

รายงานการวิจัย
เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก
PLASTIC MELT FLOW RATE TESTER



ชื่อผู้วิจัย นายวิภู ศรีสืบสาย

RCH
TA
455
P5
๑๖๖๑๑

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**131045**
วัน,เดือน,ปี**2.1.๗๓.2557**

b.12596802
i.....

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ) Plastic Melt Flow Rate Tester

แหล่งเงิน เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2554 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 68,400 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ปี ตั้งแต่ 20 ต.ค. 53 ถึง 19 ต.ค. 54

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล

..... นายวิภู ศรีสืบสาย สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

..... คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

..... e-mail : kswipoo@kmitl.ac.th

..... คำสำคัญ (Keywords) Melt Flow Rate, Melt Index

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการออกแบบและจัดสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก เพื่อทำการหาอัตราการไหลของเทอร์โมพลาสติกภายใต้แรงดัน อุณหภูมิและน้ำหนักกดตามมาตรฐาน ASTM D 1238-04C กระบอกหลอมพลาสติกทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ภายในหุ้มด้วยอุปกรณ์ให้ความร้อนพร้อมทั้งเทอร์โมคัปเปิล ชุดโครงสร้างภายนอกประกอบด้วยอิฐทนไฟและฉนวนกันความร้อน การทดสอบจะใช้ตุ้มน้ำหนักกดลูกสูบ ให้พลาสติกที่หลอมเหลวจากความร้อนไหลผ่านหัวฉีดมาตรฐานตามแนวตั้ง พลาสติกที่ไหลออกมาถูกนำไปชั่งน้ำหนักเทียบกับเวลา 10 นาที ซึ่งผลการทดสอบค่าอัตราการไหลที่ได้ใกล้เคียงกับค่าอัตราการไหลที่ได้จากเครื่องทดสอบมาตรฐาน

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก.....

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ) Plastic Melt Flow Rate Tester.....

แหล่งเงิน..... เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์.....

ประจำปีงบประมาณ 2554..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 68,400..... บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี..... ปี ตั้งแต่ 20 ต.ค. 53 ถึง 19 ต.ค. 54.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล

นายวิภู ศรีสืบสาย สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

e-mail : kswipoo@kmitl.ac.th

คำสำคัญ (Keywords)..... Melt Flow Rate, Melt Index.....

Abstract

The objective of this research was to design melt flow rate tester for testing the melt flow rate of thermoplastic under pressure, temperature and weight that are followed the ASTM D 1238-04C. The plastic was melt in the barrel that was made from cylindrical stainless steel. The outside wall was covered with heater band and thermocouple was installed. Firebrick and insulation sheet were installed inside the main structure. The experiments were performed by using standard weights to press the melted plastic flowing through the standard nozzle in vertical direction. The sample had to be weighted on grams per 10 minutes. The results showed that melt flow rate from the tester were almost the same as the data technical from the company.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบุคคลตามรายชื่อต่อไปนี้ที่ทำให้โครงการวิจัยสำเร็จไปได้ด้วยดีทั้งการให้คำแนะนำและการให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

1. ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต
2. ดร. อุดม จันทร์จรัสสุข
3. นาย นิวัฒน์ มูเก็บ
4. นาย กุลชิต วิสารทกุล
5. นาย ปฐมพงศ์ สุกใส
6. นาย อภิชาติ มณีงาม



วิภู ศรีสืบสาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประวัติความเป็นมาของพลาสติก	3
2.2 ชนิดของพลาสติกและคุณสมบัติของพลาสติก	3
2.2.1 เทอร์โมเซตติง	4
2.2.2 เทอร์โมพลาสติก	4
2.3 ทฤษฎีพฤติกรรมการไหลของพลาสติก	5
2.3.1 ความหนืดและสมบัติการไหล	5
2.3.2 การแบ่งชนิดของของไหล	6
2.3.2.1 ของไหลนิวทอนเนียน	6
2.3.2.2 ของไหลนอนนิวทอนเนียน	8
2.3.3 กลุ่มของไหลที่สมบัติการไหลไม่ขึ้นกับเวลา	8
2.3.3.1 การไหลของของไหลบิงแฮม	8
2.3.3.2 ของไหลซูโดพลาสติก	9
2.3.3.3 ของไหลโคเลตแทน	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 กลุ่มของไหลที่สมบัติการไหลขึ้นกับเวลา	11
2.3.4.1 ของไหลทริกโซทรอปิค.....	11
2.3.4.1 ของไหลรีโอเปคติก	12
2.3.4.3 ของไหลวีสโคอีลาสติก	13
2.3.5 พฤติกรรมการไหลของพอร์ทิเมอร์หลอม	13
2.4 การถ่ายเทความร้อน.....	15
2.4.1 การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี	16
2.4.2 ทรงกระบอก	16
2.4.3 ระบบการนำความร้อนที่มีแหล่งผลิตความร้อนภายใน	18
2.4.3.1 ผนังเรียบมีแหล่งผลิตความร้อน.....	18
2.4.3.2 ระบบนำความร้อนในแนวรัศมี.....	19
2.5 ระบบวัดและการควบคุม.....	20
2.5.1 ระบบควบคุม.....	21
2.5.1.1 ระบบควบคุมวงจรแบบเปิด.....	21
2.5.1.2 ระบบควบคุมวงจรแบบปิด.....	22
2.6 ฮีตเตอร์ (Heater).....	23
2.6.1 หลักการทำงานของฮีตเตอร์.....	23
2.6.2 ฮีตเตอร์ถูกแบ่งตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้.....	23
2.6.3 ฮีตเตอร์รัศมี.....	23
2.7 เทอร์โมคัปเปิล.....	24
2.8 ทฤษฎีเครื่องมือวัดทางรีโอโลยี	25
2.8.1 คาปิลารีวีสโคมิเตอร์	25
2.8.1.1 กรณีของของไหลนิวทอนเนียน.....	26
2.8.1.2 พิจารณากรณีของของไหลวีสโคอีลาสติก	27
2.9 ทฤษฎีการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 การออกแบบและการดำเนินงาน

3.1 การวางแผนการดำเนินงาน	33
3.2 การออกแบบ	33
3.2.1 แบบของชุดกระบอกหลอม	33
3.2.2 ออกแบบหัวปิดด้านล่างใหม่	34
3.2.3 แบบของ โครงเครื่อง	34
3.2.4 การออกแบบวงจรไฟฟ้า	35
3.3 ออกแบบชุดกระบอกหลอมใหม่ เนื่องจากเกิดปัญหาเครื่องทดสอบมีอัตราการไหลที่ช้ากว่าปกติ	35
3.3.1 หาสาเหตุของปัญหา	35
3.3.1 สรุปลักษณะของปัญหา	36
3.3.3 ทำการแก้ไขปัญหา	37
3.4 การคำนวณ	38
3.4.1 การคำนวณหาความร้อนสูญเสีย	38
3.4.2 คำนวณการกระจายความร้อนภายในกระบอกหลอม	38
3.4.3 คำนวณค่าไฟฟ้าที่เครื่องทดสอบต้องใช้	40
3.5 การจัดสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก	40

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการจัดสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก	41
4.2 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก	42
4.2.1 กระบอกหลอมจากเหล็กกล้าไร้สนิม	42
4.2.2 ลูกสูบจากเหล็กกล้าไร้สนิม	42
4.2.3 ไม้กระทุ้ง	42
4.2.4 โครงสร้างของเครื่องทดสอบ	43
4.2.5 ก่อตั้งควบคุม	43
4.2.6 ภายในก่อก่อควบคุม	44
4.2.7 การติดตั้งฉนวน	44
4.2.8 ชุดประกอบกระบอกเข้ากับเครื่องทดสอบ	44
4.3 การทดลองเพื่อทดสอบการทำงานของเครื่องด้านความร้อน	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.1	ชื่อการทดลองที่1.....	45
4.3.2	วัตถุประสงค์การทดลองที่1	45
4.3.3	วิธีการทดลองที่1	45
4.3.4	ผลการทดลองที่1.....	45
4.3.5	สรุปผลการทดลองที่1	46
4.3.6	ชื่อการทดลองที่2.....	46
4.3.7	วัตถุประสงค์การทดลองที่2	46
4.3.8	วิธีการทดลองที่2.....	46
4.3.9	ผลการทดลองที่2.....	47
4.4	การทดสอบการทำงานของเครื่องทดสอบ.....	49
4.4.1	ชื่อการทดลอง	49
4.4.2	วัตถุประสงค์การทดลอง	49
4.4.3	วิธีการทดลอง.....	49
4.4.4	ผลการทดลอง	50
4.4.5	สรุปผลการทดลอง.....	51
บทที่ 5	สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	
5.1	สรุปผลการดำเนินการ	52
5.2	ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	52
5.2.1	ปัญหาที่พบ.....	52
5.2.2	แนวทางแก้ไข	52
เอกสารอ้างอิง.....		53
ภาคผนวก ก.....		ผก
ภาคผนวก ข		ผข
ภาคผนวก ค		ผค
ภาคผนวก ง.....		ผง
ภาคผนวก จ.....		ผจ
ภาคผนวก ฉ		ผฉ
ภาคผนวก ช		ผช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ความหนืดของวัสดุต่างๆ.....	5
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิล.....	24
ตารางที่ 2.3 ค่ากำหนดสำหรับการทดสอบหาค่าอัตราการไหลของพลาสติก.....	30
ตารางที่ 3.1 การคำนวณหาการกระจายความร้อนภายในกระบอกหลอม.....	39
ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราการไหลของพลาสติกชนิด Polypropylene (PP).....	50
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลของพลาสติก.....	50
ตาราง ผจ. 1 ราคาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้.....	ผจ1
ตาราง ผค. 1 ข้อมูลทางเทคนิคของเทอร์โมคัปเปิล.....	ผค1
ตาราง ผค.2 ข้อมูลทางเทคนิคของอิฐทนไฟที่เลือกใช้.....	ผค2
ตาราง ผค.3 ข้อมูลเทคนิคของประเก็นฉนวนที่เลือกใช้.....	ผค3
ตาราง ผค.4 ข้อมูลเกี่ยวกับแบบมาตรฐานระหว่างประเทศ เกลีสวธรรมชาติ.....	ผค4
ตาราง ผค.5 คุณสมบัติเทอร์โมโคไนมิคส์ของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	ผค5
ตาราง ผจ.1 ข้อมูลคุณสมบัติของพลาสติกชนิด Polypropylene(PP).....	ผจ1
ตาราง ผจ.1 ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาภายนอกที่อุณหภูมิที่ 300°C.....	ผจ1
ตาราง ผจ.2 ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาภายในที่อุณหภูมิที่ 300°C.....	ผจ4
ตาราง ผจ.3 ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่100°C.....	ผจ6
ตาราง ผจ.4 ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่150°C.....	ผจ7
ตาราง ผจ.5 ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่200°C.....	ผจ8
ตาราง ผจ.6 ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่250°C.....	ผจ9
ตาราง ผจ.7 ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่300°C.....	ผจ10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 การไหลและการผิดรูปของ ของไหลนิวทอเนียนระหว่างแผ่นกระจำสองแผ่น.....	6
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือน.....	7
รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการเฉือนของของไหลนิวทอเนียน 2 ชนิด.....	7
รูปที่ 2.4 เส้นกราฟของการไหลและเส้นกราฟของความหนืดของของไหลชนิดต่างๆ.....	9
รูปที่ 2.5 เส้นกราฟการไหลของของไหล ชนิดต่างๆ.....	11
รูปที่ 2.6 สมบัติของของไหลทริกโซโทโรปีค.....	12
รูปที่ 2.7 Hysteresis loop ของ ของไหลทริกโซโทโรปีค 2 ชนิด.....	12
รูปที่ 2.8 สมบัติการไหลของของไหลรีโอเพลคติก.....	13
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราเฉือน.....	14
รูปที่ 2.10 การกระจายความร้อนสำหรับผนังทรงกระบอกหลายชั้น.....	17
รูปที่ 2.11 ระบบการวัดปริมาณต่างๆ ของเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม.....	20
รูปที่ 2.12 ระบบการควบคุมวงจรเปิด.....	21
รูปที่ 2.13 ระบบการควบคุมแบบปิด.....	22
รูปที่ 2.14 แสดงผลของซีเบ็ค.....	24
รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางของคาปิลารีวิสโคมิเตอร์.....	25
รูปที่ 2.16 ภาพตัดการไหลของของไหลนิวทอเนียนในท่อคาปิลารี.....	27
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln Q$ กับ $\ln PR/2l$	28
รูปที่ 2.18 เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก.....	29
รูปที่ 2.19 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นอยู่กับความเร็วเฉือน LDPE ที่อุณหภูมิ 150 C°.....	32
รูปที่ 3.1 กระบอกกลม.....	33
รูปที่ 3.2 การประกอบหัวปิด.....	34
รูปที่ 3.3 แรงที่กระทำต่อโครงสร้างเครื่อง.....	34
รูปที่ 3.4 การเสียรูปและส่วนที่รับความเค้น.....	34
รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมการทำงานของเครื่อง.....	35
รูปที่ 3.6 ภาพประกอบการคำนวณอุณหภูมิระหว่างแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมกับเหล็กหัวปิด.....	36
รูปที่ 3.7 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆขณะให้ความร้อนที่ 230 องศาเซลเซียส.....	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.8 การประกอบประเก็นฉนวนเข้ากับเครื่อง.....	37
รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางของชุดกระบอกหลอมที่ได้ออกแบบใหม่.....	37
รูปที่ 3.10 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆขณะให้ความร้อนที่ 230 องศาเซลเซียส.....	37
รูปที่ 3.11 การกระจายความร้อนภายในกระบอกหลอม.....	39
รูปที่ 4.1 เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกที่เสร็จสมบูรณ์.....	41
รูปที่ 4.2 กระบอกหลอม.....	42
รูปที่ 4.3 ลูกสูบ.....	42
รูปที่ 4.4 ไม้กระทุ้ง.....	42
รูปที่ 4.5 โครงสร้างของเครื่องทดสอบ.....	43
รูปที่ 4.6 ก่อคลุม.....	43
รูปที่ 4.7 การติดตั้งสายไฟฟ้าเข้ากับชุดควบคุม.....	44
รูปที่ 4.8 การติดตั้งฉนวน.....	44
รูปที่ 4.9 การประกอบกระบอกเข้ากับเครื่องทดสอบ.....	44
รูปที่ 4.10 การทดสอบเครื่องทางความร้อนที่อุณหภูมิ 300c°.....	45
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิผนังภายในกับอุณหภูมิผนังภายนอกกระบอกหลอม.....	46
รูปที่ 4.12 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 100 c°.....	47
รูปที่ 4.13 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 150 c°.....	47
รูปที่ 4.14 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 200 c°.....	48
รูปที่ 4.15 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 250 c°.....	48
รูปที่ 4.16 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 300 c°.....	49
รูปที่ 4.17 การไหลของพลาสติก.....	50
รูปที่ 4.18 พลาสติกที่ได้จากการทดสอบอัตราการไหล.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แลยูต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) ความเค้นเฉือน, 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 พอลิโพรพิลีน (PP)
- 1.3.3 น้ำหนักที่ใช้กด (รวมลูกสูบ) 1, 1.2, 2, 2.16 และ 3.8 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้เครื่องทดสอบการอัตราการไหลของพลาสติกที่มีค่าผิดพลาดน้อย และได้มาตรฐาน
- 1.5.2 มีความรู้เพิ่มในด้านการผลิตพลาสติก และนำหลักการไปประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรม
- 1.5.3 ทราบคุณสมบัติการไหลของพลาสติก และ เลือกชนิดพลาสติกมาใช้กับเครื่องจักรได้อย่างเหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) ทำเป็นลูกบิดเลียนแบบการใช้งานซึ่งข้างข้างซึ่งเกิดขาดแคลนมากในขณะนั้น ขณะเดียวกันที่อังกฤษได้นำเอาไพรอกซีลินไปทำเป็นแลกเกอร์และวัสดุเคลือบผิว (Coating Materials) อื่นๆ ต่อมาได้นำเอาเซลลูลอยด์ดัดแปลงไปใช้ทำเป็นเหงือกฟันปลอม (สีชมพู) แทนการใช้ยางแข็งหลังจากนั้นได้นำเอาไปใช้ทำเป็นกระดาษถนอมตัว จนกระทั่งพ.ศ.2425 บริษัท Eastman ได้ประดิษฐ์ทำเป็นฟิล์มภาพยนตร์ การคิดค้นพลาสติกได้หยุดชะงักไปชั่วระยะเวลาหนึ่ง จนกระทั่งปี พ.ศ. 2452 Dr. Hendrik Baekeland ได้ค้นพบพลาสติกชื่อ ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol Formaldehyde) หรือ ฟีนอลิก (Phenolic) เข้าด้วยกับพลาสติกชนิดนี้เรารู้จักกันในชื่อ เบคเคอไรท์ (Bakelite) ซึ่งใช้ทำตุ้มกระทะ หม้อหุงและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ

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

2.2 ชนิดของพลาสติกและคุณสมบัติของพลาสติก [1]

พลาสติกหรือที่เรียกว่า “พอลิเมอร์”(Polymer) เป็นสารที่สังเคราะห์ขึ้นมาจากขบวนการที่เรียกว่า “พอลิเมอร์ไรเซชัน” (Polymerization) ซึ่งเป็นการก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้หน่วยเล็กๆ ที่เรียกว่า “โมโนเมอร์”(Monomer) เกิดการรวมตัวเชื่อมต่อกัน ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นและเปลี่ยนสถานะทางกายภาพจากเดิมที่อาจอยู่ในรูปของก๊าซ หรือของเหลว ให้อยู่ในรูปของแข็ง ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ พลาสติกที่มีใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวันของเรานี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ใหญ่ๆ คือ

เอกสารเป็นเอกสารที่สังเคราะห์ขึ้นไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) [1]

เทอร์โมเซตติง (Thermosetting) พลาสติกชนิดนี้จะมีรูปร่างที่ถาวรเมื่อผ่านกรรมวิธีทางความร้อน ความดัน หรือตัวเร่งปฏิกิริยา การขึ้นรูปทำได้ยาก และไม่สามารถหลอมเหลวเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ นอกจากนี้ยังมีความคงทนสูง รวมทั้งการใช้งานยังอยู่ในวงแคบ ทำให้ปัจจุบันมีการใช้งานในอุตสาหกรรมเพียงไม่กี่ประเภท พลาสติกประเภทนี้ได้แก่ เมลามีน ฟีนอลิก ยูเรียฟอร์มมาดิไฮด์ โพลีเอสเตอร์ที่ไม่อ้อมตัว เป็นต้น โดยส่วนใหญ่จะใช้ทำผลิตภัณฑ์เครื่องครัวต่างๆ เช่นถ้วยชาม หม้อ กระจุม 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 ทำให้พลาสติกประเภทนี้มีคุณสมบัติที่สามารถนำกลับมาขึ้นรูปซ้ำๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายต้นทุนการผลิตต่ำและมีหลายชนิดที่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ปัจจุบันมีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ของเด็กเล่น ดอกไม้ประดิษฐ์ ชิ้นส่วนรถยนต์ และผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ พลาสติกประเภทนี้ที่สำคัญได้แก่ พอลิเอทีลีน (PE) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิสไตรีน (PS) พอลิเอทีลีนฟาทาเลต (PET) ฯลฯ ชนิดของเทอร์โมพลาสติกที่สำคัญและใช้งานกันอยู่โดยทั่วไปได้แก่ อะซีทัล (Acetals) อะคริลิก (Acrylic) ฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbons) โพลีเอมีด (Polyamide) หรือ ไนลอน (Nylon) พอลิโอฟิเลิน (Polyolefin) พอลิเอทีลีน (Polyethylene) พอลิสไตรีน (Polystyrene) เอบีเอส (ABS) ไวนิล (Vinyl) เซลลูโลส (Cellulose) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate) ไดไอโอโนเมอร์ (Ionomer) พอลิโอมิด (Polyamide) พอลิซัลโฟเน (Polysulphone) เอทีลีน ไวนิลอะซีเตต (EVA) พอลิเอสเตอร์ (Polyester)

ในประเทศไทยนิยมใช้พลาสติกจำพวกเทอร์โมพลาสติกกันมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากความสามารถในงานหลายประเภท โดยเฉพาะงานด้านบรรจุภัณฑ์ พลาสติกที่มีการผลิตในรูปแบบต่างๆ เช่น

พอลิเอทีลีน(PE) ผลิตเป็นถุงพลาสติกทั้งชนิดร้อนและชนิดเย็น ขวด ถัง กระจอม พลาสติก และแผ่นพลาสติกประเภทอ่อนนุ่ม เป็นต้น

พอลิโพรพิลีน(PP) นิยมผลิตมาในรูปถุงใส่อาหาร เสื้อผ้าสำเร็จรูป กระจอมพลาสติก ปูนซีเมนต์ เป็นต้น

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

เนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายประการของพลาสติก โดยเฉพาะต้นทุนที่ต่ำ ทำให้การใช้พลาสติกในอุตสาหกรรมขยายตัวอย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายปริมาณการใช้เพิ่มขึ้นมาก

2.3 ทฤษฎีพฤติกรรมกรไหลของพลาสติก [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 วินาทีของไหลชนิดนี้แสดงพฤติกรรมกรไหลที่ซับซ้อนมาก 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 พฤติกรรมกรไหลของพอลิเมอร์หลอมมีความซับซ้อนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขณะไหลในเครื่องแปรรูป

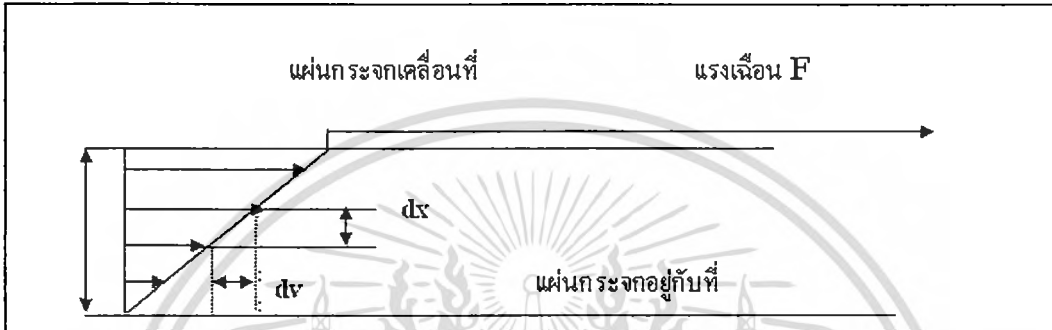
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การแบ่งชนิดของของไหล

คุณสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมในกระบวนการแปรรูป มีความจำเป็นที่ต้องเรียนรู้ ลักษณะการไหลของของไหลชนิดต่างๆ โดยทั่วไปแบ่งชนิดของของไหลตามพฤติกรรมการไหลได้ 2 ชนิด คือ

2.3.2.1 ของไหลอุดมคติหรือของไหลนิวทอนเนียน (Ideal or Newtonian Fluids)

พิจารณาการผิดรูปและการไหลของของไหลนิวทอนเนียนที่วางตัวอยู่ระหว่างแผ่นกระจกใสบาง 2 แผ่นมีพื้นที่กว้างมาก (A) มีระยะห่างเป็น X เมตร ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การไหลและการผิดรูปของของไหลนิวทอนเนียนระหว่างแผ่นกระจกสองแผ่น เนื่องจากอิทธิพลของความเค้น (shear stress) [2]

ใช้แรง F (นิวตัน) ซึ่งเป็นแรงคงที่ที่ดึงแผ่นกระจกด้านบนด้วยความเร็ว V (เมตรต่อวินาที) ในขณะที่ให้แผ่นล่างอยู่ที่สามารถคำนวณความเค้นได้ดังนี้

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

เมื่อ

- η คือ ความหนืดของของไหลนิวทอนเนียน (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)

ดังนั้นในกรณีที่ไหลของของไหลนิวทอนเนียน ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนจะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.2

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

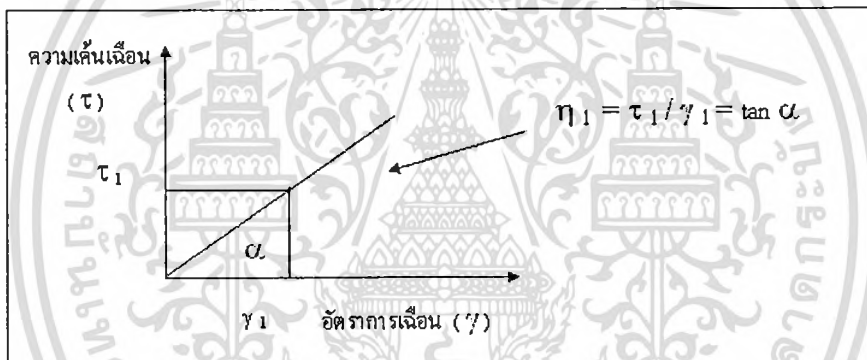
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความหนืดเฉือนของ ของไหลนิวทอนเนียน สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

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

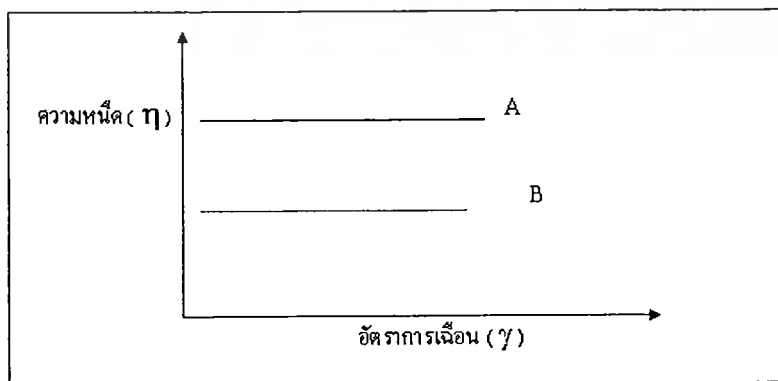
α คือ มุมที่เส้นกราฟของความหนืดทำมุมกับแกนของอัตราการเฉือน ดังรูปที่ 2.2

ดังนั้นจะเห็นว่ากราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราการเฉือนของ ของไหลนิวทอนเนียนจะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงถึงค่าความหนืดของการไหลของ ของไหลนิวทอนเนียนคงที่ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราเฉือนมักจะถูกเรียกว่า เส้นกราฟของการไหล (flow curve) ค่าความหนืดของ ของไหลนิวทอนเนียนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และชนิดของของไหล ตัวอย่างของไหลในกลุ่มของ ของไหลนิวทอนเนียนส่วนใหญ่เนของไหลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น น้ำ น้ำมันพืช และ ตัวทำละลายอินทรีย์



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือน [2]

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



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราการเฉือนของของไหลนิวทอนเนียน 2 ชนิด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารของไหล A และ B [2] ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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)

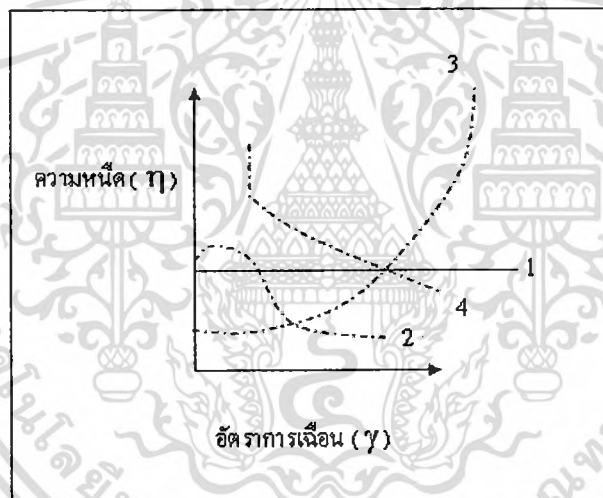
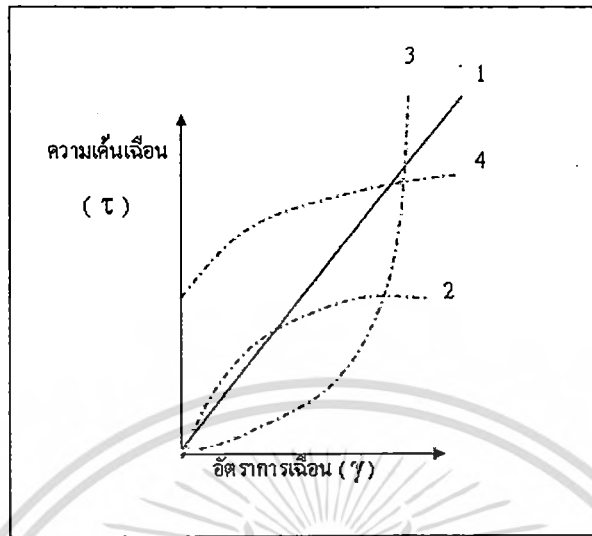
ของไหลบิงแฮม มีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะพิเศษ และจะไม่เกิดการไหลอย่างทันทีทันใดเมื่อได้รับความเค้น แต่เมื่อได้รับความเค้นที่มีขนาดมากกว่าความเค้นเฉือนค่าหนึ่ง ที่เรียกว่า yield stress โครงสร้างภายในจะเกิดการสูญเสียสภาพ และเริ่มเกิดการไหลที่ค่าความเค้นเฉือนมากกว่าค่านี้ ได้เส้นโค้งของการไหลเป็นเส้นตรง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

2.3.3.2 ของไหลซูโดพลาสติก (Pseudo plastic fluid)

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

มีการเสนอสมการจำนวนมากเพื่ออธิบายสมบัติการไหลของของไหลซูโดพลาสติก แต่สมการที่ได้รับการยอมรับในความถูกต้องมากที่สุดคือ สมการยกกำลัง (power law equation Ostwald-de-Waele equation) รายละเอียดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าของสมการ แสดงดังในสมการที่ 2.6
 ไม่วาทกรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เมื่อ

n คือ ดัชนีของสมการยกกำลังหรือดัชนีนอนนิวทอนเนียน (power law index)

K คือ ดัชนีของความเหนียวแน่น (consistency index)

สามารถใช้ค่าดัชนีของการยกกำลังในการจำแนกชนิดของของไหลได้ กล่าวคือ ของไหลนิวทอนเนียนมีค่า $n = 1$ เสมอ แต่ของไหลซูโดพลาสติกจะมีค่า n น้อยกว่า 1 ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก 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) ได้การใช้สมการยกกำลังเป็นเพียงการประเมินสมบัติการไหลในเบื้องต้นเท่านั้น นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์หลอมทุกชนิดมีสมบัติการไหลแบบซูโดพลาสติกในบางช่วงของอัตราการเฉือนเท่านั้น กล่าวคือถ้าพอลิเมอร์หลอมที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของอัตราการเฉือนที่ต่ำมาก (< 3 วินาที⁻¹) และสูงมากจะมีคุณสมบัติเป็นของไหลนิวทอนเนียน

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

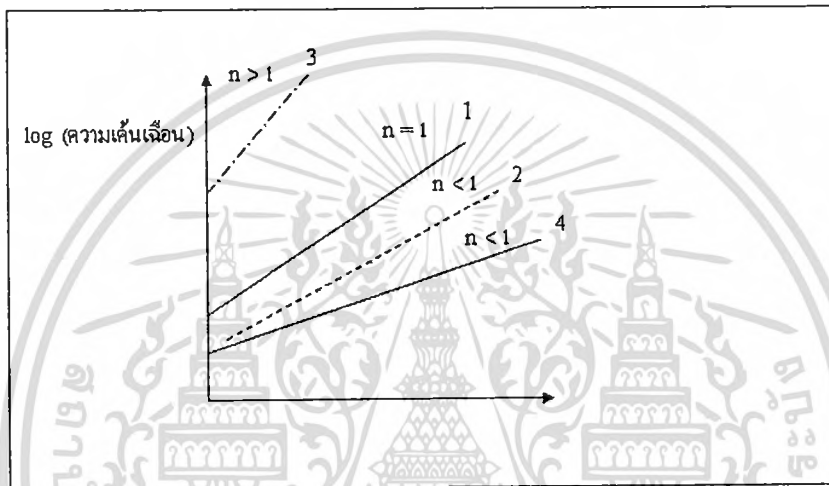
η_{∞} คือ ค่าความหนืดแบบเฉือนที่ค่าอัตราการเฉือนสูงมากๆ (Infinity shear viscosity)

η_0 คือ ค่าความหนืดแบบเฉือนที่ไม่มีค่าอัตราการเฉือน (Zero shear viscosity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.3 ของไหลไดแลทเท้น (Dilatant Fluid)

จากรูปที่ 2.4 จะสังเกตเห็นว่าการไหลของของไหลไดแลทเท้นมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการเฉือน เรียกพฤติกรรมการไหลแบบนี้ว่าเป็นพฤติกรรมการไหลแบบเพิ่มความหนืด (shear thickening behavior) ตัวอย่างของไหลที่แสดงพฤติกรรมในลักษณะนี้ เช่น การไหลของปูนซีเมนต์ การไหลของน้ำผสมแป้ง และการไหลของพอร์ทิเมนต์แชนลอยที่มีสารตัวเติมในปริมาณสูง เป็นต้น สามารถใช้สมการยกกำลังในการอธิบายสมบัติการไหลของของไหลไดแลทเท้นได้เช่นกัน ตามสมการยกกำลังของไหลไดแลทเท้นคือของไหลที่มีค่า n มากกว่า 1 สมการยกกำลังสามารถใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการไหลของของไหลชนิดต่างๆ สรุปได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เส้นกราฟการไหลของของไหล ชนิดต่างๆ 1. ของไหลนิวตันเนียน 2. ของไหลซูโดพลาสติกที่เป็นไปตามสมการยกกำลัง 3. ของไหลไดแลทเท้น 4. พอร์ลิเมอร์หลอมบางชนิดเป็นของไหลซูโดพลาสติกแต่ไม่เป็นไปตามยกกำลัง [2]

2.3.4 กลุ่มของไหลที่สมบัติการไหลขึ้นกับเวลา (Time – Dependent fluids)

สมบัติการไหลของของไหลชนิดนี้ เช่นความหนืดเฉือน เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาที่ของไหลถูกเฉือนไหลที่มีพฤติกรรมในลักษณะนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ใหญ่ๆ คือ

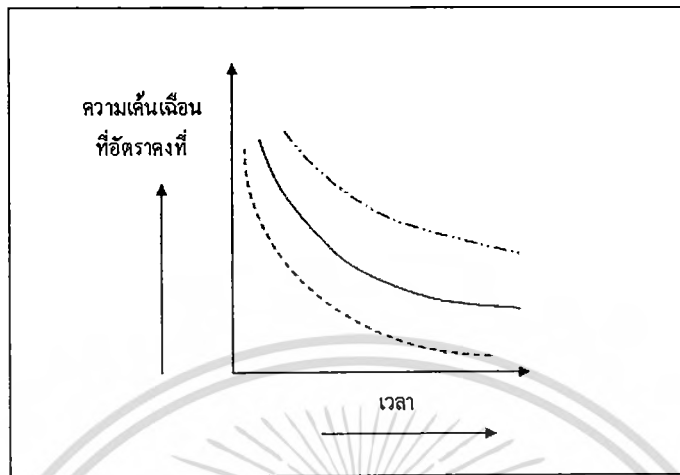
2.3.4.1 ของไหลทริกโซทรอปิก (Thixotropic fluids)

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

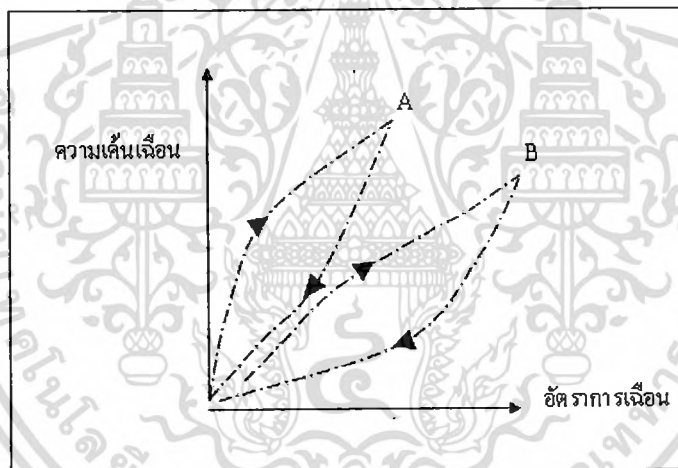
เพื่อเข้าใจถึงพฤติกรรมการไหลของของไหลทริกโซทรอปิก ทำการทดลองวัดสมบัติการไหลโดยใช้เครื่องรีโอมิเตอร์แบบหมุนที่สามารถวัดทอร์คและความเค้นเฉือนได้ ทำการกวนของไหลที่ความเร็วค่าหนึ่งแล้ววัดค่าความเค้นไว้แล้วเพิ่มความเร็วในการกวนแล้ววัดค่าความเค้น ทำอย่างนี้หลายความเร็วของการหมุน จนถึงความเร็วสูงสุดของการหมุน หลังจากนั้นเริ่มลดความเร็วของการหมุนโดยไม่หยุดเครื่อง แล้ววัดค่าความเค้นที่ความเร็วในการหมุนต่ำกัน ผลการทดลองพบว่าเส้นกราฟของความเค้นของการเพิ่มและลดความเร็วของการหมุนจะไม่ซ้อนทับกันเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงการศึกษาเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น hysteresis loop แสดงดังรูปที่ 2.7 ตัวอย่างของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบของไหลทรกโซทรอปิก เช่น สีทาภายนอกและภายใน น้ำยาบางชนิด สเลอรีของเซรามิกส์ เป็นต้น



รูปที่ 2.6 สมบัติของของไหลทรกโซทรอปิก

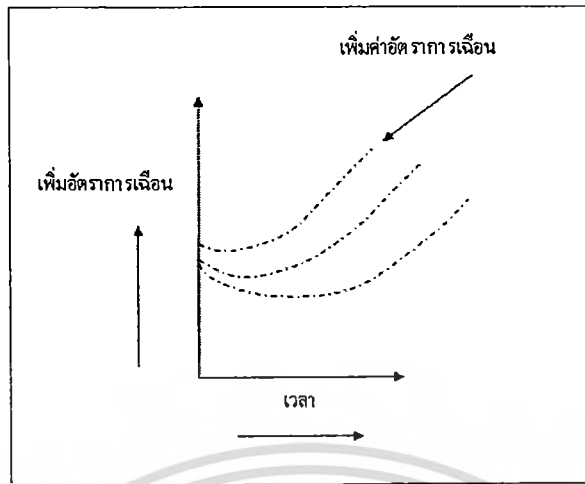


รูปที่ 2.7 Hysteresis loop ของของไหลทรกโซทรอปิก 2 ชนิด คือ ของไหล A และ B [2]

2.3.4.2 ของไหลรีโอเปคติก (Rheopectic Fluids)

ของไหลรีโอเปคติกมีคุณสมบัติการไหลกลับกักรณีของไหลทรกโซทรอปิก กล่าวคือ ค่าของสมบัติ การไหล เช่น ความหนืดสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาของการเฉือน ทำให้ของไหลชนิดนี้มีความแข็งเพิ่มขึ้นเมื่อการถูกกระทำด้วยความเค้นเฉือน ตัวอย่างของไหลที่แสดงพฤติกรรมในลักษณะนี้เช่น แร่ยิบซั่มในน้ำ เป็นต้น ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงความเค้นเฉือนเมื่อเวลาของการเฉือนเพิ่มขึ้นในของไหลรีโอเปคติก แสดงดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 สมบัติการไหลของของไหลรีโอพลาสติก [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 ($\dot{\gamma}$)

ϕ คือ สมบัติการไหลที่เกิดจากการไหลหนืดและการยืดหยุ่น

t คือ เวลา

2.3.5 พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอม

พอลิเมอร์หลอมแสดงพฤติกรรมสอดคล้องกับการไหลของของไหลพลาสติก ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา แต่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าพอลิเมอร์หลอม แสดงสมบัติเป็นของไหลที่มีสมบัติขึ้นกับเวลาด้วย กล่าวคือ มีสมบัติการไหลเป็นแบบของไหลวิสโคอีลาสติกด้วย เนื่องจากมีปรากฏการณ์หลายอย่างที่เกิดขึ้นซึ่งการมีสมบัติการไหลของวิสโคอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอม เช่น การบวมพองที่หัวสาย การบวมพองในขณะรีด

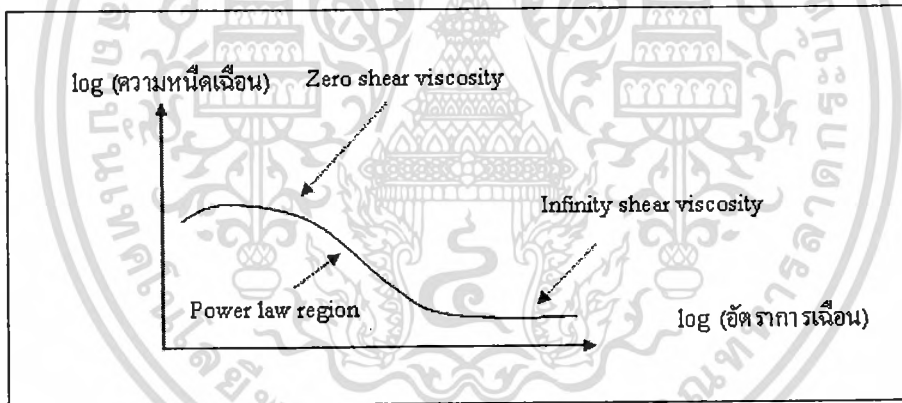
พอลิเมอร์หลอมเป็นของไหลพลาสติกดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า การประเมินสมบัติข้างต้นของพอลิเมอร์หลอมนิยมใช้สมการยกกำลังเป็นเกณฑ์ในการพิจารณา ดังนั้นในกรณีนี้พอลิเมอร์หลอมจะมีพฤติกรรมการไหลแบบของไหลพลาสติก เส้นกราฟของความหนืดเทียบกับอัตราการเฉือนในสเกล log - log แสดงดังรูปที่ 2.9 มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ค่าความหนืดต่ำมากและสูงมาก กล่าวได้ว่าที่สองช่วงของอัตราการเฉือนนี้ พอลิเมอร์หลอมมีสมบัติเป็นของไหลนิวทอนเนียน ค่าความหนืดที่ไม่มีอัตราเฉือน ส่วนค่าความหนืดที่ไม่มีอัตราเฉือน ส่วนค่าความหนืดที่ค่าอัตราการเฉือนสูงมากเรียกว่า ความหนืดเฉือนอนันต์ ช่วงกลางของเส้นกราฟของความหนืด ค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนืดเฉือนมีค่าลดลงเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น ในช่วงกลางนี้เองพอลิเมอร์หลอมจะแสดงพฤติกรรมเป็นไปตามสมการยกกำลัง และเป็นของไหลชิวโคพลาสติก

สมบัติของพอลิเมอร์หลอมในช่วงที่คุณสมบัติของไหลชิวโคพลาสติกซึ่งอธิบายด้วยสมการยกกำลัง แสดงในรูปสอดคล้องกับการจัดเรียงตัวโมเลกุลระหว่างที่เกิดการไหล กล่าวคือขณะที่อัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น โมเลกุลจะจัดเรียงตัวใหม่เพื่อให้โมเลกุลเคลื่อนตัวผ่านโมเลกุลอื่นได้อย่างง่ายขึ้น ส่งผลให้การต่อต้านต่อการไหลลดลงตามอัตราการเฉือนที่เพิ่มขึ้น จากการสังเกตเส้นกราฟของความหนืดในรูปที่ 2.9 ถ้าพอลิเมอร์หลอมไม่มีสมบัติการไหลเป็นชิวโคพลาสติก กล่าวคือความหนืดไม่ลดลงตามอัตราการเฉือน จะทำให้การแปรรูปของพอลิเมอร์ทำได้ยากมากเนื่องจากความหนืดที่สูงแต่เป็นชนิดที่อัตราการเฉือนที่มาก ค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมลดลง จึงทำให้สามารถแปรรูปพอลิเมอร์หลอมได้ง่ายขึ้นการมีสมบัติเป็นของไหลชิวโคพลาสติกของพอลิเมอร์หลอม ทำให้มีข้อดีหลายประการ การดังนี้

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



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราเฉือน [2]

การออกแบบเครื่องแปรรูป เบ้าและสายใช้ในกระบวนการแปรรูปพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถใช้งานได้ก็เพียงแต่พิจารณาว่าพอลิเมอร์หลอมเป็นของไหลหนืด(หรือของไหลชิวโคพลาสติก)เท่านั้นแต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การไหลของพอลิเมอร์หลอมที่มีสมบัติทั้งทางด้านการไหลหนืด และผลที่เกิดจากการยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอม ถึงแม้ว่าด้านแนวคิดเรื่องความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์หลอมเข้ามาพิจารณา ในการออกแบบเครื่องแปรรูปพลาสติก จะทำได้ยากและซับซ้อนมาก ดังนั้น การออกแบบเครื่องแปรรูปส่วนใหญ่ไม่ค่อยมีการนำเอาหลักการไหลแบบยืดหยุ่นเข้ามาคิดและคำนวณในแง่ของการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมในเครื่องแปรรูป โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นหัวคายของเครื่องอัดรีดขึ้นรูป และหัวฉีดของเครื่องฉีดเข้าแบบ สมการที่ใช้ในการอธิบายสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมรวมทั้งการไหลหนืดและการไหลยืดหยุ่น ไว้ในสมการเดียวกัน เรียกว่าสมการของสถานการณ์ไหล หรือ Constitutive equation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การถ่ายเทความร้อน [3]

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

กฎสัมพัทธ์ของการนำความร้อน โดยถือเกณฑ์การสังเกตจากการทดลอง 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) จะกำหนดปริมาตรควบคุมเล็กๆมาๆ $dx \cdot dy \cdot dz$ ถ้ามีเกรเดียนต์อุณหภูมิแล้ว การนำความร้อนจะเกิดขึ้นตรงข้ามแต่ละอันของผิวควบคุมอัตราการนำความร้อนนี้จะตั้งฉากกับผิวควบคุมแต่ละอันที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.4.1 การถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี

ระบบของรูปทรงกระบอกและรูปทรงกลมตามที่พบ จะมีเกรเดียนอุณหภูมิอยู่ในแนวทิศทางรัศมีเท่านั้น จึงสามารถคิดเป็นหนึ่งมิติได้อย่างไรก็ตามภายใต้เงื่อนไขสภาวะสม่ำเสมอไม่มีการผลิตความร้อน ระบบนั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้วิธีมาตรฐานซึ่งเริ่มต้นด้วยสมการความร้อน ในรูปแบบที่เหมาะสมหรือวิธีอีกอย่างหนึ่งซึ่งเริ่มต้นด้วยกฎของฟูริเยร์ในรูปแบบที่เหมาะสม

2.4.2 ทรงกระบอก

ตัวอย่างธรรมดาทั่วไปเป็นทรงกระบอกกลวงซึ่งผิวภายในและผิวภายนอกสัมผัสกับของไหลที่อุณหภูมิแตกต่างกัน 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 ค่าความต้านทานความร้อนในกรณีของทรงกระบอกกลวง จะอยู่ในรูป

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

โดยการใช้อีกวิธีหนึ่ง เนื่องจากค่าของ q_r เป็นอิสระกับ r ดังนั้นเราสามารถอินทิเกรตสมการ (2.17) ซึ่งจัดรูปใหม่ ก่อนอินทิเกรตได้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการตีพิมพ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

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

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

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

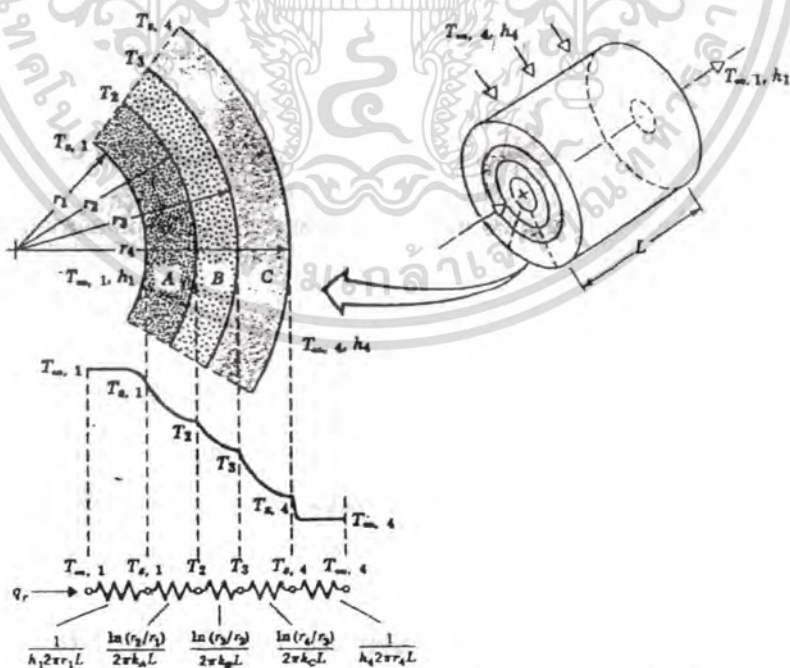
โดยที่ $A = 2\pi r_1 L$ และ

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

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

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

และรูปเฉพาะของ U_2, U_3, U_4 มีลักษณะตามสมการ (2.20)



รูปที่ 2.10 การกระจายความร้อนสำหรับผนังทรงกระบอกหลายชั้น [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

131045

2.4.3 ระบบการนำความร้อนที่มีแหล่งผลิตความร้อนภายใน (Heat source system)

ปัญหาการถ่ายเทความร้อนที่น่าสนใจจำนวนมาก ที่มีการผลิตความร้อนขึ้นภายใน เช่น เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ของลวดไฟฟ้า และระบบที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เป็นต้น เราจะพิจารณาระบบหนึ่งมิติที่ซึ่งอุณหภูมิเป็นฟังก์ชัน โคออร์ดิเนตเดียวเท่านั้น

2.4.3.1 ผนังเรียบมีแหล่งผลิตความร้อน (Plane wall with heat source)

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

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

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

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

ค่าฟังก์ชันของความร้อนที่จุดใดๆในผนัง 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_∞) เราสามารถหาความสัมพันธ์ของ T_s และ T_∞ ได้ โดยประยุกต์การสมดุลของพลังงานที่ผิว จะได้ว่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

แทนค่าสมการ (2.27) เพื่อให้ได้เกรเดียนอุณหภูมิที่ $x=L$ ซึ่งจะได้

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

ดังนั้น T_s หาได้จากการรู้ค่าของ T_∞, \dot{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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

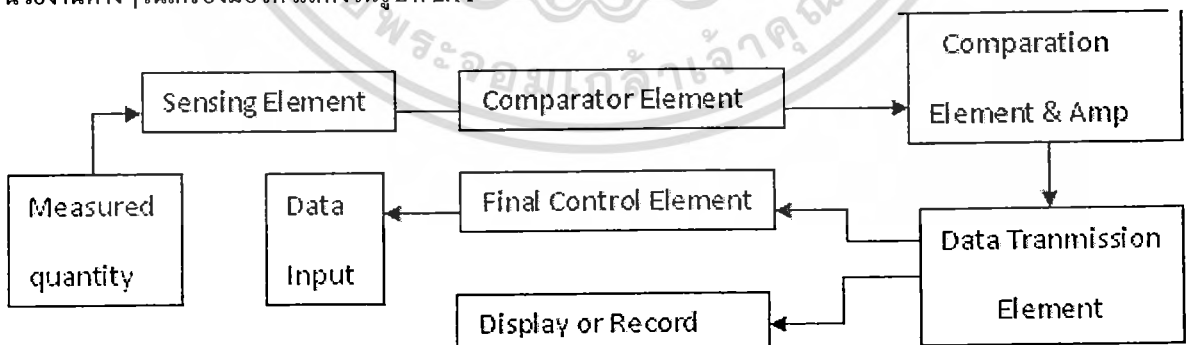
วิธีที่กล่าวมานี้ อาจจะใช้หาการกระจายของอุณหภูมิในทรงกลมตัน และในทรงกระบอกกลวง และทรงกลมกลวงก็ได้สำหรับชนิดต่างๆของเงื่อนไขที่ขอบเขตเหล่านั้น

2.5 ทฤษฎีระบบวัดและการควบคุม [5]

ส่วนประกอบของระบบการวัด แบบการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม อาจแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆตามหน้าที่การใช้งานได้เป็น 4 ส่วนคือ

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

เนื่องจากกระบวนการทำงานของเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม โดยทั่วไป 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 อัตราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่หน่วยนี้จะส่งค่าออกมาเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับปริมาณที่ต้องการวัด ในกระบวนการเหล่านั้น การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

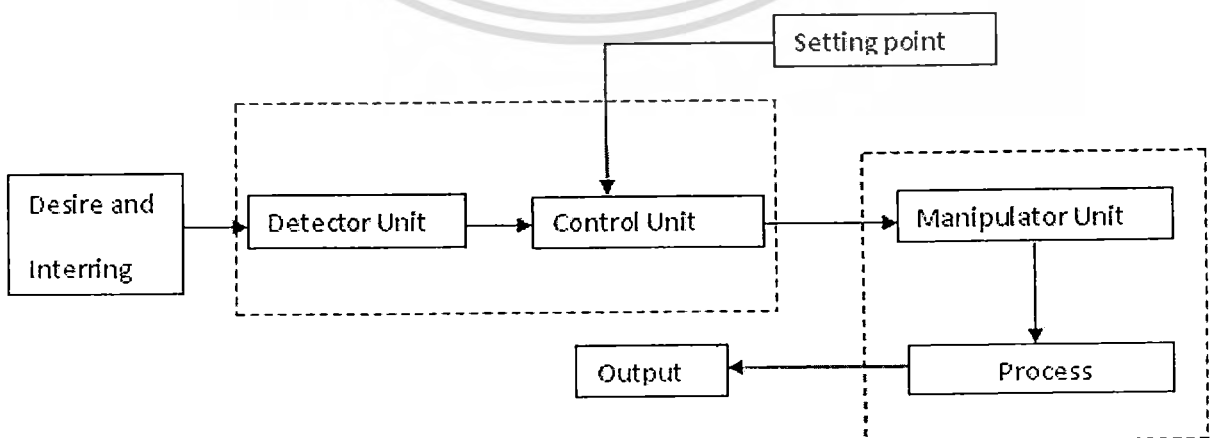
- 2) Comparator element เป็นหน่วยที่ทำการเปรียบเทียบข้อมูลจากหน่วยตรวจจับการเปลี่ยนแปลงข้อมูล และปริมาณที่ต้องควบคุม (จากหน่วยควบคุม) ซึ่งผลต่างที่ได้จะถูกนำไปใช้ สำหรับการแสดงค่าควบคุมต่อไป
- 3) Conversion element and amplifier เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงค่าที่ได้จากหน่วยแรกให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน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

2.5.1 ระบบควบคุม

ในที่นี้จะหมายถึง ระบบที่ประกอบด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์การควบคุมรวมอยู่ด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของขบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมอย่างอัตโนมัติ ระบบควบคุมวงจรมแบบเปิด (Open-loop control system)

2.5.1.1 ระบบควบคุมวงจรมแบบเปิด

เป็นระบบที่ไม่มีการติดตามผลเพื่อปรับเปลี่ยนค่าในวงจรม กล่าวคือ หลังจากที่มีการควบคุมโดยส่งสัญญาณควบคุมไปแล้วจะไม่มีการติดตามผลเกิดขึ้นใหม่ เพื่อทำการปรับแต่งสัญญาณการควบคุมให้เหมาะสมต่อไป แสดงในรูปที่ 2.12



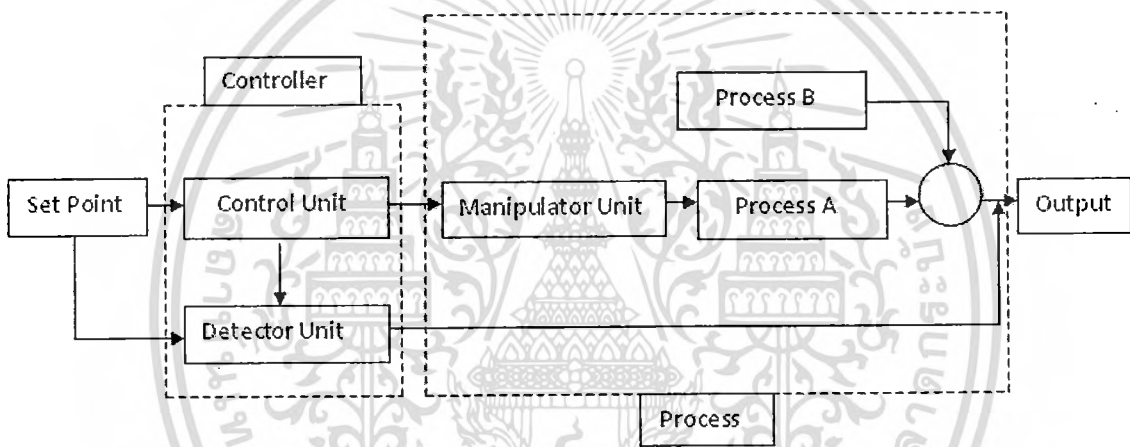
รูปที่ 2.12 ระบบการควบคุมวงจรมแบบเปิด [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.12 แสดงระบบการควบคุมวงจรมวงจรแบบเปิด จะเห็นได้ว่าค่าของตัวแปรในกระบวนการและสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้น เนื่องจากสาเหตุใดๆก็ตาม เป็นสัญญาณเข้าระบบ(ถูกวัดโดยเครื่องมือวัด) ต่อมาจะเป็นสัญญาณเข้าหน่วยระบบควบคุม (Control unit) ซึ่งสามารถปรับระดับหรือปริมาณที่ต้องการควบคุมได้ จากนั้นค่าที่ปรับได้จึงเข้าสู่กระบวนการ (Process) จากรูปนี้อาจกล่าวได้ว่าภายหลังจากที่การควบคุมกระบวนการนั้นๆอาจไม่เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการก็ได้ ซึ่งระบบการควบคุมแบบนี้ผู้ใช้หรือผู้ที่ควบคุมการทำงานของกระบวนการผลิตจำต้องคอยตรวจสอบและปรับค่าตัวแปรที่วัดได้อยู่ตลอดเวลา

2.5.1.2ระบบควบคุมวงจรมวงจรแบบปิด

เป็นระบบที่มีการติดตามผลภายหลังจากการที่มีการปรับแต่งภายในแล้ว โดยมีการวัดค่าตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการอยู่ตลอดเวลาว่าเข้าใกล้เป้าหมายที่ต้องการหรือยัง ทั้งนี้เพื่อนำไปปรับแต่งสัญญาณควบคุมสำหรับการใช้ในการควบคุมต่อไป



รูปที่ 2.13 ระบบการควบคุมแบบปิด [5]

จากรูป 2.13 แสดงระบบการควบคุมวงจรมวงจรแบบปิด จะเห็นว่าคล้ายกับระบบการควบคุมวงจรมวงจรแบบเปิด แต่ที่หน่วยควบคุม (Controller) จะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณออกภายหลังจากที่มีการปรับแต่งปริมาณที่ต้องการควบคุมแล้ว ต่อมาสัญญาณที่ตรวจจับได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายเพื่อทำการควบคุมระบบต่อไป หากค่าผลลัพธ์นั้นยังไม่เข้าใกล้หรือเท่ากับค่าเป้าหมายที่ต้องการระบบควบคุมสามารถที่จะปรับตัวเองได้อย่างอัตโนมัติจนกว่าจะถึงค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ สำหรับขั้นตอนต่างๆของระบบควบคุมวงจรมวงจรแบบปิดนี้อาจประกอบด้วย

- 1)การตรวจวัดค่าที่ต้องการควบคุมว่าต่างจากค่าเป้าหมายที่ต้องการควบคุมเพียงใด โดยอาศัยอุปกรณ์ในการวัดลักษณะต่างๆ
- 2)อุปกรณ์ควบคุมที่ทำหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณความแตกต่างระหว่างค่าผลลัพธ์หลังจากที่ถูกควบคุมแล้วและค่าเป้าหมายที่ถูกกำหนดไว้ แล้วจึงส่งไปควบคุมกระบวนการต่อไป เพื่อให้ค่าตัวแปรของกระบวนการถูกต้องตามต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) หากปรากฏว่ายังมีค่าต่างจากเป้าหมายอีก อุปกรณ์การตรวจวัดจะทำการวัดค่าตัวแปรในกระบวนการและดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆ 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 เพื่อป้องกันไม่ให้มีกระแสรั่วจากลวดฮีตเตอร์ออกไปยังผิวโลหะ จุดสำคัญคือห้ามมีความชื้นในฉนวนเด็ดขาดเพราะจะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น หากมีความชื้นแก้ไขได้โดยการอบในเตาอบ

2.6.2 ฮีตเตอร์ถูกแบ่งตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันดังต่อไปนี้

1. ฮีตเตอร์แท่ง หรือ (Cartridge Heater) ใช้ความร้อนกับวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น เหล็ก และ โลหะต่างๆ ตัวอย่างการใช้งาน เช่น งานบรรจุหีบห่อ งานขึ้นรูปพลาสติก
2. ฮีตเตอร์ครีป หรือ (Finned Heater) ใช้ให้ความร้อนกับอากาศ เช่น ใช้ในห้องอบแห้ง ในเตาอบ
3. ฮีตเตอร์จุ่ม หรือ (Immersion Heater) หรือบางที่เรียกว่า ฮีตเตอร์ต้มน้ำ ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวทุกชนิด ตัวอย่างการใช้งานเช่น งานต้มน้ำ - ต้มน้ำมัน งานผสมสาร
4. บอบบินฮีตเตอร์ (Bobbin Heater) ใช้ให้ความร้อนของเหลวเหมือนฮีตเตอร์จุ่ม
5. ฮีตเตอร์อินฟราเรด (Infrared Heater) ใช้ให้ความร้อนกับวัตถุโดยไม่ต้องสัมผัสโดยตรง ไม่เหมาะกับวัตถุที่มีลักษณะมันวาวเนื่องจากวัตถุมันวาวจะมี คุณสมบัติสะท้อนแสง ทำให้ไม่สามารถดูดซับแสงอินฟราเรดได้อย่างเต็มที่ ใช้ติดตั้งในเตาอบ หรือ เหนือคอนเวเยอร์ได้
6. ฮีตเตอร์รัดท่อ หรือ Band Heater ใช้ให้ความร้อนกับของเหลวที่อยู่ในท่อหรือถังรูปทรงกระบอก โดยรัดจากด้านนอก
7. ฮีตเตอร์แผ่น หรือ Strip Heater ใช้ให้ความร้อนโดยแนบกับวัตถุโดยตรงสามารถ

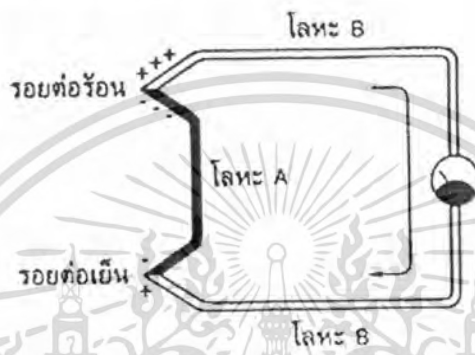
2.6.3 ฮีตเตอร์รัดท่อ (Band Heater)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) [6]

เทอร์โมคัปเปิล คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อกันทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ 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	-02.26 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับกรณึ่งวงวนเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านนารค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

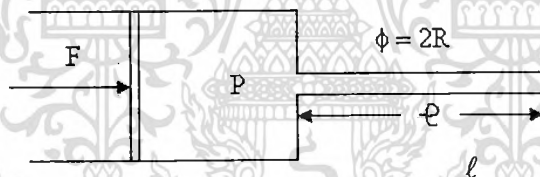
2.8 ทฤษฎีเครื่องมือวัดทางรีโอโลยี [2]

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

2.8.1 คาปิลารีวิสกอมิเตอร์ (Capillary Viscometers)

คาปิลารีวิสกอมิเตอร์มีหลักการการทำงานที่ง่ายคือ ใช้ความดันดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ของไหลที่มีความหนืดมากต้องใช้ความดันมากในการดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ความหนืดจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับอัตราส่วนความดันต่ออัตราการไหล คาปิลารีวิสกอมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นเพราะว่ามีการเปลี่ยนแปลงในระดับโซโมเลกุลในขณะที่มีการไหล

พิจารณาการไหลของของไหลที่ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากแรงดัน ไหลผ่านท่อคาปิลารี รัศมี R และยาว l ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาพตัดขวางของคาปิลารีวิสกอมิเตอร์ [2]

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

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

$$2\pi r l \tau = \pi r^2 P \tag{2.39}$$

พิจารณากรณี $r = R$ หรือที่ผิวในของท่อคาปิลารี และนิยาม τ เป็น τ_r

จะได้ว่า
$$\tau_r = \frac{PR}{2l} \tag{2.40}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ซึ่งถ้าหากว่า $\frac{dQ}{d\tau_R}$ 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

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

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 ในกรณีของไหล

นิวทอนเนียน ในกรณีนี้ $\varepsilon = \tau/\eta = f(\tau)$ เมื่อ η เป็นสัมประสิทธิ์ความหนืด

แทนค่า $f(\tau) = \tau/\eta$ ลงในสมการ (2.42) จะได้ว่า $\frac{dQ}{d\tau_R} = \frac{1}{\eta} + \frac{dQ}{d \ln \tau_R} + 3Q$ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

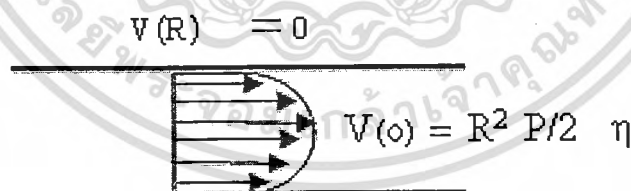
$$Q = \frac{\pi R^{4P}}{8\eta\ell} = \frac{\pi R^3 \tau_R}{4\eta} \quad (2.46)$$

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

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

$$\begin{aligned} -\frac{dV(r)}{dr} &= \epsilon = \frac{\tau}{\eta} \\ V(r) &= -\int_r^R \frac{\tau}{\eta} dr \\ \text{จากเงื่อนไขที่ } V_R &= 0 \text{ และ } \tau_r = (P/2\ell) r \\ V(r) &= -\frac{P}{2\ell\eta} \int_r^R r dr \\ V(r) &= \frac{(R^2 - r^2)P}{2\ell\eta} \end{aligned} \quad (2.47)$$

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



รูปที่ 2.16 แสดงภาพตัดการไหลของของไหลนิวทอนเนียนในท่อคาปิลารี [2]

2.8.1.2 พิจารณากรณีของของไหลวีส์โคอีลาสติก หรือ กฎยกกำลัง (power law)

ของไหลวีส์โคอีลาสติกนั้นเป็นที่ทราบกันแล้วว่า ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนไม่เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับความเค้นเฉือน แต่มีความสัมพันธ์ในลักษณะความเค้นเฉือนยกกำลังดังสมการ (2.48)

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

ในกรณีที่เรารายค่าคงตัวของ k และ m ของไหลวีส์โคอีลาสติกนั้น เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความดัน โดยแทนค่า $f(\tau) = (1/k) \tau^m$ ลงในสมการ (2.42) จะได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

หรือ

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

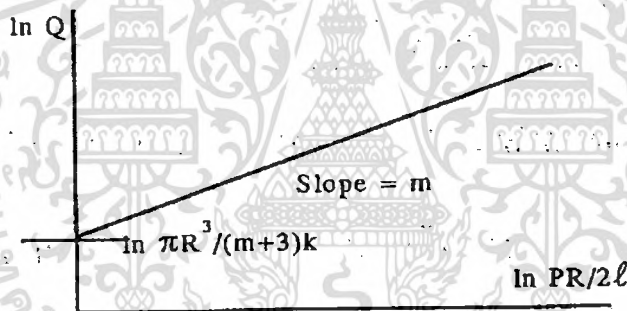
หรือความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับความดันเขียนเป็น

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

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

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

หรือ

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

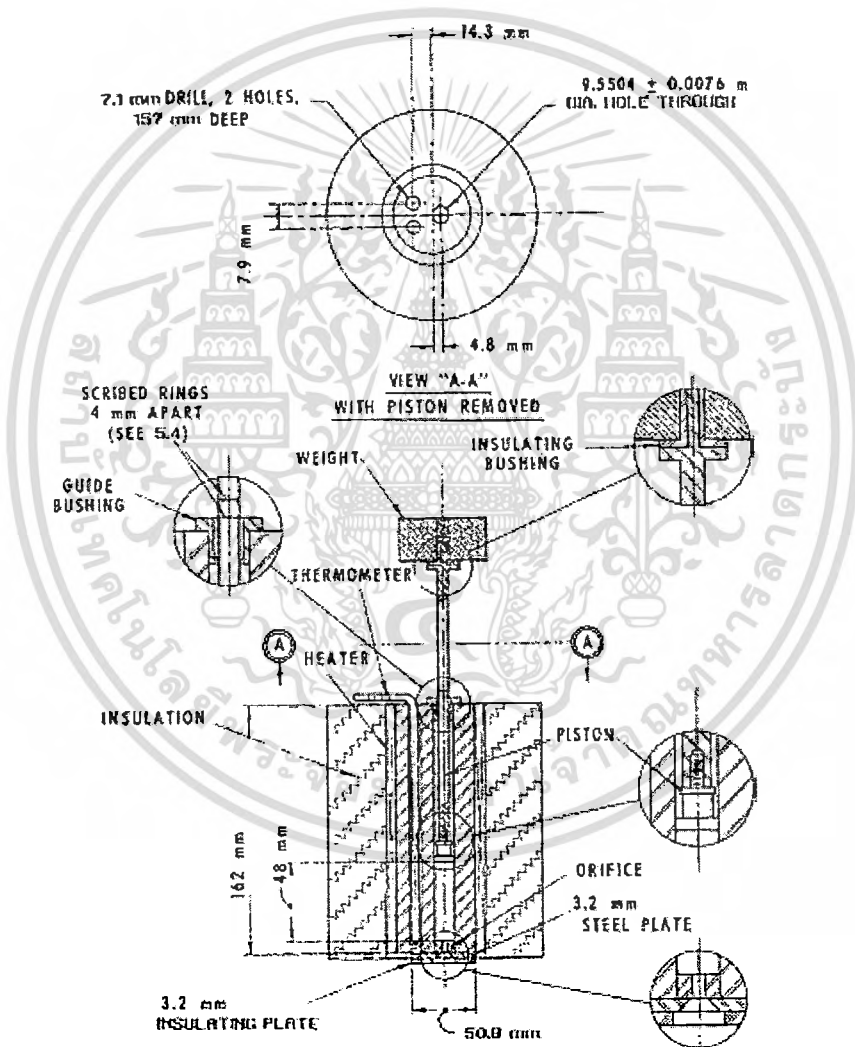
จากการหาค่าอนุพันธ์จะได้ว่า

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

พิจารณา เทอมแรกทางด้านขวามือในสมการ (2.54) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $D(\tau_R)$ หรือเรียกว่าอัตราเฉือนปรากฏ ซึ่งมีค่าเท่ากับอัตราเฉือนเมื่อคิดค่าของไหลเป็นของไหลนิวทอนเนียน เทอมที่สองด้านขวามือเป็นเทอมจึงเปรียบเสมือนกับเทอมที่แก้ไขให้ถูกต้องสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ทฤษฎีการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก [1],[7]

เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกมีการทำงานเหมือนกับ ลีโอมิเตอร์ แต่เป็นการทดสอบพลาสติก ภายใต้เงื่อนไข การกำหนดแรงเฉือนต่ำ (low shear)ถึงแม้ว่าค่า ความเค้นเฉือน หรือ อัตราเฉือน ที่กำหนดหรือทดสอบ จะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับค่าที่ใช้ในกระบวนการผลิต เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก ถูกออกแบบเพื่อใช้ ทดสอบหาค่า อัตราการไหล ตามมาตรฐาน ISO 1133 และ ASTM D 1238 ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ISO1133 ซึ่งเข้ามา แทนที่ของมาตรฐานของประเทศต่างๆเช่น 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 พลาสติกทั่วไปกับพลาสติกที่เดิมสาร

วิธีที่ 2 automatic method (Procedure B) วิธีนี้จำเป็นต้องทราบค่า ความหนาแน่นขณะหลอมเหลว เพื่อประกอบใน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การทดสอบนี้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับพลาสติกประเภทพอลิโอเลฟิน (PE,PP) แต่สามารถใช้กับเทอร์โมพลาสติกอื่น ๆ ที่มีความหนืดของพลาสติกค่อนข้างเหนียวและพลาสติกที่มีความเสถียรต่อความร้อน 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	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

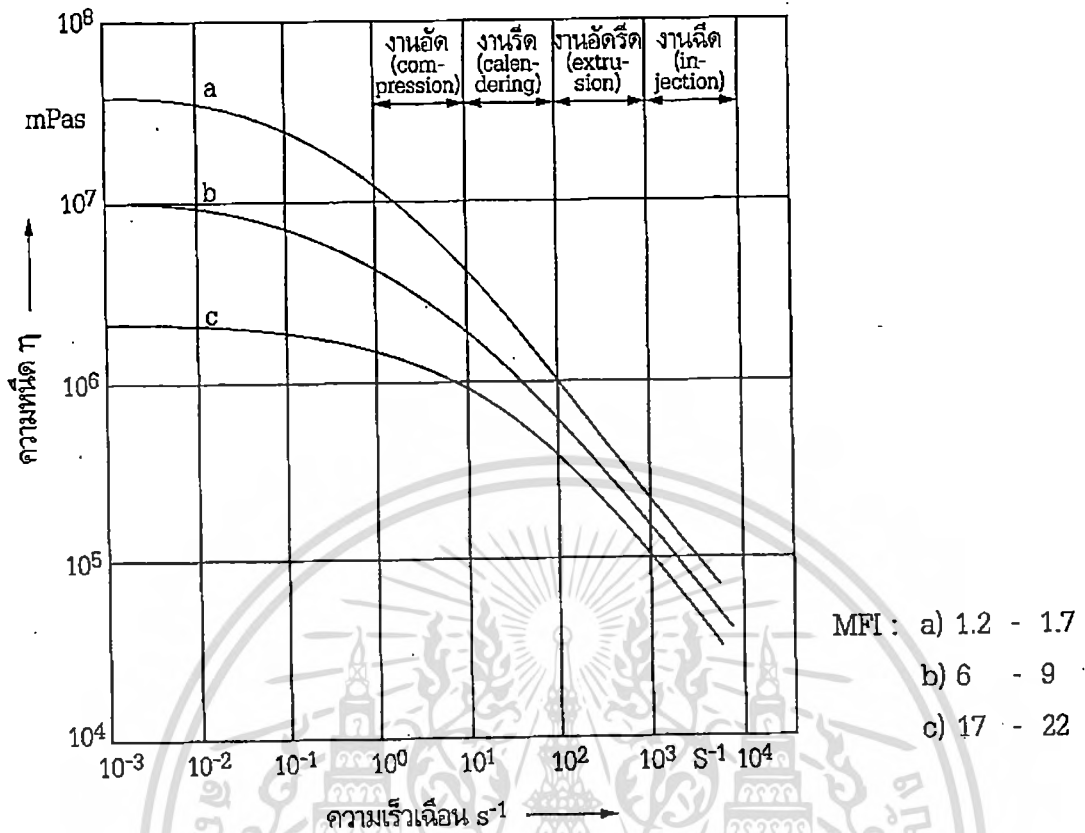
Polypropylene	230/2.16	
Polyphenyl sulfone (PPSU)	365/5.0	380/2.16
Polystyrene	200/5.0	260/1.2
	230/3.8	190/5.0
Polysulfone (PSU)	343/2.16	360/10
Polyterephthalate	250/2.16	210/2.16
	285/2.16	
Poly (vinyl acetal)	150/21.6	
Poly (vinylidene fluoride)	260/21.6	
	230/5.0	
Poly (phenylene sulfide)	315/5.0	
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	

ในการหาคุณสมบัติในการไหลของพลาสติกเหลวในทางปฏิบัติที่ใช้งานในช่วงของความเร็วในการเลื่อนสูง การหาค่าอัตราการไหลอย่างเดียวจะไม่พอเพียง เพราะในการทดสอบมีความเร็วเลื่อนต่ำมากจึงอาจเป็นไปได้ว่า พลาสติกสองชนิดที่มีค่า อัตราการไหล เท่ากัน แต่มีparameter ในการทำงานต่างกันอย่างสิ้นเชิง

ในการหาค่าคุณสมบัติในการไหลของพลาสติกเหลวสำหรับการทำงานที่ความเร็วเลื่อนสูงๆ จะต้องใช้ capillary rheometer ในการทดสอบ ซึ่งจะบอกคุณสมบัติการไหลของพลาสติกเหลวในอุดมคติได้แน่นอนกว่า

สาเหตุที่คุณสมบัติในการไหลมีความยุ่งยากก็คือ พลาสติกเหลวไม่ใช่ของเหลวในอุดมคติ ทั้งนี้เพราะความหนืดไม่คงที่แต่จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วเลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นอยู่กับความเร็วเฉือน LDPE ที่อุณหภูมิ 150 °C [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การดำเนินงาน

3.1 การวางแผนการดำเนินงาน

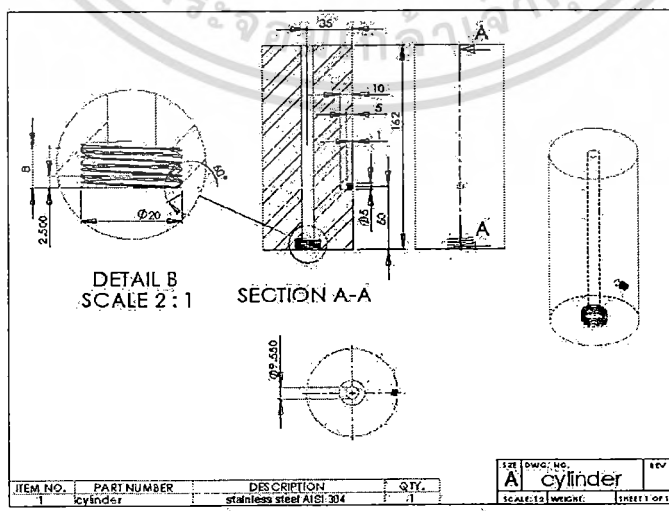
- 1 เก็บข้อมูลเกี่ยวกับการสร้างเครื่องอัดอากาศไหลของพลาสติก
- 2 เสนอราคา พร้อมกับรายละเอียดต่างๆเกี่ยวกับวัสดุ ให้แก่อาจารย์ที่ปรึกษา
- 3 สั่งซื้อวัสดุอุปกรณ์ทั้งหมด
- 4 จัดสร้าง
- 5 ทำการทดสอบการทำงานของเครื่อง
- 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.2 การออกแบบ

การออกแบบเครื่องทดสอบอัดอากาศไหลของพลาสติก ได้ออกแบบตาม ASTM D 1238 และ ISO 1133 เพื่อให้เครื่องทดสอบเพื่อให้เครื่องสามารถทดสอบได้ตามมาตรฐานและทำการปรับปรุงแบบในบางส่วนที่ไม่ส่งผลกระทบต่อผลการทดลอง เพื่อให้ง่ายต่อการดำเนินงาน แบบเครื่องทดสอบอัดอากาศไหลของพลาสติก มีดังนี้

3.2.1.แบบของชุดกระบอกกลม

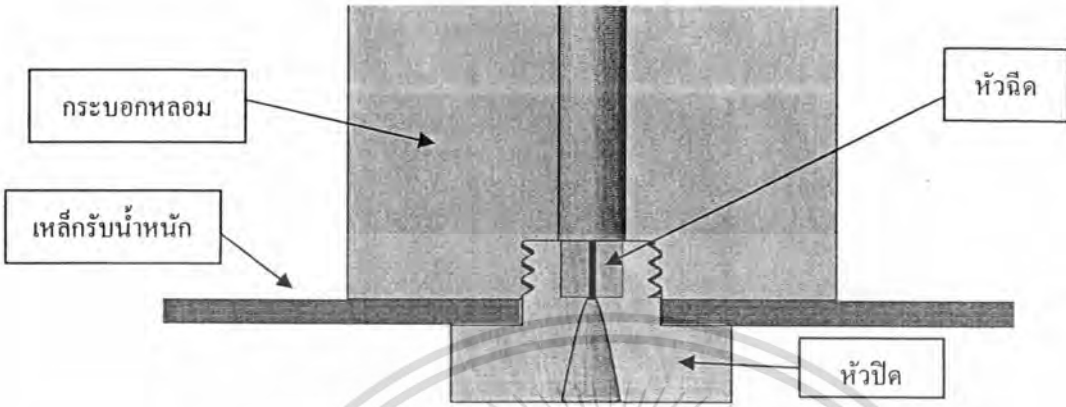
ออกแบบกระบอกกลมใหม่ เพราะ แบบของกระบอกกลมตามมาตรฐานนั้น ต้องเจาะรูเพื่อใส่เทอร์โมคัปเปิลที่ลึกมาก จึงเปลี่ยนมาเจาะด้านข้าง แล้วเลือกเทอร์โมคัปเปิลแบบเกลียวแทน ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบอกกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2. ออกแบบหัวปิดด้านล่างใหม่ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความสะอาด ทำให้เปลี่ยนหัวฉีดได้ง่ายขึ้น และ ยังไว้ยึด ครอบกลมกับเครื่องอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การประกอบหัวปิด

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

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

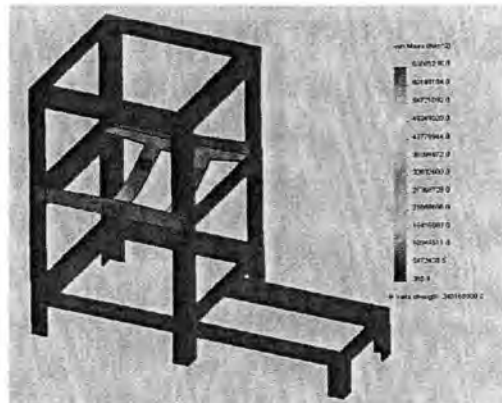
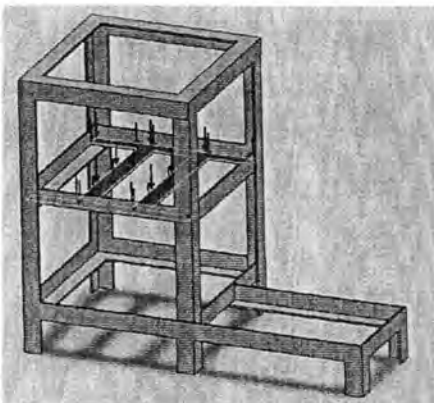
$$89.635 = \frac{150}{A_1}$$

$$A_1 = 1.6734 \text{ mm}^2$$
(3.1)

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

3.2.3. แบบของโครงเครื่อง

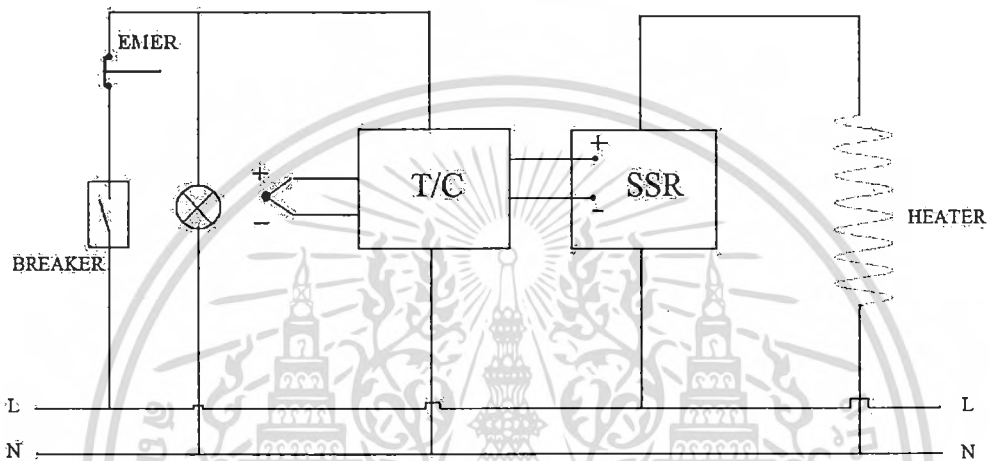
ได้ทำการวิเคราะห์แรงที่จะกระทำต่อ โครงสร้าง โดย โปรแกรมคอมพิวเตอร์ กำหนดวัสดุเป็นเหล็กฉาก 1"x1"x1/8" SS 400 แรงกระทำกับ โครงเหล็ก 300 นิวตัน ซึ่งมีค่าความปลอดภัยเท่ากับ 5 สามารถนำไปใช้งาน ได้ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4



เอกสารรูปที่ 3.3 แรงที่กระทำต่อ โครงสร้างเครื่องงานรูปที่ 3.4 การเสียบรูปและส่วนที่รับความเค้นใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4. การออกแบบวงจรไฟฟ้า

วงจรควบคุมให้ใช้คู่ทั้งแบบ ON-OFF และ แบบ PID วงจรจะทำงานเมื่อเปิดเบรกเกอร์ กระแสไฟฟ้าจะไหลไปยังตัวควบคุมอุณหภูมิ T/C ตัวควบคุมอุณหภูมิทำการรับค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิลที่ต่อมาจากกระบอกลอมนมาแสดงที่ตัวควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นทำการปรับค่า โซลิดสเตทรีเลย์ SSR จะทำงานทำให้เครื่องทำความร้อนมีแรงเคลื่อนไฟฟ้า ขดลวดความต้านทานจะทำงาน เมื่อเทอร์โมคัปเปิลรับค่าอุณหภูมิภายในกระบอกลอมนเท่ากับค่าที่ปรับไว้ ตัวควบคุมอุณหภูมิจะส่งสัญญาณให้โซลิดสเตทรีเลย์ทำการตัดวงจร ทำให้ไม่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้า เครื่องทำความร้อนไม่ครบวงจรจึงไม่ทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรควบคุมการทำงานของเครื่องทดสอบการอัดการไหลของพลาสติก

3.3 ออกแบบชุดกระบอกลอมนใหม่ เนื่องจากเกิดปัญหาเครื่องทดสอบมีอัตราการไหลที่ช้ากว่าปกติ

3.3.1 หาสาเหตุของปัญหา

ทำการคำนวณในส่วนที่คาดว่าจะมีการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากการใส่หัวปิดเข้ากับกระบอกลอมน ภาพประกอบการคำนวณแสดงดังรูปที่ 3.6

กำหนดให้

$$T_1 = \text{ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ } 230^{\circ}\text{C}$$

$$T_2 = \text{อุณหภูมิบริเวณเหล็กกล้าไร้สนิมสัมผัสกับเหล็กที่เป็นหัวปิด}$$

$$T_3 = \text{อุณหภูมิบริเวณผนังภายนอกของเหล็ก}$$

$$T_4 = \text{อากาศมีอุณหภูมิ } 25^{\circ}\text{C}$$

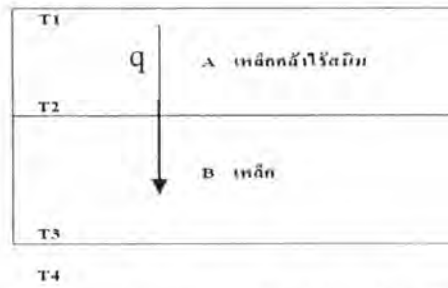
$$h = \text{มีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเป็น } 25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

$$k = \text{ค่าการนำความร้อน (W/m K)}$$

$$L = \text{ความหนาของโลหะ (m)}$$

$$q'' = \text{ฟลักซ์ของความร้อน (W/ m}^2\text{)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ภาพประกอบการคำนวณอุณหภูมิระหว่างแผ่นอิฐกับฉนวนกับเหล็กหัวปิด

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

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

จากสมการที่ (3.2)

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

$$T_2 = 195^\circ C$$

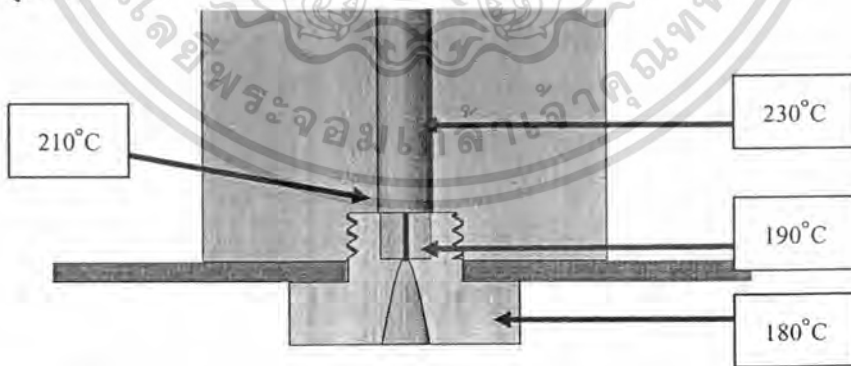
$$T_3 = T_1 - \left[\left(\frac{L_a}{k_a} \right) + \left(\frac{L_b}{k_b} \right) \right] \times q'' \tag{3.3}$$

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 ความร้อนที่ผนังของเหล็กหัวปิดมีการถ่ายเทความร้อนออกไปมากเกินไปเกินกว่าจะยอมรับได้ ซึ่งจะส่งผลให้ความร้อนในกระบอกหลอมไม่เท่ากันอย่างที่คาดการณ์ไว้ในตอนแรก ต่อมาเพื่อทำการยืนยันชั้นค่าความร้อนทางทฤษฎีเราได้ตั้งอุณหภูมิเครื่องทดสอบไว้ที่ 230°C แล้วใช้เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิจริง เพื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆขณะให้ความร้อนที่ 230 องศาเซลเซียส

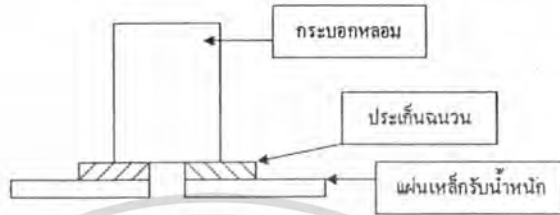
3.3.2 สรุปสาเหตุของปัญหา

1. หัวปิดซึ่งเป็นเหล็กขี้ออกมาอาจจะมีการถ่ายเทความร้อนออกไปทำให้ความร้อนที่หัวฉีดลดลงตามไปด้วย
2. กระบอกหลอมตั้งอยู่บนเหล็กที่สามารถนำความร้อนออกไปได้ง่าย จนทำให้อุณหภูมิที่หัวปิดและหัวฉีด

เอกสารนี้ **เนื่องกว่าที่ควร** สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

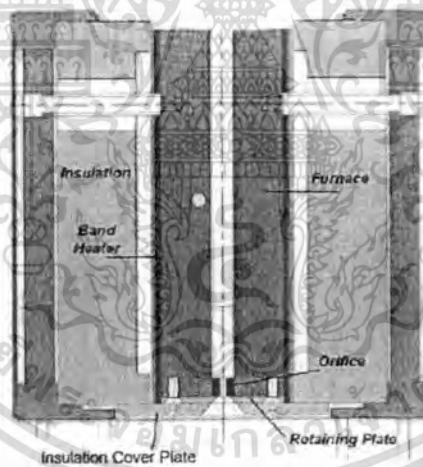
3.3.3 ทำการแก้ไขปัญหา

1. ทำการออกแบบชุดกระบอบอกใหม่ให้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนออกให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ และ ปรับแบบให้ใกล้เคียงกับเครื่องมาตรฐานมากขึ้น
2. นำประเด็นจนวนมาลงกระบอบอกเพื่อไม่ให้ความร้อนถูกถ่ายเทไปที่เหล็กรับน้ำหนักด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.8



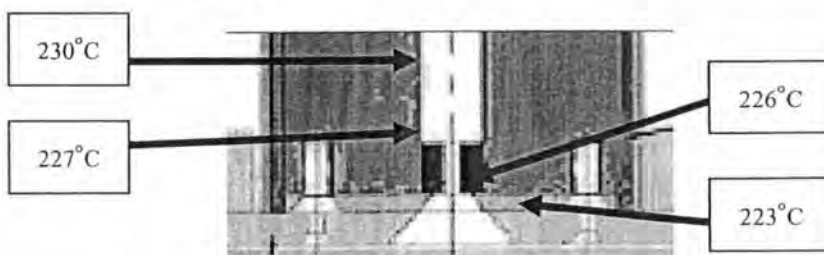
รูปที่ 3.8 การประกอบประเด็นจนวนเข้ากับเครื่อง

3. ออกแบบชุดจับยึดกระบอบอกใหม่ โดยใช้ชนิดเหล็กกล้าไร้สนิม ยึดกระบอบอกแทนหัวปิด
 4. นำจนวนทนความร้อนสูงหุ้มรอบๆกระบอบอก
- จากที่ผู้จัดทำได้คิดแก้ไขไว้จะสามารถเขียนแบบออกมาได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ภาพตัดขวางของชุดกระบอบอกที่ได้ออกแบบใหม่

หลังจากทำการแก้ไขกระบอบอกใหม่แล้วทำการวัดอุณหภูมิจริงอีกครั้งตามจุดต่างๆ พบว่าอุณหภูมิในกระบอบอกลดลงน้อยมาก ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งคาดว่าจะไม่มีปัญหาเรื่อง อุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมออีกต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.10 อุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ จะให้ความร้อนที่ 230 องศาเซลเซียส ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 = $0.28 \times 0.25 \text{ m}$ มีด้านที่ใช้ผนังอิฐทนไฟ ใช้กฎของ Fourier

คำนวณฟลักความร้อนหาได้จากสมการ

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

จากสมการ

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

จะได้

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

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

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

$$Q_x = 94.5 \text{ W}$$

ผนังด้านที่ใช้อิฐทนไฟมี 5 ด้าน

$$Q_x = 94.5 \times 5$$

$$= 472.5 \text{ W}$$

ส่วนด้านข้างมีประเก็นฉนวน 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]

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาค่าจากสมการที่ 6 มาแทนค่าในสมการที่ 6

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

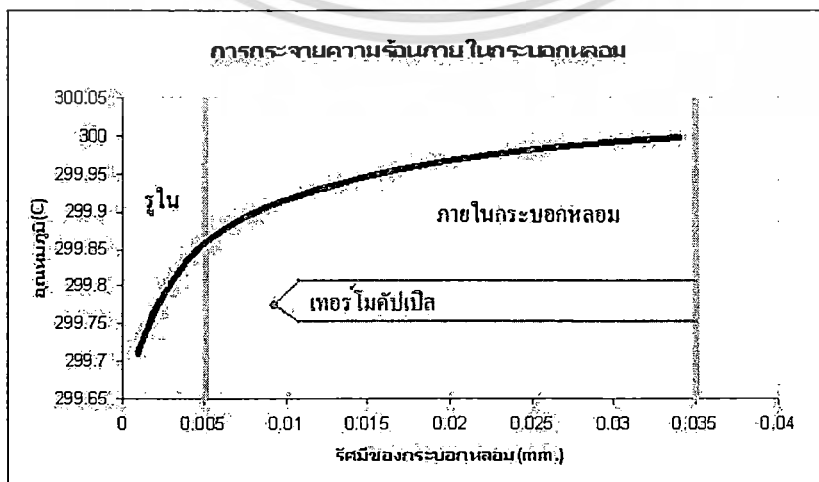
$$T_1 = 572.86k$$

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 ซึ่งคาดว่า จะไม่มีปัญหาเรื่อง อุณหภูมิ ณ จุดกึ่งกลาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.11 การกระจายความร้อนภายในกระบอกกลม ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 3.11 จะเห็นว่าถึงแม้อุณหภูมิจะตกลง ณ บริเวณตรงกลางแต่ก็ยังห่างกับอุณหภูมิของผนังภายนอกเล็กน้อย ซึ่งคาดว่า จะไม่มีปัญหาเรื่อง อุณหภูมิ ณ จุดกึ่งกลาง

3.4.3 ค่าปริมาณค่าไฟฟ้าที่เครื่องทดสอบต้องใช้

เครื่องทำความร้อนใช้ไฟฟ้า 880W เครื่องควบคุมอุณหภูมิใช้ไฟฟ้า 440W

เครื่องทดสอบใช้ไฟฟ้ารวม $880W + 440W = 1320W$

ใช้งานต่อครั้งใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมงต่อวัน

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

อัตราค่าไฟฟ้าจาก กฟผ. 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 ครอบห่อหุ้มจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304
- จัดทำลูกสูบจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304
- จัดทำไม้กระทุ้งจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304
- จัดทำโครงสร้างของเครื่องทดสอบจากเหล็ก SS400
- จัดทำกล่องควบคุม
- ตัดตั้งฉนวน
- ประกอบกระบอกเข้ากับเครื่องทดสอบ
- ตัดตั้งสายไฟฟ้าเข้ากับชุดควบคุม
- นำทุกส่วนมาประกอบกันจนเสร็จสมบูรณ์

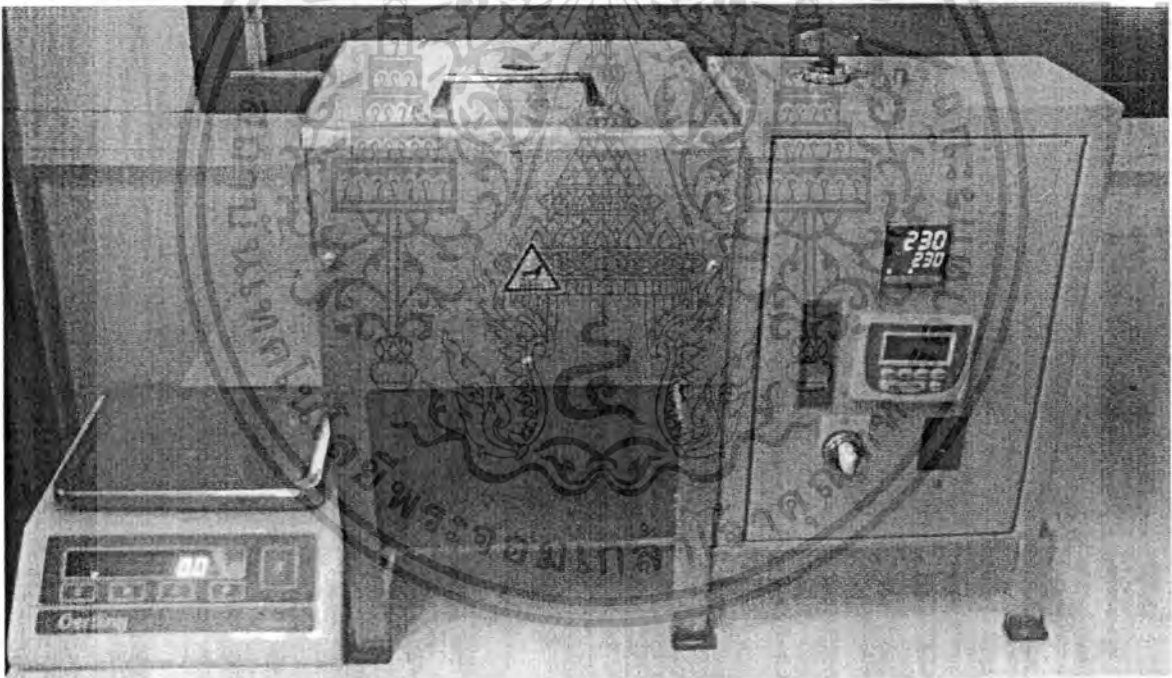
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการจัดสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

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



รูปที่ 4.1 แสดงเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ส่วนประกอบของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

จากการศึกษามาตรฐานของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกจากเครื่องต้นแบบ ได้นำข้อมูลที่ได้ออกแบบชิ้นส่วนของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2.1 ครอบกลม

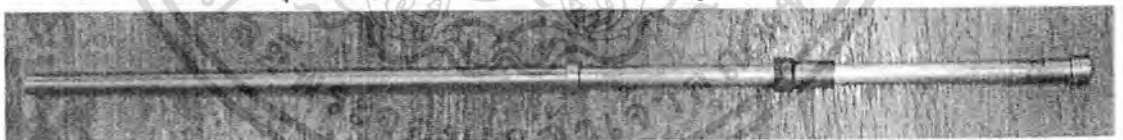
ครอบกลมทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม AISI 304 ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ความยาว 162 มิลลิเมตร เจาะรูตรงกลางขนาด 10 มิลลิเมตร ด้านข้างเจาะรูขนาด 6.5 มิลลิเมตร เพื่อใส่เทอร์โมคัปเปิล ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ครอบกลม

4.2.2 ลูกสูบ

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



รูปที่ 4.3 ลูกสูบ

4.2.3 ไม้กระทุ้ง

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

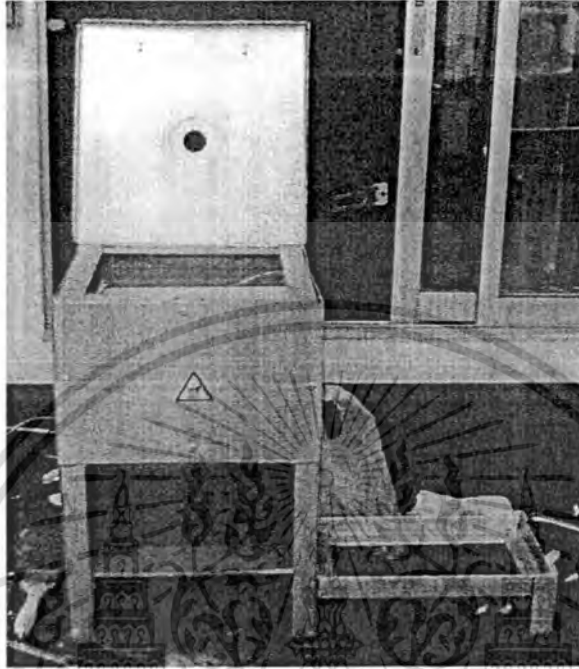


รูปที่ 4.4 ไม้กระทุ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 โครงสร้างของเครื่องทดสอบ

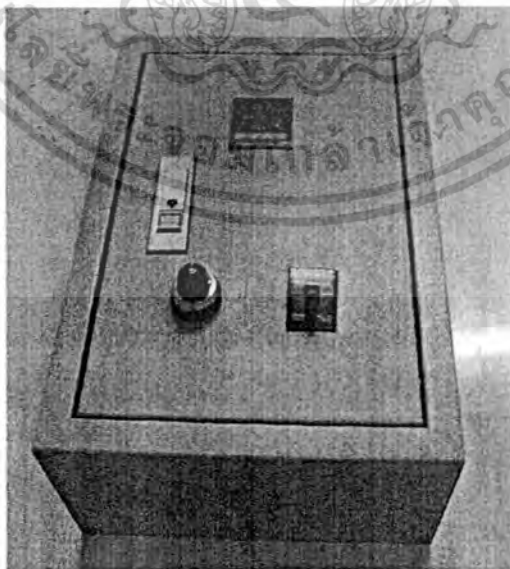
โครงสร้างโดยทั่วไปทำจากเหล็กฉาก SS400 ขนาดหน้าตัด 1 นิ้ว X 1 นิ้ว และ ผนังของเครื่องทดสอบทำจากเหล็กแผ่น ด้านมีฝาสำหรับเปิดซ่อมแซมอุปกรณ์ภายในได้สะดวก ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 โครงสร้างของเครื่องทดสอบ

4.2.5 กล่องควบคุม

กล่องควบคุมติดตั้งระบบควบคุมอุณหภูมิ มีหลอดไฟสีแดงเพื่อแสดงสถานะ มีเบรกเกอร์ไว้สำหรับเปิดปิดเครื่องทั้งหมด และมีปุ่มฉุกเฉินสำหรับกดเมื่อมีเหตุขัดข้องขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.6

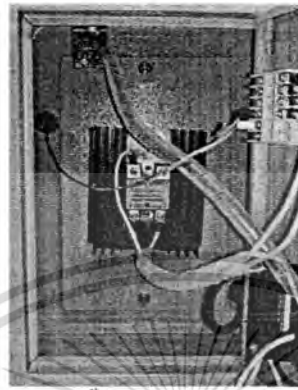


รูปที่ 4.6 กล่องควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ภายในกล่องควบคุม

ภายในกล่องควบคุม ติดตั้ง โซลิดสเตตรีเลย์ที่รับinputจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิและทำการตัดต่อไฟฟ้าที่ส่งไปยังเครื่องทำความร้อน และ มีการติดตั้งระบบไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่4.7 การติดตั้งสายไฟฟ้าเข้ากับชุดควบคุม

4.2.7 การติดตั้งฉนวน

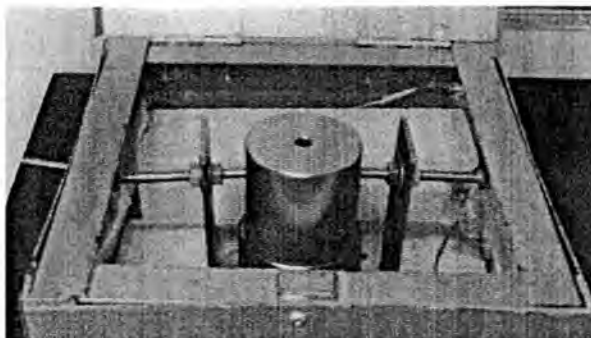
ฉนวนใช้อิฐทนไฟประกอบด้านข้าง แล้ว บุผนังด้านนอกสุดด้วยผ้าใยแก้ว ด้านล่างติดตั้ง ceramic fibre paper ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่4.8 การติดตั้งฉนวน

4.2.8 ชุดประกอบกระบอกเข้ากับเครื่องทดสอบ

เป็นอุปกรณ์ที่จะช่วยยึดกระบอกหลอมให้ติดอยู่กับ โครงสร้าง โดยมีเหล็กแผ่นหนา 4.5 มิลลิเมตร เชื่อมติดกับ โครงสร้างด้านล่าง ทำการเจาะรูทั้งแผ่นเหล็กและกระบอกหลอมเพื่อใส่หนีตเหล็กกล้าไร้สนิม แล้วทำการประกอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของกรมการศึกษานานาชาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

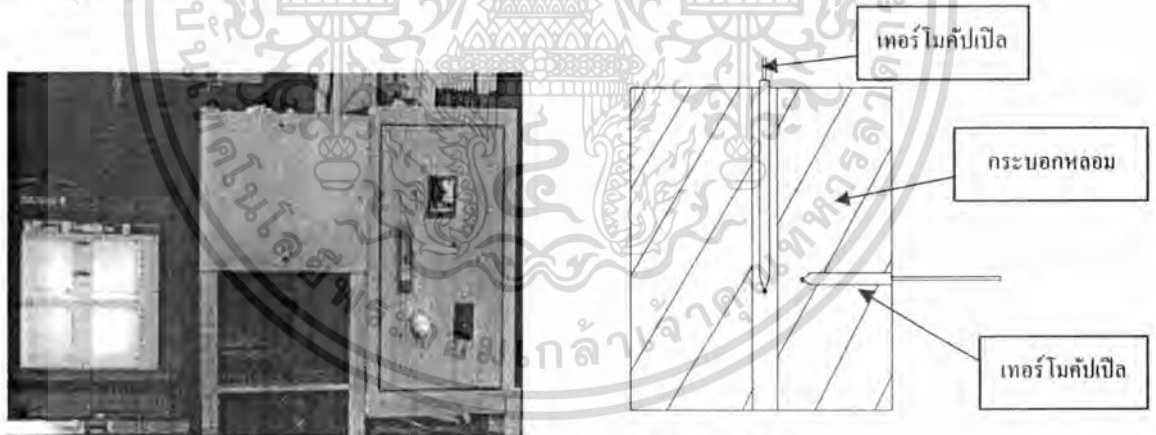
การทดสอบเพื่อพิสูจน์ว่าอุณหภูมิภายในรูของกระบอกหลอมและภายนอกกระบอกหลอมมีค่าต่างกันหรือไม่

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

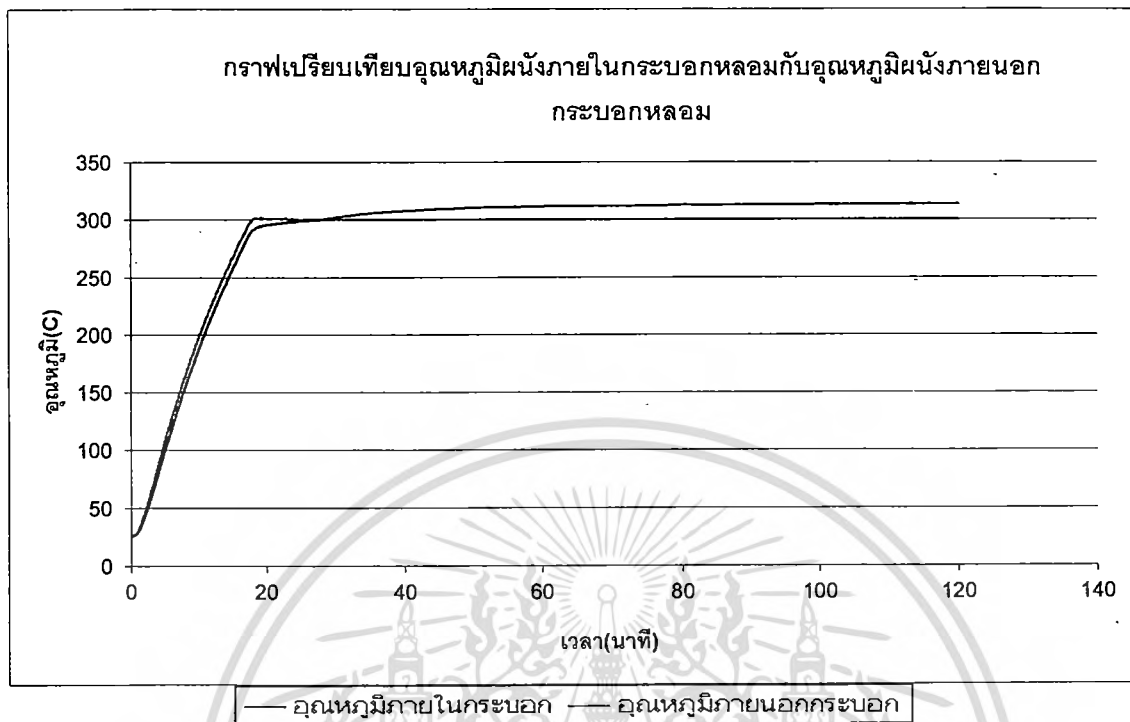


รูปที่ 4.10 การทดสอบเครื่องทางความร้อนที่อุณหภูมิ 300°C

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 การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบอุณหภูมิผนังภายในกับอุณหภูมิผนังภายนอกกระบอบอลอม

4.3.5 สรุปผลการทดลองที่ 1

จากกราฟ รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิผนังภายในและผนังภายนอกมีความต่างกันอยู่น้อยมาก และเมื่อให้ความร้อนไป 2 ชั่วโมงพบว่าเกิดความร้อนสะสมขึ้นในกระบอบอลอมทำให้ผนังภายในกระบอบอลอมมีอุณหภูมิที่สูงกว่าผนังภายนอก 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

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของกรมการศึกษานอกโรงเรียน กระทรวงศึกษาธิการ ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมการศึกษานอกโรงเรียน

ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

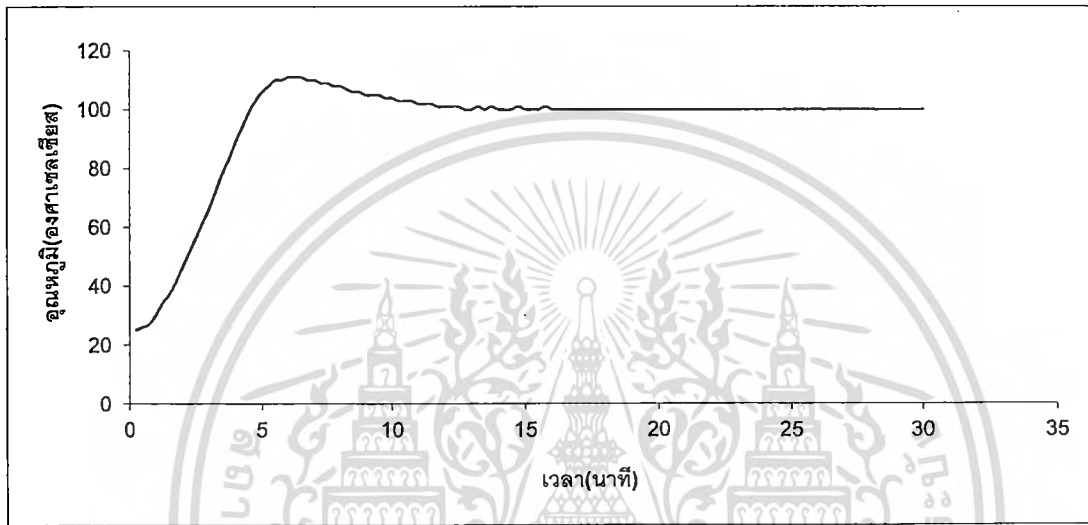
4. เมื่อเตาให้ความร้อนจนถึงเวลา30นาทีจึงหยุดการทดสอบ

5. นำค่าที่ได้จากการบันทึกมาเขียนกราฟ

4.3.9 ผลการทดลองที่2

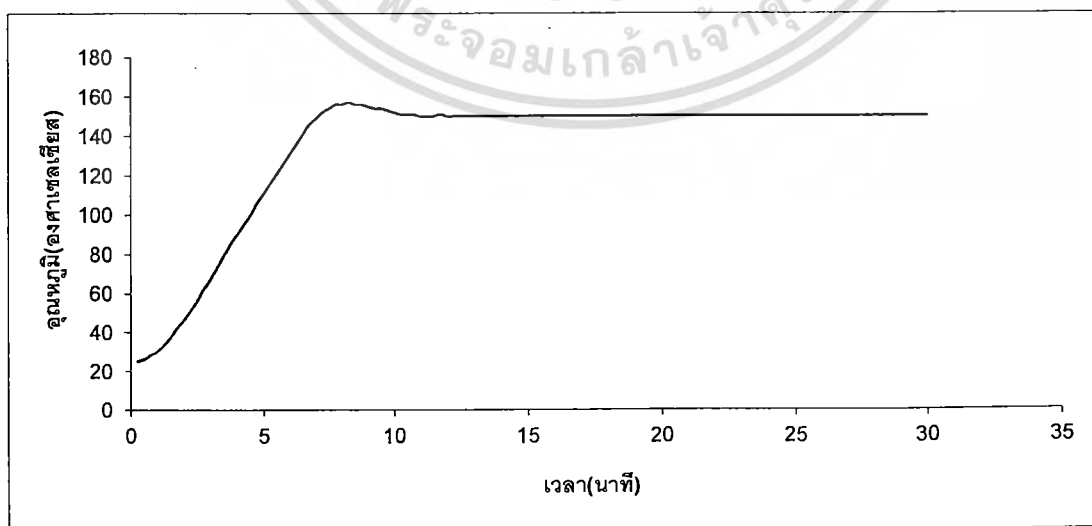
ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.12,4.13,4.14,4.15และ4.16 โดยข้อมูลผลการทดลองแสดงในตาราง ผณ.3-7

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



รูปที่ 4.12 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 100°C

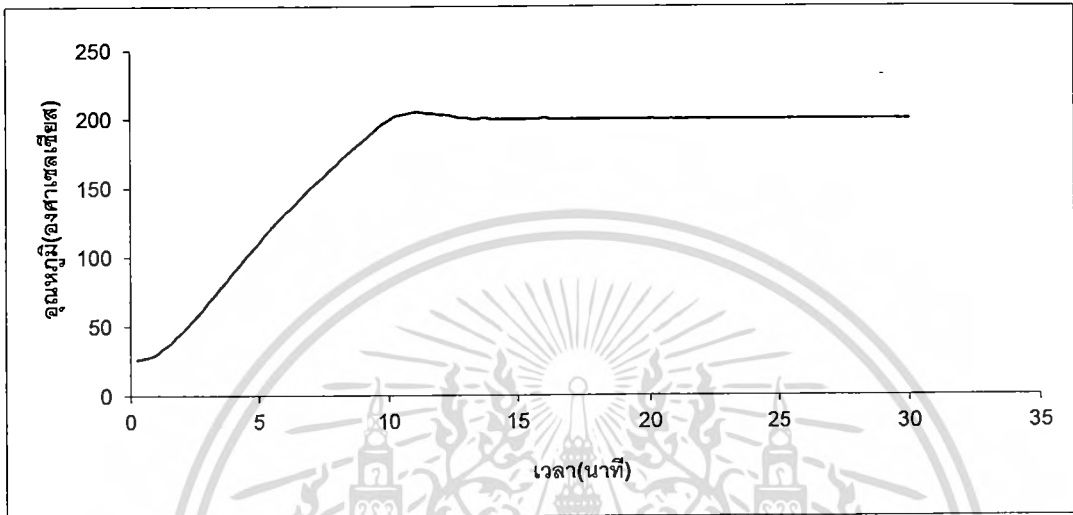
จากผลการทดลองในตาราง ผณ.4 พบว่าเมื่อตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 150°C ในช่วง 7นาทีแรก อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนเกินระดับอุณหภูมิที่ตั้งไว้จากนั้นอุณหภูมิจะค่อยๆลดลงสู่ค่าที่ได้ตั้งไว้ และ เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ประมาณ 13 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 150°C

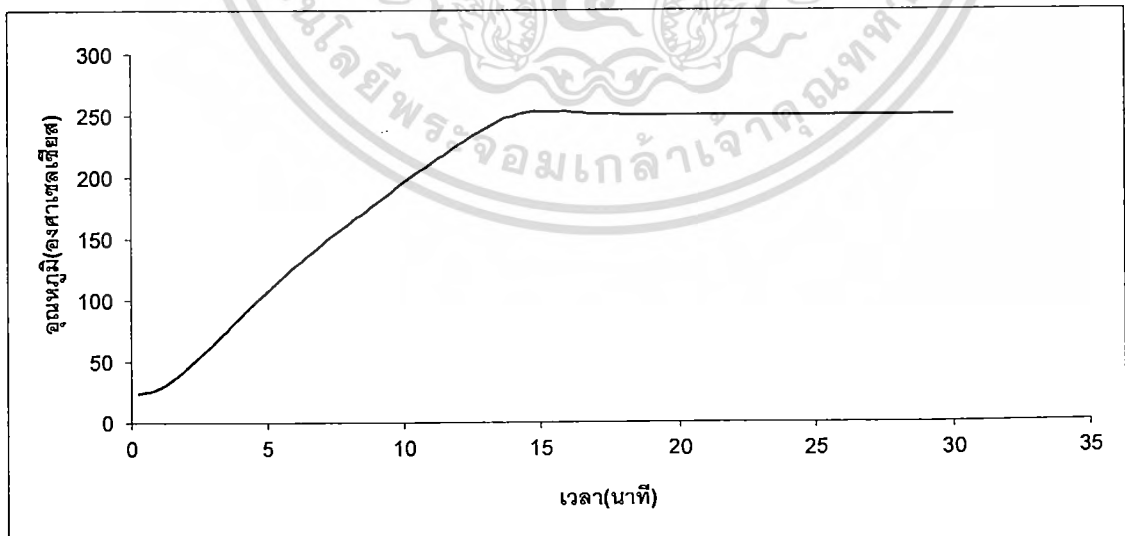
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 4.14 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 200°C

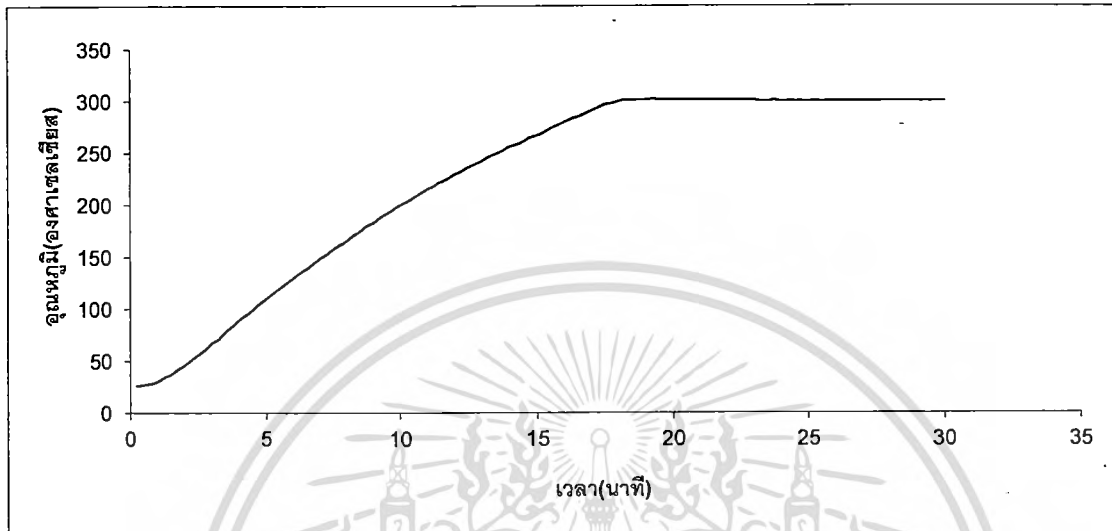
จากผลการทดลองในตาราง ผล.6 พบว่าเมื่อตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 250°C ในช่วง 15 นาทีแรก อุณหภูมิเพิ่มขึ้น จนเกินระดับอุณหภูมิที่ตั้งไว้เล็กน้อย จากนั้นอุณหภูมิจะลดลงสู่ค่าที่ได้ตั้งไว้ และ เริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 16 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่ 250°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ข้อการทดลอง

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

4.4.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1. เพื่อทดสอบเครื่องที่สร้างขึ้นทำงานได้จริงหรือไม่
2. เพื่อทดสอบว่าค่าอัตราการไหลของพลาสติกจากเครื่องที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องมากเพียงใด

4.4.3 วิธีทำการทดลอง

1. เปิดเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก
2. ทำการปรับค่าอุณหภูมิที่ต้องการ
3. ใส่พลาสติก ชนิด Polypropylene(PP) ลงไปในกระบอกหลอม
4. ปลดปล่อยให้หลอมเหลว 5 นาที

5. นำลูกสูบใส่น้ำหนักร่วม 2.16 กิโลกรัม ใส่เข้าไปในกระบอกหลอม และ จับเวลาไปพร้อมๆกัน โยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

4.4.4 ผลการทดลอง

เมื่อใส่เม็ดพลาสติกลงในกระบอกลอมแล้วทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที จากนั้นนำลูกสูบที่ใส่น้ำหนักไว้ 2.16 กิโลกรัม กดโดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลก พลาสติกที่หลอมเหลวในกระบอกลอมจะไหลผ่านหัวฉีดได้ดังแสดงในรูปที่ 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/10 นาที

ตารางที่ 4.1 ค่าอัตราการไหลของ Polypropylene (PP) ที่ได้จากเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกที่สร้างขึ้น

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

นำค่าเฉลี่ยค่าอัตราการไหลของพลาสติกที่ได้จากเครื่องทดสอบมาเปรียบเทียบกับเครื่องมาตรฐานของบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลของพลาสติกที่ได้กับค่าจากเครื่องมาตรฐาน

ค่าอัตราการไหลที่ได้จากเครื่องที่สร้าง	ค่าอัตราการไหลที่ได้จากเครื่องมาตรฐาน	%ความคลาดเคลื่อน
10.76667	11	2.12%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 สรุปผลการทดสอบ

จากการที่นำค่าอัตราการไหลของพลาสติกชนิดเดียวกันมาเปรียบเทียบ ค่า%ความคลาดเคลื่อนมีเพียง2.12% ซึ่งน้อยมาก เป็นเหตุให้เชื่อได้ว่าเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกที่ได้สร้างขึ้นนั้นมีความสามารถในการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกใกล้เคียงเครื่องทดสอบอัตราการไหลมาตรฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกขึ้นเพื่อใช้ศึกษาและทดลอง ได้ผล ดังต่อไปนี้

1. สามารถสร้างเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติกตามที่ออกแบบไว้ มีขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ให้ความร้อนได้สูงสุด 300 องศาเซลเซียส แรงดันไฟฟ้า 220 โวลต์ กำลังไฟฟ้า 880 วัตต์ ควบคุมอุณหภูมิโดย เทอร์โมคัปเปิลชนิด J ภายในประกอบด้วยเครื่องทำความร้อนแบบรีดท้อ 1 ชุด ฉนวนกันความร้อนทำจากอิฐทนความร้อน ชุดควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิทัล น้ำหนักที่ใช้กด (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

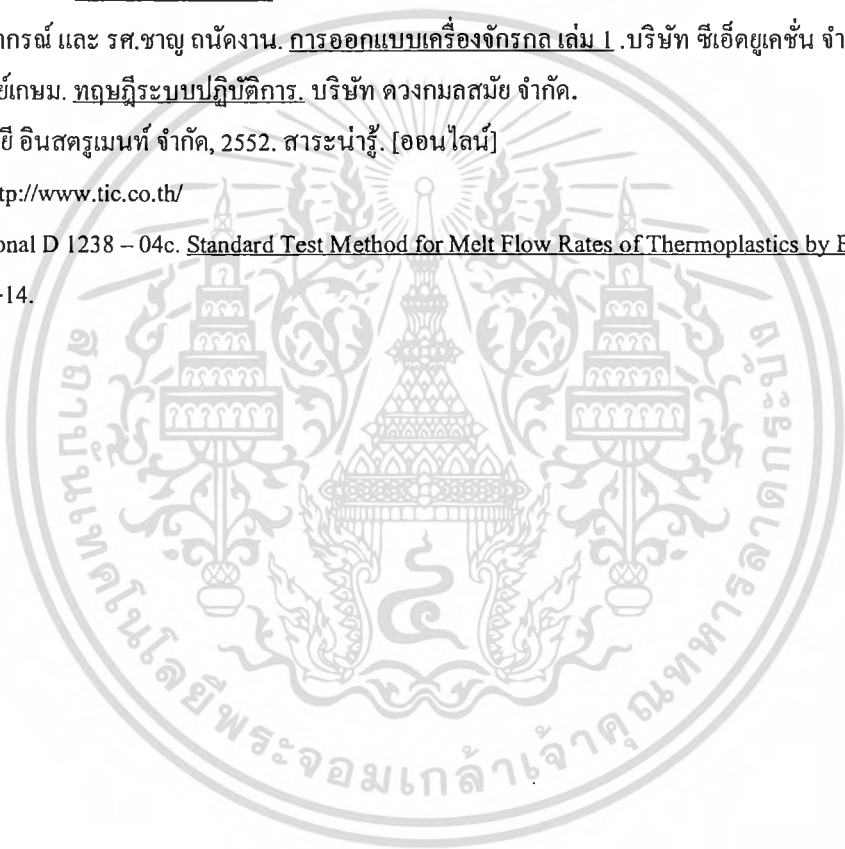
1. อุณหภูมิในรูภายในกระบอกล้อมในบั้งตำแหน่งมีอุณหภูมิต่างกันมากเกินไปจนส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลของพลาสติกคลาดเคลื่อน
2. มีพลาสติกเก่าเหลือติดค้างอยู่กระบอกล้อม

5.2.2 แนวทางแก้ไข

1. ทำการออกแบบให้ชุดกระบอกล้อมใหม่ให้มีการถ่ายความร้อนออกให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ และเพิ่มประกันฉนวนมารองกระบอกล้อมเพื่อลดการถ่ายเทความร้อนจากกระบอกลงไปสู่แผ่นเหล็กที่รองรับน้ำหนักอยู่ เมื่อลดการสูญเสียความร้อนลงจะทำให้กระบอกล้อมมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันในทุกๆตำแหน่ง และ จะทำให้ค่าอัตราการไหลของพลาสติกมีความแม่นยำยิ่งขึ้น
2. ต้องมีการทำความสะอาดทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนชนิดของพลาสติกที่จะทำการทดสอบ หรือ ทำความสะอาดทุกครั้งหลังเลิกใช้เครื่อง และ เมื่อทำการทดสอบอาจจะไม่ต้องจับเวลาในช่วงแรกที่พลาสติกไหลออกมาเพราะอาจจะมีพลาสติกชนิดอื่นติดค้างอยู่ ปล่อยให้ไหลออกมาเล็กน้อยก่อนแล้วค่อยจับเวลา เพื่อให้ได้ค่าอัตราการไหลของพลาสติกชนิดนั้นๆที่แม่นยำที่สุดสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. รศ.บรรเลง ศรีนิล, 2546. เทคโนโลยีพลาสติก(ฉบับปรับปรุง)กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น),
2. มนัส แซ่ค่าน. รีโพลีเอ็องตัน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โพธิ์เพช.
3. รศ. มนตรี พิรุณเกษตร. การถ่ายเทความร้อน. บริษัท วิทยพัฒน์ จำกัด .
4. ศ.ดร.วิวิธ อึ้งภากรณ์ และ รศ.ชาญ ถนัดงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1 .บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด(มหาชน).
5. ผศ. สุจิตรา อุดลย์เกษม. ทฤษฎีระบบปฏิบัติการ. บริษัท ดวงกลมสมัย จำกัด.
6. บริษัท เทคโนโลยี อินสตรูเมนต์ จำกัด, 2552. สารระนำรู้. [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.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก
คู่มือการใช้เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการใช้งานเครื่องทดสอบอัตราการใช้ของพลาสติก

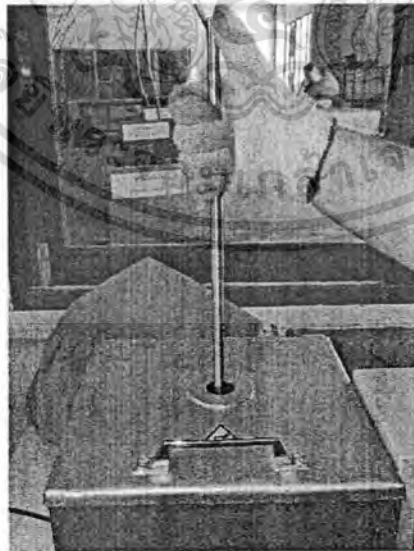
1. เปิดเครื่องแล้วตั้งอุณหภูมิที่จะใช้ในการทดสอบทิ้งไว้ 30 นาที



2. ทำการกรอกเม็ดพลาสติกเข้าไปในกระบอกทดสอบ โดยกรอกให้เต็ม



3. ใช้เหล็กกระทู้ให้แน่นจนเต็มกระบอกทดสอบ แล้วทิ้งให้เม็ดพลาสติกหลอม ใช้เวลา 5 นาที

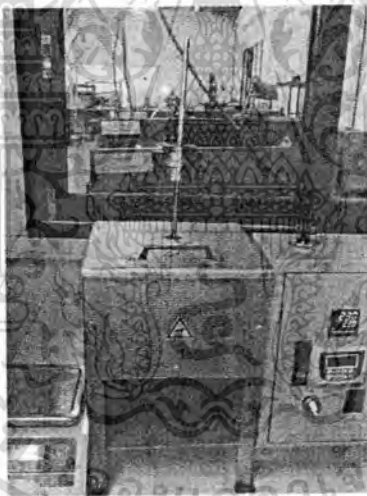


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.เอาลูกสูบที่ใส่ค้อน้ำหนักตามเกณฑ์มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ มาใส่ตรงกระบอก โดยขณะปล่อยค้อน้ำหนักลงมา จะทำการจับเวลาไปพร้อมกัน



5.รอให้พลาสติกไหลออกมา ใช้เวลากี่นาทีก็ได้



6.เอาพลาสติกที่ไหลออกมาไปชั่งน้ำหนัก

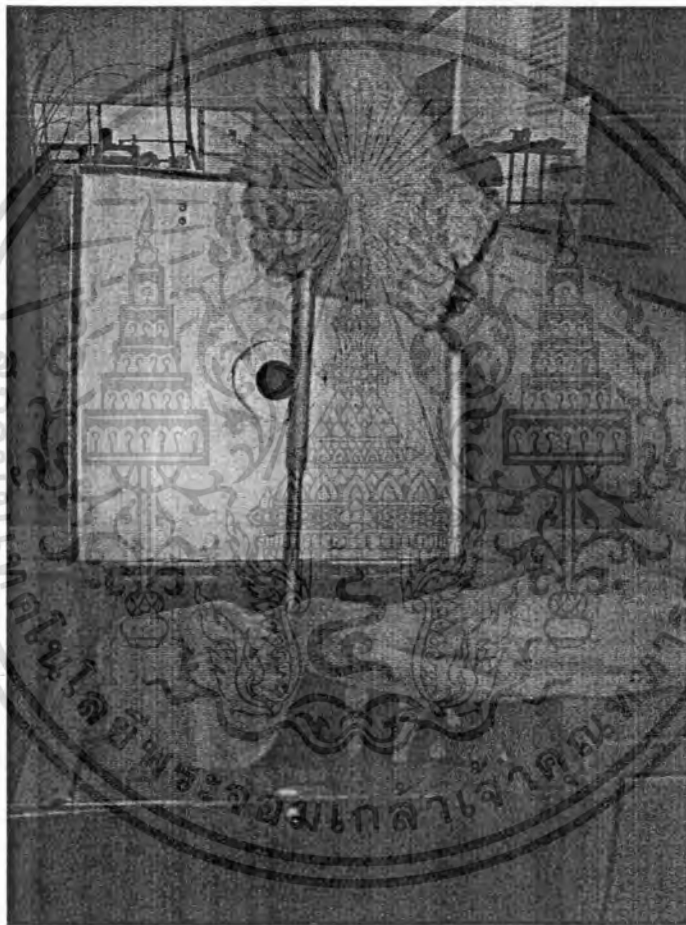


7.นำค่าที่ได้ไปเทียบเป็นอัตราการไหล เป็นหน่วย กรัม/10นาที จะได้ค่าอัตราการไหลของพลาสติกชนิดที่ได้ทำ

การทดสอบอยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทำความสะอาดเครื่องทดสอบอัตราการใช้ของพลาสติก

1. หลังใช้งานเครื่องเสร็จให้อุ่นเครื่องทิ้งไว้
2. ใช้ผ้าขาวบางมาหุ้มตัวกระทงที่ใช้สำหรับทำความสะอาดเครื่อง
3. ใช้ตัวกระทงที่หุ้มผ้าแล้ว กระทงเข้าไปในกระบอกล้างขึ้นลงๆ



ในส่วนของผู้ปฏิบัติงานเมื่อใช้เครื่องเสร็จก็จะเอาออกมาใช้ผ้าขาวบางเช็ดทำความสะอาด ถ้าปล่อยทิ้งไว้พลาสติกจะแข็งทำให้ทำความสะอาดยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ราคาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผข. 1 ราคาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้

วัสดุ และ อุปกรณ์	จำนวน	ราคา(บาท)
เหล็กฉาก 1"x1"x1/8" ยาว 6 เมตร	1	180
ค้อนน้ำหนัก	8	750
เหล็กกล้าไร้สนิม Ø 70mm.ยาว165mm.	1	740
เหล็กกล้าไร้สนิม Ø 12mm.ยาว1000mm.	1	250
น็อต กิโลกรัมละ 65 บาท	1 Kg.	65
แผ่นเหล็ก 4.5X255X255	1	80
แผ่นเหล็ก 4.5X255X255 รู 50	1	105
เครื่องควบคุมอุณหภูมิ MACD-MSF-EN	1	2160
Solid State Relay I/P 3-32VDC,O/P	1	480
Heat Sink 1 PHASE	1	360
เทอร์โมคัปเปิล แบบเกลียว FWJ-14A-1M T/C TYPE J ออกสาย.	1	136
เครื่องทำความร้อนแบบรีดท่อ Ø 70mm. ยาว 100mm.220V 880W	1	420
ตู้ควบคุม	1	450
เบกเกอร์	1	120
ไฟแดง	1	80
สายไฟAC (YAZAKI)	4เมตร	70
สายไฟ	1เมตร	60
หางปลา	10	20
สวิตช์กดลัด	1	130
เคเบิลแกน	3	30
ปลั๊ก2ขากลม	1	35
สีน้ำมัน Temco	1	110
สีรองพื้น	1	100
ทินเนอร์	1	35
ยางขาโต๊ะ	6	50
กาวติดเหล็ก	1	90
ผ้าใยแก้ว	1ตารางเมตร	120
ฉนวนกันความร้อน(ใยแก้ว)หนา3นิ้ว ความหนาแน่น12kg/m3	1ม้วน	335
เม็ดพลาสติก PP,PS,ABS,LDPE	3-4 Kg	ฟรี
ภาษีมูลค่าเพิ่ม 7 %		529.27
รวม		8090.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

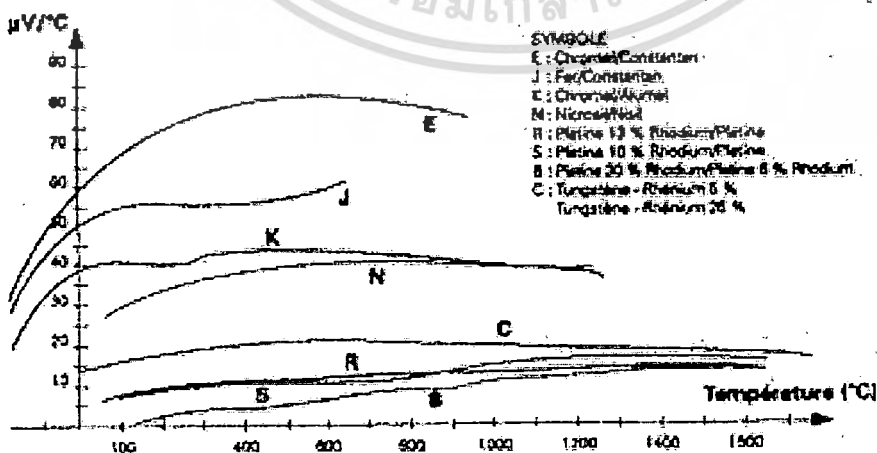


ภาคผนวก ก
ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์ที่ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผค.1 ข้อมูลทางเทคนิคของเทอร์โมคัปเปิล

TC	Min Temp C	Max Temp C	Min Temp mV	Max Temp mV	Min Temp $\mu\text{V}/\text{C}$	Max Temp $\mu\text{V}/\text{C}$
J	-210	-100	-8	-4	19	41
	-100	150	-8	8	41	55
	150	1200	+8	69	55	57
K	-200	-50	-6	-2	15	35
	-50	200	-2	8	35	40
	200	1360	+8	54	40	33
T	-200	-100	-6	-3	15	28
	-100	175	-3	8	28	50
	175	400	8	20	50	61
E	-200	-60	-8	3	25	50
	-60	125	3	8	50	70
	125	1000	8	76	70	75
R	-50	70	-1	1	3	6
	70	800	1	8	6	12
	800	1768	8	21	12	12
S	-50	150	-1	1	4	8
	150	860	1	8	8	11
	860	1768	8	19	11	10
B	250	600	1	2	3	6
	600	1300	2	8	6	10
	1300	1820	8	14	10	12
N	-200	-110	-4	-2	10	20
	-110	260	-2	8	20	34
	260	1300	8	47	34	36



ที่มา: บริษัท เทคโนโลยี อินสตรูमेंท์ จำกัด ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผค.2 ข้อมูลทางเทคนิคของอิฐทนไฟที่เลือกใช้

	INSULATING FIREBRICK					WHITE BRICK
	PC-2	B-1	B-2	C-1	C-2	
Physical Data (Typical)						
Maximum Service Temperature. °C	1400	900	1000	1300	1400	26-27
Refractoriness. SK(Sager Cone)	1.35-	0.65-0.72	0.75-0.80	0.75-0.80	0.85-0.90	2.05-2.10
Bulk Density. gm/cc	1.45	70-75	70-75	70-72	65-70	14-20
Apparent Porosity. %	45-50					8-10
Water absorption. %		10-15	20-30	30-40	40-50	250-400
Cold Crushing Strength. kg/cm^2	110-130	10-12	10-12	15-20	20-25	40-70
Modulus of Rupture, kg/cm^2	20.0-					
Thermal Conductivity. Kcal/hr.m. °C at 350 °C	30.0	0.17	0.18	0.30	0.38	
Chemical Analysis, % Approx.						
Silica (SiO_2)	36.72	54.2	51.3	50.3	34.6	69.0
Alumina (Al_2O_3)	56.15	36.5	39.1	42.8	60.2	21.0
Iron Oxide (Fe_2O_4)	0.80	3.3	3.0	2.7	1.4	1.3



ที่มา : บริษัท เจริญสุขอิฐทนไฟ จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผ.3 ข้อมูลเทคนิคของประเก็นฉนวนที่เลือกใช้

Ceramic Fibre Paper

PROPERTIES		CFP 1260 PAPER
PHYSICAL PROPERTIES	Color	White
	Class. Temp.	1260°C
	Density	180 Kg/m ³
CHEMICAL ANALYSIS	Al ₂ O ₃	48.0 %
	SiO ₂	51.0 %
	Trace Elements	1.0 %
	Leachable chlorides	10 ppm
STANDARD ROLL SIZES	THICKNESS × WIDTH × LENGTH (mm) (mm) (mm)	
	1 × 1,220 × 40,000	
	2 × 1,220 × 20,000	
	3 × 1,220 × 20,000	
5 × 1,220 × 10,000		
THERMAL CONDUCTIVITY	t _m = 400 °C	k = 0.085 W/m·K
	t _m = 800 °C	k = 0.132 W/m·K
	t _m = 1000 °C	k = 0.185 W/m·K

ที่มา : บริษัท เบย์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด , 2552. Ceramic Fibre. [ออนไลน์]

เข้าถึงได้จาก : http://www.bay-corporation.com/Ceramic_fiber1.html

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผค.4 ข้อมูลเกลียวแบบมาตรฐานระหว่างประเทศ เกลียวธรรมดา

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระบุ		ระยะพิตช์ P	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางพิตช์ d_2 D_2	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย		พื้นที่รับความเค้น (A_s) Mm ²
ช่องที่ 1	ช่องที่ 2			D_1	D_1	
1.00		0.25	0.838	0.693	0.729	0.456
1.20		0.25	1.038	0.893	0.929	0.730
1.60		0.35	1.373	1.170	1.221	1.270
2.00		0.40	1.740	1.509	1.567	2.070
2.50		0.45	2.208	1.948	2.013	3.390
3.00		0.50	2.675	2.387	2.459	5.030
4.00	3.50	0.60	3.110	2.764	2.850	6.780
		0.70	3.545	3.141	3.242	8.780
	4.50	0.75	4.013	3.580	3.688	11.300
5.00		0.80	4.480	4.019	4.134	14.200
6.00		1.00	5.350	4.773	4.917	20.100
8.00		1.25	7.183	6.466	6.647	36.600
10.00	9.00	1.25	8.188	7.466	7.647	48.100
		1.50	9.026	8.160	8.376	58.000
	11.00	1.50	10.026	9.160	9.376	72.300
12.00		1.75	10.863	9.853	10.106	84.300
16.00	14.00	2.00	12.701	11.546	11.835	115.000
		2.00	14.701	13.546	13.835	157.000
20.00	18.00	2.50	16.376	14.933	15.294	192.000
		2.50	18.376	16.933	17.294	245.000
	22.00	2.50	20.376	18.933	19.294	303.000
24.00		3.00	22.051	20.319	20.752	353.000
30.00	27.00	3.00	25.051	23.319	23.752	459.000
		3.50	27.727	25.706	26.211	561.000
36.00	33.00	3.50	30.727	28.706	29.211	694.000
		4.00	33.402	31.093	31.670	817.000
	39.00	4.00	36.402	34.093	34.670	976.000

ที่มา : ศ.ดร.วิวิทย์ อึ้งภากรณ์ และ รศ.ชาลย์ ถนังงาน. การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1 .บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผค.5 คุณสมบัติเทอร์โมไดนามิกส์ของเหล็กกล้าไร้สนิม

COMPOSITION	Melting Point(K)	Properties at 300 K			
		ρ (kg / m ³)	c_p (J / kg.K)	k (W / m.K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² / s)
AISI 302	1810	8055	480	15.1	3.91
AISI 304	1670	7900	477	14.9	3.95
AISI 316	1670	8238	468	468	3.48
AISI 347	1670	7978	480	480	3.71

ที่มา : รศ.มนตรี พิรุณเกษตร, 2542. การถ่ายความร้อน. กรุงเทพฯ : บริษัท วิทย์พัฒน์ จำกัด .



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก
มาตรฐานของการทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Designation: D 1238 – 04c

Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer¹

This standard is issued under the fixed designation D 1238; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers measurement of the rate of extrusion of molten resins through a die of a specified length and diameter under prescribed conditions of temperature, load, and piston position in the barrel as the timed measurement is being made.

1.2 Procedure A is a manual cutoff operation based on time used for materials having flow rates that fall generally between 0.15 and 50 g/10 min. Procedure B is an automatically timed flow rate measurement used for materials having flows from 0.50 to 900 g/10 min. By both procedures, the piston travel is generally the same during the timed measurement; the piston foot is about 46 and 20.6 mm above the die. Comparable flow rates have been obtained by these procedures in interlaboratory round-robin measurements of several materials described in 14.1. Provision is made for calculation of melt volume-flow rate as well as melt mass-flow rate.

Note 1—Round-robin testing indicates this test method may be suitable at flow rates up to 1500 g/10 min if the timing clock resolves the elapsed time to the nearest 0.01 s.

Note 2—This test method and ISO 1133-1991 are technically equivalent.

1.3 This standard does not purport to address the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. Specific precautionary statements are given in 5.7, 10.2.12, and 15.1.2.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing

D 883 Terminology Relating to Plastics

D 3364 Test Method for Flow Rates for Poly Vinyl Chloride with Molecular Structural Implications

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

2.2 ANSI Standard:

B46.1 on Surface Texture³

2.3 ISO Standard:

ISO 1133-1991 Determination of the Melt-Mass Flow Rate (MFR) and the Melt Volume-Flow Rate (MVR) of Thermoplastics³

3. Terminology

3.1 General:

3.1.1 For definition of some of the technical terms used in this test method refer to Terminology D 883.

4. Significance and Use

4.1 This test method is particularly useful for quality control tests on thermoplastics.

Note 3—Polymers having flow rates less than 0.15 or greater than 900 g/10 min may be tested by the procedures in this test method; however, precision data have not been developed.

4.2 This test method serves to indicate the uniformity of the flow rate of the polymer as made by an individual process and, in this case, may be indicative of uniformity of other properties. However, uniformity of flow rate among various polymers as made by various processes does not, in the absence of other tests, indicate uniformity of other properties.

4.3 The flow rate obtained with the extrusion plastometer is not a fundamental polymer property. It is an empirically defined parameter critically influenced by the physical properties and molecular structure of the polymer and the conditions of measurement. The rheological characteristics of polymer melts depend on a number of variables. Since the values of these variables occurring in this test may differ substantially from those in large-scale processes, test results may not correlate directly with processing behavior.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.20 on Thermal Properties (Section D20.30.08).

Current edition approved Dec. 1, 2004. Published December 2004. Originally approved in 1955. Last previous edition approved in 2004 as D 1238 - 04b.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 The flow rate of a material may be measured under any of the conditions listed for it in 8.2. Additional characterization of a material can be obtained if more than one condition is used. In case two conditions are employed, a Flow Rate Ratio (FRR) may be obtained by dividing the flow rate at one condition by the flow rate at the other condition.

5. Apparatus

5.1 Plastometer:

5.1.1 The apparatus shall be a dead-weight piston plastometer consisting of a thermostatically controlled heated steel cylinder with a die at the lower end and a weighted piston operating within the cylinder. The essential features of the plastometer, illustrated in Figs. 1 and 2, are described in 5.2-5.8. All dimensional measurements shall be made when the article being measured is at $23 \pm 5^\circ\text{C}$.

5.1.2 Relatively minor changes in the design and arrangement of the component parts have been shown to cause differences in results among laboratories. It is important, therefore, for the best interlaboratory agreement that the design adhere closely to the description herein; otherwise, it should be determined that modifications do not influence the results.

5.2 *Cylinder*—The steel cylinder shall be 50.8 mm in diameter, 162 mm in length with a smooth, straight hole

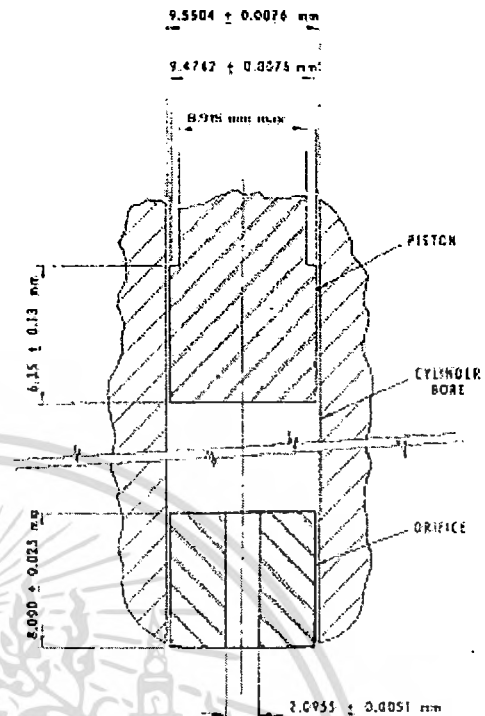


FIG. 2 Details of Extrusion Plastometer

9.5504 \pm 0.0076 mm in diameter, displaced 4.8 mm from the cylinder axis. Wells for a thermal sensor (thermoregulator, thermistor, etc.) and thermometer shall be provided as shown in Fig. 1. A 3.2-mm plate shall be attached to the bottom of the cylinder to retain the die. A hole in this plate, centered under the die and countersunk from below, allows free passage of the extrudate. The cylinder may be supported by at least two 6.4-mm high-strength screws at the top (radially positioned at right angles to the applied load) or by at least two 10-mm diameter rods screwed into the side of the cylinder for attaching to a vertical support. The essential dimensions of a satisfactory cylinder of this type are shown in Fig. 1 (Note 4). The cylinder bore should be finished by techniques known to produce approximately 12 rms or better in accordance with ANSI B46.1.

NOTE 4—Cylinders made of SAE 52100 or other equivalent steel heat-hardened to 60–65 Rockwell Hardness Scale C give good service when used at temperatures below 200°C. Cylinder liners of cobalt-chromium-tungsten alloy are also satisfactory to 300°C.

5.3 *Die*—The outside of the steel die shall be such diameter that it will fall freely to the bottom of the 9.5504 \pm 0.0076 mm diameter hole in the cylinder (Note 5). The die shall have a smooth straight bore 2.0955 \pm 0.0051 mm in diameter and shall be 8.000 \pm 0.025 mm in length. The bore and its finish are critical. It shall have no visible drill or other tool marks and no detectable eccentricity. The die bore shall be finished by techniques known to produce approximately 12 rms or better in accordance with ANSI B46.1.

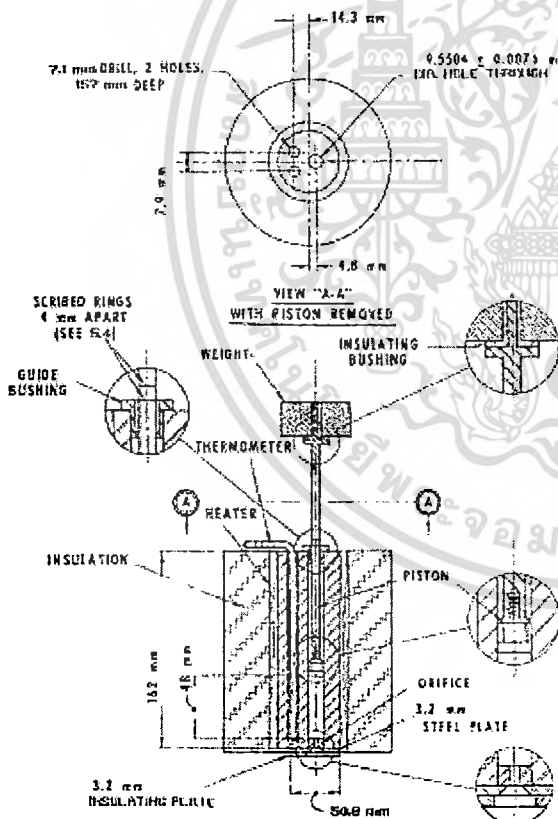


FIG. 1 General Arrangement of Extrusion Plastometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NOTE 5—Recommended die material is tungsten carbide. Also satisfactory are steel, synthetic sapphire, and cobalt-chromium-tungsten alloy.

5.4 Piston:

5.4.1 The piston shall be made of steel with an insulating bushing at the top as a barrier to heat transfer from the piston to the weight. The land of the piston shall be 9.4742 ± 0.0076 mm in diameter and 6.35 ± 0.13 mm in length. The piston design may incorporate means for land replacement, for example, having threads and flats immediately above the land. Above the land, the piston shall be no larger than 8.915 mm in diameter (Note 6). The finish of the piston foot shall be 12 rms in accordance with ANSI B46.1. If wear or corrosion is a problem, the piston should be of stainless steel and equipped with a detachable foot for ease of replacement.

NOTE 6—To improve standardization it is preferable that the piston be guided with a loose-fitting metal sleeve at the top of the cylinder.

NOTE 7—Pistons of SAE 52100 steel with the bottom 25 mm, including the foot, hardened to a Rockwell hardness, C scale, of 55 to 59 have been found to give good service when used at temperatures below 200°C.

5.4.2 The piston shall be scribed with two reference marks 4 mm apart in such fashion that when the lower mark coincides with the top of the cylinder or other suitable reference point, the bottom of the piston is 48 mm above the top of the die (see Fig. 1).

5.4.3 The combined weight of piston and load shall be within a tolerance of $\pm 0.5\%$ of the selected load.

5.5 Heater:

5.5.1 The equipment must have a heater capable of heating the apparatus so that the temperature at 10 mm above the die can be maintained within $\pm 0.2^\circ\text{C}$ of the desired temperature

during the test. The temperature of the barrel, from 10 mm to 75 mm above the top of the die, must be maintained within $\pm 1\%$ of the set temperature ($^\circ\text{C}$).

NOTE 8—At temperatures higher than 200°C this degree of temperature control may be more difficult to obtain.

5.5.2 Calibrate the temperature-indicating device by means of a light-gage probe-type thermocouple or a platinum-resistance temperature sensor having a short sensing length.⁴ The thermocouple should be encased in a metallic sheath having a diameter of approximately 1.6 mm with its hot junction grounded to the end of the sheath. Insert the temperature sensor into the melt from the top of the cylinder so that it is 10 ± 1 mm above the upper face of the die. The temperature sensors shall be used with a potentiometer having a sensitivity of at least 0.005 mV, or a temperature readout having a sensitivity of at least 0.1°C . Calibration should also be verified at 75 mm above the upper face of the die. An alternate technique for calibration is to use a sheathed thermocouple or platinum-resistance temperature sensor with tip diameter of 9.4 ± 0.1 mm for insertion in the bore without material present. An example of this is shown in Fig. 3. Calibration of the temperature-indicating device shall be verified at each run temperature.

NOTE 9—The response of the temperature sensing device may be affected by immersion level. Take care to ensure adequate insulation of the

⁴ Round-robin data showing flow rate and corresponding temperature profile of the melt obtained using probe-type thermocouples and platinum resistance temperature sensors can be obtained from ASTM Headquarters. Request RR-026-1094.

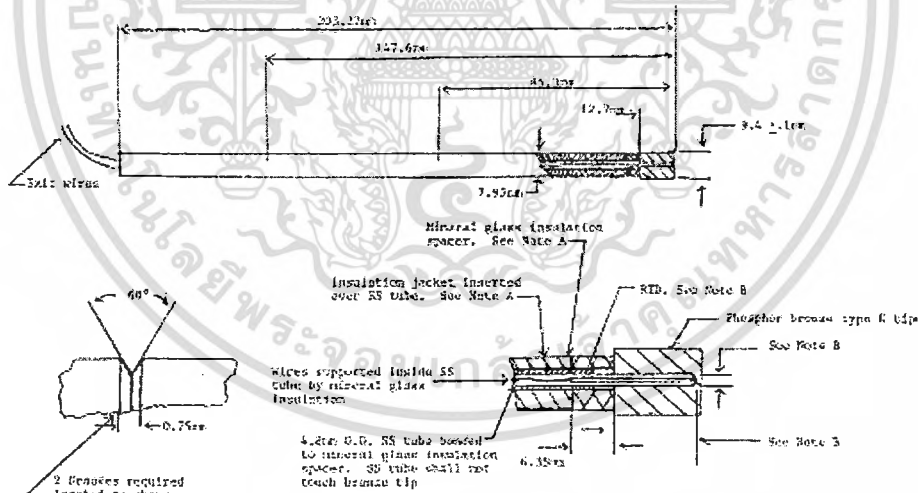


FIG. 3 Example of a Temperature Calibration Device

Note A—Mineral glass insulation or equivalent spacer shall be bonded to tip and SS tube. Bond material shall be low conductivity type, 400°C minimum rating. Insulation jacket material shall be low conductivity type (400°C minimum rating preferred, see Note 5).

Note B—The RTD shall be inserted into bronze tip and bonded using high conductivity, 400°C rated material. Tip of RTD element shall touch the bronze tip. Minimum insertion depth of 11.2 mm clearance between RTD and tip wall shall be minimized.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

device sensor and stabilization of the barrel temperature.

5.5.3 Heat shall be supplied by electric band heater(s) covering the entire length of the cylinder. The heater(s) may be single- or multi-element, depending upon the manufacturer's control means. The heater(s) plus control system must be capable of maintaining the temperature within the required $\pm 0.2^\circ\text{C}$ of the set point. The temperature sensor and readout equipment must be calibrated to a traceable national standard (that is, NIST) at least once per year. The cylinder with the heater(s) shall be lagged with 38 mm of foamed-glass insulation. An insulating plate 3.2 mm in thickness shall be attached to the bottom of the cylinder to minimize heat loss at this point.

5.6 *Temperature Controller*—The type of controller and sensor must be capable of meeting the required control tolerance specified in 5.5.1.

5.7 *Thermometer*—Thermometers having a range of 4°C graduated in 0.2°C divisions may be used to indicate temperature. The temperature at this point may not necessarily be the temperature of the material 10 mm above the die. The thermometer may be used to monitor indirectly the temperature of the material 10 mm above the die and may be calibrated by reference to a thermocouple or platinum resistance temperature sensor inserted in the material 10 mm above the die. See 5.5.2 for a description of a method for measuring temperature. (Warning—Caution should be observed with the use of a mercury-filled thermometer. Mercury vaporization occurs if the thermometer is broken. Mercury thermometers are not to be used at or above the boiling point of mercury, which is 357°C .)

5.8 *Level*—Provision shall be made for vertical alignment of the bore of the extrusion plastometer. This is necessary to minimize subtractive loads resulting from rubbing or friction between the piston tip and sidewall. Means of alignment are discussed in Appendix XI.

5.9 *Accessory Equipment*—Necessary accessories include equipment for charging samples to the cylinder, a funnel, a die plug, a tool for cutting off the extruded sample, a timer or stop watch, cleaning equipment, go/no-go gages, a balance accurate to ± 0.001 g, and, when required, a weight or weight-piston support.

NOTE 10—Satisfactory operation of the apparatus for polyethylenes can be ascertained by making measurements on NIST Standard Reference Materials (SRMs) certified for melt flow rate. The four SRMs certified under condition 190/2.16 are SRM 1473 with a flow rate of 1.29 g/min, SRM 1474 with a flow rate of 3.03 g/10 min, SRM 1496 with a flow rate of 0.26 g/10 min, and SRM 1497 with a flow rate of 0.19 g/10 min. SRM 1475a is certified under condition 190/3.25 with a flow rate of 2.20 g/10 min.³

6. Test Specimen

6.1 The test specimen may be in any form that can be introduced into the bore of the cylinder, for example, powder, granules, strips of film, or molded slugs. It may be desirable to preform or pelletize a powder.

³ These standard polyethylenes are available from the National Institute of Standards and Technology, Office of Standard Reference Materials, Washington, DC 20234.

7. Conditioning

7.1 Many thermoplastic materials do not require conditioning prior to testing. Materials which contain volatile components, are chemically reactive, or have other special characteristics most probably require appropriate conditioning procedures. Moisture not only affects reproducibility of flow rate measurement but, in some types of materials, degradation is accelerated by moisture at the high temperatures used in testing. Check the applicable material specification for any conditioning requirements before using this test. See Practice D 618 for appropriate conditioning practices.

8. Procedural Conditions

8.1 Standard conditions of test are given in Table 1. Test conditions shall be shown as: Condition ___ / ___, where the temperature in degrees Celsius is shown first, followed by the weight in kilograms. For example: Condition 190/2.16.

8.2 The following conditions have been found satisfactory for the material listed:

Material	Condition	
Acetals (copolymer and homopolymer)	190/2.16	190/1.05
Acrylics	230/1.2	290/3.8
Acrylonitrile-butadiene-styrene	20/0.5.0	290/3.8
	220/1.0	
Acrylonitrile-butadiene-styrene/polycarbonate blends	230/3.8	250/1.2
	255/0.8	285/5.0
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(styrene-polyethylene) copolymer	372/2.16	
Perfluoroalkoxyalkene	372/5.0	
Polycaprolactone	125/2.16	80/2.16
Polychlorotrifluoroethylene	265/12.5	
Polyether sulfone (PES)	390/2.16	390/10
	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	
Polymethylchlorotrifluoroethylene	255/21.6	
	255/31.6	
Polypropylene	230/2.16	
Polyphenyl sulfone (PPSU)	395/5.0	390/2.16
Polystyrene	20/0.5.0	290/1.2
	230/3.8	190/5.0
Poly sulfone (PSU)	343/2.16	390/10
Polyterephthalate	250/2.16	210/2.16
	235/2.16	
Poly(vinyl acetate)	150/21.6	
Poly(vinylidene fluoride)	230/21.6	
	230/5.0	
Poly(methylene sulfide)	315/5.0	
Styrene-acrylonitrile	220/1.0	290/10
	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 elastomers (TEO)	230/2.16	
Vinylidene fluoride copolymers	230/21.6	
	230/5.0	

for $T_m = 100^\circ$ use 120/5.0 or 21.6

NOTE 11—Some materials may require special materials of construction or handling for performing this test. Please refer to the material

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 1 Standard Test Conditions, Temperature, and Load

Condition Standard Designation	Temperature, °C	Total Load Including Piston, kg	Approximate Pressure	
			kPa	psi
90/2.16	90	2.16		
125/0.825	125	0.825	44.9	6.5
125/2.16	125	2.16	299.2	43.25
150/2.16	150	2.16	299.2	43.25
190/0.825	190	0.825	44.9	6.5
190/2.16	190	2.16	299.2	43.25
190/21.60	190	21.60	2992.2	432.5
230/5.0	230	5.0	699.5	100.0
230/1.2	230	1.2	165.4	24.0
230/3.8	230	3.8	524.0	76.0
255/12.5	255	12.5	1723.7	250.0
275/0.825	275	0.825	44.9	6.5
275/2.16	275	2.16	299.2	43.25
190/1.05	190	1.05	144.7	21.0
190/10.0	190	10.0	1379.0	200.0
90/1.2	90	1.2	165.4	24.0
190/5.0	190	5.0	699.5	100.0
235/1.0	235	1.0	139.2	20.05
235/2.16	235	2.16	299.2	43.25
235/5.0	235	5.0	699.5	100.0
250/2.16	250	2.16	299.2	43.25
310/12.5	310	12.5	1723.7	250.0
210/2.16	210	2.16	299.2	43.25
295/2.16	295	2.16	299.2	43.25
315/5.0	315	5.0	699.5	100.0
372/2.16	372	2.16	299.2	43.25
372/5.0	372	5.0	699.5	100
297/5.0	297	5.0	699.5	100
230/21.6	230	21.6	2992.2	432.5
230/5.0	230	5.0	699.5	100
285/21.6	285	21.6	2992.2	432.5
285/31.6	285	31.6	4361.2	632.5
271.5/2.16	271.5	2.16	299.2	43.25
220/1.0	220	1.0	139.2	20.0
250/1.2	250	1.2	165.4	24.0
255/3.8	255	3.8	524.0	76.0
265/5	265	5.0	699.5	100.0

specification for appropriate recommendations.

8.3 If more than one condition is used and the material is polyethylene, the determination of Flow Rate Ratio (FRR) has been found to be useful. The FRR is a dimensionless number derived by dividing the flow rate at Condition 190/10 by the flow rate at Condition 190/2.16.

Note 12—When determining such a ratio of flow rates for a material at the same temperature under different loads, it has been found that precision is maximized when one operator uses one Procedure (A or B), the same plastometer, and the same die for both measurements (the die need not be removed from the plastometer between the two determinations).

9. Procedure A—Manual Operation

9.1 Select conditions of temperature and load from Table 1 in accordance with material specifications such that flow rates will fall between 0.15 to 50 g/10 min.

9.2 Ensure that the bore of the extrusion plastometer is properly aligned in the vertical direction. (See Appendix X1.)

9.3 Inspect the apparatus and die for cleanliness. If it is not clean, see 9.11.

Note 13—The degree of cleanliness can significantly influence the flow rate results, therefore a thorough method of cleaning must be established. It has been found that three swabs of the barrel is satisfactory for most materials and that the die, barrel, and piston are more easily cleaned while hot.

9.4 Check the die bore diameter with appropriately sized no-go/go gages prior to testing. Make frequent checks to determine whether the die diameter (tested with die at 23 ± 5°C) is within the tolerances given in 5.3.

Note 14—Cleaning and usage can result in a die diameter that is out of specifications. Data has shown that erroneous results will be obtained if the die diameter is not within the appropriate tolerances.

9.5 Verify that the temperature is stable and within ±0.2°C of the appropriate test temperature as specified in 5.5.1.

9.6 Insert the die and the piston. The temperature of the cylinder with the piston and die in place must be stable at the appropriate test temperature 15 min before testing is begun. When equipment is used repetitiously, it should not be necessary to heat the piston and die for 15 min.

Note 15—The reduction in heating time when the unit is being used repetitiously is only allowed when runs of the same or similar material are being measured over a continuous time frame. If the piston and die are removed and cleaned, they should be considered "cold" and the full 15 minutes heating stabilization time required.

9.7 Remove the piston and place it on an insulated surface. Charge the cylinder within 1 min with a weighed portion of the sample in accordance with the expected flow rate, as given in Table 2. Reinsert the piston and add the appropriate weight.

Note 16—Experience has shown that for the best reproducibility the piston should operate within the same part of the cylinder for each

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 2 Standard Test Conditions, Sample Mass,^a and Testing Time^b

Flow Range, g/10 min	Suggested Mass of Sample in Cylinder, g	Time Interval, min	Factor for Obtaining Flow Rate in g/10 min
0.15 to 1.0	2.5 to 8.0	6.00	1.67
>1.0 to 3.5	3.0 to 5.0	3.00	3.33
>3.5 to 10	4.0 to 8.0	1.00	10.00
>10 to 25	4.0 to 8.0	0.50	20.00
>25	4.0 to 8.0	0.25	40.00

^a This is a suggested mass for materials with melt densities of about 0.7 g/cm³. Correspondingly, greater quantities are suggested for materials of greater melt densities. Density of the molten resin (without filler) may be obtained using the procedure described by Terry, B. W., and Yang, K., "A New Method for Determining Melt Density as a Function of Pressure and Temperature," *SPE Journal*, SPEJA, Vol. 20, No. 8, June 1964, p. 540 or the procedure described by Zoller, Paul, "The Pressure-Temperature Properties of Polycylofins," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 20, 1976, p. 1051. It may also be obtained from the weight of an extruded known volume of resin at the desired temperature. For example, 25.4 mm (1 in.) of piston movement extrudes 1.014 cm³ of resin. An estimate of the density of the material can be calculated from the following equation:
resin density at test temperature = $M/1.014$

where:

M = mass of extruded resin.

^b See 9.14.

measurement. The piston is scribed so the starting point for each extrusion is roughly the same. Some excess of material over the minimum required for the actual flow measurement portion of the test is provided by the charging weights shown in Table 2. This is necessary to achieve a void-free extrudate and flow equilibrium before start of rate measurements.

Note 17—It is frequently helpful to take interim cuts of the extrudate at uniform time intervals during the specified extrusion time. Weights of these individual cuts give an indication of the presence of bubbles which may be masked due to their size or to opacity of the sample. This technique is particularly helpful in the case of highly pigmented materials. Forcing out some of the resin manually during the preheat period often eliminates bubbles in the test extrudate.

9.8 Allow time for the material to soften and begin to melt, and then purge some material to a position such that subsequent travel of the piston will position the lower scribe mark at the reference start position 7.0 ± 0.5 min from the completion of the charge. Purge must be completed at least 2 min prior to start of the test for materials having melt flow rates less than 10 g/10 min.

Note 18—It has been found that purging within 60 s of the start time will result in higher variability in the data.

Note 19—There may be cases where the 7.0 ± 0.5 min is too much or not enough preheat time. For those materials, provisions must be in the material documents. It is necessary to refer to the appropriate material document before beginning any test.

Note 20—Additional care may be necessary to prevent thermal degradation in the extrusion plastometer. This is sometimes done by the addition of an appropriate antioxidant. For highly unstable materials, it may be necessary to use alternative techniques as an indication of flow characteristics.

9.9 For materials with flow rates greater than 10 g/10 min, a weight (and if needed, a piston) support must be used after the initial purge. The support shall be removed at such a time as to allow the test to begin within 7 ± 0.5 min of the completion of the charge. The piston/weight support should be of such a length that the lower scribe mark of the supported

piston/weight will be 25 mm above the top of the guide bushing or other suitable reference mark.

Note 21—It has been found that the effect of choosing plugging, weight support, or both, is significant to the flow rate results. The choice of piston support was made to cover all conditions and flow rates 10 to 50 g/10 min.

9.10 For all tests, start collecting a timed extrudate when requirements for the piston position are met, provided this is within 7.0 ± 0.5 min from the end of charging; otherwise, discard the charge and repeat the test with readjusted piston position after the initial purge, or change weights. Requirements are that the top scribed mark on the piston be visible above the cylinder or index and that the lower scribe mark be in the cylinder or below the index. As the lower scribed mark approaches the top of the cylinder or index, reset the timer to zero, then simultaneously start the timer and make the initial cut-off when the position requirements are met. Make the final cut-off exactly when the time interval given in Table 2 is reached. Collect the timed extrudate. If the extrudate contains visible bubbles, discard the complete charge and begin the test again.

Note 22—The charge weight should only be increased if no material is being purged and there is still not enough material to complete the test.

9.11 Discharge the remainder of the specimen and push the die out through the top of the cylinder. Swab out the cylinder with cloth patches after the manner of cleaning a pistol barrel. The die may be cleaned by dissolving the residue in a solvent. A better method is pyrolytic decomposition of the residue in a nitrogen atmosphere. Place the die in a tubular combustion furnace or other device for heating to $550 \pm 10^\circ\text{C}$ and clean with a small nitrogen purge through the die. This method is preferable to flame or solvent cleaning, being faster than solvent cleaning and less detrimental to the die than an open flame. In certain cases where materials of a given class having similar flow characteristics are being tested consecutively, interim die cleaning may be unnecessary. In such cases, however, the effect of cleaning upon flow rate determination must be shown to be negligible if this step is avoided.

9.12 Once the extrudate is cool, weigh to the nearest 1 mg.

9.13 Multiply the weight of the extrudate by the appropriate factor shown in Table 2 to obtain the flow rate in grams per 10 min.

Note 23—Frequently, errors in test technique, apparatus geometry, or test conditions, which defy all but the most careful scrutiny exist, causing discrepancy in flow rate determinations. The existence of such errors is readily determined by periodically measuring a reference sample of known flow rate. The flow rate value and range to be tolerated can be determined using a statistically correct test program composed of multiple determinations with various instruments. Standard samples of polyethylene, linear or branched, are available from the National Institute of Standards and Technology.

9.14 In case a specimen has a flow rate at the borderline of the ranges in Table 2 and slightly different values are obtained at different time intervals, the referee value shall be obtained at the longer time interval.

10. Procedure B—Automatically Timed Flow Rate Measurement

10.1 Apparatus:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.1.1 Extrusion plastometer and auxiliary equipment are detailed in Section 4 and below.

10.1.2 A timing device shall electrically, optically, or mechanically time piston movement within the specified travel range. The requirements of the system are as follows:

10.1.2.1 Sense and indicate the piston travel time within ± 0.01 s (see Note 1).

10.1.2.2 Measure piston travel within ± 0.4 % of the nominal preset value (see 10.1.2.4 and 10.1.2.5) for use in the flow rate calculations.

10.1.2.3 Any effects on the applied load must be included in the allowable tolerance given in 5.4.3.

10.1.2.4 It should be preset or be settable for measuring piston travel of 6.35 ± 0.25 mm for flow rates up to 10 g/10 min.

10.1.2.5 It should be preset or be adjustable for measuring piston travel of 25.4 ± 0.25 mm for flow rates greater than 10 g/10 min.

10.1.2.6 To ensure high interlaboratory reproducibility, it is important that the timing device operates within a fixed portion of the cylinder. This is defined as the portion of the cylinder between 46 ± 2 mm and 20.6 ± 2 mm above the top of the die.

10.1.2.7 Check die, cylinder, and position dimensions for conformance to 5.2-5.4 and Figs. 1 and 2.

10.2 Procedure:

10.2.1 Refer to Table 1 for selection of conditions of temperature and load in accordance with the material specification.

10.2.2 Check the die bore diameter with appropriately sized no-go/go gages prior to testing. Make frequent checks to determine whether the die diameter (tested with die at $23 \pm 5^\circ\text{C}$) is within the tolerances given in 5.3 (see Note 14).

10.2.3 Ensure that the bore of the extrusion plastometer is properly aligned in the vertical direction (see Appendix X1).

10.2.4 Inspect the apparatus and die for cleanliness. If it is not clean, see 9.11 and Note 13.

10.2.5 Check the die bore diameter with appropriately sized no-go/go gages before beginning the test. Make frequent checks to determine whether the die diameter is within the tolerances given in 5.3 (see Note 14).

10.2.6 Verify that the temperature is stable and within $\pm 0.2^\circ\text{C}$ of the appropriate test temperature as specified in 5.5.1.

10.2.7 Insert the die and the piston. The temperature of the cylinder with the piston and die in place must be stable at the appropriate test temperature 15 min before testing is begun.

When equipment is used repetitiously, it should not be necessary to heat the piston and die for 15 min.

10.2.8 Adjust the travel arm to 6.35 ± 0.25 mm for measuring materials with expected flow rates of up to 10 g/10 min or 25.40 ± 0.25 mm for measuring materials with expected flow rates of 10 g/10 min or higher.

Note 24—It has been found that for some materials the melt flow rates obtained on a material will be different depending on which timer length is chosen; therefore, it is important to adhere to the protocol in 10.2.8 to compare interlaboratory results.

10.2.9 Remove the piston and place it on an insulated surface. Charge the cylinder within 60 s with a weighted portion of the sample in accordance with the expected flow rate, as given in Table 2. Reinsert the piston and add weight.

10.2.10 Allow time for the material to soften and begin to melt, and then purge some material to a position such that subsequent travel of the piston will position the lower scribe mark at the reference start position 7.0 ± 0.5 min from the completion of the charge. Purge must be completed at least 2 min prior to start of the test for materials having melt flow rates less than 10 g/10 min (see Note 18).

10.2.11 Weight and piston support, if needed, must be used after the initial purge. The support will be removed at such a time as to allow the timer to activate within 7.0 ± 0.5 min after completion of the charge. If the timer is not activated within 7 ± 0.5 min after the completion of the charge, the test must be repeated with readjusted piston position after the initial purge, or change weights. The piston/weight support should be of such a length that the lower scribe mark of the supported piston/weight will be at least 25 mm above the top of the cylinder. Only use piston support if there is excessive material flow (see Notes 21 and 22).

10.2.12 For materials greater than 50 g/10 min a die plug must be used in addition to the piston/weight support. The die plug is inserted before charge and is removed prior to removing the piston/weight support. The initial charge should be adjusted to reduce excess flow. If the timer arm is not activated within 7 ± 0.5 min after the completion of the charge the test must be repeated with readjusted piston position, or change weights (see Notes 21 and 22). (Warning—Rapid expulsion of material when die plug is removed may be hazardous.)

10.2.13 If the timed extrudate contains visible bubbles, repeat the test (see Note 23).

10.2.14 Record the time to the nearest 0.01 s for the piston to complete the calibrated distance of travel.

10.2.15 Discharge any remaining resin and clean the die, piston, and cylinder as detailed in 9.11.

TABLE 3 Factors for Calculation of Flow Rate

Material (Uplimented)	Temperature, °C	Piston Travel, L, cm [in.]	Factor for Calculation of Flow Rate, F^a
Polyethylene	190	2.54 [1]	828
Polyethylene	190	0.635 [0.25]	207
Polypropylene	230	2.54 [1]	799
Polypropylene	230	0.635 [0.25]	200

^a Factors calculated using melt-density values of 0.7898 g/cm³ for polyethylene and 0.7299 g/cm³ for polypropylene, as expressed in article by Zoller, Paul, "The Pressure-Volume-Temperature Properties of Polyolefins," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 23, 1979, P. 1051. The base densities at 23°C for which the melt densities are reported were 0.817 g/cm³ for annealed low-density polyethylene and polypropylene homopolymer.

11. Procedure C—Automatically Timed Flow Rate Measurement for High Flow Rate Polyolefins Using Half-Height, Half Diameter Die

11.1 Apparatus:

11.1.1 Extrusion plastometer and auxiliary equipment are detailed in Sections 5 and 10.

11.1.2 For polyolefins with a MFR of 75 or greater using the standard die (See 5.3), an alternate die can be used to reduce the flow rate of these materials and improve the reproducibility of results. The alternate die dimensions shall be: Height 4.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

± 0.025 mm; bore diameter 1.048 ± 0.005 mm. No spacer shall be used with this die. Bore and finish requirements are the same as 5.3.

11.1.3 For calibration of the temperature indicating device, 5.5.2 shall be used with the variation that temperatures are measured at 14 ± 1 mm and at a nominal 79 mm above the upper surface of the die.

11.1.4 If a thermometer as described in 5.7 is used to indicate temperature, it can be used to monitor indirectly the temperature of the material 14 mm above the upper surface of the die and may be calibrated via 11.1.3.

11.2 Procedure:

11.2.1 Use procedure described in 10.2 with the exception that the die diameter and tolerances are given in 11.1.2.

12. Calculation (Procedures B and C)

12.1 Calculate the flow rate in grams per 10 min or volume rate in cm³ per 10 min as follows (see Note 23):

$$\text{Flow rate} = (426 \times L \times d) / t$$

or

$$\text{Volume rate} = 426 \times L / t$$

where:

- L = length of calibrated piston travel, cm,
- d = density of resin at test temperature, g/cm³ (see reference under Table 2),
- t = time of piston travel for length L, s, and
- 426 = mean of areas of piston and cylinder × 600.

Note 25—Factors that may be substituted in the following equation are given for some materials in Table 3.

$$\text{Flow rate, g/10 min} = Ft$$

where:

- F = factor from Table 3, and
- t = time of piston travel for length L, s.

12.2 Agreement between Procedures A and B may be optimized if an average melt density for a particular type of material is determined with the actual equipment used and that value is substituted into the equation given in 12.1.

13. Procedure D—Multi-Weight Using Automatically Timed Flow Rate Measurement

13.1 Apparatus:

13.1.1 Extrusion plastometer and auxiliary equipment are detailed in Section 4 and below.

13.1.2 A timing device shall electrically, optically, or mechanically time piston movement within the specified travel range. The requirements of the system are as follows:

13.1.2.1 Sense and indicate the piston travel time within ±0.01 s (see Note 1).

13.1.2.2 Measure piston travel within ±0.4 % of the nominal preset value for use in the flow rate calculations.

13.1.2.3 Any effects on the applied load must be included in the allowable tolerance given in 5.4.3.

13.1.2.4 To ensure high interlaboratory reproducibility, it is important that the timing device operates within a fixed portion of the cylinder. This is defined as the portion of the cylinder between 46 ± 2 mm and 20.6 ± 2 mm above the top of the die.

13.1.2.5 Check die, cylinder, and position dimensions for conformance to 5.2-5.4 and Figs. 1 and 2.

13.2 Procedure:

13.2.1 Refer to Table 4 for selection of conditions of temperature and loads in accordance with the material specification.

13.2.2 Check the die bore diameter with appropriately sized no-go/go gages prior to testing. Make frequent checks to determine whether the die diameter (tested with die at 23 ± 5°C) is within the tolerances given in 5.3 (see Note 14).

13.2.3 Ensure that the bore of the extrusion plastometer is properly aligned in the vertical direction (see Appendix XI).

13.2.4 Inspect the apparatus and die for cleanliness. If it is not clean, see 9.11 and Note 13.

13.2.5 Check the die bore diameter with appropriately sized no-go/go gages before beginning the test. Make frequent checks to determine whether the die diameter is within the tolerances given in 5.3 (see Note 14).

13.2.6 Verify that the temperature is stable and within ±0.2°C of the appropriate test temperature as specified in 5.5.1.

TABLE 4 Precision, Procedure A (Values in g/10 min)

Material	Condition	Average	S _r ^a	S _m ^b	t ₁ ^c	t ₂ ^d	Number of Laboratories
Polyethylene	190/2.16	0.27	0.008	0.022	0.023	0.063	9
Polyethylene	190/2.16	0.40	0.012	0.038	0.035	0.109	9
Polyethylene	190/2.16	2.04	0.025	0.079	0.073	0.224	9
Polyethylene	190/2.16	44.1	0.319	1.232	2.590	3.496	7
Polypropylene	230/2.16	2.23	0.105	0.226	0.299	0.699	9
Polypropylene	230/2.16	7.09	0.222	0.471	0.627	1.331	9
Polypropylene	230/2.16	32.8	0.581	1.051	1.644	2.974	9
Polystyrene	200/5	1.67	0.024	0.122	0.098	0.344	6
Polystyrene	200/5	8.82	0.190	0.657	0.598	1.996	6
Polystyrene	200/5	19.3	0.305	0.925	0.934	2.617	6
Polycarbonate	300/1.2	2.41	0.076	0.115	0.215	0.326	4
Polycarbonate	300/1.2	10.5	0.429	0.647	1.215	1.930	4
Polycarbonate	300/1.2	16.2	0.155	1.109	0.438	3.140	4
Acrylic	230/3.8	2.59	0.051	0.051	0.145	0.145	3

^a S_r = within-laboratory standard deviation of the average.
^b S_m = between-laboratories standard deviation of the average.
^c t₁ = 2.83 S_r, and
^d t₂ = 2.83 S_m.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 5 Precision, Procedure B (Values in g/10 min)

Material	Condition	Average	S_r^A	S_R^B	t_r^C	t_R^D	Number of Laboratories
Polystyrene	190/2.16	0.27	0.009	0.014	0.025	0.028	8
Polystyrene	190/2.16	0.40	0.016	0.027	0.045	0.078	8
Polystyrene	190/2.16	2.04	0.040	0.094	0.112	0.266	9
Polystyrene	190/2.16	49.7	0.997	1.924	2.819	5.440	8
Polypropylene	230/2.16	2.25	0.062	0.214	0.1466	0.604	8
Polypropylene	230/2.16	7.16	0.143	0.589	0.4051	1.668	8
Polypropylene	230/2.16	32.6	0.589	0.945	1.859	2.672	8
Polystyrene	200/5	1.65	0.037	0.166	0.105	0.470	4
Polystyrene	200/5	8.89	0.144	0.423	0.405	1.167	4
Polystyrene	200/5	18.0	0.109	0.387	0.305	1.087	4

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average.
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average.
^C t_r = 2.83 S_r and
^D t_R = 2.83 S_R .

TABLE 6 Precision, Procedure A (Values in g/10 min)

Material	Condition	Average	S_r^A	S_R^B	t_r^C	t_R^D	Number of Labs
PMMA	230/3.8	1.51	0.019	0.086	0.037	0.242	7
LDPE	190/2.16	1.74	0.027	0.052	0.075	0.144	11
Polystyrene	200/5.0	1.85	0.040	0.085	0.112	0.239	9
HDPE	190/2.16	5.35	0.049	0.109	0.137	0.289	11
Polypropylene	230/2.16	10.94	0.088	0.473	0.247	1.324	10
Polycarbonate	300/1.2	18.59	0.109	0.233	0.305	0.659	4 ^E
Acetal	190/2.16	25.90	0.285	0.571	0.658	1.589	7

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average.
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average.
^C t_r = 2.83 S_r .
^D t_R = 2.83 S_R .
^E Insufficient laboratories to meet Practice E 861.

TABLE 7 Precision, Procedure B (Values in g/10 min)

Material	Condition	Average	S_r^A	S_R^B	t_r^C	t_R^D	Number of Labs
PMMA	230/3.8	1.54	0.023	0.102	0.072	0.298	8
LDPE	190/2.16	1.76	0.015	0.053	0.042	0.149	11
Polystyrene	200/5.0	1.89	0.042	0.102	0.117	0.265	7
HDPE	190/2.16	5.41	0.041	0.113	0.114	0.313	10
Polypropylene	230/2.16	10.96	0.057	0.491	0.899	1.373	10
Polycarbonate	300/1.2	18.79	0.104	0.477	0.232	1.365	9 ^E
Acetal	190/2.16	25.34	0.182	0.622	0.508	2.302	6

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average.
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average.
^C t_r = 2.83 S_r .
^D t_R = 2.83 S_R .
^E Insufficient laboratories to meet Practice E 861.

TABLE 8 Precision, Procedure B (Values in g/10 min)

Material	Condition	Average	S_r^A	S_R^B	t_r^C	t_R^D
Polypropylene	230/2.16	245	13.2	16.6	37.4	48.9
Polypropylene	230/2.16	482	31.8	40.0	89.9	119
Polypropylene	230/2.16	937	20.9	59.8	59.1	165
Polypropylene	230/2.16	1609	129	243	365	698

^A S_r = within-laboratory standard deviation of the average.
^B S_R = between-laboratories standard deviation of the average.
^C t_r = 2.83 S_r and
^D t_R = 2.83 S_R .

13.2.7 Insert the die and the piston. The temperature of the cylinder with the piston and die in place must be stable at the appropriate test temperature 15 min before testing is begun. When equipment is used repetitiously, it should not be necessary to heat the piston and die for 15 min.

13.2.8 Remove the piston and place it on an insulated surface. Charge the cylinder within 60 s with a weighted

portion of the sample as given in Table 2 for the expected flow rate at the first test load.

13.2.9 Allow time for the material to soften and begin to melt, and then purge some material to a position such that subsequent travel of the piston will position the lower scribe mark at the reference start position 7.0 ± 0.5 min from the completion of the charge. Purge must be completed at least 2 min prior to start of the test for materials having melt flow rates less than 10 g/10 min (see Note 18).

13.2.10 Weight and piston support, if needed, must be used after the initial purge. The support will be removed at such a time as to allow the timer to activate within 7.0 ± 0.5 min after completion of the charge. If the timer is not activated within 7 ± 0.5 min after the completion of the charge, the test must be repeated with readjusted piston position after the initial purge, or change weights. The piston/weight support should be of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

such a length that the lower scribe mark of the supported piston/weight will be at least 25 mm above the top of the cylinder. Only use piston support if there is excessive material flow (see Notes 21 and 22).

13.2.11 If the material flows from the die when both the piston and weight are supported, a die plug must be used. The die plug is inserted before charge and is removed prior to removing the piston/weight support. The initial charge should be adjusted to reduce excess flow. If the timer arm is not activated within 7 ± 0.5 min after the completion of the charge the test must be repeated with readjusted piston position, or change weights (see Notes 21 and 22). (Warning—Rapid expulsion of material when die plug is removed may be hazardous.)

13.2.12 If the timed extrudate contains visible bubbles, repeat the test (see Note 23).

13.2.13 Record the times to the nearest 0.01 s for a minimum of two piston travel distances for each test load. Piston travel distances shall be chosen so that these times are at least 2 s and that the distances can be determined within ± 0.4 %.

13.2.14 After at least two measurements have been taken at the initial load condition, change to the next test load and allow for sufficient piston travel or time to achieve stable flow before recording the piston travel times at this load. Do not take readings below 18.6 mm above the top of the die.

Note 26—Normally 5 mm of piston travel or 2 minutes is sufficient to obtain stable flow after changing test loads.

13.2.15 Repeat the above for any additional test loads. Do not take any readings below 18.6 mm above the top of the die.

13.2.16 Discharge any remaining resin and clean the die, piston, and cylinder as detailed in 9.11.

13.3 Calculations:

13.3.1 Calculate the individual flow rate values in accordance with Section 12 (Procedure B).

13.3.2 If the differences between the individual flow rates at each test load is no greater than 3 %, calculate the average flow rate for each test load. If differences are >3 % repeat the test. To achieve stable flow after applying each test load, it may be necessary to increase the time or the piston travel distance before taking a measurement.

13.3.3 Calculate the Flow Rate Ratio (FRR) as the ratio of the average flow rate at the higher load to the average flow rate at the lower load.

14. Report

14.1 Report the following information:

14.1.1 Statement indicating the nature and physical form of the material charged to the cylinder.

14.1.2 Temperature and load at which the test is run shall be reported. The results and test conditions can be referred to as FR-condition, where the standard designation for the condition from Table 1 is shown (for example, FR-190/2.16).

Note 27—It has become customary to refer to the flow rate of polyethylene as "melt index" when obtained under Condition 190/2.16. However, for all other materials the use of melt index or any term other

14.1.3 Flow rate reported as the rate of extrusion in grams per 10 min or volume rate in cm^3 per 10 min.

14.1.4 Procedure used (A, B, or C).

14.1.5 Any unusual behavior of the test specimen such as discoloration, sticking, extrudate surface irregularity or roughness, etc.

14.1.6 Details of conditioning, if any.

14.1.7 For multi-weight tests using Procedure D, also report:

14.1.7.1 The average flow rate at each test load.

14.1.7.2 The Flow Rate Ratio (FRR) together with the temperature and loads used (for example, FRR-190/2.16/2.16).

14.1.7.3 Whether the decreasing or increasing load technique was used.

15. Precision and Bias (Procedures A, B, and C)

15.1 Precision:

15.1.1 Tables 4 and 5 are based on a round robin⁶ conducted in 1986 and 1987, involving polypropylene, polyethylene, polystyrene, polycarbonate and acrylic materials. Tables 6 and 7 are based on a round robin⁷ completed in 1997 involving low and high density polyethylene, polypropylene, polystyrene, polycarbonate, PMMA, and acetal. The number of participating laboratories is shown for each material. Data for Tables 4 and 5 were generated through each lab testing two specimens for each material on three different days, while data for Tables 6 and 7 were generated through each lab testing two specimens for each material on two different days. The analysis in Practice E 691 is based on a test result being the average of two specimens.

15.1.2 Table 8 is based on a round robin⁸ conducted in 1980 using Procedure B. Four polypropylene samples having flow rates from 250 to 1500 were tested in nine laboratories. (Warning—The following explanations of I_r and I_R (15.1.4–15.1.6) are only intended to present a meaningful way of considering the approximate precision of this test method. The data in Tables 4–8 should not be vigorously applied to acceptance or rejection of material since those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials. The principles of 15.1.4–15.1.7 would then be valid for such data.)

15.1.3 Table 9 is based on a round robin conducted in 1999 on Procedure C. Data for seven of the eight participating laboratories were included in the statistics for this table. Four polyethylene materials were tested with melt flow rates using the standard die ranging from approximately 35 to 2350 g/10 min using the half-height, half-diameter die.

15.1.4 *Concept of I_r and I_R* —Relevant if S_c and S_R have been calculated from a large enough body of data, and if test results are averages obtained from testing two specimens.

⁶ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-1164.

⁷ Supporting data are available from ASTM Headquarters.

⁸ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR: D20-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE 9 Precision Data for High Melt Flow Polyolefins Procedure C (Values in g/10 min)^a

Materials ^b	Average	S _p	S _m	r	R
PE-A (35)	4.67	0.068	0.118	0.191	0.384
PE-B (185)	24.90	0.688	1.188	1.928	3.270
PE-C (2350)	315.7	10.81	19.89	36.27	55.68
PE-D (122)	16.20	0.188	0.348	0.526	0.875

^aThis data was generated with dies having a nominal length of 3.685 mm versus the required 4.000 mm.

^bNumbers in parentheses are approximate melt flow rate values of materials using standard die (5.3).

15.1.5 *Repeatability, I_r*—In comparing two test results for the same material, obtained by the same operator using the same equipment on the same day, the two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_r value for that material.

15.1.6 *Reproducibility, I_R*—In comparing two test results for the same material, obtained by different operators using different equipment on different days, the two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the I_R value for that material.

15.1.7 Any judgment in accordance with 15.1.4 and 15.1.6 would have an approximate 95% (0.95) probability of being correct.

15.2 *Bias*—There are no recognized standards by which to estimate bias of this test method.

16. Precision and Bias (Procedure D)

16.1 Precision

16.1.1 Procedure D used as many as nine laboratories, five materials and two determinations in order to come up with the following tables of precision supporting the method. This meets or exceeds all the standards required for Practice E 691.

16.1.2 The degree of precision is quite high for all levels of loads on the ram. The highest level of precision was attained for the 2.16 kg load, the lowest for the 21.6 kg load. It is important to note that the 21.6 kg load is not optimum for the short [0.316 in.] die because the speed of testing does not allow

for the flow to reach probably equilibrium rate. All such testing at 21.6 kg is much better done with a longer die such as used in Test Method D 3364. Refer to Table 10 for 2.16 kg load; Table 11 for 5 kg load; Table 12 for 10 kg load and Table 13 for 21.6 kg load.

TABLE 10 Precision Statement for Test Method: 2.16 kg

Materials	Average	S _p	S _m	r	R
PE1	0.7567	0.0079	0.0223	0.0220	0.0904
PE2	0.4298	0.0050	0.0277	0.0168	0.0776
PE3	0.5527	0.0098	0.0179	0.0288	0.0502
PE4	0.2627	0.0048	0.0192	0.0120	0.0511
PE5	0.4104	0.0079	0.0119	0.0222	0.0334

TABLE 11 Precision Statement for Test Method: 5 kg

Materials	Average	S _p	S _m	r	R
PE1	3.0661	0.2715	0.7909	2.1602	2.1865
PE2	1.9950	0.0482	0.1627	0.1853	0.2595
PE3	1.5821	0.0650	0.0462	0.0729	0.1283
PE4	0.9876	0.2158	0.2650	0.6042	0.7168
PE5	1.2939	0.0170	0.0285	0.0475	0.0788

TABLE 12 Precision Statement for Test Method: 10 kg

Materials	Average	S _p	S _m	r	R
PE1	11.6841	0.3066	0.4595	0.8581	1.2867
PE2	7.5768	0.1268	0.2751	0.2644	0.7704
PE3	4.1181	0.6335	0.1036	0.1497	0.2902
PE4	3.7693	0.0639	0.1125	0.1507	0.8151
PE5	3.2471	0.0228	0.0647	0.0688	0.1812

TABLE 13 Precision Statement for Test Method: 21.6 kg

Materials	Average	S _p	S _m	r	R
PE1	59.9385	2.1012	2.7687	5.8633	7.7489
PE2	28.2287	1.4450	1.4450	4.0459	4.0459
PE3	14.1978	0.1862	0.3352	0.4653	0.8387
PE4	17.8132	0.3324	0.4259	0.8308	1.1924
PE5	12.2552	0.1104	0.4590	0.3090	1.2851

17. Keywords

17.1 melt flow rate; melt index; volume flow rate

APPENDICES

(Nonmandatory Information)

X1. EXTRUSION PLASTOMETER BORE ALIGNMENT

X1.1 A fixture consisting of a circular level mounted on a shaft having two bearing points 9.47 + 0.00 – 0.0076 mm in diameter that can be inserted into the bore has been found suitable. A circular level that can be rigidly mounted on the

piston rod for insertion into the bore may also be satisfactory. A circular level having a sensitivity of 20 min/2.5 mm has been found satisfactory. Other alignment techniques that give comparable alignment sensitivity would be considered satisfactory.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X2. TROUBLESHOOTING GUIDE

INTRODUCTION

Appendix X2 is offered in an effort to help a laboratory improve melt flow rate testing and to get to the root cause of problems which may be caused by equipment, environment, or testing technique. This guide is not meant to be an all-inclusive trouble-shooting check list, but merely tries to help users to evaluate testing to some degree.

X2.1 Basic Programs

X2.1.1 The following are basic programs in which all laboratories should participate:

X2.1.1.1 *Standard Reference Materials*—If available, SRMs can usually be obtained from NIST. These SRMs provide accurate information on the melt flow rate of these materials. However, these SRMs are expensive and are available for a very limited number of materials.

X2.1.1.2 *Internal Controls*—An internal control for each type of material should be set up. This involves setting aside enough material to last a long time (at least one year). These materials will have to be tested many times to establish statistical parameters. Each time an internal standard is run, the results should be plotted on a SQC chart so that any problems or trends can be detected quickly. A SQC chart should be set up for each extrusion plastometer in the laboratory. A replacement standard should be introduced before the old standard runs out and should be compared to the old standard to ensure that any shifts seen in the SQC chart are due to the material and not to the equipment.

X2.1.1.3 *Proficiency Tests*—Participation in proficiency test programs is important for demonstrating how the laboratory's results compare with other laboratories. Over a period of time, laboratory bias can be demonstrated, if bias exists.

X2.1.1.4 *ASTM Round Robins (Interlaboratory Tests)*—These programs are similar to proficiency test programs but are limited to only a few laboratories and a few materials. However, these programs do provide information on how well the laboratory performs the test.

X2.1.1.5 *Calibration, Verification, and Maintenance*—The extrusion plastometer should be calibrated. Proper maintenance of the instrument will help to ensure proper calibration.

(1) As a first step to obtaining reproducible results, operators should be well trained. Using internal standards can demonstrate that repeatable results can be provided. The operators should also understand the test and know what can affect the results.

(2) Before starting the test, the following should be verified:

- (a) The protocol is understood by the operator.
- (b) The barrel, piston, and die orifice have been properly cleaned.
- (c) The extrusion plastometer, including the piston and die, are at equilibrium at the proper temperature.
- (d) The extrusion plastometer is level.
- (e) A standard has been run and the results fall within established parameters.

(3) When a problem arises, the following questions should be asked:

- (a) Did anything unusual happen?
- (b) Does the extrudate contain air bubbles?
- (c) Were the proper weights applied?
- (d) Is the unit at the proper temperature?
- (e) Was the piston stored in the barrel?
- (f) Is the die damaged, that is, chipped?
- (g) Is the die bore worn, that is, the diameter is larger than the maximum specified?
- (h) Was the proper amount of material used?
- (i) Has the balance been properly calibrated?
- (j) Was the proper purge time used?
- (k) Was the plug pulled at the proper time?
- (l) Was the correct warm-up time used?
- (m) Was the barrel cleaned properly?
- (n) Is the piston rod straight?
- (o) Is the piston tip diameter OK?

X2.2 Understanding How Melt Flow Rate Is Affected

X2.2.1 *Levelness of the Instrument*—The piston must be free to move in a vertical position. If the instrument is not level, the piston can be slowed by friction as it touches the side of the barrel. This will not only introduce an error into the results but may also scratch the barrel. The piston must move in an exact vertical plane, indicated by a small bubble level that should be placed on the top of the barrel or on the top of the piston when placed in the barrel. The level should be checked on a regular schedule.

X2.2.2 *Die Orifice Diameter*—An undersized die orifice (which can result from a buildup of residue) will cause low results. Conversely, an oversized orifice (which can result from wear) will cause high results. It is important that the die orifice be cleaned after each test and that the die orifice diameter be verified frequently using a calibrated go/no-go gage. Remember, the calibrated pin gage can also wear and the diameter should be verified regularly.

X2.2.3 *Die Cleanliness*—The die should be completely cleaned after each test. Any residue left in the orifice will eventually char and be very difficult, if not impossible, to clean. Buildup of material will reduce the diameter of the die and change the surface smoothness, resulting in erroneous results.

X2.2.4 *Temperature in the Barrel*—Melt flow rates are very dependent on temperature. The temperature within the barrel is the only important temperature. Temperature indicators must be calibrated to the temperature within the barrel. High flow rates will result from high temperatures and low flow rates from low temperatures. Defective heaters may be difficult to detect and can cause variable results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X2.2.5 Preheat Time—Proper preheat time is required to allow the material in the barrel to fully melt and to come to temperature equilibrium throughout the barrel. If material is not fully melted, die plugging and low melt flow rates can result. If not at temperature equilibrium, the melt flow rate will change as the test is conducted.

X2.2.5.1 It is important that the die and piston be at temperature equilibrium with the rest of the system before any sample is introduced into the barrel. If the piston and die are not at temperature, the large mass of metal involved must be heated to temperature during testing and the energy required may not allow the polymer to reach thermal equilibrium. This can result in erroneous data.

X2.2.6 Barrel Condition—The barrel should be properly cleaned after each test. Failure to do so can result in contamination of the next sample, and buildup and degradation of material in the barrel, resulting in a decrease in the diameter of the barrel. This can cause friction with the piston tip resulting in low melt flow rates.

X2.2.6.1 Frequently overlooked is the condition of the barrel itself. In addition to being clean, the barrel wall must be smooth and of the proper diameter. The inside diameter of the barrel is as important as the diameter of the die orifice. The barrel diameter should be measured regularly, and changed if so indicated. The melt flow rate is a function of the fourth power of the barrel diameter.

X2.2.7 Piston Parameters—The diameter of the piston foot should be checked. If it is worn, material can flow back past the tip. This would result in erroneous data.

X2.2.7.1 The piston tip, or foot, is sometimes screwed into the end of the piston and can be changed easily. However, because it is easily unscrewed, it can work itself loose. The piston tip must be checked frequently and kept tightly screwed into the piston.

X2.2.7.2 Care must be taken not to bend a piston. Even a slight, almost non-detectable curvature in the piston can result in the force not being applied directly to the vertical position, resulting in excessive pressure on the wall of the barrel. This will cause low results and can also scratch the barrel wall.

X2.2.7.3 The piston has two reference marks. The lower scribe mark on the piston must be at the reference start position (top of the guide ring or barrel) at 7.0 ± 0.5 min, as stated in 9.8 and 10.2.10. Starting each test at a different position can give variable results.

X2.2.8 Sample Mass—Small variations in sample mass can cause significant variability in melt flow rates. Any balance used to weigh the sample should be calibrated and verified on a regular schedule.

X2.2.9 Moisture in Sample—Samples should be dried before testing. Some materials may be affected more than others by moisture. However, the presence of moisture during the test, in general, will affect the melt flow rates of most materials.

X2.2.10 Sample Purge Time—Purging material from the barrel before the actual test starts serves two primary functions:

(1) to expel entrapped air or volatiles before applying the full test load, and (2) to move the lower scribe mark on the piston to the reference start position. For flow rate consistency, it is important that the extrudate be free of voids and that the test always starts with the piston in the same position in the barrel. Whether in the extrudate for Procedure A or in the barrel for Procedure B, voids will affect test results.

X2.2.11 Load Weight—The actual weight (load) applied to the material during the test will affect the test results. Higher weights will produce higher results. The load weight, which includes the piston weight, should be verified at regular intervals.

X2.2.12 Extrudate Cut Technique—It is important that good extrudate cutting technique be developed. A sharp, clean tool should always be used for this operation. The timing of the cut is critical since a shorter than target cut time will produce low results and a longer than target cut time will give high results. The timing intervals should be verified with certified timers. When cut, the extrudate end should not be ragged or stringy. These variables, if not controlled, can cause poor reproducibility of test results.

X2.2.13 Purging—Purging the barrel between runs or when changing materials is sometimes necessary. Purging with the same material which will be tested after the purge is best. However, if for some reason another purge material is used, run the test material through the barrel before the actual test run in order to ensure that the purge material is no longer in the barrel.

X2.2.13.1 Purging does not replace cleaning. After purging, the equipment must be cleaned properly to avoid the effects of contamination, resin buildup, and so forth, as discussed previously.


X2.2.14 Melt Density—It is important that the correct melt density be used, that is, 0.7636 g/cm^3 for PE at 190°C and 0.7386 g/cm^3 for PP at 230°C . These values may be different for copolymers or when additives are incorporated into the resin. Small errors in these values can affect the end results. If not known, the melt density can be determined as described at the end of Footnote A of Table 2.

X2.2.15 Piston (Flag) Travel Distance—The setting of the proper piston travel distance (6.35 ± 0.25 mm for MFRs up to 10 g/10 min and 25.40 ± 0.25 mm for MFRs greater than 10 g/10 min) is important in Procedure B. The reproducibility of Procedure B is better if these parameters are strictly adhered to. A calibrated distance verification device will be required to maintain the proper piston travel.

X2.2.16 Calculation Factors—When trouble shooting, always check the calculations and the factors used.

X2.2.17 Power (Electrical) Fluctuation—Constant power (voltage) is important to maintain the temperature desired. Periodic changes in voltage will cause changes in the temperature of the unit, creating test values that fluctuate because of inconsistent sample temperatures. Though this is a rare situation, this fluctuation has been found to cause erratic test results.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

 D 1238 - 04c

REFERENCES

- (1) "Polyethylene Insulation and Sheathing for Electrical Cables," *Government Department Electrical Specification No. 27*, Great Britain, 1950.
- (2) Tordella, J. P., and Jolly, R. E., "Melt Flow of Polyethylene," *Modern Plastics*, Vol 31, No. 2, 1953, p. 146.
- (3) Dexter, F. D., "Plasticity Grading of Fluorothenes," *Modern Plastics*, Vol 30, No. 8, 1953, p. 125.
- (4) Harban, A. A., and McClamery, R. M., "Limitations on Measuring Melt Flow Rates of Polyethylene and Ethylene Copolymers by Extrusion Plastometer," *Materials Research and Standards*, Vol 3, No. 11, 1963, p. 906.
- (5) Rudin, A., and Schreiber, H. P., "Factors in Melt Indexing of Polyolefins," *SPE Journal*, Vol 20, No. 6, 1964, p. 533.

SUMMARY OF CHANGES

Committee D20 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue, D 1238 - 04b, that may impact the use of this standard. (December 1, 2004)

- (1) Added Procedure D (Section 13). (2) Added reporting information for Procedure D to Section 14.

Committee D20 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue, D 1238 - 04a, that may impact the use of this standard. (October 1, 2004)

- (1) Inclusion of a precision statement for Procedure D.

Committee D20 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue, D 1238 - 04, that may impact the use of this standard. (August 1, 2004)

- (1) Changed the die height dimension in 11.1.2. (2) Added footnote in Table 9 to address the change in 11.1.2.

Committee D20 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue, D 1238 - 01, that may impact the use of this standard. (March 1, 2004)

- (1) Editorially added sulfone plastic melt flow rate conditions as found in Specification D 6394 for Sulfone Plastics (SP). (2) Additional melt flow rate conditions for polyether sulfone and polyphenylsulfone placed in 8.2.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19380-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9555 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก จ

ข้อมูลคุณสมบัติของพลาสติกชนิด Polypropylene(PP)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผจ.1 ข้อมูลคุณสมบัติของพลาสติกชนิด Polypropylene(PP) จาก บ. ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)

1100NK



POLYPROPYLENE HOMOPOLYMER

CHARACTERISTICS : HIGH FLOW

APPLICATIONS : FOR INJECTION MOLDING
GENERAL PURPOSE : HOUSEWARES, CLOSURES, FOOD CONTAINERS

PROCESSING TEMPERATURE : 190 - 240°C

* MEET THE F.D.A. REQUIREMENT IN THE CODE OF FEDERAL REGULATIONS IN 21 CFR 177.1520 FOR FOOD CONTACT

TYPICAL DATA			
PROPERTIES	UNIT	VALUE	TEST METHOD
MELT FLOW INDEX (2.16 kg/230 °C)	g/10min	11	ASTM D 1238
TENSILE STRENGTH AT YIELD	N/mm ²	36	ASTM D 638
ELONGATION AT YIELD	%	26	ASTM D 638
CHARPY NOTCHED IMPACT STRENGTH (AT 23 °C)	kJ/mm ²	2.9	DIN 53453
FLEXURAL MODULUS (1% SECANT)	MPa	1500	ASTM D790
ROCKWELL HARDNESS	R-Scale	107	ASTM D785
HEAT DISTORTION TEMPERATURE (LOAD 0.45 N/mm ²)	°C	110	ASTM D 648

ISSUE NO. 01 06 09 REV. 03

REMARK : THE VALUES PRESENTED ON THE ABOVE ARE TYPICAL LABORATORY AVERAGE, NOT TO BE CONSTRUED AS SPECIFICATIONS AND MAY VARY WITHIN MODERATE RANGES. THE APPLICABILITY OR THE ACCURACY OF THIS INFORMATION OR THE SUITABILITY OF OUR PRODUCTS CANNOT BE GUARANTEED BECAUSE THE CONDITIONS OF USE ON THE PART OF OUR USERS ARE BEYOND OUR CONTROL.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ผล.1 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาของผนังภายนอกกระบอกลอมเมื่อตั้งที่

อุณหภูมิ 300°C

เวลา(นาท)	อุณหภูมิ	เวลา(นาท)	อุณหภูมิ	เวลา(นาท)	อุณหภูมิ	เวลา(นาท)	อุณหภูมิ	เวลา(นาท)	อุณหภูมิ
0.25	26	12	229	23.75	301	35.5	300	47.25	300
0.5	27	12.25	232	24	300	35.75	300	47.5	300
0.75	28	12.5	236	24.25	300	36	300	47.75	300
1	30	12.75	239	24.5	300	36.25	300	48	300
1.25	34	13	242	24.75	300	36.5	300	48.25	300
1.5	37	13.25	246	25	300	36.75	300	48.5	300
1.75	42	13.5	249	25.25	300	37	300	48.75	300
2	46	13.75	252	25.5	300	37.25	300	49	300
2.25	51	14	256	25.75	300	37.5	300	49.25	300
2.5	56	14.25	258	26	300	37.75	300	49.5	300
2.75	61	14.5	261	26.25	300	38	300	49.75	300
3	67	14.75	265	26.5	300	38.25	300	50	300
3.25	71	15	267	26.75	300	38.5	300	50.25	300
3.5	78	15.25	270	27	300	38.75	300	50.5	300
3.75	83	15.5	274	27.25	300	39	300	50.75	300
4	89	15.75	277	27.5	300	39.25	300	51	300
4.25	94	16	280	27.75	300	39.5	300	51.25	300
4.5	99	16.25	283	28	300	39.75	300	51.5	300
4.75	105	16.5	285	28.25	300	40	300	51.75	300
5	110	16.75	288	28.5	300	40.25	300	52	300
5.25	115	17	291	28.75	300	40.5	300	52.25	300
5.5	120	17.25	294	29	300	40.75	300	52.5	300
5.75	125	17.5	297	29.25	300	41	300	52.75	300
6	130	17.75	298	29.5	300	41.25	300	53	300
6.25	135	18	300	29.75	300	41.5	300	53.25	300
6.5	139	18.25	301	30	300	41.75	300	53.5	300
6.75	144	18.5	301	30.25	300	42	300	53.75	300
7	149	18.75	301	30.5	300	42.25	300	54	300
7.25	153	19	301	30.75	300	42.5	300	54.25	300
7.5	158	19.25	302	31	300	42.75	300	54.5	300
7.75	162	19.5	301	31.25	300	43	300	54.75	300
8	166	19.75	301	31.5	300	43.25	300	55	300
8.25	171	20	301	31.75	300	43.5	300	55.25	300
8.5	175	20.25	301	32	300	43.75	300	55.5	300
8.75	180	20.5	301	32.25	300	44	300	55.75	300
9	183	20.75	301	32.5	300	44.25	300	56	300
9.25	188	21	301	32.75	300	44.5	300	56.25	300
9.5	192	21.25	301	33	300	44.75	300	56.5	300
9.75	196	21.5	301	33.25	300	45	300	56.75	300
10	200	21.75	301	33.5	300	45.25	300	57	300
10.25	203	22	301	33.75	300	45.5	300	57.25	300
10.5	207	22.25	301	34	300	45.75	300	57.5	300
10.75	211	22.5	301	34.25	300	46	300	57.75	300
11	215	22.75	301	34.5	300	46.25	300	58	300
11.25	218	23	301	34.75	300	46.5	300	58.25	300
11.5	222	23.25	300	35	300	46.75	300	58.5	300
11.75	225	23.5	300	35.25	300	47	300	58.75	300

เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ
59	300	71.5	300	84	300	96.5	300	109	300
59.25	300	71.75	300	84.25	300	96.75	300	109.25	300
59.5	300	72	300	84.5	300	97	300	109.5	300
59.75	300	72.25	300	84.75	300	97.25	300	109.75	300
60	300	72.5	300	85	300	97.5	300	110	300
60.25	300	72.75	300	85.25	300	97.75	300	110.25	300
60.5	300	73	300	85.5	300	98	300	110.5	300
60.75	300	73.25	300	85.75	300	98.25	300	110.75	300
61	300	73.5	300	86	300	98.5	300	111	300
61.25	300	73.75	300	86.25	300	98.75	300	111.25	300
61.5	300	74	300	86.5	300	99	300	111.5	300
61.75	300	74.25	300	86.75	300	99.25	300	111.75	300
62	300	74.5	300	87	300	99.5	300	112	300
62.25	300	74.75	300	87.25	300	99.75	300	112.25	300
62.5	300	75	300	87.5	300	100	300	112.5	300
62.75	300	75.25	300	87.75	300	100.25	300	112.75	300
63	300	75.5	300	88	300	100.5	300	113	300
63.25	300	75.75	300	88.25	300	100.75	300	113.25	300
63.5	300	76	300	88.5	300	101	300	113.5	300
63.75	300	76.25	300	88.75	300	101.25	300	113.75	300
64	300	76.5	300	89	300	101.5	300	114	300
64.25	300	76.75	300	89.25	300	101.75	300	114.25	300
64.5	300	77	300	89.5	300	102	300	114.5	300
64.75	300	77.25	300	89.75	300	102.25	300	114.75	300
65	300	77.5	300	90	300	102.5	300	115	300
65.25	300	77.75	300	90.25	300	102.75	300	115.25	300
65.5	300	78	300	90.5	300	103	300	115.5	300
65.75	300	78.25	300	90.75	300	103.25	300	115.75	300
66	300	78.5	300	91	300	103.5	300	116	300
66.25	300	78.75	300	91.25	300	103.75	300	116.25	300
66.5	300	79	300	91.5	300	104	300	116.5	300
66.75	300	79.25	300	91.75	300	104.25	300	116.75	300
67	300	79.5	300	92	300	104.5	300	117	300
67.25	300	79.75	300	92.25	300	104.75	300	117.25	300
67.5	300	80	300	92.5	300	105	300	117.5	300
67.75	300	80.25	300	92.75	300	105.25	300	117.75	300
68	300	80.5	300	93	300	105.5	300	118	300
68.25	300	80.75	300	93.25	300	105.75	300	118.25	300
68.5	300	81	300	93.5	300	106	300	118.5	300
68.75	300	81.25	300	93.75	300	106.25	300	118.75	300
69	300	81.5	300	94	300	106.5	300	119	300
69.25	300	81.75	300	94.25	300	106.75	300	119.25	300
69.5	300	82	300	94.5	300	107	300	119.5	300
69.75	300	82.25	300	94.75	300	107.25	300	119.75	300
70	300	82.5	300	95	300	107.5	300	120	300
70.25	300	82.75	300	95.25	300	107.75	300		
70.5	300	83	300	95.5	300	108	300		
70.75	300	83.25	300	95.75	300	108.25	300		
71	300	83.5	300	96	300	108.5	300		
71.25	300	83.75	300	96.25	300	108.75	300		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผล.2 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาของผนังภายในกระบอกลอสมเมื่อตั้งที่

อุณหภูมิ 300°C

เวลา(นาท)	อุณหภูมิ	เวลา(นาท)	อุณหภูมิ	เวลา(นาท)	อุณหภูมิ	เวลา(นาท)	อุณหภูมิ	เวลา(นาท)	อุณหภูมิ
0.25	26.7	12	218	23.75	298.1	35.5	305.9	47.25	309.9
0.5	26.8	12.25	221.8	24	298.3	35.75	306.1	47.5	309.9
0.75	27.5	12.5	225.1	24.25	298.4	36	306.2	47.75	309.9
1	29.2	12.75	228.6	24.5	298.6	36.25	306.3	48	310
1.25	32	13	231.9	24.75	298.7	36.5	306.4	48.25	310
1.5	35.1	13.25	235.3	25	298.8	36.75	306.4	48.5	310
1.75	38.9	13.5	238.6	25.25	298.9	37	306.6	48.75	310.1
2	43	13.75	241.7	25.5	299.1	37.25	306.7	49	310.1
2.25	47.5	14	244	25.75	299.2	37.5	306.9	49.25	310.2
2.5	51.8	14.25	248.2	26	299.4	37.75	306.9	49.5	310.2
2.75	56.9	14.5	251.4	26.25	299.5	38	307	49.75	310.3
3	61.4	14.75	254.6	26.5	299.5	38.25	307.1	50	310.3
3.25	66.7	15	257.7	26.75	299.6	38.5	307.2	50.25	310.4
3.5	71.3	15.25	260.6	27	299.7	38.75	307.2	50.5	310.5
3.75	76.2	15.5	263.2	27.25	299.8	39	307.3	50.75	310.6
4	81.6	15.75	266.8	27.5	299.9	39.25	307.4	51	310.7
4.25	86.6	16	269.8	27.75	300	39.5	307.5	51.25	310.7
4.5	91.3	16.25	272.6	28	300.1	39.75	307.6	51.5	310.7
4.75	96.5	16.5	275.8	28.25	300.4	40	307.8	51.75	310.7
5	101.5	16.75	278.7	28.5	300.6	40.25	307.8	52	310.7
5.25	106.4	17	281.8	28.75	300.9	40.5	307.9	52.25	310.8
5.5	111	17.25	284.6	29	301.1	40.75	307.9	52.5	310.8
5.75	115.1	17.5	287.1	29.25	301.4	41	308	52.75	310.8
6	120.8	17.75	289.4	29.5	301.6	41.25	308.1	53	310.8
6.25	125.2	18	290.8	29.75	301.9	41.5	308.1	53.25	310.8
6.5	130.1	18.25	292.1	30	302	41.75	308.2	53.5	310.8
6.75	134.7	18.5	293.1	30.25	302.3	42	308.3	53.75	310.8
7	139.2	18.75	293.8	30.5	302.5	42.25	308.4	54	310.7
7.25	143.4	19	294.2	30.75	302.7	42.5	308.5	54.25	310.8
7.5	148	19.25	294.6	31	303	42.75	308.6	54.5	310.8
7.75	152.3	19.5	295	31.25	303.1	43	308.7	54.75	310.8
8	156.3	19.75	295.2	31.5	303.3	43.25	308.8	55	310.8
8.25	160.7	20	295.6	31.75	303.5	43.5	308.9	55.25	310.8
8.5	164.9	20.25	295.8	32	303.7	43.75	309	55.5	310.9
8.75	168.8	20.5	296	32.25	303.8	44	309	55.75	310.9
9	172.8	20.75	296.2	32.5	304	44.25	309	56	311
9.25	177	21	296.4	32.75	304.2	44.5	309.3	56.25	311.1
9.5	181.1	21.25	296.5	33	304.4	44.75	309.3	56.5	311.1
9.75	185	21.5	296.7	33.25	304.7	45	309.3	56.75	311.1
10	189	21.75	296.9	33.5	304.8	45.25	309.4	57	311.2
10.25	192.5	22	297.1	33.75	304.9	45.5	309.5	57.25	311.3
10.5	196.8	22.25	297.3	34	305.1	45.75	309.6	57.5	311.4
10.75	200.3	22.5	297.4	34.25	305.2	46	309.6	57.75	311.3
11	204.2	22.75	297.6	34.5	305.2	46.25	309.6	58	311.4
11.25	207.8	23	297.7	34.75	305.4	46.5	309.6	58.25	311.4
11.5	211.3	23.25	297.9	35	305.6	46.75	309.7	58.5	311.4
11.75	214.8	23.5	297.9	35.25	305.7	47	309.8	58.75	311.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ
59	311.4	71.5	311.9	84	312.6	96.5	312.9	109	313.2
59.25	311.4	71.75	311.9	84.25	312.6	96.75	312.9	109.25	313.2
59.5	311.4	72	311.9	84.5	312.6	97	312.9	109.5	313.2
59.75	311.4	72.25	311.9	84.75	312.6	97.25	312.9	109.75	313.2
60	311.4	72.5	311.9	85	312.6	97.5	313	110	313.2
60.25	311.4	72.75	311.9	85.25	312.6	97.75	313	110.25	313.2
60.5	311.5	73	312	85.5	312.6	98	313	110.5	313.2
60.75	311.6	73.25	312	85.75	312.8	98.25	313.1	110.75	313.2
61	311.6	73.5	312.1	86	312.8	98.5	313.1	111	313.2
61.25	311.7	73.75	312.2	86.25	312.8	98.75	313.1	111.25	313.2
61.5	311.7	74	312.2	86.5	312.8	99	313.1	111.5	313.2
61.75	311.7	74.25	312.2	86.75	312.8	99.25	313.1	111.75	313.2
62	311.6	74.5	312.2	87	312.8	99.5	313.2	112	313.2
62.25	311.6	74.75	312.2	87.25	312.8	99.75	313.2	112.25	313.2
62.5	311.6	75	312.2	87.5	312.8	100	313.2	112.5	313.2
62.75	311.6	75.25	312.2	87.75	312.8	100.25	313.2	112.75	313.2
63	311.6	75.5	312.2	88	312.8	100.5	313.2	113	313.2
63.25	311.6	75.75	312.2	88.25	312.8	100.75	313.2	113.25	313.2
63.5	311.7	76	312.2	88.5	312.8	101	313.1	113.5	313.2
63.75	311.8	76.25	312.2	88.75	312.8	101.25	313.1	113.75	313.2
64	311.9	76.5	312.2	89	312.9	101.5	313	114	313.2
64.25	312	76.75	312.2	89.25	312.9	101.75	312.9	114.25	313.3
64.5	312	77	312.2	89.5	312.9	102	312.9	114.5	313.3
64.75	312	77.25	312.2	89.75	312.9	102.25	312.9	114.75	313.3
65	312	77.5	312.3	90	312.9	102.5	312.9	115	313.3
65.25	312	77.75	312.3	90.25	312.9	102.75	312.9	115.25	313.3
65.5	312	78	312.4	90.5	312.9	103	312.9	115.5	313.3
65.75	312	78.25	312.5	90.75	312.9	103.25	312.9	115.75	313.3
66	312	78.5	312.5	91	313	103.5	312.9	116	313.3
66.25	312	78.75	312.6	91.25	313.1	103.75	312.9	116.25	313.3
66.5	312	79	312.6	91.5	313.1	104	312.9	116.5	313.3
66.75	312	79.25	312.6	91.75	313.1	104.25	312.9	116.75	313.3
67	312	79.5	312.6	92	313.1	104.5	312.9	117	313.3
67.25	312	79.75	312.7	92.25	313.1	104.75	312.9	117.25	313.3
67.5	312	80	312.7	92.5	313.1	105	312.9	117.5	313.3
67.75	312	80.25	312.7	92.75	313.1	105.25	312.9	117.75	313.3
68	312	80.5	312.8	93	313	105.5	312.9	118	313.3
68.25	312	80.75	312.8	93.25	313	105.75	312.9	118.25	313.3
68.5	311.9	81	312.7	93.5	313	106	312.9	118.5	313.3
68.75	311.9	81.25	312.7	93.75	313	106.25	312.9	118.75	313.3
69	311.9	81.5	312.6	94	313	106.5	312.9	119	313.3
69.25	311.9	81.75	312.6	94.25	313	106.75	312.9	119.25	313.3
69.5	311.9	82	312.6	94.5	313	107	312.9	119.5	313.3
69.75	312	82.25	312.6	94.75	313	107.25	313	119.75	313.3
70	312	82.5	312.6	95	312.9	107.5	313	120	313.3
70.25	311.9	82.75	312.6	95.25	312.9	107.75	313		
70.5	311.9	83	312.6	95.5	312.9	108	313.1		
70.75	311.9	83.25	312.6	95.75	312.9	108.25	313.1		
71	311.9	83.5	312.6	96	312.9	108.5	313.1		
71.25	311.9	83.75	312.6	96.25	312.9	108.75	313.1		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ไปเผยแพร่ข้อมูล

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผล.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่100°C

เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ
0.25	25	11	102	21.75	100
0.5	26	11.25	102	22	100
0.75	27	11.5	102	22.25	100
1	30	11.75	101	22.5	100
1.25	34	12	101	22.75	100
1.5	37	12.25	101	23	100
1.75	41	12.5	101	23.25	100
2	46	12.75	100	23.5	100
2.25	51	13	100	23.75	100
2.5	56	13.25	101	24	100
2.75	61	13.5	100	24.25	100
3	66	13.75	101	24.5	100
3.25	72	14	100	24.75	100
3.5	78	14.25	100	25	100
3.75	83	14.5	100	25.25	100
4	89	14.75	101	25.5	100
4.25	94	15	100	25.75	100
4.5	99	15.25	100	26	100
4.75	103	15.5	100	26.25	100
5	106	15.75	101	26.5	100
5.25	108	16	100	26.75	100
5.5	110	16.25	100	27	100
5.75	110	16.5	100	27.25	100
6	111	16.75	100	27.5	100
6.25	111	17	100	27.75	100
6.5	111	17.25	100	28	100
6.75	110	17.5	100	28.25	100
7	110	17.75	100	28.5	100
7.25	109	18	100	28.75	100
7.5	109	18.25	100	29	100
7.75	108	18.5	100	29.25	100
8	108	18.75	100	29.5	100
8.25	107	19	100	29.75	100
8.5	106	19.25	100	30	100
8.75	106	19.5	100		
9	105	19.75	100		
9.25	105	20	100		
9.5	105	20.25	100		
9.75	104	20.5	100		
10	104	20.75	100		
10.25	103	21	100		
10.5	103	21.25	100		
10.75	103	21.5	100		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผจ.4 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่150°C

เวลา(นาท)	อุณหภูมิ	เวลา(นาท)	อุณหภูมิ	เวลา(นาท)	อุณหภูมิ
0.25	25	12.25	150	24.25	150
0.5	26	12.5	150	24.5	150
0.75	28	12.75	150	24.75	150
1	30	13	150	25	150
1.25	33	13.25	150	25.25	150
1.5	37	13.5	150	25.5	150
1.75	42	13.75	150	25.75	150
2	46	14	150	26	150
2.25	51	14.25	150	26.25	150
2.5	56	14.5	150	26.5	150
2.75	62	14.75	150	26.75	150
3	67	15	150	27	150
3.25	73	15.25	150	27.25	150
3.5	79	15.5	150	27.5	150
3.75	85	15.75	150	27.75	150
4	90	16	150	28	150
4.25	95	16.25	150	28.25	150
4.5	100	16.5	150	28.5	150
4.75	106	16.75	150	28.75	150
5	111	17	150	29	150
5.25	116	17.25	150	29.25	150
5.5	121	17.5	150	29.5	150
5.75	126	17.75	150	29.75	150
6	131	18	150	30	150
6.25	136	18.25	150		
6.5	141	18.5	150		
6.75	146	18.75	150		
7	149	19	150		
7.25	152	19.25	150		
7.5	154	19.5	150		
7.75	156	19.75	150		
8	156	20	150		
8.25	157	20.25	150		
8.5	156	20.5	150		
8.75	156	20.75	150		
9	155	21	150		
9.25	154	21.25	150		
9.5	154	21.5	150		
9.75	153	21.75	150		
10	152	22	150		
10.25	151	22.25	150		
10.5	151	22.5	150		
10.75	151	22.75	150		
11	150	23	150		
11.25	150	23.25	150		
11.5	150	23.5	150		
11.75	151	23.75	150		
12	150	24	150		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผล.5 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่200°C

เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ
0.25	26	12.25	203	24.25	200
0.5	27	12.5	202	24.5	200
0.75	28	12.75	201	24.75	200
1	30	13	201	25	200
1.25	34	13.25	200	25.25	200
1.5	37	13.5	200	25.5	200
1.75	42	13.75	201	25.75	200
2	46	14	200	26	200
2.25	51	14.25	200	26.25	200
2.5	56	14.5	200	26.5	200
2.75	61	14.75	200	26.75	200
3	67	15	200	27	200
3.25	72	15.25	200	27.25	200
3.5	78	15.5	200	27.5	200
3.75	83	15.75	200	27.75	200
4	89	16	201	28	200
4.25	94	16.25	200	28.25	200
4.5	100	16.5	200	28.5	200
4.75	105	16.75	200	28.75	200
5	110	17	200	29	200
5.25	116	17.25	200	29.25	200
5.5	121	17.5	200	29.5	200
5.75	126	17.75	200	29.75	200
6	131	18	200	30	200
6.25	135	18.25	200		
6.5	140	18.5	200		
6.75	145	18.75	200		
7	150	19	200		
7.25	154	19.25	200		
7.5	158	19.5	200		
7.75	163	19.75	200		
8	167	20	200		
8.25	172	20.25	200		
8.5	176	20.5	200		
8.75	180	20.75	200		
9	184	21	200		
9.25	188	21.25	200		
9.5	192	21.5	200		
9.75	196	21.75	200		
10	199	22	200		
10.25	202	22.25	200		
10.5	203	22.5	200		
10.75	204	22.75	200		
11	205	23	200		
11.25	205	23.25	200		
11.5	204	23.5	200		
11.75	204	23.75	200		
12	203	24	200		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผล.6 ผลการทดลองความสัมพัทธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่250°C

เวลา(นาทื)	อุณหภูมิ	เวลา(นาทื)	อุณหภูมิ	เวลา(นาทื)	อุณหภูมิ
0.25	24	12.25	229	24.25	250
0.5	25	12.5	233	24.5	250
0.75	26	12.75	236	24.75	250
1	28	13	239	25	250
1.25	31	13.25	242	25.25	250
1.5	35	13.5	245	25.5	250
1.75	39	13.75	248	25.75	250
2	44	14	249	26	250
2.25	49	14.25	251	26.25	250
2.5	54	14.5	252	26.5	250
2.75	59	14.75	253	26.75	250
3	64	15	253	27	250
3.25	70	15.25	253	27.25	250
3.5	75	15.5	253	27.5	250
3.75	81	15.75	253	27.75	250
4	86	16	253	28	250
4.25	92	16.25	252	28.25	250
4.5	97	16.5	252	28.5	250
4.75	102	16.75	251	28.75	250
5	107	17	251	29	250
5.25	112	17.25	251	29.25	250
5.5	117	17.5	251	29.5	250
5.75	122	17.75	251	29.75	250
6	127	18	250	30	250
6.25	131	18.25	250		
6.5	136	18.5	250		
6.75	140	18.75	250		
7	145	19	250		
7.25	150	19.25	250		
7.5	154	19.5	250		
7.75	158	19.75	250		
8	162	20	250		
8.25	167	20.25	250		
8.5	170	20.5	250		
8.75	175	20.75	250		
9	179	21	250		
9.25	183	21.25	250		
9.5	187	21.5	250		
9.75	192	21.75	250		
10	196	22	250		
10.25	200	22.25	250		
10.5	204	22.5	250		
10.75	207	22.75	250		
11	211	23	250		
11.25	215	23.25	250		
11.5	218	23.5	250		
11.75	222	23.75	250		
12	226	24	250		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ผจ.7 ผลการทดลองความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อเวลาเมื่อตั้งค่าอุณหภูมิที่300°C

เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ	เวลา(นาที)	อุณหภูมิ
0.25	26	12.25	232	24.25	300
0.5	27	12.5	236	24.5	300
0.75	28	12.75	239	24.75	300
1	30	13	242	25	300
1.25	34	13.25	246	25.25	300
1.5	37	13.5	249	25.5	300
1.75	42	13.75	252	25.75	300
2	46	14	256	26	300
2.25	51	14.25	258	26.25	300
2.5	56	14.5	261	26.5	300
2.75	61	14.75	265	26.75	300
3	67	15	267	27	300
3.25	71	15.25	270	27.25	300
3.5	78	15.5	274	27.5	300
3.75	83	15.75	277	27.75	300
4	89	16	280	28	300
4.25	94	16.25	283	28.25	300
4.5	99	16.5	285	28.5	300
4.75	105	16.75	288	28.75	300
5	110	17	291	29	300
5.25	115	17.25	294	29.25	300
5.5	120	17.5	297	29.5	300
5.75	125	17.75	298	29.75	300
6	130	18	300	30	300
6.25	135	18.25	301		
6.5	139	18.5	301		
6.75	144	18.75	301		
7	149	19	301		
7.25	153	19.25	302		
7.5	158	19.5	301		
7.75	162	19.75	301		
8	166	20	301		
8.25	171	20.25	301		
8.5	175	20.5	301		
8.75	180	20.75	301		
9	183	21	301		
9.25	188	21.25	301		
9.5	192	21.5	301		
9.75	196	21.75	301		
10	200	22	301		
10.25	203	22.25	301		
10.5	207	22.5	301		
10.75	211	22.75	301		
11	215	23	301		
11.25	218	23.25	300		
11.5	222	23.5	300		
11.75	225	23.75	301		
12	229	24	300		

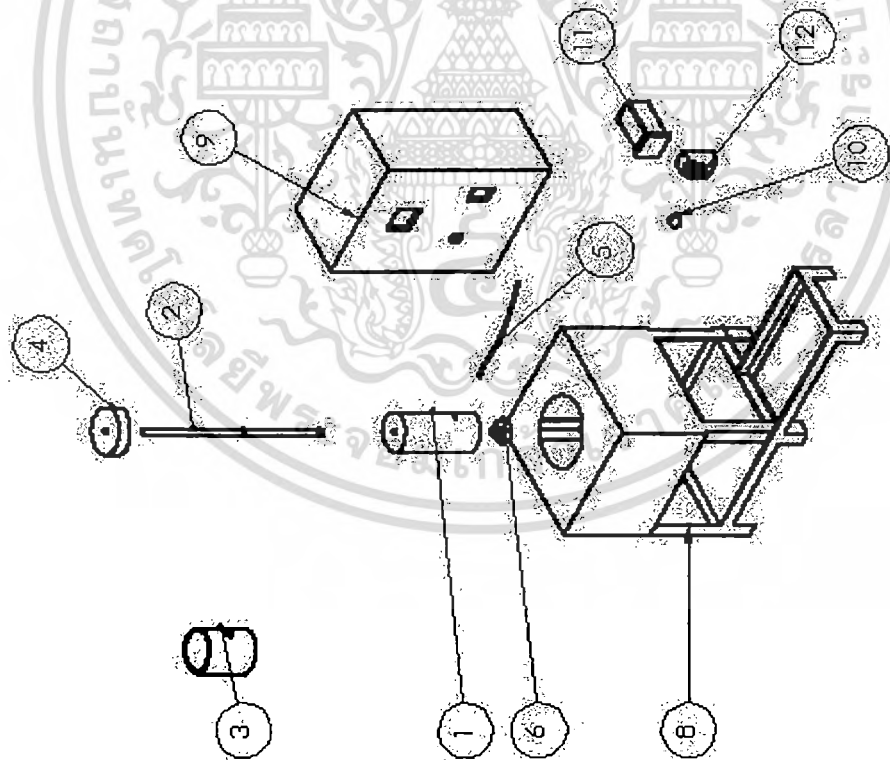
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
แบบของเครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY
1	cylinder		1
2	piston		1
3	heater		1
4	weight		1
5	thermometer		1
6	สกรู		1
7	หัวฉีด		1
8	เครื่องชั่ง	เครื่องชั่ง X1X1B	1
9	ถัง		1
10	ไมโครสวิตช์		1
11	Temperature Controller		1
12	Braker		1

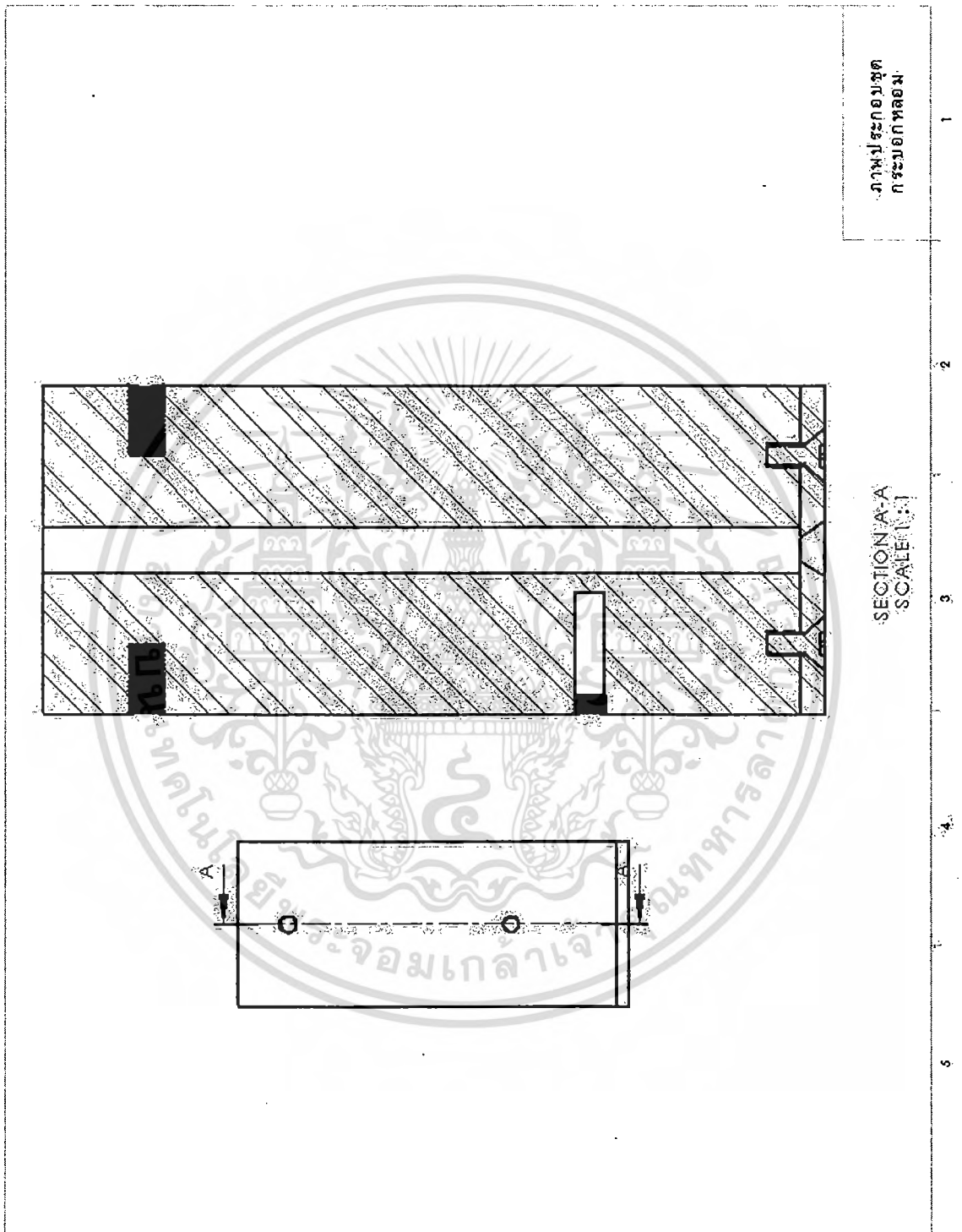


ภาพประกอบ

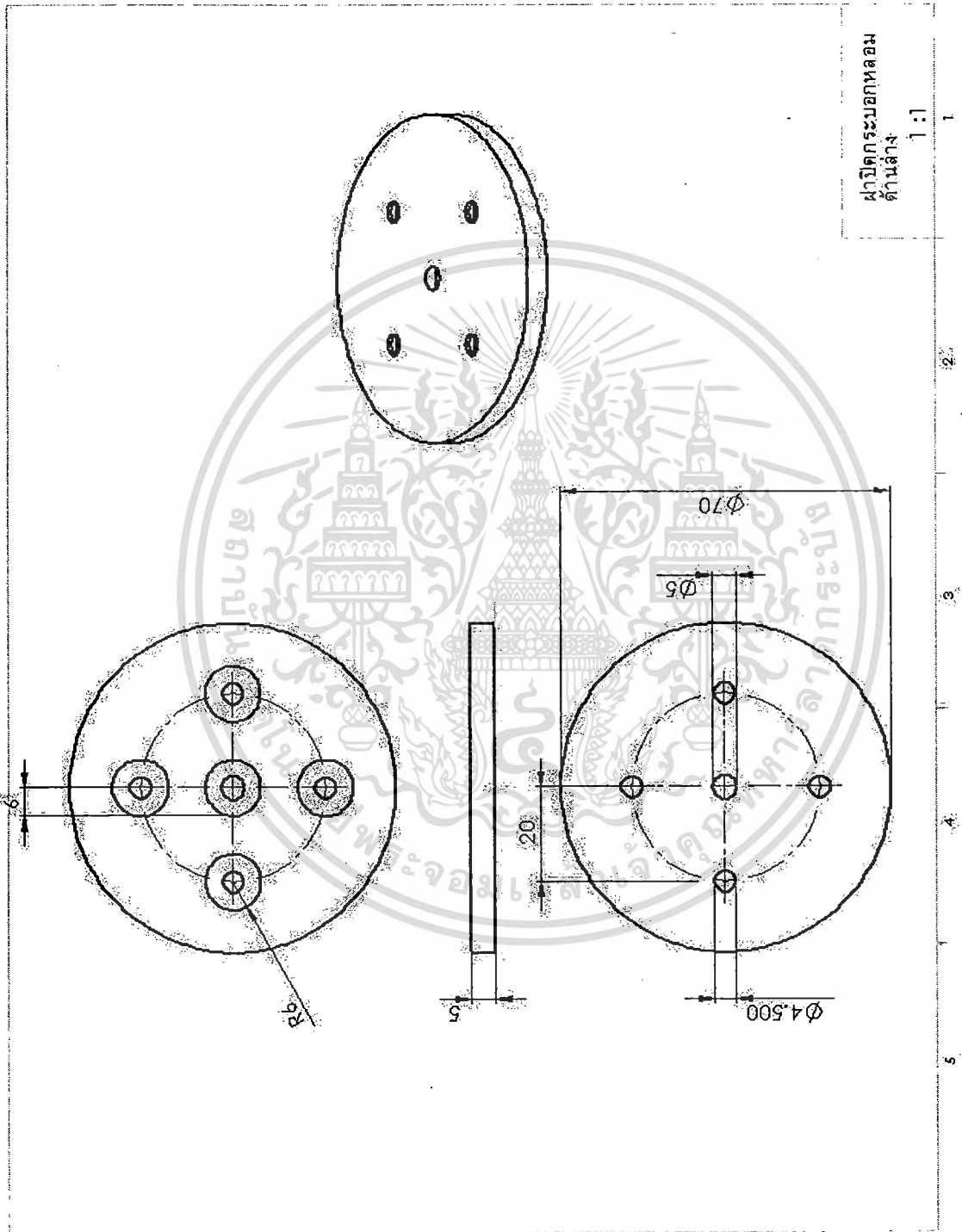
ภาพแยกชิ้นส่วน

SIZE	DWG. NO.	REV.
A	Melt-Flow-Rate-Tester	
SCALE: 1:20 WEIGHT:		SHEET 1 OF 1

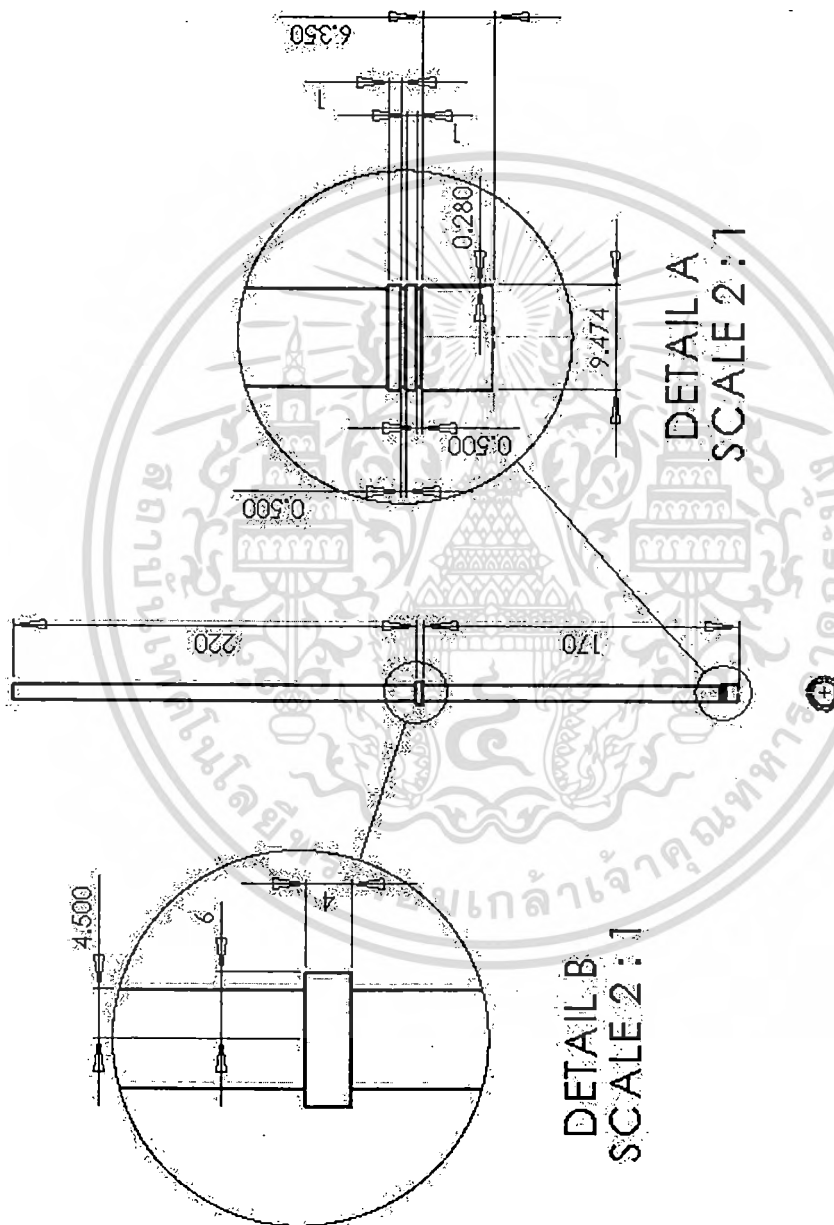
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

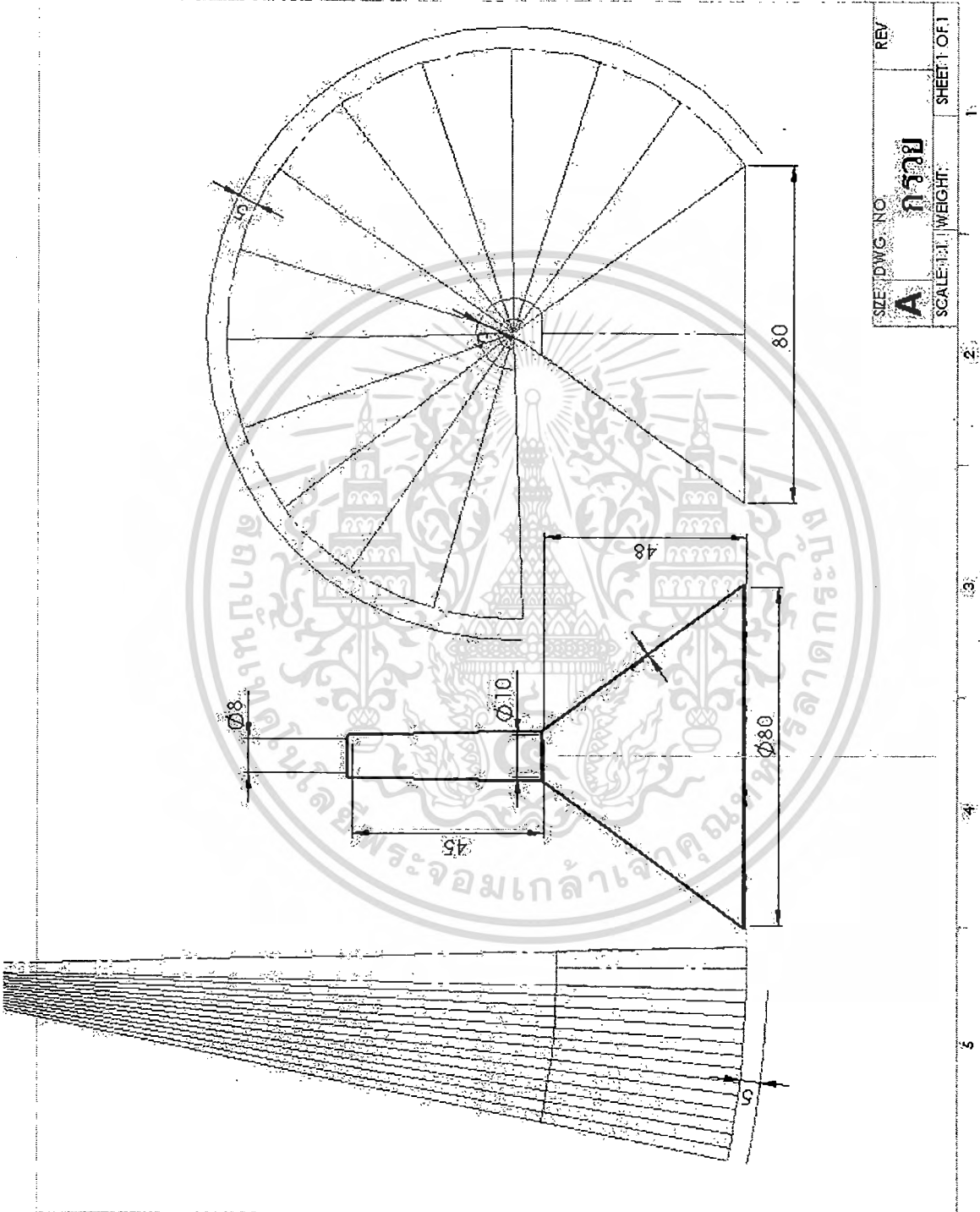


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



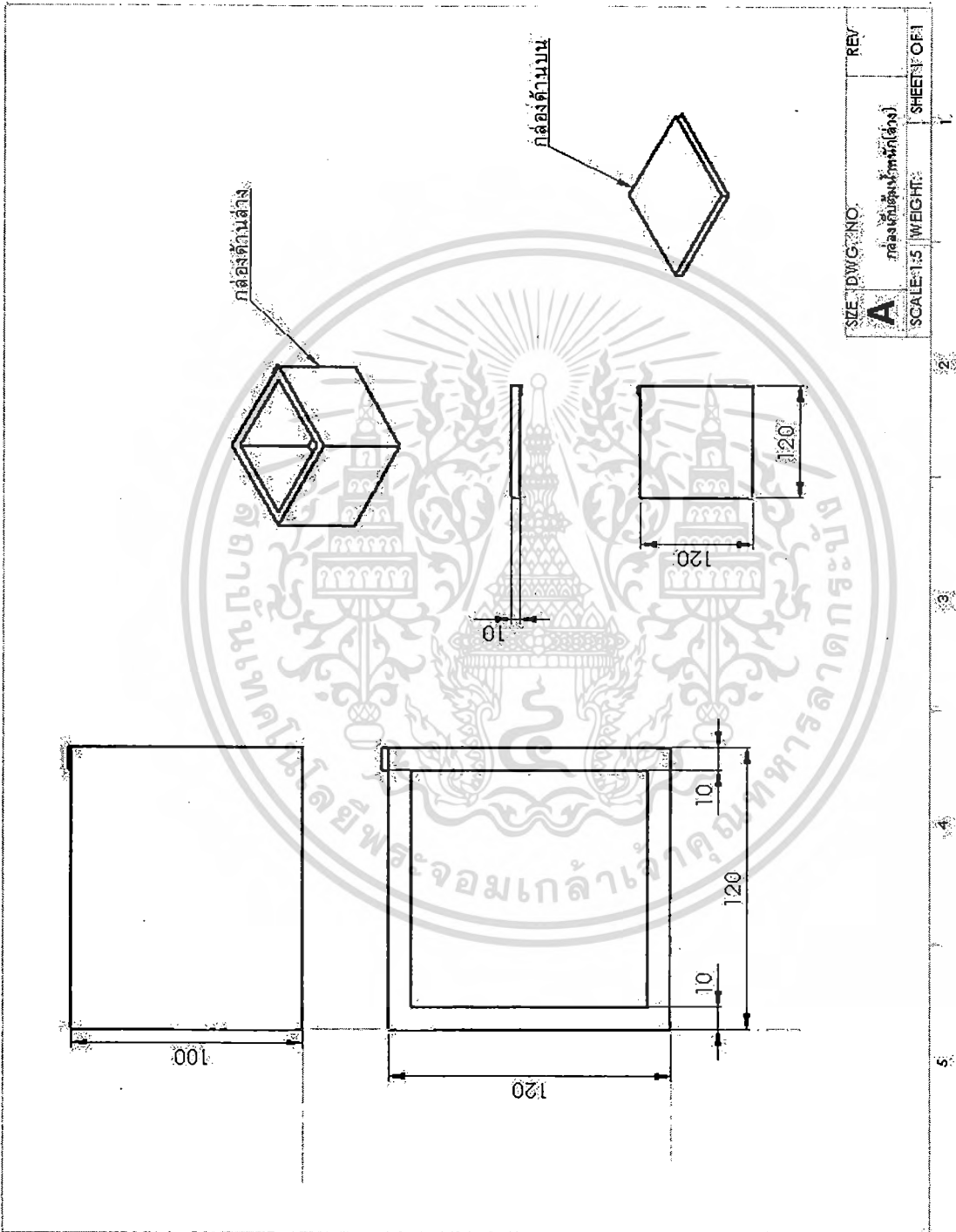
SIZE: DWG. NO.:	A	REV	
SCALE: (1/3) WEIGHT:	piston	SHEET: (1 OF 1)	1
ITEM NO.:	PART NUMBER:	DESCRIPTION:	QTY.
	PISTON	stainless steel JAS 304	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



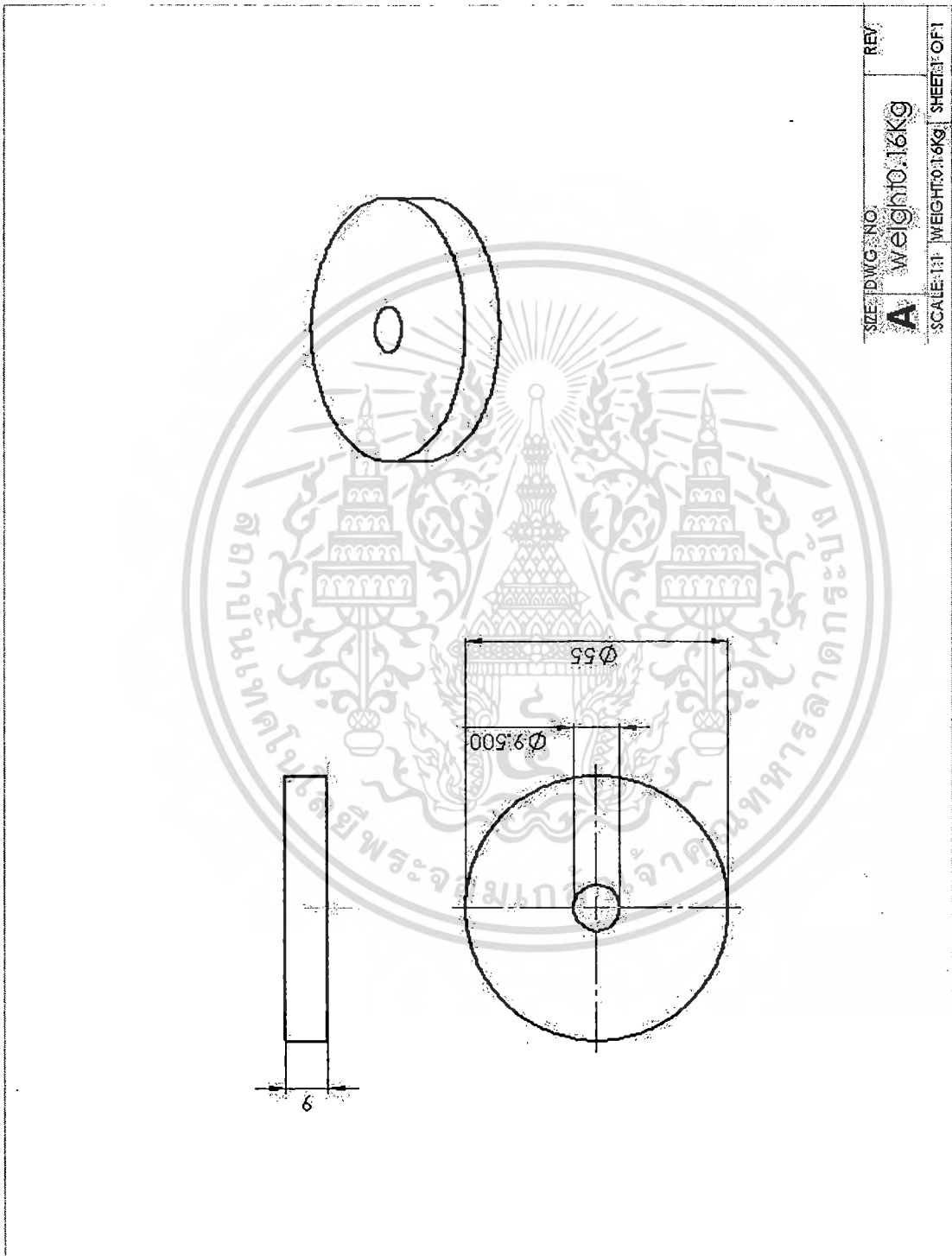
SIZE/DWG. NO.	REV.
A	การยบ
SCALE: 1:1	WEIGHT:
SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



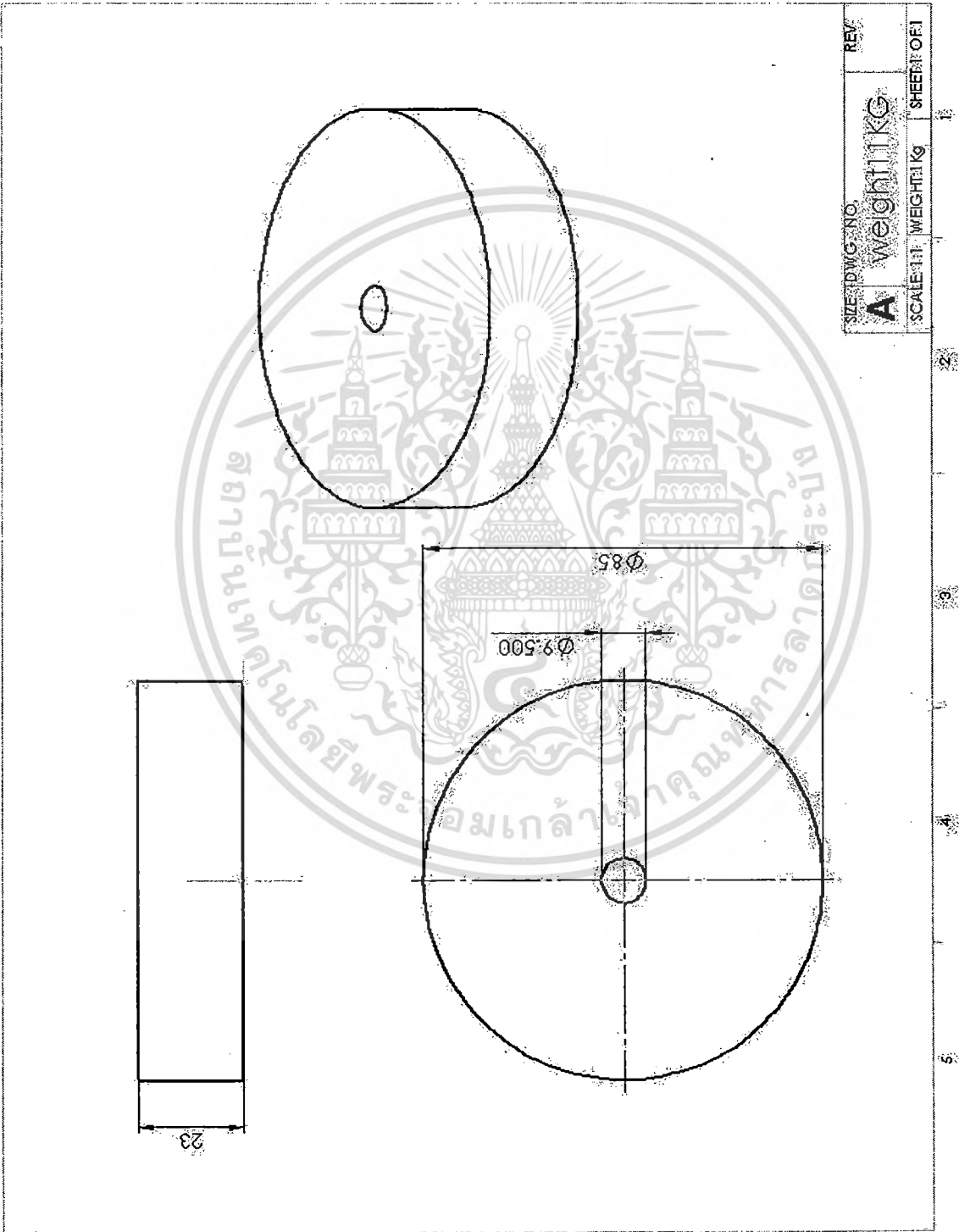
SIZE	DWG. NO.	REV.
A	กล่องด้านบน (กล่อง)	
SCALE: 1:5	WEIGHT:	SHEET OF 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



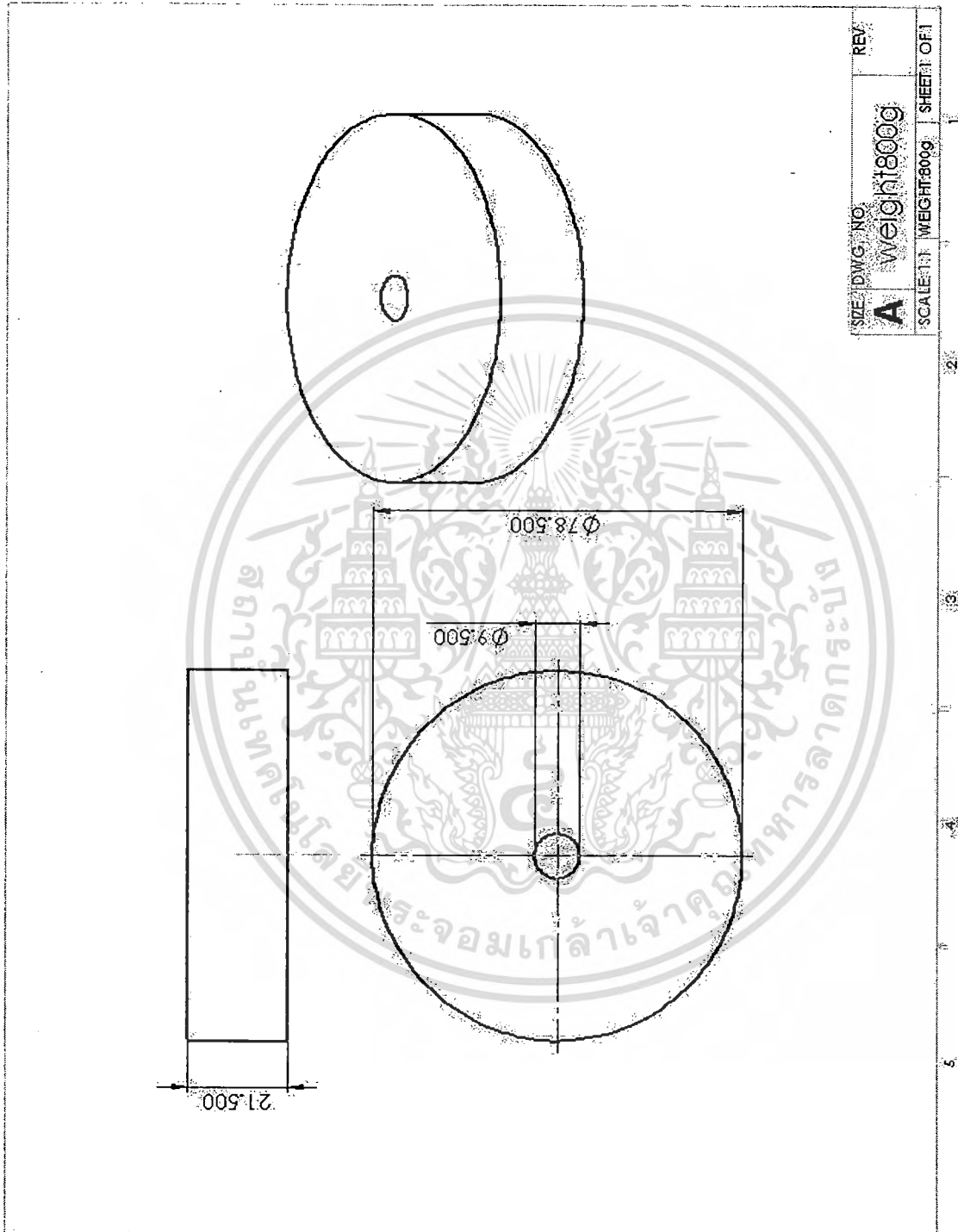
SIZE: DWG NO.	REV.
A	
Weight: 0.16kg	
SCALE: 1:1	WEIGHT: 0.16kg
	SHEET: 01 OF 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

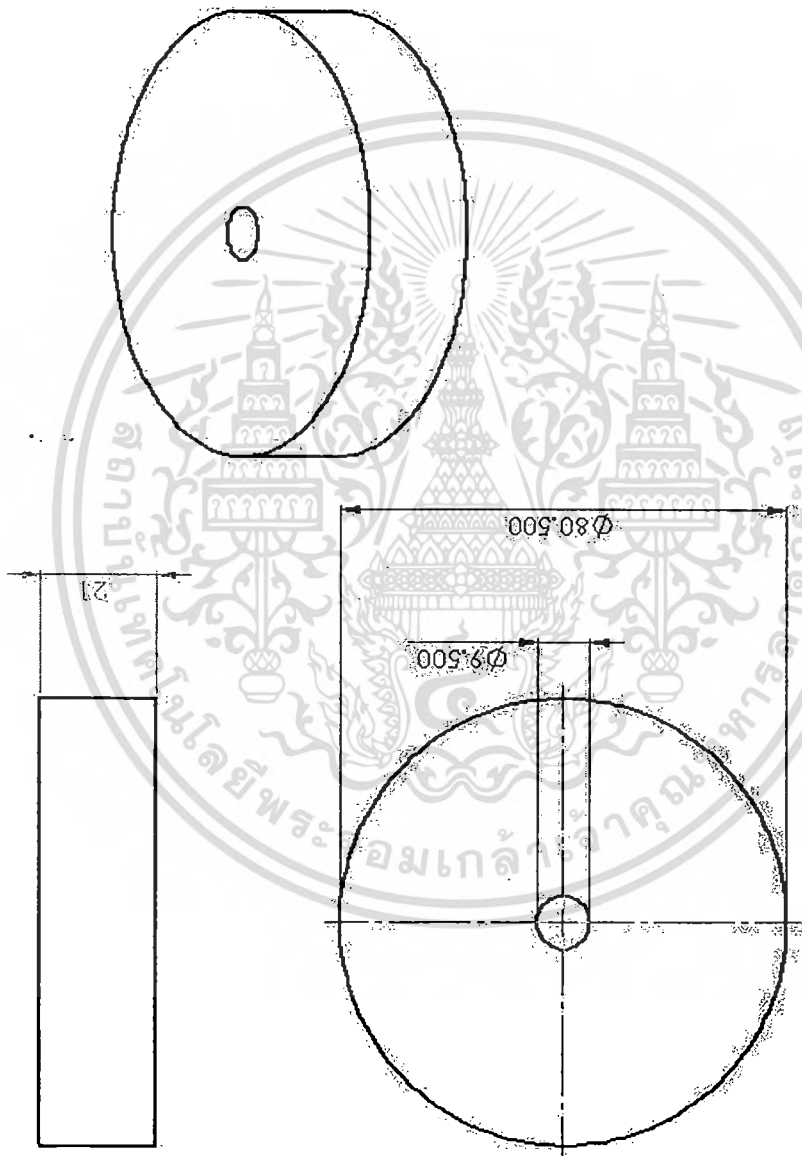


SIZE/DWG. NO.	REV.
A	
WEIGHT: 1 KG	
SCALE: 1:1	WEIGHT: 1 KG
	SHEET: OF: 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



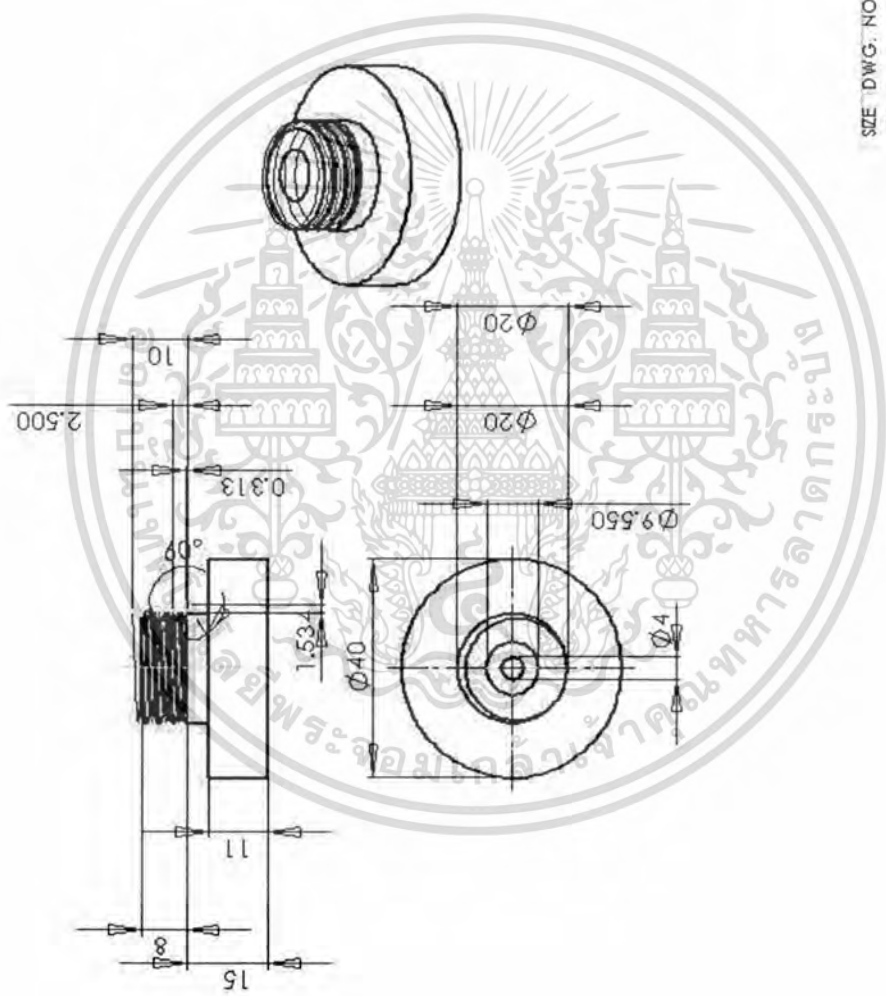
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SIZE/DWG. NO.	REV.
A weight822g	
SCALE: 1:2	WEIGHT: 822g
	SHEET 1 OF 1

1
2
3
4
5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SIZE DWG. NO. REV

A สก๊ว

SCALE: 1:1 WEIGHT: SHEET 1 OF 2

1 2 3 4 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้