สมบัติการบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน
Extrudate Swell Properties of High Density Polyethylene Melts in Annular Die

นเรศ อินต๊ะวงค์[1]* กนต์ธีร์ สุขตากจันทร์[1] สิทธิชัย อุดมสม[2] และ วัชรินทร์ สิทธิเจริญ[3]

[1,2]สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ 50300
[3]สาขาวิชาวิศวกรรมแม่พิมพ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จังหวัดเชียงใหม่ 50300

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาสมบัติการบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน ซึ่งถูกอัดรีดในเครื่องคาปิลารี่รีโอมิเตอร์ผ่านหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน 3 รูปแบบได้แก่ หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบธรรมดา หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่เข้า และหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่ออก โดยแต่ละชนิดของหัวขึ้นรูปกำหนดให้มีขนาดช่องการไหล 1 มิลลิเมตร 1.5 มิลลิเมตร และ 2 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าการบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวทั้งในแบบตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและแบบด้านความหนาที่ตรวจวัดได้ในระบบหัวขึ้นรูปทั้งสามแบบรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือน และมีค่าเพิ่มขึ้นตามการลดลงของขนาดช่องการไหลจาก 2 มิลลิเมตร เป็น 1.5 มิลลิเมตร และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับโดยเฉลี่ยร้อยละ 12% โดยสามารถอธิบายได้จากการตรวจวัดสมบัติการไหลในหัวขึ้นรูปทั้งสามแบบที่มีค่าความเค้นเฉือนเพิ่มตามการลดลงของขนาดช่องการไหลใกล้เคียงกันเฉลี่ยร้อยละ 10% นอกจากนี้ยังพบว่าการบวมตัวแบบด้านความหนามีค่าสูงกว่าการบวมตัวแบบตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแล้วร้อยละ 45% ในทุก ๆ ขนาดช่องการไหล ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการกระจายตัวของค่าความเค้นที่มีความหนาแน่นบริเวณผิวแกนแมน-ดเร็ลเมื่อมีการลดลงของขนาดช่องการไหลในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน

คำสำคัญ: พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง เครื่องคาปิลารี่รีโอมิเตอร์ หัวขึ้นรูปแบบวงแหวน การบวมตัวแบบตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง การบวมตัวแบบด้านความหนา

Abstract

This research presents a study about extrudate swell properties of high density polyethylene melts in annular die, extruded in a capillary rheometer through 3 types of annular die: normal annular die, convergent annular die and divergent annular die. Each type of die had a die gap of 1 mm, 1.5 mm and 2 mm, respectively. Results of the experiment showed that extrudate swell of high density polyethylene melts occurred in both diameter swell and thickness swell ratio. The swell measured in all 3 types of die tended to be higher with the increase of shear rate and the decrease of 2 mm, 1.5 mm to 1 mm die gap by an average of 12%. This occurrence could be explained from measurement of flow properties in all 3 types of die which had increasing shear stress due to the decrease of die gap by an average of 10%. Moreover, it was also found that the thickness swell ratio was higher than the diameter swell by an average of 45% in all sizes of die gap. This could be explained from the Stress distribution which was more dense at the mandrel's surface when the die gap of annular die decreased.

Keywords: High Density Polyethylene; Capillary Rheometer; Annular Die; Diameter Swell; Thickness Swell Ratio

** ผู้นิพนธ์ประสานงานทางไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ naret_i@yahoo.com โทร. 08 8252 7908*

1. บทนำ

กระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์แบบอัดรีด (Extrusion Process) ส่วนใหญ่มักประสบปัญหาสำคัญคือการควบคุมขนาดของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ กระบวนการผลิตแบบอัดรีดนั้นเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลว (Polymer Melt) ถูกอัดรีดพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูป (Die) แล้วจะมีลักษณะการไหลที่เป็นอิสระ (Free Flow) และชิ้นงานพอลิเมอร์มักมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเสมอด้วยสมบัติความเป็นวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic) ของพอลิเมอร์ ซึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของขนาดและรูปร่างของชิ้นงานใน 3 ลักษณะด้วยกันคือ การบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Extrudate Swell) การเกิดรอยฟันฉลามบนผิวของพอลิเมอร์ หลอมเหลว (Sharkskin) และการเสียรูปทรงอย่างไม่เป็นรูปแบบของพอลิเมอร์ หลอมเหลว (Melt Fracture หรือ Melt Distortion) (Koopmans R.J.,1992) หากพิจารณาเฉพาะในส่วนของพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน (Annular Die) นั้นเป็นที่ทราบกันดีว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนนั้นขนาดของแท่งพาริสัน (Parison) จะมีการขยายออกทั้งในด้านมิติของเส้นผ่านศูนย์กลางและมิติขนาดความหนาเสมอ (Garcia-Rejon A., DiRaddo R.W. and Dube F.A., 1995) ซึ่งนับว่าเป็นตัวแปรที่ผู้ควบคุมการผลิตให้ความสนใจและต้องคำนึงถึงเสมอเพื่อควบคุมคุณภาพและขนาดของชิ้นงานพอลิเมอร์ ปรากฏการณ์การขยายตัวออกของขนาดชิ้นงานทั้งสองมิตินี้เรียกว่าการบวมตัวตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter Swell Ratio) และการบวมตัวแบบความหนา (Thickness Swell Ratio) ตามลำดับ (Wagner A. H., and Kalyon D.M., 1996) โดยทั่วไปปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้สามารถอธิบายด้วยกลไกการเก็บสะสมพลังงานอิลาสติก (Elastic Energy) รูปแบบการไหล (Flow Pattern) ของพอลิเมอร์ หลอมเหลวที่เกิดขึ้นในห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (Barrel) สมบัติการไหล (Flow Properties) ของ พอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลไหลผ่านหัวขึ้นรูป และที่สำคัญคือลักษณะการออกแบบหัวขึ้นรูป (Die Design) (Sombatsompop N., and Intawong N-T., 1999)

มีหลักฐานรายงานผลการวิจัยที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันที่แสดงให้เห็นว่าการออกแบบหัวขึ้นรูปเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างเป็นรูปธรรมคือ (Gupta A. Hsu T.-C. and Harrison, I. R., 1999) ได้ทำการศึกษาผลของการหมุนส่วนปลายของแกนแมน-ดเร็ล (Rotating Tip of Mandrel) ในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน ผลการวิจัยพบว่าเทคนิคดังกล่าวมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ในการควบคุมขนาดของท่อทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกได้โดยการปรับความเร็วรอบการหมุนของส่วนปลายของแกน แมน-ดเร็ล (Mandrel) นอกเหนือจากวิธีการปรับขนาดของท่อด้วยการปรับตัวแปรความเร็วรอบการหมุนสกรูและอัตราการดึงท่อ นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการควบคุมปริมาณการบวมตัวของ พอลิเมอร์ในแนวทางของการปรับรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (Barrel) และในหัวขึ้นรูปด้วยการออกแบบและจัดสร้างหัวขึ้นกลมรูปแบบหมุน (Circular Rotating Die) ในเครื่องคาปิลาร์รีโอมิเตอร์ (Capillary Rheometer) ผล

การทดลองพบว่าปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบของการหมุนหัวขึ้นรูป ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้สามารถอธิบายได้จากการพัฒนาของรูปแบบการไหลของสารประกอบยางธรรมชาติ (NR Compound) กล่าวคือการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนหัวขึ้นรูปมีผลทำให้รูปแบบการไหลบริเวณทางเข้าของหัวขึ้นรูป (Die Entrances) มีความซับซ้อนมากขึ้น (Intawong N-T., Wongchaleo C. and Sombatsompop N., 2008) งานที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้มีการพัฒนาต่อยอดไปสู่กระบวนการผลิตจริง โดยผู้วิจัย (Intawong N-T., Darajang A., Udomsom, S., Yoochooshai T. and Kantala C., 2014) ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนเพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติการไหล การเปลี่ยนแปลงของค่าความดันตกคร่อม และพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) หลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ผลการทดลองพบว่าค่าความดันตกคร่อมที่ตรวจวัดได้ในระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนแกนแมน-ดเร็ล ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงกับสมบัติการไหลและสมบัติการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลางและการบวมตัวแบบความหนาอย่างมีนัยสำคัญ การอธิบายปรากฏการดังกล่าวได้ถูกเชื่อมโยงไปยังรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกและภายใน หัวขึ้นรูปแบบวงแหวน ด้วยผลการการศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของสารประกอบยางธรรมชาติที่เกิดขึ้นบริเวณทางเข้าของหัวขึ้นรูปวงแหวนต่อเนื่องลงไปในช่องการไหลภายในช่องการไหลของหัวขึ้นรูปวงแหวนของเครื่องคาปิลารี่รีโอมิเตอร์ที่มีผลต่อสมบัติการบวมตัวของสารประกอบยางธรรมชาติ โดยหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ถูกออกแบบให้มีสิ่งกีดขวางเทียม (Simulated Obstruction) บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปที่ทำให้เกิดรูปแบบการไหลของสารประกอบยางธรรมชาติเฉพาะรูปแบบการไหลที่มีความซับซ้อนบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (Vortex Flow at Die Entrance, VFE) เท่านั้น (Intawong N., Udomsom S., Sugtakchan K., and Sitticharoen W., 2015) ผลการทดลองพบว่าการบวมตัวแบบความหนามีค่าสูงกว่าการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 20 % ในทุก ๆ ขนาดช่องการไหล (Die Gap) ซึ่งสามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนจากหลักฐานการวิเคราะห์การพัฒนารูปแบบการไหลซับซ้อนบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปลงสู่ช่องการไหลของหัวขึ้นรูปวงแหวน (Intawon N-T., Wiratket A., and Meechue P., 2014) งานวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการออกแบบหัวขึ้นรูปที่ส่งผลต่อสมบัติการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวในกระบวนการอัดรีดอย่างชัดเจน โดยข้อมูลการวิจัยเป็นประโยชน์และแนวทางของการควบคุมขนาดของชิ้นงานที่ผลิตจากหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน เช่น กระบวนการผลิตแบบอัดรีดเป่า (Extrusion Blow Moulding) หรือ การผลิตท่อ (Pipe Extrusion Process) เป็นต้น (Intawong N-T., Darajang A., Udomsom, S., Yoochooshai T. and Kantala C., 2014)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของการออกแบบหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนที่มีผลต่อการบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวในเครื่องคาปิลารี่รีโอมิเตอร์ โดยหัวขึ้นรูปที่ได้

ออกแบบและใช้ในงานวิจัยนี้มี 3 รูปแบบ ได้แก่ หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบธรรมดา (Normal Annular Die) หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่เข้า (Convergent Annular Die) และหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่ออก (Divergent Annular Die) ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่าการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลางและการบวมตัวแบบความหนามีค่าต่างกันในแต่ละชนิดของหัวขึ้นรูปอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งความแตกต่างกันดังกล่าวถูกอธิบายด้วยองค์ความรู้จากการกระจายตัวของความเค้นภายในหัวขึ้นรูปและพฤติกรรมการไหลสมบัติการไหลที่ตรวจวัดได้

2. วิธีการทดลอง

2.1 วัสดุทดลอง

วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงเกรด HD5000S จาก PTT Chemical Thailand Bangkok มีค่า Melt Flow Index (MFI) เท่ากับ 0.8 และความหนาแน่นเท่ากับ 0.954 g/cm^3 (ASTM D1238-13 and ASTM D1505-10).

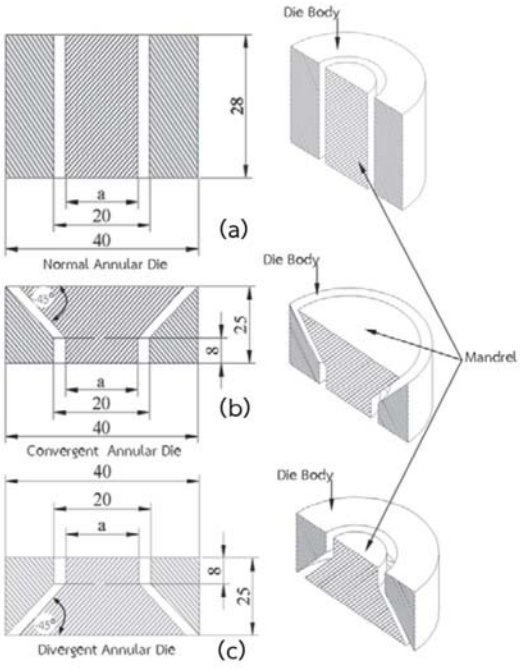
2.2. การออกแบบเครื่องมือวิจัย

รูปที่ 1 แสดงเครื่องคาปิลารี่รีโอมิเตอร์แบบอัตราเฉือนคงที่ (Constant Shear Rate) ที่ใช้ในการทดสอบสมบัติการไหลและสมบัติการบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวในงานวิจัยนี้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางห้องหลอมเหลวทรงกระบอกเท่ากับ 40 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร ส่วนล่างของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกติดตั้ง ความดัน (Pressure Transducer, Dynisco, Model PT460E-2CB-6, Franklin, MA) ซึ่งมีช่วงการวัดค่าความดัน (Pressure Ranges จาก 0-100 bar), มีค่าความแม่นยำในการวัดเท่ากับ $\pm$1% f.s.v. และค่า Repeatability เท่ากับ $\pm$0.2% f.s.v. การควบคุมอุณหภูมิห้องหลอมเหลวทรงกระบอกใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ DD6 Temperature Controller จากบริษัท Changchai Meter Bangkok, Thailand มีค่าความแม่นยำในการวัดเท่ากับ $\pm$1.5% f.s.v. และค่า Repeatability เท่ากับ $\pm$2.5% f.s.v. สามารถปรับตั้งอุณหภูมิการทดสอบได้เท่ากับ 0-300 ^{o}C โดยในงานวิจัยนี้กำหนดอุณหภูมิทดสอบที่ 220 ^{o}C

รูปที่ 1 เครื่องคาปิลารี่รีโอมิเตอร์แบบอัตราเฉือนคงที่

รูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบของหัวขึ้นรูปวงแหวนทั้งสามแบบ ได้แก่ แบบธรรมดา (a) หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่เข้า (b) และหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่ออก (c) ตามลำดับ แต่ละชนิดมีส่วนประกอบหลักคือ Die Body และ แมน-ดเร็ล

โดยตัว แมน-ดเร็ล ออกแบบให้มีขายึด (Spider Leg) 4 แท่งตามแนวรัศมี เพื่อใช้ประกอบเข้ากับ Die Body ด้วยเทคนิคการสวมพอดีที่พิกัดความเผื่อเท่ากับ H7/k6. เทคนิคดังกล่าวนี้ทำให้แมน-ดเร็ล ถูกยึดอย่างมั่นคงอยู่ภายใน Die Body อย่างร่วมศูนย์กัน (Alignment) ขนาดของแมน-ดเร็ล ในหัวขึ้นรูปแต่ละชนิดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (a) เท่ากับ 18, 16, และ 14 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้ได้ขนาดของช่องการไหลเท่ากับ 1, 2, และ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ สำหรับมุมเอียงของหัวขึ้นรูปทั้งลู่เข้าและลู่ออกมีค่าเท่ากับ -450 และ +450 ตามลำดับ โดยที่ความยาว Die Land Length ของหัวขึ้นรูปทั้งสามชนิดมีค่าเท่ากัน คือ 28 มิลลิเมตร



รูปที่ 2 หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบธรรมดา (a) หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่เข้า (b) และหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่ออก (c)

2.3 การศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว

การทดสอบสมบัติทางการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวได้จากหลักการวัดความดันตกคร่อม (Pressure Drop) บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปด้วยเครื่องมือวัดความดัน ค่าความดันที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบจะนำมาในการคำนวณหาค่าความเค้นเฉือน (Wall Shear Stress, τ_w) ณ ความเร็วในการอัดรีด (Average Velocity, $\bar{v}$) หนึ่ง ๆ โดยถูกคำนวณเป็นค่าอัตราการเฉือน (Wall Shear Rate, $\gamma^{\bullet}_w$) ต่าง ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าอัตราการเฉือนไว้ในช่วง 1^{s-1} ถึง 4^{s-1} โดยในทางปฏิบัติสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1 และสมการที่ 2 ตามลำดับ โดยที่ค่า n คือ Power-Law Index, P คือ ค่าความดันตกคร่อม, H = ขนาดช่องการไหล, และ L คือความยาวหัวขึ้นรูป (Intawong N-T., Wiratket A., and Meechue p., 2014)

$$\tau_w = \frac{H\Delta P_{ent}}{2L} \quad (1)$$

$$\gamma^{\bullet}_w = -(1/n + 2)2\bar{v}/H \quad (2)$$

เมื่อ

τ_w = ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผนังของ Die (N/m^2)

$\gamma^{\bullet}_w$ = อัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผนัง Die (s^{-1})

H = ขนาดช่องการไหล (m)

n = Power-Law Index

P = ความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น (N/m^2)

L = ความยาวหัวขึ้นรูป (m)

$\bar{v}$ = ความเร็วเฉลี่ยของการอัดรีด (Average Velocity, m/s)

2.4 การศึกษาสมบัติการบวมตัวของ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลว

การศึกษาอัตราการบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวโดยการวัดขนาดของแท่งพาริสัน ซึ่งมีการขยายตัวในสองมิติคือ ทางด้านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และขนาดความหนาภายหลังจากถูกอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน โดยนำค่าที่วัดได้มาคำนวณเพื่อหาอัตราการวัดการบวมตัวได้ 2 แบบคือ การบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง (B_D) และการบวมตัวแบบความหนา (B_T) ตามสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ (Intawong N-T., Wiratket A., and Meechue p., 2014)

$$B_D = \frac{D_p}{D_d} \quad (3)$$

$$B_T = \frac{h_p}{h_d} \quad (4)$$

เมื่อ

D_p = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแท่งพาริสัน (m)

D_d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (m)

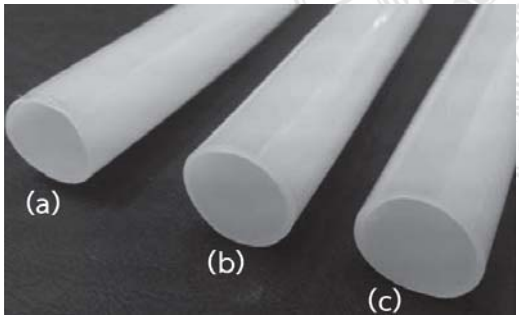
h_p = ขนาดความหนาของแท่งพาริสัน (m)

h_d = ขนาดช่องการไหล (m)

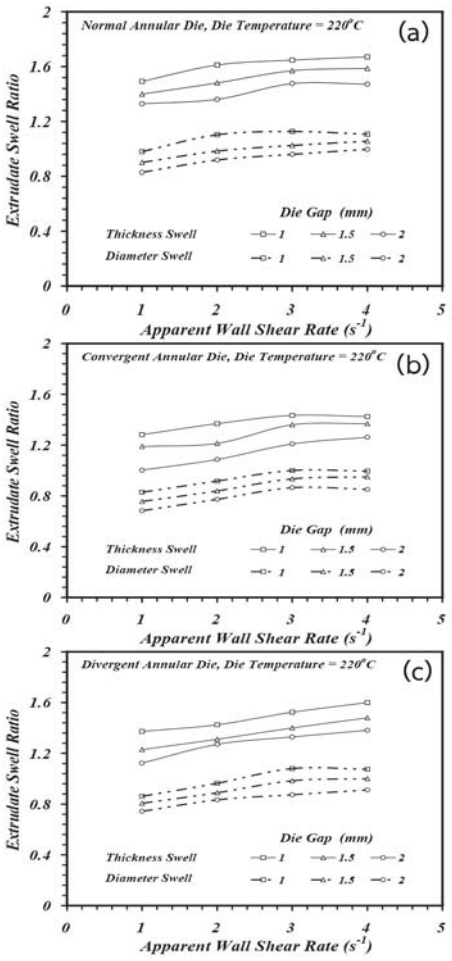
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

รูปที่ 3 แสดงชิ้นงานแท่งพาริสันของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ถูกอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบธรรมดา หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่เข้า และหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่ออก จากนั้นนำมาวัดปริมาณการบวมตัวในแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง และการบวมตัวแบบความหนาตามสมการที่ (3) และ(4) โดยพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เกิดขึ้นในระบบหัวขึ้นรูปทั้งสามระบบที่มีขนาดช่องการไหล 1, 1.5, และ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4 ตามลำดับผลการทดลองโดยรวมพบว่า การบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หลอมเหลวทั้งในแบบการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลางและการบวมตัวแบบความหนาที่ตรวจวัดได้ในแต่ละรูปแบบของ หัวขึ้นรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือนซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราเฉือนก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือน (Shearing Stress) ในขณะที่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวกำลังไหลในหัวขึ้นรูปก่อให้เกิดการสะสมพลังงานในรูปของพลังงานอิลาสติก และเมื่อไหลพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูปแล้วจะเกิดการบวมตัวเพิ่มขึ้นตามระดับของแรงกระทำที่ทำให้เกิดการไหลนั่นคือการเพิ่มอัตราเฉือนนั่นเอง ผลการทดลองที่ได้ยังแสดงให้เห็นว่าการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง และการบวมตัวแบบความหนาที่ตรวจวัดได้ในทั้งสามระบบหัวขึ้นรูปมีการเพิ่มขึ้นตามการลดลงของขนาดช่องการไหลอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณการบวมตัวทั้งสองรูปแบบจากขนาดช่องการไหล 2 มิลลิเมตร เป็น 1.5 มิลลิเมตร และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเฉลี่ยเท่ากับ 12% ทั้งนี้มีผลเนื่องมาจากการลดลงของช่องการไหล ก่อให้เกิดการสะสมพลังงานอิลาสติกที่มากจากการที่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวถูกบังคับให้ไหลผ่านช่องทางการไหลที่แคบลงไหลได้ยากขึ้นต้องใช้แรงกระทำมากขึ้น โดยที่สายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง จะถูกดึงยืดที่มากขึ้นเช่นกัน ในทิศทางการไหลและมีการสะสมพลังงานในรูปของพลังงานอิลาสติกที่มากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งส่งผลต่อการบวม

ตัวในทั้งสองลักษณะที่เพิ่มขึ้นในที่สุด โดยคำอธิบายดังกล่าวนี้สามารถยืนยันได้จากผลการทดลองสมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบต่าง ๆ ในรูปที่ 5 พบว่า สมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวที่ได้จากการทดสอบในหัวขึ้นรูปทั้งสามแบบยังคงแสดงสมบัติความเป็น Non-newtonian ในพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudoplastic โดยค่าความหนืดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือน (Intawong N-T., Wiratket A., and Meechue P., 2014) ในทุก ๆ สภาวะการทดสอบ ส่วนข้อมูลที่นำมาอธิบายคือประเด็นของค่าความเค้นเฉือนที่ตรวจวัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามการลดลงของช่องทางการไหลเช่นกัน ในทุก ๆ สภาวะการทดสอบของทุกรูปแบบของหัวขึ้นรูปวงแหวนแต่ละชนิดโดยเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 10 % ของการลดลงของขนาดช่องการไหลจาก 2 มิลลิเมตร เป็น 1.5 มิลลิเมตร และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นการยืนยันว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวได้รับแรงกระทำในรูปแบบของค่าความเค้นเฉือนจริงเมื่อมีการลดลงของช่องการไหล



รูปที่ 3 แท่งพาริสันของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบธรรมดา (a) หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่เข้า (b) และหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่ออก (c) ณ อุณหภูมิการทดสอบ 220 °C ที่อัตราเฉือน 1 s^{-1}, 2 s^{-1}, 3 s^{-1} และ 4 s^{-1}

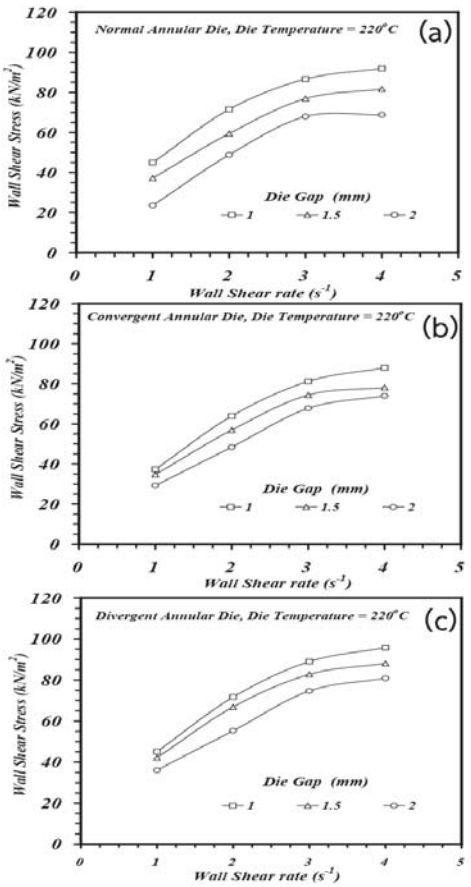


รูปที่ 4 สมบัติการบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบธรรมดา (a) หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่เข้า (b) และหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่ออก (c) ณ อุณหภูมิการทดสอบ 220 °C ที่อัตราเฉือนต่าง ๆ

ผลการทดลองพบว่าการบวมตัวแบบความหนามีค่าสูงกว่าการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง ซึ่งตรวจพบได้ทั้งในทั้งสามระบบหัวขึ้นรูป โดยพบว่าที่ค่าการบวมตัวแบบความหนาของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวที่อัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปทุกขนาดช่องการไหลอยู่ในช่วง 1-1.4 ในขณะที่การบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่า

ต่ำกว่าคืออยู่ในช่วง 0.7-0.9 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการบวมตัวแบบความหนามีค่าสูงกว่าการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 45 % ในทุก ๆ ขนาดช่องการไหล ทั้งนี้สามารถอธิบายได้คือ ระหว่างที่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวไหลจากภายในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกลงสู่ช่องการไหลของหัวขึ้นรูปวงแหวนนั้น สายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวบริเวณชั้นการไหลด้านใน (Inner Layer) ที่สัมผัสกับผิวแกนแมน-ดเร็ล มีแนวโน้มที่จะถูกดึงยืดมากกว่าเมื่อไหลไปตามพื้นผิวของแมน-ดเร็ล ดังนั้นการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแมน-ดเร็ล เพื่อให้ขนาดช่องการไหลลดลงนั้นเสมือนเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสที่ก่อให้เกิดความเค้นเฉือนจากการดึงยืดของสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวมากขึ้นตามไปด้วย และมีผลต่อเนื่องให้ปริมาณการสะสมพลังงานในรูปแบบของอิลาสติกในบริเวณชั้นการไหลด้านในที่สัมผัสกับผิวแกนแมน-ดเร็ลมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นเช่นกัน และภายหลังไหลพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนจึงพบว่ามีการบวมตัวในส่วนของความหนาเพิ่มขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง คำอธิบายดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Y, Mu, Y. Zhao, G, Xianghong, W. and Zhang, C., 2010) ที่ได้ศึกษาการกระจายตัวของความเค้น (Stress Distributions) ระหว่างที่พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) หลอมเหลวไหลในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ FES/BPNN/NSGA-II ผลการวิจัยพบว่าการกระจายตัวของค่าความเค้นขณะไหลนั้นเกิดขึ้นอย่างหนาแน่นที่สุดบริเวณผิวโดยรอบแกนแมน-ดเร็ล ดังนั้นผลการวิจัยที่ได้ยกมานี้มีความสอดคล้องและสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการอธิบายปรากฏการณ์การบวมตัวแบบความหนาที่พบในงานวิจัยนี้อย่างตรงประเด็น

ในกรณีของการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลางที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่มากนักตามการลดลงของขนาดช่องการไหลเมื่อเปรียบเทียบกับการบวมตัวแบบความหนาที่มีค่าระดับการเพิ่มขึ้นสูงกว่าในทุกสภาวะการทดสอบนั้นอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากข้อสันนิษฐานที่ว่า พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวที่จะก่อตัวเป็นส่วนผิวนอกของแท่งพาริสันคือส่วนของชั้นการไหลด้านนอก (Outside Layer) ที่ไหลบริเวณผนังของหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนน่าจะมีการกระจายตัวของค่าความเค้นต่ำและมีการสะสมพลังงานในรูปแบบอิลาสติกที่ต่ำกว่าด้วยเช่นกัน ด้วยสาเหตุที่ว่าสายโซ่โมเลกุลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงหลอมเหลวบริเวณนี้ถูกดึงยืดในปริมาณเท่าเดิมเสมอเพราะพื้นผิวสัมผัสบริเวณผนังโดยรอบของหัวขึ้นรูปวงแหวนคงที่ด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ในทุกสภาวะการทดสอบ (Intawong, N., Udomsom S., Sugtakchan K., and Sitticharoen W., 2015)



รูปที่ 5 สมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบธรรมดา (a) หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่เข้า (b) และหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบลู่ออก (c) ณ อุณหภูมิการทดสอบ 220 °C ที่อัตราเฉือนต่าง ๆ

4. สรุป

4.1 การบวมตัวของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หลอมเหลวทั้งการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง และ การบวมตัวแบบความหนา ที่ตรวจวัดได้ในระบบหัวขึ้นรูปทั้งสามแบบรูปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือน

4.2 การบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง และการบวมตัวแบบความหนาที่ตรวจวัดได้ในทั้งสามระบบหัวขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้นตามการลดลงของช่องการไหลจาก 2 มิลลิเมตร เป็น 1.5 มิลลิเมตร และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับโดยเฉลี่ยเท่ากับ 12%

4.3 สมบัติการไหลของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง หลอมเหลวเป็นแบบ Non-newtonian ในพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudoplastic และค่าความเค้นเฉือนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการลดลงของช่องการไหลจากขนาด 2 มิลลิเมตร เป็น 1.5 มิลลิเมตร และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับโดยเฉลี่ยเท่ากับ 10%

4.4 การบวมตัวแบบความหนา มีค่าสูงกว่าการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยเฉลี่ยแล้วเท่ากับ 45% ในทุก ๆ ขนาดช่องการไหล โดยสามารถอธิบายได้จากการกระจายตัวของค่าความเค้นที่มีความหนาแน่นบริเวณผิวแกนแมน-ดเร็ลเมื่อมีการลดลงของขนาดช่องการไหลในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ โครงการยกระดับปริญญานิพนธ์เป็นงานวิจัยตีพิมพ์ งานสร้างสรรค์ และงานบริการวิชาการสู่ชุมชน (HRG: Hands-on Researcher Group) ฝ่ายวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา งบประมาณประจำปี 2557 ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

ASTM D1238-13, (2013). Standard Test Method for Melt Flow Rates of

Thermoplastics by Extrusion Plastometer, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D1505-10, (2010). Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Garcia-Rejon, A. DiRaddo, R.W. and Dube, F.A. (1995). Annual swell in multilayer flow of virgin and recycled polymers, SPEANTEC, 913-917.

Gupta, A. Hsu, T.-C. and Harrison, I. R. (1999). Influence of a 'rotating tip' on the properties of tubing made using a cross-head tubing die, International Polymer Processing 14, 51-56.

Intawong, N, Udomsom, S. Sugtakchan, K. and Sitticharoen, W. (2015). Influence of flow pattern development at die entrance and inside annular die on extrudate swell behavior of NR compound, Polímeros 25, 508-513.

Intawong, N-T. Darajang, A. Udomsom, S. Yoochooshai, T. and Kantala, C. (2014). An annular rotating-die technique in extrusion process: effect of mandrel rotating speed on entrance pressure drop and flow properties of molten HDPE, International Journal of Plastics 18, 241-251.

Intawong, N-T. Wongchaleo, C. and Sombatsompop N. (2008). Rheological properties, flow visualization and extrudate swelling of NR compound by rotating-die rheometer, Polymer Engineering and Science 48, 1191-1198.

Intawong, N-T. Wiratket, A. and Meechue, P. (2014). Flow visualization & extrudate swell behavior of natural rubber compound in annular die capillary rheometer, Polímeros 24, 434-440.

Koopmans, R.J. (1992). Extrudate swell of high density polyethylene. part III: extrusion blow molding die geometry effects, Polymer Engineering and Science 32, 1755-1764.

Mu, Y. Zhao, G. Xianghong, W. and Zhang, C. (2010). An optimization strategy for die design in the low-density polyethylene annular extrusion process based on FES/BPNN/NSGA-II. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 50, 517–532.

Sombatsompop, N. and Intawong, N-T. (1999). A novel capillary rheometer for measurement of flow properties of polymer melts, Materials Research Innovations 3, 150-155.

Wagner, A. H. and Kalyon, D.M. (1996). Parison formation and inflation behavior of polyamide-6 during extrusion blow molding, Polymer Engineering and Science 36, 1897-1906.