

การตรวจวัดอุณหภูมิที่แท้จริงของพอลิเมอร์หลอมเหลวใน ท่อหน้าตัดกลม โดยใช้ระบบการเคลื่อนที่ของชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

สมเจตน์ พัชรพันธ์¹ และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ²

Abstract

Patcharaphun, S. and Sombatsompop, N.

**Measurements of true polymer melt temperature in a circular
cross-sectional duct by moving temperature sensor**

Songklanakarinn J. Sci. Technol., 2002, 24(1) : 53-66

The objective of this research was to design and develop an experimental apparatus and a temperature sensor in order to measure true melt temperature rise due to the shear heating during the flow. The designed apparatus featured two different forms, one being the polymer melt flowing past the stationary sensor (so-called moving piston), and the other being the sensor moving along the stationary polymer melt (so-called moving sensor). By subtracting the temperature data obtained by moving sensor from those obtained by moving piston the true melt temperature rise could be yielded. The temperature data were collected using a high-speed data logger and a computer. The effects of melt/piston velocity, initial melts temperature and various types of polymer melts used were of interest in this work. It was found that the experimental apparatus designed and used in this work was very effective and gave reasonably accurate

Material Technology, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Tungkru, Bangmod, Bangkok 10140 Thailand.

¹M.Eng. (Materials Technology) ²Ph.D. (Polymer Processing and Rheology) รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะ
พลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เขตทุ่งครุ บางมด กรุงเทพฯ 10140

Corresponding email: narongrit.som@kmutt.ac.th

รับต้นฉบับ 21 พฤษภาคม 2544

รับลงพิมพ์ 14 สิงหาคม 2544

results. In the moving piston system, the maximum melt temperature rise was in the range of 6-12 °C. Increasing the piston speed and initial melt temperature resulted in an increase in the maximum temperature rise. At very high piston speed, the maximum temperature rise reduced. In the moving sensor system, the maximum melt temperature rise due to the friction between the melt and the sensor was independent of the sensor velocity, initial melt temperature and types of polymer melts. The maximum melt temperature rise for this system was in the range of 3-5 °C. After the calculation of the true melt temperature, the true maximum melt temperature ranged from 5 to 7 °C. Finally, it was observed that the experimental temperature data were considerably different from the theoretical data.

Key words : temperature profiles, polymer melts, shear heating, temperature sensor

บทคัดย่อ

สมเจตน์ พัชรพันธ์ และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

การตรวจวัดอุณหภูมิที่แท้จริงของพอลิเมอร์หลอมเหลวในท่อหน้าตัดกลม

โดยใช้ระบบการเคลื่อนที่ของชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2545 24(1) : 53-66

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนาชุดทดสอบและชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ เพื่อวัดอุณหภูมิแท้จริงของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหล โดยชุดทดสอบได้ทำการออกแบบให้สามารถใช้งานได้ 2 ลักษณะคือ การเคลื่อนที่ของ piston วัดพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ซึ่งถูกยึดอยู่กับที่ (moving piston) และการเคลื่อนที่ชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิผ่านพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งอยู่กับที่ในท่อนหลอม (moving sensor) โดยเมื่อนำค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทดลองแบบ moving sensor มาปรับแก้จาก moving piston ทำให้ทราบถึงค่าอุณหภูมิแท้จริงที่เพิ่มขึ้นของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหล ข้อมูลการวัดอุณหภูมิจะถูกบันทึกและประมวลผลโดยใช้เครื่องตรวจวัดข้อมูลแบบความเร็วสูง (high speed data logging system) และคอมพิวเตอร์ โดยศึกษาผลกระทบของความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston หรือพอลิเมอร์หลอมเหลว อุณหภูมิเริ่มต้นของพอลิเมอร์ก่อนการทดสอบ และชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดสอบ ผลการทดลองโดยทั่วไปพบว่าชุดทดสอบที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพสูงและให้ผลที่น่าเชื่อถือได้ กล่าวคือ ในการทดสอบแบบ moving piston ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุด (ΔT_{max}) จะอยู่ในช่วงระหว่าง 6-12 °C โดยเมื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston พบว่าค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงสุดมีค่าเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston สูง ๆ พบว่า ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุดนี้มีค่าน้อยลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นของพอลิเมอร์หลอมเหลวก่อนการทดสอบ (initial bulk temperature of the melt) พบว่า ค่าอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการทดสอบพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน พบว่า ค่าอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจาก ลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด โดยเมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบแบบ moving sensor ซึ่งใช้สภาวะในการทดสอบเช่นเดียวกับ moving piston จะพบว่า ค่าอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันทุกสภาวะทดสอบคือ มีค่าประมาณ 3 ถึง 5 °C ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยในการทดสอบดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้น กล่าวคืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะมาจากความร้อนที่ได้จากการเสียดสีระหว่างชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิกับพอลิเมอร์หลอมเหลวเท่านั้น หากนำค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากการทดลองแบบ moving sensor มาหักลบจาก moving piston ทำให้ทราบถึงค่าอุณหภูมิแท้จริงที่เพิ่มขึ้นสูงสุดของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลซึ่งมีค่าประมาณ 5-7 °C และเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิแท้จริงที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากทางทฤษฎี พบว่า มีค่าแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาวะการทดสอบที่แตกต่างกันซึ่งอาจไม่เหมือนกับสภาวะในการทดลองนี้ รวมถึงสมมติฐานที่กำหนดขึ้นในทางทฤษฎีที่แตกต่างกับความเป็นจริง

สมบัติที่ต้องการของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ได้จากกระบวนการผลิต ไม่ว่าจะเป็นด้านทางกล (mechanical properties) ทางกายภาพ (physical properties) ตลอดจนขนาดรูปร่าง (dimension) และสี (coloration) ที่เป็นไปตามความต้องการของผู้ผลิตและผู้บริโภค จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก คือ ชนิดของพอลิเมอร์, ลักษณะอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต และสภาวะการผลิต เช่น อุณหภูมิ (temperature), ความดัน (pressure) และอัตราการไหล (flow rate) เป็นต้น เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปแล้วว่าการวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวในกระบวนการผลิตเป็นสิ่งสำคัญ หากอุณหภูมิภายในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าสูงเกินไป อาจส่งผลให้เกิดการเสื่อมสลาย (degradation) ของพอลิเมอร์ได้ และหากอุณหภูมิภายในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าต่ำเกินไป ส่งผลทำให้ต้องใช้แรงดันที่สูงเพื่อทำการผลิต รวมถึงการสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น อีกทั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจมีข้อบกพร่องเกิดขึ้น เช่น ชิ้นงานไม่เต็มแบบ (short fill) เป็นต้น

จากการศึกษาวิจัยในอดีต พบว่า มีการทำวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดอุณหภูมิในเครื่องคาปิลารี รีโอมิเตอร์น้อยมาก ดังเช่น งานวิจัยของ Sentmanat และ Dealy (1995) ซึ่งได้ทำการศึกษาปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการใช้งานในเครื่องคาปิลารี รีโอมิเตอร์ (capillary rheometer) คือ การควบคุมอุณหภูมิให้เท่ากันตลอดความยาวของห้องหลอม (temperature uniformity) โดยใช้หัววัดอุณหภูมิ (thermocouple probe) ที่ทำการประกอบแทน piston เคลื่อนที่วัดอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งตามความยาวของห้องหลอม ซึ่งพบว่าอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงได้ทำการติดตั้งฉนวนกันความร้อนที่ทำจากใยอลูมินาและซิลิกา หุ้มบริเวณภายนอกของห้องหลอม และทำการเคลื่อนที่หัววัดอุณหภูมิ เพื่อวัดอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่ง ซึ่งพบว่ายังคงมีความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละจุด โดยมีค่าต่ำสุดที่บริเวณทางเข้า die แสดงว่าเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นที่บริเวณนี้ จึงได้ทำการติดตั้งฉนวนกันความร้อนเพิ่มขึ้นที่บริเวณนี้ และทำการตั้งค่าอุณหภูมิในแต่ละช่วงแตกต่างกัน เพื่อให้ได้รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันตลอดความยาวของห้อง และจากงานวิจัยของ Hulatt และ Wilkinson (1977) ได้อธิบายไว้ว่า

เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้เนื่องจากการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (T_m) มารวมกับอุณหภูมิที่สูญเสียไปเนื่องจากการนำความร้อนที่เกิดขึ้นในกระเปาะหุ้มของชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (T_c) แล้วหักลบค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเสียดสีกันระหว่างชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิกับพอลิเมอร์หลอมเหลว (T_f) จะได้อุณหภูมิที่แท้จริงของพอลิเมอร์หลอมเหลว ดังแสดงในสมการที่ 1

$$T_{true} = T_m + T_c - T_f \quad (1)$$

เมื่อ T_{true} คือ อุณหภูมิที่แท้จริงของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหล

T_m คือ อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่วัดได้จากชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

T_c คือ อุณหภูมิที่ลดต่ำลง เนื่องจากการนำความร้อนของกระเปาะในเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

T_f คือ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสียดสีกันระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาของ Sombatsompop และคณะ (1996) ได้มีการจัดสร้างชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบใหม่โดยใช้ลวดเทอร์โมคัปเปิลแบบเปลือยไม่มีกระเปาะหุ้ม ส่งผลให้สามารถจัดค่าอุณหภูมิที่ลดต่ำลงเนื่องจากการนำความร้อนของกระเปาะหุ้มที่ทำจากวัสดุโลหะ ในชุดวัดอุณหภูมิ (T_c) ออกไป ดังนั้น จึงสามารถลดรูปสมการที่ 1 ลงได้ คือ

$$T_{true} = T_m - T_f \quad (2)$$

จากสมการที่ 2 แสดงว่ายังคงมีความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสียดสีระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวกับชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (T_f) อยู่ แต่ในกระบวนการผลิตจริงนั้น ไม่มีชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิปรากฏอยู่ ซึ่งหมายความว่า ค่าอุณหภูมิที่วัดได้นี้ ยังคงมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่แท้จริงของพอลิเมอร์หลอมเหลว

ดังนั้นในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและพัฒนา ชุดทดสอบและชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบเคลื่อนที่ (moving

sensor) โดยเป็นการเคลื่อนที่ของชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิผ่านพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่งอยู่กับที่ในห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (barrel) ดังนั้นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นนี้ได้มาจากการเสียดสีกันระหว่างพอลิเมอร์หลอมเหลวกับชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (T_p) ซึ่งเมื่อนำค่าที่ได้นี้ไปปรับแก้จากค่าอุณหภูมิที่วัดได้ (T_m) จากการอัดพอลิเมอร์หลอมเหลวเคลื่อนที่ผ่านชุดวัดอุณหภูมิ (moving piston) ดังแสดงในสมการที่ 2 ดังนั้นจึงสามารถหาค่าอุณหภูมิแท้จริงที่เกิดขึ้น (T_{true}) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลได้

การออกแบบการทดลอง

1. ชุดทดสอบสำหรับการวัดอุณหภูมิ

ชุดทดสอบสำหรับการวัดค่าอุณหภูมิที่แท้จริงของพอลิเมอร์หลอมเหลว ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเดียวกับเครื่องคาปิลารี โรมิเตอร์ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 35 มม. มีความยาวเท่ากับ 200 มม. และสามารถปรับเปลี่ยนขนาด die ได้ตามความต้องการ โดยใช้ die holder ที่ประกอบบริเวณด้านล่างของชุดทดสอบ (die ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ มีขนาด L/D เท่ากับ 55/4) ชุดทดสอบ

ออกแบบให้สามารถถอดแยกประกอบได้ (split barrel) เพื่อความสะดวกในการติดตั้งบนเครื่องทดสอบแรงดึงของ SHIMADZU รุ่น AGS-500 D โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ของ cross-head เพื่อใช้ในการอัดพอลิเมอร์หลอมเหลว โดย piston ผ่าน ชุดวัดอุณหภูมิ ซึ่งถูกยึดอยู่กับที่บริเวณด้านล่างของชุดทดสอบ ดังแสดงใน Figure 1 คือ moving piston (a) และเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ชุดวัดอุณหภูมิผ่านพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งอยู่กับที่ในห้องหลอม คือ moving sensor (b)

2. ชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

ลักษณะของชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ดังแสดงใน Figure 2 กล่าวคือ ใช้ลวดเทอร์โมคัปเปิลแบบเปลือย ชนิด K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มม. ประกอบไปด้วย ขั้วบวกและขั้วลบ เชื่อมต่อกันในลักษณะแบบจุด (spot arc welding) ซึ่งทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีขนาดเล็กเท่ากับขนาดของลวดเทอร์โมคัปเปิล ไม่ขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว และทำให้การวัดค่าอุณหภูมิที่ได้มีความเที่ยงตรงในระดับความผิดพลาด ± 0.5 °C (Sombatsompop, et al., 1996) โดยการออกแบบชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

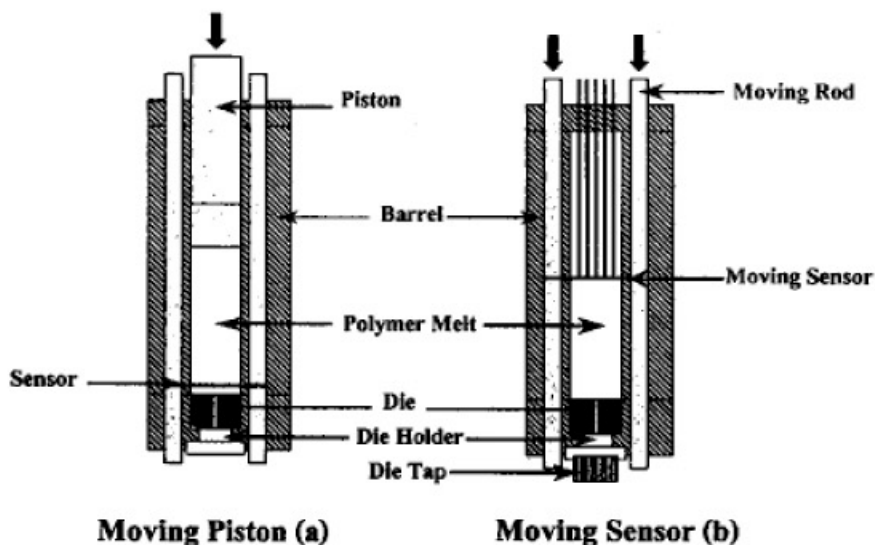


Figure 1. Experimental apparatus for temperature profile measurement

(a) Moving piston mode (b) Moving sensor mode

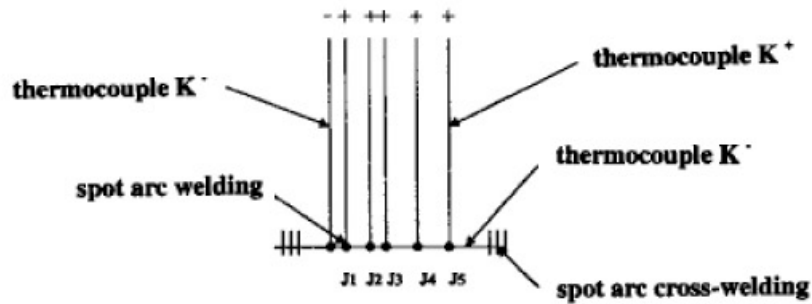


Figure 2. Temperature sensor

ที่ใช้ในการทดสอบนี้ มีตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ 5 ตำแหน่ง คือ J_1 ถึง J_5 ซึ่งแสดงในรูปของ r/R (reduced radius) เมื่อ r คือ ตำแหน่งของการวัดซึ่งห่างจากจุดศูนย์กลางของท่อ และ R คือ รัศมีของท่อซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.5 มม. ดังแสดงใน Table 1 และที่บริเวณปลายขาทั้ง 2 ข้างของ sensor ทำการเชื่อมต่อกับลวดเทอร์โมคัปเปิลชนิดเดียวกันแบบขวาง ทั้งนี้เพื่อให้ sensor สามารถอยู่ในตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้อย่างแข็งแรง (Chaiwattanpipat, 1999)

Table 1. Position of temperature measurement as a function of reduced radius

Measuring junction of temperature sensor	Distance from center (r) (mm)	r/R (Reduced radius)
J_1	10.5	0.6
J_2	3.5	0.2
J_3	0	0
J_4	7.0	0.4
J_5	14.0	0.8

3. ขั้นตอนการประกอบชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิและวิธีการทดลอง

ในการทดสอบแบบ moving piston จะทำการประกอบชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิเข้ากับชุดทดสอบที่บริเวณด้านล่าง ซึ่งอยู่เหนือทางออกของ die เท่ากับ 10 มม. และทำการต่อชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิเข้ากับชุดตรวจวัด

ข้อมูลความเร็วสูง (high speed data logging system) จากนั้นตั้งอุณหภูมิทดสอบตามที่ต้องการโดยใช้อุปกรณ์ให้ความร้อนแบบแท่งกลมคาร์บอนร่วมกับชุดควบคุมอุณหภูมิของ DIGICON รุ่น DD6 RTD Pt-100 Ω เมื่อได้อุณหภูมิทดสอบตามที่ต้องการแล้วจึงทำการบรรจุเม็ดพอลิเมอร์เข้าทางด้านบนของชุดทดสอบ และทำการประกอบ piston เข้ากับ cross-head ของเครื่องทดสอบแรงดึง โดยใช้ piston อัดเม็ดพอลิเมอร์ให้แน่น จากนั้นรอให้เกิดการหลอมเหลว จนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากันทั้งระบบ (isothermal) เป็นเวลาประมาณ 60 นาที (Sentmanat and Dealy, 1995) และเริ่มทำการทดลองโดยเคลื่อนที่ของ piston อัดพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ความเร็วต่างๆ กัน ดังแสดงใน Figure 1 (a) ในขณะที่การทดสอบแบบ moving sensor จะทำการประกอบชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ เข้ากับ moving rod ที่ประกอบบน cross-head เพื่อเคลื่อนที่ชุดวัดอุณหภูมิผ่านพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งอยู่กับที่ในห้องหลอมที่ความเร็วต่างๆ กัน โดยมีขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกับการทดสอบแบบ moving piston ดังแสดงใน Figure 1 (b) ซึ่งผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการทดสอบและอุปกรณ์การทดสอบได้จากผลงานที่ตีพิมพ์ของ Sombatsompop และ Patcharaphun (2001)

4. วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท คำเคมีภัณฑ์สยาม จำกัด ซึ่งแสดงรายละเอียดดัง Table 2

Table 2. Raw materials and initial bulk melt temperature testing

Polymer types	Grade	Initial bulk temperature testing (°C)
1. Polypropylene (PP)	P700J	190, 210, 230
2. High Density Polyethylene (HDPE)	H5690S	170, 190, 210
3. Low Density Polyethylene (LDPE)	LD1905F	190
4. Polystyrene	GPPS	230

5. ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston และ sensor

การควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston และ sensor ได้มาจากระบบขับเคลื่อนที่ใช้ในเครื่องทดสอบแรงดึง SHIMADZU รุ่น AGS-500D โดยกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ตั้งแต่ 50 ถึง 500 มม./นาที

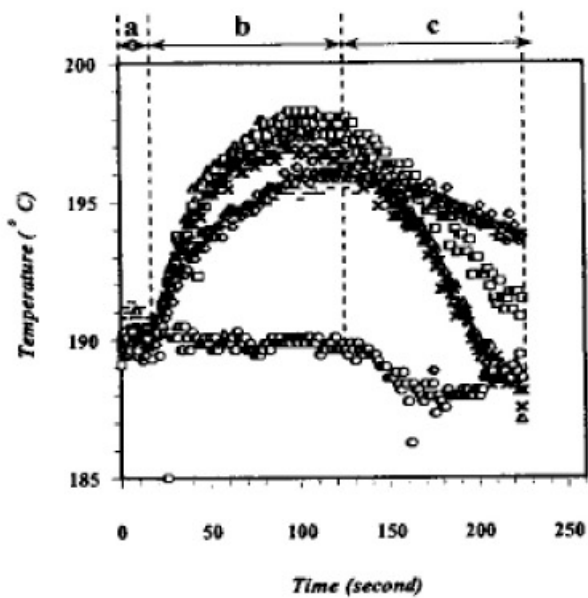
6. อุณหภูมิเริ่มต้นของพอลิเมอร์หลอมเหลวก่อนการทดสอบ

อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง จะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบด้วย โดยพิจารณาจากค่าความหนืด (viscosity) ของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ และระยะเวลาที่สามารถทำการทดสอบได้โดยค่าความหนืดไม่เปลี่ยนแปลงจากเครื่องทดสอบสมบัติทางการไหล (rheometer) ของบริษัท Instron รุ่น 4467 ซึ่งมีอัตราส่วนความยาว ต่อ เส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) เท่ากับ 43.75/1.255 และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของ piston เท่ากับ 9.26 มม. ดังแสดงใน Table 2

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่ได้

1. การอธิบายและวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้โดยทั่วไป

เมื่อพิจารณารูปแบบการแจกแจงของอุณหภูมิของการทดสอบแบบ moving piston ดังแสดงใน Figure 3 โดยใช้พอลิเมอร์ชนิดพอลิโพรพิลีน (PP) ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 190 °C ณ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston เท่ากับ 50 มม. / นาที ซึ่งทำการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ตามพื้นที่หน้าตัดของท่อกลมในชุดทดสอบ ผลการทดลองทั่วไปพบว่า ในช่วงแรก (ช่วง a) ของการเคลื่อนที่ อุณหภูมิที่วัดได้มีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากว่าขณะที่ piston เคลื่อนที่



Δ r/R = 0, □ r/R = 0.2, × r/R = 0.4,
◇ r/R = 0.6, - r/R = 0.8, ○ Barrel Temperature

Figure 3. Temperature profiles and time for PP melt at a initial bulk temperature of 190 °C with piston speed of 50 mm.min⁻¹ (moving piston)

อัดลงมายังไม่เกิดการไหลของพอลิเมอร์ในทันที ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถในการอัดตัวได้ภายใต้ความดัน (compressibility) ของพอลิเมอร์ (Yue and Wood, 1994 a) หลังจากนั้นอุณหภูมิจึงเริ่มเพิ่มสูงขึ้น (ช่วง b) เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มมีการไหลจากห้องหลอมเหลวผ่าน die ออกมา ซึ่งในระหว่างการไหลนี้จะเกิดการเสียดสีของสายโซ่โมเลกุลภายในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว ส่งผลให้

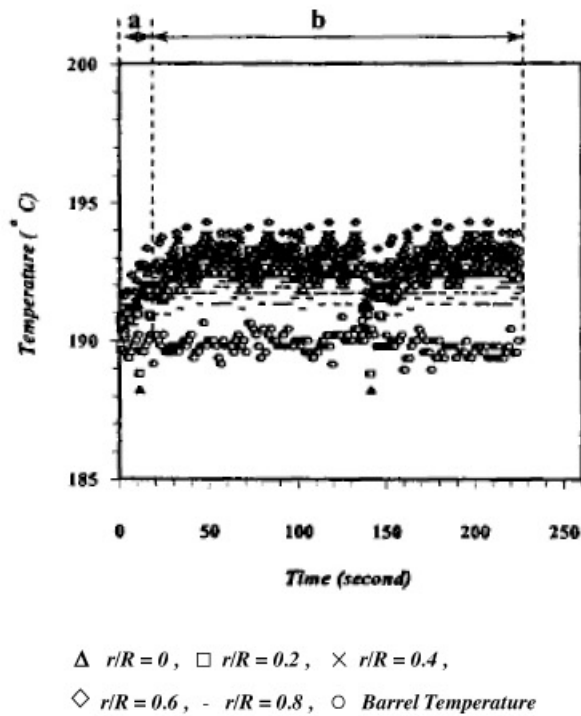


Figure 4. Temperature profiles and time for PP melt at a initial bulk temperature of 190 °C with sensor speed of 50 mm.min⁻¹ (moving sensor)

เกิดความร้อนเพิ่มสูงขึ้น จากนั้นอุณหภูมิเริ่มลดลง (ช่วง c) จนกระทั่งสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของ piston ซึ่งการลดลงของอุณหภูมินี้เกี่ยวข้องกับรูปร่างการไหลที่เกิดขึ้น และการถ่ายเทความร้อนจากพอลิเมอร์หลอมเหลวไปยังผนังของห้องหลอม ซึ่งได้อธิบายไว้โดยละเอียดจากงานวิจัยของ Sombatsompop และ Chaiwattanpipat (2000)

จาก Figure 4 แสดงรูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิของการทดลองแบบ moving sensor โดยใช้พอลิเมอร์ชนิดเดียวกัน ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 190 °C ณ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของชุดวัดอุณหภูมิเท่ากับ 50 มม. / นาที ผลการทดลองทั่วไปพบว่า อุณหภูมิจะเริ่มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเริ่มคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของชุดวัดอุณหภูมิ โดยการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในช่วงแรก (ช่วง a) ของการทดสอบมาจากชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิเกิดการเสียดสีกับพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งอยู่กับที่ในห้องหลอม และการที่อุณหภูมิคงที่ในช่วงหลัง (ช่วง b) เนื่องจากอัตราการสูญเสียความร้อน (heat loss) ของชุดเครื่องมือวัดมีค่าเท่ากับความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดสีระหว่างชุดเครื่องมือวัดกับพอลิเมอร์หลอมเหลว

เมื่อพิจารณารูปแบบการแจกแจงของอุณหภูมิตามแนวรัศมี (radial temperature profile) ของ PP ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston เท่ากับ 50 มม./นาที ณ เวลาต่างๆ ดังแสดงใน Figure 5 พบว่า ในตอนเริ่มแรก (0 วินาที) ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่ง (r/R) มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อเวลาผ่านไป 56 วินาที รูปร่างการแจกแจงอุณหภูมิเริ่มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเสียดสีของสายโซ่โมเลกุลขณะเกิดการไหล โดยเมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งที่วัดได้ พบว่าที่ตำแหน่ง r/R เท่ากับ 0.8 และ 0.6 มีค่าสูงเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความเค้นแรงเฉือนและอัตราเฉือนที่ยังคงสูงอยู่ (Brydson, 1981) และที่ตำแหน่ง r/R เท่ากับ 0.4 มีค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่ำกว่า เนื่องจากในตำแหน่งนี้มีความเค้นแรงเฉือนและอัตราเฉือนเกิดขึ้นน้อยกว่า และในตำแหน่ง r/R เท่ากับ 0 ซึ่งเป็น

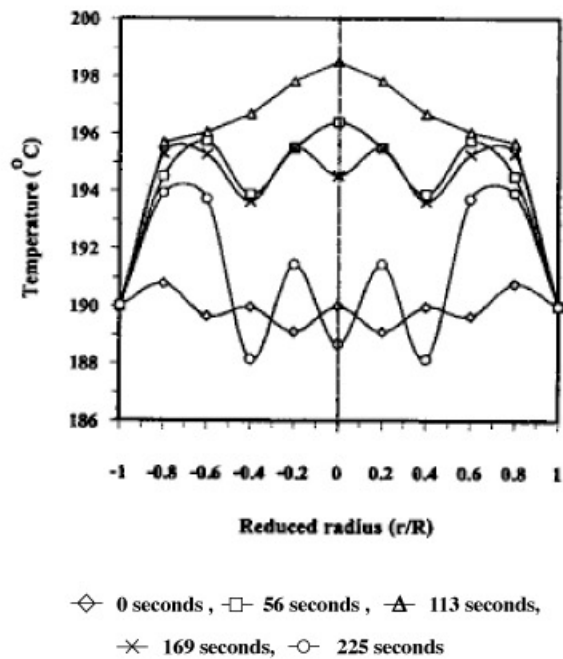


Figure 5. Radial temperature profiles for PP melt at piston speed of 50 mm.min⁻¹ as a function of r/R position for different time (moving piston)

ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิที่กึ่งกลางของห้องหลอมเหลว เป็นตำแหน่งที่มีค่าอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งจากงานวิจัยของ Sombatsompop (1998) พบว่าในบริเวณนี้พอลิเมอร์มีความเร็ว ระยะทางและเวลาในการไหลมากที่สุด ส่งผลให้อุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงตามไปด้วย โดยรูปร่างการแจกแจงอุณหภูมิมีค่าสูงสุดที่เวลา 113 วินาที จากนั้นที่เวลา 169 วินาที จึงเริ่มลดลง เนื่องจากผลของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น (Sombatsompop and Chaiwattanpipat, 2000) เมื่อเวลาสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของ piston คือ 225 วินาที รูปร่างการแจกแจงอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งจะมีค่าลดลงใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มแรกของการทดสอบโดยเฉพาะบริเวณตรงกลาง ในขณะที่ตำแหน่ง r/R เท่ากับ 0.6 และ 0.8 ยังคงมีอุณหภูมิสูง ทั้งนี้อาจเกิดจากรูปร่างการไหลของพอลิเมอร์ได้พัฒนาเต็มที่แล้วทำให้ความร้อนเริ่มถ่ายเทจากบริเวณตรงกลางซึ่งมีความเค้นเฉือน (shear rate) ต่ำไปยังด้านข้างซึ่งมีความเค้นเฉือนสูงและเกิดความร้อนสะสมเพิ่มขึ้นอยู่ตลอดเวลาขณะไหล

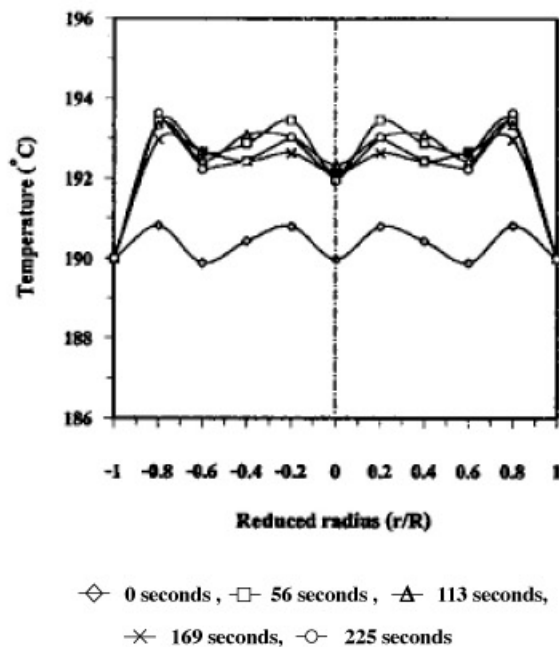


Figure 6. Radial temperature profiles for PP melt at sensor speed of $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ as a function of r/R position for different time (moving sensor)

จาก Figure 6 เป็นรูปแบบการแจกแจงของอุณหภูมิตามแนวรัศมี (radial temperature profile) ของ PP ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิเท่ากับ $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ณ เวลาต่าง ๆ กัน จากการทดลองโดยทั่วไป พบว่า ในตอนเริ่มแรก (0 วินาที) ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละจุดมีค่าใกล้เคียงกัน จากนั้นที่เวลาในการเคลื่อนที่ 56 วินาที รูปร่างการแจกแจงของอุณหภูมิเริ่มเพิ่มสูงขึ้นในลักษณะใกล้เคียงกันในทุกตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิผ่านพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งอยู่กับที่ในห้องหลอมเหลวในลักษณะแบบพร้อมกันของทุกตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ ซึ่งอาจเปรียบเสมือนกับการไหลแบบ plug flow ของระบบ ส่งผลให้อุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกัน และเป็นความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเสียดสีระหว่างชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิกับพอลิเมอร์หลอมเหลว จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งเริ่มมีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เท่ากันระหว่างชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิและพอลิเมอร์หลอมเหลว

เมื่อพิจารณารูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ได้จากการทดสอบแบบ moving piston และ moving sensor เปรียบเทียบกัน จะพบว่าแตกต่างกันอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะการไหลในระบบที่แตกต่างกัน กล่าวคือ การทดสอบแบบ moving piston การไหลที่เกิดขึ้นในระบบจะเป็นแบบ parabolic shear flow และเกิดการพัฒนารูปร่างการไหลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละจุดมีค่าไม่เท่ากัน (Sombatsompop, 1998) ในขณะที่การทดสอบแบบ moving sensor การไหลที่เกิดขึ้นในระบบจะเป็นแบบ plug flow ซึ่งเปรียบเสมือนพอลิเมอร์หลอมเหลวเคลื่อนที่ผ่านชุดวัดอุณหภูมิด้วยความเร็วที่เท่ากันทุกจุดโดยไม่มีการพัฒนารูปร่างการไหล ดังนั้นอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งตามพื้นที่หน้าตัด (r/R) จึงมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อนำผลของค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นจากการเคลื่อนที่ของชุดวัดอุณหภูมิ มาหักลบออกจากค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากการเคลื่อนที่ของ piston อัตราพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ความเร็วเท่ากับ $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ทำให้ได้รูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่แท้จริง

(true radial temperature profile) หรือปรับแก้ค่าแล้ว (corrected) เปรียบเทียบกับที่ยังไม่ได้มีการปรับแก้ (uncorrected) ดังแสดงใน Figure 7 โดยทั่วไปพบว่า มีรูปแบบคล้ายคลึงกับ Figure 5 อย่างไรก็ตามรูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิที่แท้จริงนี้จะมีค่าต่ำกว่า

2. ผลกระทบของอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ทดสอบต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของ PP

Table 3 แสดงค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุด (ΔT_{max}) ของพอลิเมอร์ชนิด PP ณ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston เท่ากับ 50 มม./นาที ที่อุณหภูมิการทดสอบต่างๆ

กัน ซึ่งจะพบว่าค่า ΔT_{max} ของการทดสอบแบบ moving piston มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการทดสอบเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิให้กับพอลิเมอร์หลอมเหลว เป็นการเพิ่มพลังงานให้กับสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์เกิดการสั่นตัว (mobility) เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดสีมีค่าสูงมากขึ้นด้วย (Yue and Wood, 1994 b) และอาจมีผลมาจากรูปแบบการไหลของระบบที่มีลักษณะแบบ parabolic shear flow ในขณะที่ค่า ΔT_{max} ของการทดสอบแบบ moving sensor มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นนี้มาจากการเสียดสีกันระหว่างชุดวัดอุณหภูมิกับพอลิเมอร์

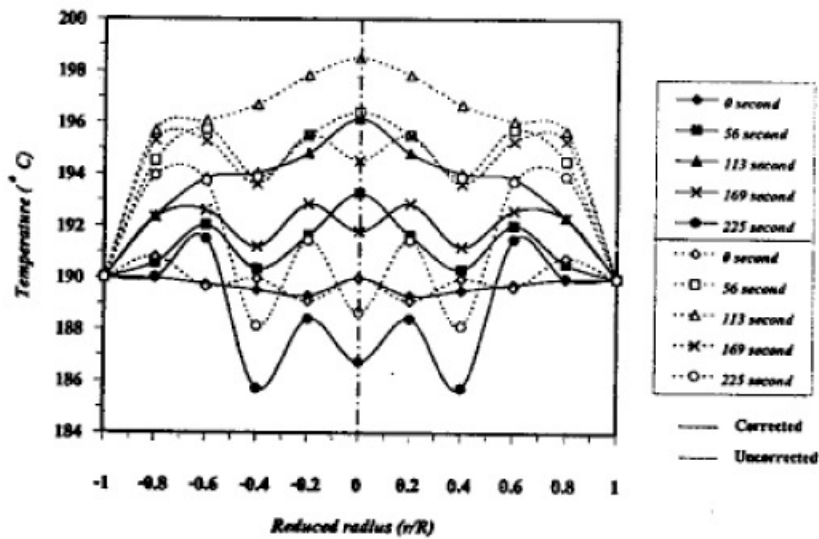


Figure 7. Uncorrected and corrected radial temperature profiles for PP melt at sensor speed of 50 mm.min⁻¹ as a function of r/R position for different time (dashed line : uncorrected) (solid line : corrected)

Table 3. Effect of different initial bulk temperature of PP melt on maximum temperature rise (ΔT_{max}) at piston speed of 50 mm.min⁻¹

Test Temperature (°C)	ΔT_{max} (°C) Moving Piston	ΔT_{max} (°C) Moving Sensor	ΔT_{max} (°C) Corrected
190	8.0	4.0	4.0
210	9.0	3.5	5.5
230	11.5	3.5	8.0

Table 4. Effect of different piston and sensor speed on maximum temperature rise (ΔT_{max}) at a initial bulk temperature of PP melt 190 °C

Test Temperature (°C)	Speed (mm/min)	ΔT_{max} (°C) Moving Piston	ΔT_{max} (°C) Moving Sensor	ΔT_{max} (°C) Corrected
190	50	8.0	4.0	4.0
	100	9.0	3.5	5.5
	200	9.0	3.0	6.0
	300	6.0	3.5	2.5
	500	5.5	3.0	2.5

หลอมเหลวซึ่งมาจากรูปแบบการไหลที่มีลักษณะแบบ plug flow และเมื่อพิจารณาว่า ΔT_{max} ที่ได้ทำการปรับแก้โดยการหักลบกันระหว่าง ΔT_{max} ของการทดลองแบบ moving sensor และ moving sensor พบว่ายังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุผลเดียวกับที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น

3. ผลกระทบของความเร็วที่ใช้ทดสอบต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของ PP

จาก Table 4 เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุด ΔT_{max} ของ PP ณ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston เท่ากับ 50, 100, 200, 300 และ 500 มม./นาที ตามลำดับ ที่อุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 190 °C พบว่าค่า ΔT_{max} จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston เพิ่มสูงขึ้น จนถึงที่ความเร็ว 200 มม./นาที ทั้งนี้เนื่องจากอัตราเฉือน (shear rate) ที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วย (Yue, 1994) อย่างไรก็ตามพบว่า ที่ความเร็วในการอัดรีดเท่ากับ 300 และ 500 มม./นาที ค่า ΔT_{max} มีค่าน้อยลง เนื่องจากว่า เวลาที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลอยู่ในระบบ (residence time) มีค่าลดลง และจากการที่พอลิเมอร์มีค่าการนำความร้อนที่ต่ำ (Sombatsompop and Wood, 1997) ส่งผลให้ความร้อนที่สะสมภายในเนื้อพอลิเมอร์มีค่าลดลงตามไปด้วย

หากพิจารณาค่า ΔT_{max} ของการทดสอบแบบ moving sensor จะพบว่าโดยภาพรวมแล้วค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นนี้มาจากการเสียดสีกันระหว่างชุดวัดอุณหภูมิกับพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งมา

จากรูปแบบการไหลที่มีลักษณะแบบ plug flow ดังที่กล่าวมาแล้ว

4. ผลกระทบของชนิดพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น

เมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพอลิเมอร์ชนิด PP เปรียบเทียบกับ PS โดยพิจารณาค่าอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของการวัดตามพื้นที่หน้าตัด (r/R) จากรูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่ได้ทำการปรับแก้แล้ว โดยเลือกที่เวลาในการไหลเท่ากับ 113 วินาที ดัง Figure 8 พบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งของ PP มีค่าสูงกว่า PS ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกัน กล่าวคือ ลักษณะโครงสร้างของ PS จะประกอบด้วยหมู่ benzene ซึ่งน่าจะส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการเคลื่อนตัวได้ยากกว่า PP ดังนั้น อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการเสียดสีของสายโซ่โมเลกุลขณะเกิดการไหลจึงมีค่าน้อยกว่า (Yue and Wood, 1994a) อีกทั้ง PP มีค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ที่สูงกว่า PS ส่งผลให้การแพร่กระจายของความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อพอลิเมอร์มีค่ามากกว่าด้วย (Sombatsompop and Wood, 1997)

จาก Figure 9 เมื่อพิจารณารูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิตามแนวรัศมีที่แท้จริง หรือที่ทำการปรับแก้แล้ว โดยเลือกที่เวลาในการไหลเท่ากับ 113 วินาที ของ PP, HDPE และ LDPE เปรียบเทียบกันที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston เท่ากับ 50 มม./นาที ใช้อุณหภูมิทดสอบ 190 °C โดยทั่วไปพบว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ

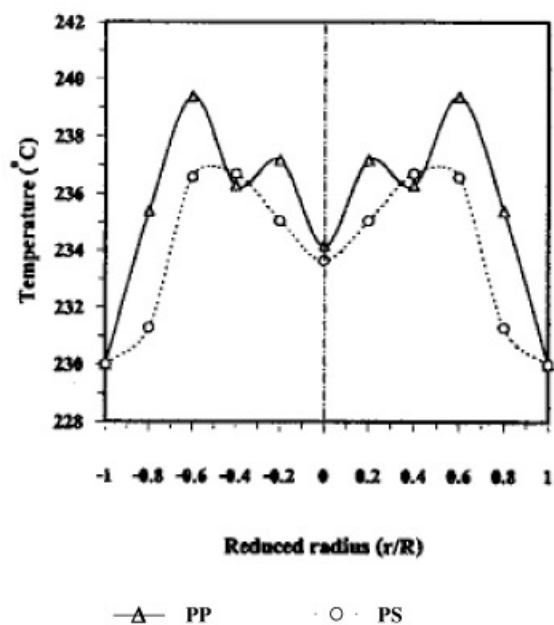


Figure 8. Corrected radial temperature profiles for PP and PS melt at piston speed of 50 mm.min⁻¹ as a function of r/R position

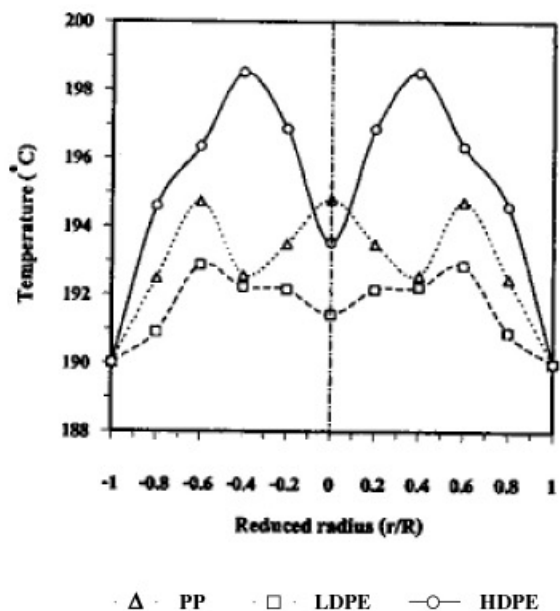


Figure 9. Corrected radial temperature profiles for PP, HDPE and LDPE melt at piston speed of 50 mm.min⁻¹ as a function of r/R position

เนื่องจากการไหลของ HDPE มีค่าสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิทดสอบนี้ HDPE ยังคงมีความหนืดที่สูงมากเมื่อเทียบกับ PP และ LDPE (โดยพิจารณาผลการทดลองจากเครื่อง rheometer) และเมื่อพิจารณาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ PP เปรียบเทียบกับ LDPE พบว่า PP มีค่าสูงกว่า LDPE

5. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี (เฉพาะในกรณีของพอลิเมอร์ชนิด PP)

สมการที่ 3 ใช้หาค่า ΔT_{max} ที่เกิดขึ้นบริเวณตรงกลางของท่อกลม จากการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวประเภท shear thinning (Agassant และคณะ, 1991) คือ

$$\Delta T_{max} = T_{(0)} - T_w = \frac{K}{k} \left(\frac{n}{3n+1} \right)^{1+n} \frac{V^{n+1}}{R^{n-1}} \quad (3)$$

เมื่อ K คือ ค่า power law consistency n คือ ค่า power law index V คือ ค่าความเร็วเฉลี่ยในการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว k คือ ค่า thermal conductivity R คือ รัศมีของท่อกลมซึ่งมีค่าเท่ากับ 17.5 มม. $T_{(0)}$ คืออุณหภูมิภายในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลว และ T_w คืออุณหภูมิที่ผนังท่อกลม ซึ่งตัวแปรต่างๆ สามารถสรุปได้ดัง Table 4 (โดยค่า K และ n หาได้จากเครื่องคาลอรีมิเตอร์ ซึ่งผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมเกี่ยวกับวิธีการทดสอบและอุปกรณ์การทดสอบได้จากงานของ Patcharaphun (2001)

เมื่อทำการแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการข้างต้น จะได้ค่า ΔT_{max} จากการคำนวณในทางทฤษฎี เปรียบเทียบกับค่า ΔT_{max} ที่ได้จากการทดลอง ดังแสดงใน Table 5 ซึ่งพบว่าค่า ΔT_{max} ที่ได้จากการคำนวณในทางทฤษฎีมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วการเคลื่อนที่ของ piston มีค่าสูงขึ้น ซึ่งแตกต่างกับค่า ΔT_{max} ที่ได้จากการทดลองกล่าวคือ จะมีค่าสูงสุดที่ความเร็วในการเคลื่อนที่เท่ากับ 200 มม./นาที่ จากนั้นจะมีค่าน้อยลง ทั้งนี้เนื่องจาก residence time ที่มีค่าลดลง ดังที่กล่าวไว้แล้ว และเมื่อพิจารณาค่า ΔT_{max} ที่ได้จากการคำนวณในทางทฤษฎี เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มขึ้น ณ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston เท่า

Table 5. Comparison the maximum temperature rise (ΔT_{max}) between experimental and theoretical of PP melt

Type of Polymer	Test Temperature (°C)	Piston Speed (mm/min)	ΔT_{max} (°C)	
			Theoretical	Experimental (Corrected)
PP	190	50	0.07	4.0
		100	0.18	5.5
		200	0.49	6
		300	0.87	2.5
		500	1.75	2.5
	210	50	0.06	5.5
		100	0.14	6
		200	0.39	6.5
		300	0.70	7
		500	1.41	4.5
	230	50	0.05	8
		100	0.11	11
		200	0.32	12.5
		300	0.57	10.5
		500	1.16	8.5

กัน พบว่า ค่า ΔT_{max} มีค่าน้อยลง ซึ่งแตกต่างกับค่า ΔT_{max} ที่ได้จากการทดลอง กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิการทดสอบเพิ่มสูงขึ้นค่า ΔT_{max} ที่จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มพลังงานให้กับสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ ดังที่กล่าวไว้แล้ว

จาก Table 5 พบว่าค่า ΔT_{max} ของ PP ที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี เมื่อเปรียบเทียบกับค่า ΔT_{max} ที่ได้จากการทดลอง มีความแตกต่างกันมาก ซึ่งอาจมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1. สมมติฐานที่ตั้งขึ้นในทางทฤษฎีเพื่อใช้ในการคำนวณ แตกต่างจากความเป็นจริง ยกตัวอย่างเช่น ไม่เกิดการถ่ายเทความร้อนขณะไหล (isothermal) ซึ่งถึงแม้ว่าการทดลองจะเริ่มต้นที่อุณหภูมิ isothermal แต่ระหว่างการไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเนื้อพอลิเมอร์อย่างต่อเนื่องรวมถึงการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น (Yue and Wood, 1994 b) และจากรูปร่างการไหล (flow pattern) ที่สมมติฐานกำหนดว่ารูปร่างการไหลมีค่าคงที่ตลอดการไหลภายในท่อ แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมา (Sombatsompop *et al.*, 1997) พบว่ารูปร่างการไหล

แท้จริงที่เกิดขึ้นมีลักษณะแตกต่างกับทางทฤษฎีอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีสาเหตุให้อุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งตามพื้นที่หน้าตัดของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกมีค่าแตกต่างกันด้วย อีกทั้งจากสมมติฐานที่ว่า ของไหลไม่สามารถอัดได้ด้วยควมดัน ซึ่งจากงานวิจัยของ Sombatsompop และคณะ (1997) พบว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถอัดได้ด้วยควมดัน และยังส่งผลให้ค่าความหนืด และอุณหภูมิภายในเนื้อพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงไปด้วย

2. ค่าของข้อมูลที่น่ามาใช้ในการคำนวณ เช่น ค่า K และค่า n ที่ได้มาจากการทดสอบในเครื่อง rheometer รวมถึงค่า thermal conductivity (k) ซึ่งมาจากสภาวะการทดสอบที่แตกต่างจากสภาวะการทดสอบในการทดลองนี้ ดังนั้น อาจส่งผลให้ค่าที่ได้เกิดความแตกต่างกัน (Sombatsompop และ Panapoy, 2000)

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นการตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่แท้จริงของพอลิเมอร์หลอมเหลวในห้อง

หลอมที่มีพื้นที่หน้าตัดกลม โดยใช้ระบบการเคลื่อนที่ของชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (moving sensor) ผ่านพอลิเมอร์หลอมเหลวซึ่งอยู่กับที่ในห้องหลอม (barrel) ซึ่งสามารถสรุปเป็นสาระสำคัญได้ดังต่อไปนี้

1. จากการทดสอบแบบ moving piston โดยศึกษาผลของความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston อุณหภูมิทดสอบ และชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบ ผลการทดลองโดยทั่วไปสรุปว่ารูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้นประมาณ 6 ถึง 12 °C ตามความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston เนื่องจากรูปร่างการไหลของพอลิเมอร์ที่มีลักษณะแบบ parabolic shear flow อย่างไรก็ตาม ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ piston สูงๆ พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีค่าน้อยลง ทั้งนี้เนื่องมาจาก residence time ของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาผลในแง่ของการเพิ่มอุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบ พบว่า รูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากรูปร่างการไหล และการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานให้กับสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์เกิดการสั่นตัวมากขึ้น ส่งผลให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสียดสีมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อทำการทดสอบพอลิเมอร์ต่างชนิดกัน พบว่า รูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิที่ได้ต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะโครงสร้าง ค่าการนำความร้อน และความหนืดที่ต่างกันของพอลิเมอร์แต่ละชนิด

2. ในการทดสอบแบบ moving sensor เมื่อศึกษาผลของความเร็วในการเคลื่อนที่ของชุดวัดอุณหภูมิ อุณหภูมิทดสอบ และชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ทดสอบ โดยทั่วไปพบว่า รูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิที่ได้ มีความคล้ายคลึงกัน และค่าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นมีค่าประมาณ 3 ถึง 5 °C ซึ่งหมายความว่า ปัจจัยดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ กล่าวคืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมาจากความร้อนที่ได้จากการเสียดสีระหว่างชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิกับพอลิเมอร์หลอมเหลวในระบบที่มีลักษณะการไหลแบบ plug flow

3. เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่ได้จากการทดสอบแบบ moving sensor หักลบออกจากค่าอุณหภูมิที่ได้จาก moving piston ทำให้ได้รูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิที่แท้จริงของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหล ซึ่งมีค่าประมาณ 5 ถึง 7 °C เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิที่แท้จริงที่ได้จากการทดลอง

เปรียบเทียบกับทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณ ในลักษณะรูปร่างการแจกแจงอุณหภูมิตามแนวรัศมี และค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสูงสุด (ΔT_{max}) ในแต่ละตำแหน่งตามพื้นที่หน้าตัดของท่อกลม (r/R) พบว่า มีค่าแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาวะการทดสอบที่แตกต่างกัน ซึ่งอาจไม่เหมือนกับสภาวะในการทดลองนี้ การทดลองนี้ รวมถึงสมมติฐานที่กำหนดขึ้นในทางทฤษฎีที่แตกต่างกับความ เป็นจริง

เอกสารอ้างอิง

- Agassant, J-F., Avenas, P., Sergent, J-Ph and Carreau, P.J. 1991. Polymer Processing Principles and Modeling, New York, Hanser Publishers.
- Brydson, J.A. 1981. Flow Properties of Polymer Melts, London, George Godwin Limited.
- Chaiwattanpipat, W. 1999. M.Eng. Thesis, Design and Development of Experimental Apparatus for Determination of Melt Temperature Profiles in Flowing Polymer Melt in Injection Moulding, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, : 32-33.
- Hulatt, M. and Wilkinson, W.L. 1977. Temperature Measurement in Polymer Melts Flowing in Ducts, Plastics and Rubber Processing, March: 15-18.
- Patcharaphun, S. 2001. M.Eng. Thesis, Measurements of True Polymer Melt Temperature in a Circular Cross-sectional Duct By Moving Temperature Sensor, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, : 31-48.
- Sentmanat, M.L. and Dealy, J.M. 1995. Some Factors Affecting Capillary Rheometer Performance, SPE ANTEC, 41(1) : 1068-1072.
- Sombatsompop, N., Wood, A.K. and Yue, M.Z. 1996. Techniques for The Simultaneous Determination of Temperature and Velocity Profiles in Flowing Polymer Melts, ASME Fluid Measurements and Instrumentation, FED, 239(4) : 371-377.
- Sombatsompop, N., Tan, M.C. and Wood, A.K. 1997. Flow Analysis of Natural Rubber in a Capillary Rheometer : Part 1. Rheological Behavior and Flow Visualization in the Barrel, Polymer En-

- gineering and Science, 37(2) : 270-280.
- Sombatsompop, N. and Wood, A.K. 1997. Measurement of Thermal Conductivity of Polymers Using an Improved Lee's Disc Apparatus, *Polymer Testing*, 16(3) : 203-223.
- Sombatsompop, N., Liolios, K., Mohsd Jamel, M.H. and Wood, A.K. 1997. Techniques for Pressure-Density-Volume-Temperature Measurement of Polymer Melts, *Polymers & Polymer Composites*, 5(4) : 259-264.
- Sombatsompop, N. 1998. Relationship between Temperature Profiles and Flow Pattern of Flowing Polymer Melts, *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 20(4) : 455-463.
- Sombatsompop, N. and Chaiwattanpipat, W. 2000. Temperature Distributions of Molten Polypropylene During Injection Molding, *Advances in Polymer Technology*, 19(2) : 79-86.
- Sombatsompop, N. and Panapoy, M. 2000. Effect of Screw Rotating Speed on Polymer Melt Temperature Profiles in Twin Screw Extruder, *Journal of Materials Science*, 35(24) : 6131-6137.
- Sombatsompop, N. and Patcharaphun, S. 2001. A New Experimental Method for Determining Simultaneously True Radial Temperature Profiles of Polymer Melt under Isothermal Capillary Flow, *Polymer Journal*, 33(6) : 491-494.
- Wood, A.K., Judeh, Y.H. and Yue, M.Z. 1996. Two - Three Dimensional Temperature Sensors, Patent Application GB 2291197, January.
- Yue, M.Z, Wood, A.K. 1994 a. Pressure Effect on Temperature Measurement of Polymer Melts, *Polymer Bulletin*, No.33 : 127-132.
- Yue, M.Z. and Wood, A.K. 1994 b. Temperature Profiles and Shear Heating Effect in Polymer Processing, *SPE ANTEC*, 40(1) : 667-971.