

อิทธิพลของการออกแบบหัวขึ้นรูปที่มีต่อพฤติกรรมการเสีรूपภายในชั้นแกนกลางของ
วัสดุเชิงประกอบเส้นใยแก้ว/พอลิโพรพิลีนขณะอัดรีดร่วม
Effect of Die Design on Internal Melt Fracture of
Glass Fiber/Polypropylene Composite during Co-Extrusion Process

ศรัณย์ รุ่งเรืองสุภรัตน์^{1,*}, นฤสรณ์ ภัทรจารึก², สมเจตน์ พืชพันธ์² และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ¹
Sarun Rungruangsuparat^{1,*}, Nurusorn Phattharajaruk², Somjate Patcharaphun² and
Narongrit Sombatsompop¹

¹กลุ่มวิจัยการผลิตและขึ้นรูปพอลิเมอร์ (P-PROF), คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี,
126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

²ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์,
50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy, Environment and Materials,
King Mongkut's University of Technology, Thonburi
126 Pracha Uthit Rd., Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140

²Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,
50 Ngam Wong Wan Rd., Ladyaow, Chatuchak, Bangkok 10900

*sarun_mhoo@hotmail.com, 0959591876

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะของหัวขึ้นรูป (Die geometry) แบบต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการเสีรूपภายใน (Internal melt fracture) ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม (Co-extrusion) โดยใช้พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ชั้นผิว (Skin layer) และใช้พอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นพอลิเมอร์ชั้นแกนกลาง (Core layer) ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า การเสีรूपภายในที่เกิดขึ้นนั้น มีความเกี่ยวข้องกับรูปแบบของหัวขึ้นรูปที่ใช้ ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นในระบบการอัดรีดร่วม โดยการเพิ่มความยาวของหัวขึ้นรูป ส่งผลให้เกิดการเสีรूपภายในเพิ่มขึ้น ในขณะที่สามารถลดและจัดการเสีรूपภายในของพอลิเมอร์ผสมเส้นใยแก้วที่เกิดขึ้นระหว่างการอัดรีดร่วม โดยการใช้หัวขึ้นรูปที่มีลักษณะลาดเอียง (Tapered die) ตลอดความยาวหัวขึ้นรูป

คำหลัก: กระบวนการอัดรีดร่วม, การเสีรूपภายใน, ลักษณะหัวขึ้นรูป และพอลิโพรพิลีนผสมด้วยเส้นใยแก้ว

Abstract

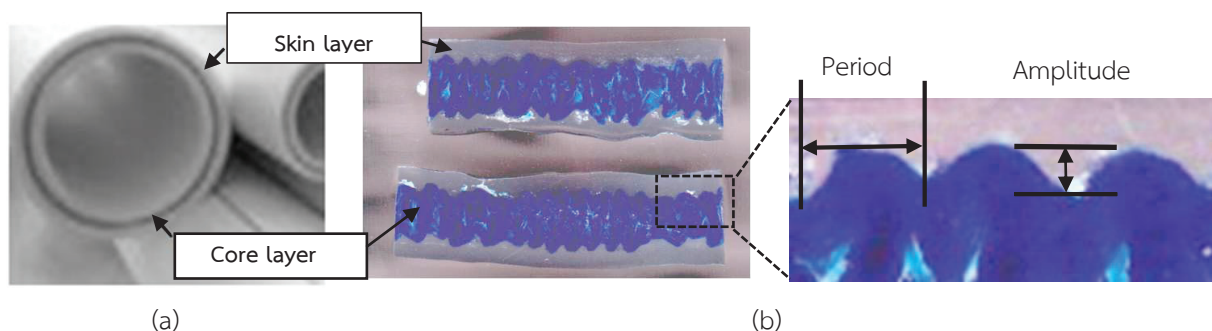
The influence of die geometry on internal melt fracture occurred during co-extrusion was investigated in this work. Polypropylene (PP) and Polypropylene filled with 20 wt.% short-glass-fiber were used in the skin and core layers, respectively. The experimental results indicated that the occurrence of internal melt fracture was dependent on the die geometry, which was directly related to the pressure drop in the co-extruders. Increasing the die length at the exit increased the amount of the internal fracture. However, the internal melt fracture was minimized and finally eliminated by using dies with tapered configurations along the die length.

Key words: Co-extrusion, Internal melt fracture, Die geometry, Short-glass-fiber-filled Polypropylene

1. บทนำ

ในปัจจุบัน การผลิตชิ้นส่วนพลาสติกมีความต้องการในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลาย ทั้งในแง่ความสวยงาม รวมถึงสามารถตอบสนองความต้องการใช้งานที่กว้างขวางและทนทานมากขึ้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องออกแบบและพัฒนากระบวนการผลิตให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน โดยกระบวนการอัดรีดร่วม (Co-extrusion process) เป็นกระบวนการที่พัฒนาขึ้น ซึ่งอาศัยการอัดรีดจากเครื่องอัดรีดสองเครื่องผ่านหัวขึ้นรูป (Die) แบบร่วม ทำให้สามารถอัดรีดผลิตภัณฑ์

ที่มีวัสดุชั้นผิว (Skin layer) และชั้นแกนกลาง (Core layer) ที่แตกต่างกันได้ ดังแสดงในรูปที่ 1(a) ยกตัวอย่างเช่น การใช้พอลิเมอร์รีไซเคิลเป็นวัสดุชั้นแกนกลาง ในขณะที่ชั้นผิวเป็นวัสดุพอลิเมอร์ใหม่ (Virgin material) หรือการใช้พอลิเมอร์ที่มีความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพเป็นวัสดุชั้นผิว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิตและยืดอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น [1] จากงานวิจัยที่ผ่านมา [2] ได้ศึกษาสมบัติการไหลในกระบวนการอัดรีดร่วมระหว่างพอลิพรพิลีน (ชั้นผิว) และพอลิพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในปริมาณต่างๆ กัน (ชั้นแกนกลาง) และได้พบปรากฏการณ์การเสียรูปภายใน (Internal melt fracture) ที่มีลักษณะคล้ายเกลียวคลื่น (Helical distortion) โดยได้วิเคราะห์การเสียรูปที่เกิดขึ้นจากการวัดความสูงของร่องเกลียว (Amplitude, A) และความกว้างของร่องเกลียว (Period, λ) ดังแสดงในรูปที่ 1(b)

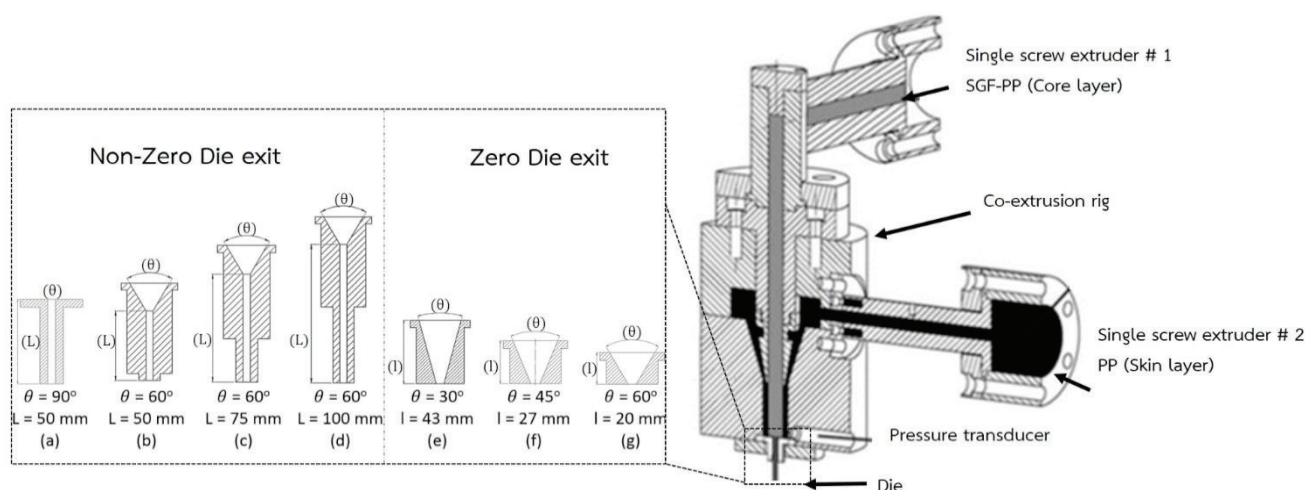


รูปที่ 1 (a) ผลิตภัณฑ์ท่อพลาสติกที่มีวัสดุรีไซเคิลอยู่ในชั้นแกนกลาง และ (b) การวัดความกว้าง (Period) และความสูง (Amplitude) ของร่องเกลียวการเสียรูปภายในของ PP/GFRPP [2]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ปรับเปลี่ยนลักษณะของหัวขึ้นรูป ได้แก่ การเพิ่มความยาวของหัวขึ้นรูป และการปรับเปลี่ยนมุมทางเข้าของหัวขึ้นรูป เพื่อหาแนวทางในการแก้ไขปัญหาการเสียรูปภายในที่เกิดขึ้น

2. วิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้ใช้พอลิพรพิลีน (PP) เกรดอัดรีด (EL-Pro P400S) และพอลิพรพิลีนเกรดอัดรีดที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในปริมาณ 20 wt.% ความยาว 6 mm (SGF-PP) ซึ่งใช้ชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม (Co-extrusion rig) [2] และหัวขึ้นรูปที่มีลักษณะต่างๆ กัน (a-g) ดังแสดงในรูปที่ 2

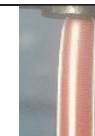
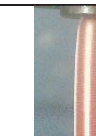


รูปที่ 2 ภาพแสดงเส้นทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในหัวขึ้นรูปแบบอัดรีดร่วมและลักษณะของหัวขึ้นรูปที่ใช้งานวิจัยนี้

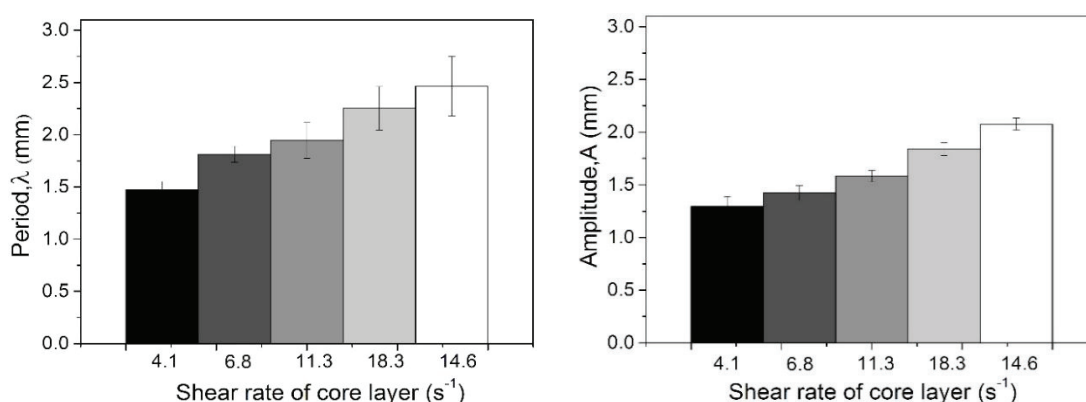
สภาวะที่ใช้ในการศึกษาการเสียรูปภายในที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วมระหว่าง PP/SGF-PP ประกอบไปด้วย อุณหภูมิบริเวณกระบอกหลอมถึงหัวขึ้นรูปเท่ากับ 190 / 200 / 210 / 220 / 230 °C ตามลำดับ ควบคุมอัตราการไหลในชั้นผิวที่ 20.5 s⁻¹ และปรับเปลี่ยนความถี่การไหลในชั้นแกนกลางตั้งแต่ 4.1 / 6.8 / 11.3 / 14.6 / 18.3 s⁻¹

3. ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบที่ได้จากการอัดรีดร่วมกันระหว่าง PP/PP เปรียบเทียบกับ PP/SGF-PP เมื่อใช้หัวขึ้นรูปที่มีมุมทางเข้า 90° และมีความยาว 50 mm ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม (Co-extrudate) ระหว่าง PP/PP ไม่เกิดปรากฏการณ์เสียรูปภายใน ที่ทุกๆ การเปลี่ยนแปลงอัตราความเร็วที่บริเวณชั้นแกนกลาง ในขณะที่การอัดรีดร่วมระหว่าง PP/SGF-PP เกิดปรากฏการณ์เสียรูปภายใน โดยการเสียรูปภายในมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราความเร็วในชั้นแกนกลาง ทั้งนี้สามารถวิเคราะห์การเสียรูปภายในที่เกิดขึ้นได้จากค่าความสูงและความกว้างของร่องเกลียวที่วัดได้ ดังแสดงในรูปที่ 4

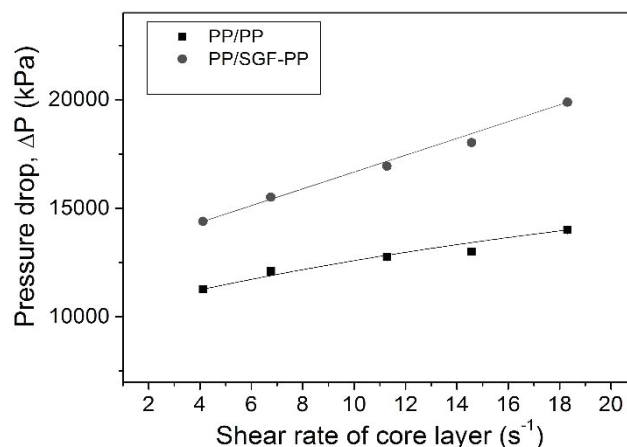
Materials	Shear rate of core layer ($\dot{\gamma}_{core}$)				
	$\dot{\gamma}_{core} = 4.1 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 6.8 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 11.3 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 14.6 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 18.3 \text{ s}^{-1}$
PP/PP					
PP/SGF-PP					

รูปที่ 3 พอลิเมอร์หลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมที่ได้จากการอัดรีดร่วมของ PP/PP และ PP/SGF-PP เมื่อใช้อัตราความเร็วที่บริเวณชั้นแกนกลางต่างๆ กัน



รูปที่ 4 ค่าความกว้าง (Period) และความสูง (Amplitude) ของร่องเกลียวที่วิเคราะห์ได้จากการเสียรูปภายในของ PP/SGF-PP

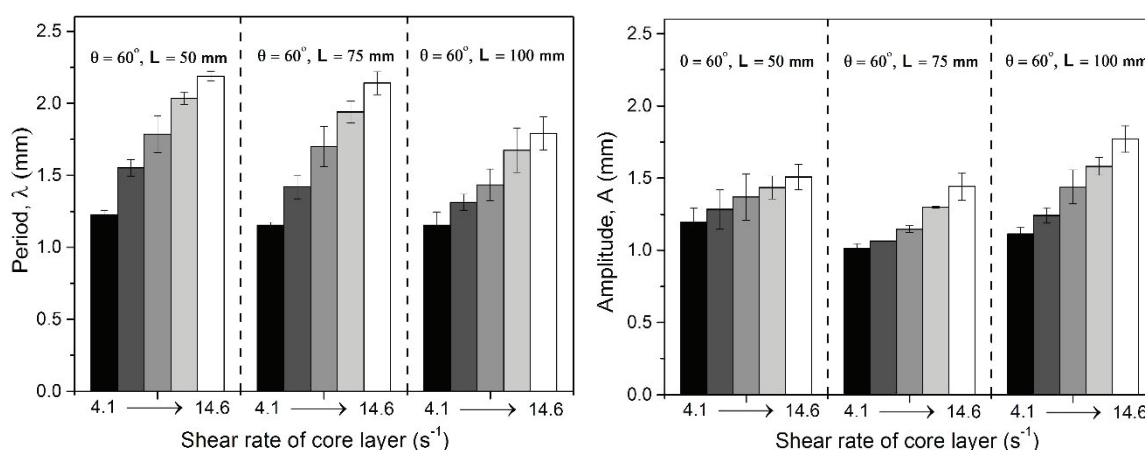
รูปที่ 5 แสดงผลการวัดความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น (Pressure drop, ΔP) ในระหว่างการอัดรีดร่วมของ PP/PP และ PP/SGF-PP เมื่อใช้อัตราความเร็วในชั้นแกนกลางต่างๆ กัน จากผลการทดลองพบว่า ความดันมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราความเร็วในชั้นแกนกลาง โดยความดันที่วัดของ PP/SGF-PP มีค่าสูงกว่า PP/PP เนื่องจากเส้นใยที่ผสมลงไปทำให้พอลิโพรพิลีนในชั้นแกนกลางมีความหนืดเพิ่มขึ้นและมีสมบัติความเป็นออสติก (Elastic properties) ซึ่งได้แก่ความสามารถในการสะสมพลังงาน (Stored energy) หรือการคืนรูป (Strain recovery) ที่ลดลง [3] โดยค่าความดันตกคร่อมที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ส่งผลโดยตรงต่อความเค้นเฉือน (Shear stress) ที่เพิ่มมากขึ้นในเนื้อพอลิโพรพิลีน นอกจากนี้การที่พอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วมีสมบัติความเป็นออสติกที่ต่ำลง จึงส่งผลให้แนวโน้มการเสียรูปภายในเพิ่มมากขึ้น หากพิจารณาผลการทดสอบการอัดรีดร่วมของ PP/GFRPP เมื่อปรับเปลี่ยนมุมทางเข้าของหัวขึ้นรูปจาก 90° เป็น 60° ที่ความยาวของหัวขึ้นรูปเท่ากับ 50, 75 และ 100 mm ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่ายังคงเกิดการเสียรูปภายในขึ้น โดยการเพิ่มอัตราความเร็วในชั้นแกนกลางและการเพิ่มความยาวของหัวขึ้นรูป ส่งผลให้เกิดการเสียรูปที่เพิ่มมากขึ้น ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Jae และ Costas [4] นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ค่าความกว้างและความสูงของร่องเกลียว ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่า ความกว้างของร่องเกลียวมีแนวโน้มลดลงในขณะที่ความสูงของร่องเกลียวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเสียรูปภายในที่เพิ่มมากขึ้นตามความยาวหัวขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 5 ความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นในระหว่างการอัดรีดร่วมของ PP/PP และ PP/SGF-PP เมื่อใช้อัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลางต่างๆ กัน

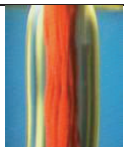
Type of die	Shear rate of core layer ($\dot{\gamma}_{core}$)				
	$\dot{\gamma}_{core} = 4.1 s^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 6.8 s^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 11.3 s^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 14.6 s^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 18.3 s^{-1}$
$\theta = 60^\circ$ $L = 50$ mm					
$\theta = 60^\circ$ $L = 75$ mm					
$\theta = 60^\circ$ $L = 100$ mm					

รูปที่ 6 พอลิเมอร์หลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมของ PP/SGF-PP เมื่อใช้หัวขึ้นรูปที่มีมุมทางเข้าเท่ากับ 60° ความยาว 50, 75, และ 100 mm ที่อัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลางต่างๆ กัน



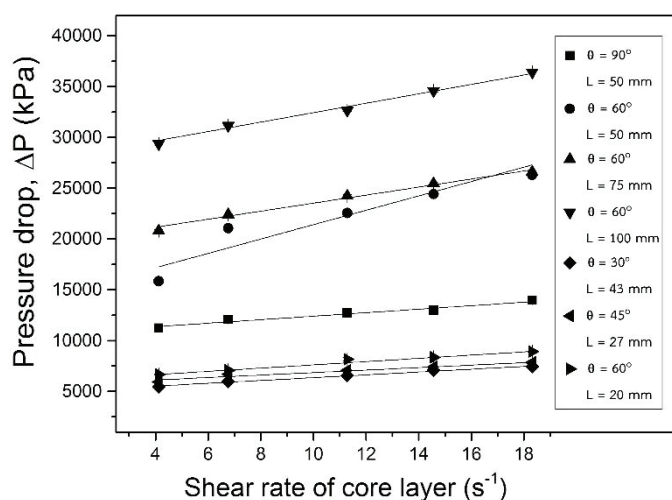
รูปที่ 7 ค่าความกว้าง (Period) และความสูง (Amplitude) ของร่องเกลียวที่วิเคราะห์ได้จากการเสียรูปภายในของ PP/GFRPP เมื่อใช้หัวขึ้นรูปที่มีมุมทางเข้าเท่ากับ 60° ความยาว 50, 75, และ 100 mm ที่อัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลางต่างๆ กัน

จากผลการทดลองที่ได้จากการอัดรีดร่วมของ PP/SGF-PP โดยใช้หัวขึ้นรูปที่มีมุมทางเข้าขนาด 30°, 45° และ 60° โดยหัวขึ้นรูปเหล่านี้มีลักษณะลาดเอียง (Tapered section) ตลอดความยาว ดังแสดงในรูปที่ 8 พบว่า ไม่เกิดปรากฏการณ์การเสีรูปภายในชั้นแกนกลางในทุกกรณีที่ใช้ โดยเกิดเป็นเพียงการบวมตัวเท่านั้น

Type of die	Shear rate of core layer ($\dot{\gamma}_{core}$)				
	$\dot{\gamma}_{core} = 4.1 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 6.8 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 11.3 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 14.6 \text{ s}^{-1}$	$\dot{\gamma}_{core} = 18.3 \text{ s}^{-1}$
$\theta = 30^\circ$ $l = 43 \text{ mm}$					
$\theta = 45^\circ$ $l = 27 \text{ mm}$					
$\theta = 60^\circ$ $l = 20 \text{ mm}$					

รูปที่ 8 พอลิเมอร์หลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมที่ได้จากการอัดรีดร่วมของ PP/SGF-PP เมื่อใช้หัวขึ้นรูปที่มีมุมทางเข้า 30°, 45° และ 60° ที่อัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลางต่างๆ กัน

รูปที่ 9 แสดงผลการตรวจวัดค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วมของ PP/SGF-PP เมื่อใช้หัวขึ้นรูปในลักษณะต่างๆ จากผลการตรวจวัดพบว่า ค่าความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นเมื่อใช้หัวขึ้นรูปที่มีมุมทางเข้า 30°, 45° และ 60° มีค่าต่ำที่สุด ส่งผลให้ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นกับพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวนี้น้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้หัวขึ้นรูปในลักษณะอื่นๆ ซึ่งจากงานวิจัยของ Chang [5] และ Arman et.al. [6] พบว่าการปรับเปลี่ยนมุมทางเข้า (Die entry angle) ของหัวขึ้นรูป ส่งผลโดยตรงต่อความดันตกคร่อมและความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์หลอมเหลว ดังนั้นการลดความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นในระบบการอัดรีดร่วมจึงอาจเป็นแนวทางหลักในการแก้ปัญหาปรากฏการณ์การเสีรูปภายในที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วมของ PP/SGF-PP



รูปที่ 9 ความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นในระหว่างการอัดรีดร่วมของ PP/SGF-PP เมื่อใช้หัวขึ้นรูปแบบต่างๆ ที่อัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลางต่างๆ กัน

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะของหัวขึ้นรูปแบบต่างๆ ที่มีต่อพฤติกรรมการเสียรูปภายในที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วมโดยใช้พอลิโพรพิลีนเป็นพอลิเมอร์ชั้นผิวและใช้พอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในปริมาณ 20 wt.% เป็นพอลิเมอร์ชั้นแกนกลาง (PP/SGF-PP) จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มอัตราครีดยืดเคืองในชั้นแกนกลางและการเพิ่มความยาวของหัวขึ้นรูป ส่งผลให้การเสียรูปภายในชั้นแกนกลางมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เมื่อใช้การใช้หัวขึ้นรูปที่มีลักษณะลาดเอียง (Tapered die) ตลอดความยาวหัวขึ้นรูปสามารถจัดปรากฏการณ์การเสียรูปภายในที่เกิดขึ้นได้ โดยความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงมาก

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (เมธีวิจัยอาวุโส สกว., เลขที่สัญญา RTA5580009) ทางคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรีและมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สำหรับการเอื้อเฟื้อเครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย และบริษัทเอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด (มหาชน) สำหรับความอนุเคราะห์วัสดุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Sidney, L. and James, F.C., (1989), *Plastics Extrusion Technology Handbook*, Industrial Press Inc., New York.
- [2] Apimonsiri, W. (2004), Influence of Glass Fiber Content on Rheological Properties of Polypropylene During Coextrusion Process, *Master of Engineering Thesis*, Materials Engineering, Department of Materials Engineering, pp. 55-66.
- [3] Von, R.S.L. (1978), *Polymer Rheology Handbook*, Applied Science Publishers Ltd., London.
- [4] Jae, J.B. and Costas, T. (1998), A Study of Extrudate Distortion in Controlled-Rheology Polypropylenes, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 38, No.2, PP. 274-281.
- [5] Chang, D.H. (1973), Influence of the Die Entry Angle on the Entrance Pressure Drop, Recoverable Elastic Energy, and Onset of Flow Instability in Polymer Melt Flow, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 17, PP. 1403-1413.
- [6] Arman, M.A.A., Mohammed, D.H.M. and Ahmed, I.A.S.A. (2014), Simulation of Pressure Drop for Tapered and Non-tapered Die for Polypropylene Using Ansys Polyflow, *Journal of Polymer and Textile Engineering*, Vol. 1, PP.22-29