รหัสงานวิจัย: BRG4780023

ชื่องานวิจัย: ความเค้นเฉือน ปริมาณบวมตัว และรูปแบบความเร็วเชิงรัศมีของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวโดยใช้หัวขึ้นรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ผู้วิจัยหลัก: ศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

ที่อยู่อิเล็กทรอนิกส์: narongrit.som@kmutt.ac.th

ระยะเวลาดำเนินงาน: ตั้งแต่ 31 สิงหาคม 2547 ถึง 30 สิงหาคม 2550

วัตถุประสงค์ :

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาหัวขึ้นรูปที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคการอัดรีดร่วมแบบขนานสำหรับการวัดการบวมตัวเชิงรัศมี ค่าความเค้นเฉือน และความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว ค่าความเค้นเฉือน และความเร็วในการไหลเชิงรัศมีของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในหัวขึ้นรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ในสภาวะต่างๆ เช่น ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก อุณหภูมิหัวขึ้นรูป อุณหภูมิกระบอกฉีด อัตราเค้นเฉือน และความเร็วรอบสกรู
3. เพื่อสร้างและเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการบวมตัวเชิงรัศมี ค่าความเค้นเฉือน รูปแบบการไหล ของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว

วิธีการทดลอง ผลการทดลองและอภิปลายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการตรวจวัดปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมีและรูปแบบความเร็วในการไหลเชิงรัศมีของPSหลอมเหลวที่ไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว โดยใช้หัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กซึ่งได้ทำการออกแบบมาเฉพาะเพื่อใช่ร่วมกับระบบการอัดรีดร่วมขนาน (PCT) ระบบการอัดรีดร่วมดังกล่าวนี้สามารถตรวจวัดปริมาณการบวมตัวและรูปแบบความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวตลอดพื้นที่หน้าตัดของหัวขึ้นรูปในเวลาเดียวกัน สภาวะการทดสอบที่สนใจประกอบด้วย ความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็ก โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ อุณหภูมิของหัวขึ้นรูป อัตราเฉือนและความเร็วรอบในการหมุนสกรู ผลการวิจัยที่ได้ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอในรูปของการรวบรวมผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ ดังนี้

การวิจัยเริ่มจากการออกแบบและจัดสร้างหัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าให้ใช่ร่วมกับระบบการอัดรีดร่วมขนานเพื่อใช้ศึกษาปริมาณการบวมตัวแบบโดยรวมและแบบรัศมีของPS หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว [***Polymers for Advanced Technologies***, 16 (7): 505-514 (2005)]. ที่มีผลกระทบมาจากความเข้มของสนามแม่เหล็ก อัตราเฉือน(ความเร็วรอบ

ในการหมุนสกรู) และอุณหภูมิของหัวขึ้นรูป ผลการทดลองพบว่าในกรณีของหัวขึ้นรูปแบบธรรมดาปริมาณการบวมแบบโดยรวมเฉลี่ยของ PS หลอมเหลวอยู่ในช่วง 1.25 ถึง 1.55 ปริมาณการบวมตัวเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเฉือนถึงระดับ $8.5s^{-1}$ จากนั้นมีค่าลดลงที่อัตราเฉือน $17.1s^{-1}$ นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณการบวมตัวลดลงตามการเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของหัวขึ้นรูป

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการบวมตัวที่เกิดขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบความเร็วเชิงรัศมีที่ตรวจวัดได้ในเวลาเดียวกันขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลอยู่ในหัวขึ้นรูป โดยพบว่ามีปริมาณการบวมตัวมีค่าลดลงตามตำแหน่งรัศมีที่เพิ่มขึ้นในหัวขึ้นรูป และจะสังเกตได้ว่ามีการลดลงของชั้นการไหลบริเวณใกล้กับผนังของหัวขึ้นรูป นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของหัวขึ้นรูปไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมีแต่อย่างใด สำหรับผลการทดลองที่ได้จากการใช้หัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กพบว่า ปริมาณการบวมแบบโดยรวมเฉลี่ยของPS หลอมเหลวเพิ่มขึ้นตามความเข้มของสนามแม่เหล็กถึงจุดสูงสุด จากนั้นมีค่าลดลงถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเข็มของสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นอีกก็ตาม ปริมาณการบวมตัวสูงสุดในสภาวะความเข้มของสนามแม่เหล็กถูกทำให้เปลี่ยนแปลงด้วยอัตราเฉือน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากผลรวมของพลังงานในรูปอิลาสติกและพลังงานแม่เหล็กระหว่างเกิดการไหล พลังงานแม่เหล็กมีผลกระทบต่อปริมาณการบวมอย่างชัดเจนที่อัตรเฉือนต่ำ และที่อุณหภูมิของหัวขึ้นรูปต่ำ หากพิจารณาในส่วนของปริมาณการบวมตัวที่ตำแหน่งรัศมีต่าง ๆ ของหัวขึ้นรูป พบว่าที่ตำแหน่งส่วนกลางของหัวขึ้นรูปมีปริมาณการบวมตัวมากที่สุด ในช่วง 2.4 ถึง 3.3 และไม่มีการการลดลงของชั้นการไหลบริเวณใกล้กับผนังของหัวขึ้นรูป

ในงานวิจัยเกี่ยวกับ พฤติกรรมการบวมตัวของ PS หลอมเหลวขณะทำการอัดรีด ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของวัสดุที่ใช้ทำหัวขึ้นรูปที่ผลต่อปริมาณการบวมตัว[***Polymer Journal***, 37 (7): 541-544 (2005)] ผลการทดลองพบว่าปริมาณการบวมตัวของ PS หลอมเหลวมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีระดับของการเปลี่ยนแปลงมากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากการทดลองเล็กน้อย โดยปริมาณการบวมตัวมีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีของหัวขึ้นรูปที่ทำจากวัสดุเหล็กแต่ลดลงเมื่อใช้หัวขึ้นรูปที่ทำจากสเตรนเลส ปัจจุบันยังไม่มีเหตุผลที่ชัดเจนในการอธิบายถึงผลการทดลองที่ได้ คำอธิบายที่มีความเป็นไปได้ของปรากฏการณ์ดังกล่าวได้แก่ ความเค้นเฉือนตั้งฉากในแนวแกน การเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กของPS ที่เกิดการเสียรูปของสายโซ่โมเลกุลไปในทิศทางเดียวกันขณะไหลในหัวขึ้นรูป การศึกษาในลำดับต่อไปอยู่ในแนวทางที่สร้างความชัดเจนในส่วนผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว จากการวัดสมบัติทางวิสโคอิลาสติกภายใต้สนามแม่เหล็ก โดยการเปรียบเทียบปริมาณการบวมตัวและการแจกแจงความเร็วความเร็วในการไหลที่ตรวจวัดได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวและเครื่องคาปิลารี่รีโอมิเตอร์ [***Polymer Testing***, 24 (8): 948-952 (2006)] ผล

การทดลองพบว่าปริมาณการบวมตัวของ PS หลอมเหลวที่ตรวจวัดได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวมากกว่าที่พบในเครื่องคาปิลารี่รีโอมิเตอร์ ทั้งนี้มีผลเนื่องมาจากสมบัติการไหลของทั้งสองเครื่องมีความแตกต่างกัน ปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมีที่ตรวจวัดได้จากทั้งสองเครื่องพบว่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้สามารถอธิบายด้วยการพัฒนารูปแบบของการแจกแจงความเร็วในการไหล นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณการบวมของ PS หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลกระทบมาจากขนาดของเครื่องมือทดสอบที่ใช้

ช่วงปลายสุดของโครงการวิจัยฯ ได้ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกหลอมเหลวที่มีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ในหัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างทำการอัดรีด [***Polymer Engineering and Science*** 47 (3): 270-280 (2007)] โดยสภาวะการทดลองที่สนใจที่มีผลต่อปริมาณการบวมตัวและสมบัติการไหล ได้แก่ ความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็ก อุณหภูมิของหัวขึ้นรูปและอัตราเฉือน ผลการทดลองพบว่าปริมาณการบวมตัวของ PS, LLDPE และ PVC มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราเฉือน แต่ในกรณีของ ABS และ PC ให้ผลในทางตรงกันข้าม การเพิ่มอุณหภูมิของหัวขึ้นรูปทำให้ปริมาณการบวมตัวของ PS, ABS, PC, และ LLDPE มีค่าลดลง แต่สำหรับ PVC มีปริมาณการบวมตัวเพิ่มขึ้น ผลการวิจัย พบว่า สนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อเทอร์โมพลาสติกหลอมเหลวที่มีวงเบนซีนในตำแหน่ง side-chain และมีโครงสร้างโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างมีทิศทาง กล่าวคือปริมาณการบวมเพิ่มขึ้นตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้สนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ตามลำดับจากมากไปน้อย คือ PS $\rightarrow$ ABS $\rightarrow$ PC โดยปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่สนามแม่เหล็กวิ่งไปในแนวเดียวกับทิศทางการไหลมีค่าสูงกว่าปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่สนามแม่เหล็กวิ่งไปในแนวตรงข้าม โดยเฉพาะที่ความเข้มของสนามแม่เหล็กระดับสูง

บทสรุปและข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

<u>บทสรุป</u>

งานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบและจัดสร้างหัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าให้ใช่ร่วมกับระบบการอัดรีดร่วมเพื่อใช้ศึกษาปริมาณการบวมตัวแบบโดยรวมและแบบรัศมีของPS หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ผลการวิจัยพบว่า เมื่อใช้หัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็ก ปริมาณการบวมแบบโดยรวมเฉลี่ยของ PS หลอมเหลวเพิ่มขึ้นตามความเข้มของสนามแม่เหล็กถึงจุดสูงสุดจากนั้นมีค่าลดลงถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเข็มของสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นอีกก็ตาม ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากผลรวมของพลังงานในรูปอิลาสติกและพลังงานแม่เหล็กระหว่างเกิดการไหล พลังงานแม่เหล็กมีผลกระทบต่อปริมาณการบวมอย่างชัดเจนที่อัตรเฉือนต่ำ และที่อุณหภูมิของหัวขึ้นรูปต่ำ ปริมาณการบวมตัวมีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีของหัวขึ้นรูปที่ทำจากวัสดุเหล็กแต่ลดลงเมื่อใช้หัวขึ้นรูป

ที่ทำจากสเตรนเลส ปริมาณการบวมโดยรวมตัวของ PS หลอมเหลวที่ตรวจวัดได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวมากกว่าที่พบในเครื่องคาปิลารี่รีโอมิเตอร์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก ปริมาณการบวมของ PS หลอมเหลวมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลกระทบมาจากขนาดของเครื่องมือทดสอบที่ใช้ การเพิ่มของอัตราเฉือนทำให้ปริมาณการบวมตัวของ PS, LLDPE และ PVC เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของ ABS และ PC ให้ผลในทางกลับกัน การเพิ่มอุณหภูมิของหัวขึ้นรูปทำให้ปริมาณการบวมตัวของ PS, ABS, PC, และ LLDPE มีค่าลดลงส่วน PVC มีปริมาณเพิ่มขึ้น สนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อเทอร์โมพลาสติกหลอมเหลวที่มีกลุ่มวงเบนซีนในตำแหน่ง side-chain และมีโครงสร้างโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างมีทิศทาง นอกจากนี้สนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ตามลำดับจากมากไปน้อยคือ PS → ABS → PC โดยปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่สนามแม่เหล็กวิ่งไปในแนวเดียวกับทิศทางการไหลมีค่าสูงกว่าปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่สนามแม่เหล็กวิ่งไปในแนวตรงข้าม

<u>ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต</u>

จากผลงานที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า เทคนิคการอัดรีดร่วมขนานและระบบหัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนแล้วว่า เป็นเทคนิคที่สามารถใช้ในการวัดปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมี และความเร็วเชิงรัศมีของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี เช่น กระบวนการผลิตแบบอัดรีดร่วมเป็นต้น ดังนั้น งานวิจัยในอนาคต จะเป็นการตรวจวัดปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมี และรูปบบความเร็วเชิงรัศมีในหัวขึ้นรูปของกระบวนการผลิตแบบอัดรีดร่วมภายใต้สภาวะความเข้มของสนามแม่เหล็กต่าง ๆ ซึ่งในระบบการอัดรีดร่วมนี้ได้แบ่งเป็นในสองส่วนที่ต้องทำการศึกษาคือ การอัดรีดร่วมแบบชั้นแกนพอลิเมอร์ชั้นเดียว และแกนหลายชั้น โดยได้ทำการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือเฉพาะเพื่อใช้ในการทดลอง โดยสามารถอัดรีดร่วมพอลิเมอร์หลอมเหลวได้ทั้งแบบแกนชันเดียว และแกนหลายชั้นภายใต้สภาวะความสนามแม่เหล็ก รวมทั้งสามารถวัดปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมี และความเร็วเชิงรัศมีของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้ในเวลาเดียวกัน ในส่วนของพอลิเมอร์ในระบบการอัดรีดร่วม ได้แก่ PS ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นพอลิเมอร์ที่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก โดยเลือกใช้ PS เป็นพอลิเมอร์ชั้นผิวนอกสุดในระบบการอัดรีดร่วมทั้งหมด ตัวอย่าง เช่น ชั้นผิว/ชั้นแกนกลาง ได้แก่ PS/LLDPE, PS/PVC, PS/ABS และ PS/PC สำหรับตัวแปรที่สนใจ อันจะมีผลกระทบต่อปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมี และความเร็วเชิงรัศมีของพอลิเมอร์หลอมเหลว ได้แก่ อัตราเฉือน อุณหภูมิของหัวขึ้นรูป ความเข้มของสนามแม่เหล็ก ชนิดของพอลิเมอร์ อัตราส่วนความหนืด ขนาดรูปร่างของการอัดรีดร่วม และอัตราส่วนของขนาดชั้นผิวและชั้นแกนกลางพอลิเมอร์ เป็นต้น

Abstract

190653

Project Code: BRG4780023

Project Title: Normal Stress, Radial Extrudate Swell and Velocity Profiles of Flowing Polymer Melts in Single-Screw Extruder with Electro-magnetic Dies

Main Researcher: Professor Dr Narongrit Sombatsompop

Email address: narongrit.som@kmutt.ac.th

Project Period: 31st August 2004 - 30th August 2007

Objectives:

1. Designing and developing an electro-magnetized die to be used in the parallel co-extrusion technique for simultaneous measurements of normal stress, radial extrudate swell and velocity profiles of polymer melts flowing in a single screw extruder
2. Investigating effects of test conditions such as magnetic flux density and direction, molecular structure of polymers, die temperature, and shear rate (rotating speed) on extrudate swell and velocity profiles of polymer melts flowing in the single screw extruder.
3. Relating the normal stresses, radial extrudate swell with the velocity profiles of polymer melts in the single screw extrusion process

Methodology, Results and Discussion

This research project determined the radial extrudate swell and velocity profiles of polystyrene melt flowing in a single screw extruder using a specially designed electro-magnetized die together with "Parallel Co-Extrusion Technique (PCT)". The PCT technique allowed simultaneous measurements of extrudate swell and melt velocity across the die diameter. The test variables included magnetic flux density and direction, molecular structure of polymers, die temperature, shear rate and rotating speed extrudate were considered. The presentation of research outputs from this project is in the form of combination of all papers published in various international journals.

The work was started by designing and constructing an electro-magnetized capillary die to be used with the PCT technique in order to study the changes in the overall and radial extrudate swell ratio of PS melt flowing in a single screw extruder [***Polymers for Advanced Technologies***, 16 (7): 505-514 (2005)]. The effects of magnetic flux density, wall shear rate (screw rotating speed) and die temperature were studied. The results suggested that, in

the case of non-magnetic die the average overall swell ratio of the melt ranged from 1.25 to 1.55. The swelling ratio increased with increasing wall shear rate up to $8.5s^{-1}$ and then decreased at $17.1s^{-1}$. Increasing die temperature caused a reduction of extrudate swell ratio. The changes in extrudate swell ratio can be explained using the simultaneously measured velocity profiles during the flow in the die, and the swell ratio decreased with increasing radial position. Melt contraction of the melt layer near the die wall was observed. The die temperature was found to have no effect on the change of the radial extrudate swell profiles. When an electro-magnetized die was used, the average overall swell ratio was found to increase with increasing magnetic flux density to a maximum value and then decreased at higher flux densities. The magnetic flux density of the maximum swell was changed by the wall shear rate. It was associated with a balance of elastic and magnetic energies during the flow. The magnetic energy was thought to have a pronounced effect on the swell ratio at low shear rate and low die temperature. Considering the radial position, the highest swell ratio occurred at the duct center, in the range of 2.4-3.3. There was no extrudate contraction of the melt layer near the die wall.

The work on swelling behaviour of PS melt during extrusion was extended to investigate the effect of die materials on such behaviour [***Polymer Journal***, 37 (7): 541-544 (2005)]. It was found that the extrudate swell ratio of PS melt changed upon exposure to the magnetic field, the magnitude of the change being slightly larger than the scattering of the data. The extrudate swell increased for a steel die and decreased for a stainless die. The reason was not clear at the present time. An interpretation of the observed phenomena was made in terms of the normal stresses and anisotropic magnetic energy stored by the deformation of the chains under flow. Further study is under way to clarify the effect of the magnetic field on the flow of the polymer melt using viscoelastic measurement under the magnetic field. By comparing the extrusion swell ratios and velocity profiles obtained from single screw extruder with capillary rheometer [***Polymer Testing***, 24 (8): 948-952 (2006)], it was found that the overall swell ratio of the PS melt measured in the extruder was greater than that in the rheometer, this being caused by the differences in the flow properties of the melt in these two machines. The discrepancies in the radial extrudate swell profiles from the rheometer and extruder could be explained by the velocity profile development. When an electro-magnetized die was used, the swelling ratio of the melt changed with magnetic flux density and was affected by the size of the machinery used.

Finally, the extrudate swell behaviour of thermoplastic melts, with different molecular structures, flowing into an electro-magnetized die during extrusion was studied [***Polymer Engineering and Science*** 47 (3): 270-280 (2007)]. The effects of the magnetic flux direction and density, die temperature and wall shear rate on the extrudate swell and flow properties were of interest. The experimental results suggested that an increasing wall shear rate increased the swelling ratio for the PS, LLDPE and PVC melts, but the opposite effect was observed for the ABS and PC melts. The extrudate swell ratio for the PS, ABS, PC, and LLDPE melts decreased with increasing die temperature, the effect being reversed for the PVC melt. Thermoplastic melts having high benzene content in the side-chain and exhibiting anisotropic character were apparently affected by the magnetic field, the extrudate swell ratio increasing with magnetic flux density. The effect of the magnetic field on the extrudate swell ratio decreased in the order of PS $\longrightarrow$ ABS $\longrightarrow$ PC. The extrudate swell ratio for the co-parallel magnetic field system was slightly higher than that for the counter-parallel magnetic field system at a high magnetic flux density.

Conclusion and suggestions to further work

Conclusion

This project has designed and developed an electro-magnetized die to be used in the parallel co-extrusion technique for simultaneous measurements of radial extrudate swell and velocity profiles of polymer melts flowing in a single screw extruder. The main findings of this work suggested that when an electro-magnetized die was used, the average overall swell ratio increased with increasing magnetic flux density to a maximum value and then decreased at higher flux densities. It was associated with a balance of normal stresses and magnetic energies during the flow. The magnetic energy was thought to have a pronounced effect on the swell ratio at low shear rate and low die temperature. The extrudate swell increased for a steel die and decreased for a stainless die. The overall swell ratio of the PS melt measured in the extruder was greater than that in the extrusion rheometer. Under magnetic field, the swelling ratio of the melt changed with magnetic flux density and was affected by the size of the machinery used. Increasing wall shear rate increased the swelling ratio for the PS, LLDPE and PVC melts, but the opposite effect was observed for the ABS and PC melts. The extrudate swell ratio for the PS, ABS, PC, and LLDPE melts decreased with increasing die temperature, the effect being reversed for the PVC melt. Thermoplastic melts having high benzene content in the side-chain and exhibiting anisotropic character were apparently affected by the magnetic field. The effect of the magnetic field on the extrudate swell ratio

decreased in the order of PS → ABS → PC. The extrudate swell ratio for the co-parallel magnetic field system was slightly higher than that for the counter-parallel magnetic field system at a high magnetic flux density.

Suggestions to further work

In the next step, as the Parallel Co-extrusion Technique (PCT) with electro-magnetized die system has now been well-established it should be used for measurements of radial extrudate swell and velocity profiles of flowing polymer melts in more complex polymer processing techniques such as co-extrusion processes. In the future work, the radial extrudate swell and velocity profiles of co-extruded melts under different magnetic flux densities to the die will be investigated. Two coextrusion geometries are to be studied, one being single core co-extrusion and the other being multi-core co-extrusion. An experimental test rig will be specially designed and constructed to allow both single and multi-layer co-extrudates under magnetic field to be produced and to allow both radial extrudate swell and velocity profiles to be simultaneously measured. In terms of polymer systems, since PS melt was found in our previous works to be most affected by the magnetic field, all co-extruded polymer systems are based by the PS as skin layer. Examples of skin/core extrudates to be produced are PS/LLDPE, PS/PVC, PS/ABS and PS/PC. The effects of wall shear rate, die temperature, magnetic flux density, polymer type, viscosity ratio, co-extrusion geometry, and core-to-skin size ratio on the radial extrudate swell and velocity profiles are of our main interest here.