

# อิทธิพลของการรีไซเคิลที่มีผลต่อสมบัติการไหล และสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

Effect of Reprocessing cycles on rheological and mechanical properties of Low density polyethylene (LDPE)

นายเจษฎินทร์ โพธิ์งาม

อ.ดร.สมเจตน์ พันธ์พันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

โทร 0-2549-3429, 0-2549-3420 โทรสาร 0-2549-3422 E-mail: fengntk@ku.ac.th

## บทคัดย่อ

จากงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของจำนวนครั้งและปริมาณการใช้รีไซเคิลที่มีต่อสมบัติการไหลและสมบัติเชิงกลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ โดยได้ทำการศึกษาน้ำหนักของสารรีไซเคิลตั้งแต่ 1 ถึง 4 ครั้ง ในอัตราส่วนผสมในช่วงระหว่าง 15 ถึง 45 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบที่การรีไซเคิลครั้งที่ 1 และ 2 พบว่า ค่าความหนืด อัตราส่วนการบวมตัว ความต้านทานต่อแรงดึงและระยะยืดที่จุดขาดมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการที่สายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัว และถูกตัดขาดในระหว่างกระบวนการผลิตซ้ำ อย่างไรก็ตามหากพิจารณาผลการทดสอบที่ได้จากจำนวนครั้งของการรีไซเคิลที่ 3 และ 4 พบว่าค่าความหนืด และความต้านทานต่อแรงดึง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามลำดับ ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลที่มีลักษณะเป็นกิ่งก้านของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มปริมาณการใช้รีไซเคิล พบว่า ค่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัว มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ค่าความต้านทานต่อแรงดึงสูงสุดและระยะยืดก่อนขาดมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

**คำสำคัญ:** การรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ, สมบัติการไหลและสมบัติเชิงกล

## Abstract

In this study, the effects of reprocessing cycles and recycle ratio on the rheological and mechanical properties of Low Density Polyethylene (LDPE) were investigated. The number of reprocessing cycles was varied from 1 to 4 and the recycle ratio was varied from 15 to 45 wt%. The results obtained from reprocessing numbers 1 and 2 of LDPE showed that the apparent viscosity, die swell ratio, tensile strength and elongation at break were lower than that of virgin LDPE. This was probably due to the disentanglement and chain scission of long chain branching of LDPE molecules. However, an increase in viscosity and tensile strength of LDPE were found for the reprocessing numbers 3 and 4. This mainly attributed to an occurrence of

crosslinking structure. Increasing recycle ratio tended to decrease the apparent viscosity and die swell ratio, while no significant changes were found in tensile strength and elongation at break of LDPE.

**Keywords:** Recycled LDPE, Rheological and mechanical properties

## 1. บทนำ

ปัจจุบันผลิตภัณฑ์ประเภทพอลิเมอร์มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งการเลือกใช้พอลิเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน โดยพบว่าการใช้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) ที่มีสมบัติการยืดหยุ่น (Flexibility) และทนต่อสารเคมี (Chemical Resistance) ได้เป็นอย่างดี จึงนิยมนำมาผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ซองบรรจุอาหาร แผ่นฟิล์ม รวมถึงของเล่นเด็กที่ต้องการลักษณะชิ้นงานที่มีความนิ่ม เป็นต้น จากการใช้งานของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีเป็นจำนวนมาก จึงทำให้เกิดปัญหาของเสียที่เพิ่มขึ้น ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษที่เป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากการย่อยสลายของพอลิเมอร์ตามธรรมชาติใช้เวลานานมาก หรือการทำลายด้วยการเผาซึ่งส่งผลให้ชั้นบรรยากาศถูกทำลายได้ หากมีการนำพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำผ่านกระบวนการรีไซเคิล (Recycle) และขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่อีกครั้ง นอกจากช่วยภาคอุตสาหกรรมลดต้นทุนการผลิตแล้วยังช่วยในเรื่องการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอีกด้วย ดังนั้น การรีไซเคิลจึงถือเป็นวิธีการที่เหมาะสม ถึงแม้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากการนำพอลิเอทิลีนที่ผ่านกระบวนการรีไซเคิลนั้นอาจมีสมบัติที่ด้อยลงเมื่อเทียบกับเกรดบริสุทธิ์ นอกจากนี้จำนวนครั้งของการรีไซเคิลก็ถือเป็นส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากหากมีการรีไซเคิลซ้ำไปซ้ำมาเป็นจำนวนหลายๆ ครั้ง เป็นการทำให้สมบัติในด้านการใช้งานลดลงไปอีก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงจำนวนครั้งในการรีไซเคิล และปริมาณการใช้เม็ดรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เพื่อศึกษาสมบัติการไหล (Rheological Properties) และสมบัติเชิงกล (Mechanical Properties) ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละรอบของการรีไซเคิล

## 2. อุปกรณ์และวิธีการ

### 2.1 การเตรียมเม็ดรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ

นำเม็ดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาผ่านกระบวนการอัดรีดที่อุณหภูมิ 150°C พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำหลอมเหลวที่ออกจากหัวขึ้นรูปถูกดึงผ่านรางน้ำเพื่อให้เกิดการเย็นตัว และเข้าสู่กระบวนการตัดเม็ด จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 80°C และถือว่าเม็ดที่ได้มาเป็นเม็ดรีไซเคิลครั้งที่ 1 นำเม็ดรีไซเคิลที่ได้แบ่งเป็น 2 ส่วนนำส่วนหนึ่งเข้าสู่กระบวนการข้างต้นเพื่อเตรียมเป็นเม็ดรีไซเคิลครั้งที่ 2, 3 และ 4 ต่อไป นำเม็ดที่ผ่านการรีไซเคิลในแต่ละครั้งผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่อัตราส่วน 15, 30, 45 และ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติการไหล และสมบัติเชิงกล

### 2.2 การทดสอบสมบัติการไหล

การทดสอบสมบัติการไหลแบ่งเป็นการทดสอบค่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวที่อัตราความเร็วเฉือนต่างๆ ซึ่งใช้เครื่องทดสอบสมบัติการไหลอินไลน์รีโอมิเตอร์ (In-line Rheometer) ตามมาตรฐาน ASTM D1238 โดยเริ่มจากการนำเม็ดรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่เตรียมไว้ข้างต้น มาทำการอัดรีดโดยใช้อุณหภูมิ 150°C เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านเครื่องอินไลน์รีโอมิเตอร์ และทำการบันทึกข้อมูล โดยสามารถคำนวณค่าความหนืด และค่าอัตราส่วนการบวมตัวได้จากสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1)$$

$$B = \frac{D_2}{D_1} \quad (2)$$

- เมื่อ  $\eta$  คือ ความหนืด  
 $\dot{\gamma}$  คือ อัตราความเร็วเฉือน  
 $\tau$  คือ ความเค้นเฉือน  
 $B$  คือ อัตราส่วนการบวมตัว  
 $D_1$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (mm)  
 $D_2$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่บริเวณทางออกของหัวขึ้นรูป (mm)

### 2.3 การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

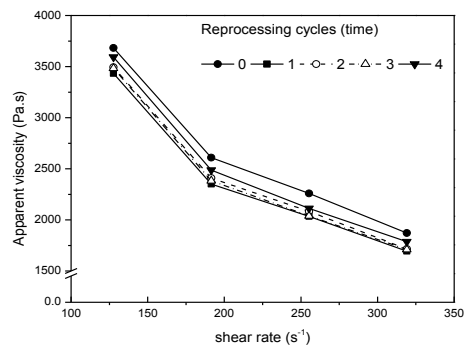
การทดสอบสมบัติเชิงกลแบ่งออกเป็น การทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึง และระยะที่จุดขาด โดยเริ่มจากการนำเม็ดพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผสมในอัตราส่วนข้างต้นฉีดขึ้นรูปเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D638 จากนั้นจึงนำไปทดสอบด้วยเครื่อง

ทดสอบเอนกประสงค์ (Universal Testing Machine) โดยใช้ความเร็วในการดึงยึดเท่ากับ 50 mm/min และมีระยะจับชิ้นงานเท่ากับ 50 mm

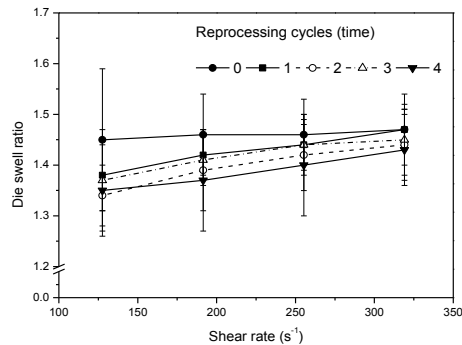
## 3. ผลการดำเนินโครงการ

### 3.1 สมบัติการไหล

จากรูปที่ 1 พบว่าค่าความหนืดที่ได้จากการรีไซเคิลในครั้งที่ 1 และ 2 มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำถูกตัดขาดจากแรงเฉือนของสกรูขณะกระบวนการรีไซเคิล อย่างไรก็ตามจากการรีไซเคิลในครั้งที่ 3 และ 4 พบว่าค่าความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุล ทั้งนี้จากการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลส่งผลให้มีความแข็งเกร็ง (Rigid) เพิ่มขึ้น และจากการที่สายโซ่โมเลกุลที่ถูกตัดขาดในปริมาณมากทำให้มีการสะสมพลังงานแบบอีลาสติกน้อยลง ซึ่งเป็นเหตุให้อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ค่าความหนืดของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่จำนวนครั้งในการรีไซเคิลต่างๆ

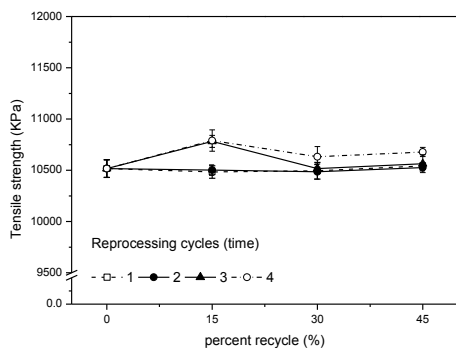


รูปที่ 2 ค่าอัตราส่วนการบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่จำนวนครั้งในการรีไซเคิลต่างๆ

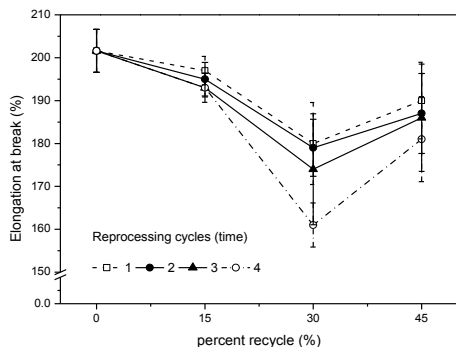
### 3.2 สมบัติความต้านทานต่อแรงดึง

ผลการทดสอบสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงของการรีไซเคิลในครั้งที่ 1 ถึง 4 และที่ปริมาณ 15, 30 และ 45 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ดัง

แสดงในรูปที่ 3 พบว่าค่าความต้านทานต่อแรงดึงในการรีไซเคิลครั้งที่ 1 และ 2 มีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาดจากความร้อนและแรงเฉือนของสกรูในระหว่างกระบวนการรีไซเคิล และจากการรีไซเคิลครั้งที่ 3 และ 4 ส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามลำดับอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยเมื่อดูอิทธิพลของปริมาณรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วนต่างๆ พบว่าไม่ส่งผลต่อความต้านทานต่อแรงดึงมากนัก ในขณะที่ผลของการทดสอบระยะยืดที่จุดขาดให้ผลสอดคล้องกับค่าความต้านทานต่อแรงดึง กล่าวคือเมื่อความต้านทานต่อแรงดึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าระยะยืดที่จุดขาดลดลงตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 3 ความต้านทานต่อแรงดึงของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่จำนวนครั้งและปริมาณการรีไซเคิลต่างๆ



รูปที่ 4 ค่าระยะยืดที่จุดขาดของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่จำนวนครั้งและปริมาณการรีไซเคิลต่างๆ

#### 4. สรุปผล

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของจำนวนครั้งในการรีไซเคิล พบว่าในครั้งที่ 1 และ 2 ค่าความหนืด และค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาดจากความร้อน และแรงเฉือนของสกรูในระหว่างกระบวนการรีไซเคิล ในขณะที่การรีไซเคิลครั้งที่ 3 และ 4 พบว่าค่าความหนืด และค่าความต้านทานต่อแรงดึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุล ซึ่งสอดคล้อง

กับผลของค่าระยะยืดที่จุดขาด คือ เมื่อความแข็งแรงเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการดึงยืดลดน้อยลง อีกทั้งค่าอัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อจำนวนครั้งในการรีไซเคิลเพิ่มขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่สายโซ่โมเลกุลถูกตัดขาดมากขึ้นทำให้สามารถสะสมพลังงานได้น้อยลง จึงส่งผลให้การบวมตัวลดลง และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของปริมาณรีไซเคิลพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่ผสมกับพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 15, 30, 45 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความหนืดและค่าอัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ เนื่องจากปริมาณของสายโซ่โมเลกุลที่ถูกตัดขาดและการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุล ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งไม่ส่งผลต่อค่าความต้านทานต่อแรงดึง และค่าระยะยืดที่จุดขาดมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากการที่มีอิทธิพลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเป็นส่วนผสมอยู่ในปริมาณมาก

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับเงินทุนสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย และเครื่องมือทดสอบในการทำงานวิจัย รวมทั้งขอขอบพระคุณ อ.ดร. สมเจตน์ พัชรพันธ์ อ.ดร.อมรรัตน์ เลิศวรศิริกุล และศ.ดร. อภิรัตน์ เล่าห์บุตรี ที่ได้ให้คำปรึกษา ตลอดจนให้คำแนะนำเป็นอย่างดี และขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ในกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตพลาสติกและยาง (Plastic and Rubber Processing Research Group, PaRP-Group)

#### เอกสารอ้างอิง

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2548. พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้งาน (ฉบับปรับปรุงและเพิ่มเติม). พิมพ์ครั้งที่ 2 คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

วีรพล อภิณศิริ และ ปาณัสม์ กาลนิล. 2552. การออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวแบบอินไลน์รีโอมิเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรอุมา สันตวิธิ. 2548. ผลของโครงสร้างโมเลกุลและองศาของความเป็นกิ่งของพอลิเอทิลีนที่มีต่อกลไกการสลายตัวของพอลิไวนิลคลอไรด์ในพอลิเมอร์ผสมของพอลิไวนิลคลอไรด์และพอลิเอทิลีน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยศิลปากร.

Achilias, D. S., C. Roupakias., P. Megalokonomos, A. A. Lappas. and E. V. Antonakou. 2007. Chemical Recycling of Plastic Wastes made from Polyethylene (LDPE and HDPE) and

- Polypropylene (PP). **Journal of Hazardous Materials**. 149(3): 536-542.
- Cantor, K., 2006. **Blown Film Extrusion**. Hanser publishers, Munich.
- Charles, A.H., 2006. **Handbook of Plastic Technology**. McGraw-Hill, New York.
- Cogswell, F.N., 1981. **Polymer Melt Rheology**. George Godwin, London.
- Dintcheva, N. T., N. Jilov. and F. P. La Mantia. 1997. Recycling of Plastics from Packaging. **Polymer Degradation and Stability**. 57(2): 191-203.
- Dostal, J., Kasparikova, V., Zatloukal, M., Muras, J. and Simek L., 2008, Influence of the Repeated Extrusion on the Degradation of Polyethylene. Structure Change in Low Density Polyethylene, **European Polymer Journal**, Vol. 44 , pp. 2652–2658.
- Han, C.D., 1976. **Rheology in Polymer Processing**. Academic Press, New York.
- Loultcheva, M. K., M. Proietto, N. Jilov. and F. P. La Mantia. 1997. Recycling of High Density Polyethylene Containers. **Polymer Degradation and Stability**. 57(1): 77-81.
- Levy, S. and J.F. Carley. 1989. **Plastics Extrusion Technology Handbook**. Industrial Press Inc, New York.
- Pedroso, A. G. and D. S. Rosa. 2005. Mechanical Thermal and Morphological Characterization of recycled LDPE/corn starch blends. **Carbohydrate Polymers**. 59(1): 1-9.
- Roger , L.C., Norman, C.B. and T.G. Kenneth. 1996. **Polymer urability Degradation Stabilization and Life Time Prediction**. American Chemical Society, Washington.
- Sciamanna, R. A. and C. A. Ramos. 1999. Recycling of Low Density Polyethylene (to be used for tubing production). **Revista De La Facultad De Ingenieria (Venezuela)**. 14(1): 123-133.
- Scheirs, J. 1998. **Polymer Recycling**. John Wiley & Sons, New York.
- Tadmor, Z. and C. Gogos. 2006. **Principles of Polymer Processing**. John Wiley & Sons, New York.