

อิทธิพลของลักษณะหน้าตัดช่องทางไหลที่มีผลต่ออุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในกระบวนการฉีดพลาสติก

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ¹ สมคิด สกุลศุภเศรษฐ์² เอกวิเศษ ไชยนาเคนทร์²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด ทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

สมเจตน์ พชรพันธ์³

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและจัดสร้างชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิและชุดทดสอบที่สามารถปรับเปลี่ยนลักษณะช่องทางไหลได้ เพื่อศึกษาลักษณะช่องทางไหลแบบต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องฉีดพลาสติก โดยใช้ชุดตรวจวัดข้อมูลความเร็วสูงร่วมกับคอมพิวเตอร์ ในการบันทึกและประมวลผลการทดลองที่ได้ผลการทดลองโดยทั่วไปพบว่าในช่วงแรกของการฉีด อุณหภูมิที่วัดได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น จากนั้นอุณหภูมิที่วัดได้เริ่มมีค่าลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการฉีด ซึ่งเกี่ยวข้องกับการเสียดสีของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหล และผลของการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ และการพัฒนารูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ในท่อกกลม เมื่อพิจารณาลักษณะของช่องทางไหลที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ช่องทางไหลที่มี 4 ลักษณะหน้าตัดที่แตกต่างกัน คือ หน้าตัดกลม หน้าตัดกลมรีวง หน้าตัดกากบาท และหน้าตัดสี่เหลี่ยม พบว่าลักษณะช่องทางไหลแบบหน้าตัดกลม มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงสุด คือ ประมาณ 24°C เนื่องจากรูปร่างการไหลและความเร็วในการไหลที่เกิดขึ้น

¹ รองศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ

² นักศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือและวัสดุ

³ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ

Effect of Duct Cross-Section Design on Temperature Profile Measurement of Flowing Polymer Melts in Injection Moulding

Narongrit Sombatsompop¹ **Somkid Sakulsupaset**² **Ekawit Chainaken**²

King Mongkut's University of Technology Thonburi Bangmod, Toongkru, Bangkok 10140

Somjate Patcharaphun³

Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900

Abstract

This article involved designing and manufacturing an experimental apparatus coupled with two thermocouple-network sensors to measure the temperature changes of flowing polymer melts in an injection machine, using a high speed data logger and a computer, under various duct geometries. The results in general suggested that the melt temperature increased at the initial stage and then decreased progressively with screw displacement, this concerning shear heating and heat conduction effects and the flow pattern development of polymer melts in the duct. With the effect of die (duct) geometry, it was found that the circular cross-sectional die gave the highest melt temperature rise, this being about 24 °C as compared to slit, tapered circular and cross ducts due to the nature and the complexity of the flows occurring.

¹ Associate Professor, Materials Technology Program, School of Energy and Materials.

² Under-graduated Student, Tool and Materials Engineering Department.

³ Lecturer, Department of Materials Engineering.

1. บทนำ

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการขึ้นรูปชิ้นงานพอลิเมอร์ที่ใช้กันมากในปัจจุบัน คือ กระบวนการฉีดพลาสติก (Injection molding) ซึ่งมีขั้นตอนการทำงาน คือ ป้อนพอลิเมอร์ที่อยู่ในลักษณะผงหรือเม็ดเข้าทางกรวยเติม (Hopper) และให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์ โดยใช้เข็มขัดให้ความร้อน (Heater band) ร่วมกับหลักการหมุนของสกรู เพื่อให้เกิดการหลอมละลายและเข้ากันเป็นเนื้อเดียว (Homogeneous) ของเนื้อพอลิเมอร์ จากนั้นจึงทำการเคลื่อนที่สกรูอัดพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านหัวฉีดเข้าไปในโพรงแม่แบบ (Mould) ซึ่งมีขนาดและรูปร่างตามชิ้นงานที่ต้องการผลิต โดยมีการติดตั้งระบบน้ำหล่อเย็น (Cooling system) ไว้ภายในแม่แบบ เพื่อให้เกิดการเย็นตัวของชิ้นงาน และนำชิ้นงานออกจากแม่แบบโดยใช้ระบบนำปลดชิ้นงาน

จากขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์ในกระบวนการผลิตมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของชิ้นงานที่ได้ เช่น การเสื่อมสลาย (Degradation) ของพอลิเมอร์ เมื่ออุณหภูมิการผลิตสูงเกินไป หรือ ชิ้นงานที่ได้ไม่เต็มแบบเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตต่ำเกินไป อีกทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น ดังนั้น การควบคุมและการตรวจวัดอุณหภูมิที่ถูกต้องแม่นยำจึงเป็นสิ่งจำเป็น จากงานวิจัยที่ผ่านมา [1] ได้มีการวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องฉีดพลาสติก โดยใช้ชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบใหม่ที่ได้พัฒนามาจากงานวิจัยของ Sombatsompop และคณะ [2] ซึ่งมีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง ไม่ขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว และสามารถวัดอุณหภูมิได้พร้อมกันหลายตำแหน่งในเวลาเดียวกัน โดยทำการวัดอุณหภูมิภายในห้องหลอมที่มีลักษณะช่องทางไหลแบบหน้าตัดกลมในเครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบและพัฒนาชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ และชุดทดสอบที่สามารถปรับเปลี่ยนช่องทางไหลในลักษณะต่างๆ กันได้ เพื่อทำการวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในช่องทางไหลที่มีรูปร่างและลักษณะต่างๆ กันที่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น โดยเปรียบเทียบผลการวัดอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองกับรูปร่างการไหลของยางธรรมชาติขณะไหลในช่องทางไหลที่มีลักษณะต่างๆ กัน ของเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์ [3]

2. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบที่สามารถปรับเปลี่ยนช่องทางไหลที่มีรูปร่างต่างๆ กัน และทำการวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในช่องทางไหลที่มีรูปร่างต่างๆ กันในเครื่องฉีดพลาสติก โดยใช้ชุดทดสอบที่ได้ออกแบบและจัดสร้างขึ้น

3. เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Armstrong [4] ได้ศึกษารูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิตามแนวรัศมีในกระบวนการรีดขึ้นรูป (Extrusion) แล้วเปรียบเทียบผลที่ได้รับจากการทดลองกับรูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิที่ได้จากการใช้แบบจำลองการแจกแจงอุณหภูมิตัวด้วยโปรแกรม LFLOW ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองโดยใช้

พอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ PP, PE โดยควบคุมอุณหภูมิห้องหลอมเหลวให้มีค่า 204 °ซ และทดลองที่ความเร็วสกรู 10, 30 และ 50 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่า รูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิที่ได้จากการใช้เทอร์โมคัปเปิลวัด ค่าจะแตกต่างกันตามชนิดของพอลิเมอร์ โดย PE มีอุณหภูมิสูงกว่า PP และพบว่า การแจกแจงอุณหภูมิที่ได้แตกต่างจากการใช้คอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลอง ทั้งนี้เกิดจากตัวแปรที่เกิดขึ้นในการทดลอง เช่น อุณหภูมิเนื่องจากการเสียดสี ที่ผิดพลาดได้ถึง 2.2 °ซ

Yokoi และคณะ [5] ได้วัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่บริเวณหัวฉีด (Nozzle) ของเครื่องฉีดพลาสติก โดยใช้ชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบ Integrated thermocouple sensor ติดตั้งที่ตำแหน่งต่างๆ ตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดและใช้พอลิเมอร์ชนิด PP ในการทดลอง โดยศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบสกรูต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่วัดได้บริเวณตรงกลางมีค่าสูงกว่าที่บริเวณผนัง เนื่องจากเกิดการเสียดสีของสายโซ่โมเลกุลขณะเกิดการไหล ซึ่งความเร็วการไหลที่บริเวณตรงกลางของห้องหลอมเหลวมีค่าสูงสุด และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของสกรู พบว่าอุณหภูมิที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าที่ความเร็วรอบของสกรูช้า เนื่องจากมีการสะสมความร้อนเพิ่มมากขึ้น เพราะระยะเวลาในการเสียดสีกันของสายโซ่โมเลกุลที่เพิ่มมากขึ้น

Sombatsompop และ Chaiwattanpipat [1] ศึกษาแบบการแจกแจงอุณหภูมิและอิทธิพลของความเร็วในกระบวนการฉีดพลาสติก ในการทดลองนี้ได้วัดอุณหภูมิโดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ได้พัฒนามาจากงานวิจัยของ Sombatsompop และคณะ [2] โดยติดตั้งชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของชุดทดสอบ จากนั้นจึงนำชุดทดสอบประกอบเข้ากับบริเวณด้านหน้าห้องหลอม (Barrel) ในเครื่องฉีดพลาสติก โดยใช้ชุดตรวจวัดข้อมูลแบบความเร็วสูง (High Speed Data Logging System) ร่วมกับคอมพิวเตอร์ในการบันทึกและประมวลผลการทดลองจากการทดลองโดยทั่วไปพบว่า อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่วัดได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดและเริ่มลดลงจนสิ้นสุดการฉีดใน Sensor 1 การลดลงของอุณหภูมิตอนท้ายของการฉีดที่ Sensor 1 มาจากสาเหตุ 2 ประการคือ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นที่บริเวณหัวฉีด (Nozzle) และจากการที่พอลิเมอร์เหลวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจาก Sensor 2 วิ่งมาถึง Sensor 1 ในขณะที่บริเวณ Sensor 2 ไม่มีการลดลงของอุณหภูมิ และเมื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบเนื่องจากความเร็วในการฉีด พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วในการฉีด ค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุด (ΔT_{max}) ที่วัดได้มีค่าน้อยลง

4. อุปกรณ์และวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องฉีดพลาสติก (Injection moulding machine)

ใช้เครื่องฉีดพลาสติกรุ่น Elite 80 ซึ่งผลิตโดยบริษัท Elite Precision Machinery Co., Ltd. โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของห้องหลอมเหลว 106 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางภายในห้องหลอมเหลว 35 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางสกรู (Screw) 30 มม. โดยใช้ตัวแปรในการฉีดดังต่อไปนี้

1.1 ความดันฉีด (Injection pressure)

ความดันฉีดเป็นความดันที่เกิดขึ้นกับพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่หน้าปลายสกรู โดยการเคลื่อนที่สกรูตามแนวแกน ซึ่งความดันนี้สามารถปรับได้โดยตรงที่ความดันของน้ำมันไฮดรอลิก ซึ่งในการทดลองนี้ตั้งไว้ที่ความดันฉีด 80% ของความดันสูงสุด หรือประมาณ 2500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว

1.2 ความเร็วในการฉีด (Injection speed)

ความเร็วในการฉีดเป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของสกรู ซึ่งต้นกำลังมาจากระบบไฮดรอลิก ในการทดลองนี้ใช้ความเร็วในการฉีดเท่ากับ 9 มม.ต่อวินาที

1.3 ความเร็วรอบของสกรู (Screw speed)

ในการทดลองนี้ได้ตั้งความเร็วรอบสกรูไว้ที่ 99% ซึ่งเป็นความเร็วรอบสกรูสูงสุดของเครื่องฉีดพลาสติก (ประมาณ 162 รอบต่อนาที)

1.4 ระยะการฉีด (Shot size)

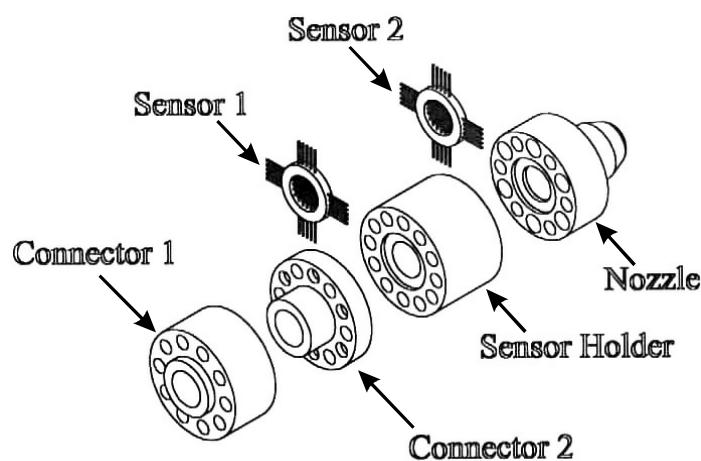
ระยะการฉีดของสกรูคือ ระยะที่สกรูถอยหลัง เพื่อให้เม็ดพลาสติกที่ถูกหลอมเหลวเคลื่อนตัวไปด้านหน้าของสกรูภายในห้องหลอมเหลว ซึ่งในงานวิจัยนี้ตั้งระยะไว้ที่ 135 มม.

1.5 อุณหภูมิเริ่มต้นในการทดสอบ

อุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการทดสอบที่ใช้ คือ 190 °ซ

2. ชุดทดสอบสำหรับการวัดอุณหภูมิ

ชุดทดสอบสำหรับการวัดค่าอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 โดยชุดทดสอบสามารถแบ่งออกเป็นส่วนสำคัญๆ ได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 1 แสดงชุดทดสอบสำหรับการวัดค่าอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องฉีดพลาสติก

2.1 ชุดเชื่อมต่อ 1 (Connector 1)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อชุดทดสอบเข้ากับบริเวณด้านหน้าของห้องหลอมเหลวในเครื่องฉีดพลาสติก ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 106 มม.

เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 35 มม. ยาว 50 มม. และทำเกลียวในขนาด M55x1.5 ลึก 30 มม. เพื่อประกอบกับชุดเชื่อมต่อ 2 โดยประกอบกับชุดเชื่อมต่อ 1 เข้ากับห้องหลอมเหลวของเครื่องฉีดพลาสติกนั้น การยึดจะใช้สกรูขนาด M12 จำนวน 10 ตัวทำการยึดชุดเชื่อมต่อ 1 เข้ากับห้องหลอมเหลว

2.2 ชุดเชื่อมต่อ 2 (Connector 2)

ประกอบเข้ากับชุดเชื่อมต่อ 1 และชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับห้องหลอมเหลวและชุดเชื่อมต่อ 1

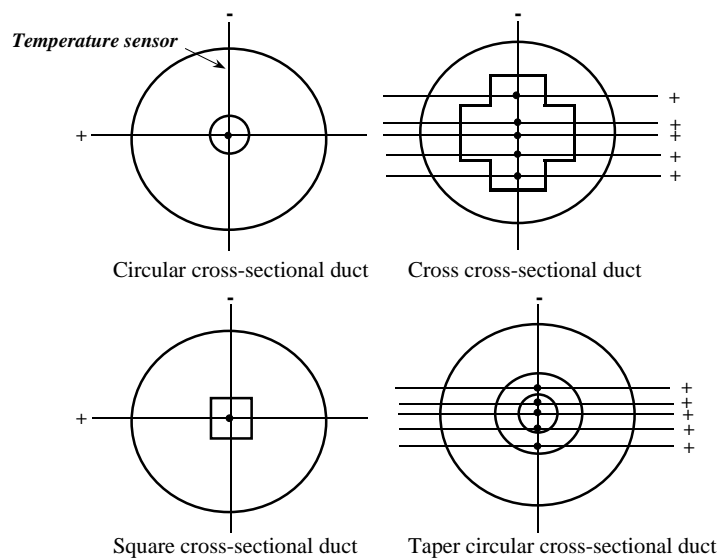
2.3 ชุดประกอบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Sensor Holder)

ประกอบด้วยชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่จัดสร้างขึ้น โดยวางชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (sensors 1 และ 2) ไว้ที่บริเวณปลายทั้งสองด้านของชุดประกอบ การออกแบบชุดประกอบนี้ได้ออกแบบเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างช่องทางไหลในแบบต่างๆ ได้ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 106 มม. ยาว 70 มม.

2.4 ชุดทางไหล

ชุดทางไหลทำหน้าที่เป็นช่องทางไหลสำหรับพอลิเมอร์หลอมเหลว ดังแสดงในรูปที่ 2 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของลักษณะช่องทางไหลในแบบต่างๆ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหล โดยประกอบชุดทางไหลไว้ภายในชุดประกอบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ขนาดความยาวของชุดทางไหลเท่ากับ 62 มม. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 43.5 มม. พร้อมทั้งทำเกลียวนอกขนาด M10x1.5 ตลอดความยาว ซึ่งมีลักษณะแตกต่างกัน 4 ลักษณะ คือ

1. ช่องทางไหลหน้าตัดกลม (Circular cross-sectional duct)
2. ช่องทางไหลสี่เหลี่ยม (Square cross-sectional duct)
3. ช่องทางไหลกากบาท (Cross cross-sectional duct)
4. ช่องทางไหลกลมเรียว (Taper circular cross-sectional duct)



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของช่องทางไหลแบบต่างๆ ในชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

2.5 ชุดหัวฉีด (Nozzle)

ชุดหัวฉีดทำหน้าที่เป็นทางผ่านของพอลิเมอร์เหลวไปยังแม่พิมพ์ ในงานวิจัยนี้ เป็นหัวฉีดแบบตรงที่มีลักษณะเหมือนกับที่ใช้งานจริง โดยรูฉีดที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3 มม.

3. ชุดให้ความร้อน (Heater)

ชุดให้ความร้อนที่ใช้เป็นแบบเข็มขัดรัด (Heater Band) ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ห้องหลอมเหลวและหัวฉีดของเครื่องฉีดพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 106 มม. ยาว 145 มม. กำลังไฟฟ้า 1400 วัตต์ ให้ความร้อนได้สูงสุด 900 °ซ

4. ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature control)

ชุดควบคุมอุณหภูมิ ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิห้องหลอมเหลวและชุดทดสอบให้ได้อุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการทดสอบตามที่ต้องการ โดยชุดควบคุมอุณหภูมิที่บริเวณห้องหลอมเหลว และบริเวณหัวฉีด เป็นแบบ RKC รุ่น DB-480 BIC-M มีการแสดงผลแบบเข็มชี้ มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1% มีช่วงอุณหภูมิใช้งาน 0-399 °ซ ทำงานร่วมกับลวดเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. ยาว 1000 มม. มีช่วงอุณหภูมิใช้งาน 0-350 °ซ ซึ่งหัวเทอร์โมคัปเปิลจะถูกฝังไว้ที่ผนังห้องหลอมเหลวและหัวฉีด ในขณะที่ชุดควบคุมอุณหภูมิที่บริเวณชุดทดสอบ จะใช้ของ DIGICON รุ่น DD-6 แบบ RTD Pt-100 Ω สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ในช่วง 0-399 °ซ ต่อเข้ากับอุปกรณ์ตัดต่อไฟฟ้าด้วยกำลังแม่เหล็ก (Magnetic switch) เพื่อใช้ควบคุมอุณหภูมิจากบริเวณชุดทดสอบให้มีอุณหภูมิตามต้องการ

5. ชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Temperature sensor)

ลักษณะของชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2 กล่าวคือ ใช้ลวดเทอร์โมคัปเปิลแบบเปลือย ชนิด K ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มม. ประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ เชื่อมต่อกันในลักษณะแบบจุด (Spot arc welding) ซึ่งทำให้ได้รอยเชื่อมที่มีขนาดเล็กเท่ากับขนาดของลวดเทอร์โมคัปเปิล ไม่ขัดขวางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว และทำให้อุณหภูมิที่วัดได้มีความเที่ยงตรง [2] โดยการออกแบบชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ขึ้นอยู่กับรูปร่างลักษณะของช่องทางไหลด้วย โดยวัดอุณหภูมิภายในช่องทางไหลกลม และช่องทางไหลสี่เหลี่ยมที่ตำแหน่ง $r/R=0$ (ที่บริเวณจุดศูนย์กลางของช่องทางไหล) เพียง 1 ตำแหน่ง ในขณะที่ช่องทางไหลรูปกากบาทและช่องทางไหลกลมเรียววัดอุณหภูมิ 5 ตำแหน่ง คือ J1 ถึง J5 ซึ่งแสดงในรูปของ Reduced radius (r/R) เมื่อ r (h) คือ ตำแหน่งของการวัดซึ่งห่างจากจุดศูนย์กลางของท่อ และ R (H) คือ รัศมี (ความสูง) ของท่อ โดยรายละเอียดของตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในช่องทางไหลเรียวและช่องทางไหลกากบาท แสดงดังตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิช่องทางไหลกลมเรียบ

ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ	r/R	ระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง (มม.)
J ₁	0.6	10.5
J ₂	0.2	3.5
J ₃	0	0
J ₄	0.4	7
J ₅	0.8	14

ตารางที่ 2 แสดงตำแหน่งการวัดอุณหภูมิช่องทางไหลกากบาท

ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ	h/H	ระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง (มม.)
J ₁	0.6	6
J ₂	0.2	2
J ₃	0	0
J ₄	0.4	4
J ₅	0.8	8

6. วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท คำเคมีภัณฑ์สยาม จำกัด คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Low-Density Polyethylene : LDPE) เกรด LD1905F

5. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

เมื่อทำการประกอบชุดทดสอบและชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิเข้าด้วยกันแล้ว จึงนำชุดทดสอบไปประกอบที่ด้านหน้าของเครื่องฉีดพลาสติก ทำการต่อชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิเข้ากับชุดตรวจวัดข้อมูลแบบความเร็วสูง [1] จากนั้นทำการปรับตั้งค่าอุณหภูมิที่ชุดควบคุมอุณหภูมิของเครื่องฉีดและชุดควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบ เท่ากันที่ 190 °ซ แล้วจึงทำการถอยสกรูเพื่อนำเม็ดพอลิเมอร์เข้าสู่ห้องหลอมเหลวและชุดทดสอบ จากนั้นปล่อยให้พอลิเมอร์หลอมเหลวอยู่ในห้องหลอมเหลว และชุดทดสอบเป็นเวลาประมาณ 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีอุณหภูมิ 190 °ซ เท่ากันทั้งระบบ (Isothermal) [1] ซึ่งเมื่ออุณหภูมิเท่ากันทั้งระบบแล้วจึงเริ่มทำการทดลองที่ความเร็วในการฉีด 9 มม. ต่อวินาที ในช่องทางไหลที่มีลักษณะต่างๆ กัน ของพอลิเมอร์ชนิด LDPE

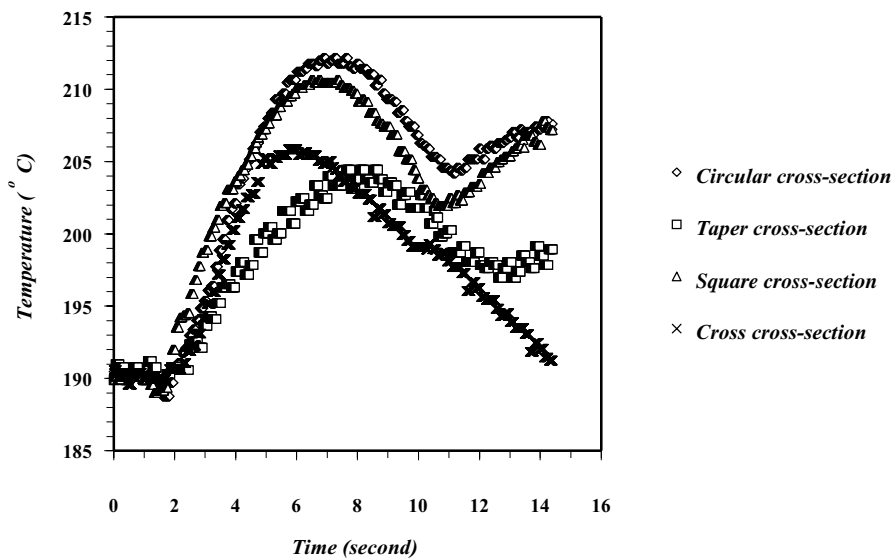
6. ผลการทดลองและวิจารณ์

การวิเคราะห์ผลของลักษณะช่องทางไหลแบบต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

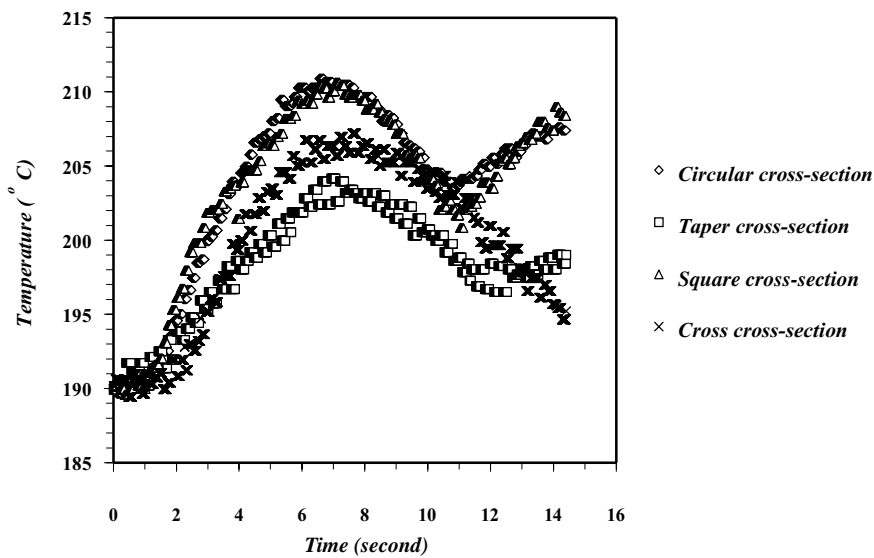
จากรูปที่ 3 และ 4 แสดงรูปแบบการกระจายอุณหภูมิ (Temperature distribution) ของพอลิเมอร์ชนิด Low-Density Polyethelene (LDPE) ขณะไหล ที่ตำแหน่งการวัด $r/R = 0$ เปรียบเทียบกันตามลักษณะของช่องทางไหล ณ บริเวณ Sensor 1 และ Sensor 2 ที่อุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการทดลองเท่ากับ 190°C ในช่องทางไหลหน้าตัดกลม หน้าตัดสี่เหลี่ยม หน้าตัดกากบาท และหน้าตัดกลมรีเวท ตามลำดับ ผลการทดลองโดยทั่วไป พบว่ารูปแบบการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้น มีลักษณะคล้ายคลึงกันกล่าวคือ อุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวในช่วงแรกมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากความสามารถในการอัดตัวได้ (Compressibility) ภายใต้ความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลว [6] ซึ่งทำให้พอลิเมอร์เหลวไม่เกิดการไหลในทันที จากนั้นอุณหภูมิที่วัดได้เริ่มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวเริ่มมีการไหลออกจากห้องหลอมเหลวผ่านช่องทางไหล ซึ่งในระหว่างการไหลนี้สายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์หลอมเหลวจะเกิดการเสียดสีกันส่งผลให้เกิดความร้อนเพิ่มสูงขึ้น [7] และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดแล้วจึงเริ่มลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการฉีด การลดลงของอุณหภูมินี้เป็นผลมาจากการถ่ายเทความร้อนจากพอลิเมอร์หลอมเหลวไปยังผนังของห้องหลอมเหลว นอกจากนี้ยังพบว่า ณ บริเวณ Sensor 1 มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงกว่าที่บริเวณ Sensor 2 เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลผ่าน Sensor 1 มีระยะเวลาที่อยู่นิ่งในห้องหลอมเหลว (Residence time) นานกว่าและยังเกิดความร้อนสะสมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการไหลจากบริเวณห้องหลอมเหลวมายังชุดทดสอบ ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณความร้อนสะสมในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลผ่าน Sensor 1 มีมากกว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลผ่าน Sensor 2

เมื่อทำการวิเคราะห์อิทธิพลของลักษณะช่องทางไหลที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นพบว่า ช่องทางไหลหน้าตัดกลม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงสุด เนื่องจากในช่องทางไหลชนิดนี้เกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดอย่างมาก ส่งผลให้มีความเร็วในการไหลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ การกระจายอุณหภูมิสามารถอธิบายได้จากการศึกษารูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ผ่านช่องทางไหลรูปร่างต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นรูปแบบการไหลของยางธรรมชาติขณะกำลังไหลในห้องหลอมของเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ โดยใช้ช่องทางไหลที่มีหน้าตัดต่างๆ กัน (วิธีการทดลองสำหรับการตรวจสอบรูปร่างการไหลสามารถศึกษาเพิ่มเติมในเอกสารอ้างอิงที่ [3]) จากผลการศึกษาพบว่า ในช่องทางไหลหน้าตัดกลม เกิดรูปร่างการไหลแบบซับซ้อน (Complex flow) ขึ้น ทำให้เกิดการเสียดสีระหว่างสายโซ่โมเลกุลเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่วัดได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิในช่องทาง

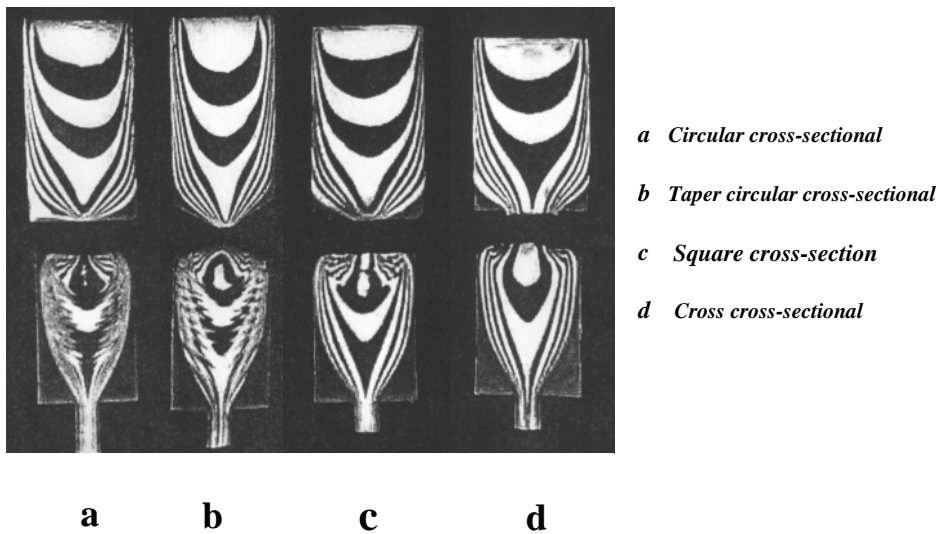
ไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยม พบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากรูปร่างการไหลในช่องทางไหลหน้าตัดสี่เหลี่ยมไม่เกิดการไหลแบบซับซ้อนมากนัก และสำหรับช่องทางไหลหน้าตัดกากบาทมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมिन้อยที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วในการไหลมีค่าน้อยที่สุด รวมถึงเมื่อพิจารณารูปร่างการไหล จะพบว่าไม่มีรูปร่างการไหลแบบซับซ้อนเกิดขึ้น ในกรณีของช่องทางไหลหน้าตัดกลมเร็ววนั้น ถึงแม้ว่าจะเกิดการไหลแบบซับซ้อนมาก แต่จะเกิดที่บริเวณ $r/R=0.2$ และ 0.4 เท่านั้น ซึ่งหากพิจารณาโดยภาพรวมแล้ว จะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงกว่าช่องทางไหลหน้าตัดกากบาทและหน้าตัดสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของช่องทางไหลที่มีหน้าตัดต่างๆ กัน ที่ตำแหน่งการวัด $r/R = 0$ (Sensor 1)



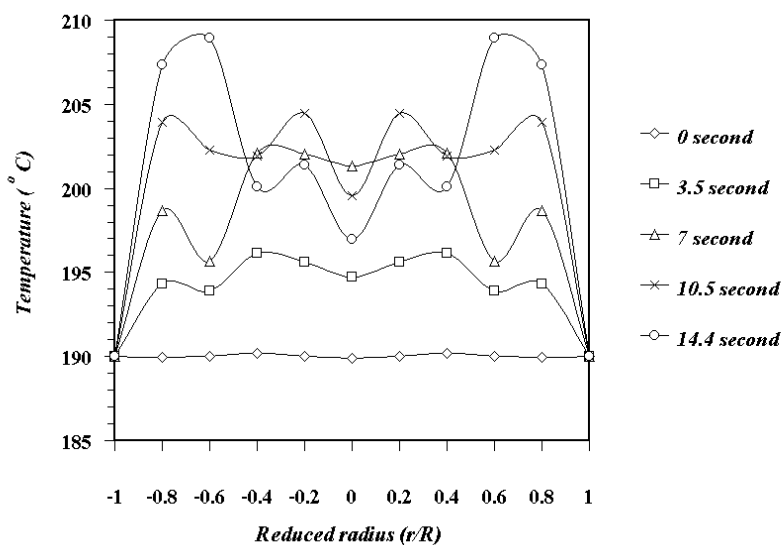
รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของช่องทางไหลที่มีหน้าตัดต่างๆ กัน ที่ตำแหน่งการวัด $r/R = 0$ (Sensor 2)



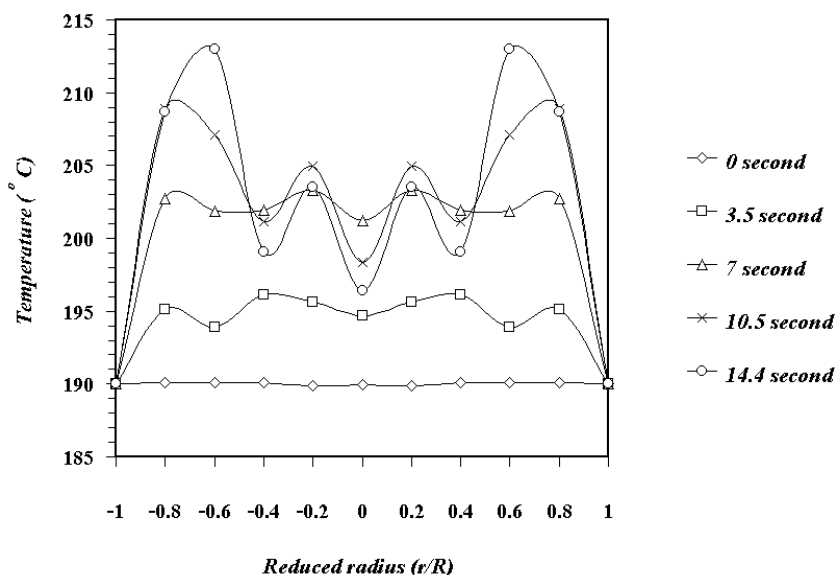
รูปที่ 5 แสดงรูปแบบการไหลของยางธรรมชาติขณะกำลังไหลในช่องหลอมที่มีลักษณะหน้าตัดต่างๆ กัน ของเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์

การวิเคราะห์รูปร่างการกระจายอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ณ เวลาในการฉีดต่างๆ กัน

เมื่อพิจารณารูปแบบการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมี (Radial temperature distribution) ของ LDPE ขณะไหลในช่องทางไหลหน้าตัดกลมเร็ว ที่ความเร็วในการฉีด 9 มม.ต่อวินาที ณ เวลาต่างๆ กัน ที่ Sensor 1 และ Sensor 2 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 พบว่า ที่เวลาเริ่มแรกของการฉีด (0 วินาที) อุณหภูมิที่วัดได้จาก Sensor 1 และ Sensor 2 ในแต่ละตำแหน่ง (r/R) มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้น คือ 190°C เมื่อเวลาผ่านไป 3.5 วินาที รูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิที่ได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวทำให้เกิดความร้อนเนื่องการเสียดสีกันในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ จากนั้นที่เวลา 7 วินาที พบว่าอุณหภูมิที่บริเวณใกล้ศูนย์กลาง ($r/R = 0.2$) มีอุณหภูมิสูงสุด และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะมีค่าสูงสุดที่เวลา 10.5 วินาที จากนั้นเมื่อถึงเวลาสิ้นสุดการฉีด (14.4 วินาที) ที่บริเวณด้านข้าง คือ ที่บริเวณ $r/R=0.6$ และ 0.8 จะมีค่าของอุณหภูมิสูงสุด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากรูปร่างการไหลได้พัฒนาเต็มที่แล้ว ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนจากบริเวณตรงกลางไปสู่บริเวณด้านข้างหนึ่งซึ่งมีความร้อนเนื่องจากอัตราการเฉือน (Shear rate) ที่สูง [8] ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมที่บริเวณนี้ตลอดเวลาขณะไหล นอกจากนี้เมื่อพิจารณารูปแบบการไหลของยางธรรมชาติขณะกำลังไหลในเครื่องคาปิลารี โอมิเตอร์ ที่มีลักษณะหน้าตัดรีเวีย [3] ดังแสดงในรูปที่ 5 จะพบว่าเกิดรูปร่างการไหลแบบซับซ้อน (Complex flow) ที่บริเวณดังกล่าว ทำให้เกิดการเสียดสีกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้น และหากพิจารณารูปแบบการกระจายของอุณหภูมิตามแนวรัศมี ณ เวลาต่างๆ กัน ของ Sensor 1 และ Sensor 2 เปรียบเทียบกัน พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่อุณหภูมิที่ Sensor 1 จะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ Sensor 2



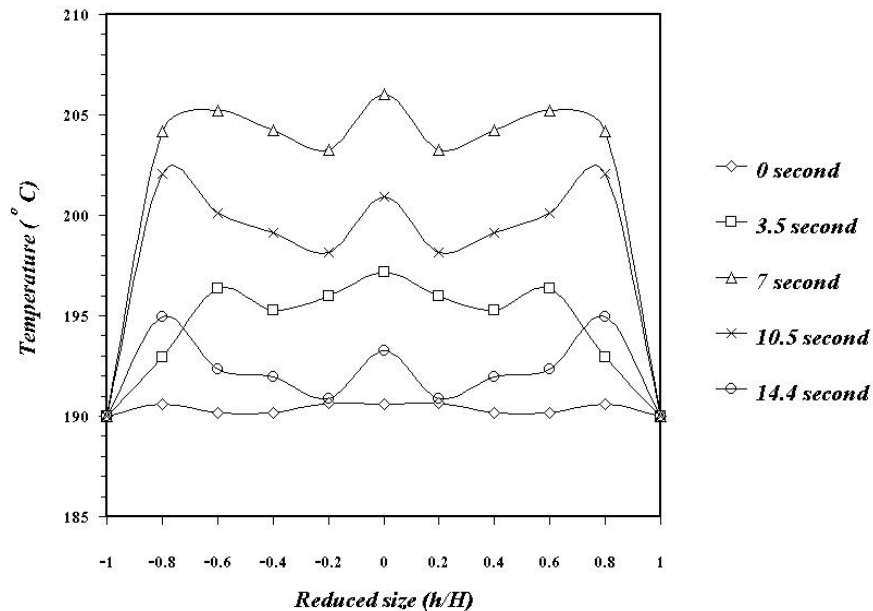
รูปที่ 6 รูปแบบการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของ LDPE ในช่องทางไหลกลมเรียบ ที่ความเร็วฉีด 9 มม.ต่อวินาที ณ เวลาต่างๆ กัน (Sensor 1)



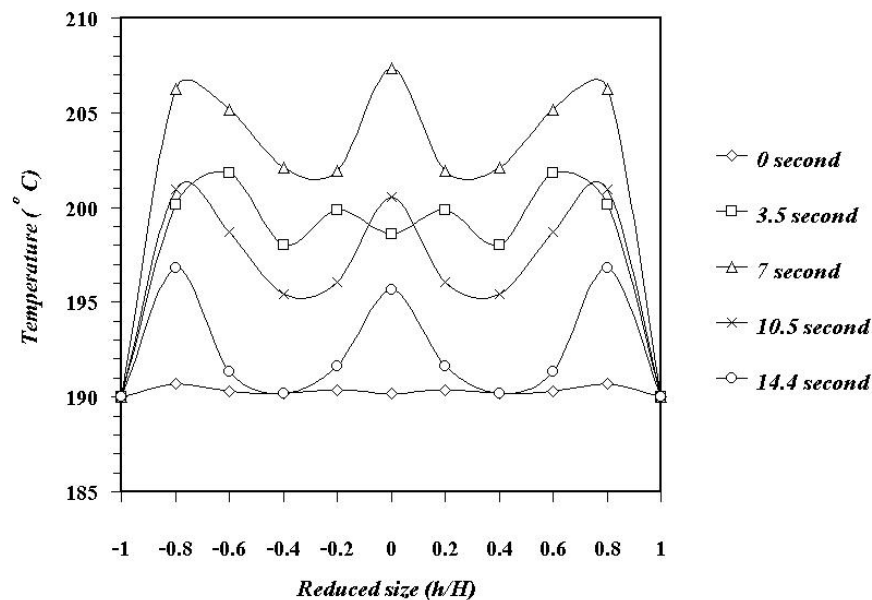
รูปที่ 7 รูปแบบการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของ LDPE ในช่องทางไหลกลมเรียบ ที่ความเร็วฉีด 9 มม.ต่อวินาที ณ เวลาต่างๆ กัน (Sensor 2)

รูปที่ 8 และ รูปที่ 9 เป็นรูปแบบการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของ LDPE ที่ความเร็วในการฉีด 9 มม.ต่อวินาที ณ เวลาต่างๆ กัน ในช่องทางไหลหน้าตัดกากบาท ที่ Sensor 1 และ Sensor 2 ตามลำดับ ผลจากการทดลองโดยทั่วไปพบว่า ในตอนเริ่มต้นการฉีด (0 วินาที) ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละจุดมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้น คือ 190 °ซ เมื่อเวลาผ่านไป 3.5 วินาที พบว่าอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิบริเวณใกล้ผนัง ($r/R=0.8$) และ บริเวณตรงกลางช่องทางไหล ($r/R=0$) มีค่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่าบริเวณอื่น ทั้งนี้เนื่องจากที่บริเวณตรงกลางของช่องทางไหลมีความเร็วในการไหลสูงสุด ขณะที่บริเวณใกล้ผนังมีอัตราเฉือน (Shear rate) สูงสุดและที่เวลา 7 วินาที การเพิ่มของอุณหภูมิจะมีค่าสูงสุด จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่ารูปแบบการกระจายอุณหภูมิ

เริ่มมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเวลาในการไหลที่ความเร็วในการฉีดสูงๆ มีน้อยทำให้ความร้อนสะสมมีค่าน้อยลงไปด้วย จนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มต้นก่อนการฉีดที่เวลา 14.4 วินาที และหากพิจารณาเปรียบเทียบรูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของ Sensor 1 และ Sensor 2 จะพบว่า มีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่อุณหภูมิที่ Sensor 1 มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ Sensor 2



รูปที่ 8 รูปแบบการกระจายอุณหภูมิตามแนวรัศมีของ LDPE ในช่องทางไหลหน้าตัดกากบาท ที่ความเร็วฉีด 9 มม.ต่อวินาที ณ เวลาต่างๆ กัน (Sensor 1)



รูปที่ 9 รูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิตามแนวรัศมีของ LDPE ในช่องทางไหลหน้าตัดกากบาท ที่ความเร็วฉีด 9 มม.ต่อวินาที ณ เวลาต่างๆ กัน (Sensor 2)

7. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและจัดสร้างชุดเครื่องมือวัดอุณหภูมิและชุดทดสอบที่สามารถปรับเปลี่ยนลักษณะของช่องทางไหลได้ เพื่อศึกษาลักษณะช่องทางไหลแบบต่างๆ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องฉีดพลาสติก โดยสามารถสรุปเป็นสาระสำคัญได้ดังต่อไปนี้

1. ชุดวัดอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิด K แบบตายายเปลือย มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มม. สามารถวัดอุณหภูมิได้พร้อมกันหลายตำแหน่งตามพื้นที่หน้าตัดของช่องทางไหล และชุดทดสอบให้สามารถปรับเปลี่ยนลักษณะช่องทางไหลได้หลายลักษณะ

2. ผลการวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลที่ Sensor 1 และ Sensor 2 สามารถสรุปได้ว่า รูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลที่บริเวณ Sensor 1 และ Sensor 2 มีรูปแบบการแจกแจงอุณหภูมิลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่อุณหภูมิสูงสุดที่บริเวณ Sensor 1 มีค่ามากกว่าที่บริเวณ Sensor 2 เนื่องจาก พอลิเมอร์เหลวที่ไหลผ่าน Sensor 1 มีเวลาอยู่ในห้องหลอมนานกว่าและยังเกิดความร้อนสะสมเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการไหลจากบริเวณห้องหลอมเหลวมายังชุดทดสอบ ดังนั้นจึงส่งผลให้ปริมาณความร้อนสะสมในเนื้อพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลผ่าน Sensor 1 มีมากกว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลผ่าน Sensor 2

3. เมื่อวิเคราะห์ถึงลักษณะของช่องทางไหลที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ช่องทางไหลที่มี 4 ลักษณะหน้าตัดที่แตกต่างกัน คือ หน้าตัดกลม หน้าตัดกลมรีเยว หน้าตัดกากบาท และหน้าตัดสี่เหลี่ยม พบว่าลักษณะช่องทางไหลแบบหน้าตัดกลม มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงสุด คือ ประมาณ 24°C เนื่องจากรูปร่างการไหลและความเร็วในการไหลที่เกิดขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับการให้ทุนวิจัยสนับสนุนการวิจัยในโครงการนี้ (MT-B-43-POL-20-147-G)

เอกสารอ้างอิง

1. Sombatsompop, N. and Chaiwattanapipat, W., 2000, "Temperature Distributions of Molten Polypropylene During Injection Molding," *Advances in Polymer Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 79-86

2. Sombatsompop, N., Wood, A.K., and Yue, M.Z., 1996, "Techniques for The Simultaneous Determination of Temperature and Velocity Profiles in Flowing Polymer Melt," *ASME Fluid Measurements and Instrumentation*, FED-Vol. 239, No. 4, pp. 371-377.

3. Sombatsompop, N. and Dantungee, R., 2001, "Flow Visualization & Extrudate Swell of Natural Rubber in a Capillary Rheometer : Effect of Die/Barrel System," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 82, No. 10, pp. 2525-2533.
4. Armstrong, W.S., 1995, "A Study of the Melt Temperature Profile in an Extrusion Die" *SPE ANTEC*, Vol. 41, pp. 4336-4341.
5. Yokoi, H., Murata, Y., Ueda, Y., and Sakai, H., 1993, "Measurement of Cross-sectional Melt Temperature Profile in the Nozzle of and Injection Moulding Machine," *The Polymer Processing Society # 9th Annual Meeting (PPS-9)*, April, Manchester, 404 p.
6. Yue, M.Z and Wood, A.K., 1994, "Pressure Effect on Temperature Measurement of Polymer Melts," *Polymer Bulletin*, Vol. 33, No. 3, pp. 127-132.
7. Yue, M.Z. and Wood, A.K., 1994, "Temperature Profiles and Shear Heating Effect in Polymer Processing," *SPE ANTEC*, Vol. 40, No. 1, pp. 667-971.
8. Brydson, J.A., 1981, *Flow Properties of Polymer Melts*, London, George Godwin Ltd., pp. 21-48.