

การวิเคราะห์และพัฒนาอุปกรณ์สำหรับ วัดอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูป ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์

วีระกร ชัยวัฒน์พัฒน์

วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า วิทยาเขตภาคพายัพ จ. เชียงใหม่

มานพ ปานะโปย

อนุพันธ์ ตั้งทรงเจริญ

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.)

ทุ่งครุ บางมด 10140 กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

เอกสารวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือวัดอุณหภูมิเพื่อการตรวจวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในเครื่องมือผลิตชิ้นงานพอลิเมอร์ เครื่องมือวัดอุณหภูมิในงานนี้ใช้หลักการของเทอร์มิสเตอร์ที่มีโครงสร้างการออกแบบคล้ายกับงานของ Wood และ Sombasompop รายละเอียดของงานวิจัยนี้ จะเน้นถึงข้อมูลของการเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้สร้างเครื่องมือวัด ในแง่ของความคงทนแข็งแรง ราคา และความสะดวกรวดเร็วในการจัดซื้อ นอกจากนี้ ยังมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางกล และความร้อนของวัสดุที่นำมาใช้ทำเครื่องมือวัด การสอบเทียบ และประสิทธิภาพของการวัดของเครื่องมือวัด ได้ถูกตรวจสอบและพบว่าเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่จัดสร้างขึ้นในครั้งนี้ มีการออกแบบและจัดสร้างง่าย ต้นทุนการผลิตต่ำ วัสดุที่ใช้ในการจัดสร้างหาซื้อได้ง่ายและราคาถูก การสอบเทียบและใช้งานค่อนข้างง่าย มีความแม่นยำในการวัดสูง หากพิจารณาจากโครงสร้างการออกแบบเครื่องมือวัดนี้จะไม่รบกวนการไหลของพอลิเมอร์ขณะวัด สามารถใช้วัดในอุณหภูมิสูง (ประมาณ 300°C) และวัดได้หลายตำแหน่งในเวลาเดียวกัน และมีข้อผิดพลาดของการวัดอันเนื่องจากการนำความร้อนและความร้อนจากแรงเฉือนของพอลิเมอร์ขณะไหลเกิดขึ้นน้อยมาก

Analysis and Development of Temperature Sensor in Polymer Processing

Chalwattanpiat W.

Industrial Engineering, Faculty of Engineering
Rachamungkla Institute, Payap Campus Chiangmai

Panapoy M.

Tangsongcharoen A.

Sombatsompop N.

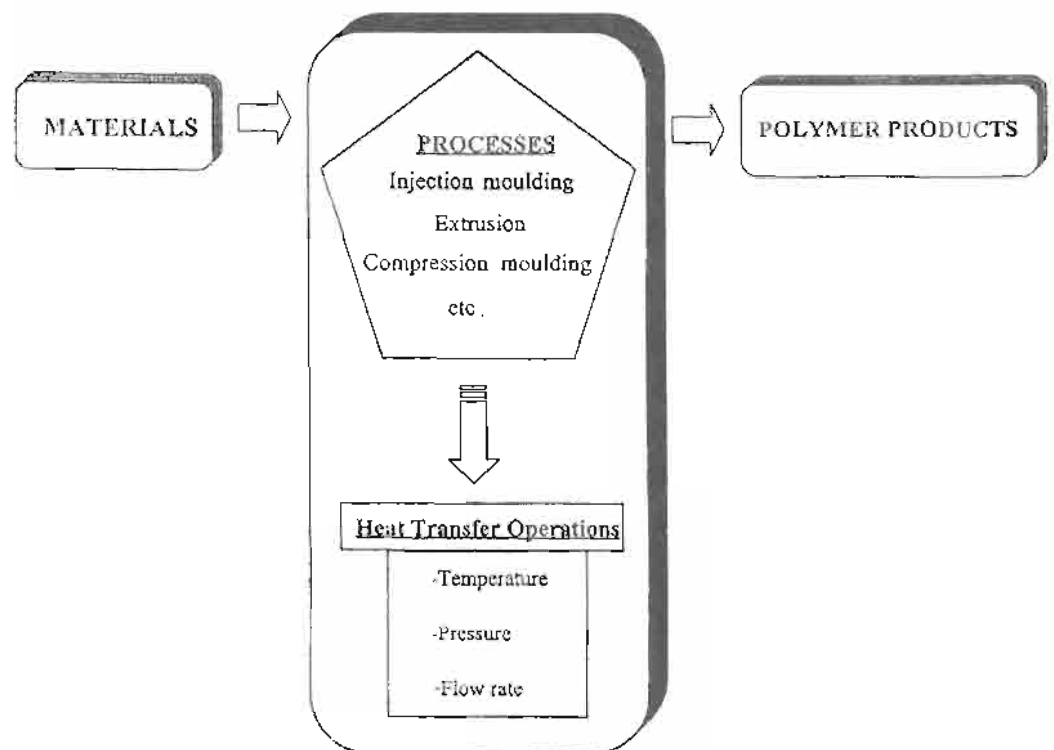
Division of Materials Technology, School of Energy and Materials
King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT)
Bangmod, 10140, Bangkok

Abstract

This work was part of ongoing investigations into study and development of temperature sensing devices for measuring temperatures of flowing polymer melts in polymer processing equipment. The proposed temperature sensor uses the principle of thermocouple in which its design is similar to that originally proposed by Wood, Sombatsompop and their co-workers. The main objective of this article was to investigate in more details as to the characteristics of materials used for making the sensor, including the properties, costs, availability, and robustness of the sensor. The reliability and efficiency of the proposed sensor were also examined. It was found that the sensor was reliable, simple in design and manufacture, low in cost, easy to calibrate and use. In addition, the sensor could be utilised to measure multi-point temperatures simultaneously at elevated temperatures (up to 300 °C) without any obvious damages. With the use of this sensor, the effects of heat conduction and shear heating on the measured temperatures were minimised.

บทนำ

กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ (polymer processing) คือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงของวัตถุดิบพอลิเมอร์ ซึ่งโดยปกติอยู่ในรูปของของแข็งที่เป็นเม็ดหรือผงแล้วผ่านกระบวนการให้ความร้อนทำให้เกิดการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ จากนั้นจะถูกส่งผ่านเข้าสู่แม่พิมพ์เพื่อขึ้นเป็นรูปร่างชิ้นงานตามที่ต้องการ ในแม่พิมพ์ชิ้นงานจะเกิดการแข็งตัวโดยระบบหล่อเย็น (cooling) หรือปฏิกิริยาทางเคมีแล้วจึงได้ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปออกมา (ตามรูปที่ 1) กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์มีอยู่หลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น กระบวนการฉีด (injection moulding) กระบวนการรีด (extrusion) และการอัดความดัน (compression moulding) เป็นต้น จากรูปที่ 1 ในกระบวนการ heat transfer operation มี 3 องค์ประกอบหลักคือ อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ซึ่งทั้ง 3 องค์ประกอบนี้เป็นตัวแปรที่มีผลต่อคุณสมบัติของชิ้นงานที่ผลิตออกมา อีกทั้ง 3 องค์ประกอบนี้ยังมีความสัมพันธ์กันอย่างไม่สามารถแยกออกจากกันได้



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์

ในเอกสารวิจัยฉบับนี้ จะกล่าวเน้นถึงการตรวจวัดอุณหภูมิในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์มาจากแหล่งให้ความร้อน 2 แหล่งใหญ่ ดังนี้

- **ความร้อนจากภายนอก** คือ ความร้อนที่เกิดจากสวดความร้อน (heater) ที่ติดอยู่กับผนังด้านนอกของห้องหลอม (barrel) ดाय (die) หรือหัวฉีด (nozzle) เช่น ในกระบวนการฉีดและรีดพลาสติก เป็นต้น ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการนำความร้อน (heat conduction) ระหว่างอุปกรณ์ให้ความร้อน ห้องการไหล และพอลิเมอร์
- **ความร้อนภายในระบบ** คือ ความร้อนที่เกิดจากแรงเฉือน (shear heating) ของพอลิเมอร์ขณะไหล กล่าวคือ ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของสายโซ่โมเลกุลที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการผลิตขณะที่เกิดการไหลของพอลิเมอร์ และเป็นความร้อนสำคัญที่เป็นปัจจัยทำให้เกิดการหลอมเหลวของพอลิเมอร์อย่างทั่วถึง ซึ่งทราบกันดีอยู่แล้วว่าในสภาวะการผลิตที่เหมาะสมหนึ่งๆ การเพิ่มของอุณหภูมิของพอลิเมอร์ขณะที่กำลังไหลจะทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ต่ำลง ซึ่งส่งผลให้การไหลง่ายขึ้นและ ในกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของความเร็วในการไหลก็จะก่อให้เกิดแรงเสียดสีมากขึ้นซึ่งจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้นด้วย ซึ่งในกระบวนการผลิตของพอลิเมอร์จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอมพอลิเมอร์จะเป็นตัวแปรที่สำคัญต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ออกมาว่าจะเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่เช่น ทางด้านความแข็งแรง สี สัน ผิวของชิ้นงาน ฯลฯ คุณสมบัติที่เป็นผลโดยตรงจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในระบบมีมากมายยกตัวอย่างเช่น ความหนาแน่น น้ำหนักโมเลกุล การจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุล (orientation) การบวมตัวของพอลิเมอร์ (die swell) การฉีกขาดที่ผิวของพอลิเมอร์ (sharkskin) การแตกหักของพอลิเมอร์ (melt fracture) และการสลายตัวของพอลิเมอร์ (degradation)[1-2]

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตมีความสำคัญต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาเป็นอย่างมาก ในปัจจุบัน มีผู้สนใจศึกษาและออกแบบเครื่องมือวัดอุณหภูมิเพื่อวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหล ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าคุณสมบัติของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สมบูรณ์ต้องมียกประกอบสำคัญ ดังต่อไปนี้

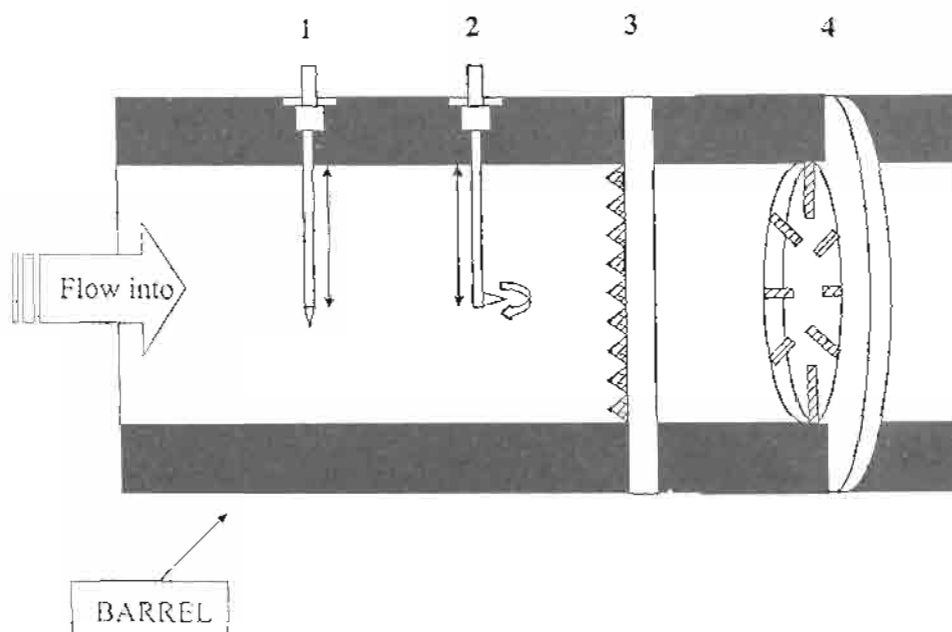
- **การกีดขวางการไหล** การออกแบบเครื่องมือวัดจะต้องไม่ไปรบกวนระบบของการไหลของพอลิเมอร์ ซึ่งการที่เครื่องมือวัดอุณหภูมิไปกีดขวางทิศทางการไหลจะทำให้รูปร่างการไหลเปลี่ยนแปลงไปจากความเป็นจริงและมีผลต่ออุณหภูมิที่ทำการวัด

- **ความถูกต้องในการวัด** คือ การที่เครื่องมือวัดอุณหภูมิสามารถอ่านค่าได้ตามความเป็นจริงของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งนั้นๆ โดยทั่วไปจะมีการสอบเทียบกับอุณหภูมิที่เป็นมาตรฐาน เช่น อุณหภูมิของน้ำเดือด (100°C) และน้ำแข็ง (0°C)
- **ความแม่นยำในการวัด** คือ เครื่องมือวัดอุณหภูมิแสดงค่าการวัดเหมือนเดิม ณ อุณหภูมิเดิมในการวัดหลายๆ ครั้ง
- **ความละเอียดในการวัด** คือ ความสามารถในการวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ณ ตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิ ในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ เครื่องมือวัดที่ดีควรอ่านค่าของอุณหภูมิที่ได้ด้วยความละเอียดอย่างน้อย $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
- **ความแข็งแรงของเครื่องมือวัด** คือ เนื่องจากการที่จะวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวต้องเผชิญกับสภาวะที่พอลิเมอร์มีความหนืดและความดันสูงเช่น ในเครื่องฉีดพอลิเมอร์หลอมเหลว ถ้าเครื่องมือวัดไม่แข็งแรงจะไม่สามารถต้านทานต่อความดันที่เกิดขึ้นภายในระบบได้ และทำให้เกิดความเสียหายต่อเครื่องมือวัด นอกจากนี้ เครื่องมือวัดที่ดีควรต้องทนต่อปฏิกิริยาทางเคมีที่อาจเกิดขึ้นในระบบ
- **ง่ายต่อการบำรุงรักษา** คือ เมื่อเกิดความเสียหายกับเครื่องมือวัดสามารถจัดซื้ออุปกรณ์ทดแทนหรืออุปกรณ์เสริมได้ง่ายภายในประเทศ โดยไม่ต้องรอในการส่งซื้ออุปกรณ์จากต่างประเทศ ซึ่งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตเครื่องมือ
- **ง่ายต่อการติดตั้งและใช้งาน** คือ เครื่องมือวัดที่ดีจะต้องมีวิธีการติดตั้งที่ง่าย ไม่ยุ่งยากในการประกอบ และใช้งานของเครื่องมือวัด
- **ราคา** คือ เครื่องมือวัดต้องมีราคาที่ไม่แพง

การทบทวนข้อมูลเบื้องต้นของการพัฒนาเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ในกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์

การวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์นิยมใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการของการนำโลหะ 2 ชนิดที่แตกต่างกันมาเชื่อมต่อกันปลายทั้งสองเข้าด้วยกันและนำไปวัดอุณหภูมิ โดยอาศัยหลักการของการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า electromotive force (emf) ซึ่งค่าแรงดันไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจะเป็นไปตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อของโลหะทั้งสองที่ทำการวัดอุณหภูมิอยู่ เราเรียกวิธีการแบบนี้ว่า เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple)[3] ในอุตสาหกรรมการผลิตและควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์พอลิ

เมอร์ การออกแบบและการศึกษาวิจัยโครงสร้างของเครื่องมือวัดอุณหภูมิโดยอาศัยหลักการนี้ได้ถูกจดบันทึกไว้มากมายในเอกสารวิชาการ ดังตัวอย่างต่อไปนี้ [4] (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 เครื่องมือวัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ

Transverse to flow probe (หมายเลข 1 ในรูปที่ 2) เป็นเทอร์โมคัปเปิลที่มีชายตามห้องตลาดโดยปกตเป็นชนิด K ซึ่งมีส่วนประกอบของโครเมิล (Chromel) และอะลูเมล (Alumel) สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง $-270^{\circ}C$ ถึง $1372^{\circ}C$ และมีกระเปาะครอบ (thermo well) ซึ่งทำจากโลหะเพื่อเสริมความแข็งแรงให้แก่ลวดเทอร์โมคัปเปิลที่อยู่ภายในที่ต่อกันเป็นจุดอยู่ที่ปลายของกระเปาะหุ้ม ทำการวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวในห้องหลอมเหลวโดยการเจาะรูที่ห้องหลอมและนำเอาเทอร์โมคัปเปิลสอดลงไปตามความลึกต่างๆ ที่สนใจ ซึ่งสามารถทำการเลื่อนขึ้น-ลงเพื่ออ่านค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งได้ เครื่องมือวัดแบบนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยประมาณ 5-10 มม. ข้อดีและข้อเสียของเครื่องมือวัดแบบนี้คือ [4-5]

ข้อดี

- อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำเครื่องมือวัดหาได้ง่าย
- คงทน แข็งแรง

ข้อเสีย

- ขนาดของเทอร์โมคัปเปิลมีขนาดใหญ่ซึ่งส่งผลให้เกิดการขัดขวางต่อทิศทางการไหลของพอลิเมอร์ที่ไหลในระบบ

- ทำการวัดอุณหภูมิได้ที่ละครั้งต่อหนึ่งตำแหน่ง เมื่อจะวัดจุดต่อไปต้องทำการเลื่อนความลึกของหัววัดอีกครั้งซึ่งเป็นการเสียเวลา
- กระเปาะที่หุ้มลวดเทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะจึงเกิดการนำความร้อน
- เกิดความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากการเสียดสีระหว่างอุปกรณ์วัดอุณหภูมิกับพอลิเมอร์

Parallel to flow probe (หมายเลข 2 ในรูปที่ 2) เป็นพัฒนามาจาก transverse to flow probe โดยการที่นำเทอร์โมคัปเปิลชนิด K มาทำการตัดไปปลายอุณหภูมิ 90°C เพื่อให้หัววัดได้สัมผัสกับพอลิเมอร์ที่ไหลโดยตรง และทิศทางการวัดยังสามารถหมุนเทอร์โมคัปเปิลให้ตั้งฉากและขนานกับทิศทางการไหลได้[4-5]

ข้อดี

- จุดวัดสัมผัสกับพอลิเมอร์ที่ไหลมั่วหลวก่อนที่จะสัมผัสกับของเทอร์โมคัปเปิล
- สามารถปรับทิศทางการหมุนของหัววัดเพื่อวัดอุณหภูมิในแต่ละทิศทางการไหลของพอลิเมอร์ในระดับความลึกเดียวกันได้
- คงทน แข็งแรง

ข้อเสีย

- ยังคงมีการกีดขวางต่อทิศทางการไหล
- เกิดการไหลวนของพอลิเมอร์ที่ตำแหน่งมุมของหัววัด ทำให้เกิดความร้อนจากแรงเฉือนมากขึ้นและอุณหภูมิที่วัดได้ในบางตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นมาก ซึ่งผิดไปจากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระบบ
- ทำการวัดอุณหภูมิได้ที่ละครั้งต่อหนึ่งตำแหน่ง เมื่อจะวัดจุดต่อไปต้องทำการเลื่อนความลึกของหัววัดอีกครั้งซึ่งเป็นการเสียเวลา
- กระเปาะที่หุ้มลวดเทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะจึงเกิดการนำความร้อน
- เกิดความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากการเสียดสีระหว่างอุปกรณ์วัดอุณหภูมิกับพอลิเมอร์

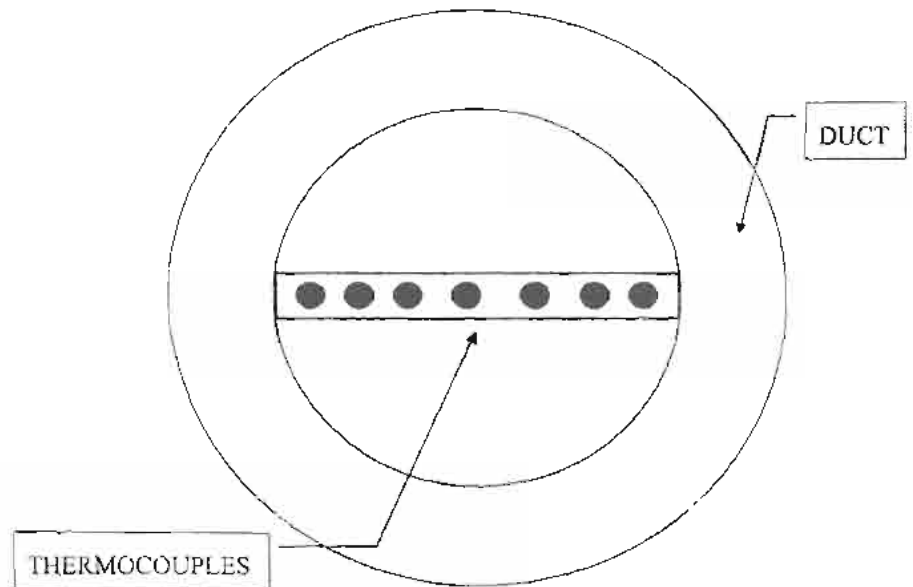
Ring bar device (หมายเลข 3 ในรูปที่ 2) คือการออกแบบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ โดยทำเป็นวงแหวนซึ่งมีเทอร์โมคัปเปิลอยู่ตรงกลางวงแหวน และตั้งฉากกับทิศทางการไหลของพอลิเมอร์ ซึ่งภาพขยายได้แสดงในรูปที่ 3[4-6]

ข้อดี

- สามารถทราบข้อมูลของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในได้พร้อมกันหลายตำแหน่งในการวัดแต่ละครั้ง
- มีความคงทน แข็งแรง

ข้อเสีย

- มีความยุ่งยากในการที่จะประกอบเส้นลวดเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตำแหน่งลงในแท่งกระเปาะ ต้องใช้ความชำนาญในการทำและเสียเวลาในการประกอบ
- ขนาดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิมีขนาดใหญ่มากเกินไป กีดขวางการไหลมากกว่าแบบอื่นที่กล่าวมาแล้ว
- มีข้อผิดพลาดของการวัดอันเนื่องมาจากการนำความร้อนและเกิดความร้อนสูงขึ้นเนื่องจาก การเสียดระหว่างเครื่องมือวัดและพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวมากกว่าแบบอื่นที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 3 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบ Ring-Bar Device

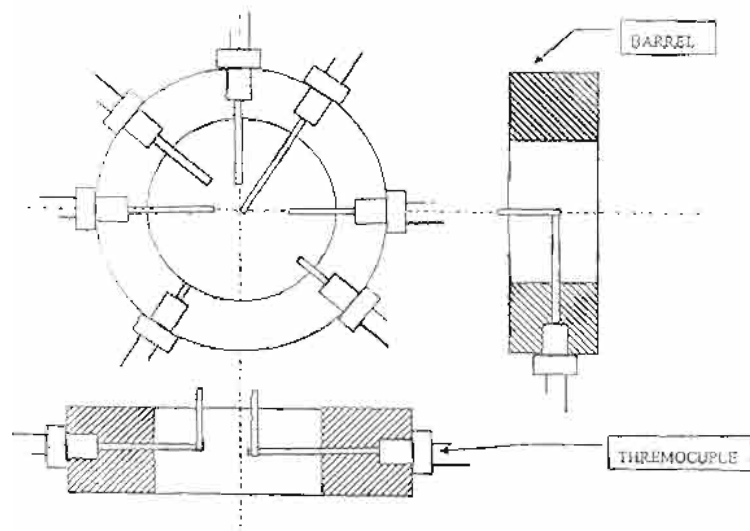
Multi probes profile ring (หมายเลข 4 ในรูปที่ 2) เป็นการออกแบบเครื่องมือโดยการใช้เทอร์โมคัปเปิลทำการจัดปลายให้จอ 90° แล้วใส่ลงไปในห้องของห้องหลอมเหลวที่ความลึกของตำแหน่งการวัดต่างๆ กันรอบๆ ห้องหลอมเหลว ซึ่งภาพขยายแสดงในรูปที่ 4[4-7]

ข้อดี

- เครื่องมือวัดมีความแข็งแรง
- สามารถเก็บข้อมูลได้หลายตำแหน่งในการทำการวัดแต่ละครั้ง

ข้อเสีย

- ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องมือวัดต่อชุดสูง
- เกิดการขัดขวางทิศทางการไหล
- การติดตั้งเครื่องมือวัดค่อนข้างยุ่งยาก
- เกิดข้อผิดพลาดในการวัดอันเนื่องมาจากการนำความร้อนและเกิดความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากการเสียดระหว่างเครื่องมือวัดและพอลิเมอร์ที่หลอมเหลว



รูปที่ 4 เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบ Multi-Probe Profile Ring

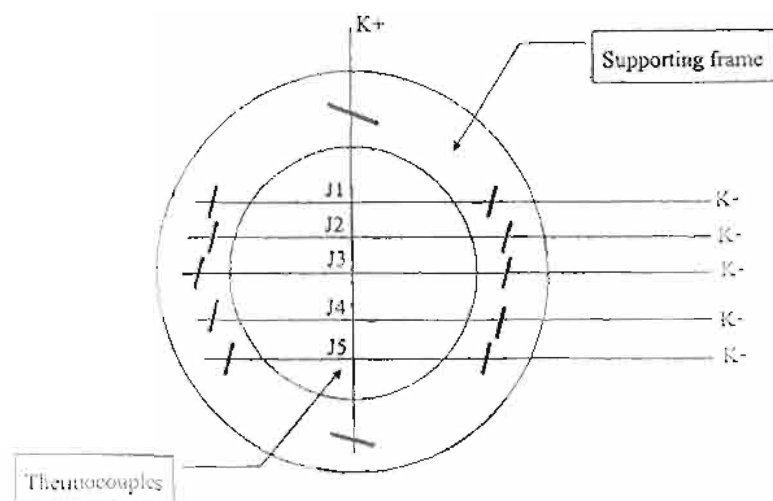
จะเห็นได้ว่าในงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน แต่ส่วนมากจะมีข้อเสียที่ขนาดของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่มีขนาดใหญ่ซึ่งไปรบกวนระบบการไหลของพอลิเมอร์ นอกจากนั้นยังเกิดปัญหาข้อผิดพลาดในการวัดอันเนื่องมาจากอิทธิพลของการนำความร้อนและเกิดความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากการเสียดระหว่างเครื่องมือวัดอุณหภูมิกับพอลิเมอร์ที่กำลังไหลอยู่ ดังนั้น จึงมีงานวิจัยที่ต้องการที่จะออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบใหม่เพื่อทำการวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยปราศจากการรบกวนการไหลของระบบและลดปัญหาข้อผิดพลาดของการวัดอันเนื่องมาจากสาเหตุดังกล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งเครื่องมือวัดแบบใหม่จะยังคงอาศัยหลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิล การออกแบบดังกล่าวดำเนินโดยการต่อลวดเทอร์โมคัปเปิลเป็นแบบท่ายาวโดยใช้ลวดเทอร์โมคัปเปิลเปลือยไม่มีกระเปาะฉนวนหุ้ม ซึ่งการเชื่อมโยงดังกล่าวจะถูกทำบนแผ่นโครงสร้างที่ทำมาจากวัสดุโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยคณะวิจัยที่ทำการพัฒนาเครื่องมือวัดดังกล่าวนี้ครั้งแรก คือ Wood

และคณะ[8] และต่อมาคือ Sombatsompop และ Wood[9] ซึ่งเครื่องมือวัดอุณหภูมิดังกล่าวนี้ภายหลังสามารถประยุกต์เพื่อใช้วัดรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ได้อีกด้วย[9]

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการพัฒนาเครื่องมือวัดอุณหภูมิต่อจากงานวิจัยของ Wood และ Sombatsompop[9] โดยเน้นการออกแบบโครงสร้างของเครื่องมือวัด วัสดุที่ใช้ในการออกแบบและจัดสร้าง และการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้จัดสร้างเครื่องมือวัด การสอบเทียบ และรวมถึงการเปรียบเทียบราคาของเครื่องมือวัดอุณหภูมิกับเครื่องมือวัดแบบอื่นๆ ซึ่งในส่วนนี้ยังไม่มีผลการเผยแพร่หรือตีพิมพ์มาก่อน

การออกแบบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

เครื่องมือวัดอุณหภูมิในเอกสารวิจัยฉบับนี้แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้

องค์ประกอบของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

1. โครงสร้างเสริมแรง เป็นอุปกรณ์ซึ่งทำให้เครื่องมือวัดอุณหภูมิมีความแข็งแรงทนทานใช้สำหรับยึดจับเส้นลวดของเทอร์โมคัปเปิล และเป็นส่วนที่ป้องกันไม่ให้เส้นลวดเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับ วัสดุที่นำมาทำเป็นโครงสร้างเสริมแรงต้องทำมาจากวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าและสามารถทนอุณหภูมิได้สูงอีกทั้งสามารถนำมาขึ้นรูปหรือกลึงได้ง่าย จากงานวิจัยของ Sombatsompop และ Wood[9] ใช้โครงสร้างเสริมแรงที่ทำจาก Phenol-formaldehyde

หรือ Bakelite ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิได้ประมาณ 180°C [10] ต่อมาคณะวิจัยฯ ได้ทำการทดสอบโดยการอบ Bakelite ที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงในเตาอบพบว่า Bakelite ไหม้และเสียรูป นอกจากนี้เมื่อนำ Bakelite มากลึงไสจะทำได้ยากเนื่องจากเมื่อเจาะ Bakelite พบว่าบริเวณผิวข้างๆ รอยเจาะเกิดการแตกร้าวทำให้ไม่ได้รูปร่างหรือขนาดตามต้องการ ดังนั้น ในงานวิจัยฉบับนี้ ได้มีการพัฒนาการจัดสร้างโครงสร้างเสริมแรงโดยการใช้ Polytetrafluoroethylene (PTFE) หรือ Teflon ซึ่งสามารถทนอุณหภูมิถึง 340°C ซึ่งเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่ไม่นำไฟฟ้า ไม่ดูดซับความชื้น ไม่ติดไฟ[11] ในการทดสอบจะนำ Teflon มาอบที่ 300°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่า Teflon ไม่ไหม้และไม่เสียรูป จากนั้นเมื่อนำ Teflon มากลึงไสหรือเจาะพบว่าสามารถทำได้ง่ายโดยไม่มียอยตำหนิที่เกิดจากการแตกบริเวณขอบของงานเจาะหรืองานกลึง ดังนั้น Teflon จึงเหมาะสมในการนำมาทำเป็นโครงสร้างเสริมแรงมากกว่า Bakelite

2. **เส้นลวดเทอร์โมคัปเปิล** (ชนิด K ซึ่งประกอบด้วย K^{+} และ K^{-} ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.65 มม.) เนื่องจาก เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ให้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าแรงดันไฟฟ้า (voltage) ก่อนข้างเป็นเส้นตรง[11] ดังนั้น จึงง่ายต่อการทำการสอบเทียบ อีกทั้งเทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เป็นที่นิยมในท้องตลาดหาซื้อง่ายและราคาถูก ช่วงการวัดอุณหภูมิของชนิด K คือ -270°C ถึง 1372°C [3] ซึ่งสามารถใช้วัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้เป็นอย่างดี
3. **Multimeter (Fluke 8840 A)** เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้น เนื่องจากค่าแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K มีค่าอยู่ในระดับไมโครโวลต์ (μV) จากการสอบเทียบพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในระดับ $4\ \mu\text{V}$ ต่ออุณหภูมิ 0.1°C [12] ดังนั้น จำเป็นจะต้องใช้ multimeter ที่สามารถวัดละเอียดถึงระดับ μV ได้ ในกรณีที่ต้องการที่จะวัดอุณหภูมิของของไหลโดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบที่กล่าวถึงนี้พร้อมๆ กันหลายตำแหน่ง เครื่องบันทึกข้อมูลแบบความเร็วสูง (data logging system) และคอมพิวเตอร์อาจต้องนำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์[9]

วิธีการออกแบบและจัดสร้าง

1. โครงสร้างเสริมแรง ใช้วิธีการกลึงใส่โดยขนาดหรือเส้นผ่านศูนย์กลางขึ้นอยู่กับขนาดของอุปกรณ์หรือระบบของไหลที่จะนำโครงสร้างเสริมแรงไปใช้
2. การสร้างขดลวดเทอร์โมคัปเปิลแบบตาข่าย ทำโดยการเชื่อมลวดเทอร์โมคัปเปิลชนิด K^+ และ K^- เข้าด้วยกัน โดยการนำลวด K^+ และ K^- มาวางตั้งฉากกัน บริเวณที่จุดลวดสัมผัสกันจะถูกเชื่อมเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 5 วิธีการเชื่อมนี้จะใช้แบบเชื่อมจุด (spot-welding) ทำให้จุดเชื่อมมีขนาดเล็กไม่ขวางการไหลของฟลูอิดเมอร์เหลวและสามารถอ่านอุณหภูมิได้ทันทีเนื่องจากจุดที่เชื่อมเป็นจุดที่ลวด K^+ และ K^- หลอมเป็นจุดเดียวกันและจะเป็นจุดที่สัมผัสกับของไหลได้โดยตรง จากงานวิจัยของ Wood และ Sombatsompop ขดลวดเทอร์โมคัปเปิลแบบตาข่ายถูกเชื่อมต่อกันโดยวิธีบัดกรี (soldering) ทำให้จุดที่เชื่อมมีขนาดใหญ่ (เป็น 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลวด)[8] วิธีการเชื่อมแบบจุดเป็นวิธีการเชื่อมโดยอาศัยหลักการของความต้านทาน เมื่อให้กระแสไฟฟ้าในระดับที่สูงกับลวดเทอร์โมคัปเปิลจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงทำให้ลวดเทอร์โมคัปเปิลเกิดความร้อนจนสามารถเชื่อมติดกัน วิธีการสร้างเครื่องมือวัดแบบนี้สามารถอ่านอุณหภูมิในเวลาเดียวกันได้มากกว่า 1 ค่า [ในที่นี้จากรูปที่ 5 สามารถอ่านได้ 5 ตำแหน่ง กล่าวคือ ตำแหน่ง 1 (J_1), ตำแหน่ง 2 (J_2), ตำแหน่ง 3 (J_3), ตำแหน่ง 4 (J_4) และตำแหน่ง 5 (J_5)] ในขณะที่เดียวกัน ลวดเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้เป็นแบบเปลือยและมีขนาดเล็กทำให้ไม่เกิดการนำความร้อนจากของไหลที่วัดออกจากระบบ และมีผลกระทบน้อยมากจากการเกิดความร้อนสูงขึ้นเนื่องจากการเสียดที่ เกิดเนื่องจากการเสียดทานกันระหว่างของไหลกับอุปกรณ์หุ้มลวดเทอร์โมคัปเปิลเหมือนเครื่องมือวัดแบบอื่นๆ[4]
3. การประกอบชุดเครื่องมือวัด โดยนำลวดเทอร์โมคัปเปิลแบบตาข่ายติดตั้งเข้ากับโครงสร้างเสริมแรง โดยโครงสร้างเสริมแรงจะถูกออกแบบเป็น 2 ส่วน แล้วนำทั้ง 2 ส่วนประกอบเข้าหากันโดยมีลวดเทอร์โมคัปเปิลอยู่ระหว่างโครงสร้างเสริมแรง เพื่อให้ชิ้นส่วนทั้ง 3 ชิ้นยึดติดกันแน่นอาจจับยึดด้วยสลักเกลียวหรืออุปกรณ์ภายนอกขึ้นอยู่กับลักษณะเครื่องมือหรือรูปร่างของห้องหลอมเหลวที่ถูกวัด เนื่องจากโครงสร้างเสริมแรงทำมาจาก Teflon เมื่อมีแรงกดบนเส้นลวดทำให้เส้นลวดแนบสนิทกับโครงสร้างเสริมแรงทำให้ของไหลไม่มีการรั่วออกมาระหว่างทำการวัด

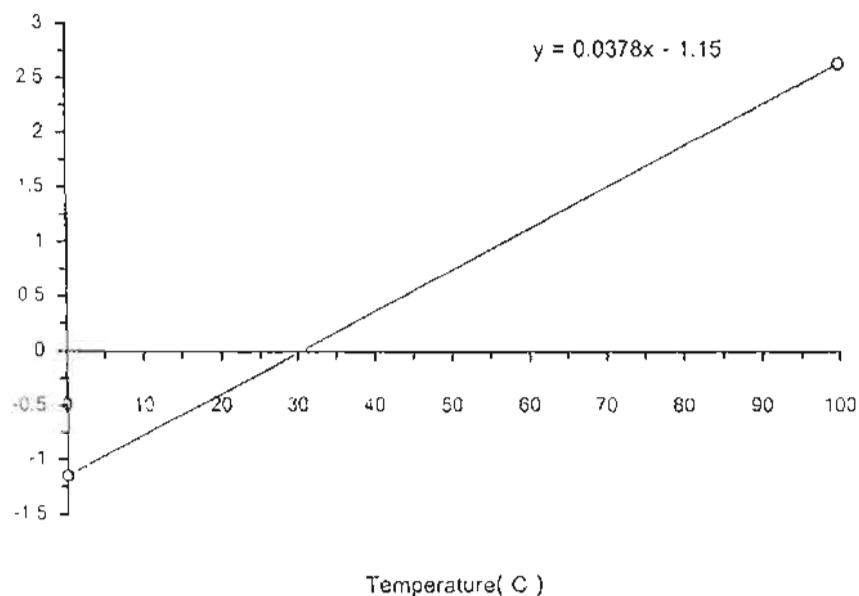
ข้อเสนอแนะเบื้องต้นเกี่ยวกับหลักการทำงานและการใช้งานของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่จัดสร้างขึ้นมานี้ ใช้หลักการของการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในรูปของ electromotive force ที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดเชื่อมต่อของ K^+ และ K^- โดยใช้ทฤษฎีของ Kirchhoff's Network Law และ Ohm's Law[8,14] การวัดค่า emf ในแต่ละจุดเชื่อมต่อ (ดูรูปที่ 5 ประกอบ) จะเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน ดังนั้น หากต้องการให้มีความละเอียดถูกต้องในการวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์ขณะไหลจะต้องใช้เครื่องบันทึกข้อมูลแบบความเร็วสูงและคอมพิวเตอร์มาช่วยในการบันทึก เครื่องบันทึกข้อมูลแบบความเร็วสูงนี้สามารถควบคุมระยะเวลาห่าง (time intervals) ของการวัดในแต่ละจุดเชื่อมต่อได้จนกระทั่งเสมือนว่าทุกจุดเชื่อมต่อสามารถอ่านอุณหภูมิได้ในเวลาเดียวกัน ขณะนี้คณะวิจัยกำลังดำเนินการในการออกแบบและจัดสร้างเครื่องบันทึกข้อมูลแบบความเร็วสูง เพื่อใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิ จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า เครื่องบันทึกข้อมูลแบบความเร็วสูงสามารถให้ค่าระยะเวลาห่างในแต่ละจุดเชื่อมต่อได้ละเอียดถึง 0.01 วินาที ซึ่งถือว่ามีความละเอียดสูงมาก อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยฉบับนี้ทางคณะวิจัยยังไม่ขอกล่าวในรายละเอียดของการใช้งานในการวัด (รวมถึงผลการทดลองในการวัดของพอลิเมอร์ใดๆ) และในส่วน of เครื่องบันทึกข้อมูลแบบความเร็วสูง

การสอบเทียบของเทอร์โมคัปเปิล

การสอบเทียบจะเป็นการดำเนินการเพื่อใช้หาอุณหภูมิ ณ ค่าแรงดันไฟฟ้าต่างๆ เทียบกับอุณหภูมิมาตรฐานโดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้น วิธีการทำสอบเทียบดังกล่าวจะเป็นการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิ ($^{\circ}C$) ซึ่งในที่นี้ใช้น้ำที่อุณหภูมิ $100^{\circ}C$ (น้ำเดือด) และ $0^{\circ}C$ (น้ำสมน้ำแข็ง) เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำที่จุดเดือดและจุดเยือกแข็งเป็นอุณหภูมิซึ่งเป็นที่ยอมรับกันทั่วค่อนข้างคงที่และให้ค่าเฉพาะการทำกราฟสำหรับการสอบเทียบของเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น ขั้นตอนของการทดสอบจะเริ่มต้นโดยจุ่มเทอร์โมคัปเปิลลงในน้ำ $100^{\circ}C$ และวัดแรงดันไฟฟ้าจาก multimeter จนค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่จดบันทึกข้อมูลแรงดันไฟฟ้า แล้วทำการยกเทอร์โมคัปเปิลออกจากน้ำจุ่มเทอร์โมคัปเปิลลงในน้ำเย็นที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$ และวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจนค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่จึงทำการจดบันทึก นำค่าอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้ามาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 6

Voltage (mV)



รูปที่ 6 การสอบเทียบของหลอดเทอร์โมคัปเปิล

การทดสอบประสิทธิภาพของเทอร์โมคัปเปิลที่สร้างขึ้น

จุดประสงค์การทดสอบประสิทธิภาพ เพื่อทดสอบความสามารถในการอ่านอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล ณ บริเวณแต่ละจุดเชื่อมต่อว่าสามารถตรวจวัดอุณหภูมิได้ในเวลาพร้อมๆ กันได้หรือไม่ ซึ่งจะแสดงถึงการอ่านค่าอุณหภูมิแต่ละจุดเชื่อมต่อว่าเป็นอิสระต่อกันหรือไม่

วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

- 1 ทำการทดสอบในการอ่านอุณหภูมิของแต่ละจุดเชื่อมต่อในเวลาพร้อมกัน โดยการวัดค่าแรงดันทางไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อของหลอดเทอร์โมคัปเปิลโดยใช้หลอดหยด (dropper) หยดน้ำอุณหภูมิ 100°C บน J_1 และหยดน้ำเย็น 0°C บน J_2 (รูปที่ 5) ในเวลาพร้อมๆ กัน จากนั้นอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าของทุกจุดเชื่อมต่อ (หมายเหตุ อุณหภูมิ น้ำเดือดและน้ำเย็น ตรวจสอบโดยใช้เทอร์โมมิเตอร์)
- 2 ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งโดยสลับอุณหภูมิ น้ำที่หยด (หยดน้ำอุณหภูมิ 100°C บน J_2 และหยดน้ำเย็น 0°C บน J_1)
- 3 ทำการทดลองอีกครั้งเหมือนกับข้อ 1 โดยเปลี่ยนจุดเชื่อมต่ออื่นๆ
- 4 จากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่อ่านได้จากจุดเชื่อมต่อต่างๆ มาเปลี่ยนค่าจากแรงดันไฟฟ้าเป็นอุณหภูมิจริงโดยใช้กราฟสำหรับการสอบเทียบ (รูปที่ 6) จะได้ผลทดสอบตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1

อุณหภูมิที่อ่านได้เมื่อหยดน้ำ 100°C บน J_1 และน้ำ 0°C บน J_5

จุดเชื่อมต่อ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
J_1	97.63
J_2	32.2
J_3	31.1
J_4	31.2
J_5	1.84

ตารางที่ 2:

อุณหภูมิที่อ่านได้เมื่อหยดน้ำ 100°C บน J_5 และน้ำ 0°C บน J_1

จุดเชื่อมต่อ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
J_1	2.37
J_2	31.8
J_3	32.0
J_4	31.6
J_5	98.41

ตารางที่ 3:

อุณหภูมิที่อ่านได้เมื่อหยดน้ำ 100°C บน J_2 และน้ำ 0°C บน J_4

จุดเชื่อมต่อ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
J_1	32.5
J_2	97.09
J_3	31.6
J_4	2.63
J_5	32.3

ตารางที่ 4:

อุณหภูมิที่อ่านได้เมื่อหยดน้ำ 100°C บน J_1 และน้ำ 0°C บน J_2

จุดเชื่อมต่อ	อุณหภูมิ($^{\circ}\text{C}$)
J_1	31.4
J_2	2.11
J_3	31.9
J_4	96.57
J_5	32.1

ผลการทดสอบพบว่า เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นสามารถวัดอุณหภูมิในแต่ละจุดเชื่อมต่อในเวลาเดียวกันได้ โดยค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิหยดน้ำที่ นำมาหยด ข้อผิดพลาดจากการที่เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่จัดสร้างขึ้นที่ไม่สามารถอ่านค่าได้ 100°C และ 0°C อย่างถูกต้อง เป็นเพราะข้อผิดพลาดที่จากเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ (เทอร์โมมิเตอร์ที่นำมาใช้ก็อ่านค่าได้ประมาณ 98°C และ 2°C) และอาจมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำในหลอดหยดขณะที่นำน้ำมาหยดบนจุดเชื่อมต่ออุณหภูมิของน้ำอาจมีการเปลี่ยนแปลง อย่างไรก็ตาม ข้อผิดพลาดดังกล่าวมีค่าเพียง $\pm 1.5\%$ ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ในทางปฏิบัติ

จากผลการทดสอบในตารางที่ 1 ถึง 4 ยังพบว่าจุดเชื่อมต่ออื่นๆ ที่ไม่ได้ผ่านการหยดของน้ำมีอุณหภูมิที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิห้อง ซึ่งจากผลการทดสอบนี้สามารถสรุปได้ว่าแต่ละจุดเชื่อมต่อมีความเป็นอิสระต่อกันในการตรวจวัดอุณหภูมิ ส่วนการนำความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างจุดเชื่อมต่อใกล้เคียงอาจมีผลต่อการวัดอุณหภูมิ แต่ก็ไม่มากเนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลเป็นแบบเปลือยทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกอย่างรวดเร็ว และจากการทดสอบพบว่าเทอร์โมคัปเปิลที่สร้างขึ้นมีความไวต่อการวัดอุณหภูมิ เนื่องจากหยดน้ำเป็นหยดเล็กๆ แต่เทอร์โมคัปเปิลสามารถวัดอุณหภูมิได้ทันที

การทดสอบความแข็งแรงของลวดเทอร์โมคัปเปิลที่นำมาใช้

การทดสอบความแข็งแรงของลวดเทอร์โมคัปเปิลที่นำมาใช้น่าจะเป็นแนวทางในการบอกถึงความคงทนแข็งแรงของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่จัดสร้างขึ้น คุณสมบัติการต้านทานแรงดึง (tensile strength) ของลวดเทอร์โมคัปเปิลที่ทำการทดสอบจะเน้นถึงค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัว (elongation) ซึ่งเป็นตัวประกอบที่แสดงถึงการเสียรูปของลวดเทอร์โมคัปเปิล และค่าโมดูลัส (modulus) ซึ่งเป็นตัว

ประกอบที่แสดงความแข็งแรงของลวดเทอร์โมคัปเปิล การทดสอบออกเป็น 3 แนวทางตามลักษณะการใช้งาน ดังนี้คือ

เพื่อทดสอบความแข็งแรงของลวดเทอร์โมคัปเปิล K^+ และ K^- เพื่ออธิบายว่าส่วนประกอบทางเคมีของลวดเทอร์โมคัปเปิล K^+ และ K^- ที่แตกต่างกันมีผลอย่างไรต่อคุณสมบัติทางกลของลวด การทดสอบดำเนินการโดยการนำลวดเทอร์โมคัปเปิล K^+ และ K^- มาทดสอบการดึง ที่ความเร็วในการทดสอบเท่ากับ 100 มม./นาที ผลการทดสอบแสดงในตารางต่อไปนี้ (วิธีการคำนวณหาค่าความเค้นดึง การยืดตัวที่จุดแตกหัก และโมดูลัส สามารถอธิบายได้จากเอกสารอ้างอิงหมายเลขที่ 13)

ตารางที่ 5:

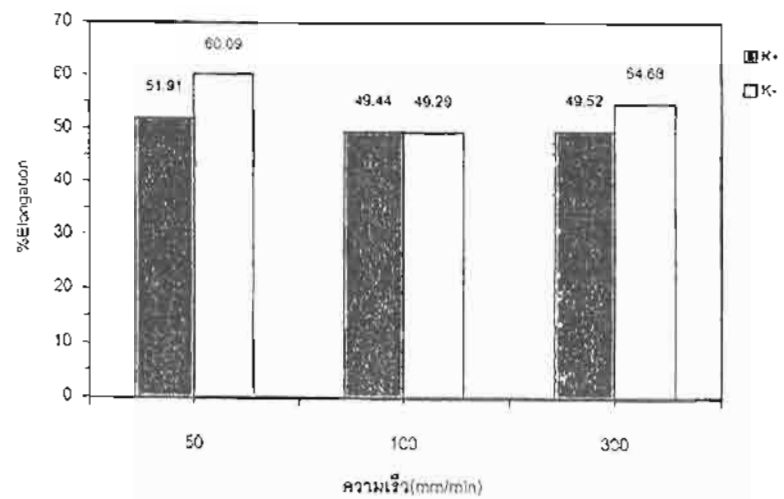
ผลการทดสอบ tensile strength ของลวดเทอร์โมคัปเปิล

ลวดเทอร์โมคัปเปิล	Tensile Stress (GPa)	Elongation (%)	Young Modulus (GPa)
K+	0.74	49.44	1.495
K-	0.74	49.29	1.50

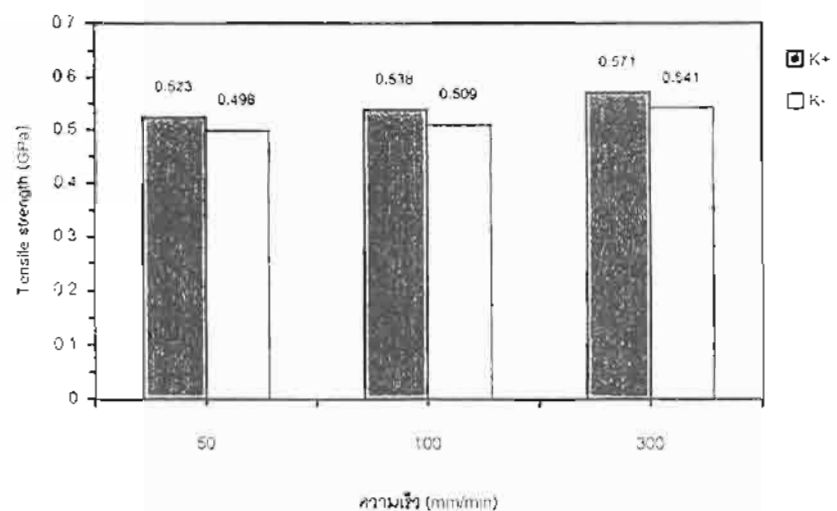
จากการทดลองพบว่าลวดเทอร์โมคัปเปิล K^+ และ K^- ไม่มีสมบัติการต้านทานแรงดึงที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าส่วนประกอบทางเคมีของ K^+ และ K^- ที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อการรับแรงในการดึง ในการนี้ส่งผลต่อการออกแบบและใช้งานของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

- การทดสอบการต้านทานแรงดึง ณ อัตราเร็วในการทดสอบที่แตกต่างกัน ในการวัดอุณหภูมิของกระบวนการผลิตแบบกระบวนการฉีด โดยใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบใหม่นี้ อาจใช้อัตราเร็วในการฉีดของ screw ที่ไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบความสามารถในการรับแรงของเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ณ อัตราเร็วการทดสอบที่แตกต่างกัน วิธีการทดสอบจะดำเนินการโดยนำลวดเทอร์โมคัปเปิล K^+ และ K^- มาทดสอบโดยการดึง โดยใช้ความเร็วในการดึงที่แตกต่างกันคือ ที่ 50 100 และ 300 มม./นาที ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองในรูปที่ 7ก จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเร็วในการดึง จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของการยืดตัวมีค่าลดลงแต่มีค่าการต้านทานแรงดึงสูงขึ้น (รูปที่ 7ข) พฤติกรรมดังกล่าวเป็นที่ทราบกันตามคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุที่เรียกว่า พฤติกรรมการเปราะ-การอ่อนตัวของวัสดุ (brittle-ductile behaviour)[13] อย่างไรก็ตาม จากการทดลองพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของการ

ยึดตัวของลวดเทอร์โมคัปเปิลมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยจึงทำให้ง่ายในการออกแบบและนำไปใช้งาน



(ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation กับความเร็วในการดึง

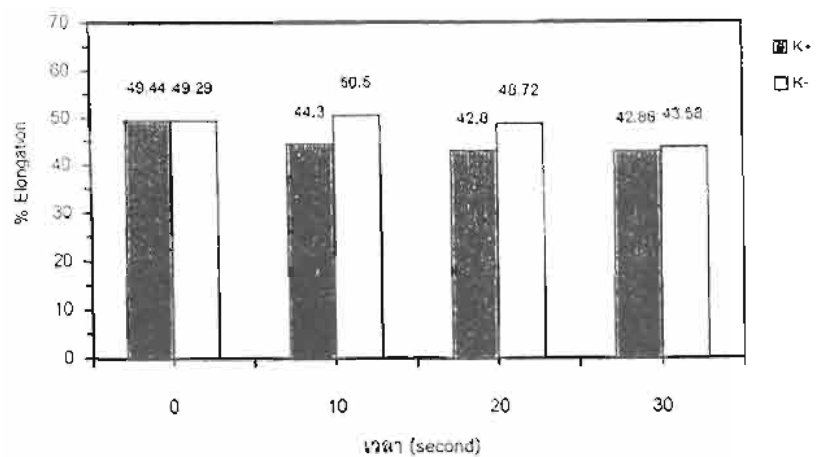


(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง Tensile Strength กับความเร็วในการดึง

รูปที่ 7

- 3 เพื่อทดสอบการต้านทานแรงดึงขณะที่ลวดเทอร์โมคัปเปิลอยู่ภายใต้สภาวะรับแรง เครื่องมือวัดอุณหภูมิอาจเกิดความล้าอันเนื่องมาจากการใช้งานเป็นเวลานานๆ ดังนั้น ควรมีการทดสอบค่าการต้านทานแรงดึงที่เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากความล้าสะสม วิธีการทดสอบจะ

ดำเนินการโดยนำลวดเทอร์โมคัปเปิล K^+ และ K^- มาทำทดสอบการดึงโดยการดึงที่ความเร็ว 100 มม./นาที จนกระทั่งลวดเทอร์โมคัปเปิลมียูกายได้แรงดึง 20 kgf แล้วหยุดการดึงแต่ยังคงให้ลวดมียูกายได้แรงดึงดังกล่าวเป็นเวลา 10 วินาที หลังจากนั้นทำการดึงจนลวดเทอร์โมคัปเปิลจนขาด ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนเวลาที่ให้ลวดเทอร์โมคัปเปิลมียูกายได้แรงดึง 20 kgf เป็นเวลาต่างๆ เช่นที่ 20 และ 30 วินาที ผลการทดลองจะแสดงในรูปที่ 8 และพบว่าลวด K^+ จะมีค่าเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัวลดลงตามระยะเวลาที่หยุดส่วนลวด K^- ค่าเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัวลดลงในอัตราที่สูงกว่า K^+ แต่ค่าเปอร์เซ็นต์ของการยืดตัวของ K^- ยังมีระดับที่สูงกว่า K^+ ผลการทดลองนี้ให้ประโยชน์ในแง่ของการใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในกระบวนการผลิตจริง เช่น กระบวนการฉีดพลาสติก พอลิเมอร์หลอมเหลวหลังจากการฉีดยังคงมียูกายได้ความดันในช่วงของการอัดเต็ม (packing stage) ซึ่งความดันนี้เราเรียกว่า ความดันย้ำ (hold-on pressure) เพื่อเติมพอลิเมอร์หลอมเหลวให้เต็มแม่พิมพ์ ในกรณีดังกล่าวนี้ ลวดเทอร์โมคัปเปิลจะมียูกายได้แรงดึง (ความดัน) อยู่ตลอดเวลา ผลการทดสอบสภาวะนี้ยังช่วยให้การวิเคราะห์อายุการใช้งานของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้น ดังนั้น เพื่อให้ลวดมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นจึงจำเป็นต้องออกแบบให้ลวด K^+ เป็นตัวหลัก และใช้ลวด K^- เป็นตัวสำรองในแต่ละจุด



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง %Elongation กับ เวลาที่หยุดดึงของลวดเทอร์โมคัปเปิล

การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นกับเครื่องมือวัดที่มีตามท้องตลาดใน แง่ราคา

การคิดราคาของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการออกแบบเครื่องมือวัดเป็นรูป
ร่างตามผังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ

1. โครงสร้างเสริมแรง ที่ทำมาจาก Teflon ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนและสามารถทนอุณหภูมิ
ได้ 340°C ได้ โดยไม่เกิดความเสียหายและสามารถทำการขึ้นรูปได้ง่ายโดยการกลึง ไส
กัด และการเจาะ เช่น ในสถานที่ทำวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
คณะผู้วิจัยได้ทำการวัดอุณหภูมิในห้องหลอมเหลวทรงกระบอก ในเครื่องฉีดพลาสติกที่ใช้
โครงสร้างเสริมแรงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มม. และหนา 6 มม. (ถ้าเป็นการขบวนการ
ผลิตด้วยวิธีอื่นขนาดของโครงสร้างเสริมแรงก็จะเปลี่ยนไป) ค่าใช้จ่ายในการสร้างโครงสร้าง
เสริมแรง 2 วงสำหรับเครื่องมือวัดอุณหภูมิ 1 ชุด คิดเป็นเงิน 100 บาท
2. ลวดเทอร์โมคัปเปิลแบบเปลือยชนิด K ราคาเมตรละ 100 บาท ทำการสานให้เป็นรูป
ตาข่าย โดยใช้ K^{+} จำนวน 1 เส้นยาว 0.12 เมตร และใช้ K^{-} จำนวน 5 เส้น ยาว
0.12 เมตร (ดังรูปที่ 5) เมื่อคิดราคาของเส้นลวดที่ใช้ประมาณ 60 บาท

ตารางที่ เมื่อเปรียบเทียบราคาของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่สร้างขึ้นกับเครื่องมือวัดแบบอื่นๆ ดัง
มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 6

การเปรียบเทียบราคาของเทอร์โมคัปเปิลแบบต่างๆ (ไม่รวมอุปกรณ์บันทึกการวัด)

ลักษณะของเครื่องมือวัด	ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง (มม.)	ราคาหน่วย (บาท)	แหล่งที่มา ของราคา	ปริมาณค่าเช่าที่วัดได้ ณ เวลาหนึ่ง
1 เทอร์โมคัปเปิลแบบแห้ง	5	400	⊗	วัดได้ตำแหน่งเดียว
2 RTD	5	1,300	⊗	วัดได้ตำแหน่งเดียว
3 เทอร์มิสเตอร์	5	1,500	⊗	วัดได้ตำแหน่งเดียว
4 เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น	5.55	160	งานวิจัยนี้	วัดได้หลายตำแหน่ง (ในที่นี้ได้ 5 ตำแหน่ง)

หมายเหตุ ⊗ หมายถึงข้อมูลที่ได้จากการสอบถามจาก บริษัทแลมซิมเตอร์ จำกัด 634/23-26 ถนนพหลโยธิน แขวงสามเสน
ใน เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400

งานวิจัยฉบับนี้ถือเป็นส่วนเริ่มต้นของโครงการวิจัยที่มีวัตถุประสงค์เพื่อติดตามและวัดอุณหภูมิของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องมือผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ ขณะนี้ คณะวิจัยกำลังดำเนินการใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิดังกล่าวนี้ ในการวัดอุณหภูมิของของไหลพอลิเมอร์ในเครื่องฉีดและรีดพลาสติก ซึ่งคาดว่าจะผลการทดลองจะสามารถรายงานและตีพิมพ์ได้ในโอกาสอันใกล้ต่อไป

บทสรุป

เครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้นในงานวิจัยครั้งนี้ใช้หลักการของเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งการออกแบบและจัดสร้างในงานนี้ทำให้เครื่องมือวัดอุณหภูมิมีข้อได้เปรียบเหนือเครื่องมือวัดประเภทอื่นๆ ที่ใช้งานในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ

- ออกแบบและจัดสร้างง่าย
- ต้นทุนการผลิตต่ำ
- วัสดุที่ใช้ในการจัดสร้างหาซื้อได้ง่าย และราคาถูก
- วิธีการสอบเทียบและใช้งานค่อนข้างง่าย
- ให้ความแม่นยำในการวัดสูง
- พิจารณาจากโครงสร้างการออกแบบเครื่องมือวัดชนิดนี้ไม่รบกวนการไหลของพอลิเมอร์ขณะทำการวัด
- มีความคงทน แข็งแรง
- สามารถใช้วัดในอุณหภูมิสูง (ประมาณ 300°C)
- สามารถใช้วัดได้หลายตำแหน่งในเวลาเดียวกัน
- ข้อผิดพลาดของการวัดอันเนื่องจากการนำความร้อน และการเกิดความร้อนสูงเนื่องมาจากการเสียดสีมีค่าน้อยมาก

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับการให้ทุนวิจัยสนับสนุนการวิจัยในโครงการวิจัยนี้ (MT-B-S6-17-20-102).

เอกสารอ้างอิง

1. Sombatsompop N. and Wood A.K. **"An Examination of Melt Fracture in Molten Polymers"** Polym.-Plast. Technol. Eng., 37 (3), 317-331, 1998.
2. Chnstodoulou K.J., Wood A.K. and Sombatsompop N. **"Novel Techniques for Measurement of Die Swell of Polymer Melt"** SPE ANTEC Tech. Papers, 44 (1), 915-919, 1998
3. Holman J.P. **"Experimental Methods for Engineers"** McGraw-Hill, New York, 1994
4. Van Leeuwen **"Stock Temperature Measurement in Plastifying Equipment"** Polym. Eng. Sci., April, 98-109, 1967.
5. M. Hulatt and W.L. Wilkinson **"Temperature Measurement in Polymer Melts Flowing in Ducts"** Plast. Rubb. Proc. March, 15-18, 1977.
6. Rischl G.C. and Bruker I. **"Melt Homogeneity in Injection Moulding: Application of a Ring Bar Device"** Polym. Eng. Sci., 29 (3), 202-208, 1989.
7. Saltuf I., Siskovic N. and Grisey R.G. **"Energy Transport to Molten Flowing Polymer Systems: 1. Development of an Apparatus to Obtain Temperature Profiles"** Polym. Eng. Sci., 12 (6), 397-401, 1972.
8. Wood A.K., Judeh Y.H. and Yue M.Z. **"Two-Three Dimensional Temperature Sensors"** Patent Applications GB 2291197, January 1996
9. Sombatsompop N., Wood A.K. and Yue M.Z. **"Techniques for the Simultaneous Determination of Temperature and Velocity Profiles in Flowing Polymer Melts"** ASME Fluid Measure. Instrument., FED-Vol. 239 (4), 371-377, 1996
10. Whelan T. **"Polymer Technology Dictionary"** Chapman & Hall, London, 1994
11. Brydson J.A. **"Plastics Materials"**, Butterworths-Heinemann, Oxford, 1995
12. Jacob J.M. **"Industrial Control Electronics"** Prentice Hall, New Jersey, 1988.