



สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรพธาลาตกับพริสทีน  
กับขวดพอลิเอทิลีนเทเรพธาลาตที่ใช้แล้ว

MACHANICAL PROPERTIES OF VIRGIN PET AND  
RECYCLE PET BLEND

นายคุณิธิ ศรีสุวรรณ รหัส 48365132  
นางสาวสุธารัตน์ จันทร์ศรีทอง รหัส 48365323

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 7. ก.ค. 2553
เลขทะเบียน..... 507943
เลขเรียกหนังสือ.....
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๒๕๕๓

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร  
ปีการศึกษา 2552



## ใบรับรองปริญญาโท

**หัวข้อโครงการ** สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลทกับวัสดุ  
กับขวดพอลิเอทิลีนเทเรพทาเลทที่ใช้แล้ว

**ผู้ดำเนินโครงการ** นายคุณนิตี ศรีสุวรรณ รหัส 48365132  
นางสาวสุธารัตน์ จันทร์ศรีทอง รหัส 48365323

**อาจารย์ที่ปรึกษา** อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์

**สาขาวิชา** วิศวกรรมวัสดุ

**ภาควิชา** วิศวกรรมอุตสาหกรรม

**ปีการศึกษา** 2552

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบรบรัมย์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

.....ที่ปรึกษาโครงการ  
(อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์)

.....กรรมการ  
(ดร.นพวรรณ โมทอง)

.....กรรมการ  
(อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ชวลีพรชัย ป่าไร่)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์)

<b>หัวข้อโครงการงาน</b>	สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอธิลีนเทเรพธาลาท บริสุทธิ์กับขวดพอลิเอธิลีนเทเรพธาลาทที่ใช้แล้ว		
<b>ผู้ดำเนินโครงการงาน</b>	นายคุณนิตี	ศรีสุวรรณ	รหัส 48365132
	นางสาวสุธารัตน์	จันทร์ศรีทอง	รหัส 48365323
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์		
<b>สาขาวิชา</b>	วิศวกรรมวัสดุ		
<b>ภาควิชา</b>	วิศวกรรมอุตสาหกรรม		
<b>ปีการศึกษา</b>	2552		

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอธิลีนเทเรพธาลาทบริสุทธิ์ (Poly(ethylene terephthalate) Virgin : PET<sub>p</sub>) กับ ขวดพอลิเอธิลีนเทเรพธาลาทที่ใช้แล้ว (Poly(ethylene terephthalate) Recycle : PET<sub>r</sub>) สำหรับสมบัติเชิงกลที่ได้ทำการศึกษาคือ ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength), ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at Break), โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) และดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index : MFI)

ในการศึกษาพอลิเมอร์ผสมประกอบด้วยอัตราส่วนผสมของ PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> คือ 100:0, 100:10, 100:20, 100:30, 100:40, 100:50, 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 และ 100:100 phr โดยศึกษากระบวนการฉีดขึ้นรูปที่สภาวะการขึ้นรูป Feed zone 255 °C, Compression zone 260 °C, Metering zone 265 °C, Nozzle zone 270 °C และ กำหนดให้อุณหภูมิในส่วนของแม่พิมพ์เป็น (Mold temperature) 70 °C ความเร็วรอบ 50 rpm ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> พบว่าเมื่อมีการเติม PET<sub>r</sub> สมบัติความแข็งแรงดึง โมดูลัสของยัง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเติม PET<sub>r</sub> ส่งผลให้จำนวนโมเลกุลลดลง เนื่องจากนำ PET<sub>r</sub> มาขึ้นรูปซ้ำสายโซ่ที่ได้จึงสั้นลง และยังมีผลถึงโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลง ส่งผลให้สมบัติความแข็งแรงดึง โมดูลัสของยัง และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด มีแนวโน้มลดลง การศึกษาดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> พบว่า ดัชนีการหลอมไหลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนโมเลกุลลดลงและสายโซ่ที่สั้นลง ส่งผลถึงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมลดลง สายโซ่จึงมีการเคลื่อนไหวได้อิสระขึ้น ดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมจึงเพิ่มขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาอย่างดีจาก อาจารย์ศิริกาญจน์ ชันสัมฤทธิ์ อาจารย์ ที่ปรึกษาโครงการในการให้ความรู้ คำปรึกษาและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการค้นหาข้อมูล และแนวทางในการวิเคราะห์ต่างๆ ตลอดจนสละเวลาให้คำแนะนำทั้งภาคทฤษฎี และภาคปฏิบัติ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณา และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณดร.นพวรรณ ไม้ทอง อาจารย์ชุลีพรย์ ป่าไร่ อาจารย์กฤษณา พูลสวัสดิ์ และ อาจารย์ปิยนันท์ บุญพยัคฆ์ ที่กรุณาสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบโครงการพร้อมทั้ง ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และข้อเสนอแนะในการปรับปรุงแก้ไขโครงการนี้

ขอบคุณครูช่างภาควิชาอุตสาหกรรม และภาควิชาเครื่องกลทุกท่านที่คอยเอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำโครงการ อีกทั้งยังคอยแนะนำการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมืออย่างถูกต้อง

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวรที่ให้วิชาความรู้และ อบรมสั่งสอนให้ผู้จัดทำเป็นคนดีของสังคม

ขอบคุณเพื่อนทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และคำปรึกษาในการทำโครงการนี้ จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำเนิด และทำให้มีวันนี้คุณค่า และประโยชน์จาก โครงการนี้ ทางผู้จัดทำขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

คณะผู้ดำเนินโครงการวิศวกรรม

นายคุณนิธิ ศรีสุวรรณ

นางสาวสุธารัตน์ จันทร์ศรีทอง

มีนาคม 2553

# สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
สัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output).....	2
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome).....	2
1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ.....	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ.....	3
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ.....	3
1.8 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ (Gantt Chart).....	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น.....	4
2.1 พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลท (Poly(ethylene terephthalate) : PET).....	4
2.2 สมบัติของ PET.....	4
2.3 ข้อดีของ PET.....	5
2.4 ข้อเสียของ PET.....	6
2.5 การประยุกต์ใช้งาน PET.....	6
2.6 การรีไซเคิลพลาสติกในปัจจุบัน.....	6
2.7 โครงสร้างของพอลิเมอร์ 2 ประเภท.....	11
2.8 การขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding machine).....	14

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 การทดสอบ.....	16
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....</b>	<b>22</b>
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	22
3.2 อุปกรณ์.....	22
3.3 วิธีการทดลอง.....	22
<b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....</b>	<b>26</b>
4.1 ผลการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป แบบไม่มีเครื่องคองอุณหภูมิแม่พิมพ์.....	27
4.2 ผลการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป แบบมีเครื่องคองอุณหภูมิแม่พิมพ์.....	27
<b>บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>32</b>
5.1 สรุปผล.....	32
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	33
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>34</b>
<b>ภาคผนวก ก.....</b>	<b>36</b>
<b>ประวัติผู้ดำเนินโครงการ.....</b>	<b>38</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการปฏิบัติงาน.....	3
2.1 สมบัติของพอลิเอธิลีนเทเรพทาเลท เกรด SA 135T.....	5
2.2 สัญลักษณ์การรีไซเคิลพลาสติก.....	10
2.3 แสดงดีกรีความเป็นผลึกสูงสุด (Maximum degree of crystallinity, $X_{c(max)}$ ), อัตราการเจริญเติบโตของผลึกสูงสุด ( $v_{max}$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ.....	13
2.4 สมบัติเชิงกลที่ใช้ในการทดสอบ.....	16
2.5 ตัวอย่างสภาวะการทดสอบเม็ดพอลิเมอร์ตามมาตรฐาน.....	20
3.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง $PET_p : PET_R$ .....	23
4.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง $PET_p : PET_R$ .....	25
ก.1 ค่าเฉลี่ยสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง $PET_p : PET_R$ ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	37
ก.2 ค่าเฉลี่ยดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง $PET_p : PET_R$ ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	37

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ethylene glycol+Purified terephthalic acid <sup>antimony trioxide</sup> PET .....	4
2.2 โครงสร้าง Poly (ethylene terephthalate) : PET (C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> O <sub>4</sub> ) <sub>n</sub> .....	5
2.3 ปริมาณขยะพลาสติกแต่ละประเภท.....	8
2.4 ผลิตภัณฑ์จากการรีไซเคิล PET.....	9
2.5 ขยะพลาสติกที่ผ่านการคัดแยกก่อนนำมารีไซเคิล.....	11
2.6 โครงสร้างพอลิเมอร์ (ก) โครงสร้างอสังฐาน (ข) โครงสร้างกิ่งผลึก.....	11
2.7 แบบจำลองผลึกสเฟียรูไลต์.....	12
2.8 เครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding machine).....	14
2.9 เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุ (Universal Testing Machine : UTM).....	18
2.10 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล.....	18
2.11 ลักษณะเครื่องมือ โดยพื้นฐานของ Melt Flow Index.....	19
3.1 ชิ้นงานพอลิเมอร์หลังการขึ้นรูป.....	23
4.1 ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> .....	27
(ก) พอลิเมอร์ผสม PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> ที่อัตราส่วน 100 : 40 phr	
(ข) พอลิเมอร์ผสม PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> ที่อัตราส่วน 100 : 50 phr	
(ค) พอลิเมอร์ผสม PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> ที่อัตราส่วน 100 : 60 phr	
(ง) พอลิเมอร์ผสม PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> ที่อัตราส่วน 100 : 70 phr	
(จ) พอลิเมอร์ผสม PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> ที่อัตราส่วน 100 : 80 phr	
(ฉ) พอลิเมอร์ผสม PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> ที่อัตราส่วน 100 : 90 phr	
(ช) พอลิเมอร์ผสม PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> ที่อัตราส่วน 100 : 100 phr	
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์สมบัติความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> ....	28
4.3 กราฟแสดงร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> .....	29
4.4 กราฟแสดงมอดุลัสความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> .....	30
4.5 กราฟแสดงดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET <sub>p</sub> : PET <sub>R</sub> ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ.....	31

## สัญลักษณ์และอักษรย่อ

PET	=	Poly(ethylene terephthalate)
PET <sub>p</sub>	=	Poly(ethylene terephthalate) Virgin
PET <sub>r</sub>	=	Poly(ethylene terephthalate) Recycle
phr	=	Part per hundred of rubber
MPa	=	Megapascal
MFI	=	Melt Flow Index
mm	=	Millimeter
min	=	Minute
kg	=	Kilograms
g	=	Gram
°C	=	Degree Celsius
rpm	=	Revolutions per minute



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ท่าโครงการ

ในปัจจุบันพอลิเมอร์เข้ามามีบทบาทในการดำเนินชีวิตของมนุษย์เราเป็นอย่างมากเนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษหลายด้าน สามารถใช้แทนวัสดุชนิดอื่นๆได้โดยเฉพาะคุณสมบัติด้านความแข็งแรง ความยืดหยุ่น ด้านทานการกระแทกสูง น้ำหนักเบา ด้วยคุณสมบัติดังกล่าวทำให้พอลิเมอร์ถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะพอลิเมอร์ประเภท พอลิเอธิลีนเทเรพทาเลทบริสุทธิ์ (Poly(ethylene terephthalate) Virgin : PET<sub>p</sub>) ได้รับความนิยมนับเป็นอย่างมากในการนำมาผลิตเป็นภาชนะบรรจุภัณฑ์ ที่เรียกว่า ขวดเพท เช่นขวดบรรจุน้ำดื่ม น้ำแร่ น้ำอัดลม น้ำมันพืช เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับ PET มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว มีปริมาณการผลิตและการใช้งานมากขึ้นจนทำให้เกิดปัญหาการจัดเก็บและกำจัดขวด PET ที่ใช้แล้ว

PET เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีสมบัติเหมาะสมในการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆด้วยเทคนิคพื้นฐาน เช่น การฉีด การอัดรีด หรือปั่นเป็นเส้นใยนอกจากนี้ยังมีสมบัติที่นำมาหลอมใหม่และขึ้นรูปซ้ำได้ เพราะโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกเป็นแบบสายโซ่ยาวซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระกว่าโครงสร้างแบบอื่นเมื่อพอลิเมอร์เกิดการ หลอมเหลวแล้วทำให้อุณหภูมิต่ำลงอย่างช้าๆ โครงสร้างสามารถเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลได้เร็วกว่าโครงสร้างแบบอื่น ทำให้เกิดประโยชน์จากการใช้เศษพอลิเมอร์หรือของเสียจากการผลิต

ดังนั้นจึงมีการคิดวิธีการรีไซเคิลขวดพอลิเอธิลีนเทเรพทาเลทที่ใช้แล้ว (Poly(ethylene terephthalate) Recycle : PET<sub>r</sub>) เพื่อลดปริมาณของขยะที่ได้จาก PET ลงและสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่อีกครั้ง ซึ่งการรีไซเคิลขวด PET มีหลายวิธี โครงการนี้ก็เป็นการศึกษาแนวทางในการนำขวด PET มารีไซเคิล โดยผ่านกระบวนการขึ้นรูปใหม่เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลของ PET หลังการรีไซเคิล ทั้งนี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการช่วยลดมลภาวะ ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการลดปริมาณขยะจากขวด PET และช่วยแบ่งเบาภาระการกำจัดขยะ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 ศึกษาผลของการใช้พอลิเมอร์ที่ใช้แล้ว (Recycled Polymer) ชนิด PET<sub>p</sub> ในการเตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วน 100:10, 100:20, 100:30, 100:40, 100:50, 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 และ 100:100 phr

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติเชิงกลและดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_r$  ที่อัตราส่วน 100:10, 100:20, 100:30, 100:40, 100:50, 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 และ 100:100 phr

### 1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Output)

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_r$  ที่อัตราส่วน 100:10, 100:20, 100:30, 100:40, 100:50, 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 และ 100:100 phr

### 1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcome)

สมบัติเชิงกลและดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_r$  ที่อัตราส่วน 100:10, 100:20, 100:30, 100:40, 100:50, 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 และ 100:100 phr

### 1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงการ

#### 1.5.1 พอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลองคือ

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_r$  ที่อัตราส่วน 100:10, 100:20, 100:30, 100:40, 100:50, 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 และ 100:100 phr

#### 1.5.2 สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา

- ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)
- โมดูลัสของยัง (Young's Modulus)
- ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at Break)
- ดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index)

ขั้นตอนและสภาพเงื่อนไขที่ใช้เตรียมชิ้นทดสอบที่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM ดังนี้

- ASTM D638 type III ซึ่งใช้ในการทดสอบ Tensile Strength, %Elongation at Break และ Young's Modulus (ASTM D638 type III เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบ Standard test method for tensile properties of plastic)

1.5.3 ศึกษาสมบัติเชิงกลและดัชนีการหลอมไหล จากพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ที่อัตราส่วนต่างๆ

- ISO 1133 ซึ่งใช้ในการทดสอบ Melt Flow Index (ISO 1133 เป็นมาตรฐานในการทดสอบดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์)

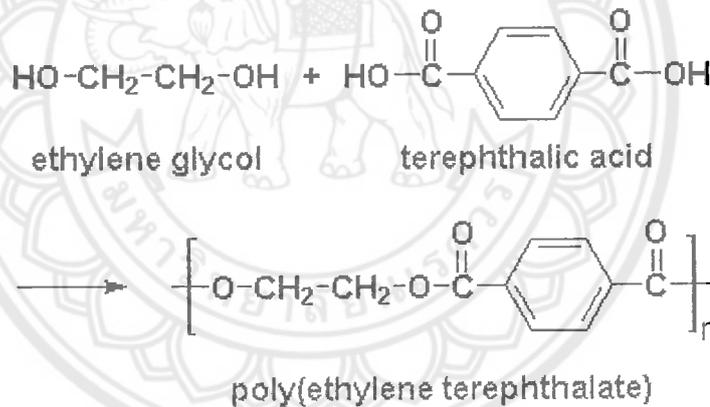


## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

#### 2.1 พอลิเอธิลีนเทเรพธาลาต (Poly(ethylene terephthalate) : PET)

PET ย่อมาจาก Poly(ethylene terephthalate) เป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถทำให้หลอมเหลวหรือเปลี่ยนรูปร่างได้ด้วยความร้อนและแข็งตัวเมื่อทำให้เย็น PET เกิดการทำปฏิกิริยาของพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation Polymerization) ของ Purified terephthalic acid (PTA) และ Ethylene glycol (EG) โดยมี Antimony trioxide หรือ Antimony triacetate เป็นสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ที่สภาวะสูญญากาศและอุณหภูมิสูงซึ่ง PET ที่ได้จะหลอมฟังกักชั้นเป็น เอสเทอร์ PET ถูกผลิตขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2493 ในรูปแบบของเม็ด (Pellerts) สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากคุณสมบัติในด้านความแข็งแรง ความคงทนต่ออุณหภูมิ และทนทานต่อการฉีกขาดจึงถูกนำมาเข้ามาทดแทนเส้นใยธรรมชาติ เช่น ผ้าไหม ผ้าฝ้าย และขนสัตว์[1]



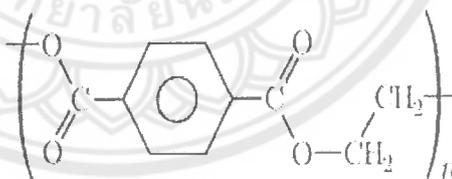
รูปที่ 2.1 ethylene glycol+Purified terephthalic acid  $\xrightarrow{\text{antimony trioxide}}$  PET[1]

#### 2.2 สมบัติของ PET

โครงสร้างของ PET มีลักษณะเป็นสายโซ่ตรงมีการจัดเรียงตัวโครงสร้างแบบกึ่งผลึก ส่งผลให้มีสมบัติเชิงกลที่ดี PET มีความทนต่อแรงดึงยึดได้สูง ไม่เปราะแตกง่าย ทนอุณหภูมิได้สูง ขึ้นรูปง่าย ป้องกันการซึมผ่านของก๊าซได้ดี น้ำหนักเบา ไม่มีกลิ่น ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ อากาศ และน้ำมัน PET จะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อนและแข็งตัวเมื่อทำให้เย็น [2]

ตารางที่ 2.1 สมบัติของพอลิเอธิลีนเทเรพทาเลทเกรด SA 135T [3]

สมบัติ	หน่วย	ค่าของสมบัติ	มาตรฐาน
Intrinsic Viscosity	dl/g	0.82	ASTM D1601
Melt Flow Index	g/10 min	35.08	ISO 1133
Density	kg/m <sup>3</sup>	1,400	ASTM D1505
Melting point	°C	247	
Glass transition Temperature	°C	75	
Acetaldehyde	ppm	2 or less	
	ppm	1 or less	
Water content	%	0.4 or less	
Tensile Strength at Yield	MPa	57	ASTM D638
	kgf/cm <sup>2</sup>	580	
Tensile Strength at Break	MPa	59	ASTM D638
	kgf/cm <sup>2</sup>	600	
Elongation at Break	%	300	ASTM D638
Tensile Modulus	MPa	680	ASTM D638
	kgf/cm <sup>2</sup>	6,770	



รูปที่ 2.2 โครงสร้าง Poly (ethylene terephthalate) : PET (C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>O<sub>4</sub>)<sub>n</sub> [4]

### 2.3 ข้อดีของ PET

มีความทนทานต่อสารเคมีสูง มีความยืดหยุ่นในการออกแบบ สามารถทำบรรจุภัณฑ์ได้หลากหลายรูปแบบ และหลายขนาด มีความใส ซึ่งเหมาะแก่การนำมาบรรจุผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม ไม่มีกลิ่น ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุไม่เสียรสชาติ ผลิตภัณฑ์จาก PET จะยอมให้ก๊าซออกซิเจนคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำผ่านได้น้อยมากมี และน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง PET มีความ

เหนียวและไม่แตกง่ายในระหว่างการผลิต การจัดเก็บ และการขนส่ง และมีอายุการใช้งานนาน PET ยังสามารถรีไซเคิลได้ จึงไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมโดยการนำขวด PET มาล้างแล้วตัดเป็นชิ้นเล็กๆ และนำไปผ่านกระบวนการผลิตอีกครั้ง (Reprocess) จะได้ผลิตภัณฑ์ PET กลับคืนมา

## 2.4 ข้อเสียของ PET

PET ไม่สามารถบรรจุผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิสูงได้ PET ที่เป็นพอลิเมอร์ผสมที่มีอัตราการเกิดผลึกช้าทำให้ความคงทนต่อแรงกระแทก (Impact Strength) ต่ำ

## 2.5 การประยุกต์ใช้งาน PET

ผลิตเป็นเส้นใยสำหรับเครื่องนุ่งห่ม โดยพอลิเมอร์ที่หลอมละลายจะถูกขับผ่านเครื่องปั่นเส้นใย ซึ่งเมื่อเส้นใยพอลิเมอร์สัมผัสอากาศภายนอก จะเกิดการถ่ายเทความร้อนจากเส้นใยไปสู่อากาศ ทำให้อุณหภูมิของเส้นใยลดลงและแข็งตัวหรือผลิตเป็นฟิล์มสำหรับบรรจุภัณฑ์ (Mylar) โดยใช้หลักการหล่อพอลิเมอร์เหลว (Casting) ซึ่งมีความหนาตั้งแต่ 0.002-0.004 นิ้ว ตามประเภทการใช้งาน และที่นิยมมากที่สุดคือผลิตเป็นภาชนะบรรจุของเหลวประเภทขวด การขึ้นรูปขวดจะใช้งานเป่า (Blow molding) ซึ่งขวด PET จะนิยมขึ้นรูปเป็นหลอดพลาสติกที่เรียกว่า Preform ก่อนแล้วจึงนำ Preform ไปเป่าขึ้นรูปเป็นขวดพลาสติกต่อไป ซึ่งขณะขึ้นรูป Preform ที่ร้อนจะยืดตัวออกทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของผลึก PET ที่ได้จึงมีความแข็งแรงมากขึ้นซึ่งมีรูปร่างตามแม่แบบภาชนะบรรจุของเหลวจาก PET เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 2 ลิตร จนถึงขนาดเล็กกว่า 0.5 ลิตร นอกจากนี้ยังใช้บรรจุอาหาร น้ำเชื่อม สุรา น้ำดื่ม เครื่องดื่มอีกหลายชนิด[2]

## 2.6 การรีไซเคิลพลาสติกในปัจจุบัน

การรีไซเคิลพลาสติกนั้น พลาสติกจะถูกแบ่งออกเป็น 7 ชนิดด้วยกัน สามารถสังเกตได้จากสัญลักษณ์ตัวเลขที่อยู่ด้านข้างหรือก้นภาชนะพลาสติก ดังตารางที่ 2.2 พลาสติกที่ได้นำรีไซเคิลมักเป็นพลาสติกที่มีปริมาณการใช้สูง สามารถหาได้ง่าย สะดวกในการเก็บรวบรวม คัดแยก ทำความสะอาด เช่น ขวดน้ำดื่มชนิดขวดจุ่มและชนิดใส และขวดยาสระผม เป็นต้น

การรีไซเคิลพลาสติกมี 2 กระบวนการได้แก่

1. กระบวนการทางเคมี เป็นการย่อยสลายสายโซ่ของพลาสติกที่มีขนาดโมเลกุลยาวให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง หรือเป็นการเปลี่ยนพลาสติกกลับเป็นสารตั้งต้น
2. กระบวนการทางกล เป็นการนำพลาสติกมาเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปใหม่ เป็นผลิตภัณฑ์อื่นที่มีสมบัติที่ต่าง

ปริมาณขยะพลาสติกสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท หากพิจารณาสมบัติทางความร้อนและโครงสร้างแล้วสามารถแบ่งพลาสติกได้ออกเป็น 2 ประเภท ใหญ่ๆ คือ

### 2.6.1 พลาสติกเทอร์โมเซตติง (Thermosetting Plastic)

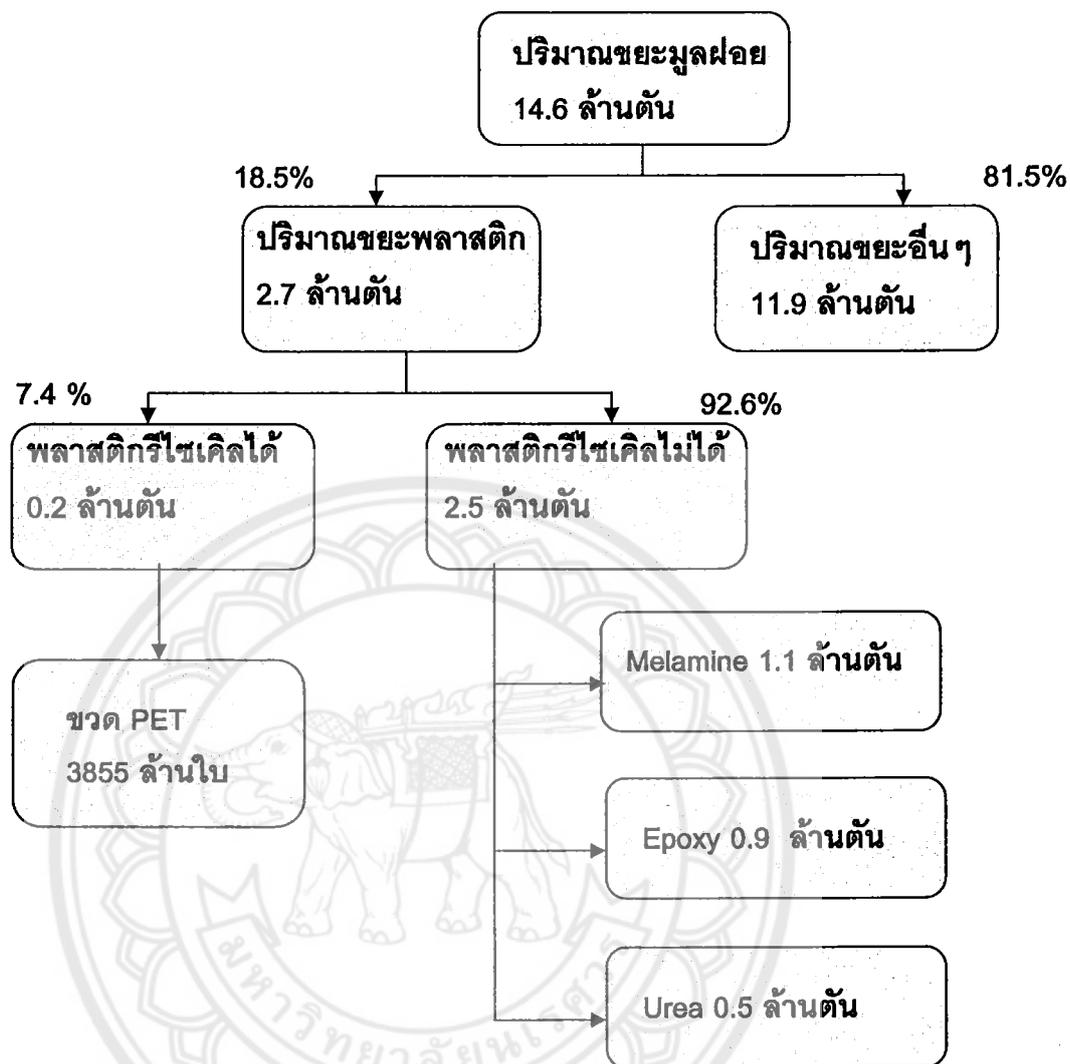
เป็นพลาสติกที่มีลักษณะเป็นโครงสร้างตาข่ายและแข็งตัวด้วยความร้อน โดยสามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้หลายแบบ และมีความคงรูปสูงมาก ซึ่งไม่สามารถหลอมเหลวได้อีก ดังนั้นพลาสติกชนิดนี้จะไม่สามารถรีไซเคิลได้พลาสติกในกลุ่มนี้ได้แก่

- อีพอกซี (Epoxy)
- เมลามีน (Melamine)
- ยูเรีย (Urea)
- ฟีนอลิก (Phenolic)
- พอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester)

### 2.6.2 พลาสติกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Plastic)

เป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่ โดยจะหลอมตัวได้ด้วยความร้อนและจะแข็งตัวเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ดังนั้น พลาสติกชนิดนี้สามารถนำมารีไซเคิลได้ นอกจากนี้พลาสติกชนิดนี้ มีราคาถูก พลาสติกในกลุ่มนี้ได้แก่

- พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene : LDPE)
- พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene : HDPE)
- พอลิโพรพิลีน (Polypropylene : PP)
- พอลิสไตรีน (Polystyrene : PS)
- พอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(vinyl chloride) : PVC)
- พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลท (Poly(ethylene terephthalate) : PET)

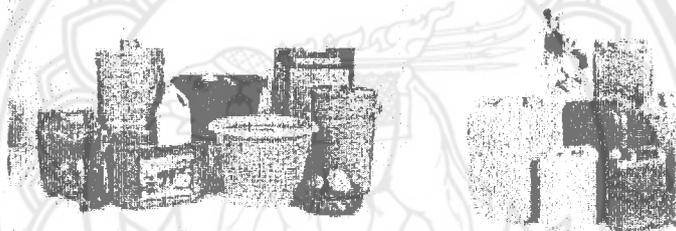


รูปที่ 2.3 ปริมาณขยะพลาสติกแต่ละประเภท [5]

ขวด PET อยู่ในพลาสติกประเภทที่รีไซเคิลได้โดยที่ประเทศไทยใช้ขวด PET ปีละ 3,855 ล้านใบ ส่วนพลาสติกประเภทอื่นที่เป็นขยะ เช่น Melamine มีปริมาณขยะ 1.1 ล้านตัน, Epoxy มีปริมาณ 0.9 ล้านตัน และ Urea มีปริมาณขยะที่ 0.5 ล้านตัน ซึ่งขยะจำพวกนี้ไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้ [5]

### การใช้ประโยชน์จากพอลิเอทิลีนเทรพธาลาทหลังจากการรีไซเคิลคือ

1. นำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยบริษัทผู้ผลิตพรมปกติจะใช้ PET ที่ได้หลังจากการรีไซเคิลนี้ในการผลิตพรมชนิด โพลีเอสเตอร์ซึ่งมีสีสั่นและเนื้อพรมต่างๆ กัน
2. นำไปผลิตเป็นใยฝ้ายเทียมเพื่อใช้ในเครื่องนอน เช่น หมอน พูก ผ้าคลุม
3. ทำเป็นฟิล์มใสเพื่อห่อสินค้าเช่นห่อดรัมเทปคาสเซ็ทหรือดรัมวีดีโอ
4. กลับไปเป็นขวดหรือภาชนะใส่อาหารอีก [6]



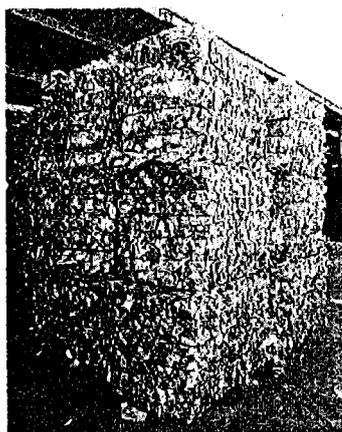
รูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์จากการรีไซเคิล PET[6]

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์การรีไซเคิลพลาสติก [7]

	พอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (PET)	พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นสูง (HDPE)	พอลิไวนิล คลอไรด์ (PVC)	พอลิเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	พอลิโพรพิลีน (PP)	พอลิสไตรีน (PS)
รหัสของพลาสติก (ID Code)	 PETE					
ความใส	ใส	ขุ่น	ใส	ขุ่น	ขุ่น	ใส
การป้องกันความชื้น	พอใช้ถึงดี	ดีถึงดีมาก	พอใช้	ดี	ดีถึงดีมาก	ไม่คิดถึงพอใช้
การป้องกันออกซิเจน	ดี	ดี	ดี	ไม่คิด	ไม่คิด	พอใช้
อุณหภูมิสูงสุด (F)	120	145	140	120	165	150
ความแข็ง	ปานกลางถึงสูง	ปานกลาง	ปานกลางถึงสูง	ต่ำ	ปานกลางถึงสูง	ปานกลางถึงสูง
ความทนทานต่อการกระแทก	ดีถึงดีมาก	ดีถึงดีมาก	พอใช้ถึงดี	ดีมาก	พอใช้ถึงดี	พอใช้ถึงดี
ความทนทานต่อความร้อน	ไม่คิดถึงพอใช้	ดี	ไม่คิดถึงพอใช้	พอใช้	ดี	พอใช้
ความทนทานต่อความชื้น	ดี	ดีมาก	พอใช้	ดีมาก	ไม่คิดถึงพอใช้	ไม่คิด
ความทนทานต่อแสงแดด	ดี	พอใช้	พอใช้ถึงดี	พอใช้	พอใช้	ไม่คิดถึงพอใช้



หมายเหตุ หมายถึง พลาสติกนอกเหนือจาก 6 ประเภทที่กล่าวมานี้



รูปที่ 2.5 แสดงขยะพลาสติกที่ผ่านการคัดแยกก่อนนำมารีไซเคิล [7]

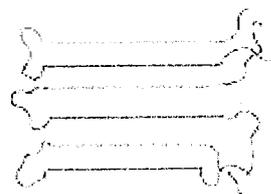
## 2.7 โครงสร้างของพอลิเมอร์ 2 ประเภทคือ

1. โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) เกิดจากมอนอเมอร์เกิดพันธะเชื่อมโยกันเป็นสายโซ่โมเลกุล สายโซ่โมเลกุลไม่สามารถเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบได้เลย ทำให้ไม่เกิดเป็นโครงสร้างผลึก พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน เมื่อให้ความร้อนพอลิเมอร์จะไม่อ่อนตัว แต่จะคงรูปอยู่จนสลายตัวหรือเกิดการเผาไหม้ จึงไม่สามารถนำมาหลอมเพื่อใช้งานใหม่ได้อีกหลังจากที่ขึ้นรูปแล้ว

2. โครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi crystalline) เกิดจากมอนอเมอร์เกิดพันธะเชื่อมโยกันเป็นสายโซ่โมเลกุล แล้วเรียงกันอย่างเป็นระเบียบเป็นโครงสร้างผลึก พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก เมื่อให้ความร้อนแล้วจะอ่อนตัวจนหลอมและแข็งตัวเมื่อทำให้เย็นลง จึงสามารถนำมาขึ้นรูปใหม่ได้อีกโดยกระบวนการรีไซเคิล



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.6 โครงสร้างพอลิเมอร์ (ก) โครงสร้างอสัณฐาน (ข) โครงสร้างกึ่งผลึก [9]

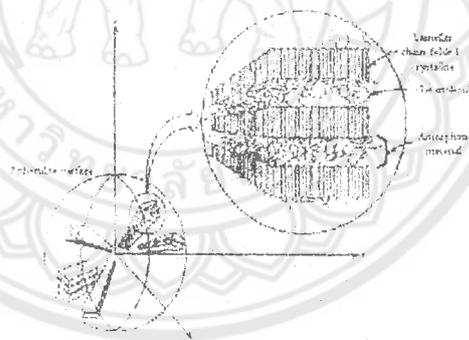
ปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้นมีผลต่อสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ เนื่องจากผลึกในโครงสร้างทำหน้าที่ถ่ายโอนแรงที่พอลิเมอร์ได้รับกระจายสู่โมเลกุลเล็กที่เชื่อมโยกันเป็นผลึก ปริมาณและขนาดของผลึกก็มีผลต่อสมบัติเชิงกล พอลิเมอร์ที่มีปริมาณของผลึกมากจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

พอลิเมอร์ที่มีปริมาณของผลึกน้อยและพอลิเมอร์ที่มีขนาดของผลึกใหญ่ จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเมอร์ที่มีขนาดของผลึกเล็ก [8]

### 2.7.1 ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์

ความเป็นผลึกของพอลิเมอร์จะเป็นตัวกำหนดสมบัติที่สำคัญต่าง ๆ ของพอลิเมอร์อันได้แก่ ความสามารถในการต้านแรงดึง ความแข็งแรง รวมทั้งความทนทานต่อสารเคมีเป็นต้น ซึ่งเมื่อก้าวถึงพอลิเมอร์กึ่งผลึกนั้นจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline region) และมีส่วนที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous region) ดังนั้นความมีผลึกจะมีมากน้อยเพียงใด จะเรียกว่าดีกรีความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) ซึ่งจะมีผลึกสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับน้ำหนัก โมเลกุลและ โครงสร้างของพอลิเมอร์ อีกทั้งมีผลจากอัตราการทำให้พอลิเมอร์เย็นตัวลง (Cooling rate) อีกด้วย

เมื่อก้าวถึงการเกิดผลึกของพอลิเมอร์แล้ว พอลิเมอร์จะสร้างผลึกโดยเริ่มจากการก่อตัวของนิวเคลียส (Nucleation) ขึ้นก่อนแล้วจึงเริ่มมีเกาะรวมตัวขยายขนาดผลึกหรือที่เรียกว่า การโตของผลึก (Crystalline growth) ลักษณะของผลึกจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ซ้อนกันเป็นชั้นๆ เรียกว่า ลามลลา (Lamella) สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์จะต้องพับไปพับมา (Chains folding) จากนั้นผลึกลามลลา จะจัดเรียงตัวรวมกลุ่มกัน โดยกระจายออกจากนิวเคลียส ได้เป็นผลึกทรงกลมที่มีโครงสร้างซับซ้อนเรียกว่า สเฟียรูไลต์ (Spherulites) ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 แบบจำลองผลึกสเฟียรูไลต์

### รูปที่ 2.7 แบบจำลองผลึกสเฟียรูไลต์ [9]

PET โดยทั่วไปมีดีกรีความเป็นผลึกประมาณร้อยละ 50 และเนื่องจากโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลมีวงอะโรมาติกมีหมู่เอสเทอร์ที่มีขั้ว ด้วยสมบัติความเป็นผลึกที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลนี้เองทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการหลอมผลึก (Crystalline melting point Temperature :  $T_m$ ) สูงทำให้การจัดเรียงตัวได้ช้าจึงมีอัตราการเกิดนิวเคลียสและมีอัตราการเติบโตของผลึกต่ำ คือ  $1.2 \times 10^{-1} \mu\text{m/s}$  เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนจะมีดีกรีความเป็นผลึกสูงกว่า เพราะเนื่องจากมีโครงสร้างที่

เป็นเส้นตรงและสม่ำเสมอ ทำให้สายโซ่โมเลกุลสามารถจัดเรียงตัวเป็นผลึกอย่างระเบียบได้ง่าย ในขณะที่พอลิเอไมด์มีความเป็นผลึกสูงเนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ปริมาณสูงดังตารางที่ 2.3

PET มีอัตราการเกิดนิวเคลียสช้าและมีอัตราการเกิดผลึกต่ำ จัดเป็นข้อดีสำหรับการนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความใส ได้แก่ นำมาเป่าขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุต่างๆมีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางในวงการบรรจุภัณฑ์ ไม่ใช่เฉพาะนำมาผลิตเป็นขวดเครื่องดื่มชนิดมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่านั้น แต่สามารถนำมาผลิตเป็นภาชนะบรรจุชนิดอื่นด้วย

**ตารางที่ 2.3** แสดงดีกรีความเป็นผลึกสูงสุด (Maximum degree of crystallinity,  $X_{c(max)}$ ), อัตราการเจริญเติบโตของผลึกสูงสุด ( $v_{max}$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ [9]

พอลิเมอร์	$X_{c(max)}$	$v_{max}$ ( $\mu\text{m/s}$ )	$T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	0.80	33	141
พอลิเอไมด์ 6,6	0.70	20	267
พอลิเอไมด์ 6	0.35	3.3	229
ไอโซเทกติกพอลิพรอพิลีน	0.63	$3.3 \times 10^{-1}$	250
พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง	0.80	33	141
พอลิเอทอลีนเทรฟทาเลท	0.50	$1.2 \times 10^{-1}$	270
ไอโซเทกติกพอลิสไตรีน	0.32	$4.2 \times 10^{-3}$	240
พอลิคาร์บอเนต	0.25	$1.7 \times 10^{-4}$	267

มีการนำ PET มาใช้ประโยชน์เป็นแผ่นฟิล์มสำหรับบรรจุอาหาร และเป็นเส้นใยสำหรับอุตสาหกรรมสิ่งทอ ได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านการผลิตให้ทันสมัย จนกระทั่งได้ PET ชนิดวิศวกรรม และโดยเฉพาะใช้เป็นภาชนะบรรจุ ความสำเร็จในการนำ PET มาทำเป็นขวดบรรจุ น้ำอัดลม และเป็นที่นิยมของผู้ใช้มาก เพราะมีคุณสมบัติแข็งแรงรับน้ำหนักได้ดี ทนทานต่อกรดอ่อน ต่างอ่อนและสารละลายได้ดี ไม่แตกง่าย ทนต่อการขีดข่วน ใส น้ำหนักเบา ราคาถูก และมีน้ำหนักเบาสะดวกและประหยัดพลังงานในการขนส่ง นอกจากนี้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าการผลิตแก้วเพราะใช้อุณหภูมิไม่สูง ใช้เวลาในการขึ้นรูปน้อย จึงประหยัดแรงงานและพลังงานมากกว่า ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมของผู้ผลิตที่จะผลิตขวด PET แทนขวดแก้ว

PET สามารถนำไปทำเป็นพอลิเมอร์แบบมัลติเลเยอร์ (Multilayer) กับพอลิเมอร์หรือวัสดุอื่นเพื่อไปใช้ในลักษณะ เช่น สามารถทำเป็นแผ่นฟิล์มเอกซ์เรย์ ฟิล์มถ้ำรูปเมกเนติกเทป อุปกรณ์

กันไม่ให้กระแสไฟฟ้ารั่วและสำหรับเป็นอุปกรณ์ตัดแต่งฝาผนัง ทำฟิล์มสำหรับเคลือบบนแผ่นกระดาษ ใช้กับเตาอบอาหาร PET แบบผลึกมีคุณสมบัติทนทานต่อความร้อนได้ดี จึงนิยมใช้ ทำภาชนะทนความร้อนสำหรับใส่อาหารเพื่อเข้าเตาอบหรือทำเป็นถาดหรือชั้นใช้กับเตาอบอาหาร และด้วยสำหรับใช้ในการดื่มน้ำหรือเครื่องดื่มน้ำร้อน

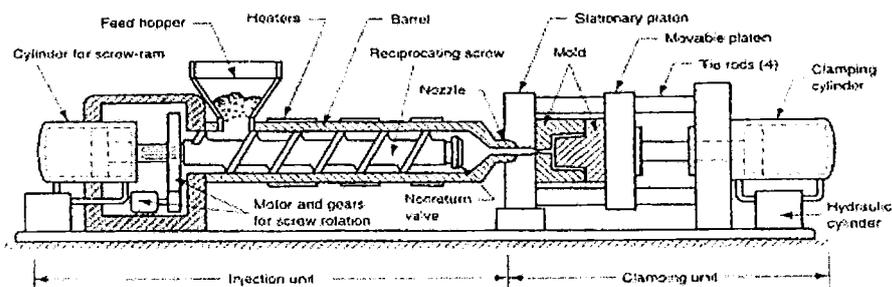
สมบัติการสร้างผลึกของ PET ที่ใช้เวลาในการสร้างผลึกสมบูรณ์นานทำให้ ไม่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตที่มีการเย็นตัวในเวลาจำกัดฉะนั้นในงานฉีดขึ้นรูป PET จึงไม่นิยมใช้

### 2.7.2 พอลิเมอร์เสื่อมสภาพ (Degradation)

PET เมื่อใช้ไปจะเกิดการเสื่อมสภาพ (Degradation) จากสภาวะแวดล้อมต่างๆอันได้แก่ การได้รับแรง ความร้อน แสง และน้ำ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของ PET จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน จากความร้อนและออกซิเจน และการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจากน้ำ เป็นสาเหตุทำให้สายโซ่โมเลกุลแตกหักออกจากกัน (Chain scission) และการเกิดการเชื่อมโยง (Crosslink) เป็นสาเหตุทำให้น้ำหนักโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งทำให้คุณสมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไป อันได้แก่ สีที่เปลี่ยนไป ความสามารถในการรับแรงลดลง ซึ่งสามารถทดสอบสาเหตุการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เหล่านี้ได้จาก สมบัติเชิงกล ดัชนีความเป็นผลึกตลอดจนพฤติกรรม การไหลของ PET

PET สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยทำเป็นนวม เส้นใยสำหรับเป็นเสื้อผ้า เข็มขัดหรือ ห่วงชนิดต่างๆ ใช้ในงานอุตสาหกรรมหรือผลิตภัณฑ์อื่นๆ เนื่องจาก PET เป็นพอลิเมอร์แบบ ควบแน่นจึงเสื่อมสภาพ (Degradation) จากปฏิกิริยาออกซิเดชันและไฮโดรไลซิส ทำให้สายโซ่ โมเลกุลแตกหัก สูญเสียการจัดเรียงตัว PET จึงไม่สามารถนำไปเป่าขึ้นรูปเป็นขวดน้ำดื่มได้อีกครั้ง แต่สามารถนำมาทำให้เกิดพอลิเมอร์ได้ใหม่ และทำให้บริสุทธิ์เพื่อทำเป็นเม็ดสำหรับนำมา ผลิต เป็นภาชนะบรรจุใหม่ได้ และอีกวิธีการคือการนำไปผสมกับวัสดุหรือพอลิเมอร์ชนิดอื่น เพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงคุณสมบัติ อันได้แก่ความเปราะและเพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูป [9]

## 2.8 การขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding machine)



รูปที่ 2.8 เครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ ( Injection molding machine ) [10]

## หลักการการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding machine)

ทำการเปิดเครื่องฉีดพลาสติกจากนั้นตั้งอุณหภูมิที่จะทำการฉีดพลาสติก เมื่ออุณหภูมิถึงที่กำหนดจึงใส่เม็ดพอลิเมอร์ที่จะทำการฉีดลงไป ในฮอปเปอร์ จากนั้นจึงเริ่มเดินเครื่องฉีดพลาสติก สกรูจะเริ่มทำงาน โดยสกรูจะนำเม็ดพอลิเมอร์ไหลไปตาม zone ต่างๆ โดยในแต่ละ zone จะมีอุณหภูมิที่ต่างกันตามที่กำหนดอุณหภูมิ เมื่อเม็ดพอลิเมอร์ไหลไปตาม zone ต่างๆ จะเริ่มหลอมเหลวและจะถูกดันมารวมกันที่หัวฉีดเพื่อทำการฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ โดยที่แม่พิมพ์จะประกอบอยู่ที่ปลายหัวฉีด จากนั้นพอลิเมอร์จึงถูกดันเข้าสู่แม่พิมพ์โดยสกรู แม่พิมพ์จะถูกคงอุณหภูมิด้วยเครื่องคงอุณหภูมิแม่พิมพ์ เพื่อไม่ให้พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ฉีดเกิดการแข็งตัวเร็วขณะทำการฉีดพอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์ถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์แล้ว พอลิเมอร์จะเริ่มเย็นตัวจนได้รูปร่างตามแบบของแม่พิมพ์ และจะถูกดันออกด้วยระบบปลดชิ้นงาน วิธีนี้เป็นการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ง่ายมีขั้นตอนที่ไม่ยุ่งยากและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม มีส่วนประกอบสำคัญคือ

### 2.8.1 ฮอปเปอร์ (Hopper)

อุปกรณ์ส่วนนี้มีลักษณะเป็นกรวยขนาดใหญ่เป็นส่วนที่ใช้บรรจุเม็ดพอลิเมอร์ และสารเติมแต่งเพื่อป้อนเข้าเครื่องฉีดพลาสติก

### 2.8.2 กระบอกลัดและสกรู (Injector and Screw)

เป็นส่วนสำคัญของเครื่องฉีดพลาสติกทำหน้าที่หลอมเหลวพอลิเมอร์ และสร้างแรงดันเพื่อฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์ประกอบด้วยกระบอกลัดติดต่อกับที่ ส่วนต้นของกระบอกลัดเป็นที่ติดตั้งฮอปเปอร์ ตรงส่วนกลางและส่วนปลายของกระบอกลัดมีเครื่องให้ความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ปลายของกระบอกลัดจะต่อเข้ากับหัวฉีดภายในของกระบอกลัดนี้เป็นสกรูที่มีความยาวสั้นกว่ากระบอกลัดเล็กน้อย โดยมีลักษณะเป็นเกลียวหยาบหมุนป้อนส่วนผสมของพอลิเมอร์ให้เคลื่อนที่เข้าสู่กระบอกลัดและสามารถเคลื่อนถอยหลังและดันกลับเพื่อเพิ่มแรงดันให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าสู่แม่พิมพ์

### 2.8.3 หัวฉีด (Nozzle)

เป็นส่วนต่อปลายกระบอกลัดฉีดพอลิเมอร์เข้ากับช่องทางไหลของพอลิเมอร์ในแม่พิมพ์ หัวฉีดมีรูขนาดเล็ก เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านเข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ด้วยความรวดเร็ว

### 2.8.4 แม่พิมพ์ (Mold)

เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นช่องว่างที่มีรูปร่างตามผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิตแม่พิมพ์ โดยทั่วไปมักออกแบบให้มี 2 ชั้น เพื่อให้สะดวกต่อการถอดผลิตภัณฑ์ออกจากแม่พิมพ์นอกจากนี้ต้องมีช่องทางไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวต่อจากหัวฉีด เข้าสู่ช่องว่างในแม่พิมพ์ เรียกว่า สปรู (Sprue) ในแม่พิมพ์ที่มีหลายช่อง (ผลิตผลิตภัณฑ์ครั้งละหลายชิ้น) จะต้องมีช่องทางแยกจาก สปรู เข้าสู่แม่พิมพ์แต่ละช่องเรียกว่า รันเนอร์ (Runner)

### 2.8.5 ตัวหนีบยึดแม่พิมพ์ (Hydraulic clamp unit)

มักเรียกกันว่า แคลมป์ เป็นกลไกสำหรับเปิดและปิดฝาแม่พิมพ์ขับเคลื่อนด้วยกำลังไฮดรอลิก อุปกรณ์ส่วนนี้ยังรวมทั้งอุปกรณ์ทำความร้อนเพื่ออุ่นแม่พิมพ์ก่อนฉีด และอุปกรณ์ทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิแม่พิมพ์ ทำให้ผลิตภัณฑ์แข็งตัวก่อนถอดออกจากแม่พิมพ์

### 2.8.6 ชุดควบคุมกลาง (Central control)

เป็นชุดควบคุมเครื่องจักรรวมทุกส่วน ได้แก่ส่วน อุปกรณ์จ่ายกระแสไฟฟ้า อุปกรณ์วัด และควบคุมอุณหภูมิ อุปกรณ์ควบคุมความดัน และอุปกรณ์ตั้งเวลา

### 2.8.7 เครื่องคงอุณหภูมิแม่พิมพ์ (Hold mold)

เป็นเครื่องควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ เพื่อให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง สำหรับพอลิเมอร์ที่มีการแข็งตัวเร็ว [10]

## 2.9 การทดสอบ

การทดสอบสมบัติเชิงกลโดยทั่วไปเครื่องทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุ (Universal-Testing Machine : UTM )

ตารางที่ 2.4 สมบัติเชิงกลที่ใช้ในการทดสอบ [11]

สมบัติ	มาตรฐาน	หน่วย
Tensile Strength	ASTM D638	MPa
% Elongation at Break	ASTM D638	%
Young's Modulus	ASTM D638	MPa
Melt Flow Index	ISO 1133	g/10 min

### 2.9.1 สมบัติเชิงกล

ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength), โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) และร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at Break)

การทดสอบสมบัติเชิงกลเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 type III โดยใช้เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุ (Universal Testing Machine : UTM ) ดังรูปที่ 2.9 ในการทดสอบแต่ละครั้งจะใช้ตัวอย่างในการทดสอบ 10 ตัวอย่างต่อ 1 อัตราส่วนผสม โดยตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็น Dumb-bell ดังรูปที่ 2.10 ที่สภาวะในการทดสอบนี้แรงในการทดสอบ 500 N, ความเร็วในการทดสอบ 25 mm/min และความยาวของเกจ 60 mm

ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile Strength), โมดูลัสของยัง (Young's Modulus) และ ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at Break) สามารถหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength :  $\sigma$ )

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็น MPa  
 $P$  = แรงภายนอกที่มากระทำ มีหน่วยเป็น N  
 $A$  = พื้นที่ภาคตัดขวางที่แรงกระทำ มีหน่วยเป็น  $\text{mm}^2$

ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (%Elongation at Break : %El)

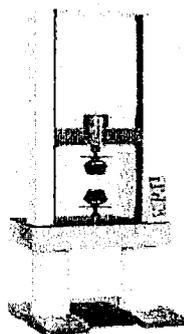
$$\%El = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\% \quad (2.2)$$

เมื่อ  $L_f$  = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด  
 $L_o$  = ความยาวของเกจเริ่มต้น

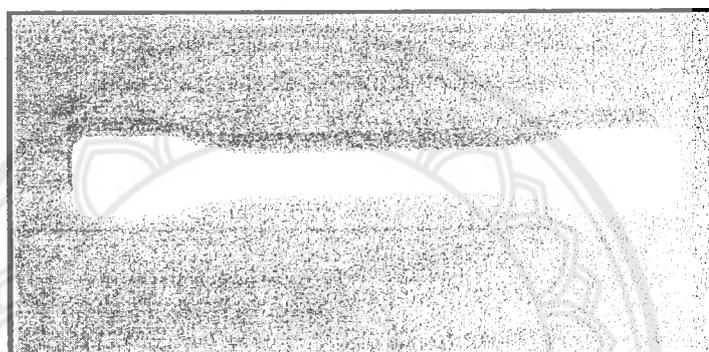
โมดูลัสของยัง (Young's Modulus :  $E$ )

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\sigma$  = ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็น MPa  
 $\varepsilon$  = ความเครียด (Strain)



**รูปที่ 2.9** เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุ (Universal Testing Machine : UTM) [11]



**รูปที่ 2.10** ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล

#### **การเตรียมชิ้นงานทดสอบ**

ใช้ชิ้นทดสอบเป็นรูป Dumb-bell ตามมาตรฐานการทดสอบโดยแบ่งการทดสอบออกเป็นชนิดต่างๆ ตามลักษณะของวัสดุที่ใช้ทดสอบ ASTM D638 type III ค่าที่ได้จากการทดสอบ Tensile Strength (MPa), %Elongation at Break (%) และ Young's Modulus (MPa) [11]

#### **2.9.2 การทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index : MFI)**

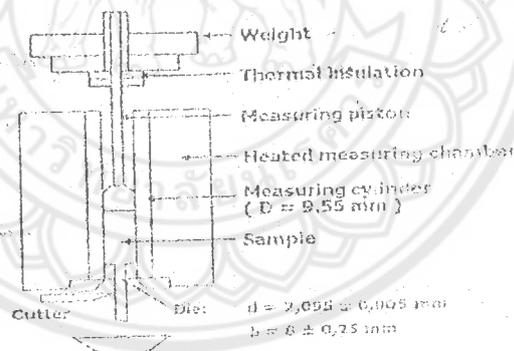
การทดสอบ MFI ของพอลิเมอร์ เป็นการทดสอบคุณสมบัติการไหลตัวของพอลิเมอร์เหลวจำพวก Thermoplastics ถ้าค่า MFI สูงแสดงถึงความยาวของ สายโซ่พอลิเมอร์นั้นสั้นลง และส่งผลถึงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นลดลง เนื่องจากเกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุลซึ่งได้รับอุณหภูมิจากการขึ้นรูปของพอลิเมอร์ ทำให้พันธะที่เชื่อมโยงในสายโซ่มีพลังงานพันธะที่ลดลง โมเลกุลเกิดการแยกจากกันเป็น โมเลกุลขนาดเล็ก ส่วนพอลิเมอร์ที่ผ่านการขึ้นรูปมาแล้วอุณหภูมิในการขึ้นรูป ทำให้พันธะที่เชื่อมโยงในสายโซ่โมเลกุลลดพลังงานพันธะได้เร็วกว่าโมเลกุลเกิดการแยกจากกันเป็น โมเลกุลขนาดเล็กได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่ยังไม่ผ่านการขึ้นรูปเนื่องจาก ในระหว่างการขึ้นรูป โมเลกุลที่เชื่อมโยงกันเป็นสายโซ่โมเลกุลจะเกิดการเสียหายทางความร้อน ทำให้พอลิเมอร์นั้น มีจำนวน โมเลกุลที่ลดลง ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสั้นลงและยังส่งผลถึงน้ำหนัก

โมเลกุลที่ลดลงด้วย เพราะน้ำหนักโมเลกุลเกิดจาก จำนวน โมเลกุลที่เชื่อมโยงกันเป็นสายโซ่ โมเลกุล

**MFI** เป็นเครื่องมือวัดการไหลของพอลิเมอร์ เนื่องจากอัตราเฉือนที่เกิดขึ้นในเครื่องมือมีค่าค่อนข้างต่ำ และน้อยกว่าอัตราเฉือนที่เกิดขึ้นในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์จึงมักถูกใช้ในงานตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของพอลิเมอร์

หลักการอย่างง่ายของ MFI คือ การปล่อยน้ำหนักมาตรฐานอัดลงบนพอลิเมอร์ที่บรรจุอยู่ในกระบอกสูบที่มีการให้อุณหภูมิสูง พอลิเมอร์ที่ถูกกดอัดจะไหลผ่านหัวตายมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน  $1.180 \pm 0.005$  mm หรือ  $2.095 \pm 0.005$  mm ค่าที่ได้เรียก MFI มีหน่วยเป็น g/10 min ลักษณะเครื่องมือโดยพื้นฐานจะถูกออกแบบให้สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ 125-300 °C และรับน้ำหนักในช่วง 0.325-21.6 kg เพื่อค่าที่ได้อยู่ระหว่าง 0.15-25 ผลลัพธ์ที่ได้ต้องมีการระบุสภาวะการทดสอบเสมอไป เช่น MFI (190 °C /2.16 kg) = 5 g/10 min

ลักษณะเครื่องมือโดยพื้นฐานแสดงดังรูปที่ 2.11 MFI ถูกออกแบบให้สามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิ 125-300 °C และรับน้ำหนักในช่วง 0.325 ถึง 21.6 kg เพื่อให้ค่าที่ได้อยู่ระหว่าง 0.15 ถึง 25.00 ผลลัพธ์ที่ได้จึงต้องมีการระบุสภาวะการทดสอบเสมอไป เช่น MFI (190 °C/2.16 kg) = 5 g/10 min ตารางที่ 2.5 แสดงสภาวะมาตรฐานที่ใช้ในการตรวจสอบสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์



รูปที่ 2.11 ลักษณะเครื่องมือโดยพื้นฐานของ Melt Flow Index [12]

**ตารางที่ 2.5** ตัวอย่างสภาวะการทดสอบเม็ดพอลิเมอร์ตามมาตรฐานต่างๆ [12]

Material	DIN 53735	ISO 1133	ASTM 1238	Temp (°C)	Load (kg)
PS	H	8	G	200	5.00
	D	4	E	190	2.16
PE	G	4	F	190	21.6
	T	5	P	190	5.00
PP	M	12	L	230	2.16
ABS	U	9	-	220	10.0
	B	2	C	150	2.16
EVA	D	4	D	190	2.16
	Z	22	Z	125	0.325
SAN	U	9	-	220	10.0
PC	W	21	-	300	1.20
PET	S	17	-	280	2.16
PMMA	N	13	I	230	3.80

**การเตรียมชิ้นงานทดสอบ**

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ ใช้ความร้อนทำให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลว โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวและน้ำหนักของค้อนน้ำหนักเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 1133 ค่าที่ได้จากการทดสอบ คือ MFI (g/10 min) [12]

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ศุภาพ ชาราศักดิ์ [13] ได้มีการศึกษาการย่อยสลาย PET เพื่อเตรียมกรดเทเรพทาติกด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และเมธานอลิซิสโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมเมรอกไซด์เป็นตัวทำปฏิกิริยาตามลำดับ ทำปฏิกิริยาในสารตัวกลางต่างกันคือ เมธานอล แลโทลูอินพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลาย PET ในตัวกลางโทลูอิน ผลที่ได้คือกรดเทเรพทาติก

เพลินพิศ บุชาธรรม และคณะ [14] ได้ศึกษาการนำ PET กลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบของสี โดยใช้เอธิลีนไกลคอลกับเพนตะอีทริทอลทำปฏิกิริยาย่อยสลายขวด PET และเติมกรดไขมัน กรดไอโซพาทาติก เพื่อทำปฏิกิริยาให้สารละลายกลายเป็นเรซิน เดิม 2-บิวทอกซิล-เอทานอล และ 2-บิวทานอลเพื่อทำให้เรซินเป็นสีที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ได้พอลิเมอร์ในรูปแบบของเรซินที่สามารถนำไปทำเป็นสีได้

ศรารัตน์ มหาศรานนท์ [15] ได้ศึกษาการนำ PET จากขวดน้ำดื่มกลับมาใช้ใหม่ด้วยกระบวนการทางเคมี โดยใช้ปฏิกิริยาเมธานอลิซิส และไกลโคไลซิสได้พอลิเมอร์ในรูปแบบของเรซินที่สามารถนำไปเข้าสู่กระบวนการขึ้นรูปได้

Firas Awaja and Dumitru Pavel [16] ได้ศึกษากระบวนการรีไซเคิล PET ด้วยกระบวนการทางเคมี และการขึ้นรูปพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการ Extrusion molding และ Injection molding ได้พอลิเมอร์จากกระบวนการขึ้นรูปสามารถนำไปทดสอบสมบัติเชิงกลได้ ซึ่งพบว่า PET เมื่อผ่านการรีไซเคิลแล้วสมบัติเชิงกลจะต่ำลง และอุณหภูมิในการเกิดผลึกก็ลดลงด้วย

N.Torres, J.J.Robin and B.Boutevin [17] ได้ศึกษาสมบัติทางความร้อน และเชิงกลของ PET<sub>r</sub> และ PET<sub>r</sub> หลังกระบวนการขึ้นรูปด้วย Injection molding ได้พอลิเมอร์จากกระบวนการขึ้นรูป สามารถนำไปทดสอบสมบัติทางความร้อน และเชิงกลได้ ผลที่ได้คือ เมื่อ PET<sub>r</sub> ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้ว ที่อุณหภูมิ 280°C ส่งผลให้ PET<sub>r</sub> เกิดการเสถียรภาพทางความร้อน สมบัติเชิงกล และความหนืดลดลง อุณหภูมิในการเกิดผลึกก็ลดลงด้วย

J.D.Badia. at al [18] ได้ศึกษาอิทธิพลจากการเสถียรภาพทางความร้อนของ PET<sub>r</sub> ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 250 °C, 260 °C และ 270°C และมีการทดสอบดัชนีการหลอมไหลเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 1133 โดยใช้เครื่องทดสอบดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index) ที่สภาวะการทดสอบ อุณหภูมิในการหลอมเหลวพอลิเมอร์ 280 °C, น้ำหนักของดรัมน้ำหนัก 2.16 kg ได้การดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ และอุณหภูมิการเกิดผลึกของ PET<sub>r</sub> หลังกระบวนการขึ้นรูป พบว่า PET<sub>r</sub> มีดัชนีการหลอมไหลที่ดีขึ้นจึงส่งผลถึง น้ำหนักโมเลกุลและค่าความหนืดที่ลดลง อุณหภูมิในการเกิดผลึกก็ลดลงด้วย

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงาน

#### 3.1 วัสดุและสารเคมี

1. พอลิเอทิลีนเทเรพธาลาตบริสุทธิ์ (Poly(ethylene terephthalate) Virgin : PET<sub>p</sub>) เกรด SA 135T บริษัท Thai PET Resin Co., LTD
2. ขวดพอลิเอทิลีนเทเรพธาลาตที่ใช้แล้ว (Poly (ethylene terephthalate) Recycle : PET<sub>R</sub>) ใช้ขวดน้ำดื่มตรา สิงห์

#### 3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding machine) : ยี่ห้อ Battlefield รุ่น B250 CDC ขนาด 40 ตัน
2. เครื่องทดสอบความแข็งแรงดึงของวัสดุ (Universal Testing Machine : UTM) รุ่น LR 5 K
3. เครื่องทดสอบการไหลตัวของพลาสติก (Melt Flow Index : MFI)

#### 3.3 วิธีการทดลอง

##### 3.3.1 การเตรียมขวด PET<sub>R</sub>

1. นำขวดน้ำดื่มตรา สิงห์ มาล้างน้ำสะอาด แล้วคว่ำขวดทิ้งไว้ให้แห้ง
2. ตัดขวด โดยจะใช้บริเวณลำตัวของขวด
3. ตัดขวดออกเป็นเส้นขนาดเล็กหลังจากนั้นจึงตัดออกเป็นชิ้นเล็กๆ

##### 3.3.2 เตรียมพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>R</sub>

1. ผสม PET<sub>p</sub> : PET<sub>R</sub> ตามอัตราส่วน ตารางที่ 3.1
2. การขึ้นรูปโดยใช้เครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ (Injection molding machine) เครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ทำการศึกษาที่สภาวะการขึ้นรูป ดังนี้ Feed zone 255 °C, Compression zone 260 °C, Metering zone 265 °C, Nozzle zone 270 °C และกำหนดให้อุณหภูมิในส่วน of แม่พิมพ์เป็น (Mold temperature) 70 °C ความเร็วรอบ 50 rpm

### 3.3.3 นำพอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปไปศึกษาสมบัติต่างๆ ดังนี้

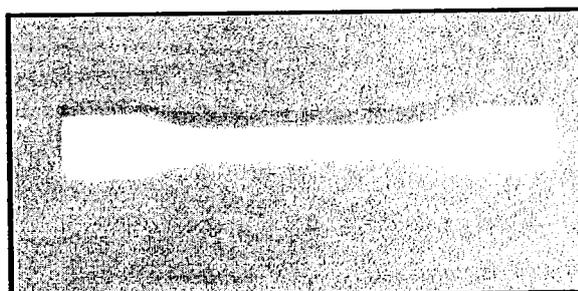
- ความแข็งแรงดึง (Tensile Strength)
- โมดูลัสของยัง (Young's Modulus)
- ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at Break)
- ดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index : MFI)

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub>

PET <sub>p</sub> (phr)	PET <sub>r</sub> (phr)
100	0
100	10
100	20
100	30
100	40
100	50
100	60
100	70
100	80
100	90
100	100

#### กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก

เมื่อเตรียมพอลิเมอร์ได้ตามที่ต้องการแล้ว นำไปทำการฉีดโดยใช้เครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์เมื่อทำการฉีดพอลิเมอร์แล้วจะได้พอลิเมอร์รูปร่างดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ชิ้นงานพอลิเมอร์หลังการขึ้นรูป

### ศึกษาสมบัติเชิงกล

ใช้ชิ้นทดสอบเป็นรูป Dumb-bell ตามมาตรฐานการทดสอบโดยแบ่งการทดสอบออกเป็นชนิดต่างๆ ตามลักษณะของวัสดุที่ใช้ทดสอบ ASTM D638 type III ค่าที่ได้จากการทดสอบ Tensile Strength (MPa), %Elongation at Break (%) และ Young's Modulus (MPa)

### ศึกษาค่าดัชนีการหลอมไหล (Melt Flow Index : MFI)

ชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ ใช้ความร้อนทำให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลว โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมเหลวเป็นไปตามมาตรฐาน ISO 1133 โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 280 °C น้ำหนัก 2.16 kg ค่าที่ได้จากการทดสอบ คือ MFI (g/10 min)



บทที่ 4  
ผลการทดลองและวิเคราะห์

รศ.  
นบ๑๔๘  
๒๕๕๒  
๑.๒

โครงการนี้ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอธิลีนเทเรพธาลาเททบริสุทธิ์กับขวดพอลิเอธิลีนเทเรพธาลาเททที่ใช้แล้ว ที่อัตราส่วนในการผสม ระหว่าง  $PET_p : PET_r$  ดังตารางที่ 4.1

15072943

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_r$

$PET_p$ (phr)	$PET_r$ (phr)
100	0
100	10
100	20
100	30
100	40
100	50
100	60
100	70
100	80
100	90
100	100

ได้ศึกษาวิธีการผสมโดยใช้กระบวนการฉีดขึ้นรูปที่สภาวะการขึ้นรูป Feed zone 255 °C, Compression zone 260 °C, Metering zone 265 °C, Nozzle zone 270 °C และกำหนดให้อุณหภูมิในส่วนของแม่พิมพ์เป็น (Mold temperature) 70 °C ความเร็วรอบ 50 rpm การทดสอบดัดขึ้นรูปการหลอมไหลของพอลิเมอร์โดยทดสอบที่สภาวะการหลอมเหลว 280 °C น้ำหนักตุ้มกด 2.16 kg ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

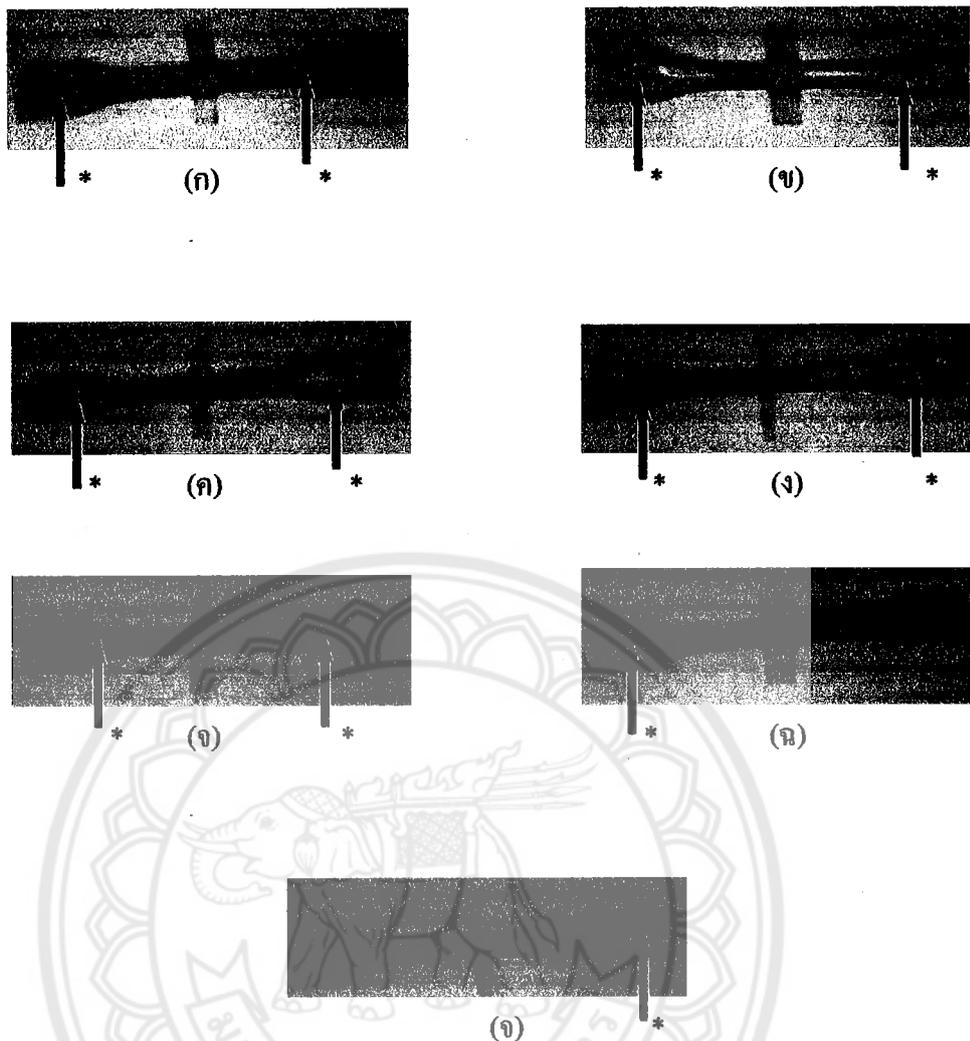
#### 4.1 ผลการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง $PET_p : PET_R$ โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบไม่มีเครื่องกดอุณหภูมิแม่พิมพ์

จากการศึกษาการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_R$  พบว่าขณะที่ทำการฉีดพอลิเมอร์เหลวเข้าแม่พิมพ์ พอลิเมอร์เกิดการแข็งตัวตั้งแต่ทางเข้าของแม่พิมพ์ เนื่องจาก เมื่อพอลิเมอร์ไหลลงเหลวสัมผัสกับแม่พิมพ์ พอลิเมอร์ไหลลงเกิดเกิดการแข็งตัว ทำให้ไม่สามารถฉีดพอลิเมอร์เข้าแม่พิมพ์ต่อได้ ทำให้กระบวนการฉีดขึ้นรูป แบบไม่มีเครื่องกดอุณหภูมิแม่พิมพ์ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานได้ เพราะแม่พิมพ์มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์ไหลลงเหลวมาก ส่งผลให้ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลได้

#### 4.2 ผลการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง $PET_p : PET_R$ โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบมีเครื่องกดอุณหภูมิแม่พิมพ์

กระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ซึ่งมีเครื่องกดอุณหภูมิแม่พิมพ์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิในส่วนของแม่พิมพ์เป็น (Mold temperature)  $70^{\circ}\text{C}$  ส่งผลให้กระบวนการฉีดขึ้นรูป พอลิเมอร์ไม่เกิดการแข็งตัวก่อนเข้าสู่แม่พิมพ์ทำให้สามารถทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์ได้

หลังจากที่ได้ทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_R$  ที่อัตราส่วนต่างๆพบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_R$  ที่อัตราส่วน 100:40, 100:50, 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 และ 100:100 phr ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะไม่เต็มแม่พิมพ์ เนื่องจากการผสม  $PET_R$  ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้  $PET_R$  ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้ว เมื่อนำมาขึ้นรูปซ้ำอีกครั้งหนึ่ง จำนวน โมเลกุลของ  $PET_R$  เกิดการเสียดสภาพทางความร้อน มีผลให้จำนวน โมเลกุลลดลงและการขึ้นรูปซ้ำยังมีอิทธิพลต่อการขาดของสายโซ่ ทำให้สายโซ่สั้นลงและจำนวน โมเลกุลที่ลดลงยังส่งผลถึงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_R$  ลดลงตามไปด้วย ปัจจัยดังที่กล่าวมาส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_R$  จึงมีการดัชนีการหลอมไหลของ  $PET_R$  ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์ ที่มีดัชนีการหลอมไหลที่ต่างกันผสมกันเพื่อทำการขึ้นรูป พบว่า  $PET_R$  ที่ดัชนีการหลอมไหลดีกว่า  $PET_p$  จึงสามารถไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้ง่ายและเร็วกว่า  $PET_p$  ที่ดัชนีการหลอมไหลต่ำกว่า เมื่อ  $PET_R$  เข้าสู่แม่พิมพ์แล้ว ด้วยสายโซ่ที่สั้นลงจากการขึ้นรูปซ้ำส่งผลให้เกิด โครงสร้างผลึกที่รวดเร็วขึ้น เนื่องจากสายโซ่ที่สั้นสามารถจัดเรียงตัวเป็น โครงสร้างผลึกทำได้ง่ายและเร็วกว่าสายโซ่ที่ยาวกว่านั่นเอง ในขณะที่  $PET_p$  เริ่มไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้เพียงบางส่วน จึงไม่สามารถไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ต่อได้ ส่งผลถึงชิ้นงานที่ได้มีลักษณะที่ไม่เต็มแม่พิมพ์ เมื่อมีการเติม  $PET_R$  ในอัตราส่วนที่มากขึ้น  $PET_R$  เริ่มเสียดสภาพทางความร้อน ส่งผลให้ชิ้นงานไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 type III ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล รูปที่ 4.1 แสดงจุดบกพร่องของชิ้นงาน



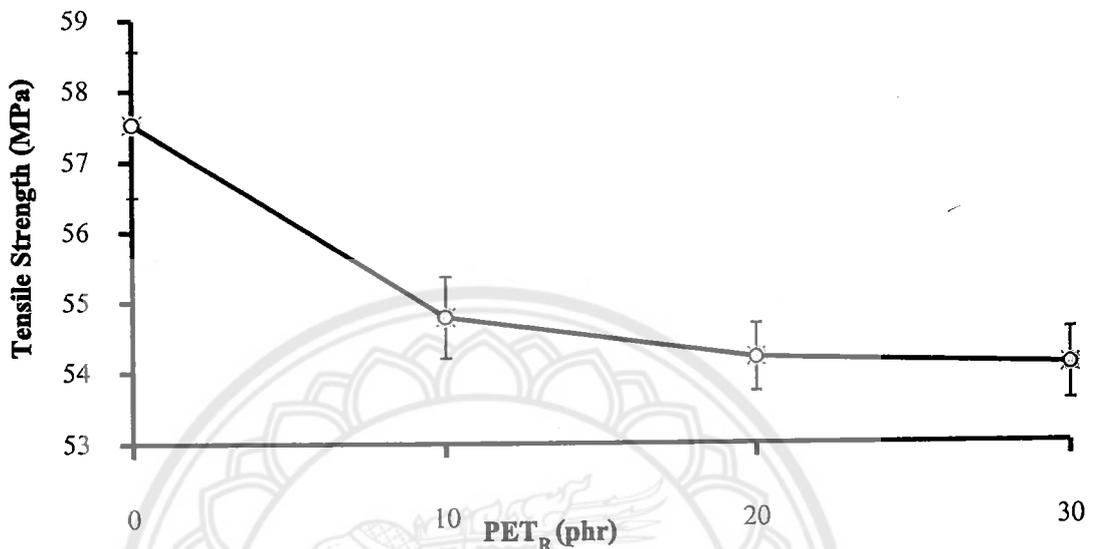
หมายเหตุ \* บริเวณชิ้นงานที่ไม่เต็มแนวพิมพ์

รูปที่ 4.1 ชิ้นงานพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_R$

- (ก) พอลิเมอร์ผสม  $PET_p : PET_R$  ที่อัตราส่วน 100 : 40 phr
- (ข) พอลิเมอร์ผสม  $PET_p : PET_R$  ที่อัตราส่วน 100 : 50 phr
- (ค) พอลิเมอร์ผสม  $PET_p : PET_R$  ที่อัตราส่วน 100 : 60 phr
- (ง) พอลิเมอร์ผสม  $PET_p : PET_R$  ที่อัตราส่วน 100 : 70 phr
- (จ) พอลิเมอร์ผสม  $PET_p : PET_R$  ที่อัตราส่วน 100 : 80 phr
- (ฉ) พอลิเมอร์ผสม  $PET_p : PET_R$  ที่อัตราส่วน 100 : 90 phr
- (ช) พอลิเมอร์ผสม  $PET_p : PET_R$  ที่อัตราส่วน 100 : 100 phr

#### 4.2.1 สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub>: PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

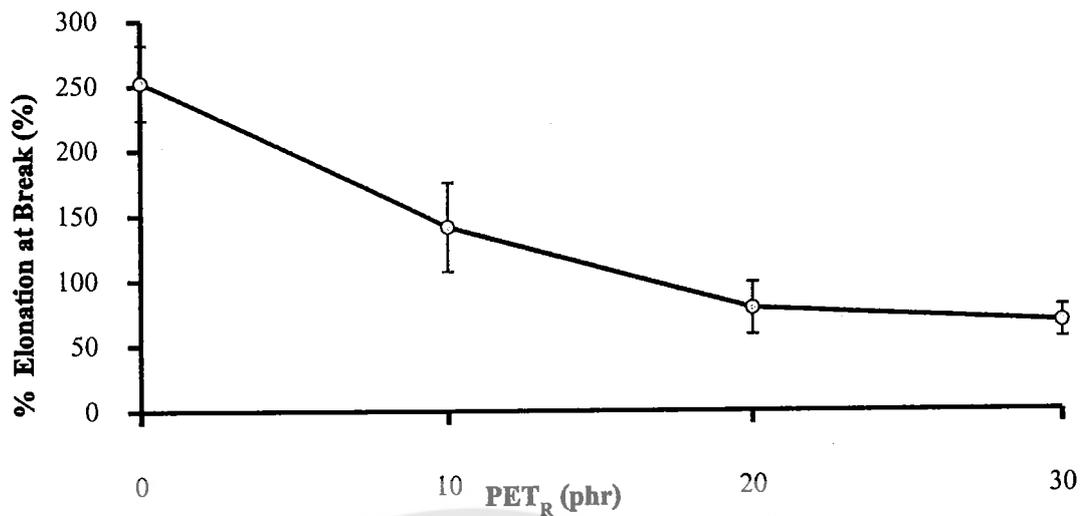
หลังจากที่ได้ทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub>: PET<sub>r</sub> ด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบมีเครื่องกดอุณหภูมิแม่พิมพ์ ที่อัตราส่วนต่างๆ ได้นำชิ้นงานของพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง PET<sub>p</sub>: PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วน 100:0, 100:10, 100:20 และ 100:30 phr มาทดสอบสมบัติเชิงกล



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์สมบัติความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub>: PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub>: PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วน 100:0, 100:10, 100:20 และ 100:30 phr ตามลำดับ พบว่า PET<sub>p</sub> ให้สมบัติความแข็งแรงดึงที่ดีกว่า เมื่อมีการเติม PET<sub>r</sub> ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มให้สมบัติด้านความแข็งแรงดึงลดลง

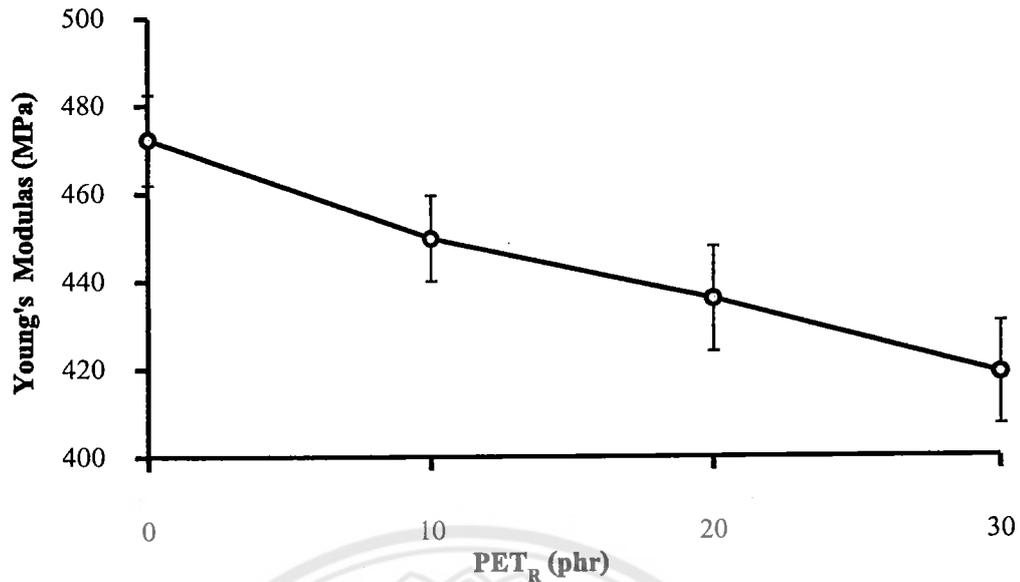
จากการศึกษาการเติม PET<sub>r</sub> เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub>: PET<sub>r</sub> มีผลให้จำนวนโมเลกุลลดลง เนื่องจากการเสถียรภาพทางความร้อนในกระบวนการขึ้นรูปซ้ำ และยังส่งผลถึงการเกิดโครงสร้างผลึกลดลงตามไปด้วย เพราะโครงสร้างผลึกเกิดจากจำนวนโมเลกุลหลายๆ โมเลกุลเชื่อมโยงกันเป็นสายโซ่ และจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบเกิดเป็นโครงสร้างผลึก และ PET<sub>r</sub> ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้ว เมื่อนำมาขึ้นรูปซ้ำจึงเกิดการเสถียรภาพทางความร้อนในกระบวนการขึ้นรูป [16] นอกจากนี้ การเสถียรภาพทางความร้อนเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้น้ำหนักโมเลกุลลดลง เป็นผลให้ความแข็งแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมลดลง



**รูปที่ 4.3** กราฟแสดงความสัมพันธ์ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>R</sub> ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub>:PET<sub>R</sub> ที่อัตราส่วน 100:0, 100:10, 100:20 และ 100:30 phr ตามลำดับ พบว่า PET<sub>p</sub> ให้ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดดีกว่า เมื่อมีการเติม PET<sub>R</sub> ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มให้ค่าร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาดลดลง

จากการศึกษาการเติม PET<sub>R</sub> เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>R</sub> ส่งผลให้จำนวนโมเลกุลลดลง เนื่องจาก PET<sub>R</sub> ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้ว เมื่อนำมาขึ้นรูปซ้ำโมเลกุลจึงเกิดการเสียหาย จากความร้อนในกระบวนการขึ้นรูป และกระบวนการขึ้นรูปซ้ำยังมีอิทธิพลต่อการขาดของสายโซ่ทำให้สายโซ่ที่ได้สั้นลง ส่งผลให้การส่งผ่านแรง และถ่ายโอนแรงกัน ภายในสายโซ่ของพอลิเมอร์ผสมเกิดความไม่ต่อเนื่อง เพราะมีทั้งสายโซ่สั้น และสายโซ่ยาว มาจัดเรียงกันเป็นโครงสร้างผลึก ทำให้การดึงยืดของพอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มลดลง



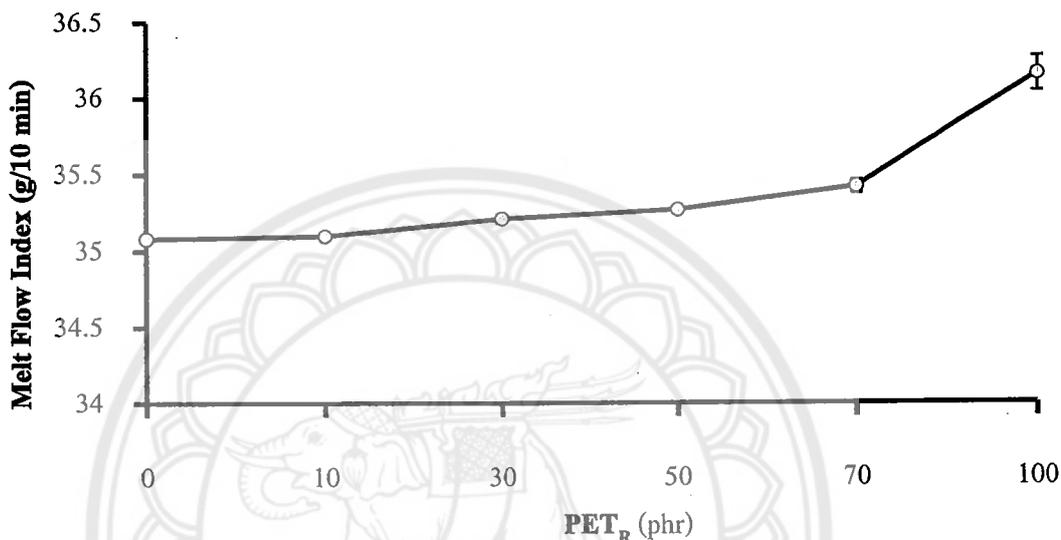
**รูปที่ 4.4** กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>R</sub> ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของค่ามอดูลัสของยังของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>R</sub> ที่อัตราส่วน 100:0, 100:10, 100:20 และ 100:30 phr ตามลำดับ พบว่า PET<sub>p</sub> ให้ค่ามอดูลัสของยังดีกว่าเมื่อมีการเติม PET<sub>R</sub> ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีแนวโน้มให้ค่ามอดูลัสของยังลดลง

จากการศึกษาการเติม PET<sub>R</sub> เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>R</sub> มีผลให้จำนวนโมเลกุลลดลงและส่งผลถึงโครงสร้างผลึกที่ลดลง เนื่องจาก PET<sub>R</sub> ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้ว เมื่อนำมาขึ้นรูปซ้ำอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป มีผลให้โมเลกุลเกิดการเสียหายทางความร้อน [16] และยังมีผลต่อสายโซ่ที่สั้นลงด้วย นอกจากนี้ การนำมาขึ้นรูปซ้ำเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>R</sub> ลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการต้านทานต่อการเสีรูปของพอลิเมอร์ผสมลดลง

#### 4.2.2 ดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วนผสม ต่างๆ

หลังจากศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> แล้วได้ทดสอบดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วน 100:10, 100:20, 100:30, 100:40, 100:50, 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 และ 100:100 phr โดยพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วน 100:0 ได้มาจากสมบัติของพอลิเอทิลีนเทเรพธาลเอทเกรด SA 135T ดังตารางที่ 2.1 เพื่อศึกษาสมบัติด้านการไหลของพอลิเมอร์หลังการขึ้นรูป



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วน 100:0, 100:10, 100:20, 100:30, 100:40, 100:50, 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 และ 100:100 phr พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> มีแนวโน้มให้ค่าดัชนีการหลอมไหลที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติม PET<sub>r</sub> ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาการเติม PET<sub>r</sub> ที่นำมาขึ้นรูปซ้ำ ส่งผลให้จำนวนโมเลกุลของ PET<sub>r</sub> เสียสภาพทางความร้อนในการขึ้นรูปมีผลให้จำนวนโมเลกุลลดลง และยังส่งผลให้สายโซ่สั้นลง นอกจากนี้จำนวนโมเลกุลที่ลดลงยังส่งผลถึงน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงด้วย ดังนั้นพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> ที่เติม PET<sub>r</sub> ในปริมาณที่มากขึ้นจึงมีดัชนีการหลอมไหลที่เพิ่มขึ้น [16]

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอธิลีนเทเรพธาลเอทบริสุทธิกับ ขวดพอลิเอธิลีนเทเรพธาลเอทที่ใช้แล้วโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปศึกษาที่สภาวะการขึ้นรูป Feed zone 255 °C, Compression zone 260 °C, Metering zone 265 °C, Nozzle zone 270 °C และ กำหนดให้อุณหภูมิในส่วนของแม่พิมพ์เป็น (Mold temperature) 70 °C ความเร็วรอบ 50 rpm ด้วย เครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ ยี่ห้อ Battlefield รุ่น B250 CDC มีเครื่องคองอุณหภูมิแม่พิมพ์ เนื่องจากเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ไม่สามารถขึ้น รูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p$  :  $PET_r$  เพราะเครื่องฉีดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ไม่มีเครื่องคองอุณหภูมิแม่พิมพ์ ทำให้พอลิเมอร์ผสมที่ทำการขึ้นรูปเกิดการ แข็งตัวเร็ว ทำให้ได้ชิ้นงานที่ลักษณะไม่เต็มแม่พิมพ์ ส่งผลให้ไม่สามารถนำมาทดสอบสมบัติเชิงกล ได้ สรุปผลงานโครงการได้ดังนี้

1. จากการศึกษารูปการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p$  :  $PET_r$  พบว่าขณะที่ได้ทำการฉีด พอลิเมอร์เหลวเข้าแม่พิมพ์ พอลิเมอร์เกิดการแข็งตัวเร็วอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเมื่อพอลิเมอร์ หลอมเหลวสัมผัสกับแม่พิมพ์อุณหภูมิที่ต่ำกว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวมาก พอลิเมอร์หลอมเหลวเกิด การแข็งตัว ทำให้ไม่สามารถฉีดพอลิเมอร์เข้าแม่พิมพ์ ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปแบบไม่มีเครื่องคอง อุณหภูมิแม่พิมพ์ได้ส่งผลให้ไม่สามารถขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลได้

2. กระบวนการฉีดขึ้นรูปพอลิเมอร์ที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์มีเครื่อง คองอุณหภูมิแม่พิมพ์ โดยกำหนดให้อุณหภูมิในส่วนของแม่พิมพ์เป็น (Mold temperature) 70 °C ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมยังไม่เกิดการแข็งตัว ทำให้สามารถทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมได้ หลังจาก ที่ได้ทำการขึ้นรูปพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p$  :  $PET_r$  ที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า พอลิเมอร์ผสม ระหว่าง  $PET_p$  :  $PET_r$  ที่อัตราส่วน 100:40, 100:50, 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 และ 100:100 phr ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะไม่เต็มแม่พิมพ์ เนื่องจากการผสม  $PET_r$  ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้  $PET_r$  ที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้ว เมื่อนำมาขึ้นรูปซ้ำอีกครั้ง โมเลกุลของ  $PET_r$  เกิดการเสีย สภาพทางความร้อนมีผลให้โมเลกุลเกิดการเสียสภาพทางความร้อนและสายโซ่ที่ได้สั้นลง และ ส่งผลถึงน้ำหนักโมเลกุลของ  $PET_r$  ที่ลดลงตามไปด้วย  $PET_r$  จึงมีดัชนีการหลอมไหลที่เพิ่มขึ้น พอลิเมอร์ที่มีดัชนีการหลอมไหลที่ต่างกันผสมกันเพื่อทำการขึ้นรูป  $PET_r$  ที่ดัชนีการหลอมไหล ต่ำกว่า  $PET_p$  จึงสามารถไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้เร็วกว่า  $PET_p$  ที่ดัชนีการหลอมไหลต่ำกว่า เมื่อ  $PET_r$  เข้าสู่แม่พิมพ์แล้ว เกิดเป็นโครงสร้างผลึกได้รวดเร็ว เนื่องจาก สายโซ่ที่สั้นและน้ำหนักโมเลกุลที่

ลดลงทำให้การจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกได้ง่ายและเร็ว ในขณะที่  $PET_p$  ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ได้เพียงบางส่วน ส่งผลถึงชิ้นงานที่ได้มีลักษณะที่ไม่เต็มแม่พิมพ์ เมื่อเติม  $PET_r$  ในอัตราส่วนที่มากขึ้น ชิ้นงานที่ได้จึงไม่เป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D638 type III ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกล

3. จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_r$  ที่อัตราส่วน 100:0, 100:10, 100:20 และ 100:30 phr ตามลำดับ พบว่า  $PET_p$  ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_r$  ที่มีแนวโน้มให้สมบัติด้านความแข็งแรงดึง ร้อยละการดึงยืด ณ จุดขาด และมอดูลัสของยังลดลง เนื่องจากการเติม  $PET_r$  เข้าไปในพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_r$  มีผลให้เกิดโครงสร้างผลึกลดลง และสายโซ่สั้นลง เพราะ  $PET_r$  ผ่านกระบวนการขึ้นรูปมาแล้ว เมื่อนำมาขึ้นรูปซ้ำ ส่งผลให้โมเลกุลเกิดการเสียสภาพทางความร้อน และการขาดของสายโซ่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ผสม ระหว่าง  $PET_p : PET_r$  ที่เกิดจากการจัดเรียงตัวกันของสายโซ่ โครงสร้างที่ได้จึงมีขนาดและจำนวนที่ลดลง

4. จากการทดสอบดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_r$  ที่อัตราส่วน 100:0, 100:10, 100:20, 100:30, 100:40, 100:50, 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 และ 100:100 phr พบว่า พอลิเมอร์ผสมระหว่าง  $PET_p : PET_r$  มีแนวโน้มให้ค่าดัชนีการหลอมไหล ที่เพิ่มขึ้น การเติม  $PET_r$  ซึ่งนำมาขึ้นรูปซ้ำส่งผลให้โมเลกุลเสียสภาพทางความร้อน และส่งผลให้สายโซ่สั้นลง และส่งผลถึงน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงด้วย เนื่องจาก การขึ้นรูปซ้ำมีอิทธิพลต่อการขาดของสายโซ่ที่สั้นลง ดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมจึงเพิ่มขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินโครงการนี้พบว่าดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์  $PET_p$  กับ  $PET_r$  มีดัชนีการหลอมไหลต่างกันควรมีการใส่สารช่วยให้ดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์  $PET_p$  กับ  $PET_r$  มีดัชนีการหลอมไหลที่ดีขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วิกิพีเดียคอม. **Polymer**. สืบค้นเมื่อ 30 กรกฎาคม 2552. จาก <http://www.wikipedia.com/wiki/Polymer>.
- [2] วิกิพีเดียคอม. (**Poly(ethylene terephthalate)**). สืบค้นเมื่อ 25 กรกฎาคม 2552. จาก [http://www.wikipedia.com/wiki/Polyethylene\\_terephthalate](http://www.wikipedia.com/wiki/Polyethylene_terephthalate).
- [3] บริษัท Thai PET Resin Co., LTD. **PET SA 135T**. สืบค้นเมื่อ 25 มีนาคม 2553. จาก [http://www.levantsuez.com/EN/Polyolefins/pet/pet\\_bottles/mitsui\\_pet/](http://www.levantsuez.com/EN/Polyolefins/pet/pet_bottles/mitsui_pet/)
- [4] ภูเก็ตคอม. **polyesters และ PET**. สืบค้นเมื่อ 25 มีนาคม 2553. จาก <http://www.chemguide.co.uk/organicprops/esters/polyesters.html>
- [5] สุเมธ ชิตินาคร. (2543). บริษัท นีโอเมติก จำกัด ขยะพลาสติกกรีไซเคิล. **53 เรื่องน่ารู้เทคนิคเครื่องกล ชุดที่ 7**. เอ็มแอนค้อ. กรุงเทพมหานคร.
- [6] วิชาการคอม. **PET**. สืบค้นเมื่อ 8 กันยายน 2552. จาก <http://www.vcharkarn.com/varticle/38232>.
- [7] พิชิต เลี่ยมพิพัฒน์. (2538). **พลาสติก** (พิมพ์ครั้งที่ 12). กรุงเทพมหานคร.
- [8] สนุกคอม. **พอลิเมอร์**. สืบค้นเมื่อ 18 กันยายน 2552. จาก <http://blog.sanook.com/DesktopModules/MIH/Blog>
- [9] ปรีชา พหลเทพ. (2536). **พอลิเมอร์**. กรุงเทพมหานคร. มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- [10] วิชาการคอม. **เครื่องฉีดพลาสติก**. สืบค้นเมื่อ 24 สิงหาคม 2551. จาก <http://www.vcharkarn.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=423174&Ntype=1>
- [11] สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. **เครื่องทดสอบความแข็งแรงของวัสดุ**. สืบค้นเมื่อ 24 สิงหาคม 2551. จาก [http://www2.mtec.or.th/th/search\\_sys/search\\_proj/](http://www2.mtec.or.th/th/search_sys/search_proj/)
- [12] สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. **เครื่องทดสอบการหลอมไหลของพลาสติก**. สืบค้นเมื่อ 11 กรกฎาคม 2552. จาก [http://www2.mtec.or.th/th/search\\_proj/](http://www2.mtec.or.th/th/search_proj/)
- [13] สุภาพ ธาราศักดิ์. (2540). **การศึกษาปฏิกิริยาเคมีการย่อยสลายพอลิเอริลีนเทรฟธาเลท**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [14] เพลินพิศ บุญธรรม และคณะ. (2544). **ศึกษาการนำพอลิเอริลีนเทรฟธาเลทกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบของสีด้วยกระบวนการทางเคมี**. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 24 ฉบับที่ 2 :หน้า 193 - 208

- [15] ศรารัตน์ มหาศรานนท์. (2543). **การนำพอลิเอธิลีนเทเรพทาเลท จากขวดน้ำดื่มกลับมาใช้ใหม่ ด้วยกระบวนการทางเคมี**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [16] Firas Awaja and Dumitru Pavel. (2005). **Recycling of PET**. European Polymer Journal. Volumes 41 .P 1453-1477.
- [17] N.Torres, J.J.Robin and B.Boutevin. (2000). **Study of Thermal and Mechanicl properties of Virgin and recycle poly(ethylene terephthalate) before and after injection**. European Polymer Journal. Volumes 36 .P 2075-2080.
- [18] J.D.Badia. at al. (2009). **Thermal analysis a quality tool for assessing the influence of thermo mechanical degradation on recycle poly(ethylene terephthalate)**. Polymer Testing. Volumes 28.P 169-175.





ตารางที่ ก.1 ค่าเฉลี่ยสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

สมบัติเชิงกล	พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET <sub>p</sub> : PET <sub>r</sub>			
	100 : 0	100 : 10	100 : 20	100 : 30
Tensile Strength (MPa)	57.53±1.02	54.78±0.58	54.21±0.47	54.10±0.50
% Elongation at Break (%)	252.60±28.94	141.57±34.16	78.72±20.09	67.90±12.30
Young's Modulus (MPa)	472.26±10.26	449.86±9.75	436.06±11.97	419.13±11.74

ตารางที่ ก.2 ค่าเฉลี่ยดัชนีการหลอมไหลของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET<sub>p</sub> : PET<sub>r</sub> ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ

พอลิเมอร์ผสมระหว่าง PET <sub>p</sub> : PET <sub>r</sub> (phr)	Melt Flow Index (g/10 min)
0	35.08±0.01
10	35.10±0.02
20	35.13±0.02
30	35.21±0.02
40	35.25±0.02
50	35.27±0.02
60	35.32±0.06
70	35.42±0.04
100	36.16±0.11