

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดขวดพอลิเอทิลีนชนิด
ความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดดัดแปร

**EXTRUSION BLOW MOLDING PROCESS OF
MODIFIED CaCO_3 - FILLED HDPE BOTTLES**



ดพ.
๑๖3๒1/ก
2548

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... **60492**
วัน,เดือน,ปี..... - 3 ก.ค. 2549

๑๑๕๘๕๗๑๕

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548

ISBN 974-151-549-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EXTRUSION BLOW MOLDING PROCESS OF
MODIFIED CaCO₃ – FILLED HDPE BOTTLES**



**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**

2005

ISBN 974-151-549-9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอครีคของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดคัดแปร
นักศึกษา	นายณัฐวุฒิ พยัคศิริ
รหัสประจำตัว	44065607
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอครีคของขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่ง CaCO_3 ที่นำมาใช้มีทั้งเกรดที่ไม่มีและมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) หรือใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) เป็นสารช่วยผสม โดยทำการผสม CaCO_3 ในปริมาณต่าง ๆ คือ 0 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้ HDPE-g-MA ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ CaCO_3 ด้วยเครื่องอครีคชนิดเกลียวหนอนคู่ พบว่าการผสม CaCO_3 ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ขณะที่การบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างลดลง จากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค พบว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของ พอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน เวลาในการหล่อเย็นของขวดผลิตภัณฑ์ลดลงเมื่อมีการผสม CaCO_3 น้ำหนักขวด HDPE/ CaCO_3 สูงกว่าขวด HDPE บริสุทธิ์ แต่ความหนาขวด HDPE/ CaCO_3 น้อยกว่าเมื่อเทียบกับขวด HDPE บริสุทธิ์ ส่วนสมบัติเชิงกลของขวดผลิตภัณฑ์พบว่าค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก และค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทั้งน้ำหนักมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัสและความแข็งกมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการปรับปรุงพื้นผิว CaCO_3 ด้วย SA ส่งผลให้ค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก และค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทั้งน้ำหนักของขวดผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของขวด HDPE/ CaCO_3 สำหรับความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 และจากสมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึก และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของขวดผลิตภัณฑ์ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนสัญญาณวิทยาของพอลิเมอร์ตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นมีผลทำให้การกระจายตัวของ CaCO_3 ใน HDPE ยากขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่าสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเพิ่มความดันในขั้นตอนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Extrusion Blow Molding Process of Modified CaCO ₃ – filled HDPE Bottles
Student	Mr. Natthawud Payaksiri
Student ID	44065607
Degree	Master of Science
Programme	Polymer Technology
Year	2005
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee
Thesis Co-advisor	Assoc. Prof. Dr. Taweechai Amornsakchai

ABSTRACT

This research aims to study extrusion blow molding process of CaCO₃ – filled HDPE bottles. Both uncoated and stearic acid (SA) coated grades of CaCO₃ were used. Maleic anhydride grafted high density polyethylene (HDPE-g-MA) was used as a compatibilizer. CaCO₃ contents were varied at 0, 20 and 30% by weight and HDPE-g-MA was used at 1% by weight of CaCO₃. All compounds were mixed using a twin-screw extruder. It was found that an addition of CaCO₃ increased viscosity but decreased die swell of the samples. An extrusion blow molding machine was used to produce bottles. It was found that all samples had similar volumetric output rate. Cooling time of the blown products decreased with incorporation of CaCO₃. The weight of HDPE/ CaCO₃ bottle was higher than that of HDPE bottle, but bottle thickness of HDPE/ CaCO₃ bottle was less than that of HDPE bottle. From mechanical properties of the blown products, the results indicated that the tensile yield stress, %elongation at yield and falling weight impact strength of HDPE/ CaCO₃ bottle decreased with an increase of CaCO₃ contents but modulus and hardness were increased. Improvement of tensile yield stress, %elongation at yield and falling weight impact strength of the bottles were achieved by using SA coated CaCO₃. An incorporation of HDPE-g-MA had no effect on mechanical properties of the HDPE/CaCO₃ bottle. In addition, environmental stress cracking resistance (ESCR) tended to increase with increasing CaCO₃ contents. Thermal properties of samples showed that the HDPE crystalline melting temperature, recrystallization temperature and %crystallinity of all samples were similar. Morphology of the samples revealed that the difficulty of CaCO₃ dispersion in the HDPE matrix increased with increasing CaCO₃ contents. Moreover, properties of the samples were hardly changed with increasing pressures (4-5 bars) in the extrusion blow molding process.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยการได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการทำวิจัยในครั้งนี้จาก ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธิ และ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ผศ.ดร.รัตนวรรณ มกรพันธุ์ และ ดร.ชลดดา ฤตวิรุฬห์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกและช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ บริษัทสุรินทร์ธอ้อมยาเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด ในความอนุเคราะห์ให้แคลเซียมคาร์บอเนต และบริษัทไทยพอลิเอทิลีน จำกัด (มหาชน) ในความอนุเคราะห์ให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่าง ๆ อีกทั้งคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด นอกจากนี้ขอขอบคุณครอบครัวของผู้วิจัยที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีและสนับสนุนช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อนึ่งยังมีบุคคลอีกหลายท่านนอกเหนือจากที่กล่าวมาแล้ว ผู้ทำวิจัยขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ณัฐฉิ พัทม์ศิริ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์.....	XI
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.....	5
2.1.3 สมบัติทั่วไป.....	6
2.1.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	8
2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต.....	10
2.2.1 ความเป็นมา.....	10
2.2.2 กระบวนการผลิต.....	10
2.2.3 สมบัติทั่วไป.....	12
2.2.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	12
2.3 กรดสเตียริก.....	13
2.3.1 ความเป็นมา.....	13
2.3.2 กระบวนการผลิต.....	13
2.3.3 สมบัติทั่วไป.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	14
2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์.....	15
2.4.1 ความเป็นมา.....	15
2.4.2 กระบวนการผลิต.....	15
2.4.3 สมบัติทั่วไป.....	15
2.4.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	16
2.5 การคอมปาวด์และการผสมเพื่อเตรียมพลาสติกใช้ในกระบวนการแปรรูป.....	16
2.6 กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค.....	18
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	28
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	28
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.3 วิธีการทดลอง.....	30
3.3.1 การเตรียมสารตัวอย่าง.....	30
3.3.2 การทดสอบสารตัวอย่างผสม.....	31
3.3.2.1 การตรวจสอบความหนาแน่นสารตัวอย่างด้วยวิธี Density gradient column.....	31
3.3.2.2 การทดสอบสมบัติการไหล.....	31
3.3.2.3 ศึกษาการบวมตัวจากเครื่องทดสอบสมบัติการไหล.....	32
3.3.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูป.....	32
3.3.3.1 ศึกษาสภาวะการผลิต.....	32
3.3.3.2 ศึกษาอัตราการไหลเชิงปริมาตร.....	33
3.3.3.3 ศึกษาการบวมตัวจากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค.....	33
3.3.4 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์.....	33
3.3.4.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	34
3.3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.4.3 การทดสอบสมบัติความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....	35
3.3.4.4 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง.....	36
3.3.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	36
3.3.4.6 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	37
4.1 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่าง.....	37
4.2 สมบัติการไหล.....	38
4.3 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างจากเครื่องทดสอบสมบัติการไหล.....	41
4.4 กระบวนการเป่าขึ้นรูป.....	42
4.4.1 สภาพที่ใช้ในการผลิตขวดผลิตภัณฑ์.....	42
4.4.2 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ตัวอย่างในกระบวนการเป่าขึ้นรูป.....	45
4.4.3 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างจากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด.....	47
4.4.4 สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์.....	48
4.4.4.1 น้ำหนักต่อขวดของผลิตภัณฑ์.....	48
4.4.4.2 ความหนาแน่นและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์.....	49
4.4.5 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์.....	51
4.4.5.1 ความเค้นดึง ณ จุดคราก เปรอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากและ มอดุลัส.....	51
4.4.5.2 ความแข็งกด.....	55
4.4.5.3 ความแข็งแรงกระแทกแบบตึงน้ำหนัก.....	56
4.4.6 ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....	57
4.4.7 ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง.....	58
4.4.8 สมบัติทางความร้อน.....	59
4.4.9 การกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	67
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	68
เอกสารอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	72
ภาคผนวก ก. การคำนวณความหนาแน่น.....	72
ภาคผนวก ข. การคำนวณค่าการบวมตัว.....	73
ภาคผนวก ค. การคำนวณเวลาในการหล่อเย็น.....	74
ภาคผนวก ง. การคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรและอัตราความเครียดเฉือน.....	75
ภาคผนวก จ. การคำนวณสัมประสิทธิ์ความผันแปร.....	76
ภาคผนวก ฉ. การคำนวณความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก.....	77
ภาคผนวก ช. การวิเคราะห์ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....	78
ภาคผนวก ซ. การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเลือกใช้งานเป่าแบบผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ.....	9'
2.2 ผลของสารตัวเติม CaCO_3 ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม.....	21
2.3 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตสามวัฏภาค.....	23'
2.4 ผลของสารช่วยผสม EOR-MA ที่มีต่อสมบัติเชิงกล.....	23
2.5 สมบัติเชิงกลของ HDPE และ PS ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมที่ปริมาณ SEBS-g-MA แตกต่างกัน.....	24'
2.6 ผลของสารช่วยผสม LDPE-g-MA ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ HDPE กับ CaCO_3	25
2.7 ผลของค่าครั้นการไหลที่มีต่อสมบัติความต้านแรงดึงจากสภาพแวดล้อม.....	27
3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	28'
3.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	29
3.3 สูตรสารตัวอย่างที่เตรียม (% โดยน้ำหนัก)	30'
3.4 อัตราส่วนของสารละลายผสมในแต่ละกระบอกลง.....	31
4.1 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร.....	38'
4.2 รอบการผลิตโดยรวมของ HDPE และพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร.....	43
4.3 อัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในคานของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีคที่แต่ละรอบการหมุน ของสกรูของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร.....	46
4.4 น้ำหนักต่อขวด.....	48
4.5 ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์.....	50
4.6 ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง.....	59
4.7 ค่าสมบัติทางความร้อน.....	60
ช-1 จำนวนชิ้นงานที่เกิดการแตกหักภายในระยะเวลา 31 วัน.....	79

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สมการทางเคมีแสดงการเกิดของพอลิเอทิลีน.....4
2.2	โครงสร้างของพอลิเอทิลีนที่ผลิตได้จากกระบวนการ Zeigler.....4
2.3	โครงสร้างของพอลิเอทิลีนที่ผลิตได้จากกระบวนการ Phillips และ Standard oil.....4
2.4	ลักษณะทางกายภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (Omyacarb 2T)...10
2.5	กระบวนการสังเคราะห์กรดสเตียริก.....13
2.6	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์..15
2.7	กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค.....18
2.8	สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี CaCO ₃ เป็นสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกัน.....20
2.9	สมบัติเชิงกลของ PP ที่มี CaCO ₃ เป็นสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกันและมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA.....22
2.10	การบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE/HDPE-g-MA/PA6 ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน โดย x = PA6(5%), □ = 15%, + = 25%, O = 35%, ▽ = 45%, Δ = 55%.....24
3.1	เครื่องอครีคชนิดเกลียวหนอนคู่.....30
3.2	เครื่องเป่าขึ้นรูปพลาสติกชนิดอครีค.....32
3.3	ลักษณะผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป.....33
3.4	ลักษณะขวดที่ตัดส่วนเกินบริเวณปากขวดและกันขวดสำหรับวัดน้ำหนักต่อขวด.....34
3.5	ลักษณะชิ้นงานสำหรับวัดความหนาเมื่อแกน x เป็นการวัดในแนวตั้งและแกน y เป็นการวัดในแนวเส้นรอบวง.....34
3.6	ชิ้นงานรูปคัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบ.....35
3.7	การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม.....36
4.1	กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงและความหนาแน่น.....37
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง สูตร HDPE, CA20(2) และ CA30(2).....39
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง สูตร CA20(2), CA20(2g), CA20(2t), CA30(2), CA30(2g) และ CA30(2t).....40
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมตัวกับอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง ทุกสูตร.....41
4.5	เวลาในการหล่อเย็น (%) ของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรที่ P = 4 และ P = 5.....44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้ไฮดรอกซีปริมาณกับรอบการหมุนของสกรูของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร.....	45
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมตัวของพาริซันกับอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร.....	47
4.8 ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากของผลิตภัณฑ์ที่ P=4 และ P=5.....	52
4.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากของผลิตภัณฑ์ที่ P=4 และ P=5.....	52
4.10 ค่ามอดุลัสของผลิตภัณฑ์ที่ P=4 และ P=5.....	53
4.11 ค่าความแข็งกดของผลิตภัณฑ์ที่ P=4 และ P=5.....	55
4.12 ค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักที่ P=4 และ P=5.....	56
4.13 ค่าความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ที่ P=4 และ P=5.....	57
4.14 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA สูตร HDPE + 20%wt CaCO ₃	58
4.15 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ HDPE.....	60
4.16 รูปร่าง CaCO ₃ ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (Omyacarb 2T) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	62
4.17 ลักษณะพื้นผิวของ HDPE เมตริกซ์และการกระจายตัวของ CaCO ₃ ใน HDPE โดย (a) HDPE (b) HDPE + 20%wt CaCO ₃ และ (c) HDPE + 30%wt CaCO ₃	63
4.18 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ใน HDPE โดย (a) HDPE + 20%wt CaCO ₃ (b) HDPE + 20%wt CaCO ₃ + 1%wt HDPE-g-MA และ (c) HDPE + 20%wt CaCO ₃ (SA 1%wt).....	64
4.19 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO ₃ ใน HDPE โดย (a) HDPE + 30%wt CaCO ₃ (b) HDPE + 30%wt CaCO ₃ + 1%wt HDPE-g-MA และ (c) HDPE + 30%wt CaCO ₃ (SA 1%wt).....	65

สัญลักษณ์

HDPE	= พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง
CaCO ₃	= แคลเซียมคาร์บอเนต
HDPE-g-MA	= พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์
CA20(2)	= พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง + แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 20% โดยน้ำหนักเกรดที่ไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก
CA20(2g)	= พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง + แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 20% โดยน้ำหนักเกรดที่ไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก + พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของ CaCO ₃
CA20(2t)	= พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง + แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 20% โดยน้ำหนักเกรดที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกในปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของ CaCO ₃
CA30(2)	= พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง + แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักเกรดที่ไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก
CA30(2g)	= พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง + แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักเกรดที่ไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก + พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ในปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของ CaCO ₃
CA30(2t)	= พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง + แคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณ 30% โดยน้ำหนักเกรดที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกในปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของ CaCO ₃
ESCR	= ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม
T _m	= อุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก
ΔH _f	= เอนทาลปีของการหลอมเหลวผลึก (พื้นที่ใต้พีคจากขั้นตอน Heating)
%Cry _f	= เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง
T _c	= อุณหภูมิของการเกิดผลึก
ΔH _c	= เอนทาลปีของการเกิดผลึก (พื้นที่ใต้พีคจากขั้นตอน Cooling)
%Cry _c	= เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้พลาสติกเป็นที่รู้จักกันดีเพราะได้รับความนิยมและมีการใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพลาสติกกันอย่างแพร่หลายโดยทั่วไป เพียงมองดูรอบตัวเราก็จะพบว่าผลิตภัณฑ์พลาสติกอยู่ทุกหนทุกแห่งไม่ว่าจะอยู่ภายในบ้านหรือภายนอกบ้าน พลาสติกมีบทบาทต่อชีวิตประจำวันและอุตสาหกรรมในหลาย ๆ ด้าน เนื่องจากมีสมบัติพิเศษที่โดดเด่นกว่าวัสดุอื่น ๆ และยังสามารถใช้ทดแทนวัสดุธรรมชาติที่นับวันจะลดน้อยลงไปทุกที

พลาสติกราคาแพงเมื่อเทียบกับน้ำหนักวัตถุดิบกับวัสดุธรรมชาติอื่น ๆ แต่พลาสติกกลับมีการนำมาใช้มากเป็นเพราะมีน้ำหนักเบา ทนทาน สามารถผลิต คัดแปลงและแปรรูปได้ง่าย นอกจากนั้นพลาสติกมีสมบัติทางโครงสร้างพิเศษคือมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ดังนั้นในหนึ่งโมเลกุลจึงมีจำนวนอะตอมมากกว่าสารชนิดอื่นมาก ทำให้มีสมบัติหลายอย่างพร้อมกันไปคือสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) มีความแข็งแรง เหนียว ยืดหยุ่น สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties) เป็นฉนวนไฟฟ้า สมบัติทางเคมี (Chemical properties) ทนกรด ด่าง และสารเคมีอื่น ๆ ด้วย สมบัติดังกล่าวทำให้สินค้าที่ผลิตจากพลาสติกถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย

พลาสติกก่อนที่จะนำไปใช้งานจะต้องผ่านกระบวนการแปรรูปพลาสติกเพื่อให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์และเหมาะสมต่อการใช้งานแต่ละประเภท กระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นกระบวนการแปรรูปพลาสติกชนิดหนึ่งที่ใช้ในการผลิตขวดและภาชนะอื่น ๆ ที่มีรูปร่างกลวง เนื่องจากกระบวนการเป่าขึ้นรูปมีข้อดีคือ สามารถผลิตขวดให้มีขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ได้ การออกแบบเหมาะสมสำหรับภาชนะที่มีผนังบางและมีลักษณะเป็นเส้นโค้งงอเข้าด้านใน อัตราการผลิตสูง ค่าใช้จ่ายในการอัดแบบต่ำ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีน้ำหนักเบา และวัสดุที่ใช้ก็เป็นที่แพร่หลาย พลาสติกชนิดหนึ่งที่ได้รับคามนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาผลิตบรรจุภัณฑ์ประเภทขวดพลาสติกคือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [1] เนื่องจากความหนาแน่นที่สูงทำให้ขวดที่ได้มีความเหนียวและทนทานต่อการซึมผ่านได้ดี นอกจากนั้นยังมีความสามารถในการทรงรูปที่ดี สามารถผลิตให้เป็นรูปร่างตามต้องการได้ง่าย ใช้เวลาในการผลิตสั้น และที่สำคัญที่สุดคือน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับขวดแก้ว

พลาสติกมีอยู่หลายชนิดจึงมีการนำไปใช้งานแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสมบัติและงานที่เราต้องการ แต่มีอยู่หลายกรณีที่พลาสติกเพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้สมบัติที่ต้องการได้ จึงมีการนำพลาสติกมาผสมกับวัสดุอื่นเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติของพลาสติกให้ได้ตามความต้องการของงานที่จะใช้ วัสดุที่นำมาผสมรวมกับพลาสติกคือสารเติมแต่ง (Additives) ในบางครั้งสารเติมแต่งอาจนำมาใช้เพื่อลดปริมาณการใช้พลาสติกลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายของวัตถุดิบลดลง สารเติมแต่งที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าไปแทนที่พลาสติกเพื่อลดต้นทุนการผลิตและประหยัดปริมาณการใช้พลาสติกเรียกว่าสารตัวเติม (Filler) แต่การใช้สารตัวเติมก็มีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณการใช้เนื่องจากมีผลต่อการกระจายตัวในพลาสติก ถ้ามีการใส่ในปริมาณที่มากเกินไปการกระจายตัวก็จะไม่ดี จึงต้องใช้ในปริมาณที่พอเหมาะ นอกจากนั้นอาจมีการใช้สารเติมแต่งประเภทอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น สารช่วยผสม (Compatibilizer) สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) เพื่อช่วยให้การผสมและการกระจายตัวดีขึ้น

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการเป่าขึ้นรูปและสมบัติของขวดที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ที่มีการใช้สารเติมแต่งซึ่งได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (Maleic anhydride grafted high density polyethylene, HDPE-g-MA) ซึ่งแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำมาใช้มีทั้งเกรดที่ไม่มีการเคลือบผิวและมีการเคลือบผิว โดยสารที่นำมาเคลือบผิวคือ กรดสเตียริก (Stearic acid, SA)

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษากระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัด สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์และผลของสารเติมแต่งที่ใช้ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เกรดที่ไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) และสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) ที่มีต่อความสามารถในการขึ้นรูป ตลอดจนสมบัติของผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป เช่น สมบัติทางกายภาพ และสมบัติเชิงกล เป็นต้น

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเป่าขึ้นรูปของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) โดยการนำสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ชนิดที่ไม่เคลือบผิวและเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (SA) ปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของ CaCO_3 และสารช่วยผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) ในปริมาณ 1% โดยน้ำหนักของ CaCO_3 มาใช้เป็นสารเติมแต่งใน HDPE โดยในขั้นตอนการผสมจะทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ CaCO_3 ในปริมาณ 20 และ 30% โดยน้ำหนัก จากนั้นนำพอลิเมอร์ผสมที่ได้มาศึกษาสมบัติการไหล แล้วนำไปผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ เพื่อศึกษาความสามารถในการขึ้นรูป สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูป และสมบัติของผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์ประเภทขวดจาก HDPE ที่มี CaCO_3 ผสมอยู่
- 1.4.2 ได้ทราบถึงอัตราส่วนของสารตัวเติม CaCO_3 ที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้บรรจุภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีเหมาะต่อการนำไปใช้งาน
- 1.4.3 เพื่อเป็นแนวทางในการลดการใช้พลาสติกเนื่องจากพลาสติกสังเคราะห์มาจากพวกปิโตรเลียมซึ่งเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีจำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

2.1.1 ความเป็นมา

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก และมีการนำมาใช้งานในรูปแบบที่หลากหลายแตกต่างกันไปในชีวิตประจำวันของเรา เช่น ขวดภาชนะ เครื่องใช้ในครัวเรือน ถัง ของเล่น และบรรจุภัณฑ์ประเภทอื่นอีกมากมาย พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เกิดจากการนำเอทิลีนมอนอเมอร์มาผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน สารตั้งต้นคือเอทิลีนได้จากอีเทนซึ่งสารพวกนี้ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี



รูปที่ 2.1 สมการทางเคมีแสดงการเกิดของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

แต่โครงสร้างจะเป็นแบบเส้นตรงหรือกิ่งสั้น ๆ นั้นขึ้นอยู่กับแต่ละวิธีการบวนการผลิตซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

- กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process) จะให้โครงสร้างแบบเส้นตรงแต่สามารถให้เกิดกิ่งเล็ก ๆ ได้โดยใช้โคมอนอเมอร์

รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผลิตได้จากกระบวนการ Zeigler [1]

- กระบวนการฟิลลิปส์และสแตนดาร์ดออย (Phillips and Standard oil process) จะให้โครงสร้างแบบกิ่งปานกลาง

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผลิตได้จากกระบวนการ Phillips และ Standard oil [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงมีอยู่ด้วยกัน 5 วิธีคือ [2]

1. กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process)

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เกิดโดยวิธีนี้เป็นแบบโคออร์ดิเนชัน โดยจะเกิดสารเชิงซ้อนโคออร์ดิเนตระหว่างมอนอเมอร์กับตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้คือไทเทเนียมเตตระคลอไรด์กับอลูมิเนียมอัลคิล เช่น อลูมิเนียมไตรเอทิล เวลาเตรียมจะผ่านเอทิลีนมอนอเมอร์เข้าไปในเตาปฏิกรณ์ภายใต้ความดันต่ำและมีสารเจือจาง (diluent) เช่น โทลูอีน ปฏิกิริยาต้องทำในบรรยากาศไนโตรเจน ต้องไม่มีความชื้นและออกซิเจนเพราะจะทำให้ประสิทธิภาพของตัวเร่งลดลง ปกติปฏิกิริยาจะใช้อุณหภูมิประมาณ 70°C ความยาวของโมเลกุลขึ้นกับปริมาณ Al-Ti ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และมักจะใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวย้ายสายโซ่ (Chain transfer agent) โครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ได้จะมีหมู่เอทิลเพียง 5-7 หมู่ต่ออะตอมของคาร์บอน 1,000 อะตอม และไม่ปรากฏโซ่กิ่งที่เป็นหมู่บิวทิล โดยพอลิเมอร์จะมีความหนาแน่นประมาณ 0.945 g/cm^3

2. กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process)

วิธีนี้ใช้ความดันประมาณ 30-40 atm อุณหภูมิ $90-160^{\circ}\text{C}$ ใช้โครเมียมออกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (CrO_3) และมีตัวทำละลาย เช่น ไซโคลเฮกเซน ตัวเร่งที่ใช้เตรียมโดยใส่ซิลิกา-อลูมินากับสารละลายเกลือโครเมียมเผาให้ถึง $400-800^{\circ}\text{C}$ ในอากาศ เมื่อปฏิกิริยาเกิดแล้วผ่านของผสมไปยังที่แยกของเหลว-ก๊าซเพื่อแยกเอทิลีนมอนอเมอร์ พอลิเมอร์จะถูกแยกออกจากตัวทำละลายโดยให้ความร้อนสูง (บางทีก็อาจตกตะกอนโดยทำให้เย็นก็ได้) HDPE ที่ได้มีความหนาแน่นสูง (0.96 g/cm^3) และมีโครงสร้างเชิงเส้นที่เกือบสมบูรณ์ โดยมีหมู่เมทิล 3 หมู่ต่ออะตอมของคาร์บอน 1000 อะตอม และไม่ปรากฏโซ่กิ่งที่เป็นหมู่เอทิลและบิวทิล

3. กระบวนการสแตนดาร์ดออย (Standard oil process)

วิธีนี้คล้าย ๆ กระบวนการฟิลลิปส์ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประกอบด้วยโลหะออกไซด์ เช่น โมลิบดีนัมไดออกไซด์กับอลูมินา ซึ่งเตรียมได้โดยเผาอลูมินากับแอมโมเนียม โมลิบเดต ประมาณ $500-600^{\circ}\text{C}$ และผสมกับสารที่เป็นตัวช่วยริดิซ์ เช่น โลหะหมู่ IA IIA หรือพวกไฮดรายเป็นตัวช่วยกระตุ้นให้ว่องไวต่อปฏิกิริยา ความดันใช้ประมาณ 40-80 atm อุณหภูมิ $230-270^{\circ}\text{C}$ ใช้ตัวทำละลายพวกไฮโดรคาร์บอน ผลผลิตที่ได้มีความหนาแน่นประมาณ 0.96 g/cm^3 ซึ่งเท่า ๆ กับที่ได้จากกระบวนการฟิลลิปส์น้ำหนักโมเลกุลก็ใกล้เคียงกัน

4. กระบวนการยูเนียนคาร์ไบด์ก๊าซเฟส (Union Carbide gas phase process)

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผลิตโดยกระบวนการก๊าซเฟส เอทิลีนจะถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการในเวลาเดียวกับ Fluidizing gas อุณหภูมิที่ใช้ $75-100^{\circ}\text{C}$ และความดันที่ใช้โดยทั่วไป 7-20 atm โดยจะใช้โลหะทรานซิชันที่มีประสิทธิภาพสูงแบบฟิลลิปส์ (โครเมียมออกไซด์) หรือแบบซีเกลอร์ (ไทเทเนียม) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เม็ดของพอลิเอทิลีนจะเกิดบนอนุภาคของตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เร่งปฏิกิริยาซึ่งอยู่ใน Fluidized bed พอลิเอทิลีนที่ได้จากกระบวนการนี้มีความหนาแน่น 0.94-0.96 g/cm³

5. กระบวนการเมทัลโลซีน (Metallocene-based process)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใหม่ที่สุด โดยความแปลกใหม่ของกระบวนการนี้จะมีผลอย่างมากในการควบคุมลักษณะที่เหมือนกับของความยาวของสายโซ่ องค์ประกอบความเป็นกึ่ง และ Stereoregularity

กระบวนการเมทัลโลซีนเป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพมาก โดยปริมาณผลผลิตที่ได้มากคือได้พอลิเมอร์ 1 ตันต่อกรัมของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อชั่วโมง

เมทัลโลซีนจะมีสูตร L_2MX_2 โดย M คือโลหะทรานซิชันหมู่ 4 เช่น ไทเทเนียม X คือหมู่ฮาโลเจนหรือ อัลคิล ฟีนิล เบนซิล และ L คือลิแกนด์

เมทัลโลซีนเชิงซ้อนที่ใช้จะมี 2 ประเภทคือ ระบบ Bicomponent และระบบ Single component โดยในระบบ Bicomponent นั้นผลผลิตจะมากที่ระหว่างอุณหภูมิ 0-40 °C แต่จะมีมวลโมเลกุลมากที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะใช้ไฮโดรเจนในการควบคุมน้ำหนักโมเลกุล ส่วนในระบบ Single component อุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ระหว่าง -20-15 °C

2.1.3 สมบัติทั่วไป

HDPE เป็นของแข็งแบบกึ่งผลึก (Partially crystalline) ซึ่งมีสมบัติความยืดหยุ่นอันเป็นผลมาจากปริมาณของส่วนที่เป็นผลึก (Crystal phase) และปริมาณของส่วนอสัณฐาน (Amorphous phase) ส่วนที่เป็นผลึกนั้นจะให้สมบัติของความแข็งและจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่ส่วนอสัณฐานจะให้ความยืดหยุ่นและการทนต่อแรงกระแทก (Impact resistance)

HDPE มีน้ำหนักเบา ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 0.96-0.97 และมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรงเกือบตลอดมีโซ่กิ่งน้อยมาก สายโซ่พอลิเมอร์จึงมีความเป็นระเบียบมากเป็นเหตุให้พอลิเมอร์นั้นมีความเป็นผลึกสูง (ร้อยละ 60-70 %) จุดหลอมเหลวสูงถึง 135 °C

สมบัติทางไฟฟ้านั้น เนื่องจาก HDPE เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกไม่ขึ้นกับอุณหภูมิจึงเหมาะกับงานที่ใช้เป็นฉนวน เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก

สมบัติทางแสง เนื่องจาก HDPE มีความเป็นผลึกสูงและมีดัชนีหักเหจากส่วนที่เป็นอสัณฐานต่างกันมาก ดังนั้นแผ่นฟิล์มบางของ HDPE จะมีความโปร่งแสง

สมบัติในการละลาย ปกติพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวทำละลายใด ๆ ที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 70 °C ขึ้นไปจะเริ่มพองและละลายได้ในตัวทำละลายพวกโทลูอีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไซลีน และไตรคลอโรเอทิลีน เป็นต้น ทนต่อกรดและด่างได้ดี จึงมักใช้ทำภาชนะบรรจุกรด ด่าง

HDPE ที่หลอมเหลวความหนืดจะลดลงและมีการไหลแบบ Non-newtonian liquid ที่อุณหภูมิระหว่าง 140-200 °C แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 300°C จะมีการไหลแบบ Newtonian liquid ประมาณ 20% ของพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีนที่ใช้จะเป็น HDPE และโดยส่วนใหญ่จะเป่าขึ้นรูปเป็นขวด เนื่องจากความหนาแน่นที่สูงทำให้ HDPE มีความเหนียวและทนต่อการซึมผ่านของก๊าซได้ดี

การเลือกใช้พอลิเอทิลีนให้เหมาะสมกับงานเป่าแบบ

พอลิเอทิลีนที่ใช้ในงานเป่าแบบมี 4 ชนิดคือ

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE)
3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)
4. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นตรง (LLDPE)

แต่ที่นิยมใช้ในงานเป่าแบบมากที่สุดคือ HDPE เนื่องจากมีความสามารถในการทรงรูปที่ดี

ในกระบวนการเป่าแบบการเลือกใช้พลาสติกเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและเหมาะสมกับสภาพการใช้งานจะต้องพิจารณาถึงสมบัติพื้นฐานของพลาสติก สมบัติพื้นฐานของ HDPE มีดังนี้

1) ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นจะแสดงถึงความสามารถในการตกผลึก พลาสติกที่มีความหนาแน่นสูงจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความทรงรูปดีและมีความแข็งแรง แต่จะมีผลทำให้ความต้านทานแรงกระแทกและความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมลดลง

2) ครรชนิการไหล (Melt flow index, MFI)

ครรชนิการไหลแสดงถึงความสามารถในการไหลตัวของพลาสติกเมื่อหลอมเหลว พลาสติกที่มีค่าครรชนิการไหลตัวต่ำจะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านแรงกระแทก และความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมสูงกว่าพลาสติกที่มีค่าครรชนิการไหลสูง นอกจากนี้ยังให้ความเนียนของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า พลาสติกที่มีค่าครรชนิการไหลต่ำ เมื่อหลอมเหลวจะถูกขับออกจากเครื่องจักรได้ยากและความสามารถในการทรงรูปเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเม็ดพลาสติกที่มีค่าครรชนิการไหลสูง

HDPE ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการเป่าแบบ สามารถแบ่งเป็นกลุ่มได้ 4 กลุ่ม ซึ่งเป็นการแบ่งตามครรชนิการไหล ดังนี้

- ครรชนิการไหล 0.7-2.0 กรัม/10 นาที เป็นเกรดที่ใช้เป่าขวดนมเป็นส่วนใหญ่ ต้องการการทำงานเร็ว ไม่เน้นสมบัติทางกายภาพเป็นพิเศษเนื่องจากใช้แล้วทิ้ง

- ครรชนีการไหล 0.3-0.4 กรัม/10 นาที เป็นเกรดที่นิยมใช้กันมาก ใช้เป่าขวด แทบทุกประเภทแต่มีขนาดไม่เกิน 5 ลิตร เช่น ขวดเครื่องสำอาง ขวดน้ำยาทำความสะอาด ขวดน้ำมันเครื่อง ขวดน้ำมันเบรค เพราะต้องการสมบัติความต้านแรงเค้น

- ครรชนีการไหล 0.1-0.3 กรัม/10 นาที เป็นเกรดที่ใช้เป่าขวดหรือถังขนาดกลางมีปริมาตรไม่เกิน 20 ลิตร เพราะต้องการสมบัติในเรื่องความต้านแรงกระแทก

- ครรชนีการไหลน้อยกว่า 0.1 กรัม/10 นาที เป็นเกรดที่ใช้เป่าผลิตภัณฑ์ลักษณะพิเศษ เช่น ถังน้ำมันรถยนต์ ถังน้ำมันต่าง ๆ ถึงสารเคมีขนาด 40 ลิตรขึ้นไป ซึ่งต้องการสมบัติในเรื่องความต้านแรงเค้น ความต้านแรงกระแทกสูงเป็นพิเศษ เกรดนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงประเภทน้ำหนักโมเลกุลสูง หรือ High Molecular Weight

3) การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight distribution, MWD)

สมบัติพื้นฐานที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเลือกใช้ HDPE ในการเป่าแบบคือ การกระจายน้ำหนักโมเลกุล การเลือกใช้พลาสติกที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบกว้างจะช่วยลดปัญหาการแปรรูปได้ การเลือกใช้พลาสติกที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลแบบกว้าง นอกจากจะช่วยให้ขั้วพลาสติกเหลวออกจากเครื่องจักรง่ายขึ้นแล้ว ยังช่วยเพิ่มความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม และช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีผิวเรียบเนียนขึ้น แต่จะมีผลทำให้ความแข็งแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์และความแข็งแรงลดลงเล็กน้อย

2.1.4 การประยุกต์ใช้งาน

พอลิเอทิลีนจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณการใช้งานสูงที่สุด โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงนิยมนำมาขึ้นรูป ประมาณ 40 % ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงใช้ทำบรรจุภัณฑ์ประเภทขวด [2] นอกจากนั้นก็จะเป็นภาชนะสำหรับบรรจุภัณฑ์อื่น ๆ ที่ต้องใช้กับงานที่มีความต้านทานสูง ทนต่อแรงเค้นสูง และมีน้ำหนักไม่สูงมากนัก

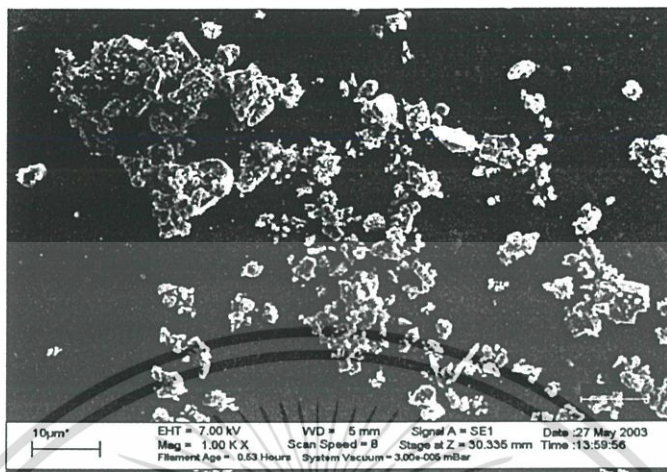
ตารางที่ 2.1 การเลือกใช้งานเป่าแบบผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ [1]

ประเภท	สมบัติที่ต้องการ	เม็คที่ควรใช้
ขวดสารเคมีพวกน้ำยาทำความสะอาด แชมพู น้ำยาล้างจาน	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม 2. ความสามารถในการทรงรูป 3. ความต้านแรงกระแทก 	<ul style="list-style-type: none"> - ครรชนีการไหล 0.3-0.4 กรัม/10 นาที - ความหนาแน่น 0.945-0.956 g/cm³ - การกระจายน้ำหนักโมเลกุล กว้าง
ขวดเครื่องสำอาง	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม 2. ความสามารถในการทรงรูป 3. มีผิวของพลาสติกเนียน 4. ไม่มีกลิ่น 	<ul style="list-style-type: none"> - ครรชนีการไหลน้อยกว่า 0.3-0.4 กรัม/10 นาที - ความหนาแน่น 0.945-0.956 g/cm³ - การกระจายน้ำหนักโมเลกุล ปานกลาง-กว้าง
ขวดบรรจุอาหาร	<ol style="list-style-type: none"> 1. ความสามารถในการทรงรูป 2. ไม่มีกลิ่น 3. มีผิวของพลาสติกเนียน 	<ul style="list-style-type: none"> - ครรชนีการไหลน้อยกว่า 0.7-2.0 กรัม/10 นาที - ความหนาแน่น 0.958-0.963 g/cm³ - การกระจายน้ำหนักโมเลกุล แคบ-กว้าง

ปกติพอลิเอทิลีนที่ใช้งานมักจะมีการผสมสารต่าง ๆ ด้วย เช่น สารตัวเติม (Filler) สารเชื่อมโยง (Crosslinking agent) สี (Color) เพื่อให้สวยงามน่าใช้ เป็นต้น ซึ่งการผสมสารเติมแต่งเหล่านี้จะช่วยทำให้คุณภาพในการใช้งานเหมาะสมยิ่งขึ้น [2]

2.2 แคลเซียมคาร์บอเนต

2.2.1 ความเป็นมา



รูปที่ 2.4 ลักษณะทางกายภาพของแคลเซียมคาร์บอเนตเกรดที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (Omycarb 2T)

แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate) มีสูตรโมเลกุลคือ CaCO_3 น้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 100.09

ประกอบด้วย	CaO	56.03%
	CO_2	43.97%

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ถูกเผาไหม้หมดไปที่อุณหภูมิ 900°C

CaCO_3 เป็นแร่ธาตุที่มีอยู่อย่างสมบูรณ์บนเปลือกโลก แต่ในอุตสาหกรรมมีการนำ CaCO_3 มาใช้เพียง 20% จากทั้งหมด CaCO_3 เป็นสารทั่วไปที่ใช้เติมลงในพลาสติกซึ่งมีหลายชื่อ โดยแบ่งตามแหล่งกำเนิด เช่น หินปูน (Limestone) ชอล์ก (Chalk) หินอ่อน (Marble) และ หินปะการัง (Coral) เป็นต้น แบ่งตามโครงสร้างผลึก เช่น แคลไซต์ (Calcite) และ อีกรไนต์ (Argonite) เป็นต้น และเมื่อมีแมกนีเซียมคาร์บอเนตอยู่ในโครงสร้างจะเรียกว่า โดโลไมต์ (Dolomite) [3]

2.2.2 กระบวนการผลิต

CaCO_3 มีอยู่ 2 ชนิดคือ ชนิดที่ได้จากธรรมชาติ และชนิดที่ได้จากปฏิกิริยาการตกตะกอนซึ่งไม่ว่าจะเป็นชนิดไหนก็รู้จักแคลเซียมคาร์บอเนตในชื่อ Whiting [4]

- แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ

แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติได้มาจาก 2 แหล่งคือ จากซอล์กซึ่งประกอบด้วยตะกอนที่ได้จากซากของพืชหรือสัตว์เล็ก ๆ และหินปูนขาว (White limestone) ส่วนใหญ่เกิดจากซากสัตว์เล็ก ๆ ที่เรียกว่า โฟรามินิเฟอรา (Foraminifera) และเปลือกสัตว์ทะเลอื่น ๆ ซากกระดูกและเปลือกสัตว์เหล่านี้ประกอบด้วย CaCO_3 เมื่อสัตว์เหล่านี้ตายก็จะจมลงสู่ก้นทะเล เมื่อเวลาผ่านไปนับล้านปีก็ก่อรูปแปลงเป็นหินปูนใหญ่ขึ้น นอกจากนั้นหินต่าง ๆ ก็มักจะมี CaCO_3 อยู่ด้วยซึ่งจะถูกฝนชะและถูกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศกัดกร่อนทำให้ CaCO_3 ในหินนั้นละลายกลายเป็น CaCO_3 แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติที่มีเกร็ดละเอียดที่สุดเรียกกันว่า Paris white

- แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์

แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตเคมีภัณฑ์ ตัวอย่างเช่นได้จากกรรมวิธี Ammonia-soda, Solvay, Carbonation และ Sodium hydroxide process แต่กระบวนการผลิตที่นิยมใช้มากที่สุดคือ Carbonation process กระบวนการนี้เริ่มจากนำก้อนหินปูนมาเผาในเตาเผาให้ร้อนจัดที่อุณหภูมิประมาณ $750-900\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นเหตุให้เนื้อสารสลายตัวคือ CaCO_3 สลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) ส่วนแมกนีเซียมคาร์บอเนตสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการเคมีดังนี้ [5]



CaO ดูดความชื้นในอากาศได้กลายเป็นไฮดรอกไซด์



Ca(OH)_2 เป็นผงละเอียดสีขาวมี CaO 75% Ca(OH)_2 เกิดปฏิกิริยาช้า ๆ กับ CO_2 ในอากาศได้ CaCO_3



แยกขนาดอนุภาคด้วยการกรองโดยมีตัวกรองสูญญากาศแบบขนาน ตัวกรองแบบใช้ความดันหรือใช้การหมุนช่วยในการกำจัดน้ำ หลังจากนั้นทำให้แห้ง CaCO_3 ที่ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.03 ไมครอน

2.2.3 สมบัติทั่วไป

- สมบัติทางกายภาพ

สี	ขาว ใส เทา น้ำตาล ดำ
ความแข็ง	3 โมห์สเกล
ความถ่วงจำเพาะ	2.72
จุดหลอมละลาย	2570 °C
รูปผลึกที่พบบ่อย	สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน

- CaCO_3 มีฤทธิ์เป็นด่าง ค่า pH ของ CaCO_3 อยู่ในช่วง 9-10 ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์ มีค่า pH อยู่ในช่วง 9.5-10.5 นอกจากนั้น CaCO_3 ที่มีความละเอียดมาก ๆ จะมีค่า pH ที่สูงขึ้นคืออยู่ในช่วง 10.8-11.3

- การละลายสามารถละลายได้เฉพาะที่ pH เป็นกลาง ไม่ละลายน้ำและแอลกอฮอล์ ถ้ามีเกลือแอมโมเนียมหรือคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ก็จะเพิ่มความสามารถในการละลาย แต่ถ้ามี Alkali hydroxide อยู่จะลดความสามารถในการละลาย

- ขนาดของอนุภาคมีหลายขนาด ตั้งแต่ผงละเอียดจนถึงผงหยาบ

- มีความบริสุทธิ์ ปราศจากสิ่งเจือปนที่จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของพลาสติก

- มีการกระจายตัวดีขึ้น ถ้าเลือกใช้เกรดที่มีการเคลือบผิว

- เพิ่มความเหนียว มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระแทก

- ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ทนอุณหภูมิได้สูง 750-900 °C

2.2.4 การประยุกต์ใช้งาน

1. ในอุตสาหกรรมพลาสติก [3]

CaCO_3 มีการใช้กับพลาสติกหลายชนิดตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนและพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นต้น CaCO_3 นำมาใช้กับพลาสติกเพื่อลดต้นทุนในการผลิตและยังช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางอย่างให้ดีขึ้น เช่น มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระแทก นอกจากนั้น CaCO_3 ก็ช่วยปรับปรุงผิวของพลาสติก โดยทำให้พลาสติกมีความเงาหรือความมันเพิ่มขึ้น ความต้านทานไฟฟ้าดีขึ้น ทนทานต่อแรงบีบอัด ควบคุมการหดตัวของพลาสติก ทำให้ผลิตภัณฑ์จากพลาสติกทนทานต่อสภาพภูมิอากาศมากขึ้น

2. ในอุตสาหกรรมอื่น [5]

- เป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางตัวหนึ่งใน Antacids เรียกว่า Limestone

- ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว อุตสาหกรรมกระดาษและหินอ่อน

- ใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

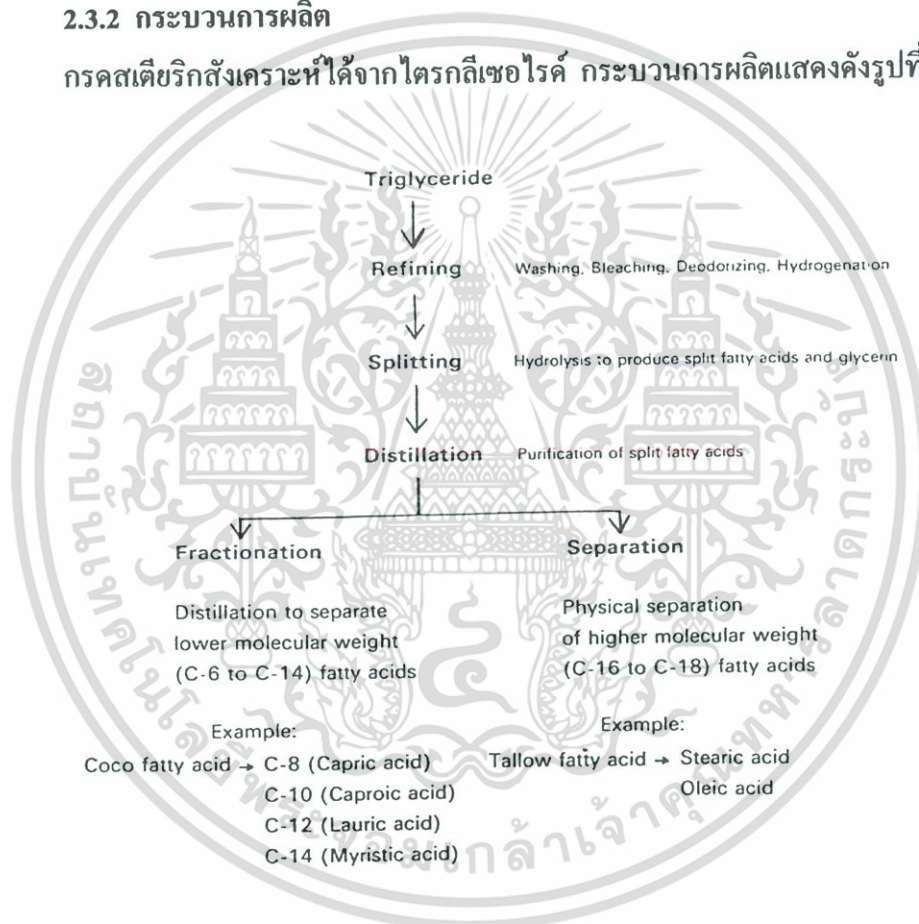
2.3 กรดสเตียริก

2.3.1 ความเป็นมา

กรดสเตียริก (Stearic acid, SA) เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ยาวของไฮโดรคาร์บอนและหมู่ฟังก์ชันของกรด กรดสเตียริกสังเคราะห์ได้มาจากกลีเซอไรด์ซึ่งพบในไขมันสัตว์และพืชหลายชนิด นิยมใช้เป็นสารหล่อลื่นในพอลิเมอร์คอมพอสิตหรือเป็นส่วนประกอบหนึ่งในกระบวนการวัลคาไนเซชันยาง นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stabilizer) ในรูปของ Sterate (Metal sterate) [6]

2.3.2 กระบวนการผลิต

กรดสเตียริกสังเคราะห์ได้จากไตรกลีเซอไรด์ กระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการสังเคราะห์กรดสเตียริก [6]

กระบวนการเริ่มจากนำไตรกลีเซอไรด์มากำจัดสิ่งปนเปื้อน เช่น ฟอสฟาไทด์ โลหะหนัก สี กลิ่น โดยการล้าง (Washing) ฟอกขาว (Bleaching) ต่อมานำไตรกลีเซอไรด์ที่ได้มาผ่านไอน้ำแรงดันสูงเพื่อแยกกรดไขมันออกจากกลีเซอรอลเรียกว่า Splitting process กรดไขมันที่ได้นำไปกลั่น (Distillation) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมี สี กลิ่น และเป็นการแยกกรดไขมันแต่ละชนิดออกจากกันแบ่งเป็น 2 วิธีคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Frictionation วิธีนี้ใช้กระบวนการกลั่นด้วยไอน้ำ สามารถแยกกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้ (C_6-C_{14})
- Separation เนื่องจากกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ($C_{16}-C_{18}$) แยกออกจากกันได้ยากด้วยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำเพราะมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงต้องใช้การแยกเชิงกายภาพ (Physical separation) ซึ่งกระบวนการแยกมี 3 วิธีคือ Mechanical processing, Solvent crystallization และ Hydrophilization [6]

2.3.3 สมบัติทั่วไป

กรดสเตียริกมีสูตรทางเคมีคือ $CH_3(CH_2)_{16}COOH$ [7]

- น้ำหนักโมเลกุล 284.48
- จุดเดือด $361^\circ C$
- จุดหลอมเหลว $70^\circ C$
- ความถ่วงจำเพาะ 0.847
- ความสามารถในการละลายน้ำ 0.1-1 กรัม/ 100 มิลลิตร ที่ $23^\circ C$

2.3.4 การประยุกต์ใช้งาน

ในการปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมเพื่อให้สามารถกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น กรดสเตียริกเป็นสารตัวหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะกับสารตัวเติม $CaCO_3$ เนื่องจากโครงสร้างของกรดสเตียริกประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ยาวของไฮโดรคาร์บอนและหมู่ฟังก์ชัน ซึ่งในส่วนที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนจะเป็นส่วนที่กระจายในวัฏภาคของพอลิเมอร์หรือเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ ส่วนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันก็จะกระจายอยู่ในวัฏภาคของสารตัวเติมและเข้ากันได้กับสารตัวเติม [7]

การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. สารตัวเติมที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวจะทำให้สามารถกระจายตัวได้ง่ายและทั่วถึงในพอลิเมอร์
2. การปรับปรุงพื้นผิวช่วยทำให้ระยะระหว่างพื้นผิวระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมตริกซ์ใกล้เคียงกันมากขึ้น
3. ช่วยในเรื่องการป้องกันพื้นผิวเกิดการแตก รอยรุม และอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการนำไปใช้งานและเป็นการทำให้วัสดุมีความแข็งแรง
4. ช่วยในเรื่องการกำจัดรอยตำหนิ รอยขีดข่วนบนพื้นผิว

2.4 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์

2.4.1 ความเป็นมา

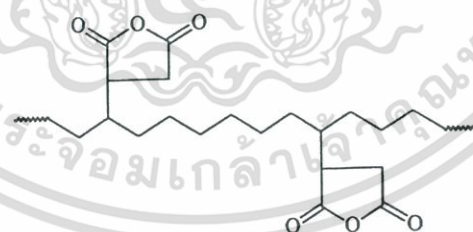
ในการผสมพอลิเมอร์กับสารตัวเติมในบางครั้งจะเห็นว่าพอลิเมอร์กับสารตัวเติมที่ใส่เข้าไปผสมเข้ากันได้ยากมีการแบ่งวัฏภาคกัน การยึดเหนี่ยวระหว่างพื้นผิวของวัสดุทั้งสองไม่ดี เนื่องจากสมบัติความแตกต่างกันของชั้นระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์ จึงมีการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ (Maleic anhydride grafted high density polyethylene, HDPE-g-MA) มาใช้ในการผสมพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มสมบัติการเข้ากันได้ ซึ่ง HDPE-g-MA ทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม ทำให้พอลิเมอร์กับสารตัวเติมผสมเข้ากันได้มากขึ้น โดย HDPE-g-MA จะลดความแตกต่างระหว่างชั้น ทำให้พอลิเอทิลีนผสมเข้ากับสารตัวเติมที่มีขั้วได้ดีขึ้น [8]

2.4.2 กระบวนการผลิต

HDPE-g-MA สามารถผลิตได้ 3 วิธีคือ

- การพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation polymerization)
- การพอลิเมอไรเซชันแบบการเติม (Addition polymerization)
- การพอลิเมอไรเซชันด้วยรังสีอุลตราไวโอเลต (UV Radiation)

การผลิต HDPE-g-MA ทำได้โดยการผสมพอลิเอทิลีนกับมาเลอิกแอนไฮดรายด์ในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และใช้สารประกอบเปอร์ออกไซด์เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) เพื่อให้เกิดการเชื่อม โยง (Crosslinking) ระหว่างสายโซ่ของพอลิเอทิลีนกับมาเลอิกแอนไฮดรายด์



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์ [9]

2.4.3 สมบัติทั่วไป

สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดรายด์

- ทำให้ HDPE มีสมบัติทางเคมีเชิงฟิสิกส์ (Physicochemical properties) ดีขึ้น

- ทำให้ HDPE มีความเป็นขี้เพิ่มขึ้น (Hydrophilicity)
- ทำให้ความสามารถในการเปียกดีขึ้น (Wet ability)
- ทนต่อความร้อนได้ดี (Heat resistance)

2.4.4 การประยุกต์ใช้งาน

HDPE-g-MA ถูกนำไปใช้เป็นสารช่วยผสมระหว่างพอลิเมอร์กับสารตัวเติม ส่วนของพอลิเอทิลีนก็จะเข้ากันได้กับพอลิเมอร์เกิดการเกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ และในส่วนของมาเลอิกแอนไฮไดรด์ซึ่งมีความเป็นขี้ก็จะเข้ากับสารตัวเติมที่มีความเป็นขี้ ทำให้มีการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น [9]

2.5 การคอมปาวด์และการผสมเพื่อเตรียมพลาสติกใช้ในกระบวนการแปรรูป

ในกระบวนการแปรรูปนั้น บางครั้งพลาสติกที่ใช้จะต้องมีการผสมสารเคมีที่เรียกว่าสารเติมแต่ง (Additives) เพื่อปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ และปรับปรุงความสามารถในการแปรรูปพลาสติก เพื่อให้แปรรูปได้ง่ายขึ้น ตัวอย่างสมบัติของพลาสติกที่ได้รับการปรับปรุงหลังจากผสมสารเคมีแล้ว เช่น ความเหนียวและแข็งแรงของชิ้นงานทำได้โดยผสมพลาสติกกับสารตัวเติมเสริมแรง (Reinforcing filler) ความอ่อนนุ่มสามารถหกงอได้ดีขึ้นทำได้โดยผสมพลาสติกกับพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) ทำให้แปรรูปง่ายขึ้นโดยการผสมสารหล่อลื่น (Lubricants) หรือทำให้พลาสติกทนความร้อนได้โดยไม่เสื่อมสภาพขณะทำการแปรรูปที่อุณหภูมิสูงโดยการผสมสารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (Heat stabilizer)

การคอมปาวด์เป็นการผสมส่วนประกอบต่าง ๆ กับพลาสติกเข้าด้วยกัน การผสมแบบนี้จะอาศัยแรงเฉือนในการบดผสมส่วนประกอบชนิดต่าง ๆ เข้าด้วยกัน โดยทำขณะที่พลาสติกอยู่ในสภาพหลอมเหลว ในกระบวนการแปรรูปพลาสติกจะใช้วิธีการคอมปาวด์ก็ต่อเมื่อต้องการผสมสารเคมีเช่น สารตัวเติม พลาสติกไซเซอร์ ผสมในพลาสติกในปริมาณสูงหรือหลังจากใช้การผสมแห้ง (Dry blending) ด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High speed mixer)

กระบวนการคอมปาวด์โดยเครื่องอัดรีดเป็นการเตรียมพลาสติกไว้ใช้ในกระบวนการแปรรูปต่อไป โดยการอัดรีดพลาสติกหลอมเหลวไหลผ่านหัวคาย ซึ่งเป็นกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous process) และผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นผลิตภัณฑ์กึ่งสำเร็จรูปที่ต้องนำไปเข้ากระบวนการชนิดอื่นต่อไป เพื่อผลิตเป็นชิ้นงานขั้นสุดท้ายก่อนจะนำไปใช้งาน

เครื่องอัดรีดที่ใช้ในการเตรียมคอมปาวด์พลาสติกมี 3 ชนิด คือ เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหอนเดี่ยว (Single-screw extruder) เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหอนคู่ (Twin-screw extruder)

เครื่องอัดรีดชนิดหลายเกลียวหนอน (Multi-screw extruder) โดยทั่วไปในการเตรียมคอมปาวด์พลาสติกมักจะใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่เป็นหลัก

เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่เป็นเครื่องอัดรีดที่มีสกรูสองตัวอยู่ในกระบอกเดียวกันซึ่งมีภาพตัดขวางเป็นรูปเลขแปด การแบ่งเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่จะแบ่งตามทิศทางการหมุนและระดับของการอินเทอร์เมท (Intermeshing) ซึ่งหมายถึงการหมุนของสกรูในลักษณะที่สันเกลียวของสกรูตัวหนึ่งแทรกตัวอยู่ในร่องเกลียวของสกรูอีกตัวหนึ่ง ทิศทางการหมุนของสกรูของเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่สามารถหมุนได้สองแบบคือหมุนในทิศตรงกันข้ามกันหรือหมุนสวนทางกัน (Counter-rotating) และการหมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating) ส่วนระดับของการอินเทอร์เมทของการหมุนของสกรูแบ่งออกเป็น การอินเทอร์เมทเต็ม (Fully intermeshing) การอินเทอร์เมทบางส่วน (Partially intermeshing) และการหมุนไม่อินเทอร์เมท

เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่มักจะประยุกต์ใช้ในกระบวนการแปรรูปพลาสติกใน 2 ลักษณะคือ

1. ใช้ในการแปรรูปพอลิเมอร์ที่แปรรูปยาก

เนื่องจากพอลิเมอร์บางกลุ่มไหลยากในขณะหลอมเหลวหรือเสื่อมสภาพได้ง่ายที่อุณหภูมิสูงจำเป็นต้องใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่หมุนสวนทางกันและมีการอินเทอร์เมท เนื่องจากเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่นี้มีความสามารถในการขนส่งพลาสติกหลอมได้เร็ว จึงทำให้มีช่วงเวลาที่พักตัวอยู่ในกระบอกและคายสั้นมาก (Short residence time) และมีวัสดุหลงเหลือในกระบอกน้อยมาก เนื่องจากการทำความสะอาดตัวเอง (Wiping) ของสกรู ทำให้การกระจายตัวของเวลาที่วัสดุอยู่ในเครื่อง (Residence time distribution) ต่ำ พอลิเมอร์บางกลุ่มป้อนเข้าเครื่องอัดรีดได้ยาก การใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ที่มีสกรูหมุนสวนทางกัน ทำให้สามารถแปรรูปพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ได้

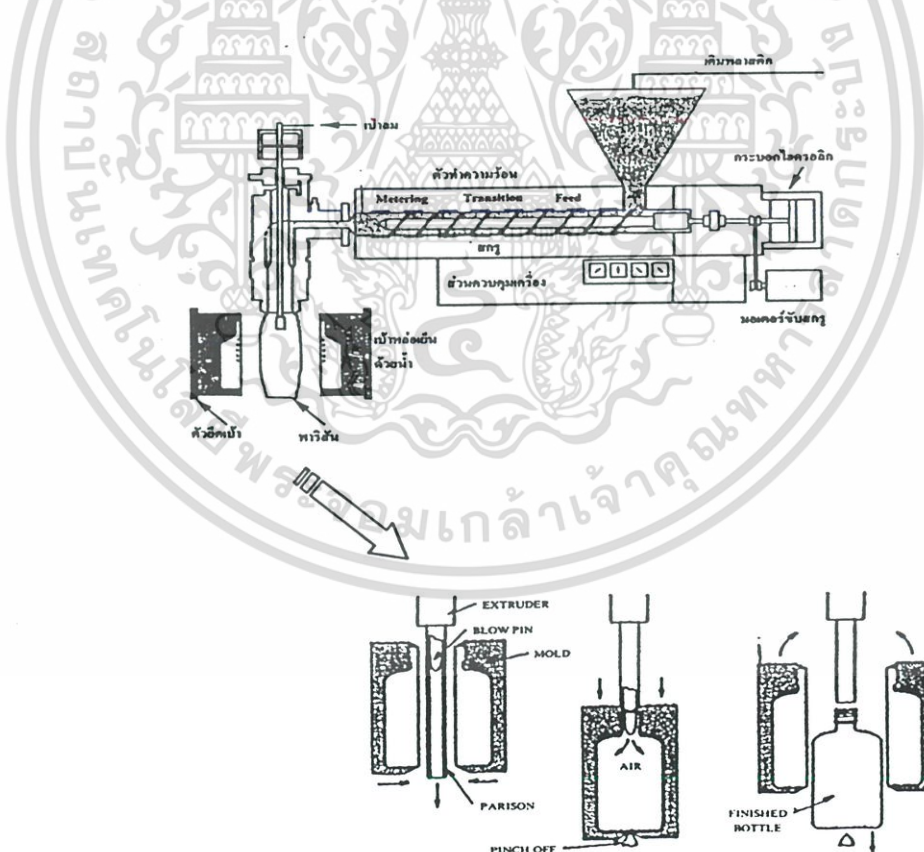
2. ใช้ในกระบวนการแปรรูปแบบพิเศษชนิดต่าง ๆ

การผสมพลาสติกกับสารเติมแต่งชนิดต่าง ๆ กัน เช่น สารตัวเติมและสี เป็นต้น ในระหว่างการอัดรีดอาจมีก๊าซเกิดขึ้น นิยมใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ในการดึงเอาก๊าซออกจากระบบ

2.6 กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

กระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์จะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงวัสดุพอลิเมอร์ให้เป็นชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์พลาสติกที่นำไปใช้งานต่อไป ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพลาสติกต่าง ๆ มีวิธีการผลิตต่างกันและสมบัติก็ต่างกันด้วย ทั้งนี้มีผลจากความต้องการของผู้บริโภค ดังนั้นการผลิตพลาสติกจึงต้องมีการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ตรงตามความต้องการของผู้บริโภค กระบวนการแปรรูปพลาสติกทั่ว ๆ ไปที่พบในอุตสาหกรรมผลิตพลาสติกมีหลายกระบวนการ เช่น การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การเป่าขึ้นรูป (Blow molding) เป็นต้น [10]

ในงานวิจัยนี้กระบวนการแปรรูปพลาสติกที่ใช้ก็คือ กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding process) กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดเป็นกระบวนการผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงขวด มีหลักการทำงานอย่างง่าย ๆ คือ การอัดรีดท่อพลาสติกกลวงที่เรียกว่า พาริชัน (Parison) ลงภายในแม่พิมพ์ที่มีระบบการหล่อเย็นด้วยระบบน้ำไหลวน ซึ่งนิยมใช้น้ำเย็นที่มีช่วงอุณหภูมิระหว่าง 5 ถึง 20 °C จากนั้นใช้ลมเป่าโดยความดันลมที่ใช้ขึ้นกับขนาดของเครื่อง ทำให้ท่อพลาสติกพองตัวออกกระทบกับผนังแม่พิมพ์ที่เย็น ทำให้พลาสติกเกิดการแข็งตัวได้ชิ้นงานตามลักษณะของแม่พิมพ์ รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการอัดรีดแบบเป่าขึ้นรูป [10]



รูปที่ 2.7 กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนของการเป่าขึ้นรูปสภาวะที่ใช้ในการผลิตมีความสำคัญเป็นอย่างมาก จึงต้องควบคุมให้มีความเหมาะสม เช่น

- อุณหภูมิของพาริชั่นหรือพลาสติกเหลว : ที่เหมาะสมควรจะอยู่ในช่วง 170-200 °C สำหรับ HDPE เพราะการกำหนดอุณหภูมิที่เผงให้ความร้อน โชนต่าง ๆ ค่อนข้างจะลำบาก เพราะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายชนิด เช่น การออกแบบสกรู ประสิทธิภาพของเผงให้ความร้อน รอบสกรูที่ใช้ ฯลฯ จึงกำหนดเป็นอุณหภูมิของพาริชั่น

- ลมที่ใช้เป่าพาริชั่น : โดยปกติจะใช้ความดันลมเป่า 4-10 bar ส่วนความเร็วลมจะต้องเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ นอกจากนี้ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางควรจะใหญ่เท่าที่จะใหญ่ได้สำหรับงานเป่าถึงขนาดใหญ่ นอกจากจะใช้ลมธรรมดาแล้ว ยังใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเพื่อช่วยในการระบายความร้อนให้เร็วขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มผลผลิตได้

- อุณหภูมิแม่แบบ : จะมีผลอย่างมากต่อลักษณะผิวและการหดตัวของผลิตภัณฑ์และรอบเวลาของการผลิต ฯลฯ ดังนั้นอุณหภูมิของแม่แบบจะต้องเลือกและควบคุมให้คงที่อย่างระมัดระวังเพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างลักษณะและความหนาของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

กระบวนการผลิตแบบเป่าขึ้นรูป คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้จะมีความสัมพันธ์หรือขึ้นอยู่กับคุณภาพของพาริชั่นที่อัดรีดออกมาก่อนทำการเป่าขึ้นรูป โดยทั่วไปเมื่อพาริชั่นออกมาจากปากคายจะเกิดพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับการไหลสองประการที่สำคัญคือ การบวมตัว (Extrudate swell หรือ Die swell) และการย้อยตัว (Draw down) โดยพฤติกรรมทั้งสองนี้ให้ผลตรงกันข้ามกล่าวคือ Die swell ทำให้พาริชั่นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดของคาย ส่วน Draw down มีผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพาริชั่นลดลง เพราะฉะนั้นเพื่อที่จะควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในขั้นตอนการผลิตจึงต้องทราบถึงผลกระทบและพฤติกรรมทั้งสองในกระบวนการผลิต

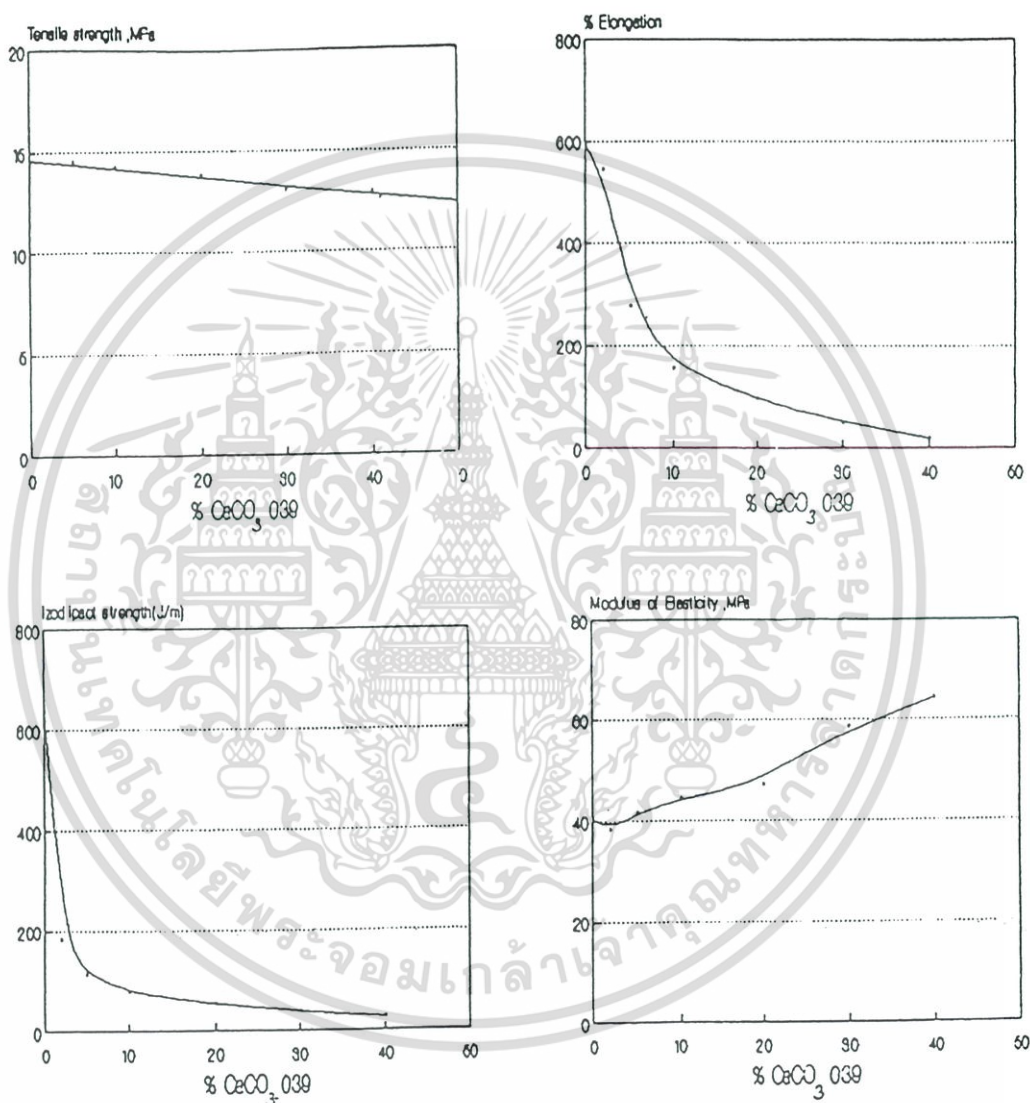
ข้อพิจารณาในการผลิตชิ้นงานในกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดนี้มีดังนี้ [11]

- มีการไหลตัวของพลาสติกเหลวดี อัดรีดออกเป็นพาริชั่นได้ง่ายและไม่เกิดการย้อยตัวของพลาสติกเหลว (Drawdown และ Sagging) เพื่อไม่ให้เกิดขวดที่มีก้นหนา แต่ผนังช่วงคอและบ่าขวดบางเกินไป

- ขนาดและความหนาของขวดควรมีความสม่ำเสมอ
- มีความทรงรูปดี
- มีความต้านทานแรงกระแทกดี
- ผิวของชิ้นงานเรียบ สวยงาม
- ปริมาณของเสียควรมีน้อยที่สุด
- มีอัตราและกำลังการผลิตสูง

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sumanutvarapun และคณะ [12] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตัวเติม โดยผสมพอลิเอทิลีนกับสารตัวเติมปริมาณ 0-40% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงดึง เปรอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงกับการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ในขณะที่มอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกัน [12]

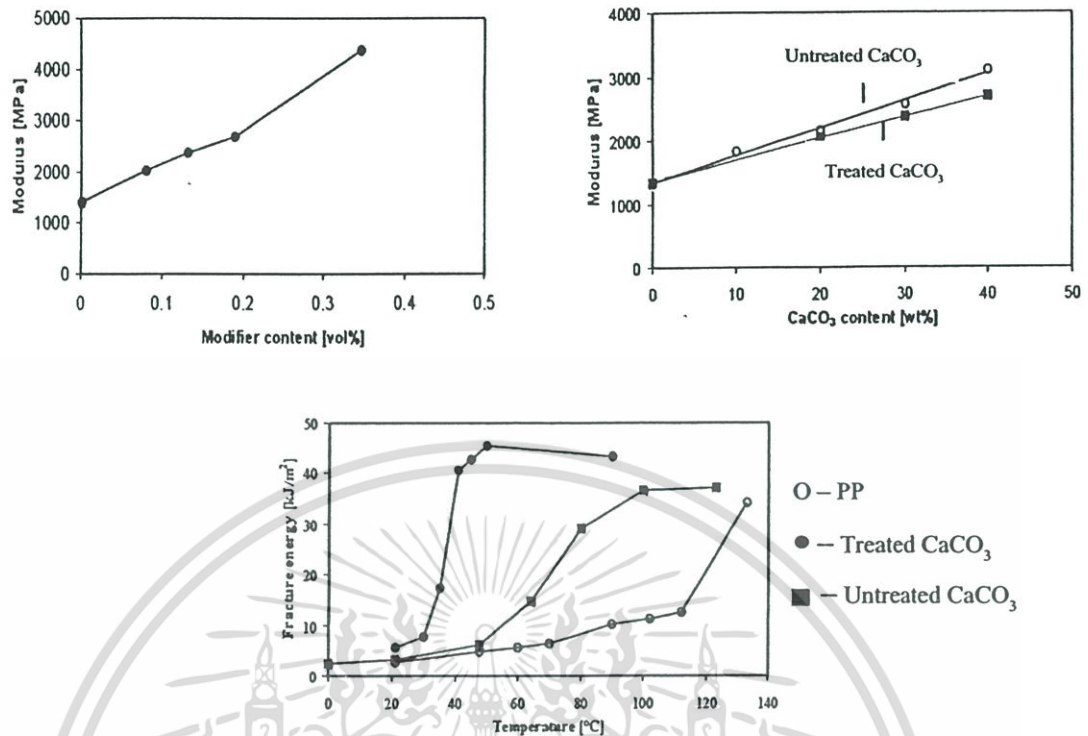
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Premphet และคณะ [13] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิพรอพิลีน (PP) ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-25% โดยปริมาตร พบว่าเมื่อปริมาณของ CaCO_3 เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง และเมื่อทำการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 ด้วยกรดสเตียริก (SA) พบว่าค่ามอดูลัส เปอร์เซ็นต์การยืด ๓ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ CaCO_3 ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิว ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลของสารตัวเติม CaCO_3 ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม [13]

CaCO ₃ (%) Content	Young's Modulus (GPa)		Elongation at Yield (%)		Impact Strength (J/m)	
	Uncoated	Coated	Uncoated	Coated	Uncoated	Coated
0	1.62	1.62	7.80	7.80	33.10	33.10
10	2.00	2.45	3.92	4.59	36.71	45.39
15	2.15	2.42	3.14	3.41	33.13	42.41
20	2.44	3.04	2.95	3.17	33.56	41.62
25	2.57	3.46	2.46	2.77	28.94	40.43

Zuiderduim และคณะ [14] ทำการศึกษาความทนทานของ PP เมื่อมีการใช้สารตัวเติม CaCO_3 ซึ่ง CaCO_3 ที่ใช้มีทั้งเกรดเคลือบและไม่เคลือบ SA จากผลการทดลองที่ได้พบว่าปริมาณ CaCO_3 ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมกล่าวคือ ปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นทำให้มอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการใช้ CaCO_3 ที่มีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA พบว่าค่ามอดูลัสที่ได้มีค่าไม่แตกต่างจากเมื่อไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นผิว แต่ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ SA เนื่องจาก SA ช่วยในการกระจายตัวของ CaCO_3 จึงมีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง PP กับ CaCO_3 มากขึ้น ค่าความทนทานต่อแรงกระแทกจึงเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 สมบัติเชิงกลของ PP ที่มี CaCO₃ เป็นสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกันและมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA [14]

Horanont [15] ทำการศึกษาคอมพอสิตตามวิฤภาคของ PP อีลาสโตเมอร์ซึ่งได้แก่ เอทิลีนไวนิลอะซีเตต (EVA) กับเอทิลีน-ออกทีน โคลพอลิเมอร์ (EOR) และมี CaCO₃ เป็นสารตัวเติม โดยที่ CaCO₃ มีการใช้ SA เป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่าคอมพอสิตที่ใช้ EVA เป็นอีลาสโตเมอร์มีการยึดเกาะที่ระหว่างผิวอีลาสโตเมอร์และสารตัวเติมทำให้มีค่าแรงดึงสูง ส่วนคอมพอสิตที่ใช้ EOR มีค่ามอดูลัสและค่าความทนทานต่อแรงกระแทกที่ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สารตัวเติมที่มีการเคลือบผิวด้วย SA สามารถเพิ่มค่าความทนทานต่อแรงกระแทกของคอมพอสิตได้มากกว่าการใช้สารตัวเติมที่ไม่มีการเคลือบผิว ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมบัติเชิงกลของคอมพอสิตสามวัฏภาค [15]

PP/Elastomer /filler(%)	Yield stress (MPa)		Modulus (GPa)		Impact strength (J/m)	
	EOR	EVA	EOR	EVA	EOR	EVA
100/0/0	34.35		1.62		32.11	
60/40/0	18.78	20.08	0.87	0.87	777.16	279.52
60/35/5	18.02	20.95	0.98	0.99	795.99	62.63
60/30/10	17.59	21.42	1.22	1.15	749.84	50.08
60/20/10	17.06	23.10	1.91	1.26	235.43	40.54
60/10/30	17.07	24.17	2.99	2.33	49.24	29.34

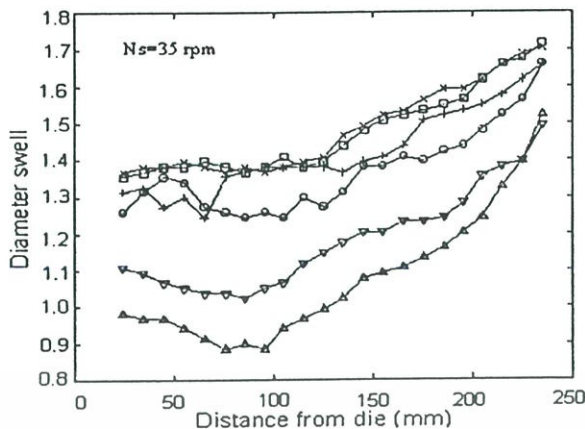
Premphet และคณะ [16] ทำการศึกษาสมบัติของ PP ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติม โดยมีเอทิลีน-ออกทีนคอลลีด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (EOR-MA) เป็นสารช่วยผสม จากการทดลองพบว่าการใช้ EOR-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ความแข็งแรงกระแทกเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น ส่วนค่ามอดุลัสมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารช่วยผสม เนื่องจากการใช้ EOR-MA เป็นการเพิ่มวัฏภาคของพอลิเมอร์ทำให้ค่ามอดุลัสลดลง ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลของสารช่วยผสม (EOR-MA) ที่มีต่อสมบัติเชิงกล [16]

EOR-MA loading (by vol)	Modulus (GPa)	Elongation at Break (%)	Impact strength (J/m)
Pure PP	1.69	442.03	31.28
0	3.31	27.95	30.42
5	2.02	13.37	34.41
10	1.63	27.11	59.73
20	1.26	38.69	111.00
30	0.97	81.93	219.92

Huang และคณะ [17] ทำการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE กับพอลิเอไมด์-6 (PA6) โดยมี HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม พบว่าเมื่อปริมาณ PA6 เพิ่มขึ้นทำให้ค่าการบวมตัวของชิ้นงาน (Die swell) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ PA6 ที่เพิ่มขึ้นจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ HDPE ทำให้การคืนตัวเกิดขึ้นน้อยลง การบวมตัวจึงมีค่าลดลง ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE/ HDPE-g-MA/ PA6 ในอัตราส่วนต่าง ๆ

กัน โดย x = PA6(5%), □ = 15%, + = 25%, O = 35%, ▽ = 45%, Δ = 55% [17]

Sahnoune และคณะ [18] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และพอลิสไตรีน (PS) ที่มี CaCO₃ เป็นสารตัวเติมและใส่ (Styrene/Ethylene-Butylene/Styrene triblock copolymer, SEBS-g-MA) เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 0-8% โดยน้ำหนัก พบว่า SEBS-g-MA จะช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมให้ดีขึ้น ดังตารางที่ 2.5 เนื่องจากมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (MA) จะเข้ากันได้ดีกับ CaCO₃ ซึ่งเป็นสารตัวเติม และส่วนของ SEBS จะเข้ากันได้ดีกับส่วนของ HDPE และ PS ทำให้แรงยึดติดระหว่างภูมิภาคของ CaCO₃ กับ HDPE และ PS เพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 2.5 สมบัติเชิงกลของ HDPE และ PS ที่มี CaCO₃ เป็นสารตัวเติมที่ปริมาณ SEBS-g-MA แยกต่างกัน [18]

HDPE/PS/CaCO ₃ /SEBS-g-MA	Young's Modulus (MPa)	Impact strength (J/m)
60/20/20/1% SEBS-g-MA	1531	32
60/20/20/2% SEBS-g-MA	1432	36
60/20/20/4% SEBS-g-MA	1292	45
60/20/20/8% SEBS-g-MA	1092	72

Wang และคณะ [19] ทำการศึกษาผลของสารช่วยผสม (LDPE-g-MA) ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE กับ CaCO₃ โดยใช้สารช่วยผสมในปริมาณ 0-100% โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงจะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับไม่ใช้ ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอดูลัสก็มียาลดลงเพียงเล็กน้อยเช่นกัน เนื่องจากการใช้ LDPE-g-MA เป็นการเพิ่มวิฤภาคของพอลิเมอร์ทำให้มอดูลัสลดลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ LDPE-g-MA ต่ำกว่า 16.7% โดยน้ำหนัก และตั้งแต่ 16.7% ขึ้นไปค่าเปอร์เซ็นต์การยึด ฉ จุดขาด และความทนทานต่อแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงดังตารางที่ 2.6 เนื่องจากการใช้ LDPE-g-MA ในปริมาณต่ำจะช่วยในการผสมแต่เมื่อปริมาณมากขึ้นทำให้เกิดการแยกวิฤภาคของ LDPE-g-MA ที่มีมากเกินไปทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน

ตารางที่ 2.6 ผลของสารช่วยผสม LDPE-g-MA ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ HDPE กับ CaCO_3 [19]

LDPE-g-MA Content (%)	Tensile strength (MPa)	Yong modulus (MPa)	Elongation at auto break (%)	Impact strength (J/m)
0	22.07	1282	120.0	185.4
16.7	21.03	1286	364.4	319.8
33.3	20.42	1471	290.0	269.3
50	19.81	1085	230.0	238.5
66.7	18.31	1094	265.7	230.0
83.3	18.20	1577	155.7	159.8
100	16.29	1041	84.39	81.50

คารินและพิทยา [20] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-30% โดยน้ำหนัก และใช้กรดสเตียริกเป็นสารปรับปรุงพื้นผิว จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึง ฉ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ฉ จุดขาด ความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น และเมื่อปรับปรุงพื้นผิว CaCO_3 ด้วยกรดสเตียริก สมบัติเชิงกลที่กล่าวมาข้างต้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ปรมินทร์และประภษฎ์ [21] ศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE โดยใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก และมีการใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 0.1-15.0% โดยน้ำหนักของ CaCO_3 จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกระแทก และเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ฉ จุดขาดของ HDPE มีค่าลดลงเมื่อมีการใช้ CaCO_3 30% ผสมกับ HDPE เพราะแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง CaCO_3 และ HDPE ไม่แข็งแรง ส่วนค่าความแข็งแรงของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ CaCO_3 เพราะอนุภาคของ CaCO_3 มีค่าความแข็งแรงมากกว่า HDPE การใช้ HDPE-g-MA ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะ HDPE-g-MA มีทั้งส่วนที่มีและไม่มีขั้วในโครงสร้าง ทำให้ HDPE เข้ากับ CaCO_3 ได้ดีขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรงกระแทก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเปอร์เซ็นต์การขีด ฅ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ HDPE-g-MA ในปริมาณน้อย (0.1-0.5%) การใช้ HDPE-g-MA ในปริมาณมากขึ้นทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของ HDPE-g-MA และส่งผลลดค่าความแข็งแรงกระแทกและเปอร์เซ็นต์การขีด ฅ จุดขาด

ธนเรศและธราศัย [22] ศึกษาผลของการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA ที่มีต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 20% โดยน้ำหนักของ HDPE ปริมาณของสารช่วยผสมที่ใช้คือ 0.1 0.25 0.5 1.0 และ 2.0% โดยน้ำหนักของ CaCO_3 จากการทดลองพบว่าการเติม CaCO_3 20% โดยน้ำหนักลงใน HDPE ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงกระทำระหว่างพื้นผิวสัมผัสของ HDPE กับ CaCO_3 การใช้สารช่วยผสมทั้ง HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA ในปริมาณ 0-2% โดยน้ำหนักไม่มีผลต่อค่าความหนืด ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การขีด ฅ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกลดลงเมื่อมี CaCO_3 ผสมอยู่เพราะแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่าง CaCO_3 กับ HDPE ไม่แข็งแรง ส่วนค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจาก CaCO_3 มีค่ามอดูลัสและความแข็งที่สูงกว่า HDPE การใช้สารช่วยผสมในปริมาณน้อย 0.1% ทำให้สมบัติส่วนใหญ่ดีขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารช่วยผสมมีส่วนที่มีขั้วซึ่งน่าจะเข้ากันได้ดีกับ CaCO_3 และมีส่วนที่เป็น HDPE ซึ่งเหมือนกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ การใช้ HDPE-g-AA ให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่าเปอร์เซ็นต์การขีด ฅ จุดขาดที่มากกว่าการใช้ HDPE-g-MA เล็กน้อย เนื่องจาก HDPE-g-AA มีหมู่ที่มีขั้วในโครงสร้างมากกว่า HDPE-g-MA เมื่อใช้ในปริมาณที่เท่ากัน

พลชีพ ลิ้มพงษ์ [23] ทำการศึกษาสมบัติของ HDPE ที่ผสม CaCO_3 ที่ใช้สำหรับงานเป่าขึ้นรูป โดยใช้ CaCO_3 ในปริมาณ 0-30% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA และมีการใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 0-10% โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ SA ปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การขีด ฅ จุดขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจาก CaCO_3 มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของ HDPE กับ CaCO_3 เพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่าค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ HDPE-g-MA เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่ามอดูลัสลดลงเนื่องจากการเพิ่มวัฏภาคของพอลิเมอร์ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การขีด ฅ จุดขาดเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ HDPE-g-MA 1% โดยน้ำหนัก และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ HDPE-g-MA มากกว่า 1% โดยน้ำหนัก เนื่องจาก HDPE-g-MA ที่มากเกินไปทำให้เกิดการแยกวัฏภาคเกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังนำพอลิเมอร์ที่ผสม CaCO_3 บางสูตรมาผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยใช้เครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค พบว่าพอลิเมอร์ทั้งสูตรที่มีและไม่มี CaCO_3 20% โดยน้ำหนัก มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรใกล้เคียงกัน น้ำหนักต่อขวดของขวด HDPE บริสุทธิ์ต่ำกว่าน้ำหนักของขวดที่ได้จาก HDPE ผสม CaCO_3 แต่ความหนาของขวดได้ผลในทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงข้าม สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างจากการฉีดขึ้นรูปที่นำมาทดสอบก่อนผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูป

Strebel [24] ศึกษาสมบัติความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (Environmental stress crack resistance, ESCR) ของขวดพอลิเอทิลีน ทำการทดลองโดยใช้ขวด HDPE ที่มีค่าครรรณีการไหล (MFI) แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าเมื่อ MFI มีค่าลดลง การแตกของชิ้นงานใช้เวลานานขึ้น ซึ่ง ESCR จะแปรตามเวลา เพราะฉะนั้น ESCR สูง ๆ ก็จะทนต่อสภาพแวดล้อมได้นาน ดังนั้นผลจากการทดลองที่ได้จึงสรุปได้ว่า HDPE ที่มีค่า MFI ต่ำ ๆ จะมีค่า ESCR ดีกว่า HDPE ที่มีค่า MFI สูง ๆ คือทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ผลของค่าครรรณีการไหลที่มีต่อสมบัติความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม [24]

Properties	Type of HDPE Bottles			
	A	B	C	D
MFI (g/10 min)	0.33	0.33	0.30	0.20
ESCR (h)	14.0	15.0	28.4	144.8

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรดสำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูป (H6240B) จากบริษัทไทยพอลิเอทิลีน จำกัด มหาชน สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [25]

สมบัติ	หน่วย	HDPE (H6240B)	วิธีการทดสอบ
ความหนาแน่น	กรัม/ลบ.ซม.	0.962	ASTM D 1505
ครรชนีการไหล	กรัม/10 นาที	0.4	ASTM D 1238
จุดหลอมเหลว	องศาเซลเซียส	132	ASTM D 2117
จุดอ่อนตัว	องศาเซลเซียส	128	ASTM D 1525
จุดเปราะ	องศาเซลเซียส	<-60	ASTM D 746
ความแข็ง (Shore D)	-	64	ASTM D 2240
ความต้านทานแรงดึงขาด	กก./ตร.ซม.	350	ASTM D 638
ความต้านทานแรงดึงยืด	กก./ตร.ซม.	280	ASTM D 638
เปอร์เซ็นต์การยืดออก	%	>500	ASTM D 638
ความต้านทานแรงกระแทก	กก./ตร.ซม.	12	ASTM D 256
ความสามารถในการทรงรูป	กก./ตร.ซม.	11500	ASTM D 747

หมายเหตุ : ข้อมูลของบริษัทผู้ผลิต

2. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เกรดไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (Omyacarb 2) และเกรดเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (Omyacarb 2T) จากบริษัทสุรินทร์อ่อมฆ่าเคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดคกตะกอน [26]

สมบัติ	หน่วย	CaCO ₃ (Omyacarb 2)	CaCO ₃ (Omyacarb 2T)
ขนาดอนุภาค	μm	2.8	2.7
ความหนาแน่น	g/cm ³	2.7	2.7
เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก 1%	-	ไม่เคลือบ	เคลือบ

หมายเหตุ : ข้อมูลบริษัทผู้ผลิต

3. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกิ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮดไรด์ (HDPE-g-MA) เกรด Polybond[®] 3009 ซึ่งมีค่าดัชนีการไหล (MFI) เท่ากับ 5 g/10 นาที และมีปริมาณของมาเลอิกแอนไฮดไรด์ (MA) เท่ากับ 1% โดยน้ำหนัก

4. Tergital[®] NP-9 (Nonylphenol polyethylene glycol ether)
5. ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) ความหนาแน่นเท่ากับ 1.325 g/cm³
6. ไซลีน (Xylene) ความหนาแน่นเท่ากับ 0.861 g/cm³

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวทวนอกัน (Twin-screw extruder) : Intro Engineering รุ่น PL 200 (Screw : length = 330 mm, diameter = 31.1 mm drive and 19.7 mm output end)
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder) : Bosco Engineering รุ่น Bosco A600
3. เครื่องเป่าขึ้นรูปพลาสติกชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding machine) : SMC Co., Ltd รุ่น 200T (Screw : length = 22D, diameter = 30 mm)
4. เครื่องทดสอบแรงกด (Universal testing machine) : LLYOD Instrument Co., Ltd รุ่น LLOYD LR 30K
5. เครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester) : Italia Co., Ltd รุ่น DTSFDDR
6. เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary rheometer) : Rosand Precision Co., Ltd รุ่น Rh 7/2
7. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC) : Perkin Elmer Co., Ltd รุ่น DSC7
8. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) : Shimadzu Co., Ltd รุ่น TGA-51
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) : รุ่น LEO 1455VP
10. ไมโครมิเตอร์ : Mitutoyo รุ่น 293265
11. บริภัณฑ์เครื่องแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสารตัวอย่าง

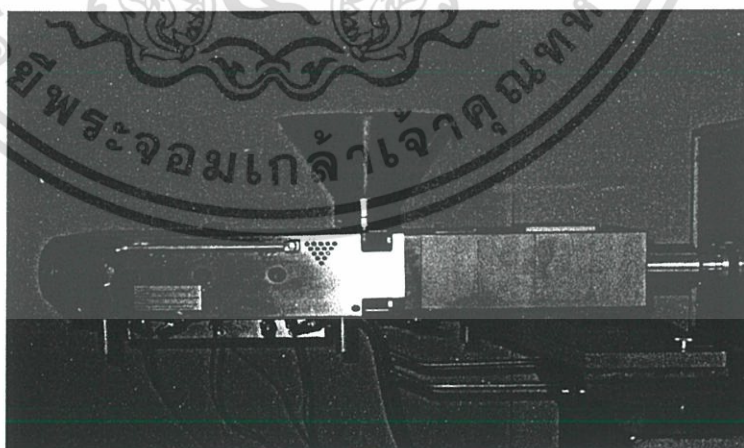
การผสม

1. เตรียมส่วนผสมของสารตัวอย่างให้มีอัตราส่วนดังตารางที่ 3.3 โดยเตรียมสูตรละ 5 กิโลกรัม

ตารางที่ 3.3 สูตรสารตัวอย่างที่เตรียม (% โดยน้ำหนัก)

สูตร	ส่วนประกอบของสารตัวอย่าง
HDPE	HDPE Pure
CA20(2)	HDPE + 20%wt CaCO ₃
CA20(2g)	HDPE + 20%wt CaCO ₃ + 1%wt HDPE-g-MA
CA20(2t)	HDPE + 20%wt CaCO ₃ (SA 1 %wt)
CA30(2)	HDPE + 30%wt CaCO ₃
CA30(2g)	HDPE + 30%wt CaCO ₃ + 1%wt HDPE-g-MA
CA30(2t)	HDPE + 30%wt CaCO ₃ (SA 1%wt)

2. หลังจากเตรียมสูตรผสมได้ตามที่ต้องการแล้ว นำส่วนผสมแต่ละชนิดไปผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่แสดงดังรูปที่ 3.1 ที่อุณหภูมิจากบาร์เรลถึงหัวคาย เป็น 170 180 190 และ 200 °C ตามลำดับ ความเร็วรอบที่ใช้ 13 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.1 เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำส่วนผสมที่ได้จากเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนกลุ่มมาบดเป็นเม็ดเล็ก ๆ ด้วยเครื่องบดพลาสติก

3.3.2 การทดสอบสารตัวอย่างผสม

3.3.2.1 การตรวจสอบความหนาแน่นสารตัวอย่างด้วยวิธี Density gradient column

เตรียมสารละลายผสมระหว่างไดคลอโรมีเทน (CH_2Cl_2) และไซลีน (Xylene) ในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนของสารละลายผสมในแต่ละกระบอกตวง

หมายเลขสารละลาย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CH_2Cl_2 (cm^3)	25	22	20	17	14	11	8	5	3	-
Xylene (cm^3)	-	3	5	8	11	14	17	20	22	25

ใช้แท่งแก้วคนให้ตัวทำละลายทั้งสองผสมกัน แล้วเทตัวทำละลายเหล่านีกลงในกระบอกตวงขนาด 250 cm^3 โดยเริ่มเทจากหมายเลข 1 การเทต้องให้ไหลผ่านแท่งแก้วและสัมผัสผิวด้านในของกระบอกตวง เมื่อเทครบ 10 หมายเลขแล้วใช้แท่งแก้วคน 1 ครั้งและปล่อยให้ของเหลวอยู่ในสมดุลที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นหย่อนเม็ดพลาสติกมาตรฐานที่ทราบความหนาแน่นลงในกระบอกตวงครั้งละ 1 เม็ด เม็ดพลาสติกจะลอยที่ระดับความสูงต่าง ๆ ตามความหนาแน่นของเม็ดพลาสติกนั้น ๆ คือช่วง $855\text{-}1575 \text{ kg/m}^3$ วัดระดับความสูงของเม็ดพลาสติกที่ลอยอยู่จากด้านล่างของกระบอกตวงและสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความหนาแน่นกับความสูง เมื่อได้กราฟมาตรฐานให้นำชิ้นตัวอย่างตัดให้มีขนาดพอสมควรและหย่อนลงในกระบอกตวงที่เตรียมไว้ วัดระดับความสูงที่พอลิเมอร์ตัวอย่างลอยอยู่และเทียบกับกราฟมาตรฐาน แล้วหาความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่าง [27]

3.3.2.2 การทดสอบสมบัติการไหล

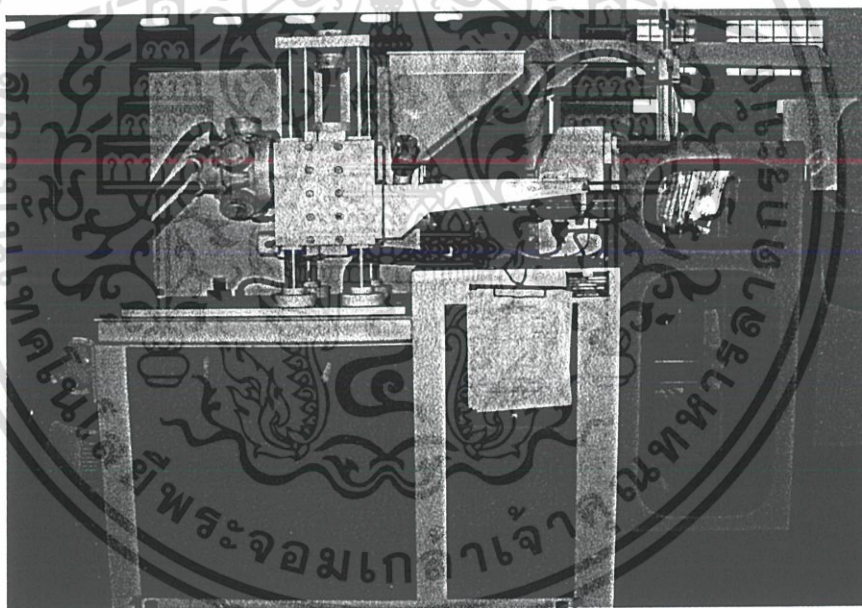
นำเม็ดสารตัวอย่างผสมมาทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Capillary rheometer ที่อุณหภูมิหัวคาย $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ในช่วงอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ที่ $30\text{-}3600 \text{ s}^{-1}$ โดยใช้หัวคายเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ความยาว 0 และ 16 mm มุม 180 เพื่อแก้ไขค่าความดันที่ได้เพื่อให้ได้ความหนืดที่มีค่าถูกต้องมากขึ้นตามมาตรฐาน ASTM D 3835 [28]

3.3.2.3 ศึกษาการบวมตัวของพลาสติกจากเครื่องทดสอบสมบัติการไหล

ศึกษาพฤติกรรมของการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Die swell) โดยการตัดสารตัวอย่าง (Extrudate) ที่ไหลออกจากหัวคายของเครื่อง Capillary rheometer ขนาด 3-4 เซนติเมตร ลงบนกระดาษจำนวน 5 ชั้น ที่อัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) 30 60 และ 150 s^{-1} ของการทดสอบ ที่อุณหภูมิหัวคาย 200 °C ในช่วงเวลาคงที่ จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสารตัวอย่าง (Extrudate) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่าง

3.3.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูป

นำเม็ดสารตัวอย่างที่ผสมและบดไปเป่าขึ้นรูปเป็นขวดด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding machine) แสดงดังรูปที่ 3.2 โดยใช้อุณหภูมิจากบาร์เรลถึงหัวคายเป็น 170 180 190 และ 200 °C ตามลำดับ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 17 °C ความเร็วรอบที่ใช้ 24 รอบต่อนาที ส่วนขวดที่ได้จะนำไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ต่อไป



รูปที่ 3.2 เครื่องเป่าขึ้นรูปพลาสติกชนิดอัดรีด

3.3.3.1 ศึกษาสภาวะการผลิต

ศึกษาสภาวะในการผลิตขวดขณะทำการเป่าขึ้นรูป ได้แก่ ความดันลมเป่า เวลาในการหล่อเย็น และรอบการผลิต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง เพื่อเปรียบเทียบผลของสารตัวเติม $CaCO_3$ ที่มีต่อสภาวะการผลิตขวดแต่ละสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3.2 ศึกษาอัตราการไหลเชิงปริมาตร

ศึกษาสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการขึ้นรูปคือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate) โดยเก็บสารตัวอย่างที่ออกจากหัวคาย (Parison) ของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดในแต่ละความเร็วของสกรูคือ 20 22 24 26 และ 28 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิหัวคาย 200°C ในช่วงเวลาคงที่ที่มาซึ่งน้ำหนัก แล้วนำไปคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรจากความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่าง

3.3.3.3 ศึกษาการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว

ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Parison swell) โดยการตัดสารตัวอย่าง (Parison) ที่ออกจากหัวคายของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดลงในถังน้ำเย็น (อุณหภูมิอยู่ในช่วง $5-8^{\circ}\text{C}$) ที่รองรับอยู่จำนวน 5 ชิ้นในแต่ละความเร็วของสกรูคือ 20 22 24 26 และ 28 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิหัวคาย 200°C ในช่วงเวลาคงที่ จากนั้นวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพาริชัน เพื่อนำไปคำนวณหาค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่าง

3.3.4 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์

ขวดผลิตภัณฑ์ที่มีความสูง 7.7 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.2 cm และมีปริมาตร 106 cm^3 แสดงดังรูปที่ 3.3



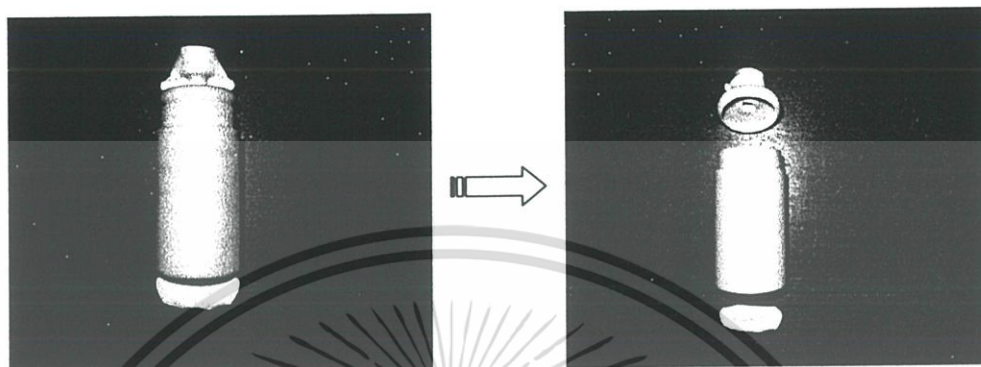
รูปที่ 3.3 ลักษณะผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ก. น้ำหนักต่อขวด

นำขวดที่ขึ้นรูปได้มาตัดพลาสติกส่วนเกินบริเวณปากและก้นขวดออกดังรูปที่ 3.4 จากนั้นนำขวดทุกสูตรสูตรละ 10 ขวดมาชั่งน้ำหนัก เพื่อหาน้ำหนักเฉลี่ย



รูปที่ 3.4 ลักษณะขวดที่ตัดส่วนเกินบริเวณปากขวดและก้นขวดสำหรับวัดน้ำหนักต่อขวด

ข. ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวด

นำขวดมาตัดบริเวณคอขวดและก้นขวดออก จากนั้นตัดบริเวณรอยต่อของขวดให้เป็นที่เหลื่อมผืนผ้าแล้ววัดความหนาโดยรอบขวดตามแนวเส้นรอบวงและแนวตั้งบริเวณละ 5 จุด ในระยะเท่า ๆ กันจำนวน 10 ขวด เพื่อหาค่าเฉลี่ยดังรูปที่ 3.5



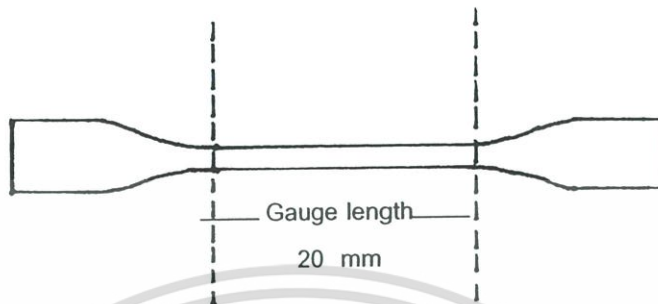
รูปที่ 3.5 ลักษณะชิ้นงานสำหรับวัดความหนาเมื่อ x เป็นการวัดในแนวตั้งและ y เป็นการวัดในแนวเส้นรอบวง

3.3.4.2 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ก. การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

นำขวดมาตัดบริเวณกลางขวดในแนวเส้นรอบวงและแนวตั้งโดยลักษณะชิ้นงานที่ได้เป็นรูปคัมเบลล์ดังรูปที่ 3.6 แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่ความเร็วในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดึง 80 mm/min ระยะการจับชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 20 mm ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D 638 [29] เพื่อหาค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก (Tensile yield stress) เปรอ์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield) และค่ามอดุลัส (Modulus)



รูปที่ 3.6 ชิ้นงานรูปคัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบ

ข. การทดสอบสมบัติความแข็งกด

นำชิ้นงานที่ใช้วัดความหนาคังรูปที่ 3.5 มาซึอนให้มีความหนาประมาณ 6 mm จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบ Dead load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D 2240 [30] เพื่อหาค่าความแข็งกด

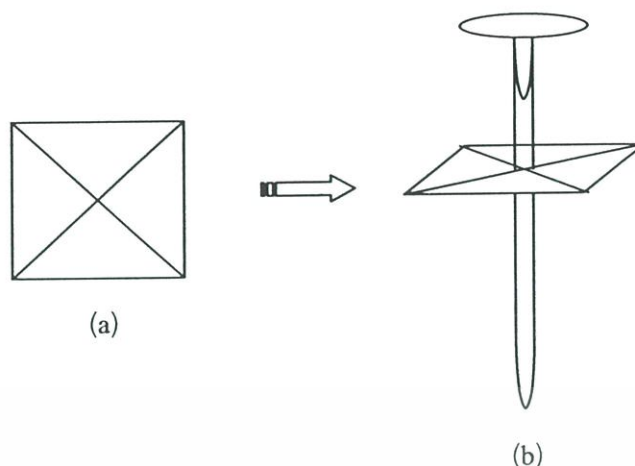
ค. การทดสอบสมบัติความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก

นำขวดที่ผลิตได้จำนวน 20 ขวดบรรจุน้ำให้เต็มขวดพร้อมที่ฝักขวด จากนั้นปล่อยขวดให้ตกสู่พื้นในแนวคังที่ระดับต่าง ๆ กันแล้วบันทึกจำนวนขวดที่แตกและไม่แตกที่ระดับความสูงต่าง ๆ กัน นำค่าที่ได้ไปคำนวณความแข็งแรงกระแทกของขวดตามมาตรฐาน ASTM D 2463 [31]

3.3.4.3 การทดสอบสมบัติความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

นำขวดที่ตัดคอขวดและกั้นขวดออกแล้วจำนวน 10 ขวดมาตัดให้มีลักษณะคังรูปที่ 3.7 (a) โดยกำหนดให้แต่ละคังยาว 2 cm และกรีดชิ้นงานให้เป็นรอยบากในแนวทแยงมุม จากนั้นเจาะและยึดชิ้นงานด้วยตะปูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 cm คังรูปที่ 3.7 (b) แซ่ชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้ในบีกเกอร์ที่มีสารละลาย Nonylphenol polyethylene glycol ether บรรจุอยู่ จากนั้นนำบีกเกอร์ไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50 °C สังเกตการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานตัวอย่างและจดบันทึกเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลง เพื่อนำไปหาค่าความต้านแรงเค้นต่อสภาพแวดล้อมตามมาตรฐาน ASTM D 1693 [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

- ชิ้นงานขนาด 2 x 2 cm ที่มีรอยบาก และ
- ชิ้นงานที่ยึดด้วยตะปูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 cm

3.3.4.4 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง

นำชิ้นสารตัวอย่างที่ตัดจากขวดที่ได้จากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีคมาหาปริมาณ CaCO_3 โดยใช้เครื่อง TGA โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 600°C ภายใต้อากาศ (Air) นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาปริมาณ CaCO_3 ที่แน่นอนตามมาตรฐาน ASTM D 1131 [33]

3.3.4.5 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

นำชิ้นสารตัวอย่างเหมือนการทดสอบที่ผ่านมามาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น $20^\circ\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ 200°C และทำให้เย็นโดยลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา $20^\circ\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของผลึก (T_m) อุณหภูมิของการเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Cry) ตามมาตรฐาน ASTM E 794 [34]

3.3.4.6 ศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3

ตัดชิ้นงานบริเวณพื้นผิวรอบขวดมาแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 10 นาที แล้วหักชิ้นงานทันทีในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ นำพื้นผิวตรงบริเวณรอยหักมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

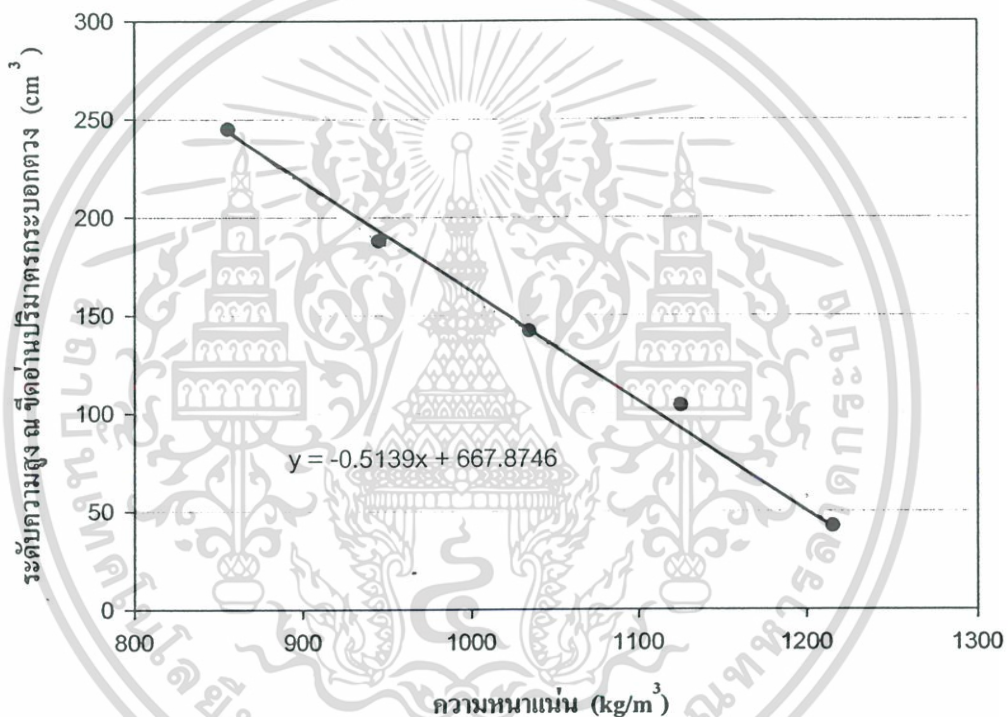
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่าง

นำเม็ดสารตัวอย่างที่ผสมและบดได้จากเครื่องบดพลาสติกมาหาความหนาแน่น โดยสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความหนาแน่น (kg/m^3) กับระดับความสูง ณ จีดอ่านปริมาตรกระบอกตวง (cm^3) ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความสูงและความหนาแน่น

จากกราฟมาตรฐานสามารถเทียบหาความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรได้ แสดงดังตารางที่ 4.1 เช่นเดียวกับความหนาแน่นตามทฤษฎีซึ่งได้จากการคำนวณ (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ก)

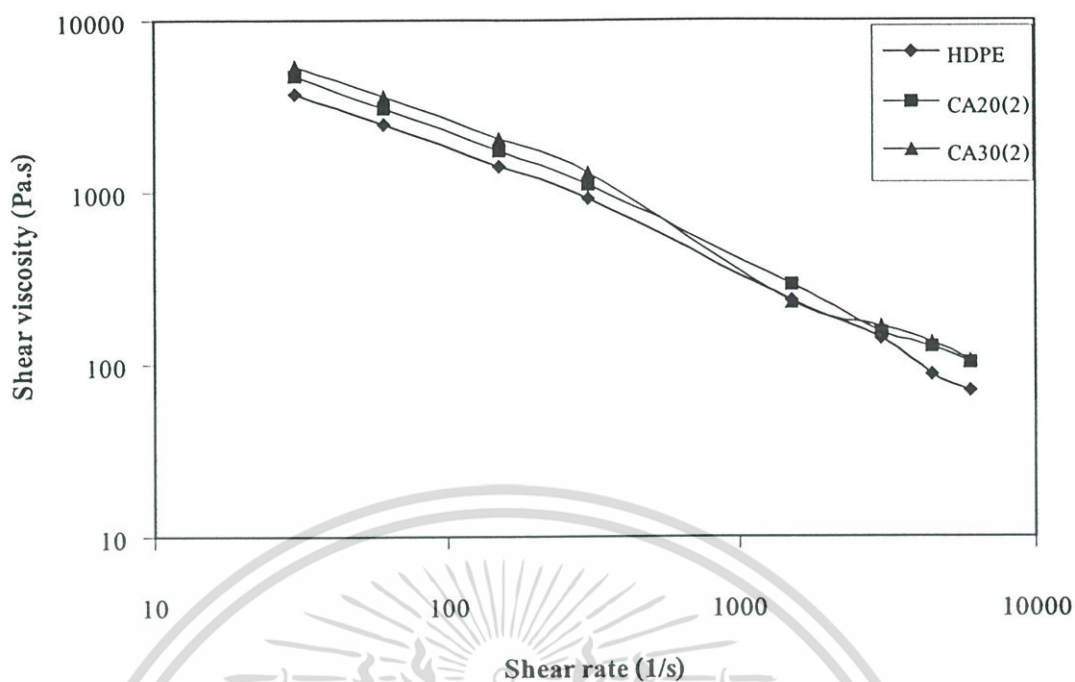
ตารางที่ 4.1 ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร

สูตร	CaCO ₃ (% โดยน้ำหนัก)	ความหนาแน่น (kg/m ³)	
		ค่าตามทฤษฎี	ค่าจากการทดลอง
HDPE	0	962	958
CA20(2)	20	1105	1081
CA20(2g)			1083
CA20(2t)			1080
CA30(2)	30	1193	1158
CA30(2g)			1156
CA30(2t)			1155

จากตารางที่ 4.1 พบว่าความหนาแน่นของ HDPE บริสุทธิ์ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของ HDPE บริสุทธิ์ตามทฤษฎี (HDPE จากโรงงาน) เนื่องจาก HDPE ก่อนนำมาหาความหนาแน่นได้ผ่านการให้ความร้อนจากเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่แล้วปล่อยให้เย็นตัวลง อาจทำให้ความเป็นผลึกลดลงจากเดิม ความหนาแน่นจึงลดต่ำลงเมื่อเทียบกับ HDPE จากโรงงาน เช่นเดียวกับความหนาแน่นของ HDPE สูตรที่ผสม CaCO₃ ที่ได้จากการทดลองมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นตามทฤษฎี (จากการคำนวณ) ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ยังเป็นเพราะเกิดฟองอากาศขึ้นภายในเม็ดพอลิเมอร์ตัวอย่างผสมที่นำมาทดสอบ จึงทำให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำกว่า เมื่อพิจารณาผลของ CaCO₃ พบว่า HDPE ผสม CaCO₃ มีความหนาแน่นสูงกว่า HDPE บริสุทธิ์ เนื่องจาก CaCO₃ มีความหนาแน่น (2700 kg/m³) สูงกว่าของ HDPE (962 kg/m³) ที่เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกันจึงทำให้ HDPE ที่ผสม CaCO₃ มีความหนาแน่นที่สูงกว่า HDPE บริสุทธิ์ และความหนาแน่นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO₃ เพิ่มขึ้นตามกฎของการผสม (Rule of mixture) ส่วนสูตรที่มีการใช้ CaCO₃ เกลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA พบว่าความหนาแน่นมีค่าใกล้เคียงกับความหนาแน่นของ HDPE ผสม CaCO₃ ที่ไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก

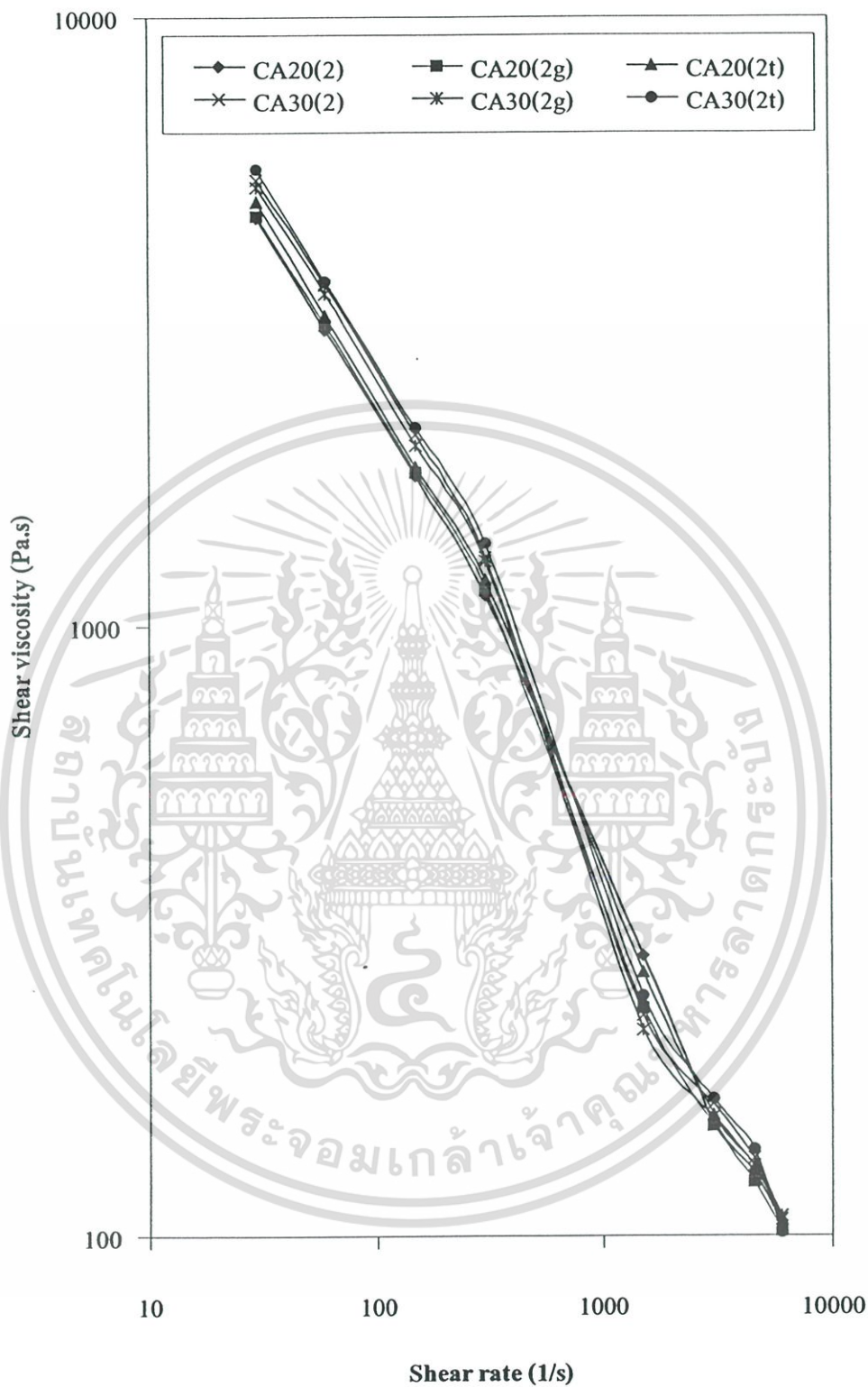
4.2 สมบัติการไหล

เมื่อเตรียมสารตัวอย่างดังตารางที่ 3.3 แล้ว นำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary rheometer) โดยพิจารณาค่าความหนืดเฉือน (Shear viscosity) ของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่อัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ต่าง ๆ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเค้นเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง สูตร HDPE, CA20(2) และ CA30(2)

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าความหนืดเฉือนของ HDPE บริสุทธิ์และ HDPE ที่ผสม CaCO_3 จะลดลงเมื่ออัตราความเค้นเฉือนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการคลายตัวของสายโซ่โพลีเมอร์ (Disentanglement) ที่อัตราความเค้นเฉือนสูง ๆ ทำให้สายโซ่โพลีเมอร์สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันง่ายขึ้นค่าความหนืดจึงลดลง แสดงถึงพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic [35] นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าที่อัตราความเค้นเฉือนสูงๆ ที่มากกว่า 300 s^{-1} ค่าความหนืดที่วัดได้มีความแปรปรวนเกิดขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวถูกขับออกจากคานอย่างรวดเร็วจึงยังเกิดการเสีรูปร่างของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากหัวคาน (Melt fracture) ดังนั้นในกระบวนการเป่าขึ้นรูปอัตราความเค้นเฉือนในช่วงที่เหมาะสมคือไม่เกิน 300 s^{-1} จึงต้องพิจารณาการเลือกใช้อุปกรณ์หมุนของสกรูที่ทำให้เกิดอัตราความเค้นเฉือนให้สอดคล้องกับอัตราความเค้นเฉือนในช่วงดังกล่าว เมื่อพิจารณาผลของ CaCO_3 พบว่าเมื่อผสม CaCO_3 ลงใน HDPE ในปริมาณ 20 % ทำให้ความหนืดเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้น และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 เป็น 30 % เนื่องจากสายโซ่ HDPE เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและเคลื่อนที่ แต่อนุภาคของ CaCO_3 ซึ่งเป็นของแข็ง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างเกิดขึ้นได้น้อยจึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ HDPE ในบริเวณที่เกิดการสัมผัสกันระหว่างสายโซ่ HDPE กับอนุภาคของ CaCO_3 จึงทำให้ค่าความหนืดเฉือนเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [23]



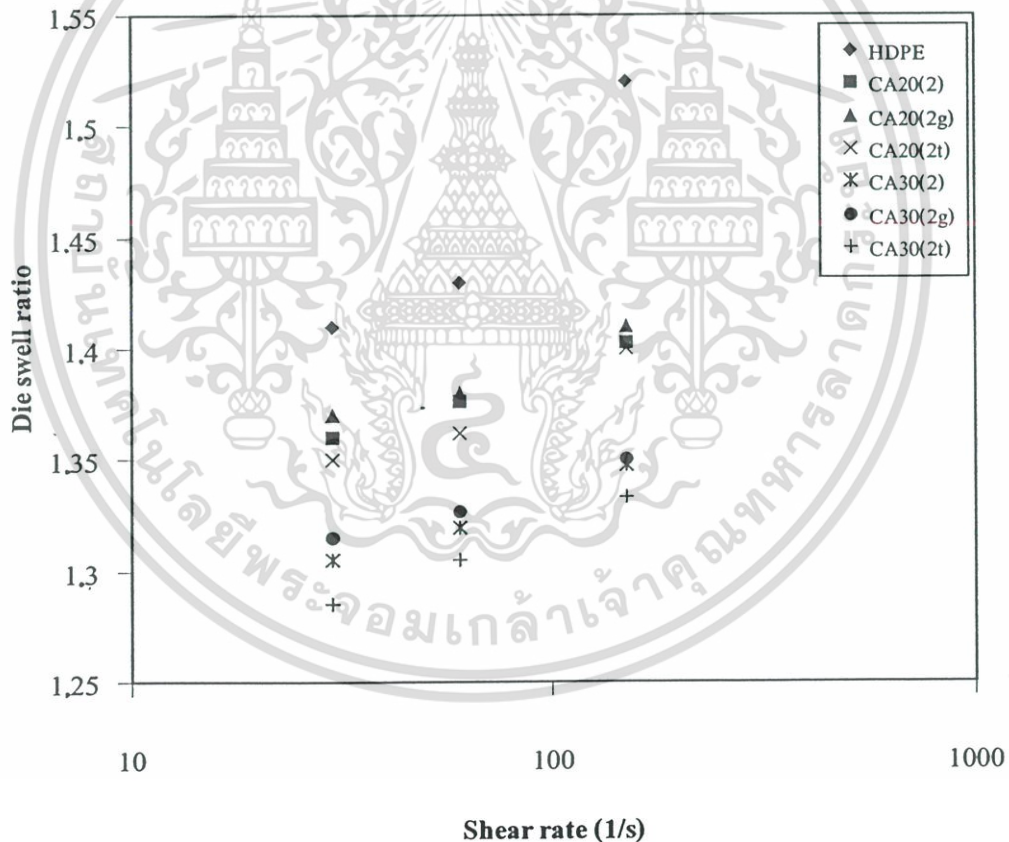
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉือนและอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง สูตร CA20(2), CA20(2g), CA20(2t), CA30(2), CA30(2g) และ CA30(2t)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่าความหนืดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่างเฉพาะสูตรที่ใช้ CaCO_3 เพื่อดูผลของการใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดเตตระไฮดรอกซีหรือใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA พบว่าค่าความหนืดเฉือนของสูตรที่มีกรดเตตระไฮดรอกซีและสูตรที่ใส่ HDPE-g-MA ที่ปริมาณ CaCO_3 เท่ากันมีแนวโน้มเดียวกัน และมีค่าพอ ๆ กับสูตรที่ไม่ได้ใช้สารสองชนิด แสดงว่าสารทั้งสองมิได้ส่งผลต่อความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ตัวอย่าง อาจเนื่องจากปริมาณของสารในกรณีนี้ทั้งสองชนิดที่ใช้น้อยมากเมื่อเทียบกับ HDPE ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง

4.3 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างจากเครื่องทดสอบสมบัติการไหล

ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่าง โดยนำค่าการบวมตัว (Die swell ratio) ที่ได้ (แสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก ข) มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมตัวกับอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรที่เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเฉือนมีค่ามากขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลวมีเวลาอยู่ในคายน้อยลงการคลายตัวของสายโซ่ HDPE เกิดได้น้อยลงและมีพลังงานสะสมเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์ตัวอย่างไหลออกมาบริเวณทางออกของหัวคายนพลังงานบางส่วนที่สะสมอยู่เกิดการปลดปล่อย โดยพลังงานส่วนนั้นจะถูกใช้ในการคืนสภาพของสายโซ่ HDPE ที่หลอมเหลวกลับไปสู่การเกี่ยวพันกัน (Entanglement) ดังเดิมในขณะที่ออกจากหัวคายน [35] เมื่อพิจารณาผลของ CaCO_3 พบว่า HDPE ที่ผสม CaCO_3 ทุกสูตรจะมีค่าการบวมตัวต่ำกว่า HDPE บริสุทธิ์ และเมื่อผสม CaCO_3 ในปริมาณเพิ่มขึ้นค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก CaCO_3 มีลักษณะเป็นของแข็งไม่เปลี่ยนรูปร่างในระหว่างการขึ้นรูป ซึ่งแตกต่างจาก HDPE ที่หลอมเหลวที่มีสมบัติทาง Elastic ดังนั้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 มากขึ้น CaCO_3 จะขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่ HDPE เมื่อออกจากหัวคายนของเครื่อง Capillary rheometer ทำให้ความเป็น Elastic ของระบบลดลง จึงส่งผลต่อค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่าง ผลที่ได้เป็นเช่นเดียวกับงานวิจัยที่ผ่านมา [20] และที่ปริมาณ CaCO_3 30% โดยน้ำหนักเห็นได้ชัดว่าค่าการบวมตัวลดลงเมื่อใช้ CaCO_3 เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก เนื่องจากกรดสเตียริกช่วยให้ CaCO_3 กระจายตัวใน HDPE ได้ดีขึ้น เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นจึงไปขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่ HDPE เพิ่มขึ้น ส่วนการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ทำให้ค่าการบวมตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากโครงสร้างมีส่วนของสายโซ่ HDPE ที่มีโอกาสเกิดการเกี่ยวพันกับสายโซ่ HDPE ที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งจะส่งผลต่อค่าการบวมตัว แต่การใส่ในปริมาณน้อยจึงทำให้ค่าการบวมตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

4.4 กระบวนการเป่าขึ้นรูป

4.4.1 สภาวะที่ใช้ในการผลิตขวดผลิตภัณฑ์

ศึกษาผลของสารตัวเติม CaCO_3 ที่มีต่อสภาวะในการผลิตขวดผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปเมื่อมีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของพอลิเมอร์ตัวอย่าง ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 รอบการผลิตโดยรวมของ HDPE และพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร

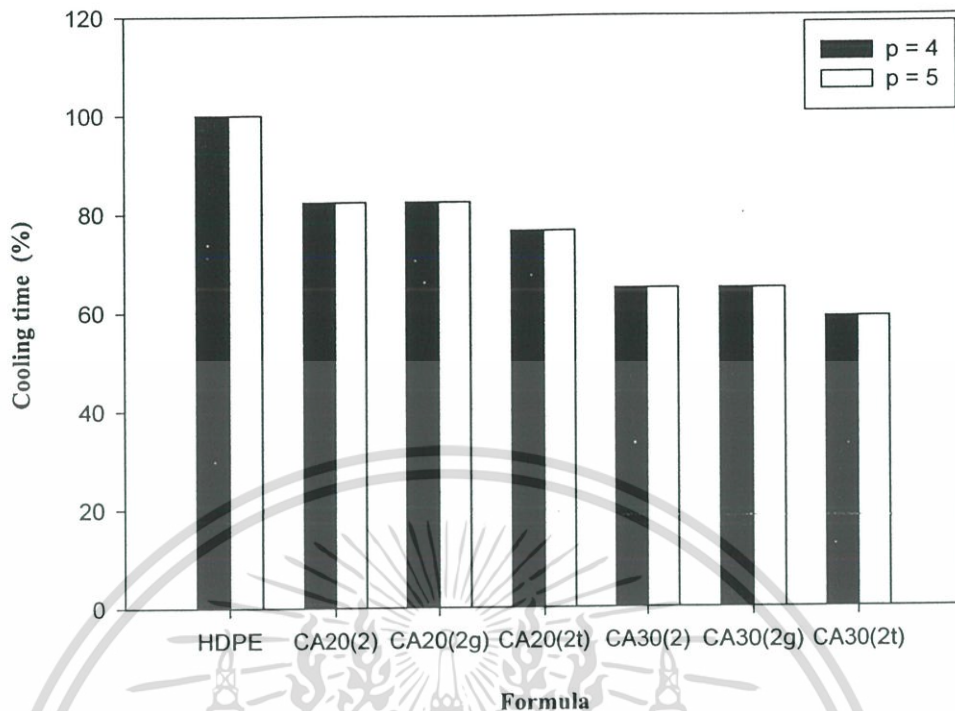
Cycle time	Time x 10 ⁻¹ (s)													
	P = 4 bars							P = 5 bars						
	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G
Mold close	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Carriage down	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Blow pin down	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Blow time	140	120	110	100	90	90	80	140	120	110	100	90	90	80
Holding time	30	20	30	30	20	20	20	30	20	30	30	20	20	20
Cutter time	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Total cycle time	180	150	150	140	120	120	110	180	150	150	140	120	120	110

หมายเหตุ : A = HDPE, B = CA20(2), C = CA20(2g), D = CA20(2t),

E = CA30(2), F = CA30(2g) และ G = CA30(2t)

: เวลาที่ใช้เป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (Blow time) + เวลาที่ผลิตภัณฑ์อยู่ในแม่พิมพ์ (Holding time) = เวลาในการหล่อเย็น (Cooling time)

ตารางที่ 4.2 แสดงเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนของการเป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์แต่ละสูตร (A-G) ที่ความดัน 4 และ 5 บาร์ โดยขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปมีการปรับเปลี่ยนเวลาในการหล่อเย็น (Cooling time) ซึ่งก็คือผลรวมของเวลาที่ใช้เป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์ (Blow time) กับเวลาที่ขวดผลิตภัณฑ์อยู่ภายในแม่พิมพ์ (Holding time) ทั้งนี้เพื่อให้ได้รอบการผลิตที่ใช้เวลาสั้นที่สุดที่สามารถผลิตขวดผลิตภัณฑ์ที่มีความสมบูรณ์ไม่เสียรูปทรง ผลจากการปรับเปลี่ยนเวลาในการหล่อเย็นที่กล่าวมาข้างต้นทำให้รอบการผลิตรวมที่ได้แตกต่างกันดังตารางที่ 4.2 ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบเวลาในการหล่อเย็นของแต่ละสูตรจึงคิดสัดส่วนเวลาในการหล่อเย็นของ HDPE บริสุทธิ์เป็น 100% เวลาในการหล่อเย็นสูตรอื่นเป็นดังกราฟในรูปที่ 4.5 (แสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก ค)



รูปที่ 4.5 เวลาในการหล่อเย็น (%) ของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรที่ P = 4 และ P = 5

หมายเหตุ : P คือความดันลมเป่าในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปหน่วยเป็นบาร์

จากรูปที่ 4.5 พบว่าเวลาในการหล่อเย็น (Cooling time, %) ของพอลิเมอร์ตัวอย่างลดลงเมื่อผสม CaCO_3 ลงใน HDPE เนื่องจากค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของ CaCO_3 (2.5 W/m.k) สูงกว่าของ HDPE (0.52 W/m.k) [36] ทำให้เมื่อนำ CaCO_3 ไปผสมกับ HDPE พอลิเมอร์ตัวอย่างผสมที่ได้จึงมีการส่งผ่านความร้อนออกมาได้มากกว่า HDPE บริสุทธิ์ ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นขดผลิตภัณฑ์ลดลง และลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น เมื่อใช้ CaCO_3 ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดเตตระอิก พบว่าเวลาในการหล่อเย็นน้อยกว่าสูตรที่ใช้ CaCO_3 ที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยกรดเตตระอิก เนื่องจากกรดเตตระอิกทำให้การกระจายตัวของ CaCO_3 ดีขึ้นการส่งผ่านความร้อนทำได้ดีขึ้น ส่วนสูตรที่ใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA จะใช้เวลาในการหล่อเย็นใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่ได้ใช้ HDPE-g-MA เนื่องจากมีโครงสร้างหลักเป็นพอลิเมอร์เช่นเดียวกับ HDPE ที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์จึงไม่ช่วยในเรื่องการถ่ายเทความร้อน ส่วนการเปลี่ยนแปลงความดันลมเป่า จากรูปที่ 4.5 พบว่าเวลาในการหล่อเย็นมีค่าเท่ากันในแต่ละสูตรเมื่อความดันลมเป่าเพิ่มขึ้นเป็นเพราะขดผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้มีขนาดเล็ก ความดันปรับเพิ่มขึ้นจาก 4 เป็น 5 บาร์ซึ่งเป็นช่วงที่น้อยมากและเป็นข้อจำกัดของเครื่องเป่าขึ้นรูปขดรุ่น 200T ทำให้ผลของความดันลมเป่าที่เพิ่มขึ้นที่น่าจะช่วยให้ขดผลิตภัณฑ์เย็นตัวเร็วขึ้นและส่งผลให้รอบการผลิตสั้นลงเนื่อง

จากการขยายตัวของพริชชันกระทบผิวของแม่พิมพ์ที่เร็วกว่าจึงไม่เห็นผลที่ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

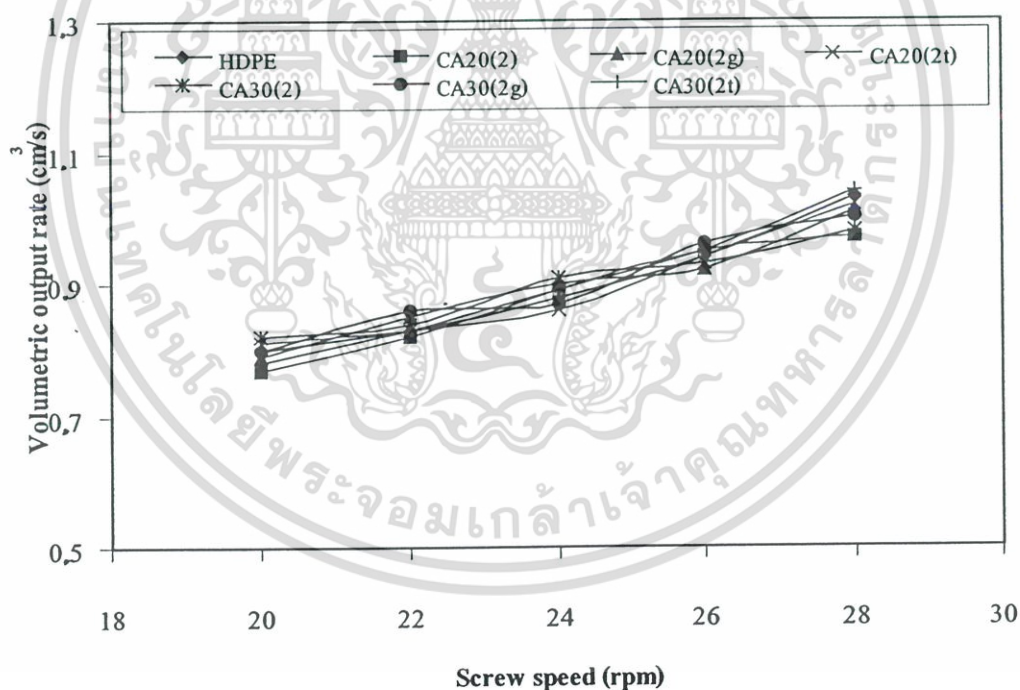
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.2 รูปที่ 4.5 และที่กล่าวมาข้างต้นทำให้พิจารณาได้ว่า CaCO_3 ที่ผสมลงใน HDPE ช่วยลดเวลาในการหล่อเย็นในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูป เนื่องจากความสามารถในการนำความร้อนที่ดีของ CaCO_3 ทำให้รอบการผลิตโดยรวมทั้งหมดลดลง ซึ่งในแง่ของอุตสาหกรรมจะเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการผลิตได้

สำหรับกระบวนการเป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์เลือกใช้รอบการผลิตและสภาวะการผลิตของสูตร HDPE บริสุทธิ์ในการเป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์ทุกสูตร เพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้สารเติมแต่งที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน เป็นต้น

4.4.2 อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ตัวอย่างในกระบวนการเป่าขึ้นรูป

ศึกษาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ตัวอย่าง โดยคำนวณได้จากน้ำหนักของพาริชันและความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้ (แสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก ง) ผลการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงปริมาตรกับรอบการหมุนของสกรูของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร

จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ได้สามารถคำนวณหาอัตราความเครียดเฉือน (Shear rate) ของพอลิเมอร์ตัวอย่างหลอมเหลวทุกสูตรที่เกิดขึ้นภายในคานของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราครีในแต่ละรอบการหมุนของสกรูคือ 20 22 24 26 และ 28 รอบ/นาที (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ง) ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในคานของเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัตราครีที่แต่ละรอบการหมุนของสกรูของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร

รอบการหมุน ของสกรู (rpm)	อัตราความเครียดเฉือน (1/s)						
	HDPE	CA20 (2)	CA20 (2g)	CA20 (2t)	CA30 (2)	CA30 (2g)	CA30 (2t)
20	158.02	152.09	156.04	160.00	161.97	158.02	154.07
22	163.95	161.97	167.90	163.95	165.92	169.87	163.95
24	173.82	175.80	177.77	169.87	179.75	171.85	175.80
26	185.67	187.65	181.72	185.67	183.70	189.62	187.65
28	203.45	191.60	199.50	201.48	193.58	197.53	205.43

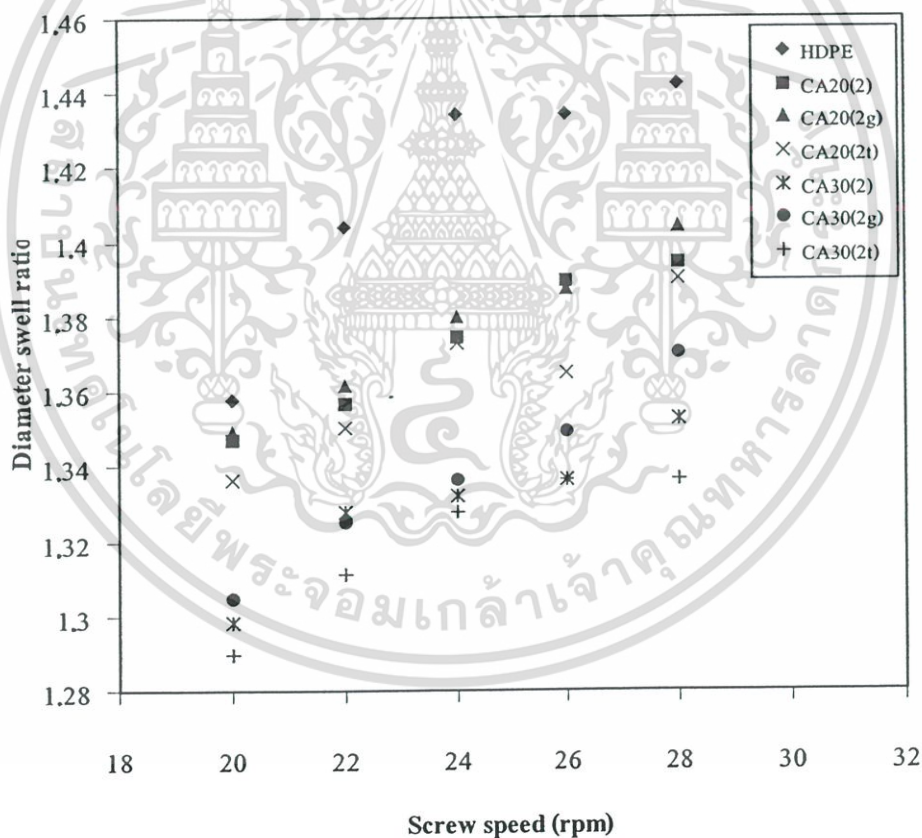
จากรูปที่ 4.6 พบว่ารอบการหมุนของสกรูที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์ตัวอย่างมีพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic (จากผลในข้อ 4.2) และการเพิ่มรอบการหมุนของสกรูเป็นการเพิ่มอัตราความเครียดเฉือนทำให้พอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลวมีความหนืดลดลง ความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้น พาริชั่นไหลออกจากหัวคานมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์ เนื่องจาก HDPE บริสุทธิ์มีความหนืดที่ต่ำกว่า HDPE ที่ผสม CaCO_3 ทำให้ความสามารถในการไหลดี พาริชั่นจึงไหลออกมาได้มาก แต่มีน้ำหนักเบาเพราะความหนาแน่นขณะหลอมเหลวต่ำ ในทางกลับกัน HDPE ที่มีการผสม CaCO_3 ซึ่งมีความหนืดสูงกว่าทำให้ความสามารถในการไหลออกจากหัวคานลดลง พาริชั่นจึงไหลออกมาได้น้อย แต่มีน้ำหนักรวมมากกว่าเนื่องจากความหนาแน่นขณะหลอมเหลวสูง ดังนั้นอัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ที่ไม่มีและมี CaCO_3 จึงมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อมีการใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA พบว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรมีค่าใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่ได้ใช้สารสองชนิดที่กล่าวมา แสดงว่าสารทั้งสองมิได้ส่งผลต่อความสามารถในการไหลของพอลิเมอร์ตัวอย่าง เนื่องจากมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับ HDPE ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง

จากตารางที่ 4.3 พบว่าอัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นภายในคานของเครื่องเป่าขึ้นรูปจากการใช้รอบการหมุนของสกรูเป็น 20 24 24 26 และ 28 รอบ/นาที โดยเฉพาะที่ 24 รอบ/นาที ซึ่งเป็นรอบการหมุนของสกรูที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นภายในคานของเครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Capillary rheometer) ดังกราฟรูปที่ 4.2 พบว่าอัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นของเครื่องเป่าขึ้นรูปดังตารางที่ 4.3 อยู่ในช่วง 154.07-205.43 ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เกิดความแปรปรวนและเสีรูปร่างของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt fracture) เมื่อเทียบกับอัตราความเครียดเฉือนจากเครื่องทดสอบสมบัติการไหล ($< 300 \text{ s}^{-1}$) ทำให้ไม่มีผลของ melt fracture ที่จะมีผลต่อรูปร่างขวดผลิตภัณฑ์ที่ได้ ดังนั้นอัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในคานของเครื่องเป่าขึ้นรูปจึงอยู่ในช่วงที่เหมาะสม ส่งผลให้รอบการหมุนของสกรูที่ทำให้เกิดอัตราความเครียดเฉือนดังตารางที่ 4.3 เหมาะสำหรับการเป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์

4.4.3 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างจากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค

ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่าง โดยนำค่าการบวมตัว (Diameter swell ratio) ที่ได้ (แสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก ข) มาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการบวมตัวของพารีชันกับอัตราความเครียดเฉือนของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตร

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วของสกรูค่าการบวมตัวของพาริซันทุกสูตรมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลวมีเวลาอยู่ในคายน้อยลงการคลายตัวเกิดขึ้นน้อยลงเมื่อถูกขับออกจากหัวคายเกิดการคืนตัวมากขึ้นค่าการบวมตัวจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาผลของ CaCO_3 พบว่าค่าการบวมตัวลดลงเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกค่าการบวมตัวที่ได้ลดลงมากขึ้น ส่วนการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA พบว่าค่าการบวมตัวเพิ่มขึ้น แต่แนวโน้มที่ได้ไม่ชัดเจนเหมือนกับผลในข้อ 4.3 ซึ่งเป็นผลการทดลองที่ได้จากเครื่อง capillary rheometer ทั้งนี้อาจเป็นเพราะขนาดและน้ำหนักของพาริซันที่มากกว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากหัวคาย (Extrudate) ของเครื่อง capillary rheometer จึงมีผลทำให้เกิดการย่อยตัวของพาริซันส่งผลให้รูปร่าง (หรือขนาด) ของพาริซันเล็กลง นอกจากนี้ในวิธีการทดสอบเพื่อเป็นการป้องกันการโค้งงอและบิดเบี้ยวของพาริซันที่จะนำมาหาค่าการบวมตัว จึงต้องทำให้พาริซันมีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วโดยใช้ถังน้ำเย็นรองรับพาริซันที่ตัดจากเครื่องเป่าขึ้นรูป ดังนั้นผลของอุณหภูมิในถังที่รองรับพาริซันและเวลาที่พาริซันแช่ในถังน้ำจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้การบวมตัวของพาริซันมีความแปรปรวนเกิดขึ้น

4.4.4 สมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์

4.4.4.1 น้ำหนักต่อขวดของผลิตภัณฑ์

น้ำหนักที่ขึ้นรูปได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดมาห้าน้ำหนักต่อขวด ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 น้ำหนักต่อขวด

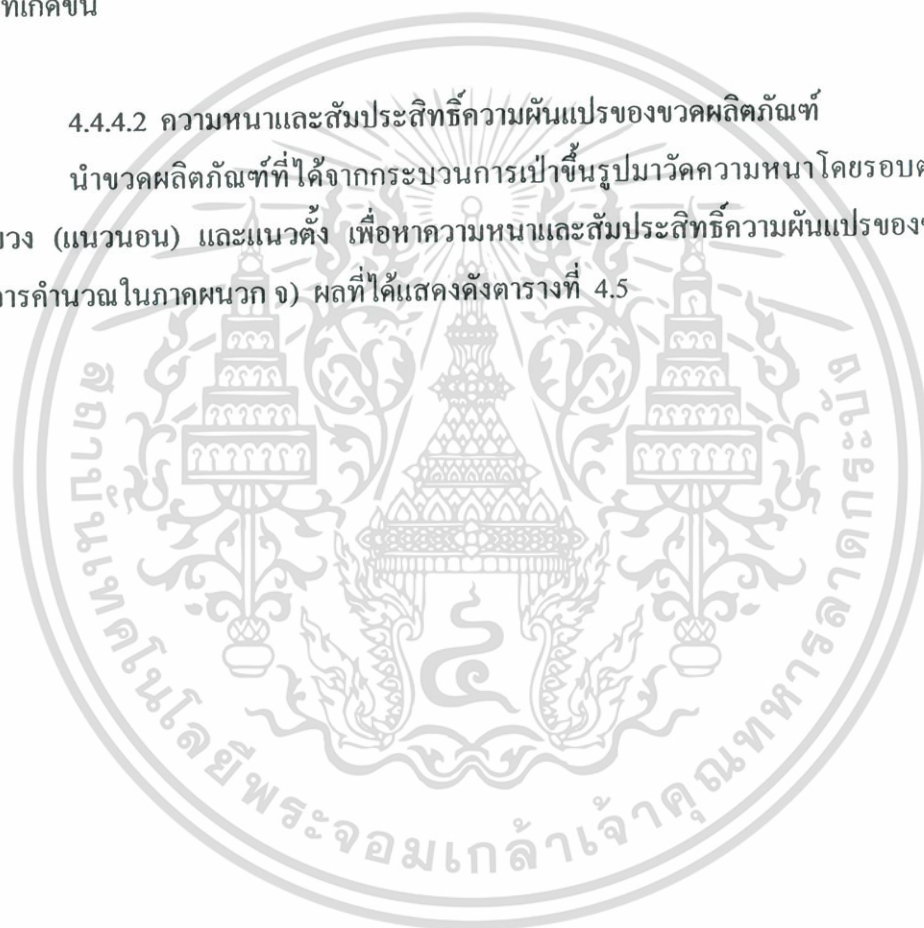
สูตร	P = 4 bars		P = 5 bars	
	น้ำหนักต่อขวด (g)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	น้ำหนักต่อขวด (g)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
HDPE	10.75	0.26	10.77	0.28
CA20(2)	11.64	0.13	11.46	0.14
CA20(2g)	11.46	0.15	11.68	0.12
CA20(2t)	11.60	0.11	11.58	0.10
CA30(2)	11.78	0.12	11.77	0.10
CA30(2g)	11.76	0.11	11.79	0.14
CA30(2t)	11.91	0.19	11.85	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 พบว่าน้ำหนักของขวด HDPE บริสุทธิ์น้อยกว่าน้ำหนักขวด HDPE ผสม CaCO_3 เนื่องจากความหนาแน่นที่สูงกว่าของ CaCO_3 เมื่อเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์ ดังนั้นเมื่อนำมาผสมกันพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้จึงมีความหนาแน่นสูงขึ้นดังผลการทดสอบในข้อ 4.1 ดังนั้นน้ำหนักขวดก็จะเพิ่มตามความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นและจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ CaCO_3 ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง เมื่อพิจารณาความคลาดเคลื่อนหรือส่วนเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้น อาจเนื่องจากในขั้นตอนการทดสอบการตัดส่วนเกินบริเวณปากขวดและก้นขวดอาจไม่สม่ำเสมอทำให้น้ำหนักที่ได้แตกต่างกัน แต่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้นมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง 0.10-0.28 ดังนั้นผลของ CaCO_3 ที่มีต่อน้ำหนักขวดผลิตภัณฑ์จึงมากกว่าความคลาดเคลื่อนหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกิดขึ้น

4.4.4.2 ความหนาแน่นและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์

นำขวดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูปมาวัดความหนาแน่นโดยรอบตามแนวเส้นรอบวง (แนวนอน) และแนวตั้ง เพื่อหาความหนาแน่นและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวด (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก จ) ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5



ตารางที่ 4.5 ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์

สูตร	แนวนอน				แนวตั้ง			
	ช่วง ความหนา (mm)	ความ หนา (mm)	ส่วน เบี่ยง เบน มาตรฐาน ฐาน	สัมประ สิทธิ์ ความผัน แปร (%)	ช่วง ความหนา (mm)	ความ หนา (mm)	ส่วน เบี่ยง เบน มาตรฐาน ฐาน	สัมประ สิทธิ์ ความผัน แปร (%)
P = 4 bars								
HDPE	0.93-1.15	1.07	0.01	0.93	0.97-1.17	1.08	0.09	8.33
CA20(2)	0.91-1.16	1.03	0.03	2.91	0.97-1.05	1.01	0.07	6.93
CA20(2g)	0.90-1.17	1.01	0.02	1.98	0.59-1.06	1.01	0.11	10.89
CA20(2t)	0.90-1.19	1.04	0.01	0.96	0.97-1.03	1.01	0.11	10.89
CA30(2)	0.79-1.11	0.97	0.04	4.12	0.81-0.96	0.93	0.13	13.97
CA30(2g)	0.84-1.11	0.99	0.05	5.05	0.89-1.02	0.94	0.19	20.21
CA30(2t)	0.83-1.19	1.00	0.03	3.00	0.95-1.06	1.01	0.13	12.87
P = 5 bars								
HDPE	0.95-1.19	1.09	0.02	1.83	0.98-1.15	1.08	0.09	8.33
CA20(2)	0.91-1.14	1.03	0.03	2.91	0.96-1.05	1.01	0.10	9.90
CA20(2g)	0.89-1.15	1.02	0.02	1.96	0.99-1.07	1.03	0.09	8.73
CA20(2t)	0.90-1.12	1.05	0.02	1.90	0.98-1.07	1.02	0.09	8.82
CA30(2)	0.85-1.09	1.02	0.05	4.90	0.89-0.96	0.93	0.10	10.75
CA30(2g)	0.88-1.09	0.96	0.04	4.16	0.88-1.05	1.00	0.09	9.00
CA30(2t)	0.82-1.17	1.01	0.04	3.96	0.96-1.04	1.00	0.12	12.00

จากตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาผลของ CaCO_3 พบว่าขวดผลิตภัณฑ์สูตรที่ผสม CaCO_3 มีความหนาน้อยกว่าขวด HDPE บริสุทธิ์และความหนาจะลดลงเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 ไปขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่ HDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ ทำให้พาริชั่นที่ได้มีการบวมตัวน้อยกว่าพาริชั่นของ HDPE บริสุทธิ์ ส่งผลให้เมื่อเป่าขึ้นรูปเป็นขวดผลิตภัณฑ์ความหนาของขวดสูตรที่ผสม CaCO_3 จึงน้อยกว่าขวด HDPE บริสุทธิ์ ส่วนสัมประสิทธิ์ความผันแปรมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นบ่งบอกถึงการกระจายตัวที่ไม่ดีของ CaCO_3 นอกจากนั้นอาจเกิดจากชิ้นงานส่วนที่นำมาวัดความหนายังมีส่วนโค้งตามรูปทรงของขวดผลิตภัณฑ์และพื้นผิวด้านในของขวดก็มีความขรุขระจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดความคลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

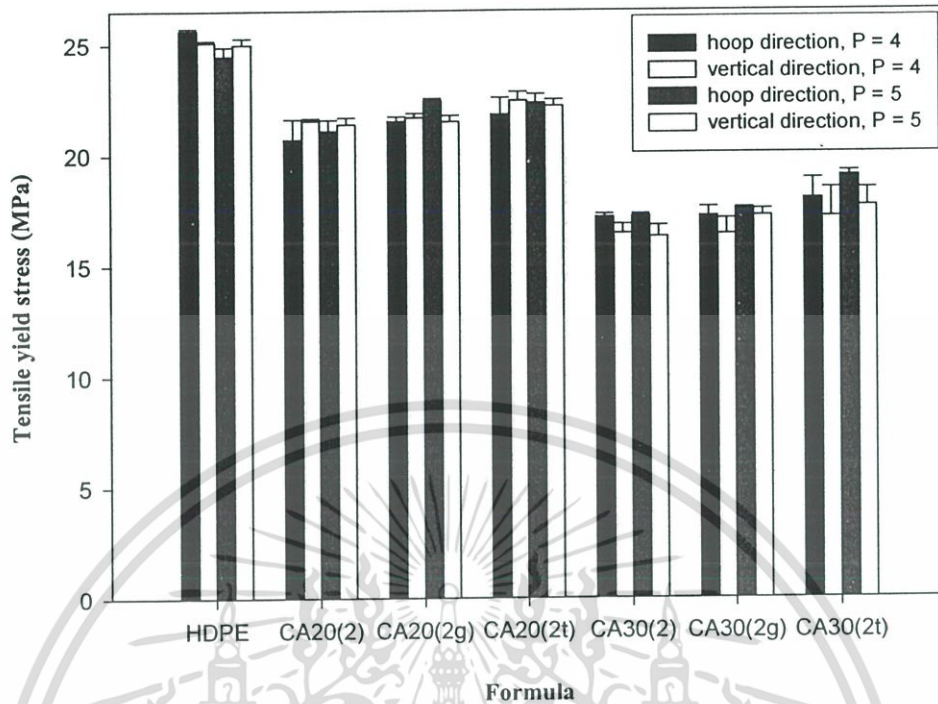
เคลื่อนในการวัดได้ เมื่อพิจารณาความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขดผลิตภัณฑ์สูตรที่ใช้ CaCO_3 เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือที่ใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่ได้ใช้สารทั้งสองชนิด

เมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาเฉลี่ยของขดในแนวนอนและแนวตั้งพบว่า ความหนาเฉลี่ยทั้งสองแนวของขดผลิตภัณฑ์ในแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการขยายตัวของพาริชั่นเมื่อทำการเป่าขึ้นรูปทั้งสองแนวพอ ๆ กัน ส่วนสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขดผลิตภัณฑ์ในแนวนอนจะมีค่าน้อยกว่าแนวตั้ง เพราะในแนวนอนนั้นพาริชั่นของพอลิเมอร์ตัวอย่างขยายตัวออกอย่างสม่ำเสมอเป็นทรงกระบอก ทำให้ความหนาใกล้เคียงกันเมื่อเป่าขึ้นรูปเป็นขดผลิตภัณฑ์ ส่วนในแนวตั้งมีอิทธิพลของแรงโน้มถ่วงเนื่องจากน้ำหนักของพาริชั่นเข้ามาเกี่ยวข้อง พาริชั่นที่อัดรีดออกจากหัวดายจึงมีการยืดตัวออกตามน้ำหนักตัวของพาริชั่น (Sagging) ทำให้ความหนาของพาริชั่นบริเวณคอขดมีน้อยและความหนาจะมากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงก้นขด ดังนั้นความหนาของขดผลิตภัณฑ์ตั้งแต่คอขดถึงก้นขดจึงแตกต่างกัน โดยที่ก้นขดจะมีความหนามากกว่าคอขด ในส่วนของความผันแปรที่มีการปรับเปลี่ยนจะให้ค่าความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขดผลิตภัณฑ์ทุกสูตรใกล้เคียงกันเนื่องจากขดผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กและความดันก็มีการปรับขึ้นเพียงเล็กน้อยจาก 4 เป็น 5 บาร์ ดังนั้นความหนาที่จะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความดันจึงไม่เห็นผลที่ชัดเจน

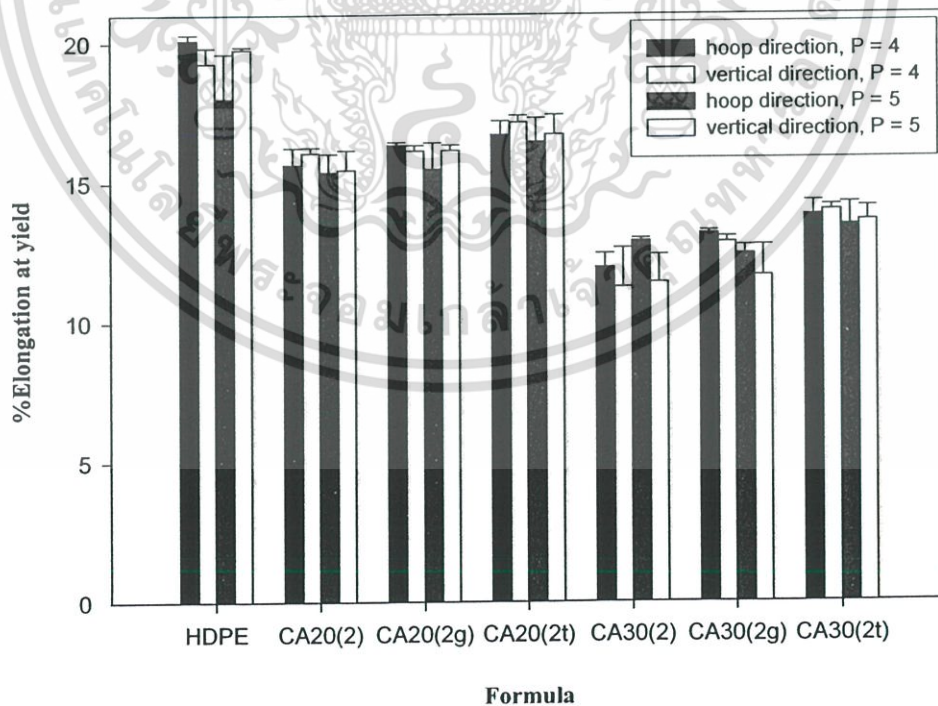
4.4.5 สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์

4.4.5.1 ความเค้นดึง ณ จุดคราก เเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากและมอดูลัส

นำขดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูปไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบแรงกดอัดเพื่อหาค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก (Tensile yield stress) เเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield) และค่ามอดูลัส (Modulus) โดยค่าที่ได้แสดงดังกราฟรูปที่ 4.8-4.10

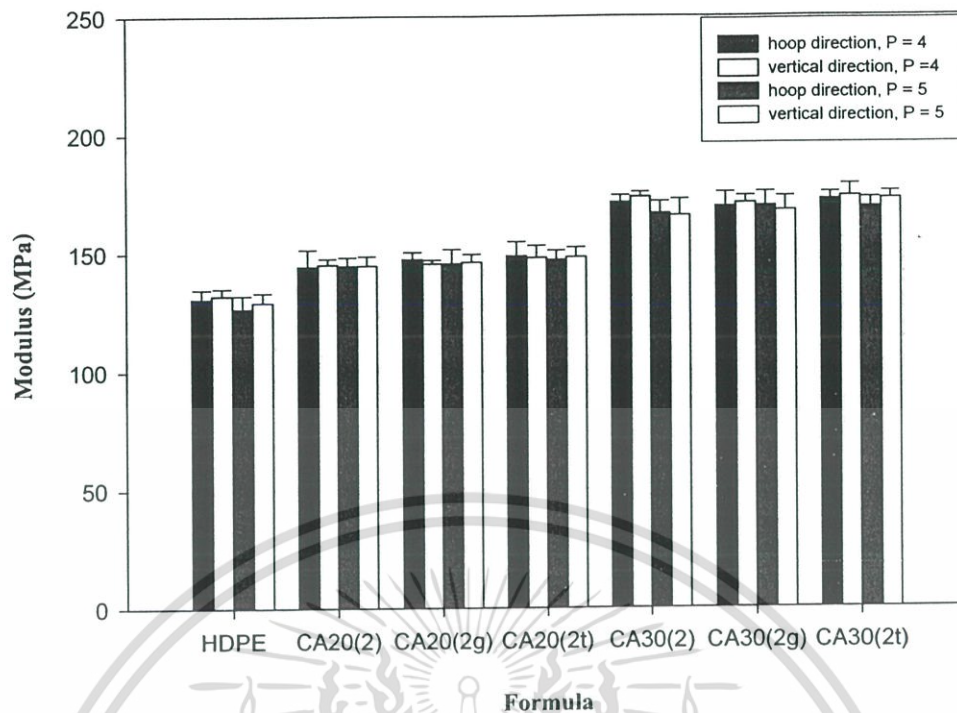


รูปที่ 4.8 ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5



รูปที่ 4.9 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ค่ามอดูลัสของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5

จากรูปที่ 4.8-4.10 เมื่อพิจารณาค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เปรอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก และมอดูลัสของขวดผลิตภัณฑ์ในแนวเส้นรอบวงหรือแนวอน (Hoop direction) และแนวตั้ง (Vertical direction) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากการขยายตัวของพาริชั่นในแนวอนและแนวตั้งมีการขยายตัวพอ ๆ กัน เพราะขวดผลิตภัณฑ์มีรูปทรงระบอบและมีขนาดเล็กโดยมีปริมาตรเท่ากับ 106.72 cm^3 และความสูงเท่ากับ 7.70 cm ส่งผลให้การจัดเรียงตัวในแนวอนและแนวตั้งมีค่าใกล้เคียงกันหรือสมดุลกัน

เมื่อปรับเพิ่มความดันลมเป่าที่ใช้ในการเป่าขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์ค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก เปรอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก และมอดูลัสของขวดผลิตภัณฑ์ในแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องจากขวดมีขนาดเล็กและการปรับเพิ่มความดันก็มีข้อจำกัดในเรื่องอุปกรณ์ จึงทำให้ปรับเพิ่มขึ้นได้จาก 4 เป็น 5 บาร์ ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนเพียงเล็กน้อย ดังนั้นการเพิ่มความดันที่จะช่วยให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่ HDPE ที่เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ของขวดผลิตภัณฑ์ในแนวอนหรือแนวเส้นรอบวงเพิ่มขึ้นซึ่งจะมีผลต่อสมบัติเชิงกลที่ได้ไม่ให้เกิดที่ชัดเจน

จากรูปที่ 4.8 พบว่าเมื่อผสม CaCO_3 ลงใน HDPE ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากมีค่าลดลง เนื่องจาก HDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์เป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว แต่ CaCO_3 เป็นวัสดุที่มีขั้ว เมื่อผสมกันวัสดุทั้งสองจึงไม่เกิดแรงกระทำระหว่างกันทำให้ไม่สามารถเข้ากันได้ดี ส่งผลให้ CaCO_3 ที่เติมลงไปมีโอกาสรวมกันเป็นกลุ่มก้อน นอกจากนั้นยังเป็นการลดวัสดุภาคในส่วนของ

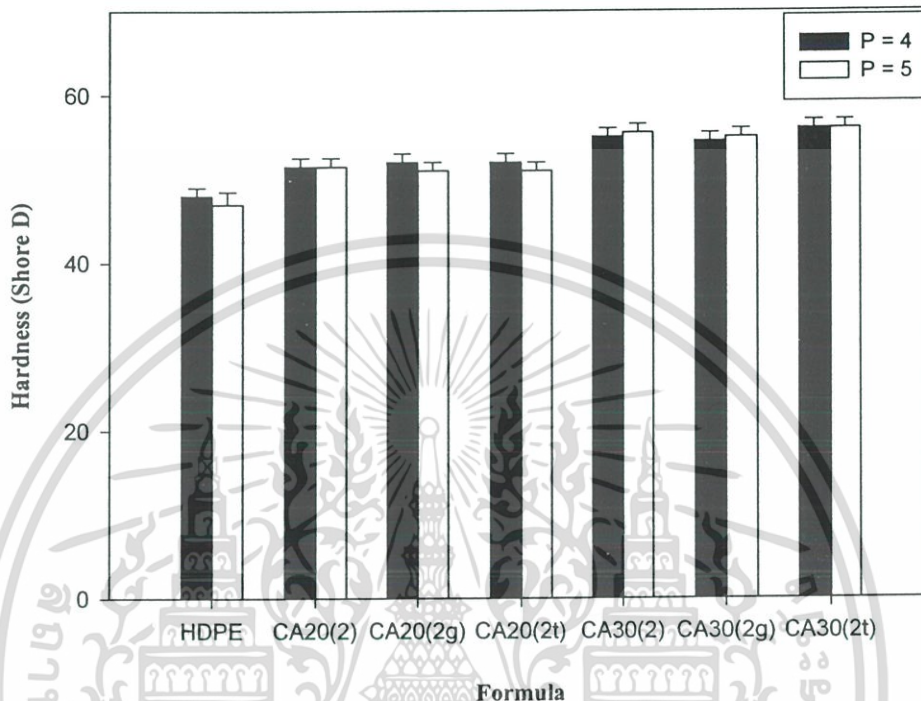
พอลิเมอร์ (HDPE) ซึ่งเป็นส่วนที่รับแรงดึง ดังนั้นความสามารถในการรับแรงจึงลดลงตามปริมาณพอลิเมอร์ที่ลดลง ส่งผลให้ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากลดลง จากนั้นเมื่อใช้ CaCO_3 ที่ได้รับการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกจะช่วยให้การกระจายตัวของ CaCO_3 ใน HDPE ดีขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของ CaCO_3 กับ HDPE ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากจึงมีค่าเพิ่มขึ้น เล็กน้อย ส่วนการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่ามีค่าไม่แตกต่างกับเมื่อไม่ได้ใช้สารช่วยผสม

จากรูปที่ 4.9 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากของ HDPE มีค่าลดลงเมื่อผสม CaCO_3 เนื่องจากอนุภาค CaCO_3 เป็นอนุภาคที่แข็งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทำได้ยากต่างจากสายโซ่ HDPE ที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ จึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ HDPE และ CaCO_3 ที่เติมลงไปจะเข้าไปแทรกตัวในเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้ความต่อเนื่องของ HDPE ลดลง ดังนั้นความสามารถในการยืดของพอลิเมอร์ตัวอย่างจึงลดลง ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากจึงมีค่าลดลง และจะลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น ส่วนการใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากของพอลิเมอร์ตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดสเตียริกช่วยลดความมีขั้วของ CaCO_3 ทำให้การกระจายตัวดีขึ้นเพิ่มความต่อเนื่องของ HDPE เมทริกซ์ ส่วนสารช่วยผสม HDPE-g-MA ให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากใกล้เคียงกัน

จากรูปที่ 4.10 พบว่าค่ามอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อผสมสารตัวเติม CaCO_3 เนื่องจาก CaCO_3 ที่เติมลงไปมีค่ามอดูลัสสูงกว่า HDPE [36] ดังนั้นพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้จึงมีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น และเมื่อใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกผสมลงใน HDPE พบว่าค่ามอดูลัสไม่เปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อเทียบกับสูตรอื่น เช่นเดียวกับสูตรที่ใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA เนื่องจากผสมในปริมาณน้อย

4.4.5.2 ความแข็งกด

นำตัวอย่างที่ตัดเป็นรูปคัมเบลล์มาทดสอบสมบัติความแข็งกด (Hardness) ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งกดชนิด Shore D ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.11

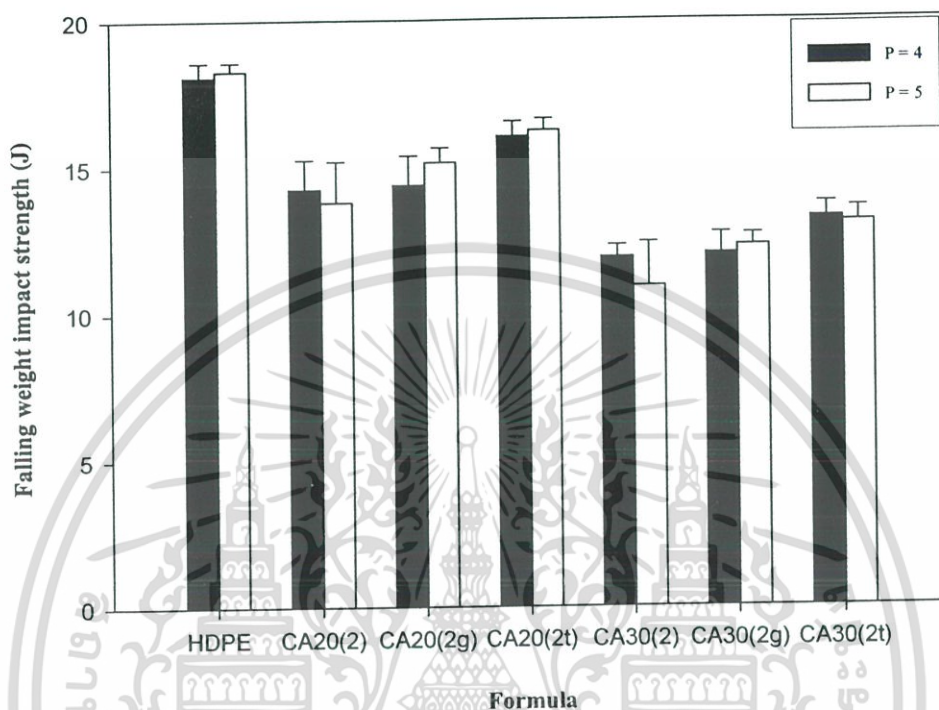


รูปที่ 4.11 ค่าความแข็งกดของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4.11 พบว่าค่าความแข็งกดของพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตรที่ผสม CaCO_3 มีค่าสูงกว่า HDPE บริสุทธิ์ เนื่องจากอนุภาค CaCO_3 มีค่าความแข็งกด (3 โมห์สเกล) [36] มากกว่า HDPE เมื่อนำมาผสมกันพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้จึงมีค่าความแข็งกดสูงขึ้นทนต่อแรงกดได้ดีขึ้น และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของ CaCO_3 ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง ส่วนการเคลือบผิวของ CaCO_3 ด้วยกรดสเตียริกและการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ไม่ส่งผลต่อค่าความแข็งกด ส่วนความดันที่ปรับเปลี่ยนก็ไม่มีผลต่อค่าความแข็งกดของผลิตภัณฑ์สังเคราะห์ได้จากค่าความแข็งกดมีค่าใกล้เคียงกัน

4.4.5.3 ความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก

นำขวดผลิตภัณฑ์ที่เป่าขึ้นรูปมาทดสอบความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก (Falling weight impact strength) ผลที่ได้ (แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ฉ) แสดงดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักที่ P=4 และ P=5

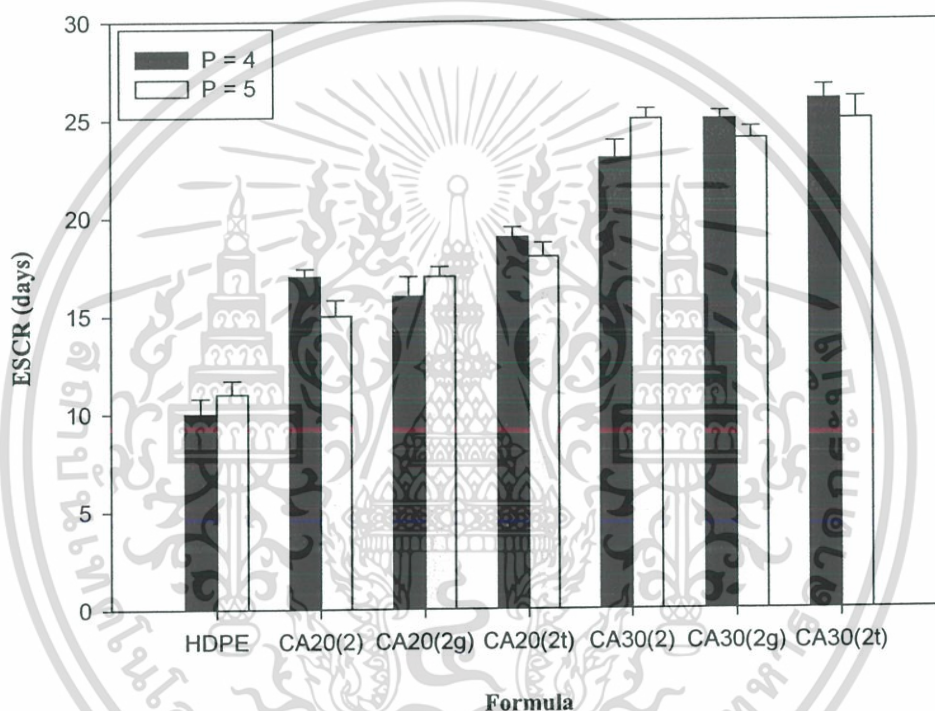
จากรูปที่ 4.12 พบว่าค่า Falling weight impact strength ของ HDPE มีแนวโน้มลดลงเมื่อผสม CaCO_3 เนื่องจาก CaCO_3 ทำให้ความต่อเนื่องของ HDPE ที่เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ลดลง และการที่เป็นอนุภาคที่แข็งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้น้อย เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างรวดเร็วจึงไม่สามารถส่งผ่านแรงได้ดีเมื่อเทียบกับสายโซ่ HDPE เมตริกซ์ ดังนั้นพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตรที่ผสม CaCO_3 จึงเกิดการแตกหักได้ง่ายกว่า HDPE บริสุทธิ์ ค่า Falling weight impact strength จึงลดลงและลดลงมากขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 ในพอลิเมอร์ตัวอย่างเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มส่วนที่มีการส่งผ่านแรงหรือกระจายแรงไม่ดีในพอลิเมอร์ตัวอย่างและ CaCO_3 เริ่มอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น (Agglomerates) จากนั้นเมื่อใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกพบว่าพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่า Falling weight impact strength เพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดสเตียริกช่วยลดความมีขั้วของ CaCO_3 ทำให้การกระจายตัวดีขึ้นลดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนเพิ่มความต่อเนื่องในการส่งผ่านแรงของ HDPE ส่วน HDPE-g-MA ก็ช่วยในการผสมระหว่าง HDPE กับ CaCO_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้ค่า Falling weight impact strength เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในส่วนของความต้านลมเป่าที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อค่า Falling weight impact strength เช่นเดียวกับผลในข้อ 4.4.5.1

4.4.6 ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

เมื่อทำการเตรียมตัวอย่างดังรูปที่ 3.7 จากนั้นนำมาทดสอบความต้านแรงเค้นต่อสภาพแวดล้อม (Environmental Stress Cracking Resistance, ESCR) ผลที่ได้ (ผลการทดสอบแสดงในภาคผนวก ข) นำมาสร้างกราฟดังรูปที่ 4.13



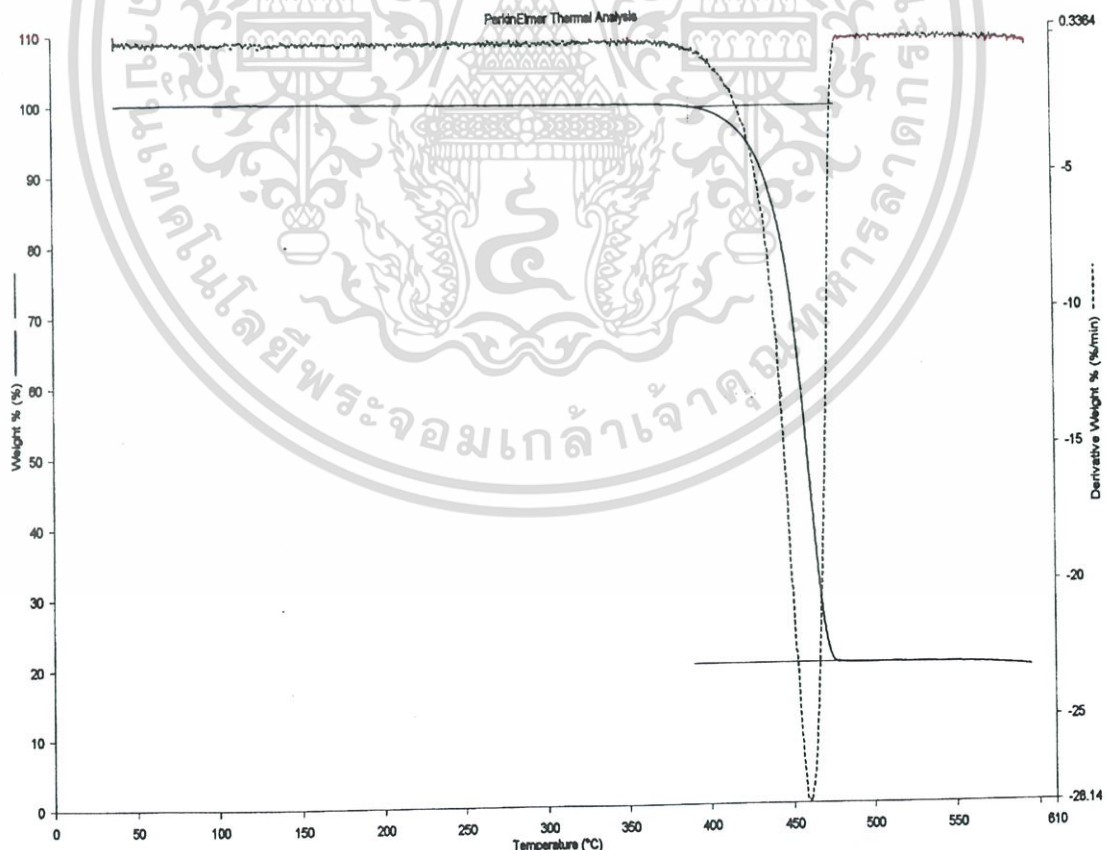
รูปที่ 4.13 ค่าความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของผลิตภัณฑ์ที่ P = 4 และ P = 5

จากรูปที่ 4.13 พบว่าค่าความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของ HDPE ที่ผสม CaCO_3 มีค่าสูงกว่า HDPE บริสุทธิ์ โดยการเสียดสภาพของ HDPE เกิดจากการแทรกตัวของสารละลาย Nonylphenol polyethylene glycol ether เข้าไปยังบริเวณตำหนิขนาดเล็ก (Microscopic defects) บนผิวของ HDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่เกิดจากแรงภายนอก (External stress) หรือความเค้นตึงภายใน (Internal stress) กระทำกับ HDPE ของเหลว จึงแทรกตัวเข้าไปในเนื้อพอลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็วที่ปลายรอยแตก (Crack-tip) และเกรซ (Craze) ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาตร HDPE ส่งผลให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเค้นและเร่งให้เกิดการเสียดสภาพเร็วขึ้น [37] ดังนั้นเมื่อมีการผสม CaCO_3 ลงไปและเพิ่มปริมาณมากขึ้น พบว่าการเสียดสภาพเป็นเอกสารที่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพของพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจากการผสม CaCO_3 ทำให้สารละลาย Nonylphenol polyethylene glycol ether แทรกตัวไปตามรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ HDPE กับ CaCO_3 ทำให้ใช้เวลาในการเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับ HDPE นานกว่า นอกจากนั้นการผสม CaCO_3 เป็นการลดวัฏภาคในส่วนของ HDPE ที่เป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดการเสียหาย ทำให้การเสียหายของพอลิเมอร์ตัวอย่างเกิดได้ช้าลงทนต่อสภาพแวดล้อมได้นานขึ้น ส่งผลให้ค่า ESCR มีค่าสูงขึ้น (ESCR แปรตามเวลา) และเมื่อใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกจะช่วยในการกระจายตัวของ CaCO_3 ทำให้ค่า ESCR ดีขึ้นเล็กน้อย ส่วนการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ไม่ส่งผลต่อค่า ESCR เนื่องจากมีโครงสร้างเป็นหลักเป็น HDPE เหมือนกับพอลิเมอร์เมตริกซ์ และใช้ในปริมาณน้อย จากนั้นเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความดันในขั้นตอนการผลิตพบว่าค่า ESCR มีค่าใกล้เคียงกัน

4.4.7 ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง

นำชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ตัดจากขวดมาหาปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างแต่ละสูตร โดยใช้เครื่อง (Thermogravimetric Analyzer, TGA) จะได้กราฟดังรูปที่ 4.14 จากกราฟสามารถหาปริมาณ CaCO_3 ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.14 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA สูตร HDPE + 20%wt CaCO_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง

สูตร	องค์ประกอบ	ปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 (%wt)	
		P = 4	P = 5
HDPE	HDPE บริสุทธิ์	0.0	0.0
CA20(2)	HDPE + 20%wt CaCO_3	19.9	18.5
CA20(2g)	HDPE + 20%wt CaCO_3 + 1%wt HDPE-g-MA	20.1	20.2
CA20(2t)	HDPE + 20%wt CaCO_3 (SA 1%wt)	20.0	17.4
CA30(2)	HDPE + 30%wt CaCO_3	31.0	31.1
CA30(2g)	HDPE + 30%wt CaCO_3 + 1%wt HDPE-g-MA	30.7	29.6
CA30(2t)	HDPE + 30%wt CaCO_3 (SA 1%wt)	31.4	30.8

จากตารางที่ 4.6 พบว่าปริมาณของ CaCO_3 ที่วัดได้จากพอลิเมอร์ตัวอย่างแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนที่กำหนดไว้คือ 20% และ 30% แสดงให้ทราบว่ากรรมผลพลาสติกกับสารเติมแต่งโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวนอนคู่ตลอดจนสภาวะที่ใช้เป็นวิธีที่เหมาะสมที่ใช้ในการผสม HDPE กับ CaCO_3 ให้ได้อัตราส่วนใกล้เคียงกันตรงตามที่ต้องการ

4.4.8 สมบัติทางความร้อน

นำสารตัวอย่างแต่ละสูตรมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง (Differential scanning calorimeter, DSC) จะได้ค่า Crystalline melting temperature (T_m), Recrystallization temperature (T_c), Heat of fusion (ΔH_f) และ Heat of recrystallization (ΔH_c) จากกราฟดังรูปที่ 4.15 นำค่าที่ได้มาคำนวณ % Crystallinity (%Cry) (แสดงวิธีคำนวณในภาคผนวก ข) โดยกำหนดให้

T_m คืออุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก

ΔH_f คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวผลึก (พื้นที่ใต้พีคจากขั้นตอน Heating)

%Cry_f คือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

T_c คืออุณหภูมิของการเกิดผลึก

ΔH_c คือเอนทาลปีของการเกิดผลึก (พื้นที่ใต้พีคจากขั้นตอน Cooling)

%Cry_c คือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นใหม่



รูปที่ 4.15 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง DSC ของ HDPE

ค่าที่ได้จากกราฟและจากการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.7
ตารางที่ 4.7 ค่าสมบัติทางความร้อน

สูตร	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_f (J/g)	%Cry _f	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ΔH_c (J/g)	%Cry _c
P = 4 bars						
HDPE	135	196	67	116	208	71
CA20(2)	133	155	66	118	168	71
CA20(2g)	133	145	62	117	165	70
CA20(2t)	132	150	64	118	169	72
CA30(2)	132	135	66	118	145	72
CA30(2g)	131	140	69	118	140	69
CA30(2t)	132	137	68	119	144	71
P = 5 bars						
HDPE	134	194	66	117	206	70
CA20(2)	132	151	63	116	167	69
CA20(2g)	133	153	65	117	169	72
CA20(2t)	133	148	61	117	168	69
CA30(2)	132	134	66	117	144	71
CA30(2g)	132	135	65	118	144	70
CA30(2t)	133	133	65	118	141	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

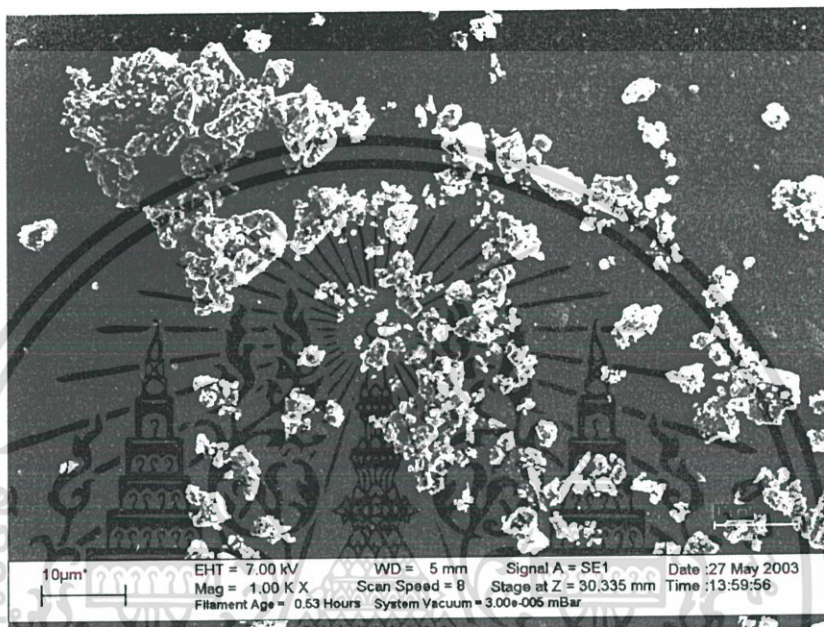
จากตารางที่ 4.7 พบว่า %Cry_f ของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีค่าน้อยกว่า %Cry_c เนื่องจากพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรก่อนนำมาทดสอบด้วยเครื่อง DSC ได้ผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูปแล้วทิ้งผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้ให้เย็นตัวภายในแม่พิมพ์ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งอาจจะมีอัตราการลดอุณหภูมิเร็วกว่าอัตราการลดอุณหภูมิของเครื่อง DSC ส่งผลให้เกิดผลึกขนาดเล็กและไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับที่ได้จากเครื่อง DSC

เมื่อพิจารณาค่า T_m และ T_c ของพอลิเมอร์ตัวอย่างแต่ละสูตร พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน และใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์ แสดงว่ากรดสเตียริกที่เคลือบผิว CaCO₃ และสารช่วยผสม HDPE-g-MA ไม่ส่งผลต่อขนาดและความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ตัวอย่าง ในส่วนของค่า %Cry_f และ %Cry_c ให้ผลในทำนองเดียวกับค่า T_m และ T_c ซึ่งบ่งบอกให้ทราบว่า CaCO₃ ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึก (Nucleating agent) สำหรับ HDPE

จากนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความดันในขั้นตอนการผลิตพบว่าค่า T_m, T_c, %Cry_f และ %Cry_c ของพอลิเมอร์ตัวอย่างแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าความดันที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อขนาดและความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้น เนื่องจากช่วงเวลาที่ใช้ในการผลิตใกล้เคียงกันและความดันที่ปรับเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเท่านั้นจึงไม่ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของสายโซ่ HDPE และขนาดผลึกที่เกิดขึ้น

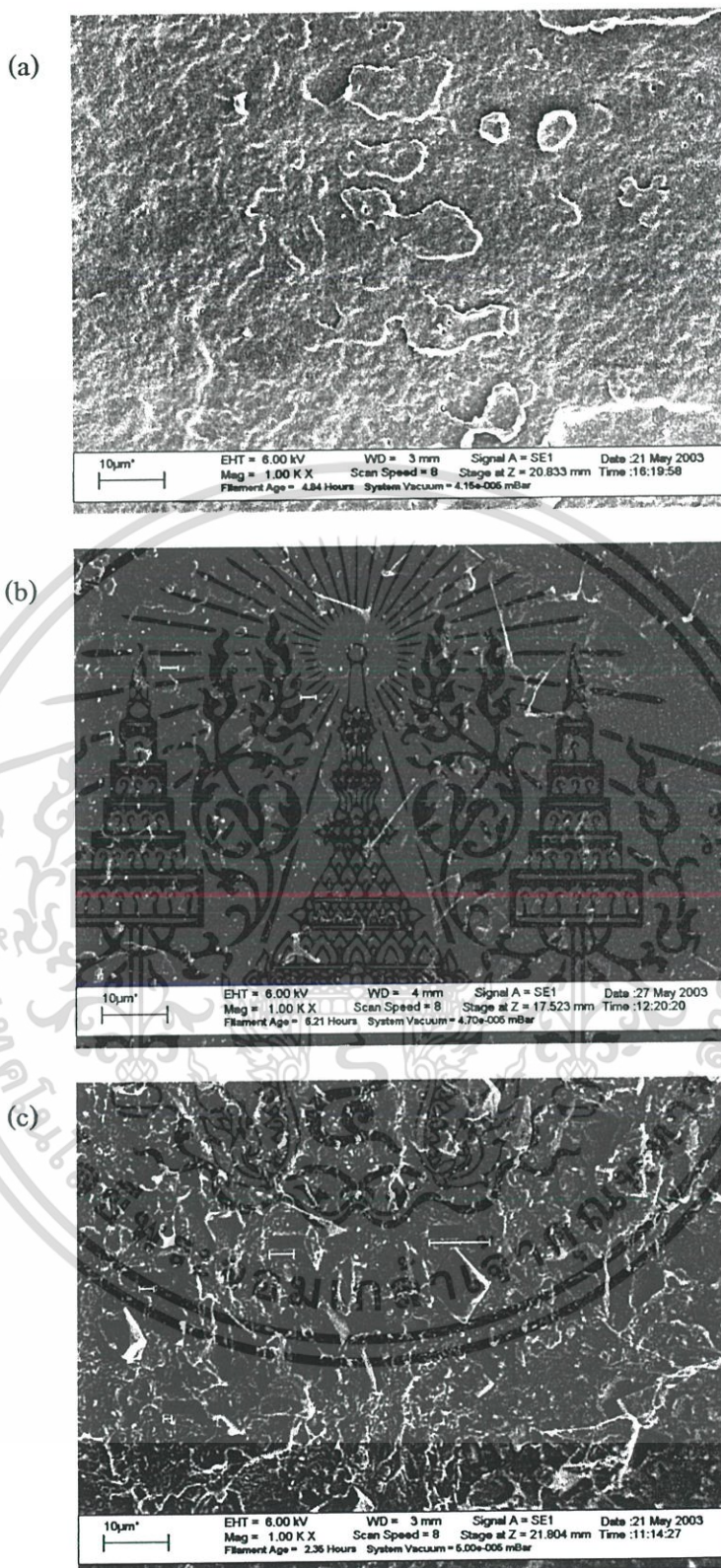
4.4.9 การกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต

ศึกษาสัณฐานวิทยาของพอลิเมอร์ตัวอย่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16-4.19



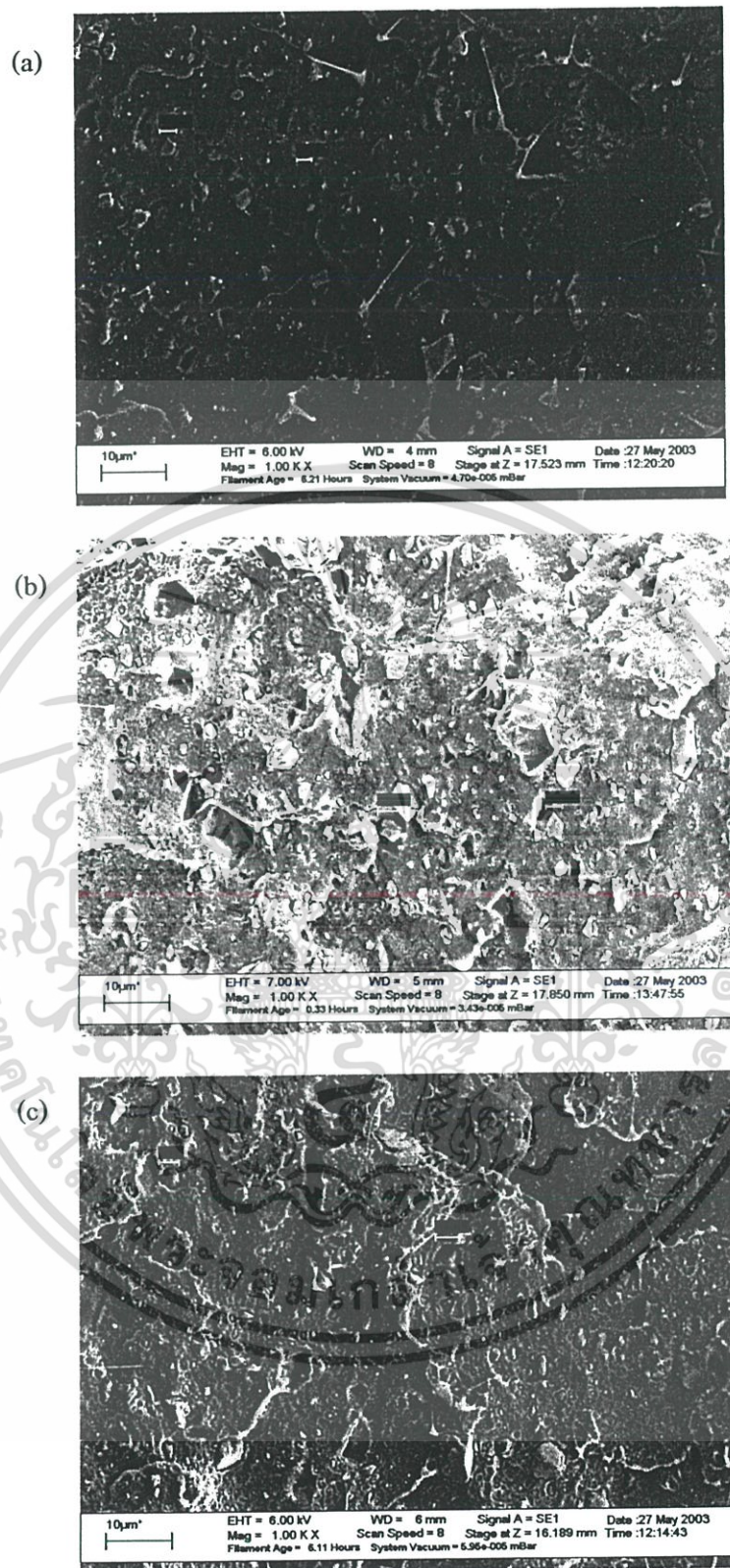
รูปที่ 4.16 รูปร่างของ CaCO_3 ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (Omyacarb 2T) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า

จากรูปที่ 4.16 แสดงรูปร่างของ CaCO_3 ซึ่งมีลักษณะเกือบเป็นทรงกลมอาจจะมีเหลี่ยมมุมอยู่บ้างและอยู่ในลักษณะรวมกันเป็นกลุ่มก้อน (Agglomerates) มากกว่าจะอยู่เป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ (Single particles) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากความมีขี้ของ CaCO_3 และอนุภาคมีขนาดเล็กทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสมากจึงเกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคมากทำให้เกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน



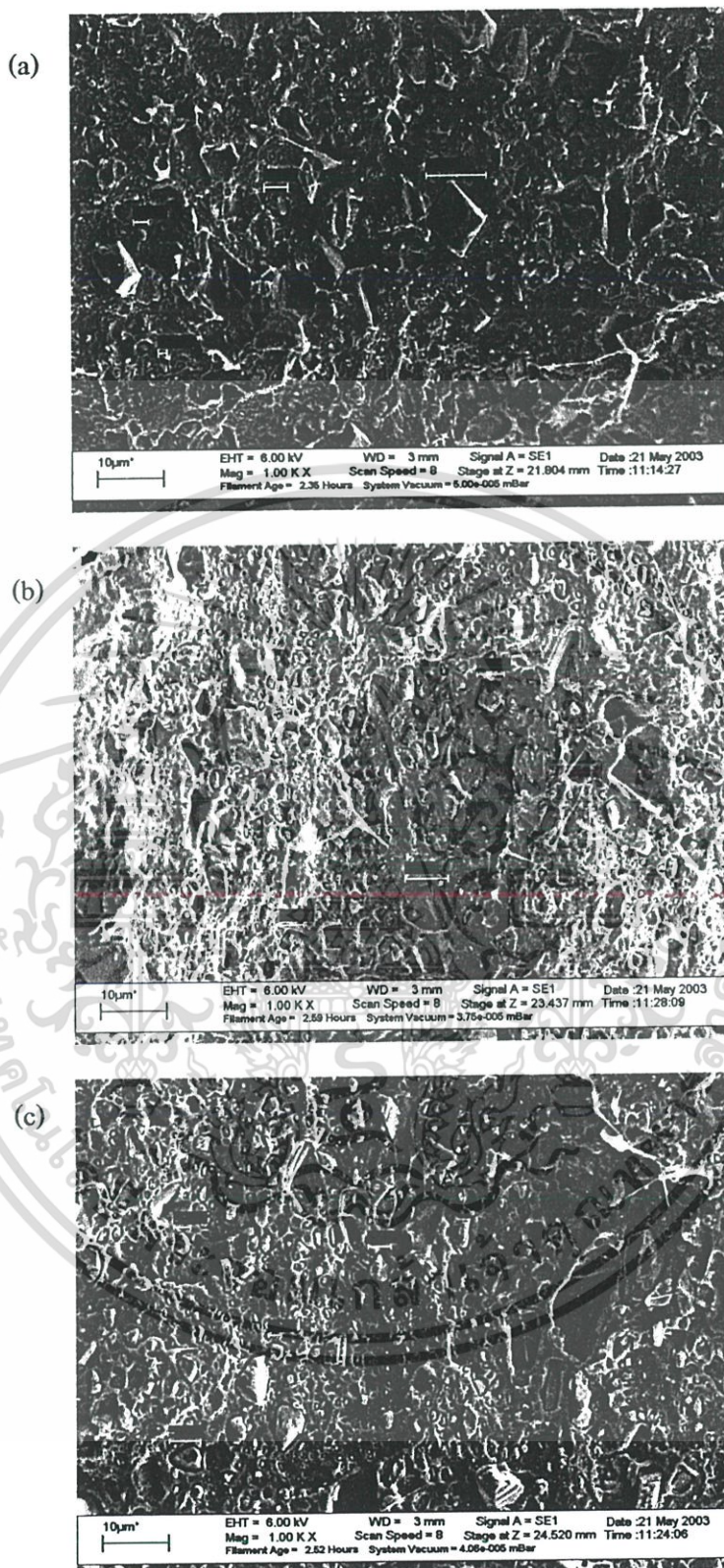
รูปที่ 4.17 ลักษณะพื้นผิวของ HDPE เมทริกซ์และการกระจายตัวของ CaCO_3 ใน HDPE โดย (a) HDPE (b) HDPE + 20%wt CaCO_3 และ (c) HDPE + 30%wt CaCO_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ใน HDPE โดย (a) HDPE + 20%wt CaCO_3 ,
 (b) HDPE + 20%wt CaCO_3 + 1%wt HDPE-g-MA และ
 (c) HDPE + 20%wt CaCO_3 (SA 1%wt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 ใน HDPE โดย (a) HDPE + 30%wt CaCO_3
 (b) HDPE + 30%wt CaCO_3 + 1%wt HDPE-g-MA และ
 (c) HDPE + 30%wt CaCO_3 (SA 1%wt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อผสม CaCO_3 ลงใน HDPE ในปริมาณ 20% CaCO_3 มีการกระจายตัวที่ดีใน HDPE เพราะการผสม CaCO_3 ในปริมาณต่ำอาจจะมองเห็นการรวมเป็นกลุ่มก้อนบ้างแต่ก็ไม่ได้บ่งบอกว่ามีการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 เป็น 30% CaCO_3 มีแนวโน้มรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่มากขึ้น แสดงถึงการกระจายตัวที่ไม่ดี เนื่องจากการไม่เข้ากันระหว่างความไม่มีขั้วของ HDPE และความมีขั้วของ CaCO_3 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 มากขึ้น ทำให้แรงกระทำระหว่าง CaCO_3 กับ CaCO_3 มากกว่าแรงกระทำระหว่าง CaCO_3 กับ HDPE ดังนั้นจึงส่งผลให้ CaCO_3 มีการกระจายตัวที่ไม่ดีใน HDPE

จากรูปที่ 4.18 และ 4.19 เมื่อใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ลักษณะพื้นผิวไม่แตกต่างกับเมื่อไม่ใช้สารช่วยผสมทั้งที่ 20 และ 30 % CaCO_3 เพราะ SEM ไม่สามารถแยกความแตกต่างของ HDPE และ HDPE-g-MA ในพอลิเมอร์ตัวอย่างได้ เนื่องจากมี HDPE เป็นพอลิเมอร์หลักเหมือนกัน ดังนั้นจึงไม่สามารถแสดงถึงอิทธิพลของสารช่วยผสมที่ผสมลงไป ใน HDPE จากรูป SEM ได้ชัดเจน และเมื่อใช้ CaCO_3 เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกจะช่วยให้การกระจายตัวของ CaCO_3 ดีขึ้น เนื่องจากกรดสเตียริกช่วยลดความมีขั้วของ CaCO_3 แต่ผลที่ได้จาก SEM ไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับสมบัติเชิงกล

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเป่าขึ้นรูปและสมบัติต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ขวด HDPE ที่ผสมสารตัวเติม CaCO_3 ชนิดที่เคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือมีการใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมระหว่าง HDPE กับ CaCO_3 สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- พอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีพฤติกรรมเป็นแบบ Pseudoplastic โดยความหนืดมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น เมื่อใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ความหนืดของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตรที่ไม่ได้ใช้สารทั้งสองชนิด
- ค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้จากสารตัวอย่างที่ออกมาจากเครื่อง Capillary rheometer และจากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีคมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกพบว่าค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างลดลง และเพิ่มขึ้นเมื่อใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA นอกจากนั้นยังพบว่าค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดเฉือนมีค่ามากขึ้น
- พอลิเมอร์ตัวอย่างมีเวลาในการหล่อเย็น (%) ลดลงเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก เวลาในการหล่อเย็น (%) มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสูตรที่ใช้ CaCO_3 ที่ไม่ได้เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก ส่วนสูตรที่ใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA มีเวลาในการหล่อเย็น (%) ใกล้เคียงกับสูตรที่ไม่ได้ใช้สารช่วยผสม ในส่วนของความดันลมเป่าที่เพิ่มขึ้นในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปไม่ส่งผลต่อเวลาในการหล่อเย็น
- อัตราการไหลเชิงปริมาตรของพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของสกรูในขั้นตอนการเป่าขึ้นรูป
- น้ำหนักของขวดพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตรที่ผสม CaCO_3 มีค่ามากกว่า แต่ความหนาขวดน้อยกว่าขวด HDPE และความหนาของขวดทุกสูตรในแนวนอนและแนวตั้งมีค่าใกล้เคียงกัน แต่สัมประสิทธิ์ความผันแปรขวดในแนวตั้งมีค่ามากกว่าแนวนอน
- เมื่อผสม CaCO_3 ลงใน HDPE และเพิ่มปริมาณมากขึ้นค่าความเค้นดึง ณ จุดครากและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากมีค่าลดลง เมื่อมีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก

ทำให้ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากและเปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดคราก เพิ่มขึ้น ส่วนการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ไม่มีผลต่อค่าสมบัติดังกล่าว

- ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งกคมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น และพบว่าค่ามอดูลัสและความแข็งกคของพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่าไม่แตกต่างกันเมื่อใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA
- เมื่อผสม CaCO_3 ลงใน HDPE และเพิ่มปริมาณมากขึ้นค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักมีค่าลดลง และเมื่อใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น
- ความดันลมเป่าที่เพิ่มขึ้นในกระบวนการเป่าขึ้นรูปไม่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลทั้งค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดคราก มอดูลัสและค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก
- ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของขวดพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตรที่ผสม CaCO_3 มีค่ามากกว่าขวด HDPE ส่วนในการใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกให้ค่าความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น แต่ค่าดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA
- พอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน ส่วนการใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ไม่ส่งผลต่อขนาดและความสมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์ตัวอย่าง

จากผลงานวิจัยนี้พบว่าขวด HDPE/ CaCO_3 ช่วยให้ต้นทุนการผลิตลดลง เนื่องจากเป็นการลดปริมาณการใช้พลาสติก (HDPE) และยังสามารถลดเวลาในการผลิต (Cycle time) ขวดผลิตภัณฑ์ก็ได้ นั่นคือช่วยให้อัตราการผลิตขวดผลิตภัณฑ์เร็วขึ้น และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแข็งแรงและความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมดีขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสถานะและสมบัติของพอลิเมอร์ที่ผสม CaCO_3 โดยใช้ CaCO_3 ที่มีขนาดแตกต่างกัน
2. ทำการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ในหลายรูปแบบหลายขนาด เพื่อความหลากหลายในการใช้งาน ตลอดจนศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้
3. ทำการปรับเปลี่ยนเครื่องมือในการผสมเพื่อเพิ่มความสามารถในการผสมองค์ประกอบต่าง ๆ ให้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. โฉลก ปิงตระกูล. รายงานการสัมมนา HDPE บรรจุภัณฑ์ทันสมัย. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์การบรรจุหีบห่อ สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2526.
2. ปรีชา พหลเทพ. โพลีเมอร์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2531.
3. Jesse E. **Plastic Additive and Modifiers Handbook**. 1st Ed. London : Chapman & Hall, Inc. 1996.
4. อรุษา สรวารี. สารเคลือบผิว. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2537.
5. ปรีดา พิมพ์ขาวคำ. เซรามิกส์. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539.
6. Riegeland Emil R. **Handbook of Industrial Chemistry**. 9th Ed. NewYork : VNR, C. 1992.
7. Wade L.G. **Organic Chemistry**. New Jersey : Prentice-Hill, Inc. 1995.
8. สมศักดิ์ วรมงคลชัย. เอกสารประกอบการเรียนวิชาสารปรับแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
9. 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-MA as a Compatibilizing Agent." *J.Appl.Polym.Sci.* vol. 75, no. 2, January 2000. pp. 232-238.
10. เจริญ นาคะสรรค์. กระบวนการแปรรูปพลาสติก. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี. 2544.
11. อัญชติ กลมรัตน์กุล. รายงานการสัมมนา HDPE บรรจุภัณฑ์ทันสมัย. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์การบรรจุหีบห่อ สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2526.
12. Sumanutvarapun P., Prasassarakich P., Trakulcoo K., and Kiatkamjornwong S. "Mechanical Properties of Polyethylene Filled with Calcium Carbonate." *J.Sci.Res.Chula.Univ.* vol. 19, no. 2, 1994. pp. 235-248.
13. Premphet K. and Horanont P. "Improveing Performance of Polypropylene Through Comblined Use of Calcium Carbonate and Metallocence-Produced Impact Modifier." *Polym.Plast.Technol.Eng.* vol. 40, no. 3, 2001. pp. 235-247.
14. Zuiderduim W.C.J., Westzaan C., Hue'tink J., and Gaymans R.J. "Toughening of Polypropylene with Calcium Carbonate Particle." *Polym.* vol. 44, 2003. pp. 261-275.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. Horanont P. "A Study of Phase Structure Formation and Mechanical Properties of Ternary Composite of Polypropylene, Elastomer and Filler." *M.Sc. Thesis of Mahidol University.* 1999.
16. Premphet-Sirisinha K. and Preechachon I. "Changes in Morphology and Properties by Grafting Reaction in PP/EOR/CaCO₃ Ternary Composites." *J.Appl.Polym.Sci.* vol. 89, 2003. pp. 3557-3562.
17. Huang H.X. and Liao C.M. "HDPE/PA6 blends : parison formation behaviour in extrusion blow molding." *Polym.Test.* vol. 22, 2003. pp. 509-513.
18. Sahnoune F., Lopez J.m., and Crespy A. "Improvement of the Mechanical Properties of an HDPE/PS blend by Compatibilization and Incorporation of CaCO₃," *Polym.Eng.Sci.* vol. 43, March 2003. pp. 647-660.
19. Wang Q., Chen H., and Liu Y. "LDPE-g-MAH Prepared Though Solid-Phase Mechanochemistry and Its Compatibilizing Effects on HDPE/CaCO₃," *Polym.Plast.Technol.Eng.* vol. 41, no. 2, 2002. pp. 215-228.
20. คาริน วงศ์วัฒน์เสรษฐ์ และพิทยา เหลืองนิชประภา. "ผลของการเคลือบผิวสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีผลต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542
21. ประมินทร์ ช้างเพชร และประภฤกษ์ แสงทองอโณทัย. "การปรับปรุงสมบัติของ HDPE ที่มี CaCO₃ เป็นสารตัวเติมโดยใช้สารคู่ควบ" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.
22. ธนเรศ ประเสริฐวงษ์ และธราศรัย แสงภักดี. "การใช้สารช่วยผสมปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต" โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
23. พลชีพ ลิ่มพงษ์. "การปรับปรุงสมบัติของ HDPE ที่มี CaCO₃ เป็นสารตัวเติมสำหรับงานเป่าขึ้นรูป" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
24. Strebel J.J. "ESCR Performance of Blow Molded Polyethylene Bottles as Measured by the Internal Pressure Test." *Polym.test.* vol. 14, 1995. pp. 189-202.
25. เอกสารภายใน บริษัท ไทยพอลิเอทิลีน จำกัด (มหาชน).
26. เอกสารภายใน บริษัท สุรินทร์ ออมย่า เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27. มาลินี ชัยศุกกิจสินธ์. **ปฏิบัติการเคมีพอลิเมอร์**. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2541.
28. 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.
29. Roberta A.S. "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics." *Annual Book of ASTM Standards*. vol. 8.01, 1992. pp. 155-171.
30. Roberta A.S. "Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness." *Annual Book of ASTM Standards*. vol. 8.02, 1992. pp. 226-229.
31. 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.
32. Roberta A.S. "Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics." *Annual Book of ASTM Standards*. vol. 8.02, 1992. pp. 37-42.
33. Roberta A.S. "Standard Test Method for Composition Analysis by Thermogravimetry." *Annual Book of ASTM Standards*. vol. 14.02, 1992. pp. 712-716.
34. 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.
35. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. **เอกสารประกอบการเรียนเรื่องพฤติกรรมคาร์ไฮลของพอลิเมอร์ หลอมเหลวและการนำไปใช้**. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2544.
36. James E. Mark. **Physical Properties of Polymer Handbook** New York : Woodbury.
37. อธิพิล แจ่มชัด. **เอกสารประกอบการเรียนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์**. กรุงเทพมหานคร : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.
38. Jacqueline I.K. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**. Vol. 10. New York : John Wiley & Sons, Inc. 1986.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การคำนวณความหนาแน่น

หาปริมาณพอลิเมอร์ผสมได้จาก

ความหนาแน่น HDPE จากโรงงาน = 962 kg/m^3 [25]

ความหนาแน่น CaCO_3 = $2,700 \text{ kg/m}^3$ [26]

ดังนั้น ปริมาณพอลิเมอร์ผสมคือ

$$\frac{(100 - \% \text{CaCO}_3 \text{ ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม})}{962} + \frac{\% \text{CaCO}_3 \text{ ที่มีอยู่ในพอลิเมอร์ผสม}}{2,700}$$

ดังนั้น

$$\text{ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม} = \frac{100}{\text{ปริมาณพอลิเมอร์ผสม}}$$



ภาคผนวก ข. การคำนวณค่าการบวมตัว

1. ค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Extrudate) จากเครื่อง Capillary rheometer
คำนวณได้จากสูตร

$$\text{Die swell ratio} = \frac{\text{Extrudate diameter}}{\text{Die diameter}}$$

โดย Die swell ratio คือค่าการบวมตัว

Die diameter คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคายนที่ใช้

Extrudate diameter คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ออกจากหัวคาย

2. ค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Parison) จากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค
คำนวณได้จากสูตร

$$\text{Diameter swell ratio} = \frac{\text{Outer diameter of parison}}{\text{Outer diameter of blow molding die}}$$

โดย Diameter swell ratio คือค่าการบวมตัว

Outer diameter of blow molding die คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของคายนของเครื่องเป่า
ขึ้นรูปชนิดอครีค

Outer diameter of parison คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของพาริซัน

ภาคผนวก ก. การคำนวณเวลาในการหล่อเย็น

กำหนด X คือ Blow time + Hold time ของแต่ละสูตร

Y คือ Blow time + Hold time ของ HDPE

$$\text{จะได้ Cooling time} = \frac{X}{Y} \times 100 (\%)$$

ตัวอย่างการคำนวณเวลาในการหล่อเย็นของพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตร HDPE

$$\begin{aligned} \text{Cooling time} &= \frac{140 + 30}{140 + 30} \times 100 (\%) \\ &= \frac{170}{170} \times 100 (\%) \\ &= 100 \% \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณเวลาในการหล่อเย็นของพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตร CA20(2)

$$\begin{aligned} \text{Cooling time} &= \frac{120 + 20}{140 + 30} \times 100 (\%) \\ &= \frac{140}{170} \times 100 (\%) \\ &= 82 \% \end{aligned}$$

ภาคผนวก ง. การคำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตรและอัตราความเครียดเฉือน

หาปริมาตรพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลวได้จาก

$$\text{ความหนาแน่น HDPE หลอมเหลว} = 770 \text{ kg/m}^3 \text{ [22]}$$

$$\text{ความหนาแน่น CaCO}_3 = 2,700 \text{ kg/m}^3 \text{ [26]}$$

ดังนั้น ปริมาตรพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลวคือ

$$\frac{(100 - \% \text{CaCO}_3 \text{ ที่มีอยู่จริงในตารางที่ 4.6})}{770} + \frac{\% \text{CaCO}_3 \text{ ที่มีอยู่จริงในตารางที่ 4.6}}{2,700}$$

ดังนั้น ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลว = $\frac{100}{\text{ปริมาตรพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลว}}$

จะได้ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s) = $\frac{\text{น้ำหนักของพาริชั่นที่ไหลออกมา}}{\text{ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่หลอมเหลว}}$

จากอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ได้สามารถคำนวณอัตราความเครียดเฉือนได้จาก

$$\text{อัตราความเครียดเฉือน (Shear rate, } \dot{\gamma} \text{)} = \frac{6Q}{WH^2}$$

โดย Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m^3/s)

W คือ

$$\begin{aligned} \text{ความกว้างของคาน (cm)} &= \frac{\text{เส้นรอบวงภายนอกของหัวคาน} + \text{เส้นรอบวงภายในของหัวคาน}}{2} \\ &= \frac{1.5 + 1.2}{2} \\ &= 1.35 \text{ cm} \end{aligned}$$

H คือ ความหนาของคานมีค่าเท่ากับ 0.15 cm

ภาคผนวก จ. การคำนวณสัมประสิทธิ์ความผันแปร

$$\text{สัมประสิทธิ์ความผันแปร} = \frac{\text{ส่วนเบี่ยงเบน}}{\text{ความหนาเฉลี่ย}} \times 100 (\%)$$

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

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

โดย X_i คือ ความหนา เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, 10$

\bar{X} คือ ความหนาเฉลี่ย

$n = 5$ เมื่อทำการวัดในแนวนอนและแนวตั้งแนวละ 5 ค่าต่อหนึ่งขวด

แล้ว $n = 10$ เมื่อจำนวนขวดที่วัดเพื่อหาค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10 ขวด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ฉ. การคำนวณความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2463 โดยในงานวิจัยนี้ใช้ระดับความสูงที่ชั้น 2 ถึงชั้น 6 ของอาคารจุฬารามวลัยลักษณะ 1 คณะวิทยาศาสตร์และความแตกต่างของความสูงแต่ละระดับคือ 2.3 เมตร ซึ่งพื้นผิวที่ขูดคกกระทบคือพื้นปูนผิวเรียบจะได้ค่าความสูงเฉลี่ยที่ขูดแตก (Mean failure weight) แล้วนำมาคำนวณค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก (Falling weight impact strength) จาก

$$\text{Falling weight impact strength (J)} = \text{Mean failure height} \times \text{Mean failure weight} \times F$$

โดย Mean failure weight คือ น้ำหนักขูดเฉลี่ย (บรรจุน้ำเต็มขวดและปิดผนึกขวด)

F คือ ค่าคงที่เฉพาะในการคำนวณ (9.80655×10^{-3})

เมื่อความสูงมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรและน้ำหนักมีหน่วยเป็นกิโลกรัม



ภาคผนวก ข. การวิเคราะห์ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

- กำหนดให้
- A = HDPE
 - B = HDPE + 20% CaCO₃
 - C = HDPE + 20% CaCO₃ + 1%wt HDPE-g-MA
 - D = HDPE + 20% CaCO₃ (SA 1%wt)
 - E = HDPE + 30% CaCO₃
 - F = HDPE + 30% CaCO₃ + 1%wt HDPE-g-MA
 - G = HDPE + 30% CaCO₃ (SA 1%wt)
 - H = HDPE
 - I = HDPE + 20% CaCO₃
 - J = HDPE + 20% CaCO₃ + 1%wt HDPE-g-MA
 - K = HDPE + 20% CaCO₃ (SA 1%wt)
 - L = HDPE + 30% CaCO₃
 - M = HDPE + 30% CaCO₃ + 1%wt HDPE-g-MA
 - N = HDPE + 30% CaCO₃ (SA 1%wt)

โดย A-G ใช้ความดันลมเป่า (P) = 4 bar

H-N ใช้ความดันลมเป่า (P) = 5 bar

ตารางที่ ข-1 แสดงผลการทดสอบ โดยในแต่ละสูตรทดสอบจำนวน 10 ขวด

ตาราง ข-1 จำนวนชิ้นงานที่เกิดการแตกหักภายในระยะเวลา 31 วัน

สูตร	วันที่ของการทดสอบ																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
A	0	0	0	0	2	3	3	3	4	5	6	7	9	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B	0	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3	5	5	6	8	8	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C	0	0	0	0	1	1	1	2	2	3	3	3	4	4	4	5	6	6	7	7	8	9	10	-	-	-	-	-	-	-	-	
D	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	9	10	-	-	-	-	-	
E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	4	5	6	6	7	7	8	8	9	9	
F	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	4	4	5	6	7	8	9	10	-	
G	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	4	5	6	8	9	9	10	
H	0	0	0	1	1	1	2	2	3	4	5	6	6	7	8	9	10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7	9	9	10	-	-	-	-	-	-	-	-	
J	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	5	5	6	6	8	9	10	-	-	-	-	-	-	-	-	
K	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	3	3	4	4	4	4	4	5	7	7	8	8	8	9	10	-	-	-	-	-	-	
L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	5	6	6	7	8	8	9	
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3	4	5	5	6	6	7	8	9	10	
N	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	3	5	6	6	7	7	8	8	

ภาคผนวก ช. การคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก

กำหนดให้ ΔH_f คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวของผลึก (พื้นที่ใต้พีคจากขั้นตอน Heating)

$\%Cry_f$ คือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง

ΔH_c คือเอนทาลปีของการเกิดผลึก (พื้นที่ใต้พีคจากขั้นตอน Cooling)

$\%Cry_c$ คือเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่เกิดขึ้นใหม่

ΔH_0 คือเอนทาลปีของการหลอมเหลวของ HDPE ที่มีความเป็นผลึก 100% = 293 J/g [38]

$$\text{จะได้ } \%Cry_{f,c} = \frac{\Delta H_{f,c}}{\Delta H_0} \times 100$$

แต่การหาค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ตัวอย่างนั้นต้องเปรียบเทียบจากสัดส่วนของ HDPE ทั้งหมดในพอลิเมอร์ตัวอย่าง

$$\text{ดังนั้น } \%Cry_{f,c} = \frac{\Delta H_{f,c}}{\Delta H_0} \times \frac{100}{(100 - \%CaCO_3 \text{ ที่มีอยู่จริงในตารางที่ 4.5})} \times 100$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายณัฐวุฒิ พษ์ศิริ
 วัน เดือน ปีเกิด 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 ที่กรุงเทพมหานคร
 ประวัติการศึกษา 2539 โรงเรียนเบญจมราชรังสฤษฎิ์ จ.ฉะเชิงเทรา
 2543 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้