



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ขวดพลาสติกชนิดรีไซเคิลจากขวดนมที่ผลิตจาก HDPE: การเตรียม  
ความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติเชิงกล

Recycled Plastic Bottles from Milk Bottles made from HDPE:  
Preparation, Processability and Mechanical Properties

นางสุภาวรัตน์ รักขลธิ

RCH ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556  
TP คณะวิทยาศาสตร์  
1150 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ส 838 ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขหมู่ 130284 เลขทะเบียน 2 ใส.ย. 2557



ชื่อโครงการ ขวดพลาสติกชนิดรีไซเคิลจากขวดนมที่ผลิตจาก HDPE: การเตรียม ความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติเชิงกล

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2556 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2555 ถึง 30 กันยายน 2556

หัวหน้าโครงการวิจัย

นางสุภารัตน์ รัชชลธิ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์)

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของขวดรีไซเคิล พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ที่ผ่านการขึ้นรูปใหม่ด้วยกระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด ซึ่งศึกษาจากขวดนม (R-HDPE), HDPE และ HDPE ที่มีการเติมสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) 30% โดยน้ำหนัก โดยกรดสเตียริก (SA) 1% และ/หรือ IRGASURF<sup>®</sup> 2% โดยน้ำหนักของ  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารช่วยกระจายตัว ทำการผสมส่วนประกอบต่างๆ ด้วยเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่และขึ้นรูปขวดด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด แบ่งขวดที่ได้ไปทดสอบ 16 รอบ โดยทำการทดสอบขวดทุกๆ 3 รอบ ส่วนที่เหลือนำไปบดเพื่อนำไปขึ้นรูปขวด ทำซ้ำเช่นนี้จนครบของการขึ้นรูป พบว่าขวดสูตร R-HDPE และ HDPE มีค่าความหนืดที่สูงขึ้นเมื่อผ่านการรีไซเคิลขณะที่สูตรที่มีการผสม  $\text{CaCO}_3$  ได้ค่าความหนืดที่ค่อนข้างคงที่ ขณะที่การกระจายตัวของ  $\text{CaCO}_3$  ในเนื้อพอลิเมอร์พบว่าการกระจายตัวที่ดีขึ้นเมื่อผ่านการรีไซเคิลมากขึ้น น้ำหนักขวดของสูตรที่เติม  $\text{CaCO}_3$  มีค่ามากกว่าขวดสูตร R-HDPE และ HDPE ส่วนความหนาแน่นมีค่าน้อยกว่าขวดสูตร R-HDPE และ HDPE จากสมบัติทางความร้อนพบว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและเปอร์เซ็นต์และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของ HDPE จากขวดทุกสูตรใกล้เคียงกัน การเติม  $\text{CaCO}_3$  ไม่ส่งผลต่อขนาดและปริมาณการเกิดผลึกใน HDPE สำหรับสมบัติการรับแรงดึงพบว่าค่าความเค้นดึง ณ จุดขาด และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของขวด R-HDPE มีค่าใกล้เคียงกับ HDPE และสูงกว่า HDPE ที่เติม  $\text{CaCO}_3$  และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อผ่านการรีไซเคิล ส่วนค่ามอดูลัสมีค่าสูงขึ้นเมื่อเติม  $\text{CaCO}_3$  และมีแนวโน้มลดลงเมื่อผ่านการรีไซเคิล เนื่องมาจากในการรีไซเคิลพบปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ในพอลิเมอร์ลดลง สำหรับการใส่สารช่วยกระจายตัวกรดสเตียริกและ IRGASURF<sup>®</sup> ทำให้การไหลของพอลิเมอร์ดีขึ้น การกระจายตัวของ  $\text{CaCO}_3$  ดีขึ้น ขณะที่สมบัติการรับแรงดึงมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง

คำสำคัญ : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง, รีไซเคิล, ขวดนม, แคลเซียมคาร์บอเนต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** Recycled Plastic Bottles from Milk Bottles made from HDPE: Preparation, Processability and Mechanical Properties

**Researcher:** Mrs. Suparat Rukchonlatee

**Faculty:** Science

**Department:** Chemistry

## ABSTRACT

This research studied mechanical and thermal properties of recycled high density polyethylene (HDPE) bottles. The bottles were produced from recycled milk bottles (R-HDPE), virgin HDPE and HDPE with  $\text{CaCO}_3$  filler at a 30% by weight loading, 1% by weight of stearic acid and/or 2% by weight of IRGASURF<sup>®</sup> were employed as dispersing agents. All compounds were prepared using a twin-screw extruder and shaped to be bottles using an extrusion blow molder. Some produced bottles were tested the properties and the rest was ground and reproduced to be bottles. The bottle production was repeated until the 16<sup>th</sup> round. The bottle samples were tested every 3 recycle rounds. It was found that R-HDPE and HDPE samples gave higher viscosity with increasing bottle reproduction; however, the viscosity of HDPE with  $\text{CaCO}_3$  were unchanged. Better dispersion of  $\text{CaCO}_3$  was achieved with increasing recycles. The greater bottle weight and thinner bottle wall were gained from the HDPE with  $\text{CaCO}_3$ , compared with R-HDPE and HDPE. The crystalline melting temperature, the recrystalline temperature and %crystallinity of HDPE were not altered with bottle formulation or recycling. From the tensile tests, it was found that tensile strength at break and %elongation at break of R-HDPE and HDPE bottles were almost the same and higher than those of bottles from HDPE with  $\text{CaCO}_3$ . Those properties gave an increasing trend with increasing recycles. The modulus of the bottles increased with the presence of  $\text{CaCO}_3$  and had a reducing trend with increasing recycles. This may be because less  $\text{CaCO}_3$  in the bottle compounds was found with increasing recycles. The presence of 1% of stearic acid and/or 2% of IRGASURF<sup>®</sup> dispersing agents gave better flowability (i.e. lower viscosity) due to better dispersion of  $\text{CaCO}_3$ ; however, the tensile properties were not affected with the addition of these substances.

**Keywords:** HDPE, Recycle, Milk bottle, Calcium carbonate

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยเรื่อง ขวดพลาสติกชนิดรีไซเคิลเกิดจากขวดนมที่ผลิตจาก HDPE: การเตรียมความสามารถในการขึ้นรูป และสมบัติเชิงกล (Recycled Plastic Bottles from Milk Bottles made from HDPE: Preparation, Processability and Mechanical Properties) ดำเนินงานได้เป็นอย่างดี โดยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากทุนวิจัยเงินงบประมาณเงินรายได้ คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปี งบประมาณ ๒๕๕๖

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวณัฐริกา ใจสมบูรณ์ นางสาวพัชรินทร์ คำชมภู นายพัฒนชัย สอนกระโทก นางสาวพิมลา เตรียมล้ำเลิศ นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของสาขาวิชาเคมีทุกท่านในการอำนวยความสะดวก และช่วยให้งานสำเร็จลุล่วงด้วยดี

นางสุภารัตน์ รักชลธิ  
หัวหน้าโครงการ

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การรีไซเคิล.....	3
2.1.1 ความเป็นมา.....	3
2.1.2 พลาสติกรีไซเคิล.....	3
2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	5
2.2.1 ความเป็นมา.....	6
2.2.2 สมบัติทั่วไป.....	7
2.2.3 กระบวนการผลิตขวดนม.....	8
2.3 แคลเซียมคาร์บอเนต.....	8
2.3.1 ความเป็นมา.....	8
2.3.2 กระบวนการผลิตขวดนม.....	9
2.3.3 สมบัติทั่วไป.....	9
2.3.4 การประยุกต์ใช้งาน.....	10
2.4 สารช่วยกระจายตัว.....	10
2.4.1 กรดสเตียริก (Stearic Acid, SA).....	10
2.4.2 สารช่วยกระจายตัว IRGASURF® HL 560.....	11
2.5 กระบวนการผสม โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
<b>บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....</b>	<b>17</b>
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	17
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	17
3.3 วิธีการทดลอง.....	18
3.3.1 การผลิตขวดจากขวดนมที่ใช้แล้ว.....	18
3.3.2 การผลิตขวดจากเม็ด HDPE ผสม $\text{CaCO}_3$ .....	18
3.3.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูปขวด.....	19
3.3.4 การทดสอบสมบัติการไหล.....	20
3.3.5 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์.....	20
3.3.5.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ.....	20
3.3.5.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง.....	21
3.3.5.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน.....	21
3.3.5.4 การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ $\text{CaCO}_3$ .....	22
3.3.5.5 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของ $\text{CaCO}_3$ ในสารตัวอย่าง.....	22
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....</b>	<b>23</b>
4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ $\text{CaCO}_3$ ในแต่ละสูตร.....	23
4.2 การกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	24
4.3 สมบัติการไหล.....	26
4.4 น้ำหนักต่อขวดของผลิตภัณฑ์.....	28
4.5 ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์.....	29
4.6 สมบัติทางความร้อน.....	29
4.7 สมบัติการรับแรงดึง.....	30
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>35</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	35
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	36
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>37</b>
<b>ข้อมูลประวัติคณะวิจัย.....</b>	<b>40</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลของสารตัวเติม $\text{CaCO}_3$ ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม.....	16
3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง.....	17
3.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต.....	17
3.3 ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ในพอลิเมอร์ผสม.....	18
4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ $\text{CaCO}_3$ ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง.....	23
4.2 น้ำหนักของขวด.....	28
4.3 ความหนาของขวด.....	29
4.4 ค่าสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์.....	30



## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน.....	6
2.2 ขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัด.....	8
2.3 โครงสร้างทางเคมีของกรดสเตียริก.....	10
2.4 สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี $\text{CaCO}_3$ เป็นสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกัน.....	15
3.1 เครื่องอัตรัดชนิดเกลียวหนอนคู่.....	19
3.2 เครื่องเป่าขึ้นรูปพลาสติกชนิดอัตรัด.....	19
3.3 ลักษณะผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป.....	20
3.4 ลักษณะขวดที่ตัดส่วนเกินบริเวณปากขวดและก้นขวดสำหรับวัดน้ำหนักต่อขวด.....	20
3.5 ลักษณะชิ้นงานสำหรับวัดความหนาเมื่อ $x$ เป็นการวัดในแนวตั้งและ $y$ เป็นการวัดในแนวเส้นรอบวง.....	21
3.6 ชิ้นงานรูปคัมเบิ้ลที่ใช้ในการทดสอบ.....	21
4.1 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA สูตร $\text{Ca}_2\text{I}$ .....	23
4.2 ลักษณะพื้นผิวแตกหักของชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	26
4.3 ความสัมพันธ์ค่า Melt flow index กับขวดสูตรต่างๆ.....	26
4.4 การเสียดภาพทางความร้อนแบบเชื่อม โยง (ซ้าย) และตัดสาย โซ่ (ขวา).....	27
4.5 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ของชิ้นงาน.....	31
4.6 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ของชิ้นงาน.....	31
4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากของชิ้นงาน.....	32
4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของชิ้นงาน.....	32
4.9 ค่ามอดุลัสของชิ้นงาน.....	33

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการบริโภคนมอย่างเป็นทางการเป็นจำนวนมากในทุกเพศและทุกวัย เพราะนมเป็นอาหารที่สำคัญ และยังมีสารอาหารที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย จากการค้นคว้าพบว่าอุตสาหกรรมนมมีการขยายตัวอย่างมากในช่วงหลายปีที่ผ่านมา จากปี พ.ศ. 2527 ที่มีมูลค่าเพียง 1,300 ล้านบาท มาเป็น 250,000 ล้านบาท ในปี พ.ศ. 2540 จากสถิติ การสำรวจเมื่อปี พ.ศ. 2549 คนทั่วโลกมีการดื่มนมเฉลี่ย 100 ลิตร/คน/ปี และพบว่าคนไทยมีการดื่มนมเฉลี่ย 13.02 ลิตร/คน/ปี [1] นมสามารถนำมาผ่านกระบวนการได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย เช่น นมพาสเจอร์ไรซ์ นมยูเอชที นมสเตอริไลซ์ นมเปรี้ยว เป็นต้น เพื่อให้บริโภคสามารถเลือกบริโภคได้หลากหลาย

การออกแบบบรรจุภัณฑ์ของผลิตภัณฑ์นมขึ้นกับปัจจัยหลายประการ ทั้งความจำเป็นและความต้องการของผู้บริโภค การตลาดและความคุ้มค่า อันเป็นผลให้บรรจุภัณฑ์ในขณะนั้นจะต้องมีความเป็นเอกลักษณ์และรักษาความสดของสินค้า ในช่วงแรกจะใช้ขวดแก้วเป็นบรรจุภัณฑ์เมื่อคิดค้นฝาที่กันอากาศเข้าได้แก้วจึงเป็นบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมในขณะนั้น เมื่อเวลาผ่านไปเกิดการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี มีการพัฒนาบรรจุภัณฑ์นมโดยใช้กระดาษเคลือบ ผลิตเป็นกล่อง มีน้ำหนักเบา และที่สำคัญสามารถลดต้นทุนการผลิต มีการใช้บรรจุภัณฑ์ชนิดกระดาษต่อมาอีกหลายปี หลังจากนั้นได้พบถึงข้อจำกัดว่าบรรจุภัณฑ์ชนิดนี้สามารถใช้ได้เฉพาะระบบการพิมพ์แบบเฟล็กโซ จำกัดสีที่พิมพ์เพียง 4 สีเท่านั้น [2] และมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของบรรจุภัณฑ์ได้ง่ายในการระหว่างการขนส่ง แต่บรรจุภัณฑ์กระดาษสามารถย่อยสลายได้และง่ายต่อการรีไซเคิล จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาเนื่องจากขยะ จากนั้นได้มีการพัฒนานำพลาสติกเข้ามาทำเป็นบรรจุภัณฑ์ เพราะสามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) เป็นหนึ่งในพอลิเมอร์ที่มีการใช้งานในการผลิตบรรจุภัณฑ์ขวดนมพลาสติก เพราะมีสมบัติที่เหมาะสมในการบรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์จากนม เนื่องจาก HDPE ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่อุณหภูมิห้อง จึงปลอดภัยกับอาหารและยา ทำให้ปลอดภัยในการผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร และสามารถเลือกเกรดในการใช้งานได้มากจึงง่ายต่อการขึ้นรูป นอกจากนั้นพลาสติกยังมีสมบัติเด่นคือ น้ำหนักเบา ปิดฉลากได้ง่าย ราคาถูก และที่สำคัญเมื่อใช้ฝักันอากาศเข้าไปได้จะสามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานขึ้น รวมทั้งทนทานกว่ากระดาษและเบากว่าแก้วอีกด้วย จากความเฉื่อยของปฏิกิริยานั้นทำให้ HDPE นั้นย่อยสลายได้ยากจึงเกิดปัญหาขวดนมที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นขยะเกิดขึ้น และเพื่อเป็นการใช้ทรัพยากรพอลิเมอร์ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้คุ้มค่า จึงมีการเติมสารตัวเติม (Filler) แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก มีความขาว และมีหลายขนาดเพื่อเป็นการลดต้นทุนและเพิ่มอัตราการผลิต แต่เนื่องจาก HDPE นั้นไม่มีขี้ ด้วยเหตุนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เองทำให้สมบัติการยึดเกาะระหว่าง HDPE กับ  $\text{CaCO}_3$  ซึ่งเป็นวัสดุที่มีขี้ไม่ดี โดยสามารถแก้ปัญหาได้หลายวิธี เช่น การปรับปรุงพื้นผิว  $\text{CaCO}_3$  การใส่สารควบคู่ และการใส่สารช่วยผสม เป็นต้น

จากข้างต้นจำนวนขบวนการที่เพิ่มมากขึ้นจัดเป็นปัญหาที่เกิดขึ้น เนื่องจาก HDPE ไม่เกิดการย่อยสลาย จึงเกิดแนวความคิดในการนำขบวนการที่ใช้งานแล้วนำมาทำการรีไซเคิล เพื่อผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่และในการขึ้นรูปนั้นในกระบวนการต้องผ่านการให้ความร้อนแก่ขบวนการ จึงอาจมีผลต่อสมบัติของ HDPE ให้เปลี่ยนแปลงไป โครงการพิเศษฉบับนี้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของ HDPE ที่ทำการรีไซเคิลจากขบวนการพลาสเจอร์ไรซ์ ที่มีและไม่มีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติม

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ศึกษาสมบัติขบวนการที่ใช้แล้วและ HDPE ที่มีและไม่มีเติม  $\text{CaCO}_3$  30% โดยน้ำหนัก เพื่อความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของขบวนการ HDPE ที่เตรียมจาก ขบวนการพลาสติกที่ใช้แล้ว ในที่นี้เรียกชนิดรีไซเคิล (R-HDPE), HDPE และ HDPE ที่เติมสารตัวเติม  $\text{CaCO}_3$  ชนิดที่มีและไม่มีสารช่วยกระจายตัว แล้วนำมาขึ้นรูปขบวนการด้วยวิธีเป่าขึ้นรูปชนิดอครีค เป็นจำนวน 16 ครั้ง และทำการสุ่ม ตัวอย่างทุกๆ 3 ครั้งของการขึ้นรูปขบวนการ เพื่อทดสอบสมบัติดังนี้

- สมบัติการไหล
- สมบัติการรับแรงดึง
- สมบัติทางความร้อน
- การกระจายตัวของ  $\text{CaCO}_3$

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เป็นแนวทางที่สามารถลดปัญหาจากขบวนการที่ใช้แล้วและการลดต้นทุนการผลิต
- 2) เป็นแนวทางในการลดการใช้พอลิเมอร์ที่บริสุทธิ์ ที่อาจจะหมดลงในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การรีไซเคิล

##### 2.1.1 ความเป็นมา

ปัญหาขยะนับเป็นปัญหาใหญ่อย่างหนึ่งที่เราต้องเผชิญในยุคปัจจุบัน ในแต่ละวันมีของเหลือทิ้งเหลือใช้ที่เกิดจากการอุปโภคบริโภคเป็นจำนวนมากจนดูเหมือนว่าสักวันอาจจะเกิดการขยะล้นโลกก็เป็นได้ ในแต่ละประเทศมีขั้นตอนในการกำจัดขยะที่แตกต่างกันบ้างฝังกลบ บ้างเผากำจัด ซึ่งแต่ละวิธีส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันได้แทบทั้งสิ้น ยิ่งในขยะที่มีสารพิษปลอมปนอยู่อาจจะถึงขั้นไปเข้าพื้นที่ในประเทศด้อยพัฒนาเพื่อฝังกลบขยะ ขยะบ้างประเภทสร้างปัญหาให้มนุษย์และโลกในระยะยาว เพราะไม่สามารถย่อยสลายลงได้ในระยะเวลาอันรวดเร็ว ต้องใช้เวลานานนับร้อยนับพันปี เพื่อย่อยสลาย เช่น พลาสติกต่างๆ

จนกระทั่ง แนวคิดเกี่ยวกับการรีไซเคิล (Recycle) ได้เกิดขึ้น ซึ่งกลายเป็นทางออกในการลดขยะ หรือสิ่งเหลือใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แม้จะไม่ลดไปถึงขั้นที่ทำให้การกำจัดขยะเป็นไปได้อย่างมีเด็ดขาด แต่แนวคิดนี้ช่วยส่งเสริมให้เกิดขยะใหม่ลดจำนวนลงได้มาก [3]

“การรีไซเคิล หมายถึง การปรับปรุงคุณภาพของวัสดุที่ใช้แล้ว ให้กลับมามีคุณภาพดั้งเดิม และสามารถใช้ประโยชน์ได้เหมือนเดิมทุกประการ” [4]

##### 2.1.2 พลาสติกรีไซเคิล

พลาสติกที่ใช้กันมีหลายชนิด พลาสติกที่รีไซเคิลได้ คือ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ซึ่ง เป็นพลาสติกที่อ่อนตัวเมื่อถูกความร้อน และแข็งตัวเมื่อเย็นลง พลาสติกประเภทนี้สามารถนำมหลอมและขึ้นรูปใหม่ได้ โดยสังเกตได้จาก ก้นขวดซึ่งมักจะใส่สัญลักษณ์ว่า รีไซเคิลได้ และใส่หมายเลขชนิดของพลาสติกนั้นไว้ [5]

1. พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Poly (ethylene terephthalate), PET) ทนแรงกระแทก ไม่เปราะแตกง่าย สามารถทำให้ใสมาก มองเห็นสิ่งที่บรรจุอยู่ภายในจึงนิยมใช้บรรจุน้ำดื่ม น้ำมันพืช และเครื่องดื่ม นอกจากนี้ขวด PET ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของก๊าซได้เป็นอย่างดี จึงใช้เป็นภาชนะบรรจุน้ำอัดลม PET สามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ โดยนิยมนำมาผลิตเป็นเส้นใยสำหรับทำเสื้อกันหนาว พรม และเส้นใยสังเคราะห์สำหรับยัดหมอน หรือเส้นใยสำหรับเล่นสกี



2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นสายตรง ค่อนข้างแข็งแต่ยืดได้มาก ไม่แตกง่าย ส่วนใหญ่ทำให้มีสีสันทสวยงาม ยกเว้นขวดที่ใช้บรรจุน้ำดื่ม ซึ่งจะขุ่นกว่าขวด PET ราคาถูกขึ้นรูปได้ง่าย ทนสารเคมีจึงนิยมใช้ทำบรรจุภัณฑ์สำหรับน้ำยาทำความสะอาด แชมพูสระผม แป้งเด็ก และถุงหูหิ้ว นอกจากนี้ภาชนะที่ทำจาก HDPE ยังมีสมบัติป้องกันการแพร่ผ่านของความชื้นได้ดี จึงใช้เป็นขวดนมเพื่อยืดอายุของนมให้นานขึ้น HDPE สามารถนำกลับมารีไซเคิลเพื่อผลิตขวดต่างๆ เช่น ขวดใส่น้ำยาซักผ้า แท่งไม้เทียมเพื่อใช้ทำรั้วหรือม้านั่งในสวน



3. พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly (vinyl chloride), PVC) เป็นพลาสติกแข็งใช้ทำท่อ เช่น ท่อน้ำประปา แต่สามารถทำให้นิ่มโดยใส่สารพลาสติกไซเซอร์ ใช้ทำสายยางใส แผ่นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ม่านในห้องอาบน้ำ แผ่นกระเบื้องยาง แผ่นพลาสติกปูโต๊ะ ขวดใสแชมพูสระผม PVC เป็นพลาสติกที่มีสมบัติหลากหลาย สามารถนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อีกมาก เช่น ประตู หน้าต่าง วงกบ และหนังเทียม PVC สามารถนำกลับมารีไซเคิลเพื่อผลิตท่อประปาสำหรับการเกษตร กรวยจราจร และเฟอร์นิเจอร์ หรือม้านั่งพลาสติก



4. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE) เป็นพลาสติกที่นิ่มสามารถยืดตัวได้มาก มีความใส นิยมนำมาทำเป็นฟิล์มสำหรับห่ออาหารและห่อของ ถุงใส่ขนมปัง และถุงเย็นสำหรับบรรจุอาหาร LDPE สามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ โดยใช้ผลิตเป็นถุงดำสำหรับใส่ขยะ ถุงหูหิ้ว หรือถังขยะ



5. พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นพลาสติกที่แข็ง ทนต่อแรงกระแทกได้ดี ทนต่อสารเคมี ความร้อน และน้ำมัน ทำให้มีสีสันทสวยงามได้ ส่วนใหญ่นิยมนำมาทำภาชนะบรรจุอาหาร เช่น ถ้วย ชาม จาน ถัง ตะกร้า หรือกระบอกสำหรับใส่น้ำแช่เย็น PP สามารถนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ โดยนิยมนำมาผลิตเป็นกล่องเบตเตอร์รถยนต์ ชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น กันชน และกรวยสำหรับน้ำมัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



6. พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) เป็นพลาสติกที่แข็ง ใส แต่เปราะ และแตกง่าย ราคาถูก นิยมนำมาทำเป็นภาชนะบรรจุของใช้ เช่น เทปเพลง สำลี หรือของแห้ง เช่น หมูแผ่น หมูหยอง และคุกกี้ เนื่องจาก PS เปราะและแตกง่าย จึงไม่นิยมนำพลาสติกประเภทนี้มาบรรจุน้ำดื่มหรือแชมพูสระผม เนื่องจากอาจลื่นตกแตกได้ มีการนำพลาสติกประเภทนี้มาใช้ทำภาชนะหรือถาดโฟมสำหรับบรรจุอาหาร โฟมจะมีน้ำหนักที่เบาเนื่องจากประกอบด้วย PS ประมาณ 2-5 % เท่านั้น ส่วนที่เหลือเป็นอากาศที่แทรกอยู่ในช่องว่าง PS สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยนิยมผลิตเป็นไม้แขวนเสื้อ กล่องวีดีโอ ไม้บรรทัด หรือ ของใช้อื่นๆ



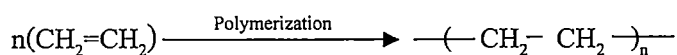
7. พลาสติกอื่นๆ ที่ไม่ใช่ 6 ชนิดแรก หรือไม่ทราบว่าเป็นพลาสติกชนิดใด ปัจจุบันมีพลาสติกหลายชนิดให้เลือกใช้



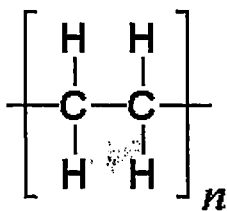
พลาสติกที่ใช้ในครัวเรือนส่วนใหญ่สามารถนำกลับมารีไซเคิลเพื่อหลอมใช้ใหม่ได้ การมีสัญลักษณ์ตัวเลข ทำให้สามารถแยกพลาสติกออกเป็นชนิดต่างๆ เพื่อนำกลับมารีไซเคิลใช้ใหม่ได้ง่ายขึ้น นอกจากจะมีตัวเลขระบุแล้ว ควรใส่สัญลักษณ์ภาษาอังกฤษระบุชนิดของพลาสติกนั้นๆ ไว้ เพื่อสะดวกในการแยกและนำกลับมารีไซเคิล เช่น พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC)

## 2.2 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง [6]

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) ผลิตจากแก๊สเอทิลีนที่ผ่านกระบวนการเติมสาร ที่ทำให้สามารถจับตัวกันเป็นพอลิเมอร์ได้ภายใต้แรงดันขนาดต่างๆ ทำให้ได้พอลิเมอร์ที่มีขนาดตั้งแต่น้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ลักษณะเป็นน้ำมัน หรือไขข้น) ไปจนถึงขนาดโมเลกุลสูง (ลักษณะเป็นของแข็งที่ยืดหยุ่นได้) ซึ่งได้มาจากกระบวนการกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ของเอทิลีนดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของพอลิเอทิลีน [6]

HDPE มีโครงสร้างทางเคมีที่เป็นกิ่งสาขา (Branching) น้อย จึงมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ค่อนข้างสูง มีความแข็งแรง เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้มีความแข็งและความเหนียวเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาแน่นลดลง จะทำให้ผิวแตกกร่อนได้ง่าย ทนความร้อนได้ไม่มากนัก แต่ทนสารเคมีได้ดี โดยทนความร้อน (ทนอุณหภูมิสูงถึง  $110^{\circ}\text{C}$  และทนอุณหภูมิสูงถึง  $120^{\circ}\text{C}$  ได้ในช่วงสั้นๆ) แต่ไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงในหม้ออัดไอน้ำ (Autoclave) เท่าพลาสติกชนิด PP และทนต่อสารเคมีมากกว่า LDPE ทนต่อสภาพอากาศได้ดีพอสมควร แต่เมื่อเป็นฟิล์มบางอากาศสามารถซึมผ่านได้

HDPE มีสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีความลื่นมันในตัว มีความเหนียวและยืดหยุ่น ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำจึงลอยน้ำได้ สามารถผสมให้มีสีต่างๆ ได้ [6]

### 2.2.1 ความเป็นมา

พอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ Polythene) ถูกค้นพบในปี 1933 โดย Reginald Gibson and Eric Fawcett แห่งบริษัท Imperial Chemical Industries (ICI) ในประเทศอังกฤษ วัสดุประเภทนี้มี 2 รูปแบบ คือ LDPE และ HDPE โดย LDPE ใช้ผลิตแผ่นฟิล์มและวัสดุสำหรับบรรจุหีบห่อ ส่วน HDPE มีความแข็งแรงกว่า ใช้ผลิตบรรจุภัณฑ์ท่อน้ำและอุปกรณ์ยานยนต์

HDPE เป็นวัสดุประเภท Polyethylene Thermoplastic (Thermoplastic คือพลาสติกที่สามารถนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ได้) ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม จัดเป็นพลาสติกที่ได้รับสัญลักษณ์เลข 2 ซึ่งหมายถึง Resin Identification Code 2 เพื่อความสะดวกสำหรับการจำแนกชนิดของพลาสติกในการนำกลับไปเวียนทำใหม่ (Recycle)

ในปี 1945 Earl Tupper แห่งบริษัท DuPont® สังเกตว่าพอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีความเหนียว ทนทาน สามารถนำมาหล่อในแบบพิมพ์ให้มีขนาด รูปร่าง และผสมสีให้มีสีต่างๆ ได้ จึงเริ่มด้วยการผลิตแก้วน้ำพลาสติก และชามอ่าง ซึ่งได้รับความนิยมเนื่องจากมีน้ำหนักเบา สีสนำใช้ และต่อมาได้ผลิตภาชนะที่มีฝาปิดได้ด้วย ซึ่งเป็นที่มาของภาชนะบรรจุอาหารที่ได้รับความนิยมจากแม่บ้านในสมัยนั้น ในชื่อของทัปเปอร์แวร์ (Tupperware®) นั่นเอง

HDPE มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมากกว่า PVC และ PC ที่อาจปลดปล่อย Bisphenol A ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และมีข้อดีเหนือภาชนะที่ทำจากแก้ว โลหะ และกระดาษแข็ง เนื่องจากภาชนะที่ใช้ในการบรรจุอาหารต้องสัมผัสกับอาหารโดยตรง ผู้บริโภคจึงควรคำนึงถึงความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลอดภัยของภาชนะเหล่านั้น ว่ามีการทำปฏิกิริยากับอาหารที่บรรจุอยู่หรือไม่ และมีการปลดปล่อยสารต่าง ๆ ออกมาสู่อาหารหรือไม่ [6]

### 2.2.2 สมบัติทั่วไป [7]

HDPE จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกประเภทพอลิเอทิลีน สามารถดูดซึมน้ำได้ต่ำมาก ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ดี ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ค่อนข้างดี และมีความปลอดภัย สามารถใช้กับอาหารและยาได้ ซึ่งสมบัติต่างๆขึ้นกับตัวแปรดังนี้

#### ความหนาแน่น

ความหนาแน่นเป็นตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาสมบัติของ HDPE โดย HDPE จะมีความหนาแน่นประมาณ  $940-965 \text{ kg/m}^3$  พบว่าเมื่อความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้สมบัติต่อไปนี้ดีขึ้น เช่น ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength) การคงรูปหรือความแข็งแรงแรง (Rigidity) ความแข็งกด (Hardness) ความทนทานต่อความร้อน (Heat Resistance) ความทนต่อสารเคมี และความทนต่อการซึมผ่านของก๊าซ รวมทั้งสมบัติทางกายภาพต่างๆ ดีขึ้น [8]

#### ค่าครรชนิกการไหล

ครรชนิกการไหลเป็นการประเมินค่าน้ำหนักโมเลกุล ถ้าครรชนิกการไหลสูงแสดงว่ามีความหนืดน้อย สายโซ่โมเลกุลสั้น น้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ถ้าครรชนิกการไหลต่ำแสดงว่ามีความหนืดสูงหรือน้ำหนักโมเลกุลสูง ปกติ HDPE จะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง  $40,000-300,000$  ซึ่งมีค่าครรชนิกการไหลอยู่ในช่วง  $0.02-100 \text{ กรัม/10นาท}$  ครรชนิกการไหลมีผลต่อสมบัติเชิงกลของ HDPE เช่น ความสามารถในการขึ้นรูปถ้าค่าครรชนิกการไหลมาก การขึ้นรูปจะทำได้ง่ายเพราะความหนืดลดน้อยลง แต่สมบัติอื่นๆ เช่น ความต้านทานต่อแรงกระแทกจะลดลง เพราะน้ำหนักโมเลกุลลดลง สายโซ่โมเลกุลมีขนาดสั้น ดังนั้นการรับแรงจึงไม่ดีเท่ากับโมเลกุลสายโซ่ยาว ในขณะที่ HDPE ที่มีช่วงของน้ำหนักโมเลกุลปานกลาง สูงจะมีสมบัติทนทานต่อแรงกระแทกดีมากแต่ขึ้นรูปยาก [8]

#### การกระจายน้ำหนักโมเลกุล

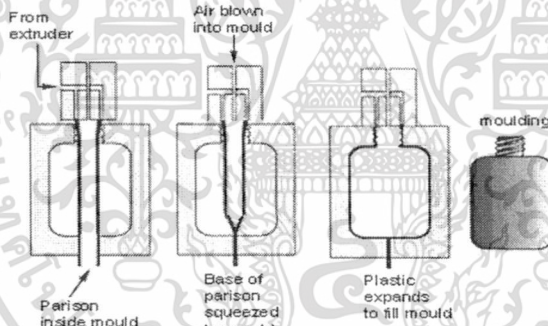
การกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ HDPE จะอยู่ในช่วงแคบหรือกว้าง ขึ้นอยู่กับตัวเร่งปฏิกิริยาแลกระบวนกรแปรรูปที่ใช้ พบว่าถ้าการกระจายตัวกว้างจะทำให้ขึ้นรูปง่าย ขณะเดียวกันจะทำให้หดตัว และการงอตัวเพิ่มขึ้น เพราะสายโซ่ขนาดโมเลกุลไม่เท่ากันมีทั้งสายโซ่สั้นสายโซ่ยาวอยู่ด้วยกัน เวลาขึ้นงานได้รับความเย็นการตกผลึกจะไม่เท่ากัน ส่วนความต้านทานต่อแรงกระแทกจะลดลงโดยปกติถ้าทำการผลิต HDPE ที่มีค่าครรชนิกการไหลต่ำหรือน้ำหนักโมเลกุลสูงจะทำให้ขึ้นรูปได้ลำบาก ดังนั้นจึงต้องอาศัยการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่กว้างมากขึ้นมาช่วย โดยการนำ HDPE ที่มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลที่มีช่วงแคบ 2 ชนิดมารวมกัน [8]

## สารเติมแต่ง

พลาสติกจำนวนมากจำเป็นต้องเติมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ เพื่อให้สมบัติต่างๆ ดีขึ้น เช่น เติมสารปรับปรุงความทนทานต่อแรงกระแทกเพื่อเพิ่มความเหนียว เส้นใยเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรง สารปรับปรุงสมบัติพลาสติก (Plastic Modifier) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น สารตัวเติมเพื่อเพิ่มเนื้อและลดต้นทุนในการผลิต และสารให้สีเพื่อทำให้มีสีที่สวยงามน่าใช้ เป็นต้น [8]

### 2.2.3 กระบวนการผลิตขวดนม

การเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัดคือการขึ้นรูปพลาสติกแบบหนึ่งที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกลวง เช่น ขวด และบรรจุภัณฑ์ต่างๆ เนื่องจากความต้องการบรรจุภัณฑ์ประเภทพลาสติกมีปริมาณมาก ดังนั้น กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัดจึงมีความสำคัญในอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ซึ่งหลักการทำงานของเครื่องเป่าชนิดอัตรัดจะเริ่มจากเม็ดพลาสติกได้รับความร้อนจนหลอม และได้รับแรงเฉือนจากเกลียวหมุน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ออกจากหัวดาวยูรูปท่อทรงกระบอกพลาสติกที่ได้ไหลผ่านจากหัวดาวยู เรียกว่า พาริซัน (Parison) หลังจากนั้นแม่พิมพ์จะประกบพาริซันและเป่าอากาศเข้าสู่พาริซันที่อยู่ภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะเกิดแรงดันให้พาริซันเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามแม่พิมพ์ โดยในแม่พิมพ์จะมีระบบหล่อเย็นให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในแม่พิมพ์ เมื่อผลิตภัณฑ์เย็นตัวแม่พิมพ์จะเปิดออกเพื่อนำผลิตรายออกจากแม่พิมพ์ [9]



ภาพที่ 2.2 ขั้นตอนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัด [9]

## 2.3 แคลเซียมคาร์บอเนต

### 2.3.1 ความเป็นมา

ในปัจจุบันนี้มีการใช้สารตัวเติม (Filler) ผสมลงในพลาสติกกันอย่างกว้างขวางทั้งนี้เพื่อช่วยเพิ่มความหนาแน่น และลดต้นทุน หรืออาจช่วยให้สมบัติบางประการของพลาสติกดีขึ้น ในการพิจารณาที่จะนำเอาสารตัวเติมมาใช้จะต้องคำนึงถึงผลต่างๆ หลายประการ เช่น การกระจายตัวของสารในเนื้อพลาสติก การขัดสีของสารกับเครื่องจักร สมบัติต่างๆ เมื่อผสมสารตัวเติมแล้ว รวมทั้งปัญหาด้านความปลอดภัยจากละอองฝุ่น และที่สำคัญที่สุดคือด้านราคา  $\text{CaCO}_3$  มีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาใช้งาน เพราะราคาถูก ไม่เป็นพิษ มีความขาว มีหลายขนาด และมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารธรรมชาติที่เกิดจากการตกตะกอนของหินในทะเลเปลือกหอยและโครงกระดูกสัตว์น้ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\text{CaCO}_3$  เป็นสารทั่วไปที่ใช้เติมลงในพลาสติก ซึ่งมีหลายชื่อโดยแบ่งตามแหล่งกำเนิด เช่น หินปูน หินปะการัง เปลือกหอย และชอล์ค หรือแบ่งตามลักษณะโครงสร้างผลึก เช่น แคลไซต์ (Calcite) อะราโกไนต์ (Aragonite) และเมื่อมีแมกนีเซียมคาร์บอเนตอยู่ในโครงสร้างผลึกจะเรียกว่า โดโลไมท์ (Dolomite,  $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ ) [10]

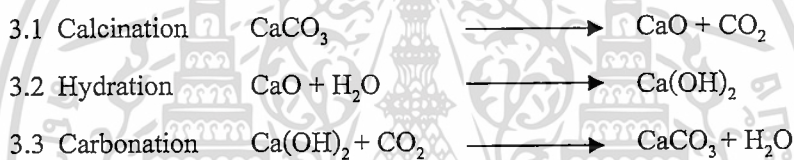
### 2.3.2 กระบวนการผลิต

ในทางการค้าได้มีการผลิต  $\text{CaCO}_3$  เป็น 3 เกรด แลใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติกคือ แบบบดหยาบ แบบลดละเอียด และแบบตะกอน

การสังเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตมี 3 วิธี

1. Solvay Process ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )
2. Sodium Hydroxide Process
3. Carbonation Process

ซึ่ง Carbonation Process เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด และได้  $\text{CaCO}_3$  โดยตรงมี 3 ขั้นตอน ดังนี้



กระบวนการเริ่มจากการเผา หินปูน ที่อุณหภูมิประมาณ  $900^\circ\text{C}$  จะได้ คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) หลังจากนั้นทำการแยกให้บริสุทธิ์ขึ้น  $\text{CaO}$  จะกลายเป็นสารแขวนลอยของหินปูน (Milk of Lime) และน้ำ ผ่านก๊าซ  $\text{CO}_2$  ในสารแขวนลอยของหินปูนได้  $\text{CaCO}_3$  แยกอนุภาคด้วยการกรองโดยตัวกรองสูญญากาศแบบหมุนและตัวกรองใช้ความดัน ช่วยในการกำจัดน้ำ หลังจากนั้นทำให้แห้งโดยใช้ช่องพ่นละอองน้ำแบบหมุน (Rotary Tunnel Spray) หรือการทำให้แห้งแบบรวดเร็ว ในกระบวนการมักจะได้  $\text{CaCO}_3$  ในรูปของอะราโกไนต์ มีขนาดอนุภาค 0.2-2.0 ไมครอน ซึ่งสถานะของปฏิกิริยาจะมีผลต่อขนาดอนุภาคและการกระจายตัวของอนุภาค โดยถ้ามีความชื้นมากเกินไปจะทำให้อนุภาคกระจายตัวได้ไม่ดีเนื่องจากจะทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างอนุภาค [10]

### 2.3.3 สมบัติทั่วไป

$\text{CaCO}_3$  ประกอบด้วย แคลเซียม 40% คาร์บอน 12% และออกซิเจน 48% แคลเซียมคาร์บอเนตคุณภาพสูง จะต้องมียสมบัติดังนี้ [10]

- มีความบริสุทธิ์ ไม่มีโลหะหนักเจือปนที่จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพของพลาสติก

- มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ไม่ดูดซึมสารปรับปรุงสมบัติพลาสติก และสารเติมแต่งต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีองศาความขาวสูง
- การกระจายตัวดี
- เพิ่มความแข็งแรง (Stiffness) และมอดูลัสของความยืดหยุ่น
- ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ ไม่จุดระเบิดและทนความร้อนได้สูงถึง 800°C

### 2.3.4 การประยุกต์ใช้งาน

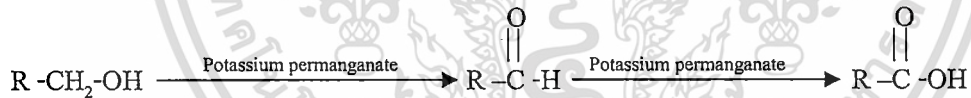
CaCO<sub>3</sub> ใช้กับ PE และ PP เพื่อลดต้นทุน CaCO<sub>3</sub> ที่เติมลงใน PE ทำให้สมบัติเชิงกลบางประการของ PE ลดลง เช่น ค่าความแข็งแรงดึง แต่จะให้ค่ามอดูลัสที่เพิ่มขึ้น CaCO<sub>3</sub> ที่ได้รับการปรับปรุงพื้นผิวจะมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์ได้ดีกว่า CaCO<sub>3</sub> ที่ไม่มีการปรับปรุงพื้นผิว ซึ่งจะมีผลทำให้ความทนทานต่อแรงกระแทกเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใช้สารช่วยกระจายในปริมาณมากเกินไป จะทำให้สารช่วยกระจายนั้นทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นซึ่งจะมีผลต่อกระบวนการขึ้นรูป [10]

## 2.4 สารช่วยกระจายตัว

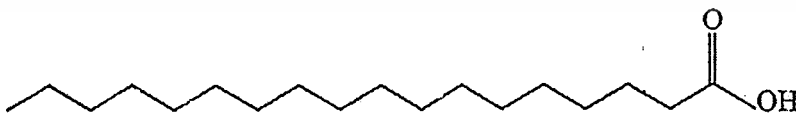
### 2.4.1 กรดสเตียริก (Stearic Acid, SA)

SA เป็นกรดไขมันชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยส่วนที่เป็นสายโซ่ไฮโดรคาร์บอน C<sub>18</sub> และหมู่ฟังก์ชันของกรดซึ่งสามารถเกิดอันตรกิริยากับพื้นผิวของสารตัวเติมได้ ซึ่งช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติมในพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์ที่ได้สมบัติดีขึ้น [11]

การผลิต SA สามารถสังเคราะห์ได้จากการออกซิเดชันแอลกอฮอล์ปฐมภูมิและอัลดีไฮด์



SA จะนำไปใช้ปรับปรุงพื้นผิวของสารตัวเติมเพื่อช่วยในการกระจายตัวของสารตัวเติมชนิดต่างๆ ในพอลิเมอร์ ซึ่งจะเป็นการปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลให้ดีขึ้น สารตัวเติมที่เคลือบผิวด้วย SA จะมีการดูดซึมน้ำต่ำกว่าสารตัวเติมที่ไม่ได้ทำการเคลือบผิว SA ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนหลักคือส่วนที่กระจายในวัฏภาคของสารตัวเติมและพอลิเมอร์ ดังภาพ



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของกรดสเตียริก [11]

#### 2.4.2 สารช่วยกระจายตัว IRGASURF® HL 560

สารช่วยกระจายตัว IRGASURF® HL 560 เป็นสารเติมแต่งที่ใช้ในการค้า และเป็นสารเติมแต่งประเภทมีขี้ผึ้งใช้สำหรับผสมกับพอลิโอฟีน ซึ่งเป็นสารเติมแต่งที่หลอมได้ เพื่อให้พอลิโอฟีนมีความชอบน้ำได้ชั่วคราว และยังมีสมบัติต้านทานไฟฟ้าสถิตย์ได้ดี โดยเหมาะที่จะใช้กับงานเส้นใยและงานฟิล์ม โดยแนะนำให้ใช้ในปริมาณ 1.5 – 3%

#### 2.5 กระบวนการผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่

ในปี ค.ศ. 1930 ที่ประเทศอิตาลี ได้มีการใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-Screw Extruder) เป็นครั้งแรกสำหรับใช้ในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ R. Colombo ได้ทำการพัฒนาเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่แบบหมุนไปทางเดียวกัน (Co-Rotating Twin-Screw Extruder) และ C. Pasquetti ได้ทำการพัฒนาเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่แบบหมุนสวนทางกัน (Counter-Rotating Twin-Screw Extruder) ในตอนแรกนั้นเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่มีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องจักรข้อจำกัดที่สำคัญมากคือ การออกแบบตลับผลึก (Thrust Bearing) เนื่องจากมีที่ว่างจำกัด ทำให้ยากแก่การออกแบบตลับผลึกให้อยู่ในแนวแกนที่ดี ต่อมาในปี ค.ศ. 1960 ได้มีการพัฒนาตลับผลึกสำหรับใช้ร่วมกับ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แต่ถึงอย่างไรก็ตามเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ยังมี Thrust Bearing Rating ที่ต่ำกว่าเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว

เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ มีการแบ่งเป็น Co-Rotating (สกรูจะหมุนในทิศทางเดียวกัน) และ Counter-Rotating (สกรูสองอันจะหมุนสวนทางกัน) การแบ่งอีกอย่างคือเครื่องอัดรีดแบบเฟืองตรงกัน (Intermeshing) และเครื่องอัดรีดแบบเฟืองไม่ตรงกัน (Non-Meshing) รูปแบบของ Non-Meshing ประกอบด้วยสกรูเดี่ยว 2 อันอยู่เคียงข้างกัน หลักการทำงานนั้นคล้ายเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ดังนั้นเครื่องอัดรีดแบบ Non-Meshing จึงไม่ใช่ Twin-Screw ที่แท้จริง ซึ่งอาจจะอธิบายเป็น “Double Screw” รูปแบบของ Meshing หรือ Intermeshing มีการแบ่งย่อยอีกเป็น Conjugated และ Non-Conjugated ขึ้นกับว่า Meshing Flight จะเข้าไปอยู่ใน Channel ในบริเวณที่ Mesh กัน ได้หมดหรือไม่

ในโครงการพิเศษนี้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ที่ใช้เป็นแบบ Intermeshing Counter-Rotating Screw โดย Counter-Rotating นั้น Flight ของทั้งสองสกรูจะอยู่ใกล้ชิดกัน ลักษณะของ Flight จะไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งปกติจะเป็นรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมคางหมู [12]

การประยุกต์ใช้งานของ เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ ใช้ในการอัดรีดวัสดุที่ไวต่อความร้อน เช่น PVC และใช้กับกระบวนการที่เฉพาะของพอลิเมอร์ เช่น Compounding, Devolatilization และอื่นๆ กระบวนการอัดรีดของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ จะใช้ Fitting Flight และ Channel ที่แคบกระทำที่ความเร็วรอบของสกรูไม่สูงมากคืออยู่ในช่วงประมาณ 10 rpm โดยมีข้อดีที่เหนือกว่าเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวหลายประการคือ มีการป้อน (Feed) ที่ดีกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการลำเลียงหรือการพาลักษณะที่เป็น การเคลื่อนที่แบบกระจัดทางบวก (Positive Conveyance) มากกว่า มี Residence Time ที่สั้นกว่า และมี Residence Time Distribution (RTD) Spectrum ที่แคบ การที่มีการผสมที่ดีกว่าและมีพื้นที่ผิวในการส่งผ่านที่กว้างกว่า ทำให้ง่ายแก่การควบคุมอุณหภูมิที่เก็บสะสมไว้ ซึ่งเป็นกุญแจสำคัญในการอัดรีดวัสดุที่ไวต่อความร้อน เครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ที่ใช้โดยส่วนใหญ่เป็นเครื่องอัดรีดแบบเฟืองตรงกัน (Intermeshing) รองลงมาคือ เครื่องอัดรีดแบบหมุนสวนทางกัน (Counter-Rotating) และมีการใช้ Co-Rotating Twin-Screw Extruder บ้างในบางกรณี [12]

แต่ละกระบวนการที่เฉพาะของพอลิเมอร์ที่มีการใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ มักมีความแตกต่างไปตามการออกแบบ เช่น High-Speed Intermeshing Co-Rotating Extruder ใช้ประโยชน์ในการ Compounding, Continuous Chemical Reactor และ Devolatilization จะทำให้ความเร็วรอบสูงๆ โดยความเร็วรอบของสกรูจะมีค่ามากที่สุดอยู่ในช่วง 300-600 rpm Non-Intermeshing Extruder ใช้ในการ Mixing, Chemical Reaction และ Devolatilization

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kostadinova และคณะ[13] ทำการศึกษาบรรจุภัณฑ์รีไซเคิลจาก HDPE สมบัติการไหล และสมบัติการรับแรงดึงของขวดรีไซเคิลจาก HDPE ขึ้นกับเงื่อนไขในการขึ้นรูปใหม่ พบว่าเมื่อระยะเวลาในการอัดรีดมากจะทำให้สมบัติเชิงกลลดลง หลังจากขึ้นรูปเพียง 2 ครั้ง แต่หากใช้เวลาในการอัดรีดน้อยลงสมบัติเชิงกลยังคงไม่เปลี่ยนแปลง จากการขึ้นรูปถึง 5 ครั้งสมบัติใกล้เคียงกับ HDPE บริสุทธิ์ สมบัติของ HDPE ขึ้นกับ การแข่งขันระหว่างพฤติกรรมที่เกี่ยวข้องของกิ่งสายโซ่พอลิเมอร์ และการตัดสายโซ่พอลิเมอร์

ดาริน วงศ์วัฒน์เศรษฐ์ และพิทยา เหลืองวนิชประภา [14] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-30% โดยน้ำหนัก และใช้กรดสเตียริกเป็นสารปรับปรุงพื้นผิว จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  เพิ่มขึ้น และเมื่อปรับปรุงพื้นผิว  $\text{CaCO}_3$  ด้วยกรดสเตียริก สมบัติเชิงกลที่กล่าวมาข้างต้นจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ปรามินทร์ ช้างเพชร และประภษฎี แสงทองอินทัย [15] ศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE โดยใช้  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 30% โดยน้ำหนัก และมีการใช้ HDPE ที่ต่อกิ่งด้วยมาลิกแอนไฮไดรด์ (HDPE-g-MA) เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 0.1 - 15.0% โดยน้ำหนักของ  $\text{CaCO}_3$  จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงดึง ความแข็งแรงกระแทก และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของ HDPE มีค่าลดลงเมื่อมีการใช้  $\text{CaCO}_3$  30% ผสมกับ HDPE เพราะแรงยึดเหนี่ยวระหว่าง  $\text{CaCO}_3$  และ HDPE ไม่แข็งแรง ส่วนค่าความแข็งแรงของตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อใช้  $\text{CaCO}_3$  เพราะอนุภาคของ  $\text{CaCO}_3$  มีค่าความแข็งแรงมากกว่า HDPE การใช้ HDPE-g-MA ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เพราะ HDPE-g-MA มีทั้งส่วนที่มีขั้วและไม่มีขั้วในโครงสร้าง ทำให้ HDPE เข้ากับ  $\text{CaCO}_3$  ได้ดีขึ้น ส่วนค่าความแข็งแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแทกและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ HDPE-g-MA ในปริมาณน้อย (0.1-0.5%) การใช้ HDPE-g-MA ในปริมาณมากขึ้นทำให้เกิดการแยกวัฏภาคของ HDPE-g-MA และส่งผลต่อค่าความแข็งแรงกระแทกและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด

ธนเรศ ประเสริฐวงษ์ และธราศรัย แสงภักดี [16] ทำการศึกษา ผลของชนิดของสารช่วยผสมต่อสมบัติของ HDPE ที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  ซึ่งทำการศึกษาระหว่าง HDPE-g-MA กับ HDPE ที่ต่อกิ่งด้วยกรดอะคริลิก (HDPE-g-AA) พบว่าการเติม  $\text{CaCO}_3$  20% โดยน้ำหนักลงใน HDPE ทำให้ความเหนียวเพิ่มขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างพื้นผิวสัมผัสของ HDPE กับ  $\text{CaCO}_3$  การใช้สารช่วยผสมทั้ง HDPE-g-MA และ HDPE-g-AA ในปริมาณ 0-2 % โดยน้ำหนักไม่มีผลต่อค่าความเหนียว ค่าความแข็งแรงดึง ค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และความแข็งแรงกระแทกลดลงเมื่อมี  $\text{CaCO}_3$  ผสมอยู่เพราะแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่าง  $\text{CaCO}_3$  กับ HDPE ไม่แข็งแรง ส่วนค่ามอดุลัสและค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  มีค่ามอดุลัสและความแข็งที่สูงกว่า HDPE และ  $\text{CaCO}_3$  ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นสารก่อผลึกสำหรับ HDPE การใช้สารช่วยผสมทำให้สมบัติส่วนใหญ่ดีขึ้น โดยเฉพาะในสูตรที่มีการใช้ HDPE-g-AA ในปริมาณ 0.2% และเมื่อใช้สารช่วยผสมในปริมาณเท่ากับ HDPE-g-AA ให้สมบัติส่วนใหญ่ที่ดีกว่าการใช้ HDPE-g-MA เล็กน้อย

ณัฐวุฒิ พยัมศิริ [17] ศึกษากระบวนการเป่าขึ้นรูปและสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ขวด HDPE ที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  ชนิดที่เคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือมีการใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมระหว่าง HDPE กับ  $\text{CaCO}_3$  พอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีพฤติกรรมเป็นแบบ Pseudoplastic โดยความเหนียวมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  เพิ่มขึ้น เมื่อใช้  $\text{CaCO}_3$  ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ความเหนียวของพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตรที่ไม่ได้ใช้สารทั้งสองชนิด เมื่อผสม  $\text{CaCO}_3$  ลงใน HDPE และเพิ่มปริมาณมากขึ้นค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากมีค่าลดลง เมื่อมีการเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก ทำให้ค่าความเค้นดึง ณ จุดครากและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากเพิ่มขึ้น ส่วนการใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA ไม่มีผลต่อค่าสมบัติดังกล่าว ค่ามอดุลัสและค่าความแข็งกมมีค่ามากขึ้นเมื่อปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  เพิ่มขึ้น และค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทั้งน้ำหนักมีค่าลดลง และเมื่อใช้  $\text{CaCO}_3$  ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมค่าความแข็งแรงกระแทกแบบทั้งน้ำหนักมีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมของขวดพอลิเมอร์ตัวอย่างสูตรที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  มีค่ามากกว่าขวด HDPE ส่วนในการใช้  $\text{CaCO}_3$  ที่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกให้ค่าความต้านแรงเค้นจากสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น แต่ค่าดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อใช้สารช่วยผสม HDPE-g-MA

Ruckchonlatee และคณะ[18] ทำการศึกษาสมบัติของ HDPE ที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  ที่ใช้สำหรับงานเป่าขึ้นรูป โดยใช้  $\text{CaCO}_3$  ในปริมาณ 0-30% โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA และมีการใช้ HDPE-g-MA เป็นสารช่วยผสมในปริมาณ 0-10% โดยน้ำหนัก จากการทดลองพบว่าเมื่อใช้ SA ปรับปรุง พื้นผิวของ  $\text{CaCO}_3$  ทำให้ค่าความแข็งแรงดึง และค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น

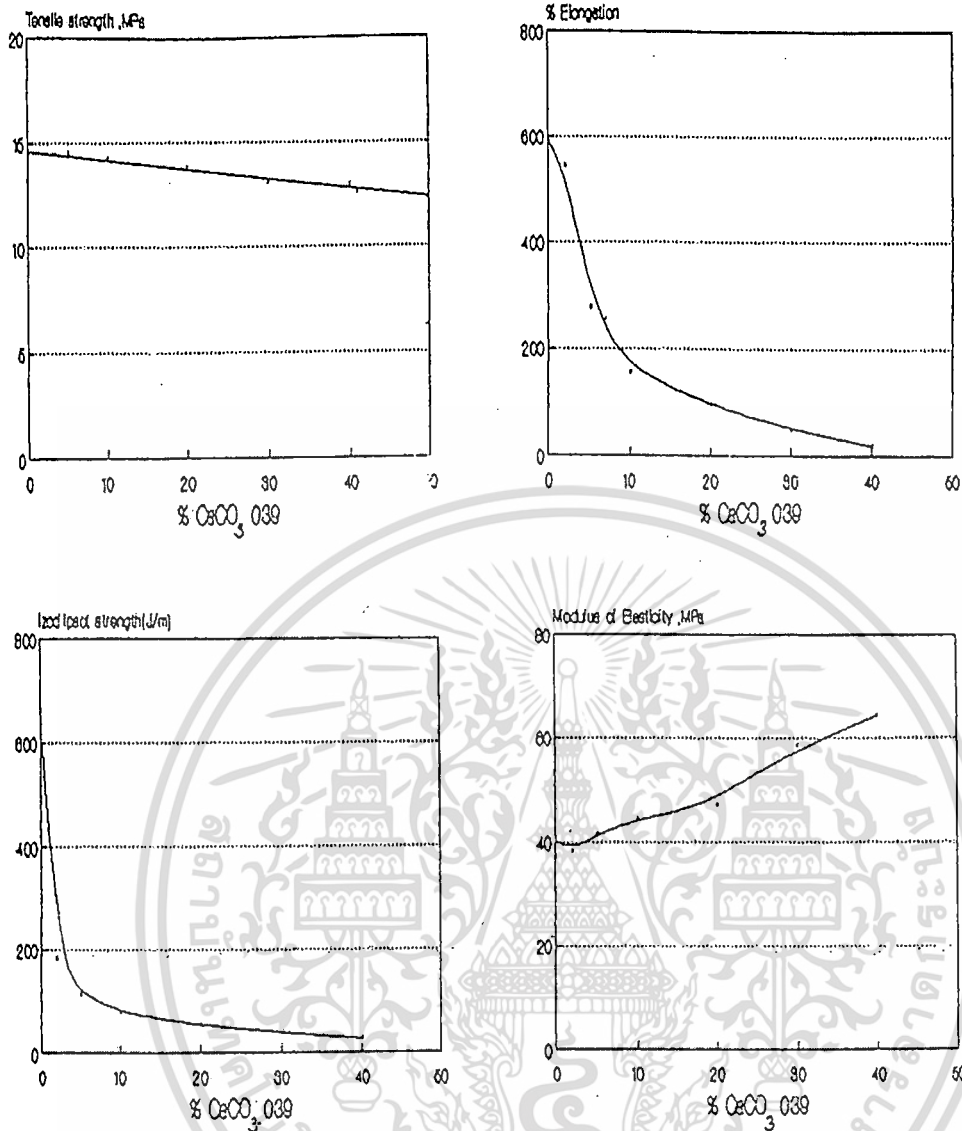
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  มีการกระจายตัวที่ดีขึ้นทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสของ HDPE กับ  $\text{CaCO}_3$  เพิ่มขึ้น และยังพบอีกว่าค่าความแข็งแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีการใช้ HDPE-g-MA เพิ่มมากขึ้น ส่วนค่ามอดูลัสลดลงเนื่องจากการเพิ่มวิฤภาคของพอลิเมอร์ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นที่ปริมาณ HDPE-g-MA 1% โดยน้ำหนัก และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ HDPE-g-MA มากกว่า 1% โดยน้ำหนัก เนื่องจาก HDPE-g-MA ที่มากเกินไปทำให้เกิดการแยกวิฤภาคเกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังนำพอลิเมอร์ที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  บางสูตรมาผ่านกระบวนการขึ้นรูป โดยใช้เครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด พบว่าพอลิเมอร์ทั้งสูตรที่มีและไม่มี  $\text{CaCO}_3$  20% โดยน้ำหนัก มีอัตราการไหลเชิงปริมาตรใกล้เคียงกัน น้ำหนักต่อชวคของชวค HDPE บริสุทธิ์ต่ำกว่าน้ำหนักของชวคที่ได้จาก HDPE ผสม  $\text{CaCO}_3$  แต่ความหนาของชวคได้ผลในทางตรงข้าม สมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น ความแข็งแรงดึง ณ จุดครากและเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับตัวอย่างจากการฉีดขึ้นรูปที่นำมาทดสอบก่อนผ่านกระบวนการเป่าขึ้นรูป

Jumpa [19] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลและสมบัติการไหลของ HDPE ที่มี  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 40%wt และใช้กรดสเตียริกเป็นสารช่วยกระจายตัว พบว่าการเติม  $\text{CaCO}_3$  ทำให้ค่าความหนืดและมอดูลัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก และค่าความแข็งแรงกระแทกลดลง แต่ค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปรับปรุงพื้นผิวของแคลเซียมคาร์บอเนตด้วยกรดสเตียริกก่อนนำไปผสมกับ HDPE

Papirer และคณะ[20] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางพื้นผิวของ  $\text{CaCO}_3$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วยกรดสเตียริกพบว่า  $\text{CaCO}_3$  ที่ปรับปรุงพื้นผิวด้วย SA จะทำให้ลดแรงกระทำระหว่างอนุภาคและทำให้มีการกระจายตัวที่ดีขึ้น ส่งผลให้  $\text{CaCO}_3$  ที่ถูกปรับปรุงพื้นผิวสามารถผสมเข้ากันได้ดีกับพอลิเมอร์ทำให้ได้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเมอร์ที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  ที่ไม่ได้ปรับปรุงพื้นผิว

Sumanutvarapun และคณะ [21] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารตัวเติม โดยผสมพอลิเอทิลีนกับสารตัวเติมปริมาณ 0-40% โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความแข็งแรงดึงเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงกับการเพิ่มปริมาณสารตัวเติม ในขณะที่มอดูลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 สมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี CaCO<sub>3</sub> เป็นสารตัวเติมในปริมาณที่แตกต่างกัน [21]

Premphet และคณะ [22] ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ PP ที่มี CaCO<sub>3</sub> เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-25% โดยปริมาตร พบว่าเมื่อปริมาณของ CaCO<sub>3</sub> เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การยืด ฉ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงและเมื่อทำการปรับปรุงพื้นที่ผิวของ CaCO<sub>3</sub> ด้วยกรดเตียริก พบว่าค่ามอดูลัส เปอร์เซ็นต์การยืด ฉ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ CaCO<sub>3</sub> ที่ไม่ได้มีการปรับปรุงพื้นที่ผิว ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลของสารตัวเติม  $\text{CaCO}_3$  ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสม [22]

$\text{CaCO}_3$ (%)	Young's Modulus (GPa)		Elongation at Yield (%)		Impact Strength (J/m)	
	Uncoated	Coated	Uncoated	Coated	Uncoated	Coated
0	1.62	1.62	7.80	7.80	33.10	33.10
10	2.00	2.45	3.92	4.59	36.71	45.39
15	2.15	2.42	3.14	3.41	33.13	42.41
20	2.44	3.04	2.95	3.17	33.56	41.62
25	2.57	3.46	2.46	2.77	28.94	40.43

Maiti และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-60%wt พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตัวเติมจะทำให้เปอร์เซ็นต์การยืด ฌ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทก ลดลง ในขณะที่ค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น

Fu และคณะ [24] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของ HDPE ที่มี  $\text{CaCO}_3$  เป็นสารตัวเติมในปริมาณ 0-50%wt พบว่าเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์การยืด ฌ จุดขาด และค่าความแข็งแรงกระแทก ลดลง ในขณะที่สมบัติเชิงกลดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปรับปรุงพื้นผิวของ  $\text{CaCO}_3$  ด้วยฟอสเฟต ก่อนนำไปผสมกับ HDPE

Pauquet [25] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับสารช่วยการกระจายตัว IRGASURF® พบว่า มีการพัฒนาสารเคมีใหม่ที่มีความทนทาน เพิ่มความมีขี้วในพอลิโอฟีน ซึ่ง IRGASURF® ถูกเติมลงในพอลิเมอร์ในระหว่างขั้นตอนอัดรีดในการปั่นเส้นใยและกระบวนการเป่า มีการใช้งานในอุปกรณ์การแพทย์, ผ้าเช็ดทำความสะอาดและแผ่นดูดซับ

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

1. ขวดนมสด ชนิดพลาสติกเจอร์ไรส์ ขนาด 830 ml ซึ่งทำจาก HDPE เรียกเป็นเกรดรีไซเคิล (R-HDPE)
2. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เกรด H6340BM เกรดเป่าขวด ของบริษัทเอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด สมบัติบางประการแสดงดังตารางที่ 3.1
3. แคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เกรดไม่เคลือบผิว (Omyacarb 2) และเกรดเคลือบผิวด้วยกรดสเตียริก (Omyacarb 2T) ของบริษัทสุรินทรอ้อมยาเคมีคอล จำกัด สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงดังตารางที่ 3.2
4. สารช่วยกระจายตัว IRGASURF<sup>®</sup> HL 560 ของบริษัท Ciba จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติบางประการของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง

สมบัติ	หน่วย	ผลการทดสอบ
สมบัติการไหล (MFI)	g/10min	0.49
ความหนาแน่น	g/cm <sup>3</sup>	0.963

ตารางที่ 3.2 สมบัติบางประการของแคลเซียมคาร์บอเนต

สมบัติ	หน่วย	$\text{CaCO}_3$ (Omyacarb 2)	$\text{CaCO}_3$ (Omyacarb 2T)
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย	$\mu\text{m}$	2.69	2.75
ความหนาแน่น	g/cm <sup>3</sup>	2.70	2.70
เคลือบผิว	-	ไม่เคลือบ	เคลือบด้วยกรดสเตียริก(SA) 1%

หมายเหตุ : ข้อมูลบริษัทผู้ผลิต

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding machine): SMC รุ่น 200T (Screw: length = 22D, diameter = 30 mm)
2. เครื่องบดพลาสติก (Plastic grinder): Bosco Engineering รุ่น Bosco A600
3. เครื่อง Differential scanning calorimeter (DSC): Perkin Elmer รุ่น DSC7
4. เครื่อง Thermogravimetric analyzer (TGA) : Shimadzu รุ่น TGA-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัด **130284** และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM): JEOL รุ่น JSM-5410LV
6. เครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Melt flow index) : CEAST รุ่น 6841
7. เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder): Intro Engineering รุ่น PL 200 (Screw : length = 330 mm, diameter = 31.1 mm drive and 19.7 mm output end)
8. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal testing machine): LLOYD Instrument รุ่น LLOYD LR 5 K
9. เวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การผลิตขวดจากขวดนมที่ใช้แล้ว

นำขวดนม R-HDPE ล้างให้สะอาดอบให้แห้งและนำมาบดด้วยเครื่องบดพลาสติกเพื่อนำไปขึ้นรูปขวดด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด

#### 3.3.2 การผลิตขวดจากเม็ด HDPE ผสม $\text{CaCO}_3$

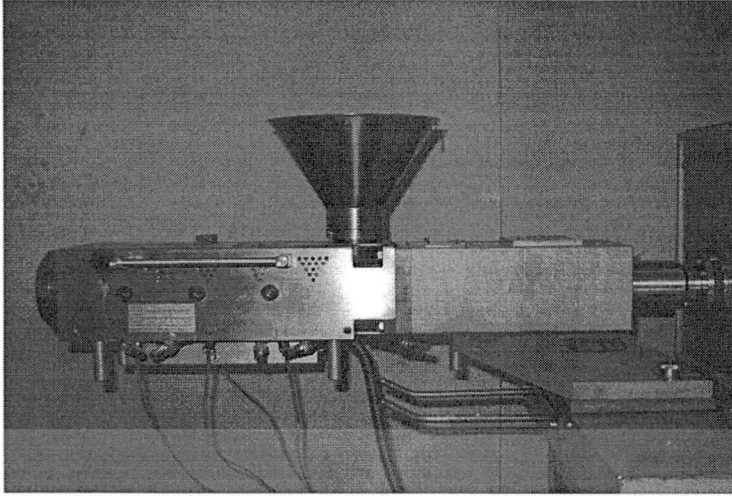
1. เตรียมพอลิเมอร์ผสมสูตรจากเม็ด HDPE และ  $\text{CaCO}_3$  ตามตารางที่ 3.3 โดยนำส่วนผสมแต่ละชนิดไปผสมโดยใช้เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ ที่อุณหภูมิจากบาร์เรลถึงหัวคายเป็น 170 180 190 และ 200 °C ตามลำดับ ความเร็วรอบที่ใช้ 15 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.3 ปริมาณองค์ประกอบต่างๆ ในพอลิเมอร์ผสม

สูตร	องค์ประกอบ			
	HDPE	$\text{CaCO}_3$	1% SA coated $\text{CaCO}_3$	IRGASURF®
R-HDPE	100%	-	-	-
HDPE	100%	-	-	-
Ca2	70%	30%	-	-
Ca2T	70%	-	30%	-
Ca2I	70%	30%	-	2%
Ca2TI	70%	-	30%	2%

\*ปริมาณ IRGASURF® เทียบกับ  $\text{CaCO}_3$  (%)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

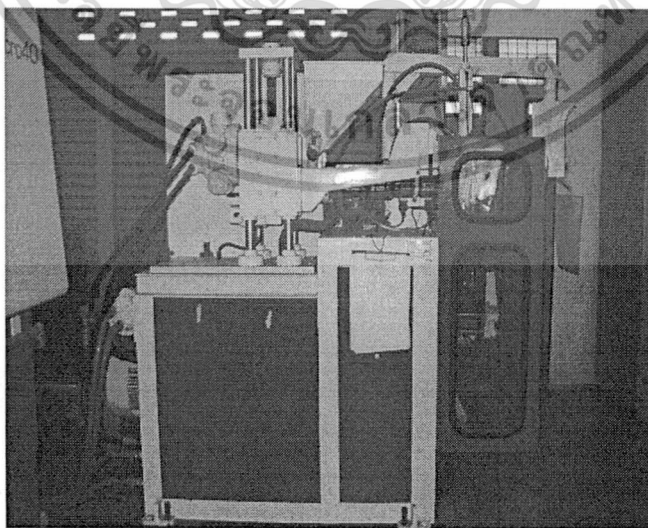


ภาพที่ 3.1 เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่

2. นำส่วนผสมที่ได้จากเครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่มาบดเป็นเม็ดเล็กๆ ด้วยเครื่องบดพลาสติกเพื่อนำไปขึ้นรูปขวดต่อไป

### 3.3.3 กระบวนการเป่าขึ้นรูปขวด

นำเม็ดสารตัวอย่างที่บดแล้วของแต่ละสูตรมาเป่าขึ้นรูปเป็นขวดด้วยเครื่องเป่าขึ้นรูปชนิดอัดรีด (Extrusion blow molding machine) โดยใช้อุณหภูมิจากบาร์เรลถึงหัวคายเป็น 170 180 190 และ 200° C ตามลำดับ อุณหภูมิแม่พิมพ์ 15° C ความเร็วรอบที่ใช้ 20 รอบต่อนาที นำส่วนที่ได้แบ่งทดสอบสมบัติต่างๆ ส่วนที่เหลือนำไปบดเพื่อขึ้นรูปใหม่ ทำซ้ำๆจนครบ 16 รอบการขึ้นรูป และทำการสุ่มตัวอย่างชิ้นงานทุกๆ 3 ครั้งของการขึ้นรูป นำไปทดสอบ



ภาพที่ 3.2 เครื่องเป่าขึ้นรูปพลาสติกชนิดอัดรีด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 การทดสอบสมบัติการไหล

นำชิ้นตัดจากขวดมาบดแล้วทดสอบสมบัติการไหลด้วยเครื่อง Melt flow indexer ที่อุณหภูมิ หัวตาย 190°C โดยใช้น้ำหนักกดทับ 2.16 kg ช่วยกดทับ โดยตามมาตรฐาน ISO 1133 [26] และทำการ ทดสอบใหม่ทุกๆ 3 ครั้งของการขึ้นรูป

### 3.3.5 การทดสอบสมบัติของผลิตภัณฑ์

ขวดผลิตภัณฑ์มีความสูง 7.7 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.2 cm และมีปริมาตร 106 cm<sup>3</sup> แสดงดัง ภาพที่ 3.3

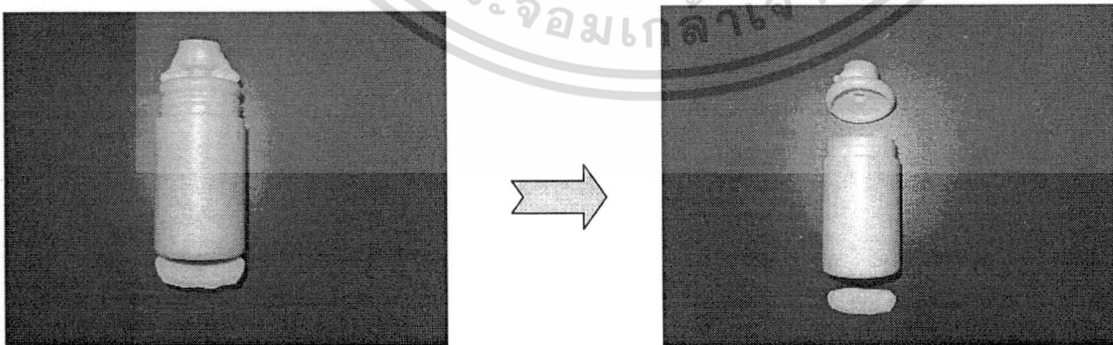


ภาพที่ 3.3 ลักษณะผลิตภัณฑ์ขวดที่ได้จากกระบวนการเป่าขึ้นรูป

#### 3.3.5.1 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

##### ก. น้ำหนักต่อขวด

นำขวดที่ขึ้นรูปได้มาตัดพลาสติกส่วนเกินบริเวณปากและก้นขวดออกดังภาพที่ 3.4 จากนั้นนำขวดทุกสูตร สูตรละ 10 ขวดมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักเฉลี่ย

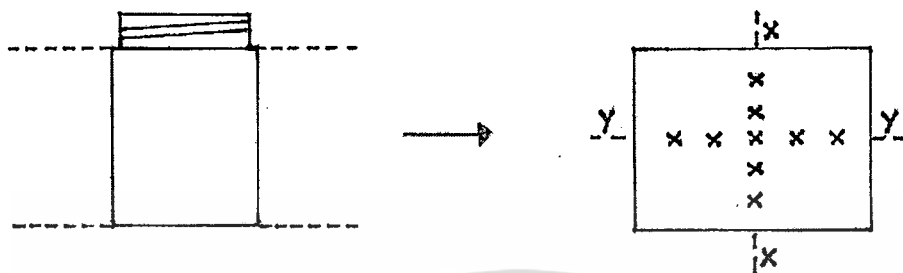


ภาพที่ 3.4 ลักษณะขวดที่ตัดส่วนเกินบริเวณปากขวดและก้นขวดสำหรับวัดน้ำหนักต่อขวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรความหนาของขวด

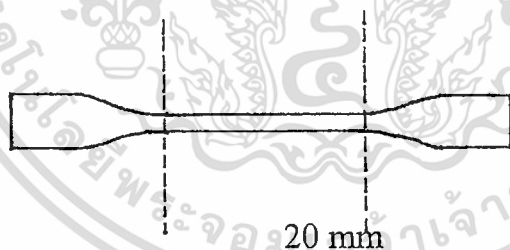
นำขวดมาตัดบริเวณคอขวดและก้นขวดออก จากนั้นตัดบริเวณรอยต่อของขวดให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าแล้ววัดความหนาโดยรอบขวดตามแนวเส้นรอบวงและแนวตั้งบริเวณละ 5 จุดในระยะเท่าๆกันจำนวน 10 ขวด เพื่อหาค่าเฉลี่ยดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ลักษณะชิ้นงานสำหรับวัดความหนาเมื่อ  $x$  เป็นการวัดในแนวตั้งและ  $y$  เป็นการวัดในแนวเส้นรอบวง

### 3.3.5.2 การทดสอบสมบัติการรับแรงดึง

นำขวดมาตัดบริเวณกลางขวดในแนวเส้นรอบวง โดยลักษณะชิ้นงานที่ได้เป็นรูปดัมเบลล์ดังภาพที่ 3.6 แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ที่ความเร็วในการดึง 100 mm/min ระยะการจับชิ้นงาน (Gauge length) เป็น 20 mm ที่อุณหภูมิห้องตามมาตรฐาน ASTM D 638 [27] เพื่อหาค่า Tensile strength at yield, Tensile strength at break, %Elongation at yield, %Elongation at break และ Modulus



ภาพที่ 3.6 ชิ้นงานรูปดัมเบลล์ที่ใช้ในการทดสอบ

### 3.3.5.3 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ตัดชิ้นส่วนของขวดมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5-10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น  $40^{\circ}\text{C}$  ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ  $200^{\circ}\text{C}$  และทำให้เย็นโดยลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา  $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$  จนถึงอุณหภูมิเริ่มต้น นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาค่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของผลึก ( $T_m$ ) อุณหภูมิของการเกิดผลึก ( $T_c$ ) และเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (%Cry) ตามมาตรฐาน ASTM E 794 [28]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5.4 การศึกษาลักษณะการกระจายตัวของ $\text{CaCO}_3$

ตัดชิ้นส่วนของขวดมาขนาด  $3 \times 1 \text{ cm}^2$  นำมาแช่ในไนโตรเจนเหลวประมาณ 10 นาที แล้วหักชิ้นงานทันทีในขณะที่ชิ้นงานยังเย็นอยู่ นำพื้นผิวตรงบริเวณรอยหักมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่า

### 3.3.5.5 การตรวจสอบปริมาณที่แน่นอนของ $\text{CaCO}_3$ ในสารตัวอย่าง

ตัดชิ้นส่วนของขวดมาหาปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  โดยใช้เครื่อง TGA โดยใช้น้ำหนักสารประมาณ 5 - 10 mg นำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิเริ่มต้น  $40^\circ\text{C}$  ด้วยอัตราการให้ความร้อนเป็น  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  จนถึงอุณหภูมิสูงสุดคือ  $600^\circ\text{C}$  ภายใต้อากาศ (Air) นำข้อมูลจากกราฟที่ได้มาหาปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ที่แน่นอนตามมาตรฐาน ASTM D 1131 [29]

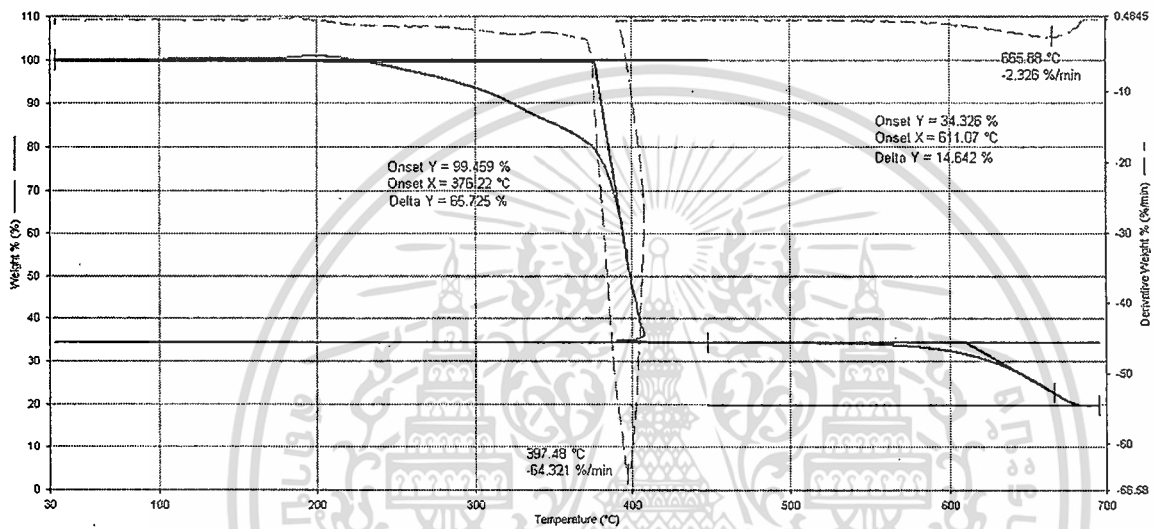


## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ $\text{CaCO}_3$ ในแต่ละสูตร

นำชิ้นพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ตัดจากขวดมาหาปริมาณที่แน่นอนของ  $\text{CaCO}_3$  ที่มีอยู่ในสารตัวอย่างแต่ละสูตร โดยใช้เครื่อง TGA จะได้กราฟตัวอย่างดังภาพที่ 4.1 จากกราฟสามารถหาปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 กราฟตัวอย่างแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA สูตร Ca2I

ตารางที่ 4.1 ปริมาณที่แน่นอนของ  $\text{CaCO}_3$  ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง

สูตร	องค์ประกอบ				ปริมาณที่แน่นอนของ $\text{CaCO}_3$ (%wt)
	HDPE	$\text{CaCO}_3$	1% SA coated $\text{CaCO}_3$	IRGASURF®	
R-HDPE	100%	-	-	-	0
HDPE	100%	-	-	-	0
Ca2 (1)	70%	30%	-	-	31.8
Ca2T (1)	70%	-	30%	-	32.6
Ca2I (1)	70%	30%	-	2%	33.7
Ca2TI (1)	70%	-	30%	2%	33.0
Ca2 (16)	70%	30%	-	-	21.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ปริมาณที่แน่นอนของ $\text{CaCO}_3$ ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง

สูตร	องค์ประกอบ				ปริมาณที่แน่นอนของ $\text{CaCO}_3$ (%wt)
	HDPE	$\text{CaCO}_3$	1% SA coated $\text{CaCO}_3$	IRGASURF®	
Ca2T (16)	70%	-	30%	-	20.8
Ca2I (16)	70%	30%	-	2%	21.4
Ca2TI (16)	70%	-	30%	2%	20.4

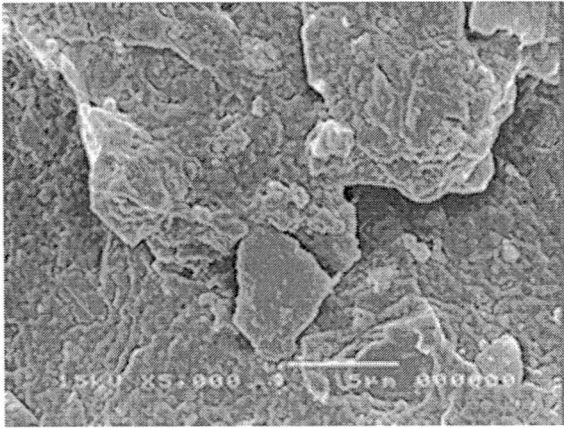
หมายเหตุ เลขในวงเล็บของข้างหลังสูตรคือจำนวนรอบรีไซเคิล

จากตารางที่ 4.1 พบว่าทุกสูตรมีปริมาณของ  $\text{CaCO}_3$  มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 32-34% โดยน้ำหนัก และเมื่อผ่านการรีไซเคิลจำนวน 16 รอบ พบว่าปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ลดลงเหลือเพียง 20-22% เนื่องจากอนุภาคของ  $\text{CaCO}_3$  ไม่มีแรงกระทำกับ HDPE อนุภาค  $\text{CaCO}_3$  จึงหลุดในระหว่างกระบวนการบดเพื่อนำไปขึ้นรูปขวด และอีกปัจจัยที่ทำให้มีปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ลดลงคือเมื่ออนุภาคของ  $\text{CaCO}_3$  หลุดไปเกาะที่ผิวโลหะของเครื่องบดจะมีแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตย์อยู่อาจทำให้  $\text{CaCO}_3$  ไปเกาะติดกับตัวโลหะได้ดี จึงไม่ลงไปรวมกับเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่บดแล้ว

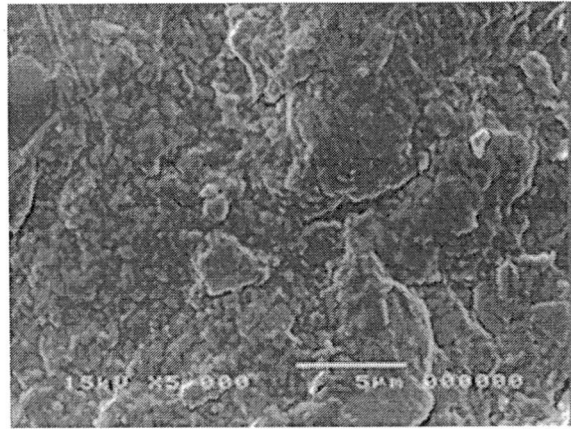
#### 4.2 การกระจายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนต

ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของชิ้นงานพอลิเมอร์ตัวอย่าง โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่าแสดงดังภาพที่ 4.2 พบว่าเมื่อผสม  $\text{CaCO}_3$  ลงใน HDPE และทำการขึ้นรูปครั้งที่ 1 พบว่า  $\text{CaCO}_3$  ในสูตร Ca2 มีกระจายตัวไม่ดีเมื่อเทียบกับสูตรอื่นๆ ที่มีการใช้สารช่วยกระจาย เนื่องจากความไม่เข้ากันระหว่างความไม่มีขั้วของ HDPE และความมีขั้วของ  $\text{CaCO}_3$  ดังนั้น HDPE และ  $\text{CaCO}_3$  จึงไม่มีอันตรกิริยาต่อกัน ทำให้  $\text{CaCO}_3$  มีโอกาสที่จะเกาะกลุ่มมากกว่าที่จะกระจายตัวเป็นอนุภาคเดี่ยว

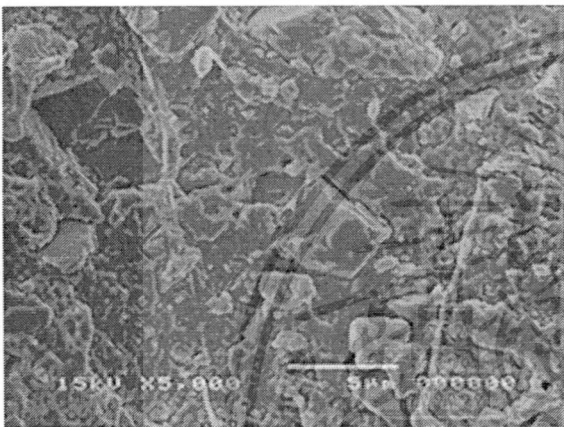
เมื่อทำการขึ้นรูปครั้งที่ 16 พบว่า  $\text{CaCO}_3$  มีการกระจายตัวได้ดีขึ้น เนื่องจากอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  ได้รับแรงกระทำมากขึ้น จากจำนวนรอบการรีไซเคิลที่มากขึ้น เป็นผลให้การกระจายตัวได้ทั่วถึงและดีขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่า อนุภาคของ  $\text{CaCO}_3$  ในรอบการรีไซเคิลครั้งที่ 1 มีขนาดใหญ่ แต่ในการรอบรีไซเคิลที่ 16 อนุภาคมีขนาดเล็ก และกระจายตัวได้ทั่วมากขึ้น



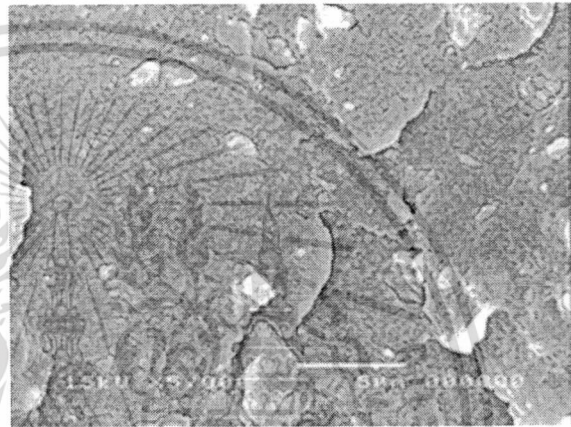
Ca2 (1)



Ca2 (16)



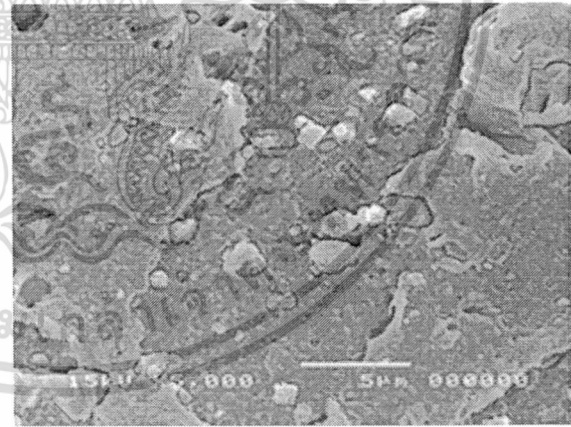
Ca2T (1)



Ca2T (16)

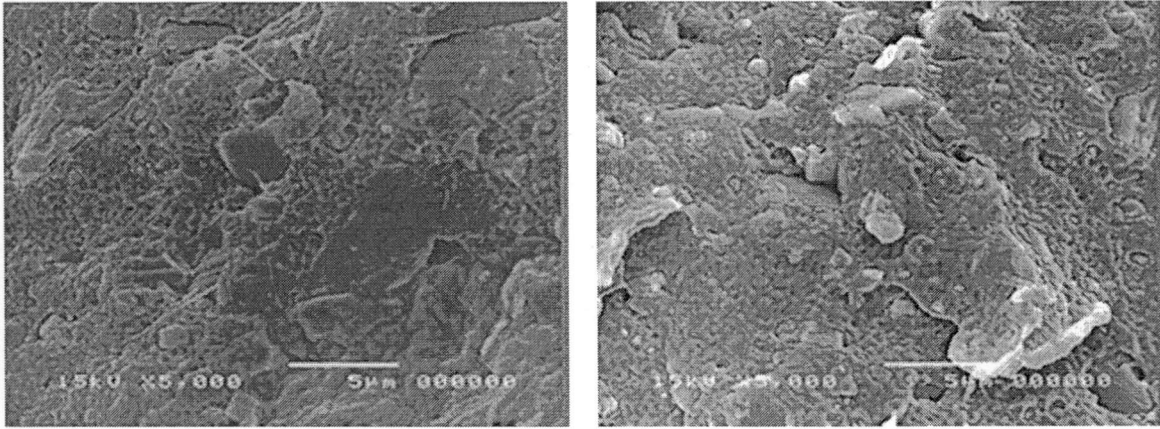


Ca2I (1)



Ca2I (16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



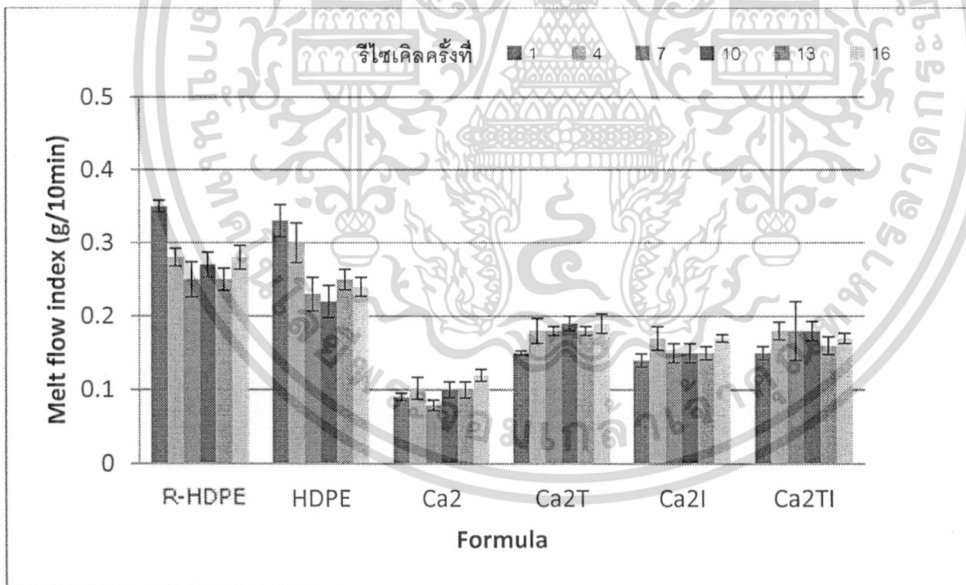
Ca2TI (1)

Ca2TI (16)

ภาพที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวแตกหักของชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

### 4.3 สมบัติการไหล

การทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติการไหล (Melt flow indexer) โดยพิจารณาจากน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่ไหลได้ในเวลา 10 นาที ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.4 (ข้อมูลในภาคผนวก ข)



ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ค่า Melt flow index กับชนิดสูตรต่างๆ

จากผลการทดลองดังภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่า ค่า MFI ของขวดนมรีไซเคิลสูตร R-HDPE และสูตร HDPE มีค่าใกล้เคียงกันแสดงว่าทั้งสองสูตรน่าจะใช้ HDPE ที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลของ CaCO<sub>3</sub> พบว่าเมื่อผสม CaCO<sub>3</sub> ลงใน HDPE ทำให้ค่า MFI ลดลงจากสูตร HDPE แสดงว่ามีค่าความหนืดมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคของ CaCO<sub>3</sub> ซึ่งเป็นของแข็ง ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



70%) ซึ่งน้อยกว่าสูตร HDPE (100%) จึงเกิดการเสียสภาพทางความร้อนแบบเชื่อมโยงสายโซ่น้อยกว่าสูตร HDPE จึงควรแสดงค่า MFI ลดลงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม จากผล TGA พบว่าปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ลดลงตามจำนวนรอบการบดและการขึ้นรูปขวด ทำให้เกิดการขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ลดลง ค่า MFI จึงควรเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

นอกจากนี้สมบัติการนำความร้อนของ  $\text{CaCO}_3$  ที่มากกว่า HDPE จะทำให้พอลิเมอร์สูตรที่มี  $\text{CaCO}_3$  รับความร้อนที่มากกว่า มีโอกาสทำให้สายโซ่ของ HDPE เกิดการเสียสภาพทางความร้อนแบบสายโซ่ขาดออกได้มากขึ้น จากผลการทดลองคาดว่าเกิดการแข่งขันของพฤติกรรมทางเสถียรภาพของพอลิเมอร์ในลักษณะต่างๆ ทำให้ค่า MFI เปลี่ยนแปลงไม่ชัดเจน

#### 4.4 น้ำหนักต่อขวดของผลิตภัณฑ์

ขวดที่ขึ้นรูปได้มีน้ำหนักขวด แสดงดัง ตารางที่ 4.2 พบว่าน้ำหนักของขวดจากสูตร R-HDPE และ HDPE มีค่าไม่แตกต่างกัน แต่มีค่าน้อยกว่าสูตรที่มีการผสม  $\text{CaCO}_3$  เนื่องจากความหนาแน่นที่สูงกว่าของ  $\text{CaCO}_3$  ( $2.7 \text{ g/cm}^3$ ) เมื่อเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์ ( $0.93 \text{ g/cm}^3$ ) ดังนั้นน้ำหนักขวดจึงเพิ่มขึ้นเมื่อเติม  $\text{CaCO}_3$  ในพอลิเมอร์ตัวอย่าง ส่วนน้ำหนักขวดสูตรที่มี  $\text{CaCO}_3$  ผสมมีค่าใกล้เคียงกันเพราะมีปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ใกล้เคียงกัน (ดังตารางที่ 4.1) และเมื่อจำนวนรอบการรีไซเคิลที่มากขึ้นพบว่าน้ำหนักขวดมีค่าลดลง โดยสูตร R-HDPE และ HDPE มีน้ำหนักลดลง ใกล้เคียงกันและน้อยกว่าสูตรที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  โดยสูตรที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  นั้นน้ำหนักที่ลดลงเกิดจากการลดลงของ  $\text{CaCO}_3$  ที่หลุดออกจากพอลิเมอร์ในขั้นตอนการบดตามที่กล่าวมาแล้วในเบื้องต้น เมื่อพิจารณาความคาดเคลื่อนหรือส่วนเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้น อาจเนื่องจากในขั้นตอนการทดสอบการตัดส่วนเกินบริเวณปากขวดและก้นขวดอาจไม่สม่ำเสมอ ทำให้น้ำหนักที่ได้แตกต่างกันบ้าง

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักของขวด

สูตร	น้ำหนักขวด (g) การขึ้นรูปครั้งที่					
	1	4	7	10	13	16
R-HDPE	11.4±0.1	11.0±0.1	11.2±0.1	11.2±0.2	11.1±0.1	10.8±0.1
HDPE	11.3±0.2	11.7±0.1	11.6±0.2	11.4±0.1	10.7±0.1	10.8±0.2
Ca2	14.1±0.1	13.0±0.2	12.2±0.1	12.0±0.1	11.3±0.1	11.2±0.1
Ca2T	12.8±0.1	12.8±0.2	12.3±0.1	11.8±0.1	11.5±0.2	11.2±0.2
Ca2I	13.3±0.1	12.3±0.1	12.5±0.2	12.2±0.1	11.8±0.1	11.3±0.1
Ca2TI	12.7±0.2	12.4±0.1	12.0±0.1	11.8±0.1	11.5±0.1	11.1±0.2

#### 4.5 ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวดผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์ที่ได้ความหนาและสัมประสิทธิ์ความผันแปรของขวด แสดงผลดังตารางที่ 4.3 เมื่อพิจารณาผลพบว่าความหนาของขวดสูตร R-HDPE และ HDPE มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อจำนวนรอบการรีไซเคิลมากขึ้นแต่มีค่ามากกว่าสูตรที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  เนื่องจากสูตร R-HDPE และ HDPE ไม่มีสารตัวเติมไปขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พาริสันเกิดการบวมตัวที่บริเวณหัวคายได้มาก ซึ่งงานที่ได้จึงมีความหนามากกว่าสูตรที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  โดยอนุภาคของ  $\text{CaCO}_3$  ไปขัดขวางการคืนตัวของสายโซ่ HDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมตริกซ์ทำให้พาริสันที่ได้มีความบวมตัวน้อยกว่าพาริสันของสูตรที่ไม่มีสารตัวเติมจึงได้ชิ้นงานที่บาง โดยสามารถเห็นค่าที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจนในรอบการรีไซเคิลที่ 16 ซึ่ง  $\text{CaCO}_3$  มีการกระจายตัวได้ดีขึ้น เมื่อผ่านการรับแรงกระทำมากขึ้นตามจำนวนรอบการรีไซเคิล ทำให้ได้พื้นผิวที่มีความเรียบ ความหนาแต่ละส่วนจึงมีความเท่ากันมากขึ้น ส่วนในรอบการรีไซเคิลที่ 1  $\text{CaCO}_3$  ยังกระจายตัวได้ไม่ดี พื้นผิวชิ้นงานมีความขรุขระมากกว่า เมื่อพิจารณาความหนาสูตรที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  เกลือบผิวด้วยกรดเตตระไฮดรอกซีหรือ IRAGASURF® พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันแต่ไม่ส่งผลเด่นชัดในเรื่องความหนา

ตารางที่ 4.3 ความหนาของขวด

สูตร	ความหนาของขวด (mm) จากการขึ้นรูปครั้งที่					
	1	4	7	10	13	16
R-HDPE	1.13±0.14	1.18±0.04	1.21±0.03	1.08±0.17	1.24±0.06	1.07±0.07
HDPE	1.18±0.05	1.14±0.05	1.16±0.04	1.03±0.05	1.10±0.06	1.08±0.07
Ca2	1.06±0.05	1.04±0.02	1.12±0.06	1.20±0.06	0.99±0.04	0.93±0.05
Ca2T	1.15±0.04	1.13±0.04	1.12±0.04	0.98±0.06	1.01±0.10	1.01±0.07
Ca2I	1.14±0.11	1.14±0.03	1.16±0.06	1.08±0.07	1.03±0.11	1.01±0.08
Ca2TI	1.10±0.05	1.16±0.04	1.11±0.03	1.09±0.16	1.03±0.06	0.99±0.12

#### 4.6 สมบัติทางความร้อน

จากการนำสารตัวอย่างแต่ละสูตรมาวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง (DSC) จะได้ค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Crystalline melting temperature,  $T_m$ ) อุณหภูมิการเกิดผลึก (Recrystallization temperature,  $T_c$ ) เอนทาลปีของการหลอมเหลวผลึก (Heat of fusion,  $\Delta H_f$ ) เพื่อนำค่าที่ได้จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (% Crystallinity, %Cry) ดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

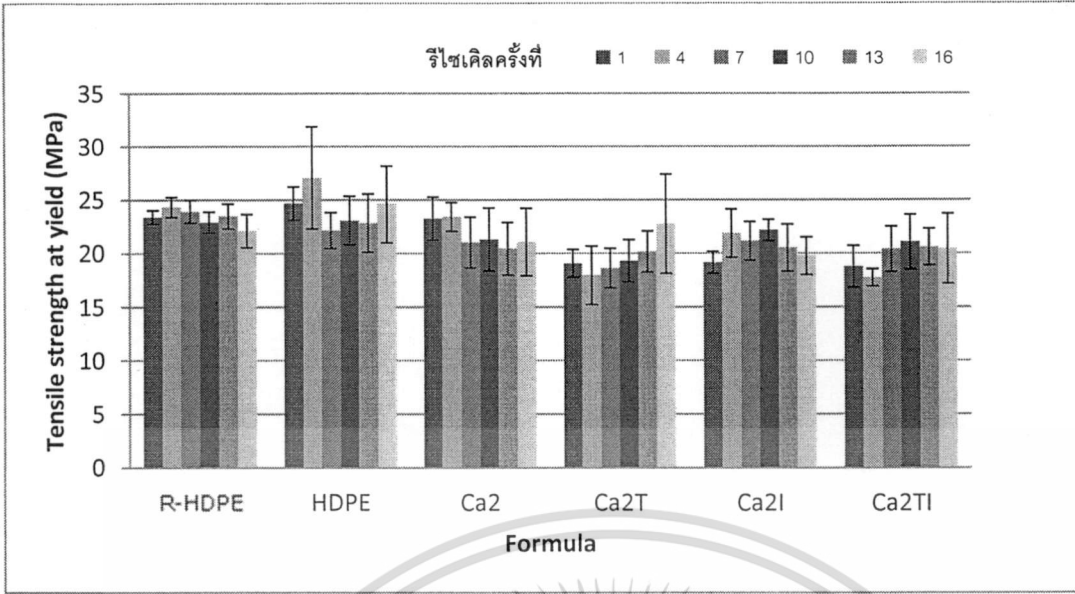
ตารางที่ 4.4 ค่าสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์

สูตร	%CaCO <sub>3</sub>	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>m</sub> (°C)	ΔH <sub>f</sub> (J/g)	%Cry
R-HDPE	0	113	137	160.6	54.8
HDPE	0	111	137	178.3	60.8
Ca2	31.8	110	136	124.8	62.5
Ca2T	32.6	112	134	120.6	61.1
Ca2I	33.7	114	131	111.7	57.5
Ca2TI	33.0	114	133	112.3	57.2

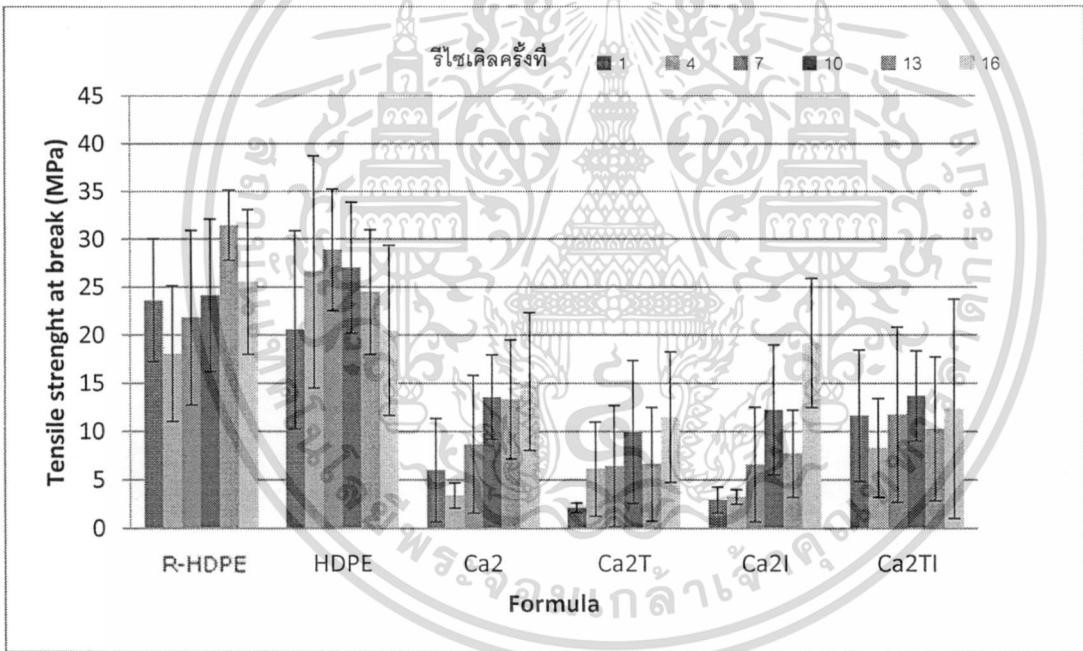
จากตารางที่ 4.4 พบว่าค่าอุณหภูมิของการหลอมเหลวผลึก และอุณหภูมิของการเกิดผลึกของแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าขนาดผลึกที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่มีอยู่ในสารตัวอย่างพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันเช่นกัน แสดงให้เห็นว่า CaCO<sub>3</sub> ไม่ได้ช่วยให้การเกิดผลึกของ HDPE ไม่เปลี่ยนแปลงไป เพราะการมี CaCO<sub>3</sub> 30% โดยน้ำหนัก ไม่มีผลต่อขนาดและปริมาณผลึกของ HDPE

#### 4.7 สมบัติการรับแรงดึง

นำขวดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการระบวนการเป่าขึ้นรูปไปทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องทดสอบอเนกประสงค์เพื่อหาค่าความเค้นดึง ณ จุดคราก (Tensile strength at yield) ความเค้นดึง ณ จุดขาด (Tensile strength at break) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดคราก (%Elongation at yield) เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at break) และค่ามอดูลัส (Modulus) โดยค่าที่ได้แสดงดังกราฟภาพที่ 4.5-4.9

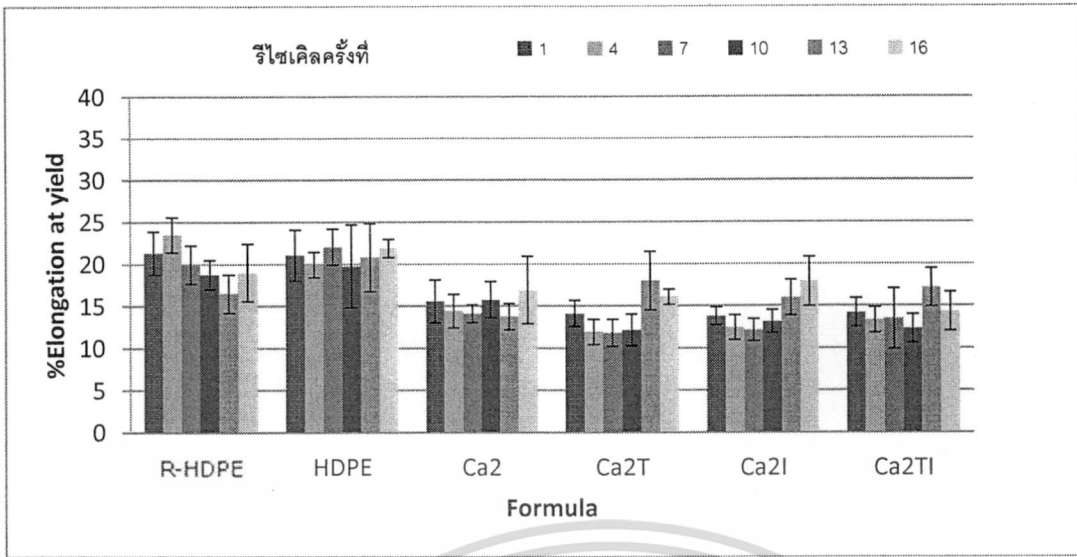


ภาพที่ 4.5 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดคราก ของชิ้นงาน

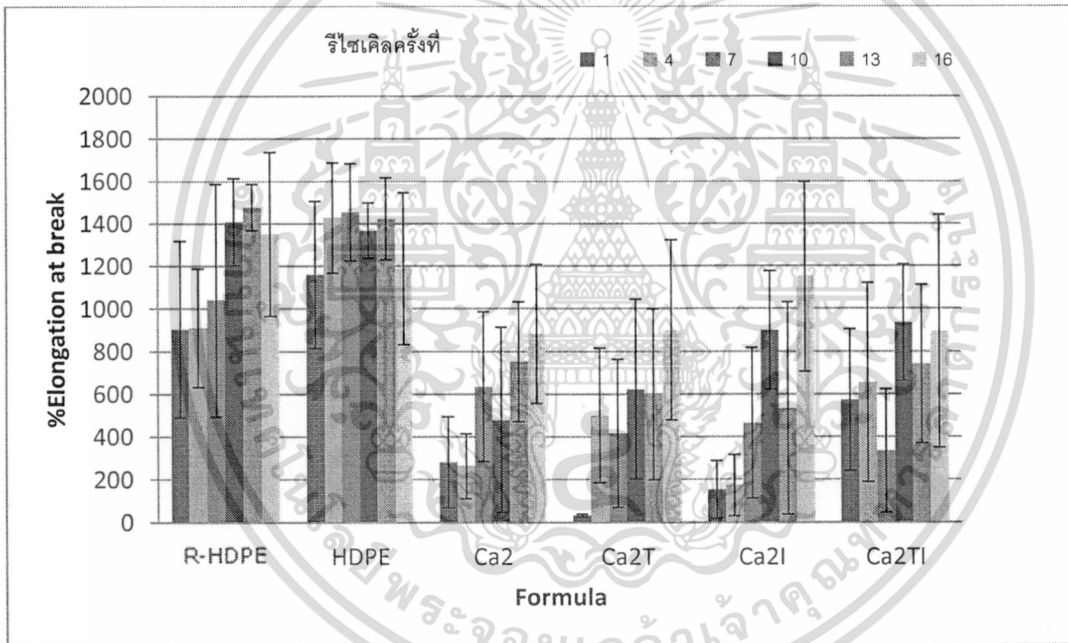


ภาพที่ 4.6 ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

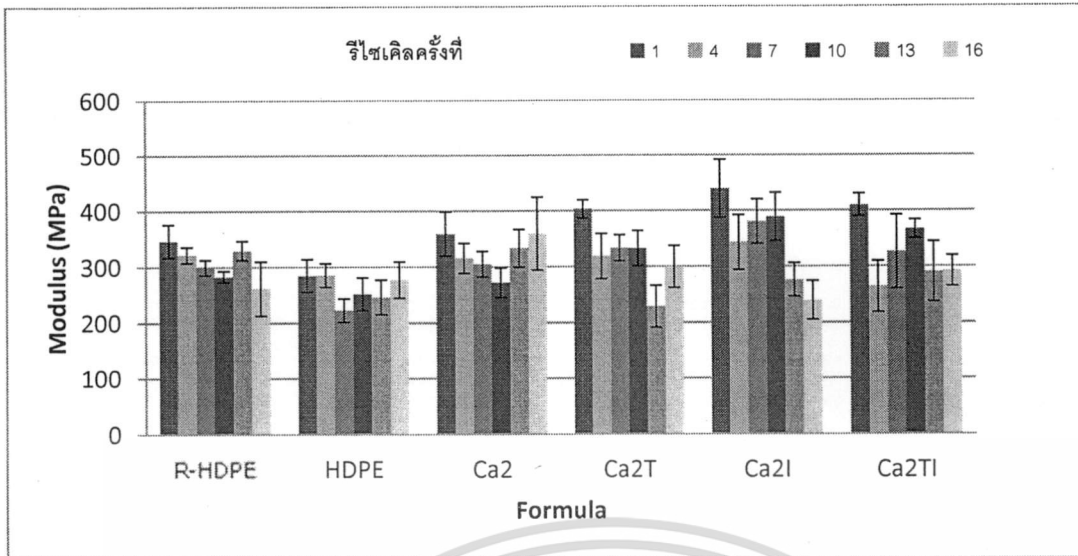


ภาพที่ 4.7 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดครากของชิ้นงาน



ภาพที่ 4.8 ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 ค่ามอดุลัสของชิ้นงาน

จากภาพที่ 4.6 พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดของขวดสูตร R-HDPE และ HDPE มีค่าเริ่มต้นใกล้เคียงกัน และเมื่อผ่านรอบการรีไซเคิลที่มากขึ้นค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งมีผลสอดคล้องกับค่า MFI และเมื่อผสม  $\text{CaCO}_3$  ลงใน HDPE ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าน้อยกว่าขวดสูตร R-HDPE และ HDPE เนื่องจาก HDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นวัสดุที่ไม่มีขี้ แต่  $\text{CaCO}_3$  เป็นวัสดุภาคที่มีขี้เมื่อผสมกันจึงไม่เกิดแรงกระทำระหว่างกันทำให้ไม่สามารถเข้ากันได้ และการกระจายตัวที่ไม่ดี นอกจากนี้ยังเป็นการลดน้ำหนักในส่วนของ HDPE ที่เป็นส่วนที่รับแรงดึง ดังนั้นความสามารถในการรับแรงจึงลดลงตามปริมาณพอลิเมอร์ที่ลดลง และเมื่อผ่านรอบการรีไซเคิลที่มากขึ้นพบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ที่ลดลง ส่งผลให้ HDPE มีอัตราส่วนมากขึ้น

จากภาพที่ 4.8 พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดของขวดสูตร R-HDPE และ HDPE มีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อมีการเติม  $\text{CaCO}_3$  จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดที่ต่ำกว่า HDPE เพราะอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  เป็นอนุภาคที่แข็งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทำได้ยากต่างจากสายโซ่ HDPE จึงไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของสายโซ่และ  $\text{CaCO}_3$  ที่เติมเข้าไปเป็นวัสดุภาคที่มีขี้เมื่อผสมกัน จึงไม่เกิดแรงกระทำกับ HDPE เมื่อทำการดึงจึงเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาค  $\text{CaCO}_3$  และ HDPE จึงกลายเป็นจุดเริ่มการขาดของชิ้นงานส่วนการใช้  $\text{CaCO}_3$  ที่เคลือบผิวหรือ IRGASURF<sup>®</sup> ได้ค่าไม่แตกต่างกัน เมื่อจำนวนรอบการรีไซเคิลที่มากขึ้นพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้นเนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  กระจายตัวได้ดีขึ้นและมีปริมาณลดลง

จากภาพที่ 4.6 และ 4.8 ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรผันกว้างนั้น อาจเนื่องมาจากสิ่งปนเปื้อนและฝุ่นผงจากการบดและการขึ้นรูปทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องในเนื้อชิ้นงานมากขึ้น

จากภาพที่ 4.9 พบว่าค่ามอดุลัสของขวดสูตร R-HDPE และ HDPE มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มคงที่เมื่อผ่านรอบการรีไซเคิลที่มากขึ้นและเมื่อเติม  $\text{CaCO}_3$  พบว่าได้ค่ามอดุลัสที่เพิ่มขึ้นจากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสองเนื่องมาจาก  $\text{CaCO}_3$  ที่เติมลงไปมีค่ามอดุลัสสูงกว่า HDPE [30] ดังนั้นพอลิเมอร์ตัวอย่างที่ได้จึงมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้น และพบว่าเมื่อผ่านรอบการรีไซเคิลที่มากขึ้นค่ามอดุลัสของสูตรที่เติม  $\text{CaCO}_3$  มีค่าลดลงเนื่องจากปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ในพอลิเมอร์ผสมมีปริมาณที่น้อยลงจากการรีไซเคิลทำให้อัตราส่วนของ HDPE เพิ่มขึ้นทำให้ได้ค่ามอดุลัสที่ต่ำลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากระบวนการเป่าขึ้นรูปและสมบัติต่างๆ ของขวดนมเมจิที่นำมารีไซเคิล และ ผลิตภัณฑ์ขวด HDPE ที่ผสมสารตัวเติม  $\text{CaCO}_3$  ชนิดที่เคลือบและไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกหรือมีการใช้ IRGASURF® เป็นสารช่วยผสมระหว่าง HDPE กับ  $\text{CaCO}_3$  สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

- ขวดสูตร R-HDPE และ HDPE มีค่า MFI ที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ได้ค่าความหนืดที่ใกล้เคียงกัน เมื่อจำนวนรอบการรีไซเคิลที่มากขึ้นพบว่าการเสียดสีทางความร้อนแบบการเชื่อมโยงสายโซ่และขาดออกของสายโซ่ เมื่อเติมสารตัวเติม  $\text{CaCO}_3$  พบว่าความหนืดมีค่าต่ำกว่า HDPE และเมื่อจำนวนรอบการรีไซเคิลที่มากขึ้นพบว่ามีค่า MFI เพิ่มขึ้นน้อยมากเนื่องจากการเสียดสีทางความร้อนแบบการเชื่อมโยงสายโซ่ ปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ลดลง และการนำความร้อนของ  $\text{CaCO}_3$  และเมื่อใช้ กรดสเตียริกและ IRGASURF® พบว่าช่วยให้การไหลดีขึ้น
- เมื่อผสม  $\text{CaCO}_3$  ลงใน HDPE พบว่า  $\text{CaCO}_3$  ยังกระจายตัวได้ไม่ดีเนื่องจากความต่างกันของขั้ว แต่เมื่อมีการเคลือบกรดสเตียริกและ/หรือ IRGASURF®  $\text{CaCO}_3$  มีการกระจายได้มากยิ่งขึ้น ส่วนในกระบวนการรีไซเคิลที่ 1 พบว่าอนุภาคของ  $\text{CaCO}_3$  ยังมีขนาดใหญ่แต่เมื่อผ่านการรีไซเคิลไป 16 รอบ พบว่าอนุภาคมีขนาดเล็กลง
- น้ำหนักของขวดที่มีการผสม  $\text{CaCO}_3$  มีน้ำหนักที่มากกว่าสูตร R-HDPE และ HDPE บริสุทธิ์ และมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อผ่านการรีไซเคิล โดยสูตรที่ผสม  $\text{CaCO}_3$  จะมีน้ำหนักที่ลดลงได้ชัดเจนกว่า ส่วนความหนาของขวดที่มีการผสม  $\text{CaCO}_3$  มีความหนาที่น้อยกว่า สูตร R-HDPE และ HDPE เนื่องจาก  $\text{CaCO}_3$  ไปขัดขวางการเกิดการบวมตัวที่พาริสันและจะเด่นชัดขึ้นเมื่อผ่านการรีไซเคิลมากขึ้นเพราะการกระจายตัวของ  $\text{CaCO}_3$  ที่สูงขึ้นมากขึ้น
- พอลิเมอร์ตัวอย่างทุกสูตรมีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวผลึก อุณหภูมิการเกิดผลึกและเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกใกล้เคียงกัน ส่วนการใช้  $\text{CaCO}_3$  ที่เคลือบผิวและไม่เคลือบผิวด้วยกรดสเตียริกและ/หรือ IRGASURF® ไม่ส่งผลต่อขนาดและปริมาณการเกิดผลึกใน HDPE
- ค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด ค่าเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด ของขวดสูตร R-HDPE และ HDPE พบว่ามีค่าเริ่มต้นใกล้เคียงกันและเมื่อผ่านรอบการรีไซเคิลมากขึ้น พบว่าค่าความแข็งแรงดึง ณ จุดขาด สูงขึ้นเพียงเล็กน้อย สูตรที่มีการเติม  $\text{CaCO}_3$  พบว่ามีค่าน้อยกว่า HDPE และมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ส่วนค่ามอดุลัสของสูตร R-HDPE และ HDPE มีค่าใกล้เคียงกันและน้อยกว่า สูตรที่มีการเติม  $\text{CaCO}_3$  และเมื่อผ่านการรีไซเคิลที่จำนวนรอบมากขึ้นพบว่ามีค่าที่ลดลงเนื่องจากปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ขึ้น

1. ศึกษาความแข็งแรงกระแทกแบบทิ้งน้ำหนัก เพื่อเห็นผลความแตกต่างของสมบัติชัดเจนมากขึ้น
2. ศึกษาสมบัติของขวดโดยการควบคุมปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ให้มีปริมาณคงที่ ในแต่ละรอบการรีไซเคิล เพื่อเห็นผลการทดลองในเรื่องการรีไซเคิลชัดเจนมากขึ้น
3. ศึกษาสมบัติเมื่อมีการเปลี่ยนปริมาณ IRGASURF® เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. ชมรมนมสร้างชาติ. **Thai Dairy Fact Book 2009**. ปทุมธานี : ชมรมนมสร้างชาติ. 2551.
2. บุษกร ประดิษฐ์นียกุล. **บรรจุภัณฑ์ผลิตภัณฑ์นม**. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์บรรจุหีบห่อ, สถาบันวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2526.
3. วิรุฬ หกกลับ. **รีไซเคิลในชีวิตประจำวัน**. กรุงเทพมหานคร. 2552.
4. รุจิ จิตวิธน์ชัยกุล. **เอกสารอบรมสิ่งแวดล้อม**. กรุงเทพมหานคร : รีไซเคิลเอ็นจีเนียลริ่ง. 2548.
5. สุเมธ ธิติชนากร. **ขยะพลาสติกกำลังรูดอุตสาหกรรมรีไซเคิล**. กรุงเทพมหานคร : บริษัท นีโอเมติก จำกัด. 2543.
6. ไพศาล นาคพิพัฒน์. **สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่ม 28**. กรุงเทพมหานคร : โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. 2554.
7. Muangpluem S. "A study of the Rheology and Properties of Blow Moulded High Density Polyethylene." **Ph.D. Thesis of Polymer Science**. Mahidol University. 1994.
8. สุภรัตน์ รักชลธิ. **เอกสารประกอบการเรียนวิชา Packaging Technology**. สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554.
9. Xinyi Mould. "Extrusion Blow Molding." [Online]. Available: <http://www.prettypmould.com/> 2013.
10. Jesse E. **Plastic Additive and Modifiers Handbook**. 1<sup>st</sup> Ed. London : Champman & Hall, Inc. 1996.
11. Wade L.G. **Organic Chemistry**. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1995.
12. Morton-Jones D.H. **Polymer Processing**. London : Champman & Hall, Inc. 1989.
13. Loutcheva M.K., Proietto M., Jilov N. and La Mantia F.P. "Recycling of high density polyethylene containers." *Polym. Degrad. Stab.* Vol. 57. pp. 77-81. 1997.
14. คาริน วงศ์วัฒน์เศรษฐ์ และพิทยา เหลืองวนิชประภา. "ผลของการเคลือบผิวสารตัวเติมแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีผลต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง"  
**โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542.**
15. ประมินทร์ ช้างเพชร และประภคณัฐ แสงทองอินทชัย. "การปรับปรุงสมบัติของ HDPE ที่มี CaCO<sub>3</sub> เป็นสารตัวเติมโดยใช้สารคู่ควบ" **โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2543.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. ชนเรศ ประเสริฐวงษ์ และธราศรัย แสงภักดี. “การใช้สารช่วยผสมปรับปรุงสมบัติพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่มีการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต” *โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2544.
17. ณัฐวุฒิ พัทธ์ศิริ. “กระบวนการเป่าขึ้นรูปชนิดอัตรัดขวดพอลิเมอร์เอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตชนิดดัดแปร” *วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง*. 2548.
18. Ruckchonlatee S., Amornsakchai T. and Limpong P. “Properties of Calcium carbonate-filled Polyethylene Bottles produced from Extrusion blow molding process.” *KMITL Sci. J.* Vol. 6(2b). pp. 582-589. 2006.
19. Jumba S. “Elongational Rheometry and Processing of Filled Polyethylene Melts.” **Ph.D. Thesis**, Institute of Polymer and Material Engineering, Loughborough University, U.K. 1998.
20. Papirer E., Schultz J., and Turchi C. “Surface Properties of Calcium carbonate Filler Treated with Stearid acid.” *Eur.Polym.J.* Vol. 20(12). pp. 1155-1158. 1984.
21. Sumanutvarapun P., Prasassarakich P., Trakulcoo K., and Kiatkamjornwong S. “Mechanical Properties of Polyethylene Filled with Calcium Carbonate.” *J.Sci.Res.Chula.Univ.* Vol. 19(2). pp. 235-248. 1994.
22. Premphet K. and Horanont P. “Improving Performance of Polypropylene Through Combined Use of Calcium Carbonate and Metalocene-Produced Impact Modifier.” *Polym.Plast.Technol.Eng.* Vol. 40(3). pp. 235-247. 2001.
23. Maiti S.N. and Jeyakumar R. “Mechanical and Melt Rheology Properties of CaCO<sub>3</sub>-Filled Polyethylene.” *J.Polymer.Mater.* Vol. 7. pp. 29-34. 1990.
24. Fu Q. and Wang G. “Polyethylene Toughened by Rigid Inorganic Particles.” *Polym.Eng.Sci.* Vol. 32(2). pp. 94-97. 1992.
25. Pauquet J.R. “Ciba additive makes polypropylene fibre hydrophilic.” [Online]. Available:<https://161.246.22.23/science/article/pii/,DanaInfo=.awxyCwholvloou4sr9Qu76+S0306374702110062>. 2011.
26. Robert A.S. “Standard Test Method for Determination of Properties of Polymeric Materials by Means of a Capillary Rheometer.” **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 9.03. pp. 201-207. 1992.
27. Robert A.S. “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.” **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 8.01. pp. 155-171. 1992.

28. Robert A.S. "Standard Test Method for Melting and Crystallization Temperatures by Thermal Analysis." **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 14.02. pp. 582-585. 1992.
29. Robert A.S. "Standard Test Method for Composition Analysis by Thermogravimetry." **Annual Book of ASTM Standards**. Vol. 14.02. pp. 712-716. 1992.
30. James E.Mark. **Physical Properties of Polymer Handbook**. New York : Woodbury. 1996.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัว

นางสุภารัตน์ รักชลธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วทบ. (เกียรตินิยม)	เคมีอุตสาหกรรม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	พ.ศ. 2535
MSc	Polymer Science and Technology	Loughborough University	พ.ศ. 2537
PhD	Polymer Rheology	Loughborough University	พ.ศ. 2541

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ

- Polymer Processing and Compounding

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
พ.ศ. 2536-2541	ทุนเรียนปริญญาโท-เอก ณ สหราชอาณาจักร	กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
พ.ศ. 2543	ทุนวิจัย พัฒนา และวิศวกรรมขนาดเล็ก	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)
พ.ศ. 2547	ทุนวิจัยงบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2548	ทุนวิจัยงบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2552	ทุนงบประมาณแผ่นดิน	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2553	ทุนวิจัยความร่วมมือกับเอกชน	บริษัท เวสเทิร์นดิจिटอล (ประเทศไทย) จำกัด
พ.ศ. 2555	ทุนวิจัยงบรายได้ คณะวิทยาศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. Haworth, B. and Jumpa, S., Understanding Elongational Flow Properties of Filled Polymer Melts for Plastics Blow Molding, *Food, Cosmetics and Drug Packaging*, **21(11)**, 213, 1998.
2. Haworth, B. and Jumpa, S., Extensional Flow Characterization and Extrusion Blow Molding of High Density Polyethylene Modified by Calcium Carbonate, *Plastics Rubber and Composites*, **28(8)**, 363, 1999.
3. Haworth, B. and Jumpa, S., Melt-State Elongational Rheometry of Mineral-Filled Polyethylene, *Polymer Testing*, **19(4)**, 459, 2000.
4. สุภารัตน์ รักขลธิ์ ชนเรศ ประเสริฐวงศ์ และชราศรัย แสงภักดี, “ผลของชนิดของสารช่วยผสมต่อสมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงที่ผสมแคลเซียมคาร์บอเนต”, *วารสารเทคโนโลยีสุรนารี*, **9(4)**, 253, 2545.
5. สุภารัตน์ รักขลธิ์ กังสตาล บัวบุตรา ณัฐนิชารั ศิริเจียรนัย และกัญญาวิวี สุวรรณชัย, “สมบัติของฟิล์มพอลิเอทิลีนที่ผสมสารเติมแต่งซีโอไลต์”, *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, **30(4)**, 262, 2545.
6. สุภารัตน์ รักขลธิ์ ปรมินทร์ ช้างเพชร และประกฤษฏี แสงทองอโณทัย, “สมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงต่อกึ่งด้วยมาเลอิกแอนไฮโดรด์เป็นสารช่วยผสม”, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. **12(1)**, 27, 2546.
7. สุภารัตน์ รักขลธิ์ พงษ์ธร แซ่ฮุย ชีระชาติ ก่อตระกูล และปานหทัย ชื่นพุฒิ, ผลของเส้นแกลบในสารตัวเติมผสมต่อสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. **12(2)**, 13, 2546.
8. สุภารัตน์ รักขลธิ์ ชีระชาติ ก่อตระกูล ปานหทัย ชื่นพุฒิ และพงษ์ธร แซ่ฮุย, อิทธิพลของเส้นแกลบในสารตัวเติมผสมต่อความสามารถในการขึ้นรูปและสมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ, *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*. **12(3)**, 50, 2547.
9. Rukchonlatee, S., Amornsakchai, T. and Limpong, P., Properties of Calcium Carbonate- Filled Polyethylene Bottles Produced from Extrusion Blow Molding Process, *KMITL Science Journal*, **6(2b)**, 582, 2006.
10. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Fuongfuchart, A. and Sirikittikul, D., Selective ethylene permeable zeolite composite double-layered film for novel modified atmosphere packaging, *Polymer Engineering and Science.*, **51(7)**, 1264, 2011. (Impact factor 2009: 1.248)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การเสนอผลงานวิชาการ

1. Haworth, B. and Jumpa, S., Elongational Rheometry of Filled Polyethylene Melts, Loughborough Fillers Symposium II, 17<sup>th</sup>–18<sup>th</sup> September 1996, Loughborough, UK.
2. Haworth, B. and Jumpa, S., Processing Behavior of Filled HDPE for Blow Molding, Advances in Blow Molding: New Materials and Processes, 30<sup>th</sup> June – 1<sup>st</sup> July 1998, Loughborough, UK
3. Haworth, B., Jumpa, S., and Miller, N.A., Proceeding International Conference “PPS-15”, S’Hertogenbosch, The Netherlands, 1999, Polymer Processing Society, Paper 132.
4. Jumpa, S and Haworth, B., Extrusion Blow Moulding of CaCO<sub>3</sub>-Filled HDPE Compounds, PPS Symposium, Thailand, P-50, 1999.
5. Jangchud, I. and Rukchonlatee, S., Porous Water Pipe made from Ground Rubber Tire (GRT) and High Density Polyethylene (HDPE): Rheology and Water Irrigation, *The 8<sup>th</sup> Pacific Polymer Conference Proceedings*, November 24-27, Bangkok, Thailand, 120, 2003.
6. Rukchonlatee, S., Water Vapor Permeability, Rheological and Mechanical Properties of Zeolite NaA –filled Linear Low Density Polyethylene, *The 8<sup>th</sup> Pacific Polymer Conference Proceedings*, November 24-27, Bangkok, Thailand, 134, 2003.
7. Ochaikul, D., Rukchonlatee, S., Soisant, P., Aramruang, S., and Fapratanchai, T., Paper Production and Properties from Bacterial Cellulose *Acetobacter xylinum* TISTR 967, *The 1<sup>st</sup> KMITL International Conference Proceedings*, August 25-26, Bangkok, Thailand, Vol.1, 153, 2004.
8. ระเบียบสูงเนิน ปุณณมา ศิริพันธ์โนน ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธิ์, การเตรียมวัสดุประกอบนาโนระหว่างพอลิ(สไตรีน-บิวทาไดอีน-สไตรีน) กับมอนต์มอริลโลไนต์ด้วยเทคนิคการหล่อแบบสารละลาย, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICHe 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
9. อภิขญา เจียนประเสริฐ ปุณณมา ศิริพันธ์โนน สุภารัตน์ รักชลธิ์ และชลลดา ฤตวิรุฬห์, ผลของสารช่วยผสมต่อสมบัติของวัสดุประกอบนาโน LDPE/MMT, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17 (TICHe 17), 29-30 ตุลาคม, เชียงใหม่, 2550.
10. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Study on Ethylene Gas Permeability of Double-layer Composite Film, *Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON)*, January 14-16, Naresuan University, Phitsanulok, Thailand, 82, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. ดวงใจ โอชัยกุล สุภารัตน์ รักชลธี นवलพรรณ ณ ระนอง และพิชพันธ์ พงษ์สกุล, ผลของไคโตซานต่อการผลิตกระดาษจากเซลลูโลสแบคทีเรียและสมบัติที่ได้, การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48, เล่มที่ 6 สาขาวิทยาศาสตร์, กรุงเทพฯ, 313-320, 2552.
12. Moungrmee, N., Rukchonlatee, S. and Sooknoi, T, Improvement on Tensile Properties of Water-Permeable LDPE Film with EVA as Co-Matrix and Non-Reinforcing Zeolite Filler, *The 6<sup>th</sup> International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 121, 2009.
13. Monprasit, P., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S., Sooknoi, T. and Fuongfuchart, A., Tensile Properties of the Zeolite Composite Double-Layered Film, *The 6<sup>th</sup> International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 156, 2009.
14. Laowakul, S., Sooknoi, T., Ritvirulh, C., Rukchonlatee, S. and Fuongfuchart, A., Study on Tensile Properties of SEBS/LDPE and SEBS/OPP double-layer films for Packaging Application, *The 6<sup>th</sup> International Symposium on Advance Material in Asia-Pacific Rim (ISAMAP)*, November 21-23, Bangkok, Thailand, 163, 2009.
15. Laowakul, S., Ritvirulh, C., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Fuongfuchart, A. and Sirikittikul, D., Ethylene Transmission Rate through Zeolite Modified Double-Layered Films for Packaging of Fresh Produces, *The 7<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 45, 2010.
16. Moungrmee, N., Sooknoi, T. and Rukchonlatee, S., Improved Water Vapor Permeability of Fresh Produces Packaging Film: Zeolite A-Filled LDPE/EVA, *The 7<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 49, 2010.
17. Rukchonlatee, S., Amornsakchai, T. and Payaksiri, N., Investigation on Extrusion Blow Molding Process and Properties of Modified CaCO<sub>3</sub>-Filled HDPE Bottles, *The 7<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Materials in Asia-Pacific (ISAMAP)*, September 30-October 1, Ishikawa, Japan, 147, 2010.
18. สมยศ รัตนไพบูลย์กิจ, ตะวัน สุขน้อย, ชลลดา ฤตวิรุฬห์ และสุภารัตน์ รักชลธี, ฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง, การประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 4, ณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 12-13 มีนาคม, พิษณุโลก, 2554.

19. Jaisomboon, N., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S., Enhancement of Water Vapor Permeation of LLDPE Film with EVA as Dispersed Phase, The 38<sup>th</sup> Congress on Science and Technology of Thailand (STT38), October 17-19, Chiang Mai, Thailand, E\_E0007, 2012.
20. Wiwattananukul, R., Sooknoi, T., Rukchonlatee, S. and Ritvirulh, C., Improved the ethylene transmission rate of LLDPE/SEBS blend film, The proceedings Pure and Applied Chemistry International Conference 2013 (PACCON 2013), January 23-25, Bangsaen, Thailand, 1033, 2013.

#### บทความวิชาการที่เผยแพร่

1. สุภารัตน์ จำปา, “เครื่อง Uniaxial Elongational Rheometer สำหรับศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว”, วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง, 10(1), 8, 2543.

#### งานแปลหนังสือ

1. สุภารัตน์ จำปา อะลูมิเนียม นานมีบุ๊คส์ กรุงเทพฯ 2542.
2. จินดา อุดชาชน ตะวัน สุชน้อย อธิพิพล แจ่มชัด สุภารัตน์ จำปา และชลลดา ฤตวิรุฬห์ เคมี่ หลักสูตร แห่งชาติระดับมัธยมศึกษา (GCSE) ของประเทศอังกฤษ นานมีบุ๊คส์ กรุงเทพฯ 2542.

#### งานเขียนและเรียบเรียงหนังสือ

1. สุภารัตน์ รักชลธิ์ (กองบรรณาธิการ) สาร...อะโรเมติกส์เฉลิมพระเกียรติ บริษัทอะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด 2549.
2. อธิพิพล แจ่มชัด ชลลดา ฤตวิรุฬห์ จุฬารัตน์ ปรัชญาวรากร สุภารัตน์ รักชลธิ์ และสมศักดิ์ วรมงคลชัย ปฏิบัติการเทคโนโลยีพอลิเมอร์ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. จำนวน 77 หน้า 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้