

การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มี
แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมสำหรับงานเบาขึ้นรูป

IMPROVEMENT IN PROPERTIES OF CALCIUM CARBONATE-
FILLED HIGH DENSITY POLYETHYLENE FOR
BLOW MOULDING APPLICATION

พลชีพ ลิมพงษ์
POLLACHEEP LIMPONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2545
ISBN 974-643-786-8

การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มี
แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมสำหรับงานเป่าขึ้นรูป

IMPROVEMENT IN PROPERTIES OF CALCIUM CARBONATE-
FILLED HIGH DENSITY POLYETHYLENE FOR
BLOW MOULDING APPLICATION

พลชีพ ลิมพงษ์

POLLACHEEP LIMPONG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 44027
วัน, เดือน, ปี 2 7 ค.ศ. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-648-786-8

**IMPROVEMENT IN PROPERTIES OF CALCIUM CARBONATE-
FILLED HIGH DENSITY POLYETHYLENE FOR
BLOW MOULDING APPLICATION**

POLLACHEEP LIMPONG

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

2002

ISBN 974-648-786-8

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมสำหรับงานเป่าขึ้นรูป
นักศึกษา	นายพลชีพ ลิมพงษ์
รหัสประจำตัว	42065106
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ผศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) สำหรับงานเป่าขึ้นรูป ในระบบนี้มีการใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัวหรือใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted high density polyethylene, HDPE-g-MA) เป็นสารช่วยผสม โดยผสมในเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ เพื่อศึกษาสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติการไหลและสมบัติทางความร้อน พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ทำให้สมบัติเชิงกลได้แก่ ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงกระแทกของ HDPE มีค่าลดลง ในขณะที่ค่ามอดุลัสและความแข็งกมมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัวของ CaCO_3 ที่ 20 % โดยน้ำหนัก พบว่า ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นแต่ค่ามอดุลัสลดลงเมื่อเทียบกับการไม่ใส่กรดสเตียริก ส่วนการใช้ HDPE-g-MA (จนถึง 1 % โดยน้ำหนัก) ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงกระแทกของ HDPE ที่ผสม CaCO_3 เพิ่มขึ้น แต่เมื่อปริมาณ HDPE-g-MA มากขึ้นจะส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง ในสมบัติการไหลนั้น HDPE ที่ผสม CaCO_3 มีความหนืดสูงกว่า HDPE บริสุทธิ์และผลจากการใช้เทคนิค Differential Scanning Calorimetry พบว่า CaCO_3 ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกสำหรับ HDPE

นอกจากนี้ยังนำพอลิเมอร์ที่ผสม CaCO_3 บางสูตรมาผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยใช้เครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดเพื่อตรวจสอบความสามารถในการผลิตและผลิตเป็นขวด พบว่าพอลิเมอร์ทั้งสูตรที่มีและไม่มี CaCO_3 20 % โดยน้ำหนัก มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรใกล้เคียงกัน น้ำหนักต่อขวดของขวด HDPE บริสุทธิ์ต่ำกว่าน้ำหนักของขวดที่ได้จาก HDPE ผสม CaCO_3 แต่ความหนาของขวด

ได้ผลในทางตรงกันข้าม ในขณะที่สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างจากการฉีดขึ้นรูปที่นำมาทดสอบก่อนผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูป

Thesis Title	Improvement in Properties of Calcium Carbonate-Filled High Density Polyethylene for Blow Moulding Application
Student	Mr. Pollacheep Limpong
Student ID.	42065106
Degree	Master of Science
Programme	Polymer Technology
Year	2002
Thesis Advisor	Dr. Suparat Rukchonlatee
Thesis Co-Advisor	Asst.Prof.Dr. Taweechai Amornsakchai

ABSTRACT

This research concerns in improving properties of calcium carbonate (CaCO_3)-filled high density polyethylene (HDPE) for blow moulding application. Stearic acid (SA) was used as a dispersing agent whereas maleic anhydride grafted high density polyethylene (HDPE-g-MA) was used as a compatibiliser for CaCO_3 -filled HDPE. All compounds were prepared using a twin-screw extruder. Some properties such as mechanical, rheological and thermal properties were investigated. It was found that an increase in CaCO_3 content decreased tensile yield strength, %elongation at break, and impact strength, but modulus and hardness were increased. The use of stearic acid as the dispersing agent of 20 %wt CaCO_3 tended to increase tensile yield strength, %elongation at break, and impact strength, but decrease modulus of CaCO_3 -filled HDPE. An incorporation of HDPE-g-MA (up to 1 %wt) in CaCO_3 -filled HDPE resulted in increasing tensile yield strength, %elongation at break, and impact strength. The higher content of HDPE-g-MA the lower %elongation at break and impact strength. Shear viscosity of CaCO_3 -filled HDPE was greater than that of pure HDPE. The results from Differential Scanning Calorimetry (DSC) showed that CaCO_3 did not act as a nucleating agent for HDPE.

In addition, some HDPE compounds were processed using an extrusion blow moulding machine to examine processability and products. It was found that CaCO_3 -filled HDPE and pure HDPE had similar volumetric output rate. The weight of pure HDPE bottle was less than that of CaCO_3 -filled HDPE bottle, but the bottle thickness gave the opposite result. The mechanical properties (such as tensile yield strength and %elongation at break) of the blown products had the same trends as those properties of the injected samples, tested before the blow moulding process.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและสารเติมแต่งต่างๆ ตลอดจนทุกๆ สิ่งจาก ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และ ผศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ผศ.ดร.รัตนวรรณ มกรพันธุ์ และ ดร.ชลลดา ฤตวิรุพห์ อาจารย์และคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ ดร.ปยุตมา ศิริพันธ์โนน ที่กรุณาเอื้อเพื่ออุปกรณ์การถ่ายภาพ

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และคุณสุคใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ ที่คอยอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัทไทยพอลิเอทิลีน จำกัด ที่เอื้อเพื่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (H6240 B) เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัทสุรินทร์ออมยาเคมีคอล จำกัด ที่เอื้อเพื่อแคลเซียมคาร์บอเนต (Omyacarb2 และ 2T) เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัทยูนิรอยัลเคมีคอล จำกัด ที่เอื้อเพื่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดราย (Polybond 3009) เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ สวทช (MTEC) ที่ให้ความเอื้อเพื่อในการใช้เครื่อง SEM และ DSC

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความเอื้อเพื่อในการใช้เครื่องทดสอบสมบัติการไหล

ขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความเอื้อเพื่อในการใช้เครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

ขอขอบคุณ พ่อ แม่ พี่น้อง และเพื่อนๆ นักศึกษาทุกท่านที่เป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นๆ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือ ซึ่งผู้วิจัยมิได้กล่าวถึง คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พลชีพ ลัมพงษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญภาพ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	4
2.1.1 ความเป็นมา.....	4
2.1.2 กระบวนการผลิต.....	4
2.1.3 สมบัติทั่วไป.....	5
2.1.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	6
2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต.....	7
2.2.1 ความเป็นมา.....	7
2.2.2 กระบวนการผลิต.....	7
2.2.3 สมบัติทั่วไป.....	8
2.2.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	8
2.3 กรดสเตียริก.....	9
2.3.1 ความเป็นมา.....	9
2.3.2 สมบัติทั่วไป.....	9
2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน.....	9

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดราย.....	10
2.4.1 ความเป็นมา.....	10
2.4.2 กระบวนการผลิต.....	10
2.4.3 สมบัติทั่วไป.....	10
2.4.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	10
2.5 กระบวนการแปรรูปพลาสติก.....	11
2.5.1 การอัดรีด.....	11
2.5.2 การฉีดขึ้นรูป.....	11
2.5.3 การเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด.....	12
2.6 เครื่องผสมชนิดความเร็วสูง.....	13
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
3.3 วิธีการทดลอง.....	26
3.3.1 การปรับปรุงพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	26
3.3.2 สารตัวอย่างที่เตรียม.....	26
3.3.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ.....	26
3.3.4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการเป่าขึ้นรูป.....	26
3.3.5 การทดสอบ.....	26
3.3.5.1 การตรวจสอบวัตถุดิบที่ใช้.....	26
3.3.5.2 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	27
3.3.5.3 การตรวจสอบความหนาแน่นของสารตัวอย่างด้วยวิธี Density Gradient column.....	27
3.3.5.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.5.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	29
3.3.5.6 การศึกษาการกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในสารตัว อย่าง.....	29
3.3.5.7 การทดสอบสมบัติการไหล.....	29
3.3.6 กระบวนการเป่าขึ้นรูป.....	30
3.3.6.1 ศึกษาอัตราการไหลเชิงปริมาตร.....	30
3.3.6.2 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้.....	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	32
4.1 ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ในพอลิเมอร์ผสม.....	32
4.2 สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสม.....	34
4.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม.....	36
4.3.1 ความแข็งแรงดึง เบอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดและมอดูลัส.....	36
4.3.2 ความแข็งแรงกระแทก.....	42
4.3.3 ความแข็งกด.....	44
4.4 สมบัติทางความร้อน.....	46
4.5 การกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	48
4.6 สมบัติการไหล.....	55
4.7 กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด.....	59
4.7.1 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ในกระบวนการเป่าขึ้นรูป.....	59
4.7.2 สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์.....	59
4.7.2.1 น้ำหนักต่อขวด.....	59
4.7.2.2 ความหนาและการกระจายความหนาของขวด.....	60
4.7.3 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์.....	61
4.7.3.1 ความแข็งแรงดึง เบอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดและมอดูลัส.....	61
4.7.3.2 ความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก.....	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	65
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	65
5.1.1 สมบัติเชิงกล.....	65
5.1.2 สมบัติการไหล.....	66
5.1.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูป.....	66
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	67
เอกสารอ้างอิง.....	68
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก. การคำนวณปริมาณกรดสเตียริกที่เคลือบผิวแคลเซียมคาร์บอเนต.....	72
ภาคผนวก ข. การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก.....	74
ภาคผนวก ค. การคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ผสมสูตร.....	75
ภาคผนวก ง. การคำนวณการกระจายความหนา.....	76
ภาคผนวก จ. การคำนวณค่า Falling weight impact energy.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แนวโน้มปริมาณการใช้ HDPE ในปี ค.ศ. 1995 จนถึง ค.ศ. 2000.....	6
2.2 สมบัติเชิงกลของ LLDPE ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติม.....	14
2.3 สมบัติเชิงกลของ PP ที่มี Talc 30 %wt เป็นสารตัวเติมที่ปริมาณ PP-g-Si แตกต่างกัน...	22
2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ UHMWPE ที่มี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม.....	23
2.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง N66 และ PS.....	23
3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	24
3.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	25
3.3 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	25
3.4 อัตราส่วนของสารละลายผสม.....	28
4.1 ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ในพอลิเมอร์ผสม.....	33
4.2 ปริมาณที่แน่นอนของกรดสเตียริกซึ่งเคลือบผิว CaCO_3	34
4.3 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตร.....	35
4.4 ค่าสมบัติทางความร้อน.....	47
4.5 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ผสมสูตร.....	59
4.6 น้ำหนักต่อขวดของผลิตภัณฑ์แต่ละสูตร.....	60
4.7 ความหนาและการกระจายความหนาของขวด.....	60
ก-1 น้ำหนักสารที่ใช้คำนวณหาปริมาณกรดสเตียริกใน CaCO_3 เกรด 2T.....	72
ก-2 น้ำหนักสารที่ใช้คำนวณหาปริมาณกรดสเตียริกใน CaCO_3 เกรดเคลือบผิวเอง.....	73
ค-1 น้ำหนักพริชชันและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ผสมสูตร.....	75

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผลิตโดยกระบวนการเป่าขึ้นรูป.....	1
2.1 การแบ่งเกรดของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	7
2.2 โครงสร้างทางเคมีของกรดสเด็ยริก.....	9
2.3 ลักษณะโครงสร้างของ HDPE-g-MA.....	10
2.4 ขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัคริค.....	12
2.5 สมบัติการไหลของพอลิพรอพิลีนที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม.....	13
2.6 ผลของขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ที่มีต่อสมบัติการไหลของ PS.....	15
2.7 สมบัติการไหลของ PS ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมซึ่งถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA.....	16
2.8 ความสามารถในการกระจายตัวของ CaCO_3 ที่ปรับปรุงพื้นผิวและใช้สารก่อกวน.....	17
2.9 ค่าความแข็งแรงดึงที่สัมพันธ์กับปริมาณแป้ง โดยใช้สารช่วยผสม.....	18
2.10 เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดที่สัมพันธ์กับปริมาณแป้งโดยใช้สารช่วยผสม.....	19
2.11 พฤติกรรมในลักษณะ Stress- Strain curve ของการผสมของ TPU ต่อ PE และ TPU ต่อ PE-g-MA.....	20
2.12 ค่าความแข็งแรงดึงที่สัมพันธ์กับปริมาณ PE และ PE-g-MA ที่ผสมกับ TPU.....	20
2.13 เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดที่สัมพันธ์กับปริมาณ PE และ PE-g-MA ที่ผสมกับ TPU...	21
3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์และไอซอดที่มีรอยบาก.....	28
3.2 ลักษณะผลิตภัณฑ์ขูดที่ได้จากการเป่าขึ้นรูป.....	30
3.3 ลักษณะชิ้นงานสำหรับวัดความหนา เมื่อ X เป็นการวัดในแนวตั้ง และ O เป็นการวัดในแนวนอน.....	31
3.4 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ขนาดเล็กซึ่งตัดจากผนังขูดในแนวตั้ง และแนวนอนของขูด.....	31
4.1 ตัวอย่างกราฟที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง TGA ; สูตร HDPE + 20 % CaCO_3 (HDPE-g-MA 1%).....	32
4.2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงและความหนาแน่น.....	34
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากกับปริมาณ CaCO_3	36
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดกับปริมาณ CaCO_3	37
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสกับปริมาณ CaCO_3	37

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของสูตรที่มีการใช้ (SA1 และ SA2T) และไม่ใช่กรดเตียริก (CA20).....	38
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของสูตรที่มีการใช้ (SA1 และ SA2T) และไม่ใช่กรดเตียริก (CA20).....	39
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสของสูตรที่มีการใช้ (SA1 และ SA2T) และไม่ใช่กรดเตียริก (CA20).....	39
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากกับปริมาณ HDPE-g-MA ของสูตรที่มี CaCO ₃ 20 %wt	40
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับปริมาณ HDPE-g-MA ของสูตรที่มี CaCO ₃ 20 %wt	41
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสกับปริมาณ HDPE-g-MA ของสูตรที่มี CaCO ₃ 20 %wt	41
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกระแทกกับปริมาณ CaCO ₃	42
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกระแทกของสูตรที่มีการใช้ (SA1 และ SA2T) และไม่ใช่กรดเตียริก (CA20).....	43
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกระแทกกับปริมาณ HDPE-g-MA ของสูตรที่มี CaCO ₃ 20 %wt	43
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดกับปริมาณ CaCO ₃	44
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดของสูตรที่มีการใช้ (SA1 และ SA2T) และไม่ใช่กรดเตียริก (CA20).....	45
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดกับปริมาณ HDPE-g-MA ของสูตรที่มี CaCO ₃ 20 %wt	45
4.18 ตัวอย่างกราฟที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง DSC ; สูตร HDPE + 20 %CaCO ₃ (SA 1%).....	46
4.19 ลักษณะรอยแตกที่ผิวของ HDPE (ไม่มี CaCO ₃).....	48
4.20 ลักษณะรอยแตกที่ผิวของ HDMA0.5 (ไม่มี CaCO ₃).....	48
4.21 ลักษณะรอยแตกที่ผิวของ HDMA1 (ไม่มี CaCO ₃).....	49
4.22 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 10 %wt ใน HDPE.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt ใน HDPE.....	49
4.24 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 30 %wt ใน HDPE.....	50
4.25 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งเคลือบด้วยกรดสเตียริกเอง.....	50
4.26 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt เคลือบด้วย กรดสเตียริกจากโรงงาน.....	50
4.27 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 0.1 %wt.....	51
4.28 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 0.25 %wt.....	51
4.29 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 0.5 %wt.....	52
4.30 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 1 %wt.....	52
4.31 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 2 %wt.....	53
4.32 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 4 %wt.....	53
4.33 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 6 %wt.....	54
4.34 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 8 %wt.....	54
4.35 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 10 %wt.....	55
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน ของสูตร HDPE, HDMA1 และ CA20.....	56
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน ของสูตร HDPE, CA20 และสูตรที่มีการใช้ HDPE-g-MA ปริมาณต่างๆ.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน ของสูตร HDPE, CA20, SA2T และ MA1.....	57
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือน ของสูตร HDPE, CA20, HDMA1 และ MA1.....	57
4.40 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของผลิตภัณฑ์.....	61
4.41 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของผลิตภัณฑ์.....	62
4.42 ค่ามอดูลัสของผลิตภัณฑ์.....	62
4.43 ค่าพลังงานการกระแทกแบบทั้งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์.....	64

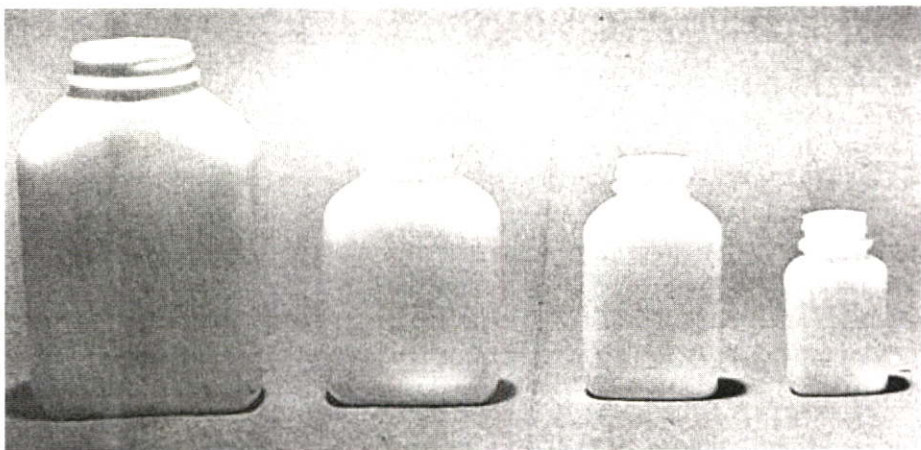
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันพลาสติกมีบทบาทต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์ในทุกๆด้าน ซึ่งส่งผลให้ปริมาณการใช้พลาสติกสูงขึ้น แต่เนื่องจากพลาสติกเป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาโดยใช้วัตถุดิบจำพวกปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัดและมีโอกาสที่จะหมดไปในอนาคต จึงทำให้ราคาของพลาสติกมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการพยายามลดปริมาณการใช้พลาสติกเพื่อเป็นการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ และเพื่อประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมเชิงพาณิชย์คือการลดต้นทุนการผลิต ซึ่งวิธีการที่จะช่วยลดปริมาณการใช้พลาสติกทำได้โดยการนำพลาสติกที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ หรือโดยการใส่สารตัวเติมลงไปในพลาสติก อย่างไรก็ตามการใช้สารตัวเติมทดแทนพลาสติกบางส่วนอาจจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีคุณสมบัติด้อยลง ดังนั้นจึงมีการใช้ สารเติมแต่งอื่นๆเพิ่ม เช่น สารช่วยกระจายตัว และสารช่วยผสมเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของสารผสมที่ได้ให้ดีขึ้น

ในท้องตลาดโดยทั่วไปจะเห็นได้ว่ามีภาชนะบรรจุภัณฑ์ประเภทขวดพลาสติกเป็นจำนวนมากตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ (รูปที่ 1.1) ซึ่งกระบวนการทางอุตสาหกรรมที่นิยมใช้ในการผลิตขวดพลาสติกคือกระบวนการเป่าขึ้นรูป (Blow moulding process) พลาสติกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการเป่าขึ้นรูปคือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เนื่องจากเป็นพลาสติกที่มีสมบัติที่ดีหลายประการเช่น มีความทนทานต่อสารเคมี ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และง่ายต่อการขึ้นรูป เป็นต้น



รูปที่ 1.1 ขวดพลาสติกพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผลิตโดยกระบวนการเป่าขึ้นรูป [1]

ในงานวิจัยนี้พอลิเมอร์ที่เลือกใช้คือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) โดยมีแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) เป็นสารตัวเติม เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย (ได้จากหินแร่ธรรมชาติหรือจากการสังเคราะห์) มีความขาว ราคาถูกและมีให้เลือกหลายขนาดและหลายเกรดทั้งที่มีและไม่มีเคลือบผิว ซึ่งสารที่นิยมนำมาเคลือบผิวคือ กรดสเตียริก และในงานวิจัยนี้มีการใช้สารช่วยผสม เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted high density polyethylene, HDPE-g-MA) เพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต นอกจากนี้ยังนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อศึกษาความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตเพื่อนำไปใช้ในการเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติก
2. ศึกษาผลของสารช่วยผสม (HDPE-g-MA) และสารช่วยกระจายตัว (กรดสเตียริก) ที่เคลือบบนสารตัวเติมที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ผสม เช่น สมบัติเชิงกลและสมบัติการไหล
3. ศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป เช่น สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะเน้นการศึกษาสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมกับ CaCO_3 ดังนี้

1.3.1 สมบัติเชิงกล

1.3.1.1 ศึกษาผลของปริมาณสารตัวเติม

ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดอนุภาค 2 ไมครอน ปริมาณต่างๆ ดังนี้ 10 20 และ 30 % โดยน้ำหนัก

1.3.1.2 ศึกษาผลของสารช่วยกระจายตัว

ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกปริมาณ 1 % โดยน้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนต (โดยเลือกมา 1 สูตรจากข้อ 1.3.1.1)

1.3.1.3 ศึกษาผลของสารช่วยผสม

ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต (สูตรเดียวกับข้อ 1.3.1.2) และใช้ HDPE-g-MA ในปริมาณ 0-10 % โดยน้ำหนักของแคลเซียมคาร์บอเนต

1.3.2 สมบัติการไหล

เลือกหนึ่งสูตรจากข้อ 1.3.1.1 และเลือกสูตรจากข้อ 1.3.1.2 ถึง 1.3.1.3 เพื่อศึกษาสมบัติการไหลและความสามารถในการแปรรูป

1.3.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูป

1.3.3.1 อัตราการไหลเชิงปริมาตร

นำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาศึกษาอัตราการไหลเชิงปริมาตรจากเครื่องเป่าขึ้นรูป โดยอาศัยการคำนวณน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมที่ไหลผ่านหัวคายต่อหน่วยเวลา

1.3.3.2 ศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป

นำขวดที่ทำจากพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปแล้วมาศึกษาสมบัติเชิงกล น้ำหนักต่อขวด ความหนาและการกระจายความหนาของขวดเพื่อเปรียบเทียบกันในแต่ละสูตรที่ใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ถ้าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการผสมแคลเซียมคาร์บอเนตและสารเติมแต่งอื่นๆ ที่ศึกษาสามารถนำไปเป่าขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ง่ายและมีสมบัติที่ดีหรือไม่ดีน้อยกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ไม่ผสมสารตัวเติม ก็มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมพลาสติกในอนาคต เพื่อลดปริมาณการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากและเป็นการลดต้นทุนการผลิต นอกจากนี้ยังอาจจะนำความรู้พื้นฐานในเรื่องสมบัติด้านต่างๆ ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ปรับปรุงได้ไปประยุกต์ใช้กับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ใช้แล้วนำกลับมาใช้ใหม่ หรือพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ เพื่อประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE)

2.1.1 ความเป็นมา

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน ซึ่งได้มาจากกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ของเอทิลีนดังสมการ



พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงอาจจะเรียกว่า พอลิเอทิลีนเชิงเส้น (Linear polyethylene) เพราะพอลิเมอร์มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด (มีโซ่กิ่งบ้างแต่น้อยมาก) หรืออาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันต่ำ เพราะกระบวนการเตรียมพอลิเมอร์ชนิดนี้ทั่วไปใช้ความดันต่ำกว่าการเตรียมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงนี้ผลิตขึ้นในเชิงการค้าในปี ค.ศ. 1955 และได้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน [1]

2.1.2 กระบวนการผลิต

การผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงได้พัฒนามาเป็นลำดับจนถึงปัจจุบันมีการใช้อยู่ 3 กระบวนการคือ กระบวนการแบบสารละลาย (Solution process) กระบวนการแบบสถานะก๊าซ (Gas phase process) และกระบวนการแบบสารแขวนลอย (Slurry process) ซึ่งในกระบวนการทั้งหมดเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน แต่พบว่าสมบัติของ HDPE ที่ได้จากแต่ละกระบวนการจะแตกต่างกันไป ส่วนองค์ประกอบหลักที่จำเป็นในกระบวนการผลิตคือ เอทิลีนมอนอเมอร์ โคมอนอเมอร์ ตัวเร่งปฏิกิริยา (อาจมีมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ) และสารละลายไฮโดรเจนกับตัวเร่งปฏิกิริยาในการควบคุมน้ำหนักโมเลกุล [2]

ในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีเพื่อที่จะพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาแบบความดันต่ำที่ใช้กับ HDPE โดยแบ่งตามประเภทของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process) โดยใช้โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะได้ HDPE ที่มีการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลกว้าง และกระบวนการตัวเร่ง Ziegler-Natta โดยใช้สารประกอบของทิตาเนียม (Titanium) กับอลูมิเนียมแอลคิล (Aluminium alkyl) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้ HDPE ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแคบ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองจะใช้ในกระบวนการแบบสารแขวนลอย [3]

2.1.3 สมบัติทั่วไป

HDPE มีความเป็นผลึกสูง เนื่องจาก มีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง และมีโซ่กิ่งน้อยมาก ไม่มีขั้ว มีสมบัติต้านทานทางเคมีสูง และไม่ดูดซึมของผสม ซึ่งจัดว่าเป็นสารที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ (Water vapor barrier) ที่ดี โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเรื่องของบรรจุภัณฑ์ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

สิ่งที่กำหนดสมบัติของ HDPE นั้นมี 4 ตัวแปร คือความหนาแน่น crystallinity (MI) การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD) และสารเติมแต่ง ดังมีรายละเอียดดังนี้

ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาสมบัติของ HDPE โดย HDPE จะมีความหนาแน่นประมาณ $940-965 \text{ kg/m}^3$ พบว่าเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้สมบัติต่อไปนี้ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) การคงรูปหรือความแข็งเกร็ง (Rigidity) ความแข็งกด (Hardness) ความทนทานต่อความร้อน (Heat Resistance) ความทนทานต่อสารเคมี และความทนต่อการแทรกซึมของก๊าซ รวมทั้งมีสมบัติทางกายภาพต่างๆ ดีขึ้น [3]

ค่า crystallinity (MFI)

crystallinity เป็นการประเมินค่าน้ำหนักโมเลกุล ถ้า crystallinity สูงแสดงว่ามีความหนืดน้อย สายโซ่โมเลกุลสั้น น้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ถ้า crystallinity ต่ำ แสดงว่ามีความหนืดสูงหรือน้ำหนักโมเลกุลสูง ปกติ HDPE จะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 40,000-300,000 ซึ่งมีค่า crystallinity อยู่ในช่วง 0.02-100 กรัมต่อ 10 นาที crystallinity มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ HDPE เช่น ความสามารถในการขึ้นรูปถ้า crystallinity สูงมาก การขึ้นรูปจะทำได้ง่ายเพราะความหนืดลดลง แต่สมบัติอื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงกระแทกจะลดลง เพราะน้ำหนักโมเลกุลลดลง สายโซ่โมเลกุลมีขนาดสั้น ดังนั้นการรับแรงจึงไม่ดีเท่ากับโมเลกุลที่มีสายโซ่ยาว ในขณะที่ HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง – สูง จะมีสมบัติทนทานต่อแรงกระแทกดี [3]

การกระจายของน้ำหนักโมเลกุล (MWD)

การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ HDPE จะอยู่ในช่วงแคบ – กว้าง ซึ่งขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการแปรรูปที่ใช้ พบว่าถ้าการกระจายตัวกว้างจะทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย ขณะเดียวกันจะทำให้การหดตัว และการงอตัวเพิ่มขึ้น เพราะมีสายโซ่ขนาดโมเลกุลไม่เท่ากัน มีทั้งสายโซ่แบบสั้นและยาวอยู่ด้วยกัน เวลาขึ้นงานได้รับความเค้นการตกลึกจะไม่เท่ากัน ส่วนความต้านทานต่อแรงกระแทกจะลดลง โดยปกติถ้าทำการผลิต HDPE ที่มีค่า crystallinity ต่ำหรือน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้ขึ้นรูปลำบากมาก ดังนั้นจึงต้องอาศัยการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างเข้ามาช่วย โดยการนำ HDPE ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่มีช่วงแคบ 2 ชนิดมารวมกัน [3]

สารเติมแต่ง

พลาสติกจำนวนมากจำเป็นต้องเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เพื่อให้สมบัติต่างๆ ดีขึ้น เช่น เติมสารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกเพื่อเพิ่มความเหนียว เส้นใยเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สารปรับปรุงสมบัติพลาสติก (Plastic modifier) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น สารตัวเติมเพื่อเพิ่มเนื้อและลดต้นทุนในการผลิต และสารให้สีเพื่อทำให้มีสีสันทที่สวยงามน่าใช้ เป็นต้น [3]

2.1.4 การประยุกต์ใช้งาน

HDPE ถูกนำมาแปรรูปให้ได้รูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ใช้ทำภาชนะ รองเท้า เครื่องใช้ในครัวเรือน ประตู และหน้าต่าง เป็นต้น โดยกระบวนการแปรรูปที่มีการใช้ HDPE มีด้วยกันหลายกระบวนการ เช่น ทำแผ่นฟิล์ม (Film) ฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) เป่าขึ้นรูป (Blow moulding) ทำท่อ (Pipe Extrusion) ทำแผ่น (Sheet extrusion) เคลือบผิว (Coating) เป็นต้น ซึ่งปริมาณการใช้ HDPE มีแนวโน้มแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แนวโน้มปริมาณการใช้ HDPE ในปี ค.ศ. 1995 จนถึง ค.ศ. 2000 [4]

ภูมิภาค	ปริมาณในปี ค.ศ. 1995		ปริมาณในปี ค.ศ. 2000		อัตราการ ใช้ที่เพิ่ม ขึ้น (%)
	ปริมาณการใช้ (1000 ตัน)	ปริมาณการ ใช้ (%)	ปริมาณการใช้ (1000 ตัน)	ปริมาณการ ใช้ (%)	
ยุโรปตะวันตก	4505	22.6	4870	18.9	8
อเมริกาเหนือ	7195	36.1	7900	30.7	10
เอเชีย	3655	18.35	6310	24.5	73
ตะวันออกไกล	900	4.5	2045	7.9	127
อื่นๆ	3675	18.45	4640	18.0	26
รวม	19930	100	25765	100	29

2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3)

2.2.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันนี้มีการใช้สารตัวเติม (Filler) ผสมลงไปในพลาสติกกันอย่างกว้างขวางทั้งนี้เพื่อช่วยเพิ่มความหนาแน่น และลดต้นทุน หรืออาจช่วยให้สมบัติบางประการของพลาสติกดีขึ้น ในการพิจารณาที่จะนำเอาสารตัวเติมมาใช้จะต้องคำนึงถึงผลต่างๆ หลายประการ เช่น การกระจายตัวของสารในเนื้อพลาสติก การขัดสีของสารกับเครื่องจักร สมบัติต่างๆ เมื่อผสมสารตัวเติมแล้ว รวมทั้งปัญหาด้านความปลอดภัยจากละอองฝุ่น และที่สำคัญที่สุดคือด้านราคา CaCO_3 มีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาใช้งานเพราะ ราคาถูก ไม่เป็นพิษ มีความขาว มีหลายขนาดและมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม CaCO_3 เป็นสารธรรมชาติที่เกิดจากการตกตะกอนของหินในทะเลเปลือกหอยและโครงกระดูกสัตว์น้ำ CaCO_3 เป็นสารทั่วไปที่ใช้เติมลงในพลาสติก ซึ่งมีหลายชื่อโดยแบ่งตามแหล่งกำเนิด เช่น หินปูน หินปะการัง เปลือกหอย และชอล์ค หรือแบ่งตามลักษณะโครงสร้างผลึก เช่น แคลไซต์ (Calcite) อะราโกไนท์ (Aragonite) และเมื่อมีแมกนีเซียมคาร์บอเนตอยู่ในโครงสร้างผลึกจะเรียก โดโลไมท์ [Dolomite, ($\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$)] [5]

2.2.2 กระบวนการผลิต

ในทางการค้าได้มีการผลิต CaCO_3 เป็น 3 เกรด และใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกคือ แบบบดหยาบ แบบบดละเอียด และแบบตะกอน แสดงดังรูปที่ 2.1

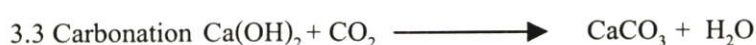


รูปที่ 2.1 การแบ่งเกรดของแคลเซียมคาร์บอเนต [5]

การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตมี 3 วิธี

1. Solvey Process (Na_2CO_3)
2. Sodium Hydroxide Process
3. Carbonation Process

ซึ่ง Carbonation Process เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด และได้ CaCO_3 โดยตรง มี 3 ขั้นตอนดังนี้



กระบวนการเริ่มจากการเผา หินปูน ที่อุณหภูมิประมาณ 900°C จะได้ คาร์บอนไดออกไซด์ และแคลเซียมออกไซด์ (CaO หรือ Quicklime) หลังจากนั้นทำการแยกให้บริสุทธิ์ขึ้น CaO จะกลายเป็นสารแขวนลอยของหินปูน (Milk of lime) และนำ ผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในสารแขวนลอยของหินปูนได้ CaCO_3 แยกขนาดอนุภาคด้วยการกรอง โดยมีตัวกรองสูญญากาศแบบหมุน และตัวกรองใช้ความดัน ช่วยในการกำจัดน้ำ หลังจากนั้นทำให้แห้งโดยใช้ ช่องพ่นละอองน้ำแบบหมุน (Rotary tunnel spray) หรือ การทำให้แห้งแบบรวดเร็ว (Flash dryers) ในกระบวนการมักจะ ได้ CaCO_3 ในรูปของอะราโกไนท์ (Aragonite) มีขนาดอนุภาค 0.2-2.0 ไมครอน ซึ่งสภาวะของปฏิกิริยาจะมีผลต่อขนาดอนุภาค และการกระจายตัวของอนุภาคโดยถ้ามีความชื้นมากเกินไป จะทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ไม่ดีเนื่องจากจะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างอนุภาค [5]

2.2.3 สมบัติทั่วไป

แคลเซียมคาร์บอเนตประกอบด้วย แคลเซียม 40% คาร์บอน 12% และออกซิเจน 48% แคลเซียมคาร์บอเนตคุณภาพสูง จะต้องมียสมบัติดังนี้ [5]

- มีความบริสุทธิ์ ไม่มีโลหะหนักเจือปนที่จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของพลาสติก
- มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ไม่ดูดซึมสารปรับปรุงสมบัติพลาสติก และสารเติมแต่งต่าง ๆ
- มีองศาความขาวสูง
- การกระจายตัวดี (โดยเฉพาะชนิดที่มีการเคลือบ)
- เพิ่มความแข็งตึง (Stiffness) และมอดุลัสของความยืดหยุ่น
- ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ ไม่จุดระเบิดและทนความร้อนได้สูงถึง 800°C

2.2.4 การประยุกต์ใช้งาน

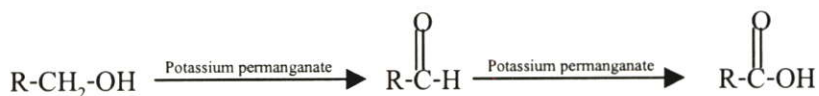
CaCO_3 ใช้กับพอลิเอทิลีน (PE) และพอลิพรอพิลีน (PP) เพื่อลดต้นทุน CaCO_3 ที่เติมลงใน PE ทำให้สมบัติเชิงกลบางประการของ PE ลดลง เช่น ค่าความแข็งแรงตึง (Tensile strength) แต่จะให้ค่ามอดุลัสที่เพิ่มขึ้น CaCO_3 ที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวจะมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีกว่า CaCO_3 ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิวซึ่งจะมีผลทำให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใช้สารช่วยกระจายในปริมาณมากเกินไปจะทำให้สารช่วยกระจายนั้นทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นซึ่งจะมีผลต่อกระบวนการขึ้นรูป [5]

2.3 กรดสเตียริก (Stearic acid, SA)

2.3.1 ความเป็นมา

กรดสเตียริก (SA) เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน C_{18} และส่วนหมู่ฟังก์ชันของกรดซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของสารตัวเติมได้ ซึ่งช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติดีขึ้น [6]

การผลิตกรดสเตียริกสามารถสังเคราะห์ได้จากการ ออกซิเดชันแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ และอัลดีไฮด์ (Oxidation primary alcohol and aldehyde) ดังสมการ [6]



2.3.2 สมบัติทั่วไป

กรดสเตียริก (IUPAC Name = Octadecanoic, $C_{18}H_{36}O_2$) มีน้ำหนักโมเลกุล 284.48 และมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีราคาถูก สมบัติเฉพาะของกรดสเตียริกมีดังนี้ [6]

- จุดหลอมเหลว 69.3°C
- จุดเดือด 361°C
- ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) 0.847
- ความสามารถในการละลายน้ำ 0.1-1 กรัม/100 มิลลิลิตร ที่ 23°C

2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน

กรดสเตียริกจะนำไปใช้ปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมเพื่อช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในพอลิเมอร์ ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลให้ดีขึ้น สารตัวเติมที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกจะมีการดูดซึมของน้ำต่ำกว่าสารตัวเติมที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว กรดสเตียริกประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือส่วนที่กระจายในวัฏภาคของสารตัวเติมและพอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของกรดสเตียริก [6]

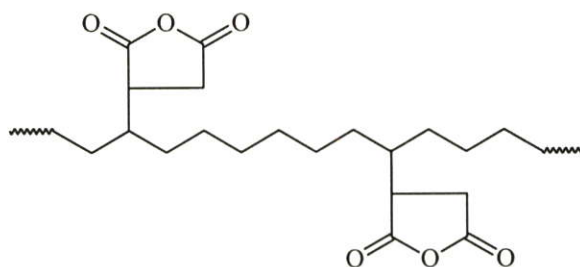
2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงตอกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรย (HDPE-g-MA)

2.4.1 ความเป็นมา

การผสมพอลิเมอร์ตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปหรือการใส่สารเติมแต่งลงในพอลิเมอร์มีการใช้สารช่วยผสมช่วยให้การผสมดีขึ้นซึ่งจะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้นด้วย HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมที่ผลิตขึ้นเพื่อช่วยให้ HDPE และพอลิเมอร์ที่มีสมบัติใกล้เคียงกันสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับสารตัวเติมและพอลิเมอร์ที่มีความเป็นขั้วหรือมีโครงสร้างใกล้เคียงกับ MA ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งาน [7]

2.4.2 กระบวนการผลิต

การผลิต HDPE-g-MA ทำได้โดยนำพอง HDPE มาผสมกับ MA ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่โดยมีการใส่สารจำพวกเปอร์ออกไซด์ เช่น ไดคูมิวเปอร์ออกไซด์ (DCP) ระหว่างการผสม ส่วนประกอบและลักษณะโครงสร้างของ HDPE-g-MA แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของ HDPE-g-MA [7]

2.4.3 สมบัติทั่วไป

HDPE-g-MA จะมีสมบัติเชิงกลดีกว่า HDPE เนื่องจากการตอกิ่งทำให้น้ำหนักโมเลกุลของ HDPE ลดลงและทำให้สมบัติทางความร้อนด้อยลงโดยมีอุณหภูมิการหลอมเหลวต่ำกว่า HDPE [7]

2.4.4 การประยุกต์ใช้งาน

HDPE-g-MA ถูกนำมาใช้เป็นสารช่วยผสมระหว่างพอลิเมอร์ผสมหรือพอลิเมอร์ที่มีการใส่สารเติมแต่ง โดยหมู่ของ MA จะอยู่ที่ผิวของสารเติมแต่งดังนั้นสายโซ่ HDPE จึงอยู่ล้อมรอบสารเติมแต่งทำให้มีการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น และทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมกับการใช้งาน เช่น พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอไมด์ 6 กับพอลิเอทิลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง [7] และพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทนกับพอลิเอทิลีน [24] เป็นต้น

2.5 กระบวนการแปรรูปพลาสติก

กระบวนการแปรรูปพลาสติกเป็นการทำให้พลาสติกหรือวัสดุประเภทพอลิเมอร์เกิดประโยชน์ใช้สอยมากที่สุด ซึ่งกระบวนการแปรรูปทางอุตสาหกรรมมีหลายกระบวนการ เช่น การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection moulding) การเป่าขึ้นรูป (Blow moulding) การหมุนขึ้นรูป (Rotational moulding) การรีด (Calendering) การขึ้นรูปร้อน (Thermoforming) และการหล่อ (Casting) ในงานวิจัยนี้จะใช้เพียง 3 กระบวนการคือ การอัดรีด การฉีดขึ้นรูป และ การเป่าขึ้นรูป

2.5.1 การอัดรีด (Extrusion)

การอัดรีดเป็นกระบวนการพื้นฐานที่นิยมใช้ทั้งในการผสมพอลิเมอร์กับสารเติมแต่งต่างๆ และใช้ในการแปรรูปพอลิเมอร์ เนื่องจากค่าใช้จ่ายในกระบวนการต่ำกว่ากระบวนการอื่น สามารถผลิตรูปร่างผลิตภัณฑ์ได้หลายแบบได้ตามต้องการเช่น แท่งกลม พิล์ม แผ่น และท่อ ซึ่งขึ้นกับลักษณะของหัวดายที่ใช้ และเป็นกระบวนการที่ทำได้อย่างต่อเนื่อง เครื่องอัดรีดจัดเป็นเครื่องมือที่มีความหลากหลายในการแปรรูปทางพลาสติกซึ่งมีขั้นตอนคือ เม็ดพลาสติกถูกป้อนเข้ามาในระหว่างเกลียวหนอน (Screw) ของเครื่องอัดรีดและกระบอกใส่เกลียวหนอน (Barrel) ถูกอัด หลอม ผสม แล้วไหลไปตามท่อและออกทางหัวดาย ทั้งนี้โดยอาศัยความแตกต่างของความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของเกลียวหนอนและกระบอกใส่ เกลียวหนอนทำให้เกิดพลังงานการเฉือน (Shearing energy) ช่วยในการผสมและหลอมเหลว ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) เนื่องจากมีการผสมที่ดีกว่าเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนเดี่ยว [8] ในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการอัดรีดในการผสมพอลิเมอร์และสารตัวเติมก่อนนำไปผ่านกระบวนการอื่น

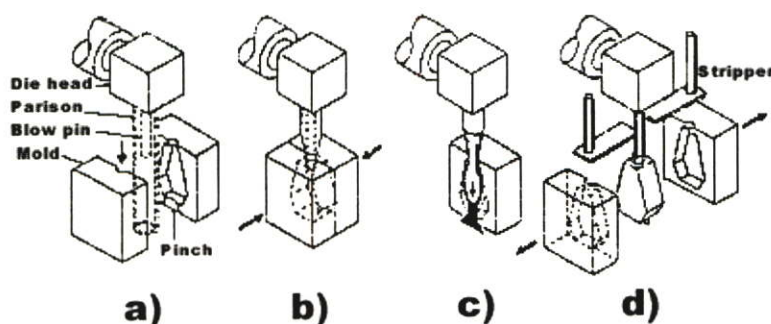
2.5.2 การฉีดขึ้นรูป (Injection moulding)

การฉีดขึ้นรูปเป็นเทคโนโลยีการแปรรูปที่สำคัญ และใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากการฉีดขึ้นรูปมีข้อได้เปรียบกว่าวิธีอื่นๆ คือ สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี และมีขนาดต่างๆ กัน กรรมวิธีการทำงานไม่ยุ่งยากเนื่องจากสามารถทำงานแบบอัตโนมัติได้ นอกจากนี้สามารถทำงานได้กับพลาสติกที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือผง และกับพลาสติกทุกประเภทคือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เทอร์โมเซต (Thermosets) และอีลาสโตเมอร์ (Elastomers) การทำงานของเครื่องฉีดขึ้นรูปเริ่มจาก ระบบขับเคลื่อน (ระบบไฮดรอลิก) ของส่วนการยึดแม่พิมพ์จะดันให้แท่นยึดแม่พิมพ์ที่เคลื่อนที่ (Moving platen) วิ่งมาประกบปิดกับแท่นยึดแม่พิมพ์ที่อยู่กับที่ (Stationary platen) ขณะที่แม่พิมพ์ปิดอยู่ ส่วนของการฉีดจะเริ่มทำงานโดยเกลียวหนอนจะหมุนเพื่อดึงเม็ดพลาสติกลงมาหลอมโดยใช้ความร้อนจากการเสียดสีและจากแถบความร้อน ในขณะที่เม็ดพลาสติกหลอมจะเคลื่อนตัวไปด้านหน้าตามร่องของเกลียวหนอน และทำให้เกิดความดันขึ้น

เนื่องจากเกลียวหนอนมีการหมุนขับให้เม็ดพลาสติกหลอมเคลื่อนตัวมาข้างหน้าตลอดเวลา จึงเกิดการสะสมของพอลิเมอร์ที่ด้านหน้าของเกลียวหนอนจนมากพอที่จะดันให้เกลียวหนอนถอยกลับไปสู่ระยะที่ได้กำหนดไว้ เกลียวหนอนจึงหยุดหมุน แล้วจึงเริ่มฉีด โดยแบ่งเป็น 2 จังหวะคือ การฉีดในจังหวะแรก เกลียวหนอนจะทำหน้าที่คล้ายลูกสูบดันให้พอลิเมอร์หลอมไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ หลังจากนั้นจะทำการฉีดในจังหวะที่ 2 ซึ่งจะช่วยให้พอลิเมอร์หลอมไหลเข้าสู่แม่พิมพ์มากขึ้น เพื่อชดเชยกับส่วนที่หดตัวของผลิตภัณฑ์ แล้วเข้าสู่การทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัว (Cooling) ซึ่งเกิดจากการถ่ายเทความร้อนจากผลิตภัณฑ์ผ่านผนังของแม่พิมพ์ที่เย็น ทำให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวและแข็งตัวจนสามารถนำออกจากแม่พิมพ์ได้ [9,10] ในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูปในการขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบสมบัติของพอลิเมอร์ที่ผสมได้

2.5.3 การเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัด (Extrusion blow moulding)

การเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัดเป็นการขึ้นรูปพลาสติกรูปแบบหนึ่งที่มีลักษณะกลวง เช่น ขวด และบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เนื่องจากความต้องการบรรจุภัณฑ์ประเภทพลาสติกมีปริมาณมาก ดังนั้นกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัดจึงมีความสำคัญในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ซึ่งหลักการทำงานของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัดจะเริ่มจากเม็ดพลาสติกได้รับความร้อนจนหลอมและได้รับแรงเฉือนจากเกลียวหนอนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ออกจากหัวดายรูปท่อทรงกระบอก พลาสติกที่ไหลผ่านจากหัวดายจะเรียกว่าพาริซัน (Parison) หลังจากนั้นแม่พิมพ์จะประกบพาริซันและให้อากาศเข้าสู่พาริซันที่อยู่ภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะเกิดแรงดันให้พาริซันเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามแม่พิมพ์ โดยในแม่พิมพ์จะมีระบบให้ความเย็นแก่ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในแม่พิมพ์ เมื่อผลิตภัณฑ์เย็นตัวแม่พิมพ์จะเปิดออกเพื่อนำผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์ รูปที่ 2.4 แสดงขั้นตอนในการเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัดคือ a) เม็ดพลาสติกหลอมผ่านหัวดายลักษณะเป็นพาริซัน b) เมื่อพาริซันเข้าสู่แม่พิมพ์แล้วประกบแม่พิมพ์ c) ขึ้นรูปพาริซันตามลักษณะแม่พิมพ์โดยใช้อากาศเป่า d) ให้ความเย็นกับแม่พิมพ์เพื่อให้ผลิตภัณฑ์เย็นตัวแล้วนำออกจากแม่พิมพ์



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัด [11]

2.6 เครื่องผสมชนิดความเร็วสูง

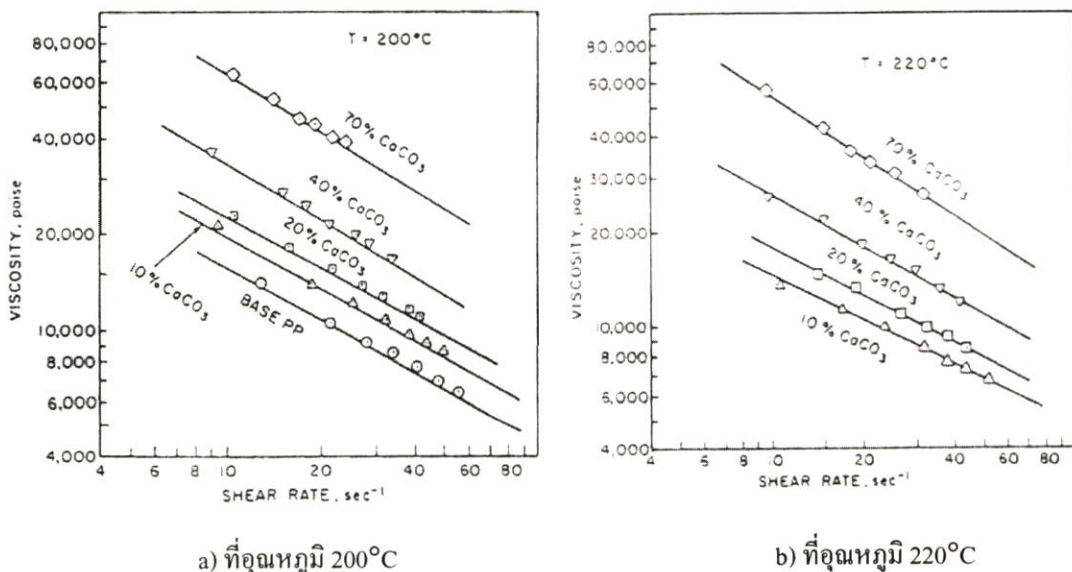
เครื่องผสมชนิดความเร็วสูงเป็นเครื่องมือในการช่วยผสมสารตั้งแต่ 2 ชนิดให้เข้ากันได้ ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการแปรรูปพลาสติกต่างๆ ภายในเครื่องผสมจะเกิดแรงเฉือนขึ้นในระหว่างการผสม ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมจะทำให้เกิดการดูดซับสารเติมแต่งเข้าไปในอนุภาคของพลาสติก เครื่องผสมชนิดความเร็วสูง ประกอบด้วยใบพัด (Impeller) ที่ต่อเข้ากับมอเตอร์โดยสามารถปรับความเร็วรอบได้สูงถึง 4,000 รอบต่อนาที อยู่ในห้องผสม ในระหว่างการผสมใบพัดจะกวนอนุภาคสารให้กระจายเป็นวง และกระทบกับผนังด้านบนตกลงมาด้านล่างตรงกลางเหมือนการเคลื่อนที่ของของไหล โดยทั่วไปแล้วเวลาที่ใช้ในการผสมไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับสูตรผสม [12]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในระยะเวลาที่ผ่านมา ได้มีนักวิทยาศาสตร์หลายท่านให้ความสนใจในการศึกษาค้นคว้างานวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์ที่มีการผสมสารตัวเติม โดยตัวอย่างงานวิจัยมีดังนี้

งานวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์ที่มีการผสมสารตัวเติม

Han [13] ได้ทำการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิพรอพิลีน (PP) ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-70 %wt พบว่าพอลิเมอร์ที่ได้มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณสารตัวเติมมากขึ้น และอุณหภูมิมีผลต่อสมบัติการไหลคือความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 สมบัติการไหลของพอลิพรอพิลีนที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม [13]

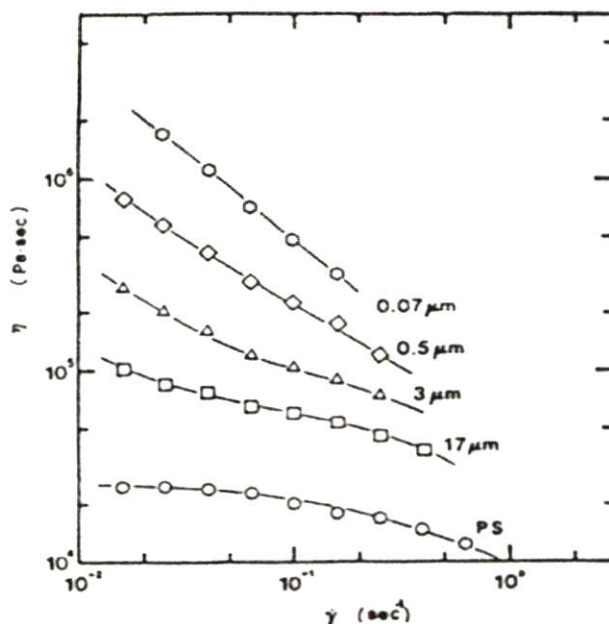
Maiti และคณะ [14] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-60 %wt พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจะทำให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ลดลง ในขณะที่ค่ามอดุลัส (Modulus) เพิ่มขึ้น

Schreiber และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแบบเชิงเส้น (LLDPE) ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-30 %wt พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืดลดลง ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติเชิงกลของ LLDPE ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติม [15]

Compound	Modulus (E) (Mpa)	Elongation (%)
LLDPE	270	360
LLDPE + 5% CaCO_3	305	263
LLDPE + 8% CaCO_3	335	216
LLDPE + 12% CaCO_3	360	158
LLDPE + 20% CaCO_3	370	75
LLDPE + 30% CaCO_3	385	29

Suetsugo และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาผลของอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มีต่อสมบัติการไหลของพอลิสไตรีน (PS) พบว่าเมื่อทำการผสม PS กับ CaCO_3 ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของ CaCO_3 ลดลงและความหนืดของ PS จะต่ำกว่า PS ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติม ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ผลของขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ที่มีต่อสมบัติการไหลของ PS [16]

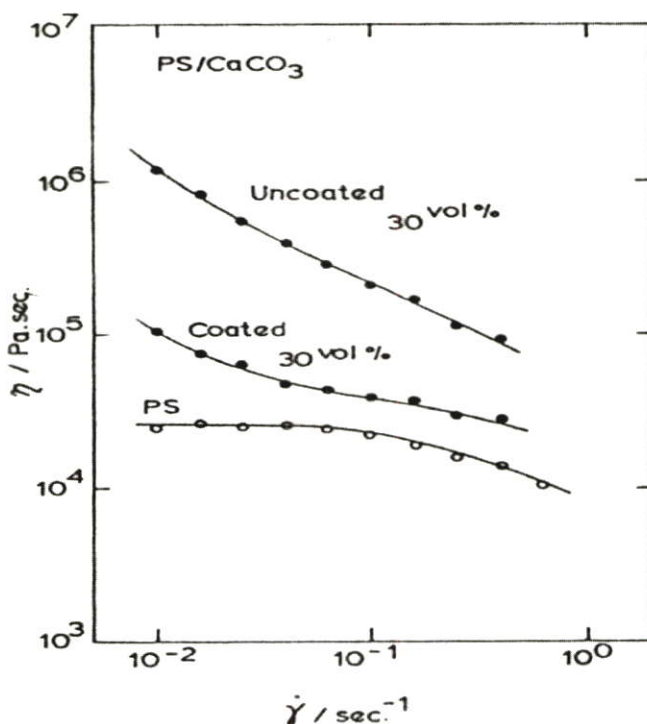
Santelices และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิพรอพิลีน (PP) ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตัวเติม พบว่าเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นแต่สมบัติความยืดหยุ่นลดลงซึ่งแสดงค่าจากการบวมตัวของชิ้นงาน (Die swell) ที่มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก CaCO_3 จะขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ PP (CaCO_3 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปในกระบวนการ)

งานวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์ที่มีการผสมสารตัวเติมซึ่งถูกปรับปรุงพื้นผิวมีดังนี้

Fu และคณะ [18] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-50 %wt พบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง ในขณะที่สมบัติเชิงกลดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปรับปรุงพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยฟอสเฟต (Phosphate) ก่อนนำไปผสมกับ HDPE

Papirer และคณะ [19] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) พบว่า CaCO_3 ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA จะทำให้ลดแรงกระทำระหว่างอนุภาคและทำให้มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ส่งผลให้ CaCO_3 ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเมอร์ที่ผสม CaCO_3 ที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว

White และคณะ [20] ได้ทำการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิสไตรีน (PS) ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตัวเติมซึ่งถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก พบว่าความหนืดของ PS ที่ผสม CaCO_3 สูงกว่า PS ที่ผสม CaCO_3 ซึ่งปรับปรุงพื้นผิวและ PS บริสุทธิ์ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.7



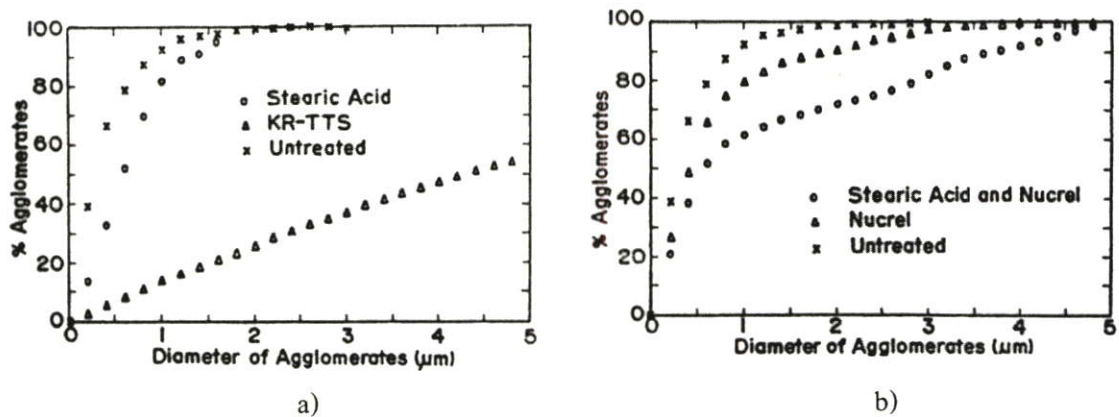
รูปที่ 2.7 สมบัติการไหลของ PS ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมซึ่งถูกปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA [20]

Suparat [21] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมในปริมาณ 40 %wt และใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่าการเติมแคลเซียมคาร์บอเนตทำให้ค่าความหนืดและโมดูลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง แต่ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปรับปรุงพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริก ก่อนนำไปผสมกับ HDPE

พลชีพและธำรงค์ศักดิ์ [22] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-30 %wt พบว่าเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าโมดูลัสเพิ่มขึ้นแต่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลง ส่วนค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากแตกต่างกันไม่มาก และค่าความแข็งแรงกระแทกของ HDPE ลดลงเมื่อผสมกับแคลเซียมคาร์บอเนต ในขณะที่การปรับปรุงพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริก ก่อนนำไปผสมกับ HDPE จะไม่เห็นความแตกต่างของสมบัติเชิงกลที่ชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณและขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการเปรียบเทียบคือ 20 %wt และ 0.5 ไมครอน ตามลำดับ

พิทยาและคาริน [23] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-30 %wt พบว่าเมื่อปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง ฅ จุดคราก และค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง ในขณะที่สมบัติเชิงกลดงกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปรับปรุงพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาณ 30 %wt ด้วยกรดสเตียริกก่อนนำไปผสมกับ HDPE

Dealy และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) และที่มีการใช้สารคู่ควบ Triisostearoyl methyl titanate (KR-TTS) และ Copolymer of methacrylic acid – ethylene (Nucrel) พบว่า CaCO_3 ที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิวจะมีการรวมตัวกันเป็นก้อน ในขณะที่การใช้ SA และสารคู่ควบกับ CaCO_3 จะช่วยให้ CaCO_3 กระจายตัวได้ดี ดังรูปที่ 2.8 a) ใช้ KR-TTS เป็นสารคู่ควบ b) ใช้ Nucrel เป็นสารคู่ควบ



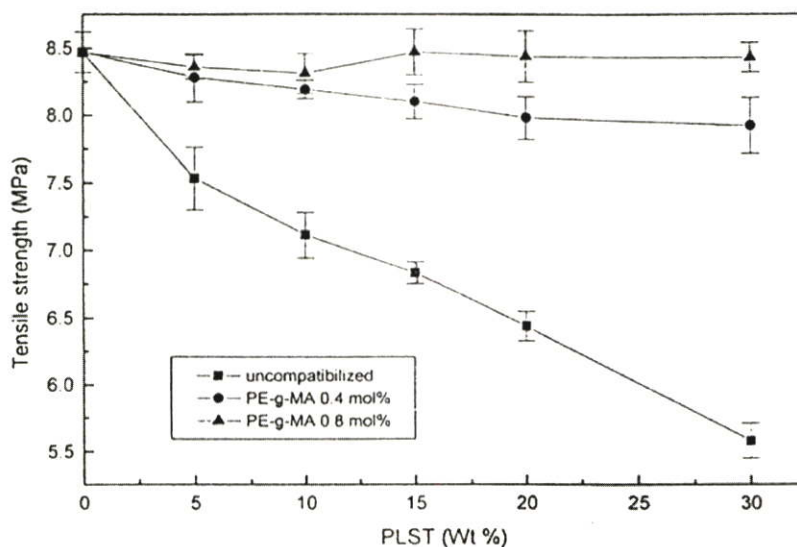
รูปที่ 2.8 ความสามารถในการกระจายตัวของ CaCO_3 ที่ปรับปรุงพื้นผิวและใช้สารคู่ควบ [24]

งานวิจัยเกี่ยวกับพอลิเมอร์ที่มีการผสมสารตัวเติม โดยมีการใช้สารคู่ควบมีดังนี้

Borden และคณะ [25] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลพอลิพรอพิลีน (PP) ที่มี Talc เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-40 %wt และมีการใช้สารคู่ควบ (PP-g-MA) ช่วยในการผสมในปริมาณ 0-10 %wt Talc พบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง แต่เมื่อใช้สารคู่ควบช่วยในการผสม พบว่าเมื่อปริมาณสารคู่ควบเพิ่มขึ้นจะทำให้สมบัติเชิงกลดงกล่าวดีขึ้น

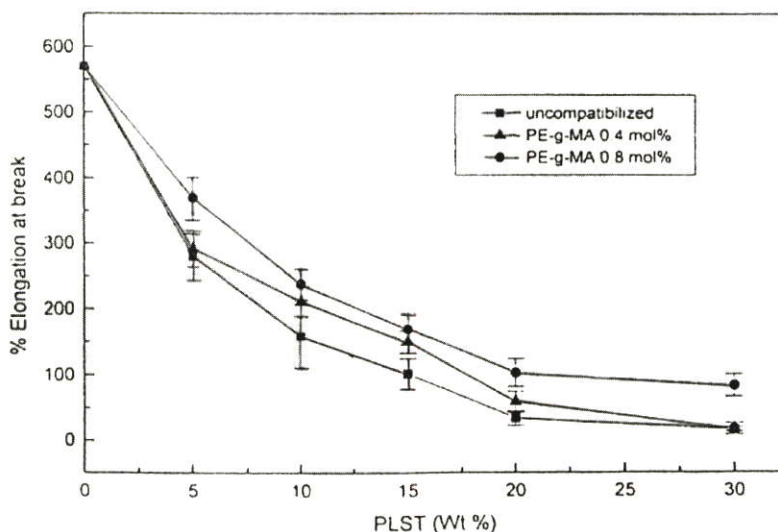
ปรมินทร์และประกฤษณ์ [26] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 30 %wt และมีการใช้สารคู่ควบ (HDPE-g-MA) ช่วยในการผสมปริมาณ 0-15 %wt ของ CaCO_3 พบว่าเมื่อปริมาณสารคู่ควบเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และค่าความแข็งแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใช้สารคู่ควบในปริมาณมากกว่า 1 %wt CaCO_3 พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง เนื่องจากการเกี่ยวพันของสายโซ่ที่มีเพิ่มขึ้น

Bikiaris และคณะ [27] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) กับแป้ง (Starch, PLST) ซึ่งมีพอลิเอทิลีนต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (PE-g-MA) เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 0.4 และ 0.8 mol% พบว่าการผสมโดยไม่ใช้สารช่วยผสมจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ลดลงเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น เนื่องจาก LDPE และแป้งมีความแตกต่างกันในด้านของความเป็นขั้ว แต่ถ้าใช้สารช่วยผสมจะทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มลดลงน้อยกว่าเมื่อเทียบกับที่ไม่ใช้สารช่วยผสม เนื่องจาก PE จะเข้าไปอยู่ในวัฏภาคของ LDPE และ MA จะเข้าไปอยู่ในวัฏภาคของแป้งซึ่งช่วยในการผสมเข้ากันได้ และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสมจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.9



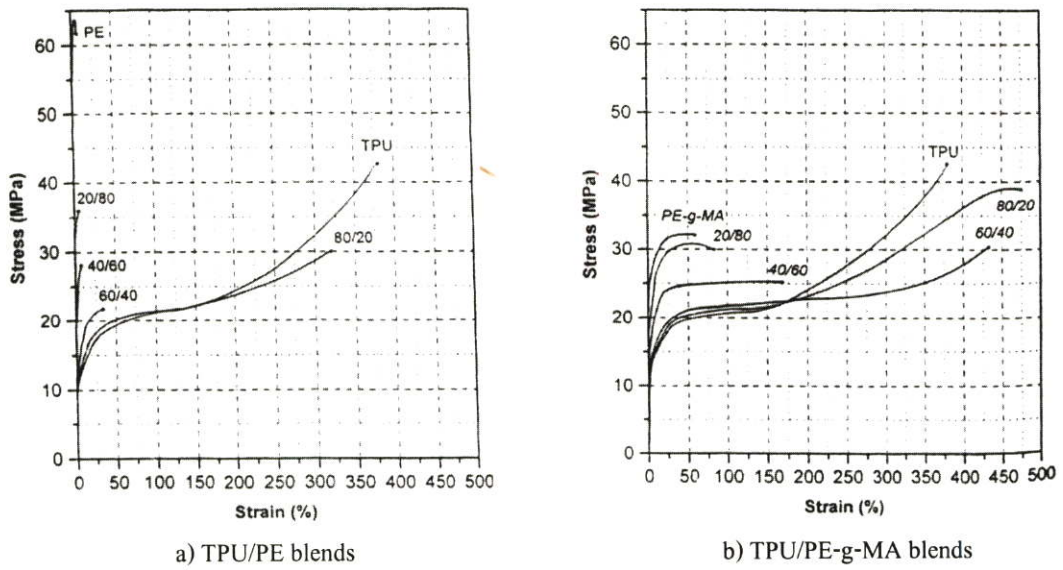
รูปที่ 2.9 ค่าความแข็งแรงดึงที่สัมพันธ์กับปริมาณแป้งโดยใช้สารช่วยผสม [27]

ส่วนเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation) ของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณแป้งเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 0.4 และ 0.8 mol% จะทำให้เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้นตามลำดับเมื่อเทียบกับที่ไม่ใช้สารช่วยผสม ดังรูปที่ 2.10 นอกจากนี้พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ใช้สารช่วยผสมมีอัตราการสลายตัวทางชีวภาพช้ากว่าที่ไม่ใช้สารช่วยผสม

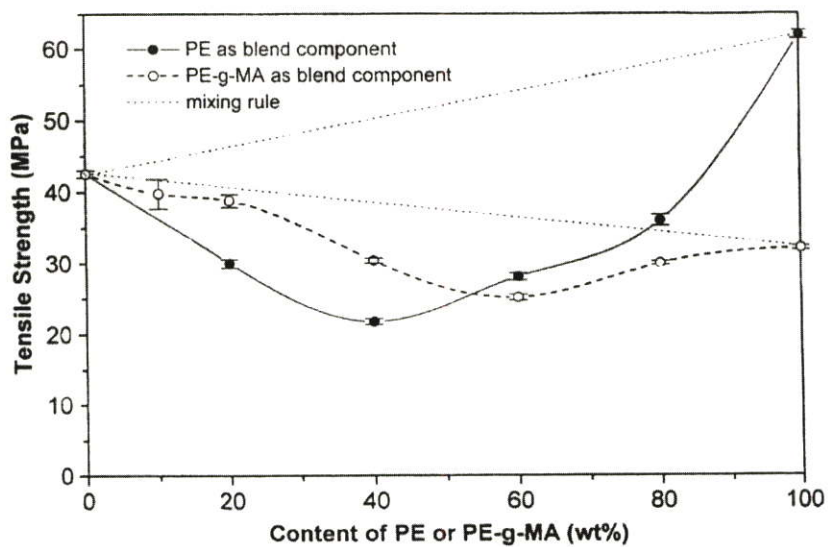


รูปที่ 2.10 เปอร์เซนต์การยืด ณ จุดขาดที่สัมพันธ์กับปริมาณแป้งโดยใช้สารช่วยผสม [27]

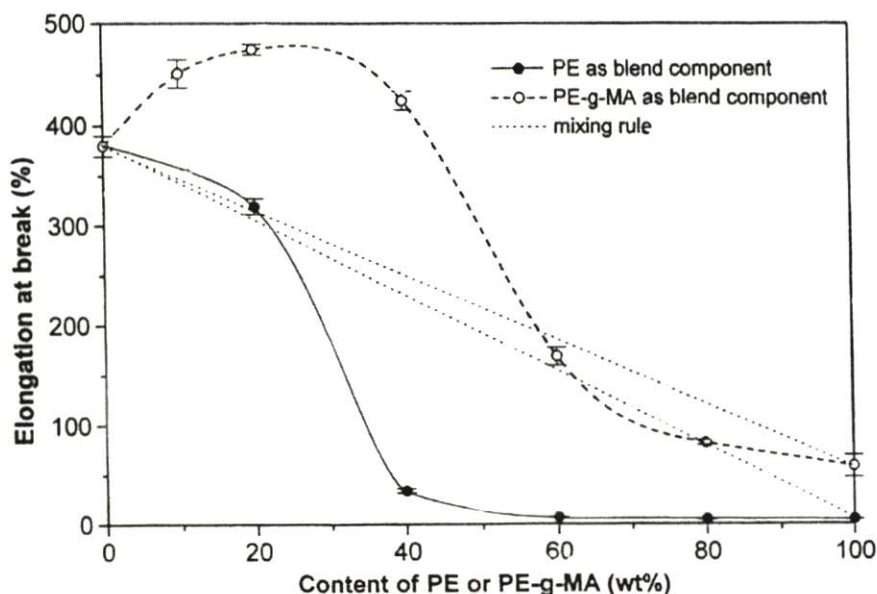
Katrin และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างเทอร์โมพลาสติกพอลิยูรีเทน (Thermoplastic polyurethane, TPU) และพอลิเอทิลีน (PE) พบว่า TPU และ PE ไม่สามารถเข้ากันได้ดี เนื่องจากความเป็นขั้วที่แตกต่างกันทำให้แรงดึงผิวระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองมีมาก จึงได้ปรับปรุง PE ให้สามารถผสมเข้ากันกับ TPU ได้ดีขึ้นโดยทำการต่อกิ่ง PE ด้วย MA เนื่องจาก MA สามารถเข้ากันได้กับ TPU แต่ PE-g-MA จะมีสมบัติเชิงกลด้อยกว่า PE บริสุทธิ์เนื่องจากการต่อกิ่งทำให้ PE มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง อัตราส่วนการผสมของ TPU ต่อ PE สามารถแสดงพฤติกรรมในลักษณะของ Stress- Strain curve ดังรูปที่ 2.11 ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPU กับ PE-g-MA มีค่าความแข็งแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดสูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง TPU กับ PE ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 พฤติกรรมในลักษณะ Stress-Strain curve ของการผสมของ TPU ต่อ PE และ TPU ต่อ PE-g-MA [28]



รูปที่ 2.12 ค่าความแข็งแรงดึงที่สัมพันธ์กับปริมาณ PE และ PE-g-MA ที่ผสมกับ TPU [28]



รูปที่ 2.13 เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดที่สัมพันธ์กับปริมาณ PE และ PE-g-MA ที่ผสมกับ TPU [28]

Larsen และคณะ [29] ได้ทำการศึกษาความสามารถในการผสมเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิพรอพิลีน (PP) และพอลิบิวทิลีนเทเรพทาเลท (PBT) โดยมีพินอลฟอร์มาลดีไฮด์ต่อกิ่งบนพอลิพรอพิลีนเป็นสารช่วยผสม (PP-g-PF) พบว่า PP และ PBT ผสมเข้ากันได้ไม่ดีเนื่องจากมีโครงสร้างที่ต่างกันคือ PP มีหมู่อะลิฟาติก (Aliphatic) เป็นสายโซ่หลัก ในขณะที่ PBT มีหมู่อะโรมาติกในสายโซ่หลัก แต่เมื่อใช้ PP-g-PF เป็นสารช่วยผสมจะทำให้ PP และ PBT ผสมเข้ากันได้ดี ขึ้นส่งผลให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น เนื่องจาก PF ในส่วนของ PP-g-PF มีโครงสร้างเป็นอะโรมาติกทำให้เข้ากันได้ดีกับ PBT

Wulin และคณะ [30] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีนที่มี Talc เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 30 %wt โดยมีไซเลนต่อกิ่งบนพอลิพรอพิลีน (PP-g-Si) เป็นสารก่อกวน พบว่า PP ที่ผสม Talc จะมีค่ามอดูลัส (Modulus) เพิ่มขึ้นในขณะที่เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) ลดลง แต่ เมื่อใช้ PP-g-Si เป็นสารก่อกวนในปริมาณต่ำกว่า 10 %wt จะช่วยให้สมบัติเชิงกลส่วนใหญ่ดีขึ้นในขณะที่ค่ามอดูลัสและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดลดลง ดังตารางที่ 2.3 เนื่องจาก Si ในส่วนของ PP-g-Si นั้นมีความเป็นขั้วเช่นเดียวกับ Talc ส่งผลให้ PP และ Talc ผสมเข้ากันได้ดีขึ้น

ตารางที่ 2.3 สมบัติเชิงกลของ PP ที่มี Talc 30%wt เป็นสารตัวเติมที่ปริมาณ PP-g-Si ต่างกัน [30]

Properties	Neat PP	PP-g-Si 0 %wt	PP-g-Si 5 %wt	PP-g-Si 10 %wt
Tensile strength (MPa)	33.0	34.9	38.5	38.7
Tensile modulus (GPa)	1.84	3.89	3.16	3.12
Elongation at break (%)	>250	69	29	23
Flexural strength (MPa)	53.5	59.4	63.6	68.4
Flexural modulus (GPa)	1.60	3.28	3.67	4.07
Izod impact strength (J/m^2)	4.9	5.9	6.2	5.0

Zhanhai และคณะ [7] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอไมด์ 6 (PA6) และพอลิโอทีลีนชนิดน้ำหนักโมเลกุลสูง (UHMWPE) โดยมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม พบว่า HDPE-g-MA จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้น ดังตารางที่ 2.4 เนื่องจาก HDPE-g-MA จะช่วยเพิ่มแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวของ PA6 และ UHMWPE โดยส่วนของ MA และ HDPE ใน HDPE-g-MA จะเข้ากันได้ดีกับ PA6 และ UHMWPE ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PA6 และ UHMWPE ที่มี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม [7]

PA6/UHMWPE /HDPE-g-MA (wt/wt/wt)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
90/10/0	47.1	1190	19.4	67.7	1397
90/10/5	50.4	1202	39.2	69.1	1402
90/10/10	54.2	1217	132.1	72.4	1411
80/20/0	35.2	996	15.3	54.6	1181
80/20/5	42.3	1038	29.8	57.2	1208
80/20/10	48.5	1120	40.5	60.4	1219
80/20/15	50.8	1137	67.4	62.3	1228
80/20/20	52.3	1149	89.2	64.2	1235
70/30/0	28.7	809	18.8	40.2	1008
70/30/30	47.9	1056	127.8	54.7	1093

Srinivas และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิสไตรีน (PS) และไนลอน 6,6 (N66) เปรียบเทียบกับพอลิสไตรีนที่ต่อกิ่งด้วยกรดอะคริลิก (PS-g-AA) และ N66 พบว่าเมื่อต่อกิ่ง AA บน PS แล้วจะช่วยให้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลให้ดีขึ้น ดังตารางที่ 2.5 เนื่องจาก PS มีความเป็นขี้ดต่ำในขณะที่ N66 มีความเป็นขี้ดสูง เมื่อต่อกิ่ง AA บน PS ทำให้ PS มีความเป็นขี้ดมากขึ้นจึงสามารถผสมกับ N66 ได้ดีขึ้น

ตารางที่ 2.5 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง N66 และ PS [31]

Blend composition (by weight)	Elongation at break (%)	Tensile strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)
N66/PS : 100/0	38.57	80.97	919
N66/PS : 0/100	1.98	49.34	2708
N66/PS : 85/15	16.56	70.00	955
N66/PS-g-AA : 85/15	16.58	79.10	988

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรดอัครีตสำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูป (H6240 B) จากบริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด (TPE) สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงแสดงดังตารางที่ 3.1
2. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ขนาดอนุภาค 2 ไมครอน เกรดไม่เคลือบผิว (Omyacarb 2) และเกรดเคลือบด้วยกรดสเตียริก (Omyacarb 2T) ชนิดบดละเอียด จากบริษัท สุรินทร์ออมยาเคมีคอล จำกัด สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงดังตารางที่ 3.2
3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted High density polyethylene, HDPE-g-MA) เกรด Polybond 3009 จากบริษัท ยูนิรอยัลเคมีคอล จำกัด สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

สมบัติ	หน่วย	วิธีการทดสอบ	HDPE (H6240 B)
ครรชนีการไหล	กรัม/10 นาที	ASTM D 1238	0.40
ความหนาแน่น	กรัม/ลบ.ซม.	ASTM D 1505	0.962
ความต้านทานแรงดึงยืด	กก./ตร.ซม.	ASTM D 638	280
ความต้านทานแรงดึงขาด	กก./ตร.ซม.	ASTM D 638	350
ความยืดที่จุดขาด	%	ASTM D 638	>500
ความสามารถในการทรงรูป	กก./ตร.ซม.	ASTM D 747	11,500
ความต้านทานแรงกระแทก	กก.-ซม./ซม.	ASTM D 256	12
ความแข็ง (Shore D)	-	ASTM D 2240	64
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	ASTM D 2117	132
จุดอ่อนตัว	องศาเซลเซียส	ASTM D 1525	128
จุดเปราะ	องศาเซลเซียส	ASTM D 746	<-60

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต

เกรด CaCO ₃	Specific gravity (g/cm ³)	Mean particle size (micron)	%SA
Omyacarb 2	2.7	2.8	-
Omyacarb 2T	2.7	2.7	1

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮ-
ดราย

สมบัติ	HDPE-g-MA (Polybond 3009)
ครรชนีการไหล	5
%MA ใน HDPE	1

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องผสมชนิดความเร็วสูง (High speed mixer) : Lab Tech Engineering Co.,Ltd
2. เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) : Brabender Co.,Ltd ; PL-200
3. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) : Bosco Engineering ; Bosco A600
4. เครื่องฉีดพลาสติก (Injection moulding machine) : Welltec Industrial Equipment Co.,Ltd ; Cosmo TTI 220/80 HITEC
5. เครื่องเป่าขึ้นรูปพลาสติกชนิดอัดรีด (Extrusion blow moulding machine) :Sinco Co.,Ltd ; VK100
6. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile tester) : LLYOD Instrument Co.,Ltd ; LLOYD LR 30K
7. เครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod impact tester) : Yasuda Seiki Seisakusho Co.,Ltd ; Yasuda 7697
8. เครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester) : Italia Co.,Ltd ; DTS FDDR
9. เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary rheometer) : Rosand Precision Co.,Ltd
10. เครื่อง Differential scanning calorimeter, DSC : Perkin Elmer Co.,Ltd ; DSC7
11. เครื่อง Thermogravimetric analyzer, TGA : Shimadzu Co.,Ltd ; TGA-51
12. กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : JEOL Co.,Ltd ; JSM-5410

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3

นำ CaCO_3 มาทำการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA โดยการผสม CaCO_3 กับ SA ในเครื่องผสมชนิดความเร็วสูงที่ความเร็วรอบ 1500 รอบต่อนาที และอุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 15 นาที โดยมีปริมาณ SA เป็น 1 %wt ของ CaCO_3

3.3.2 สารตัวอย่างที่เตรียม

สารตัวอย่างที่เตรียมมี 4 ประเภทคือ

1. HDPE บริสุทธิ์
2. HDPE ผสมกับ CaCO_3
3. HDPE ผสมกับ CaCO_3 และสารช่วยผสม (HDPE-g-MA)
4. HDPE ผสมกับ CaCO_3 ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยสารช่วยกระจายตัว (SA)

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างเพื่อทดสอบสมบัติต่างๆ

สารตัวอย่างทุกประเภทมีวิธีการเตรียมที่เหมือนกันคือ เตรียมสูตรละ 2 กิโลกรัมซึ่งจะถูกผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) ที่อุณหภูมิจากบาร์เรลถึงหัวคาย เป็น $160\ 170\ 180$ และ 190°C ตามลำดับ ความเร็ว 15 รอบต่อนาที เมื่อสารผสมถูกอัดรีดออกมาจะถูกปล่อยให้เย็นตามธรรมชาติ (ไม่มีการใช้น้ำในการหล่อเย็นสารผสม) แล้วนำไปบดเป็นเม็ดเล็กด้วยเครื่องบดพลาสติก พร้อมทั้งจะนำไปขึ้นรูปหรือทำการทดสอบต่อไป

3.3.4 การเตรียมตัวอย่างเพื่อใช้ในการเป่าขึ้นรูป

ทำการเตรียมตัวอย่างเช่นเดียวกับข้อ 3.3.3 แต่เตรียมในปริมาณมากขึ้นเพื่อสามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้เพียงพอต่อการทดสอบสมบัติต่อไป ประมาณสูตรละ 5 กิโลกรัม เพื่อนำไปเป่าขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow moulding machine) โดยเลือกพอลิเมอร์บางสูตรหลังจากทำการทดสอบสมบัติต่างๆ แล้ว

3.3.5 การทดสอบ

3.3.5.1 การตรวจสอบวัตถุดิบที่ใช้

ก. HDPE

- นำ HDPE มาศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ด้วยอัตราการให้

ความร้อนเป็น $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 190°C และทำให้เย็นโดยการลดอุณหภูมิตงด้วยอัตรา $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น นำข้อมูลจากกราฟที่ได้ มาหาค่าอุณหภูมิของการหลอมตัว (T_m) อุณหภูมิของการเกิดผลึก (T_c) ความร้อนของการหลอมผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกตามมาตรฐาน ASTM E 794 [32]

ข. CaCO_3

- นำ CaCO_3 เกรดเคลือบด้วยกรดสเตียริก มาหาปริมาณ SA โดยนำครุชชีเบิล 2 อัน มาเผาที่อุณหภูมิ 300°C ทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักครุชชีเบิลใช้ทศนิยม 4 ตำแหน่ง แล้วนำ CaCO_3 เกรดเคลือบด้วยกรดสเตียริกมาใส่ในปริมาณ $\frac{1}{4}$ ของครุชชีเบิลแล้วชั่งน้ำหนักก่อนเผาใช้ทศนิยม 4 ตำแหน่งเช่นเดียวกันตลอด หลังจากนั้นนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา $\frac{1}{2}$ ชั่วโมงจนเหลือแต่ CaCO_3 แล้วนำมาทิ้งให้เย็นในเดซิเคเตอร์เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำไปชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณหาปริมาณกรดสเตียริกโดยเฉลี่ย

ก. HDPE-g-MA

- นำ HDPE-g-MA มาศึกษาสมบัติทางความร้อนโดยใช้เครื่อง DSC โดยทำการทดลองสถานะเดียวกับข้อ 3.3.5.1 ก.

3.3.5.2 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง

นำสารพอลิเมอร์ตัวอย่างมาหาปริมาณ CaCO_3 โดยใช้เครื่อง TGA โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 600°C ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาปริมาณ CaCO_3 ที่แน่นอนตามมาตรฐาน ASTM E 1131 [33]

3.3.5.3 การตรวจสอบความหนาแน่นของสารตัวอย่างด้วยวิธี Density gradient column

เตรียมสารละลายผสมระหว่าง คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) และไซลีน (Xylene) ในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.4

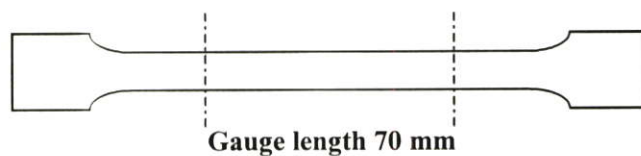
ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของสารละลายผสม

หมายเลขสารละลาย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CCl ₄ (cm ³)	25	22	20	17	14	11	8	5	3	-
Xylene (cm ³)	-	3	5	8	11	14	17	20	22	25

ใช้แท่งแก้วคนให้ตัวทำละลายทั้งสองผสมกัน แล้วเทตัวทำละลายเหล่านี้ลงในกระบอกตวงขนาด 250 cm³ โดยเริ่มเทจากหมายเลข 1 การทดสอบให้ไหลผ่านแท่งแก้วและสัมผัสผิวด้านในของกระบอกตวง เมื่อเทครบ 10 หมายเลขแล้วใช้แท่งแก้วคน 1 ครั้งและปล่อยให้ของเหลวอยู่ในสมดุที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นหย่อนเม็ดพลาสติกมาตรฐานที่ทราบความหนาแน่นลงในกระบอกตวงครั้งละ 1 เม็ด เม็ดพลาสติกจะลอยที่ระดับความสูงต่างๆ ตามความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกนั้นๆ คือช่วง 855 – 1,575 kg/m³ วัดระดับความสูงของเม็ดพลาสติกที่ลอยอยู่จากด้านล่างของกระบอกตวงและสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความหนาแน่นกับความสูง เมื่อได้กราฟมาตรฐานให้นำชิ้นตัวอย่างตัดให้มีขนาดพอสมควรและหย่อนลงในกระบอกตวงที่เตรียมไว้ วัดระดับความสูงที่พลาสติกตัวอย่างลอยอยู่และเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วหาความหนาแน่นของพลาสติกตัวอย่าง [34]

3.3.5.4 การทดสอบสมบัติเชิงกล

นำสารพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกประเภทที่ได้จากข้อ 3.3.2 มาขึ้นรูปเป็นรูปดัมเบลล์ (Dumbbell) และรูปไอซอดที่มีรอยบาก (Notched izod) ดังรูปที่ 3.1 โดยใช้เครื่องฉีดพลาสติกที่อุณหภูมิ 190°C ความดันการฉีดครั้งแรกเป็น 65 bar ครั้งที่สองเป็น 60 bar ครั้งที่สามเป็น 55 bar และระยะเวลาในการฉีดเป็นชิ้นงานหนึ่งชิ้นเป็น 50 sec แล้วนำไปทดสอบสมบัติเชิงกล



a) ตัวอย่างชิ้นงานรูปดัมเบลล์



b) ตัวอย่างชิ้นงานไอซอดที่มีรอยบาก

รูปที่ 3.1 ชิ้นงานตัวอย่างรูปดัมเบลล์และไอซอดที่มีรอยบาก

ก. สมบัติความแข็งแรงดึง

- นำตัวอย่างที่เตรียมเป็นดัมเบลล์จำนวน 5 ชิ้นงาน มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึง (Tensile tester) ที่ความเร็วการดึง 30 mm/min ระยะการจับชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 70 mm ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D 638 [35] เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile yield strength) ค่า ยั่งมอดุลัส (Young's modulus) และเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break)

ข. สมบัติความแข็งแรงกระแทก

- นำตัวอย่างที่เตรียมเป็นไอซอดที่มีรอยบาก (Notched izod) จำนวน 10 ชิ้นงาน มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทก (Impact tester) ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D 256 [36] จะได้ค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ในหน่วย kJ/m^2

ค. สมบัติความแข็งกด

- นำตัวอย่างที่เตรียมเป็นดัมเบลล์มาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดแบบ Dead load ชนิด Shore D จำนวน 5 ชิ้นงาน ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D 2240 [37] จะได้ค่าความแข็งกดโดยตรงจากเครื่อง

3.3.5.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาสมบัติทางความร้อนของสารพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกประเภทด้วยเครื่อง DSC โดยทำการทดลองสถานะเดียวกับข้อ 3.3.5.1 ก.

3.3.5.6 การศึกษาการกระจายตัวของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง

นำสารตัวอย่างที่ผ่านการฉีดขึ้นรูปเป็นดัมเบลล์มาแช่ในไนโตรเจนเหลว แล้วหักขณะที่ยังเย็นอยู่ หลังจากนั้นตัดเป็นชิ้น เพื่อนำพื้นผิวตรงรอยแตกมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

3.3.5.7 การทดสอบสมบัติการไหล

ศึกษาสมบัติการไหลของสารพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกประเภทและ HDPE-g-MA โดยใช้เครื่อง Capillary rheometer ที่อุณหภูมิหัวคาย 190°C ในช่วงอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ที่ 30 – 3,600 วินาที⁻¹ โดยใช้หัวคายเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ความยาว 0 และ 16 mm มุม 180° เพื่อแก้ไขค่าความดันที่ได้เพื่อให้ได้ความหนืดที่มีค่าถูกต้องมากขึ้น ตามมาตรฐาน ASTM D 3835 [38]

3.3.6 กระบวนการเป่าขึ้นรูป

3.3.6.1 ศึกษาอัตราการไหลเชิงปริมาตร

ศึกษาสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการขึ้นรูปคือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate) โดยเก็บสารตัวอย่างที่ออกจากหัวคายของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดที่ความเร็วของสกรู 35 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิหัวคาย 190°C ในช่วงเวลาที่คงที่มาชั่งน้ำหนักแล้วคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรจากความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมที่ได้

3.3.6.2 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้

ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดความสูง 107 mm มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 46 mm และมีปริมาตร 135 cm³ ดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 ลักษณะผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้จากการเป่าขึ้นรูป

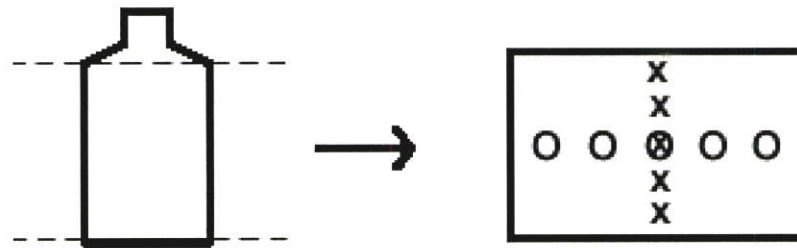
โดยมีการตัดเศษพลาสติกบริเวณปากและฐานขวดออกก่อนนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ ดังนี้

ก. น้ำหนักต่อขวด

- ชั่งน้ำหนักขวดเปล่าที่ผลิตได้ในแต่ละสูตรอย่างน้อย 10 ขวด เพื่อหาน้ำหนักเฉลี่ย

ข. ความหนาและการกระจายความหนาของแต่ละขวด

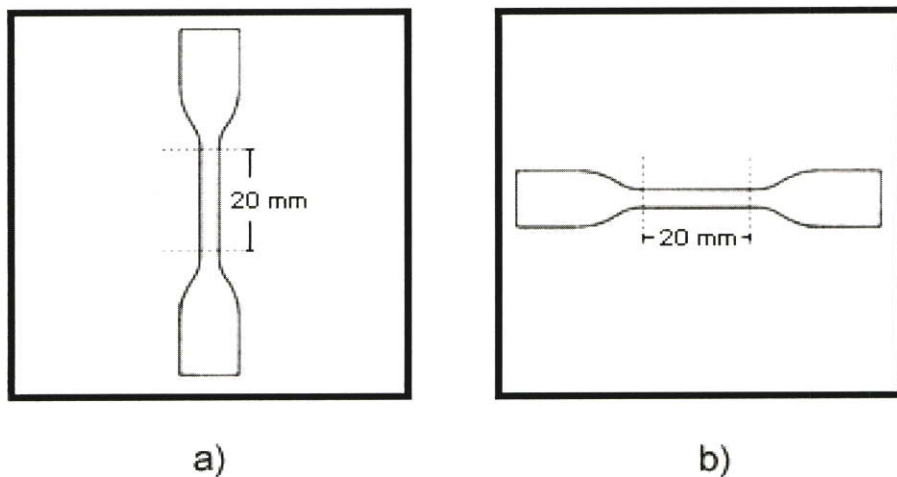
- ตัดช่วงคอขวดและก้นขวดออกและตัดให้เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าบริเวณรอยต่อของขวดแล้ววัดความหนาโดยรอบขวดและตามแนวตั้งบริเวณละ 5 จุดในระยะเท่าๆ กันอย่างน้อย 10 ขวด แล้วหาค่าเฉลี่ย ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานสำหรับวัดความหนา เมื่อ X เป็นการวัดในแนวตั้งและ O เป็นการวัดในแนวนอน

ก. สมบัติความแข็งแรงดึง

- ตัดขอบบริเวณกลางขวดทั้งในแนวเส้นรอบวงและแนวตั้งโดยลักษณะชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์ ดังรูปที่ 3.4 แล้วทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึงที่ความเร็วการดึง 80 mm/min ระยะของการจับชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 20 mm ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D 638 [35] เหมือนข้อ 3.3.5.3 ก.



รูปที่ 3.4 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ขนาดเล็กซึ่งตัดจากผนังขวดในแนวตั้งและแนวนอนของขวด

ง. สมบัติความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก

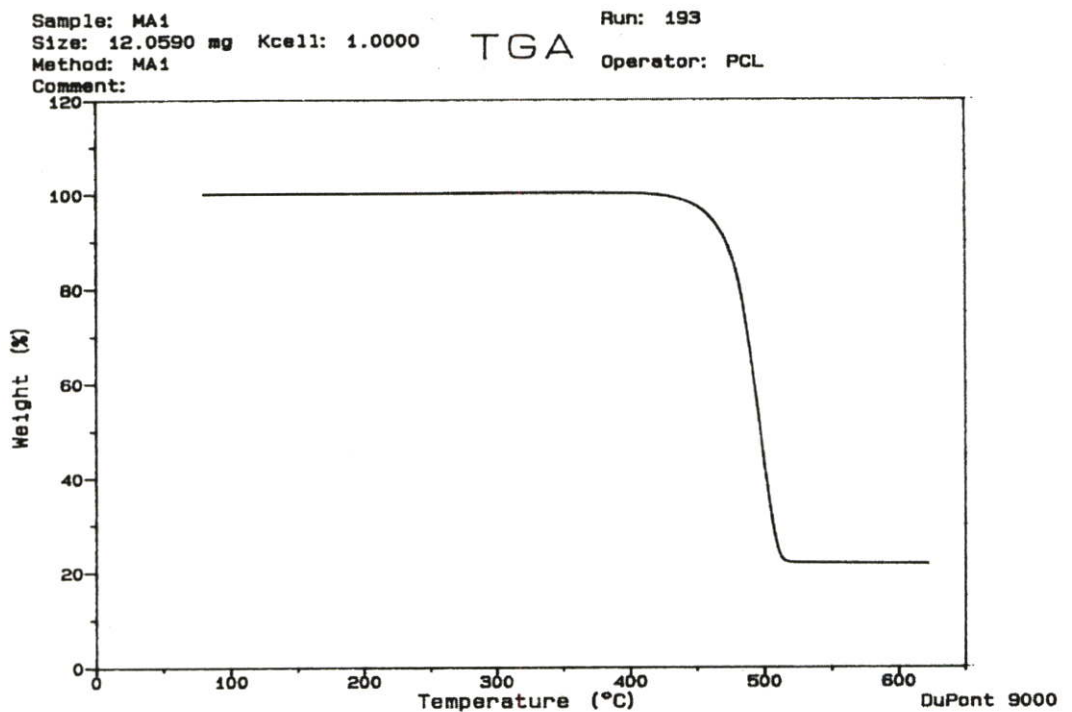
- นำขวดจำนวน 20 ขวดมาบรรจุน้ำให้เต็มขวดและปิดฝาขวดปล่อยให้ตกสู่พื้นในแนวตั้งที่ระดับต่างๆ กันแล้วบันทึกจำนวนขวดที่แตกและไม่แตกที่ระดับความสูงต่างๆ กันคำนวณความแข็งแรงกระแทกของขวดตามมาตรฐาน ASTM D 2463 [39]

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ปริมาณองค์ประกอบต่างๆในพอลิเมอร์ผสม

การหาปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ในพอลิเมอร์ผสมทำได้โดยการใช้เครื่อง TGA ซึ่งมีวิธีการดังที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3.5.2 จะได้กราฟจากเครื่องดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างกราฟที่วิเคราะห์จากเครื่อง TGA ; สูตร HDPE + 20 %CaCO₃(HDPE-g-MA 1%)

นำกราฟที่ได้มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆ ในพอลิเมอร์ผสมได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ในพอลิเมอร์ผสม

สูตร	องค์ประกอบ	ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 (%wt)
HDPE	HDPE บริสุทธิ์	0
HDMA0.5	HDPE + HDPE-g-MA 0.125 %wt	0
HDMA1	HDPE + HDPE-g-MA 0.25 %wt	0
CA10	HDPE + CaCO_3 10 %wt	10.4
CA20	HDPE + CaCO_3 20 %wt	20.8
CA30	HDPE + CaCO_3 30 %wt	31.2
SA1	HDPE + CaCO_3 20 %wt (SA 1 %wt เคลือบในงานวิจัย)	22.4
SA2T	HDPE + CaCO_3 20 %wt (SA 1 %wt เคลือบจากโรงงาน)	20.0
MA0.1	HDPE + CaCO_3 20 %wt (HDPE-g-MA 0.1 %wt)	21.6
MA0.25	HDPE + CaCO_3 20 %wt (HDPE-g-MA 0.25 %wt)	19.2
MA0.5	HDPE + CaCO_3 20 %wt (HDPE-g-MA 0.5 %wt)	22.4
MA1	HDPE + CaCO_3 20 %wt (HDPE-g-MA 1 %wt)	21.6
MA2	HDPE + CaCO_3 20 %wt (HDPE-g-MA 2 %wt)	21.6
MA4	HDPE + CaCO_3 20 %wt (HDPE-g-MA 4 %wt)	21.6
MA6	HDPE + CaCO_3 20 %wt (HDPE-g-MA 6 %wt)	22.4
MA8	HDPE + CaCO_3 20 %wt (HDPE-g-MA 8 %wt)	18.4
MA10	HDPE + CaCO_3 20 %wt (HDPE-g-MA 10 %wt)	18.4

หมายเหตุ : สูตร HDMA0.5 กับ MA0.5 และสูตร HDMA1 กับ MA1 มีอัตราส่วนระหว่าง HDPE : HDPE-g-MA เท่ากันคือ 99.875 : 0.125 และ 99.75 : 0.25 ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของ CaCO_3 20 %wt ในสูตร MA0.5 และ MA1

จากตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณของ CaCO_3 ที่มีอยู่จริงในพอลิเมอร์ผสมใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งมีค่ามากที่สุดคือ 22.4% และน้อยที่สุดคือ 18.4% แสดงว่าวิธีการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่และสภาวะที่ใช้สามารถใช้ได้กับการผสม HDPE กับ CaCO_3 ได้ดี

การหาปริมาณกรดสเตียริกที่เคลือบผิวของ CaCO_3 ทำได้โดยใช้วิธีการเผาซึ่งมีวิธีการดังกล่าวแล้วในหัวข้อ 3.3.5.1 จะได้น้ำหนักของสารที่หายไปมาคำนวณปริมาณที่แน่นอนของกรดสเตียริกดังตารางที่ 4.2 (แสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก ก)

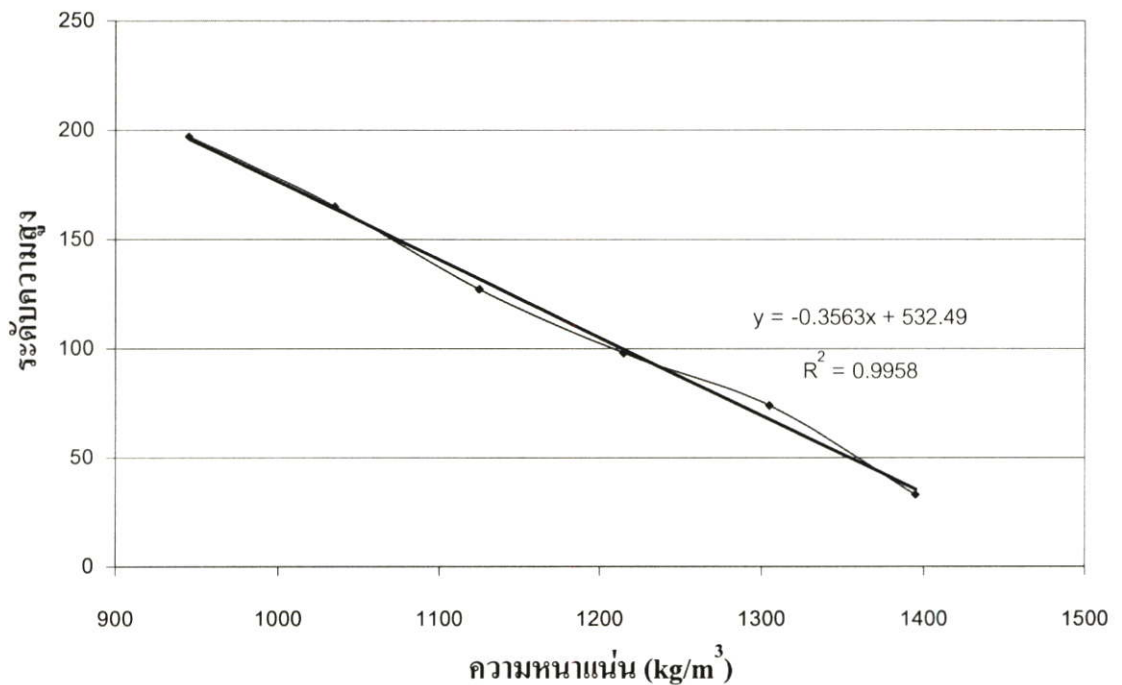
ตารางที่ 4.2 ปริมาณที่แน่นอนของกรดสเตียริกซึ่งเคลือบผิว CaCO_3

สูตร	ปริมาณที่แน่นอนของกรดสเตียริก (%wt ของ CaCO_3)
SA1 (เคลือบในงานวิจัย)	1.01
SA2T (เคลือบจากโรงงาน)	1.03

จากตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณของกรดสเตียริกในสูตรที่เคลือบในงานวิจัยและสูตรที่เคลือบจากโรงงานมีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อเปรียบเทียบ CaCO_3 ทั้งสองเกรดว่ามีสมบัติเหมือนกันหรือไม่

4.2 สมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสม

เมื่อผสมสารตัวอย่างแล้วนำมาศึกษาสมบัติทางกายภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการวัดความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมโดยได้กราฟมาตรฐานดังรูปที่ 4.2 และได้ผลดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.2 กราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงและความหนาแน่น
หมายเหตุ : แกน Y เป็นขีดแสดงปริมาตรในกระบอกตวง (cm^3)

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม

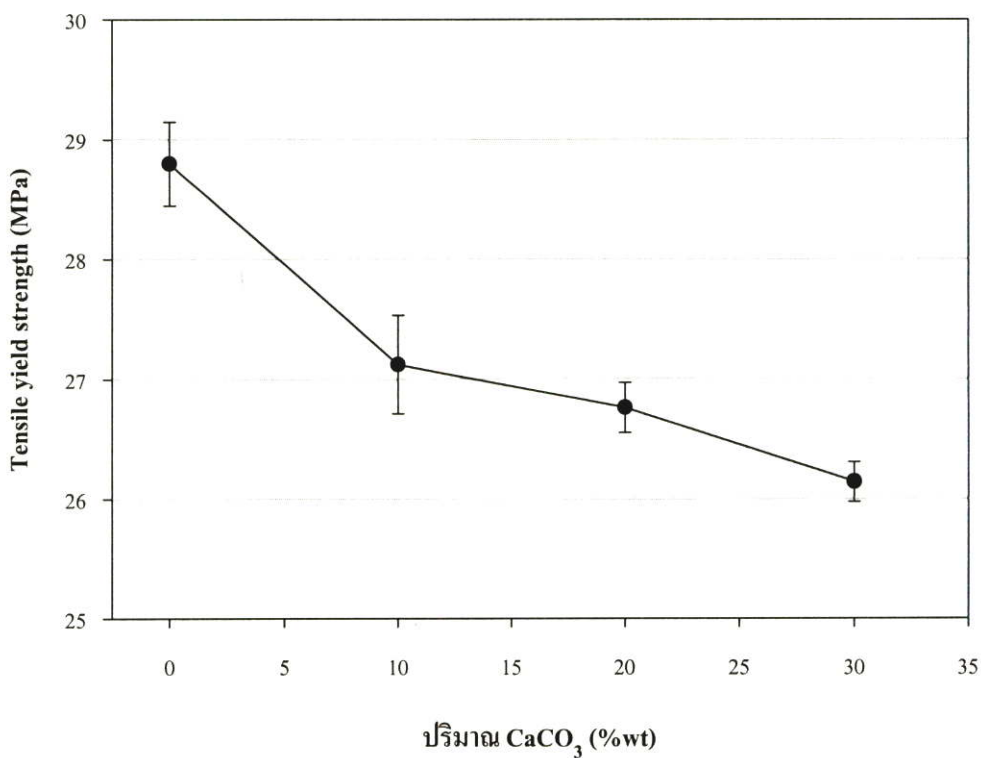
สูตร	ความหนาแน่น (kg/m ³)
HDPE	929
HDMA0.5	929
HDMA1	929
CA10	1,001
CA20	1,057
CA30	1,141
SA1	1,041
SA2T	1,066
MA0.1	1,077
MA0.25	1,057
MA0.5	1,041
MA1	1,079
MA2	1,082
MA4	1,079
MA6	1,079
MA8	1,068
MA10	1,074

จากตารางที่ 4.3 พบว่าพอลิเมอร์ผสมสูตรที่ไม่มี CaCO₃ มีความหนาแน่นต่ำกว่าที่มีการผสม CaCO₃ เนื่องจาก CaCO₃ มีความหนาแน่น 2,700 kg/m³ ซึ่งสูงกว่า HDPE คือ 929 kg/m³ จึงทำให้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม CaCO₃ สูงกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE กับ HDPE-g-MA และ HDPE บริสุทธิ์ และพบว่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO₃ เพิ่มขึ้นเหตุผลดังที่กล่าวข้างต้น ในขณะที่พอลิเมอร์ผสม CaCO₃ สูตรที่มีการใช้กรดเตียริกปรับปรุงพื้นผิวและที่ใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ มีความหนาแน่นไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากปริมาณกรดเตียริกและ HDPE-g-MA ที่ใช้มีปริมาณน้อยมาก

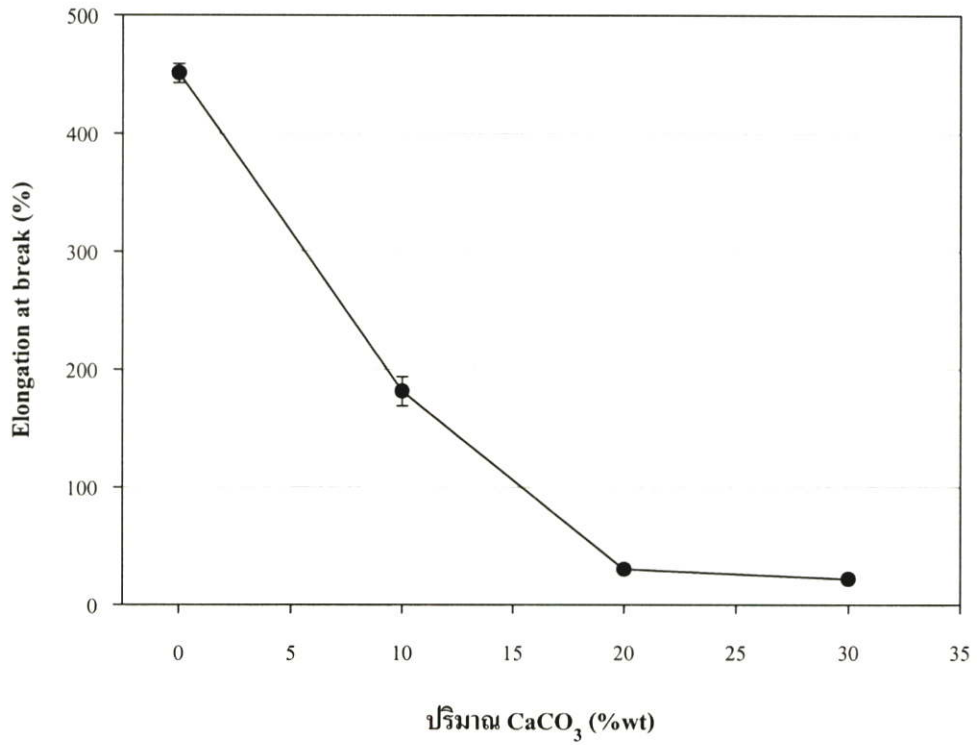
4.3 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม

4.3.1 ความแข็งแรงดึง เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและมอดูลัส

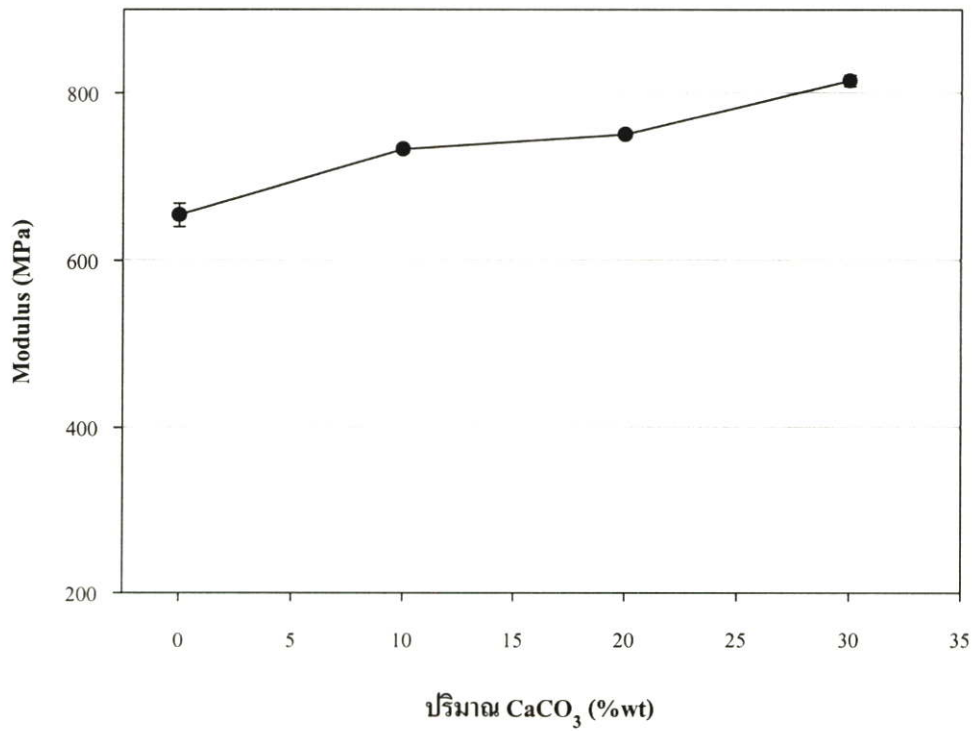
เมื่อเตรียมชิ้นงานเป็นรูปดัมเบลล์แล้วจะนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึงซึ่งจะได้ค่า Tensile yield strength, %Elongation at break และ Modulus โดยนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.3 – 4.11



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากกับปริมาณ CaCO₃

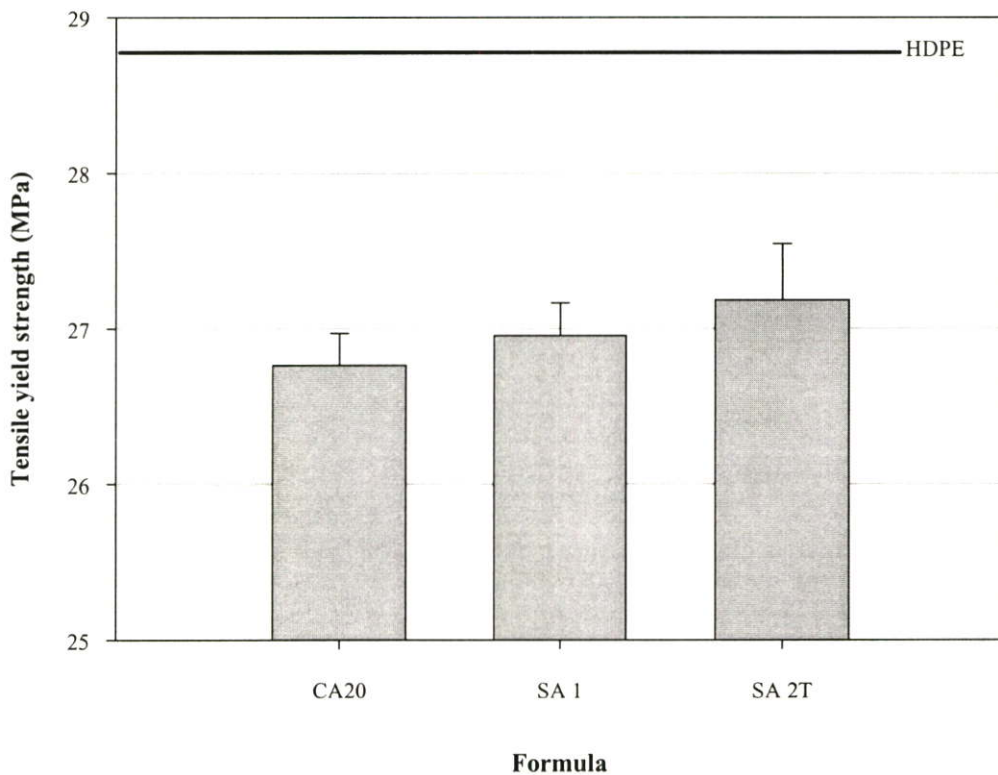


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับปริมาณ CaCO₃

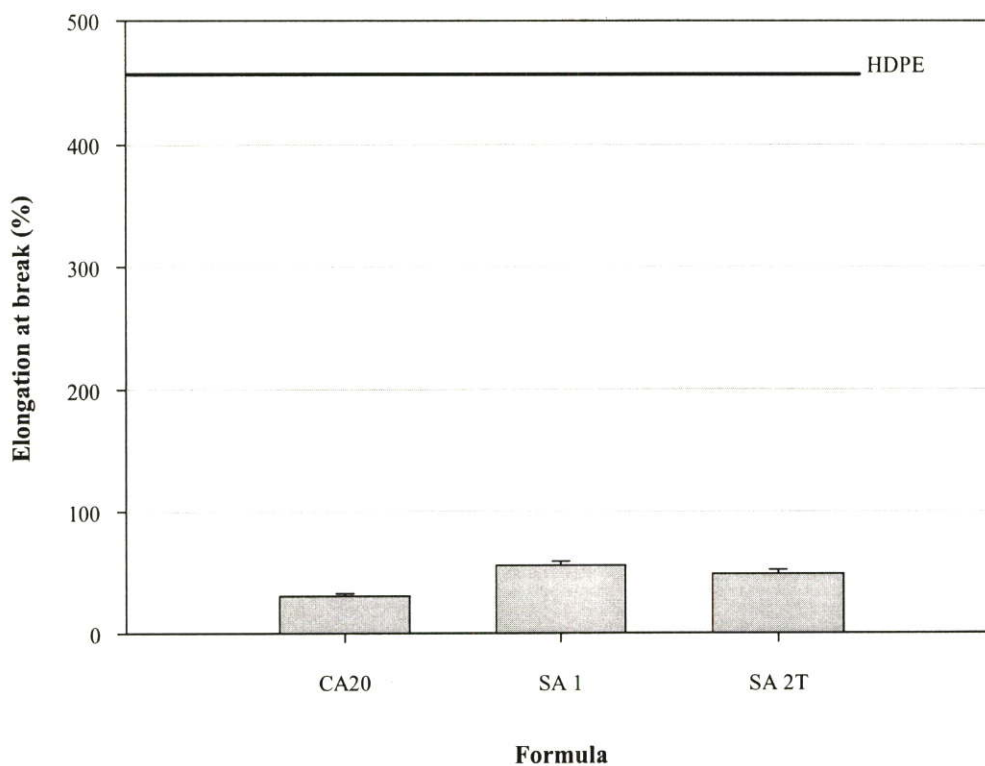


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสกับปริมาณ CaCO₃

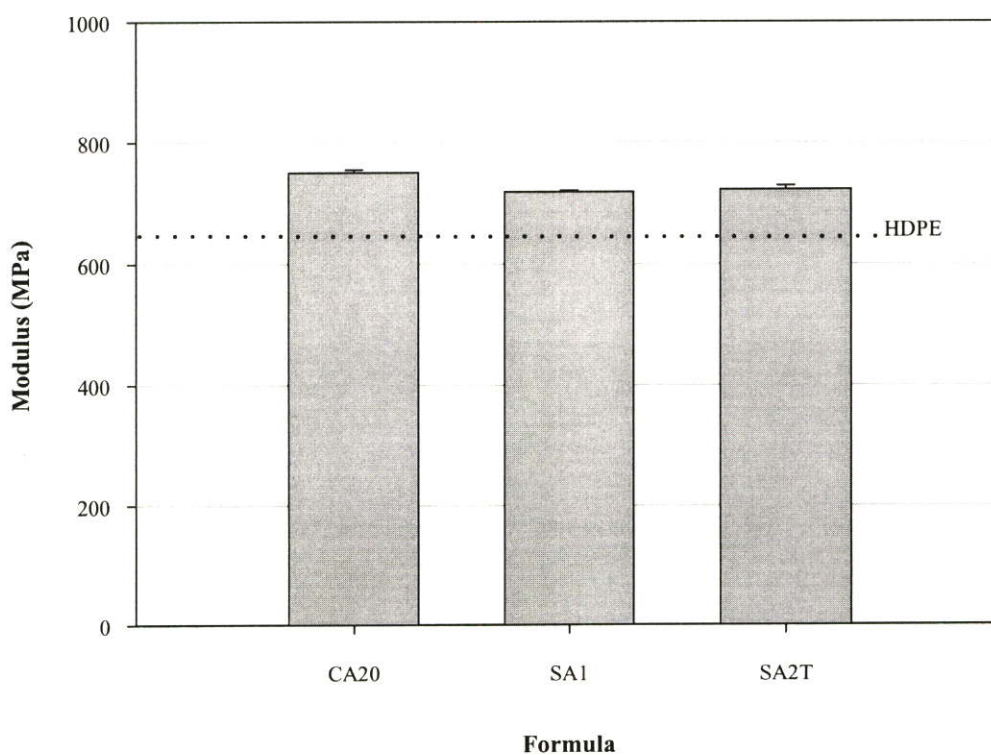
จากรูปที่ 4.3 - 4.5 พบว่าค่า Tensile yield strength และ %Elongation at break มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดี เหมือนกับสายโซ่ของ HDPE และเกิดช่องว่างระหว่างพื้นผิวของ HDPE กับ CaCO_3 เมื่อรับแรงดึง ทำให้เป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ในขณะที่ค่า Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติของ CaCO_3 มีค่ามอดูลัสสูงกว่า HDPE ดังนั้นเมื่อผสมกันจึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีค่า Modulus เพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกสูตร CA20 มาใช้ทดสอบต่อไปโดยพิจารณาจากค่า Tensile yield strength เนื่องจากที่ปริมาณ CaCO_3 10-20 %wt มีแนวโน้มที่ลดลงน้อยกว่าที่ 20- 30 %wt และการใช้ปริมาณ CaCO_3 ที่มากขึ้นจะทำให้สมบัติด้อยลงเนื่องจาก CaCO_3 มีความสามารถในการกระจายตัวยากขึ้น



รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของสูตรที่มีการใช้ (SA1 และ SA2T) และไม่ใช้กรดสเดียริก (CA20)

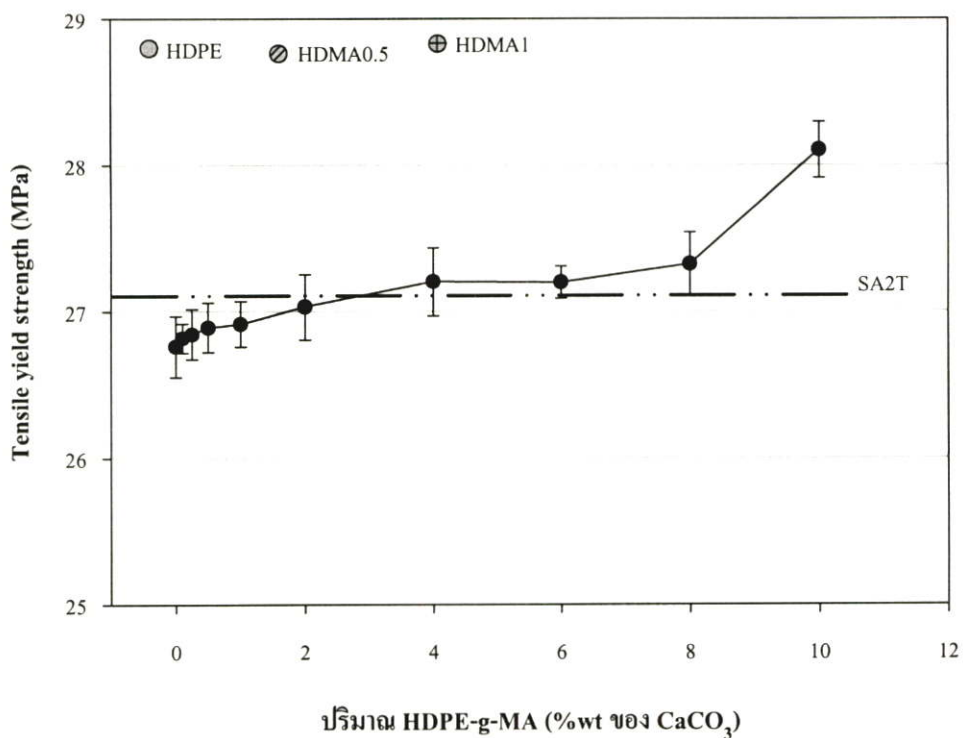


รูปที่ 4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของสูตรที่มีการใช้ (SA1 และ SA2T) และไม่ใช้กรดสเตียริก (CA20)

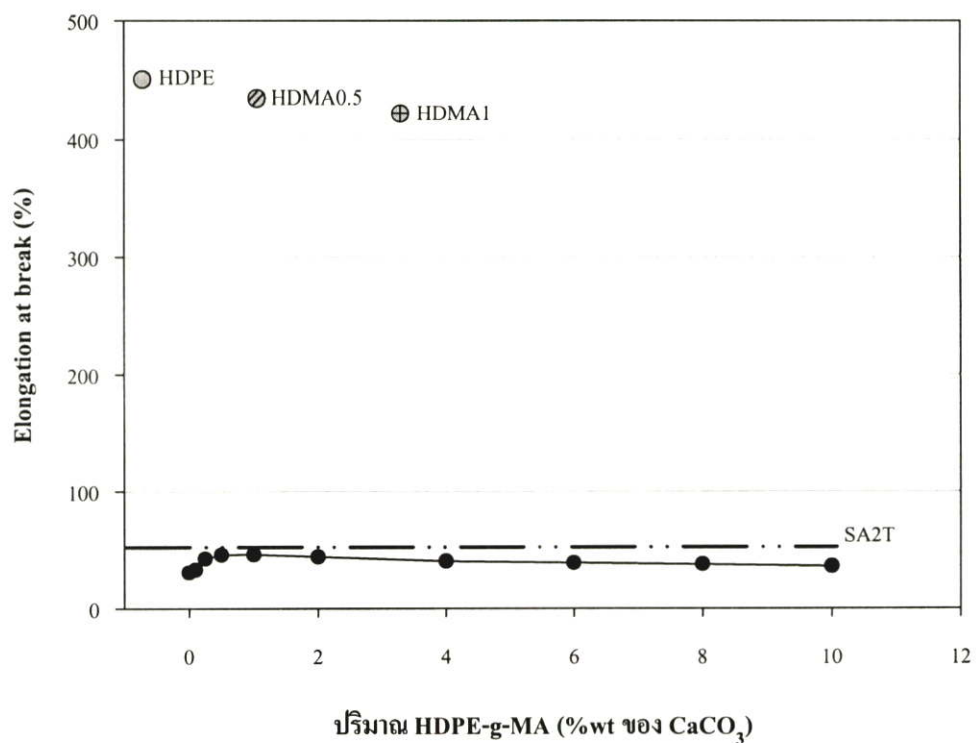


รูปที่ 4.8 ค่ามอดุลัสของสูตรที่มีการใช้ (SA1 และ SA2T) และไม่ใช้กรดสเตียริก (CA20)

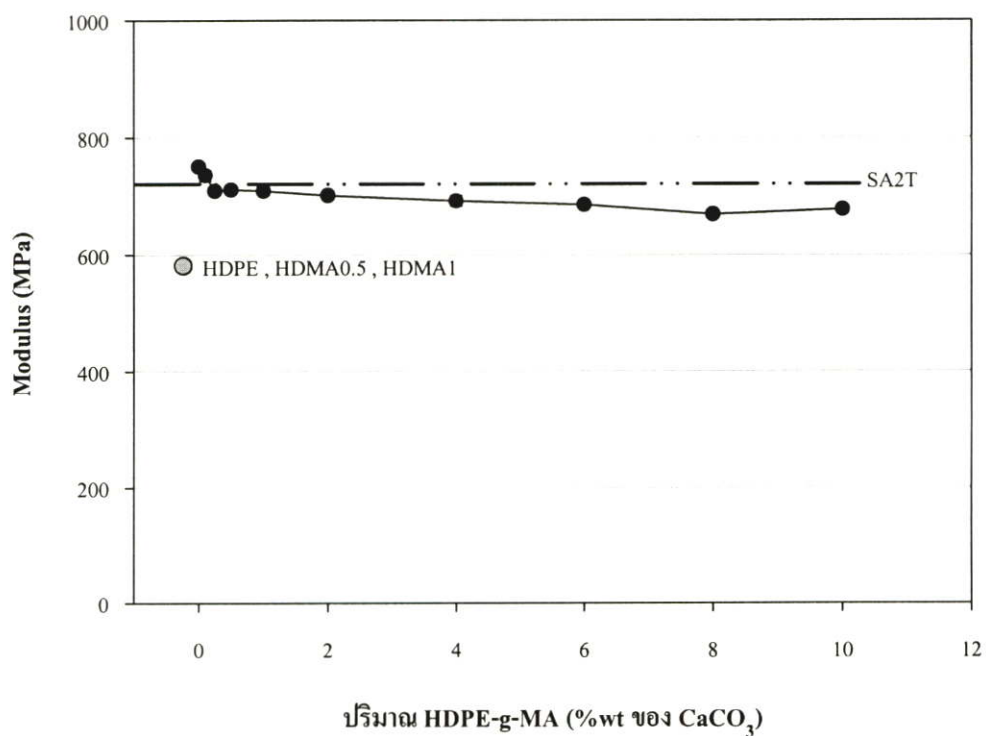
จากรูปที่ 4.6 – 4.8 พบว่าค่า Tensile yield strength และ %Elongation at break เพิ่มขึ้นในขณะที่ค่า Modulus ไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อใช้กรดเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัว เนื่องจาก CaCO_3 มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของ CaCO_3 กับ HDPE เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใส่ CaCO_3 ที่เคลือบผิวในงานวิจัยกับที่มีการเคลือบผิวจากโรงงานพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าวิธีที่ใช้ในการเคลือบผิว CaCO_3 ด้วยกรดเตียริกในหัวข้อ 3.3.1 มีประสิทธิภาพดีพอ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากกับปริมาณ HDPE-g-MA ของสูตรที่มี CaCO_3 20 %wt



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดกับปริมาณ HDPE-g-MA ของสูตรที่มี CaCO₃ 20 %wt

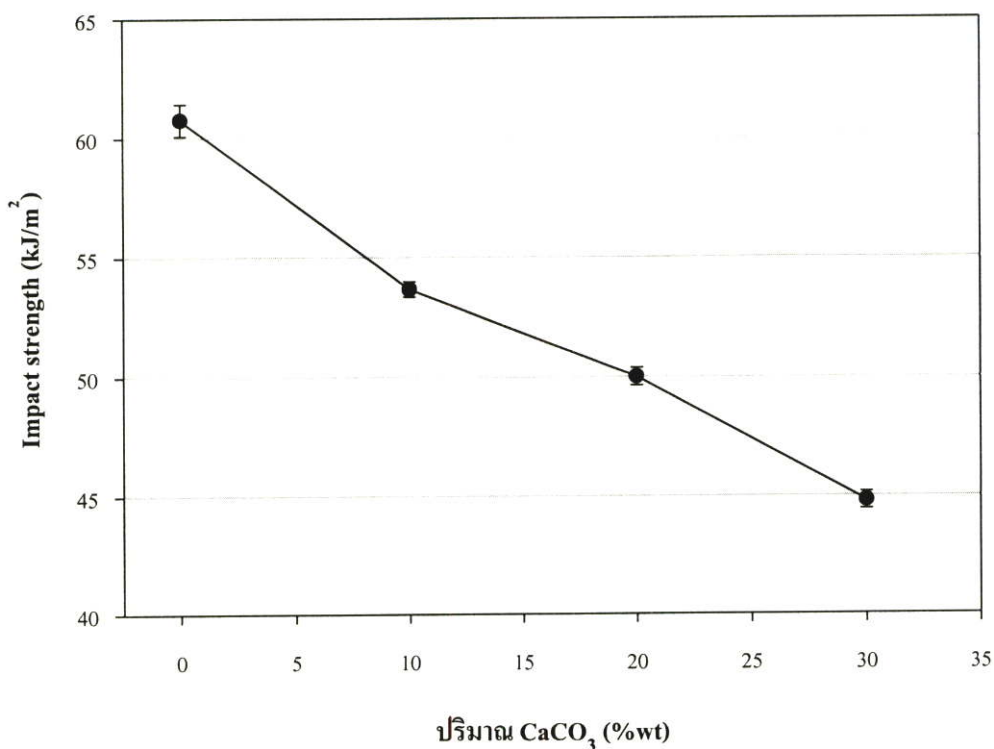


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสกับปริมาณ HDPE-g-MA ของสูตรที่มี CaCO₃ 20 %wt

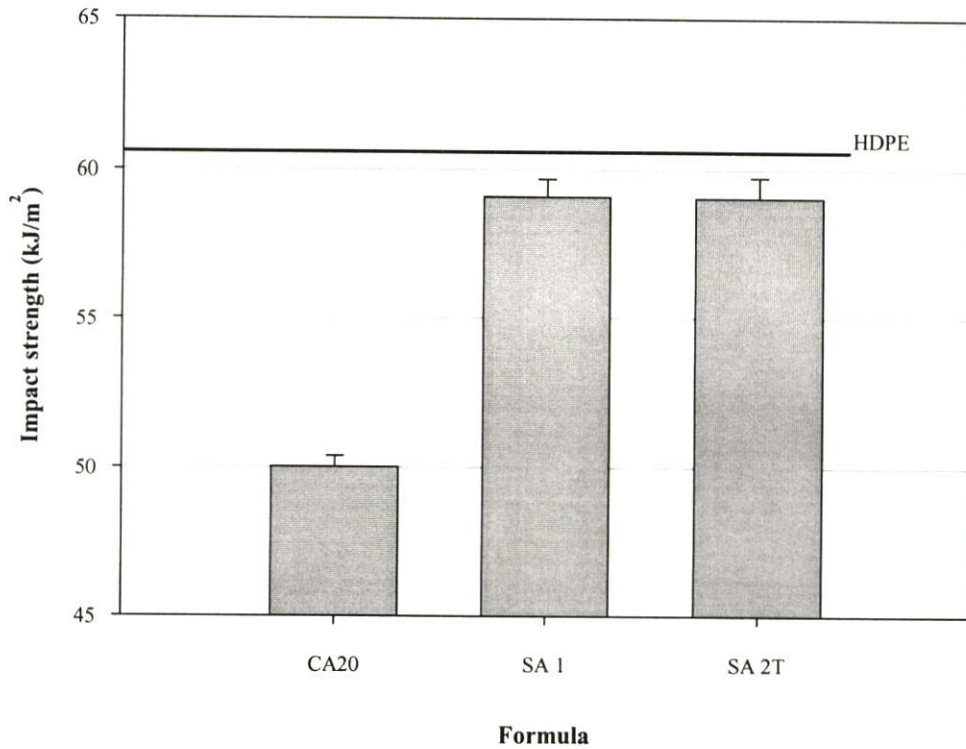
จากรูปที่ 4.9 – 4.11 พบว่าค่า Tensile yield strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ HDPE-g-MA เป็นการเพิ่มวิฏภาคของพอลิเมอร์ทำให้อัตราส่วนของ CaCO_3 ใน HDPE ลดลง ส่งผลให้ค่า Tensile yield strength เพิ่มขึ้น ส่วนค่า %Elongation at break มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ HDPE-g-MA ต่ำกว่า 2 %wt และตั้งแต่ 2 %wt ขึ้นไปค่า %Elongation at break มีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากการใช้ HDPE-g-MA ปริมาณต่ำจะช่วยในการผสมระหว่าง HDPE และ CaCO_3 แต่เมื่อ HDPE-g-MA มีปริมาณเพิ่มขึ้นอาจจะเกิดการแยกวิฏภาคของ HDPE-g-MA ที่มากเกินไปทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานส่งผลให้ค่า %Elongation at break ลดลง และในรูปที่ 4.11 พบว่าค่า Modulus มีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้ HDPE-g-MA เป็นการเพิ่มวิฏภาคของพอลิเมอร์ทำให้ค่า Modulus ลดลงเล็กน้อย

4.3.2 ความแข็งแรงกระแทก

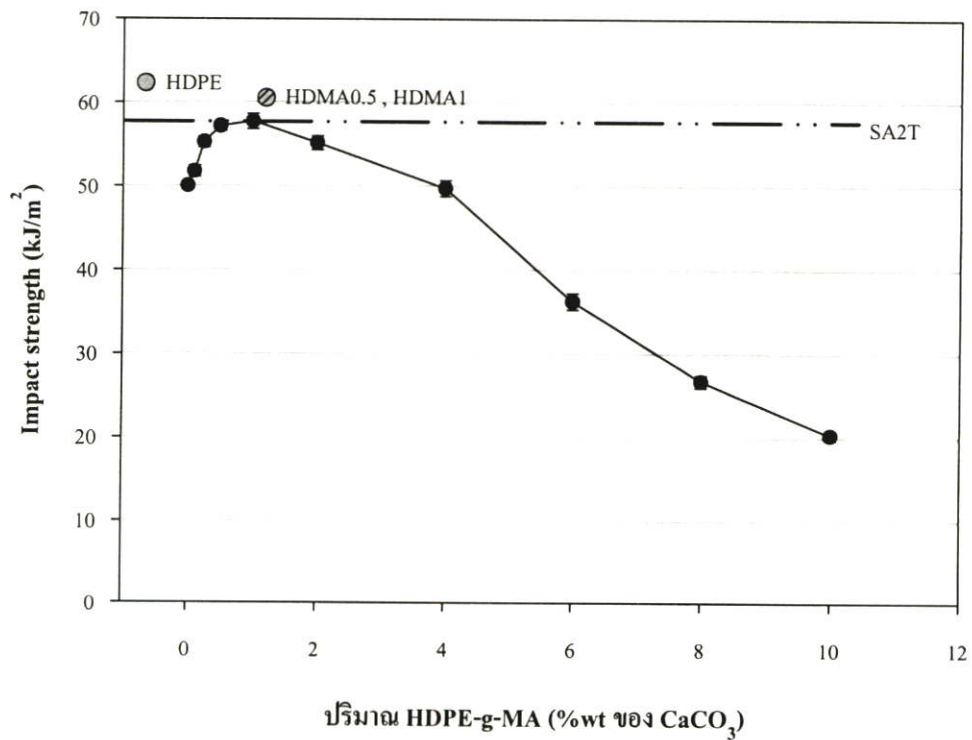
เมื่อเตรียมชิ้นงานเป็นรูปไอซอคที่มีรอยบากแล้วจะนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงกระแทกซึ่งจะได้ค่า Impact strength แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.12 – 4.14



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกระแทกกับปริมาณ CaCO_3



รูปที่ 4.13 ค่าความแข็งแรงกระแทกของสูตรที่มีการใช้ (SA1 และ SA2T) และไม่ใช้ กรดสเตียริก (CA20)

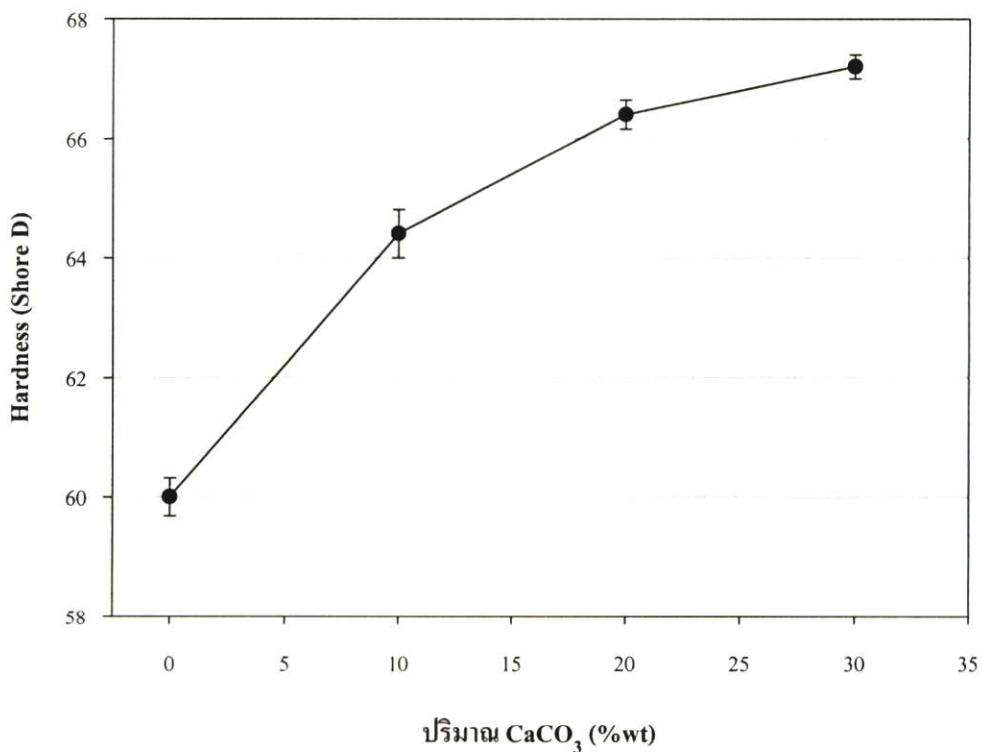


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกระแทกกับปริมาณ HDPE-g-MA ของสูตร ที่มี CaCO₃ 20 %wt

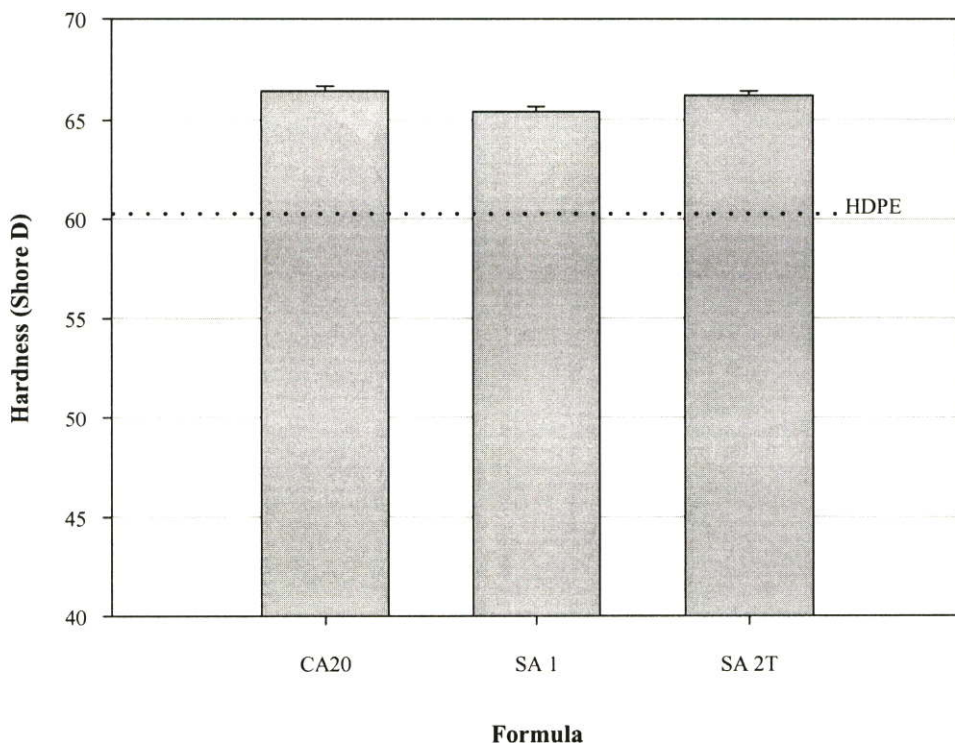
จากรูปที่ 4.12 พบว่าค่า Impact strength มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น เนื่องจาก CaCO_3 มีแนวโน้มที่จะรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเมื่อปริมาณมากขึ้นและไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ดีเท่ากับสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงกระแทก รูปที่ 4.13 พบว่าค่า Impact strength เพิ่มขึ้นเมื่อใช้กรดเตตระไฮดรอกซีเป็นสารช่วยกระจายตัว เนื่องจากกรดเตตระไฮดรอกซีช่วยในการกระจายตัวของ CaCO_3 จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง HDPE กับ CaCO_3 มากขึ้น ค่า Impact strength จึงเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง CaCO_3 ที่ทำการเคลือบผิวในงานวิจัยกับที่เคลือบผิวจากโรงงานพบว่าให้ค่า Impact strength ใกล้เคียงกัน ส่วนรูปที่ 4.14 พบว่าค่า Impact strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มขึ้นจนถึงที่ 1 %wt ของ CaCO_3 และเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มขึ้นมากกว่า 1 %wt ของ CaCO_3 ค่า Impact strength จะมีแนวโน้มที่ลดลง (เหตุผลเช่นเดียวกับรูปที่ 4.10)

4.3.3 ความแข็งกด

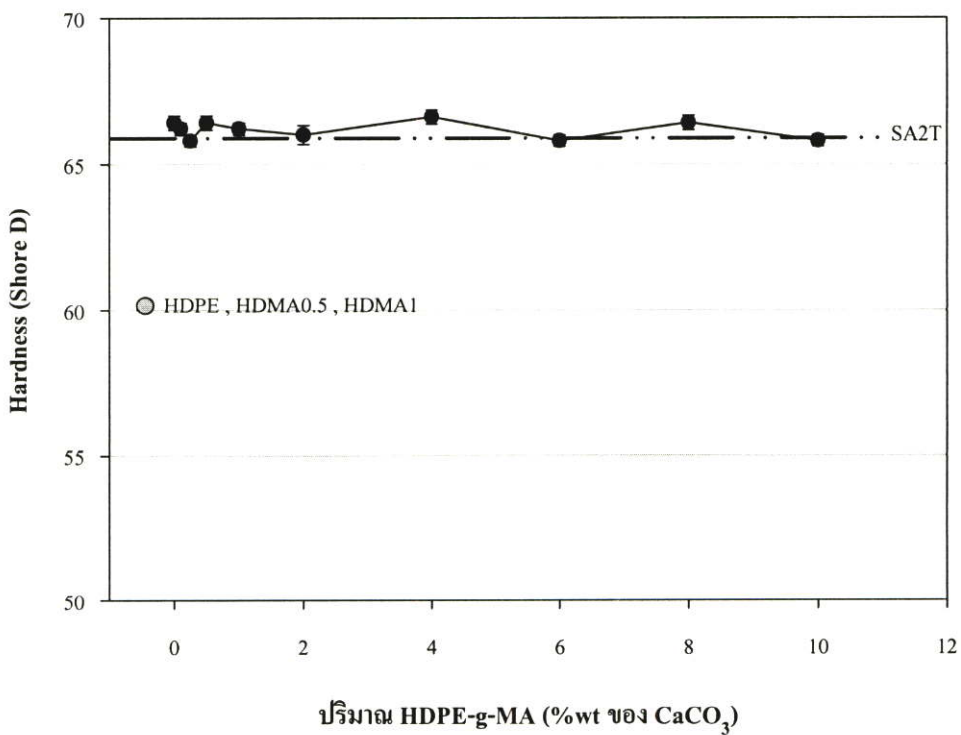
เมื่อนำชิ้นงานที่เป็นรูปไอซอดที่มีรอยบากหรือคัมเบลล์มาทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดจะได้ค่า Hardness แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.15 – 4.17



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดกับปริมาณ CaCO_3



รูปที่ 4.16 ค่าความแข็งกดของสูตรที่มีการใช้ (SA1 และ SA2T) และไม่ใช้กรดเตียริก (CA20)



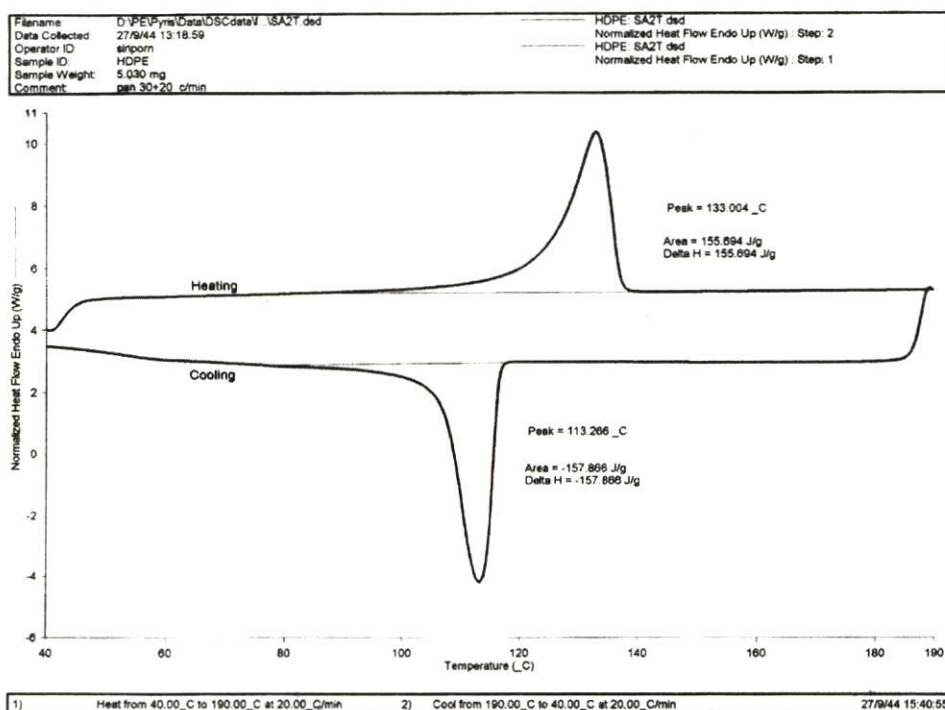
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกดกับปริมาณ HDPE-g-MA ของสูตรที่มี CaCO₃ 20 %wt

จากรูปที่ 4.15 พบว่าค่าความแข็งกคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น เนื่องจาก CaCO_3 (ความแข็งกคแบบโมห์เป็น 3) นั้นมีค่าความแข็งกคมากกว่า HDPE ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมจึงมีค่าความแข็งกคเพิ่มขึ้น ส่วนรูปที่ 4.16 และ 4.17 พบว่าค่าความแข็งกคไม่แตกต่างกันเมื่อใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัวและใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากใช้กรดสเตียริกและ HDPE-g-MA ในปริมาณต่ำจึงไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งกค

4.4 สมบัติทางความร้อน

เมื่อนำสารตัวอย่างมาทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC จะได้ค่า T_m , T_c , heat of fusion (ΔH_f) และ heat of recrystallisation (ΔH_c) จากกราฟดังรูปที่ 4.17 แล้วนำค่ามาคำนวณหา ค่า %Crystallinity (แสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก ข) เมื่อ

- T_m คืออุณหภูมิของการหลอมเหลวของผลึก
- ΔH_f คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวของผลึก (พื้นที่ใต้พีคจากขั้นตอน heating)
- %Crys1 คือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง
- T_c คืออุณหภูมิของการตกผลึก
- ΔH_c คือเอนทาลปีของการตกผลึก (พื้นที่ใต้พีคจากขั้นตอน cooling)
- %Crys2 คือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นใหม่



รูปที่ 4.18 ตัวอย่างกราฟที่วิเคราะห์ได้จากเครื่อง DSC ; สูตร HDPE + 20 % CaCO_3 (SA 1%)

ค่าที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าสมบัติทางความร้อน

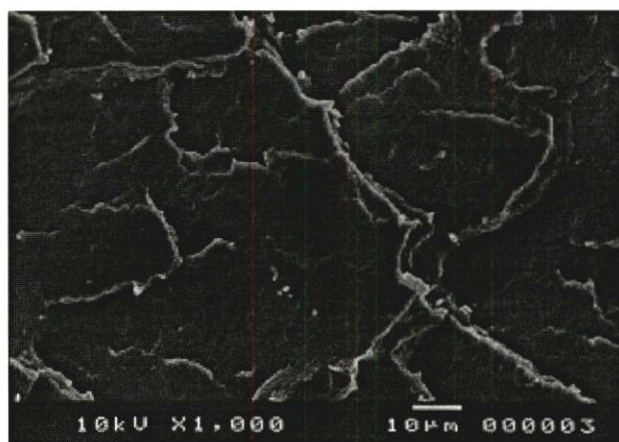
สูตร	T_m (°C)	ΔH_f (J/g)	%Crys1	T_c (°C)	ΔH_c (J/g)	%Crys2
HDPE	135	185.9	64	112	199.2	68
HDPE-g-MA	130	159.8	55	109	153.0	52
HDMA1	134	169.9	58	112	198.3	68
CA20	134	142.7	62	113	161.3	70
MA0.5	134	146.3	64	113	159.4	70
MA1	134	153.5	67	113	162.4	71
MA4	134	149.3	65	113	156.1	68
MA10	132	146.7	61	114	161.0	69
SA2T	133	155.7	66	113	157.9	68

จากตารางที่ 4.4 พบว่าสารตัวอย่างทุกชนิดมีค่า %Crys1 น้อยกว่า %Crys2 ยกเว้น HDPE-g-MA เนื่องจากสารตัวอย่างทุกสูตรก่อนนำมาทดสอบด้วยเครื่อง DSC ได้ผ่านการอัดรีดแล้วทิ้งไว้ให้เย็นตัวในที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ซึ่งอาจจะมีอัตราการลดอุณหภูมิเร็วกว่าอัตราการลดอุณหภูมิของเครื่อง DSC คือ 20°C/min ทำให้ผลึกที่ได้มีขนาดเล็กและไม่สมบูรณ์เท่ากับการทดสอบจากเครื่อง DSC ในขณะที่ HDPE-g-MA ไม่ผ่านการอัดรีดที่สภาวะดังกล่าวจึงได้ค่าที่ต่างกันไป

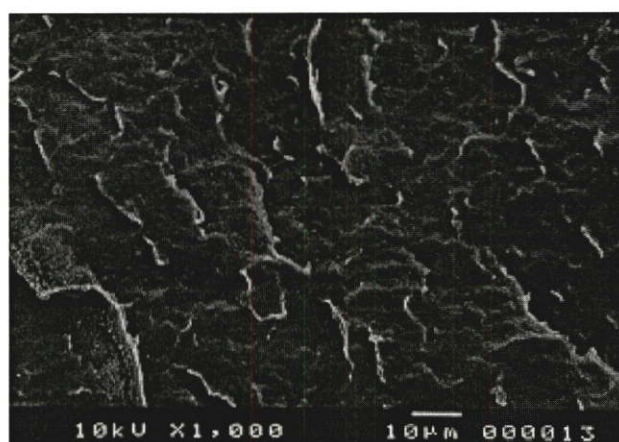
ค่า T_m , T_c , %Crys1 และ %Crys2 ของพอลิเมอร์ผสมแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์ แสดงว่า CaCO_3 มีผลต่อความเป็นผลึกของ HDPE น้อยมากนั่นคือ CaCO_3 ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (nucleating agent) สำหรับ HDPE ในขณะที่ HDPE-g-MA มีค่าสมบัติทางความร้อนต่ำกว่า HDPE บริสุทธิ์ คือค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกและค่า T_m ต่ำกว่า เนื่องจาก HDPE-g-MA มีการต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงและมีดรรชนีการไหลสูงกว่า HDPE บริสุทธิ์ส่งผลให้ผลึกไม่สมบูรณ์เท่ากับ HDPE ที่บริสุทธิ์หรือไม่มีการต่อกิ่ง ส่วนค่า T_c ของ HDPE-g-MA จะต่ำกว่า HDPE บริสุทธิ์เช่นเดียวกัน เนื่องจากการเกิดผลึกเกิดจากการที่อุณหภูมิลดลงทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยากขึ้น ความหนืดจึงสูงขึ้นดังนั้น HDPE บริสุทธิ์ซึ่งมีสายโซ่ที่ยาวและมีความหนืดสูงกว่าจึงเกิดนิวเคลียสของผลึกได้เร็วกว่า HDPE-g-MA เมื่ออุณหภูมิลดลงส่งผลให้ค่า T_c ของ HDPE สูงกว่า HDPE-g-MA ในขณะที่ T_c มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่อใส่ CaCO_3

4.5 การกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต

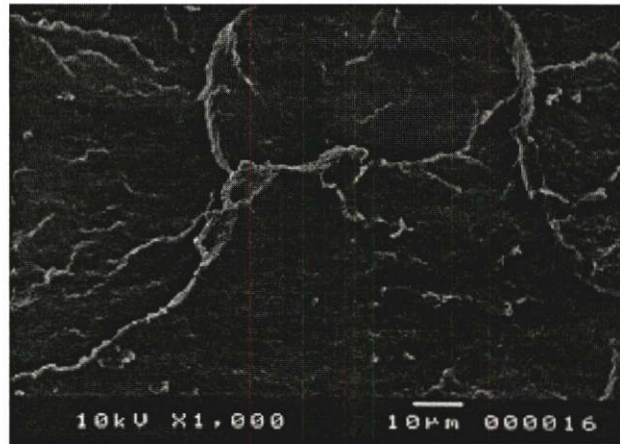
ผลของการกระจายตัวของ CaCO_3 ศึกษาโดยใช้เครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ดังรูปที่ 4.19 – 4.35



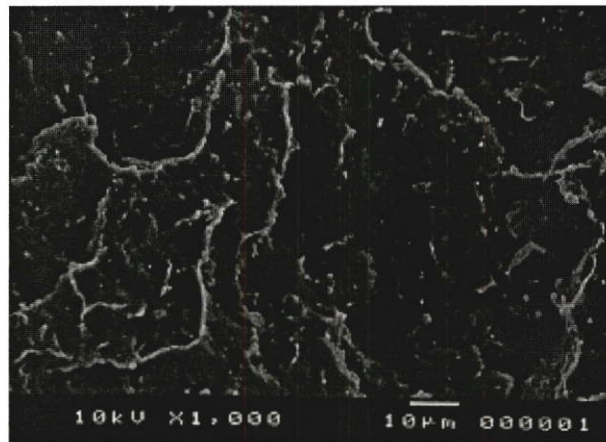
รูปที่ 4.19 ลักษณะรอยแตกที่ผิวของ HDPE (ไม่มี CaCO_3)



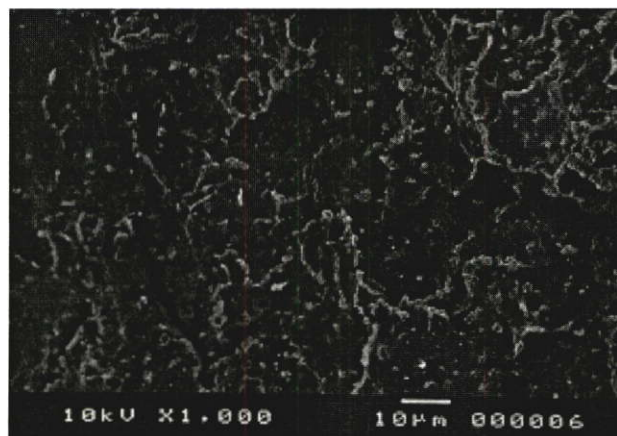
รูปที่ 4.20 ลักษณะรอยแตกที่ผิวของ HDMA0.5 (ไม่มี CaCO_3)



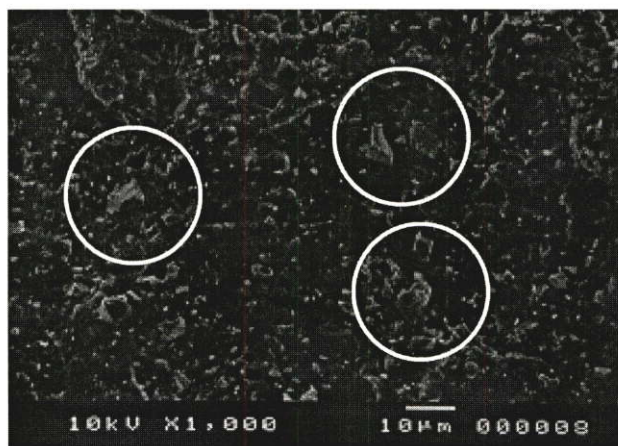
รูปที่ 4.21 ลักษณะรอยแตกที่ผิวของ HDMA1 (ไม่มี CaCO_3)



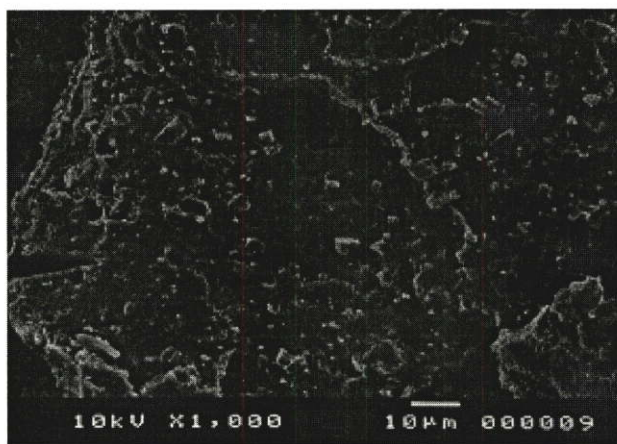
รูปที่ 4.22 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ปริมาณ 10 %wt ใน HDPE



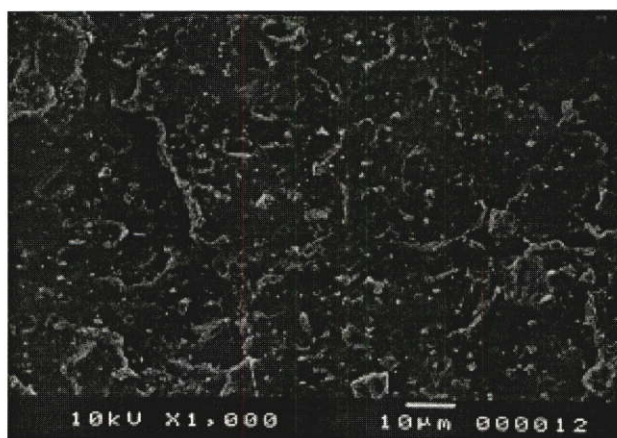
รูปที่ 4.23 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ปริมาณ 20 %wt ใน HDPE



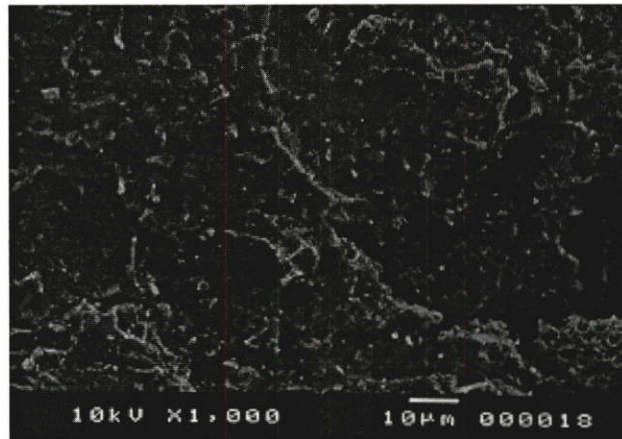
รูปที่ 4.24 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ปริมาณ 30 %wt ใน HDPE



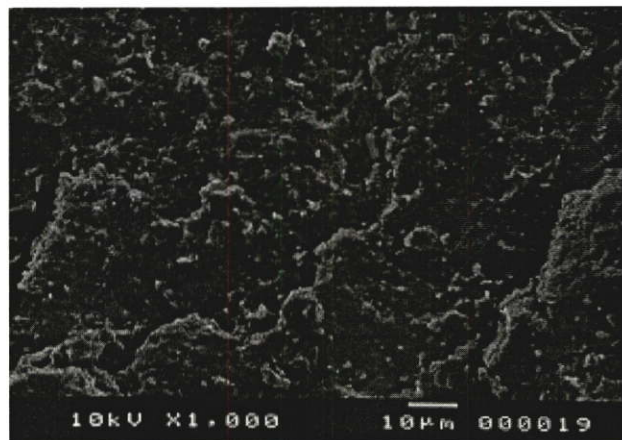
รูปที่ 4.25 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ปริมาณ 20 %wt ซึ่งเคลือบด้วยกรดสเดิยริกเอง



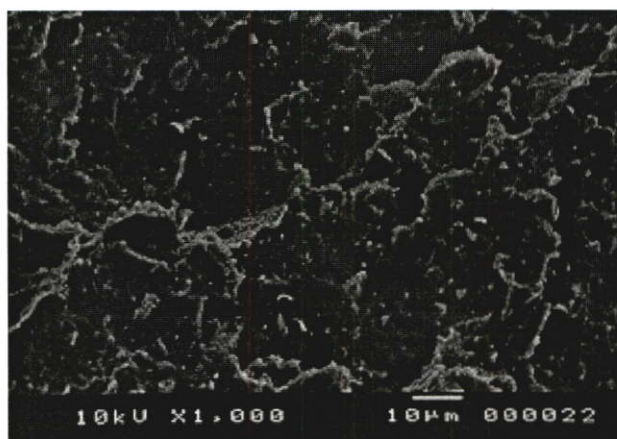
รูปที่ 4.26 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ปริมาณ 20 %wt เคลือบด้วยกรดสเดิยริกจากโรงงาน



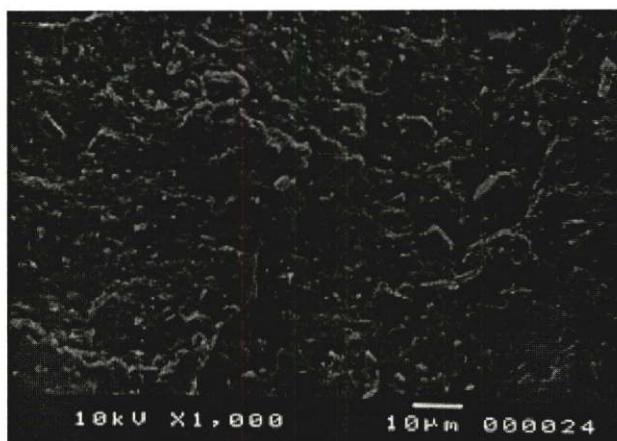
รูปที่ 4.27 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 0.1 %wt



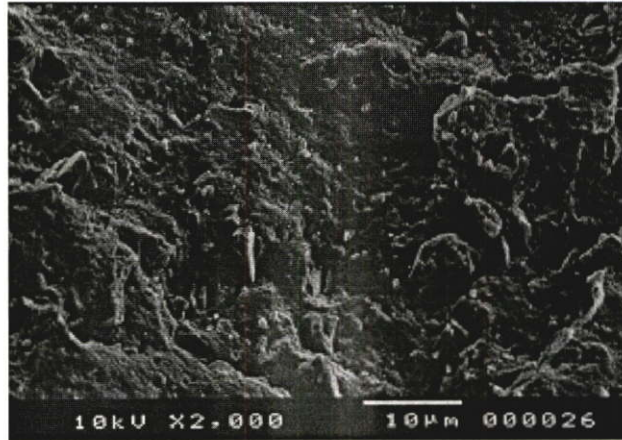
รูปที่ 4.28 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 0.25 %wt



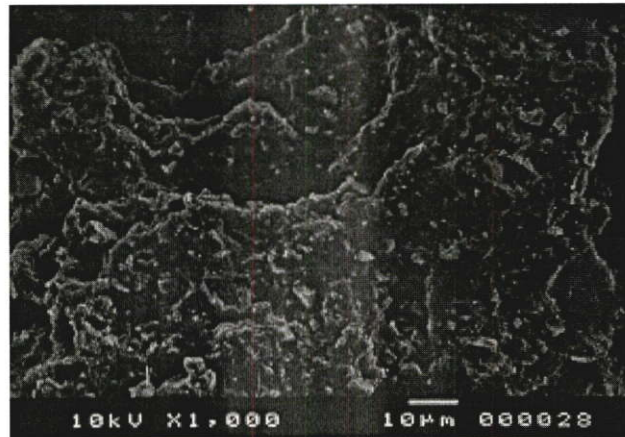
รูปที่ 4.29 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 0.5 %wt



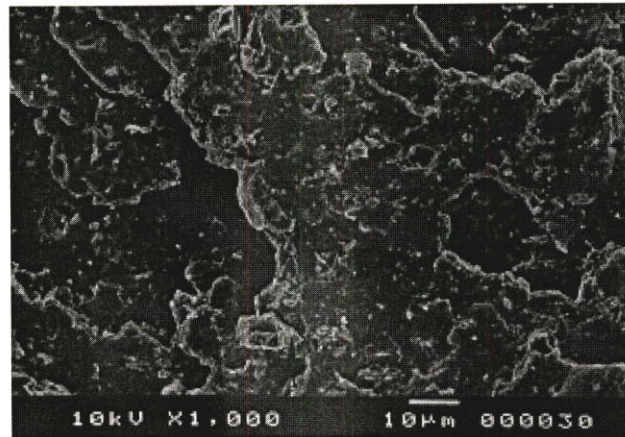
รูปที่ 4.30 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 1 %wt



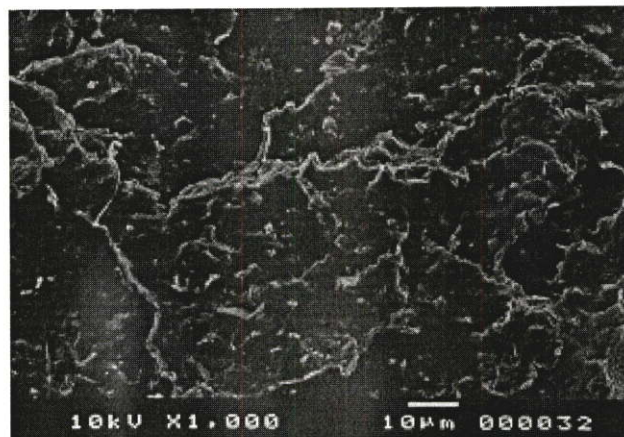
รูปที่ 4.31 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 2 %wt



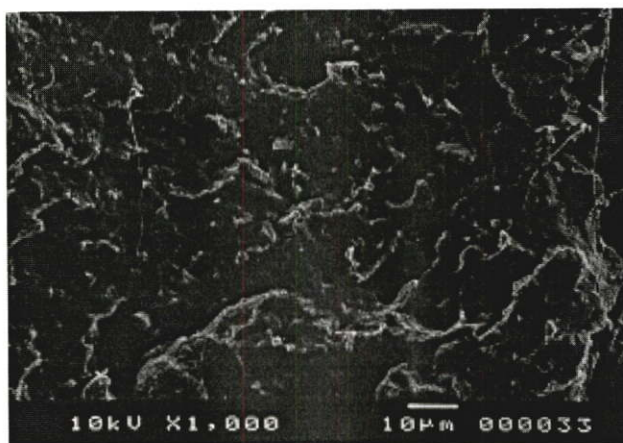
รูปที่ 4.32 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 4 %wt



รูปที่ 4.33 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 6 %wt



รูปที่ 4.34 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO₃ ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 8 %wt



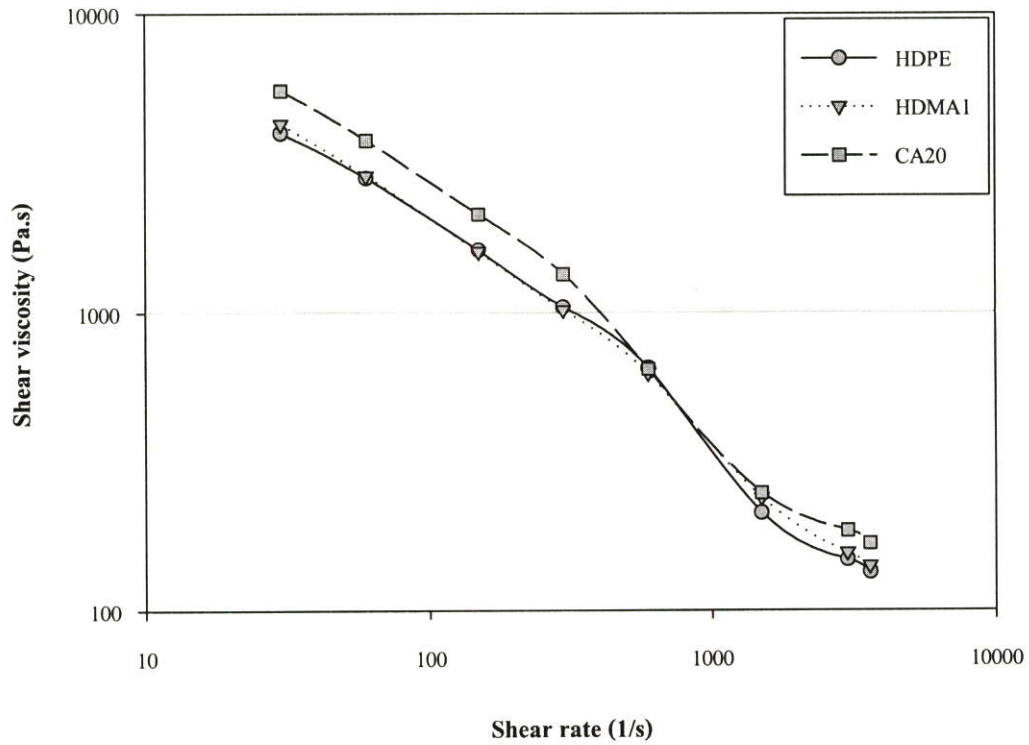
รูปที่ 4.35 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ปริมาณ 20 %wt ซึ่งมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมปริมาณ 10 %wt

จากรูปที่ 4.19 – 4.24 พบว่า ลักษณะของรอยแตกที่ผิวของ HDPE, HDMA0.5 และ HDMA1 มีความคล้ายกันเนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน และเมื่อมีการผสม CaCO_3 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีปริมาณของ CaCO_3 ใน HDPE มากขึ้น แต่เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนซึ่งเห็นได้ชัดเจนในรูป 4.24 ซึ่งมี CaCO_3 สูงถึง 30 %wt เนื่องจาก CaCO_3 เป็นสารที่มีสมบัติมีขั้วจึงมีแรงกระทำระหว่าง CaCO_3 ต่อ CaCO_3 มากกว่าแรงกระทำระหว่าง CaCO_3 ต่อ HDPE ทำให้การกระจายตัวยากขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น

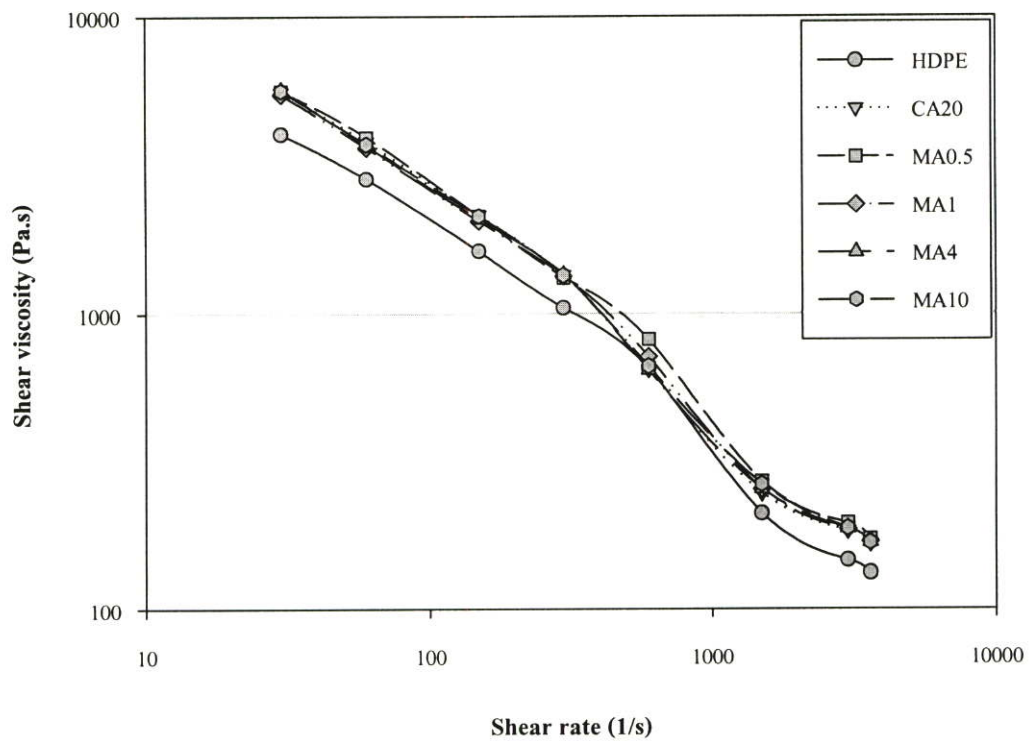
จากรูปที่ 4.25 – 4.26 พบว่าเมื่อใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายจะไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนแต่สมบัติเชิงกลจะดีขึ้นดังที่กล่าวในข้อ 4.3 เนื่องจากกรดสเตียริกช่วยให้ CaCO_3 กระจายตัวได้ดีขึ้นและพื้นที่ผิวสัมผัสของ CaCO_3 กับ HDPE มากขึ้น ในรูปที่ 4.27 – 4.35 พบว่าไม่เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนเมื่อใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมเนื่องจากเครื่อง SEM ไม่สามารถแยกความแตกต่างของ HDPE และ HDPE-g-MA ได้เนื่องจากมี HDPE เป็นพอลิเมอร์หลักเหมือนกัน จึงทำให้เห็นแค่อนุภาคของ CaCO_3 กับวัฏภาคที่ต่อเนื่องของ HDPE แต่สมบัติเชิงกลที่ได้มีความแตกต่างกันตามผลการทดลองในข้อ 4.3

4.6 สมบัติการไหล

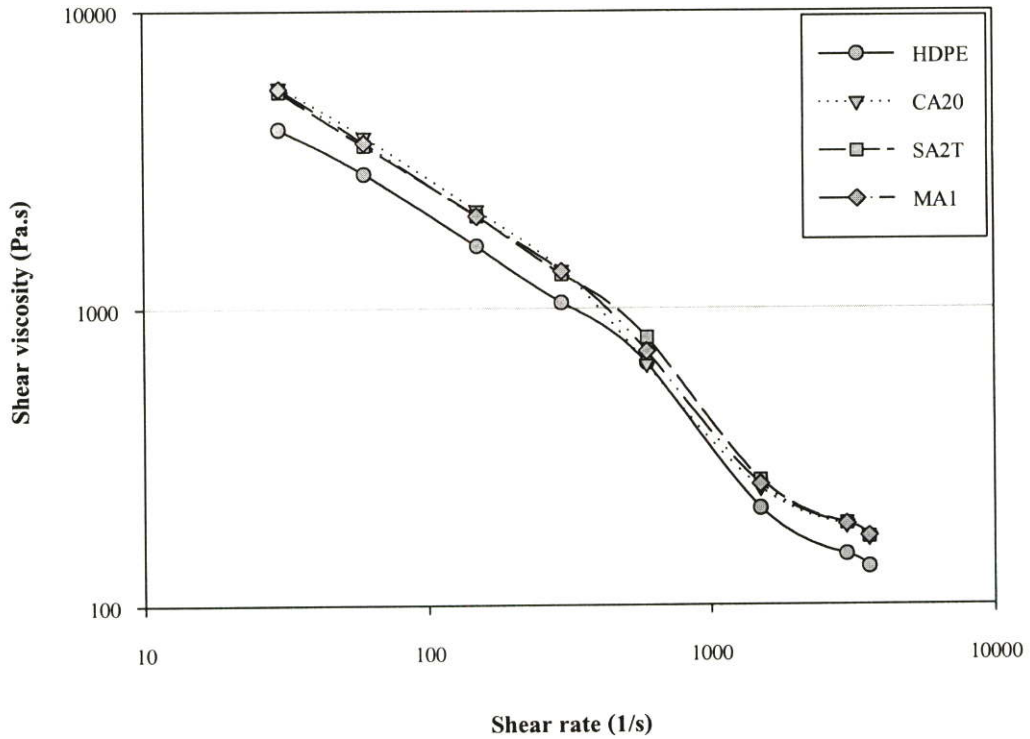
ทำการศึกษาผลของปริมาณ CaCO_3 กรดสเตียริกและ HDPE-g-MA ที่มีต่อสมบัติการไหลของ HDPE โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary rheometer) ผลการทดสอบจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือน (Shear viscosity) และอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) แสดงดังรูปที่ 4.36 – 4.39



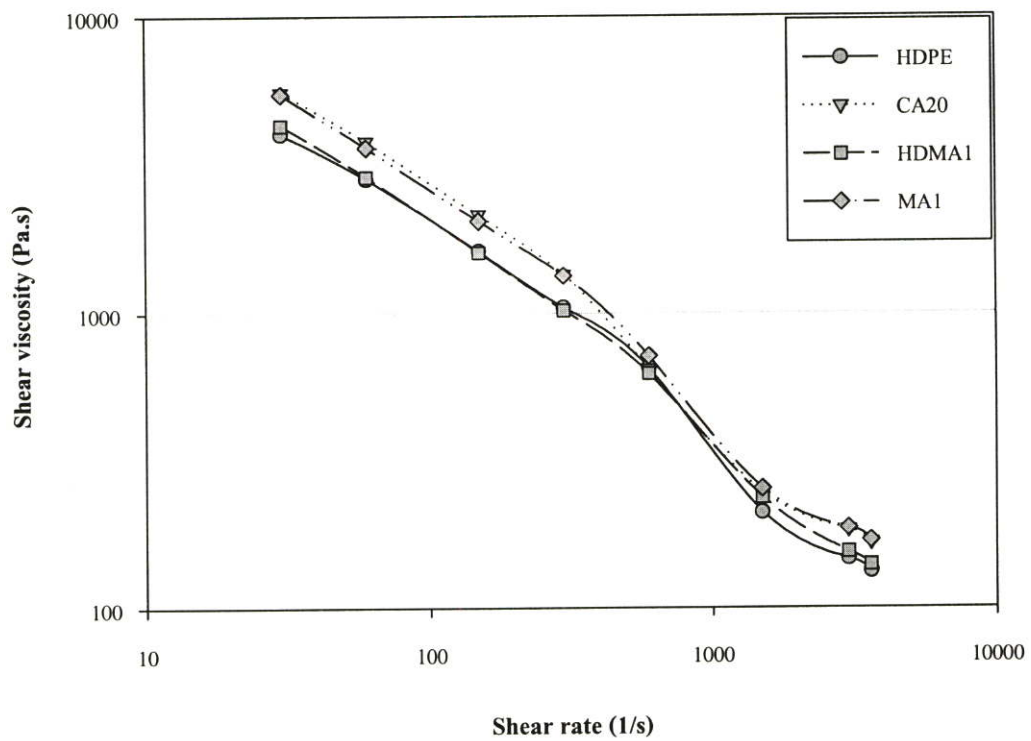
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของสูตร HDPE , HDMA1 และ CA20



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของสูตร HDPE , CA20 และสูตรที่มีการใช้ HDPE-g-MA ปริมาณต่างๆ



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของสูตร HDPE , CA20, SA2T และ MA1



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของสูตร HDPE , CA20, HDMA1 และ MA1

จากรูปที่ 4.36 – 4.39 พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่ได้มีพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic กล่าวคือ ความหนืดจะลดลงเมื่ออัตราการความเครียดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราการความเครียดเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการคลายตัวจากการเกี่ยวพันกัน (Disentanglement) ส่งผลให้ความหนืดลดลง ในรูปที่ 4.36 พอลิเมอร์สูตร HDMA1 ผสมระหว่าง HDPE (ดรชนีการไหล 0.4) กับ HDPE-g-MA (ดรชนีการไหล 5.5) มีค่าความหนืดไม่แตกต่างจาก HDPE บริสุทธิ์ เนื่องจากปริมาณของ HDPE-g-MA น้อยมากเมื่อเทียบกับ HDPE ในพอลิเมอร์ผสม แม้ว่าสารทั้งสองจะมีดรชนีการไหลที่แตกต่างกันมาก และเมื่อผสม CaCO_3 กับ HDPE แล้วส่งผลให้ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก CaCO_3 มีลักษณะเป็นของแข็งเมื่อผสมกับ HDPE และได้รับความร้อน สายโซ่ HDPE จะเกิดการเคลื่อนที่ ส่วนอนุภาคของ CaCO_3 ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ HDPE โดยเฉพาะบริเวณที่มีการสัมผัสกันระหว่างสายโซ่กับอนุภาค CaCO_3 จึงทำให้ความหนืดสูงขึ้น

จากรูปที่ 4.37 HDPE ทุกสูตรที่มี CaCO_3 20 %wt จะมีค่าความหนืดสูงกว่า HDPE บริสุทธิ์ เนื่องจากเหตุผลเดียวกับรูปที่ 4.36 และเมื่อใช้ HDPE-g-MA ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเป็นสารช่วยผสมระหว่าง HDPE กับ CaCO_3 พบว่าความหนืดมีค่าไม่แตกต่างกันเนื่องจากปริมาณ HDPE-g-MA มีน้อย

จากรูปที่ 4.38 เป็นการเปรียบเทียบการใช้ปริมาณ HDPE-g-MA 1 %wt เป็นสารช่วยผสมระหว่าง HDPE กับ CaCO_3 ซึ่งเท่ากับการใช้กรดสเตียริก 1 %wt เป็นสารช่วยกระจายตัวของ CaCO_3 ในสูตรที่มี CaCO_3 20 %wt พบว่าให้ค่าความหนืดทั้งสองสูตรไม่แตกต่างกันและไม่ต่างจากสูตร CA20 แม้ว่าการกระจายตัวของ CaCO_3 จะดีขึ้นเมื่อใช้กรดสเตียริกปรับปรุงพื้นผิว (ตามผลจากสมบัติเชิงกลในข้อ 4.3) แต่ผลดังกล่าวไม่ชัดเจนในสมบัติการไหล

จากรูปที่ 4.39 ในสูตร HDPE และ HDMA1 ไม่มี CaCO_3 อยู่ความหนืดจึงใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณของ HDPE-g-MA น้อยมากเมื่อเทียบกับ HDPE ในพอลิเมอร์ผสม แม้ว่าสารทั้งสองจะมีดรชนีการไหลที่แตกต่างกันมาก แต่ในสูตร CA20 และ MA1 มี CaCO_3 20 %wt ดังนั้นความหนืดของสูตร CA20 ใกล้เคียงกับ MA1 เนื่องจาก CaCO_3 มีลักษณะเป็นของแข็งเมื่อผสมกับ HDPE และได้รับความร้อนสายโซ่ HDPE จะเกิดการเคลื่อนที่ ส่วนอนุภาคของ CaCO_3 ซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนรูปร่างจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ HDPE โดยเฉพาะบริเวณที่มีการสัมผัสกันระหว่างสายโซ่กับอนุภาค CaCO_3 และเมื่อใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมระหว่าง HDPE กับ CaCO_3 พบว่าความหนืดมีค่าไม่แตกต่างกันเนื่องจากปริมาณ HDPE-g-MA มีน้อย ซึ่งความหนืดของสูตร CA20 และ MA1 สูงกว่าสูตร HDPE และ HDMA1 แสดงว่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นมีผลเนื่องจาก CaCO_3 เป็นหลัก จะเห็นได้จากสูตร HDMA1 กับ MA1 ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง HDPE ต่อ HDPE-g-MA เท่ากันแต่ต่างกันที่สูตร MA1 มีการใส่ CaCO_3 20 %wt

4.7 กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

4.7.1 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ในกระบวนการเป่าขึ้นรูป

เมื่อผสมสารตัวอย่างและทดสอบสมบัติต่างๆแล้วเลือกบางสูตรเพื่อนำมาผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปได้แก่ HDPE, CA20, MA0.5, MA1, MA4 และ SA2T โดยศึกษาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ผสมสูตรแต่ละสูตร (แสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก ก) ได้ผลดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ผสมสูตร

สูตร	อัตราการไหลเชิงปริมาตร (cm ³ /sec)	น้ำหนักพาริซันที่ไหลออกมา (kg/sec)	ความหนาแน่นขณะ หลอมเหลว (kg/m ³)
HDPE	0.69	0.53 x 10 ⁻³	770
CA20	0.67	0.60 x 10 ⁻³	904
MA0.5	0.71	0.65 x 10 ⁻³	916
MA1	0.73	0.66 x 10 ⁻³	910
MA4	0.75	0.68 x 10 ⁻³	910
SA2T	0.73	0.66 x 10 ⁻³	898

จากตารางที่ 4.5 พบว่าพอลิเมอร์ผสมทุกสูตรมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรใกล้เคียงกัน เนื่องจาก HDPE บริสุทธิ์มีความหนาแน่นขณะหลอมเหลวต่ำ พาริซันจึงมีน้ำหนักเบาแม้ว่าการมีความหนืดต่ำทำให้สามารถไหลได้ดี ในทางกลับกันพอลิเมอร์ที่ผสม CaCO₃ มีความหนาแน่นขณะหลอมเหลวสูงจึงทำให้พาริซันมีน้ำหนักมากกว่าแต่เนื่องจากความหนืดที่สูงกว่าทำให้ความสามารถในการไหลออกจากหัวฉายได้น้อยกว่า ดังนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรจึงได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

4.7.2 สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

4.7.2.1 น้ำหนักต่อชวด

เมื่อนำสารตัวอย่างมาเป่าขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์แล้วจึงนำมาทดสอบสมบัติทางกายภาพโดยการวัดน้ำหนักต่อชวดได้ผลดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 น้ำหนักต่อขวด

สูตร	น้ำหนัก (g)
HDPE	8.0
CA20	8.4
MA0.5	8.5
MA1	8.6
MA4	8.7
SA2T	8.5

จากตารางที่ 4.6 พบว่าน้ำหนักต่อขวดของ HDPE บริสุทธิ์มีค่าน้อยกว่า HDPE ที่ผสมสารตัวเติมและสารเติมแต่งชนิดอื่น เนื่องจากสารตัวเติมในที่นี้คือ CaCO_3 (ความหนาแน่น $2,700 \text{ kg/m}^3$) สูงกว่า HDPE (ความหนาแน่น 962 kg/m^3) จึงทำให้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมสูงกว่า HDPE บริสุทธิ์ดังที่กล่าวในข้อ 4.2 และส่งผลให้น้ำหนักต่อขวดของพอลิเมอร์ผสมสูงกว่า HDPE บริสุทธิ์ด้วย

4.7.2.2 ความหนาและการกระจายความหนาของขวด

นำผลิตภัณฑ์ที่เป่าขึ้นรูปแล้วมาตัดคอขวดและก้นขวดออกแล้วผ่าตรงรอยต่อจะได้รูปทรงที่ง่ายต่อการวัดความหนาของขวดเพื่อหาความหนาและการกระจายความหนาของขวดดังข้อ 3.3.6.2 (แสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก ง) ได้ผลดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความหนาและการกระจายความหนาของขวด

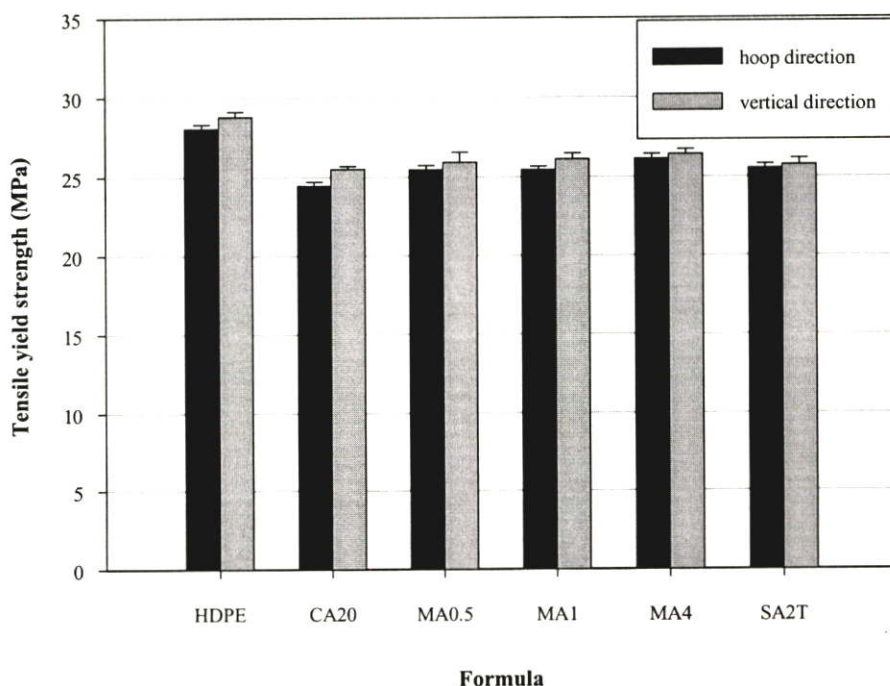
สูตร	แนวนอน				แนวตั้ง			
	ความหนาเฉลี่ย (mm)	ช่วงความหนา (mm)	ส่วนเบี่ยงเบน	การกระจายความหนา (%)	ความหนาเฉลี่ย (mm)	ช่วงความหนา (mm)	ส่วนเบี่ยงเบน	การกระจายความหนา (%)
HDPE	0.62	0.60-0.63	0.01	1.6	0.61	0.54-0.64	0.04	6.6
CA20	0.56	0.53-0.58	0.02	3.6	0.58	0.51-0.61	0.04	6.9
MA0.5	0.57	0.53-0.59	0.02	3.5	0.59	0.53-0.62	0.04	6.8
MA1	0.57	0.56-0.59	0.01	1.8	0.57	0.50-0.61	0.04	7.0
MA4	0.61	0.57-0.64	0.02	3.3	0.54	0.45-0.6	0.06	11.1
SA2T	0.57	0.56-0.58	0.01	1.8	0.58	0.51-0.62	0.04	6.9

จากตารางที่ 4.7 พบว่าความหนาในแนวนอนและแนวตั้งของผลิตภัณฑ์แต่ละสูตรใกล้เคียงกัน เนื่องจากการขยายตัวของพาริซันทั้งสองแนวนั้นใกล้เคียงกัน ส่วนการกระจายความหนาของผลิตภัณฑ์แต่ละสูตรในแนวตั้งมีค่ามากกว่าแนวนอน เนื่องจากในแนวนอนพาริซันขยายตัวเป็นทรงกระบอกทำให้ความหนาใกล้เคียงกัน ในขณะที่แนวตั้งนั้นพาริซันมีการห้อยตัวคงรูปอยู่ก่อนถูกเป่าขยายเป็นขวด ทำให้เกิดการยืดตัวเนื่องจากน้ำหนักของพาริซันตามแรงโน้มถ่วง จึงมีความแตกต่างของความหนาจากคอขวดถึงก้นขวด โดยที่ก้นขวดมีความหนากว่าที่คอขวด และผลิตภัณฑ์สูตรที่มี CaCO_3 มีความหนาน้อยกว่าสูตร HDPE บริสุทธิ์ เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พาริซันที่มี CaCO_3 มีการบวมตัวน้อยกว่าพาริซันของ HDPE บริสุทธิ์ ดังนั้นพาริซันของ HDPE บริสุทธิ์จึงหนากว่าพาริซันที่มี CaCO_3 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ HDPE บริสุทธิ์มีความหนากว่าผลิตภัณฑ์ที่มี CaCO_3 ในงานวิจัยนี้ผลิตภัณฑ์มีความหนาเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.54 – 0.64 mm

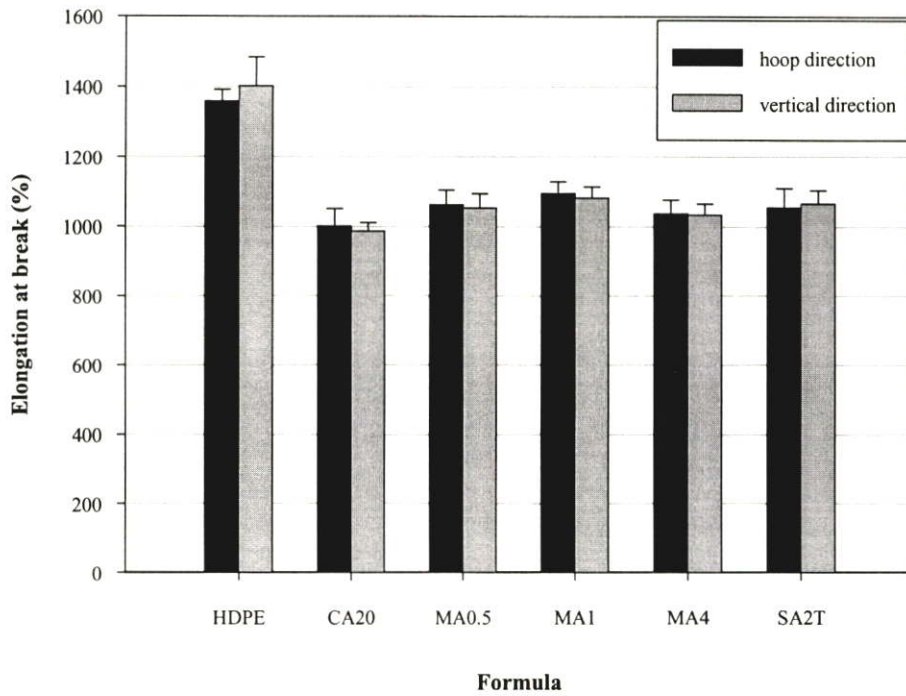
4.7.3 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

4.7.3.1 ความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดและมอดุลัส

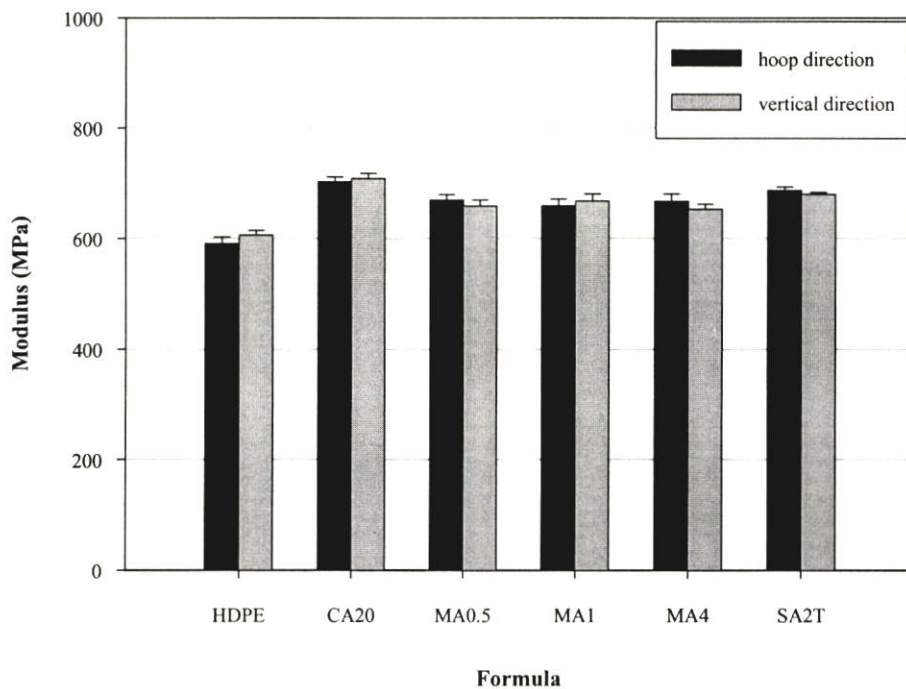
เมื่อสารตัวอย่างผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์แล้วนำผลิตภัณฑ์มาทดสอบสมบัติเชิงกลโดยตัดเป็นชิ้นงานรูปคัมเบลล์ใน 2 ทิศทางคือแนวเส้นรอบวงและแนวตั้งเพื่อทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึงซึ่งจะได้ค่า Tensile yield strength, %Elongation at break และ Young 's modulus โดยนำค่าที่ได้มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.40 – 4.42



รูปที่ 4.40 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดครากของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.41 ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดของผลิตภัณฑ์*



รูปที่ 4.42 ค่ามอดุลัสของผลิตภัณฑ์

* ข้อสังเกต เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดมีค่าสูงกว่าปกติเนื่องจากเมื่อชิ้นงานได้รับแรงดึงแล้วเกิดการยืดตัวของชิ้นงานเกินระยะการจับชิ้นงานที่กำหนดไว้

จากรูปที่ 4.40 – 4.42 พบว่าค่า Tensile yield strength, %Elongation at break และ Modulus ทั้งแนวเส้นรอบวง (Hoop direction) และแนวตั้ง (Vertical direction) มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการจัดเรียงตัวทั้งสองแนวมีความสมดุลกัน สาเหตุจากในแนวเส้นรอบวงนั้นพาริชั่นมีการขยายตัวไม่มากนัก เพราะผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่ใหญ่มากและมีลักษณะเป็นทรงกระบอกส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวในแนวเส้นรอบวงเพียงเล็กน้อย ส่วนในแนวตั้งนั้นพาริชั่นมีการขยายตัวเช่นกันแต่เป็นในแนวแรงโน้มถ่วงซึ่งมีการขยายตัวไม่มากเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสูงไม่มาก (107 mm) ส่งผลให้มีการจัดเรียงตัวในแนวตั้งเพียงเล็กน้อย กล่าวคือการจัดเรียงตัวทั้งสองแนวมีค่าใกล้เคียงกัน

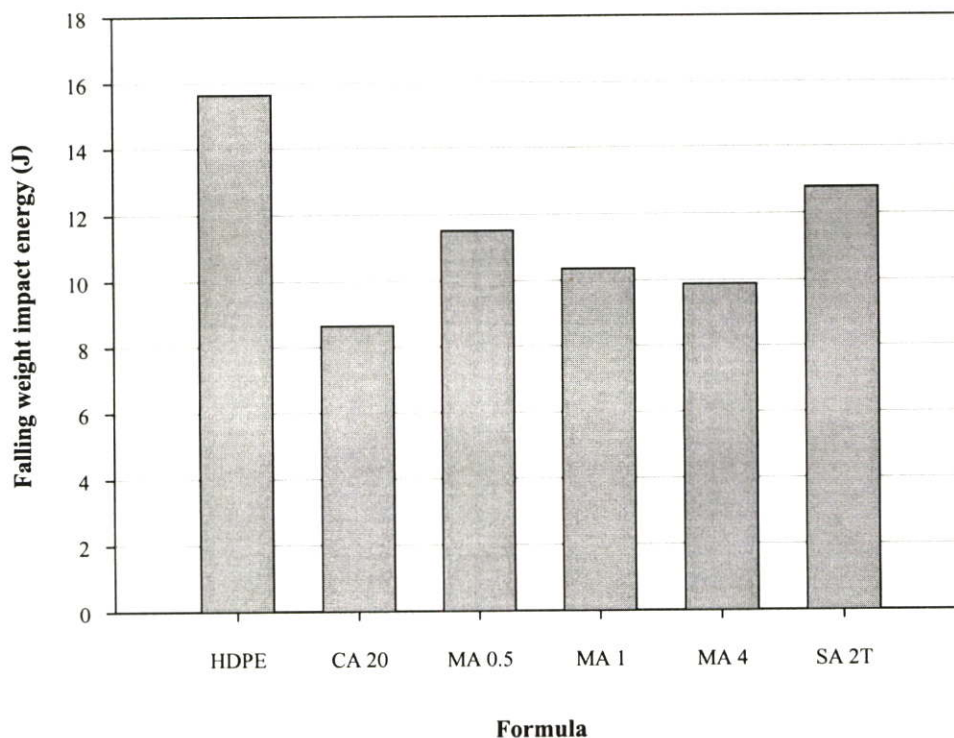
รูปที่ 4.40 ค่า Tensile yield strength ของ HDPE จะลดลงเมื่อผสมกับ CaCO_3 เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีเหมือนกับสายโซ่ของ HDPE และเกิดช่องว่างระหว่างพื้นผิวของ HDPE กับ CaCO_3 เมื่อรับแรงดึงทำให้เป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน เมื่อใช้กรดสเตียริกปรับปรุงพื้นผิวหรือใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ พบว่าค่า Tensile yield strength เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเนื่องจากกรดสเตียริกช่วยให้ CaCO_3 มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของ CaCO_3 กับ HDPE เพิ่มขึ้นและในกรณีของการใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมเป็นการเพิ่มวิฤภาคของพอลิเมอร์ทำให้อัตราส่วนของ CaCO_3 ใน HDPE ลดลง ส่งผลให้ค่า Tensile yield strength เพิ่มขึ้น โดยผลที่ได้นี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลที่ได้จากข้อ 4.3.1

จากรูปที่ 4.41 พบว่าค่า %Elongation at break ของผลิตภัณฑ์สูตรที่ผสม CaCO_3 ต่ำกว่าสูตรที่เป็น HDPE บริสุทธิ์เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีเหมือนกับสายโซ่ของ HDPE และไปขัดขวางการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสายโซ่จึงทำให้ความสามารถในการยืดลดลง เมื่อใช้กรดสเตียริกปรับปรุงพื้นผิวหรือใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ พบว่าค่า %Elongation at break เพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากกรดสเตียริกช่วยในการกระจายตัวของ CaCO_3 จึงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นและ HDPE-g-MA ที่ปริมาณต่ำช่วยในการผสมระหว่าง HDPE และ CaCO_3 ซึ่งเห็นไม่ชัดเจนเหมือนผลที่ได้ในข้อ 4.3 เนื่องจากชิ้นงานที่ทดสอบสมบัติในข้อ 4.3 ได้จากการฉีดขึ้นรูปจึงมีการจัดเรียงตัวของสายโซ่ที่ค่อนข้างดีกว่าชิ้นงานที่ได้จากผลิตภัณฑ์การเป่าขึ้นรูปซึ่งเป็นขูดขนาดเล็ก (เฉพาะในงานวิจัยนี้) แต่มีแนวโน้มคล้ายกับผลที่ได้จากข้อ 4.3.1

จากรูปที่ 4.42 พบว่าค่า Modulus ของผลิตภัณฑ์สูตรที่ผสม CaCO_3 สูงกว่าสูตรที่เป็น HDPE บริสุทธิ์เนื่องจากสมบัติของ CaCO_3 มีค่า Modulus สูงกว่า HDPE ดังนั้นเมื่อผสมกันจึงส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีค่า Modulus เพิ่มขึ้น เมื่อใช้กรดสเตียริกปรับปรุงพื้นผิวพบว่าค่า Modulus ไม่แตกต่างกันมากนัก และการใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณต่างๆ พบว่าค่า Modulus ลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการใช้ HDPE-g-MA เป็นการเพิ่มวิฤภาคของพอลิเมอร์ทำให้ค่า Modulus ที่ได้ลดลงโดยผลที่ได้นี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลที่ได้จากข้อ 4.3.1

4.7.3.2 ความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก

เมื่อสารตัวอย่างผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์แล้วนำมาทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก โดยนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาบรรจุน้ำให้เต็มแล้วปล่อยจากระดับความสูงที่แตกต่างกัน (แสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก จ) ได้ผลดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.43 ค่าพลังงานการกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักของผลิตภัณฑ์

จากรูปที่ 4.43 พบว่าค่า Falling weight impact energy ของ HDPE บริสุทธิ์ลดลงเมื่อผสมกับ CaCO_3 เนื่องจาก CaCO_3 ไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ดีเท่ากับสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักเมื่อได้รับแรงกระแทก ดังนั้นค่า Falling weight impact energy จึงลดลงส่งผลให้ความแข็งแรงกระแทกลดลง เมื่อใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัวหรือ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม พบว่าค่า Falling weight impact energy เพิ่มขึ้นเนื่องจากกรดสเตียริกช่วยในการกระจายตัวของ CaCO_3 ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น และการใช้ HDPE-g-MA ปริมาณต่ำจะช่วยในการผสมระหว่าง HDPE และ CaCO_3 แต่เมื่อ HDPE-g-MA มีปริมาณเพิ่มขึ้นอาจเกิดการแยกวัฏภาคของ HDPE-g-MA ที่มากเกินไปทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานส่งผลให้ค่า Falling weight impact energy ลดลงโดยผลที่ได้นี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลที่ได้จากข้อ 4.3.2

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของ HDPE ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมเพื่อนำไปใช้ในงานเป่าขึ้นรูปขวดพลาสติก และมีการใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัวหรือ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม จากการศึกษาสมบัติต่างๆ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 สมบัติเชิงกล

1. ค่า Tensile yield strength และ %Elongation at break มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นเนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดีเหมือนกับสายโซ่ของ HDPE และเกิดช่องว่างระหว่างพื้นผิวของ HDPE กับ CaCO_3 ทำให้เป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน แต่เมื่อใช้กรดสเตียริกปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 แล้วส่งผลให้ค่า Tensile yield strength และ %Elongation at break เพิ่มขึ้นเนื่องจาก CaCO_3 มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของ HDPE กับ CaCO_3 เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า Tensile yield strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มวิฏภาคของพอลิเมอร์ทำให้อัตราส่วนของ CaCO_3 ใน HDPE ลดลง ในขณะที่ HDPE-g-MA จะส่งผลให้ค่า %Elongation at break เพิ่มขึ้นจนถึงที่ปริมาณ 1 %wt ของ CaCO_3 แล้วมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA มากกว่า 1 %wt ของ CaCO_3 เนื่องจากการใช้ HDPE-g-MA ปริมาณต่ำจะช่วยในการผสมระหว่าง HDPE และ CaCO_3 แต่เมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มขึ้นอาจจะเกิดการแยกวิฏภาคของ HDPE-g-MA ที่มากเกินไปทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน ซึ่งความแตกต่างของค่าความแข็งแรงจึงไม่ได้เกิดจากสมบัติความเป็นผลึก เนื่องจาก CaCO_3 ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก
2. ค่า Modulus มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นเนื่องจากสมบัติของ CaCO_3 มีค่า Modulus สูงกว่า HDPE ในขณะที่ค่า Modulus ไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัว และเมื่อใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า Modulus มีแนวโน้มที่ลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการเพิ่มวิฏภาคของพอลิเมอร์

3. ค่า Impact strength มีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นเนื่องจาก CaCO_3 ไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ดีเท่ากับสายโซ่พอลิเมอร์ แต่เมื่อใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัวจะส่งผลให้ค่า Impact strength เพิ่มขึ้นเนื่องจาก CaCO_3 มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น และเมื่อใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า Impact strength เพิ่มขึ้นจนถึงที่ปริมาณ 1 %wt ของ CaCO_3 แล้วมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณ HDPE-g-MA มากกว่า 1 %wt ของ CaCO_3 เนื่องจากการใช้ HDPE-g-MA ปริมาณต่ำจะช่วยในการผสมระหว่าง HDPE และ CaCO_3 แต่เมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มขึ้นอาจจะเกิดการแยกวัฏภาคของ HDPE-g-MA ที่มากเกินไปทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน
4. ค่า Hardness มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นเนื่องจาก CaCO_3 มีค่า Hardness มากกว่า HDPE ในขณะที่ค่า Hardness ไม่แตกต่างกันเมื่อใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัวและใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากใช้กรดสเตียริกและ HDPE-g-MA ในปริมาณต่ำ

5.1.2 สมบัติการไหล

1. พอลิเมอร์ผสมมีพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic กล่าวคือความหนืดลดลงเมื่ออัตราความเครียดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราความเครียดเพิ่มขึ้นทำให้เกิดการคลายตัวจากการเกี่ยวพันกัน
2. CaCO_3 ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีความหนืดสูงกว่า HDPE บริสุทธิ์เนื่องจาก CaCO_3 ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ HDPE
3. การใช้สารช่วยกระจายตัวหรือสารช่วยผสมให้ค่าความหนืดของพอลิเมอร์ผสมที่ใกล้เคียงกันกับเมื่อไม่มีการใช้สารชนิดใดชนิดหนึ่ง

5.1.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูป

1. พอลิเมอร์ผสมมีอัตราการไหลเชิงปริมาตรใกล้เคียงกัน เนื่องจาก HDPE บริสุทธิ์มีความหนาแน่นขณะหลอมเหลวและความหนืดต่ำจึงสามารถไหลได้ดี ในขณะที่พอลิเมอร์ผสม CaCO_3 มีความหนาแน่นขณะหลอมเหลวและความหนืดสูงทำให้ความสามารถในการไหลต่ำ
2. น้ำหนักต่อขนาดของขวด HDPE บริสุทธิ์ต่ำกว่าขวดของ HDPE ที่มีการผสม CaCO_3 เนื่องจาก CaCO_3 มีความหนาแน่นสูงกว่า HDPE แต่ความหนาแน่นของขวด HDPE บริสุทธิ์สูงกว่าขวดของ HDPE ที่มีการผสม CaCO_3 เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 ขัด

ขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พาริชั่นที่มี CaCO_3 มีการบวมตัวน้อยกว่าพาริชั่นของ HDPE บริสุทธิ์

- ค่า Tensile yield strength, %Elongation at break และค่า Modulus ของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่า Tensile yield strength, %Elongation at break และค่า Modulus ของ พอลิเมอร์ผสมก่อนนำมาเป่าขึ้นรูป (ดังสรุปข้อ 5.1.1)
- ค่า Falling weight impact energy ของขวด HDPE บริสุทธิ์ลดลงเมื่อผสมกับ CaCO_3 เนื่องจาก CaCO_3 ไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ดีเท่ากับสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักเมื่อรับแรงกระแทก ในขณะที่การใช้กรดเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัวทำให้ค่า Falling weight impact energy เพิ่มขึ้น เนื่องจากการกระจายตัวของ CaCO_3 ดีขึ้น และค่า Falling weight impact energy มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ HDPE-g-MA ปริมาณ 0 ถึง 0.5 %wt และที่มากกว่านั้นจึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการใช้ HDPE-g-MA ปริมาณต่ำจะช่วยในการผสมระหว่าง HDPE และ CaCO_3 แต่เมื่อปริมาณ HDPE-g-MA เพิ่มขึ้นอาจเกิดการแยกวัฏภาคของ HDPE-g-MA ที่มากเกินไปทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน

จากผลงานวิจัยนี้พบว่า HDPE ที่ผสม CaCO_3 สูตรที่มีการใช้กรดเตียริกหรือ HDPE-g-MA 0.5 และ 1% มีสมบัติที่ใกล้เคียงกันซึ่งดีกว่าสมบัติของ HDPE ที่ผสม CaCO_3 สูตรอื่นๆ จึงน่าจะเลือกสูตร SA2T MA0.5 และ MA1 ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัดแทน HDPE บริสุทธิ์ที่ผสม CaCO_3 และศึกษาสมบัติต่างๆ ต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

- ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์ที่ผสม CaCO_3 เมื่อใช้สารช่วยกระจายตัวและสารช่วยผสมพร้อมกัน
- ขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อประโยชน์ที่มากขึ้นและศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้
- ศึกษาสภาวะในการเป่าขึ้นรูปว่ามีผลอย่างไรต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์
- นำสูตรที่มีสมบัติที่ดีไปประยุกต์ขึ้นรูปในรูปแบบอื่นเช่น การเป่าฟิล์ม และศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้

เอกสารอ้างอิง

1. Lee N. **Plastic Blow Molding Handbook**. New York : Van Nostrand Reinhold, Inc. 1992.
2. โฉลก ปิงตระกุล. รายงานการสัมมนา HDPE บรรจุภัณฑ์ทันสมัย. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์บรรจุหีบห่อ สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2526.
3. Wolfe R. **Plastic Handbook**. 2nd Ed. Newyork : McGraw-Hill, Inc. 1990.
4. Kaps R., Lecht R., and Schulte U. "High Density Polyethylene." *Kunststoffe Plast Europe*. vol. 86, no. 10, October 1996. pp. 1454-1458.
5. Jesse E. **Plastic Additive and Modifiers Handbook**. 1st Ed. London : Chapman & Hall, Inc. 1996.
6. Wade L.G. **Organic Chemistry**. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1995.
7. Zhanhai Y., Zhihui Y., Guoen S., Chaozhong L., Jin T., Luquan R., and Jinghua Y. "Morphology, Thermal Behavior, and Mechanical Properties of PA6/UHMWPE Blends with HDPE-g-MAH as a Compatibilizing Agent." *J.Appl.Polym.Sci.* vol. 75, no. 2, January 2000. pp. 232-238.
8. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เทคโนโลยีพอลิเมอร์ 1. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
9. สมหมาย ศิริเลิศสมบัติ. รายงานการสัมมนา HDPE บรรจุภัณฑ์ทันสมัย. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์บรรจุหีบห่อ สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2526.
10. นิพนธ์ วงศ์วิเศษศิริกุล. ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ 2. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2537.
11. Muangpluem S. "A Study of the Rheology and Properties of Blow Moulded High Density Polyethylene." Ph.D. Thesis of Polymer Science, Mahidol University. 1994.
12. อธิธิพล แจ่มชัด. เอกสารประกอบการเรียนวิชาปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
13. Han C.D. "Rheological Properties of Calcium Carbonate-Filled Polypropylene Melts." *J.Appl.Polym.Sci.* vol. 18, 1974. pp. 821-829.
14. Maiti S.N. and Jeyakumar R. "Mechanical and Melt Rheology Properties of CaCO₃-Filled Polyethylene." *J.Polym.Mater.* vol. 7, 1990. pp. 29-34.

15. Schreiber H.P., Viau J.M., Fetoui A., and Zhuo D. "Some Properties of Polyethylene Compounds with Surface-Modified Fillers." *Polym.Eng.Sci.* vol. 30, no. 5, March 1990. pp. 263-269.
16. Suetsugu Y. and White J.L. "The Influence of Particle Size and Surface Coating of Calcium Carbonate on the Rheological Properties of Its Suspensions in Molten Polystyrene." *J.Appl.Polym.Sci.* vol. 28, 1983. pp. 1481-1501.
17. Santelices A. "Melt Rheology Properties of CaCO₃-Filled Polyethylene and Its Processing." *ANTEC Proceedings.* 1994. pp. 3591-3595.
18. Fu Q. and Wang G. "Polyethylene Toughened by Rigid Inorganic Particles." *Polym.Eng.Sci.* vol. 32, no. 2, January 1992. pp. 94-97.
19. Papirer E., Schultz J., and Turchi C. "Surface Properties of Calcium Carbonate Filler Treated with Stearic Acid." *Eur.Polym.J.* vol. 20, no. 12, May 1984. pp. 1155-1158.
20. White J.L. and Tanaka H. "Experimental Investigations of Shear and Elongational Flow Properties of Polystyrene Melts Reinforced with Calcium Carbonate, Titanium Dioxide, and Carbon Black." *Polym.Eng.Sci.* vol. 20, no. 14, September 1980. pp. 126-136.
21. Jumpa S. "Elongational Rheometry and Processing of Filled Polyethylene Melts." Ph.D. Thesis, Institute of Polymer Technology and Material Engineering, Loughborough University, U.K. 1998.
22. พลชีพ ลิมพงษ์และธำรงค์ศักดิ์ ลาภวิบูลย์สุข. "การศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่บริสุทธิ์ และที่มีเคลือบคาร์บอนเป็นสารตัวเติม" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
23. คาริน วงศ์วัฒน์เสรษฐ์และพิทยา เหลืองวนิชประภา. "ผลของการเคลือบผิวสารตัวเติมเคลือบคาร์บอนที่มีผลต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.
24. Dealy J.M. and Mijangos F. "Effect of Filler Content and Additives on the Extrudate Swell of Polyethylene Pipe Resin." *Polym.Eng.Sci.* vol. 31, no. 16, August 1991. pp. 1176-1181.
25. Borden K.A., Keith A., Richard C.W., and Carl R.M. "Optimizing Properties of Talc-Filled Polypropylene Systems with a Polymeric Coupling Agent." *ANTEC Proceedings.* 1994. pp. 2761-2765.

26. ประมินทร์ ช้างเพชรและประภษณี แสงอโณทัย. “การปรับปรุงของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีเคลือบคาร์บอนเป็นสารตัวเติมโดยใช้สารคู่ควบ” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
27. Bikiaris D. and Panayiotou C. “LDPE/Starch Blends Compatibilized with PE-g-MA Copolymers.” *J.Appl.Polym.Sci.* vol. 70, no. 8, November 1998. pp. 1503-1521.
28. Katrin W. “Blends of Thermoplastic Polyurethane and Maleic-Anhydride Grafted Polyethylene. I : Morphology and Mechanical Properties.” *Polym.Eng.Sci.* vol. 39, no. 6, June 1999. pp. 1035-1048.
29. Larsen K.B., Kotlar H.K., and Gustafson C.G. “Polypropylene-Phenol Formaldehyde-Based Compatibilizers. III : Application in PP/PBT and PP/PPE Blends.” *J.Appl.Polym.Sci.* vol. 75, no. 3, January 2000. pp. 361-370.
30. Wulin Q., Kancheng M., and Hanmin Z. “Effect of Silane-Grafted Polypropylene on the Mechanical Properties and Crystallization Behavior of Talc/Polypropylene Composites.” *J.Appl.Polym.Sci.* vol. 77, no. 13, September 2000. pp. 2974-2977.
31. Srinivas S. and Sunggyu L. “Polystyrene-graft-Acrylic Acid as Compatibilizer of Polystyrene/Nylon6,6 Blends.” *Polym.Eng.Sci.* vol. 39, no. 11, November 1999. pp. 2274-2281.
32. Roberta A.S. “Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis.” *Annual Book of ASTM Standards.* vol. 14.02, 1992. pp. 582-585.
33. Roberta A.S. “Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry.” *Annual Book of ASTM Standards.* vol. 14.02, 1992. pp. 712-716.
34. มาลินี ชัยสุภกิจสินธุ์. **ปฏิบัติการเคมีพอลิเมอร์.** กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
35. Roberta A.S. “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.” *Annual Book of ASTM Standards.* vol. 8.01, 1992. pp. 155-171.
36. Roberta A.S. “Standard Test Method for Impact Resistance of Plastics and Electrical Insulating Materials.” *Annual Book of ASTM Standards.* vol. 8.01, 1992. pp. 58-74.
37. Roberta A.S. “Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness.” *Annual Book of ASTM Standards.* vol. 8.02, 1992. pp. 226-229.

38. Roberta A.S. "Standard Test Method for Determination of Properties of Polymeric Materials by Means of a Capillary Rheometer." *Annual Book of ASTM Standards*. vol. 8.03, 1992. pp. 201-207.
39. Roberta A.S. "Standard Test Method for Drop Impact Resistance of Blow-Molded Thermoplastic Containers." *Annual Book of ASTM Standards*. vol. 8.01, 1992. pp. 266-270.
40. Jacqueline I.K. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. vol. 10. Newyork : John Wiley & Sons, Inc. 1986.
41. Roberta A.S. "Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Tup (Falling Weight)." *Annual Book of ASTM Standards*. vol. 8.02, 1992. pp. 524-535.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การคำนวณปริมาณกรดสเตียริกที่เคลือบผิว CaCO_3

1) ปริมาณกรดสเตียริกใน CaCO_3 เกรด 2T

ซึ่งน้ำหนักตามตาราง ก-1

ตาราง ก-1 น้ำหนักสารที่ใช้คำนวณหาปริมาณกรดสเตียริกใน CaCO_3 เกรด 2T

ก่อนเผา	ครั้งที่ 1 (g)	ครั้งที่ 2 (g)
น้ำหนักครุชชีเบ็ด	54.0471	42.2717
น้ำหนักครุชชีเบ็ด + CaCO_3 เกรด 2T	55.4576	43.6118
น้ำหนัก CaCO_3 เกรด 2T	1.4105	1.3401
หลังเผา		
น้ำหนักครุชชีเบ็ด + CaCO_3 เกรด 2T	55.4420	43.5990
น้ำหนัก CaCO_3 เกรด 2T	1.3949	1.3273
น้ำหนักที่หายไป (น้ำหนักกรดสเตียริก)	0.0156	0.0128

จากตาราง ก-1 จะได้น้ำหนักของกรดสเตียริกครั้งที่ 1 คือ 0.0156 g

น้ำหนักของ CaCO_3 เกรด 2T ครั้งที่ 1 คือ 1.4105 g

เมื่อ CaCO_3 เกรด 2T 1.4105 g มีกรดสเตียริก 0.0156 g

ดังนั้น CaCO_3 เกรด 2T 100 g มีกรดสเตียริก 1.1060 g

น้ำหนักของกรดสเตียริกครั้งที่ 2 คือ 0.0128 g

น้ำหนักของ CaCO_3 เกรด 2T ครั้งที่ 2 คือ 1.3401 g

เมื่อ CaCO_3 เกรด 2T 1.3401 g มีกรดสเตียริก 0.0128 g

ดังนั้น CaCO_3 เกรด 2T 100 g มีกรดสเตียริก 0.9551 g

น้ำหนักเฉลี่ยของกรดสเตียริกคือ $\frac{1.1060 + 0.9551}{2} = 1.0301$ g

2

เพราะฉะนั้นใน CaCO_3 เกรด 2T มีกรดสเตียริกประมาณ 1%

2) ปริมาณกรดสเตียริกใน CaCO_3 เกรดเคลือบผิวเอง

ชั่งน้ำหนักตามตาราง ก-2

ตาราง ก-2 น้ำหนักสารที่ใช้คำนวณหาปริมาณกรดสเตียริกใน CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัย

ก่อนเผา	ครั้งที่ 1 (g)	ครั้งที่ 2 (g)
น้ำหนักครุชเบ็ด	48.8357	45.1683
น้ำหนักครุชเบ็ด + CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัย	50.2211	46.5694
น้ำหนัก CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัย	1.3854	1.4011
หลังเผา		
น้ำหนักครุชเบ็ด + CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัย	50.2080	46.5543
น้ำหนัก CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัย	1.3723	1.3860
น้ำหนักที่หายไป (น้ำหนักกรดสเตียริก)	0.0131	0.0151

จากตาราง ก-2 จะได้น้ำหนักของกรดสเตียริกครั้งที่ 1 คือ 0.0131 g
 น้ำหนักของ CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัยครั้งที่ 1 คือ 1.3854 g
 เมื่อ CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัย 1.3854 g มีกรดสเตียริก 0.0131 g
 ดังนั้น CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัย 100 g มีกรดสเตียริก 0.9456 g

น้ำหนักของกรดสเตียริกครั้งที่ 2 คือ 0.0151 g
 น้ำหนักของ CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัยครั้งที่ 2 คือ 1.4011 g
 เมื่อ CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัย 1.4011 g มีกรดสเตียริก 0.0151 g
 ดังนั้น CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัย 100 g มีกรดสเตียริก 1.0777 g
 น้ำหนักเฉลี่ยของกรดสเตียริกคือ $0.9456 + 1.0777 = 1.0116$ g

2

เพราะฉะนั้นใน CaCO_3 เกรดเคลือบผิวในงานวิจัยมีกรดสเตียริกประมาณ 1%

ภาคผนวก ข. การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก

กำหนด ΔH_f คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวของผลึก (พื้นที่ใต้พีคจากขั้นตอน heating)

%Crys1 คือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

ΔH_c คือเอนทาลปีของการตกผลึก (พื้นที่ใต้พีคจากขั้นตอน cooling)

%Crys2 คือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นใหม่

ΔH_0 คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวของ HDPE ที่มีความเป็นผลึก 100%
= 293 J/g [40]

$$\text{จะได้ } \%Crys_{1,2} = \frac{\Delta H_{f,c}}{\Delta H_0} \times \frac{100}{(100 - \%CaCO_3 \text{ ที่มีอยู่จริงในตาราง 4.1})} \times 100$$

ภาคผนวก ก. การคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ผสมสูตร

หาความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลวจาก

$$\text{ความหนาแน่นพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลว} = \frac{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลว}}{\text{ปริมาตรพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลว}}$$

$$\text{เมื่อน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลว} = \text{น้ำหนัก HDPE} + \text{น้ำหนัก CaCO}_3 + \text{น้ำหนักกรดสเตียริกหรือ HDPE-g-MA}$$

แต่น้ำหนักกรดสเตียริกหรือ HDPE-g-MA มีน้อยมาก = 0

$$\text{ดังนั้น น้ำหนักพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลว} = \text{น้ำหนัก HDPE} + \text{น้ำหนัก CaCO}_3 = 100$$

$$\text{และปริมาตรพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลว} = \frac{\text{น้ำหนัก HDPE}}{\text{ความหนาแน่น HDPE หลอมเหลว}} + \frac{\text{น้ำหนัก CaCO}_3}{\text{ความหนาแน่น CaCO}_3}$$

$$\text{เมื่อน้ำหนัก HDPE} = (100 - \% \text{CaCO}_3 \text{ ที่มีอยู่จริงในตาราง 4.1})$$

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่น HDPE หลอมเหลว} &= 0.8 \times \text{ความหนาแน่น HDPE ที่อุณหภูมิห้อง [21]} \\ &= 0.8 \times 962 = 770 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

และน้ำหนัก CaCO₃ = %CaCO₃ ที่มีอยู่จริงในตาราง 4.1

$$\text{ความหนาแน่น CaCO}_3 = 2,700 \text{ kg/m}^3$$

จะได้ ปริมาตรพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลวคือ

$$\frac{(100 - \% \text{CaCO}_3 \text{ ที่มีอยู่จริงในตาราง 4.1})}{770} + \frac{\% \text{CaCO}_3 \text{ ที่มีอยู่จริงในตาราง 4.1}}{2,700}$$

$$\text{ดังนั้น ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลว} = \frac{100}{\text{ปริมาตรพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลว}}$$

นำมาหาค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรในหน่วย m³/sec

$$= \frac{\text{น้ำหนักของพาริชั่นที่ไหลออกมา (ตาราง ก-1)}}{\text{ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมที่หลอมเหลว}}$$

ตาราง ก-1 น้ำหนักพาริชั่นและอัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ผสมสูตร

สูตร	น้ำหนักพาริชั่นที่ไหลออกมา (kg/sec)	อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m ³ /sec)
HDPE	0.53 x 10 ⁻³	0.69 x 10 ⁻⁶
CA 20	0.60 x 10 ⁻³	0.67 x 10 ⁻⁶
MA 0.5	0.65 x 10 ⁻³	0.71 x 10 ⁻⁶
MA 1	0.66 x 10 ⁻³	0.73 x 10 ⁻⁶
MA 4	0.68 x 10 ⁻³	0.75 x 10 ⁻⁶
SA 2T	0.66 x 10 ⁻³	0.73 x 10 ⁻⁶

ภาคผนวก ง. การคำนวณการกระจายความหนา

สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{การกระจายความหนา} = \frac{\text{ส่วนเบี่ยงเบน}}{\text{ความหนาเฉลี่ย}} \times 100$$

$$\text{เมื่อ ส่วนเบี่ยงเบน} = \left(\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1} \right)^{1/2}$$

$$\text{ความหนาเฉลี่ย} = \frac{\sum X_i}{n}$$

โดย $n = 5$ เมื่อทำการวัดในแนวนอนและแนวตั้งแนวละ 5 ค่าต่อหนึ่งขวด

แล้ว $n = 10$ เมื่อขวดที่วัดเพื่อหาค่าเฉลี่ยมีจำนวน 10 ขวด

ภาคผนวก จ. การคำนวณค่า Falling weight impact energy

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2463 โดยในงานวิจัยนี้ใช้ระดับความสูงที่ชั้น 2 ถึงชั้น 6 ของอาคารจุฬารัตน์ด้วยลักษณะ 1 คณะวิทยาศาสตร์และความแตกต่างของความสูงแต่ละระดับ (บานกระจกด้านข้างของอาคาร) คือ 0.7 m ซึ่งพื้นผิวที่ขาดกระทบคือพื้นปูนผิวเรียบ จะได้ค่าความสูงเฉลี่ยที่ขาดแตก (Mean failure height) แล้วนำมาคำนวณค่า Falling weight impact energy จาก

$$\text{Falling weight impact energy} = \text{Mean failure height} \times \text{Mean failure weight} \times F$$

โดย Mean failure weight คือน้ำหนักขวดเฉลี่ย (บรรจุน้ำเต็มขวดและปิดฝา)

F คือค่าคงที่เฉพาะในการคำนวณนี้ ซึ่งเท่ากับ 9.80665×10^{-3}

เมื่อความสูงมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรและน้ำหนักขวดมีหน่วยเป็นกิโลกรัม [41]

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	พลชีพ ลิมพงษ์
วันเกิด	17 ธันวาคม พ.ศ. 2520
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย
การศึกษา	- ระดับมัธยมจากโรงเรียนปทุมคงคา พ.ศ. 2532-2537 - ระดับปริญญาตรี (วท.บ. เคมีอุตสาหกรรม) จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2538-2541