

## 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) โดยการนำเอาไพโรกซีลีน (Pyroxylin) ซึ่งทำจากฝ้ายกับกรดไนตริกผสมกับการบูร (Solid Camphor) ทำเป็นลูกบิลเลียดแทนการใช้งาช้างซึ่งเกิดขาดแคลนมากในขณะนั้น ขณะเดียวกันที่อังกฤษได้นำเอาไพโรกซีลีนไปทำเป็นแล็กเกอร์และวัสดุเคลือบผิว (Coating Materials) อื่นๆ ต่อมาได้้นำเอาเซลลูลอยด์ดัดแปลงไปใช้ทำเป็นหมึกพิมพ์พลาสติก (สีชมพู) แทนการใช้ยางแข็งหลังจากนั้นได้นำเอาไปใช้ทำเป็นกระจกรถยนต์ จนกระทั่งพ.ศ.2425 บริษัท Eastman ได้ประดิษฐ์ทำเป็นฟิล์มภาพยนตร์ การคิดค้นพลาสติกได้หยุดชะงักไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง จนกระทั่งปี พ.ศ. 2452 Dr.riro Hendrik Baekeland ได้ค้นพบพลาสติกชื่อ ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol Formaldehyde) หรือ ฟีนอลิก (Phenolic) เข้าด้วยกันพลาสติกชนิดนี้เรารู้จักกันดีในชื่อ เบคเคอร์ไลต์ (Bakelite) ซึ่งใช้ทำด้ามกระทะ หูหม้อและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ

สำหรับประเทศไทยนั้นพลาสติกได้นำเข้ามาใช้ในประเทศไทยกว่า 40 ปี ก่อน โดยนำเข้ามาในรูปของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป เช่น ของเด็กเล่น เครื่องใช้ภายในบ้าน ฯลฯ ประมาณปี พ.ศ. 2513 ผู้ประกอบการได้ตั้งเครื่องจักรและเมสตีพลาสติกมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ขึ้นในประเทศอุตสาหกรรมสาขาพลาสติกจึงได้เริ่มขึ้น และเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว

### 2.2 ชนิดของพลาสติกและคุณสมบัติของพลาสติก [1]

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

### 2.2.1 เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) [1]

เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) พลาสติกชนิดนี้จะมีรูปร่างที่ถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ความดัน หรือตัวเร่งปฏิกิริยา การขึ้นรูปทำได้ยาก และไม่สามารถหลอมเหลวเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ยังมีความคงทนสูง รวมทั้งการใช้งานยังอยู่ในวงแคบ ทำให้ปัจจุบันมีการใช้งานในอุตสาหกรรมเพียงไม่กี่ประเภท พลาสติกประเภทนี้ได้แก่ เมลามีน ฟีนอลิก ยูเรียฟอร์มัลดีไฮด์ โพลีเอสเตอร์ที่ไม่อิ่มตัว เป็นต้น โดยส่วนใหญ่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์เครื่องครัวต่างๆ เช่นถ้วยชาม หูห้อย กระจุกม ชื่นส่วนปลั๊กไฟ 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 ทำให้พลาสติกประเภทนี้มีคุณสมบัติที่สามารถนำกลับสู่ขบวนการซ้ำๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายต้นทุนการผลิตต่ำและมีหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ปัจจุบันมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ของเด็กเล่น ดอกไม้ประดิษฐ์ ชิ้นส่วนรถยนต์ และผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ พลาสติกประเภทนี้ที่สำคัญได้แก่ พอลิเอทิลีน (PE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอทิลีนฟทาเลต (PET) ฯลฯ ชนิดของเทอร์โมพลาสติกที่สำคัญและใช้งานกันอยู่โดยทั่วไปได้แก่ อะซีทิล (Acetels) อะคริลิก (Acrylic) ฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbons) โพลีเอไมด์ (Polyamide) หรือไนลอน (Nylon) พอลิโอเลฟิน (Polyolefin) พอลิเอทิลีน (Polyethylene) พอลิสไตโรล (Polystyrene) เอบีเอส (ABS) ไวนิล (Vinyl) เซลลูลอส (Cellulose) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) ไดโอโนเมอร์ (Ionomer) พอลิโอมิด (Polyamide) พอลิซัลโฟเน (Polysulphone) เอทิลีนไวนิลอะซีเตต (EVA) พอลิเอสเตอร์ (Polyester)

ในประเทศไทยนิยมใช้พลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติกกันมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากความสามารถในงานหลายประเภท โดยเฉพาะงานด้านบรรจุภัณฑ์ พลาสติกที่มีการผลิตในรูปแบบต่างๆ เช่น

พอลิเอทิลีน (PE) ผลิตเป็นถุงพลาสติกทั้งชนิดร้อนและชนิดเย็น ขวด ถัง กระจุกม พลาสติก และแผ่นพลาสติกประเภทอ่อนนุ่ม เป็นต้น

พอลิโพรพิลีน (PP) นิยมผลิตมาในรูปถุงใส่อาหาร เสื้อผ้าสำเร็จรูป กระจุกม พลาสติก 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 (เมตร<sup>3</sup>/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 ในขณะที่ไหลพลาสติกหลอมสนองตอบต่อคุณสมบัติทั้งการไหลแบบเฉือน (shear property) และการไหลแบบยืด (extensional property) ที่ต่างกัน กล่าวคือ มีทั้งการไหลหนืด (viscous stress หรือ extensional stress)

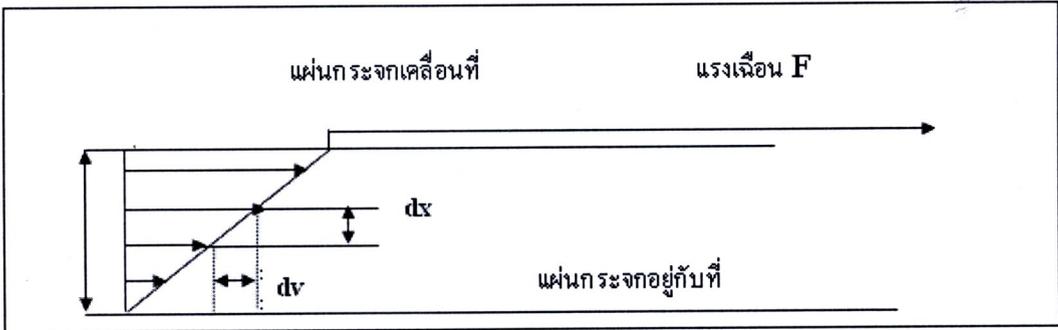
พอลิเมอร์หลอมเป็นวัสดุประเภทวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) กล่าวคือมีทั้งลักษณะหนืด (viscous) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของ ของไหล (fluid) และยืดหยุ่น (elastic) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ ของแข็งยืดหยุ่นปริมาณหรือองค์ประกอบของความหนืดและความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอม ขึ้นอยู่กับสถานะของการแปรรูป ชนิดของพอลิเมอร์ พฤติกรรม การไหลของพอลิเมอร์หลอมมีความซับซ้อนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขณะไหลในเครื่องแปรรูป

### 2.3.2 การแบ่งชนิดของของไหล

คุณสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมในกระบวนการแปรรูป มีความจำเป็นที่ต้องเรียนรู้ ลักษณะการไหลของของไหลชนิดต่างๆ โดยทั่วไปแบ่งชนิดของของไหลตามพฤติกรรมการไหลได้ 2 ชนิด คือ

#### 2.3.2.1 ของไหลอุดมคติหรือของไหลนิวตันเนียน (Ideal or Newtonian Fluids)

พิจารณาการศึกรูปและการไหลของของไหลนิวตันเนียนที่วางตัวอยู่ระหว่างแผ่นกระจกใสบาง 2 แผ่นมีพื้นที่กว้างมาก (A) มีระยะห่างเป็น X เมตร ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การไหลและการศึกรูปของของไหลนิวตันเนียนระหว่างแผ่นกระจกสองแผ่น เนื่องจากอิทธิพลของความเค้น (shear stress) [2]

ใช้แรง F (นิวตัน) ซึ่งเป็นแรงคงที่ดึงแผ่นกระจกด้านบนด้วยความเร็ว V (เมตรต่อวินาที) ในขณะที่ให้แผ่นล่างอยู่ที่ไม่สามารถคำนวณความเค้นได้ดังนี้

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

เมื่อ

- $\eta$  คือ ความหนืดของของไหลนิวตันเนียน (Newtonian viscosity) มีหน่วยเป็น ปาสคาลวินาที
- $\gamma$  คือ อัตราการเค้น (shear rate) มีหน่วยเป็น (วินาที)
- F คือ แรงที่ใช้ดึงแผ่นด้านบน มีหน่วยเป็น นิวตัน
- v คือ ค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที
- $\tau$  คือ ความเค้นเค้น (shear stress) มีหน่วยเป็น ปาสคาล (นิวตันต่อตารางเมตร)

ดังนั้นในกรณีนี้ของไหลของของไหลนิวตันเนียน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเค้นและอัตราการเค้นจะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.2

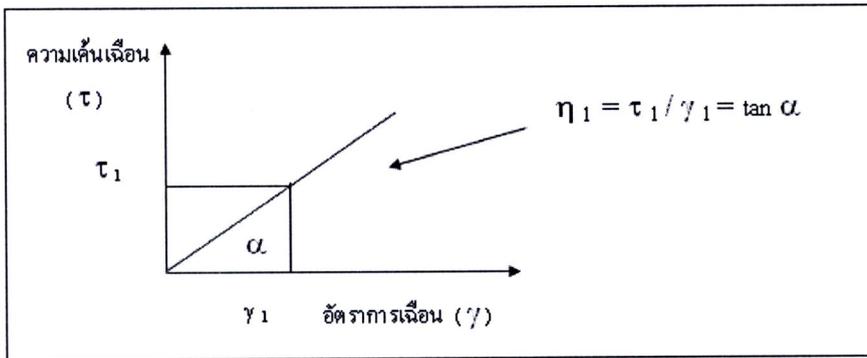
$$\tau \propto \left(\frac{dv}{dx}\right) \quad (2.2)$$

ค่าความหนืดเฉือนของ ของไหลนิวทอเนียน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

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

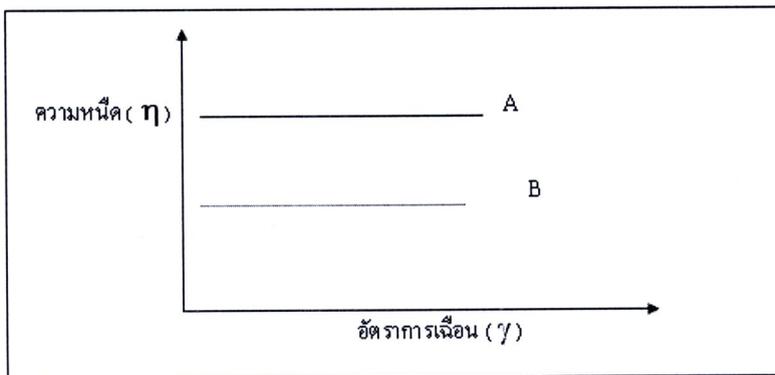
$\alpha$  คือ มุมที่เส้นกราฟของความหนืดทำมุมกับแกนของอัตราการเฉือน ดังรูปที่ 2.2

ดังนั้นจะเห็นว่ากราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือนของ ของไหลนิวทอเนียนจะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงค่าความหนืดของการไหลของ ของไหลนิวทอเนียนคงที่ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราเฉือนมักจะเรียกว่า เส้นกราฟของการไหล (flow curve) ค่าความหนืดของ ของไหลนิวทอเนียนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และชนิดของของไหล ตัวอย่างของไหลในกลุ่มของ ของไหลนิวทอเนียนส่วนใหญ่แ่นของไหลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ 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 ของไหลนอนนิวทอนเนียน (Non-Newtonian Fluids)

จากรูปที่ 2.3 พบว่าค่าความหนืดของ ของไหลนิวทอนเนียน มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับอัตราการเฉือนและไม่ขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการไหล แต่มีวัสดุหลายชนิดที่ไม่แสดงสมบัติการไหลทำนองเดียวกับของไหลนิวทอนเนียน กล่าวคือสมบัติการไหลมีการเบี่ยงเบนไปจากนี้ ตัวอย่างวัสดุเหล่านี้ เช่น พอลิเมอร์หลอม สารละลายพอลิเมอร์ และน้ำยาง เป็นต้น เรียกของไหลกลุ่มนี้ว่าเป็น ของไหลนอนนิวทอนเนียน ซึ่งมีสมบัติเฉพาะที่สำคัญ คือเส้นกราฟของการไหล (flow curve) ไม่เป็นเส้นตรงดังเช่นกรณีการไหลของของไหลนิวทอนเนียน และความหนืดของการไหลขึ้นอยู่กับอัตราการเฉือนและประวัติการถูกเฉือน (shear history) ของไหลที่แสดงพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวทอนเนียนแบ่งออกเป็น 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 และของไหลโคแลทแทน

#### 2.3.3.1 การไหลของของไหลบิงแฮม (Bingham Fluid)

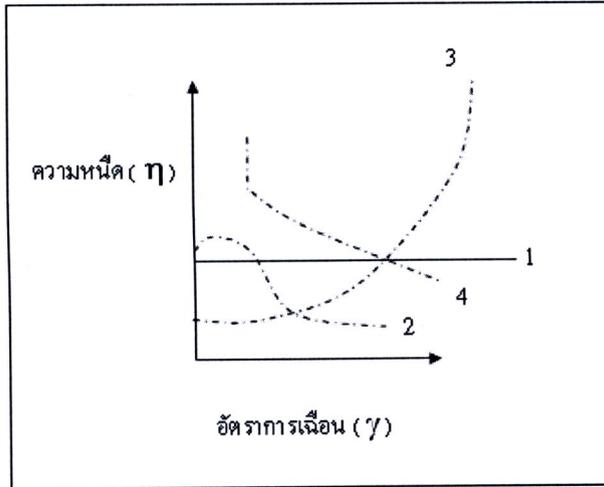
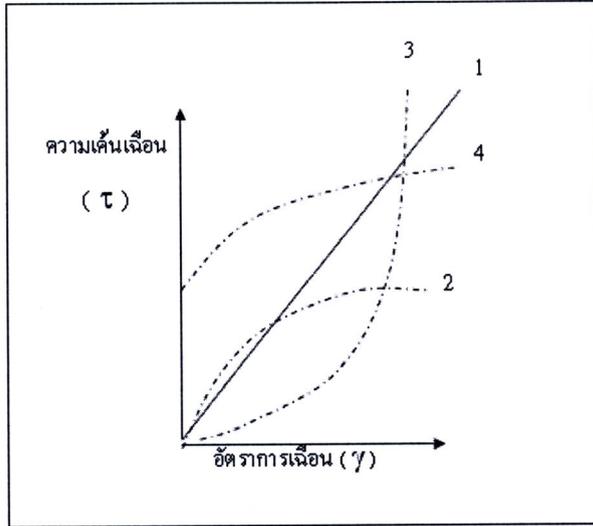
ของไหลบิงแฮม มีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะพิเศษ และจะไม่เกิดการไหลอย่างทันทีทันใดเมื่อได้รับความเค้น แต่เมื่อได้รับความเค้นที่มีขนาดมากกว่าความเค้นเฉือนค่าหนึ่ง ที่เรียกว่า yield stress โครงสร้างภายในจะเกิดการสูญเสียสภาพ และเริ่มเกิดการไหลที่ค่าความเค้นเฉือนมากกว่าค่านี้ ได้เส้นโค้งของการไหลเป็นเส้นตรง 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. ของไหลซูโดพลาสติก 3. ของไหลไดแลทแท้น และ  
 4. ของไหลบิงแฮม [2]

### 2.3.3.2 ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudo plastic fluid)

การไหลของซูโดพลาสติกมีความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มค่าอัตราเฉือน (แสดงในรูปที่ 2.4) เรียกการไหลแบบนี้ว่า เป็นพฤติกรรมการลดความหนืด (shear thinning behavior) นอกจากนี้เส้นกราฟของการไหล จะมีแนวโน้มขนานกับ แกนของอัตราเฉือนเมื่อค่าอัตราเฉือนมีค่าสูง คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งของ ของไหลชนิดนี้คือ ไม่มีลักษณะที่มีค่า ความเค้นคงที่ขณะเพิ่มอัตราเฉือน เหมือนกรณีของไหลบิงแฮม

มีการเสนอสมการจำนวนมากเพื่ออธิบายสมบัติการไหลของของไหลซูโดพลาสติก แต่สมการที่ได้รับการยอมรับในความถูกต้องมากที่สุดคือ สมการยกกำลัง (power law equation Ostwald-de-Waele equation) รายละเอียด ของสมการ แสดงดังในสมการที่ 2.6

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

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

เมื่อ

$n$  คือ ดัชนีของสมการยกกำลังหรือดัชนีอนนิวทอเนียน (power law index)

$K$  คือ ดัชนีของความเหนียวแน่น (consistency index)

สามารถใช้ค่าดัชนีของการยกกำลังในการจำแนกชนิดของของไหลได้ กล่าวคือ ของไหลนิวทอเนียนมีค่า  $n = 1$  เสมอ แต่ของไหลซูโดพลาสติกจะมีค่า  $n$  น้อยกว่า 1 ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก เช่น พอลิเมอร์หลอม สารละลายพอลิเมอร์ อาหารเหลวชนิดต่างๆ

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

พอลิเมอร์หลอมขณะไหลในเครื่องแปรรูปมีพฤติกรรมซับซ้อนกว่าการอธิบายด้วยสมการยกกำลัง กล่าวคือมีเวลาในการผิครูปและการคืนตัวของโมเลกุลหรือมีเวลาของการคลายตัวเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่ในทางวิศวกรรมและทางเทคโนโลยีพอลิเมอร์ มักจะอนุโลมใช้สมการยกกำลังเป็นเกณฑ์ในการออกแบบและสร้างเบ้า หัวตาย และการทดสอบสมบัติการไหลเบื้องต้นของพอลิเมอร์หลอมเสมอแต่บรรดานักเทคโนโลยีพอลิเมอร์ทราบดีว่าการใช้สมการยกกำลังเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอที่จะอธิบายพฤติกรรมทุกด้านของพอลิเมอร์หลอม โดยเฉพาะปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลแบบยืด (extensional flow) และการเป็นวิสโคอีลาสติก (viscoelasticity) ได้การใช้สมการยกกำลังเป็นเพียงการประเมินสมบัติการไหลเบื้องต้นเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์หลอมทุกชนิดมีสมบัติการไหลแบบซูโดพลาสติกในบางช่วงของอัตราการเฉือนเท่านั้น กล่าวคือถ้าพอลิเมอร์หลอมที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของอัตราการเฉือนที่ต่ำมาก ( $< 3$  วินาที<sup>-1</sup>) และสูงมากจะมีคุณสมบัติเป็นของไหลนิวทอเนียน

นอกจากสมการยกกำลังแล้วยังมีสมการชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในการอธิบายสมบัติการไหลของของไหลซูโดพลาสติกสรุปได้ดังสมการที่ 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)

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

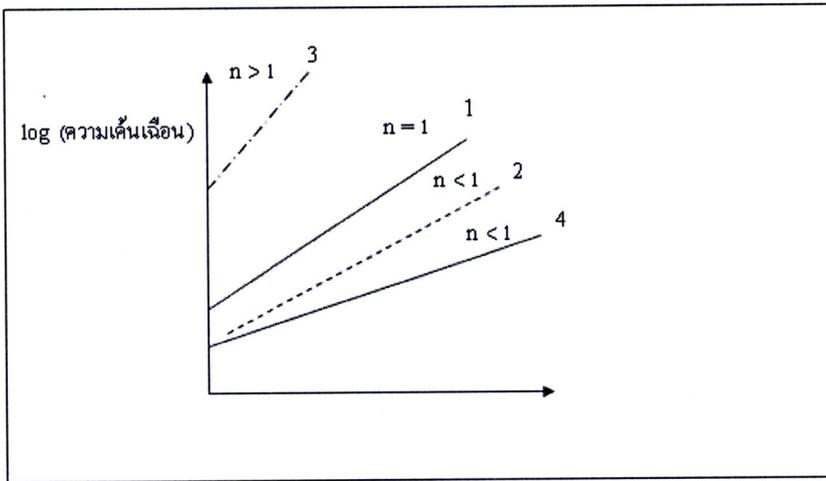
เมื่อ  $A, B$  และ  $C$  คือ ค่าคงที่

$\eta_{\infty}$  คือ ค่าความหนืดแบบเฉือนที่ค่าอัตราการเฉือนสูงมากๆ (Infinity shear viscosity)

$\eta_0$  คือ ค่าความหนืดแบบเฉือนที่ไม่มีค่าอัตราการเฉือน (Zero shear viscosity)

### 2.3.3.3 ของไหลไดแลทแท้น (Dilatant Fluid)

จากรูปที่ 2.4 จะสังเกตเห็นว่าการไหลของของไหลไดแลทแท้นมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน เรียกพฤติกรรมการไหลแบบนี้ว่าเป็นพฤติกรรมการไหลแบบเพิ่มความหนืด (shear thickening behavior) ตัวอย่างของไหลที่แสดงพฤติกรรมในลักษณะนี้ เช่น การไหลของปูนซีเมนต์ การไหลของน้ำผสมแป้ง และการไหลของพอร์ทิเมนต์เมอร์แชนลอยที่มีสารตัวเติมในปริมาณสูง เป็นต้น สามารถใช้สมการยกกำลังในการอธิบายสมบัติการไหลของของไหลไดแลทแท้นได้เช่นกัน ตามสมการยกกำลังของไหลไดแลทแท้นคือของไหลที่มีค่า  $n$  มากกว่า 1 สมการยกกำลังสามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลของของไหลชนิดต่างๆ สรุปได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เส้นกราฟการไหลของของไหล ชนิดต่างๆ 1. ของไหลนิวตันเนียน 2. ของไหลซูโดพลาสติกที่เป็นไปตามสมการยกกำลัง 3. ของไหลไดแลทแท้น 4. พอร์ลิเมอร์หลอมบางชนิดเป็นของไหลซูโดพลาสติกแต่ไม่ปฏิบัติตามยกกำลัง [2]

### 2.3.4 กลุ่มของไหลที่สมบัติการไหลขึ้นกับเวลา (Time – Dependent fluids)

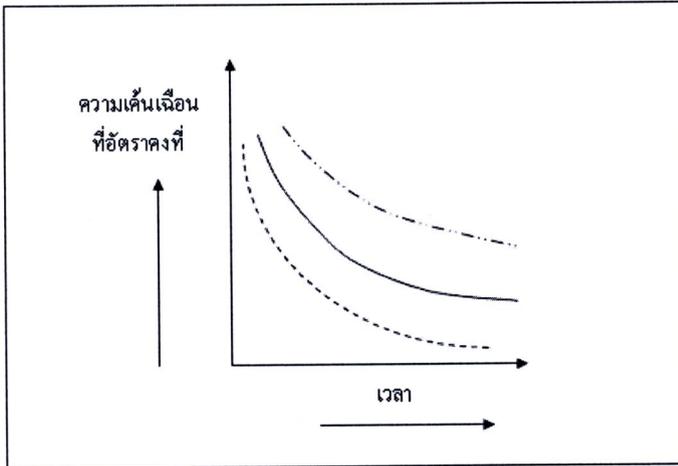
สมบัติการไหลของของไหลชนิดนี้ เช่นความหนืดเฉือน เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ของไหลถูกเฉือนไหลที่มีพฤติกรรมในลักษณะนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ใหญ่ๆ คือ

#### 2.3.4.1 ของไหลทริกโซทรอปิก (Thixotropic fluids)

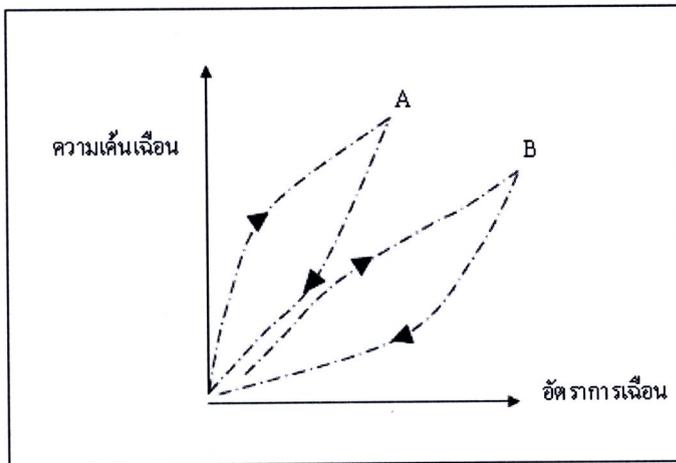
ลักษณะเฉพาะของการไหลของของไหลชนิดนี้คือ ค่าความหนืดของการผิครูปครั้งหลังจะต่ำกว่าความหนืดของการผิครูปครั้งก่อน ดังนั้นสมบัติการไหลของของไหลชนิดนี้ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ถูกเฉือน เช่น ถ้ากวนของไหลชนิดนี้เป็นเวลานานด้วยอัตราการเฉือนคงที่ จะทำให้สมบัติการไหล เช่นความหนืดเฉือนลดลง ดังแสดงดังรูปที่ 2.6 นอกจากนี้ถ้าเปรียบเทียบค่าความเค้นเฉือนที่ได้จากการใช้อัตราการเฉือนที่คงที่ แต่มีค่าแตกต่างกันพบว่าการเพิ่มอัตราเฉือน ส่งผลให้ความเค้นเฉือนลดลง

เพื่อเข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลของของไหลทริกโซทรอปิก ทำการทดลองวัดสมบัติการไหลโดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบหมุนที่สามารถวัดทอร์คและความเค้นเฉือนได้ ทำการกวนของไหลที่ความเร็วค่าหนึ่งแล้ววัดค่าความเค้นไว้แล้วเพิ่มความเร็วในการกวนแล้ววัดความเค้น ทำอย่างนี้หลายความเร็วของการหมุน จนถึงความเร็วสูงสุดของการหมุนหลังจากนั้นเริ่มลดความเร็วของการหมุนโดยไม่หยุดเครื่อง แล้ววัดค่าความเค้นที่ค่าความเร็วในการหมุนทำกัน ผลการทดลองพบว่าเส้นกราฟของความเค้นของการเพิ่มและลดความเร็วของการหมุนจะไม่ซ้อนทับกันเกิด

เป็น hysteresis loop แสดงดังรูปที่ 2.7 ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบของไหลทรกโซทรอปิก เช่น สีทา ภายนอกและภายใน น้ำยาบางชนิด สเลอรีของเซรามิกส์ เป็นต้น



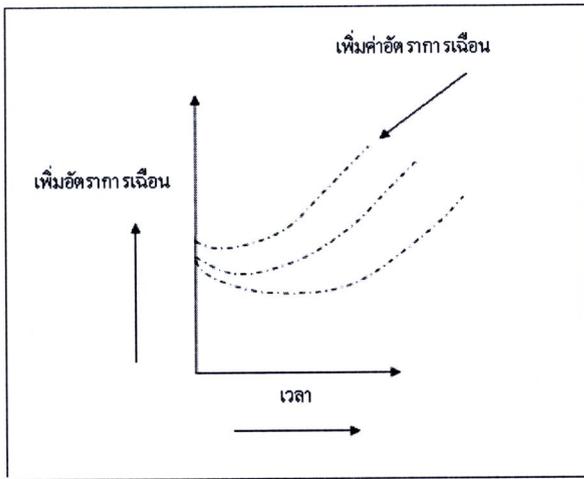
รูปที่ 2.6 สมบัติของของไหลทรกโซทรอปิก



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

#### 2.3.4.2 ของไหลรีโอเปคติก (Rheoplectic Fluids)

ของไหลรีโอเปคติกมีคุณสมบัติการไหลกลับกับกรณีของไหลทรกโซทรอปิก กล่าวคือ ค่าของสมบัติ การไหล เช่น ความหนืดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาของการเฉือน ทำให้ของไหลชนิดนี้มีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อการถูกระทำได้ด้วยความเค้นเฉือน 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 ( $\gamma$ )

$\phi$  คือ สมบัติการไหลที่เกิดจากการไหลหนืดและการยืดหยุ่น

$t$  คือ เวลา

### 2.3.5 พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอม

พอลิเมอร์หลอมแสดงพฤติกรรมสอดคล้องกับการไหลของกการไหลของโพลีเมอร์หลอม ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา แต่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าพอลิเมอร์หลอม แสดงสมบัติเป็นของไหลที่มีสมบัติขึ้นกับเวลาด้วย กล่าวคือ มีสมบัติการไหลเป็นแบบของไหลวิสโคอีลาสติกด้วย เนื่องจากมีปรากฏการณ์หลายอย่างที่ซับซ้อนถึงการมีสมบัติการไหลของวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอม เช่น การบวมพองที่หัวจ่าย การบวมพองในขณะรีด

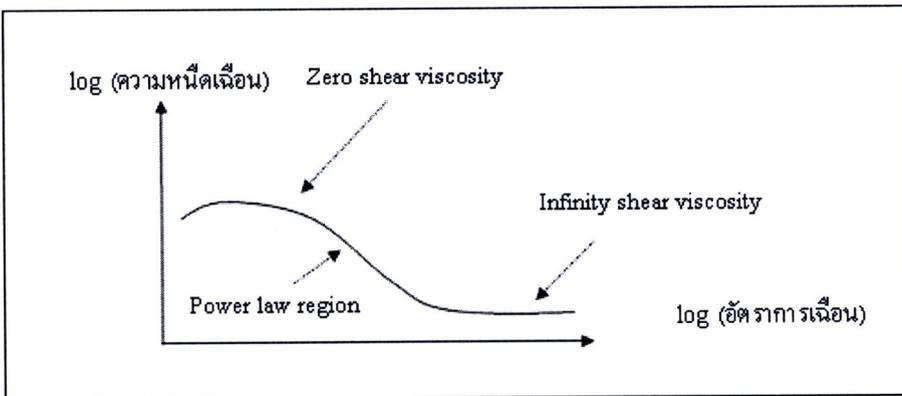
พอลิเมอร์หลอมเป็นของไหลโพลีเมอร์หลอมได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า การประเมินสมบัติข้างต้นของพอลิเมอร์หลอมนิยมใช้สมการยกกำลังเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ดังนั้นในกรณีนี้พอลิเมอร์หลอมจะมีพฤติกรรมการไหลแบบของไหลโพลีเมอร์หลอม เส้นกราฟของความหนืดเทียบกับอัตราเฉือนในสเกล log - log แสดงดังรูปที่ 2.9 มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ค่าความหนืดต่ำมากและสูงมาก กล่าวได้ว่าที่สองช่วงของอัตราเฉือนนี้ พอลิเมอร์หลอมมีสมบัติเป็นของไหลนิวทอนเนียน ค่าความหนืดที่ไม่มีอัตราเฉือน ส่วนค่าความหนืดเฉือนที่ไม่มีอัตราเฉือน ส่วนค่าความหนืดที่ค่าอัตราเฉือนสูงมากเรียกว่า ความหนืดเฉือนอนันต์ ช่วงกลางของเส้นกราฟของความหนืด ค่าความ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ  
ห้องสมุดงานวิจัย  
วันที่..... 26 มี.ค. 2555 .....  
เลขทะเบียน..... 250188 .....  
เลขเรียกหนังสือ.....

หนืดเฉือนมีค่าลดลงเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น ในช่วงกลางนี้เองพอลิเมอร์หลอมจะแสดงพฤติกรรมเป็นไปตามสมการยกกำลัง และเป็นของไหลซูโดพลาสติก

สมบัติของพอลิเมอร์หลอมในช่วงที่คุณสมบัติของไหลซูโดพลาสติกซึ่งอธิบายด้วยสมการยกกำลัง แสดงในรูปสอดคล้องกับการจัดเรียงตัวโมเลกุลระหว่างที่เกิดการไหล กล่าวคือขณะที่อัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น โมเลกุลจะจัดเรียงตัวใหม่เพื่อทำให้โมเลกุลเคลื่อนตัวผ่านโมเลกุลอื่นได้อย่างง่ายขึ้น ส่งผลให้การต่อต้านต่อการไหลลดลงตามอัตราการเฉือนที่เพิ่มขึ้น จากการสังเกตเส้นกราฟของความหนืดในรูปที่ 2.9 ถ้าพอลิเมอร์หลอมไม่มีสมบัติการไหลเป็นซูโดพลาสติก กล่าวคือความหนืดไม่ลดลงตามอัตราการเฉือน จะทำให้การแปรรูปของพอลิเมอร์ทำได้ยากมากเนื่องจากความหนืดที่สูงแต่เป็น โชคดีที่อัตราการเฉือนที่มาก ค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมลดลง จึงทำให้สามารถแปรรูปพอลิเมอร์หลอมได้ง่ายขึ้นการมีสมบัติเป็นของไหลซูโดพลาสติกของพอลิเมอร์หลอม ทำให้มีข้อดีหลายประการ การดังนี้

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



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราเฉือน [2]

การออกแบบเครื่องแปรรูป เบ้าและสายใช้ในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีเพียงแต่พิจารณาว่าพอลิเมอร์หลอมเป็นของไหลหนืด(หรือของไหลซูโดพลาสติก)เท่านั้นแต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์หลอมมีที่สมบูรณ์แบบ ควรจะพิจารณาสมบัติทั้งทางด้านการไหลหนืด และผลที่เกิดจากการยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอม ถึงแม้ว่าถ้านำความคิดเรื่องความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอมเข้ามาพิจารณา ในการออกแบบเครื่องแปรรูปพลาสติก จะทำได้ยากและซับซ้อนมาก ดังนั้น การออกแบบเครื่องแปรรูปส่วนใหญ่ไม่ค่อยมีการนำเอาหลักการไหลแบบยืดหยุ่นเข้ามาคิดและคำนวณในแง่ของการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมในเครื่องแปรรูป โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นหัวตายของเครื่องอัดรีดขึ้นรูป และหัวฉีดของเครื่องฉีดเข้าแบบ สมการที่ใช้ในการอธิบายสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมรวมทั้งการไหลหนืดและการไหลยืดหยุ่นไว้ในสมการเดียวกัน เรียกว่าสมการของสถานการณ์ไหล หรือ Constitutive equation

## 2.4 การถ่ายเทความร้อน [3]

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

กฎสัมพันธของการนำความร้อนโดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง อัตราการไหลของการนำความร้อนในทิศทางที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อนและเกรเดียนต์ของอุณหภูมิในทิศทางนั้น 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

$q_x$  = อัตราการนำความร้อนผ่านพื้นที่ A ในทิศทางบวก x

$q_x''$  = ฟลักซ์ความร้อนในทิศทางบวก x

$k$  = ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ และเป็นค่าบวก

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 ผลลัพธ์ที่ได้จากสมการดิฟเฟอเรนเชียลซึ่งคำตอบของมันจะทำให้การกระจายอุณหภูมิในตัวกลางหรือวัตถุนั้น

พิจารณาตัวกลางเนื้อเดียวกันซึ่งมีเกรเดียนต์อุณหภูมิจริง และการกระจายของอุณหภูมิ  $T(x, y, z)$  กำหนดในพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinates) จะกำหนดปริมาตรควบคุมเล็กๆมากๆ  $dx \cdot dy \cdot dz$  ถ้ามีเกรเดียนต์อุณหภูมิแล้วการนำความร้อนจะเกิดขึ้นตรงข้ามแต่ละอันของผิวควบคุมอัตราการนำความร้อนนี้จะตั้งฉากกับผิวควบคุมแต่ละอันที่

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

#### 2.4.1 การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี

ระบบของรูปทรงกระบอกและรูปทรงกลมตามที่พบ จะมีเกร์เดียอุณหภูมิอยู่ในแนวทิศทางรัศมีเท่านั้น จึงสามารถคิดเป็นหนึ่งมิติได้อย่างไรก็ตามภายใต้เงื่อนไขสภาวะสมำเสมอไม่มีการผลิตความร้อน ระบบนั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีมาตรฐานซึ่งเริ่มต้นด้วยสมการความร้อน ในรูปแบบที่เหมาะสมหรือวิธีอีกอย่างหนึ่งซึ่งเริ่มต้นด้วยกฎของฟูริเยร์ในรูปแบบที่เหมาะสม

#### 2.4.2 ทรงกระบอก

ตัวอย่างธรรมดาทั่วไปเป็นทรงกระบอกกลางซึ่งผิวภายในและผิวภายนอกสัมผัสกับของไหลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 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 ค่าความต้านทานความร้อนในกรณีของทรงกระบอกกลาง จะอยู่ในรูป

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

โดยการใช้วิธีหนึ่ง 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

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

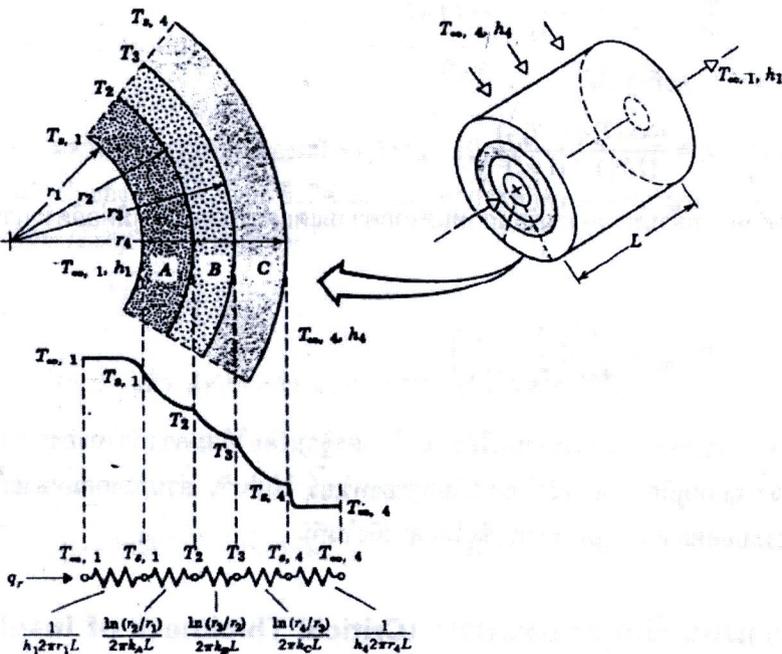
โดยที่  $A = 2\pi r_1 L$  และ

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

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 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของสวดไฟฟ้า และระบบที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เป็นต้น เราจะพิจารณาระบบหนึ่งมิติที่ซึ่งอุณหภูมิเป็นฟังก์ชัน โคออร์ดิเนตเดียวเท่านั้น

#### 2.4.3.1 ผนังเรียบมีแหล่งผลิตความร้อน (Plane wall with heat source)

ผนังมีการผลิตความร้อนสม่ำเสมอ ( $\dot{q}$  คงที่) ผนังมีอุณหภูมิ  $T_{s,1}$  และ  $T_{s,2}$  สำหรับกรณีค่า  $k$  คงที่ สมการฟุ้งกระจายความร้อน สดรูปเหลือ

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

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 (2.40) 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

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

ค่าฟลักซ์ของความร้อนที่จุดใดๆในผนัง สามารถหาได้โดยใช้สมการ (2.26) กับกฎของฟูริเยร์เพื่อให้สะดวกขึ้นจึงให้อุณหภูมิทั้ง 2 ข้างของผนังผิวเท่ากัน ( $T_{s,1} = T_{s,2} = T_s$ ) 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 ( $T_\infty$ ) เราสามารถหาความสัมพันธ์ของ  $T_s$  และ  $T_\infty$  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  $T_\infty$ ,  $q$ ,  $L$  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  $T_\infty$  โดยการคิดสมมูลของพลังงานรอบแท่งวัสดุ จะได้

อัตราการผลิตความร้อน = ความร้อนที่ถูกพาออกไป

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

หรือ

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

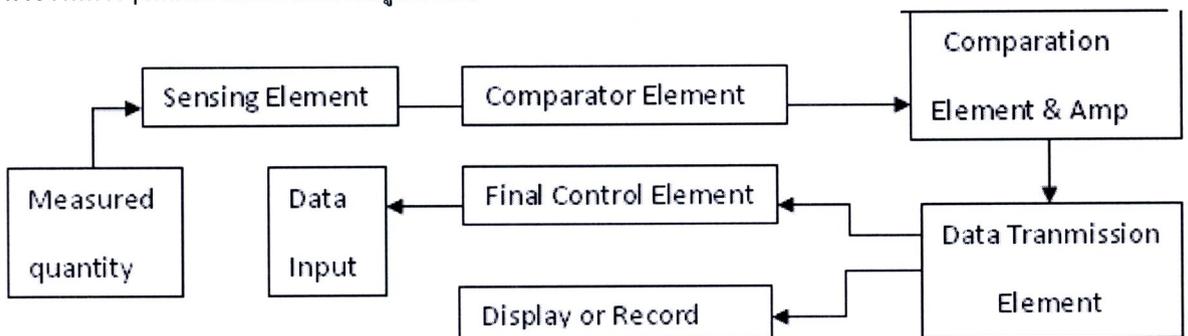
วิธีที่กล่าวมานี้ อาจจะใช้หาการกระจายของอุณหภูมิในทรงกลมตัน และในทรงกระบอกกลวง และทรงกลมกลวงก็ได้สำหรับชนิดต่างๆของเงื่อนไขที่ขอบเขตเหล่านั้น

## 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

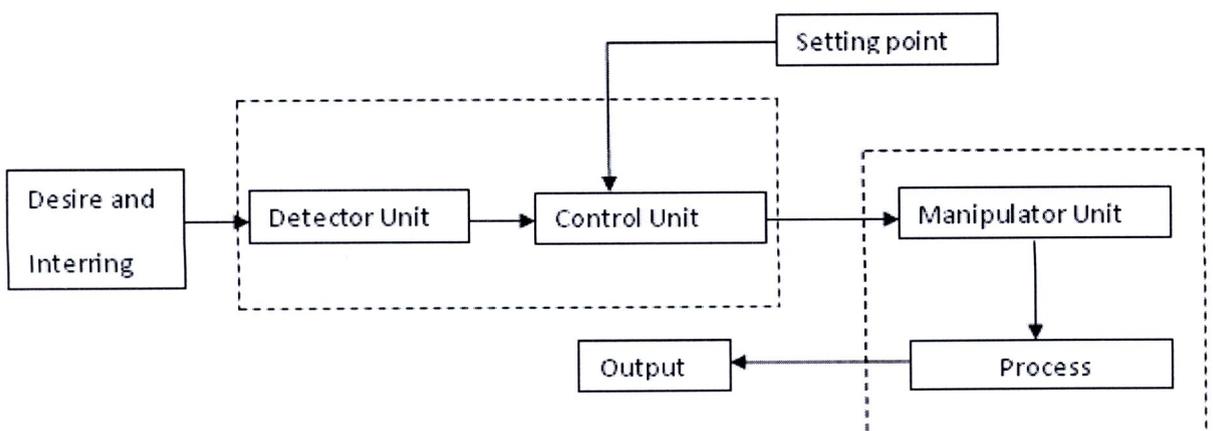
- 2) Comparator element เป็นหน่วยที่ทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากหน่วยตรวจจัดการเปลี่ยนแปลงข้อมูล และปริมาณที่ต้องควบคุม (จากหน่วยควบคุม) ซึ่งผลต่างที่ได้จะถูกนำไปใช้ สำหรับการแสดงค่าควบคุมต่อไป
- 3) Conversion element and amplifier เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงค่าที่ได้จากหน่วยแรกให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน โดยที่อาจจะมีการขยายระดับของสัญญาณ หรือข้อมูลที่วัดได้ให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะชี้แสดงค่าหรือส่งข้อมูล ไปยังหน่วยอื่นๆ ซึ่งการขยายปริมาณของตัวแปรจำเป็นต้องมีอัตราขยายที่คงที่ด้วยเพื่อให้ค่าที่อ่านได้ถูกต้องแน่นอน
- 4) Data transmission element เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลที่ถูกลบขยายให้มีปริมาณที่เหมาะสมแล้วส่งไปยังหน่วยอื่นๆ ซึ่งอาจจะส่งไปยังหน่วยแสดงผล หรือหน่วยควบคุมก็ได้
- 5) Display or recorder เป็นหน่วยงานแสดงผลข้อมูล ซึ่งอาจเป็นเครื่องมือที่ชี้บอกค่าตรงๆที่วัดได้ หรืออาจเป็นหน่วยที่สามารถทำการบันทึกการเปลี่ยนแปลงข้อมูลที่วัดได้ทุกขณะ
- 6) Final control element เป็นหน่วยงานควบคุมปริมาณที่ต้องการวัด และต้องการควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมตามความต้องการ สำหรับที่หน่วยนี้อาจจะประกอบด้วยหน่วยกำหนดค่าเป้าหมาย (Setting value) เพื่อให้กำหนดปริมาณที่ต้องการควบคุม และนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณที่วัดได้จากหน่วยตรวจจัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณต่างๆ

### 2.5.1 ระบบควบคุม

ในที่นี้จะหมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์การควบคุมรวมอยู่ด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของขบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอย่างอัตโนมัติ ระบบควบคุมวงจรมอบเปิด (Open-loop control system)

#### 2.5.1.1 ระบบควบคุมวงจรมอบเปิด

เป็นระบบที่ไม่มีการติดตามผลเพื่อปรับเปลี่ยนค่าในวงจรมอบเปิด กล่าวคือ หลังจากที่มีการควบคุมโดยส่งสัญญาณควบคุมไปแล้วจะไม่มีการติดตามผลเกิดขึ้นใหม่ เพื่อทำการปรับแต่งสัญญาณการควบคุมให้เหมาะสมต่อไป แสดงในรูปที่ 2.12

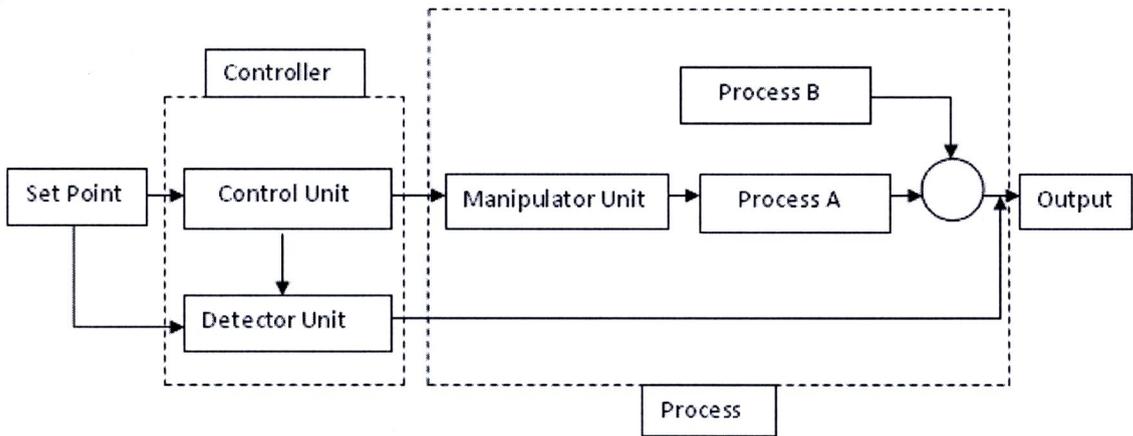


รูปที่ 2.12 ระบบการควบคุมวงจรมอบเปิด [5]

จากรูป 2.12 แสดงระบบการควบคุมวงจรมองแบบเปิด จะเห็นได้ว่าค่าของตัวแปรในกระบวนการและสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากสาเหตุใดๆก็ตาม เป็นสัญญาณเข้าระบบ(ถูกวัดโดยเครื่องมือวัด) ต่อมาจะเป็นสัญญาณเข้าหน่วยระบบควบคุม (Control unit) ซึ่งสามารถปรับระดับหรือปริมาณที่ต้องการควบคุมได้ จากนั้นค่าที่ปรับได้จึงเข้าสู่กระบวนการ (Process) จากรูปอาจกล่าวได้ว่าภายหลังจากที่การควบคุมกระบวนการนั้นๆอาจไม่เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการก็ได้ ซึ่งระบบการควบคุมแบบนี้ผู้ใช้หรือผู้ที่ควบคุมการทำงานของกระบวนการผลิตจำเป็นต้องคอยตรวจสอบและปรับค่าตัวแปรที่วัดได้ที่อยู่ตลอดเวลา

### 2.5.1.2 ระบบการควบคุมวงจรมองแบบปิด

เป็นระบบที่มีการติดตามผลภายหลังจากการที่มีการปรับแต่งภายในแล้ว โดยมีการวัดค่าตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการอยู่ตลอดเวลาว่าเข้าใกล้เป้าหมายที่ต้องการหรือยัง ทั้งนี้เพื่อนำไปปรับแต่งสัญญาณควบคุมสำหรับการใช้ในการควบคุมต่อไป



รูปที่ 2.13 ระบบการควบคุมแบบปิด [5]

จากรูป 2.13 แสดงระบบการควบคุมวงจรมองแบบปิด จะเห็นว่าคล้ายกับระบบการควบคุมวงจรมองแบบเปิด แต่ที่หน่วยควบคุม (Controller) จะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออกภายหลังจากที่มีการปรับแต่งปริมาณที่ต้องการควบคุมแล้ว ต่อมาสัญญาณที่ตรวจจับได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายเพื่อทำการควบคุมระบบต่อไป หากค่าผลลัพธ์นั้นยังไม่เข้าใกล้หรือเท่ากับค่าเป้าหมายที่ต้องการระบบควบคุมสามารถที่จะปรับตัวเองได้อย่างอัตโนมัติจนกว่าจะถึงค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ สำหรับขั้นตอนต่างๆของระบบการควบคุมวงจรมองแบบปิดนี้อาจประกอบด้วย

- 1) การตรวจวัดค่าที่ต้องการควบคุมว่าต่างจากค่าเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเพียงใด โดยอาศัยอุปกรณ์ในการวัดลักษณะต่างๆ
- 2) อุปกรณ์ควบคุมที่ทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณความแตกต่างระหว่างค่าผลลัพธ์หลังจากที่ถูกควบคุมแล้วและค่าเป้าหมายที่ถูกกำหนดไว้ แล้วจึงส่งไปควบคุมกระบวนการต่อไป เพื่อให้ค่าตัวแปรของกระบวนการถูกต้องตามต้องการ

3) หากปรากฏว่ายังมีค่าต่างจากเป้าหมายอีก อุปกรณ์การตรวจวัดจะทำการวัดค่าตัวแปรในกระบวนการและดำเนินตามขั้นตอนต่างๆ ในขั้นตอนต่างๆ ในข้อ 1 และ 2 อีก จนกระทั่งค่าตัวแปรที่วัดได้เป็นค่าที่ต้องการจึงสิ้นสุดการควบคุม

## 2.6 ฮีตเตอร์ (Heater) [6]

### 2.6.1 หลักการทำงานของฮีตเตอร์

ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำความร้อนในอุตสาหกรรม ที่มีหลักการพื้นฐานคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำที่มีความต้านทานสูง ลวดตัวนำจะร้อน ดังนั้นลวดที่ใช้ผลิตฮีตเตอร์จะต้องมีคุณสมบัติเหนียวและทนอุณหภูมิสูงได้ เช่น ลวด Kanthal ( นิกเกิล : โครเมียม / 80 : 20 ) จะทนอุณหภูมิได้ถึง 1250 องศาเซลเซียส ส่วนประกอบในการผลิตฮีตเตอร์มีดังนี้

ฉนวนเม็กนีเซียมออกไซด์ (MgO) มีค่านำไฟฟ้าต่ำแต่ทำความร้อนได้มากทำหน้าที่กั้นกลางระหว่างลวดฮีตเตอร์กับปลอกโลหะ เพื่อป้องกันไม่ให้กระแสรั่วจากลวดฮีตเตอร์ออกไปยังผิวโลหะ จุดสำคัญคือห้ามมีความชื้นในฉนวนเด็ดขาดเพราะจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น หากมีความชื้นแก้ไขได้โดยการอบในเตาอบ

### 2.6.2 ฮีตเตอร์ถูกแบ่งตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

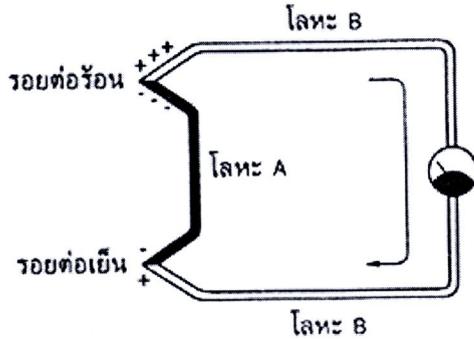
1. ฮีตเตอร์แท่ง หรือ (Cartridge Heater) ใช้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็ก และ โลหะต่างๆ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น งานบรรจุหีบห่อ งานขึ้นรูปพลาสติก
2. ฮีตเตอร์ครีบ หรือ (Finned Heater) ใช้ให้ความร้อนกับอากาศ เช่น ใช้ในห้องอบแห้ง ในเตาอบ
3. ฮีตเตอร์จุ่ม หรือ (Immersion Heater) หรือบางทีเรียกว่า ฮีตเตอร์ต้มน้ำ ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวทุกชนิด ตัวอย่างการใช้งานเช่น งานต้มน้ำ - ต้มน้ำมัน งานผสมสาร
4. บอบบินฮีตเตอร์ (Bobbin Heater) ใช้ให้ความร้อนของเหลวเหมือนฮีตเตอร์จุ่ม
5. ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater) ใช้ ให้ความร้อนกับวัตถุโดยไม่ต้องสัมผัสโดยตรง ไม่เหมาะกับวัตถุที่มีลักษณะมันวาวเนื่องจากวัตถุมันวาวจะมี คุณสมบัติสะท้อนแสง ทำให้ไม่สามารถดูดซับแสงอินฟราเรดได้อย่างเต็มที่ ใช้ติดตั้งในเตาอบ หรือ เหนือคอนเวเยอร์ได้
6. ฮีตเตอร์รัดท่อ หรือ Band Heater ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวที่อยู่ในท่อหรือถังรูปทรงกระบอกโดยรัดจากด้านนอก
7. ฮีตเตอร์แผ่น หรือ Strip Heater ใช้ให้ความร้อน โดยแนบกับวัตถุโดยตรงสามารถ

### 2.6.3 ฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater)

ได้รับการออกแบบสำหรับ ท่อ หรือถังรูปทรงกระบอก ฉนวนของฮีตเตอร์ทำจากลวดฮีตเตอร์เป็นแบบแบน (Ribbon Wire Heating Element) จึงทำให้ฮีตเตอร์ชนิดนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กขนาด 25 มม. หรืออาจใหญ่ถึง 600 มม. ก็ได้ ส่วนความกว้างอยู่ระหว่าง 20 – 300 มม. ตัวถังด้านนอกเป็นแผ่นเหล็กหรือเหล็กกล้าโรสนิม เหมาะสมสำหรับให้ความร้อนกับเครื่อง ฉีดพลาสติกมีอีกชื่อหนึ่งว่า ฮีตเตอร์กระบอก

## 2.7 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) [6]

เทอร์โมคัปเปิล คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้ไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง 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

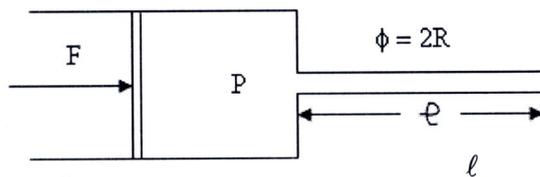
## 2.8 ทฤษฎีเครื่องมือวัดทางรีโอโลยี [2]

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 เครื่องมือวัดทางรีโอโลยีมีมากมายชนิดที่ใช้เฉพาะงานแต่บทนี้จะกล่าวถึงเฉพาะเครื่องมือวัดพื้นฐานที่ใช้กันมากเท่านั้น

### 2.8.1 คาปิลารีวิสโคมิเตอร์ (Capillary Viscometers)

คาปิลารีวิสโคมิเตอร์มีหลักการการทำงานที่ง่ายคือ ใช้ความดันดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ของไหลที่มีความหนืดมากต้องใช้ความดันมากในการดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ความหนืดจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับอัตราส่วนความดันต่ออัตราการไหล คาปิลารีวิสโคมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นเพราะว่ามีการเปลี่ยนแปลงในระดับโซโมเลกุลในขณะที่มีการไหล

พิจารณาการไหลของของไหลที่ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงดัน ไหลผ่านท่อคาปิลารี รัศมี  $R$  และยาว  $l$  ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางของคาปิลารีวิสโคมิเตอร์ [2]

ที่ปลายของท่อแต่ละข้างจะมีความดันต่างกันด้านซ้ายมือมีความดันเป็น  $P$  ได้จากการอัดของลูกสูบ และด้านขวามีความดันบรรยากาศและถือว่าความดันนี้น้อยมากเมื่อเทียบกับ  $P$  ให้  $Q$  เป็นอัตราการไหลปริมาตรต่อหน่วยเวลา ความสัมพันธ์ระหว่าง  $P$  และ  $Q$  จะสามารถอธิบายด้วยกราฟของการไหล (flow curve) ได้

พิจารณาทรงกระบอกของเหลวภายในของท่อคาปิลารีที่มีรัศมี  $r$  มีความยาว  $l$  ในขณะที่มีการไหล ของเหลวจะมีความเค้นเฉือน  $\tau$  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  $\tau$  เป็น  $\tau_R$

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  $\tau$  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  $\tau_R$  เท่านั้น ซึ่งถ้าหาว่า  $\frac{dQ}{d\tau_R}$  จะได้ว่า

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

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) จะได้ว่า

$$\dot{\varepsilon}(R) = \frac{3Q}{\pi R^3} + \frac{dQ}{\pi R^3 \frac{1}{\tau_R} d\tau_R}$$

หรือ

$$\dot{\varepsilon}(R) = \frac{1}{\pi R^3} + \frac{dQ}{d \ln \tau_R} + 3Q \quad (2.45)$$

ข้อสังเกต อัตราเฉือนในสมการ (2.45) เป็นอัตราเฉือนที่ตำแหน่งผิวของท่อคาปิลารีในขณะที่เราถือว่าความเร็วของไหลที่ตำแหน่งนี้เป็นศูนย์

### 2.8.1.1 กรณีของของไหลนิวทอนเนียน

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

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

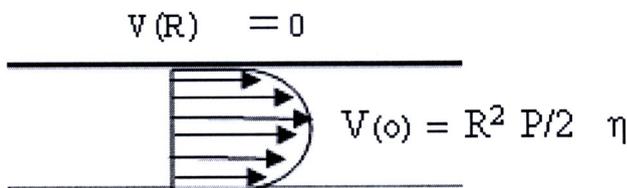
$$V(r) = -\int_r^R \frac{\tau}{\eta} dr$$

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 พิจารณากรณีของของไหลวีสโคอิลาสติก หรือ กฏยกกำลัง (power law)

ของไหลวีสโคอิลาสติกนั้นเป็นที่ทราบกันแล้วว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับความเค้นเฉือน แต่มีความสัมพันธ์ในลักษณะความเค้นเฉือนยกกำลังดังสมการ (2.48)

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

ในกรณีที่ทราบค่าคงตัวของ  $k$  และ  $m$  ของไหลวีโคอิลาสติกนั้น 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

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

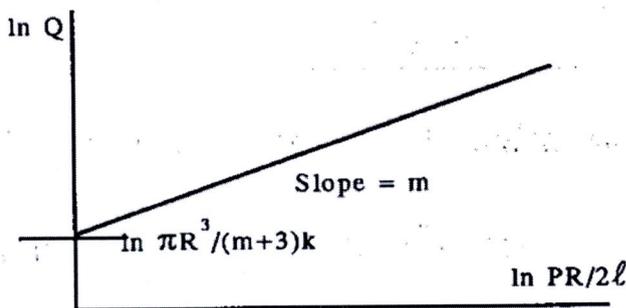
หรือความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการใช้กับความเร็วเขียนเป็น

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

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

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

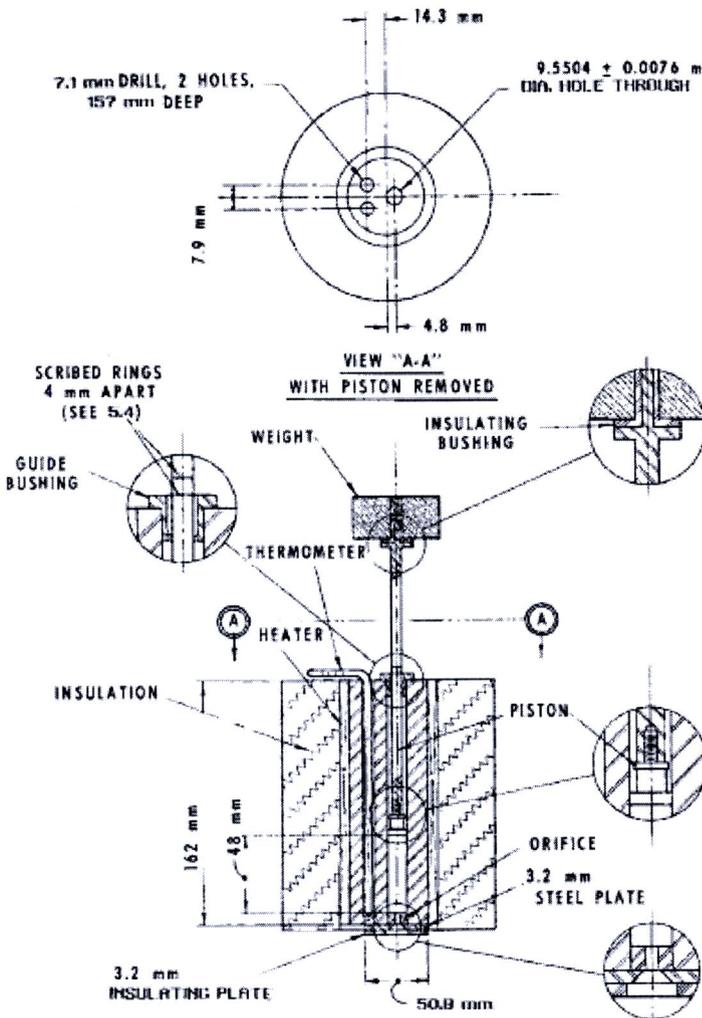
จากการหาค่าอนุพันธ์จะได้ว่า

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

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

## 2.9 ทฤษฎีการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก [1],[7]

เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกมีการทำงานเหมือนกับ ลิโอมิเตอร์ 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

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

ตารางที่ 2.3 ค่ากำหนดสำหรับการทดสอบหาค่าอัตราการไหลของพลาสติก [7]

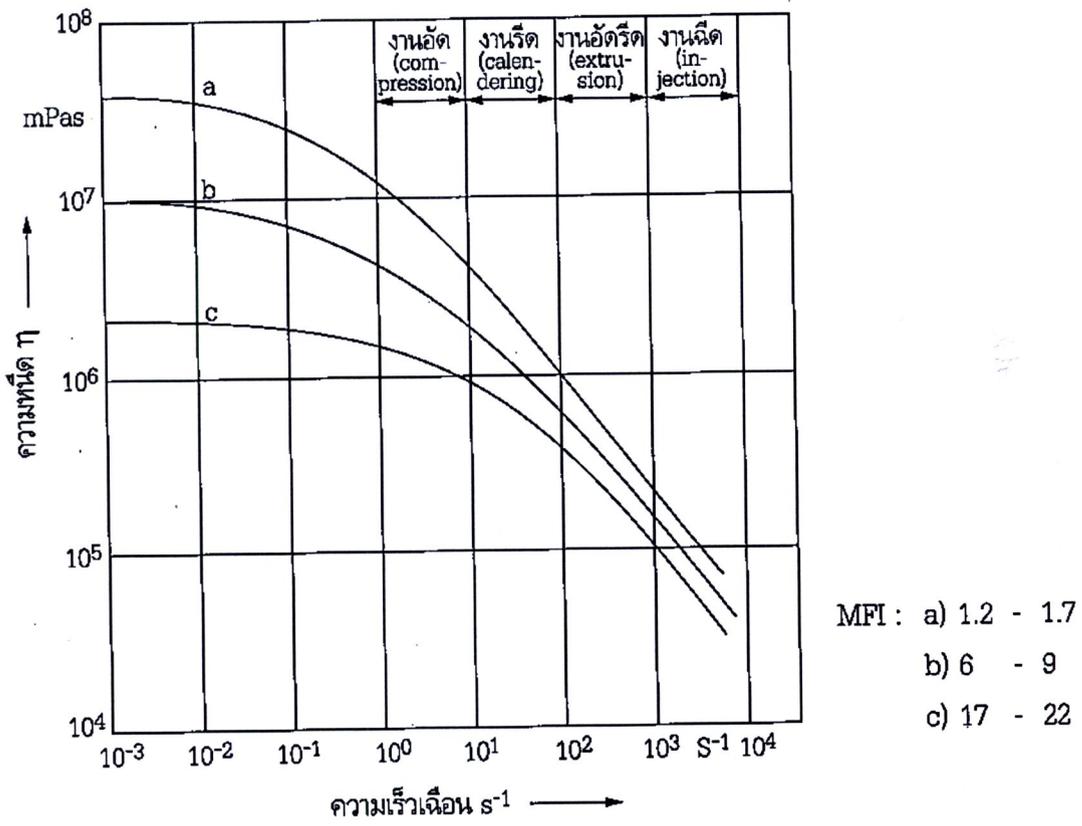
Material	Condition	
Acetals (copolymer and homopolymer)	190/2.16	190/1.05
Acrylics	230/1.2	230/3.8
Acrlonitrile-butadiene-styrene	200/5.0	230/3.8
	220/10	
Acrylonitrile/butadiene/styrene/polycarbonate blends	230/3.8	250/1.2
	265/3.8	265/5.0
Cellulose esters	190/0.325	190/2.16
	190/21.60	210/2.16
Ethylene-chlorotrifluoroethylene copolymer	271.5/2.16	
Ethylene-tetrafluoroethylene copolymer	297/5.0	
Nylon	275/0.325	235/1.0
	235/2.16	235/5.0
	275/5.0	
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	360/10
	343/.2.16	
Polyethylene	125/0.325	125/2.16
	250/1.2	
	190/0.325	190/2.16
	190/21.60	190/10
	310/12.5	
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	260/1.2
	230/3.8	190/5.0
Polysulfone (PSU)	343/2.16	360/10
Polyterephthalate	250/2.16	210/2.16
	285/2.16	
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	230/10
	230/3.8	
Styrenic Thermoplastic Elastomer	190/2.16	200/5.0
Thermoplastic Elastomer-Ether-Ester	190/2.16	220/2.16
	230/2.16	240/2.16
		250/2.16
Thermoplastic elastomer (TEO)	230/2.16	
Vinylidene fluoride copolymers	230/2.16	
	230/5.0	

ในการหาค่าคุณสมบัติในการไหลของพลาสติกเหลวในทางปฏิบัติที่ใช้งานในช่วงของความเร็วในการเฉือนสูง การหาค่าอัตราการไหลอย่างเดียวจะไม่พอเพียง เพราะในการทดสอบมีความเร็วเฉือนต่ำมากจึงอาจเป็นไปได้ว่าพลาสติกสองชนิดที่มีค่า อัตราการไหล เท่ากัน แต่มีparameter ในการทำงานต่างกันอย่างสิ้นเชิง

ในการหาค่าคุณสมบัติในการไหลของพลาสติกเหลวสำหรับการทำงานที่ความเร็วเฉือนสูงๆ จะต้องใช้ capillary rheometer ในการทดสอบ ซึ่งจะบอกคุณสมบัติการไหลของพลาสติกเหลวในอุดมคติได้แน่นอนกว่า

สาเหตุที่คุณสมบัติในการไหลมีความยุ่งยากก็คือ พลาสติกเหลวไม่ใช่ของเหลวในอุดมคติ ทั้งนี้เพราะความหนืดไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นอยู่กับความเร็วจีลอน LDPE ที่อุณหภูมิ 150 °C [1]