

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการใช้วัสดุสังเคราะห์ประเภทพลาสติกเป็นจำนวนมาก ปริมาณสูญเสียของพลาสติกในการผลิตในแต่ละวันก็มีมากเช่นกัน มูลค่าของการสูญเสียมากจนเป็นความเสียหายตั้งแต่วัตถุดิบจนถึงเครื่องจักรในโรงงาน เหตุผลหนึ่งก็มาจากการไม่ทราบคุณสมบัติที่ถูกต้องหรือความเหมาะสมของคุณสมบัติของพลาสติกที่นำมาผลิต จึงต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของวัตถุดิบการสูญเสียที่จะเกิดก็คือ ต้องส่งคืนหรือทิ้งเม็ดพลาสติกเหล่านั้น และอาจตามมาด้วยความเสียหาย คือต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อรอเม็ดพลาสติกใหม่หรือถ้าเม็ดพลาสติกที่ใส่เข้าไปในเครื่องจักร ทำให้เครื่องจักรเสียหายใช้การไม่ได้ต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อซ่อมแซม ขาดรายได้ ต้นทุนการผลิตเพิ่ม ขาดทุน แต่ถ้าทดสอบหาอัตราการไหลของพลาสติกก่อนทำการผลิตจริง ความเสี่ยงที่กล่าวมาตั้งแต่ต้นก็จะน้อยลงหรือหมดไป

เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกนั้นเป็นการบอกให้ทราบถึงมวลของพลาสติกเหลวที่มีอุณหภูมิตามกำหนดเป็นกรัมที่ถูกกดผ่านหัวฉีดมาตรฐานออกมาโดยแรงกดของลูกสูบที่มีขนาดมาตรฐานที่กำหนดเอาไว้ในเวลา 10 นาที

เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก สามารถทดสอบคุณสมบัติ อัตราการไหล (Melt Flow Rate) ความเหนียว, ความหนาแน่นขณะที่พลาสติกหลอมแล้ว ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่นำมาพิจารณาเลือกวิธีการทำผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมกับ ชนิดและเกรดของพอลิเมอร์นั้น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างแปรรูป เช่น การฉีดไม่เต็มเบ้า

1.2 วัตถุประสงค์โครงการ

- 1.2.1 ศึกษาทฤษฎีและหลักการของการไหลของพลาสติก เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม
- 1.2.2 ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการไหลของพลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D 1238 และ ISO 1133
- 1.2.3 เพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติการหลอมไหลของพลาสติก

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 การออกแบบ การสร้าง และ การทดลอง ของเครื่องทดสอบการไหลพลาสติก จะเป็นไปตาม มาตรฐานของ ASTM D 1238 และ ISO 1133
- 1.3.2 ใช้ทดสอบกับเม็ดพลาสติก พอลิโพรไพลีน (PP)
- 1.3.3 น้ำหนักที่ใช้กด (รวมลูกสูบ) 1, 1.2, 2, 2.16 และ 3.8 กิโลกรัม

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้เครื่องทดสอบการอัดรุกรานไหลของพลาสติกที่มีค่าผิดพลาดน้อย และได้มาตรฐาน

1.5.2 มีความรู้เพิ่มในด้านการผลิตพลาสติก และนำหลักการไปประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรม

1.5.3 ทราบคุณสมบัติการไหลของพลาสติก และ เลือกชนิดพลาสติกมาใช้กับเครื่องจักร ได้อย่างเหมาะสม

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบและจัดสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก จำเป็นต้องศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานอย่างถูกวิธีและตรงตามความถูกต้อง นำมาซึ่งความสำเร็จในการจัดสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก ที่พร้อมใช้งาน

2.1 ประวัติความเป็นมาของพลาสติก [1]

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีความจำเป็นสำหรับการดำเนินชีวิตของมนุษย์ในยุคนี้มาก จะพบเห็นการใช้พลาสติกในทุกชนิดของอุตสาหกรรมและกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันตัวอย่างการใช้งานเช่น ทำถังและอุปกรณ์ต่างๆเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เครื่องใช้สำหรับเกษตรกรรม ของใช้ครัวเรือน เฟอร์นิเจอร์ และอีกมากมาย

พลาสติกได้ถือกำเนิดขึ้นในทวีปอเมริกาปี พ.ศ.2411 ช่างพิมพ์ชาวอเมริกันชื่อ John Wesley Hyatt ได้ค้นพบพลาสติกชนิดแรกของสหรัฐอเมริกาชื่อเซลลูลอยด์ (Celluloid หรือ Cellulose Nitrate) โดยการนำเอาไพรอกซีลิน (Pyroxylin) ซึ่งทำจากฝ้ายกับกรดไนตริกผสมกับการบูร (Solid Camphor) ทำเป็นลูกบิลเลียดแทนการใช้งาช้างซึ่งเกิดขาดแคลนมากในขณะนั้น ขณะเดียวกันที่อังกฤษได้นำเอาไพรอกซีลินไปทำเป็นแล็กเกอร์และวัสดุเคลือบผิว (Coating Materials) อื่นๆ ต่อมาได้นำเอาเซลลูลอยด์ดัดแปลงไปใช้ทำเป็นหมึกพิมพ์พลาสติก (สีชมพู) แทนการใช้ยางแข็งหลังจากนั้นได้นำเอาไปใช้ทำเป็นกระจกรถยนต์ จนกระทั่งพ.ศ.2425 บริษัท Eastman ได้ประดิษฐ์ทำเป็นฟิล์มภาพยนตร์ การคิดค้นพลาสติกได้หยุดชะงักไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง จนกระทั่งปี พ.ศ. 2452 Driro Hendrik Baekeland ได้ค้นพบพลาสติกชื่อ ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol Formaldehyde) หรือ ฟีนอลิก (Phenolic) เข้าด้วยกันพลาสติกชนิดนี้เรารู้จักกันในชื่อ เบคเคอไรท์ (Bakelite) ซึ่งใช้ทำด้ามกระทะ หม้อและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ

สำหรับประเทศไทยนั้นพลาสติกได้นำเข้ามาใช้ในประเทศไทยกว่า 40 ปีก่อน โดยนำเข้ามาในรูปแบบของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป เช่น ของเด็กเล่น เครื่องใช้ภายในบ้าน ฯลฯ ประมาณปี พ.ศ. 2513 ผู้ประกอบการได้สั่งเครื่องจักรและแม่พิมพ์พลาสติกมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ขึ้นในประเทศอุตสาหกรรมสาขาพลาสติกจึงได้เริ่มขึ้น และเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว

2.2 ชนิดของพลาสติกและคุณสมบัติของพลาสติก [1]

พลาสติกหรือที่เรียกว่า “พอลิเมอร์”(Polymer) เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากขบวนการที่เรียกว่า “พอลิเมอไรเซชัน” (Polymerization) ซึ่งเป็นการก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้หน่วยเล็กๆที่ เรียกว่า “โมโนเมอร์”(Monomer) เกิดการรวมตัวเชื่อมต่อกัน ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นและเปลี่ยนสถานะทางการภาพจากเดิมที่อาจอยู่ในรูปของก๊าซ หรือของเหลว ให้อยู่ในรูปของแข็ง ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ พลาสติกที่มีใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวันของเรานี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ใหญ่ๆ คือ

2.2.1 เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) [1]

เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) พลาสติกชนิดนี้จะมีรูปทางที่ถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ความดัน หรือตัวเร่งปฏิกิริยา การขึ้นรูปทำได้ยาก และไม่สามารถหลอมเหลวเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ยังมีความคงทนสูง รวมทั้งการใช้งานยังอยู่ในวงแคบ ทำให้ปัจจุบันมีการใช้งานในอุตสาหกรรมเพียงไม่กี่ประเภท พลาสติกประเภทนี้ได้แก่ เมลามีน ฟีนอลิก ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ โพลีเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัว เป็นต้น โดยส่วนใหญ่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์เครื่องครัวต่างๆ เช่น ถ้วยชาม หม้อห้อม กระจกม้วน ชิ้นส่วนปลั๊กไฟ พลาสติกหล่อ เช่น ชิ้นส่วนในเครื่องบิน ที่คาดผม เป็นต้น เทอร์โมเซตติงมีหลายชนิดด้วยกันแต่ที่สำคัญและใช้กันอยู่ทั่วไปมีดังนี้คือ อะมิโน (Amino) ฟีนอลิก (Phenolic) พอลิเอสเตอร์ (Unsaturated Polyester Resin) ซิลิโคน (Silicone) ยูรีเทน (Uretane) หรือพอลิยูรีเทน (Polyurethane)

2.2.2 เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) [1]

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับมาให้ใหม่ได้อีกครั้งหลังจากนำไปหล่อทำผลิตภัณฑ์แล้ว เปรียบเสมือนน้ำแข็งเมื่อทำให้เย็นน้ำจะแข็งตัว เมื่อถูกความร้อนก็จะละลาย และเมื่อทำให้เย็นก็จะกลับมาแข็งตัวอีกครั้ง และจะกลับไปกลับมาไม่มีที่สิ้นสุด เรียกว่า “Plastics With a Memory” พลาสติกประเภทนี้เมื่อได้รับความร้อน หรือความดันระหว่างขบวนการขึ้นรูป จะเปลี่ยนแปลงสถานะกายภาพ กล่าวคือ เมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนนุ่มและเมื่อเย็นตัวลงจะแข็งตัว โดยที่โครงสร้างทางเคมีจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้พลาสติกประเภทนี้มีคุณสมบัติที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายต้นทุนการผลิตต่ำและมีหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้งานได้กว้างขวาง ปัจจุบันมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ของเด็กเล่น ดอกไม้ประดิษฐ์ ชิ้นส่วนรถยนต์ และผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ พลาสติกประเภทที่สำคัญได้แก่ พอลิเอทีลีน (PE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอทีลีนฟาทาเลต (PET) ฯลฯ ชนิดของเทอร์โมพลาสติกที่สำคัญและใช้งานกันอยู่โดยทั่วไปได้แก่ อะซีทัล (Acetals) อะคริลิก (Acrylic) ฟลูออโรคาร์บอน (Flurocarbons) โพลีเอไมด์ (Polyamide) หรือไนลอน (Nylon) พอลิโอเลฟิน (Polyolefin) พอลิเอทีลีน (Polyethylene) พอลีสไตรีน (Polystyrene) เอบีเอส (ABS) ไวนิล (Vinyl) เซลลูลอส (Cellulose) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) ไดไอโอโนเมอร์ (Ionomer) พอลิไอมิด (Polyamide) พอลิซัลโฟเน (Polysulphone) เอทีลีน ไวนิลอะซิเตต (EVA) พอลิเอสเตอร์ (Polyester)

ในประเทศไทยนิยมใช้พลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติกกันมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากความสามารถในงานหลายประเภท โดยเฉพาะงานด้านบรรจุภัณฑ์ พลาสติกที่มีการผลิตในรูปแบบต่างๆ เช่น

พอลิเอทีลีน (PE) ผลิตเป็นถุงพลาสติกทั้งชนิดร้อนและชนิดเย็น ขวด ถัง กระจสบ พลาสติก และแผ่นพลาสติกประเภทอ่อนนุ่ม เป็นต้น

พอลิโพรพิลีน (PP) นิยมผลิตมาในรูปถุงใส่อาหาร เสื้อผ้าสำเร็จรูป กระจสบพลาสติก ปูนซีเมนต์ เป็นต้น

พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และ พอลิสไตรีน (PS) นิยมผลิตถังบรรจุผักสด และเนื้อสดบางชนิด เป็นต้น

เนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายประการของพลาสติก โดยเฉพาะต้นทุนที่ต่ำ ทำให้การใช้พลาสติกในอุตสาหกรรมขยายตัวอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นมาก

2.3 ทฤษฎีพฤติกรรมการไหลของพลาสติก [1],[2]

2.3.1 ความหนืดและสมบัติการไหล

เมื่อของไหล (fluid)เกิดการไหล ค่าความเร็ว (เมตร/วินาที) และอัตราการไหล (เมตร³/วินาที) ถูกควบคุมโดยการต้านทานภายใน(internal resistance)ของของไหลนั้น ความต้านทานภายในของของไหลคือค่าความหนืด(viscosity) ซึ่งในทางปฏิบัติหาได้จากการใช้เครื่องรีโอมิเตอร์ นอกจากค่าความหนืดแล้ว เครื่องรีโอมิเตอร์ยังใช้ในการวัดคุณสมบัติอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหล เช่นความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) เป็นต้น ความหนืดของคุณสมบัติต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความหนืดของวัสดุต่างๆ

ชนิดวัสดุ	ความหนืด (ปาสคาล วินาที)	ลักษณะเนื้อสาร
อากาศ	10^{-5}	ก๊าซ
น้ำ	10^{-3}	ของเหลว
ลาเทกซ์พอลิเมอร์	$10^{-3} - 10^{-2}$	ของเหลว
สี	$10^{-2} - 10^{-1}$	เป็นครีม
น้ำมันมะกอก	10^{-1}	ของเหลว
กลีเซอรอล	10	ของเหลวค่อนข้างหนืด
เทอร์โมเซต (อีพอกซี)	50	หนืดคล้ายน้ำเชื่อม
พอลิยูรีเทนเหลว	$10^{-2} - 10^{-3}$	หนืดคล้ายน้ำเชื่อม
พลาสติกหลอม	$10^{-2} - 10^{-6}$	เหนียวหนืด
ยางดิบ	$10^{-2} - 10^{-6}$	แข็งและยืดหยุ่น
ยางมะตอย	10^9	ของแข็งไหลได้
แก้ว	10^9	ของแข็ง

จากตารางที่ 2.1 พบว่าพลาสติกหลอมเป็นของไหลที่มีความหนืดอยู่ในช่วง $10^{-2} - 10^{-6}$ ปาสคาล วินาทีของไหลชนิดนี้แสดงพฤติกรรมการไหลที่ซับซ้อนมาก กล่าวคือ ค่าความหนืดเปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบต่างๆ เช่น อัตราการเฉือน (shear rate) เวลาที่ใช้ในการไหล อุณหภูมิ ความดันและแรงกระทำจากภายนอก ในขณะที่ไหลพลาสติกหลอมสนองต่อคุณสมบัติทั้งการไหลแบบเฉือน (shear property) และการไหลแบบยืด (extensional property) ที่ต่างกัน กล่าวคือ มีทั้งการไหลหนืด (viscous stress หรือ extensional stress)

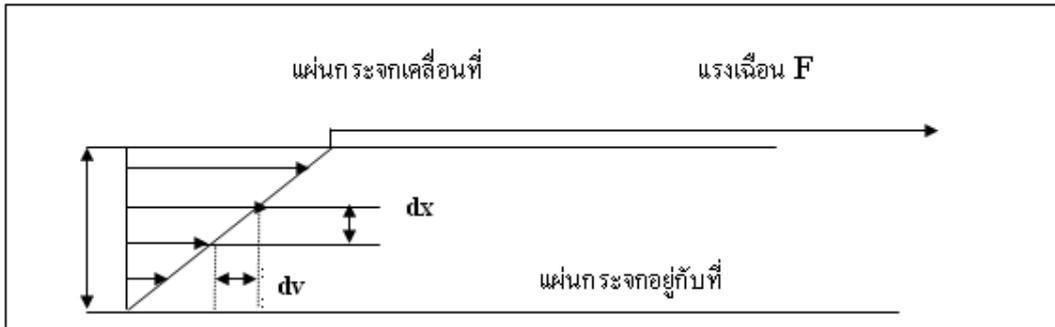
พอลิเมอร์หลอมเป็นวัสดุประเภทวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) กล่าวคือมีทั้งลักษณะหนืด (viscous) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของ ของไหล (fluid) และยืดหยุ่น (elastic) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ ของแข็งยืดหยุ่นปริมาณหรือองศาของความหนืดและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอม ขึ้นอยู่กับสภาวะของการแปรรูป ชนิดของพอลิเมอร์ พฤติกรรม การไหลของพอลิเมอร์หลอมมีความซับซ้อนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขณะไหลในเครื่องแปรรูป

2.3.2 การแบ่งชนิดของของไหล

คุณสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมในกระบวนการแปรรูป มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเรียนรู้ ลักษณะการไหลของของไหลชนิดต่างๆ โดยทั่วไปแบ่งชนิดของของไหลตามพฤติกรรมการไหลได้ 2 ชนิด คือ

2.3.2.1 ของไหลอุดมคติหรือของไหลนิวตันเนียน (Ideal or Newtonian Fluids)

พิจารณาการผิดรูปและการไหลของของไหลนิวตันเนียนที่วางตัวอยู่ระหว่างแผ่นกระจกใสบาง 2 แผ่นมีพื้นที่กว้างมาก (A) มีระยะห่างเป็น X เมตร ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การไหลและการผิดรูปของของไหลนิวตันเนียนระหว่างแผ่นกระจกสองแผ่น เนื่องจากอิทธิพลของความเค้น (shear stress) [2]

ใช้แรง F (นิวตัน) ซึ่งเป็นแรงคงที่ดึงแผ่นกระจกด้านบนด้วยความเร็ว V (เมตรต่อวินาที) ในขณะที่ให้แผ่นล่างอยู่ที่สามารถคำนวณความเค้นได้ดังนี้

$$\tau = \frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dx} = \eta \gamma \quad (2.1)$$

เมื่อ

η คือ ความหนืดของของไหลนิวตันเนียน (Newtonian viscosity) มีหน่วยเป็น ปาสคาลวินาที

γ คือ อัตราการเฉือน (shear rate) มีหน่วยเป็น (วินาที)

F คือ แรงที่ใช้ดึงแผ่นด้านบน มีหน่วยเป็น นิวตัน

v คือ ค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที

τ คือ ความเค้นเฉือน (shear stress) มีหน่วยเป็น ปาสคาล (นิวตันต่อตารางเมตร)

ดังนั้นในกรณีการไหลของของไหลนิวตันเนียน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนจะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.2

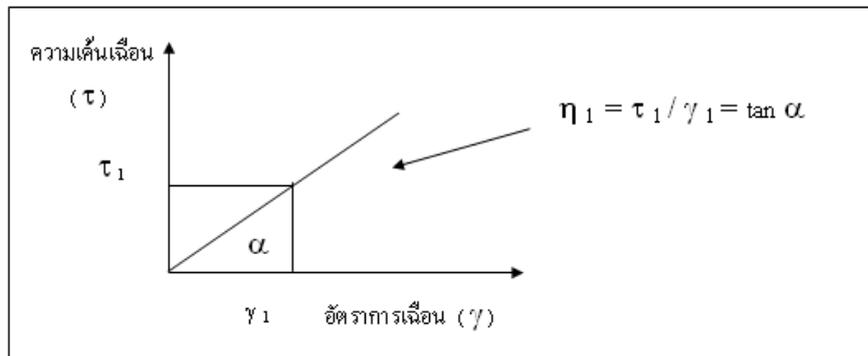
$$\tau \propto \left(\frac{dv}{dx} \right) \quad (2.2)$$

ค่าความหนืดเฉือนของ ของไหลนิวทอเนียน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} = \tan \alpha \quad (2.3)$$

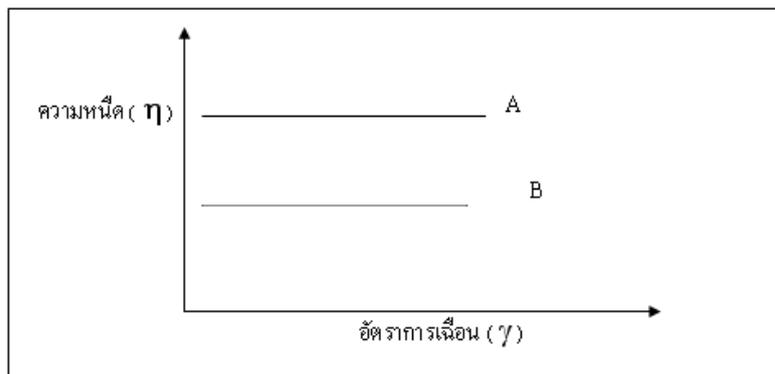
α คือ มุมที่เส้นกราฟของความหนืดทำมุมกับแกนของอัตราการเฉือน ดังรูปที่ 2.2

ดังนั้นจะเห็นว่ากราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือนของ ของไหลนิวทอเนียนจะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงค่าความหนืดของการไหลของ ของไหลนิวทอเนียนคงที่ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราเฉือนมักจะเรียกว่า เส้นกราฟของการไหล (flow curve) ค่าความหนืดของ ของไหลนิวทอเนียนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และชนิดของของไหล ตัวอย่างของไหลในกลุ่มของ ของไหลนิวทอเนียนส่วนใหญ่ แ่ของไหลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำ น้ำมันพืช และ ตัวทำละลายอินทรีย์



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือน [2]

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด ของของไหลนิวทอเนียนกับ อัตราการเฉือนเป็นกราฟเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าของไหลสองชนิดมีค่าความหนืดคงที่ แต่ ของไหล A มีค่าความหนืดเฉือนสูงกว่าของไหล B ที่ทุกค่าของอัตราการเฉือน



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการเฉือนของของไหลนิวทอเนียน 2 ชนิด คือ ของไหล A และ B [2]

2.3.2.2 ของไหลนอนิวทอนเนียน (Non-Newtonian Fluids)

จากรูปที่ 2.3 พบว่าค่าความหนืดของ ของไหลนิวทอนเนียน มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราการเฉือนและไม่ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการไหล แต่มีวัสดุหลายชนิดที่ไม่แสดงสมบัติการไหลทำนองเดียวกับของไหลนิวทอนเนียน กล่าวคือสมบัติการไหลมีการเบี่ยงเบนไปจากนี้ ตัวอย่างวัสดุเหล่านี้ เช่น พอลิเมอร์หลอม สารละลายพอลิเมอร์ และน้ำยาง เป็นต้น เรียกของไหลกลุ่มนี้ว่าเป็น ของไหลนอนิวทอนเนียน ซึ่งมีสมบัติเฉพาะที่สำคัญ คือเส้นกราฟของการไหล (flow curve) ไม่เป็นเส้นตรงดังเช่นกรณีการไหลของของไหลนิวทอนเนียน และความหนืดของการไหลขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือนและประวัติการถูกเฉือน (shear history) ของไหลที่แสดงพฤติกรรมการไหลแบบนอนิวทอนเนียนแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ

2.3.3 กลุ่มของไหลที่สมบัติการไหลไม่ขึ้นกับเวลา (Time – Independent Fluids)

นิยามทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายสมบัติการไหลของของไหลไม่ขึ้นกับเวลาแสดงดังสมการ 2.4

$$\gamma = f \times \tau = \frac{\tau}{\eta} \quad (2.4)$$

ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือน (flow curve) และระหว่างความหนืดกับอัตราการเฉือน (viscosity curve) (จากรูปที่ 2.4) ของไหลในกลุ่มนี้เปรียบเทียบกับของไหลนิวทอนเนียน และของไหลไดแลทแทน

2.3.3.1 การไหลของของไหลบิงแฮม (Bingham Fluid)

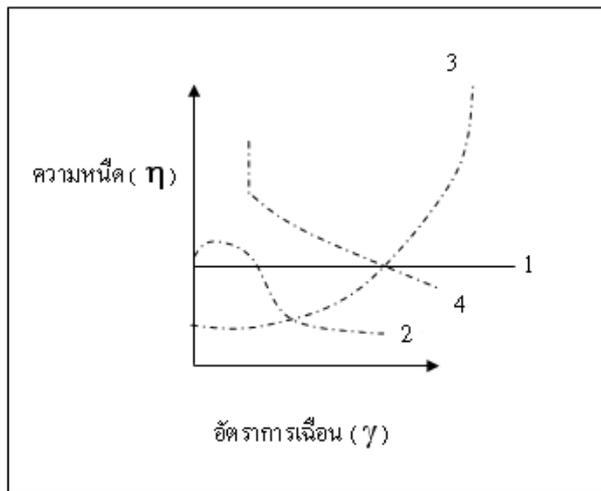
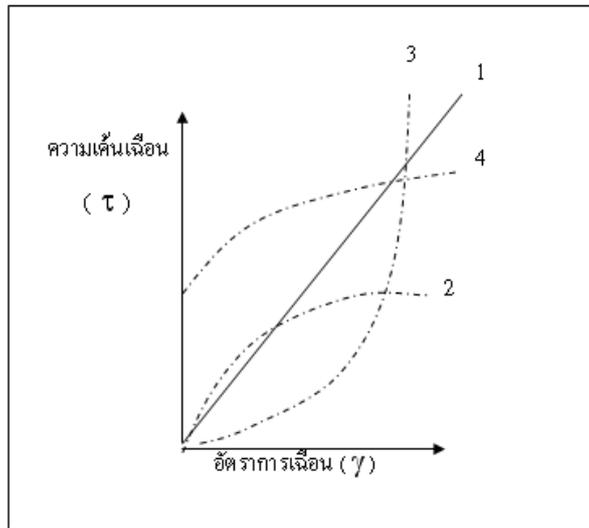
ของไหลบิงแฮม มีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะพิเศษ และจะไม่เกิดการไหลอย่างทันทีทันใดเมื่อได้รับความเค้น แต่เมื่อได้รับความเค้นที่มีขนาดมากกว่าความเค้นเฉือนค่าหนึ่ง ที่เรียกว่า yield stress โครงสร้างภายในจะเกิดการสูญเสียสภาพ และเริ่มเกิดการไหลที่ค่าความเค้นเฉือนมากกว่าค่านี้ ได้เส้นโค้งของการไหลเป็นเส้นตรง กล่าวคือ มีพฤติกรรมการไหลเช่นเดียวกับกรณีของไหลนิวทอนเนียน สมบัติการไหลของของไหลบิงแฮมอธิบายได้โดยใช้ สมการที่ 2.5

$$\gamma = \frac{1}{\eta} (\tau - \tau_y) \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$\tau \geq \tau_y$$

ตัวอย่างของไหลที่เป็นของไหลบิงแฮม เช่น ยาสีฟัน ซอสมะเขือเทศ และของไหลที่ใช้ในการขุดเจาะน้ำมัน (drilling)



รูปที่ 2.4 เส้นกราฟของการไหลและเส้นกราฟของความหนืดของของไหลชนิดต่างๆ
 1. ของไหลนิวทอนเนียน 2. ของไหลซูดอพลาสติก 3. ของไหลไดแลทเทชั่น และ
 4. ของไหลบิงแฮม [2]

2.3.3.2 ของไหลซูดอพลาสติก (Pseudo plastic fluid)

การไหลของซูดอพลาสติกมีความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มค่าอัตราเฉือน (แสดงในรูปที่ 2.4) เรียกการไหลแบบนี้ว่าเป็นพฤติกรรมการลดความหนืด (shear thinning behavior) นอกจากนี้เส้นกราฟของการไหล จะมีแนวโน้มขนานกับแกนของอัตราเฉือนเมื่อค่าอัตราเฉือนมีค่าสูง คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของ ของไหลชนิดนี้คือ ไม่มีลักษณะที่มีค่าความเค้นคงที่ขณะเพิ่มอัตราเฉือน เหมือนกรณีของไหลบิงแฮม

มีการเสนอสมการจำนวนมากเพื่ออธิบายสมบัติการไหลของของไหลซูดอพลาสติก แต่สมการที่ได้รับการยอมรับในความถูกต้องมากที่สุดคือ สมการยกกำลัง (power law equation Ostwald-de-Waele equation) รายละเอียดของสมการ แสดงดังในสมการที่ 2.6

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \quad (2.6)$$

$$\eta = K(\dot{\gamma})^{n-1}$$

เมื่อ

n คือ ดัชนีของสมการยกกำลังหรือดัชนีนอนนิวทอนเนียน (power law index)

K คือ ดัชนีของความเหนียวแน่น (consistency index)

สามารถใช้ค่าดัชนีของการยกกำลังในการจำแนกชนิดของของไหลได้ กล่าวคือ ของไหลนิวทอนเนียนมีค่า $n = 1$ เสมอ แต่ของไหลซิวโดพลาสติกจะมีค่า n น้อยกว่า 1 ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบซิวโดพลาสติก เช่น พอลิเมอร์หลอม สารละลายพอลิเมอร์ อาหารเหลวชนิดต่างๆ

โดยทั่วไปสมการยกกำลังไม่สามารถใช้ในการอธิบายสมบัติการไหลตลอดช่วงของอัตราการเฉือน แต่สามารถใช้สมการยกกำลังอธิบายสมบัติของของไหลเมื่อ กราฟระหว่าง $\log(\tau)$ กับ $\log(\dot{\gamma})$ เป็นเส้นตรงเท่านั้น และค่า n ของสมการยกกำลังสามารถหาได้จากความชันของความสัมพันธ์ข้างต้น

พอลิเมอร์หลอมขณะไหลในเครื่องแปรรูปมีพฤติกรรมซับซ้อนกว่าการอธิบายด้วยสมการยกกำลัง กล่าวคือมีเวลาในการผิดรูปและการคืนตัวของโมเลกุลหรือมีเวลาของการคลายตัวเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่ในทางวิศวกรรมและทางเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มักจะอนุโลมใช้สมการยกกำลังเป็นเกณฑ์ในการออกแบบและสร้างเบ้า หัวตาย และการทดสอบสมบัติการไหลเบื้องต้นของพอลิเมอร์หลอมเสมอแต่บรรดานักเทคโนโลยีพอลิเมอร์ทราบดีว่าการใช้สมการยกกำลังเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายพฤติกรรมทุกด้านของพอลิเมอร์หลอม โดยเฉพาะปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบยืด (extensional flow) และการเป็นวิสโคอีลาสติก (viscoelasticity) ได้การใช้สมการยกกำลังเป็นเพียงการประเมินสมบัติการไหลเบื้องต้นเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์หลอมทุกชนิดมีสมบัติการไหลแบบซิวโดพลาสติกในบางช่วงของอัตราการเฉือนเท่านั้น กล่าวคือถ้าพอลิเมอร์หลอมที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของอัตราการเฉือนที่ต่ำมาก (< 3 วินาที⁻¹) และสูงมากจะมีคุณสมบัติเป็นของไหลนิวทอนเนียน

นอกจากสมการยกกำลังแล้วยังมีสมการชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในการอธิบายสมบัติการไหลของของไหลซิวโดพลาสติกสรุปได้ดังสมการที่ 2.8 – 2.10

$$\tau = A \sin^{-1}\left(\frac{\dot{\gamma}}{C}\right) \quad (2.8)$$

สมการไคริง (Eyring equation)

$$\tau = \frac{\dot{\gamma}}{B} + C \sin\left(\frac{\tau}{A}\right) \quad (2.9)$$

สมการคาร์รีวีย์ (Carreau equation)

$$\tau = \frac{\dot{\gamma}(\eta_\infty + (\eta_0 - \eta_\infty))}{\left(1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_b}\right)^2 \times \frac{n}{2}\right)} \quad (2.10)$$

เมื่อ

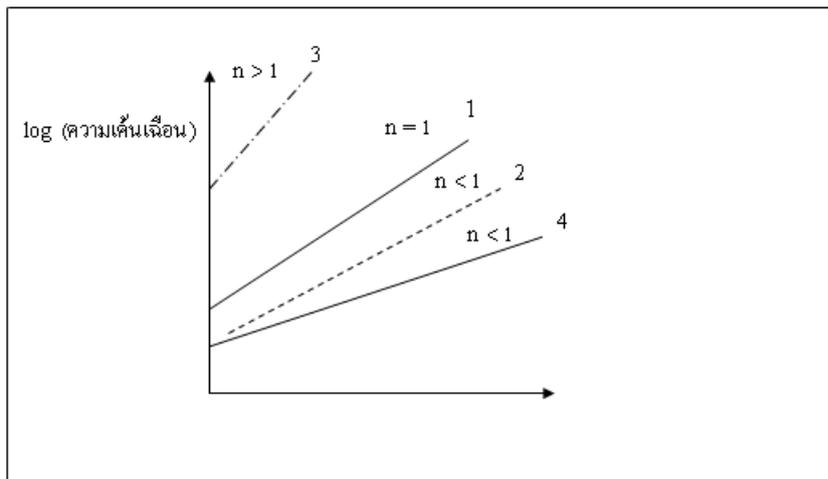
A, B และ C คือ ค่าคงที่

η_∞ คือ ค่าความหนืดแบบเฉือนที่ค่าอัตราการเฉือนสูงมากๆ (Infinity shear viscosity)

η_0 คือ ค่าความหนืดแบบเฉือนที่ไม่มีค่าอัตราการเฉือน (Zero shear viscosity)

2.3.3.3 ของไหลไดเลทแทน (Dilatant Fluid)

จากรูปที่ 2.4 จะสังเกตเห็นว่าการไหลของของไหลไดเลทแทนมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน เรียกพฤติกรรมการไหลแบบนี้ว่าเป็นพฤติกรรมการไหลแบบเพิ่มความหนืด (shear thickening behavior) ตัวอย่างของไหลที่แสดงพฤติกรรมในลักษณะนี้ เช่น การไหลของปูนซีเมนต์ การไหลของน้ำผสมแป้ง และการไหลของพอร์ลิเมอร์แขวนลอยที่มีสารตัวเติมในปริมาณสูง เป็นต้น สามารถใช้สมการยกกำลังในการอธิบายสมบัติการไหลของของไหลไดเลทแทนได้เช่นกัน ตามสมการยกกำลังของไหลไดเลทแทนคือของไหลที่มีค่า n มากกว่า 1 สมการยกกำลังสามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลของของไหลชนิดต่างๆ สรุปได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เส้นกราฟการไหลของของไหล ชนิดต่างๆ 1. ของไหลนิวทอนเนียน 2. ของไหลซูดอพลาสติกที่เป็นไปตามสมการยกกำลัง 3. ของไหลไดเลทแทน 4. พอร์ลิเมอร์หลอมบางชนิดเป็นของไหลซูดอพลาสติกแต่ไม่เป็นไปตามยกกำลัง [2]

2.3.4 กลุ่มของไหลที่สมบัติการไหลขึ้นกับเวลา (Time – Dependent fluids)

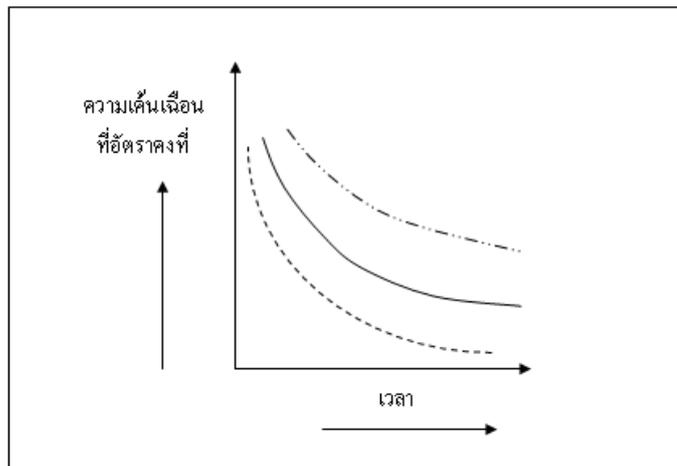
สมบัติการไหลของของไหลชนิดนี้ เช่นความหนืดเฉือน เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ของไหลถูกเฉือน ไหลที่มีพฤติกรรมในลักษณะนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ใหญ่ๆ คือ

2.3.4.1 ของไหลทริกโซทรอปิก (Thixotropic fluids)

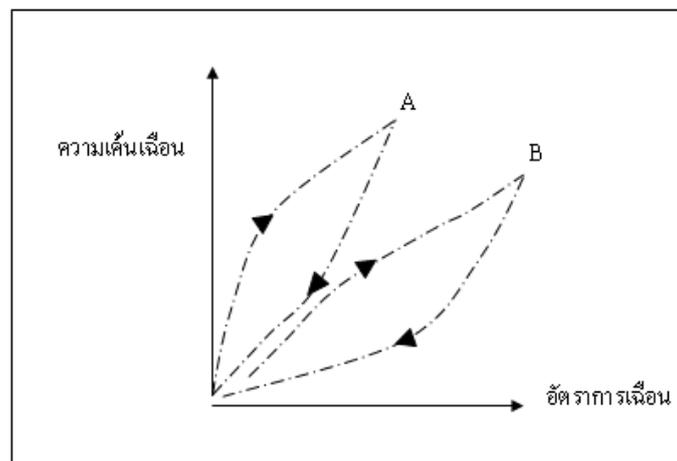
ลักษณะเฉพาะของการไหลของของไหลชนิดนี้คือ ค่าความหนืดของการผิรูปร่างครั้งหลังจะต่ำกว่าความหนืดของการผิรูปร่างก่อน ดังนั้นสมบัติการไหลของของไหลชนิดนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ถูกเฉือน เช่น ถ้ากวนของไหลชนิดนี้เป็นเวลานานด้วยอัตราการเฉือนคงที่ จะทำให้สมบัติการไหล เช่นความหนืดเฉือนลดลง ดังแสดงดังรูปที่ 2.6 นอกจากนี้ถ้าเปรียบเทียบกับค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากการใช้อัตราการเฉือนที่คงที่ แต่มีค่าแตกต่างกันพบว่า การเพิ่มอัตราเฉือน ส่งผลให้ความเค้นเฉือนลดลง

เพื่อเข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลของของไหลทริกโซทรอปิก ทำการทดลองวัดสมบัติการไหลโดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบหมุนที่สามารถวัดทอร์คและความเค้นเฉือนได้ ทำการกวนของไหลที่ความเร็วค่าหนึ่งแล้ววัดค่าความเค้นไว้แล้วเพิ่มความเร็วในการกวนแล้ววัดความเค้น ทำอย่างนี้หลายความเร็วของการหมุน จนถึงความเร็วสูงสุดของการหมุนหลังจากนั้นเริ่มลดความเร็วของการหมุนโดยไม่หยุดเครื่อง แล้ววัดค่าความเค้นที่ความเร็วในการหมุนทำกัน ผลการทดลองพบว่าเส้นกราฟของความเค้นของการเพิ่มและลดความเร็วของการหมุนจะไม่ซ้อนทับกันเกิด

เป็น hysteresis loop แสดงดังรูปที่ 2.7 ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบของไหลทรกโซทรอปิก เช่น สีทาภายนอกและภายใน น้ำยาบางชนิด สเลอรีของเซรามิกส์ เป็นต้น



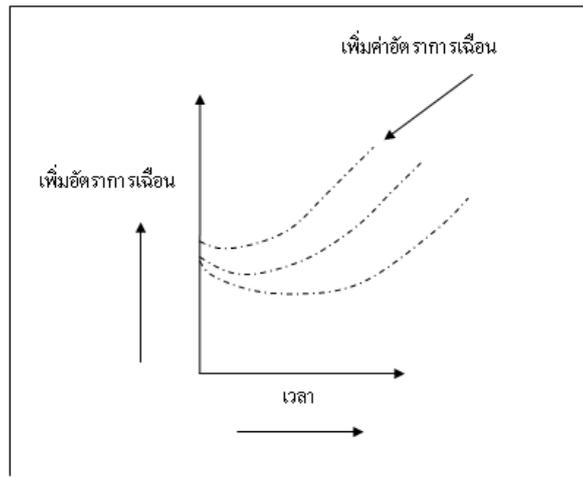
รูปที่ 2.6 สมบัติของของไหลทรกโซทรอปิก



รูปที่ 2.7 Hysteresis loop ของของไหลทรกโซทรอปิก 2 ชนิด คือ ของไหล A และ B [2]

2.3.4.2 ของไหลรีโอเปคติก (Rheopectic Fluids)

ของไหลรีโอเปคติกมีคุณสมบัติการไหลกลับกับกรณีของไหลทรกโซทรอปิก กล่าวคือ ค่าของสมบัติ การไหล เช่น ความหนืดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาของการเฉือน ทำให้ของไหลชนิดนี้มีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อการถูกระทำด้วยความเค้นเฉือน ตัวอย่างของไหลที่แสดงพฤติกรรมในลักษณะนี้เช่น แร่ยิบซั่มในน้ำ เป็นต้น ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนเมื่อเวลาของการเฉือนเพิ่มขึ้นในของไหลรีโอเปคติก แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สมบัติการไหลของของไหลรีโอเพคติก [2]

2.3.4.3 ของไหลวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic Fluids)

ของไหลวิสโคอีลาสติก เป็นวัสดุที่แสดงสมบัติผสมระหว่างการไหลหนืด (viscous flow) และการยืดหยุ่น (elastic) อธิบายสมบัติการไหลโดยรวมได้ดังนี้

$$\tau = \phi \left(\frac{d\gamma}{dt}, t \right) \quad (2.11)$$

เมื่อ

$\frac{d\gamma}{dt}$ คือ อัตราเฉือน (γ)

ϕ คือ สมบัติการไหลที่เกิดจากการไหลหนืดและการยืดหยุ่น

t คือ เวลา

2.3.5 พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอม

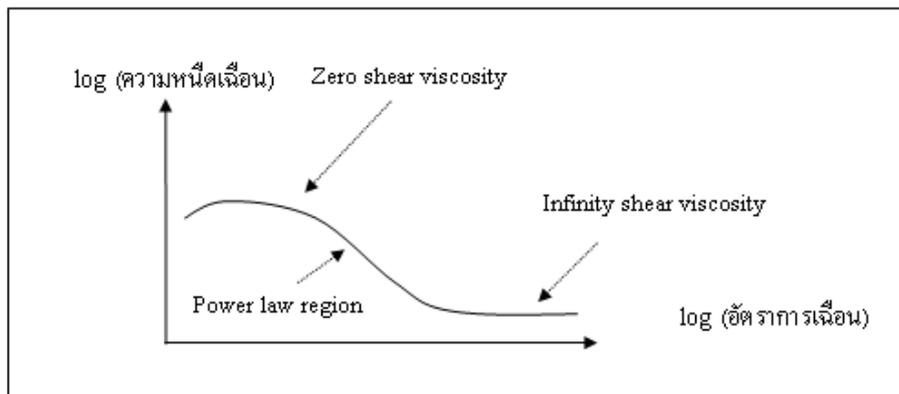
พอลิเมอร์หลอมแสดงพฤติกรรมสอดคล้องกับการไหลของการไหลของโพลีเมอร์หลอม ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา แต่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าพอลิเมอร์หลอม แสดงสมบัติเป็นของไหลที่มีสมบัติขึ้นกับเวลาด้วย กล่าวคือ มีสมบัติการไหลเป็นแบบของไหลวิสโคอีลาสติกด้วย เนื่องจากมีปรากฏการณ์หลายอย่างที่เกิดขึ้นซึ่งการมีสมบัติการไหลของวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอม เช่น การบวมพองที่หัวอาช การบวมพองในขณะรีด

พอลิเมอร์หลอมเป็นของไหลโพลีเมอร์หลอมดังกล่าวมาแล้วข้างต้นว่า การประเมินสมบัติข้างต้นของพอลิเมอร์หลอมนิยมใช้สมการยกกำลังเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ดังนั้นในกรณีนี้พอลิเมอร์หลอมจะมีพฤติกรรมการไหลแบบของไหลโพลีเมอร์หลอม เส้นกราฟของความหนืดเทียบกับอัตราการเฉือนในสเกล log - log แสดงดังรูปที่ 2.9 มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ค่าความหนืดต่ำมากและสูงมาก กล่าวได้ว่าที่สองช่วงของอัตราการเฉือนนี้ พอลิเมอร์หลอมมีสมบัติเป็นของไหลนิวทอนเนียน ค่าความหนืดที่ไม่มีอัตราเฉือน ส่วนค่าความหนืดเฉือนที่ไม่มีอัตราเฉือน ส่วนค่าความหนืดที่ค่าอัตราการเฉือนสูงมากเรียกว่า ความหนืดเฉือนอนันต์ ช่วงกลางของเส้นกราฟของความหนืด ค่าความ

หนืดเฉือนมีค่าลดลงเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น ในช่วงกลางนี้เองพอลิเมอร์หลอมจะแสดงพฤติกรรมเป็นไปตามสมการชกกำลัง และเป็นของไหลชิวโคพลาสติก

สมบัติของพอลิเมอร์หลอมในช่วงที่คุณสมบัติของไหลชิวโคพลาสติกซึ่งอธิบายด้วยสมการชกกำลัง แสดงในรูปแบบสอดคล้องกับการจัดเรียงตัวโมเลกุลระหว่างที่เกิดการไหล กล่าวคือขณะที่อัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น โมเลกุลจะจัดเรียงตัวใหม่เพื่อให้โมเลกุลเคลื่อนตัวผ่านโมเลกุลอื่นได้อย่างง่ายขึ้น ส่งผลให้การต่อต้านต่อการไหลลดลงตามอัตราการเฉือนที่เพิ่มขึ้น จากการสังเกตเส้นกราฟของความหนืดในรูปที่ 2.9 ถ้าพอลิเมอร์หลอมไม่มีสมบัติการไหลเป็นชิวโคพลาสติก กล่าวคือความหนืดไม่ลดลงตามอัตราการเฉือน จะทำให้การแปรรูปของพอลิเมอร์ทำได้ยากมากเนื่องจากความหนืดที่สูงแต่เป็นโซคติที่อัตราการเฉือนที่มาก ค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมลดลง จึงทำให้สามารถแปรรูปพอลิเมอร์หลอมได้ง่ายขึ้นการมีสมบัติเป็นของไหลชิวโคพลาสติกของพอลิเมอร์หลอม ทำให้มีข้อดีหลายประการ การดังนี้

- ทำให้ลดพลังงานที่ใช้ในการแปรรูป
- สามารถผลิตชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้ง่ายขึ้น
- สามารถใช้เครื่องที่ต้องการกำลังต่ำได้
- เพิ่มปริมาณการผลิตของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ได้ดี
- ความดันในการแปรรูปต่ำ
- สามารถทำให้พอลิเมอร์หลอมไหลเข้าเบ้าที่มีความซับซ้อนได้



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราเฉือน [2]

การออกแบบเครื่องแปรรูป เป้าและดาใช้ในระบบการแปรรูปพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีเพียงแค่พิจารณาว่าพอลิเมอร์หลอมเป็นของไหลหนืด(หรือของไหลชิวโคพลาสติก)เท่านั้นแต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์หลอมที่มีสมบรูณ์แบบ ควรจะพิจารณาสมบัติทั้งทางด้านการไหลหนืด และผลที่เกิดจากการยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอม ถึงแม้ว่าถ้านำความคิดเรื่องความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอมเข้ามาพิจารณา ในการออกแบบเครื่องแปรรูปพลาสติก จะทำได้ยากและซับซ้อนมาก ดังนั้น การออกแบบเครื่องแปรรูปส่วนใหญ่ไม่ค่อยมีการนำเอาหลักการไหลแบบยืดหยุ่นเข้ามาคิดและคำนวณในแง่ของทฤษฎีการไหลของพอลิเมอร์หลอมในเครื่องแปรรูป โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นหัวดาของเครื่องอัดรีดขึ้นรูป และหัวฉีดของเครื่องฉีดเข้าแบบ สมการที่ใช้ในการอธิบายสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมรวมทั้งการไหลหนืดและการไหลยืดหยุ่นไว้ในสมการเดียวกัน เรียกว่าสมการของสถานการณ์ไหล หรือ Constitutive equation

2.4 การถ่ายเทความร้อน [3]

การนำความร้อนเป็นรูปแบบหนึ่งของการถ่ายเทความร้อน ในลักษณะของการแลกเปลี่ยนพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยการเคลื่อนที่แบบจลน์ (kinetic motion) หรือการชนโดยตรงของโมเลกุลซึ่งเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในของไหลที่หยุดนิ่ง ส่วนในกรณีของโลหะนั้นเป็นการไหลของกระแสอิเล็กตรอนสำหรับของแข็งที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมายที่เคลื่อนไหวอยู่ในโครงสร้างของ โมเลกุล (Lattice) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี จะเป็นตัวนำความร้อนที่ดีตามไปด้วย ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง เงิน เหล็ก ฯลฯ อันเป็นผลจากการนำหรือถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้

กฎสัมพัทธ์ของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้น สำหรับการไหลของความร้อนในทิศทาง x กฎของฟูริเยร์กำหนดเป็น

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.12)$$

หรือ

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.13)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} q_x &= \text{อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ } A \text{ ในทิศทางบวก } x \\ q_x'' &= \text{ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก } x \\ k &= \text{ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุ และเป็นค่าบวก} \end{aligned}$$

จากสมการ 2.12 และ 2.13 ถ้าอุณหภูมิลดลงในทางบวกของ x แล้ว เป็นลบดังนั้น q_x'' (หรือ q_x) มีค่าเป็นบวก เนื่องจากสมการมีเครื่องหมายเป็นลบติดอยู่เพราะฉะนั้นเครื่องหมายลบจึงต้องใส่ในสมการและเพื่อให้แน่ใจว่า q_x'' (หรือ q_x) เป็นปริมาณบวกเมื่อการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางบวกของ x ทางกลับกันเมื่อทางด้านขวามือของสมการเป็นลบแสดงว่าการไหลของความร้อนอยู่ในทิศทางลบ x

จุดประสงค์หลัก ในการวิเคราะห์การนำความร้อนก็เพื่อที่จะหา สนามอุณหภูมิ (Temperature field) ในตัวกลางหนึ่งซึ่งเป็นผลจากเงื่อนไขซึ่งสอดคล้องกับขอบเขตของมัน นั่นคือ ต้องทราบการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature Distribution) เมื่อทราบค่านี้ก็จะหาความร้อนที่จุดใดๆ ในตัวกลางนั้น การหาค่านี้ทำได้โดยใช้กฎของพลังงาน (energy Conservation) กับปริมาตรควบคุมดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งระบุกระบวนการถ่ายเทพลังงาน และใช้สมการอัตราที่เหมาะสม ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งคำตอบของมันจะให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น

พิจารณาตัวกลางเนื้อเดียวกันซึ่งมีเกรเดียนต์อุณหภูมิจริง และการกระจายของอุณหภูมิ $T(x,y,z)$ กำหนดในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinates) จะกำหนดปริมาตรควบคุมเล็กๆมาๆ $dx \cdot dy \cdot dz$ ถ้ามีเกรเดียนต์อุณหภูมิแล้ว การนำความร้อนจะเกิดขึ้นตรงข้ามแต่ละอันของผิวควบคุมอัตราการนำความร้อนนี้จะตั้งฉากกับผิวควบคุมแต่ละอันที่

ตำแหน่งโคออร์ดิเนต x, y, z ซึ่งแสดงในเทอม q_x, q_y, q_z ตามลำดับอัตราการนำความร้อนที่ผิวตรงข้ามสามารถกระจายโดยอนุกรมเทเลอร์ โดยไม่คิดเทอมสำคัญสูงๆ (High Order Terms)

2.4.1 การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี

ระบบของรูปทรงกระบอกและรูปทรงกลมตามที่พบ จะมีเกร็ดเยียนอุณหภูมิล้อมอยู่ในแนวทิศทางรัศมีเท่านั้น จึงสามารถคิดเป็นหนึ่งมิติได้อย่างไรก็ตามภายใต้เงื่อนไขสภาวะสม่ำเสมอไม่มีการผลิตความร้อน ระบบนั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีมาตรฐานซึ่งเริ่มต้นด้วยสมการความร้อน ในรูปแบบที่เหมาะสมหรือวิธีอีกอย่างหนึ่งซึ่งเริ่มต้นด้วยกฎของฟูริเยร์ในรูปแบบที่เหมาะสม

2.4.2 ทรงกระบอก

ตัวอย่างธรรมดาทั่วไปเป็นทรงกระบอกกึ่งกลางซึ่งผิวภายในและผิวภายนอกสัมผัสกับของไหลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน สำหรับเงื่อนไขดังกล่าว สมการความร้อนทั่วไปจะลดรูปเป็น

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2.14)$$

สมมติว่าค่า k คงที่ โดยการอินทิเกรต 2 ครั้ง จะได้คำตอบทั่วไปเป็น

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad (2.15)$$

จากสภาวะที่ขอบเขตตามรูป จะได้ว่า

$$T(r_1) = T_{s,1} \quad \text{และ} \quad T(r_2) = T_{s,2}$$

$$T_{s,1} = C_1 \ln r_1 + C_2 \quad \text{and} \quad T_{s,2} = C_1 \ln r_2 + C_2$$

แก้สมการหาค่า C_1 และ C_2 แล้วแทนกลับในสมการคำตอบทั่วไป ได้

$$T(r) = \frac{(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_1/r_2)} \ln(r/r_2) + T_{s,2} \quad (2.16)$$

โดยใช้กฎของฟูริเยร์ หาอัตราการถ่ายเทความร้อน ซึ่งสมมติว่าไหลตามแนวรัศมีเท่านั้น

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr} \quad (2.17)$$

โดยการดิฟเฟอเรนเชียล (2.16) แล้วแทนใน (2.17) จะได้

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (2.18)$$

นั่นคือ ค่าความต้านทานความร้อนในกรณีของทรงกระบอกกึ่งกลาง จะอยู่ในรูป

$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (2.19)$$

โดยการใช้อีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากค่าของ q_r เป็นอิสระกับ r ดังนั้นเราสามารถอินทิเกรตสมการ (2.17) ซึ่งจัดรูปใหม่ก่อนอินทิเกรตได้

$$\int_{r_1}^{r_2} (q_r/r) dr = -k2\pi L \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$q_r \ln(r_2/r_1) = 2\pi kL(T_{s,1} - T_{s,2})$$

$$q_r = \frac{2\pi kL(T_{s_1} - T_{s_2})}{\ln(r_2/r_1)}$$

ซึ่งให้ค่า q_r เช่นเดียวกับสมการ (2.18) ดังนั้นจึงสามารถเลือกใช้ได้ตามเงื่อนไขที่ระบุดังกล่าว ในกรณีของทรงกระบอกกลวง 3 ชั้น โดยไม่คิดความต้านทานหน้าสัมผัสอัตราการถ่ายเทความร้อนเขียนได้เป็น

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{\frac{1}{2\pi r_1 L h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_B L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_C L} + \frac{1}{2\pi r_4 L h_4}} \quad (2.20)$$

เราอาจจะเขียนในเทอมสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U ได้ดังนี้

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,4}}{R_{tot}} = U_1 A_1 (T_{\infty,1} - T_{\infty,4}) \quad (2.21)$$

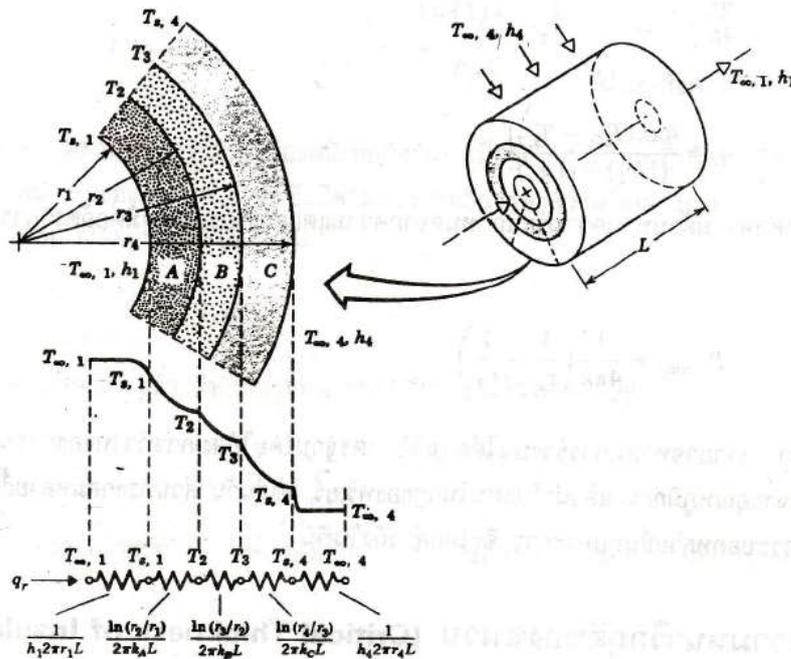
โดยที่ $A = 2\pi r_1 L$ และ

$$U_1 = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{r_1}{k_A} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_1}{k_B} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{r_1}{k_C} \ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{r_1}{r_4} \frac{1}{h_4}} \quad (2.22)$$

สมการ(2.21) กำหนดค่า U ในเทอมของพื้นที่ผิวภายใน A_1 ของทรงกระบอกกลวงหลายชั้น การกำหนดนี้สามารถเลือกได้ตามใจชอบ อาจอยู่ในเทอมของ A_4 หรือพื้นที่ผิวใดๆก็ได้ เราสังเกตได้ว่า

$$U_1 A_1 = U_2 A_2 = U_3 A_3 = U_4 A_4 = \left(\sum R_i\right)^{-1} \quad (2.23)$$

และรูปเฉพาะของ U_2, U_3, U_4 มีลักษณะตามสมการ (2.20)



รูปที่ 2.10 การกระจายความร้อนสำหรับผนังทรงกระบอกหลายชั้น [3]

2.4.3 ระบบการนำความร้อนที่มีแหล่งผลิตความร้อนภายใน (Heat source system)

ปัญหาการถ่ายเทความร้อนที่น่าสนใจจำนวนมาก ที่มีการผลิตความร้อนขึ้นภายใน เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของลวดไฟฟ้า และระบบที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เป็นต้น เราจะพิจารณาระบบหนึ่งมิติที่ซึ่งอุณหภูมิเป็นฟังก์ชันโคออร์ดิเนตเดียวเท่านั้น

2.4.3.1 ผนังเรียบมีแหล่งผลิตความร้อน (Plane wall with heat source)

ผนังมีการผลิตความร้อนสม่ำเสมอ (\dot{q} คงที่) ผนังมีความหนา L มีอุณหภูมิ $T_{s,1}$ และ $T_{s,2}$ สำหรับกรณีค่า k คงที่ สมการที่กระจายความร้อนลดรูปเหลือ

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (2.24)$$

สมการคำตอบทั่วไปคือ

$$T = -\frac{\dot{q}x^2}{2k} + C_1 + C_2 \quad (2.25)$$

โดยที่ C_1 และ C_2 เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต

จากสมการเงื่อนไขที่ขอบ คือ

$$T(-L) = T_{s,1} \quad \text{and} \quad T(L) = T_{s,2}$$

แทนใน (2.25) ได้

$$C_1 = \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{2L}$$

$$C_2 = \frac{\dot{q}}{2k}L^2 + \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2}$$

ดังนั้นการกระจายอุณหภูมิเป็น

$$T(x) = \frac{\dot{q}L^2}{2k} \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right) + \frac{T_{s,2} - T_{s,1}}{2} \frac{x}{L} + \frac{T_{s,1} + T_{s,2}}{2} \quad (2.26)$$

ค่าฟังก์ชันของความร้อนที่จุดใดๆในผนัง สามารถหาได้โดยใช้สมการ (2.26) กับกฎของฟูริเยร์เพื่อให้สะดวกขึ้นจึงให้อุณหภูมิทั้ง 2 ข้างของผนังเท่ากัน ($T_{s,1} = T_{s,2} = T_s$) การกระจายอุณหภูมิจะสมมาตรรอบกึ่งกลางระนาบ

$$T(x) = \frac{\dot{q}L^2}{2k} \left(1 - \frac{x^2}{L^2} \right) + T_s \quad (2.27)$$

อุณหภูมิสูงสุดจะมีจริงที่กึ่งกลางระนาบ

$$T(0) = T_0 = \frac{\dot{q}L^2}{2k} + T_s \quad (2.28)$$

กรณีการกระจายอุณหภูมิ (2.27) เขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{T(x) - T_0}{T_s - T_0} = \left(\frac{x}{L} \right)^2 \quad (2.29)$$

ในกรณีไม่รู้อุณหภูมิผิว (T_s) แต่ทราบค่าอุณหภูมิของของไหลรอบๆ (T_∞) เราสามารถหาความสัมพันธ์ของ T_s และ T_∞ ได้ โดยประยุกต์การสมดุลของพลังงานที่ผิว จะได้

$$-k \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} = h(T_s - T_\infty) \quad (2.30)$$

แทนค่าสมการ (2.27) เพื่อให้ได้เกรเดียนอุณหภูมิที่ $x=L$ ซึ่งจะได้

$$T_s = T_\infty + \frac{\dot{q}L}{h} \quad (2.31)$$

ดังนั้น T_s หาได้จากการรู้ค่าของ T_∞ , q , L และ h

2.4.3.2 ระบบนำความร้อนในแนวรัศมี

พิจารณาทรงกระบอกตันยาว ซึ่งอาจแทนเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน หรือชิ้นส่วนเชื้อเพลิงในเตาปฏิกรณ์ สำหรับกรณีสม่ำเสมอ อัตราการผลิตความร้อนภายในทรงกระบอก ต้องเท่ากับอัตราที่ซึ่งความร้อนถูกพาจากผิวของทรงกระบอก สถานะนี้อุณหภูมิที่ผิวมีค่าคงที่ T_s

ในการหาการกระจายของอุณหภูมิ เราเริ่มต้นที่สมการการฟูงกระจายของความร้อนสำหรับค่า k คงที่ จะลดรูปมาเป็น

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad (2.32)$$

แยกตัวแปร และอินทิเกรต จะได้

$$r \frac{dT}{dr} = -\frac{\dot{q}}{2k} r^2 + C_1 \quad (2.33)$$

อินทิเกรตอีกครั้งจะได้

$$T(r) = \frac{\dot{q}}{4k} r^2 + C_1 \ln r + C_2 \quad (2.34)$$

สำหรับเงื่อนไขแรกนั้น $dT/dr = 0$ ที่ $r=0$ เพราะว่า อุณหภูมิมีลักษณะสมมาตรในแนวรัศมี

สำหรับทรงกระบอกหนึ่งมิติ นั่นคือ $C_1 = 0$ ส่วนอีกเงื่อนไขจะได้

$$C_2 = T_s + \frac{\dot{q}}{4k} r_0^2 \quad (2.35)$$

ดังนั้น การกระจายของอุณหภูมิเป็น

$$T(r) = \frac{\dot{q}r_0^2}{4k} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) + T_s \quad (2.36)$$

และสามารถเขียนในรูปไร้มิติ ได้เป็น

$$\frac{T(r) - T_s}{T_0 - T_s} = 1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \quad (2.37)$$

โดยที่ T_0 เป็นอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลาง ($r=0$)

และอัตราการถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมีในทรงกระบอกจะหาโดยใช้สมการ (2.36) กับกฎของฟูริเยร์

เพื่อหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่ผิว T_s กับอุณหภูมิของไหล T_∞ โดยการคิดสมดุลของพลังงานรอบแท่งวัสดุ จะได้

อัตราการผลิตความร้อน = ความร้อนที่ถูกพาออกไป

$$\dot{q}(\pi r_0^2 L) = h(2\pi r_0 L)(T_s - T_\infty)$$

หรือ
$$T_s = T_\infty + \frac{\dot{q} r_0}{2h} \quad (2.38)$$

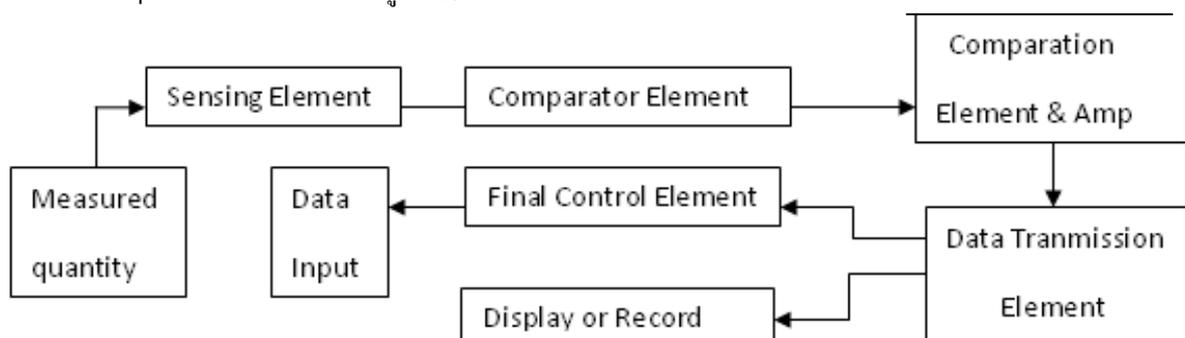
วิธีที่กล่าวมานี้ อาจจะใช้หาการกระจายของอุณหภูมิในทรงกลมตัน และในทรงกระบอกกลวง และทรงกลมกลวงก็ได้สำหรับชนิดต่างๆของเงื่อนไขที่ขอบเขตเหล่านั้น

2.5 ทฤษฎีระบบวัดและการควบคุม [5]

ส่วนประกอบของระบบการวัด แบบการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม อาจแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆตามหน้าที่การใช้งานได้เป็น 4 ส่วนคือ

- 1) ส่วนของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการวัดและตรวจจับสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของค่าตัวแปรที่ต้องควบคุม
- 2) ส่วนของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการวัดและเปรียบเทียบค่าของตัวแปรที่วัดได้ และค่าที่กำหนดไว้
- 3) ส่วนขยายสัญญาณเพื่อการควบคุม เป็นส่วนที่จะนำเอาค่าตัวแปร ที่ได้จากส่วนเปรียบเทียบมาขยายและปรับขนาดสัญญาณให้เหมาะสมที่จะใช้ในการควบคุมต่อไป
- 4) ส่วนควบคุม เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับหรือเปลี่ยนขนาด ปริมาณ หรือคุณสมบัติของตัวแปรบางประการก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิต เพื่อให้มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของตัวแปรให้มีค่าตามต้องการ

เนื่องจากกระบวนการทำงานของเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมโดยทั่วไป มีลักษณะการทำงานเหมือนกัน กล่าวคือ องค์ประกอบหรือหน่วยงานแต่ละหน่วยในเครื่องมือวัดจะทำงานคล้ายๆกันซึ่งอาจแสดงองค์ประกอบของหน่วยงานต่างๆในเครื่องมือวัด แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ระบบการวัดปริมาณต่างๆ ของเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม [5]

จากรูป 2.11 แสดงระบบการวัด ปริมาณต่างๆของเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรมจะเห็นว่าประกอบด้วยหน่วยต่างๆที่สำคัญ 6 หน่วย คือ

- 1) Sensing element เป็นหน่วยตรวจจับปริมาณตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการวัดเช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ฯลฯ ที่หน่วยนี้จะส่งค่าออกมาเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ต้องการวัด ในกระบวนการเหล่านั้น

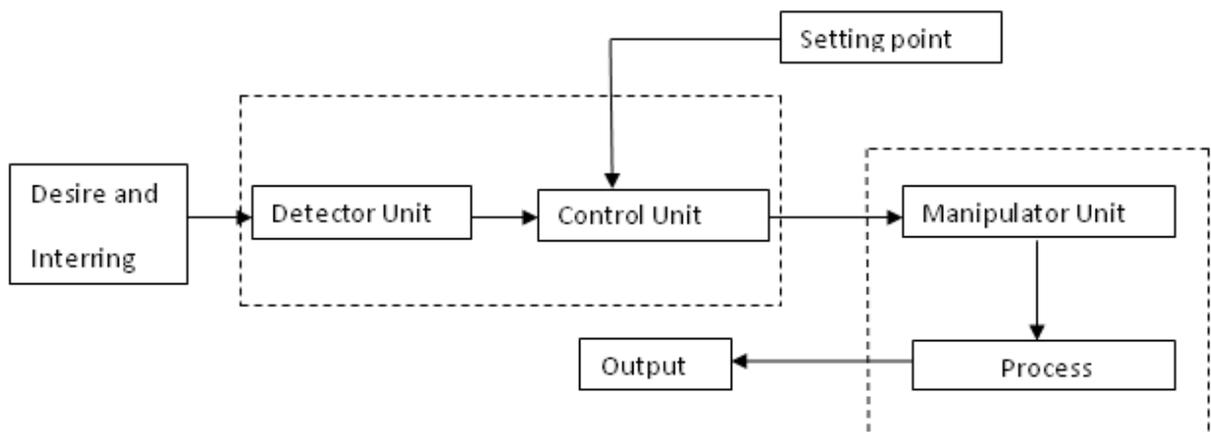
- 2) Comparator element เป็นหน่วยที่ทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากหน่วยตรวจจับการเปลี่ยนแปลงข้อมูล และปริมาณที่ต้องควบคุม (จากหน่วยควบคุม) ซึ่งผลต่างที่ได้จะถูกนำไปใช้ สำหรับการแสดงค่าควบคุมต่อไป
- 3) Conversion element and amplifier เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงค่าที่ได้จากหน่วยแรกให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน โดยที่อาจจะมีการขยายระดับของสัญญาณ หรือข้อมูลที่วัดได้ให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะชี้แสดงค่าหรือส่งข้อมูลไปยังหน่วยอื่นๆ ซึ่งการขยายปริมาณของตัวแปรจำเป็นต้องมีอัตราขยายที่คงที่ด้วยเพื่อให้ค่าที่อ่านได้ถูกต้องแน่นอน
- 4) Data transmission element เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลที่ถูกลบยให้มีความเหมาะสมแล้วส่งไปยังหน่วยอื่นๆ ซึ่งอาจจะส่งไปยังหน่วยแสดงผล หรือหน่วยควบคุมก็ได้
- 5) Display or recorder เป็นหน่วยงานแสดงผลข้อมูล ซึ่งอาจเป็นเครื่องมือที่รับบอกค่าต่างๆที่วัดได้ หรืออาจเป็นหน่วยที่สามารถทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงข้อมูลที่วัดได้ทุกขณะ
- 6) Final control element เป็นหน่วยงานควบคุมปริมาณที่ต้องการวัด และต้องการควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมตามความต้องการ สำหรับที่หน่วยนี้อาจจะประกอบด้วยหน่วยกำหนดค่าเป้าหมาย (Setting value) เพื่อให้กำหนดปริมาณที่ต้องการควบคุม และนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณที่วัดได้จากหน่วยตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆ

2.5.1 ระบบควบคุม

ในที่นี้หมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์การควบคุมรวมอยู่ด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของขบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอย่างอัตโนมัติ ระบบควบคุมวงจรมองแบบเปิด (Open-loop control system)

2.5.1.1 ระบบควบคุมวงจรมองแบบเปิด

เป็นระบบที่ไม่มีการติดตามผลเพื่อปรับเปลี่ยนค่าในวงจร กล่าวคือ หลังจากที่มีการควบคุมโดยส่งสัญญาณควบคุมไปแล้วจะไม่มีการติดตามผลเกิดขึ้นใหม่ เพื่อทำการปรับแต่งสัญญาณการควบคุมให้เหมาะสมต่อไป แสดงในรูปที่ 2.12

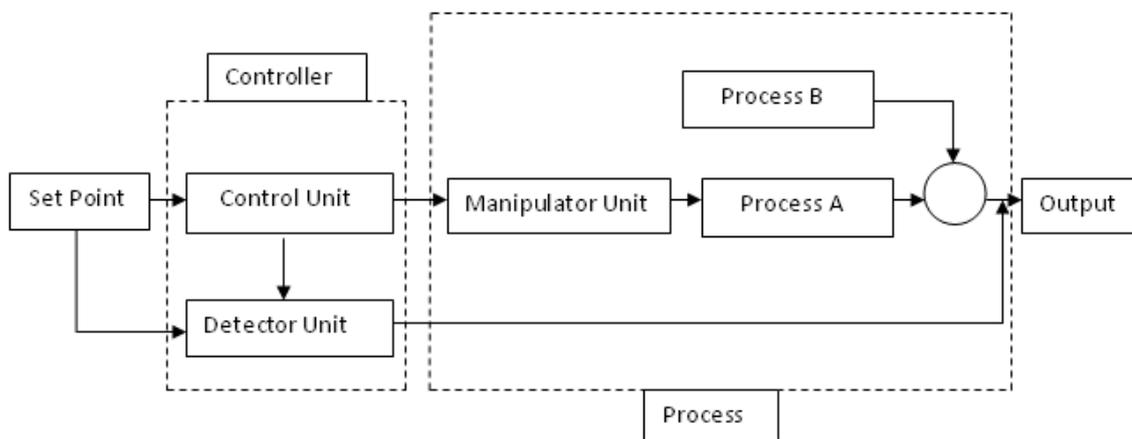


รูปที่ 2.12 ระบบการควบคุมวงจรมองแบบเปิด [5]

จากรูป 2.12 แสดงระบบการควบคุมวงจรมวงจรแบบเปิด จะเห็นได้ว่าค่าของตัวแปรในกระบวนการและสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากสาเหตุใดๆก็ตาม เป็นสัญญาณเข้าระบบ(ถูกวัด โดยเครื่องมือวัด) ต่อมาจะเป็นสัญญาณเข้าหน่วยระบบควบคุม (Control unit) ซึ่งสามารถปรับระดับหรือปริมาณที่ต้องการควบคุมได้ จากนั้นค่าที่ปรับ ได้จึงเข้าสู่กระบวนการ (Process) จากรูปนี้อาจกล่าวได้ว่าภายหลังจากที่การควบคุมกระบวนการนั้นๆอาจไม่เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการก็ได้ ซึ่งระบบการควบคุมแบบนี้ผู้ใช้หรือผู้ที่ควบคุมการทำงานของกระบวนการผลิตจำเป็นต้องคอยตรวจสอบและปรับค่าตัวแปรที่วัดได้อยู่ตลอดเวลา

2.5.1.2ระบบการควบคุมวงจรมวงจรแบบปิด

เป็นระบบที่มีการติดตามผลภายหลังจากการที่มีการปรับแต่งภายในแล้ว โดยมีการวัดค่าตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการอยู่ตลอดเวลาว่าเข้าใกล้เป้าหมายที่ต้องการหรือยัง ทั้งนี้เพื่อนำไปปรับแต่งสัญญาณควบคุมสำหรับใช้ในการควบคุมต่อไป



รูปที่ 2.13 ระบบการควบคุมแบบปิด [5]

จากรูป 2.13 แสดงระบบการควบคุมวงจรมวงจรแบบปิด จะเห็นว่าคล้ายกับระบบการควบคุมวงจรมวงจรแบบเปิด แต่ที่หน่วยควบคุม (Controller) จะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออกภายหลังจากการปรับแต่งปริมาณที่ต้องการควบคุมแล้ว ต่อมาสัญญาณที่ตรวจจับได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายเพื่อทำการควบคุมระบบต่อไป หากค่าผลลัพธ์นั้นยังไม่เข้าใกล้หรือเท่ากับค่าเป้าหมายที่ต้องการระบบควบคุมสามารถที่จะปรับตัวเองได้อย่างอัตโนมัติจนกว่าจะถึงค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ สำหรับขั้นตอนต่างๆของระบบการควบคุมวงจรมวงจรแบบปิดนี้อาจประกอบด้วย

- 1) การตรวจวัดค่าที่ต้องการควบคุมว่าต่างจากค่าเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเพียงใด โดยอาศัยอุปกรณ์ในการวัดลักษณะต่างๆ
- 2) อุปกรณ์ควบคุมที่ทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณความแตกต่างระหว่างค่าผลลัพธ์หลังจากที่ถูกควบคุมแล้วและค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ แล้วจึงส่งไปควบคุมกระบวนการต่อไป เพื่อให้ค่าตัวแปรของกระบวนการถูกต้องตามต้องการ

3) หากปรากฏว่ายังมีค่าต่างจากเป้าหมายอีก อุปกรณ์การตรวจวัดจะทำการวัดค่าตัวแปรในกระบวนการและ
ดำเนินตามขั้นตอนต่างๆ ในขั้นตอนต่างๆ ในข้อ 1 และ 2 อีก จนกระทั่งค่าตัวแปรที่วัดได้เป็นค่าที่ต้องการจึง
สิ้นสุดการควบคุม

2.6 ฮีตเตอร์ (Heater) [6]

2.6.1 หลักการทำงานของฮีตเตอร์

ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำความร้อนในอุตสาหกรรม ที่มีหลักการพื้นฐานคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำที่
มีความต้านทานสูง ลวดตัวนำจะร้อน ดังนั้นลวดที่ใช้ผลิตฮีตเตอร์จะต้องมีคุณสมบัติเหนียวและทนอุณหภูมิสูงได้ เช่น
ลวด Kanthal (นิกเกิล : โครเมียม / 80 : 20) จะทนอุณหภูมิได้ถึง 1250 องศาเซลเซียส ส่วนประกอบในการผลิตฮีต
เตอร์มีดังนี้

ฉนวนแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) มีค่านำไฟฟ้าต่ำแต่ทำความร้อนได้มากทำหน้าที่กั้นกลางระหว่างลวดฮีต
เตอร์กับปลอกโลหะ เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสรั่วจากลวดฮีตเตอร์ออกไปยังผิวโลหะ จุดสำคัญคือห้ามมีความชื้นใน
ฉนวนเด็ดขาดเพราะจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น หากมีความชื้นแก้ไขได้โดยการอบในเตาอบ

2.6.2 ฮีตเตอร์ถูกแบ่งตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

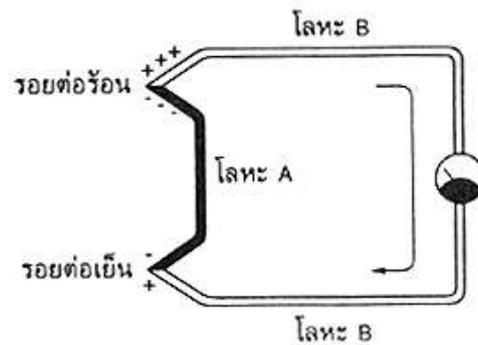
1. ฮีตเตอร์แท่ง หรือ (Cartridge Heater) ใช้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็ก และ โลหะต่างๆ ตัวอย่างการใ
้งาน เช่น งานบรรจุหีบห่อ งานขึ้นรูปพลาสติก
2. ฮีตเตอร์ครีบ หรือ (Finned Heater) ใช้ให้ความร้อนกับอากาศ เช่น ใช้ในห้องอบแห้ง ในเตาอบ
3. ฮีตเตอร์จุ่ม หรือ (Immersion Heater) หรือบางที่เรียกว่า ฮีตเตอร์ต้มน้ำ ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวทุกชนิด ตัวอย่าง
การใช้งานเช่น งานต้มน้ำ - ต้มน้ำมัน งานผสมสาร
4. บอบบิ้นฮีตเตอร์ (Bobbin Heater) ใช้ให้ความร้อนของเหลวเหมือนฮีตเตอร์จุ่ม
5. ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater) ใช้ให้ความร้อนกับวัตถุโดยไม่ต้องสัมผัสโดยตรง ไม่เหมาะกับวัตถุที่มีลักษณะ
มันวาวเนื่องจากวัตถุมันวาวจะมี คุณสมบัติสะท้อนแสง ทำให้ไม่สามารถดูดซับแสงอินฟราเรดได้อย่างเต็มที่ ใช้ติดตั้ง
ในเตาอบ หรือ เหนือคอนเวเยอร์ได้
6. ฮีตเตอร์รัดท่อ หรือ Band Heater ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวที่อยู่ในท่อหรือถังรูปทรงกระบอกโดยรัดจากด้านนอก
7. ฮีตเตอร์แผ่น หรือ Strip Heater ใช้ให้ความร้อนโดยแนบกับวัตถุโดยตรงสามารถ

2.6.3 ฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater)

ได้รับการออกแบบสำหรับ ท่อ หรือถังรูปทรงกระบอก ฉนวนของฮีตเตอร์ทำจากลวดฮีตเตอร์เป็นแบบ
แบน (Ribbon Wire Heating Element) จึงทำให้ฮีตเตอร์ชนิดนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กขนาด 25 มม. หรืออาจใหญ่ถึง 600
มม. ก็ได้ ส่วนความกว้างอยู่ระหว่าง 20 – 300 มม. ตัวถังด้านนอกเป็นแผ่นเหล็กหรือเหล็กกล้าไร้สนิม เหมาะสม
สำหรับให้ความร้อนกับเครื่อง ฉีดพลาสติกมีอีกชื่อหนึ่งว่า ฮีตเตอร์กระบอก

2.7 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) [6]

เทอร์โมคัปเปิล คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้ไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้เกิดการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ค้นพบโดย Thomas Seebeck นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันในปี ค.ศ.1821 ในรูปที่ 2.14 เป็นวงจรที่ใช้อธิบายผลของซีเบ็คดังกล่าว



รูปที่ 2.14 ผลของซีเบ็ค [6]

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) มีหลายชนิด ให้เลือก แล้วแต่ย่านอุณหภูมิและลักษณะการใช้งาน โดยความแตกต่างของแต่ละ Type นี้ เกิดจากการเลือกใช้คู่ของวัสดุ (Element) ของโลหะ ที่นำโลหะชนิดต่าง ๆ กันมาจับคู่เชื่อมเข้าด้วยกัน จะทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลที่ได้แตกต่างกัน ไป นอกจากนี้ ได้มีการทดลองผสมโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะเดิมให้ดีขึ้น หรือเพื่อใช้แทนโลหะบางชนิดที่ใช้ทำอยู่เดิม เช่น แพลตินัม เนื่องจากมีราคาสูง

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) แบบมาตรฐาน Type ต่าง ๆ [6]

Type	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ mV
		C	F	
B	แพลทินัม - 30% โรเดียม แพลทินัม - 6% โรเดียม	0 ถึง 1820	32 ถึง 3310	0 ถึง 13.814
R	แพลทินัม - 13% โรเดียม แพลทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.26 ถึง 21.108
S	แพลทินัม-10% โรเดียม แพลทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.236 ถึง 18.698
J	เหล็ก/คอนสแตนแตน	-210 ถึง 760	-350 ถึง 1400	-8.096 ถึง 42.922
K	โครเมิล/อะลูเมิล	-270 ถึง 1372	-450 ถึง 2500	-6.458 ถึง 54.875
T	ทองแดง/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 400	- 450 ถึง 750	-6.258 ถึง 20.865
E	โครเมิล/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 1000	- 450 ถึง 1830	-9.835 ถึง 76.358

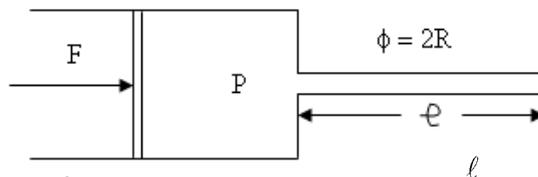
2.8 ทฤษฎีเครื่องมือวัดทางรีโอโลยี [2]

เครื่องมือวัดทางรีโอโลยีที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของของไหลสามประเภท คือ Inelastic Newtonian, Inelastic Non-newtonian และ Viscoelastic โดยที่เครื่องมือวัดต่างๆ นั้นทำการวัดใน 2 ขอบเขตสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ ได้แก่ พอลิเมอร์ในสถานะหลอมเหลว และพอลิเมอร์ในสถานะของแข็งในช่วงของกลาสทรานสิชัน ในสถานะของแข็งจะทำการศึกษาสมบัติการคืบและคุณสมบัติการพักความเครียด เครื่องมือวัดทางรีโอโลยีสามารถแบ่งตามลักษณะแรงที่กระทำออกได้ 2 ประการ เครื่องมือวัดลักษณะเป็นเชิงเส้น (Linear behavior) เช่น เครื่องมือวัดชนิดสั่น (Oscillating) และ เครื่องมือวัดลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear behavior) เช่น คาปิลารีวิสโคมิเตอร์ เครื่องมือวัดทางรีโอโลยีมีมากชนิดที่ใช้เฉพาะงานแต่บทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเครื่องมือวัดพื้นฐานที่ใช้กันมากเท่านั้น

2.8.1 คาปิลารีวิสโคมิเตอร์ (Capillary Viscometers)

คาปิลารีวิสโคมิเตอร์มีหลักการการทำงานที่ง่ายคือ ใช้ความดันดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ของไหลที่มีความหนืดมากต้องใช้ความดันมากในการดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ความหนืดจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับอัตราส่วนความดันต่ออัตราการไหลคาปิลารีวิสโคมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นเพราะว่ามีการเปลี่ยนแปลงในระดับไซโมแลกุลในขณะที่มีการไหล

พิจารณาการไหลของของไหลที่ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงดัน ไหลผ่านท่อคาปิลารี รัศมี R และยาว l ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางของคาปิลารีวิสโคมิเตอร์ [2]

ที่ปลายของท่อแต่ละข้างจะมีความดันต่างกันด้านซ้ายมือมีความดันเป็น P ได้จากการอัดของสุกสูบ และด้านขวามือมีความดันบรรยากาศและถือว่าความดันนี้น้อยมากเมื่อเทียบกับ P ให้ Q เป็นอัตราการไหลปริมาตรต่อหน่วยเวลา ความสัมพันธ์ระหว่าง P และ Q จะสามารถอธิบายด้วยกราฟของการไหล (flow curve) ได้

พิจารณาทรงกระบอกของเหลวภายในของท่อคาปิลารีที่มีรัศมี r มีความยาว l ในขณะที่มีการไหล ของเหลวจะมีความเค้นเฉือน τ กระทำ ก่อให้เกิดแรงกระทำที่ผิวทรงกระบอกนี้ มีค่าเป็น $2\pi r \tau$ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับแรง $\pi r^2 p$ เนื่องจากความดัน P ที่กระทำต่อทรงกระบอกนี้ นั่นคือ

$$2\pi r l \tau = \pi r^2 P \quad (2.39)$$

พิจารณากรณี $r = R$ หรือที่ผิวในของท่อคาปิลารี และนิยาม τ เป็น τ_R

จะได้ว่า
$$\tau_R = \frac{PR}{2l} \quad (2.40)$$

ถ้าพิจารณาความเร็วของของไหลในท่อคาปิลารีนี้ ที่กึ่งกลางท่อจะมีความเร็วสูงสุด ในขณะที่ความเร็วที่ผิวท่อเป็นศูนย์ (กรณีของไหลไม่มีการลื่นไหล) ถ้าให้ความเร็วของของเหลวที่ระยะ r จากแกนกลางของท่อเป็น $V(r)$ ดังนั้นอัตราเฉือนที่ตำแหน่ง r ใดๆ มีค่าเป็น $-dV(r)/(dr)$ เครื่องหมายลบแสดงถึงความเร็ว $V(r)$ ลดลงเมื่อ r เพิ่มขึ้น อัตราการไหลมีค่าเป็น

$$Q = \int_0^R 2\pi r V(r) dr$$

$$Q = \left[\pi r^2 V(r) \right]_0^R - \int_0^R 2\pi r^2 \frac{dV}{dr} dr \quad (2.41)$$

เทอมแรกทางขวามือเป็นศูนย์ เพราะ $V(R) = 0$ แทนค่า $dV(r)/(dr) = f(\tau)$ และ เปลี่ยนตัวแปรในการอินทิเกรต จาก r เป็น τ จาก $r = 2\tau/p$ จะได้ว่า

$$D(\tau_R) = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4}{\tau_R^3} \int_0^{\tau_R} f(\tau) \tau^2 d\tau \quad (2.42)$$

ปริมาณ $D(\tau_R)$ หรือ $4Q/\pi R^3$ คืออัตราเฉือนปรากฏที่ผิวท่อคาปิลารี จะเป็นฟังก์ชันของ τ_R เท่านั้น ซึ่งถ้าหาค่า $\frac{dQ}{d\tau_R}$ จะได้

$$\frac{dQ}{d\tau_R} = -\frac{3\pi R^3}{\tau_R^4} \int_0^{\tau_R} f(\tau) \tau^2 d\tau + \frac{\pi R^3}{\tau_R} f(\tau) \quad (2.43)$$

หรือ

$$\frac{dQ}{d\tau_R} = -\frac{3Q}{\tau_R} + \frac{\pi R^3}{\tau_R} f(\tau) \quad (2.44)$$

จากความสัมพันธ์ $f(\tau_R) = \varepsilon(R)$ แทนลงในสมการ (2.44) จะได้

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(R) &= \frac{3Q}{\pi R^3} + \frac{dQ}{\pi R^3 \frac{1}{\tau_R} d\tau_R} \\ \text{หรือ} \quad \dot{\varepsilon}(R) &= \frac{1}{\pi R^3} + \frac{dQ}{d \ln \tau_R} + 3Q \end{aligned} \quad (2.45)$$

ข้อสังเกต อัตราเฉือนในสมการ (2.45) เป็นอัตราเฉือนที่ตำแหน่งผิวของท่อคาปิลารีในขณะที่เราถือว่าความเร็วของไหลที่ตำแหน่งนี้เป็นศูนย์

2.8.1.1 กรณีของของไหลนิวทอนเนียน

สมการ (2.45) เป็นสมการทั่วไปที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับอัตราไหล ในกรณีของไหลนิวทอนเนียน ในกรณีนี้ $\varepsilon = \tau/\eta = f(\tau)$ เมื่อ η เป็นสัมประสิทธิ์ความหนืด

แทนค่า $f(\tau) = \tau/\eta$ ลงในสมการ (2.42) จะได้ว่า

$$Q = \frac{\pi R^{4P}}{8\eta\ell} = \frac{\pi R^3 \tau_R}{4\eta} \quad (2.46)$$

สมการนี้เรียกว่า สมการไฮเคน-ปัวเซย (Hagen-Poiseuille equation) เป็นสมการที่สำคัญที่ใช้หาความหนืดของของไหลนิวทอนเนียน โดยวัดอัตราไหลและความดันจากการทดลอง จากสมการที่ (2.46) จะเห็นได้ชัดเจนว่า $D(\tau_R) = \frac{4Q}{\pi R^3}$ มีค่าเท่ากับอัตราเฉือน $\varepsilon(R)$ ที่ผิวของท่อคาปิลารีในกรณีของไหลเป็นของไหลนิวทอนเนียนนั่นเอง ในกรณีของไหลทั่วไป อัตราเฉือนที่ผิวแท้จริงสามารถหาได้จากสมการ (2.45) แต่เพื่อความสะดวกในการคำนวณสามารถกำหนดให้ $D(\tau_R) = \frac{4Q}{\pi R^3}$ เป็นอัตราเฉือนปรากฏดังจะกล่าวละเอียดในหัวข้อถัดไป

ดังที่เคยกล่าวไว้ข้างต้นว่า ความเร็วในการไหลในท่อคาปิลารีเป็นฟังก์ชันกับตำแหน่ง r ในกรณีของของไหลนิวทอนเนียน สามารถหา $V(r)$ ได้จากสมการ

$$-\frac{dV(r)}{dr} = \varepsilon = \frac{\tau}{\eta}$$

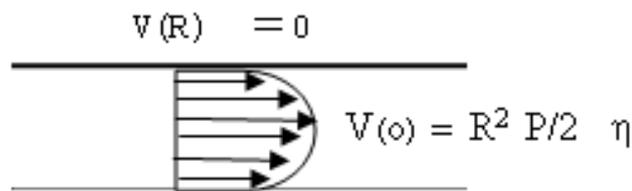
$$V(r) = -\int_r^R \frac{\tau}{\eta} dr$$

จากเงื่อนไขที่ $V_R = 0$ และ $\tau_r = (P/2\ell)r$

$$V(r) = -\frac{P}{2\ell\eta} \int_r^R r dr$$

$$V(r) = \frac{(R^2 - r^2)P}{2\ell\eta} \quad (2.47)$$

จะเห็นได้ว่า $V(r)$ เป็นฟังก์ชันกับ r^2 จึงจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงภาพตัดการไหลของของไหลนิวทอนเนียนในท่อคาปิลารี [2]

2.8.1.2 พิจารณากรณีของของไหลวิสโคอิลาสติก หรือ กฎยกกำลัง (power law)

ของไหลวิสโคอิลาสติกนั้นเป็นที่ทราบกันแล้วว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับความเค้นเฉือน แต่มีความสัมพันธ์ในลักษณะความเค้นเฉือนยกกำลังดังสมการ (2.48)

$$\dot{\varepsilon} = f(\tau) = \left(\frac{1}{k}\right)\tau^m \quad (2.48)$$

ในกรณีที่เราทราบค่าคงตัวของ k และ m ของไหลวิสโคอิลาสติกนั้น เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความดัน โดยแทนค่า $f(\tau) = (1/k)\tau^m$ ลงในสมการ (2.42) จะได้

$$D(\tau_R) = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4}{k\tau_R^3} \int_0^{\tau_R} \tau^{m+2} d\tau$$

หรือ

$$D(\tau_R) = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4\tau_R^m}{k(m+3)} \quad (2.49)$$

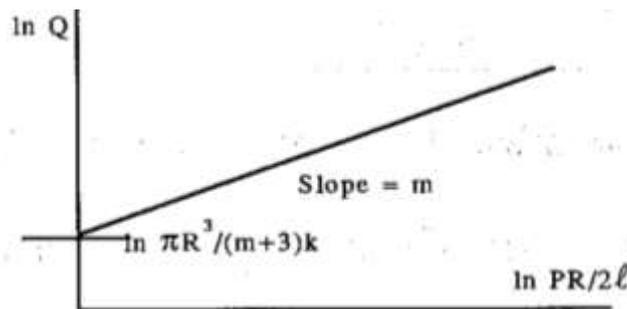
หรือความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้กับความดันเขียนเป็น

$$Q = \frac{\pi R^3}{(m+3)k} \left(\frac{PR}{2\ell} \right)^m \quad (2.50)$$

สมการ (2.50) ความสัมพันธ์ของ Q กับ P ยังขึ้นกับค่าคงตัว k และ m ซึ่งเป็นค่าคงตัวแสดงสมบัติของพอลิเมอร์ จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องหาค่าคงตัวทั้งสองก่อน จากสมการ (2.50) จะเห็นได้ว่าถ้าเราเขียนความสัมพันธ์ใหม่ในรูปของลอการิทึม สมการ (2.50) จะได้

$$\ln Q = \ln \frac{\pi R^3}{(m+3)k} + m \ln \frac{PR}{2\ell} \quad (2.51)$$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Q$ กับ $\ln P$ แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Q$ กับ $\ln PR/2\ell$ [2]

อัตราเฉือนเป็นอีกค่าหนึ่งที่เราให้ความสนใจ เราอาจหาค่านี้ได้โดยพิจารณาจากสมการ (2.45) จะได้ว่า

$$\dot{\epsilon}(\tau_R) = \frac{3D(\tau_R)}{4} + \frac{\tau_R dD(\tau_R)}{4d\tau_R} \quad (2.52)$$

หรือ

$$\dot{\epsilon}(\tau_R) = \frac{3}{4} \tau_R \phi + \frac{1}{4} \tau_R \frac{d\tau_R \phi}{d\tau_R} \quad (2.53)$$

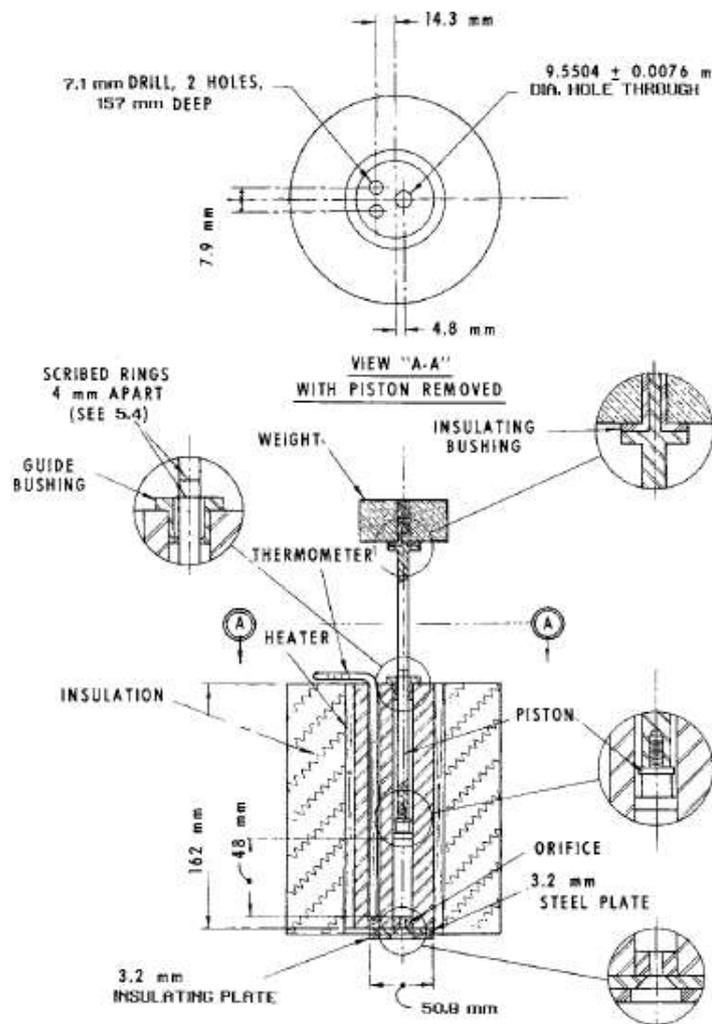
จากการหาค่าอนุพันธ์จะได้ว่า

$$\dot{\epsilon}(\tau_R) = \tau_R \phi \left(1 + \frac{1}{4} \frac{d \ln \phi}{d \ln \tau_R} \right) \quad (2.54)$$

พิจารณา เทอมแรกทางด้านขวามือในสมการ (2.54) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $D(\tau_R)$ หรือเรียกว่าอัตราเฉือนปรากฏ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราเฉือนเมื่อคิดว่าของไหลเป็นของไหลนิวทอนเนียน เทอมที่สองด้านขวามือเป็นเทอมจึงปริยาย เหมือนกับเทอมที่แก้ไขให้ถูกต้อง

2.9 ทฤษฎีการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก [1],[7]

เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกมีการทำงานเหมือนกับ ลีโอมิเตอร์ แต่เป็นการทดสอบพลาสติก ภายใต้เงื่อนไข การกำหนดแรงเฉือนต่ำ (low shear)ถึงแม้ว่าค่า ความเค้นเฉือน หรือ อัตราเฉือน ที่กำหนดหรือทดสอบ จะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้ในกระบวนการผลิต เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก ถูกออกแบบเพื่อใช้ทดสอบหาค่า อัตราการไหล ตามมาตรฐาน ISO 1133 และ ASTM D 1238 ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ISO1133 ซึ่งเข้ามาแทนที่ของมาตรฐานของประเทศต่างๆเช่น DIN 53735 (Germany), NF: 51-106 (France), UNI 5640-74 (Italy)



รูปที่ 2.18 เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก [7]

มีการทดสอบหาค่า อัตราการไหล อยู่ 2 วิธี

วิธีที่ 1 manual cut-off (Procedure A) วิธีนี้เหมาะกับพลาสติกที่มีค่า อัตราการไหล อยู่ระหว่าง 0.15 ถึง 25 กรัม ต่อ 10 นาที หรือใช้สำหรับการเปรียบเทียบระหว่าง พลาสติกทั่วไปกับพลาสติกที่เติมสาร

วิธีที่ 2 automatic method (Procedure B) วิธีนี้จำเป็นจะต้องทราบค่า ความหนาแน่นขณะหลอมเหลว เพื่อประกอบใน

สมการ คำนวณหาค่า อัตราการไหลโดยการหาค่าปริมาตรของพลาสติกหลอมไหลต่อเวลา(Melt Volume Rate,MVR) AFRT เป็นอุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยวัดหาระยะการเคลื่อนที่ของลูกสูบ นำมาคำนวณ Melt Volume Rate,MVR ภายระยะที่กำหนดโดยอัตโนมัติ วิธีทดสอบ B เหมาะกับการทดสอบหาค่า อัตราการไหล ตั้งแต่ 0.5 ถึง 900 กรัม ต่อ10 นาทีตาม ISO 1133 กำหนดให้ทดสอบได้ถึง 100 กรัม ต่อ10 นาที

การทดสอบนี้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน (PE,PP) แต่สามารถใช้กับเทอร์โมพลาสติกอื่น ๆ ที่มีความหนืดของพลาสติกค่อนข้างเหนียวและพลาสติกเหลวที่มีความเสถียรต่อความร้อน เช่น PS , SAN เป็นต้น ค่าอัตราการไหลของพลาสติกสูง หมายถึง การไหลง่ายเมื่อพลาสติกหลอมเหลวและมี Polymerization degree ต่ำ

ตารางที่ 2.3 ค่ากำหนดสำหรับการทดสอบหาค่าอัตราการไหลของพลาสติก [7]

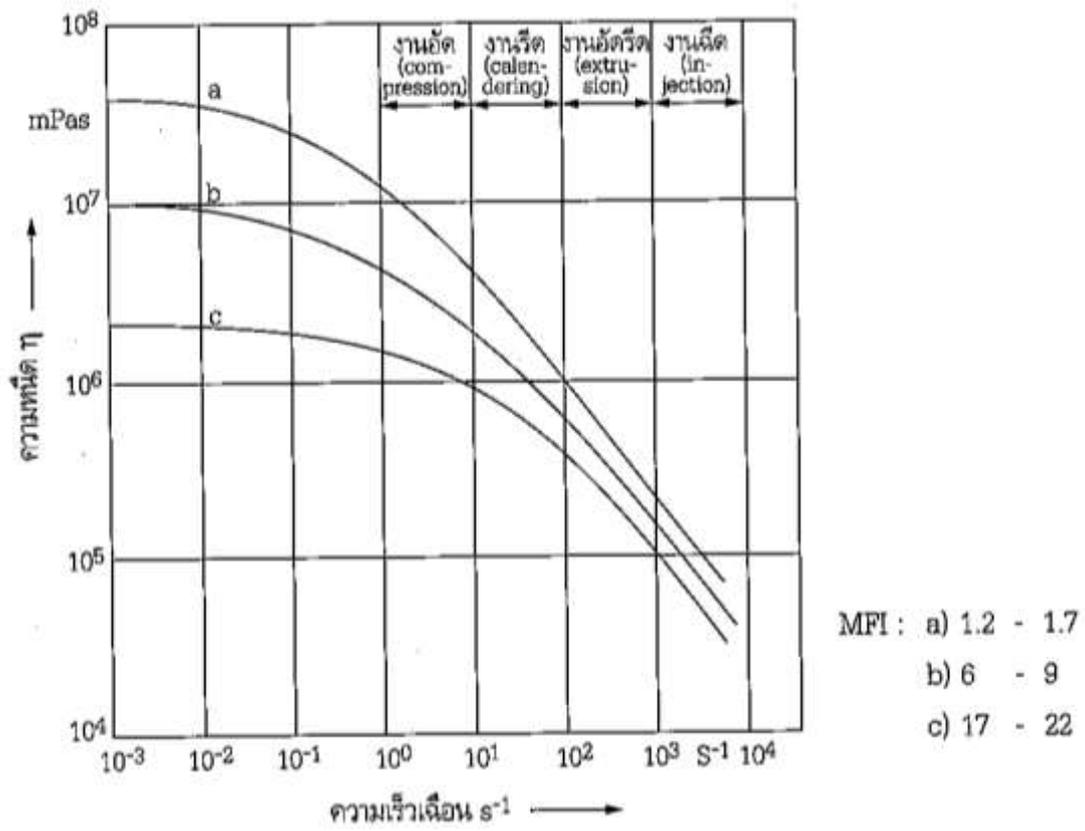
Material	Condition	
Acetals (copolymer and homopolymer)	190/2.16	190/1.05
Acrylics	230/1.2	230/3.8
Acrylonitrile-butadiene-styrene	200/5.0 220/10	230/3.8
Acrylonitrile/butadiene/styrene/polycarbonate	230/3.8	250/1.2
blends	265/3.8	265/5.0
Cellulose esters	190/0.325 190/21.60	190/2.16 210/2.16
Ethylene-chlorotrifluoroethylene copolymer	271.5/2.16	
Ethylene-tetrafluoroethylene copolymer	297/5.0	
Nylon	275/0.325 235/2.16 275/5.0	235/1.0 235/5.0
Perfluoro (ethylen-propylene) copolymer	372/2.16	
Perfluoroalkoxyalkane	372/5.0	
Polycaprolactone	125/2.16	80/2.16
Polychlorotrifluoroethylene	265/12.5	
Polyether sulfone (PES)	380/2.16 343/2.16	360/10
Polyethylene	125/0.325 250/1.2 190/0.325 190/21.60 310/12.5	125/2.16 190/2.16 190/10
Polycarbonate	300/1.2	
Polymonochlorotrifluoroethylene	265/21.6 265/31.6	

Polypropylene	230/2.16	
Polyphenyl sulfone (PPSU)	365/5.0	380/2.16
Polystyrene	200/5.0 230/3.8	260/1.2 190/5.0
Polysulfone (PSU)	343/2.16	360/10
Polyterephthalate	250/2.16 285/2.16	210/2.16
Poly (vinyl acetal)	150/21.6	
Poly (vinylidene fluoride)	260/21.6 230/5.0	
Poly (phenylene sulfide)	315/5.0	
Styrene acrylonitrile	220/10 230/3.8	230/10
Styrenic Thermoplastic Elastomer	190/2.16	200/5.0
Thermoplastic Elastomer-Ether-Ester	190/2.16 230/2.16	220/2.16 240/2.16 250/2.16
Thermoplastic elastomer (TEO)	230/2.16	
Vinylidene fluoride copolymers	230/2.16 230/5.0	

ในการหาคุณสมบัติในการไหลของพลาสติกเหลวในทางปฏิบัติที่ใช้งานในช่วงของความเร็วในการไหลสูง การหาอัตราการไหลอย่างเดียวจะไม่พอเพียง เพราะในการทดสอบมีความเร็วไหลต่ำมากจึงอาจเป็นไปได้ว่าพลาสติกสองชนิดที่มีค่า อัตราการไหล เท่ากัน แต่มีparameter ในการทำงานต่างกันอย่างสิ้นเชิง

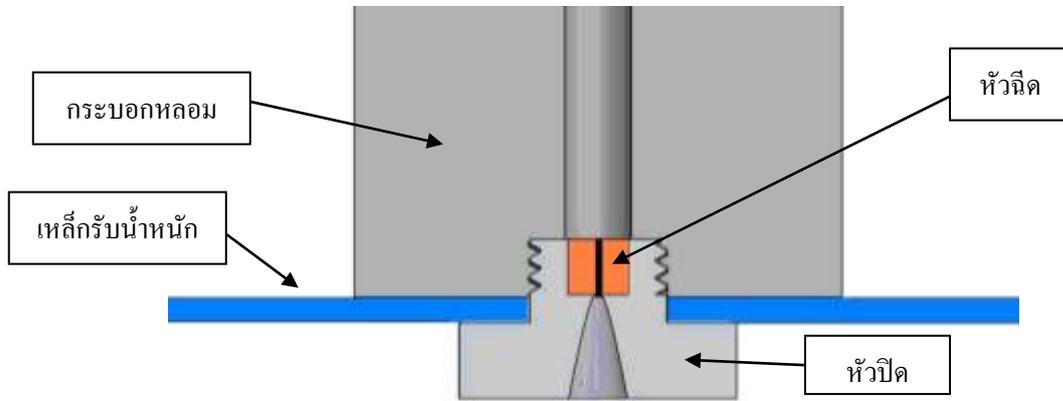
ในการหาคุณสมบัติในการไหลของพลาสติกเหลวสำหรับการทำงานที่ความเร็วไหลสูงๆ จะต้องใช้ capillary rheometer ในการทดสอบ ซึ่งจะบอกคุณสมบัติการไหลของพลาสติกเหลวในอุดมคติได้แน่นอนกว่า

สาเหตุที่คุณสมบัติในการไหลมีความยุ่งยากก็คือ พลาสติกเหลวไม่ใช่ของเหลวในอุดมคติ ทั้งนี้เพราะความหนืดไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นอยู่กับความเร็วเฉือน LDPE ที่อุณหภูมิ 150 °C [1]

3.2.2. ออกแบบหัวปิดด้านล่างใหม่ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความสะอาด ทำให้เปลี่ยนหัวฉีดได้ง่ายขึ้น และ ยังไว้ยึด ครอบอกหลอมกับเครื่องอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การประกอบหัวปิด

คำนวณหาเกลียว ใช้เหล็กกล้าคาร์บอน AISI 1020 โดยกำหนดน้ำหนักที่กระทำต่อเกลียวอยู่ที่ 15 กิโลกรัม
 ความเค้นใช้งาน = $448.175/5 = 89.635 \text{ N/mm}^2$

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.1}$$

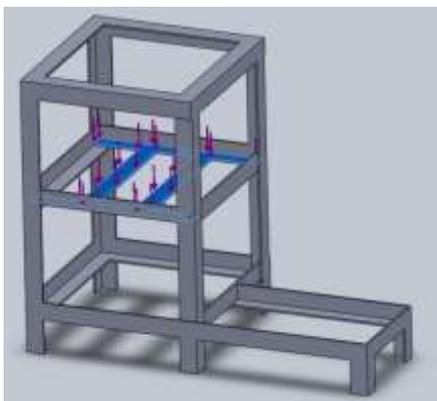
$$89.635 = \frac{150}{A_s}$$

$$A_s = 1.6734 \text{ mm}^2$$

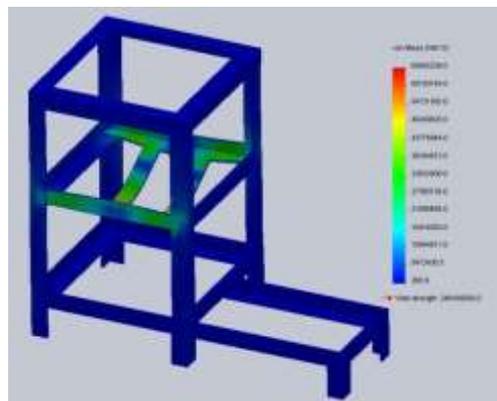
ดังนั้นควรเลือกใช้เกลียว ธรรมดาที่ M2x0.4 แต่ด้วยเราต้องการให้ใส่หัวฉีดเข้าไป จึงต้องขนาดให้ใหญ่กว่า หัวฉีด เป็น M20x2.5 $A_s = 245$ ตารางมิลลิเมตร

3.2.3. แบบของโครงเครื่อง

ได้ทำการวิเคราะห์แรงที่จะกระทำต่อโครงสร้างโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กำหนดวัสดุเป็นเหล็กฉาก 1"x1"x1/8" SS 400 แรงกระทำกับโครงเหล็ก 300 นิวตัน ซึ่งมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 5 สามารถนำไปใช้งานได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4



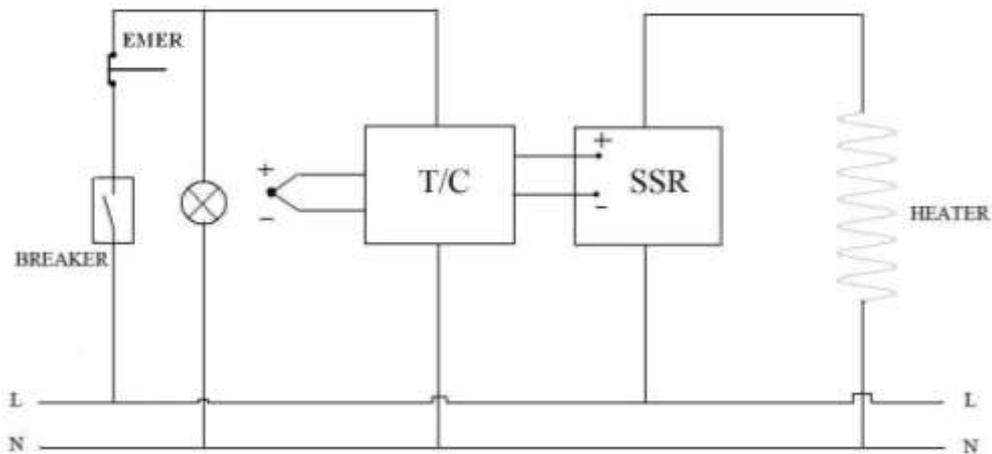
รูปที่ 3.3 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างเครื่อง



รูปที่ 3.4 การเสีรูปร่างและส่วนที่รับความเค้น

3.2.4.การออกแบบวงจรไฟฟ้า

วงจรควบคุมให้ใช้ได้ทั้งแบบ ON-OFF และ แบบ PID วงจรจะทำงานเมื่อเปิดเบรกเกอร์ กระแสไฟฟ้าจะไหลไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิ T/C ตัวควบคุมอุณหภูมิทำการรับค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลที่ต่อมาจากระบบหล่อลม มาแสดงที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นทำการปรับค่า โซลิดสเตทรีเลย์ SSR จะทำงานทำให้เครื่องทำความร้อนมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ขดลวดความต้านทานจะทำงาน เมื่อเทอร์โมคัปเปิลรับค่าอุณหภูมิภายในระบบหล่อลมเท่ากับค่าที่ปรับไว้ ตัวควบคุมอุณหภูมิจะส่งสัญญาณให้โซลิดสเตทรีเลย์ทำการตัดวงจร ทำให้ไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า เครื่องทำความร้อนไม่ครบวงจรจึงไม่ทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



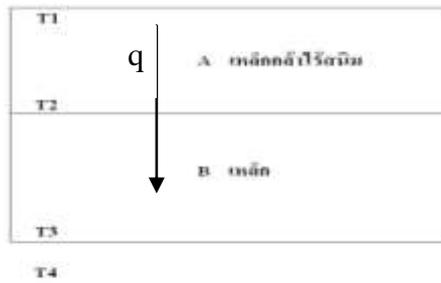
รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบการอัดอากาศไหลของพลาสติก

3.3 ออกแบบชุดกระบอกหล่อลมใหม่ เนื่องจากเกิดปัญหาเครื่องทดสอบมีอัตราการไหลที่ช้ากว่าปกติ

3.3.1 หาสาเหตุของปัญหา

ทำการคำนวณในส่วนที่คาดว่าจะมีการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการใส่หัวปิดเข้ากับกระบอกหล่อลม ภาพประกอบการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.6

- กำหนดให้
- T_1 = ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 230°C
 - T_2 = อุณหภูมิบริเวณเหล็กกล้าไร้สนิมสัมผัสกับเหล็กที่เป็นหัวปิด
 - T_3 = อุณหภูมิบริเวณผนังภายนอกของเหล็ก
 - T_4 = อากาศมีอุณหภูมิ 25°C
 - h = มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็น $25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
 - k = ค่าการนำความร้อน (W/m K)
 - L = ความหนาของโลหะ (m)
 - q'' = ฟลักซ์ของความร้อน (W/m^2)



รูปที่ 3.6 ภาพประกอบการคำนวณอุณหภูมิระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กหัวปิด

$$q'' = \frac{880W}{(0.3 \times 0.3)} = 9778 \frac{W}{m^2}$$

$$T_2 = T_1 - \left(\frac{L_a}{k_b} \right) \times q'' \quad (3.2)$$

จากสมการที่ (3.2)

$$T_2 = T_1 - \left(\frac{0.05}{14} \right) \times 9778$$

$$T_2 = 195^\circ C$$

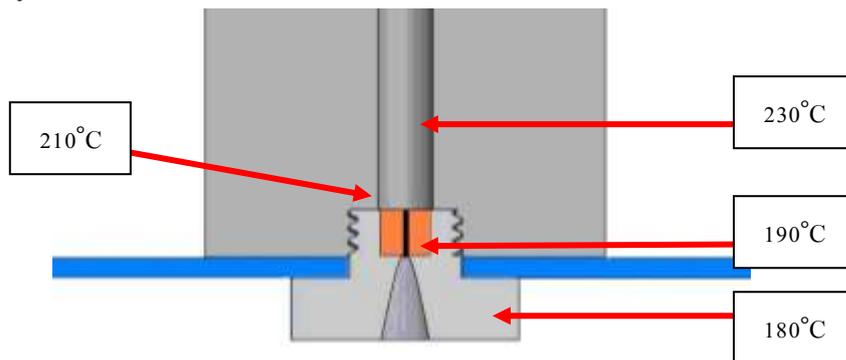
$$T_3 = T_1 - \left[\left(\frac{L_a}{k_a} \right) + \left(\frac{L_b}{k_b} \right) \right] \times q'' \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3)

$$T_3 = T_1 - \left[\left(\frac{0.05}{14} \right) + \left(\frac{0.04}{50} \right) \right] \times 9778$$

$$T_3 = 187.256^\circ C$$

จากการคำนวณพบว่า ความร้อนที่ผนังของเหล็กหัวปิดมีการถ่ายเทความร้อนออกไปมากเกินไปจนกว่าจะยอมรับได้ ซึ่งจะส่งผลให้ความร้อนในกระบอกหลอมไม่เท่ากันอย่างที่คาดการณ์ไว้ในตอนแรก ต่อมาเพื่อทำการยืนยันค่าความร้อนทางทฤษฎีเราได้ตั้งอุณหภูมิเครื่องทดสอบไว้ที่ $230^\circ C$ แล้วใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิจริง เพื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



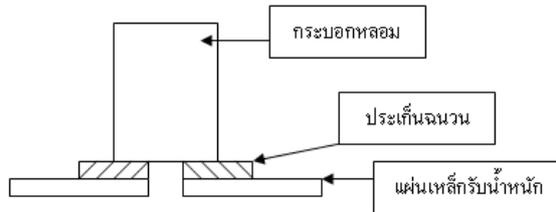
รูปที่ 3.7 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆขณะให้ความร้อนที่ 230 องศาเซลเซียส

3.3.2 สรุปสาเหตุของปัญหา

1. หัวปิดซึ่งเป็นเหล็กขีดออกมาอาจจะมีการถ่ายเทความร้อนออกไปทำให้ความร้อนที่หัวฉีดลดลงตามไปด้วย
2. กระบอกหลอมตั้งอยู่บนเหล็กที่สามารถนำความร้อนออกไปได้ง่าย จนทำให้อุณหภูมิที่หัวปิดและหัวฉีดน้อยกว่าที่ควร

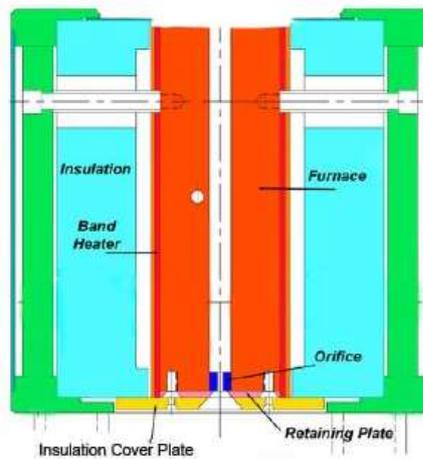
3.3.3 ทำการแก้ไขปัญหา

1. ทำการออกแบบชุดกระบอกลอมใหม่ให้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนออกให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ และ ปรับแบบให้ใกล้เคียงกับเครื่องมาตรฐานมากขึ้น
2. นำประเด็นจนวนมาลงกระบอกลอมเพื่อไม่ให้ความร้อนถูกถ่ายเทไปที่เหล็กรับน้ำหนักด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.8



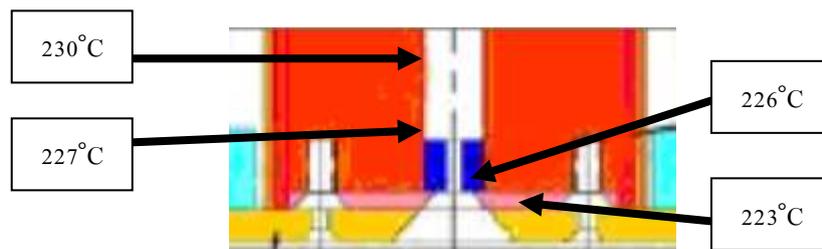
รูปที่ 3.8 การประกอบประเก็นจนวนเข้ากับเครื่อง

3. ออกแบบชุดจับยึดกระบอกลอมใหม่ โดยใช้เนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม ยึดกระบอกลอมแทนหัวปิด
 4. นำจนวนทนความร้อนสูงหุ้มรอบๆกระบอกลอม
- จากที่ผู้จัดทำได้คิดแก้ไขไว้จะสามารถเขียนแบบออกมาได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางของชุดกระบอกลอมที่ได้ออกแบบใหม่

หลังจากทำการแก้ไขกระบอกลอมใหม่แล้วทำการวัดอุณหภูมิจริงอีกครั้งตามจุดต่างๆ พบว่าอุณหภูมิในกระบอกลอมลดลงน้อยมาก ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งคาดว่าจะไม่มีปัญหาเรื่อง อุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมออีกต่อไป



รูปที่ 3.10 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆขณะให้ความร้อนที่ 230 องศาเซลเซียส

3.4 การคำนวณ

3.4.1 การคำนวณหาความร้อนสูญเสีย [3]

ผนังฉนวนด้านข้างใช้ คือ ชั้นในอิฐทนไฟ มีค่า $k = 0.38 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ หนา 76 mm กำหนด T_1 ด้านในเครื่องเท่ากับ 300°C ส่วน T_2 ด้านนอกเครื่องเท่ากับ 30°C ขนาดเตาเพื่อให้ใหญ่กว่าปกติ $= 0.28 \times 0.25 \text{ m}$ มี 5 ด้านที่ใช้ผนังอิฐทนไฟ ใช้กฎของ Fourier

คำนวณฟลักซ์ความร้อนหาได้จากสมการ $q_x = -k \frac{\partial T}{\partial X}$

จากสมการ $q_x = k \frac{(T_1 - T_2)}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$ (3.4)

จะได้ $q_x = (0.38 \text{ W/m}\cdot\text{K}) \left[\frac{270 \text{ K}}{0.076} \right] = 1350 \text{ W/m}^2$

$q_x = \frac{Q_x}{A}$ (3.5)

$Q_x = 1350 \times (0.28 \times 0.25)$

$Q_x = 94.5 \text{ W}$

ผนังด้านที่ใช้อิฐทนไฟมี 5 ด้าน

$Q_x = 94.5 \times 5$

$= 472.5 \text{ W}$

ส่วนด้านล่างมีประกันฉนวน Ceramic Fibre Paper มีค่า $K = 0.085 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ หนา 5 mm . กำหนด T_1 ด้านในเครื่องเท่ากับ 300°C ส่วน T_2 ด้านนอกเครื่องเท่ากับ 50°C

จากสมการ (3) $q_x = (0.085 \text{ W/m}\cdot\text{K}) \left[\frac{250}{0.005} \right] = 4250 \text{ W/m}^2$

จากสมการ (4) $Q_x = 4250 \times [0.28 \times 0.25]$

$Q_x = 297.5 \text{ W}$

สรุป ผนังทั้ง 6 ด้านของเครื่องทดสอบมีค่าสูญเสียความร้อนคือ $Q_{\text{รวม}} = 472.5 + 297.5 = 770 \text{ W}$

3.4.2 การคำนวณการกระจายความร้อนภายในกระบอกกลม [3]

$q = \frac{q}{\pi h(r_2^2 - r_1^2)}$ (3.6)

$q = \frac{880 \text{ w}}{\pi(0.1)\text{m}(0.035^2 - 0.005^2)\text{m}^2}$

$q = 2334.272 \text{ kw/m}^3$

$T_1 = T_2 + \frac{q}{4k}(r_2^2 - r_1^2) - \frac{q r_2^2}{2k} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$ (3.7)

T_1 คือ อุณหภูมิภายในท่อ

T_2 คือ อุณหภูมิภายนอกท่อ

r_1 คือ รัศมีขอบท่อภายใน

r_2 คือ รัศมีขอบท่อภายนอก

k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ มีค่าเป็นบวก

q คือ อัตราการนำความร้อนต่อหน่วยปริมาตร

q คือ อัตราการนำความร้อน

เอาค่าจากสมการที่ 6 มาแทนค่าในสมการที่ 6

$$T_1 = 573k + \frac{2334.27 \frac{kw}{m^3}}{4(14.9 \frac{w}{m.k})} (0.035^2 - 0.005^2)m^2 - \frac{2334.27 \frac{kw}{m^3} (0.035^2)m^2}{2(14.9 \frac{w}{m.k})} \ln\left(\frac{0.035}{0.005}\right)$$

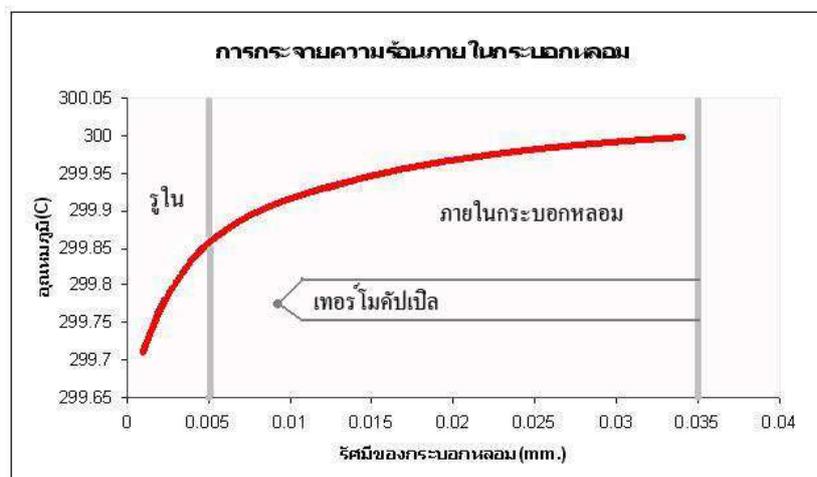
$$T_1 = 572.86k$$

ทำการคำนวณตามสูตร(6)เพื่อหาอุณหภูมิในแต่รัศมีของกระบอกกลม ซึ่งได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การคำนวณหาการกระจายความร้อนภายในกระบอกกลมทุกรัศมีของกระบอกกลม

ที่รัศมี(m)	ความร้อน(K)	ที่รัศมี(m)	ความร้อน(K)	ที่รัศมี(m)	ความร้อน(K)
0.001	572.7125317	0.013	572.939005	0.025	572.9824258
0.002	572.7770775	0.014	572.9444642	0.026	572.9846534
0.003	572.8143625	0.015	572.949435	0.027	572.9867529
0.004	572.8404148	0.016	572.9539829	0.028	572.988735
0.005	572.8602773	0.017	572.9581615	0.029	572.9906091
0.006	572.8762066	0.018	572.9620154	0.03	572.9923834
0.007	572.8894121	0.019	572.9655817	0.031	572.9940657
0.008	572.9006196	0.02	572.968892	0.032	572.9956626
0.009	572.9102996	0.021	572.9719732	0.033	572.9971803
0.01	572.9187749	0.022	572.9748484	0.034	572.9986245
0.011	572.9262767	0.023	572.9775377	0.035	573
0.012	572.9329765	0.024	572.9800584		

จากกราฟในรูปที่ 3.11 จะเห็นว่าถึงแม้อุณหภูมิจะตกลง ณ บริเวณตรงกลางแต่ก็ยังห่างกับอุณหภูมิของผนังภายนอกเล็กน้อย ซึ่งคาดว่าไม่มีปัญหาเรื่อง อุณหภูมิ ณ จุดกึ่งกลาง



รูปที่ 3.11 การกระจายความร้อนภายในกระบอกกลม

จากกราฟในรูปที่ 3.11 จะเห็นว่าถึงแม้อุณหภูมิจะตกลง ณ บริเวณตรงกลางแต่ก็ยังห่างกับอุณหภูมิของผนังภายนอกเล็กน้อย ซึ่งคาดว่าจะไม่มีปัญหาเรื่อง อุณหภูมิ ณ จุดกึ่งกลาง

3.4.3 คำนวณค่าไฟฟ้าที่เครื่องทดสอบต้องใช้

เครื่องทำความร้อนใช้ไฟฟ้า 880W เครื่องควบคุมอุณหภูมิใช้ไฟฟ้า 440W

เครื่องทดสอบใช้ไฟฟ้ารวม $880W + 440W = 1320W$

ใช้งานต่อครั้งใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมงต่อวัน

คิดเป็นค่าสูญเสียความร้อนต่อวัน $1.32kW \times 2h/d = 2.64$ หน่วย /วัน

อัตราค่าไฟฟ้าจาก กฟภ. ปี 2550 ที่เก็บจากส่วนราชการ = 2.4482 บาท / หน่วย

ดังนั้น ค่าไฟฟ้าที่ใช้ต่อวันคือ $2.64 \times 2.4482 = 6.463248$ บาท / วัน หรือ 193.89744 บาท / เดือน

3.5 การจัดสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

เป็นขั้นตอนการเตรียมชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องทดสอบ ซึ่งรวมถึงขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนต่างๆของเครื่องทดสอบอีกด้วย

- เก็บข้อมูลทางด้านราคาวัสดุทั้งหมดที่ใช้ในการสร้าง
- เสนอราคาแก่อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
- สั่งซื้อวัสดุอุปกรณ์ทั้งหมด
- จัดทำ ครอบกลมจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304
- จัดทำลูกสูบจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304
- จัดทำไม้กระทุ้งจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304
- จัดทำโครงสร้างของเครื่องทดสอบจากเหล็ก SS400
- จัดทำกล่องควบคุม
- ติดตั้งฉนวน
- ประกอบครอบเข้ากับเครื่องทดสอบ
- ติดตั้งสายไฟฟ้าเข้ากับชุดควบคุม
- นำทุกส่วนมาประกอบกันจนเสร็จสมบูรณ์

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการจัดสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

ได้เครื่องทดสอบอัตราการไหลที่มีความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เครื่องทำความร้อนใช้กำลังไฟฟ้า 880 วัตต์ สามารถให้ความร้อนได้สูงสุดที่ 300 °C น้ำหนักที่ใช้กด (รวมลูกสูบ) 1, 1.2, 2, 2.16 และ 3.8 กิโลกรัม และ เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกที่สร้างขึ้นสามารถทดสอบอัตราการไหลของเทอร์โมพลาสติกได้ทุกชนิด และให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงค่ามาตรฐานอย่างมาก



รูปที่ 4.1 แสดงเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกที่เสร็จสมบูรณ์

4.2 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

จากการศึกษามาตรฐานของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกจากเครื่องต้นแบบ ได้นำข้อมูลที่ได้มา ออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 ครอบบอกหลอม

ครอบบอกหลอมทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ความยาว 162 มิลลิเมตร เจาะรูตรงกลางขนาด 10 มิลลิเมตร ด้านข้างเจาะรูขนาด 6.5 มิลลิเมตร เพื่อใส่เทอร์โมคัปเปิล ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ครอบบอกหลอม

4.2.2 ลูกสูบ

ลูกสูบทำมาจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่หัวลูกสูบ 9.8 มิลลิเมตร ความยาวทั้งหมด 300 มิลลิเมตร มีปากสำหรับใส่ตุ้มน้ำหนักขนาด 12 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลูกสูบ

4.2.3 ไม้กระทุ้ง

ไม้กระทุ้งมีไว้สำหรับอัดเม็ดพลาสติกให้เต็ม จะช่วยลดช่องว่างของอากาศก่อนทำการทดสอบ ไม้กระทุ้งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาด 12 มิลลิเมตร ทำการกลึงออกให้เหลือ 9.8 มิลลิเมตรเพื่อให้อัดเข้าไปในครอบบอกหลอมได้สะดวก ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ไม้กระทุ้ง

4.2.4 โครงสร้างของเครื่องทดสอบ

โครงสร้างโดยทั่วไปทำจากเหล็กฉาก SS400 ขนาดหน้าตัด 1 นิ้วX1 นิ้ว และ ผนังของเครื่องทดสอบทำจากเหล็กแผ่น ด้านมีฝาสำหรับเปิดช่องแชนอุปกรณ์ภายในได้สะดวก ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่4.5 โครงสร้างของเครื่องทดสอบ

4.2.5 กล่องควบคุม

กล่องควบคุมติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิ มีหลอดไฟสีแดงเพื่อแสดงสถานะ มีเบรกเกอร์ไว้สำหรับเปิดปิดเครื่องทั้งหมด และมีปุ่มฉุกเฉินสำหรับกดเมื่อมีเหตุขัดข้องขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่4.6 กล่องควบคุม

4.2.6 ภายในกล่องควบคุม

ภายในกล่องควบคุม ติดตั้ง โซลิดสเตตรีเลย์ที่รับ input จากเครื่องควบคุมอุณหภูมิและทำการตัดต่อไฟฟ้าที่ส่งไปยังเครื่องทำความร้อน และ มีการติดตั้งระบบไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่4.7 การติดตั้งสายไฟฟ้าเข้ากับชุดควบคุม

4.2.7 การติดตั้งฉนวน

ฉนวนใช้อิฐทนไฟประกอบด้านข้าง แล้ว บุผนังด้านนอกสุดด้วยผ้าใยแก้ว ด้านล่างติดตั้ง ceramic fibre paper ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่4.8 การติดตั้งฉนวน

4.2.8 ชุดประกอบกระบอกเข้ากับเครื่องทดสอบ

เป็นอุปกรณ์ที่จะช่วยยึดกระบอกหลอมให้ติดอยู่กับ โครงสร้าง โดยมีเหล็กแผ่นหนา 4.5 มิลลิเมตร เชื่อมติดกับโครงสร้างด้านล่าง ทำการเจาะรูทั้งแผ่นเหล็กและกระบอกหลอมเพื่อใส่เนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม แล้วทำการประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่4.9 การประกอบกระบอกเข้ากับเครื่องทดสอบ

4.3 การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกด้านความร้อน

ในการทดสอบการทำงานของเครื่องด้านความร้อนนั้นจะทำวิธีคือการทดสอบแบบ คือ การทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าอุณหภูมิภายในรูของกระบอกหลอมและภายนอกกระบอกหลอมมีค่าต่างกันหรือไม่ 2.การทดสอบเพื่อทำการทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก ที่อุณหภูมิ 100°C 150°C 200°C 250°C และ 300°C

4.3.1 ชื่อการทดลองที่ 1

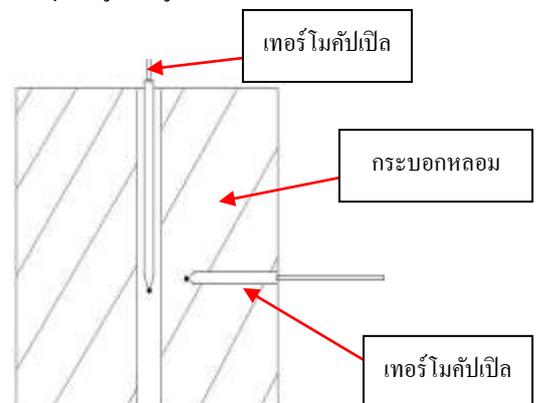
การทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าอุณหภูมิภายในรูของกระบอกหลอมและภายนอกกระบอกหลอมมีค่าต่างกันหรือไม่

4.3.2 วัตถุประสงค์การทดลองที่ 1

1. เพื่อพิสูจน์ว่าอุณหภูมิภายในรูของกระบอกหลอมและภายนอกกระบอกหลอมมีค่าต่างกันหรือไม่
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทั้งภายในรูและภายนอกกระบอกหลอมเมื่อเวลาเปลี่ยนไป
3. ทดสอบการให้ความร้อนของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

4.3.3 วิธีการทดลอง ที่ 1

1. เปิดเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก
2. ตั้งค่าอุณหภูมิที่ 300 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิสูงสุดของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกที่ทำได้
3. วัดอุณหภูมิจากทั้งผนังด้านในและด้านนอก เทียบความต่างของอุณหภูมิ ดังรูปที่ 4.10

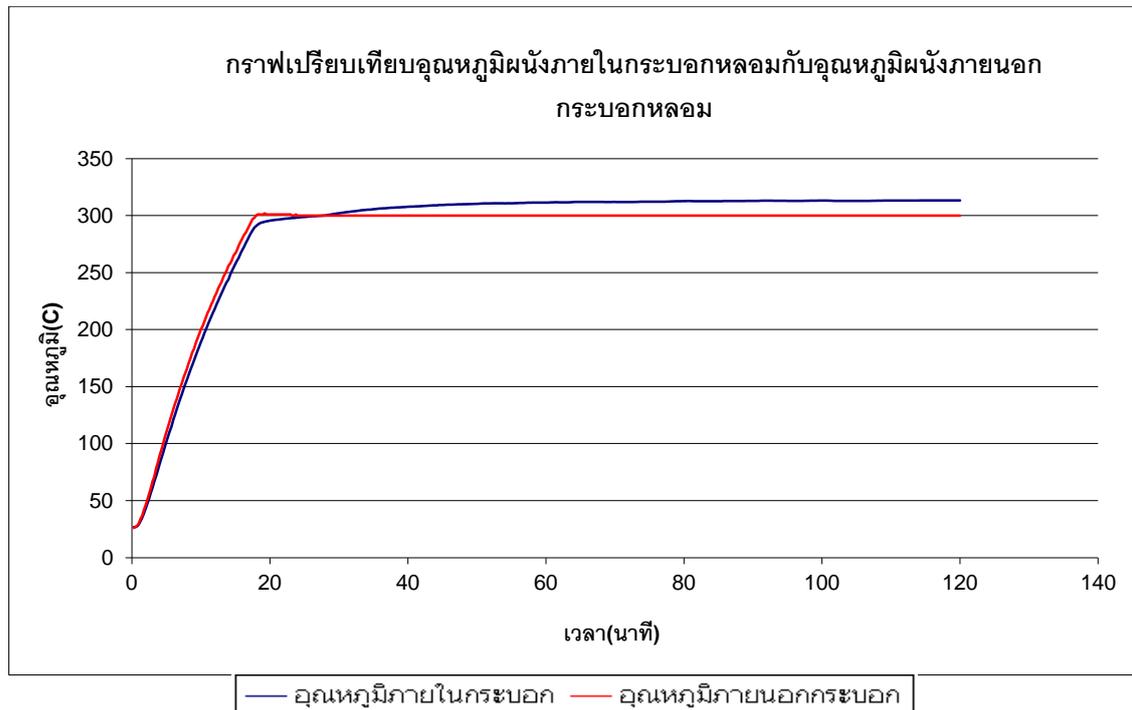


รูปที่ 4.10 การทดสอบเครื่องทางความร้อนที่อุณหภูมิ 300°C

4. ทำการจดบันทึกอุณหภูมิทั้งผนังด้านในและด้านนอก ทุกๆ 15 วินาที
5. จดบันทึกจนครบ 2 ชั่วโมง แล้วนำค่ามาเขียนกราฟ
6. นำกราฟทั้งของอุณหภูมิผนังภายนอกและอุณหภูมิผนังภายใน

4.3.4 ผลการทดลองที่ 1

การทดลองส่งผ่านความร้อน โดยให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดและจับเวลาในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทั้งผนังภายในและผนังภายนอกกระบอกหลอม ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยข้อมูลผลการทดลองแสดงในตาราง ผล.1 และ 2



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบอุณหภูมิผนังภายในกับอุณหภูมิผนังภายนอกกระบอกลอมน

4.3.5 สรุปผลการทดลองที่ 1

จากกราฟ รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิผนังภายในและผนังภายนอกมีความต่างกันอยู่น้อยมาก และเมื่อให้ความร้อนไป 2 ชั่วโมงพบว่าเกิดความร้อนสะสมขึ้นในกระบอกลอมนทำให้ผนังภายในกระบอกลอมนมีอุณหภูมิที่สูงกว่าผนังภายนอก แต่อุณหภูมิทั้งสองก็มีค่าต่างกันเพียง 13.3°C เท่านั้น ซึ่งจะไม่ส่งผลต่อการทดสอบมากนัก

4.3.6 ชื่อการทดลองที่ 2

การทดสอบเพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก ที่อุณหภูมิ 100°C 150°C 200°C 250°C และ 300°C

4.3.7 วัตถุประสงค์การทดลองที่ 2

1. ทดสอบการให้ความร้อนของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก
2. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อเวลาเปลี่ยนไป
3. ทดสอบการทำงานของวงจรควบคุม

4.3.8 วิธีการทดลอง ที่ 2

1. เปิดเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก
2. ทำการปรับค่าอุณหภูมิที่ต้องการ
3. เก็บค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาที่เปลี่ยนไปทุก 15 วินาที จากเทอร์โมคัปเปิล

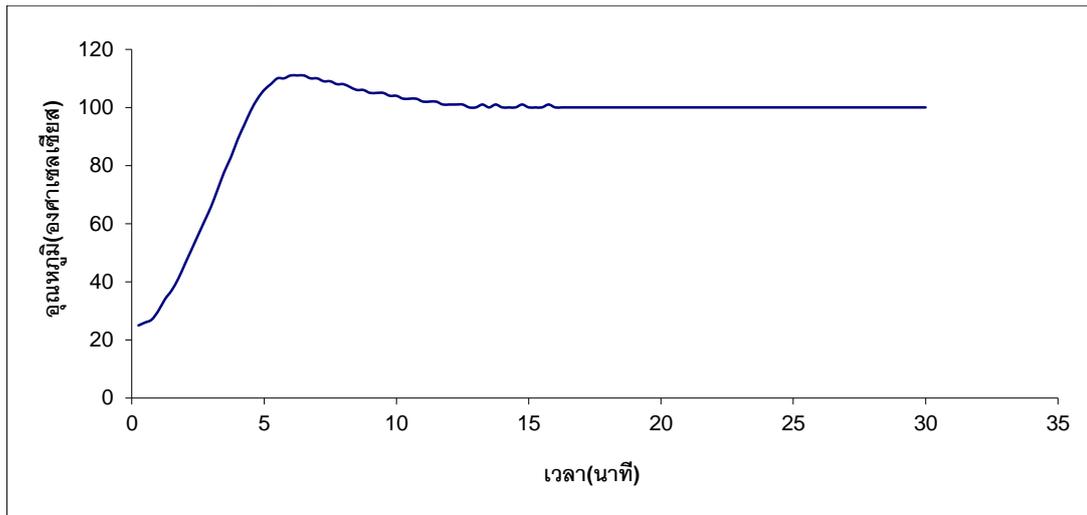
4. เมื่อเตาให้ความร้อนจนถึงเวลา30นาทีจึงหยุดการทดสอบ

5. นำค่าที่ได้จากการบันทึกมาเขียนกราฟ

4.3.9 ผลการทดลองที่2

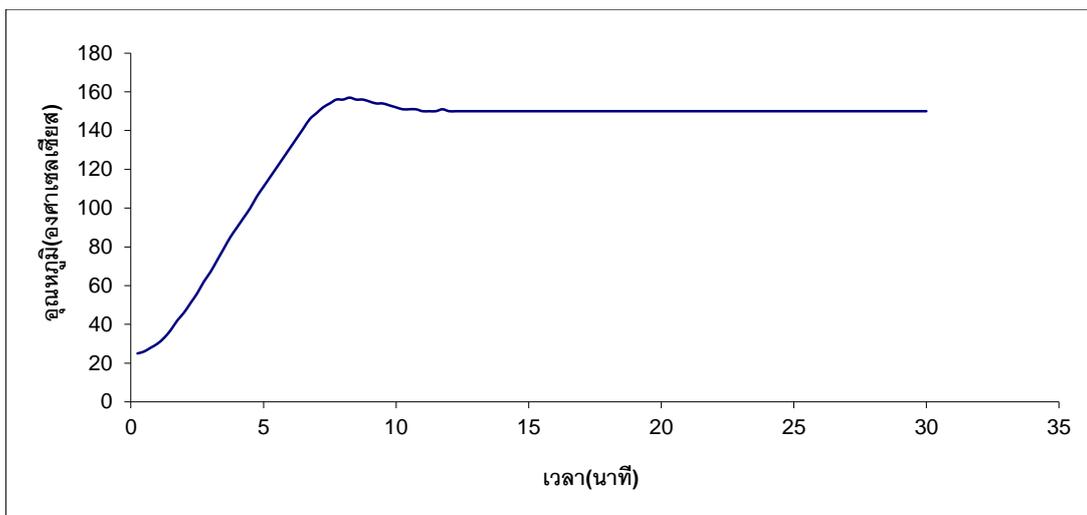
ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12,4.13,4.14,4.15และ4.16 โดยข้อมูลผลการทดลองแสดงในตาราง ผจ.3-7

จากผลการทดลองในตาราง ผจ.3 พบว่าเมื่อตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 100°C ในช่วง 5นาทีแรก อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเกินระดับอุณหภูมิที่ตั้งไว้จากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงสู่ค่าที่ได้ตั้งไว้ และ เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ประมาณ 13 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.12



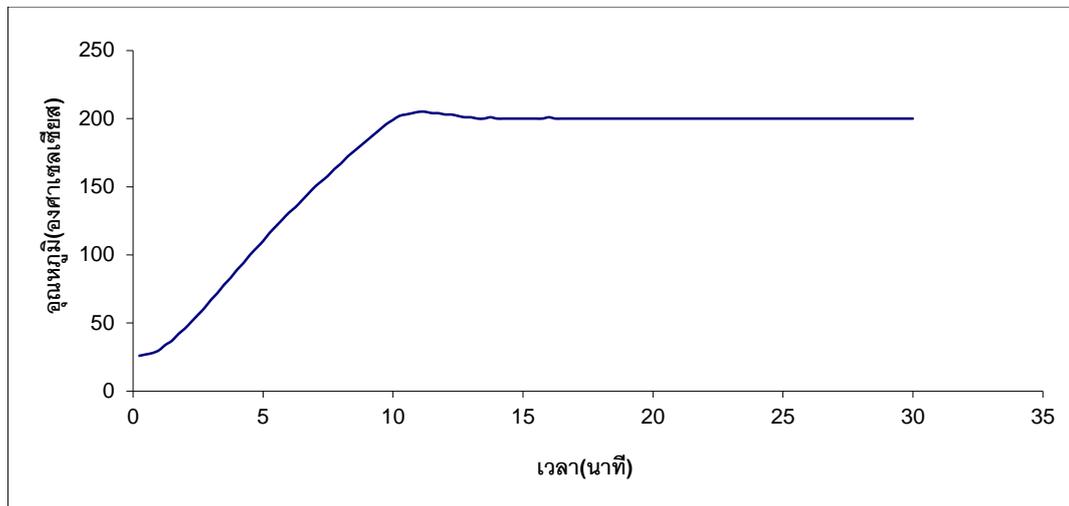
รูปที่ 4.12 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 100°C

จากผลการทดลองในตาราง ผจ.4 พบว่าเมื่อตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150°C ในช่วง 7นาทีแรก อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเกินระดับอุณหภูมิที่ตั้งไว้จากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงสู่ค่าที่ได้ตั้งไว้ และ เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ประมาณ 13 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.13



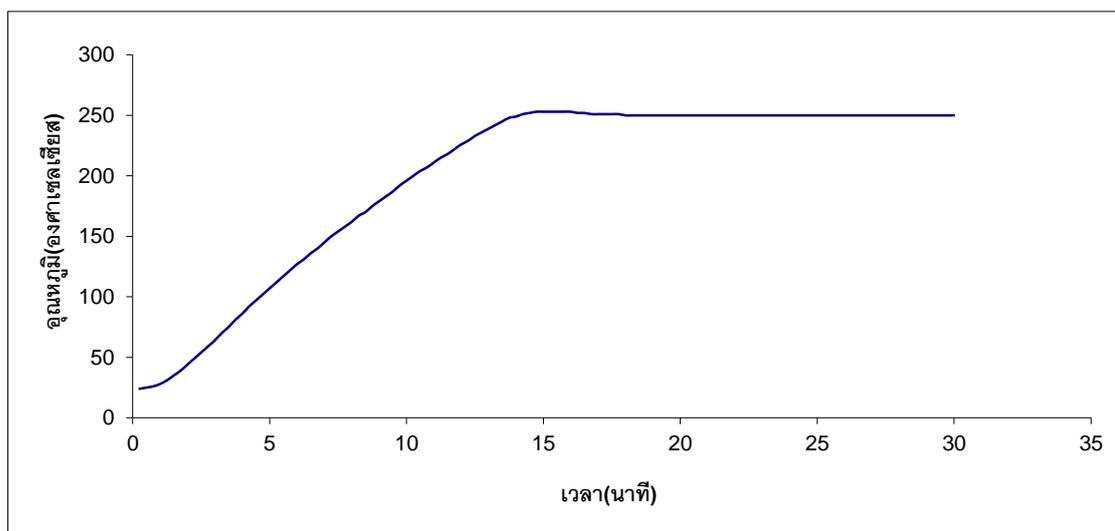
รูปที่ 4.13 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 150°C

จากผลการทดลองในตาราง ผล.5 พบว่าเมื่อตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 200°C ในช่วง 10 นาทีแรก อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเกินระดับอุณหภูมิที่ตั้งไว้เล็กน้อย จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงสู่ค่าที่ได้ตั้งไว้ และ เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ประมาณ 14 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.14



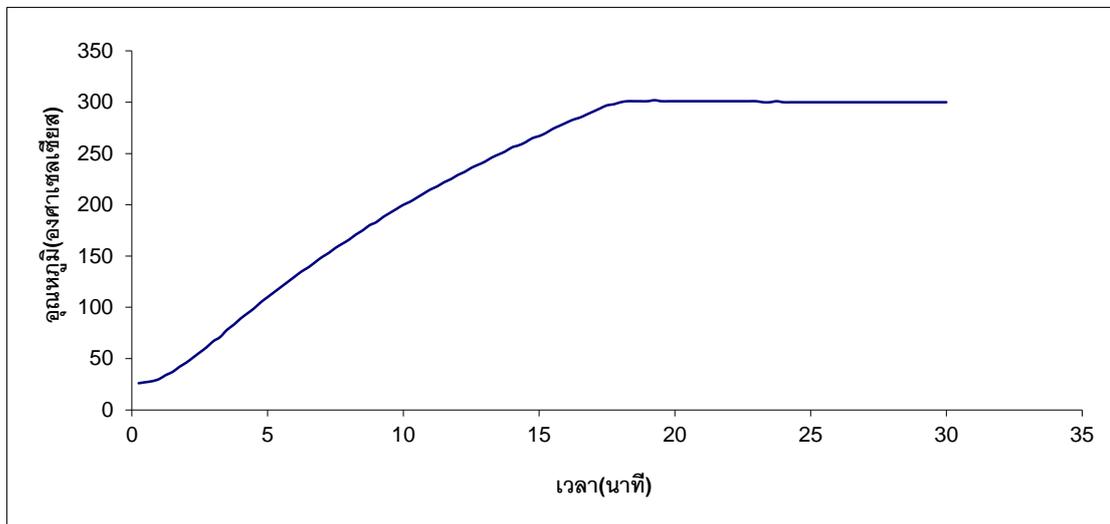
รูปที่ 4.14 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 200°C

จากผลการทดลองในตาราง ผล.6 พบว่าเมื่อตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 250°C ในช่วง 15 นาทีแรก อุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนเกินระดับอุณหภูมิที่ตั้งไว้เล็กน้อย จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงสู่ค่าที่ได้ตั้งไว้ และ เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 16 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 250°C

จากผลการทดลองในตาราง ผล.7 พบว่าเมื่อตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 300°C ในช่วง 18นาทีแรก อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 18นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 300°C

4.4 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

เป็นการทดสอบเครื่องว่าใช้งานได้หรือไม่ และ ค่าอัตราการไหลที่ได้จากเครื่องที่สร้างขึ้นมีความใกล้เคียงกับ ค่าอัตราการไหลจากเครื่องมาตรฐานมากน้อยเพียงใด โดยใช้พลาสติกชนิด Polypropylene(PP) จาก บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) และ ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 1238

4.4.1 ชื่อการทดลอง

การทดสอบเพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก โดยใช้พลาสติก Polypropylene(PP) จาก บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)

4.4.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1. เพื่อทดสอบเครื่องที่สร้างขึ้นทำงานได้จริงหรือไม่
2. เพื่อทดสอบว่าค่าอัตราการไหลของพลาสติกจากเครื่องที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องมากเพียงใด

4.4.3 วิธีการทดลอง

1. เปิดเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก
2. ทำการปรับค่าอุณหภูมิที่ต้องการ
3. ใส่พลาสติก ชนิดPolypropylene(PP)ลงไปในกระบอกหลอม
4. ปล่อยให้หลอมเหลว 5 นาที
5. นำลูกสูบใส่น้ำหนักรวม 2.16 กิโลกรัม ใส่เข้าไปในกระบอกหลอม และ จับเวลาไปพร้อมๆกัน

6. ทำการทดสอบ 5 นาที แล้วจึงตัดพลาสติกที่ไหลออกมา ไปชั่งน้ำหนัก
7. นำค่าที่ได้ไปเทียบเป็นอัตราการไหล เป็นหน่วย กรัม/10นาที
8. ทำการทดสอบ3ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย
9. นำค่าเฉลี่ยที่ได้มาเทียบกับค่ามาตรฐานจากผู้ผลิตเม็ดพลาสติกที่ใช้

4.4.4 ผลการทดลอง

เมื่อใส่เม็ดพลาสติกลงไปในระบบบดหลอมแล้วทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที จากนั้นนำลูกสูบที่ใส่น้ำหนักไว้ 2.16 กิโลกรัม กดโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลก พลาสติกที่หลอมเหลวในระบบบดหลอมจะไหลผ่านหัวฉีด ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.17 แล้วเมื่อทำการตัดพลาสติกออกจากเครื่องทดสอบ พลาสติกที่ได้จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 การไหลของพลาสติก



รูปที่ 4.18 พลาสติกที่ได้จากการทดสอบอัตราการไหล

จากการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ค่าอัตราการไหลของพลาสติกชนิด Polypropylene(PP) แสดงดังตารางที่ 4.1 ในหน่วย g/10นาที

ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราการไหลของ Polypropylene(PP) ที่ได้จากเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกที่สร้างขึ้น

จำนวนครั้งที่ทำการทดลอง	ค่าอัตราการไหลของพลาสติก(g/10min)
1	10.5
2	11.2
3	10.6
ค่าเฉลี่ย	10.76667

นำค่าเฉลี่ยค่าอัตราการไหลของพลาสติกที่ได้จากเครื่องทดสอบมาเปรียบเทียบกับเครื่องมาตรฐานของ บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลของพลาสติกที่ได้กับค่าจากเครื่องมาตรฐาน

ค่าอัตราการไหลที่ได้จากเครื่องที่สร้าง	ค่าอัตราการไหลที่ได้จากเครื่องมาตรฐาน	%ความคลาดเคลื่อน
10.76667	11	2.12%

4.4.5 สรุปผลการทดสอบ

จากการที่นำค่าอัตราการไหลของพลาสติกชนิดเดียวกันมาเปรียบเทียบ ค่า%ความคลาดเคลื่อนมีเพียง 2.12% ซึ่งน้อยมาก เป็นเหตุให้เชื่อได้ว่าเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกที่ได้สร้างขึ้นนั้นมีความสามารถในการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกใกล้เคียงเครื่องทดสอบอัตราการไหลมาตรฐาน

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกขึ้นเพื่อใช้ศึกษาและทดลอง ได้ผลดังต่อไปนี้

1. สามารถสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกตามที่ออกแบบไว้ มีขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ให้ความร้อนได้สูงสุด 300 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 880 วัตต์ ควบคุมอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด J ภายในประกอบด้วยเครื่องทำความร้อนแบบรีดท้อ 1 ชุด จนวนกันความร้อนทำจากอิฐทนความร้อน ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล น้ำหนักที่ใช้ทดสอบ (รวมลูกสูบ) 1, 1.2, 2, 2.16 และ 3.8 กิโลกรัม
2. เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกที่สร้างขึ้นสามารถทดสอบเทอร์โมพลาสติกได้ทุกชนิด
3. จากผลการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกชนิด Polypropylene(PP) ค่าอัตราการไหลที่ได้ใกล้เคียงกับค่าจากเครื่องทดสอบอัตราการไหลมาตรฐานอย่างมาก มี%ความคลาดเคลื่อนเพียง 2.12% เท่านั้น

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

5.2.1 ปัญหาที่พบ

1. อุณหภูมิในรูภายในกระบอบกลอมในบ้างตำแหน่งมีอุณหภูมิต่างกันมากเกินไปจนส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของพลาสติกคลาดเคลื่อน
2. มีพลาสติกเก่าเหลือติดค้างอยู่กระบอบกลอม

5.2.2 แนวทางแก้ไข

1. ทำการออกแบบให้ชุดกระบอบกลอมใหม่ให้มีการถ่ายความร้อนออกให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ และเพิ่มประกันจนวนมารองกระบอบกลอมเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนจากกระบอบไปสู่แผ่นเหล็กที่รองรับน้ำหนักอยู่ เมื่อลดการสูญเสียความร้อนลงจะทำให้กระบอบกลอมมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันในทุกๆตำแหน่ง และ จะทำให้ค่าอัตราการไหลของพลาสติกมีความแม่นยำยิ่งขึ้น
2. ต้องมีการทำความสะอาดทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนชนิดของพลาสติกที่จะทำการทดสอบ หรือ ทำความสะอาดทุกครั้งหลังเลิกใช้เครื่อง และ เมื่อทำการทดสอบอาจจะไม่ต้องจับเวลาในช่วงแรกที่พลาสติกไหลออกมาเพราะอาจจะมีพลาสติกชนิดอื่นติดค้างอยู่ ปล่อยให้ไหลออกมาเล็กน้อยก่อนแล้วค่อยจับเวลา เพื่อให้ได้ค่าอัตราการไหลของพลาสติกชนิดนั้นๆที่แม่นยำที่สุด

เอกสารอ้างอิง

1. รศ.บรรเลง ศรีนิล, 2546. เทคโนโลยีพลาสติก (ฉบับปรับปรุง). กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น),
2. มนัส แซ่ด่าน. รีโอโลยีเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โพธิ์เพชร.
3. รศ. มนตรี พิรุณเกษตร. การถ่ายเทความร้อน. บริษัท วิทย์พัฒน์ จำกัด .
4. ศ.ดร.วิวิธ อึ้งภากรณ์ และ รศ.ชาญ ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด(มหาชน).
5. ผศ. สุจิตรา อุดลย์เกษม. ทฤษฎีระบบปฏิบัติการ. บริษัท ดวงกลมสมัย จำกัด.
6. บริษัท เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ จำกัด, 2552. สารานุกรม. [ออนไลน์]
เข้าถึงได้จาก : <http://www.tic.co.th/>
7. ASTM International D 1238 – 04c. Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer 1: 1-14.

