



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ท้องรู้ใหม่ สกว. BRG4780023
โครงการ ความเค้นเฉือน ปริมาณบวมตัว และรูปแบบความเร็วเชิง
รัศมีของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียว
หนอนเดี่ยวโดยใช้หัวขึ้นรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

โดย

ศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพและคณะ

กรกฎาคม 2550



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย **ทุนองค์ความรู้ใหม่ฯ สกว. BRG4780023**
โครงการ **ความเค้นเฉือน ปริมาณบวมตัว และรูปแบบความเร็วเชิง
รัศมีของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียว
หนอนเดี่ยวโดยใช้หัวขึ้นรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า**

โดย
ศาสตราจารย์ ดร. **ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพและคณะ**

กรกฎาคม 2550

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย ท้องรู้ใหม่ฯ สกว. BRG4780023
ความเค้นเฉือน ปริมาณบวมตัว และรูปแบบความเร็วเชิงรัศมีของ
พอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอน
เดี่ยวโดยใช้หัวขึ้นรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

คณะผู้วิจัย	สังกัด
1. ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ	ม.พระจอมเกล้าธนบุรี
2. นาย นเรศ อินตะวงษ์	ม.พระจอมเกล้าธนบุรี
3. นาย ศรันย์ ชุมไชโย	ม.พระจอมเกล้าธนบุรี
4. นาย ภูตินันท์ เอื้อวงศ์สุวรรณ	ม.พระจอมเกล้าธนบุรี
5. นาย นิทัศน์ เหลืองวิรุจน์กุล	ม.พระจอมเกล้าธนบุรี
6. นางสาวกัลติมา เขียวชาญชัยกุล	ม.พระจอมเกล้าธนบุรี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

หัวหน้าโครงการฯ ขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เป็นอย่างยิ่งในการให้การสนับสนุนทุนวิจัยในการดำเนินการวิจัย

หัวหน้าโครงการฯ ขอขอบคุณ นายนเรศ อินต๊ะวงษ์ นักศึกษาปริญญาเอก นายศรันย์ ชุมไชโย นายภูตินันท์ เอื้อวงศ์สุวรรณ และนายนิทัศน์ เหลืองวิรัตน์กุล นักศึกษาปริญญาโท และนางสาวกัลติมา เซวี่ชาญชัยกุล นักวิจัยเต็มเวลาประจำโครงการ สำหรับความช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณปริยานุช รัชตะหิรัญ (หัวหน้างานบริการและพัฒนางานวิจัย คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มจร.) และคุณวุฒิสิทธิ ย่อชัย ผู้ช่วยนักวิจัย ศูนย์การอ้างอิงวารสารวิชาการไทย ที่ให้การช่วยเหลือในการบริหารการเงินของโครงการฯ

ศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

หัวหน้าโครงการ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

▲

สารบัญรายงาน

หัวข้อ	เลขหน้า
ปกหน้า	1
กิตติกรรมประกาศ	3
สารบัญรายงาน	4
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	5
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	9
Research Output ที่ได้จากงานวิจัยในโครงการ	13
○ การผลิตนักวิจัยรุ่นใหม่	
○ การตีพิมพ์ผลงานวิจัยในการสารวิชาการ	
นานาชาติและประชุมวิชาการ	
ภาคผนวก	15

Abstract

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 \rightarrow ABS \rightarrow 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 \rightarrow ABS \rightarrow 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.

Keywords: Single screw extrusion, Polymer melts, Radial extrudate swell, Velocity profiles, Normal stresses, Magnetic field.

บทคัดย่อ

รหัสงานวิจัย: BRG4780023
 ชื่องานวิจัย: ความเค้นเฉือน ปริมาณบวมตัว และรูปแบบความเร็วเชิงรัศมีของพอลิเมอร์
 หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวโดยใช้
 หัวขึ้นรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
 ผู้วิจัยหลัก: ศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
 ที่อยู่อิเล็กทรอนิกส์: narongrit.som@kmutt.ac.th
 ระยะเวลาดำเนินงาน: ตั้งแต่ 31 สิงหาคม 2547 ถึง 30 สิงหาคม 2550

วัตถุประสงค์ :

1. เพื่อออกแบบและพัฒนาหัวขึ้นรูปที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าโดยสามารถใช้ร่วมกับเทคนิคการอัดรีด
 ร่วมแบบขนานสำหรับการวัดการบวมตัวเชิงรัศมี ค่าความเค้นเฉือน และความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์
 หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการบวมตัว ค่าความเค้นเฉือน และความเร็วในการไหลเชิงรัศมีของพอลิเมอร์
 หลอมเหลวขณะไหลในหัวขึ้นรูปสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ใน
 สภาพต่าง ๆ เช่น ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก อุณหภูมิหัวขึ้น
 รูป อุณหภูมิกระบอกฉีด อัตราเค้นเฉือน และความเร็วรอบสกรู
3. เพื่อสร้างและเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของพฤติกรรมการบวมตัวเชิงรัศมี ค่าความเค้นเฉือน รูปแบบ
 การไหล ของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว

วิธีการทดลอง ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการตรวจวัดปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมีและรูปแบบความเร็วในการไหลเชิงรัศมีของ
 PS หลอมเหลวที่ไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว โดยใช้หัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กซึ่งได้ทำ
 การออกแบบมาเฉพาะเพื่อใช้ร่วมกับระบบการอัดรีดร่วมขนาน (PCT) ระบบการอัดรีดร่วม
 ดังกล่าวนี้อาจตรวจวัดปริมาณการบวมตัวและรูปแบบความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์
 หลอมเหลวตลอดพื้นที่หน้าตัดของหัวขึ้นรูปในเวลาเดียวกัน สภาพการทดสอบที่น่าสนใจ
 ประกอบด้วย ความเข้มและทิศทางของสนามแม่เหล็ก โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ อุณหภูมิ
 ของหัวขึ้นรูป อัตราเค้นเฉือนและความเร็วรอบในการหมุนสกรู ผลการวิจัยที่ได้ในงานวิจัยนี้ได้
 นำเสนอในรูปของการรวบรวมผลงานวิจัยที่ได้ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ ดังนี้

การวิจัยเริ่มจากการออกแบบและจัดสร้างหัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าให้ใช้ร่วมกับระบบการอัด
 รีดร่วมขนานเพื่อใช้ศึกษาปริมาณการบวมตัวแบบโดยรวมและแบบรัศมีของ PS หลอมเหลวขณะ
 ไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว [*Polymers for Advanced Technologies*, 16 (7):
 505-514 (2005)]. ที่มีผลกระทบมาจากความเข้มของสนามแม่เหล็ก อัตราเค้นเฉือน(ความเร็วรอบ

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

การเปลี่ยนแปลงของปริมาณการบวมตัวที่เกิดขึ้น สามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบความเร็วเชิงรัศมีที่ตรวจวัดได้ในเวลาเดียวกันขณะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลอยู่ในหัวขึ้นรูป โดยพบว่ามีปริมาณการบวมตัวมีค่าลดลงตามตำแหน่งรัศมีที่เพิ่มขึ้นในหัวขึ้นรูป และจะสังเกตได้ว่าการลดลงของชั้นการไหลบริเวณใกล้กับผนังของหัวขึ้นรูป นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิของหัวขึ้นรูปไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมีแต่อย่างใด สำหรับผลการทดลองที่ได้จากการใช้หัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กพบว่า ปริมาณการบวมแบบโดยรวมเฉลี่ยของ PS หลอมเหลวเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กถึงจุดสูงสุด จากนั้นมีค่าลดลงถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นอีกก็ตาม ปริมาณการบวมตัวสูงสุดในสภาวะความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กถูกทำให้เปลี่ยนแปลงด้วยอัตราเฉือน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากผลรวมของพลังงานในรูปอีลาสติกและพลังงานแม่เหล็กกระหว่างเกิดการไหล พลังงานแม่เหล็กมีผลกระทบต่อปริมาณการบวมอย่างชัดเจนที่อัตราเฉือนต่ำ และที่อุณหภูมิของหัวขึ้นรูปต่ำ หากพิจารณาในส่วนของการบวมตัวที่ตำแหน่งรัศมีต่าง ๆ ของหัวขึ้นรูป พบว่าที่ตำแหน่งส่วนกลางของหัวขึ้นรูปมีปริมาณการบวมตัวมากที่สุด ในช่วง 2.4 ถึง 3.3 และไม่มีการลดลงของชั้นการไหลบริเวณใกล้กับผนังของหัวขึ้นรูป

ในงานวิจัยเกี่ยวกับ พฤติกรรมการบวมตัวของ PS หลอมเหลวขณะทำการอัดรีด ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลกระทบของวัสดุที่ใช้ทำหัวขึ้นรูปที่ผลต่อปริมาณการบวมตัว [*Polymer Journal*, 37 (7): 541-544 (2005)] ผลการทดลองพบว่าปริมาณการบวมตัวของ PS หลอมเหลวมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีระดับของการเปลี่ยนแปลงมากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลจากการทดลองเล็กน้อย โดยปริมาณการบวมตัวมีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีของหัวขึ้นรูปที่ทำจากวัสดุเหล็กแต่ลดลงเมื่อใช้หัวขึ้นรูปที่ทำจากสแตนเลส ปัจจุบันยังไม่มีเหตุผลที่ชัดเจนในการอธิบายถึงผลการทดลองที่ได้ คำอธิบายที่มีความเป็นไปได้ของปรากฏการณ์ดังกล่าว ได้แก่ ความเค้นเฉือนตั้งฉากในแนวแกน การเก็บสะสมพลังงานแม่เหล็กของ PS ที่เกิดการเสียรูปของสายโซ่โมเลกุลไปในทิศทางเดียวกันขณะไหลในหัวขึ้นรูป การศึกษาในลำดับต่อไปอยู่ในแนวทางที่สร้างความชัดเจนในส่วนผลกระทบของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว จากการวัดสมบัติทางวิสโคอีลาสติกภายใต้สนามแม่เหล็ก โดยการเปรียบเทียบปริมาณการบวมตัวและการแจกแจงความเร็วความเร็วในการไหลที่ตรวจวัดได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวและเครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์ [*Polymer Testing*, 24 (8): 948-952 (2006)] ผล

การทดลองพบว่าปริมาณการบวมตัวของ PS หลอมเหลวที่ตรวจวัดได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเตี้ยมากกว่าที่พบในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ ทั้งนี้มีผลเนื่องมาจากสมบัติการไหลของทั้งสองเครื่องมีความแตกต่างกัน ปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมีที่ตรวจวัดได้จากทั้งสองเครื่องพบว่าไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้สามารถอธิบายด้วยการพัฒนารูปแบบของการแจกแจงความเร็วในการไหล นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณการบวมของ PS หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลกระทบมาจากขนาดของเครื่องมือทดสอบที่ใช้

ช่วงปลายสุดของโครงการวิจัยฯ ได้ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของเทอร์โมพลาสติกหลอมเหลวที่มีโครงสร้างทางเคมีที่แตกต่างกัน ในหัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างทำการอัดรีด [*Polymer Engineering and Science* 47 (3): 270-280 (2007)] โดยสภาวะการทดลองที่สนใจที่มีผลต่อปริมาณการบวมตัวและสมบัติการไหล ได้แก่ ความเข้มข้นและทิศทางของสนามแม่เหล็ก อุณหภูมิของหัวขึ้นรูปและอัตราเฉือน ผลการทดลองพบว่าปริมาณการบวมตัวของ PS, LLDPE และ PVC มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอัตราเฉือน แต่ในกรณีของ ABS และ PC ให้ผลในทางตรงกันข้าม การเพิ่มอุณหภูมิของหัวขึ้นรูปทำให้ปริมาณการบวมตัวของ PS, ABS, PC, และ LLDPE มีค่าลดลง แต่สำหรับ PVC มีปริมาณการบวมตัวเพิ่มขึ้น ผลการวิจัย พบว่า สนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อเทอร์โมพลาสติกหลอมเหลวที่มีวงเบนซินในตำแหน่ง side-chain และมีโครงสร้างโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างเป็นทิศทาง กล่าวคือปริมาณการบวมเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้สนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ตามลำดับจากมากไปน้อย คือ PS → ABS → PC โดยปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่สนามแม่เหล็กวิ่งไปในแนวเดียวกับทิศทางการไหลมีค่าสูงกว่าปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่สนามแม่เหล็กวิ่งไปในแนวตรงข้าม โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กระดับสูง

บทสรุปและข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบและจัดสร้างหัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าให้ใช้ร่วมกับระบบการอัดรีดร่วมเพื่อใช้ศึกษาปริมาณการบวมตัวแบบโดยรวมและแบบรัศมีของ PS หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเตี้ย ผลการวิจัยพบว่า เมื่อใช้หัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็ก ปริมาณการบวมแบบโดยรวมเฉลี่ยของ PS หลอมเหลวเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กถึงจุดสูงสุด จากนั้นมีค่าลดลงถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กให้สูงขึ้นอีกก็ตาม ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากผลรวมของพลังงานในรูปโอสติกและพลังงานแม่เหล็กทำให้เกิดการไหล พลังงานแม่เหล็กมีผลกระทบต่อปริมาณการบวมอย่างชัดเจนที่อัตราเฉือนต่ำ และที่อุณหภูมิของหัวขึ้นรูปต่ำ ปริมาณการบวมตัวมีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีของหัวขึ้นรูปที่ทำจากวัสดุเหล็กแต่ลดลงเมื่อใช้หัวขึ้นรูป

ที่ทำจากสไตรีนเลส ปริมาณการบวมโดยรวมตัวของ PS หลอมเหลวที่ตรวจวัดได้จากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนน้อยกว่าที่พบในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ ภายใต้สนามแม่เหล็ก ปริมาณการบวมของ PS หลอมเหลวมีการเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีผลกระทบมาจากขนาดของเครื่องมือทดสอบที่ใช้ การเพิ่มของอัตราเฉือนทำให้ปริมาณการบวมตัวของ PS, LLDPE และ PVC เพิ่มขึ้น แต่ในกรณีของ ABS และ PC ให้ผลในทางกลับกัน การเพิ่มอุณหภูมิของหัวขึ้นรูปทำให้ปริมาณการบวมตัวของ PS, ABS, PC, และ LLDPE มีค่าลดลง ส่วน PVC มีปริมาณเพิ่มขึ้น สนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อเทอร์โมพลาสติกหลอมเหลวที่มีกลุ่มวงเบนซีนในตำแหน่ง side-chain และมีโครงสร้างโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างมีทิศทาง นอกจากนี้ สนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ตามลำดับจากมากไปน้อยคือ PS → ABS → PC โดยปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่สนามแม่เหล็กวิ่งไปในแนวเดียวกับทิศทางการไหลมีค่าสูงกว่าปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ที่สนามแม่เหล็กวิ่งไปในแนวตรงข้าม

ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

จากผลงานที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า เทคนิคการอัดรีดร่วมขนานและระบบหัวขึ้นรูปแบบแม่เหล็กแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนแล้วว่า เป็นเทคนิคที่สามารถใช้ในการวัดปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมี และความเร็วเชิงรัศมีของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี เช่น กระบวนการผลิตแบบอัดรีดร่วมเป็นต้น ดังนั้น งานวิจัยในอนาคต จะเป็นการตรวจวัดปริมาณการบวมตัวเชิงรัศมี และรูปแบบความเร็วเชิงรัศมีในหัวขึ้นรูปของกระบวนการผลิตแบบอัดรีดร่วมภายใต้สภาวะความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กต่าง ๆ ซึ่งในระบบการอัดรีดร่วมนี้ได้แบ่งเป็นในสองส่วนที่ต้องทำการศึกษาคือ การอัดรีดร่วมแบบชั้นแกนพอลิเมอร์ชั้นเดียว และแกนหลายชั้น โดยได้ทำการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือเฉพาะเพื่อใช้ในการทดลอง โดยสามารถอัดรีดร่วมพอลิเมอร์หลอมเหลวได้ทั้งแบบแกนชั้นเดียว 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 ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ชนิดของพอลิเมอร์ อัตราส่วนความหนืด ขนาดรูปร่างของการอัดรีดร่วม และอัตราส่วนของขนาดชั้นผิวและชั้นแกนกลางพอลิเมอร์ เป็นต้น

คำสำคัญ กระบวนการอัดรีดเกลียวหนอนเดี่ยว พอลิเมอร์หลอมเหลว พฤติกรรมการบวมตัว ความเร็วในการไหล รูปแบบการไหล ความเค้นเฉือน สนามแม่เหล็ก

Research Output ที่ได้จากงานวิจัยในโครงการ

การผลิตนักวิจัยรุ่นใหม่ (นักวิจัยเต็มเวลา นักวิจัยหลังป.เอก นักศึกษา ป.โทและเอก) มีดังนี้

Level	Number	Name and sub-project title
PhD	1	○ Mr. Naret Intawong (2005) Investigation of Radial Extrudate Swell and Velocity Profiles of Flowing PS Melts in Extrusion Processes (Graduated)
MEng	3	○ Mr. Sarun Choomchaiyo (2005) Effect of Electromagnetic Field on Normal Stress Difference of Polymer Melts in a Single Screw Extruder (Graduated) ○ Mr. Pootinun Uawongsuwan (2006) Effect of Magnetic Field Direction in an Extrusion Die on Extrudate Swell Behaviour of Polymer Melts in Capillary Rheometer (Graduated) ○ Mr. Nitat Luangaramkul (2006) Effect of Barrel Size and Magnetic Field on Swelling and Flow Properties of Different Polymer Melts in a Single Screw Extruder (Graduated)
Postdoc	1	○ Dr Naret Intawong (2006-present) Flow Analysis and Extrudate Swell of Polymer Melts in Extrusion Processes (Extended to study the rotating die effect – ongoing)
Full-time researcher	1	○ Miss Kantima Chaochanchaikul (2007) Effect of Molecular Structure on Elastic Swell Behavior of Thermoplastic Extrudates in an Electro-magnetized Die (Done)
Total	6	-

การตีพิมพ์ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการจากโครงการวิจัย BRG4780023 มีดังนี้

Publication Level	Number of Papers	Publication Status
International Journals	4	Published
International Conferences	1	Published
National Conferences	2	Published
Total	7	Published

รายงานฉบับสมบูรณ์ BRG4780023 ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

ชื่อเรื่องของผลงานวิจัย และแหล่งที่ตีพิมพ์เผยแพร่ และค่า Impact Factors

International Refereed Journals

1. Sombatsompop N & Intawong N-T, (2005) Extrudate Swell and Flow Analysis of PS Melt Flowing in Electro-magnetized Die in a Single Screw Extruder *Polymers for Advanced Technologies*, 16 (7): 505-514 [ISI impact factor = 1.406]
2. Intawong N-T, Kimura T, Tamura M, Xiaojun L & Sombatsompop N, (2005) Magnetic Effects on Extrudate Swell of Polystyrene Melt in Extrusion Dies *Polymer Journal*, 37 (7): 541-544 [ISI impact factor = 1.146]
3. Sombatsompop N and Intawong N-T (2006) A Comparative Study on Extrudate Swell of Polystyrene in a Capillary Rheometer and a Single Screw Extruder - *Polymer Testing*, 24 (8): 948-952. [ISI impact factor = 1.312]
4. Sombatsompop N, Uawongsuwan P & Chaochanchaikul, K (2007) Effect of Molecular Structure on Elastic Swell Behavior of Thermoplastic Extrudates in an Electro-magnetized Die - *Polymer Engineering and Science* 47 (3): 270-280 [ISI impact factor = 1.414]

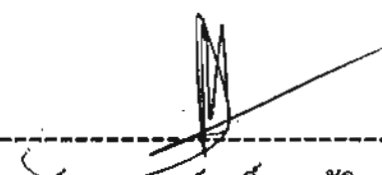
International Conference Papers

1. Sombatsompop N and Uawongsuwan P (2006) Effect of Magnetic Field on Flow and Physical Properties of Benzene-Containing Thermoplastics in Capillary Rheometer, *ASAIN Workshop on Polymer Processing 2006 (AWPP 2006)*, 6-8 December 2006, Bangkok Thailand. (Keynote Lecture).
2. Sombatsompop N and Uawongsuwan P (2006) Application of Magnetic Field to Extrudate Swell and Flow Curves of Polymer Melt Extrusion, *National Conference in Science and Technology 2006 (NCST 2006)*, 14-15 December 2006, Rachabutr Sakol-Nakorn University, Sakol-Nakorn, Thailand. (Keynote Lecture).
3. Sombatsompop N and T Palathai (2007) Application of Magnetic Field to Flow Properties of Molten Thermoplastics in Polymer Processing Techniques - *Polymer Graduate Conference of Thailand*, 10-11 May 2007, Mahidol University, Paper IL-5 (Invited Speaker).

ภาคผนวก

เอกสารแนบในภาคผนวกนี้ เป็นสำเนาบทความวิจัยเฉพาะที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติและค่า ISI impact factor ปี 2006 ที่ได้รับจากโครงการวิจัยฯ ตามลำดับ ดังนี้

1. Sombatsompop N & Intawong NT, (2005) Extrudate Swell and Flow Analysis of PS Melt Flowing in Electro-magnetized Die in a Single Screw Extruder *Polymers for Advanced Technologies*, 16 (7): 505-514 [ISI impact factor = 1.406]
2. Intawong N-T, Kimura T, Tamura M, Xiaojun L & Sombatsompop N, (2005) Magnetic Effects on Extrudate Swell of Polystyrene Melt in Extrusion Dies *Polymer Journal*, 37 (7): 541-544 [ISI impact factor = 1.146]
3. Sombatsompop N and Intawong N-T (2006) A Comparative Study on Extrudate Swell of Polystyrene in a Capillary Rheometer and a Single Screw Extruder - *Polymer Testing*, 24 (8): 948-952. [ISI impact factor = 1.312]
4. Sombatsompop N, Uawongsuwan P & Chaochanchaikul, K (2007) Effect of Molecular Structure on Elastic Swell Behavior of Thermoplastic Extrudates in an Electro-magnetized Die - *Polymer Engineering and Science* 47 (3): 270-280 [ISI impact factor = 1.414]


 (ศาสตราจารย์ ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ)
 หัวหน้าโครงการฯ

Extrudate swell and flow analysis of polystyrene melt flowing in an electro-magnetized die in a single screw extruder

Narongrit Sombatsompop* and Naret Intawong

Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy & Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thongkru, Bangmod, Bangkok 10140, Thailand

Received 22 December 2004; Revised 14 March 2005; Accepted 2 April 2005

An electro-magnetized capillary die via a parallel co-extrusion technique was used to study the changes in the overall and radial extrudate swell ratio of polystyrene (PS) melt flowing in a single screw extruder. 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 8.5 sec^{-1} and then decreased at 17.1 sec^{-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 2.4–3.3. There was no extrudate contraction of the melt layer near the die wall. Copyright © 2005 John Wiley & Sons, Ltd.

KEYWORDS: velocity profiles; single screw extruder; processing; melt; polystyrene

INTRODUCTION

In plastic extrusion, it is essential to have precise knowledge of the flow properties and flow patterns of a material under the molten stage because it helps engineers to control the size and quality of melt streams and final products. However, the final product shapes are not easily controlled during the processing because the swell phenomenon of the extrudate occurs while the melt is being forced out of the shaping die, and becomes more complex in the case of co-extrusion of two or more materials through a single shaping die. The mechanism of extrudate swell can be explained in different ways; e.g. elastic recovery,^{1–3} residence time upon the applied stresses,⁴ and the re-organization of melt velocity profiles developed in the die and the die exit.^{5–8}

Many researchers^{1–11} have studied the extrudate swell behavior of both Newtonian and non-Newtonian fluids,

usually using a single fluid flowing through a confined flow channel. In addition, it is widely known that the extrudate swell of fluids is affected by many parameters such as shear rate, temperature, fillers, and die size and design. Kar and Otaigbe¹ measured the extrudate swell of low-density polyethylene (LDPE), polypropylene, and polystyrene (PS) using a Randcastle microtruder over a range of shear rate, length/diameter ratio of die, and melt temperature, and they found that the extrudate swell of the polymers increased with increasing shear rates, but decreased with increasing melt temperature and the length/diameter ratio. They proposed a theoretical model based on strain energy density function so as to explain the extrudate swell phenomena in an extruder. Lee and Ho⁹ studied the effect of melting temperature and die length on the extrudate swell behavior of PS melt to design profile die by comparing the experimental results with the theoretical ones. The extrudate swell became smaller as the melting temperature and die length increased, and the experimental result was in good agreement with the theory. Sombatsompop¹⁰ originally designed and manufactured a magnetic circular die in a capillary rheometer and studied the effect of magnetic field at 2.16 Tesla flux density on the

*Correspondence to: N. Sombatsompop, Polymer Processing and Flow (P-PROF) Group, School of Energy & Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thongkru, Bangmod, Bangkok 10140, Thailand.
E-mail: narongrit.som@kmutt.ac.th

extrudate swell ratio of PS melt. The result showed that the application of a magnetic field to the die gave a significant increase in the swelling ratio of the PS melt of up to 25%. The author proposed that the increased swelling of the PS could be caused by the change in the molecular orientation or alignment. Later, Sombatsompop and Sergsiri¹¹ also studied effect of barrel diameter and magnetic flux density on the overall extrudate swell for the PS melt in a capillary rheometer with use of an electro-magnetized die, and they found that the maximum swelling of the PS melt was enhanced up to 2.6 times and 1.9 times with and without application of the electro-magnetic field (up to 2.11 Tesla), respectively. The barrel diameter of 30 mm was found to be a critical value in case that the extrudate swell ratio and flow properties of the PS melt were significantly affected by the magnetic flux density.

There is few data of the swell ratio of melt layers at different positions across the duct diameter due to experimental difficulties, so that the overall extrudate swell ratio (the ratio of the extrudate diameter to the die diameter) has been determined experimentally,^{1-9,11} or by computer simulations.^{1,5,12,13} The radial extrudate swell profiles are extremely important, especially for the co-extrusion process where the size of each melt layer must be accurately determined as this directly affects overall properties of the co-extruded products. Only a few works^{7,14,15} have been found. For example, Mitsoulis¹⁴ examined melt swell behavior of two Newtonian fluids which had different viscosity and feed ratios, extruded concentrically from a capillary die using the finite element method. The results showed that the highest swelling occurred at the centre of the duct and the lowest near the wall. Similar work was also conducted by Kiselev and Kanavets¹⁵ who investigated extrudate swell of PE melt layers as a function of radial positions across a circular duct. The swell ratio of a melt layer lying at a distance from the axis equal to $2/3$ of the capillary radius (R) was equal to that of the overall extrudate swell. Melt layers lying in distances below $2/3R$ exhibited higher swellings, whereas those above $2/3R$ became contracted. Christodoulou *et al.*⁷ used direct measurement to investigate the swelling ratio of ethylene-vinyl acetate (EVA) copolymer through a newly developed co-extrusion technique coupled with a color-layer technique in a capillary rheometer. The results suggested that the extrudate swell was associated with the development of velocity profiles along the die. This view was in good agreement with the work of Munstedt *et al.*⁸ Most recent work by Intawong and Sombatsompop¹⁶ have been developed using a new experimental apparatus and method to allow simultaneous measurements of extrudate swell and velocity profiles at different positions across the die diameter. The proposed technique called "Parallel Co-extrusion Technique" (PCT), was based on parallel co-extrusion of colored melt-layers into uncolored melt-stream from the barrel into and out of the capillary die. The size (thickness) ratio of the generated melt layers flowing in and out of the die was monitored to produce the extrudate swell ratio for any given radial position across the die diameter. The results suggested that the radial extrudate swell profiles could not be reasoned by the shear rate change, but closely linked with development of the velocity profiles of the melt in the die. The extrudate swell

ratio was high at the center (~ 1.9 times) and low (~ 0.9 times) near the die wall.

In this article, the authors intend to further investigate the radial extrudate swell and velocity profiles of PS melt flowing in a circular die of a single screw extruder using the developed PCT technique,¹⁶ pointing out originality on the following points:

- Radial velocity profiles: The PCT can be used to determine the velocity profiles of the melt in the die of the extruder with measurement of the radial extrudate swell, which allows one to establish a relationship between the velocity profiles and the radial extrudate swell profiles for various test conditions.
- Use of an electro-magnetic die: The authors are the first to use on electro-magnetized die to monitor a change in the extrudate swell ratio and velocity profiles of a flowing melt in real processing equipment (like a single screw extruder). The effect of the magnetic flux density in the die on the changes in the extrudate swell ratio and velocity profiles of the melt across the die diameter would be of great interest and become a new and unique parameter in altering the extrudate properties in real extrusion processes.

EXPERIMENTAL

Raw material and arrangement of the experimental apparatus

All tests in this work used PS (Styron 656D 267), supplied in granular form by Siam Polystyrene Co., Ltd (Bangkok, Thailand). It was characterized by using a melt flow index of 7 and a density of 1.350 g/cm^3 (BS2782 Method 720A; 1979).

This present work was aimed to determine the radial extrudate swell and velocity profiles of PS melt in a circular cross-section die using a single screw extruder (Thermo-Haake PolyDrive Extruder). The exact length-to-diameter (L/D) ratio of the barrel was 200:25 mm/mm. The setting temperature profiles on the extruder length were 170, 180, 190 and 200 from hopper to die zones. It should be noted that the die temperature will be varied to follow the changes in the extrudate swell and velocity profiles, which is indicated later. In order to investigate the effect of the electro-magnetic field on the radial extrudate swell and velocity profiles, the capillary die had to be re-designed to accommodate an electro-magnetized die and to be fitted at the end of the barrel of the single screw extruder. The arrangement of the experimental apparatus is shown in Fig. 1. The experimental rig consists of a PCT,¹⁶ an electro-magnetized die system, video camera and recorder. The details of the electro-magnetized die will be explained in the next section.

Construction of an electro-magnetized die for the extruder

The capillary die used in this work was made of mild steel (Grade 1020) of 64 mm in length and 5 mm in diameter. To make an electro-magnetized die, the die body was wrapped with copper wires in order to apply the electromagnetic field to the die. To prevent an electrical short-circuit, Teflon film

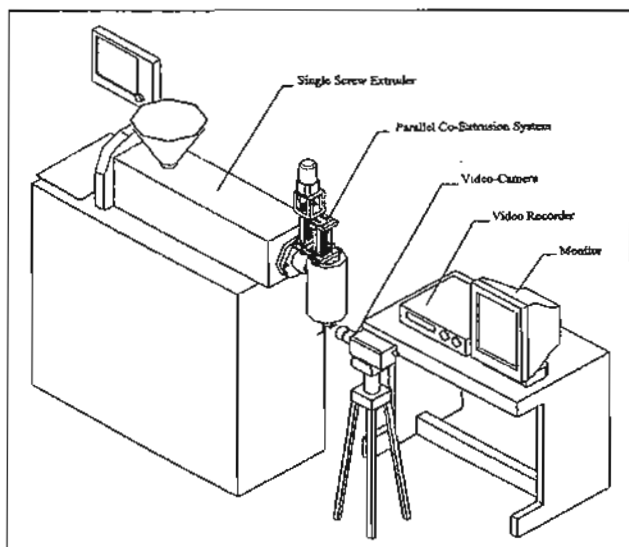


Figure 1. An arrangement of the experimental apparatus for measurement of radial extrudate swell and velocity profiles of PS melt in a single screw extruder.

was placed between the outer die wall and the copper solenoid coil. The dimensions and arrangement of the electro-magnetized die, including the magnetic field profile for this particular die system, are shown in Fig. 2. According to the relationship between magnetic force (F), charged particle (Q), charged velocity (v) and flux density (B) evidenced by Ulaby,¹⁷ the magnetic flux direction was parallel to the flow of the polymer melt in the capillary die. The electro-magnetic field was generated to the die by applying electricity to the copper solenoid coil, the electricity varying from 0 to 10 A. It was of some concern that the application of the electro-magnetic field would cause additional heat due to the induction effect across the solenoid coil. This additional heat would then affect the die and melt temperatures during the tests. Therefore, an air-cooling jacket unit was constructed and placed around the electro-magnetized die, the cooling unit being located between the solenoid coil and the die body. The flow-rate of the cooling air was adjusted and calibrated to reduce the additional heat so that the desired temperature

was achieved—some experimental results in the discussion section confirm that no additional heat occurred during the test. The apparatus temperature was controlled using a DD6 temperature controller. A small pressure hole was located between the two die locations to detect the occurrence of entrance pressure drop, the pressure being measured by a photo-conductive light pressure sensor which was originally proposed by Sombatsompop *et al.*,¹⁸ and manufactured by our research group.

Measurements of radial extrudate swell and velocity profiles, and flow properties

The radial extrudate swell and velocity profiles of the PS melt were simultaneously measured using the PCT which was based on a parallel co-extrusion of colored melt-layers into an uncolored melt-stream from the barrel into and out of a capillary die, the details of the technique being discussed elsewhere.¹⁶ The radial extrudate swell ratio values (B_r) were determined with a comparison of the thickness of the colored layer of the extrudate outside the die for a given reduced radius (r/R) position in the die. The r/R range used in this work was from 0.0 to 0.86. Accuracy of the radial extrudate swell profile can be verified by averaging the values of the radial extrudate swell obtained across die diameter, and comparing with the overall extrudate swell ratio directly measured at the die exit, the overall extrudate swell ratio being referred to as the ratio of the extrudate radius to the die radius. The detailed description of the technique, including its accuracy, can be found in previous work.¹⁶ The velocity profile measurement in this work was based on monitoring a relatively small and light foreign object (corn particles) flowing along the melt stream. The measurements were carried out by recording the times taken for the small particles loaded into the melt layers to travel for a given distance in the die (10 mm before the die exit). The detailed description of the technique is obtained in previous work.¹⁶ The accuracy of the velocity profile measurement was verified by integrating the radial melt velocity for any given die radius to give the output rate. It was calculated to be approximately 91%.¹⁶

Relationship between the wall shear stress and the wall shear rate of the PS melt was also simultaneously online-determined using the same extruder, under the same conditions at which the extrudate swell and velocity profiles were measured in the single screw extruder. The shear stress was calculated using the pressure drop measured near the entry region of the die while the shear rate was determined using the extrusion rate and the die dimensions.

Investigating parameters

A screw rotating speed and die temperature in the experimental apparatus varied and all measurements were performed with and without the application of an electro-magnetic field to the capillary die.

- **Magnetic flux density:** The magnetic flux density of the electro-magnetic field was altered by varying the amount of the electric current from 0, 2, 4, 6, 8 to 10 A, these values corresponding to the magnetic flux densities of 0, 0.75, 1.23, 1.56, 1.69 and 1.85 Tesla, respectively. In this work,

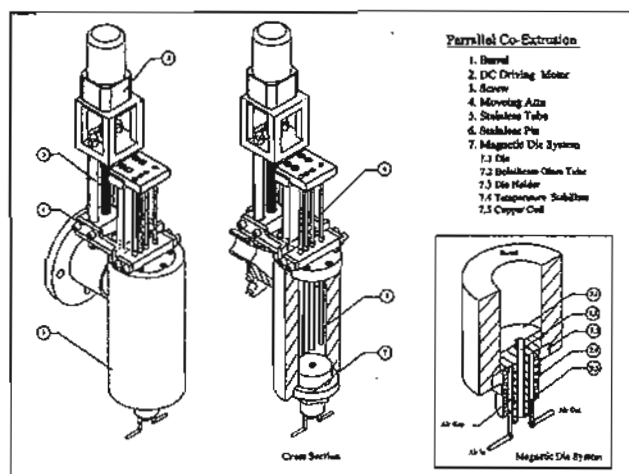


Figure 2. Design and construction of an electro-magnetized capillary die system.

the magnetic flux lines generated in the die had a parallel direction to the flow of the polymer melt. These values were measured using a Tesla-meter at the centre position of the copper coil length which appeared to give a maximum value for any given electric current; it was confirmed by computer simulation through use of the Finite Element Method Magnetics (FEMM) software (V3.3; 2003; Germany) (although the results are not shown in this paper). The test results obtained in this work were reported as a function of the maximum magnetic flux density in the capillary die at the centre position of the copper coil.

- **Wall shear rate:** The wall shear rate was calculated from the output rate (Q) of the melt flowing from the die and the die dimensions. The shear rate was altered by varying the screw rotating speeds. The extrudate swell and velocity profiles were measured at (low) shear rates below the critical shear stresses for the onset of PS melt distortions (sharks-in and melt fracture) under the test temperatures, because the extrudate swell measurements can be more accurate in this condition wherein the shear rates were 5.1, 8.5 and 17.1 sec^{-1} .
- **Die temperature:** The die temperature of the electro-magnetized die in the extruder was varied from 200 to 230°C.

RESULTS AND DISCUSSION

Extrudate swell and velocity profiles in normal (non-magnetic) die

Overall extrudate swell as a function of die temperature and shear rate

Figure 3(a)–3(d) illustrates the overall extrudate swell ratio as a function of extrusion time for the PS melt flowing in a capillary die of the extruder for different shear rates at various die temperatures. The average swell ratio of the melt was found to range from 1.25 to 1.55 (25–55% extrudate expansion as compared to the die diameter). The results suggested that the overall swell ratio reduced with increasing die temperature. This was expected since the increased die temperature resulted in an increase in the viscous component of the melt. For shear rate effect, the swell ratio increased as the shear rate increased from 5.1 to 8.5 sec^{-1} , and then decreased when the shear rate of 17.1 sec^{-1} was used. This may be surprising as one would expect the swell ratio to simply increase as the shear rate increased. A reason for this might be due to a decrease of the viscosity of the melt at the shear rate of 17.1 sec^{-1} as compared to the other shear rates. The decreases in the melt viscosity and extrudate swell ratio at this shear rate (17.1 sec^{-1}) were probably caused by an increase in

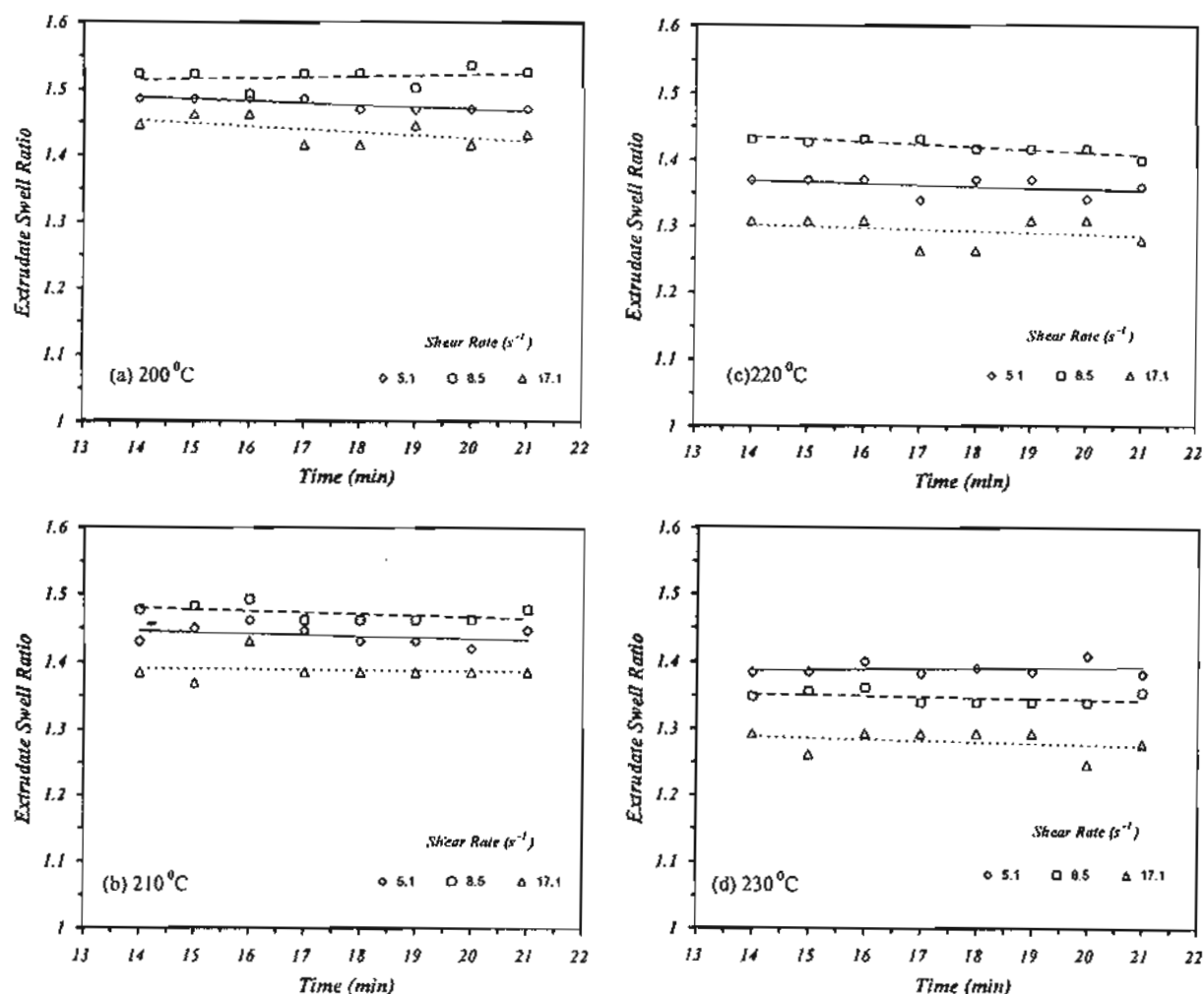


Figure 3. Overall extrudate swell ratio as a function of extrusion time in a single screw extruder for different die temperatures and shear rates: (a) 200°C; (b) 210°C; (c) 220°C; (d) 230°C.