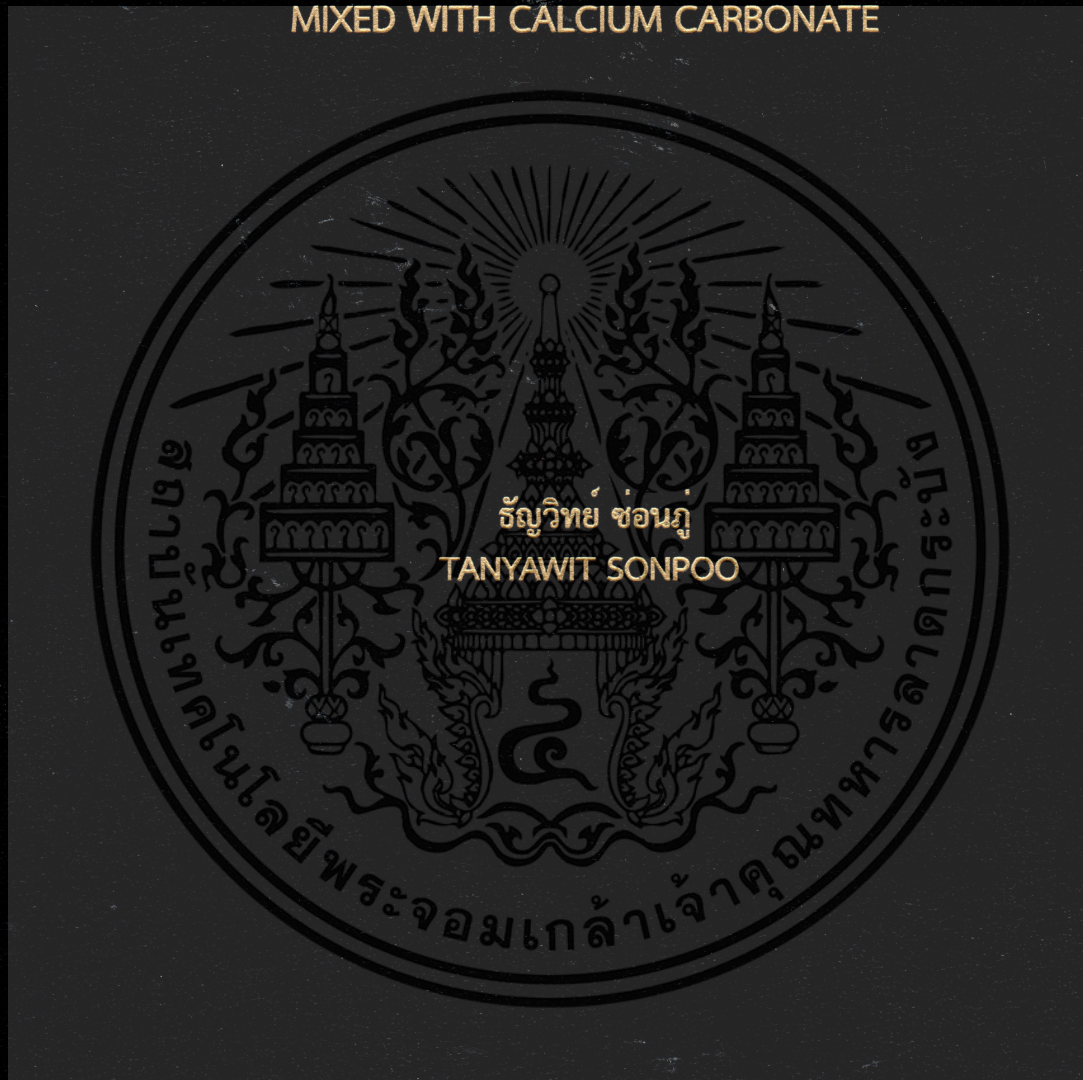


ผลของการใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตตต่อสมบัติของขวดพลาสติกที่ผลิตจาก
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

EFFECT OF ETHYLENE VINYL ACETATE ON PROPERTIES OF
BOTTLES PRODUCED FROM HIGH DENSITY POLYETHYLENE
MIXED WITH CALCIUM CARBONATE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-SC-M-014-039

ผลของการใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตตต่อสมบัติของขวดพลาสติกที่ผลิตจาก
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

EFFECT OF ETHYLENE VINYL ACETATE ON PROPERTIES OF
BOTTLES PRODUCED FROM HIGH DENSITY POLYETHYLENE
MIXED WITH CALCIUM CARBONATE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-SC-M-014-039

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF ETHYLENE VINYL ACETATE ON PROPERTIES OF
BOTTLES PRODUCED FROM HIGH DENSITY POLYETHYLENE
MIXED WITH CALCIUM CARBONATE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018
KMITL-2018-SC-M-014-039

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตตต่อสมบัติของขวดผลิตภัณฑ์ ที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสม แคลเซียมคาร์บอเนต
นักศึกษา	นายธัญวิทย์ ช่อนภู
รหัสนักศึกษา	57605049
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีพอลิเมอร์)
ภาควิชา	เคมี
พ.ศ.	2561
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุภารัตน์ รักชลธี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของขวดผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) (ทั้งไม่มีและมีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก) ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก และมีการใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) ช่วยในการผสม โดยทำการศึกษาลำดับการผสมทั้งแบบ One-step และ Two-Step การศึกษาอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA (100/0, 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20) ที่มีการผสม CaCO_3 30% โดยน้ำหนัก และศึกษาการใช้ปริมาณ CaCO_3 (30-40% โดยน้ำหนัก) การผสมสูตรทำโดยการใช้เครื่องผสมระบบปิดและขึ้นรูปขวดด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด จากการศึกษาพบว่าขวดที่มีการใช้ CaCO_3 เกรดที่ไม่มีการเคลือบผิวที่ผสมแบบ Two-step ให้สมบัติเชิงกลของขวดดี เนื่องจาก EVA ช่วยให้เกิดการผสมที่ดี CaCO_3 กระจายตัวดีและเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ ทำให้การดึงยึด ณ จุดขาด และพลังงานแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น ในระบบ HDPE/EVA/ CaCO_3 พบว่า HDPE และ EVA เป็นพอลิเมอร์ผสมแบบไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible blend) ยืนยันได้จากสัณฐานวิทยา ส่งผลให้มีอุณหภูมิในการหลอมผลึก และปริมาณความเป็นผลึกของ HDPE ใกล้เคียงกันทุกสูตร การเพิ่ม EVA ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก มอดูลัสและความแข็งกดของขวดมีค่าลดลง ในขณะที่การดึงยึด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากความยืดหยุ่นของ EVA ผลการศึกษาสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) พบว่าชิ้นงานที่มี EVA ไม่เกิดการเสียหายในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ (ESCR, $F_{50} > 504$ ชั่วโมง) และค่าพลังงานกระแทกของชิ้นงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่ 21 J ในสูตร H85E15C230

คำสำคัญ : กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด แคลเซียมคาร์บอเนต พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์

Thesis Title	Effect of ethylene vinyl acetate on properties of bottles produced from high density polyethylene mixed with calcium carbonate
Student Name	Mr. Tanyawit Sonpoo
Student ID	57605049
Degree	Master of Science (Polymer)
Department	Chemistry
Year	2018
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Suparat Rukchonlatee

Abstract

This research studied on properties of bottles produced from high density polyethylene (HDPE) mixed with calcium carbonate (CaCO_3) (both uncoated and coated stearic acid grades) at 30% by weight and used ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) for better mixing. Mixing methods (one-step and two-step) for good compounding properties were investigated. The HDPE/EVA blends ratios in the compounds with 30% CaCO_3 (by weight) studied were 100/0, 95/5, 90/10, 85/15 and 80/20 by weight. Also an effect of CaCO_3 amount (30-40% by weight) was examined. All compounds were prepared using an internal mixer and bottles were shaped using an extrusion blow molding machine. The results revealed that the best mechanical properties of bottles were achieved when using uncoated CaCO_3 with two-step mixing method. This was because EVA helped better mixing and resulted in good CaCO_3 dispersion and better compatibility between CaCO_3 and polymer. This contributed to higher %elongation at break and impact energy. SEM results revealed that HDPE and EVA were immiscible blend, causing similar crystalline melting temperature and %crystallinity of HDPE in all HDPE/EVA/ CaCO_3 samples. From mechanical properties of bottles, tensile strength at yield, modulus and hardness were decreased with increasing EVA loading but %elongation at break were increased. This was because flexibility of EVA. From environmental stress cracking resistance (ESCR), none of the samples failed during the test period of 500 hr. (ESCR, $F_{50} > 504$ hr). In addition, impact energy tended to increase with increasing EVA and the greatest value was 21 J in H85E15C230 sample.

Keyword : Calcium carbonate, Ethylene vinyl acetate copolymer, Extrusion blow molding
High density polyethylene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ด้วยการได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการทำวิจัยในครั้งนี้จาก ผศ.ดร. สุภารัตน์ รักชลธิ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ของท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชลลดา ฤตวิรุฬห์ รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และผศ.ดร.ภัทราวุธ มนต์วิเศษ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ เพิ่มความสมบูรณ์ให้กับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์และสารเคมีในการทำงานวิจัยนี้มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณบริษัทเอสซีจีเพอร์ฟอร์แมนซ์เคมีคอลส์ จำกัด ในความอนุเคราะห์ให้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงและบริษัทสุรินทร์ออย์เคมีคอล (ประเทศไทย) จำกัด ในความอนุเคราะห์ให้แคลเซียมคาร์บอเนต สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และน้อง ๆ นักศึกษาทุกคนที่ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำต่าง ๆ อีกทั้งคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่คอยห่วงใย เป็นกำลังใจที่ดี คอยสนับสนุนช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จสมบูรณ์

ฉัญวิทย์ ช่อนภู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิเมอร์ผสม	4
2.1.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม	4
2.1.2 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม	6
2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	6
2.2.1 สมบัติโดยทั่วไปของ HDPE	7
2.2.2 การใช้งาน HDPE	8
2.3 แคลเซียมคาร์บอเนต	9
2.3.1 กระบวนการผลิต	10
2.3.2 สมบัติโดยทั่วไปของ CaCO_3	11
2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน CaCO_3	11
2.4 กรดสเตียริก	11
2.4.1 ความเป็นมาของกรดสเตียริก	11
2.4.2 กระบวนการผลิต	12
2.4.3 สมบัติโดยทั่วไปของกรดสเตียริก	13
2.4.4 การประยุกต์ใช้งานกรดสเตียริก	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์	14
2.5.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ EVA	14
2.5.2 สมบัติทั่วไปของ EVA	14
2.5.3 การประยุกต์ใช้งานของ EVA	15
2.6 กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอีตริต	15
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	22
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย	22
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	23
3.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม	24
3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยการผสมแบบ One-step mixing	24
3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยการผสมแบบ Two-step mixing	24
3.4 การเตรียมขวดตัวอย่าง	25
3.5 การทดสอบพอลิเมอร์ผสมสูตร	26
3.5.1 การทดสอบดรรชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมสูตร	26
3.5.2 การศึกษาการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมสูตร	26
3.6 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของกรดเตียริกที่เคลือบอยู่บน CaCO_3	26
3.7 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์	26
3.7.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของตัวอย่าง	26
3.7.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ	28
3.7.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล	29
3.7.4 การศึกษาสัณฐานวิทยา	30
3.7.5 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง	31
3.7.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน	31
3.7.7 การทดสอบสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม	31
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	32
4.1 การวิเคราะห์สารตัวเติม	32
4.1.1 ผลการตรวจสอบปริมาณกรดเตียริกบนผิว CaCO_3	32
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ CaCO_3 ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดเตียริก	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การศึกษาผลของลำดับการผสม	34
4.2.1 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา	34
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ CaCO_3 ความหนาแน่น และน้ำหนักของขวด	37
4.2.3 ผลการทดสอบดรรชนีการไหล การบวมตัว และความหนา	38
4.2.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน	39
4.2.5 ผลการศึกษามิติเชิงกล	39
4.2.6 ผลการศึกษาความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม	44
4.3 การศึกษาผลของการใช้ EVA	46
4.3.1 ผลการศึกษากการกระจายตัวของ CaCO_3 ใน HDPE	46
4.3.2 ผลการศึกษากการกระจายตัวของ EVA ใน HDPE	47
4.3.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา	47
4.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ CaCO_3 และความหนาแน่น	49
4.3.5 ผลการทดสอบดรรชนีการไหล การบวมตัว ความหนา และน้ำหนักของขวด HDPE/EVA/ CaCO_3	50
4.3.6 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของขวด HDPE/EVA/ CaCO_3	51
4.3.7 ผลการศึกษามิติเชิงกล	52
4.3.8 ผลการศึกษาความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม	56
4.4 การศึกษาผลของปริมาณการใช้ CaCO_3	56
4.4.1 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา	56
4.4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ CaCO_3 และความหนาแน่นของขวด	58
4.4.3 ผลการทดสอบดรรชนีการไหล การบวมตัว ความหนา และน้ำหนักของขวด HDPE/EVA/ CaCO_3	58
4.4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน	59
4.4.5 ผลการศึกษามิติเชิงกล	59
4.4.6 ผลการศึกษาความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	64
5.1 สรุปผลการวิจัย	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	65
เอกสารอ้างอิง	66
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก	71
ภาคผนวก ข	77
ภาคผนวก ค	79
ภาคผนวก ง	90
ประวัติผู้เขียน	102



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเลือกใช้งานเป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จาก HDPE	9
2.2 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมโดยรายงานเป็นเวลา ที่มีตัวอย่าง 50% เกิดรอยแตกเกิดขึ้น	18
3.1 สมบัติบางประการของ HDPE H6430BM	22
3.2 สมบัติบางประการของ CaCO ₃	23
3.3 สมบัติบางประการของ EVA UL00728CC	23
3.4 สูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการศึกษาผลของลำดับการผสม	25
3.4 องค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมสูตรที่เตรียม (% โดยน้ำหนัก)	25
4.1 สูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้วิธีการผสมต่างกัน	34
4.2 ปริมาณของ CaCO ₃ ความหนาแน่น และน้ำหนักของขวดตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO ₃	38
4.3 ค่าดัชนีการไหล การบวมตัว และความหนา	38
4.4 T _m , T _c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก	39
4.5 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมใน Tergitol TM NP-9 Surfactant at 50°C	45
4.6 สูตรพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA/CaCO ₃	46
4.7 ปริมาณของ CaCO ₃ และความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO ₃ ...	50
4.8 ค่าดัชนีการไหล การบวมตัว ความหนาและน้ำหนักขวด HDPE/EVA/CaCO ₃	50
4.9 สมบัติทางความร้อนของขวด HDPE/EVA/CaCO ₃	52
4.10 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของขวด HDPE/EVA/CaCO ₃ ใน Tergitol TM NP-9 Surfactant at 50°C	56
4.11 ปริมาณของ CaCO ₃ และความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO ₃ ที่มีปริมาณ CaCO ₃ ต่างกัน	58
4.12 ค่าดัชนีการไหล การบวมตัว ความหนาและน้ำหนักขวด HDPE/EVA/CaCO ₃ ที่มีปริมาณ CaCO ₃ ต่างกัน	58
4.13 สมบัติทางความร้อนของขวด HDPE/EVA/CaCO ₃ ที่มีปริมาณ CaCO ₃ ต่างกัน	59
4.14 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของขวดผลิตภัณฑ์ ใน Tergitol TM NP-9 Surfactant at 50°C ที่มีปริมาณ CaCO ₃ ต่างกัน	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่สามารถเข้ากันได้	4
2.2 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่ไม่สามารถเข้ากันได้	5
2.3 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเมอร์ A (____) และพอลิเมอร์ B (____)	6
2.4 โครงสร้างทางเคมีของ HDPE	7
2.5 กระบวนการสังเคราะห์กรดสเตียริก	12
2.6 โครงสร้างของ EVA	14
2.7 กระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบอัดรีด	16
2.8 พื้นผิวภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Zeolite A	19
2.9 พื้นผิวที่แตกหักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Zeolite A หลังการสกัด EVA	19
3.1 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่น	27
3.2 ลักษณะผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการตัดส่วนเกินบริเวณปากขวดและก้นขวด	28
3.3 ลักษณะชิ้นงานสำหรับวัดความหนาเมื่อ x เป็นการวัดในแนวเส้นรอบวง และ y เป็นการวัดในแนวตั้ง	28
3.4 การตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง	30
3.5 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงเค้นต่อสภาพแวดล้อม โดย a) ชิ้นงานขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ที่มีรอยบาก และ b) ชิ้นงานที่ยึดด้วยตะปูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 mm	31
4.1 ผลจากการตรวจปริมาณกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บนผิวของ CaCO_3	32
4.2 FTIR สเปกตร้าของกรดสเตียริกและ CaCO_3 ด้วยเทคนิค DRIFTS-FTIR	33
4.3 SEM micrographs ภาคตัดขวางของชิ้นงาน HDPE/EVA/ CaCO_3 (กำลังขยาย 3500 เท่า)	35
4.4 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 เกรดที่ไม่มีเคลือบและเคลือบด้วยกรดสเตียริก ใน HDPE ที่มีวิธีการผสมต่างกัน เมื่อมีการใช้ EVA	37
4.5 สมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/ CaCO_3	40
4.6 ค่าความแข็งกดของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/ CaCO_3	42
4.7 ค่าพลังงานกระแทกแบบทั้งน้ำหนักของขวด HDPE/EVA/ CaCO_3	43
4.8 ลักษณะชิ้นงานก่อนการทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม	44
4.9 ลักษณะชิ้นงานที่เกิดรอยแตกจากการทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 SEM micrographs ภาคตัดขวางของชิ้นงาน HC230 (กำลังขยาย 3500 เท่า)	47
4.11 SEM micrographs ภาคตัดขวางของชิ้นงาน H80E20 (กำลังขยาย 3500 เท่า)	47
4.12 SEM micrographs ภาคตัดขวางของชิ้นงาน HDPE/EVA/CaCO ₃ ที่มีปริมาณ EVA ต่างกัน (กำลังขยาย 3500 เท่า)	48
4.13 สมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO ₃ ที่มีปริมาณ EVA ต่างกัน	52
4.14 ค่าความแข็งกดของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO ₃ ที่มีปริมาณ EVA ต่างกัน	55
4.15 ค่าพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักของขวด HDPE/EVA/CaCO ₃ ที่มีปริมาณ EVA ต่างกัน	55
4.16 SEM micrographs ภาคตัดขวางของชิ้นงาน HDPE/EVA/CaCO ₃ ที่มีปริมาณ CaCO ₃ ต่างกัน (กำลังขยาย 3500 เท่า)	57
4.17 สมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO ₃ ที่มีปริมาณ CaCO ₃ ต่างกัน	60
4.18 ค่าความแข็งกดของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO ₃ ที่มีปริมาณ CaCO ₃ ต่างกัน	62
4.19 ค่าพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักของขวด HDPE/EVA/CaCO ₃ ที่มีปริมาณ CaCO ₃ ต่างกัน	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันนี้การใช้ผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากพลาสติกเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ประเภทขวด ซึ่งเป็นหนึ่งในบรรจุภัณฑ์ที่เราสามารถพบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน พลาสติกที่นิยมใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ประเภทขวดคือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) [1] เนื่องจากมีความแข็งแรง ความยืดหยุ่น เหนียว ทนทานต่อแรงกระแทกได้ ไม่เปราะแตกง่าย ทนต่อกรด ด่าง และนอกจากนี้ยังมีความสามารถในการคงรูปที่ดี ใช้เวลาในการผลิตสั้น และมีน้ำหนักเบาเนื่องจากมีความหนาแน่นต่ำ จึงนิยมนำมาทำเป็นขวดน้ำดื่มแบบขุ่น ขวดน้ำยาทำความสะอาด แกลลอน ขวดแชมพู ขวดน้ำมันเครื่อง เป็นต้น

ในหลายกรณีการใช้พลาสติกเพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถให้สมบัติที่ต้องการได้ จึงต้องมีการนำพลาสติกมาผสมกับสารเติมแต่งเพื่อทำการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกให้ได้ตามที่ต้องการของงานที่ใช้ สารเติมแต่งที่ใช้เข้ามาแทนที่พลาสติกเรียกว่าสารตัวเติม (Filler) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, CaCO_3) ซึ่งจัดเป็นสารตัวเติมชนิดเพิ่มเนื้อ (Extender filler) ที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมพลาสติก ซึ่งนอกจากช่วยลดต้นทุนในการผลิตแล้วยังช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลบางอย่างให้ดีขึ้นได้ เช่น มอดูลัสและการคงรูป แต่การใช้ CaCO_3 ที่เป็นสารตัวเติมที่มีขั้วในปริมาณมากกับ HDPE ที่เป็นพลาสติกที่ไม่มีขั้ว ทำให้การกระจายตัวของ CaCO_3 ใน HDPE นั้นไม่ดี จึงต้องมีการใช้สารเติมแต่งประเภทอื่นเพิ่ม เช่น สารช่วยผสม (Compatibilizer) สารช่วยกระจายตัว (Dispersing agent) เพื่อช่วยในการผสมและการกระจายตัวของสารตัวเติมในพลาสติกให้ดีขึ้น [2]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [3] ได้ศึกษากระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดที่สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์ และผลของ CaCO_3 ที่มีต่อความสามารถในการขึ้นรูป พบว่าเวลาการหล่อเย็น (Cooling time) ลดลงเมื่อผสม CaCO_3 ลงใน HDPE เนื่องจาก CaCO_3 มีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) สูงกว่าของ HDPE จึงมีการส่งผ่านความร้อนออกมาได้มากกว่า ทำให้รอบการผลิตลดลง ซึ่งในแง่ของอุตสาหกรรมเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการผลิต การเพิ่มรอบการหมุนของสกรูทำให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์ตัวอย่างมีพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic และการเพิ่มรอบการหมุนของสกรูเป็นการเพิ่มอัตราความเครียดเฉือนทำให้พอลิเมอร์ตัวอย่างมีความหนืดลดลง ความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในเครื่องเป่าขึ้นรูปอยู่ในช่วง $154\text{-}205\text{ s}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบการใช้รอบการหมุนของสกรูแล้วอยู่ในช่วง 20-28 รอบ/นาที ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เกิดความแปรปรวนและเสีรูปทรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt fracture) จากการทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมพบว่าเมื่อมีการผสม CaCO_3 ลงไปใน HDPE และเพิ่มปริมาณมากขึ้น พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากการผสม CaCO_3 ทำให้สารละลาย Nonylphenol polyethylene glycol ether ที่ใช้ในการทดสอบแทรกตัวไปตามรอยต่อระหว่างภูมิภาคของ HDPE กับ CaCO_3 ใช้เวลาเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับ HDPE นานขึ้น [4] แต่ CaCO_3 เป็นอนุภาคของแข็งและเป็นจุดรวมความเค้น (Stress concentrator) ทำให้ขวด HDPE ที่มีการผสม CaCO_3 มีค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักลดลง แต่ทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์ และเมื่อมีปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น ค่ามอดูลัสมีแนวโน้มเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นถึงความต้านทานการเสีรูปที่ดี [5-8] การใช้ CaCO_3 ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก เนื่องจากโครงสร้างของกรดสเตียริกประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ยาวของไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นส่วนที่กระจายอยู่ในภูมิภาคของ HDPE และส่วนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกซึ่งเป็นส่วนที่ยึดติดอยู่บริเวณพื้นผิวของ CaCO_3 ทำให้กรดสเตียริกเป็นสารชนิดหนึ่งที่ยิยมใช้กันมากในการปรับปรุงพื้นผิวของ CaCO_3 เพื่อให้กระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น [2] ส่งผลให้ค่าความเค้นดึง จุดคราก เพอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก และค่าความต้านทานแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักของขวด HDPE/ CaCO_3 มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดสเตียริกช่วยลดความมีขั้วที่ผิวของ CaCO_3 ลดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน ทำให้แตกเป็นอนุภาคเดี่ยวและเกิดการกระจายตัวดีขึ้นจึงทำให้ HDPE สามารถส่งผ่านแรงหรือกระจายแรงได้ต่อเนื่องมากขึ้น และจากการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของ CaCO_3 พบว่าอนุภาคขนาดเล็กมีค่าความต้านทานต่อแรงกระแทกที่สูงกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) หรือพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับพอลิเมอร์เมทริกซ์มากกว่า [9-11]

จากงานวิจัยการศึกษา PP/EVA/ CaCO_3 โดยที่ CaCO_3 เป็นเกรดเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก [12] พบว่าการใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (Ethylene vinyl acetate copolymer, EVA) ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีส่วนของเอทิลีนเป็นสายโซ่หลักและส่วนของไวนิลอะซิเตตเป็นหมู่ฟังก์ชัน ทำให้มีการยึดเกาะที่ดีระหว่าง EVA และ CaCO_3 นอกจากนี้ EVA นั้นมีความนิ่ม เหนียว ยืดหยุ่น ทนทาน และเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกให้ดีขึ้นได้ และจากการศึกษาการกระจายตัวของ Zeolite A ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขั้วในฟิล์ม LDPE/EVA/Zeolite A [13-14] พบว่าเมื่อมีการเติม EVA ทำให้อนุภาคของ Zeolite A แตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวและกระจายตัวได้ดีกว่าฟิล์ม LDPE/Zeolite A ที่ไม่มีการเติม EVA เนื่องจาก EVA ประกอบไปด้วยส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว และมีโครงสร้างหลักเป็น PE จากหลักฐานวิทยาพบเพิ่มเติมว่า EVA กระจายตัวได้ดีใน LDPE และช่วยให้ Zeolite A อยู่ในภูมิภาค EVA ได้ดี

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการใช้ EVA ต่อสมบัติของขวดพลาสติกที่ผลิตจาก HDPE ที่ผสม CaCO_3 แต่เนื่องจาก HDPE เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้ว มีความเข้ากันได้ที่ต่ำเมื่อทำการผสมกับ CaCO_3 ที่เป็นอนุภาคที่มีขั้ว ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ EVA [15] เพื่อช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของ HDPE กับ CaCO_3 ให้ดีขึ้น และเพื่อปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทกและความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของขวดพลาสติกบรรจุภัณฑ์จาก HDPE ที่มี CaCO_3 เป็นสารตัวเติม โดยทำการศึกษาผลของลำดับการผสมที่มีการใช้ CaCO_3 ชนิดเคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก และใช้ EVA เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของ HDPE และ CaCO_3 ศึกษาผลของอัตราส่วน HDPE/EVA ที่มีการผสม CaCO_3 ในปริมาณที่เท่า ๆ กัน และศึกษาผลของปริมาณการใช้ CaCO_3

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อทำการปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทกและความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของขวดพลาสติกบรรจุภัณฑ์จาก HDPE/ CaCO_3 โดยการใช้ EVA

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาผลของลำดับการผสมที่มีการใช้ CaCO_3 ชนิดเคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก และใช้ EVA เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของ HDPE และ CaCO_3
2. ศึกษาอัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA (100/0, 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20) ที่มีการผสม CaCO_3 30% โดยน้ำหนัก
 3. ศึกษาอิทธิพลของปริมาณ CaCO_3 ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติต่าง ๆ ของขวด
 4. เป่าขึ้นรูปขวดสูตรต่าง ๆ ด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด
 5. ศึกษาสมบัติการไหลด้วยเครื่องทดสอบดรรชนีการไหล
 6. ศึกษาสมบัติทางความร้อนด้วยเทคนิค Differential scanning calorimetry (DSC)
 7. ศึกษาสมบัติการรับแรงดึงด้วย Universal testing machine
 8. ศึกษาสัณฐานวิทยาของขวดด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
 9. ศึกษาพลังงานกระแทกแบบทั้งน้ำหนัก
 10. ศึกษาความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์ และทราบถึงปริมาณของ HDPE, EVA และ CaCO_3 ที่ทำให้ได้ขวดผลิตภัณฑ์ที่มีความต้านทานแรงกระแทกและความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมเหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้งาน
2. เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมขวดพลาสติกที่ต้องการขวดที่มีความต้านทานแรงกระแทกและความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ผสม [16]

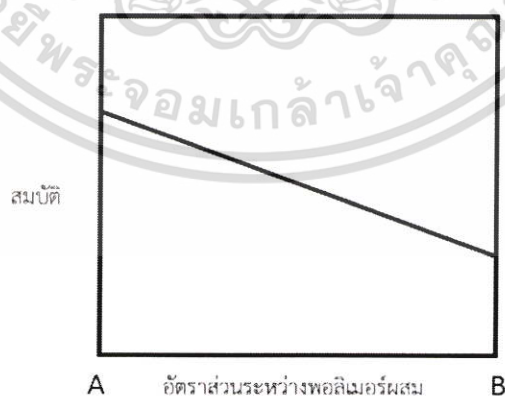
พอลิเมอร์ผสม (Polymer blend) เป็นการนำพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่ามาผสมกันเพื่อทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่หรือเพื่อแก้ไขส่วนที่ไม่ดีของพอลิเมอร์เดิม เพื่อทำให้ได้สมบัติตามที่ต้องการและทำให้สมบัติเด่นของพอลิเมอร์มีค่าสูงขึ้น ในการเลือกพอลิเมอร์ที่นำมาผสมต้องคำนึงถึงข้อดีและข้อเสียของพอลิเมอร์แต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงสมบัติให้ได้ตามต้องการ เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งต้องชดเชยข้อเสียของพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่ง โดยในปัจจุบันมีผู้ให้ความสนใจพอลิเมอร์ผสมมากขึ้นและมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการทำให้สมบัติที่ต้องการของพอลิเมอร์ผสม คือวิธีการผสม เครื่องมือและเทคนิคในการผสมพอลิเมอร์ 2 ชนิดหรือมากกว่าให้ผสมเข้ากันได้ดี ซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมสมบัติของพอลิเมอร์ผสม

2.1.1 ประเภทของพอลิเมอร์ผสม

พอลิเมอร์ผสมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

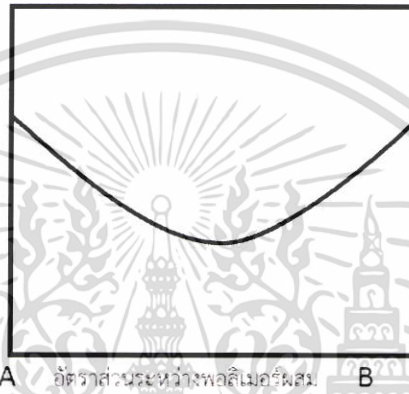
1. พอลิเมอร์ผสมที่สามารถเข้ากันได้ (Miscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกัน สามารถผสมรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ เนื่องจากมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลาย (Solubility parameter, δ) ที่ใกล้เคียงกัน สามารถเข้ากันได้ดีเนื่องมาจากการเกิดอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B โดยถ้าพอลิเมอร์ผสมกันได้อย่างสมบูรณ์ในระดับโมเลกุลและเกิดเป็นวัฏภาคเนื้อเดียว โดยทั่วไปแล้วสมบัติที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับอัตราส่วนของพอลิเมอร์ทั้งสองในพอลิเมอร์ผสม ทำให้ได้กราฟระหว่างสมบัติกับอัตราส่วนระหว่างพอลิเมอร์ผสมเป็นเส้นตรงหรืออย่างน้อยที่สุดเป็นเส้นโค้งสม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่สามารถเข้ากันได้ [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. พอลิเมอร์ที่ไม่สามารถเข้ากันได้ (Immiscible blend) หมายถึง พอลิเมอร์ที่นำมาผสมกันไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้ โดยแสดงด้วยค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายต่างกันมาก เกิดอันตรกิริยาระหว่างพอลิเมอร์ A และพอลิเมอร์ B ได้ไม่ดี องค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ภูมิภาค คือพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของพอลิเมอร์หรือที่เรียกว่า ภูมิภาคหลัก (Matrix phase) และพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบส่วนน้อยหรือที่เรียกว่า ภูมิภาคกระจาย (Dispersed phase) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ 2 ภูมิภาคนี้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดโดยระหว่างภูมิภาคอาจมีแรงดึงดูดระหว่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดบริเวณที่เป็นจุดบกพร่อง ทำให้เกิดการเสียหายได้ แม้ในกรณีที่มีความเค้นต่ำมาก ๆ ทั้งทางกล ทางความร้อน หรือทางเคมี รวมทั้งสมบัติของพอลิเมอร์ผสมอาจลดต่ำลงมากกว่าพอลิเมอร์แต่ละตัวที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสม ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 สมบัติของพอลิเมอร์ผสมในกรณีที่ไม่สามารถเข้ากันได้ [17]

ในทางเทอร์โมไดนามิกส์ สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2.1

$$\Delta G_{\text{mix}} = \Delta H_{\text{mix}} - T\Delta S_{\text{mix}} \quad (2.1)$$

- เมื่อ ΔG_{mix} คือ พลังงานอิสระกิบส์ในการผสม
 ΔH_{mix} คือ การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสม
 ΔS_{mix} คือ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสม
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

เนื่องจากพอลิเมอร์ส่วนมากมีโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecule) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เป็นสาเหตุทำให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีในการผสมต่ำ ส่วนค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีในการผสมมักมีค่าบวก ทำให้ค่าพลังงานกิบส์ของพอลิเมอร์ผสมมีค่ามากกว่า 0

2.1.2 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสม [18]

โดยทั่วไปสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมี 3 แบบ ซึ่งใช้ความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ผสมเป็นหลักเกณฑ์ในการจำแนก ในรูปที่ 2.3 (a) แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่เข้ากันได้ดีมีวัฏภาคเดียวไปจนถึงระดับโมเลกุล ลักษณะของสันฐานวิทยาคลายกับพอลิเมอร์ร่วมแบบอิสระ (Random copolymer) ในรูปที่ 2.3 (b) แสดงสันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมที่ไม่เข้ากัน ซึ่งเป็นรูปแบบที่พบได้มากในพอลิเมอร์ผสม เนื่องมาจากปัจจัยพื้นฐานต่าง ๆ เช่น ความหนืดของพอลิเมอร์แต่ละชนิด สมบัติความมีขั้ว สมบัติการละลาย นอกจากนี้ยังมีสันฐานวิทยาแบบที่เข้ากันได้ดีบางส่วนและแยกวัฏภาคกันอย่างชัดเจน (Partially miscible) ดังรูปที่ 2.3 (c)

สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมมีอิทธิพลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ผสม โดยเฉพาะสมบัติเชิงกล จากสันฐานวิทยาในรูปที่ 2.3 (b) และ (c) การกระจายตัวและการยึดติดระหว่างผิวสัมผัสของพอลิเมอร์ผสมไม่ดี ทำให้เกิดรอยตำหนิระหว่างวัฏภาค ทำให้สมบัติเชิงกลต่ำ ดังนั้นในการผสมพอลิเมอร์เพื่อให้ได้สมบัติที่ต้องการ จำเป็นต้องทราบถึงความสามารถในการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์แต่ละชนิด ถ้าพอลิเมอร์ที่เลือกมีค่าบ่งชี้ความสามารถในการละลายต่างกันมากจะได้พอลิเมอร์เป็น Immiscible Blend ดังนั้นเพื่อให้เกิดการผสมที่ดีขึ้น จึงมีการใช้สารช่วยผสม เช่น พอลิเมอร์ร่วม ซึ่งส่วนใหญ่แล้วพอลิเมอร์ร่วมที่เลือกจะมีโครงสร้างส่วนหนึ่งที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกับพอลิเมอร์เมตริกซ์และอีกส่วนหนึ่งที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกับวัฏภาคกระจาย ทำให้พอลิเมอร์ผสมเกิดการผสมเข้ากันได้ดีขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลของวัสดุดีขึ้น



(a) Miscible

(b) Immiscible

(c) Partially miscible

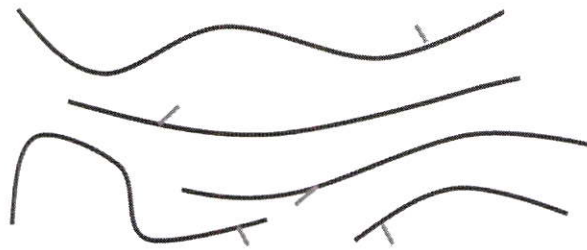
รูปที่ 2.3 สันฐานวิทยาของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง พอลิเมอร์ A (____) และพอลิเมอร์ B (____) [18]

2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [19]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เป็นพอลิเอทิลีนชนิดหนึ่งซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มพอลิโอเลฟินส์ พอลิเอทิลีน ถูกค้นพบในปี 1951 โดย Reginald Gibson and Eric Dawcett ประเทศอังกฤษ HDPE เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นตรงที่มีกิ่งสาขา (Branching) น้อย จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง มีความแข็งแรง เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นทำให้ความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น สามารถสังเคราะห์ได้จากหลายวิธี รวมถึงการเกิดพอลิเมอร์แบบอนุมูลอิสระ (Radical polymerization) ของ เอทิลีนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันสูง การเกิดพอลิเมอร์แบบโคออดิเนชัน (Coordination polymerization) ของเอทิลีน และการเกิดพอลิเมอร์ของเอทิลีนกับตัวเร่งที่เป็นโลหะออกไซด์ [20]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ HDPE

2.2.1 สมบัติโดยทั่วไปของ HDPE [1]

- เป็นของแข็งกึ่งผลึก (Partially crystalline) ส่วนที่เป็นผลึก (Crystal phase) ให้สมบัติของความแข็งและจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง ส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous phase) ให้ความยืดหยุ่นและการทนต่อแรงกระแทก
- มีค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ในช่วง 0.96-0.97
- มีโครงสร้างสายโซ่ตรง สายโซ่จึงมีความเป็นระเบียบมาก ทำให้มีความเป็นผลึกสูงและมีดรชนีหักเหจากส่วนที่เป็นอสัณฐานต่างกันมาก ดังนั้นแผ่นฟิล์มบางจาก HDPE จึงมีความโปร่งแสง
- เป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี
- ละลายในทำละลายพวกโทลูอีน คาร์บอนเตตระคลอไรด์ ไซลีน และไตรคลอโรเอทิลีน เป็นต้น เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 70°C
- ทนต่อกรดและด่างได้ดี ไม่ว่องต่อสารเคมี
- HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง-สูง มีสมบัติทนทานต่อแรงกระแทกดีมาก

สิ่งที่กำหนดสมบัติของ HDPE นั้นขึ้นกับ 3 ตัวแปร คือ ความหนาแน่น ดรชนีการไหล (MFI) และการกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD)

ความหนาแน่น

HDPE มีความหนาแน่นประมาณ $0.940\text{-}0.965\text{ g/cm}^3$ พบว่าเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นทำให้มีสมบัติดังต่อไปนี้ คือ ความแข็งแรงจากการรับแรงดึง (Tensile strength) การคงรูปหรือความแข็งเกร็ง (Rigidity) ความแข็ง (Hardness) ความทนทานต่อความร้อนและอุณหภูมิ (Heat resistance) ความทนทานต่อสารเคมี ความทนต่อการซึมผ่านของก๊าซ และสมบัติทางกายภาพ เช่น มีลักษณะเป็นผิวเรียบมันวาวดีขึ้น [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดรชนีการไหล (MFI)

ดรชนีการไหลเป็นการวัดน้ำหนักโมเลกุล ถ้าดรชนีการไหลสูงแสดงว่ามีความหนืดน้อย สายโซ่โมเลกุลสั้น น้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ถ้าดรชนีการไหลต่ำแสดงว่ามีความหนืดสูงหรือน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยปกติ HDPE มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 40,000-300,000 ซึ่งมีค่าดรชนีการไหลอยู่ในช่วง 0.02-100 g/10 min

ดรชนีการไหลมีผลต่อสมบัติเชิงกลของ HDPE เช่น ความสามารถในการขึ้นรูป ถ้าค่าดรชนีการไหลมาก การขึ้นรูปได้ง่ายเพราะความหนืดลดน้อยลง แต่สมบัติต่าง ๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงกระแทก ลดลง เพราะน้ำหนักโมเลกุลน้อย สายโซ่โมเลกุลสั้น ดังนั้นการรับแรงจึงไม่ดีเท่าโมเลกุลที่มีสายโซ่ยาว [1]

การกระจายน้ำหนักโมเลกุล (MWD)

การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ HDPE จะอยู่ในช่วงแคบ-กว้างซึ่งขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาและกระบวนการแปรรูปที่ใช้ พบว่าถ้าการกระจายตัวกว้างทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย เพราะส่วนที่เป็นโมเลกุลเล็ก ๆ เข้ามาช่วยหล่อลื่น ขณะเดียวกันทำให้การหดตัวและงอตัวเพิ่มขึ้น เพราะมีสายโซ่ขนาดไม่เท่ากัน มีทั้งสายโซ่แบบสั้นและยาวอยู่ด้วยกัน เวลาขึ้นงานได้รับความเย็นการตกผลึกไม่เท่ากัน ส่วนความต้านทานแรงกระแทก ลดลง และความต้านทานต่อแรงเค้นของสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น โดยปกติถ้าทำการผลิต HDPE ที่มีค่าดรชนีการไหลต่ำหรือน้ำหนักโมเลกุลสูงทำให้ขึ้นรูปได้ยาก ดังนั้นจึงต้องอาศัยการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้างมาก [1]

2.2.2 การใช้งาน HDPE

พอลิเอทิลีนจัดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีปริมาณการใช้งานสูงที่สุด โดยเฉพาะพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่นิยมใช้ในงานเป่าขึ้นรูป ประมาณ 40% ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงใช้ทำบรรจุภัณฑ์ประเภทขวด [21] นอกจากนั้นจะเป็นภาชนะสำหรับบรรจุภัณฑ์อื่น ๆ ที่ต้องใช้กับงานที่มีความต้านทานสูง ทนต่อแรงเค้นสูง และมีน้ำหนักไม่สูงมากนัก เช่น

- ขวดพลาสติก ที่ใช้สำหรับงานเป่าขึ้นรูปโดยเฉพาะภาชนะบรรจุอาหารและเครื่องดื่ม
- ภาชนะบรรจุสารเคมี ด้วยคุณสมบัติการทนต่อสารเคมีของ HDPE จึงเหมาะสำหรับการใช้บรรจุแชมพู ครีมนวด ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดสำหรับใช้ในครัวเรือน น้ำมันเครื่อง เป็นต้น
- ระบบท่อ (Pipe systems) เนื่องจากท่อ HDPE ทนต่อแรงกดแรงกระแทก สามารถใช้งานทั้งการกลบฝังดินและในที่โล่งแจ้งได้
- ถังบรรจุสิ่งของ เนื่องจากมีความเหนียว ยืดหยุ่น ต้านทานแรงต่าง ๆ ทนทานต่อการแตกหรือการหักงอได้ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การเลือกใช้งานเป่าขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จาก HDPE [1]

ประเภท	สมบัติที่ต้องการ	เกรดที่ควรใช้
ขวดสารเคมีพวกน้ำยาทำความสะอาด, แชมพู, น้ำยาล้างจาน	1. ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม 2. ความสามารถในการทรงรูป 3. ความต้านแรงกระแทก	- ดรรชนีการไหล 0.3-0.4 กรัม/10 นาที - ความหนาแน่น 0.945-0.956 g/cm ³ - การกระจายน้ำหนักโมเลกุล กว้าง
ขวดเครื่องสำอาง	1. ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม 2. ความสามารถในการทรงรูป 3. มีผิวของพลาสติกเนียน 4. ไม่มีกลิ่น	- ดรรชนีการไหล 0.3-0.4 กรัม/10 นาที - ความหนาแน่น 0.945-0.956 g/cm ³ - การกระจายน้ำหนักโมเลกุล ปานกลาง-กว้าง
ขวดบรรจุอาหาร	1. ความสามารถในการทรงรูป 2. มีผิวของพลาสติกเนียน 3. ไม่มีกลิ่น	- ดรรชนีการไหล 0.7-2.0 กรัม/10 นาที - ความหนาแน่น 0.958-0.963 g/cm ³ - การกระจายน้ำหนักโมเลกุล แคบ-กว้าง

2.3 แคลเซียมคาร์บอเนต

ในปัจจุบันมีการใช้สารตัวเติม (Filler) ผสมลงในพลาสติกกันอย่างกว้างขวาง เพื่อช่วยเพิ่มความหนาแน่นและลดต้นทุน หรือช่วยให้สมบัติบางประการของพลาสติกดีขึ้น ในการพิจารณาที่จะนำเอาสารตัวเติมมาใช้จะต้องคำนึงถึงผลต่าง ๆ หลายประการ เช่น การกระจายตัวของสารในเนื้อพลาสติก สมบัติต่าง ๆ เมื่อผสมสารตัวเติมแล้ว รวมทั้งปัญหาด้านความปลอดภัยจากสะเก็ดฝุ่น และเนื่องจากเป็นสารตัวเติมที่สามารถหาได้ภายในประเทศ มีหลากหลายขนาด หลากหลายเกรด ไม่เป็นพิษ มีความขาว จึงมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม

CaCO₃ จัดเป็นสารธรรมชาติที่เกิดจากการตกตะกอนของหินในทะเล เปลือกหอย ปะการังและโครงกระดูกของสัตว์น้ำ กลายเป็นหินปูนหรือ CaCO₃ ซึ่งถือเป็นสารตั้งต้นสำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ CaCO₃ เป็นสารทั่วไปที่ใช้เติมลงในพลาสติก ซึ่งมีหลายชื่อโดยแบ่งตามแหล่งกำเนิด เช่น หินปูน (Limestone) ชอล์ก (Chalk) หินอ่อน (Marble) และ หินปะการัง (Coral) เป็นต้น หรือแบ่งตามโครงสร้างผลึก เช่น แคลไซต์ (Calcite) และ อาร์โกไนต์ (Argonite) เป็นต้น และเมื่อมีแมกนีเซียมคาร์บอเนตอยู่ในโครงสร้างจะเรียกว่า โดโลไมต์ (Dolomite) [22]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 กระบวนการผลิต

- แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติ

แคลเซียมคาร์บอเนตธรรมชาติได้มาจาก 2 แหล่งคือ จากซอล์กซึ่งประกอบด้วยตะกอนที่ได้จากซากของพืชหรือซากของสัตว์เล็ก ๆ และหินปูนขาว (White limestone) ส่วนใหญ่เกิดจากซากสัตว์เล็ก ๆ ที่เรียกว่า โฟรามินิเฟอร่า (Foraminifera) และเปลือกสัตว์ทะเลอื่น ๆ ซากกระดูกและเปลือกสัตว์เหล่านี้ประกอบด้วย CaCO_3 เมื่อสัตว์เหล่านี้ตายจะจมลงสู่ก้นทะเล เมื่อเวลาผ่านไปจะก่อรูปแปลงเป็นหินปูนขนาดใหญ่ขึ้น

- แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์

แคลเซียมคาร์บอเนตสังเคราะห์เป็นผลพลอยได้จากการผลิตเคมีภัณฑ์ ตัวอย่างเช่น ได้จากกรรมวิธีกระบวนการแอมโมเนีย-โซดา (Ammonia-soda process), กระบวนการคาร์บอเนชัน (Carbonation process) และกระบวนการโซเดียม ไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide process) แต่กระบวนการผลิตที่นิยมใช้มากที่สุดคือ Carbonation process กระบวนการนี้เริ่มจากนำก้อนหินปูนมาเผาในเตาเผาให้ร้อนจัดที่อุณหภูมิประมาณ $750-900^\circ\text{C}$ จะเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้เนื้อสารเกิดการสลายตัวคือ CaCO_3 สลายตัวเป็นแคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide, CaO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) ส่วนแมกนีเซียมคาร์บอเนตสลายตัวเป็นแมกนีเซียมออกไซด์ (Magnesium oxide, MgO) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการเคมีดังนี้ [23]



CaO ดูดความชื้นในอากาศได้ติกลายเป็นไฮดรอกไซด์



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



การแยกขนาดอนุภาคของ CaCO_3 ด้วยการกรองโดยมีตัวกรองสูญญากาศแบบขนาน ตัวกรองแบบใช้ความดันหรือใช้การหมุนช่วยในการกำจัดน้ำ หลังจากนั้นทำให้แห้ง CaCO_3 ที่ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 0.03 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 สมบัติทั่วไปของ CaCO_3

CaCO_3 ประกอบด้วย แคลเซียม 40% ออกซิเจน 48% และคาร์บอน 12% โดยที่แคลเซียมคาร์บอเนตคุณภาพที่ดี จะต้องมีส่วนนี้ [23]

- มีความบริสุทธิ์ ปราศจากสิ่งเจือปนที่จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของพลาสติก
- มีการกระจายตัวดีขึ้น ถ้าเลือกใช้เกรดที่มีการเคลือบผิว
- เพิ่มความเหนียว มอดุลัส และความทนทานต่อแรงกระแทก
- ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ทนอุณหภูมิได้สูง 750-900°C

2.3.3 การประยุกต์ใช้งาน CaCO_3 [22-23]

1. อุตสาหกรรมพลาสติก: CaCO_3 มีการใช้ร่วมกับพลาสติกหลายชนิดตัวอย่างเช่น PE และพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นต้น CaCO_3 นำมาใช้กับพลาสติกเพื่อลดต้นทุนในการผลิต CaCO_3 ที่มีการเติมลงใน PE จะทำให้สมบัติบางประการของ PE ลดลง เช่น ค่าความแข็งแรงดึง แต่จะทำให้ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น CaCO_3 ที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวจะมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์ที่ดีกว่า CaCO_3 ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งจะทำความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น

2. อุตสาหกรรมกระดาษ: CaCO_3 นำมาใช้ในเรื่องการปรับปรุงสมบัติดินและน้ำ รวมถึงเพื่อการปรับความเป็นกรดต่าง และการฆ่าเชื้อโรค

3. อุตสาหกรรมกระดาษและเยื่อกระดาษ: CaCO_3 ใช้เพิ่มความทึบแสงให้กับเนื้อเยื่อกระดาษ ปรับปรุงคุณภาพของเนื้อเยื่อกระดาษ ทำให้ผิวเนื้อเยื่อสม่ำเสมอ ปรับปรุงคุณสมบัติด้านการพิมพ์ การดูดซับน้ำหมึก

4. อุตสาหกรรมสี: CaCO_3 มีคุณสมบัติทำให้สีมีความต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังใช้แทนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ที่มีราคาสูงกว่า เพื่อให้สีมีความเงามากขึ้น

5. ในอุตสาหกรรมอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมยาง อุตสาหกรรมแก้ว

2.4 กรดสเตียริก

2.4.1 ความเป็นมาของกรดสเตียริก

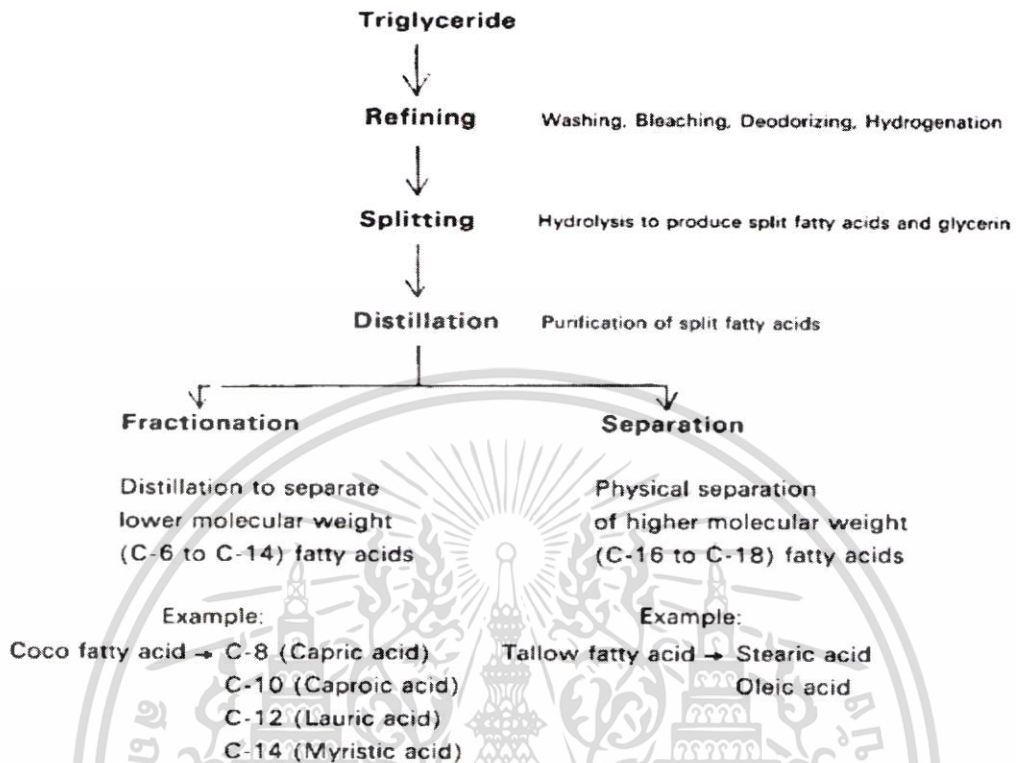
กรดสเตียริก (Stearic acid) เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนและส่วนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันของกรด ซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของสารตัวเติมได้ช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้มีสมบัติที่ดีขึ้น [24]

กรดสเตียริกสังเคราะห์ได้มาจากกลีเซอไรด์ซึ่งพบในไขมันสัตว์และพืชหลายชนิด นิยมใช้เป็นสารหล่อลื่นในพอลิเมอร์คอมโพสิตหรือเป็นส่วนประกอบหนึ่งในกระบวนการวัลคาไนเซชันยาง นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเพิ่มเสถียรสภาพทางความร้อน (Thermal stabilizer) ในรูปของสเตียเรต (โลหะสเตียเรต) [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 กระบวนการผลิต

กรดสเตียริกสังเคราะห์ได้จากไตรกลีเซอไรด์ กระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการสังเคราะห์กรดสเตียริก [24]

กระบวนการเริ่มจากนำไตรกลีเซอไรด์มากำจัดสิ่งปนเปื้อน เช่น ฟอสฟาไทด์ โลหะหนัก สี กลิ่น โดยการล้าง (Washing) ฟอกขาว (Bleaching) ต่อมนำไตรกลีเซอไรด์ที่ได้มาผ่านไอน้ำแรงดันสูงเพื่อแยกกรดไขมันออกจากกลีเซอรอล ซึ่งเรียกว่ากระบวนการสปลิตติง (Splitting process) กรดไขมันที่ได้นำไปกลั่น (Distillation) เพื่อปรับปรุงสมบัติทางเคมี สี กลิ่น และเป็นการแยกกรดไขมันแต่ละชนิดออกจากกัน แบ่งเป็น 2 วิธีคือ

- การแยกส่วน (Fractionation) วิธีนี้ใช้กระบวนการกลั่นด้วยไอน้ำ สามารถแยกกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำได้ (C_6 - C_{14})

- การแยก (Separation) เนื่องจากกรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (C_{16} - C_{18}) แยกออกจากกันได้ยากด้วยวิธีการกลั่นด้วยไอน้ำเพราะมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงต้องใช้การแยกเชิงกายภาพ (Physical separation) ซึ่งกระบวนการแยกมี 3 วิธีคือกระบวนการทางกล (Mechanical processing), การตกผลึกด้วยตัวทำละลาย (Solvent crystallization) และไฮโดรฟิลิเซชัน (Hydrophilization) [24]

2.4.3 สมบัติทั่วไปของกรดสเตียริก

กรดสเตียริกมีสูตรทางเคมีคือ $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ [25]

- น้ำหนักโมเลกุล 284.48
- จุดเดือด 361°C
- จุดหลอมเหลว 70°C
- ความถ่วงจำเพาะ 0.847
- ความสามารถในการละลายน้ำ 0.1-1 กรัม/100 มิลลิลิตร ที่ 23°C

กรดสเตียริก เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน C_{18} และส่วนที่เป็นหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของสารตัวเติมได้ กรดสเตียริกมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาถูก ช่วยในการปรับปรุงสมบัติเชิงกล ปรับปรุงสมบัติการไหล ช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติมต่าง ๆ ในพอลิเมอร์ ลดการดูดซับน้ำ ซึ่งพบว่าสารตัวเติมที่ทำการเคลือบผิวไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มากกว่าสารตัวเติมที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงผิว กรดสเตียริกเกิดการดูดซับพื้นผิวระหว่างสารตัวเติมกับพอลิเมอร์ต่ำ ในขณะที่หลอมเหลวระหว่างการผสม เนื่องจากกรดสเตียริก มีสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนที่สั้นเกินไปที่จะเกิดการเกี่ยวพันกัน (Entangle) กับสายโซ่พอลิเมอร์ [26]

2.4.4 การประยุกต์ใช้งานกรดสเตียริก

กรดสเตียริกนิยมใช้เป็นสารช่วยกระจายตัวในระบบของพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วที่มีการใช้สารตัวเติมที่มีขั้วซึ่งมักจะทำให้เกิดปัญหาการกระจายตัวที่ไม่ดีของสารตัวเติม เช่น ในระบบของ PE ที่มีการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม การเติมกรดสเตียริกทำให้การกระจายตัวของ CaCO_3 ดีขึ้น [27] เนื่องจากกรดสเตียริกจะหันด้านหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกเข้าหา CaCO_3 และหันด้านสายโซ่ไฮโดรคาร์บอนเข้าหา PE ทำให้ช่วยลดการรวมตัวของอนุภาคของ CaCO_3 ได้

การปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกมีข้อดีหลายประการดังนี้

1. สารตัวเติมที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวจะทำให้สามารถกระจายตัวได้ง่ายและทั่วถึงในพอลิเมอร์
2. การปรับปรุงพื้นผิวช่วยทำให้ระยะระหว่างพื้นผิวระหว่างสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมตริกซ์ใกล้เคียงกันมากขึ้น
3. ช่วยในเรื่องการป้องกันพื้นผิวเกิดการแตก รอยบวม และอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการนำไปใช้งานและเป็นการทำให้วัสดุมีความแข็งแรง
4. ช่วยในเรื่องการกำจัดรอยตำหนิ รอยขีดถูบนพื้นผิว

2.5 เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์

2.5.1 ลักษณะโดยทั่วไปของ EVA

เอทิลีนไวนิลอะซิเตทโคพอลิเมอร์ เป็นเทอร์โมพลาสติกในกลุ่มพอลิโอลิฟินส์ เป็นโคพอลิเมอร์ระหว่างเอทิลีนกับไวนิลอะซิเตท (Vinyl acetate, VA) ที่มีเอทิลีนเป็นเนื้อหลักประมาณ 75-90% ซึ่งแล้วแต่เกรดที่นำมาใช้ การมีไวนิลอะซิเตททำให้เกิดความยืดหยุ่นโดยลดการเกิดผลึก (Crystallinity) ซึ่งพบว่า ถ้ามีปริมาณเอทิลีนมากกว่า 75% จะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง โครงสร้างของ EVA แสดงดังรูปที่ 2.6

EVA เกิดจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันภายใต้ความดันสูงของเอทิลีนมอนอเมอร์และไวนิลอะซิเตทมอนอเมอร์ โดยอุณหภูมิและความดันที่ใช้ต่ำกว่ากรณีของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเอทิลีนมอนอเมอร์เพียงอย่างเดียว ตัวริเริ่มอนุมูลอิสระที่นิยมใช้คือเอโซบิสไอโซบิวริลไนไตรล์ (Azo-Bis-Isobutyronitrile), สารอินทรีย์เปอร์ออกไซด์ (Organic Peroxides) และเปอร์ซัลเฟต (Persulphates)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ EVA [28]

2.5.2 สมบัติทั่วไปของ EVA

- เป็นเทอร์โมพลาสติก มีลักษณะเป็นเม็ดใสจนถึงขุ่น
 - มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 0.926-0.95
 - สามารถละลายได้ในสารละลายอะโรมาติกและคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง
 - จุดเปราะ (Brittle point) อยู่ ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า -20°C
 - จุดอ่อนตัว (Softening point) อยู่ระหว่าง $60-80^{\circ}\text{C}$
 - มีค่า T_g ตั้งแต่ -20°C (ของโฮโมพอลิเมอร์) จนถึง 20°C
 - มีค่า Dielectric Strength เท่ากับ 21 kV/mm
 - มีค่า Dielectric Constant at 1 MHz เท่ากับ 2.8
 - สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล มีค่าดังนี้
- | | |
|--|----------------------|
| ค่าความแข็งกด (Hardness Shore D) | เท่ากับ 90-95 |
| ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) | เท่ากับ 2.9-19.6 MPa |
| ค่าการดึงยืด ณ จุดขาด (Extension at Break) | เท่ากับ 500-700% |
- ที่อุณหภูมิสูงมีความโค้งงอดี
 - มีความสามารถในการสปริงตัวได้ดี โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทนต่อสภาพการใช้งาน การชักล้าง และมีอายุการใช้งานสูง
- สามารถให้สีได้ง่ายและสวยงาม
- ขึ้นรูปได้ง่าย
- มีความยืดหยุ่น และโค้งงอได้ดีโดยไม่ต้องใช้พลาสติกไฮเซออร์

2.5.3 การประยุกต์ใช้งานของ EVA

- EVA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลและจุดอ่อนตัวต่ำ มักใช้ในงานเคลือบกระดาษ นอกจากนี้ยังเป็นสารยึดติด และพลาสติกไฮเซออร์
- EVA ที่มีสมบัติคล้ายยาง มักใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ประเภทอาหาร และผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์
- EVA ใช้ในงานการผลิตรองเท้า เบาะรองนั่ง
- EVA ที่มีปริมาณไวนิลอะซิเตตน้อยกว่า 7% ได้ฟิล์มที่มีความเหนียว ใส มีความมันวาว

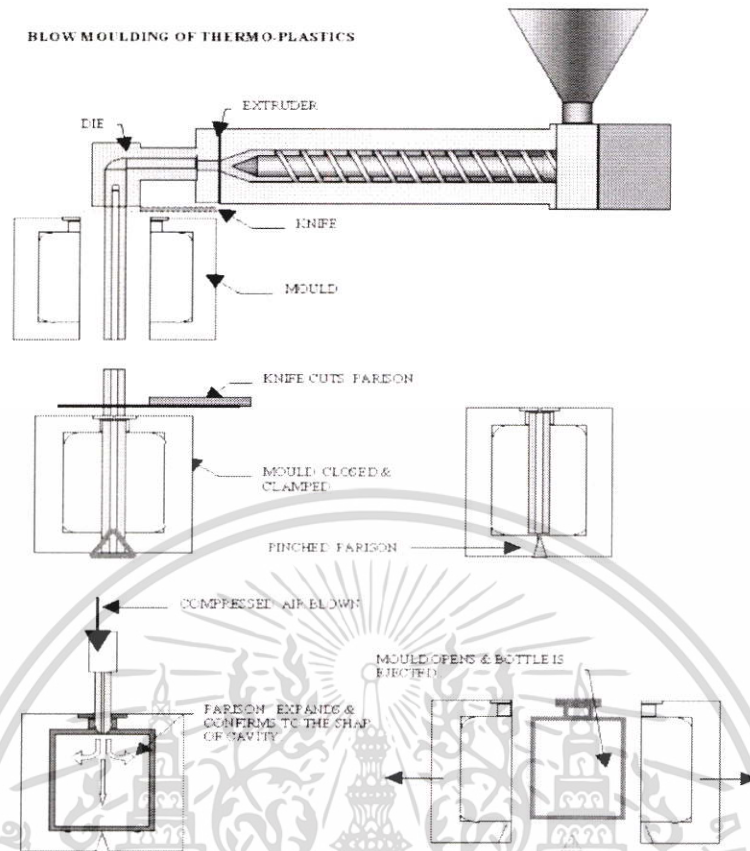
2.6 กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding process) เป็นกระบวนการผลิตขึ้นงานที่มีลักษณะเป็นทรงขวด โดยมีหลักการง่าย ๆ คือ การอัดรีดพลาสติกที่มีลักษณะเป็นท่อกลวงซึ่งเรียกว่า พาริชั่น (Parison) ลงภายในแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นด้วยระบบน้ำไหลวน ซึ่งนิยมใช้น้ำเย็นที่มีช่วงอุณหภูมิระหว่าง 5-20°C จากนั้นใช้ลมเป่าด้วยความดันลมที่ใช้ขึ้นกับขนาดของเครื่อง ทำให้ท่อพลาสติกพองตัวออกกระทบกับผนังแม่พิมพ์ที่เย็น ทำให้พลาสติกเกิดการเย็นตัวได้ขึ้นงานตามลักษณะแม่พิมพ์ ดังรูปที่ 2.7

ในขั้นตอนของการเป่าขึ้นรูปสภาวะที่ใช้ในการผลิตมีความสำคัญเป็นอย่างมาก จึงต้องควบคุมให้มีความเหมาะสม

- อุณหภูมิ (พลาสติกหลอมเหลว): ที่เหมาะสมควรจะอยู่ในช่วง 170-200°C สำหรับ HDPE อุณหภูมิของพลาสติกส่วนใหญ่จะใช้เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติกแต่ละชนิดเนื่องจากถ้าใช้อุณหภูมิในการแปรรูปต่ำเกินไป อาจทำให้พลาสติกไม่ไหลออกจากหัวตาย ถ้าใช้อุณหภูมิสูงอาจทำให้พลาสติกเกิดการเสียสภาพได้

- รอบการหมุนของสกรู: รอบการหมุนของสกรูมีผลต่อการไหลของพลาสติก กล่าวคือถ้ารอบการหมุนของสกรูเพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มอัตราความเครียดเฉือน ซึ่งพลาสติกส่วนใหญ่มีพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น พลาสติกที่หลอมเหลวอยู่มีความหนืดลดลง ความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้น พาริชั่นไหลออกจากหัวตายได้มากขึ้น



รูปที่ 2.7 กระบวนการเป่าขึ้นรูปแบบอัดรีด [29]

- ความดันลมเป่า: โดยปกติจะใช้ความดันลมเป่า 4-10 bar สำหรับ HDPE ซึ่งมีผลต่อรอบการผลิต กล่าวคือความดันลมเป่ามาก จะช่วยให้ขนาดผลิตภัณฑ์เย็นตัวได้เร็วขึ้น ส่งผลให้รอบการผลิตสั้นลง เนื่องจากการขยายตัวของพาริสันกระทบผลของแม่พิมพ์ได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังมีการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เหลวเพื่อช่วยในการระบายความร้อนให้เร็วขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มผลผลิตได้

- อุณหภูมิแม่พิมพ์: จะมีผลอย่างมากต่อลักษณะผิวและการหดตัวของผลิตภัณฑ์และรอบเวลาการผลิต ดังนั้นอุณหภูมิของแม่พิมพ์จะต้องเลือกและควบคุมให้คงที่อย่างระมัดระวังเพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างลักษณะและความหนาของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ

- เวลาในการหล่อเย็น: เวลาในการหล่อเย็นมีความสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะพลาสติกที่มีความเป็นผลึก เนื่องจากถ้าใช้เวลาในการหล่อเย็นสั้นจะทำให้เกิดผลึกไม่สมบูรณ์อาจทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงไม่ดี

กระบวนการผลิตแบบเป่าขึ้นรูป คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้จะมีความสัมพันธ์หรือขึ้นอยู่กับคุณภาพของพาริสันที่อัดรีดออกมาก่อนทำการเป่าขึ้นรูป โดยทั่วไปเมื่อพาริสันออกมาจากหัวดายจะเกิดพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องกับการไหลสองประการที่สำคัญคือ การบวมตัว (Extruded swell หรือ Die swell) และการย้อยตัว (Sagging) โดยพฤติกรรมทั้งสองนี้ให้ผลตรงข้ามกัน Die swell คือทำให้พาริสันมี

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าขนาดของหัวตาย ส่วน Sagging คือทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพาริสันลดลง เพราะฉะนั้นเพื่อที่จะควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ในขั้นตอนการผลิตจึงต้องทราบถึงผลกระทบและพฤติกรรมทั้งสองในกระบวนการผลิต

ข้อควรพิจารณาในการผลิตชิ้นงานในกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดมีดังนี้ [30]

- มีการไหลตัวของพลาสติกเหลวดี อัดรีดออกเป็นพาริสันได้ง่ายและไม่เกิดการย้อยตัวของพลาสติกเหลว (sagging) เพื่อไม่ให้เกิดขวดที่มีลักษณะก้นหนา แต่ผนังช่วงคอขวดบางเกินไป

- ขนาดและความหนาของขวดมีความสม่ำเสมอ

- มีความคงรูปที่ดี

- มีความต้านทานแรงกระแทกที่ดี

- ผิวของชิ้นงานเรียบ สวยงาม

- ปริมาณของเสียควรมีน้อยที่สุด มีอัตราและกำลังการผลิตสูง

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยการศึกษาลักษณะของการใช้ CaCO_3 ในปริมาณต่าง ๆ ต่อสมบัติเชิงกล [4], [7], [8] [31] และ [32] พบว่าเมื่อมีปริมาณของ CaCO_3 เพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแรงดึงและค่าความต้านทานแรงดัดลดลง เนื่องจากความต้านทานแรงดึงและแรงดัดของวัสดุขึ้นอยู่กับความสามารถของความเค้นในการเคลื่อนที่ภายในวัสดุ ถ้าความเค้นไม่สามารถเคลื่อนที่หรือกระจายอย่างต่อเนื่องได้ วัสดุจะเกิดการเสียรูปได้ง่าย ซึ่งอนุภาคของ CaCO_3 ที่ผสมอยู่ มีลักษณะแข็งไม่ยืดหยุ่น ทำให้ความเค้นที่เคลื่อนที่มาจากพอลิเมอร์เมตริกซ์ไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้อีก ทำให้ไม่สามารถต้านทานแรงได้ และค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่า Young's Modulus มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงความคงรูปดีขึ้น เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 เข้าไปแทรกตัวของระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้ขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่เป็นสาเหตุให้การเกี่ยวพันระหว่างสายโซ่ลดลง เมื่อได้รับแรงดึงจึงเกิดการขาดได้ง่ายความสามารถในการยึดตัวลดลง และยังพบว่าค่าความทนทานแรงกระแทกมีค่าลดลง โดยในงานวิจัย [31] พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อผสม CaCO_3 ในปริมาณน้อย ซึ่งอธิบายได้ว่า เมื่ออนุภาคของ CaCO_3 กระจายตัวใน PP ส่งผลให้พลังงานจากการกระแทกกระจายตัวได้ดีขึ้น แต่เมื่อมีการผสม CaCO_3 เพิ่มสูงขึ้น (มากกว่า 10% โดยน้ำหนัก) ค่าความทนทานแรงกระแทกลดลง เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 มีแนวโน้มเกิดการรวมตัวกัน แสดงให้เห็นว่าความทนทานต่อแรงกระแทกของคอมโพสิตขึ้นอยู่กับการกระจายตัวของอนุภาค CaCO_3 ในพอลิเมอร์เมตริกซ์

จากการใช้ CaCO_3 ในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้พบปัญหาเรื่องการกระจายตัวของ CaCO_3 ในงานวิจัย [7] จึงได้ทำการเปลี่ยน CaCO_3 เป็นชนิดที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก พบว่าค่ามอดูลัส, เปอร์เซ็นต์การดึงยึด ณ จุดขาด และค่าความต้านทานแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ CaCO_3 ที่ไม่ได้ทำการเคลือบด้วยกรดสเตียริก ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับในงานวิจัย [8] เนื่องจากกรดสเตียริกช่วยในการกระจายตัวของ CaCO_3 จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์เมตริกซ์กับ CaCO_3 มากขึ้น แต่การใช้ปริมาณกรดสเตียริกมากเกินไปจะทำให้ค่าดงกล่าวลดลง เนื่องจากกรดสเตียริกทำให้เกิดการสั่นไถลของสายโซ่พอลิเมอร์ขึ้น ทำให้ชิ้นงานขาดและแตกหักได้ง่ายขึ้น [32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลของการใช้อนุภาค CaCO_3 ขนาดต่าง ๆ [4], [10] และ [33] พบว่าค่าความต้านทานแรงดึง, ค่าความต้านทานแรงดัดและค่ามอดุลัส ที่มีการผสม CaCO_3 อนุภาคขนาดเล็กมีค่ามากกว่าการผสม CaCO_3 อนุภาคขนาดใหญ่เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กสามารถแทรกตัวเข้าไปในพอลิเมอร์เมตริกซ์ได้ง่ายกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ได้ดีกว่า ส่งผลให้สามารถต้านทานแรงดึง แรงดัดและต้านทานการเสียรูปได้มากกว่า นอกจากนี้เมื่อผสม CaCO_3 อนุภาคขนาดเล็ก มีค่าความทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าการผสม CaCO_3 อนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจาก CaCO_3 อนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) หรือพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักมากกว่า CaCO_3 อนุภาคขนาดใหญ่ ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับพอลิเมอร์เมตริกซ์มากกว่า เป็นผลทำให้สามารถถ่ายเทพลังงานจากแรงกระแทกได้ดี

จากงานวิจัยการศึกษาการใช้ EVA ร่วมกับ CaCO_3 ใน PP [12] พบว่าการใช้ EVA ซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ที่มีส่วนของเอทิลีนเป็นสายโซ่หลักและส่วนของไวนิลอะซิเตตเป็นหมู่ฟังก์ชัน ทำให้มีการยึดเกาะที่ดีระหว่าง EVA และ CaCO_3 นอกจากนี้ EVA นั้นมีความนิ่ม เหนียว ยืดหยุ่น ทนทาน และเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกให้ดีขึ้นได้ นอกจากนี้จากการศึกษาความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR) ของพอลิเมอร์ผสม [34] ในอัตราส่วน 100/0, 99/1, 97/3, 95/5, 93/7 และ 90/10 wt/wt สำหรับสูตรพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA แทนด้วย HE0, HE1, HE3, HE5, HE7 และ HE10 และสำหรับสูตรพอลิเมอร์ผสม LDPE/EVA แทนด้วย LE0, LE1, LE3, LE5, LE7 และ LE10 ดังตารางที่ 2.2 พบว่าการเพิ่มปริมาณ EVA ส่งผลให้ค่า ESCR เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจาก EVA มีความยืดหยุ่นสูง สามารถป้องกันการเกิดรอยแตกและการขยายของรอยแตกได้

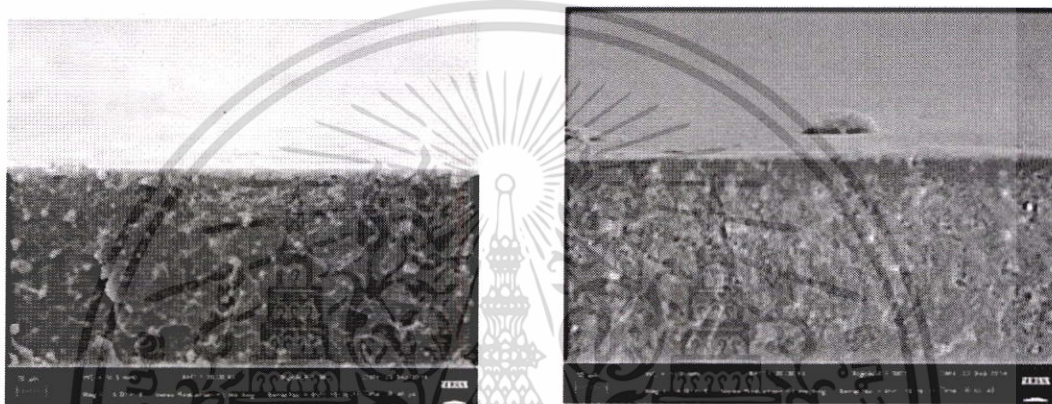
ตารางที่ 2.2 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมโดยรายงานเป็นเวลาที่มีตัวอย่าง 50% เกิดรอยแตกเกิดขึ้น [34]

Sample	ESCR (h)	Sample	ESCR (h)
HE0	3	LE0	5
HE1	4	LE1	20
HE3	6	LE3	>1000
HE5	8	LE5	>1000
HE7	10	LE7	>1000
HE10	12	LE10	>1000

นอกจากนี้จากการใช้ EVA เป็นสารช่วยผสมเพื่อศึกษาการกระจายตัวของ Zeolite A ในฟิล์ม LDPE [13] ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงการกระจายตัวของ Zeolite A พบว่าในฟิล์ม LDPE/Zeolite A มีการกระจายตัว (Distribution) ของ Zeolite A ดี แต่ Zeolite A มีการแตกตัว (Dispersion) ทั้งอนุภาคเดี่ยวและเป็นกลุ่มก้อน (Aggregate) แต่เมื่อมีการเติม EVA ในฟิล์ม LDPE/Zeolite A พบว่า Zeolite A มีการแตกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอนุภาคเดี่ยวได้ดีกว่า เนื่องจาก EVA ประกอบไปด้วยส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว จึงช่วยให้ Zeolite A สามารถกระจายตัวและแตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยวได้ดีขึ้น และเมื่อทำการศึกษาการกระจายตัวของ EVA ดังรูปที่ 2.9 โดยการสกัด EVA ออกจากฟิล์ม LDPE ด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งหลังจากสกัด EVA ออก จะพบช่องว่างซึ่งแสดงถึงตำแหน่งที่เคยมี EVA ปรากฏอยู่ โดย EVA มีกระจายตัวได้ดี เนื่องจาก EVA มีทั้งส่วนที่มีขั้วและส่วนที่ไม่มีขั้ว โดยส่วนที่ไม่มีขั้วช่วยให้ EVA กระจายตัวได้ดีใน LDPE และส่วนที่มีขั้วจะช่วยให้ Zeolite A อยู่ในวัฏภาคกระจาย สังเกตได้จากฟิล์มหลังการสกัด EVA พบว่าภายในช่องว่างบางช่องยังคงมีอนุภาคของ Zeolite A หลงเหลืออยู่ เป็นการยืนยันได้ว่า Zeolite A ชอบอยู่ในวัฏภาคที่มีขั้วของ EVA มากกว่าวัฏภาคที่ไม่มีขั้วของ LDPE



(a) ฟิล์มที่ไม่ได้เติม EVA

(b) ฟิล์มที่เติม EVA

รูปที่ 2.8 พื้นผิวภาคตัดขวางของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Zeolite A [13]



รูปที่ 2.9 พื้นผิวที่แตกหักของฟิล์มพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม Zeolite A หลังการสกัด EVA ออก [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากงานวิจัยที่ผ่านมา [3] ได้ศึกษากระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดที่สภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในการขึ้นรูปขวดผลิตภัณฑ์ และผลของ CaCO_3 ที่มีต่อความสามารถในการขึ้นรูป พบว่าเวลาการหล่อเย็น (Cooling time) ลดลงเมื่อผสม CaCO_3 ลงใน HDPE เนื่องจาก CaCO_3 มีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) สูงกว่าของ HDPE จึงมีการส่งผ่านความร้อนออกมาได้มากกว่า ทำให้รอบการผลิตลดลง การเพิ่มรอบการหมุนของสกรูทำให้อัตราการไหลเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์ตัวอย่างมีพฤติกรรมแบบ Pseudoplastic และการเพิ่มรอบการหมุนของสกรูเป็นการเพิ่มอัตราความเครียดเฉือน ทำให้พอลิเมอร์ตัวอย่างมีความหนืดลดลง ความสามารถในการไหลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในเครื่องเป่าขึ้นรูปอยู่ในช่วง $154\text{-}205\text{ s}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบการใช้รอบการหมุนของสกรูแล้วอยู่ในช่วง 20-28 รอบ/นาที ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เกิดความแปรปรวนและเสียรูปทรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt fracture) ค่าความหนืดเฉือนมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น เนื่องจากสายโซ่ HDPE เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงและเคลื่อนที่ แต่อนุภาคของ CaCO_3 ซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยากจึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ HDPE ในบริเวณที่เกิดการสัมผัสกันระหว่างสายโซ่ HDPE กับอนุภาคของ CaCO_3 เมื่อใช้ CaCO_3 ที่ปรับปรุงผิวด้วยกรดสเตียริกหรือใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ความหนืดของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตรที่ไม่ได้ใช้สารทั้งสองชนิด เมื่อผสม CaCO_3 ลงใน HDPE และเพิ่มปริมาณมากขึ้นค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากมีค่าลดลง เมื่อมีการปรับปรุงผิวด้วยกรดสเตียริก ทำให้ค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ไม่มีผลต่อค่าสมบัติดังกล่าว ค่ามอดูลัสและค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นและค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักมีค่าลดลง และเมื่อใช้ CaCO_3 ที่ปรับปรุงผิวด้วยกรดสเตียริกหรือใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสม ค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของขวดพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตรที่มีการผสม CaCO_3 มีค่ามากกว่าขวด HDPE เนื่องจากการผสม CaCO_3 ทำให้สารละลาย Nonylphenol polyethylene glycol ether ที่ใช้ในการทดสอบแทรกตัวไปตามรอยต่อระหว่างวัฏภาคของ HDPE กับ CaCO_3 ใช้เวลาเคลื่อนที่เข้าสัมผัสกับ HDPE นานขึ้น ส่วนการใช้ CaCO_3 ที่ปรับปรุงผิวด้วยกรดสเตียริกให้ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น แต่มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA

จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการเติม CaCO_3 ในปริมาณที่เหมาะสมลงในพอลิเมอร์สามารถเพิ่มความแข็งแรง และสามารถต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมได้ นอกจากนี้การใช้ CaCO_3 ที่มีขนาดอนุภาคเล็กยังช่วยเพิ่มพื้นผิวสัมผัสกับพอลิเมอร์มากขึ้นทำให้สมบัติเชิงกลดีขึ้น การใช้สารปรับปรุงพื้นผิวสามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวทำให้สมบัติรับแรงกระแทกเพิ่มขึ้น ส่วนการผสม EVA ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูง มีความนิ่มเพิ่มความเข้ากันได้ให้กับพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วและสารตัวเติมที่มีขั้วให้ดีขึ้น และยังสามารถทำให้สารตัวเติมกระจายตัวและแตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ ได้ ทำให้สามารถเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทกได้ นอกจากนี้การใช้ EVA ยังสามารถช่วยปรับปรุงสมบัติ ESCR ของวัสดุ ในงานวิจัยนี้จึงเตรียมพอลิเมอร์ผสม HDPE/ CaCO_3 ที่มีการใช้ EVA เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของ HDPE กับ CaCO_3 การใช้กรดสเตียริกเป็น

สารช่วยกระจายตัวเพื่อสามารถเพิ่มความต้านทานทนแรงกระแทกได้ และทำการศึกษาสมบัติการไหล สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และสมบัติ ESCR ของวัสดุ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรดสำหรับการเป่าขึ้นรูป (H6430BM) จาก SCG Performance Chemicals Co., Ltd
2. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เกรด Omyacarb 2 และเกรด Omyacarb 2T จาก Surintomya chemicals (Thailand) Co., Ltd
3. เอทิลีนไวนิลอะซิเตดโคพอลิเมอร์ (EVA) เกรด UL00728CC จาก Exxon Mobile Chemical Company, Inc.
4. ไซลีน (Xylene) เกรดการค้า จาก Lab Systems Co., Ltd.
5. ไนโตรเจนเหลว (Liquid N_2) Linde (Thailand) Public Co., Ltd.
6. สารละลายไนลฟีนิล พอลิเอทิลีน ไกลคอล อีเทอร์ (Nonylphenol polyethylene glycol ether) เกรด Tergitol[®] NP-9 จาก Sigma-Aldrich (Thailand) Co., Ltd.

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของ HDPE H6430BM

สมบัติ	ค่าที่ได้	หน่วย	วิธีการทดสอบ
ดรรชนีการไหล	0.4	g/10min	ASTM D 1238
ความหนาแน่น	0.966	g/cm^3	ASTM D 1505
จุดหลอมเหลว	132	$^{\circ}\text{C}$	ASTM D 2117
จุดอ่อนตัว	128	$^{\circ}\text{C}$	ASTM D 1525
จุดเปราะ	<-60	$^{\circ}\text{C}$	ASTM D 746
ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก	300	kg/cm^2	ASTM D 638
ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด	370	kg/cm^2	ASTM D 638
การดึงยืด ณ จุดขาด	1200	%	ASTM D 638
มอดุลัสโค้งงอ	15000	kg/cm^2	ASTM D 790
ความต้านทานแรงกระแทก	25	kg.cm/cm	ASTM D 256

หมายเหตุ : ข้อมูลของบริษัทผู้ผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของ CaCO₃

สมบัติ	Omyacarb 2	Omyacarb 2T	หน่วย
ขนาดอนุภาค	2.67	2.74	μm
ความหนาแน่น	2.7	2.7	g/cm ³

หมายเหตุ : ข้อมูลของบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 สมบัติบางประการของ EVA UL00728CC

สมบัติ	ค่าที่ได้	หน่วย
ไวนิลอะซิเตต (VA)	27.5	wt%
ดรรชนีการไหล (190°C/2.16 kg)	7	g/10min
ความหนาแน่น	0.951	g/cm ³
การดึงยืด ณ จุดขาด	100	%

หมายเหตุ : ข้อมูลของบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer): Chareon Tut Co., Ltd. รุ่น MX500-D75L90
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder): Bosco Engineering Co., Ltd. รุ่น 5HP
3. เครื่องเป่าขึ้นรูปพลาสติกชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding machine): SMC Co., Ltd. รุ่น 200T (Screw: length = 22D, Diameter = 30 mm)
4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine): Cometech Testing Mechines Co., Ltd. รุ่น QC-536M1
5. เครื่องวัดความแข็งกด (Hardness tester): Italia Co., Ltd. รุ่น DTSFDDR
6. เครื่องทดสอบดัชนีการไหล (Melt flow Indexer): Micro Precision Calibration Inc. รุ่น CEAST 6841
7. เครื่องดีพีเพอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC): PERKIN-ELMER Inc. รุ่น DSC 7 Differential scanning calorimeter
8. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลซิส (Thermogravimetric analyzer, TGA): NETZSCH Co., Ltd. รุ่น TG 209 F3
9. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM): JEOL Co., Ltd. รุ่น JSM-5410LV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer, FTIR): Thermo Fisher Scientific Inc. รุ่น NICOLET 6700
11. เครื่องบีบลม: Hitachi Co., Ltd. รุ่น BEBICON 400
12. อ่างอัลตราโซนิก: Densplyneytech Co., Ltd รุ่น 136H
13. คีม
14. ตู้อบลมร้อน (Universal oven): Memmert (Germany) Co., Ltd. รุ่น ML204
15. เครื่องชั่งละเอียด: Sartorius (Thailand) Co., Ltd. รุ่น AX224
16. เวอร์เนียร์
17. กระบอกใส่ไนโตรเจนเหลว
18. ตู้อุดควัน
19. เดซิเคเตอร์
20. บริษัทเครื่องแก้ว

3.3 การเตรียมพอลิเมอร์ผสม

3.3.1 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยการผสมแบบ One-step mixing

ในงานวิจัยนี้ทำการเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยการผสมแบบ One-step mixing เพื่อทำการศึกษาผลของลำดับการผสม โดยทำการผสม HDPE, EVA และ CaCO_3 ทั้งเกรดที่ไม่มีการเคลือบและเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก โดยเลือกใช้อัตราส่วนของ HDPE/EVA เป็น 90/10 ในการผสมแต่ละครั้งใช้ปริมาณผสมรวม 300 g เขย่าเพื่อให้เข้ากัน จากนั้นนำมาผสมในเครื่องผสมระบบปิด ทำการผสมพร้อมกันเป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 190°C ความเร็วในการผสมที่ 100 รอบต่อนาที จากนั้นนำไปบดเพื่อเตรียมสำหรับการขึ้นรูปขวดพลาสติกบรรจุภัณฑ์ด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดต่อไป

3.3.2 การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยการผสมแบบ Two-step mixing

การเตรียมพอลิเมอร์ผสมด้วยการผสมแบบ Two-step mixing ทำได้โดยการเตรียม Masterbatch ระหว่าง EVA กับ CaCO_3 ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณ 300 g ต่อการผสม เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วในการผสมที่ 100 รอบต่อนาที แล้วจึงนำมาบดก่อนผสมกับ HDPE ในอัตราส่วนดังตารางที่ 3.5 ต่ออีก 10 นาที ที่อุณหภูมิ 190°C ความเร็วในการผสมที่ 100 รอบต่อนาที จากนั้นนำไปบดอีกครั้งเพื่อเตรียมสำหรับการขึ้นรูปขวดพลาสติกบรรจุภัณฑ์ด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 สูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการศึกษาผลของลำดับการผสม

สูตร	ปริมาณองค์ประกอบของ พอลิเมอร์ผสม (g)				วิธีการผสม	
	HDPE	EVA	CaCO ₃		One-step mixing	Two-step mixing
			uncoated	coated		
H90E10C2301	63	7	30	-	√	
H90E10C2302	63	7	30	-		√
H90E10CT2301	63	7	-	30	√	
H90E10CT2302	63	7	-	30		√

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบพอลิเมอร์ผสมสูตรที่เตรียม (% โดยน้ำหนัก)

ลำดับ	สูตร	ปริมาณสาร (g)		ปริมาณ CaCO ₃ (g)
		HDPE	EVA	
1	HDPE	100	-	-
2	H80E20	80	20	-
3	H100E0C230	70	-	30
4	H95E5C230	66.5	3.5	30
5	H90E10C230	63	7	30
6	H85E15C230	59.5	10.5	30
7	H80E20C230	56	14	30
8	H90E10C240	54	6	40

3.4 การเตรียมขวดตัวอย่าง

นำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่บดมาเป่าขึ้นรูปขวดด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด โดยใช้อุณหภูมิจากบาร์เรลถึงหัวดายเป็น 170 180 และ 190°C ตามลำดับ ความเร็วสกรูที่ใช้ 24 รอบต่อนาที

3.5 การทดสอบพอลิเมอร์ผสมสูตร

3.5.1 การทดสอบบรรชนีการไหลของพอลิเมอร์ผสมสูตร

ศึกษาพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์ผสมสูตรด้วยเครื่องทดสอบบรรชนีการไหลที่อุณหภูมิ 190°C โดยใช้น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม และหาน้ำหนักที่ไหลได้ในหน่วย g/10 min ตามมาตรฐาน ASTM D 1238 [35]

3.5.2 ศึกษาการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมสูตร

ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Die swell) โดยการตัดพอลิเมอร์ผสมสูตร ที่ไหลออกมาจากหัวตาย (Extrudate) ของเครื่องทดสอบบรรชนีการไหลที่อุณหภูมิ 190°C น้ำหนักกด 2.16 กิโลกรัม เช่นเดียวกับในหัวข้อ 3.5.1 ควบคุมตัวอย่างให้มีความยาว 2 cm วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์ผสมสูตร เพื่อนำไปคำนวณหาค่าการบวมตัวของพอลิเมอร์

$$\text{Swell ratio} = D_{\text{ex}}/D_d$$

เมื่อ D_{ex} คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของ Extrudate

D_d คือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตาย

3.6 การตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชันของกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน CaCO_3

นำ CaCO_3 เกรดที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกมาทำการตรวจสอบหาหมู่ฟังก์ชัน โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (FTIR) แบบ DRIFTS-FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400 cm^{-1} ถึง 4000 cm^{-1}

3.7 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์

3.7.1 การวิเคราะห์ความหนาแน่นของตัวอย่าง

หาความหนาแน่นของตัวอย่างตามมาตรฐาน ASTM D792 (Method A) [36] ด้วยการใช้เครื่องชั่งที่มีความละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง) ประกอบเข้ากับ Density kit ความหนาแน่นของตัวอย่างถูกกำหนดจากของเหลวที่ทราบความหนาแน่น (ρ_0) โดยในการทดลองใช้น้ำกลั่นและทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 22.4°C ($\rho_0 = 0.9977 \text{ g/cm}^3$ ที่ 22.4°C) ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้ [37]

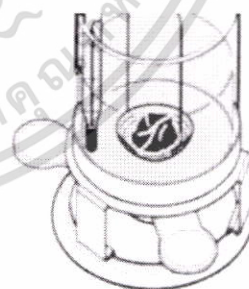
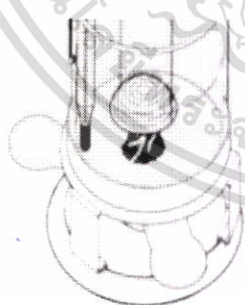
1. เตรียมชิ้นงานตัวอย่างในแต่ละสูตรขนาด $5 \times 5 \text{ mm}^2$
2. จัดเตรียมอุปกรณ์ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หยด Surfactant Pervitro 75% ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารทำให้เปียก (Wetting agent) ประมาณ 3 หยด Surfactant ไปลดแรงตึงผิวของน้ำกลั่น เพื่อทำให้น้ำกลั่นแพร่ไปบนชิ้นงานตัวอย่างได้ดีขึ้น
4. รอจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำกลั่นคงที่ก่อนทำการทดสอบ
5. ชั่งชิ้นงานตัวอย่างในอากาศโดยวางชิ้นงานบน Pan ดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 (b) กดบันทึกน้ำหนักที่ชั่งได้
6. การชั่งชิ้นงานตัวอย่างในน้ำกลั่น
 - กรณีที่ชิ้นงานที่นำมาทำการทดสอบมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบคว่ำ ดังรูปที่ 3.1 (c) จากนั้นใส่ชิ้นงานลงไปใต้น้ำกลั่นโดยค่อย ๆ ใช้แท่งแก้วคนต้นชิ้นงานให้อยู่ใต้ Basket ก่อนทำการกดบันทึกน้ำหนัก
 - กรณีที่ชิ้นงานที่นำมาทำการทดสอบมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำกลั่น ให้จัดวาง Basket แบบหงาย ดังรูปที่ 3.1 (d) จากนั้นใส่ชิ้นงานลงไปบน Basket ก่อนทำการกดบันทึกน้ำหนัก
7. หลังจากวัดน้ำหนักของชิ้นงานในตัวอย่างที่เป็นอากาศและในตัวอย่างที่เป็นน้ำกลั่นแล้ว กดปุ่มคำนวณ เครื่อง Density kit จะแสดงค่าความหนาแน่นของชิ้นงาน

(a) ลักษณะการจัดวางเครื่องมือ

(b) การชั่งชิ้นงานในตัวอย่างอากาศ

(c) ลักษณะการจัดวาง Basket สำหรับ การชั่งชิ้นงานที่มี p น้อยกว่าน้ำกลั่น(c) ลักษณะการจัดวาง Basket สำหรับ การชั่งชิ้นงานที่มี p มากกว่าน้ำกลั่น

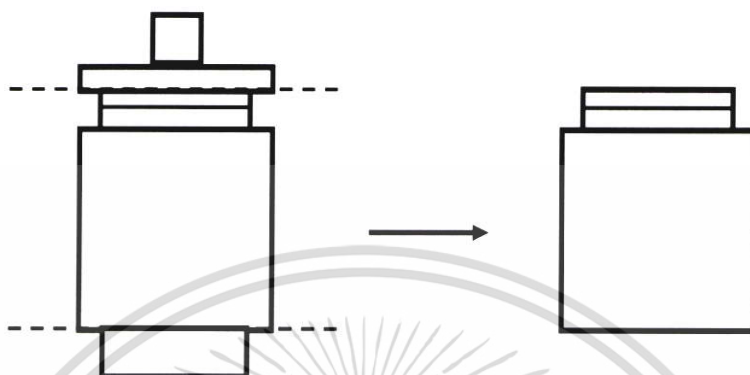
รูปที่ 3.1 การจัดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดสอบเพื่อหาความหนาแน่น [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

ก. น้ำหนักต่อขวด

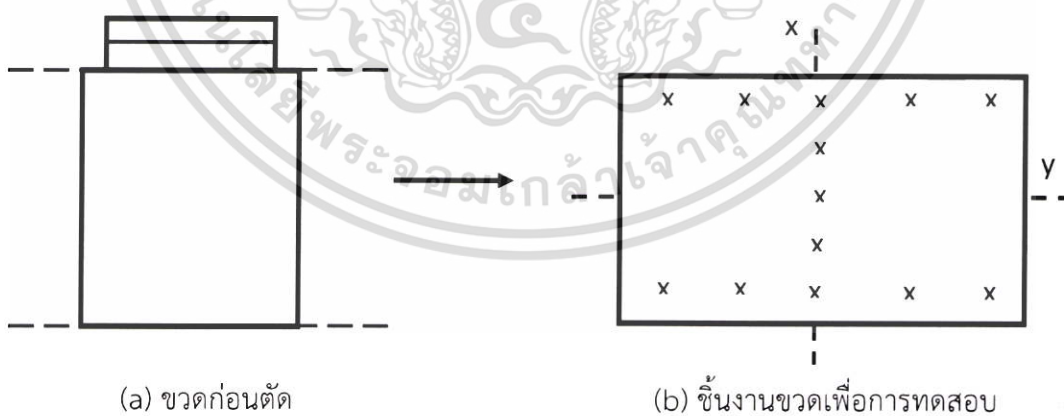
นำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูปมาตัดพลาสติกส่วนเกินบริเวณปากขวดและก้นขวดออกดังรูปที่ 3.2 จากนั้นนำขวดมาชั่งน้ำหนักสุทธละ 10 ขวด เพื่อหาน้ำหนักขวดเฉลี่ย



รูปที่ 3.2 ลักษณะผลิตภัณฑ์ก่อนและหลังการตัดส่วนเกินบริเวณปากขวดและก้นขวด

ข. ความหนาของขวดและสัมประสิทธิ์ความผันแปร

นำขวดที่ได้มาตัดด้านบนและล่างของขวด และตัดที่รอยประกบขวดจะได้ตัวอย่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า นำมาวัดความหนาโดยรอบขวดตามแนวเส้นรอบวงบริเวณปากขวด ก้นขวดและตามแนวตั้งบริเวณละ 5 จุดในระยะเท่า ๆ กันจำนวน 10 ขวดด้วยเวอร์เนียร์ เพื่อหาความหนาเฉลี่ยดังรูปที่ 3.3



(a) ขวดก่อนตัด

(b) ชิ้นงานขวดเพื่อการทดสอบ

รูปที่ 3.3 ลักษณะชิ้นงานสำหรับวัดความหนาเมื่อ x เป็นการวัดในแนวเส้นรอบวง และ y เป็นการวัดในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ก. การทดสอบพลังงานกระแทกแบบหึ่งน้ำหนัก

นำขวดที่ได้จำนวน 20 ขวดบรรจุน้ำให้เต็มขวดพร้อมปิดขวด มาชั่งน้ำหนัก หาน้ำหนักหนักเฉลี่ย จากนั้นปล่อยขวดให้ตกสู่พื้นในแนวตั้งที่ระดับความสูงต่าง ๆ แล้ว บันทึกจำนวนขวดที่แตกและไม่แตกในแต่ละระดับความสูง นำค่าที่ได้ไปคำนวณพลังงานกระแทกของขวดแบบหึ่งน้ำหนัก ตามมาตรฐาน ASTM D 2463 [38]

Drop weight impact energy = Mean failure height x Mean failure weight x g

เมื่อ Mean failure height คือ ความสูงเฉลี่ย
Mean failure weight คือ น้ำหนักขวดเฉลี่ย (บรรจุน้ำเต็มขวดและปิดฝาขวด)
g คือ ความเร่งโน้มถ่วง (9.8 m/s^2)

โดย ความสูงเฉลี่ย (Mean failure height) สามารถคำนวณได้จาก

$$h = h_0 + d [(A/N) - 1/2]$$

เมื่อ h คือ ความสูงเฉลี่ย
d คือ ระยะห่างของระดับความสูง
N คือ จำนวนชิ้นงานขวดทั้งหมดที่แตก
 h_0 คือ ความสูงต่ำสุดที่ชิ้นงานขวดเกิดการแตก
A คือ $(i_0 \times n_0) + (i_1 \times n_1) + (i_2 \times n_2) + \dots + (i_k \times n_k)$
โดย i คือ ลำดับความสูงเริ่มต้นที่ชิ้นงานขวดเกิดการแตกถึงลำดับความสูงที่ k
n คือ จำนวนชิ้นงานขวดที่แตกในแต่ละระดับความสูง

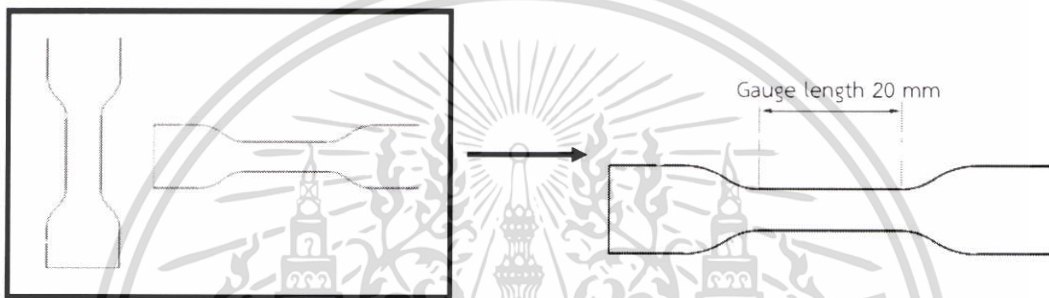
ข. การทดสอบสมบัติความแข็งแรง

นำชิ้นงานดังรูปที่ 3.3 (b) มาซ้อนกันให้มีความหนาประมาณ 6 mm จากนั้นนำมาทดสอบด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแรงแบบ Dead load ชนิด Shore D ที่อุณหภูมิห้องจำนวน 10 จุดตามมาตรฐาน ASTM D 2240 [39] เพื่อหาค่าความแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

นำชิ้นงานดังรูปที่ 3.3 (b) มาตัดเป็นรูปดัมเบลล์ทั้งในแนวเส้นรอบวงบริเวณกลางขวด และแนวตั้งดังรูปที่ 3.4 แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่ความเร็วในการดึง 50 mm/min ระยะการวัดชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 20 mm ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D 638 [40] เพื่อหาค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) ค่าความแข็งแรงดึง ณ ขาด (Tensile strength at break) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่ามอดุลัส (Young's Modulus) โดยคำนวณจากค่าความชันเริ่มต้น (ที่ 1% และ 2% การดึงยืด)



รูปที่ 3.4 การตัดชิ้นงานรูปดัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

3.7.4 การศึกษาสัณฐานวิทยา

ก. การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3

นำชิ้นงานดังรูปที่ 3.2 (b) มาตัดให้มีขนาด $1 \times 3 \text{ cm}^2$ นำมาแช่ในไนโตรเจนเหลว ประมาณ 10 นาที แล้วหักชิ้นงานทันทีในขณะที่แช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว นำชิ้นงานมาเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำมาวิเคราะห์พื้นที่ตัดขวางด้วย SEM ที่กำลังขนาด 1000 และ 3500 เท่า

ข. การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ EVA

นำชิ้นงานดังรูปที่ 3.2 (b) มาตัดให้มีขนาด $1 \times 3 \text{ cm}^2$ นำมาแช่ในไนโตรเจนเหลว ประมาณ 10 นาที แล้วหักชิ้นงานทันทีในขณะที่แช่อยู่ในไนโตรเจนเหลว แล้วนำชิ้นงานที่หักไปแช่ในตัวทำละลายไซลีนที่บรรจุในหลอดทดลอง 15 ml ปิดหลอดทดลองด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ นำไปวางในอ่างอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นนำชิ้นงานที่ถูกสกัดไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง นำชิ้นงานมาเคลือบด้วยทองคำ แล้วนำมาวิเคราะห์ภาคตัดขวางด้วย SEM ที่กำลังขยาย 1000 และ 3500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.5 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ในสารตัวอย่าง

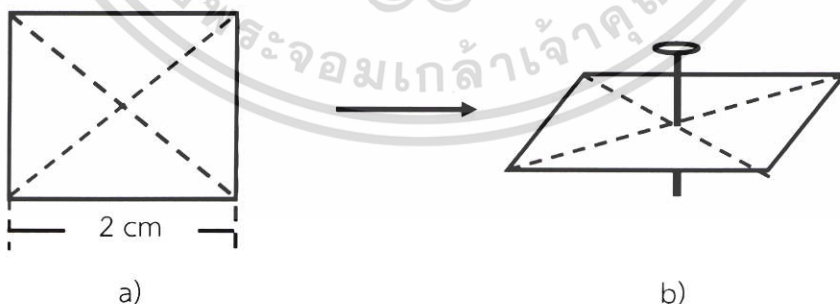
ตัดชิ้นงานจากขวดนำไปหาปริมาณ CaCO_3 โดยใช้เครื่อง TGA โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุด 500°C ภายใต้บรรยากาศ Air zero นำข้อมูลที่ได้จากกราฟมาหาปริมาณ CaCO_3 ที่แน่นอนตามมาตรฐาน ASTM D 1131 [41]

3.7.6 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ตัดชิ้นงานจากขวดมาตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น 40°C ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิสูงสุด 200°C และทำให้เย็นโดยลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา $10^\circ\text{C}/\text{min}$ จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น นำข้อมูลที่ได้จากกราฟมาหาค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของผลึก (T_m) อุณหภูมิของการเกิดผลึก (T_c) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Crystallinity) ของ HDPE ตามมาตรฐาน ASTM 794 [42]

3.7.7 การทดสอบสมบัติความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

นำชิ้นงานดังรูปที่ 3.3 (b) จำนวน 10 ชิ้นมาตัดให้มีพื้นที่ขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ และกรีดชิ้นงานให้เป็นรอยบากในแนวทแยงมุม จากนั้นเจาะและยึดชิ้นงานด้วยตะปูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 mm ดังรูปที่ 3.5 แซ่ชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมได้ในบีกเกอร์ที่มีสารละลายโนนิลฟีนอล พอลิเอทิลีน โกลคอล อีเทอร์ (Nonylphenol polyethylene glycol ether) บรรจุอยู่ ปิดบีกเกอร์ด้วยอลูมิเนียมฟอยล์ จากนั้นนำบีกเกอร์ไปให้ความร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 50°C สังเกตการเปลี่ยนแปลงของชิ้นงานตัวอย่างและจดบันทึกเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลง เพื่อนำไปหาค่าความต้านแรงเค้นต่อสภาพแวดล้อมตามมาตรฐาน ASTM D 1693 [43]



รูปที่ 3.5 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบความต้านแรงเค้นต่อสภาพแวดล้อม โดย a) ชิ้นงานขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ที่มีรอยบาก และ b) ชิ้นงานที่ยึดด้วยตะปูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.60 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

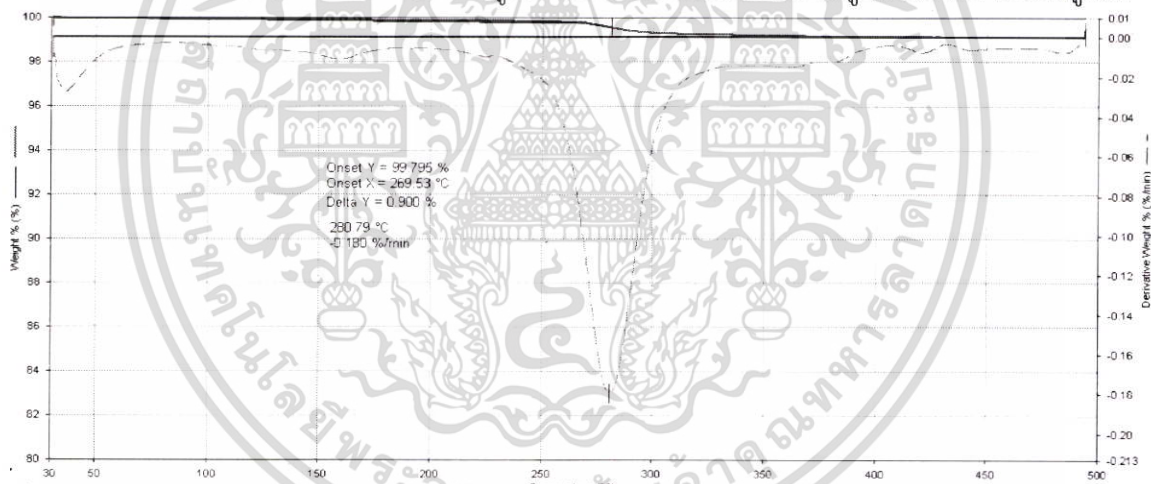
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทกและความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของขวดพลาสติกบรรจุภัณฑ์จากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นสารตัวเติม โดยทำการศึกษาผลของลำดับการผสมที่มีการใช้ CaCO_3 ชนิดเคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก และใช้เอทิลีนไวนิลอะซิเตตโคพอลิเมอร์ (EVA) เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของ HDPE และ CaCO_3 ศึกษาผลของอัตราส่วน HDPE/EVA ที่มีการผสม CaCO_3 ในปริมาณที่เท่า ๆ กัน และศึกษาผลของปริมาณการใช้ CaCO_3

4.1 การวิเคราะห์สารตัวเติม

4.1.1 ผลการตรวจสอบปริมาณกรดสเตียริกบนผิว CaCO_3

ผลจากการตรวจสอบหาปริมาณกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บนผิวของ CaCO_3 โดยการหา % Weight loss ด้วยเครื่อง TGA จากพบการทดลองพบว่าปริมาณกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บน CaCO_3 มีค่าประมาณ 0.9% โดยน้ำหนัก ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้มาจากบริษัทผู้ผลิต

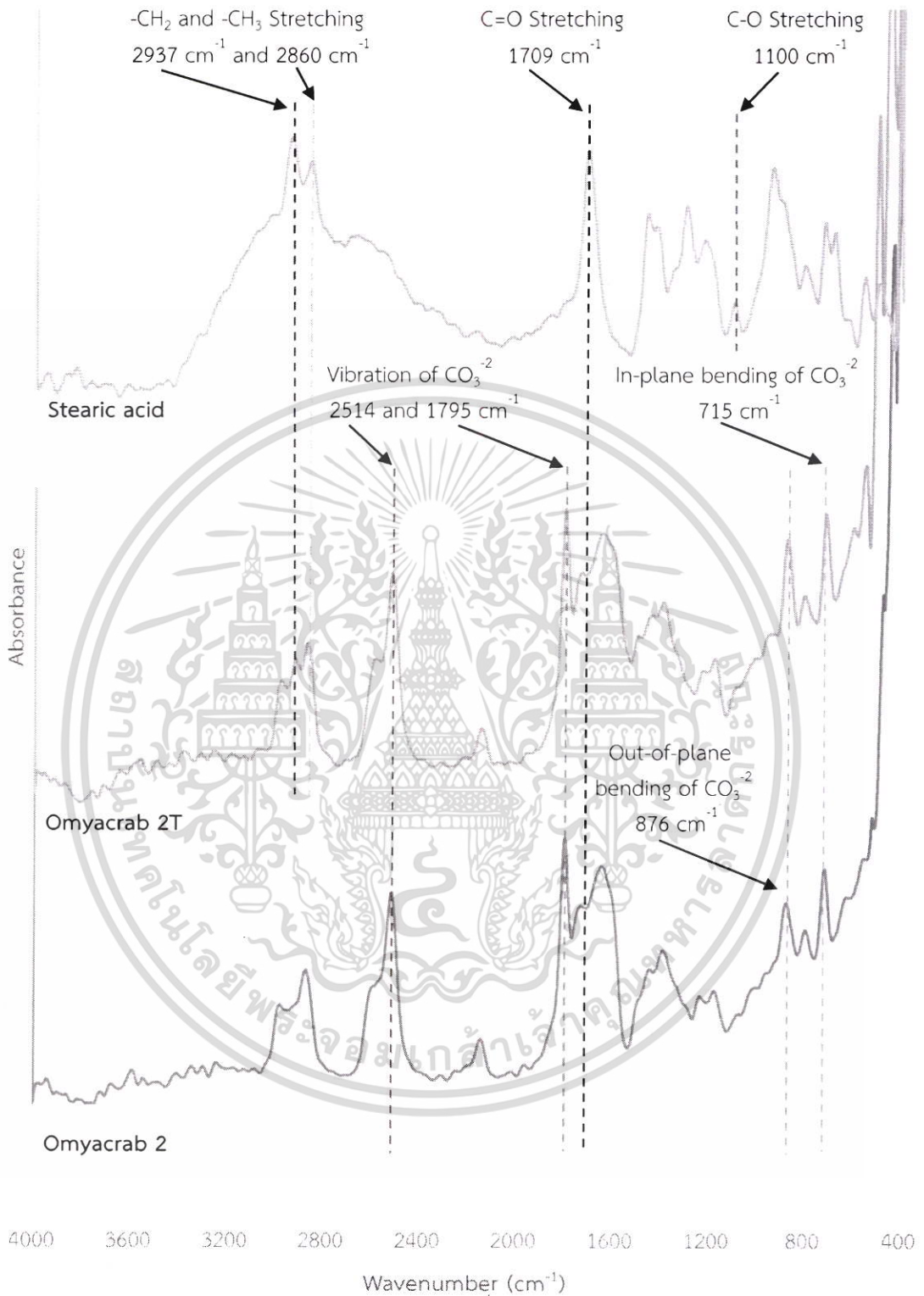


รูปที่ 4.1 ผลจากการตรวจปริมาณกรดสเตียริกที่เคลือบอยู่บนผิวของ CaCO_3

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ CaCO_3 ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก

จากรูปที่ 4.2 แสดง FTIR สเปกตรัมของกรดสเตียริก ของ CaCO_3 ที่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (Omyacarb 2T) และของ CaCO_3 ที่ไม่มีการเคลือบผิว (Omyacarb 2) จากรูปพบพิคการสั่นที่เป็นเอกลักษณ์ของกรดสเตียริกคือการสั่นแบบยืดของ C=O ที่ 1709 cm^{-1} , การสั่นแบบยืดของ C-O ที่ 1100 cm^{-1} , การสั่นแบบยืดของ $-\text{CH}_2-$ และ CH_3- ที่ 2937 และ 2860 cm^{-1} ตามลำดับ [41] พิคเอกลักษณ์ของ CaCO_3 ที่ไม่มีการเคลือบผิว (Omyacarb 2) มีพิคการสั่นแบบยืดของ C=O ใน CO_3^{2-} แบบสมมาตรที่ 1795 และ 2514 cm^{-1} นอกจากนี้ยังพบพิคการสั่นที่ 876 และ 715 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิคการสั่นแบบนอกระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 FTIR สเปกตรัมของกรดสเตียริกและ CaCO_3 ด้วยเทคนิค DRIFTS-FTIR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในระนาบของหมู่ฟังก์ชัน C=O ตามลำดับ [42] เมื่อพิจารณาพีคการสั่นของ CaCO_3 ที่มีการเคลือบผิว พบพีคการสั่นของไฮโดรคาร์บอนที่ช่วง 2937 cm^{-1} ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่า CaCO_3 เกรด Omyacarb 2T มีกรดสเตียริกเคลือบอยู่จริง แม้ว่าจะไม่พบพีคการสั่นแบบยืดของ C=O ที่ 1709 cm^{-1} เนื่องจากปริมาณกรดสเตียริกที่ตรวจพบอยู่บนผิว CaCO_3 มีปริมาณเพียง 1.023%

4.2 การศึกษาผลของลำดับการผสม

งานวิจัยนี้ได้ทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด และทำการศึกษาผลของลำดับการผสม HDPE/EVA/ CaCO_3 โดยมีการใช้ CaCO_3 ขนาด 2 ไมครอนทั้งเกรดที่ไม่มีการเคลือบและเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก ซึ่งใช้การผสม 2 วิธีคือ

1. การเตรียม Master batch ของ EVA/ CaCO_3 เป็นเวลา 10 นาที ที่อุณหภูมิ 160°C ความเร็วในการผสม (Rotor speed) ที่ 100 รอบต่อนาที แล้วจึงผสมกับ HDPE ต่ออีก 10 นาที ที่อุณหภูมิ 190°C ความเร็วในการผสมที่ 100 รอบต่อนาที (Two-step mixing)

2. การผสม HDPE/EVA/ CaCO_3 ทั้งหมดพร้อมกันเป็นเวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 190°C ที่ความเร็วในการผสมที่ 100 รอบต่อนาที (One-step mixing)

ก่อนนำมาบดทำการขึ้นรูปขวดพลาสติกบรรจุภัณฑ์ด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีดที่สภาวะเดียวกัน โดยเลือกใช้อัตราส่วนของ HDPE/EVA เป็น 90/10 และแสดงสูตรในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สูตรพอลิเมอร์ผสมที่ใช้วิธีการผสมต่างกัน

สูตร	ปริมาณองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม (g)				วิธีการผสม	
	HDPE	EVA	CaCO_3		One-step mixing	Two-step mixing
			uncoated	coated		
H90E10C2301	63	7	30	-	√	
H90E10C2302	63	7	30	-		√
H90E10CT2301	63	7	-	30	√	
H90E10CT2302	63	7	-	30		√

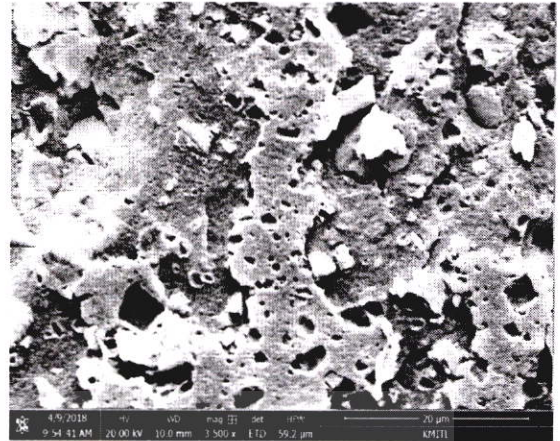
4.2.1 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

จากรูปที่ 4.3 (a), (c), (e) และ (g) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่าง พบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่เตรียมแบบทั้ง One-step mixing และ Two-step mixing มีการกระจายตัว (Distribution) ของ CaCO_3 ดี และอนุภาคส่วนใหญ่ของ CaCO_3 สามารถแตกตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว (Dispersion) ได้ดี นอกจากนี้ยังพบว่า CaCO_3 มีการฝังตัวในพอลิเมอร์ อาจเป็นเพราะเนื่องจาก EVA เป็นวัสดุภาคที่มีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้ว ทำให้เกิดการผสมเข้ากันได้ดีขึ้น ซึ่งมีขั้วสูงสามารถเข้ากันได้ดีกับ CaCO_3 และมีสายโซ่ PE ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่มีขั้วสามารถเข้ากันได้ดีกับ HDPE

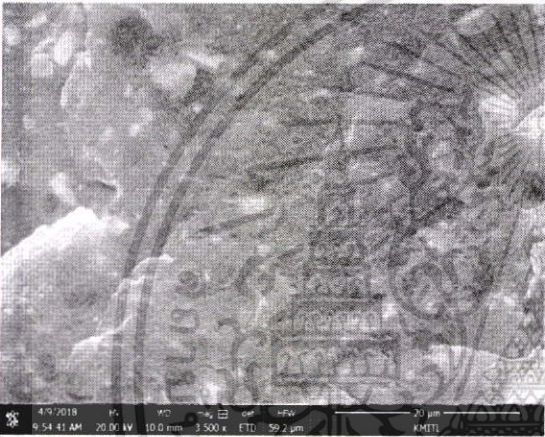
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a) H90E10C2301 ก่อนสกัด



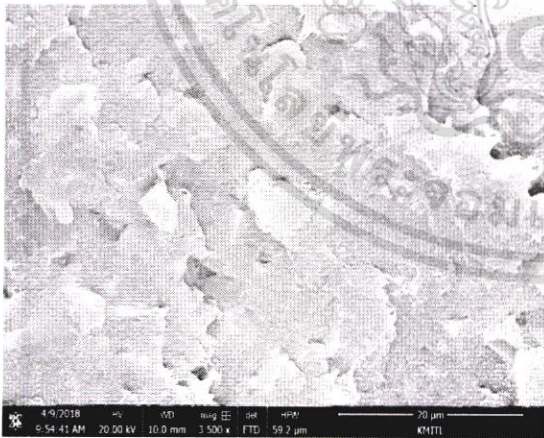
(b) H90E10C2301 หลังสกัด



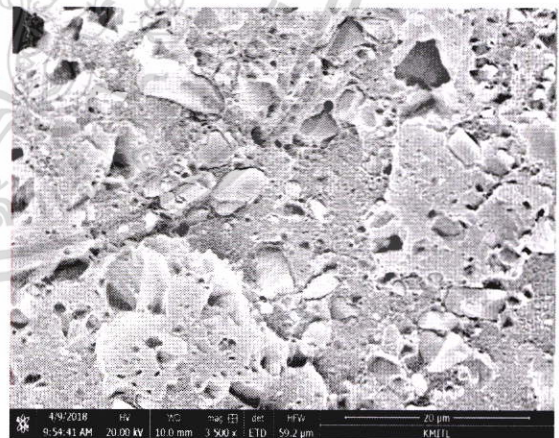
(c) H90E10C2302 ก่อนสกัด



(d) H90E10C2302 หลังสกัด



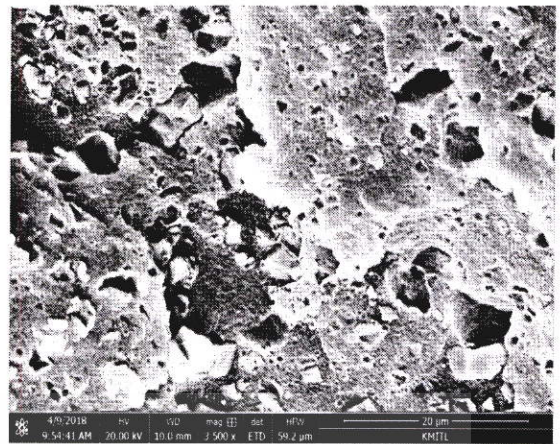
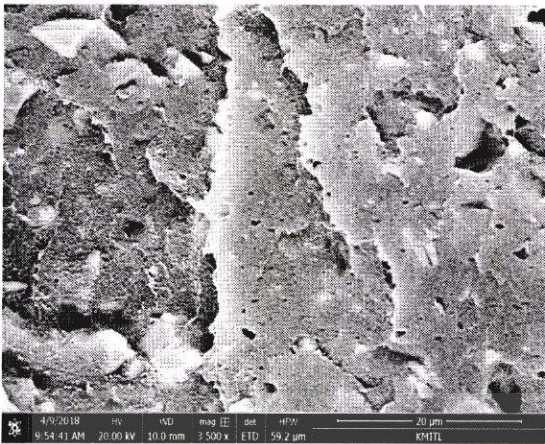
(e) H90E10CT2301 ก่อนสกัด



(f) H90E10CT2301 หลังสกัด

รูปที่ 4.3 SEM micrographs ภาคตัดขวางของชิ้นงาน HDPE/EVA/CaCO₃ (กำลังขยาย 3500 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(g) H90E10CT2302 ก่อนสกัด

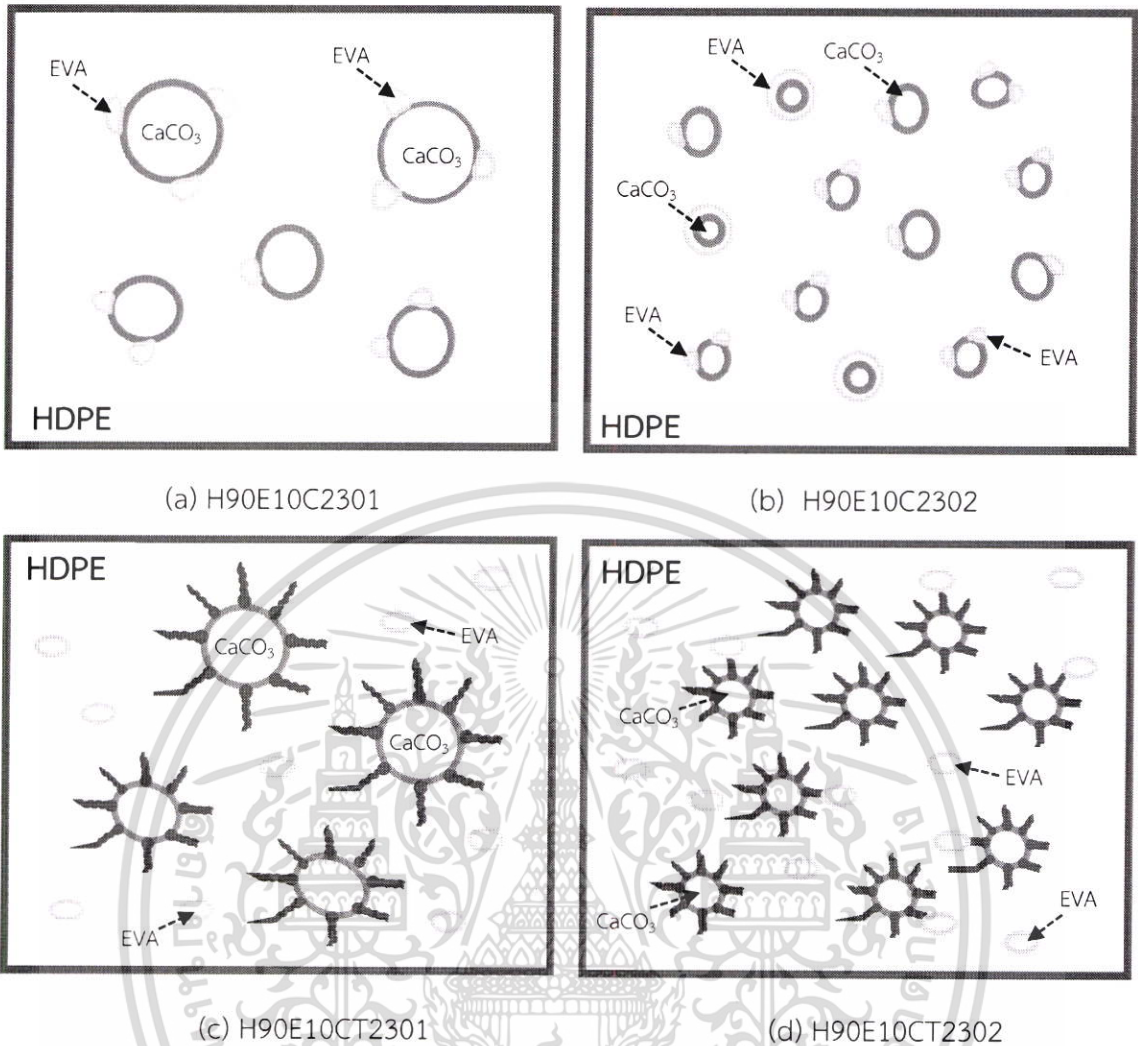
(h) H90E10CT2302 หลังสกัด

รูปที่ 4.3 (ต่อ) SEM micrographs ภาคตัดขวางของชิ้นงาน HDPE/EVA/CaCO₃ (กำลังขยาย 3500 เท่า)

จากรูปที่ 4.3 (b), (d), (f) และ (h) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาภาคตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่างหลังสกัด EVA พบว่าชิ้นงานตัวอย่างทุกสูตร มีการกระจายตัวของ EVA ที่ดี สามารถสังเกตได้จากช่องว่างรูปร่างทรงกลมและวงรี แสดงถึงตำแหน่งที่เคยมี EVA อยู่ ซึ่งทำหน้าที่เป็นวัฏภาคกระจาย (Dispersed phase) อยู่ใน HDPE ที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง (Continuous phase) การกระจายตัวของ EVA มีความสม่ำเสมอทั่วชิ้นงานตัวอย่าง นอกจากนี้ยังสังเกตพบช่องว่างที่มีลักษณะเป็นมุมเหลี่ยมปรากฏขึ้น แสดงถึงตำแหน่งที่เคยมี CaCO₃ อยู่ แสดงให้เห็นว่า CaCO₃ เกิดการหลุดออกขณะที่ทำการสกัด EVA ออกโดยการสั่นของอ่างอัลตราโซนิค

จากรูปที่ 4.4 แสดงลักษณะการกระจายตัวของ CaCO₃ ใน HDPE ที่มีวิธีการผสมต่างกัน เมื่อมีการใช้ EVA ซึ่งจากการศึกษาสัณฐานวิทยาพบว่าการใช้ CaCO₃ เกรดที่ไม่มีการเคลือบด้วยกรดสเตียริก พื้นผิวของ CaCO₃ จะมีขี้ขูดสูง ทำให้สามารถเข้ากันได้ดีกับหมู่ไวนิลอะซิเตตที่มีขี้ขูดของ EVA ซึ่งผลให้ CaCO₃ กระจายตัวได้ดีและเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ ในขณะที่การใช้ CaCO₃ เกรดที่มีการเคลือบด้วยกรดสเตียริก กรดสเตียริกทำให้ความมีขี้ขูดบริเวณพื้นผิวของ CaCO₃ ลดลง จึงทำให้ CaCO₃ แดกกระจายได้ดีแต่ไม่สามารถเข้ากับส่วนที่มีขี้ขูดของ EVA ได้ และการผสมแบบ Two-step ซึ่งเป็นการผสมระหว่าง CaCO₃ และ EVA ก่อน จึงทำให้ CaCO₃ แดกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กและกระจายตัวได้ดีใน EVA เมื่อทำการผสมลงใน HDPE จึงทำให้ CaCO₃ เกิดกระจายตัวได้ดีขึ้น ดังนั้นการผสมแบบ Two-step ที่มีการใช้ CaCO₃ เกรดที่ไม่มีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก จึงทำให้ EVA สามารถทำหน้าที่ในการเกิดการผสมได้ดี เนื่องจาก EVA มีทั้งส่วนที่มีขี้ขูดและไม่มีขี้ขูด ส่วนที่มีขี้ขูดของหมู่ไวนิลอะซิเตตทำให้เข้ากันได้ดีกับ CaCO₃ และส่วนที่ไม่มีขี้ขูดทำให้เข้ากันได้ดีกับ HDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ลักษณะการกระจายตัวของ CaCO_3 เกรดที่ไม่มีการเคลือบและเคลือบด้วยกรดสเตียริก ใน HDPE ที่มีวิธีการผสมต่างกัน เมื่อมีการใช้ EVA

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ CaCO_3 ความหนาแน่น และน้ำหนักของขวด

การวิเคราะห์หาปริมาณที่แน่นอนของ CaCO_3 ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างแต่ละสูตร โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ตัดจากขวดมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA สามารถหาปริมาณ CaCO_3 และความหนาของชิ้นงานจากขวด ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.2

จากตารางที่ 4.2 พบว่าทุกสูตรมีปริมาณของ CaCO_3 ที่พบใกล้เคียงกับ CaCO_3 ที่ต้องการ เนื่องจากทุกสูตรได้มีการผสมผ่านเครื่องผสมระบบปิด การควบคุมปริมาณองค์ประกอบต่าง ๆ ทำได้ค่อนข้างแน่นอน ไม่สูญเสียสารในระหว่างการผสม

เมื่อนำชิ้นงานตัวอย่างแต่ละสูตรมาหาค่าความหนาแน่นด้วยเครื่อง Density kit พบว่าทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากแต่ละองค์ประกอบในแต่ละสูตรมีปริมาณใกล้เคียงกัน และกรดสเตียริกมีความ

หนาแน่น (0.941 g/cm^3) ซึ่งมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับ HDPE และ EVA แต่กรดสเตียริกที่ใช้ในการเคลือบผิว CaCO_3 มีปริมาณเพียงเล็กน้อย (1% ของ CaCO_3) จึงไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อชิ้นงาน ส่งผลให้น้ำหนักขวดมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาจากส่วนเบี่ยงเบนของน้ำหนักขวดที่เกิดขึ้น คาดว่าน่าจะเป็นผลจากความคลาดเคลื่อนจากการตัดส่วนเกินบริเวณปากขวดและกันขวดอาจไม่สม่ำเสมอ

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของ CaCO_3 ความหนาแน่น และน้ำหนักของขวดตัวอย่าง HDPE/EVA/ CaCO_3

สูตร	ปริมาณ CaCO_3 (%wt)		ความหนาแน่น (g/cm^3)		น้ำหนักขวด (g)
	ที่ต้องการ	ที่พบ	ค่าจากการทดลอง	ค่าตามทฤษฎี	
HDPE	-	-	0.959 ± 0.002	0.966	9.25 ± 0.60
HC230	30	29.9	1.193 ± 0.002	1.195	11.53 ± 0.03
H90E10C2301	30	30.1	1.190 ± 0.002	1.195	10.55 ± 0.07
H90E10C2302	30	29.9	1.191 ± 0.002	1.194	12.29 ± 0.31
H90E10CT2301	30	29.8	1.189 ± 0.003	1.193	9.36 ± 0.12
H90E10CT2302	30	30.1	1.192 ± 0.002	1.195	9.62 ± 0.17

4.2.3 ผลการทดสอบดรรชนีการไหล การบวมตัว และความหนา

จากตารางที่ 4.3 แสดงการศึกษาสมบัติการไหลโดยการวัดค่าดรรชนีการไหลและการบวมตัว (ที่น้ำหนักกดทับ 2.16 kg , อุณหภูมิ 190°C) ของพอลิเมอร์ผสม H90E10C2301, H90E10C2302, H90E10CT2301 และ H90E10CT2302 พบว่าค่าดรรชนีการไหลและการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากพอลิเมอร์ทุกสูตรมีปริมาณ HDPE, EVA และ CaCO_3 ที่เท่ากัน

ตารางที่ 4.3 ค่าดรรชนีการไหล การบวมตัว และความหนา

สูตร	ค่าดรรชนีการไหลที่น้ำหนักกดทับ 2.16 kg (g/10min)	ค่าการบวมตัว (ratio)	ความหนาของขวด (mm)		
			ปากขวด	กันขวด	แนวตั้ง
HDPE	1.62 ± 0.07	1.36 ± 0.02	0.42 ± 0.01	0.51 ± 0.01	0.45 ± 0.01
HC230	0.15 ± 0.02	1.20 ± 0.02	0.32 ± 0.01	0.32 ± 0.01	0.32 ± 0.02
H90E10C2301	0.41 ± 0.01	1.25 ± 0.03	0.43 ± 0.02	0.42 ± 0.01	0.42 ± 0.01
H90E10C2302	0.40 ± 0.01	1.26 ± 0.01	0.42 ± 0.03	0.41 ± 0.01	0.41 ± 0.01
H90E10CT2301	0.42 ± 0.02	1.17 ± 0.03	0.43 ± 0.04	0.42 ± 0.01	0.43 ± 0.02
H90E10CT2302	0.41 ± 0.02	1.17 ± 0.01	0.42 ± 0.02	0.43 ± 0.03	0.42 ± 0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดความหนาของขวดที่ผลิตได้จากเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดออตริตแสดงดังตารางที่ 4.3 เนื่องจากในทางทฤษฎี ค่าความหนาในแนวเส้นรอบวง เกิดจากการบวมตัวของพาริสัน เมื่อพาริสันถูกออตริตออกมาจากหัวตาย แรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อพาริสันทำให้เกิดการยืดออกในแนวตั้ง ซึ่งถ้าพาริสันเสียรูปได้ง่าย (มีค่าความหนืดต่ำ) ทำให้เกิดปรากฏการณ์ย้อยตัว (Sagging) ส่งผลให้บริเวณปากขวดผลิตภัณฑ์มีความหนาน้อยกว่าบริเวณก้นขวดซึ่งพบในชิ้นงานตัวอย่าง HDPE

จากผลความหนาในงานวิจัยนี้ พบว่าทุกสูตรมีค่าความหนาในแต่ละแนวใกล้เคียงกัน เนื่องจากขวดที่ทำการเป่าขึ้นรูปมีขนาดเล็ก (ปริมาตร 106 cm^3) มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก และการเติม CaCO_3 ลงไปทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมในขณะหลอมเหลวสูงขึ้น ดังที่มีรายงานในงานวิจัยก่อนหน้า [3] ส่งผลให้เกิด Sagging ลดลง

4.2.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อน โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างที่ตัดจากขวดมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 พบว่าทุกสูตรมีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และความเป็นผลึกของ HDPE ใกล้เคียงกัน ไม่พบว่าการเติม CaCO_3 ที่มีหรือไม่มี การเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก เนื่องจาก HDPE กับ CaCO_3 ไม่มีแรงกระทำระหว่างกัน และกรดสเตียริกมีปริมาณน้อย จึงไม่ส่งผลต่อการรบกวนการเกิดผลึกของ HDPE

ตารางที่ 4.4 T_m , T_c และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก

สูตร	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ความเป็นผลึก (%)
	ของ HDPE	ของ HDPE	
HDPE	135.1	118.4	63
HC230	133.2	118.8	63
H90E10C2301	131.4	120.6	60
H90E10C2302	133.2	118.9	61
H90E10CT2301	130.6	118.5	64
H90E10CT2302	130.3	119.0	65

4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

จากการศึกษาสมบัติเชิงกลของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/ CaCO_3 ที่ได้จากขวดที่ผลิตจากกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดออตริต แสดงผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 – 4.6

จากรูปที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบสมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงาน พบว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบตามแนวเส้นรอบวงของขวด (Hoop Direction, HD) มีค่าพอ ๆ กับชิ้นงานตัวอย่างที่ทดสอบตามแนวตั้งของขวด (Vertical Direction, VD) เนื่องจากขวดที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูปมีลักษณะเป็นทรงกระบอกขนาดเล็ก (ปริมาตร 106 cm^3) ทำให้การจัดเรียงตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ในขณะขึ้นรูปที่ขยายตัวจากการเป่าขยายในแนวเส้นรอบวงพอ ๆ กับการยืดตัวตามแนวตั้ง



(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก



(b) ความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก



(d) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

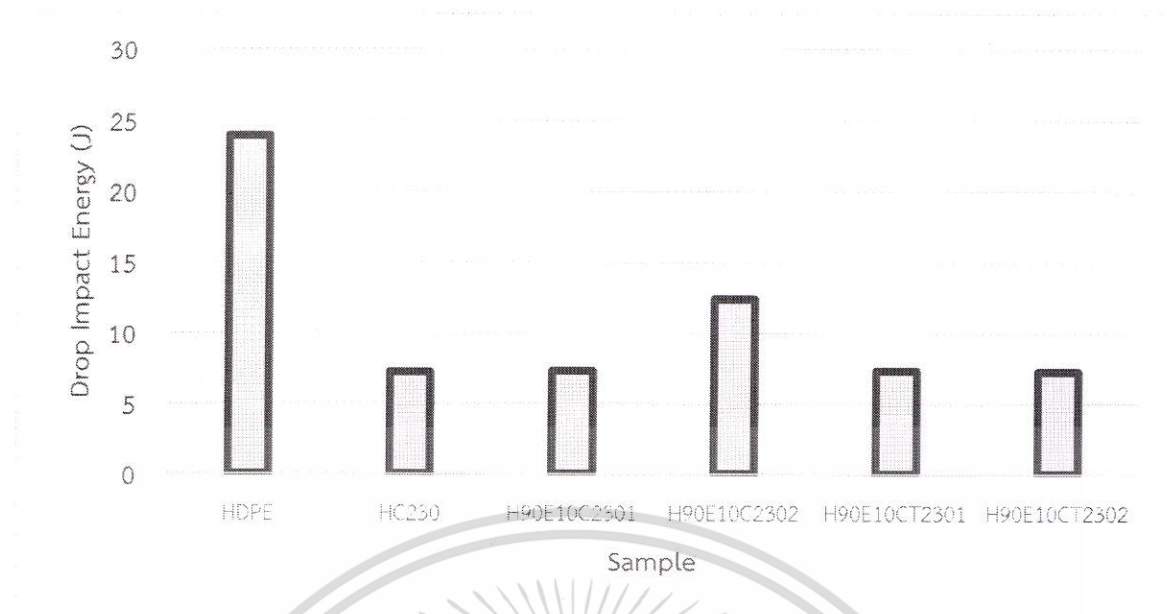


(e) มอดุลัส
รูปที่ 4.5 สมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO₃



รูปที่ 4.6 ค่าความแข็งกดของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO₃

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ค่าพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักของขวด HDPE/EVA/CaCO₃

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของขวด HDPE/EVA/CaCO₃ ที่ใช้ CaCO₃ ที่ไม่มีและมีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (H90E10C2302 และ H90E10CT2302 ตามลำดับ) พบว่า CaCO₃ เกรดที่ไม่มี การเคลือบผิว พื้นผิวมีขรุขระ ทำให้เข้ากับส่วนที่มีขี้ของ EVA ได้ดี จึงทำให้ในระบบนี้ EVA สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer) ช่วยให้ CaCO₃ กระจายตัวดีและเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ ส่งผลให้ขวด H90E10C2302 มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าสูงกว่าขวด H90E10CT2302 ที่ใช้ CaCO₃ เกรดที่มีการเคลือบผิว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ CaCO₃ เกรดที่มีการเคลือบผิว มีกรดสเตียริกซึ่งช่วยทำให้ CaCO₃ แดกกระจายได้ดี (Good dispersion) แต่ไม่สามารถเข้ากับส่วนที่มีขี้ของ EVA ได้ ในขณะที่เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของขวด HDPE/EVA/CaCO₃ สูตรที่มีการผสมต่างกัน (H90E10C2301 ผ่านการผสมแบบ One-step และ H90E10C2302 ผ่านการผสมแบบ Two-step) โดยการผสมแบบ Two-step เป็นการผสมระหว่าง CaCO₃ และ EVA ก่อน จึงทำให้ CaCO₃ แดกกระจายได้ดีใน EVA เมื่อทำการผสมลงใน HDPE จึงทำให้ CaCO₃ เกิดกระจายดี นอกจากนี้ยังลดช่องว่างระหว่างอนุภาค CaCO₃ ด้วยกันเองและลดรอยต่อระหว่างวัฏภาค CaCO₃ กับพอลิเมอร์ซึ่งเป็นการลดจุดบกพร่องภายในชิ้นงานลง ส่งผลให้การผสมแบบ Two-step มีค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าสูงกว่าการผสมแบบ One-step

จากรูปที่ 4.5 (e) และ 4.6 แสดงค่ามอดุลัสและค่าความแข็งแรงกดตามลำดับ พบว่าขวดแต่ละสูตรมีค่ามอดุลัสและค่าความแข็งแรงกดใกล้เคียงกัน เนื่องจากทุกสูตรมีปริมาณ HDPE, EVA และ CaCO₃ ที่เท่ากัน

จากรูปที่ 4.7 แสดงค่าพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักของขวด พบว่าขวดที่มีการใช้ CaCO₃ เกรดที่ไม่มี การเคลือบผิวที่ผสมแบบ Two-step (H90E10C2302) ให้ค่าสูงที่สุด เนื่องจากค่าพลังงานกระแทกนั้นขึ้นกับความสามารถในการส่งผ่านแรงหรือกระจายแรงของสายโซ่พอลิเมอร์ การผสมแบบ

Two-step ทำให้ CaCO_3 ที่ไม่มีการเคลือบผิวเกิดการกระจายตัวดีใน HDPE/EVA ดังที่กล่าวด้านบน เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างรวดเร็วจึงทำให้การส่งผ่านแรงของสายโซ่พอลิเมอร์มีความต่อเนื่องมากขึ้น ค่าพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักจึงสูง

4.2.6 ผลการศึกษาความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

จากผลการศึกษาความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมแสดงดังตารางที่ 4.5 โดยผลที่ได้รายงานค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม (ESCR, F_{50}) คือเวลาที่ชิ้นงานตัวอย่าง 50% ของจำนวนชิ้นงานมีรอยแตกเกิดขึ้น

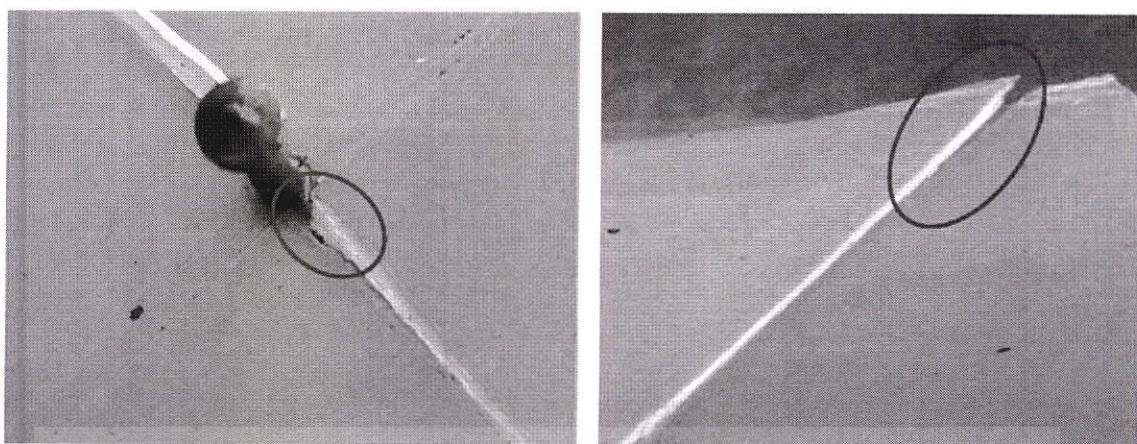
การเสียดสภาพเนื่องจากความเค้นจากสภาพแวดล้อม (Environmental stress cracking) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงเค้นจากภายนอกกระทำกับชิ้นงานในขณะที่ชิ้นงานสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก เช่น เหลวหรือไอสารทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียดสภาพ การทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม สำหรับ PE ตามมาตรฐาน ASTM D1693 [43] เนื่องจาก PE เป็นพอลิเมอร์ที่นิยมนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่บรรจุสารชำระล้าง (Surfactant) เช่น สบู่ แชมพู และน้ำยาทำความสะอาด เป็นต้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของชิ้นงานขวด HDPE/EVA/ CaCO_3 เพื่อให้เข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

ในทางทฤษฎีการเสียดสภาพจากแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม เกิดจากการดูดซับ Stress cracking agent เข้าไปบริเวณที่เกิดจุดบกพร่องหรือบริเวณที่มีแรงเค้นสะสม เช่น Micro-void หรือ เครซ ส่งผลให้โมเลกุลของ Stress cracking agent เกิดการแพร่แทรกเข้าไปในสายโซ่พอลิเมอร์ และทำหน้าที่คล้ายกับพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เข้าไประหว่างสายโซ่โมเลกุล ทำให้ปริมาตรอิสระ (Free volume) เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลคลายตัวออกจากกันได้ง่าย เกิดการขยายรอยแตก และเกิดการเสียดสภาพ [43]



รูปที่ 4.8 ลักษณะชิ้นงานก่อนการทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ลักษณะชิ้นงานที่เกิดรอยแตกจากการทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

จากรูปที่ 4.8 แสดงลักษณะชิ้นงานก่อนการทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม และรูปที่ 4.9 แสดงลักษณะชิ้นงานที่เกิดรอยแตกจากการทดสอบความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม จากการศึกษาสมบัติความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมพบว่าสูตร Pure HDPE มีค่า ESCR, F_{50} เท่ากับ 120 ชั่วโมง เป็นสาเหตุมาจากที่กล่าวไว้ข้างต้น ในขณะที่สูตร HDPE ที่มีการเติม CaCO_3 มีค่า ESCR, F_{50} เท่ากับ 360 ชั่วโมง เนื่องมาจาก CaCO_3 ทำให้ระยะทางในการขยายรอยแตกเพิ่มขึ้น โดยรอยแตกเกิดการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ นอกจากนี้การเติม CaCO_3 ที่มีขั้วลงไปทำให้ชิ้นงานมีสภาพผิวเพิ่มขึ้น ทำให้ Stress cracking agent แทรกเข้าไปในชิ้นงานได้ยากขึ้น และเมื่อพิจารณาสูตร HDPE/EVA พบว่า ไม่เกิดการเสียหายในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ (ESCR, F_{50} > 504 ชั่วโมง) เป็นผลมาจากจุดรวมความเค้นสะสมในชิ้นงานน้อยลง เกิดการแตกหักได้ยากขึ้น เนื่องจากทุกสูตรมี EVA ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงสามารถทนต่อแรงเค้นจากการดัดงอได้ดี เพิ่มสภาพผิวของชิ้นงาน ทำให้ Stress cracking agent ใช้เวลาในการแพร่เข้ามาในชิ้นงานนานขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลทำให้สูตร HDPE/EVA/ CaCO_3 ไม่เกิดการเสียหาย ดังที่กล่าวมาในข้างต้น

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมใน TergitolTM NP-9 Surfactant at 50°C

สูตร	ESCR, F_{50} (h)
HDPE	120
HC230	360
H90E10C2301	>504
H90E10C2302	>504
H90E10CT2301	>504
H90E10CT2302	>504

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลของลำดับการผสม HDPE/EVA/CaCO₃ โดยมีการใช้ CaCO₃ ขนาด 2 ไมครอนทั้งเกรดที่ไม่มีการเคลือบและเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกที่ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการผสมผ่าน Master batch (Two-step) โดยใช้ CaCO₃ เกรดที่ไม่มีการเคลือบผิว เนื่องจากการเลือกใช้ CaCO₃ ที่ไม่มีการเคลือบผิว ส่งผลทำให้ CaCO₃ จึงมีผิวสูง ซึ่งเข้ากับส่วนที่มีผิวของ EVA ได้ดี และการผสมแบบ Two-step ทำให้ CaCO₃ แดกกระจายใน HDPE ได้ดีขึ้น ส่งผลให้มีค่าความแข็งแรง ดึง ฉุด จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด และพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักที่ดี

4.3 การศึกษาผลของการใช้ EVA

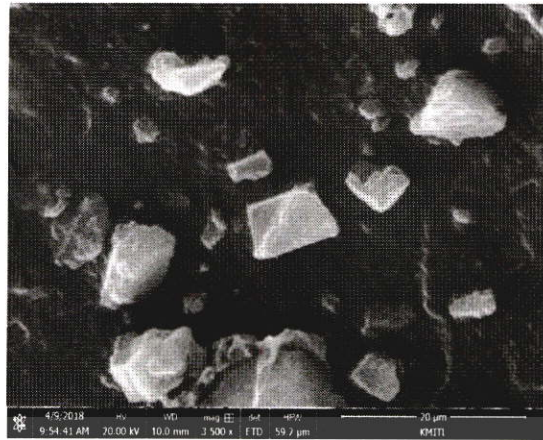
จากการศึกษาลำดับการผสม พบว่าการผสมแบบ Two-step เหมาะสำหรับการผสมกับ CaCO₃ เกรดที่ไม่มีการเคลือบผิว และให้สมบัติต่าง ๆ ของขวด HDPE/EVA/CaCO₃ ดีที่สุด จึงได้เลือกการผสมแบบ Two-step นี้มาทำการศึกษาผลของการใช้ EVA ต่อ โดยศึกษาสูตร HDPE/EVA ที่อัตราส่วน 100/0, 95/5, 90/10, 85/15 และ 80/20 ที่มีการใช้ CaCO₃ ปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก และแสดงสูตรดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สูตรพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA/CaCO₃

สูตร	ปริมาณองค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสม (g)		
	HDPE	EVA	CaCO ₃
HDPE	100	-	-
H80E20	80	20	-
HC230	70	-	30
H95E5C230	66.5	3.5	30
H90E10C230	63	7	30
H85E15C230	59.5	10.5	30
H80E20C230	56	14	30

4.3.1 ผลการศึกษาการกระจายตัวของ CaCO₃ ใน HDPE

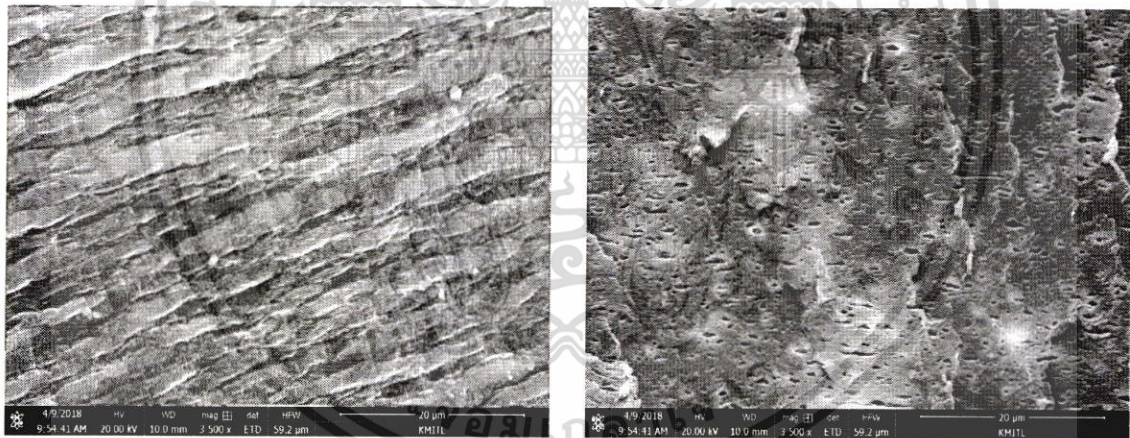
จากการศึกษาการกระจายตัวของ CaCO₃ ใน HDPE ในรูปที่ 4.10 แสดงพื้นที่ตัดขวางของชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่าง HC230 พบว่าอนุภาค CaCO₃ บางส่วนเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนและบางส่วนแตกตัวออกเป็นอนุภาคเดี่ยว เนื่องจากความมีผิวที่แตกต่างกันของ HDPE ซึ่งเป็นวัสดุภาคที่ไม่มีผิวและ CaCO₃ ที่เป็นอนุภาคที่มีผิว



รูปที่ 4.10 SEM micrographs ภาคนตัดขวางของชิ้นงาน HC230 (กำลังขยาย 3500 เท่า)

4.3.2 ผลการศึกษาการกระจายตัวของ EVA ใน HDPE

จากการศึกษาการกระจายตัวของ EVA ใน HDPE ในรูปที่ 4.11 (a) แสดงพื้นที่ที่ตัดขวางของชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่าง H80E20 พบว่าไม่เกิดการแยกวัฏภาค ไม่เกิดช่องว่างเกิดขึ้น มีลักษณะเป็นชิ้นงานเนื้อแน่น หลังจากสกัด EVA ซึ่งเป็นวัฏภาคกระจายออก สังเกตพบช่องว่างที่แสดงในรูปที่ 4.11 (b) ซึ่งเป็นช่องว่างที่เคยมี EVA อยู่ แสดงให้เห็นว่า EVA เป็นวัฏภาคกระจายตัวอยู่ใน HDPE และเป็นการยืนยันว่าระบบพอลิเมอร์ผสมของ HDPE/EVA เป็นแบบ Immiscible blend



(a) H80E20 ก่อนสกัด

(b) H80E20 หลังสกัด

รูปที่ 4.11 SEM micrographs ภาคนตัดขวางของชิ้นงาน H80E20 (กำลังขยาย 3500 เท่า)

4.3.3 ผลการศึกษาสัณฐานวิทยา

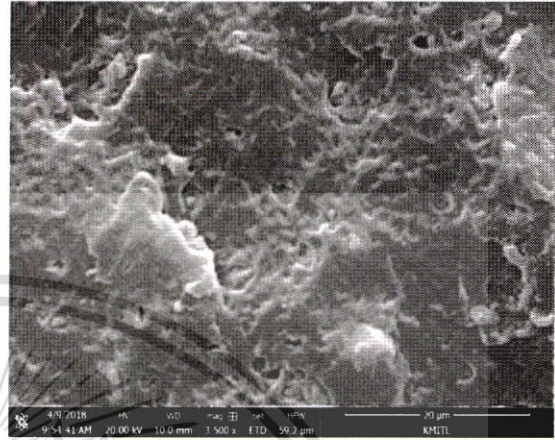
จากรูปที่ 4.12 (a), (c), (e) และ (g) แสดงลักษณะสัณฐานวิทยาภาคนตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO₃ พบว่าอนุภาคของ CaCO₃ มีการกระจายตัวดี เกิดการฝังตัวในพอลิเมอร์ผสม หลังจากทำการสกัดวัฏภาคของ EVA ออก สังเกตพบช่องว่างที่แสดงดังรูปที่ 4.12 (b), (d), (f) และ (h) แสดงถึงตำแหน่งที่เคยมี EVA อยู่ และเมื่อปริมาณ EVA มากขึ้น (ดังรูป 4.12 (f) และ (h)) พบวัฏภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ EVA มีขนาดใหญ่และต่อเนื่องมากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาปริมาณ CaCO_3 ในรูปก่อนสกัดและหลังสกัด EVA ออก พบว่า CaCO_3 มีปริมาณน้อยลง เมื่อสกัดวัฏภาค EVA ออก แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของ CaCO_3 ชอบที่อยู่กับวัฏภาคของ EVA ที่มีขี้มากกว่าวัฏภาคของ HDPE ที่ไม่มีขี้ อนุภาคของ CaCO_3 จึงหลุดออกไปพร้อมกับ EVA ที่ถูกสกัด



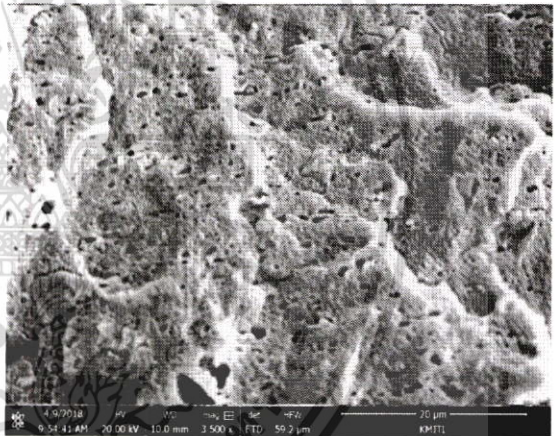
(a) H95E5C230 ก่อนสกัด



(b) H95E5C230 หลังสกัด



(c) H90E10C230 ก่อนสกัด



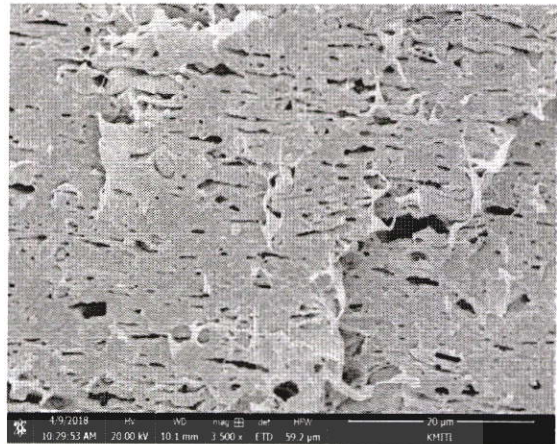
(d) H90E10C230 หลังสกัด

รูปที่ 4.12 SEM micrographs ภาคตัดขวางของชิ้นงาน HDPE/EVA/ CaCO_3 ที่มีปริมาณ EVA ต่างกัน (กำลังขยาย 3500 เท่า)

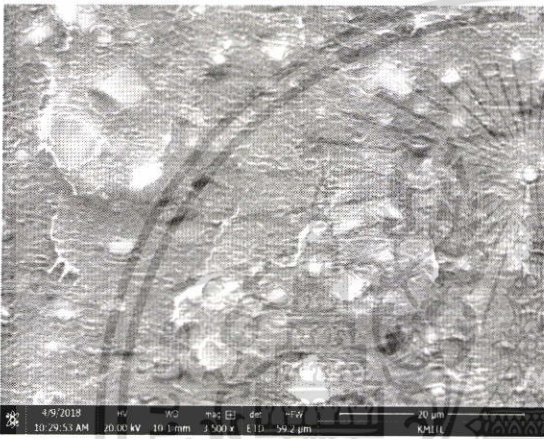
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) H85E15C230 ก่อนสกัด



(f) H85E15C230 หลังสกัด



(g) H80E20C230 ก่อนสกัด



(h) H80E20C230 หลังสกัด

รูปที่ 4.12 (ต่อ) SEM micrographs ภาคตัดขวางของชิ้นงาน HDPE/EVA/CaCO₃ ที่มีปริมาณ EVA ต่างกัน (กำลังขยาย 3500 เท่า)

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ CaCO₃ และความหนาแน่น

จากตารางที่ 4.7 แสดงปริมาณ CaCO₃ ที่ทำการตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA พบว่าปริมาณ CaCO₃ ในชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรผสมมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ (30 %โดยน้ำหนัก) เมื่อนำชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่างไปหาค่าความหนาแน่นพบว่าการเติม CaCO₃ ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงลงในพอลิเมอร์ผสม HDPE/EVA ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน จึงทำให้ความหนาแน่นโดยรวมของชิ้นงานเพิ่มขึ้น และพบว่า HDPE กับ H80E20 มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน เนื่องจาก EVA มีความหนาแน่น (0.951 g/cm³) ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของ HDPE (0.966 g/cm³) เมื่อพิจารณาชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่างที่มีปริมาณ CaCO₃ 30% โดยน้ำหนักเท่ากัน แต่มีปริมาณ EVA แตกต่างกัน (H95E5C230, H90E10C230, H85E15C230 และ H80E20C230) พบว่ามีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกัน และมีค่าความหนาแน่นใกล้เคียงกับ HC230 เนื่องจากความหนาแน่นของ HDPE และ EVA มีค่าใกล้เคียงกันดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ปริมาณของ CaCO₃ และความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO₃

สูตร	ปริมาณ CaCO ₃ (%wt)		ความหนาแน่น (g/cm ³)	
	ที่ต้องการ	ที่พบ	ค่าจากการทดลอง	ค่าตามทฤษฎี
HDPE	-	-	0.959±0.002	0.966
H80E20	-	-	0.959±0.002	0.963
HC230	30	29.9	1.193±0.002	1.195
H95E5C230	30	28.0	1.177±0.001	1.177
H90E10C230	30	29.9	1.191±0.002	1.195
H85E15C230	30	29.8	1.191±0.003	1.192
H80E20C230	30	29.6	1.190±0.002	1.189

4.3.5 ผลการทดสอบดัชนีการไหล การบวมตัว ความหนาและน้ำหนักของขวด

HDPE/EVA/CaCO₃

จากตารางที่ 4.8 แสดงค่าดัชนีการไหลและการบวมตัวที่ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Melt flow indexer) พบว่าค่าดัชนีการไหลของชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่าง HC230 มีค่าน้อยกว่า HDPE เนื่องจากอนุภาคของ CaCO₃ ซึ่งเป็นของแข็ง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างการขึ้นรูป จึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ทำให้ความหนืดสูงขึ้น ในขณะที่ค่าดัชนีการไหลของชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่าง H80E20 มีค่ามากกว่า HDPE เนื่องจาก EVA มีค่าดัชนีการไหล (7 g/10min) ที่สูงกว่าค่าดัชนีการไหลของ HDPE (0.4 g/10min) ดังนั้นเมื่อพิจารณาชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่างที่มีปริมาณ CaCO₃ เท่ากัน แต่มีปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น จึงทำให้มีค่าดัชนีการไหลเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.8 ค่าดัชนีการไหล การบวมตัว ความหนาและน้ำหนักขวด HDPE/EVA/CaCO₃

สูตร	ค่าดัชนีการไหล (g/10min)	ค่าการบวมตัว	ความหนาของขวด (mm)			น้ำหนักขวด (g)
			ปากขวด	ก้นขวด	แนวตั้ง	
HDPE	1.62±0.07	1.36±0.02	0.42±0.01	0.51±0.01	0.45±0.01	9.25±0.60
H80E20	1.83±0.04	1.45±0.02	0.51±0.01	0.61±0.01	0.63±0.01	12.26±0.03
HC230	0.15±0.02	1.20±0.02	0.32±0.01	0.32±0.01	0.32±0.02	11.53±0.03
H95E5C230	0.23±0.03	1.23±0.01	0.34±0.01	0.34±0.01	0.34±0.01	11.84±0.03
H90E10C230	0.40±0.01	1.33±0.02	0.42±0.03	0.41±0.01	0.41±0.01	12.29±0.31
H85E15C230	0.40±0.02	1.37±0.01	0.45±0.03	0.44±0.01	0.45±0.01	12.85±0.11
H80E20C230	0.52±0.01	1.41±0.02	0.50±0.01	0.53±0.01	0.53±0.02	13.16±0.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลที่ตามมาคือการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวออกจากหัวตายเร็วขึ้น และด้วยสมบัติความยืดหยุ่นของ EVA ทำให้พาริสันไหลออกมาจากหัวตายได้มากและมีผนังหนาจากการคืนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ ขวดที่ได้จึงมีความหนามากขึ้นและน้ำหนักมากขึ้นตามปริมาณของ EVA ที่มากขึ้น

จากค่าการบวมตัวของชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่าง HC230 มีค่าน้อยกว่า HDPE เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 ซึ่งเป็นของแข็ง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างการขึ้นรูป จึงขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่ HDPE ซึ่งมีสมบัติทาง Elastic ในขณะที่หลอมเหลว เมื่อออกจากหัวตายเครื่องทดสอบสมบัติการไหล ทำให้ความเป็น Elastic ในระบบลดลง ส่งผลทำให้ชิ้นงานที่ได้บางลง ในขณะที่ค่าการบวมตัวของชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่าง H80E20 มีค่ามากกว่า HDPE เนื่องจาก EVA มีสมบัติคล้ายยางมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้มีสมบัติทาง Elastic ที่สูงกว่า HDPE ทำให้เกิดการคืนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ได้มากขึ้น เมื่อออกจากหัวตายเครื่องทดสอบสมบัติการไหล ทำให้ความเป็น Elastic ในระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ชิ้นงานที่ได้หนาขึ้น ดังนั้นเมื่อพิจารณาชิ้นตัวอย่างที่มีปริมาณ CaCO_3 เท่ากัน แต่มีปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น ความเป็น Elastic ในระบบเพิ่มขึ้น ค่าการบวมตัวจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาของขวดและน้ำหนักของขวดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของความหนาบริเวณปากขวดและบริเวณก้นขวด พบว่าความหนาของขวด HDPE และ H80E20 มีความหนาบริเวณปากขวดน้อยกว่าความหนาบริเวณก้นขวด เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมทั้งสองสูตรมีความหนืดต่ำ พาริสันที่ออกมาจากหัวตายเกิดการเสียรูปได้ง่าย ส่งผลทำให้พาริสันเกิดการยึดตัวในแนวตั้ง หรือปรากฏการณ์ย้อยตัว (Sagging) ได้ง่าย ในขณะที่ขวด HC230 มีความหนาสม่ำเสมอในทุกบริเวณ เนื่องจากการเติม CaCO_3 ลงไปทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมในขณะหลอมเหลวสูง (High melt strength) จึงลดการเกิด Sagging ลง ดังนั้นจึงส่งผลให้ความหนาของขวดตัวอย่างที่มีปริมาณ CaCO_3 เท่ากัน แต่มีปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น มีความหนาสม่ำเสมอในทุกบริเวณ

4.3.6 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนของขวด HDPE/EVA/ CaCO_3

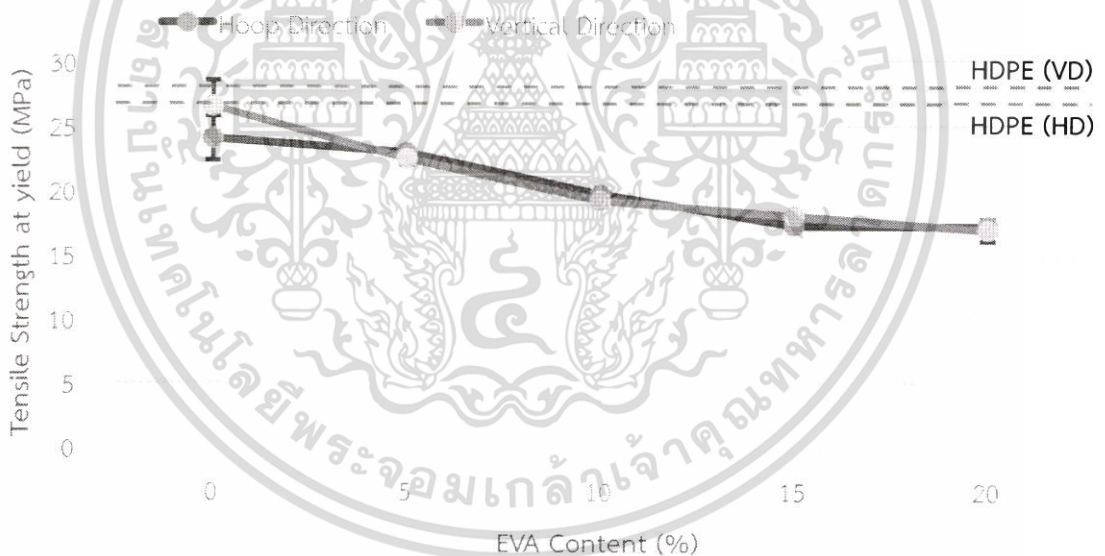
ตารางที่ 4.9 แสดงสมบัติทางความร้อนของขวด HDPE/EVA/ CaCO_3 ทุกสูตรพบว่า มี T_m ของ HDPE แต่ไม่พบ T_m ของ EVA แสดงว่า EVA ไม่สามารถเกิดผลึกได้ในระบบพอลิเมอร์ผสมนี้ แสดงว่า EVA แสดงความเป็นอสัณฐานในระบบ HDPE/EVA/ CaCO_3 ทั้งนี้ HDPE และ EVA เป็น Immiscible blend EVA เป็นวัฏภาคกระจายจึงไม่เข้าไปรบกวนการเกิดผลึกของ HDPE ยืนยันได้จากค่า T_m และความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมที่มีการเติม EVA ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกับ T_m ของ HDPE ซึ่งมีความเป็นผลึกอยู่ในช่วง 59-65%

ตารางที่ 4.9 สมบัติทางความร้อนของขวด HDPE/EVA/CaCO₃

สูตร	T _m (°C)	T _c (°C)	ความเป็นผลึก (%)
HDPE	135.1	118.4	63
H80E20	133.5	118.7	60
HC230	133.2	118.8	63
H95E5C230	132.5	117.9	59
H90E10C230	133.2	118.9	61
H85E15C230	133.0	118.0	65
H80E20C230	133.0	119.0	64

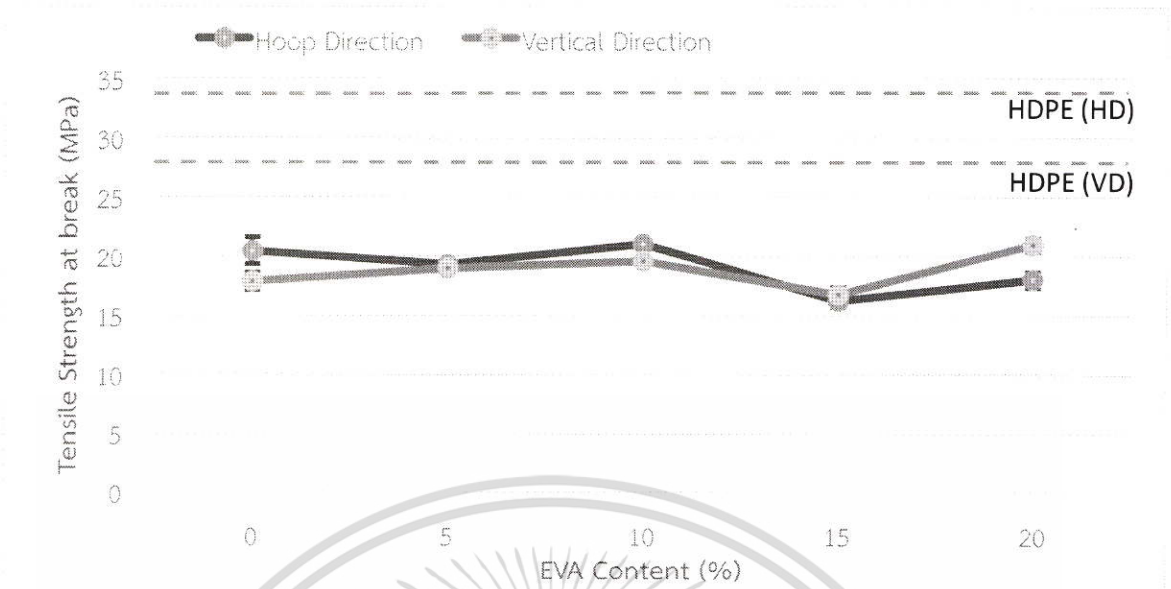
4.3.7 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.13 พบว่าการเติม EVA ลงไปใน HDPE/CaCO₃ ทำให้ HDPE กับ CaCO₃ มีความเข้ากันได้มากขึ้น การที่ EVA แสดงความเป็นอสัณฐานที่มีความยืดหยุ่น ทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียรูปได้ง่าย ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก มอดูลัสและความแข็งกดมีแนวโน้มลดลง ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณ EVA เพิ่มขึ้น เนื่องจากความยืดหยุ่นของ EVA

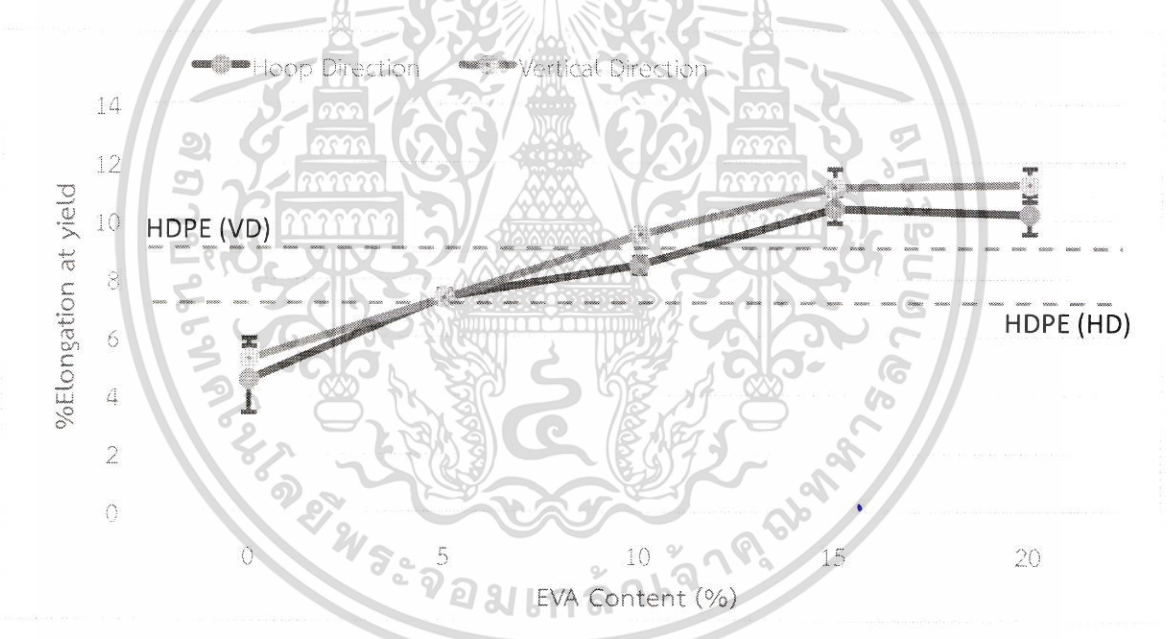


(a) ความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

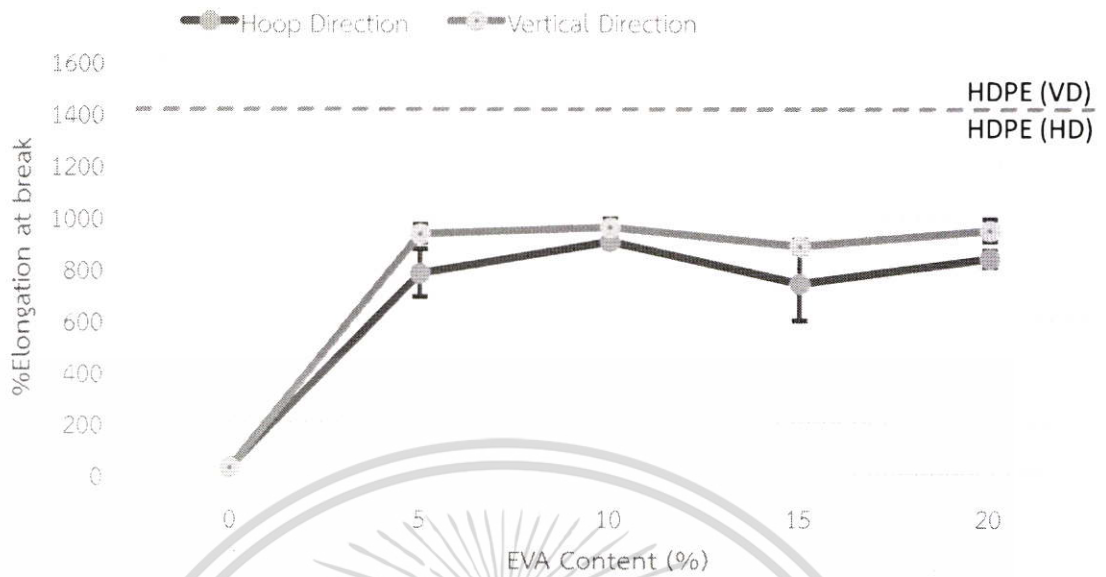


(b) ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด

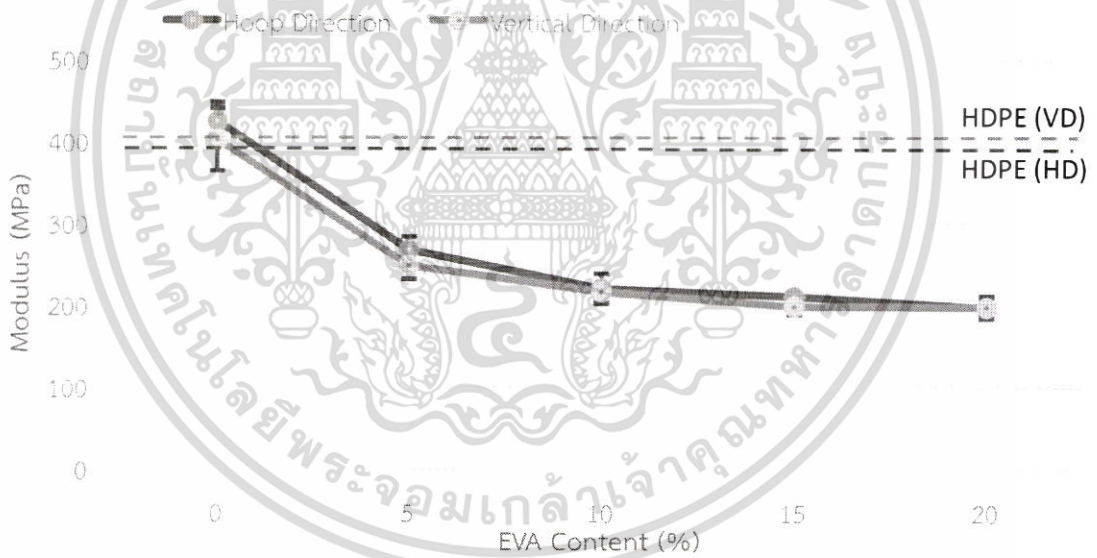


(c) เปอร์เซนต์การดึงยืด ณ จุดคราก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



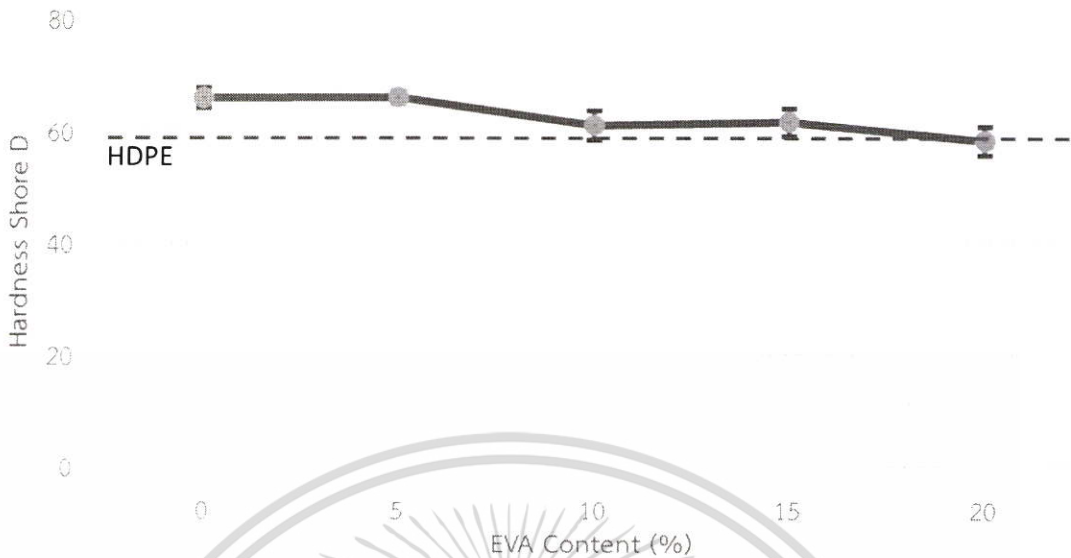
(d) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด



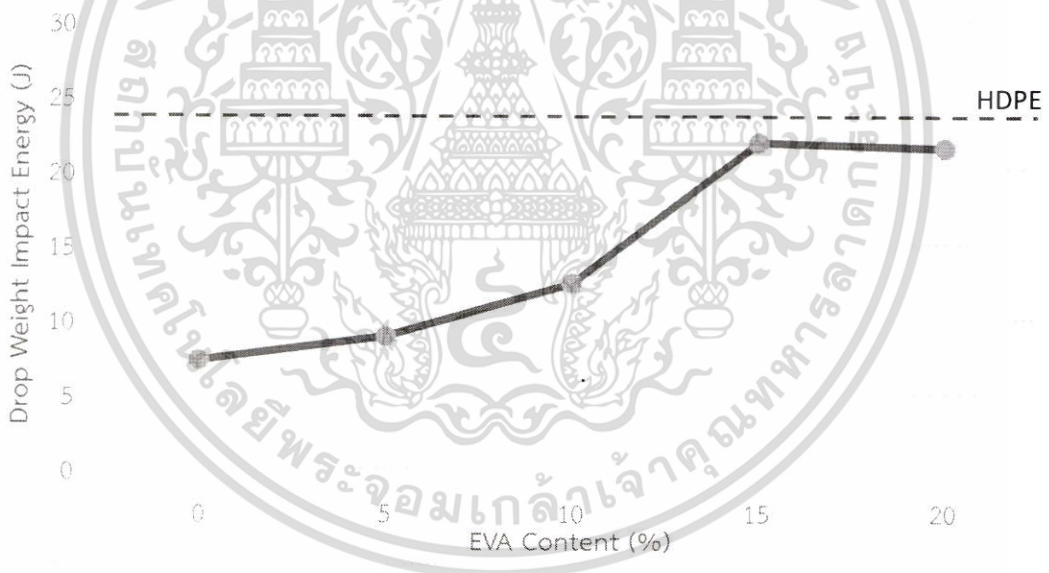
(e) มอดุลัส

รูปที่ 4.13 สมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO₃ ที่มีปริมาณ EVA ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ค่าความแข็งกดของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO₃ ที่มีปริมาณ EVA ต่างกัน



รูปที่ 4.15 ค่าพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักของขวด HDPE/EVA/CaCO₃ ที่มีปริมาณ EVA ต่างกัน

จากรูปที่ 4.15 แสดงค่าพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักของขวด HDPE/EVA/CaCO₃ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ EVA ค่าพลังงานกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจาก EVA มีสมบัติความยืดหยุ่นคล้ายยาง นอกจากนี้การใช้ EVA ช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ของ HDPE กับ CaCO₃ ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างอนุภาค CaCO₃ ด้วยกันเองและรอยต่อระหว่างภูมิภาค CaCO₃ กับพอลิเมอร์น้อยลง ดังนั้นจุดบกพร่องภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานจึงลดลง เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกอย่างรวดเร็วจึงทำให้การส่งผ่านแรงของสายโซ่พอลิเมอร์มีความต่อเนื่องมากขึ้น แต่เนื่องจากความสูงตึกและจำนวนขดไม่เพียงพอต่อการทดสอบ จึงทำให้ขด H80E20C230 กับขด H85E15C230 มีระยะความสูงเฉลี่ยในการทดสอบใกล้เคียงกัน ส่งผลให้พลังงานกระแทกของทั้งสองสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน

4.3.8 ผลการศึกษาความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

จากผลการทดลอง พบว่าชิ้นงานที่ผสม EVA ลงไป ไม่เกิดการเสียหายในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ (ESCR, $F_{50} > 500$ ชั่วโมง) เนื่องจากจุดรวมความเค้นสะสมในชิ้นงานน้อยลง เกิดการแตกหักได้ยากขึ้น เนื่องจาก EVA ซึ่งมีความยืดหยุ่นสูงสามารถทนต่อแรงเค้นจากการดัดงอได้ดี เพิ่มสภาพขั้วของชิ้นงาน ทำให้ Stress cracking agent ใช้เวลาในการแพร่เข้ามาในชิ้นงานนานขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4.10 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของขด HDPE/EVA/CaCO₃ ใน TergitolTM NP-9 Surfactant at 50°C

สูตร	ESCR, F_{50} (h)
HDPE	120
H80E20	>500
HC230	360
H95E5C230	>500
H90E10C230	>500
H85E15C230	>500
H80E20C230	>500

จากการศึกษาผลของการใช้ EVA ของขด HDPE/EVA/CaCO₃ พบว่าการเติม EVA ลงใน HDPE ที่มี CaCO₃ ผสมอยู่ EVA สามารถช่วยทำให้ CaCO₃ มีการกระจายตัวและเข้ากันกับพอลิเมอร์ได้ดีมากขึ้น แม้ว่าการเติม EVA เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันส่งผลให้ความแข็งแรงของชิ้นงานลดลงด้วยเช่นกัน เนื่องมาจากความยืดหยุ่นของ EVA ทำให้ชิ้นงานเสียรูปได้ง่าย และนอกจากนี้ EVA มีราคาที่ย่อยข้างสูง ในงานวิจัยนี้จึงเลือกสูตร H90E10C230 ที่มีปริมาณ EVA 7% โดยน้ำหนัก เพื่อใช้ในการศึกษาผลของปริมาณการใช้ CaCO₃ ในปัจจัยศึกษาต่อไป

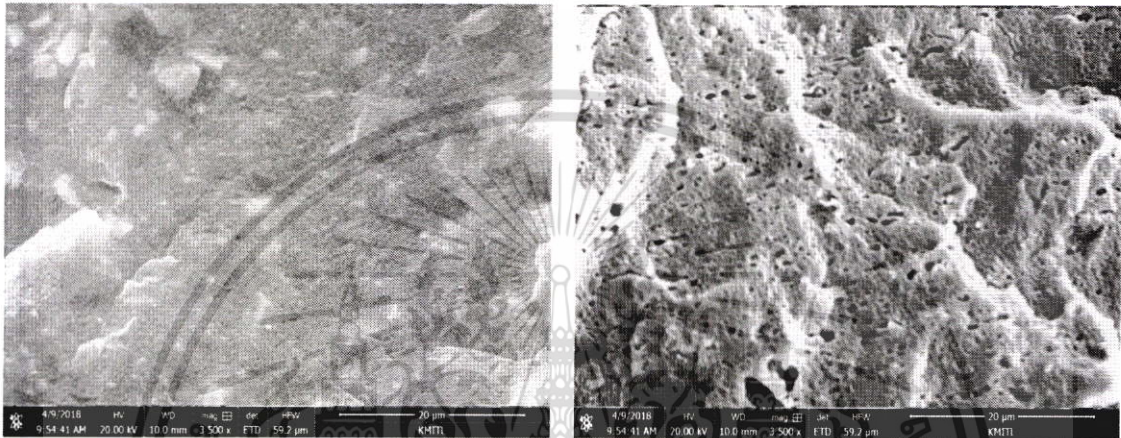
4.4 การศึกษาผลของปริมาณการใช้ CaCO₃

4.4.1 ผลการศึกษาพื้นฐานวิทยา

จากรูปที่ 4.13 (a) และ (c) แสดงลักษณะพื้นฐานวิทยาภาคตัดขวางของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO₃ ที่มีปริมาณ CaCO₃ ต่างกัน พบว่าชิ้นงานตัวอย่าง H90E10C230 (รูปที่ 4.13 (a)) มีการกระจายตัวและแตกตัวของ CaCO₃ ที่ดี (Good distribution and Good dispersion) เกิดการฝังตัว

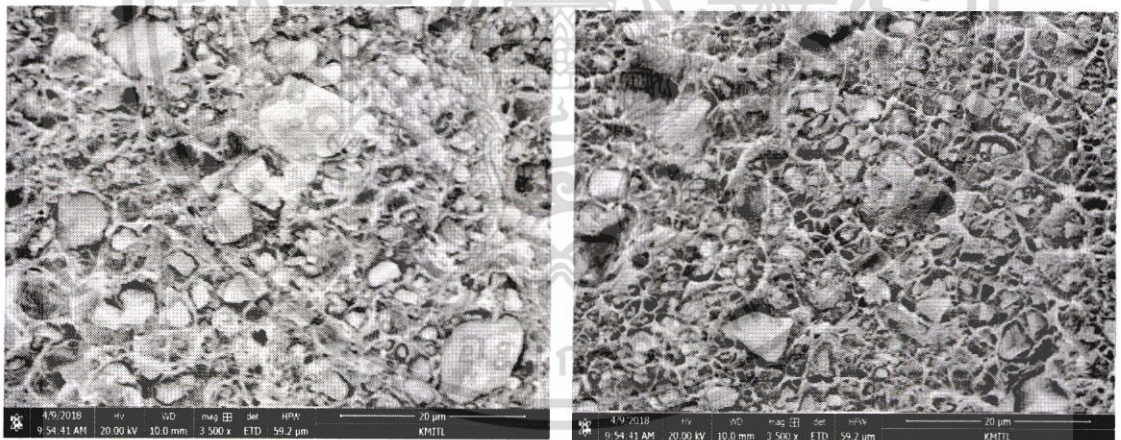
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเมอร์ได้ดี แต่เมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นในชิ้นงานตัวอย่าง H90E10C240 (รูปที่ 4.13 (c)) พบว่า CaCO_3 ส่วนใหญ่เกิดการรวมตัวกัน (Agglomeration) เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัส (Surface area) ของ CaCO_3 มีมากขึ้น ไม่เกิดการฝังตัวในพอลิเมอร์ที่มีปริมาณลดลงเป็น 60% โดยน้ำหนัก หลังจากทำการสกัดตัวภาคของ EVA ออก ดังรูปที่ 4.13 (b) และ (d) พบช่องว่างในชิ้นงานตัวอย่าง H90E10C230 (รูปที่ 4.13 (b)) ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งที่เคยมี EVA อยู่ พบว่า EVA มีการกระจายตัวที่ดีใน HDPE แต่เมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นในชิ้นงานตัวอย่าง H90E10C240 (รูปที่ 4.13 (d)) พบช่องว่างที่เคยมี EVA อยู่ น้อยลง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ส่งผลทำให้ EVA ที่มีอยู่ในระบบมีปริมาณน้อยลง



(a) H90E10C230 ก่อนสกัด

(b) H90E10C230 หลังสกัด



(c) H90E10C240 ก่อนสกัด

(d) H90E10C240 หลังสกัด

รูปที่ 4.16 SEM micrographs ภาคตัดขวางของชิ้นงาน HDPE/EVA/ CaCO_3 ที่มีปริมาณ CaCO_3 ต่างกัน (กำลังขยาย 3500 เท่า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณ CaCO_3 และความหนาแน่นของขวด

จากตารางที่ 4.11 แสดงปริมาณ CaCO_3 ที่ทำการตรวจสอบด้วยเทคนิค TGA พบว่าปริมาณ CaCO_3 ในชั้นพอลิเมอร์ตัวอย่าง พบว่าปริมาณ CaCO_3 ทั้ง 2 สูตรผสมมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณที่ต้องการ และเมื่อนำชั้นพอลิเมอร์ตัวอย่างไปหาค่าความหนาแน่น พบว่าความหนาแน่นของชั้นพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นที่สูงกว่า (2.7 g/cm^3) ลงในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE กับ EVA ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นโดยรวมของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4.11 ปริมาณของ CaCO_3 และความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/ CaCO_3 ที่มีปริมาณ CaCO_3 ต่างกัน

สูตร	ปริมาณ CaCO_3 (%wt)		ความหนาแน่น (g/cm^3)	
	ที่ต้องการ	ที่พบ	ค่าจากการทดลอง	ค่าตามทฤษฎี
H90E10C230	30	29.9	1.191±0.002	1.195
H90E10C240	40	38.6	1.273±0.003	1.283

4.4.3 ผลการทดสอบดรรชนีการไหล การบวมตัว ความหนาและน้ำหนักของขวด HDPE/EVA/ CaCO_3

จากตารางที่ 4.12 แสดงค่าดรรชนีการไหลและการบวมตัวที่ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการไหล พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ค่าดรรชนีการไหลของชั้นพอลิเมอร์ตัวอย่างมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 ซึ่งเป็นของแข็ง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างการขึ้นรูป จึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่ ทำให้ความหนืดสูงขึ้น

ตารางที่ 4.12 ค่าดรรชนีการไหล การบวมตัว ความหนาและน้ำหนักขวด HDPE/EVA/ CaCO_3 ที่มีปริมาณ CaCO_3 ต่างกัน

สูตร	ค่าดรรชนีการไหล	ค่าการบวมตัว	ความหนาของขวด (mm)			น้ำหนักขวด (g)
			ปากขวด	ก้นขวด	แนวตั้ง	
H90E10C230	0.40±0.01	1.33±0.02	0.42±0.03	0.41±0.01	0.41±0.01	12.29±0.31
H90E10C240	0.21±0.02	1.20±0.02	0.34±0.01	0.33±0.01	0.33±0.02	11.89±0.14

จากค่าการบวมตัวของชั้นพอลิเมอร์ตัวอย่าง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ค่าการบวมตัวมีค่าลดลง เนื่องจากอนุภาคของ CaCO_3 ซึ่งเป็นของแข็ง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างระหว่างการขึ้นรูป จึงขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่ HDPE ซึ่งมีสมบัติทาง Elastic ในขณะที่หลอมเหลว เมื่อออกจากหัวตายเครื่องทดสอบสมบัติการไหล ทำให้ความเป็น Elastic ในระบบลดลง ส่งผลทำให้ชิ้นงานที่ได้บางลงและ

น้ำหนักของขวดมีค่าลดลง นอกจากนี้การเติม CaCO_3 ลงไปทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ผสมในขณะหลอมเหลวสูงขึ้น จึงลดการเกิด Sagging ลง ดังนั้นจึงส่งผลทำให้ขวดมีความหนาสม่ำเสมอในทุกบริเวณ

การเติม CaCO_3 ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีความหนาแน่นสูง (2.7 g/cm^3) ทำให้ความหนาแน่นโดยรวมของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ได้ขวดที่บางลงแต่น้ำหนักมากขึ้น [3] แต่ในงานวิจัยนี้พบว่า การเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ได้ขวดที่บางลงและมีน้ำหนักน้อยลง ซึ่งพฤติกรรมที่พบนี้เป็นผลมาจากการมีอยู่ของ EVA ในระบบมีปริมาณน้อยลง

4.4.4 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อน

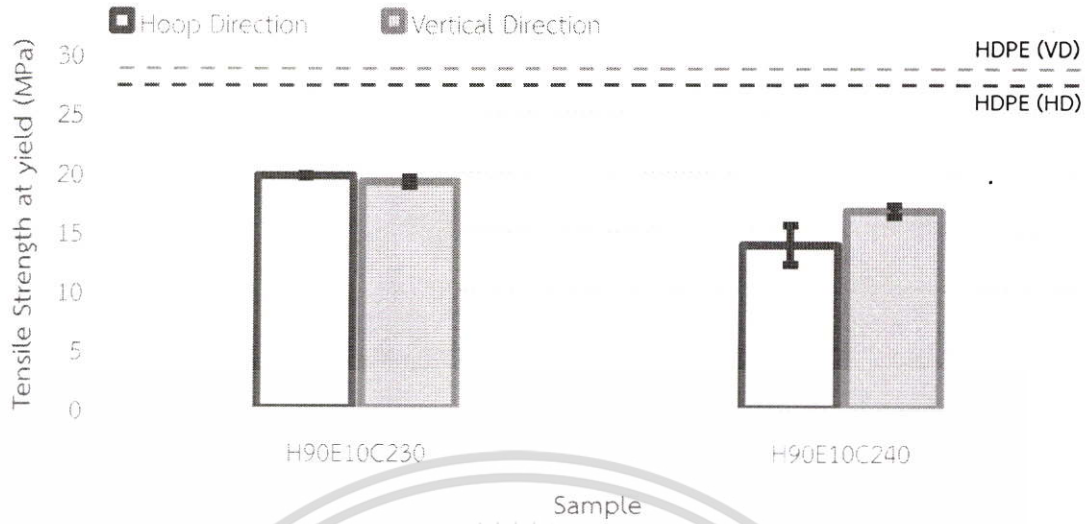
จากตารางที่ 4.13 พบว่าทั้ง 2 สูตร มีอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (T_m) อุณหภูมิการเกิดผลึก (T_c) และความเป็นผลึกของ HDPE มีค่าใกล้เคียงกับของ HDPE การเติม CaCO_3 ไม่เข้าไปรบกวนการเกิดผลึกของ HDPE ดังที่พบในตอนต้นที่ 4.2

ตารางที่ 4.13 สมบัติทางความร้อนของขวด HDPE/EVA/ CaCO_3 ที่มีปริมาณ CaCO_3 ต่างกัน

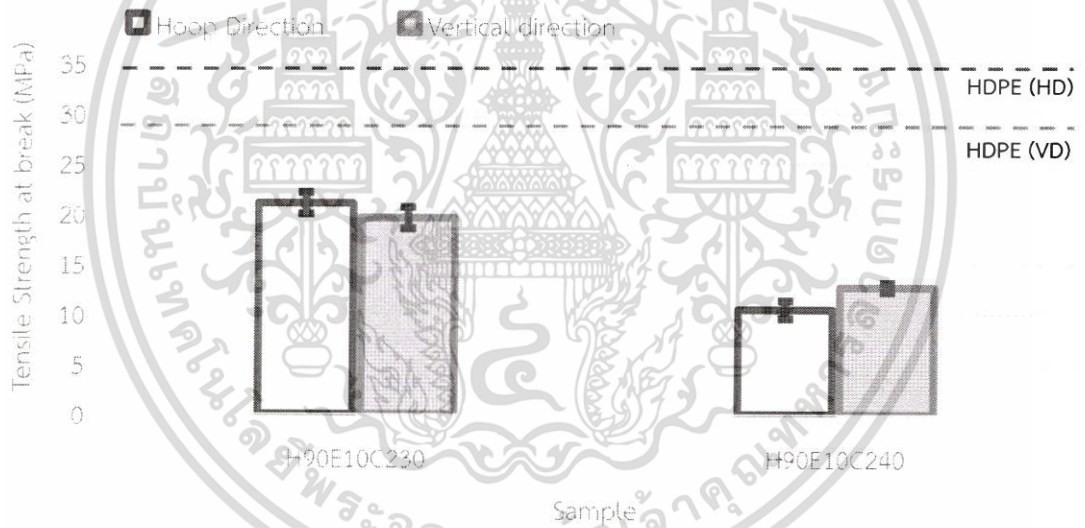
สูตร	T_m ($^{\circ}\text{C}$)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)	ความเป็นผลึก (%)
H90E10C230	133.2	118.9	61
H90E10C240	131.1	119.9	65

4.4.5 ผลการศึกษาสมบัติเชิงกล

จากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง เนื่องจาก HDPE เป็นวัสดุที่ไม่มีขั้ว ในขณะที่ CaCO_3 เป็นวัสดุที่มีขั้ว จึงทำให้ไม่สามารถเข้ากันได้ แม้ว่าจะมีการเติม EVA ลงไปเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ให้กับ HDPE และ CaCO_3 แต่การเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ทำให้ EVA ในระบบลดลง และ CaCO_3 ที่เติมลงไปเกิดการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น ส่งผลให้ช่องว่างระหว่างอนุภาค CaCO_3 ด้วยกันเองและรอยต่อระหว่างวัสดุ CaCO_3 กับพอลิเมอร์มากขึ้น ดังนั้นจุดบกพร่องภายในชิ้นงานจึงมากขึ้น เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำจึงเกิดการเสียหายได้ง่ายขึ้น

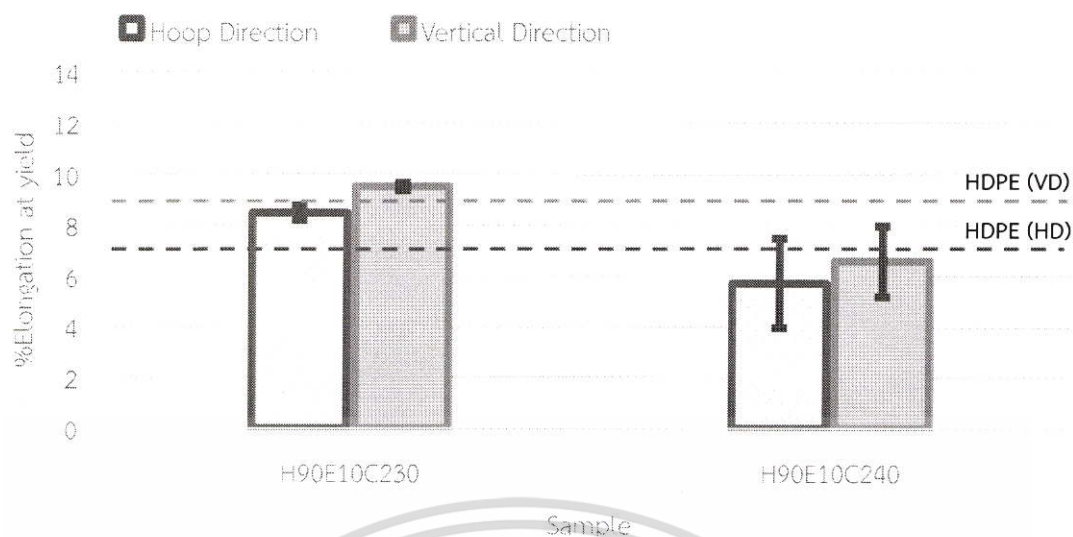


(a) ความแข็งแรงตึง ณ จุดคราก

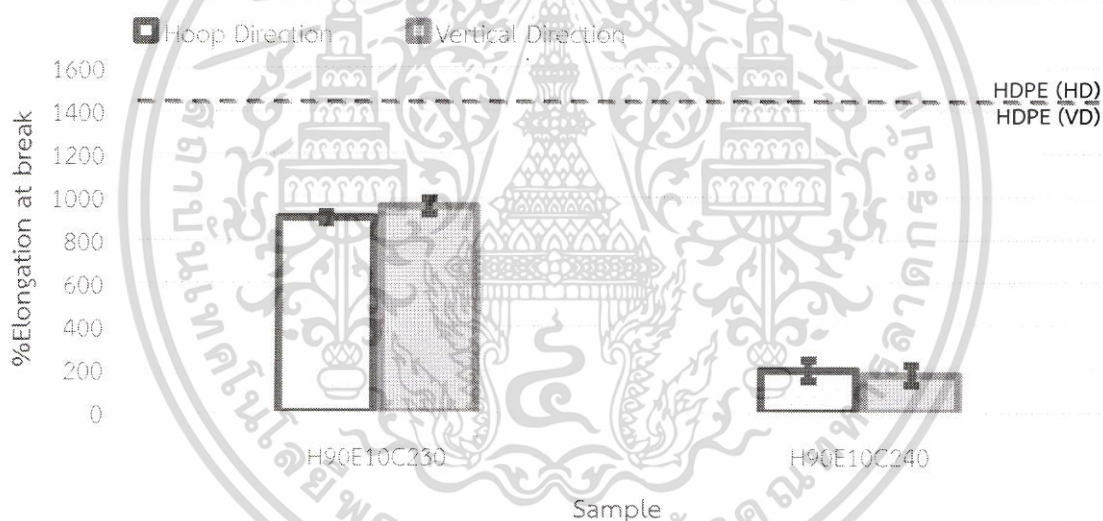


(b) ความแข็งแรงตึง ณ จุดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

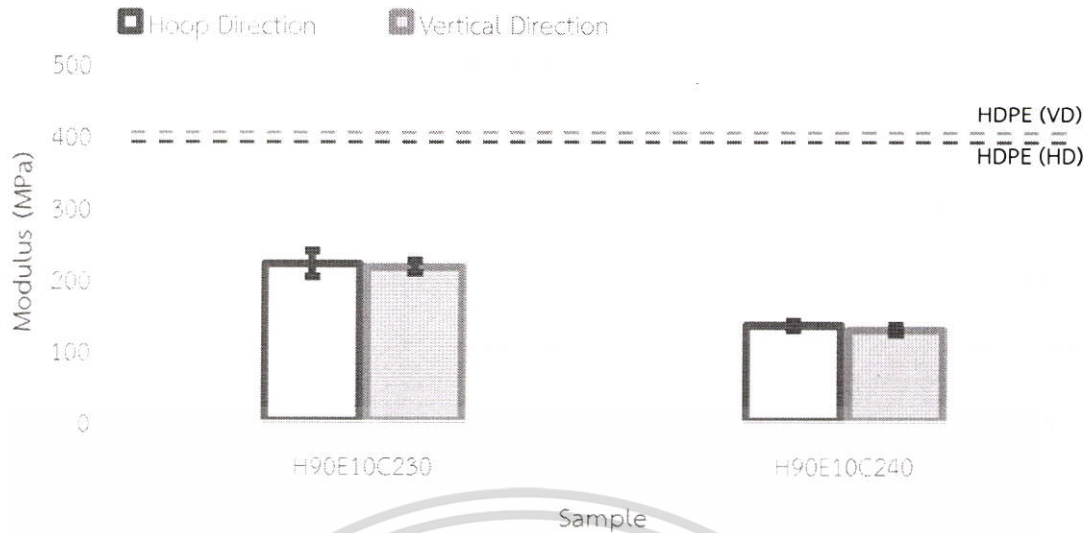


(c) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก

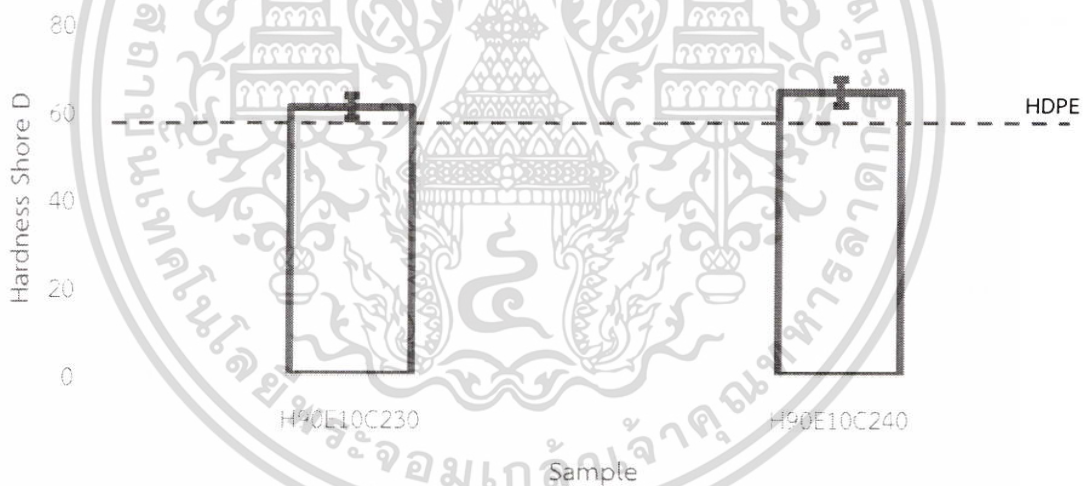


(d) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

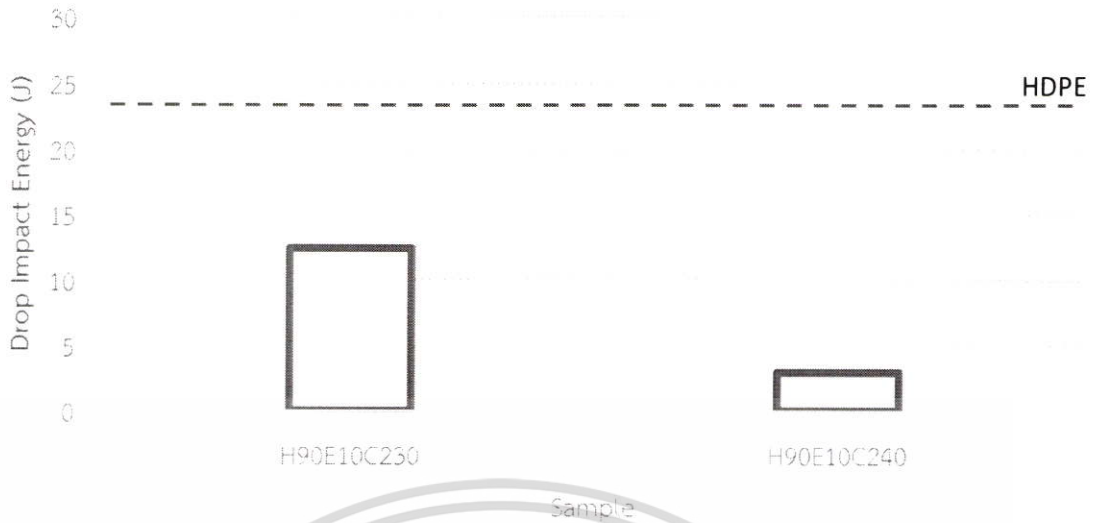


(e) มอดุลัส
รูปที่ 4.17 สมบัติการรับแรงดึงของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO₃ ที่มีปริมาณ CaCO₃ ต่างกัน



รูปที่ 4.18 ค่าความแข็งกดของชิ้นงานตัวอย่าง HDPE/EVA/CaCO₃ ที่มีปริมาณ CaCO₃ ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ค่าพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักของขวด HDPE/EVA/CaCO₃ ที่มีปริมาณ CaCO₃ ต่างกัน

4.4.6 ผลการศึกษาความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม

จากผลการทดลอง พบว่าการเติม CaCO₃ ลงไป ทำให้ชิ้นงานไม่เกิดการเสียหายในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ (ESCR, F₅₀ >504 ชั่วโมง) เนื่องจาก CaCO₃ ทำให้ระยะทางในการขยายรอยแตกเพิ่มขึ้น โดยรอยแตกเกิดการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ นอกจากนี้การเติม CaCO₃ ที่มีขั้วลงไป ทำให้ชิ้นงานมีสภาพผิวเพิ่มขึ้น ทำให้ Stress cracking agent แทรกเข้าไปในชิ้นงานได้ยากขึ้น

ตารางที่ 4.14 ค่าความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของขวดผลิตภัณฑ์ใน Tergitol™ NP-9 Surfactant at 50°C ที่มีปริมาณ CaCO₃ ต่างกัน

สูตร	ESCR, F ₅₀ (h)
H90E10C230	>504
H90E10C240	>504

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมขวดพลาสติกบรรจุภัณฑ์จาก HDPE ที่มีการใช้ CaCO_3 เป็นสารตัวเติม การ
ใช้ EVA เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ของ HDPE และ CaCO_3 เพื่อศึกษาผลของลำดับการผสม ศึกษาผลของ
อัตราส่วน HDPE/EVA และศึกษาผลของปริมาณการใช้ CaCO_3 เพื่อปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทก
และความต้านทานแรงเค้นจากสภาพแวดล้อม จากการทดลองสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. การศึกษาผลของลำดับการผสมที่มีการใช้ CaCO_3 ชนิดเคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก
พบว่าขวดที่มีการใช้ CaCO_3 เกรดที่ไม่มีการเคลือบผิวที่ผสมแบบ Two-step ให้สมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด
เนื่องจากในระบบนี้ EVA สามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยผสม (Compatibilizer) ช่วยให้ CaCO_3 กระจาย
ตัวดีและเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ ลดช่องว่างระหว่างอนุภาค CaCO_3 ด้วยตัวเองและลดรอยต่อระหว่าง
วัฏภาค CaCO_3 กับพอลิเมอร์ซึ่งเป็นการลดจุดบกพร่องภายในชิ้นงานลง ส่งผลให้ชิ้นงานมีความแข็งแรง
และพลังงานกระแทกที่ดี

2. การศึกษาการใช้อัตราส่วน HDPE/EVA ที่มีการผสม CaCO_3 ในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก พบว่า
EVA มีการกระจายตัวที่ดีใน HDPE และช่วยเพิ่มความเข้ากันได้ให้กับ HDPE และ CaCO_3 ดีขึ้น EVA ไม่
เกิดผลึกในชิ้นงาน HDPE/EVA/ CaCO_3 ทุกสูตรผสมมีปริมาณความเป็นผลึกของ HDPE ใกล้เคียงกัน เมื่อ
เพิ่มปริมาณ EVA ค่าดัชนีการไหล การบวมตัว น้ำหนักของขวดมีค่าเพิ่มขึ้นและได้ชิ้นงานที่หนาขึ้น
เนื่องจากสมบัติความยืดหยุ่นคล้ายยางของ EVA ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์คั่นตัวได้มาก ส่งผลให้ชิ้นงานเสีย
รูปได้ง่าย การดัดยัดมีค่าเพิ่มขึ้น ผลจากการศึกษา ESCR พบว่าไม่เกิดการเสียหายในระยะเวลาที่ทำการ
ทดสอบ (ESCR, $F_{50} > 504$ ชั่วโมง) เนื่องจากสมบัติความยืดหยุ่นของ EVA สามารถทนต่อแรงเค้นจากการ
ดัดงอได้ดี เพิ่มสภาพผิวของชิ้นงาน ทำให้ Stress cracking agent ใช้เวลาในการแพร่เข้ามาในชิ้นงาน
นานขึ้น และพลังงานกระแทกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุด 21 J ในขวดสูตร H85E15C230

3. การศึกษาผลของปริมาณการใช้ CaCO_3 พบว่าเมื่อปริมาณ CaCO_3 เพิ่มขึ้นจาก 30% เป็น 40%
โดยน้ำหนัก CaCO_3 เกิดการรวมตัวกันมากขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสของ CaCO_3 มีมากขึ้น การเพิ่ม
ปริมาณ CaCO_3 ควรส่งผลให้น้ำหนักของขวดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความหนาแน่นที่สูงของ CaCO_3 แต่ใน
งานวิจัยนี้พบว่า การเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ทำให้ความเป็น Elastic ในระบบลดลง ส่งผลทำให้ชิ้นงานที่ได้
บางลงและน้ำหนักของขวดมีค่าลดลง ในขณะที่การเพิ่มปริมาณ CaCO_3 ส่งผลให้สมบัติเชิงกลมีค่าลดลง
เนื่องจากช่องว่างระหว่างอนุภาคของ CaCO_3 ด้วยตัวเองและรอยต่อระหว่างวัฏภาค CaCO_3 กับ
พอลิเมอร์มีมากขึ้น เมื่อได้รับแรงกระทำจึงเกิดการเสียหายได้ง่ายขึ้น ผลจากการศึกษา ESCR พบว่าไม่
เกิดการเสียหายในระยะเวลาที่ทำการทดสอบ (ESCR, $F_{50} > 500$ ชั่วโมง) เนื่องจาก CaCO_3 ทำให้
ระยะทางในการขยายรอยแตกเพิ่มขึ้น และทำให้ชิ้นงานมีสภาพผิวเพิ่มขึ้นส่งผลให้ Stress cracking
agent แทรกเข้าไปในชิ้นงานได้ยากขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสภาวะและปริมาณที่เหมาะสมกับการใช้ CaCO_3 เกรดนาโน เพื่อให้ CaCO_3 มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับพอลิเมอร์ได้ดีขึ้น
2. ปรับเปลี่ยนการใช้ EVA ที่มีหมู่ไวโนลอะซิเตตมากขึ้น เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ให้กับ HDPE และ CaCO_3 และปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทกให้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] โฉลก ปิงตระกูล. 2526. รายงานการสัมมนา HDPE บรรจุภัณฑ์ทันสมัย .กรุงเทพฯ : ศูนย์การบรรจุหีบห่อ สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย .
- [2] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. 2547. เอกสารประกอบการเรียนวิชาการปรับแต่งพอลิเมอร์ .กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- [3] ณัฐวุฒิ พยัคศิริ. 2548. “กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัดขวดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดดัดแปร” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย .สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ,
- [4] อธิพิล แจ่งซัด. 2544. เอกสารประกอบการสอนวิชาฟิสิกส์พอลิเมอร์ กรุงเทพฯ: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] นิลุบล เผือกบัวขาว. 2550. “สมบัติเชิงกลและสัณฐานวิทยาของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต.” วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ .
- [6] Sumanutvarapun, P. Prasassarakich, P. Trakulcoo, K. and Kitatkamjornwong, S. 1994. “Mechanical Properties of Polyethylene Filled with Calcium Carbonate.” *Journal of Scientific Research Chulalongkorn University*. 19)2 (: 235-248
- [7] Premphet, K. and Horanont, P. 2001. “Improving Performance of Polypropylene Through Combined Use of Calcium Carbonate and Metalocene-Produced Impact Modifier.” *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 40(3) : 235-247
- [8] Zuiderduim, W.C.J. Westzaan, C. Hue'tink J. and Gaymans, R.J. 2003. “Toughening of Polypropylene with Calcium Carbonate Particle.” *Polymer*. 44 : 261-275
- [9] Thio, Y.S., Argon, A.S. Cohen, R.E. and Weinberg. 2002. “Toughening of isotactic polypropylene with CaCO₃ particles” *Polymer*. 43 : 3661-3674
- [10] Kun, Y. Qi, Y. Guangxian, L. Yajie, S. and Decai, F. 2006. “Mechanical Properties and Morphologies of Polypropylene With Different Sizes of Calcium Carbonate Particles” *Polymer composites*. 27 : 443-450
- [11] Pitt, S. Wipasiri, H. and Jirawut, J. 2004. “Effects of Calcium Carbonate and Its Purity on Crystallization and Melting Behavior, Mechanical Properties, and Processability of Syndiotactic Polypropylene” *Journal of Applied Polymer Science*. 92 : 201-212
- [12] Horanont, P. 1999. “A study of Phase Structure Formation and Mechanical Properties of Ternary Composite of Polypropylene, Elastomer and Filler.” *M.Sc. Thesis of Mahidol University*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] ฐิตินันท์ ศิริจันทน์ .2558. "การตรวจสอบสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ผสม LDPE/EMA และ LDPE/EEA เพื่อใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตผลสด." **วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต** สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ,สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- [14] Rukchonlatee, S., Jaisomboon, N. and Sooknoi, T. 2017. "Improvement of water Vapor Permeability of LLDPE/EVA Film with Zeolite A as Filler." **Key Engineering materials**. 730: 31-36.
- [15] Brydson, J.A. 1999. "Plastics Materials." 7th ed. Oxford : Butterworth Heinemann.
- [16] Paul, U.R. and Bucknall, C.B. 2000. **Polymer Blends**. New York: John Wiley & Son.
- [17] ชลลดา ฤตวิรุฬห์. 2543. "พอลิเมอร์ผสม". **วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง**. 10(1): 14-17.
- [18] Jacqueline, I. and Kroschwitz, J. 1995. **High performance Polymers and Composite**. New York: Plenum press.
- [19] ไพศาล นาคพิพัฒน์ .2554. **สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่ม 28** .กรุงเทพมหานคร: โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว
- [20] Billmeyer, F.W..1984 **Textbook of Polymer Science**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons.
- [21] ปรีชา พหลเทพ .โพลีเมอร์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง .2531.
- [22] Jesse, E. 1996 .**Plastic Additive and Modifiers Handbook**. 1st Ed. London: Chapman & Hall, Inc.
- [23] ปรีดา พิมพ์ขาวดำ .**เซรามิกส์**. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539.
- [24] Riegeland, E.R. 1992. **Handbook of Industrial Chemistry**. 9th Ed. New York: VNK, C.
- [25] Wade, L.G. 1995. **Organic Chemistry**. New Jersey: Prentice-Hill, Inc.
- [26] Rothon, R. 1995. **Particulate-Filled Polymer Composites**. England: Longman Scientifin & Technical.
- [27] Lazzeria, A., Zebarjadb, S.M., Pracellac, M., Cavatierd, K. and Rosad, R. 2005. "Filler Toughening of Plastics. Part 1- The Effect of Surface Interactions on Physico-Mechanical Properties and Rheological Behaviour of Ultrafine CaCO₃/HDPE Nanocomposites." **Journal of Polymer Materials** 46: 827-844.
- [28] ARmetrong, R.B. 2012. **New EVAL[®] EVOH Resins for Flexible Packaging**. [online]. Available: <http://www.tappi.org/content/enewsletters/eplace/2004/27-1Armstrong.pdf>.
- [29] Prabodh, C.B. **Pitfalls in injection moulding of plastics**. [online]. Available: <http://www.pitfallsinmolding.com/blomolding.html>
- [30] อัญชลี กลมรัตน์กุล. 2526. **รายงานการสัมมนา HDPE บรรจุภัณฑ์ทันสมัย**. กรุงเทพฯ : ศูนย์การบรรจุหีบห่อ สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [31] Silva Da, A.L.N., Rocha M.C.G., Moraes M.A.R., Valente C.A.R. and Coutinho F.M.B. 2002. "Mechanical and Rheological Properties of Composites Based on Polyolefin and Mineral Additives." **Polymer Testing**. 21: 57-60
- [32] ดาริน วงศ์วัฒน์เศรษฐ์ และพิทยา เหลืองวนิชประภา .2542. "ผลของการเคลือบผิวสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีผลต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง" **โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**.
- [33] Fu, Q., Wang, G. and Shen, J. 1993. "Polyethylene Toughened by CaCO₃ Particle: Brittle-Ductile Transition of CaCO₃ Toughened HDPE" **Journal of Applied Polymer Science** 49: 673-677
- [34] Chen, Y. 2014 "Investigations on Environmental Stress Cracking Resistance of HDPE/EVA and LDPE/EVA Blends." **Journal of Applied Polymer Science** 131(4): 39880(1-8)
- [35] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standard Test Methods for Melt Flow Rates of Thermoplastic by Extrusion Plastometer: ASTM D 1238**. Annual Book of ASTM Standards. 8.01
- [36] American Standard for Testing and Materials. 2007. **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of plastics by Displacement : ASTM D792-08**. Annual Book of ASTM Standards. 8.01
- [37] Mettler-Toledo, LLC. 2010. **Density Kit for Solids and Liquids Determination**. [Online]. Available : [http://th.mt.com/th/th/home/supportive_content/product_instructions/NC_density_OI/jcr_content/download/file/file.res/Operating_Instruction_Density%20Kit_\(OP-EN\).pdf](http://th.mt.com/th/th/home/supportive_content/product_instructions/NC_density_OI/jcr_content/download/file/file.res/Operating_Instruction_Density%20Kit_(OP-EN).pdf).
- [38] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standard Test Methods for Drop Impact Resistance of Blow-Molded Thermoplastic Containers: ASTM D 2463**. Annual Book of ASTM Standards. 8.01: 266-270
- [39] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standard Test Methods for Rubber Property-Durometer Hardness: ASTM D 2240**. Annual Book of ASTM Standards. 8.02: 226-229
- [40] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics: ASTM D 638**. Annual Book of ASTM Standards. 8.01: 155-171
- [41] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standard Test Methods for Composition Analysis by Thermogravimetry: ASTM D 1131**. Annual Book of ASTM Standards. 14.02: 712-716

- [42] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standard Test Methods for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis: ASTM D 794.** Annual Book of ASTM Standards. 14.02: 582-585
- [43] American Standard for Testing and Materials. 1992. **Standard Test Methods for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics: ASTM D 1693.** Annual Book of ASTM Standards. 8.02: 37-42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



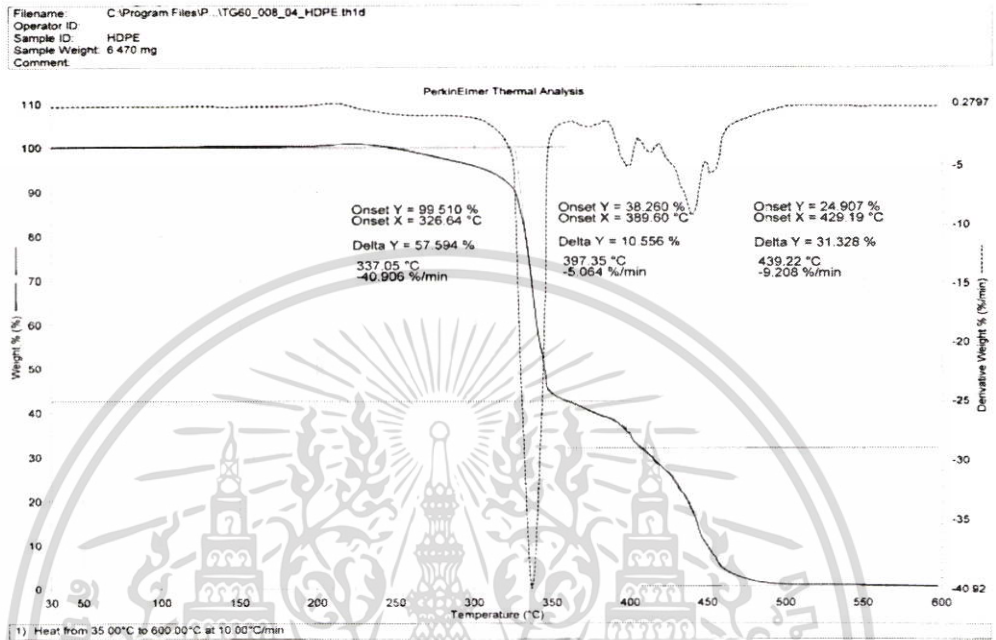
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

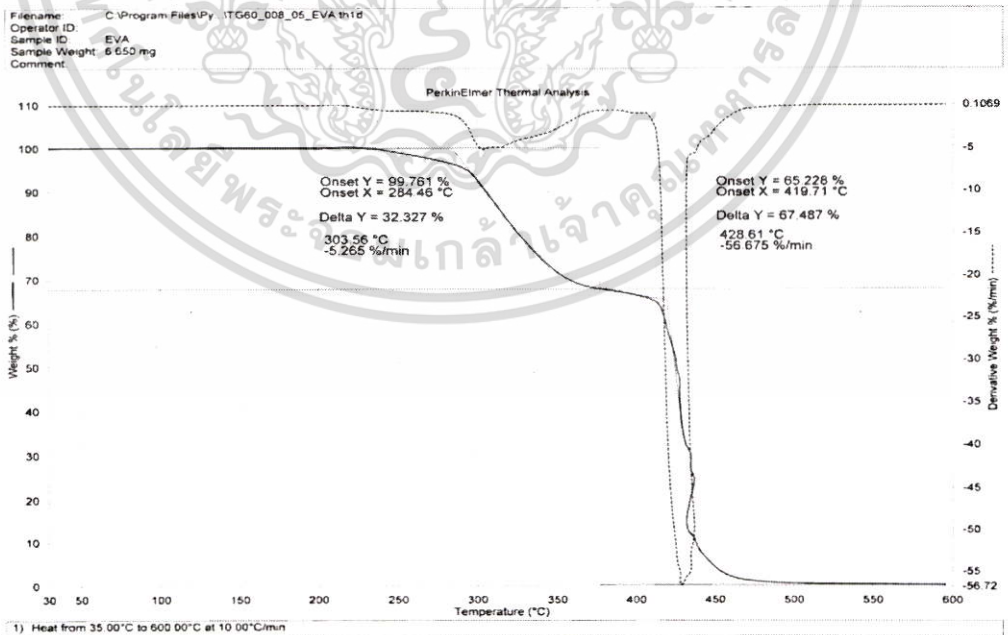
ภาคผนวก ก

การทดสอบสมบัติทางความร้อนจาก TGA

ก-1 ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Thermal gravimetric analyzer : TGA

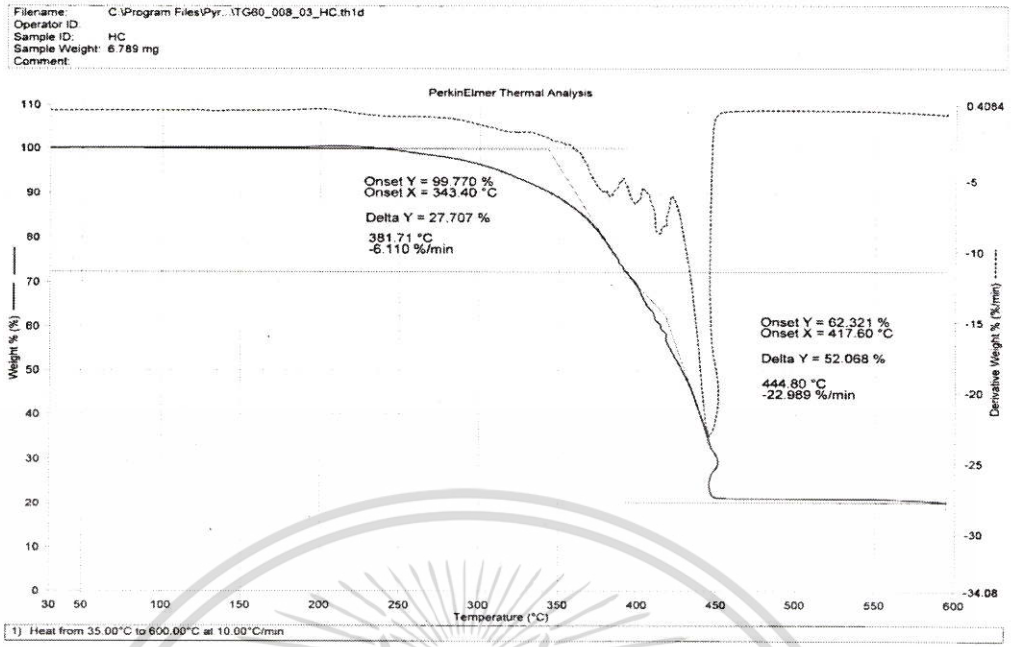


รูปที่ ก-1 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ HDPE

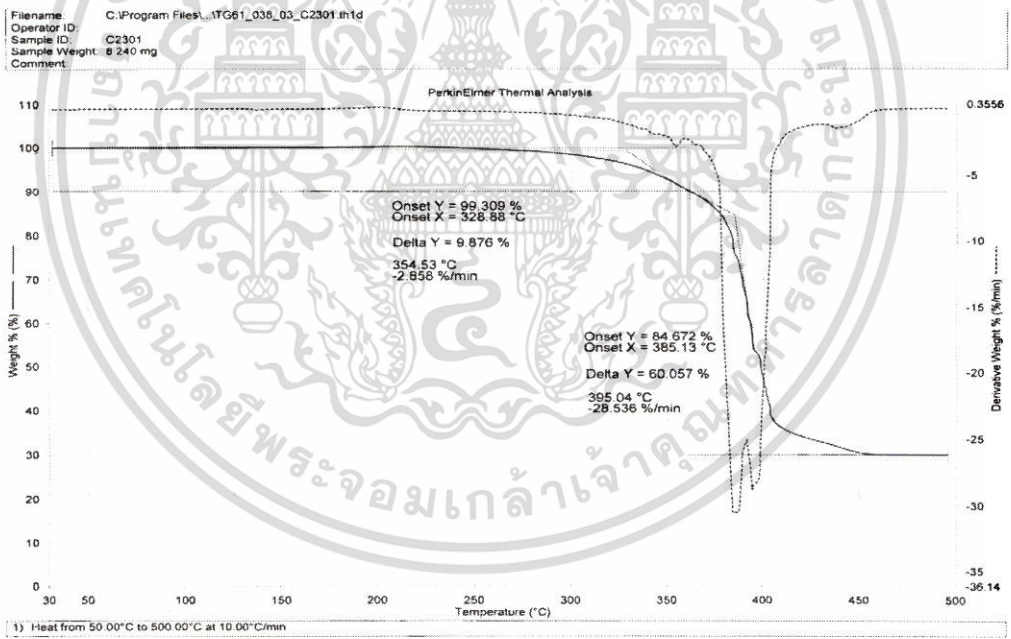


รูปที่ ก-2 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ H80E20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

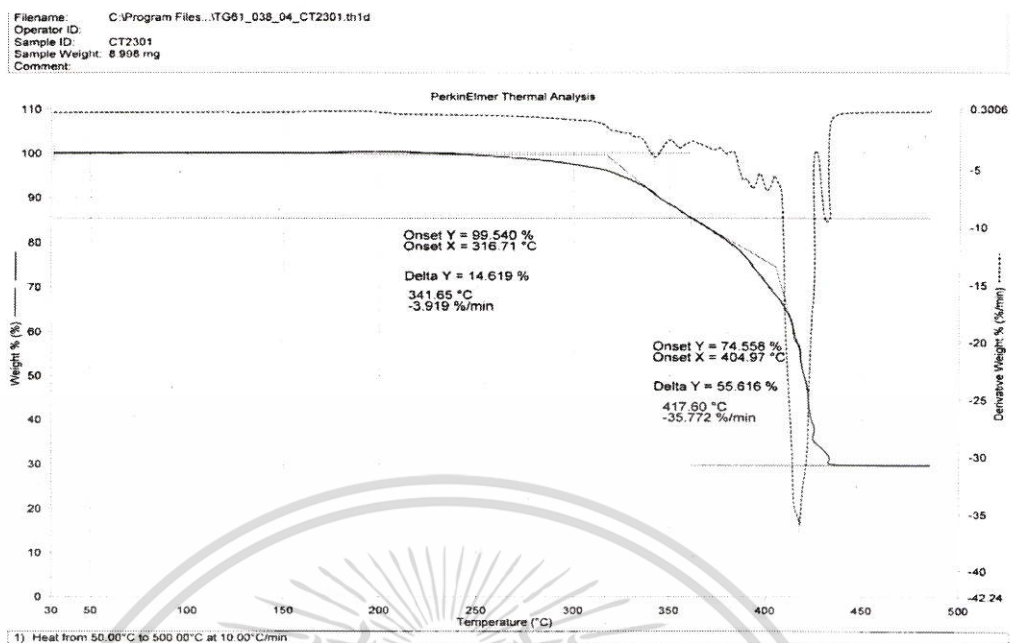


รูปที่ ก-3 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ HC230

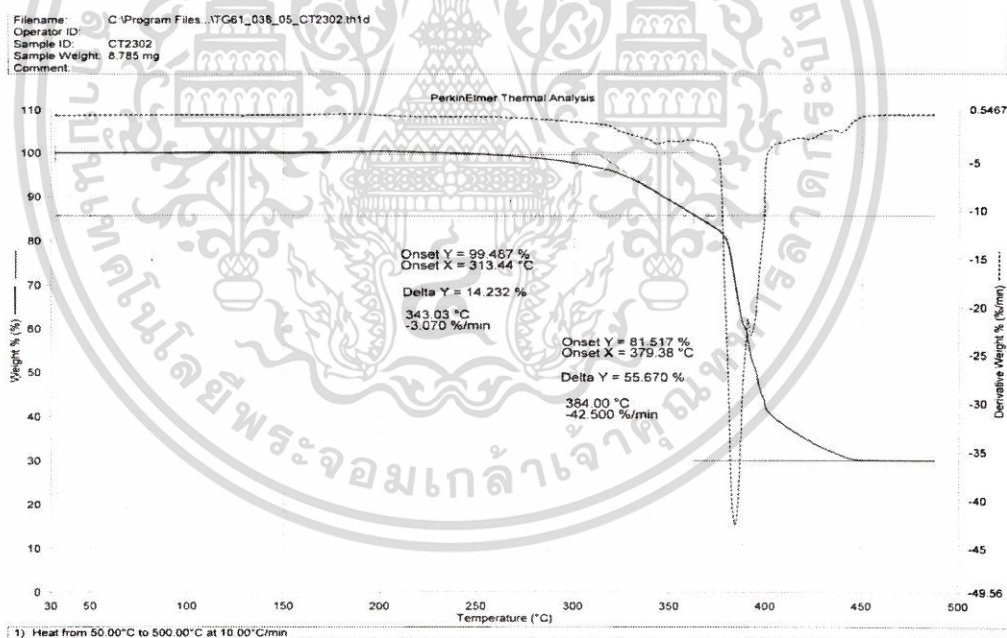


รูปที่ ก-4 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ H90E10C2301

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

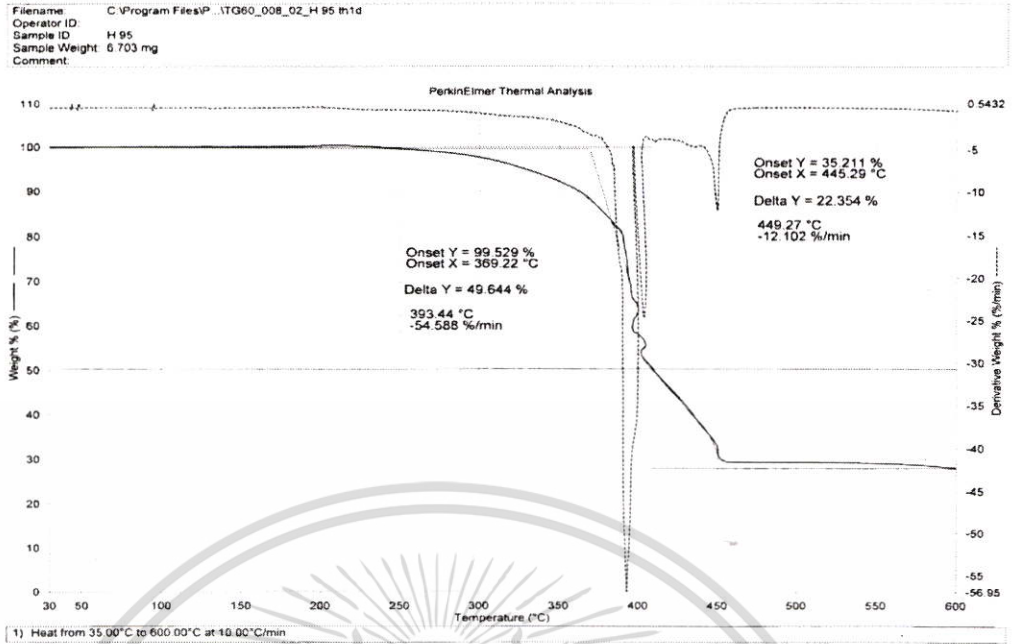


รูปที่ ก-5 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ H90E10CT2301

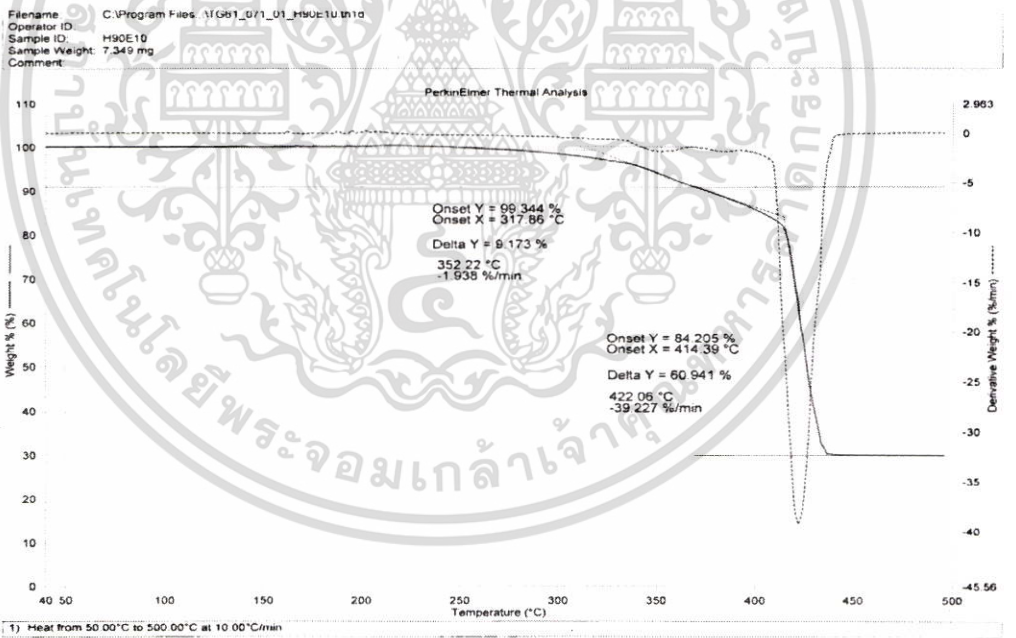


รูปที่ ก-6 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ H90E10CT2302

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

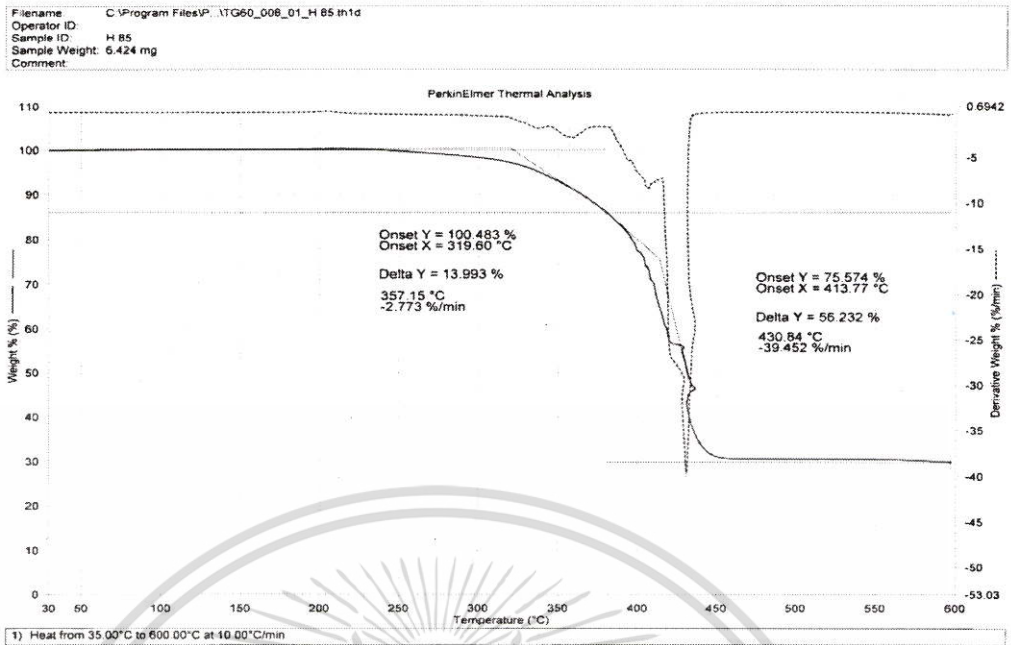


รูปที่ ก-7 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ H95E5C230

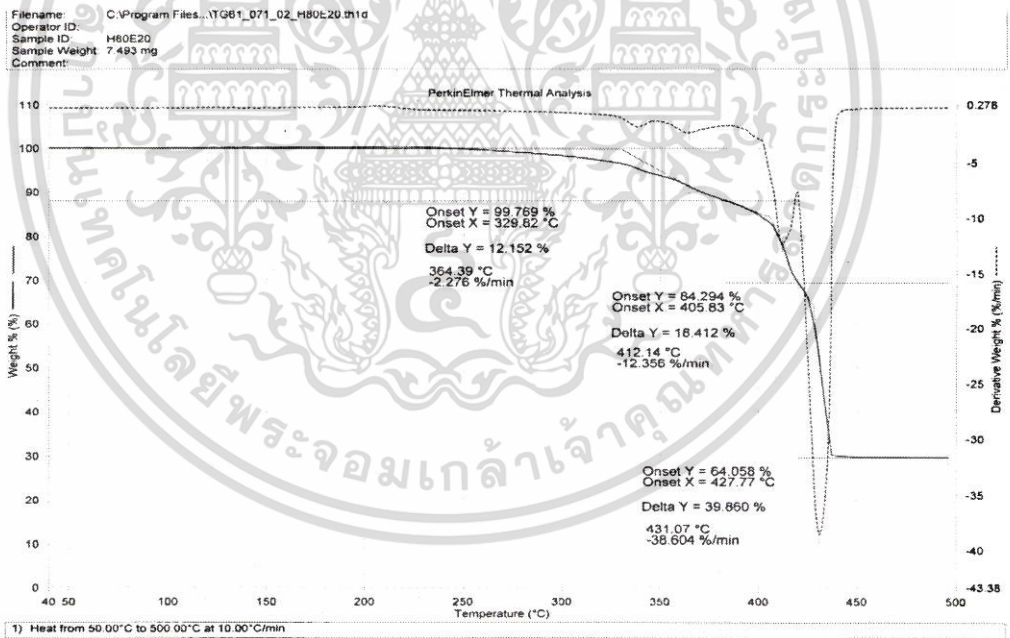


รูปที่ ก-8 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ H90E10C230

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

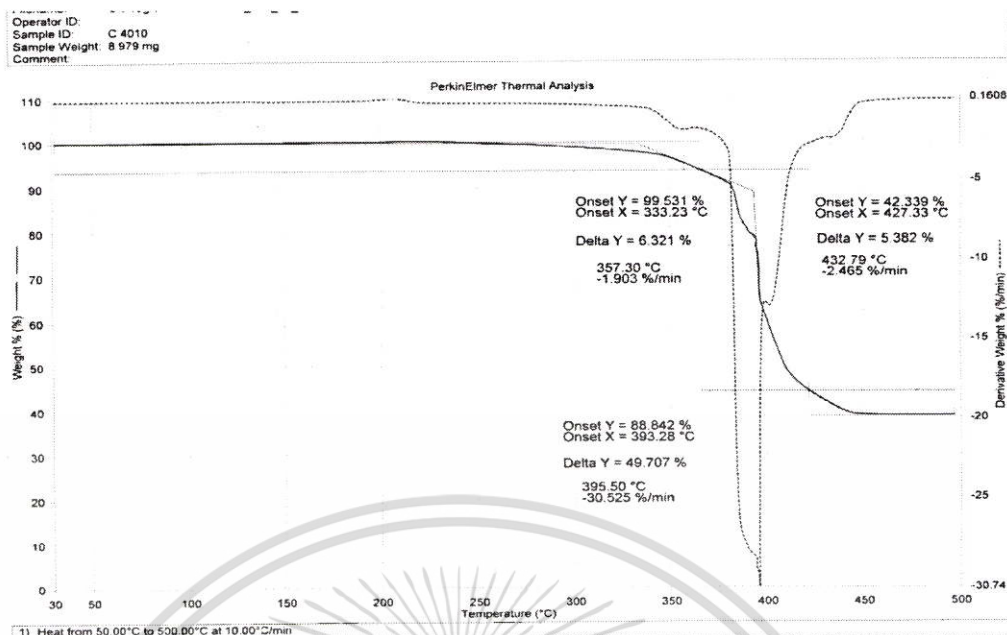


รูปที่ ก-9 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ H85E15C230



รูปที่ ก-10 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ H80E20C230

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-11 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก TGA ของ H90E10C240



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การทดสอบหาความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่าง

ข-1 ผลการทดสอบความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง Density kit

ตารางที่ ข-1 ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง

สูตร	ความหนาแน่น (g/cm ³)					ค่าเฉลี่ย (g/cm ³)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
HDPE	0.956	0.960	0.959	0.960	0.961	0.959	0.002
H80E20	0.956	0.959	0.961	0.962	0.958	0.959	0.002
H90E10C2301	1.191	1.190	1.192	1.191	1.188	1.190	0.002
H90E10CT2301	1.189	1.194	1.187	1.186	1.188	1.189	0.003
H90E10CT2302	1.192	1.192	1.189	1.194	1.195	1.192	0.002
HC230	1.194	1.195	1.189	1.194	1.194	1.193	0.002
H95E5C230	1.178	1.177	1.179	1.177	1.175	1.177	0.001
H90E10C230	1.189	1.194	1.189	1.192	1.189	1.191	0.002
H85E15C230	1.189	1.193	1.190	1.194	1.188	1.191	0.003
H80E20C230	1.192	1.190	1.186	1.191	1.192	1.190	0.002
H90E10C240	1.272	1.277	1.270	1.277	1.271	1.273	0.003

ข-2 การคำนวณความหนาแน่นทางทฤษฎี
ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมหาได้ดังสมการ

$$\text{ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสม} = \frac{100 \text{ (g)}}{\text{ปริมาตรรวมของของผสม (cm}^3\text{)}} \quad (\text{ข-1})$$

$$\text{ซึ่งปริมาตรรวมของพอลิเมอร์ผสม} = \frac{\% \text{wt of HDPE}}{\rho \text{ of HDPE}} + \frac{\% \text{wt of CaCO}_3}{\rho \text{ of CaCO}_3} + \frac{\% \text{wt of EVA}}{\rho \text{ of EVA}} \quad (\text{ข-2})$$

โดย

$$\text{ความหนาแน่นของ HDPE* } (\rho \text{ of HDPE}) = 0.966 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{ความหนาแน่นของ CaCO}_3^* (\rho \text{ of CaCO}_3) = 2.7 \text{ g/cm}^3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของ EVA* (ρ of EVA) = 0.951 g/cm^3

*ค่าความหนาแน่นที่ใช้เป็นข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตัวอย่างการคำนวณ

สูตร HC230 (สารผสม 100 g มี HDPE 70 g, CaCO_3 30 g)

ปริมาณ CaCO_3 ที่ได้จากผลของ TGA = 29.9 %wt

แสดงว่าในพอลิเมอร์ผสม 100 %wt มี HDPE = 70.1 %wt และมี CaCO_3 = 29.9 %wt

แทนค่าในสมการ ข-2

จะได้ปริมาตรรวมของพอลิเมอร์ผสม = 83.63 cm^3

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ข-1

จะได้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมสูตร HC230 = 1.195 g/cm^3

สูตร H90E10C2301 (สารผสม 100 g มี HDPE 63 g, EVA 7 g, CaCO_3 30 g)

ปริมาณ CaCO_3 ที่ได้จากผลของ TGA = 30.1 %wt

แสดงว่าในพอลิเมอร์ผสม 100 %wt มี HDPE = 62.9 %wt, EVA 7 g และมี CaCO_3 = 30.1 %wt

แทนค่าในสมการ ข-2

จะได้ปริมาตรรวมของพอลิเมอร์ผสม = 83.62 cm^3

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ข-1

จะได้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมสูตร H90E10C2301 = 1.195 g/cm^3

สูตร H90E10CT2301 (สารผสม 100 g มี HDPE 63 g, EVA 7 g, CaCO_3 30 g)

ปริมาณ CaCO_3 ที่ได้จากผลของ TGA = 29.8 %wt

แสดงว่าในพอลิเมอร์ผสม 100 %wt มี HDPE = 63.2 %wt, EVA 7 g และมี CaCO_3 = 29.8 %wt

แทนค่าในสมการ ข-2

จะได้ปริมาตรรวมของพอลิเมอร์ผสม = 83.82 cm^3

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ข-1

จะได้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมสูตร H90E10CTC2301 = 1.193 g/cm^3

สูตร H90E10C240 (สารผสม 100 g มี HDPE 54 g, EVA 6 g, CaCO_3 40 g)

ปริมาณ CaCO_3 ที่ได้จากผลของ TGA = 38.6 %wt

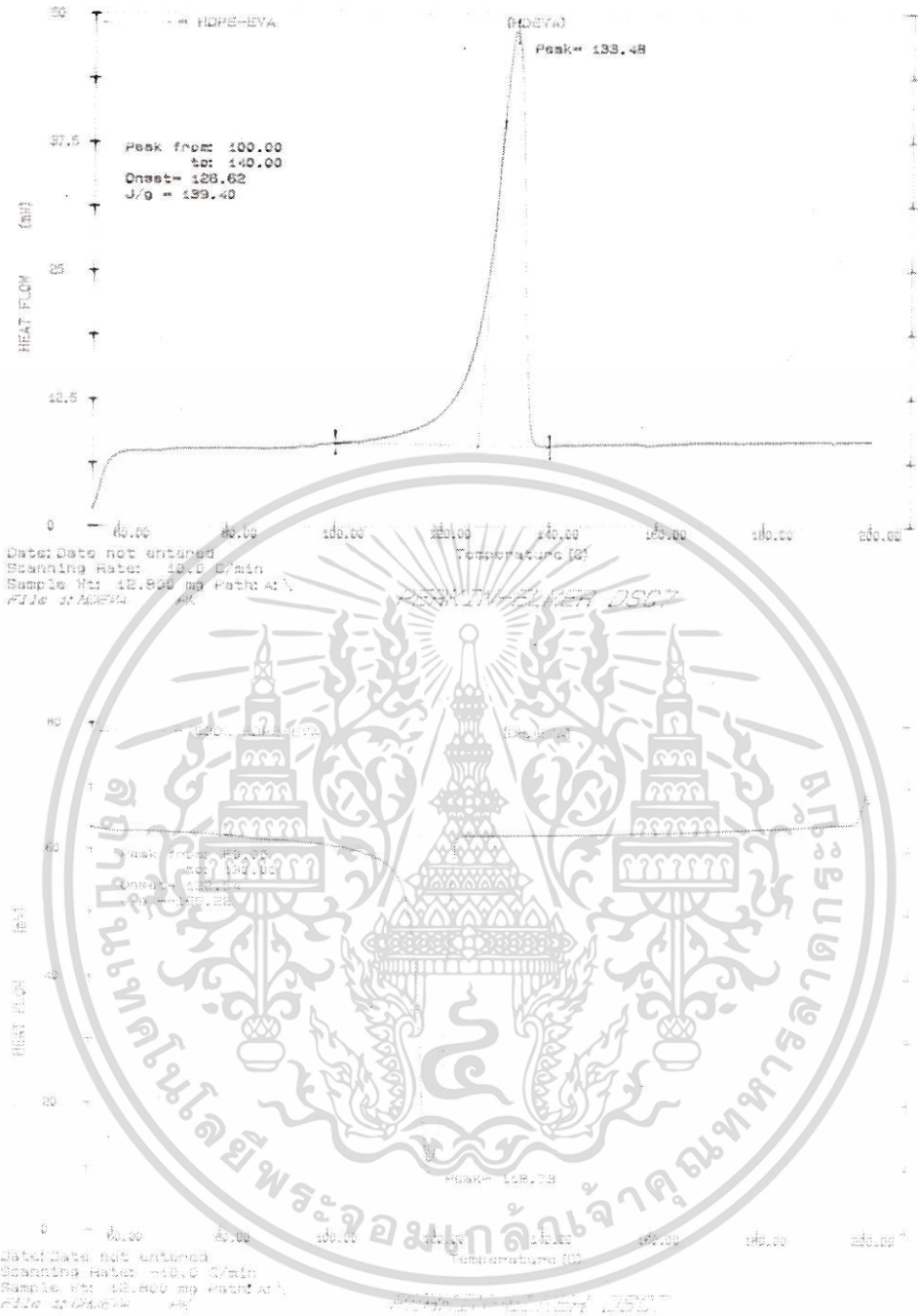
แสดงว่าในพอลิเมอร์ผสม 100 %wt มี HDPE = 55.4 %wt, EVA 6 g และมี CaCO_3 = 38.6 %wt

แทนค่าในสมการ ข-2

จะได้ปริมาตรรวมของพอลิเมอร์ผสม = 77.96 cm^3

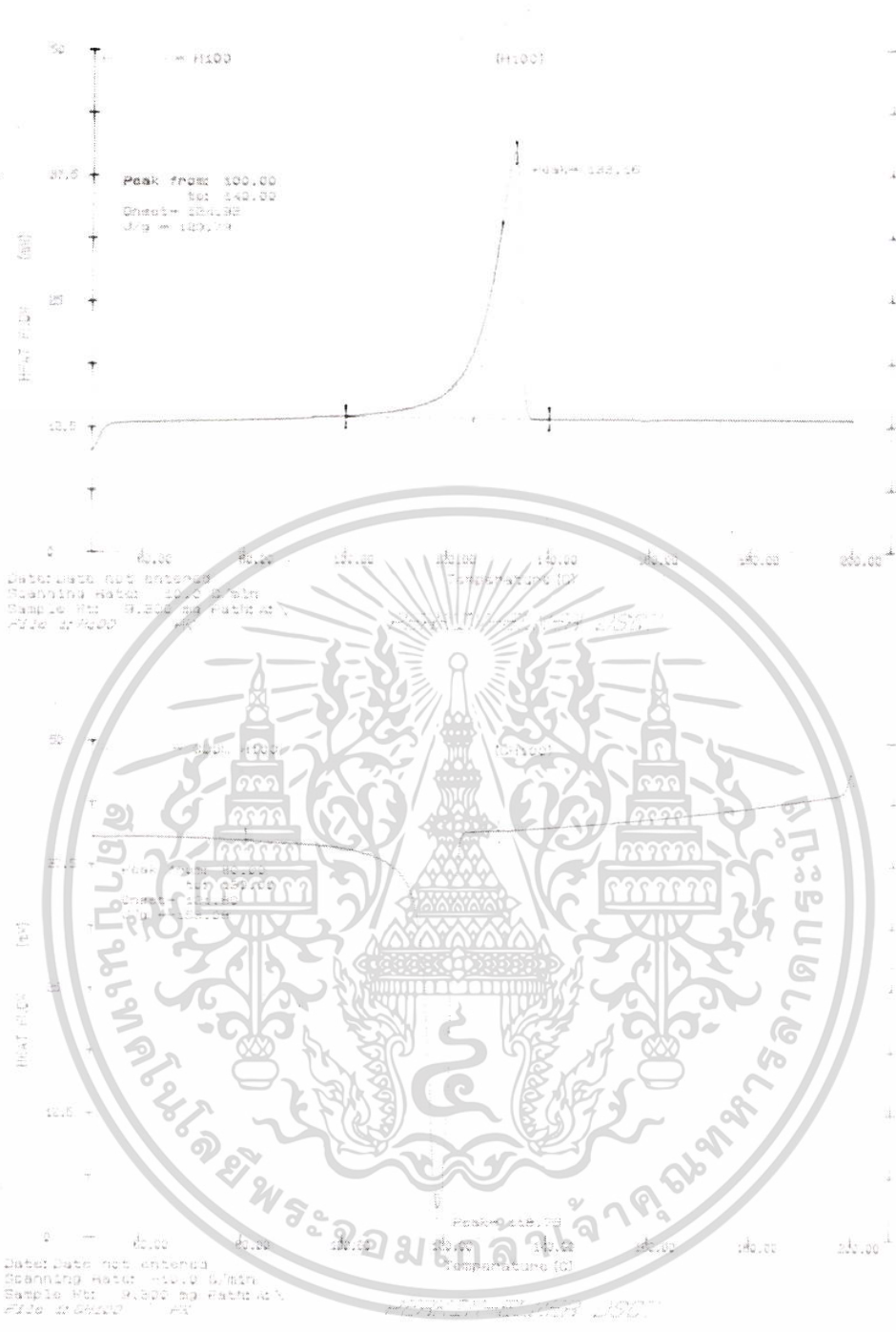
จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ข-1

จะได้ความหนาแน่นของพอลิเมอร์ผสมสูตร H90E10C240 = 1.283 g/cm^3



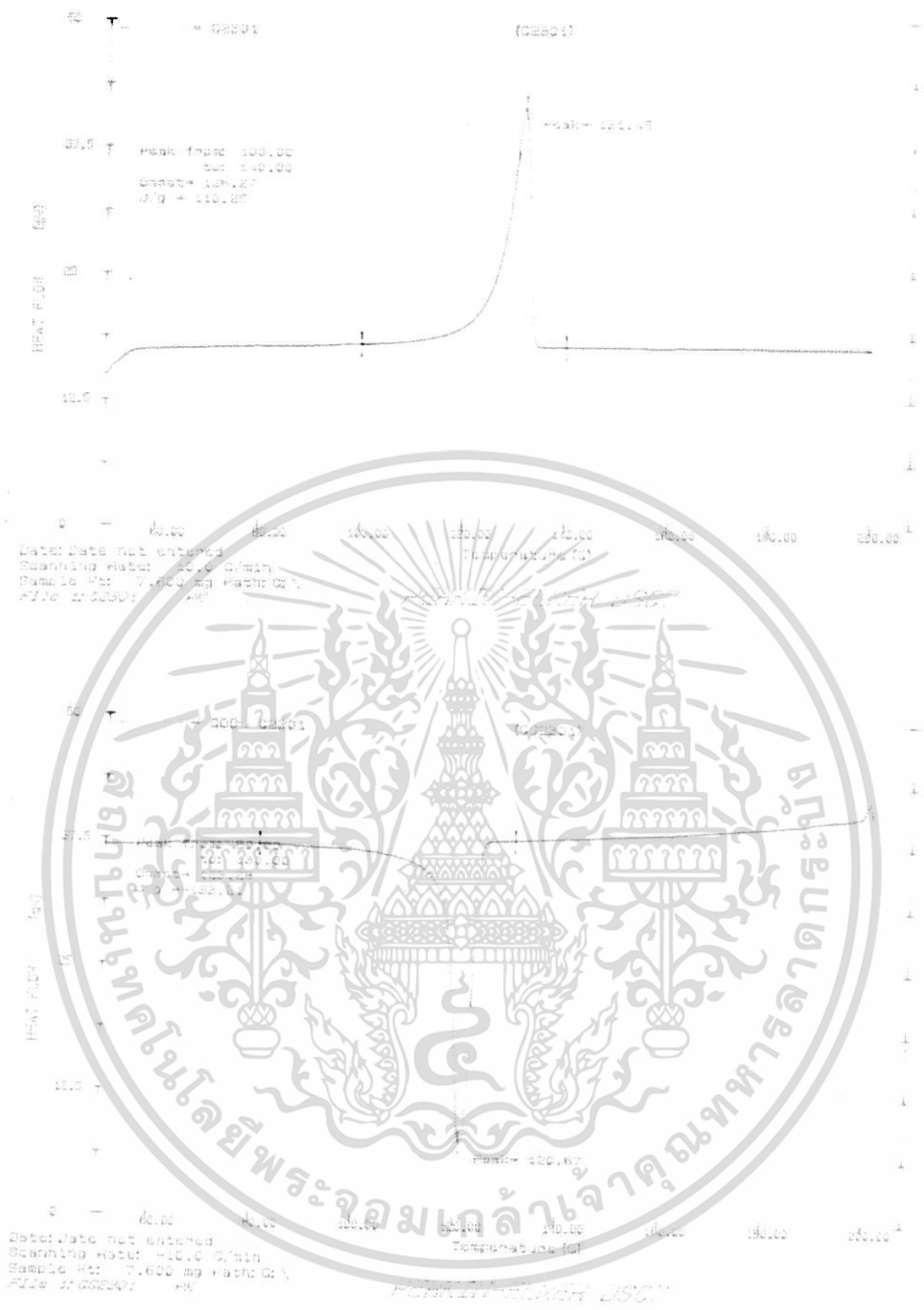
รูปที่ ค-2 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H80E20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



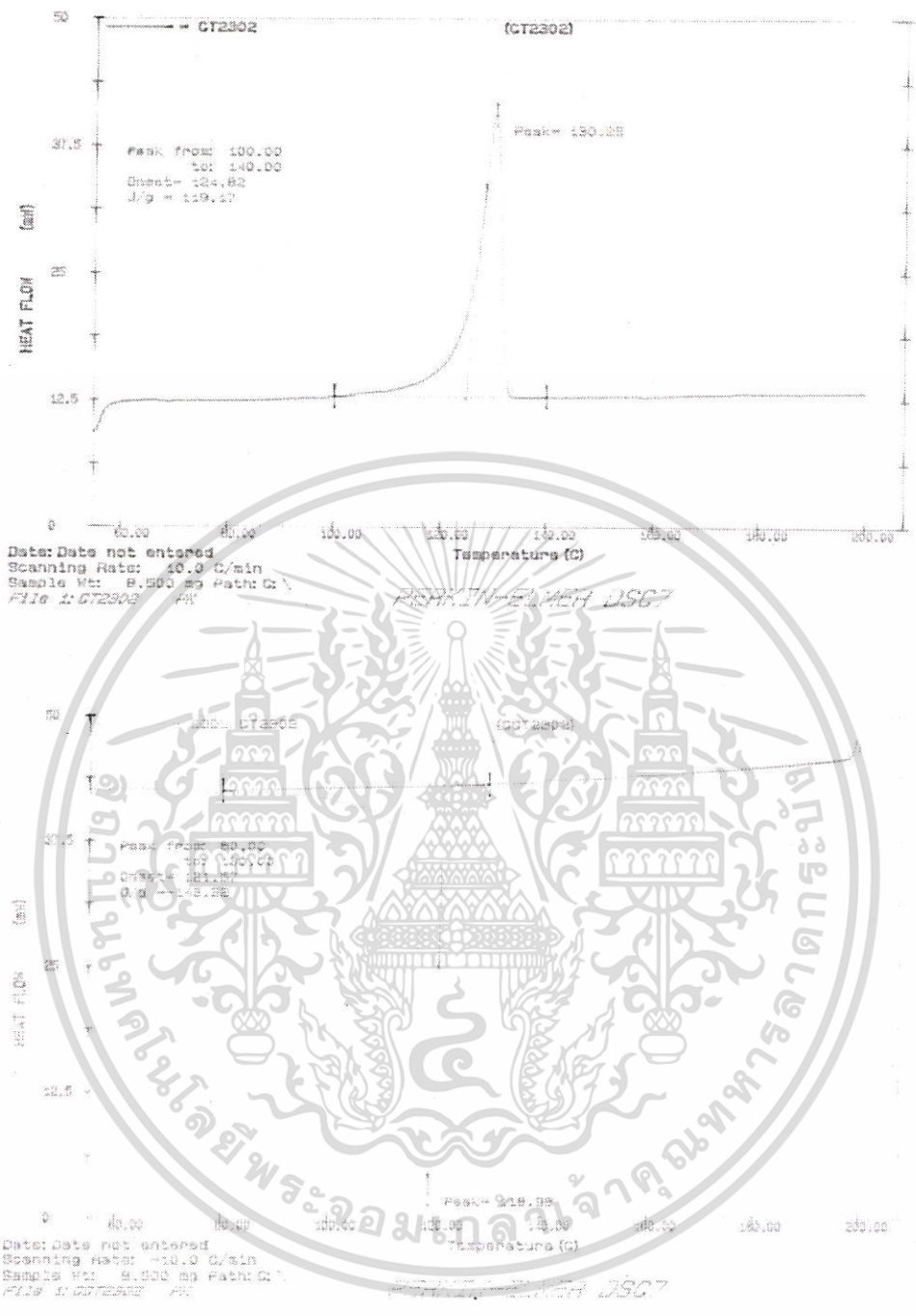
รูปที่ ค-3 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ HC230

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



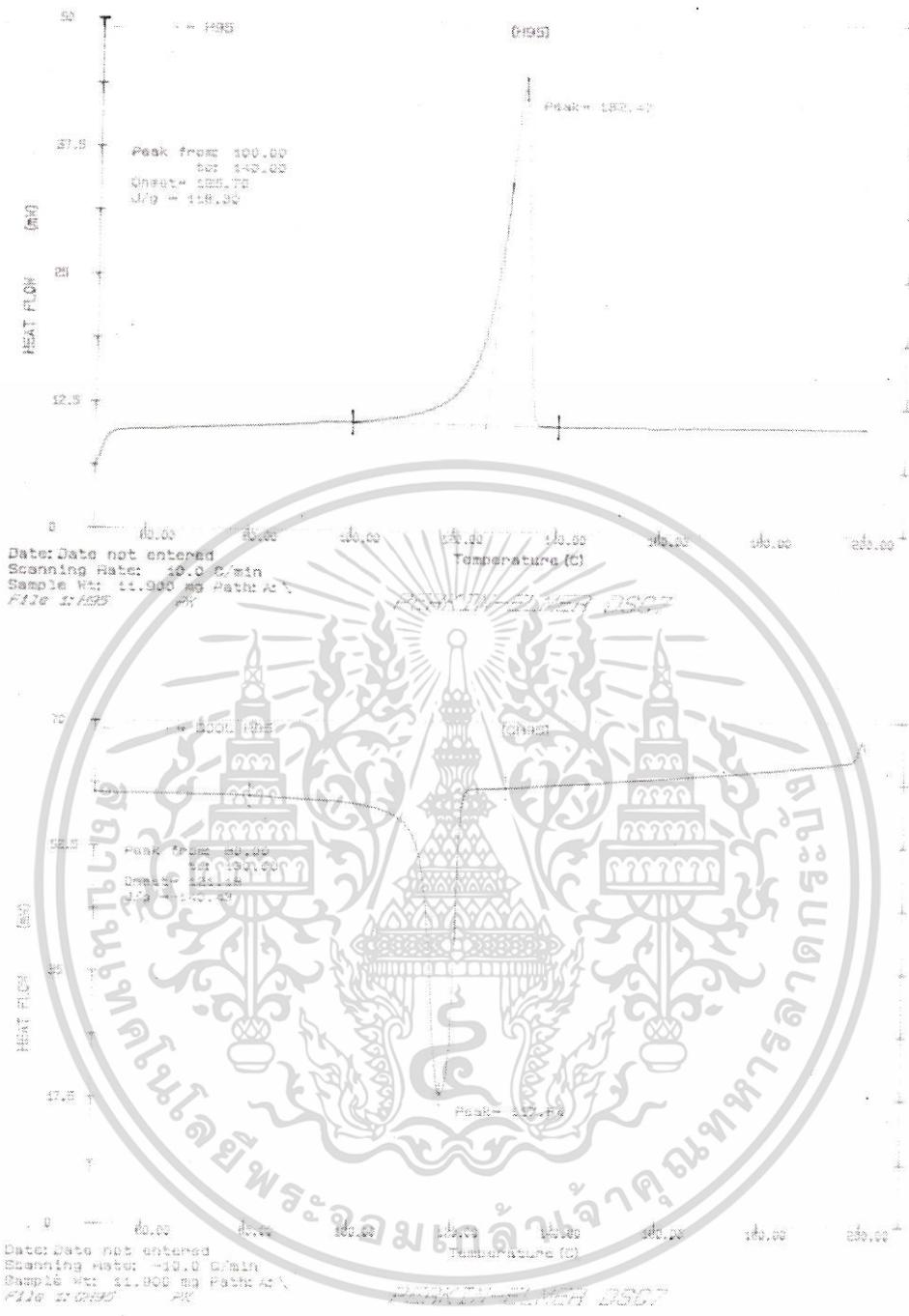
รูปที่ ค-4 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H90E10C2301

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



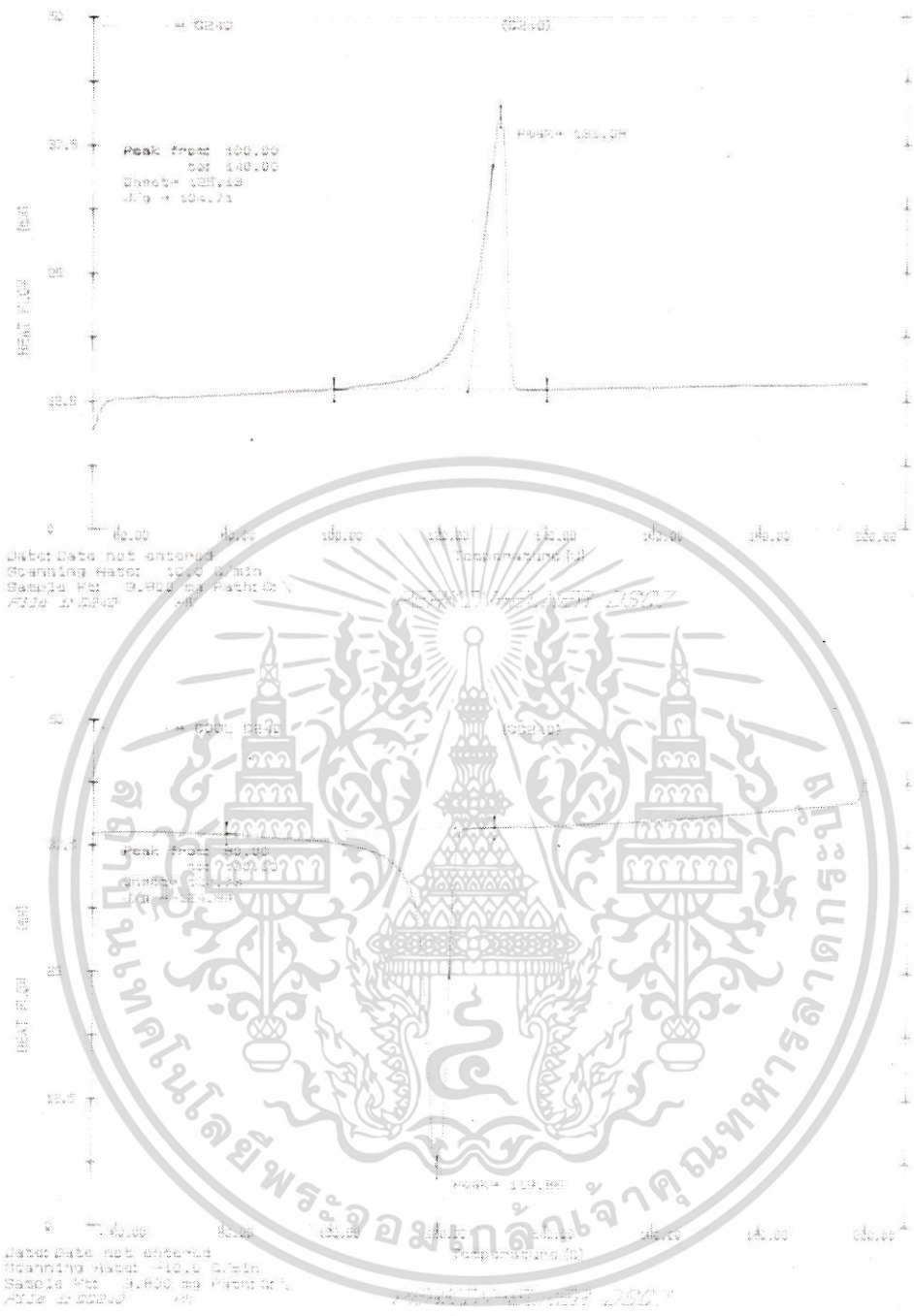
รูปที่ ค-6 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H90E10CT2302

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-7 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H95E5C230

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-11 ผลการทดสอบทางความร้อนจาก DSC ของ H90E10C240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

การทดสอบหาพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 2463 โดยในงานวิจัยนี้ใช้ระดับความสูงที่ชั้น 2 ถึง ชั้น 8 ด้านในอาคารพระจอมเกล้า คณะวิทยาศาสตร์และมีความแตกต่างของความสูงแต่ละระดับชั้น คือ 4 เมตร ซึ่งพื้นผิวที่ขูดตกกระทบคือพื้นปูนผิวเรียบจะได้ค่าความสูงเฉลี่ยที่ขูดแตก (Mean failure height) แล้วนำมาคำนวณค่าพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก (Drop weight impact energy) จาก

$$(\text{Drop weight impact energy}) = \text{Mean failure height} \times \text{Mean failure weight} \times g \quad (\text{ง-1})$$

เมื่อ

Mean failure height คือ ความสูงเฉลี่ย
 Mean failure weight คือ น้ำหนักขูดเฉลี่ย (บรรจุน้ำเต็มขวดและปิดฝาขวด)
 g คือ ความเร่งโน้มถ่วง (9.8 m/s^2)

โดย ความสูงเฉลี่ย (Mean failure height) สามารถคำนวณได้จาก

$$h = h_0 + d [(A/N) - 1/2] \quad (\text{ง-2})$$

เมื่อ

h คือ ความสูงเฉลี่ย
 d คือ ระยะห่างของระดับความสูง
 N คือ จำนวนชั้นงานขูดทั้งหมดที่แตก
 h_0 คือ ความสูงต่ำสุดที่ชั้นงานขูดเกิดการแตก
 A คือ $(i_0 \times n_0) + (i_1 \times n_1) + (i_2 \times n_2) + \dots + (i_k \times n_k)$

โดยที่

i คือ ลำดับความสูงเริ่มต้นที่ชั้นงานขูดเกิดการแตกถึงลำดับความสูงที่ k
 n คือ จำนวนชั้นงานขูดที่แตกในแต่ละระดับความสูง

ตารางที่ ง-1 พลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักของขวดแต่ละสูตรจำนวน 20 ขวด

สูตร	น้ำหนักขวดเฉลี่ย ที่บรรจุน้ำเต็มขวด และปิดฝาขวด (Kg)	ความสูงเฉลี่ย ที่ขวดแตก (m)	พลังงานกระแทกแบบ ทิ้งน้ำหนัก (J)
HDPE	0.1071	24.9	23.95
H80E20	0.1083	>28.7	>30.48
H90E10C2301	0.1118	6.7	7.35
H90E10CT2301	0.1114	6.7	7.32
H90E10CT2302	0.1107	6.7	7.27
HC230	0.1105	6.7	7.26
H95E5C230	0.1103	8.2	8.87
H90E10C230	0.1101	11.5	12.42
H85E15C230	0.1112	20.0	21.81
H80E20C230	0.1110	19.7	21.44
H90E10C240	0.1126	2.7	2.98

ตัวอย่างการคำนวณ

สูตร HDPE จากตาราง ง-2

ความสูงต่ำสุดที่ชั้นงานขวดเกิดการแตก (h_0) = 20.7 เมตร

ระยะห่างของระดับความสูง (d) = 4 เมตร

จำนวนชั้นงานขวดทั้งหมดที่แตก (N) = 9 ชั้น

และ A สามารถคำนวณได้จาก $(i_0 \times n_0) + (i_1 \times n_1) + (i_2 \times n_2) + \dots + (i_k \times n_k)$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad A &= (0 \times 1) + (1 \times 6) + (2 \times 2) \\ &= 0 + 6 + 4 \\ &= 10 \end{aligned}$$

แทนค่าในสมการ ง-2

$$\begin{aligned} \text{จะได้ค่าความสูงเฉลี่ย} &= 20.7 + 4[(10/9) - 1/2] \\ &= 22.81 \text{ เมตร} \end{aligned}$$

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ ง-1

จะได้ค่าพลังงานกระแทกแบบทิ้งน้ำหนักขวด HDPE = 23.95 จูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ง-2 จำนวนชิ้นงานที่แตกและไม่แตกของขวด HDPE

Drop Height, floor	bottles for Test (X = failure , O = non-failure)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2																				
3																				
4	O	O																		
5			O	O																
6					O	O									O	O		X	O	
7							O	O	X	X			X	X			X			
8										X	X									X

Floor	n_x	n_o	i	n_i	ln_i
4	0	2	...	...	...
5	0	2	...	...	...
6	1	5	0	1	0
7	6	2	1	6	6
8	2	0	2	2	4
Total	9 (N_x)	11 (N_o)	...	9 (N)	10(A)

ตารางที่ ง-3 จำนวนชิ้นงานที่แตกและไม่แตกของขวด HC230

Drop Height, floor	bottles for Test (X = failure , O = non-failure)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2						o	x	o	o							o	x	o		
3				x	x					x			x	x	x				x	x
4	x	x	x								x	x								
5																				
6																				
7																				
8																				

Floor

2

3

4

Total

n_x	n_o	i	n_i	ln_i
2	5	0	5	0
8	0	1	0	0
5	0	2	0	0
15	5	...	5(N)	0 (A)

ตารางที่ ง-4 จำนวนชิ้นงานที่แตกและไม่แตกของขวด H90E10C2301

Drop Height, floor	bottles for Test (X = failure , O = non-failure)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	o	o						o	o	o										
3			o	x	o	x	x				o	x	o	x	o	x	o	o	x	o
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				

Floor

	n_x	n_o	i	n_i	ln_i
2	0	5	...	...	...
3	7	8	0	7	0
4	0	0	1	0	0
5	0	0	2	0	0

Total

7 (N_x)13 (N_o)

...

7 (N)

0(A)

ตารางที่ ง-5 จำนวนชิ้นงานที่แตกและไม่แตกของขวด H90E10C2302

Drop Height, floor	bottles for Test (X = failure , O = non-failure)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2						o	o	o	o											
3										x	x	o	o			o	o			
4	x	o	x											x	x			o		
5				x	x														x	x
6																				
7																				
8																				

Floor

n_x	n_o	i	n_i	ln_i
0	4	...	...	...
2	4	0	2	0
4	2	1	4	4
4	0	2	4	8

Total

10 (N_x)

10 (N_o)

...

10 (N)

12(A)

ตารางที่ ง-6 จำนวนชิ้นงานที่แตกและไม่แตกของขวด H90E10CT2301

Drop Height, floor	bottles for Test (X = failure , O = non-failure)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	x	x	o	x	x	o	x	o	x	o							x	x	x	x
3											x	x	x	x	x	x				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				

Floor

2

3

4

5

Total

n_x	n_o	i	n_i	ln_i
10	4	0	0	0
0	6	1	6	0
0	0	2	0	0
0	0	3	0	0
10 (N_x)	10 (N_o)	...	6 (N)	0 (A)

ตารางที่ ง-7 จำนวนชิ้นงานที่แตกและไม่แตกของขวด H90E10CT2302

Drop Height, floor	bottles for Test (X = failure , O = non-failure)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	x	o	o	x	x	o	x	o	o	o										
3											o	x	x	o	x	x	x	x	x	o
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				

Floor

n_x	n_o	i	n_i	ln_i
4	6	0	0	0
7	3	1	3	0
0	0	2	0	0
0	0	3	0	0
Total	11 (N_x)	9 (N_o)	3 (N)	0 (A)

ตารางที่ ง-8 จำนวนชิ้นงานที่แตกและไม่แตกของขวด H95E5C230

Drop Height, floor	bottles for Test (X = failure , O = non-failure)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2						o	o	o	x						o	o	o			
3										x	x	x	x				o			
4	x	x	x	o	x													x	x	
5																				
6																				
7																				
8																				

Floor

	n_x	n_o	i	n_i	ln_i
2	1	6	0	6	0
3	5	1	1	1	1
4	6	1	2	1	2
5	0	0	3	0	0
Total	12 (N_x)	8 (N_o)	...	8 (N)	3(A)

ตารางที่ ง-9 จำนวนชิ้นงานที่แตกและไม่แตกของขวด H85E15C230

Drop Height, floor	bottles for Test (X = failure , O = non-failure)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2																				
3																				
4	O	O	O							O	O									
5				X	X	X			X			O	X	O	X					
6							X	X								X	O	X		
7																			X	X
8																				

Floor	n_x	n_o	i	n_i	ln_i
4	0	5	...	...	...
5	6	2	0	2	0
6	4	1	1	1	1
7	2	0	2	0	0
Total	12 (N_x)	8 (N_o)	...	3 (N)	1(A)

ตารางที่ ง-10 จำนวนชิ้นงานที่แตกและไม่แตกของขวด H80E20C230

Drop Height, floor	bottles for Test (X = failure , O = non-failure)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2																				
3																				
4	O	O	O	O						O	O									
5				O	X	X			X			O	X	O	X					
6							X	X								X	X	O		
7																			X	X
8																				

Floor	n_x	n_o	i	n_i	ln_i
4	0	5	...	...	...
5	5	3	0	3	0
6	4	1	1	1	1
7	2	0	2	0	0
Total	11 (N_x)	9 (N_o)	...	4 (N)	1 (A)

ตารางที่ ง-11 จำนวนชิ้นงานที่แตกและไม่แตกของขวด H90E10C240

Drop Height, floor	bottles for Test (X = failure , O = non-failure)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				

Floor

n_x	n_o	i	n_i	ln_i
20	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	2	0	0
0	0	3	0	0

Total

20 (N_x)

0 (N_o)

...

0 (N)

0(A)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายธัญวิทย์ ช่อนภู
วัน เดือน ปีเกิด	13 พฤษภาคม พ.ศ. 2535
ที่อยู่ปัจจุบัน	6 เทอดไท 67 ถนนพัฒนาการ แขวงบางหว้า เขตภาษีเจริญ จังหวัดกรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	2556 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม เกรดเฉลี่ย 2.43
ผลงานทางวิชาการ	1. Rukchonlatee, S. Sonpoo, T. Deesamer, S. and Sooknai, T. 2016 “Improvement of mechanical and water vapor permeability properties of LDPE/EVA/EVOH films with Zeolite A”. In The 11th SPSJ International Polymer Conference (IPC2016) . Japan. 2. Sonpoo, T. and Rukchonlatee, S. 2017 “Effect of Ethylene vinyl acetate on properties of bottles produced from High density polyethylene mixed with Calcium carbonate” 170-174. In The International Polymer Conference of Thailand (PCT-7) . Bangkok.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้