



การศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเอธีลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม

Rheological Properties of LDPE during the Co-extrusion Process

เชษฐภรณ์ แก้วกนกศิลป์¹ วีรพล อภิมณสิริ² สมเจตน์ พัชรพันธ์^{2*}

นเรศ อินตะวงศ์³ และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ¹

Chetporn Keawkanoksilp¹, Weerapol Apimonsiri², Somjate Patcharaphun^{2*},
Naret Intawong³, and Narongrit Sombatsompop¹

¹ Polymer Processing and Flow (P-PROF) group, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand.

² Plastic and Rubber Processing (PaRP) research group, Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

³ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiang Mai, Thailand.

*e-mail: fengsjpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการอัดรีดร่วม ได้แก่ อุณหภูมิหัวตาย อัตราครีดยื่นระหว่างพอลิเมอร์ชั้นผิวและชั้นแกนกลาง และจำนวนครั้งในการรีไซเคิลของพอลิเมอร์ชั้นแกนกลางที่มีต่อสมบัติการไหลของพอลิเอธีลีนหลอมเหลวชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) จากผลการวิเคราะห์พบว่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE แบบอัดรีดร่วมมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และการเพิ่มอัตราครีดยื่นที่บริเวณชั้นผิวมีแนวโน้มทำให้อัตราส่วนการบวมตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราครีดยื่นที่บริเวณชั้นแกนกลางไม่ส่งผลต่ออัตราส่วนการบวมตัวมากนัก นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนครั้งในการรีไซเคิลของ LDPE ที่บริเวณชั้นแกนกลาง ส่งผลให้ค่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE แบบอัดรีดร่วมมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างมากเนื่องจากการเสื่อมสภาพของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์จากอิทธิพลทางความร้อน

คำสำคัญ: กระบวนการอัดรีดร่วม / ปัจจัยในกระบวนการผลิต / จำนวนครั้งในการรีไซเคิล / สมบัติการไหล

Abstract: The rheological properties of Low Density Polyethylene (LDPE) during the co-extrusion process are presented in this work. The influences of die temperature, shear rate at skin and core layers, and number of extrusion passes at the core layer on the viscosity and die swell ratio of co-extruded LDPE are investigated. The results obtained in this work indicate that the viscosity and die swell of co-extruded LDPE decrease with the increase of die temperature. The increasing shear rate at skin layer tends to increase the die swell, while no significant change is found with the increase of shear rate at core layer. Furthermore, it can be seen that the increasing number of extrusion passes result in the reduction of viscosity and swelling. This is due to the molecular chain scission occurred during its thermal history.

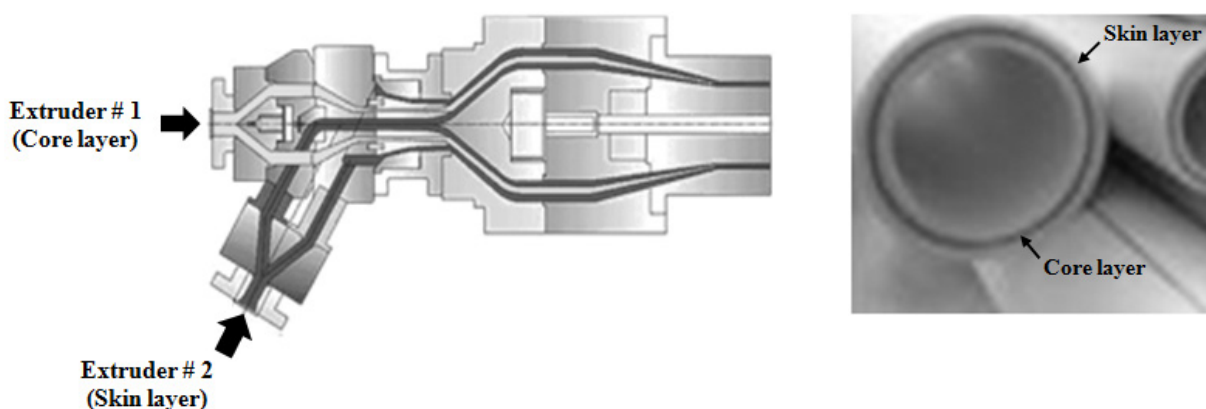
Keywords: Co-extrusion / Processing parameters / Number of extrusion passes / Rheological properties





บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนพลาสติกมีความต้องการในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลาย ทั้งในแง่ความสวยงาม รวมถึงสามารถตอบสนองความต้องการใช้งานที่กว้างขวางและทนทานมากขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน โดยกระบวนการอัดรีดร่วม (Co-extrusion process) เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้นมาจากกระบวนการอัดรีด (Extrusion process) ซึ่งหลักการทำงานของเครื่องอัดรีดร่วมนั้น อาศัยการอัดรีดจากเครื่องอัดรีดสองเครื่องผ่านหัวคาย (Die) แบบร่วม ซึ่งทำให้สามารถอัดรีดผลิตภัณฑ์ที่มีวัสดุชั้นผิว (Skin layer) และชั้นแกนกลาง (Core layer) ที่แตกต่างกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 1 ยกตัวอย่างเช่น การใช้พอลิเมอร์รีไซเคิลเป็นวัสดุชั้นแกนกลาง ในขณะที่ชั้นผิวเป็นวัสดุพอลิเมอร์ใหม่ (Virgin material) หรือการใช้พอลิเมอร์ที่มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเป็นวัสดุชั้นผิว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิตและยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น [1] โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการอัดรีดร่วม ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิหัวคาย อัตราความเร็วรอบระหว่างพอลิเมอร์ชั้นผิวและชั้นแกนกลาง และจำนวนครั้งของการรีไซเคิลพอลิเมอร์ชั้นแกนกลาง ที่มีต่อความหนืด และอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE หลอมเหลว เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการพัฒนากระบวนการผลิตต่อไป



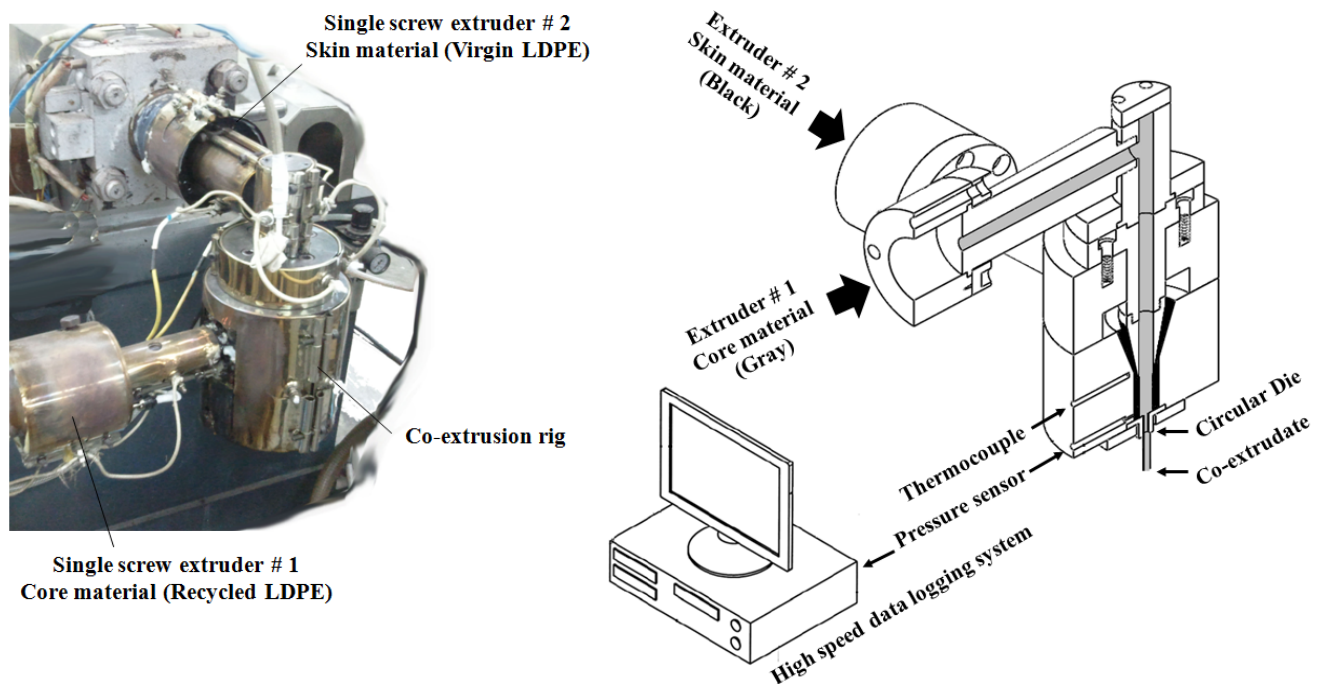
รูปที่ 1 กระบวนการอัดรีดร่วมและผลิตภัณฑ์ท่อพลาสติกที่ได้ โดยมีชั้นแกนกลางเป็นวัสดุรีไซเคิล

วิธีการทดลอง

การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมบัติการไหลสำหรับกระบวนการอัดรีดร่วม ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE หลอมเหลวที่อัตราความเร็วรอบต่างๆ กัน [2] โดยเงื่อนไขในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1





รูปที่ 2 ชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 1 แสดงเงื่อนไขในการทดสอบสมบัติการไหลของ LDPE* ในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม

Test conditions	
Die temperature ($^{\circ}\text{C}$)	140 / 150 / 160
Shear rate of skin layer (s^{-1})	12.59 / 19.79 / 26.98 / 37.78
Shear rate of core layer (s^{-1})	12.59 / 19.79 / 26.98 / 37.78
Number of extrusion passes (times)	0 / 1 / 2 / 3 / 4

* LDPE เกรด LD1905FA มีค่าดัชนีการไหลเท่ากับ 5 และความหนาแน่นเท่ากับ 0.919 g/cm^3 ตามมาตรฐาน ASTM D1238-04c เม็ดพลาสติก LDPE ได้รับความสนับสนุนจากบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด

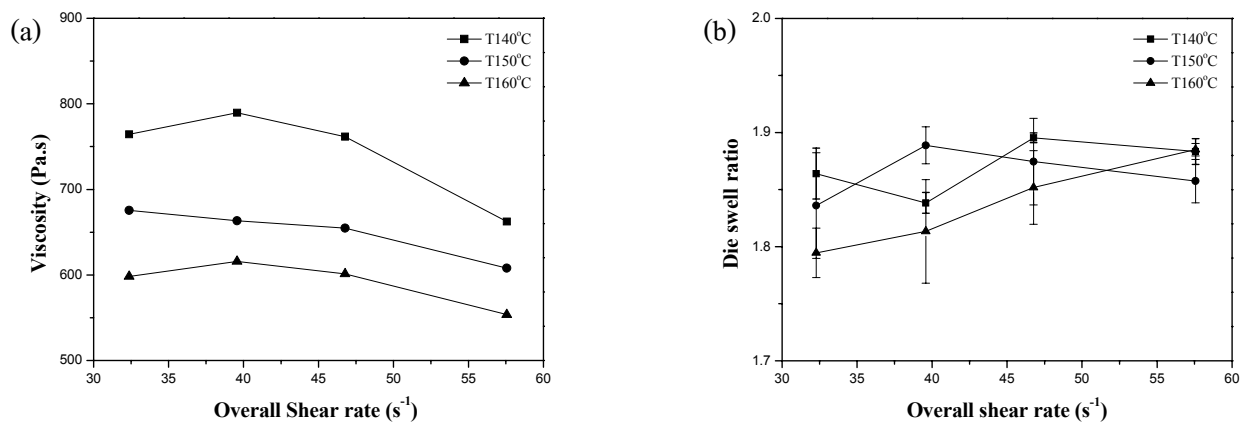
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติการไหลของ LDPE หลอมเหลวในกระบวนการอัดรีดร่วม

รูปที่ 3 (a) และ (b) แสดงค่าความหนืด และอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE แบบอัดรีดร่วม ที่อัตราความเร็วรอบต่างๆ กัน เมื่อใช้อุณหภูมิของหัวดายเท่ากับ 140 150 และ 160°C ตามลำดับ จากผลการ



ทดลองพบว่าความหนืดของ LDPE แบบอัดรีดร่วมมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิและอัตราครีดยืดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความเป็นซูโดพลาสติกของ LDPE หากพิจารณาอัตราส่วนการบวมตัวที่เกิดขึ้นพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้การบวมตัวที่หัวดายมีค่าลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากสายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัวมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราครีดยืดมีแนวโน้มทำให้การบวมตัวที่หัวดายมีค่าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอัตราครีดยืดส่งผลให้เกิดการสะสมพลังงานในสายโซ่โมเลกุลเพิ่มมากขึ้นและเมื่อพอลิเมอร์ออกจากหัวดายจึงคลายพลังงานออกมาในรูปของการบวมตัว [3] นอกจากนี้หากพิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่ออัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE ในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วมโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราครีดยืดสูงๆ พบว่า อัตราส่วนการบวมตัวมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้งนี้มีสาเหตุหลักมาจากความร้อน (Shear heating) ที่เพิ่มสูงขึ้นจากความเร็วในการไหลที่เพิ่มมากขึ้น [4]



รูปที่ 3 (a) ค่าความหนืด และ (b) อัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE หลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม ที่อัตราครีดยืดเนื่องโดยรวมต่างๆ กัน เมื่อใช้อุณหภูมิหัวดายเท่ากับ 140 150 และ 160 °C ตามลำดับ

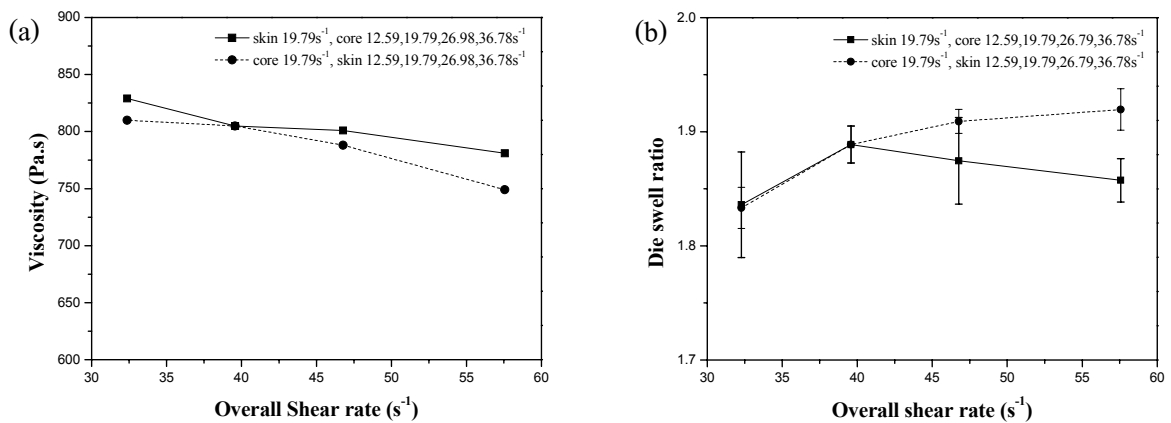
อิทธิพลของอัตราครีดยืดเนื่องที่มีต่อสมบัติการไหลของ LDPE หลอมเหลวในกระบวนการอัดรีดร่วม

จากผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE ในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม เมื่อใช้อัตราครีดยืดเนื่องของ LDPE หลอมเหลวในชั้นแกนกลางและในชั้นผิวที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 (a) และ (b) พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราครีดยืดเนื่องที่บริเวณชั้นผิวส่งผลให้ความหนืดของ LDPE แบบอัดรีดร่วมมีค่าลดลงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การเพิ่มขึ้นของอัตราครีดยืดเนื่องที่บริเวณชั้นแกนกลาง เนื่องจากอัตราครีดยืดเนื่องที่เพิ่มสูงที่บริเวณผนังทำให้เกิดความร้อนเนื่องจากการไหลที่เพิ่มขึ้นมากกว่าที่บริเวณชั้นแกนกลาง [5] จึงส่งผลต่อการลดลงของความหนืดที่มากกว่า นอกจากนี้การเพิ่มอัตราครีดยืดเนื่องที่ชั้นผิวยังส่งผลให้ LDPE แบบอัดรีดร่วมมีอัตราส่วนการบวมตัวเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากความเค้นเฉือนที่บริเวณผนัง (Shear stress at wall) ที่เพิ่มสูงขึ้น ทำให้เกิดการยืดยาวของสายโซ่โมเลกุล (Molecular disentanglement) หรือเกิดพลังงานสะสมภายในพอลิเมอร์หลอมเหลว (Stored energy) ที่มากกว่าใน





ขณะที่ไหลอยู่ภายในห้วคาย ดังนั้นเมื่อพอลิเมอร์ไหลอมเหลวไหลผ่านห้วคายออกมา จึงเกิดการคืนตัวกลับของสายโซ่โมเลกุล (Recoiling) หรือการปลดปล่อยพลังงานออกมาในลักษณะของการบวมตัวเพิ่มมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเพิ่มอัตราครีดยืดในชั้นแกนกลางที่อัตราการบวมตัวที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ซึ่งนอกจากสาเหตุที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังอาจเนื่องมาจากการปกคลุมของพอลิเมอร์ชั้นผิวที่ขัดขวางการบวมตัวของพอลิเมอร์ชั้นแกนกลางเมื่อผ่านห้วคายแบบร่วม



รูปที่ 4 (a) ค่าความหนืด และ (b) อัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE หลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม ที่อัตราครีดยืดเฉือนระหว่างชั้นผิวและชั้นแกนกลางต่างๆ กัน เมื่อใช้อุณหภูมิห้วคายเท่ากับ 150 °C

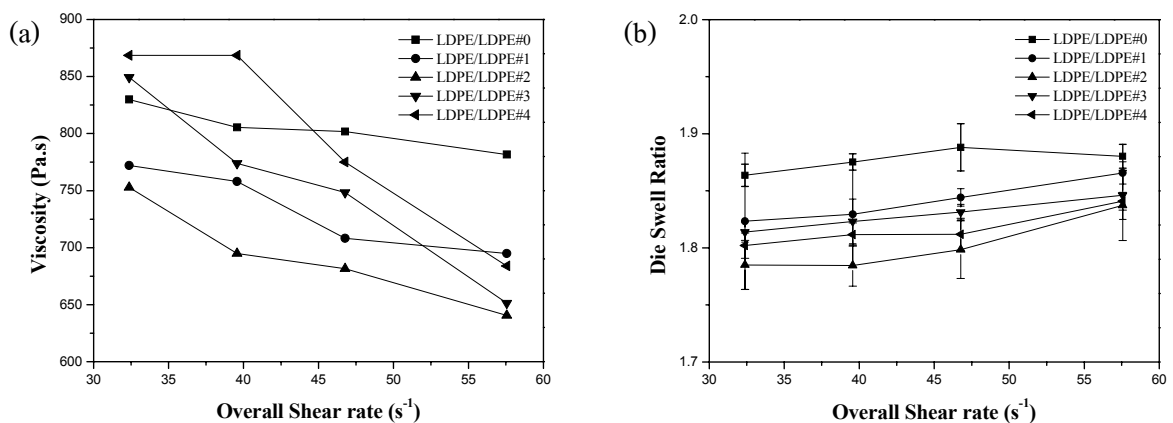
อิทธิพลของจำนวนครั้งการรีไซเคิลที่มีต่อสมบัติการไหลของ LDPE หลอมเหลวในกระบวนการอัดรีดร่วม

รูปที่ 5 (a) และ (b) แสดงค่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE แบบอัดรีดร่วมเมื่อใช้วัสดุชั้นผิวเป็น LDPE ใหม่ (LDPE หรือ LDPE#0) และใช้วัสดุแกนกลางเป็นรีไซเคิล LDPE ตั้งแต่ 0 ถึง 4 ครั้ง (LDPE#0 ถึง LDPE#4) ที่อุณหภูมิห้วคายเท่ากับ 150 °C จากผลการทดลองพบว่า เมื่อจำนวนครั้งในการรีไซเคิลเพิ่มมากขึ้น ค่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE แบบอัดรีดร่วมมีแนวโน้มที่ลดลงอย่างมาก ซึ่งมีสาเหตุมาจากการขาดของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์เนื่องจากอิทธิพลของความร้อน (Thermal history) ที่ทำให้น้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ลดลงและสามารถเคลื่อนที่ผ่านกัน (Slippage) ได้ง่ายขึ้น [2] ส่งผลให้ความหนืดมีค่าลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราครีดยืดเฉือนที่บริเวณชั้นแกนกลางเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้หากพิจารณาอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE เมื่อใช้วัสดุแกนกลางเป็นรีไซเคิล LDPE ตั้งแต่ 0 ถึง 4 ครั้งที่อัตราครีดยืดเฉือนโดยรวมซึ่งมีค่าสูงเท่ากับ 57.57 s⁻¹ (อัตราครีดยืดเฉือนชั้นผิวและชั้นแกนกลาง เท่ากับ 19.79 และ 37.78 s⁻¹ ตามลำดับ) พบว่าอัตราส่วนการบวมตัวที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากการเพิ่มอุณหภูมิของห้วคาย โดยมีสาเหตุหลักมาจากความร้อนเฉือนที่เพิ่มสูงขึ้นจากความเร็วในการไหลที่เพิ่มมากขึ้น หากพิจารณาค่าความหนืดของ LDPE แบบอัดรีดร่วม ที่อัตราครีดยืดเฉือนโดยรวมซึ่งมีค่าต่ำเท่ากับ 32.38 s⁻¹ (อัตราครีดยืดเฉือนชั้นผิวและชั้น





แกนกลาง เท่ากับ 19.79 และ 12.59 s^{-1} ตามลำดับ) เมื่อจำนวนครั้งของการรีไซเคิลมากกว่า 2 ครั้ง (LDPE/LDPE#3 และ LDPE/LDPE#4) พบว่าความหนืดของ LDPE แบบอัดรีดร่วมมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยาพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ LDPE ที่บริเวณชั้นแกนกลาง ส่งผลให้ค่าความหนืดเริ่มต้น (Zero / Low shear viscosity) มีค่าสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้วัสดุแกนกลางเป็น LDPE ใหม่ (LDPE/LDPE#0) [6]



รูปที่ 5 (a) ค่าความหนืด และ (b) อัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE หลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม เมื่อใช้วัสดุรีไซเคิล LDPE เป็นชั้นแกนกลาง ที่จำนวนครั้งของการรีไซเคิล ตั้งแต่ 0 ถึง 4 ครั้ง ที่อัตราความเร็วโดยรวมนั้น

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในกระบวนการอัดรีดร่วมที่มีต่อสมบัติการไหลของ LDPE หลอมเหลว ซึ่งได้แก่ความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวที่เกิดขึ้น จากผลการวิเคราะห์ที่ได้สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE แบบอัดรีดร่วมมีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มอัตราความเร็วมีแนวโน้มทำให้การบวมตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้น
2. อิทธิพลของอัตราความเร็วที่บริเวณชั้นผิวมีผลต่อความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE แบบอัดรีดร่วมมากกว่าอิทธิพลของอัตราความเร็วที่บริเวณชั้นแกนกลาง โดยมีสาเหตุมาจากความร้อนและการปกคลุมของพอลิเมอร์ชั้นผิว
3. จำนวนครั้งในการรีไซเคิลเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวของ LDPE แบบอัดรีดร่วมมีแนวโน้มลดลงอย่างมากเนื่องจากการเสื่อมสภาพของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์จากอิทธิพลทางความร้อน อย่างไรก็ตามที่อัตราความเร็วต่ำ การรีไซเคิลของพอลิเมอร์ชั้นแกนกลางครั้งที่ 3 และ 4 ทำให้ความหนืดของ LDPE แบบอัดรีดร่วมเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การบวมตัวลดลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเกิดพันธะเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โมเลกุลของ LDPE





กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) สำหรับทุนสนับสนุนส่งเสริมกลุ่มวิจัย สกว. ประจำปี 2552 และบริษัท ปูนซีเมนต์ไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เม็ดพลาสติก LDPE

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Levy and J.F. Carley, *Plastics Extrusion Technology Handbook*, Industrial Press Inc., New York, 1989.
- [2] F.N. Cogswell, *Polymer Melt Rheology*, Woodhead Publishing Limited, England, 1981.
- [3] N. Sombatsompop, *Polymer Rheology and Application*, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 2005.
- [4] N. Sombatsompop, W. Chaiwattanapipat, and M. Panapoy, Melt Temperature Variations in the Barrels of an Injection Molder and Twin Screw Extruder, *Mater. Res. Innovations*. 3 (2000) 271-275.
- [5] S. Patcharaphun and N. Sombatsompop, A New Experimental Method for Determining Simultaneously True Radial Temperature Profiles of Polymer Melts under Isothermal Capillary Flow, *Polym. J.* 33 (2001) 491-494.
- [6] J. Dostal and V. Kasparkova, Influence of the Repeated Extrusion on the Degradation of Polyethylene. Structure Change in Low Density Polyethylene, *Eur. Polym. J.* 44 (2008) 2652 – 2658.

