



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

ปริญญญา

วิศวกรรมวัสดุ

วิศวกรรมวัสดุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม

Influence of Glass Fiber Content on Rheological Properties of Polypropylene During Coextrusion Process

นามผู้วิจัย นายวีรพล อภิมนสิริ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์สมเจตน์ พันธ์พันธ์, Dr.-Ing.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์ปฎิภาณ จัยเจิม, Dr.-Ing.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มอววิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่าง
กระบวนการอัดรีดร่วม

Influence of Glass Fiber Content on Rheological Properties of Polypropylene
During Coextrusion Process

โดย

นายวีรพล อภิมนสิริ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ)

พ.ศ. 2554

วีรพล อภิมนสิริ 2554: อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติการไหลของ
พอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม ปริญญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมวัสดุ) สาขาวิศวกรรมวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์สมเจตน์ พัชรพันธ์, Dr.-Ing. 94 หน้า

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วมเพื่อ
ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นที่ผสมภายในพอลิโพรพิลีนในชั้นแกนกลางและ
สภาวะในการทดสอบที่มีต่อสมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม ซึ่ง
ได้แก่ ความหนืดที่แท้จริงและอัตราส่วนการบวมตัว จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิหัวขึ้นรูป
และอัตราความเร็วขึ้นรูปมีอิทธิพลอย่างมากต่อความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัวโดยรวม
เมื่อเทียบกับการเพิ่มอัตราความเร็วขึ้นรูปในชั้นแกนกลาง หากพิจารณาอิทธิพลของการผสมเส้นใย
แก้วที่มีต่อสมบัติการไหลพบว่า ความหนืดของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมมีค่าเพิ่ม
มากขึ้นในขณะที่อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของเส้นใยแก้ว นอกจากนี้ยัง
พบปรากฏการณ์การเสียดรูปภายใน (Internal melt fracture) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัด
รีดร่วมเมื่อผสมเส้นใยแก้วภายในพอลิโพรพิลีนในชั้นแกนกลาง ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการหา
แนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องอัดรีด
ในชั้นแกนกลาง การเพิ่มความยาวของหัวขึ้นรูป และการติดตั้งชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของ
พอลิเมอร์หลอมเหลว สามารถลดการเสียดรูปภายในที่เกิดขึ้นได้

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Weerapol Apimonsiri 2011: Influence of Glass Fiber Content on Rheological Properties of Polypropylene During Coextrusion Process. Master of Engineering (Materials Engineering), Major Field: Materials Engineering, Department of Materials Engineering. Thesis Advisor: Mr. Somjate Patcharaphun, Dr.-Ing. 94 pages.

The objective of this research was to design and construct the coextrusion rig in order to investigate the influence of short-glass-fiber contents and processing parameters on the rheological properties of polypropylene during the coextrusion process. The experimental results showed that the viscosity and swelling ratio of coextrudate were more dependent on the die temperature and shear rate of skin layer as compared with that of core layer. The adding of glass-fibers in polypropylene at the core layer resulted in the increase of viscosity, while tended to decrease swelling ratio of coextruded PP. In addition, the internal melt fracture phenomenon was found in all the case of short-glass-fiber filled polypropylene at the core layer. The results suggested that the use of breaker plate, the increases of melt temperature and die length could lower the instability of coextrudate.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สมเจตน์ พชรพันธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ ผู้ทรงคุณวุฒิ ดร.ราชธีร์ เตชไพศาลเจริญกิจ ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณเชษฐกร แก้วกนกศิลป์ คุณวัชรพงษ์ ชูแก้ว คุณธนวัฒน์ ตั้งเขื่อนขันธุ์ นักวิจัยของกลุ่มวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตยางและพลาสติก (Plastic and Rubber Processing Research Group; PaRP-Group) เพื่อนๆ และน้องๆ ในกลุ่มที่ให้ความช่วยเหลือทุกๆ ด้านจนงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ที่ได้อบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

วีรพล อภิมนสิริ

ธันวาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	30
อุปกรณ์	30
วิธีการ	39
ผลและวิจารณ์	41
สรุปและข้อเสนอแนะ	67
สรุป	67
ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	69
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก เครื่องทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวแบบอัดรีด	
รวม	73
ภาคผนวก ข ค่า P_0 และ e ที่ได้จากการปรับแก้ข้อมูลบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป	92
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ส่วนประกอบต่างๆของชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม	31
2 ความสัมพันธ์ระหว่างการปรับความถี่ของชุดควบคุมและความเร็วรอบการหมุนของสกรู	36
3 การจำแนกสีของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วปริมาณต่างๆในชั้นแกนกลาง	37
4 อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนต่อพอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้ว 30%wt	39
5 ความเร็วรอบการหมุนของสกรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm และอัตราเครียดเนื่องที่มาจากชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 160°C	42
6 ความเร็วรอบการหมุนของสกรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 mm และ อัตราเครียดเนื่องที่มาจากชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 160°C	43
7 ความเร็วรอบการหมุนของสกรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 และ 55 mm ผลรวมอัตราเครียดเนื่องและอัตราเครียดเนื่องโดยรวมที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านชุดทดสอบความสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 160°C	43
8 อัตราส่วนพื้นที่ของพอลิเอทิลีนชั้นแกนกลางต่อพื้นที่ทั้งหมด เมื่อผ่านชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 160°C	44
9 สภาวะการทดสอบที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดร่วมเมื่อใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 และ 55 mm ตามลำดับ	44
10 ความเร็วรอบการหมุนของสกรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ทั้งสองเครื่องและอัตราเครียดเนื่องโดยรวมที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 160°C	46
11 สภาวะการทดสอบที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการไหลและความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข1 ค่า P_0 และ e ที่ได้จากการปรับแก้ข้อมูลบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป กรณีปรับเปลี่ยนอัตราเคียวเคื่อนในชั้นแกนกลาง	93
ข2 ค่า P_0 และ e ที่ได้จากการปรับแก้ข้อมูลบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป กรณีปรับเปลี่ยนอัตราเคียวเคื่อนในชั้นผิว	93

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การไหลที่เกิดขึ้นในแผ่นประกบที่มีความเร็วแตกต่างกัน	5
2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหลเมื่อได้รับแรงเฉือนมากระทำ	5
3 การไหลที่เกิดจากความแตกต่างของความดันในท่อ	7
4 เครื่องวัดดัชนีการไหล	8
5 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครียดเฉือน	9
6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log \eta$ และ $\log \dot{\gamma}$	10
7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป	12
8 ลักษณะการไหลวนของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เกิดขึ้นในบริเวณมุมอับ (ก) มุมทางเข้าเท่ากับ 180° (ข) มุมทางเข้าน้อยกว่า 180°	15
9 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูป	16
10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเครียดเฉือนที่มีต่อการเกิดการเสียรูปของพอลิเมอร์หลอมเหลว	17
11 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอัดรีด	19
12 ส่วนประกอบของสกรู	20
13 หัวขึ้นรูปแบบรวม และผลิตภัณฑ์ท่อ 3 ชั้น	22
14 ลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน	22
15 ลักษณะโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน(ก) ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน (ข) ซินดีโอ-แทคติกพอลิโพรพิลีน (ค) อะแทคติกพอลิโพรพิลีน	23
16 ส่วนประกอบของชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม	31
17 ชุดทางเดินพอลิเมอร์หลอมเหลว (ก) ชุดทางเดินชั้นแกนกลางและ (ข) ชุดทางเดินชั้นผิว	32
18 ชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของพอลิเมอร์ชั้นแกนกลาง	33
19 แผ่นประกบชุดอัดรีดร่วม	33
20 หัวขึ้นรูปแบบกลม	34

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
21 ภาพตัดขวางเพื่อแสดงเส้นทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม	35
22 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว	36
23 พอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมในขณะไหลผ่านหัวขึ้นรูปแบบกลม	37
24 แผนผังการดำเนินการวิจัย	38
25 การเกิดปรากฏการณ์การเสีรูปร่างภายในของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวเมื่อผสมเส้นใยแก้วแบบในชั้นแกนกลางขณะผ่านกระบวนการอัดรีดร่วม	40
26 การติดตั้งชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วมเข้ากับเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 และ 55 mm ตามลำดับ	42
27 ภาพตัดขวางของพอลิเมอร์แบบอัดรีดร่วมที่ได้จากชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม	44
28 การติดตั้งชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วมที่ใช้ในงานวิจัยนี้	45
29 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log \tau$ และ $\log \dot{\gamma}$ ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลว	48
30 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นและอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูปเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราความเร็วเฉือนในชั้นผิว	48
31 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นและอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูปเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลาง	49
32 อิทธิพลของอุณหภูมิหัวขึ้นรูปและอัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลางที่มีต่อความหนืดที่แท้จริงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม	50
33 อิทธิพลของอุณหภูมิหัวขึ้นรูปและอัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลางที่มีต่ออัตราส่วนการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม	50
34 อิทธิพลของอัตราความเร็วเฉือนชั้นผิวและชั้นแกนกลางที่มีต่อความหนืดที่แท้จริง	52
35 อิทธิพลของอัตราความเร็วเฉือนชั้นผิวและชั้นแกนกลางที่มีต่ออัตราส่วนของพื้นที่ชั้นแกนกลางและชั้นผิวที่อัตราความเร็วเฉือนต่างๆต่อพื้นที่ชั้นแกนกลางและชั้นผิวที่อัตราความเร็วเฉือนเท่ากับ 36.5 s^{-1}	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมเมื่อ (ก) เพิ่มอัตราเครียดชั้นแกนกลาง และ (ข) เพิ่มอัตราเครียดเนื้อชั้นผิว	53
37	อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางที่มีต่อความหนืดที่แท้จริงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม เมื่อใช้อัตราเครียดเนื้อชั้นผิวเท่ากับ 36.5 s^{-1} และอัตราเครียดเนื้อชั้นแกนกลางต่างๆ กัน	54
38	อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางที่มีต่ออัตราส่วนการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม เมื่อใช้อัตราเครียดเนื้อชั้นผิวเท่ากับ 36.5 s^{-1} และอัตราเครียดเนื้อชั้นแกนกลางต่างๆ กัน	54
39	ลักษณะการเกิดการเสีรูปในชั้นแกนกลางของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วปริมาณต่างๆ กัน	55
40	การเสีรูปบริเวณผิวหน้าเมื่อเกิดการเย็นตัวของพอลิโพรพิลีนแบบอัดรีดร่วมที่ผสมเส้นใยแก้วภายในชั้นแกนกลาง	56
41	ความสูง และความกว้างของร่องเกลียวจากการเสีรูปภายในชั้นแกนกลางของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม เมื่อผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในชั้นแกนกลาง	56
42	อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นในชั้นแกนกลางที่มีต่อความสูงของร่องเกลียวภายในพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม	58
43	อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นในชั้นแกนกลางที่มีต่อความกว้างของร่องเกลียวภายในพอลิโพรพิลีนหลอมเหลว	58
44	อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องอัดรีดในชั้นผิวและชั้นแกนกลางที่มีต่อการเสีรูปภายใน ในลักษณะความสูงของเกลียว (Amplitude, A) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม	60
45	อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องอัดรีดในชั้นผิวและชั้นแกนกลางที่มีต่อการเสีรูปภายใน ในลักษณะความกว้างร่องเกลียว (Period, λ) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม	60
46	อิทธิพลของความยาวหัวขึ้นรูปที่มีต่อการเสีรูปภายใน ในลักษณะความสูงของเกลียว (Amplitude, A) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
47 อิทธิพลของความยาวหัวขึ้นรูปที่มีต่อการเสียรูปภายใน ในลักษณะความกว้างร่องเกลียว (Period, λ) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม	62
48 อิทธิพลของชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลที่มีต่อการเสียรูปภายใน ในลักษณะความสูงของเกลียว (Amplitude, A) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม	64
49 อิทธิพลของชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลที่มีต่อการเสียรูปภายใน ในลักษณะความกว้างร่องเกลียว (Period, λ) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม	64
50 การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วในพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวเมื่อ (ก) ไม่ติดตั้งชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหล (ข) ติดตั้งชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลที่มีความหนาเท่ากับ 20 mm	65
51 การดึงพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมผ่านลูกกลิ้ง (ก) ก่อนการดึงยืด และ (ข) ดึงยืดที่ความเร็ว 0.14 m.s^{-1}	66
52 การเย็นตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวโดย (ก) การเย็นตัวลงในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (ข) การเย็นตัวลงในน้ำที่อุณหภูมิ 2°C	66
53 กระบวนการขึ้นรูปแบบ Blown film extrusion ของพอลิโพรพิลีน	68

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

B	=	อัตราส่วนการบวมตัว
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของสกรูอัดรีด (m)
D_{die}	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (m)
$D_{extrudate}$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวบริเวณทางออกหัวขึ้นรูป (m)
H	=	ความลึกร่องเกลียวของสกรูอัดรีด (m)
K	=	ค่าคงที่การไหล (Consistency constant)
L	=	ความยาวของหัวขึ้นรูป (m)
L/D	=	ความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป
MFI	=	เครื่องมือวัดดัชนีการไหล (Melt flow index)
N	=	ความเร็วรอบการหมุนของสกรูอัดรีด (rpm)
N_{DEB}	=	เลขดีเบอร์ฮาห์ (Deborah number)
n	=	ดัชนีการไหล (Power law index)
PP	=	พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)
ΔP	=	ความดันตกคร่อม (Pa)
Q	=	อัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ($m^3 \cdot s^{-1}$)
R	=	รัศมีของหัวขึ้นรูป (m)
t_r	=	เวลาที่พอลิเมอร์ใช้เพื่อคลายตัว (s)
t_p	=	เวลาที่พอลิเมอร์ไหลอยู่ในกระบวนการผลิต (s)
τ	=	ความเค้นเฉือน ($N \cdot m^{-2}$)
$\dot{\gamma}$	=	อัตราเฉือนเฉือน (s^{-1})
η	=	ความหนืด ($N \cdot s \cdot m^{-2}$)
ϕ	=	มุมเอียงของสกรูอัดรีด

อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติการไหล ของโพลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม

Influence of Glass Fiber Content on Rheological Properties of Polypropylene During Coextrusion Process

คำนำ

กระบวนการอัดรีด (Extrusion) เป็นกระบวนการที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) เป็นผลให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความยาวได้ไม่จำกัดโดยลักษณะหน้าตัดของผลิตภัณฑ์เป็นไปตามช่องทางการไหลของหัวขึ้นรูป (Die) ซึ่งผลิตภัณฑ์จากกระบวนการอัดรีดมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น พิล์ม ท่อ อู่พลาสติก และสายไฟ เป็นต้น นอกจากนี้จากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีกระบวนการอัดรีดจึงได้มีการพัฒนาเป็นกระบวนการอัดรีดร่วม (Coextrusion) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ซึ่งหลักการทำงานคือ อัดรีดพอลิเมอร์หลอมเหลวอย่างน้อย 2 ชนิด ผ่านหัวขึ้นรูปแบบร่วม ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้จึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชั้นคือ ชั้นผิว (Skin layer) และชั้นแกนกลาง (Core layer) จากกระบวนการผลิตดังกล่าวนี้สามารถเพิ่มความแข็งแรง ตลอดจนลดต้นทุนการผลิตของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการอัดรีดพอลิเมอร์ชั้นแกนกลางที่ผสมสารเสริมแรง (Reinforcement) ประเภทต่างๆ และพอลิเมอร์รีไซเคิลตามลำดับ

การศึกษาสมบัติการไหลมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการอัดรีด ซึ่งสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ยกตัวอย่างเช่น จากงานวิจัยของ Han (1975) ได้ศึกษาการเสถียรภาพบริเวณผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์เมื่อผ่านกระบวนการอัดรีดร่วมแบบ Conjugate (Interfacial instability) ที่เกิดขึ้นในระบบอัดรีดร่วม และในงานวิจัยของ Liang (2002) ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเสริมแรง และอัตราการอัดรีด (Extrusion rate) ที่มีต่อพฤติกรรมการบวมตัว และความดันตกคร่อมที่บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (Entrance pressure drop) ของโพลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้ว

จากความสำคัญของเทคโนโลยีในกระบวนการอัดรีดร่วม งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของสภาวะการขึ้นรูป และปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีน หลอมเหลวในกระบวนการอัดรีดร่วมเพื่อเป็นข้อมูลวิจัยพื้นฐานที่สำคัญ และเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตต่อไปในอนาคต



วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัครีร่วม
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลสภาวะการขึ้นรูปและปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อสมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัครีร่วม



การตรวจเอกสาร

1. สมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

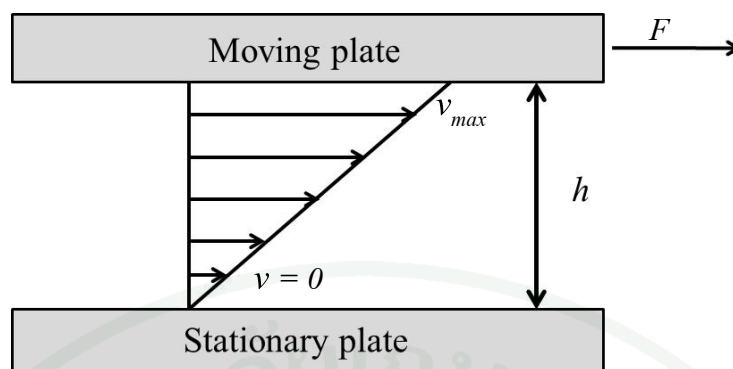
การศึกษาสมบัติการไหลคือ การศึกษาความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของพอลิเมอร์หลอมเหลว เมื่อได้รับแรง (Force) มากระทำ โดยสมบัติการไหลมีความสำคัญอย่างมากเนื่องจากสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต แสดงถึงความเป็นไปได้ในกระบวนการผลิตจากวัสดุพอลิเมอร์ประเภทนั้นๆ และนอกจากนี้ยังบ่งบอกถึงสถานะของการผลิตที่เหมาะสม รวมถึงสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการไหลของพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ การไหลที่เกิดจากแรงเฉือน (Shear flow) และการไหลที่เกิดจากแรงดึงยืด (Elongational flow) (Cogswell, 1981; Brydson, 1981)

1.1 การไหลแบบเฉือน (Shear flow)

การไหลแบบเฉือนเกิดขึ้นเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวได้รับแรงเฉือน (Shear force) มากระทำซึ่งการไหลในลักษณะนี้สามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท ได้แก่ การไหลแบบลากดึง (Drag flow) และการไหลที่เกิดจากความแตกต่างของความดัน (Pressure driven flow) โดยสามารถพิจารณาลักษณะการไหลแต่ละประเภท ดังนี้

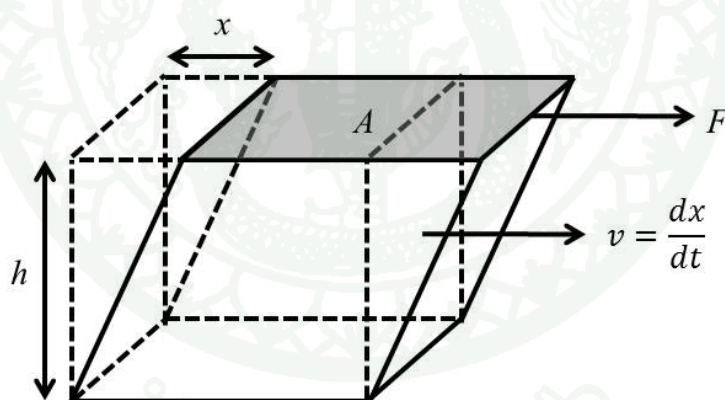
1.1.1 การไหลแบบลากดึง (Drag flow)

การไหลในลักษณะนี้สามารถพิจารณาได้จากการไหลภายในแผ่นประกบที่มีความเร็วแตกต่างกัน เช่น การไหลที่เกิดขึ้นภายในสกรู (Screw) ของเครื่องฉีดและเครื่องอัดรีดขึ้นรูป เป็นต้น โดยพอลิเมอร์ที่อยู่ติดกับแผ่นเคลื่อนที่ (Moving plate) มีความเร็วสูงที่สุดและความเร็วมีค่าลดลงเมื่อเข้าใกล้กับแผ่นที่อยู่กับที่ (Stationary plate) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การไหลที่เกิดขึ้นในแผ่นประกบที่มีความเร็วแตกต่างกัน

การคำนวณค่าความเค้นเฉือน (Shear stress, τ) ค่าความเครียดเฉือน (Shear strain, γ) ที่เกิดขึ้นกับของไหลในรูปแบบนี้สามารถพิจารณาได้ดังภาพที่ 2 โดยสามารถคำนวณค่าความเค้นเฉือน ความเครียดเฉือนและอัตราเครียดเฉือน (Shear rate, $\dot{\gamma}$) ได้จากสมการที่ 12 และ 3 ตามลำดับ



ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหลเมื่อได้รับแรงเฉือนมากระทำ

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

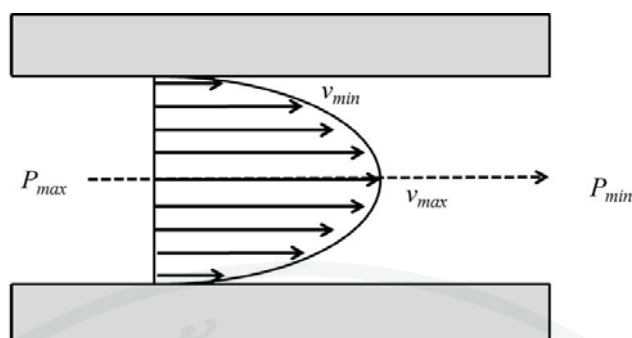
$$\gamma = \frac{x}{h} \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{h} \left(\frac{dx}{dt} \right) = \frac{v}{h} \quad (3)$$

เมื่อ	τ	=	ความเค้นเฉือน (N.m ⁻² หรือ Pa)
	γ	=	ความเครียดเฉือน
	$\dot{\gamma}$	=	อัตราเครียดเฉือน (s ⁻¹)
	F	=	แรงเฉือน (N)
	A	=	พื้นที่ (m ²)
	h	=	ความสูงของแผ่นประกบ (m)
	v	=	ความเร็วการเคลื่อนที่ของแผ่นประกบ (ms ⁻¹)

1.1.2 การไหลเนื่องจากความแตกต่างของความดัน (Pressure driven flow)

การไหลรูปแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อมีความแตกต่างของความดันภายในช่องทางการไหล โดยพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลจากปลายด้านที่มีความดันสูงไปยังปลายด้านที่มีความดันต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 3 แรงเฉือนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งติดกับผนังท่อ และต่ำสุดที่ตำแหน่งกลางท่อ ในขณะที่ความเร็วของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งกลางท่อ และต่ำสุดที่ตำแหน่งติดกับผนังท่อ ตัวอย่างการไหลในลักษณะนี้ เช่น การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวในหัวฉีดรูป และการไหลในกระบอกฉีดเป็นต้น

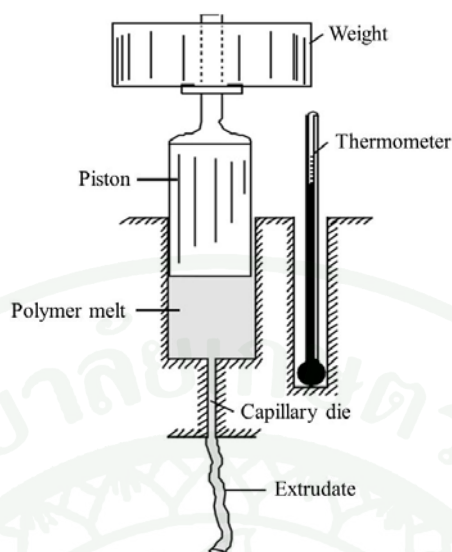


ภาพที่ 3 การไหลที่เกิดจากความแตกต่างของความดันในท่อ

2. เครื่องวัดสมบัติการไหล

2.1 เครื่องวัดดัชนีการไหล (Melt flow index tester)

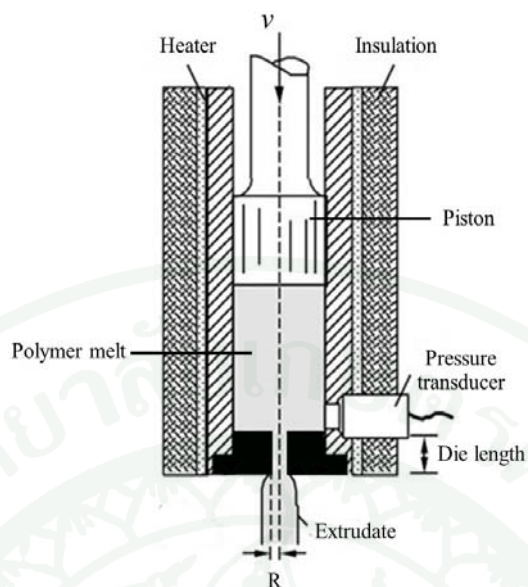
การตรวจสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีความสำคัญเนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจถึงสถานะการขึ้นรูปที่เหมาะสมตลอดจนควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานเครื่องมือวัดดัชนีการไหลเป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมอุตสาหกรรมเนื่องจากมีความสะดวก และรวดเร็วในการทดสอบ ส่วนประกอบหลักของเครื่องวัดดัชนีการไหลประกอบด้วย ห้องหลอมเหลว (Barrel) แท่งกด (Piston) และหัวขึ้นรูป (Die) โดยการทำงานของเครื่องวัดดัชนีการไหลเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM D1238 ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งอาศัยหลักการเปลี่ยนตุ้มถ่วงน้ำหนักเพื่อเปลี่ยนความเค้นเฉือนให้มีความเหมาะสมกับพอลิเมอร์ที่นำมาทดสอบ โดยพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาจากหัวขึ้นรูปเมื่อถูกกดจากแท่งกดตามน้ำหนักของตุ้มถ่วง ถูกนำไปชั่งน้ำหนักเทียบกับเวลา 10 นาที ได้ค่าของดัชนีการไหลของพอลิเมอร์ที่มีหน่วยเป็น g/10 min และนอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าความเค้นเฉือน อัตราการไหล และความหนืด (Viscosity) ได้ดังสมการที่ 4 5 และ 6 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอัตราการไหลที่เกิดขึ้นในเครื่องวัดดัชนีการไหลมีค่าที่ต่ำมากเมื่อเทียบกับกระบวนการผลิตจริง ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดของเครื่องมือชนิดนี้ ดังนั้น ในการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวสำหรับการผลิตที่ใช้อัตราการไหลที่ค่อนข้างสูง จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดแบบควบคุมอัตราการไหล (Rate-controlled rheometer)(Tim and Juan, 2006; John, 1982)



ภาพที่ 4 เครื่องวัดดัชนีการไหล

2.2 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครีชดเนื่อน (Rate-controlled rheometer)

เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครีชดเนื่อนเป็นเครื่องทดสอบสมบัติการไหลที่สามารถควบคุมอัตราเครีชดเนื่อนที่เกิดขึ้นได้โดยควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของแท่งกดข้อมูลที่ได้จากเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครีชดเนื่อนมีความแม่นยำและสอดคล้องกับกระบวนการผลิตจริง เนื่องจากสามารถทำการทดสอบในช่วงอัตราเครีชดเนื่อนที่สูงได้ โดยเครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเครีชดเนื่อนมีหลักการทำงานคือ ใช้แรงดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแท่งกดที่สามารถควบคุมความเร็วได้ กดให้พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลเข้าหัวขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 5 ความดันที่เกิดขึ้นภายในห้องหลอมเหลวสามารถตรวจวัดได้จากชุดตรวจวัดความดัน (Pressure transducer) ซึ่งติดตั้งอยู่ในบริเวณก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูปโดยความดันที่เกิดขึ้นและความเร็วของแท่งกดสามารถนำไปคำนวณหาความเค้นเฉือน และอัตราเครีชดเนื่อนรวมถึงความหนืดได้ดังสมการที่ 4 5 และ 6 ตามลำดับ



ภาพที่ 5 เครื่องรีโอมิเตอร์แบบควบคุมอัตราเฉียคเลื่อน

$$\tau = \frac{R\Delta P}{2L} \quad (4)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (6)$$

เมื่อ	R	=	รัศมีของหัวขึ้นรูป (m)
	L	=	ความยาวของหัวขึ้นรูป (m)
	Q	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตร ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) = vA
	ΔP	=	ความดันตกคร่อมหัวขึ้นรูป (Pa)
	η	=	ความหนืดปรากฏ (Pa.s)
	v	=	ความเร็วของแท่งกด ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
	A	=	พื้นที่หน้าตัดของห้องหลอมเหลว (m^2)

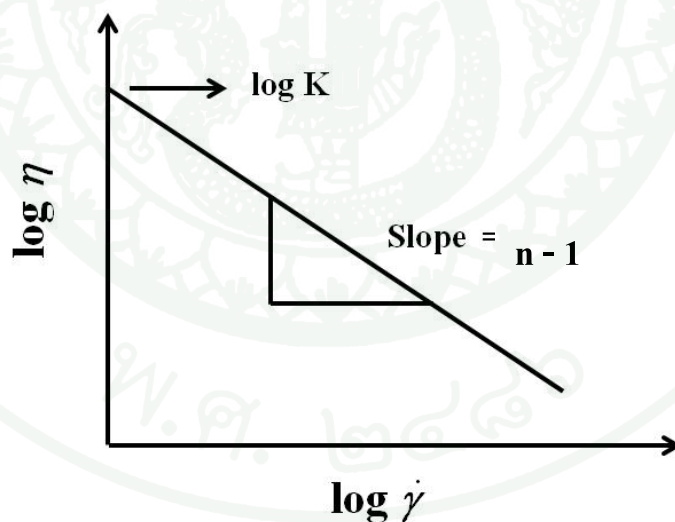
เนื่องจากความหนืดของของไหลประเภทนอนนิวโตเนียน (Non-newtonian fluid) เปลี่ยนแปลงตามอัตราเฉือน จึงเป็นผลทำให้ไม่สามารถระบุค่าความหนืดของของไหลประเภทนี้ได้ ดังนั้นจึงมีตัวแปรที่เป็นตัวแสดงถึงสมบัติการไหลซึ่งได้แก่ ค่าดัชนีการไหล (Power law index) โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 7 และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและอัตราเฉือนดังแสดงในภาพที่ 6

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (7)$$

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (8)$$

$$\log \eta = \log K + (n-1)\log \dot{\gamma} \quad (9)$$

เมื่อ K = ค่าคงที่การไหล (Consistency constant)
 n = ค่าดัชนีการไหล (Power law index)



ภาพที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\log \eta$ และ $\log \dot{\gamma}$

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต พบว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวมีสมบัติความเป็นนอนิวโตเนียน ซึ่งมีรูปแบบการไหลที่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะทางการไหล จึงได้มีการปรับแก้สมการที่ใช้ในการหาอัตราครีดยืดเค้น โดยการระบุตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับรูปแบบการไหล คือ ค่าดัชนีการไหล (Power law index, n) เพื่อให้ได้อัตราครีดยืดเค้นแท้จริง (True shear rate, $\dot{\gamma}_{true}$) ซึ่งการปรับแก้เรียกว่า การปรับแก้แบบ Rabinowitsch (Rabinowitsch's correction) และนอกจากนี้ยังพบว่าความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูปมีความไม่เป็นเชิงเส้น จึงได้มีการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (Entrance correction) เพื่อให้ได้ค่าความดันที่แท้จริง ซึ่งเรียกว่า การปรับแก้ของ Bagley (Bagley's correction) อย่างไรก็ตาม การปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปนั้น อยู่บนสมมติฐานที่ว่า ความดันบริเวณทางออกมีค่าเป็นศูนย์ (Zero-exit pressure) แต่จากผลงานวิจัยต่อมาแสดงให้เห็นว่าค่าความดันที่ตำแหน่งทางออกหัวขึ้นรูปไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งควรพิจารณาถึงความดันที่บริเวณทางออกหัวขึ้นรูปด้วย วิธีการปรับแก้แบบนี้เรียกว่า การปรับแก้บริเวณทางออกหัวขึ้นรูป (Exit correction) โดยวิธีการปรับแก้แบบต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 การปรับแก้แบบราบิโนวิทช์ (Rabinowitsch's correction) สำหรับการปรับแก้อัตราครีดยืดเค้น

การปรับแก้แบบราบิโนวิทช์เป็นการปรับแก้ค่าอัตราครีดยืดเค้น เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยทั่วไปมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติกนอนิวโตเนียน ที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วและรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ ดังนั้นค่า n จึงเป็นตัวบ่งบอกถึงรูปแบบการไหลและความเป็นนอนิวโตเนียนของพอลิเมอร์ได้ และค่า n ที่ได้ สามารถนำมาใช้หาค่าอัตราครีดยืดเค้นที่แท้จริง ($\dot{\gamma}_{true}$) ในกรณีที่ใช้หัวขึ้นรูปแบบหน้าตัดกลม (Circular die) ได้ดังสมการที่ 10

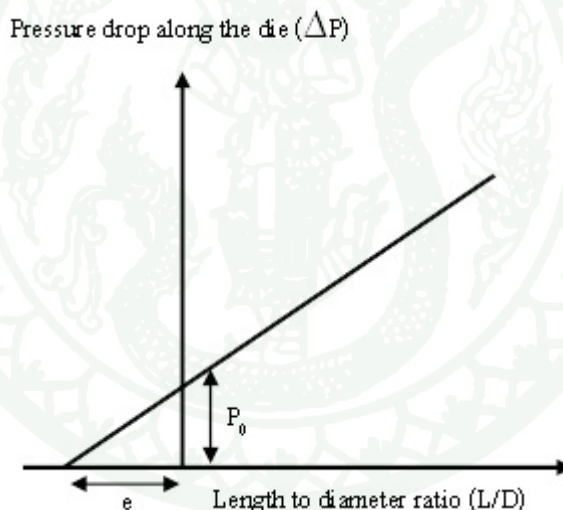
$$\dot{\gamma}_{true} = \left[\frac{3n+1}{4n} \right] \left[\frac{4Q}{\pi R^3} \right] \quad (10)$$

โดย	n	=	ค่าดัชนีการไหล
	R	=	รัศมีของหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม (m)
	Q	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตร ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) = $v A$

2.2.2 การปรับแก้ค่าความเค้นเฉือนที่บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปหรือการปรับแก้แบบ

Bagley (Bagley's correction)

เนื่องจากไม่สามารถวัดค่าความดันบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปได้โดยตรง และการเปลี่ยนแปลงความดันจากบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปตามระยะทางการไหลในหัวขึ้นรูปที่ไม่เป็นเส้นตรง (Non-linear pressure drop) ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบและความเร็วในการไหล รวมถึงสมบัติความเป็นออสติกของพอลิเมอร์หลอมเหลว ดังนั้น การวิเคราะห์หาค่าความดันตกคร่อมที่แท้จริงสามารถทำได้โดยการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นกับค่าอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (L/D) ดังแสดงในภาพที่ 7 และสามารถหาค่าความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นได้ตามการปรับแก้ของ Bagley ดังแสดงในสมการที่ 11 หรือ 12



ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป

$$\tau_{true} = \frac{R(\Delta P + P_0)}{2L} \quad (11)$$

$$\tau_{true} = \frac{R\Delta P}{2(L + eR)} \quad (12)$$

โดย	ΔP	=	ความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น (Pa)
	P_0	=	ความดันที่บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปหรือความดันเมื่อความยาวหัวขึ้นรูปเท่ากับศูนย์ (Pa)
	e	=	ความยาวนามธรรมของหัวขึ้นรูป (Imaginary length) (m)
	R	=	รัศมีของหัวขึ้นรูปหน้าตัดกลม (m)
	L	=	ความยาวของหัวขึ้นรูป (m)

สมการปรับแก้บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป มีข้อควรคำนึง คือ ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ต่างชนิด แต่ใช้หัวขึ้นรูปชุดเดียวกัน อาจไม่มีความสำคัญมากนัก (Sombatsompopet *et al.*, 1997) และสมการที่ใช้สำหรับการปรับแก้ ใช้ได้เฉพาะกับอัตราความเร็วเฉือนหนึ่งๆ ซึ่งในทางปฏิบัติอาจต้องทำการทดลองมากและใช้เวลานาน หรือแม้ในกรณีที่ใช้พอลิเมอร์ชนิดเดียวกันแต่ทดสอบที่หัวขึ้นรูปขนาดต่างกัน ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมกับค่า L/D อาจไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้ไม่อาจใช้วิธีการปรับแก้นี้เสมอไป

2.2.3 การปรับแก้ค่าความเค้นเฉือนที่บริเวณทางออกหัวขึ้นรูป (Exit correction)

เนื่องจากการปรับแก้ที่บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปเพียงอย่างเดียวอาจส่งผลให้ค่าที่ได้มีค่าที่มากเกินไป ซึ่งเป็นผลมาจากสมมติฐานที่ให้ความดันตกคร่อมบริเวณทางออกมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่ในความเป็นจริงความดันบริเวณดังกล่าวมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ (ณรงค์ฤทธิ์, 2548) ทำให้ค่าที่ได้จำเป็นต้องมีการหักลบจากความดันบริเวณทางออกของหัวขึ้นรูป ดังแสดงในสมการที่ 13 และ 14 อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก และค่าปรับแก้ที่ได้จากการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ต่างชนิดแต่ใช้ชุดทดสอบเดียวกัน หรือในกรณีที่มีย่ออัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางการไหล (L/D) มากกว่า 40 พบว่า ให้ผลแตกต่างกันน้อยมาก จึงไม่มีความจำเป็นมากนักสำหรับการใช้สมการปรับแก้ดังกล่าว

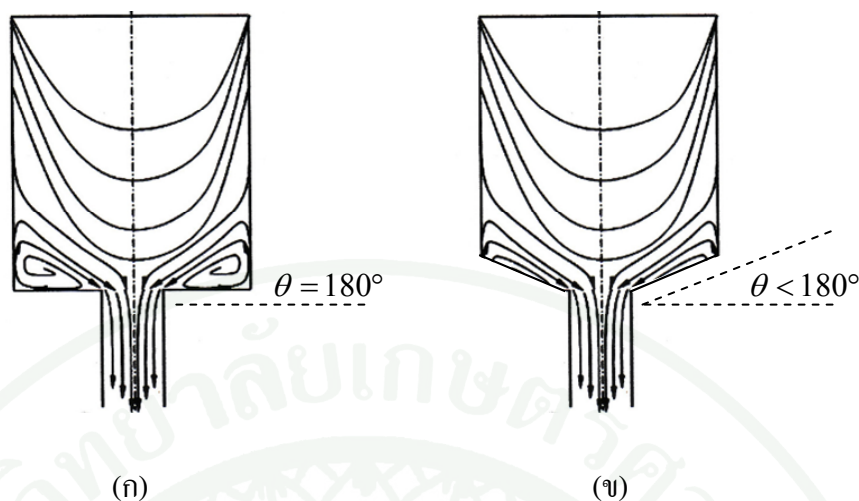
$$\tau_{true} = \frac{R(\Delta P - P_{exit})}{2(L + eR)} \quad (13)$$

$$\tau_{true} = \frac{\Delta PR}{2(L + eR + MR)} \quad (14)$$

โดย M คือ ความยาวนานธรรมชาติของหัวขึ้นรูปในบริเวณทางออกหัวขึ้นรูป

3. พฤติกรรมของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลผ่านคาปิลลารีโรมิเตอร์

โดยทั่วไปพอลิเมอร์หลอมเหลวมีรูปแบบการไหลจากห้องหลอมเหลวเข้าสู่หัวขึ้นรูปเป็น มุมลู่เข้า (Convergence flow) อย่างเป็นระเบียบ อย่างไรก็ตาม ลักษณะของการไหลจากห้อง หลอมเหลวเข้าสู่หัวขึ้นรูปยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ลักษณะของหัวขึ้นรูป (Die geometry) หรือ ชนิดของพอลิเมอร์เป็นต้น โดยพบว่า การไหลที่เกิดขึ้นในหัวขึ้นรูปที่มีมุมทางเข้า 180° เกิดการ ไหลวน (Vortex) ที่บริเวณด้านข้างทางเข้าของหัวขึ้นรูปเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัด อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการไหลวนที่บริเวณมุมอับของทางเข้าหัวขึ้นรูป ดังแสดงใน ภาพที่ 8(ก) ดังนั้น จึงได้มีการออกแบบหัวขึ้นรูปเพื่อลดการไหลวนที่เกิดขึ้นโดยการลดมุมทางเข้า ของหัวขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 8(ข) นอกจากนี้ ยังพบว่าพอลิเมอร์ชนิดเดียวกันที่มีความแตกต่าง ของสายโซ่โมเลกุล เช่น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ไม่เกิดปรากฏการณ์ไหลวน เนื่องจากมีความเป็นระเบียบของสายโซ่โมเลกุล ทำให้เมื่อไหลเข้าหัว ขึ้นรูปมีการจัดเรียงตัวได้ดีกว่า พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene, LDPE)



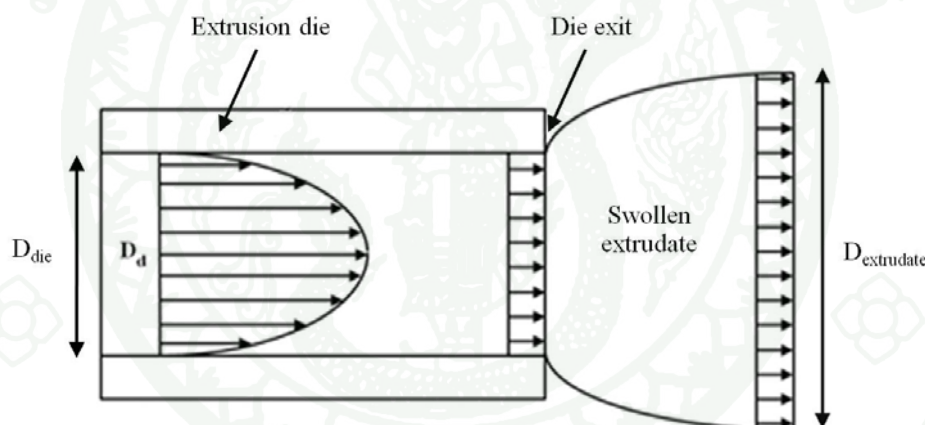
ภาพที่ 8 ลักษณะการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เกิดขึ้นในบริเวณมุมอับ (ก) มุมทางเข้าเท่ากับ 180° (ข) มุมทางเข้าน้อยกว่า 180°

การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อผ่านหัวขึ้นรูปยังแสดงพฤติกรรมการบวมตัว กล่าวคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีขนาดที่ใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ยังเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การบวมตัวของพอลิเมอร์เมื่อผ่านหัวขึ้นรูปเกี่ยวข้องกับสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) หรือความสามารถในการเสียรูปและกลับคืนรูปร่างของสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ภายหลังจากปราศจากแรงที่มากระทำ การวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนการบวมตัวสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 15

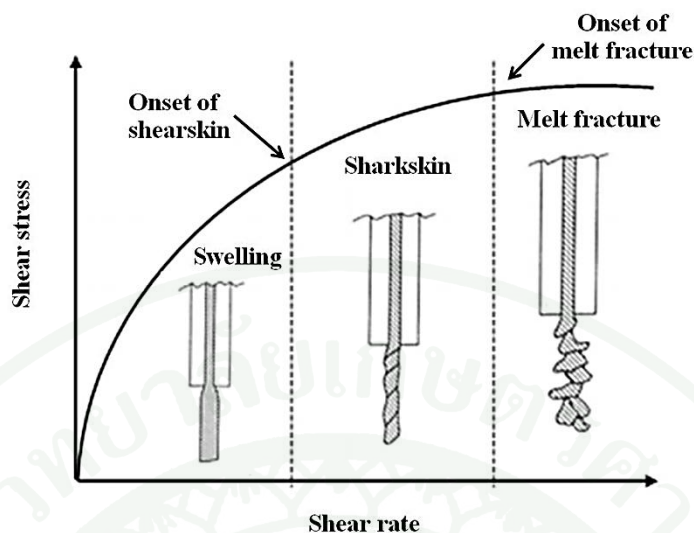
$$B = \frac{D_{\text{extrudate}}}{D_{\text{die}}} \quad (15)$$

เมื่อ	B	=	อัตราส่วนการบวมตัว
	$D_{\text{extrudate}}$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของพอลิเมอร์หลอมเหลว (m)
	D_{die}	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (m)

หากพิจารณาถึงรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในหัวขึ้นรูปพบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลจากการไหลแบบความแตกต่างของความดันเป็นการไหลแบบปลั๊ก (Plug flow) ดังแสดงในภาพที่ 9 ดังนั้น พอลิเมอร์หลอมเหลวที่บริเวณผนังหัวขึ้นรูปจึงเกิดการเร่งความเร็วเพื่อพัฒนารูปแบบการไหลเป็นแบบปลั๊กก่อนที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกจากหัวขึ้นรูป ซึ่งการเร่งความเร็วนี้ส่งผลให้เกิดการเสียสปีของสายโซ่โมเลกุลโดยหากความเค้นสะสมที่เกิดขึ้นเกินความต้านทานในการรับแรงดึงของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt tensile strength) ส่งผลให้ผิวของพอลิเมอร์เกิดการึกษาขณะสัมผัสกับหัวขึ้นรูปและเกิดเป็นรอยฟืนฉลาม (Sharkskin) บนผิวพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อไหลออกจากหัวขึ้นรูป และนอกจากนี้หากความเค้นที่พอลิเมอร์หลอมเหลวได้รับสูงเกินจุดที่พอลิเมอร์หลอมเหลวสามารถรับได้ อาจทำให้เกิดการพอลิเมอร์เกิดการเสียรูปร่าง (Melt fracture) ดังแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 10 โดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรมที่เกิดขึ้น ดังนี้



ภาพที่ 9 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูป



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนที่มีต่อการเกิดการเสียรูปของพอลิเมอร์หลอมเหลว

3.1 ระยะเวลาการไหล (Residence flow time)

ระยะเวลาการไหล หมายถึง ระยะเวลาที่พอลิเมอร์ไหลอยู่ภายในหัวขึ้นรูป ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ที่ไหลอยู่ในระบบนาน ส่งผลให้อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวมีระยะเวลาในการคลายตัวที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นผลให้พอลิเมอร์สามารถปลดปล่อยหรือเปลี่ยนรูปความเค้นสะสมบางส่วนไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่นได้โดยระยะเวลาการไหลสามารถใช้สมการของเลขดีเบอราห์ (Deborah number, N_{DEB}) ตามสมการที่ 16 ในการอธิบายอัตราส่วนการบวมตัวเชิงคุณภาพได้ ดังนี้

$$N_{DEB} = \frac{t_r}{t_p} \quad (16)$$

เมื่อ t_r = เวลาที่พอลิเมอร์ใช้ในการคลายตัว (s)
 t_p = เวลาที่พอลิเมอร์ไหลอยู่ในกระบวนการผลิต (s)

โดยมีข้อกำหนด คือ หาก N_{DEB} น้อยกว่า 1 กระบวนการผลิตเป็นแบบวิสคัส ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในระบบได้ ในขณะที่ ในขณะที่ N_{DEB}

มากกว่า 1 กระบวนการผลิตเป็นแบบอีลาสติกซึ่งเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลผ่านหัวขึ้นรูปจะเกิดการบวมตัว การเกิดรอยฟ่นฉลาม หรือการเกิดการเสียรูปเป็นต้น

3.2 รูปแบบการไหล (flow pattern)

ระบบที่มีการไหลแบบซับซ้อน เช่น ปรากฏการณ์ไหลวน หรือการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดระหว่างห้องหลอมเหลวกับหัวขึ้นรูป ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น มีแนวโน้มของอัตราส่วนการบวมตัวที่ต่ำกว่าการไหลที่มีรูปแบบไม่ซับซ้อน ซึ่งเป็นผลจากการเสียดสีของสายโซ่โมเลกุลภายในระบบที่นานกว่า หรือกล่าวได้ว่า เกิดการไหลในระบบที่นานกว่า สมบัติความเป็นอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอมเหลวจึงลดลง

3.3 อัตราการเฉือน (Shear rate)

การเพิ่มขึ้นของอัตราการเฉือนส่งผลโดยตรงต่ออัตราส่วนการบวมตัวเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการเฉือนส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีการสะสมพลังงานเพิ่มมากขึ้น และนอกจากนี้หากพอลิเมอร์หลอมเหลวได้รับอัตราการเฉือนเกินค่าๆหนึ่ง เป็นผลทำให้พอลิเมอร์หลอมเหลวอาจเกิดรอยฟ่นฉลามและเกิดการเสียรูปทรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว ตามลำดับ ซึ่งอัตราเฉือนจุดนี้เรียกว่า อัตราเฉือนวิกฤต (Critical shear rate)

3.4 อุณหภูมิของหัวขึ้นรูป (Die temperature)

เมื่ออุณหภูมิของหัวขึ้นรูปสูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความเค้นเฉือน ณ อัตราการเฉือนหนึ่งลดลง หรืออาจอธิบายในรูปของค่า N_{DEB} ที่มีค่าน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสามารถคลายตัวได้ดี และนอกจากนี้ยังส่งผลให้ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีแนวโน้มลดลงจึงเป็นผลทำให้อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง

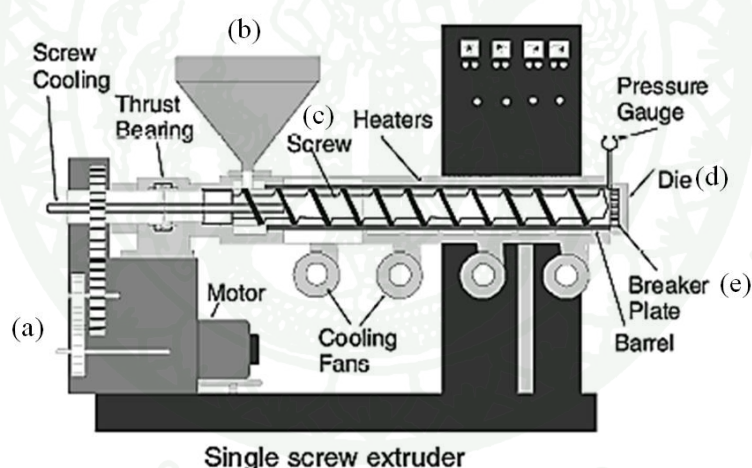
3.5 อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูป (L/D ratio)

อัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูปเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่ออัตราส่วนการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่งสามารถอธิบายได้จากเวลาที่พอลิเมอร์หลอม

เหลวไหลอยู่ในระบบเช่นเดียวกับระยะเวลาการไหลภายในหัวขึ้นรูป กล่าวคือ เมื่อค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูปมีค่าสูงขึ้น เวลาที่พอลิเมอร์หลอมเหลวไหลอยู่ในหัวขึ้นรูปมีระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นเป็นผลให้อัตราการส่วนบวมตัวมีแนวโน้มลดลง

4. กระบวนการอัดรีด

กระบวนการอัดรีดเป็นกระบวนการที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความยาวต่อเนื่องไม่จำกัด ซึ่งกระบวนการนี้มีหลักการทำงานคือหลอมละลายเม็ดพอลิเมอร์และอัดรีดพอลิเมอร์หลอมเหลวผ่านหัวขึ้นรูป โดยได้รับความร้อนจากชุดให้ความร้อน (Heater) และความร้อนที่เกิดจากการเสียดสี (Frictional heat) ระหว่างเม็ดพอลิเมอร์ ผนังห้องหลอมเหลว และผนังของสกรู จากนั้นพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลตามร่องสกรูเข้าสู่หัวขึ้นรูปเพื่อให้ได้รูปร่างหน้าตัดของผลิตภัณฑ์ที่เท่ากันตลอดความยาว โดยลักษณะของเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว แสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องอัดรีด (Cantor, 2006)

(a) ระบบขับเคลื่อน (Drive system) หรือมอเตอร์ทำหน้าที่ หมุนสกรูที่อยู่ในห้องหลอมเหลวเพื่อให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมเหลวและไหลตามร่องสกรูไปยังหัวขึ้นรูป

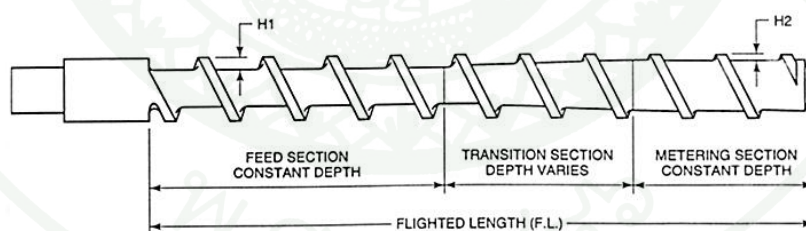
(b) กรวยเติม (Hopper) เป็นอุปกรณ์ป้อนเม็ดพอลิเมอร์เข้าสู่สกรู

(c) สกรู (Screw) เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการหลอมละลายและทำหน้าที่ลำเลียงพอลิเมอร์ไปยังหัวขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 12 โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

- ช่วงการลำเลียง (Feed zone) ทำหน้าที่ลำเลียงเม็ดพอลิเมอร์จากกรวยเดิมเข้าสู่สกรู โดยความลึกของร่องเกลียว (Channel depth) ในช่วงการลำเลียงมีความลึกมากกว่าช่วงอื่นๆ เม็ดพอลิเมอร์ที่เข้าสู่ช่วงการลำเลียงอาจเกิดการหลอมละลายที่บริเวณติดอยู่กับผนังห้องหลอมเหลว เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากความร้อนภายนอก (External heat) ที่ได้จากชุดให้ความร้อนเป็นหลัก

- ช่วงการอัดหรือช่วงการหลอมละลาย (Compression/Transition zone) ในช่วงนี้ เม็ดพอลิเมอร์ถูกอัดด้วยแรงเฉือนจนเกิดความร้อนขึ้นอย่างมากหรือที่เรียกว่าความร้อนเฉือน (Shear heating) แรงเฉือนที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เกิดจากการลดลงของความลึกของร่องสกรู โดยความร้อนภายใน (Internal heat) มีอิทธิพลอย่างมากต่อการหลอมละลายของเม็ดพอลิเมอร์

- ช่วงเพิ่มความดัน (Metering/Pumping zone) สกรูในช่วงนี้มีความลึกของร่องเกลียวน้อยที่สุดเพื่อเพิ่มความดันให้แก่ระบบและเพิ่มความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลวรวมไปถึงการได้รับอิทธิพลของความร้อนจากชุดให้ความร้อนเพื่อให้มั่นใจว่าพอลิเมอร์เกิดการหลอมละลายอย่างสมบูรณ์ทั้งหมดก่อนเข้าสู่หัวขึ้นรูป



ภาพที่ 12 ส่วนประกอบของสกรู

ที่มา: Levy and Carley, 1989

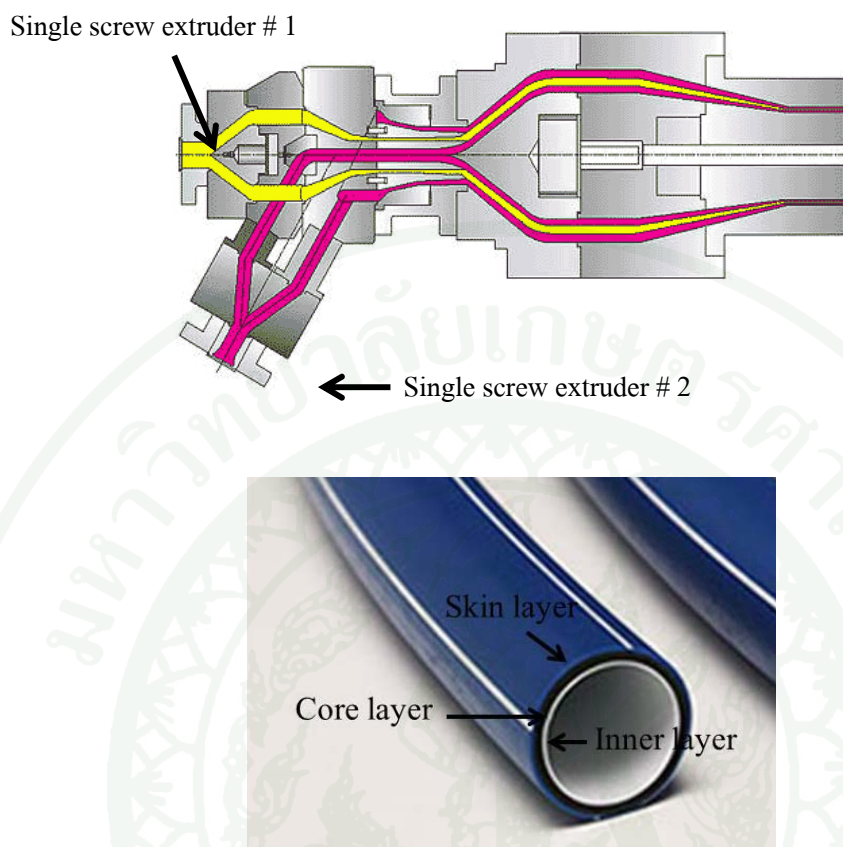
(d) ชุดปรับทิศทางกรไหล และแผ่นกรอง (Beaker plate/Screen pack) เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ถัดจากสกรู ทำหน้าที่ปรับทิศทางกรไหลและสร้างแรงดันหรือเพิ่มความหนาแน่นของพอลิเมอร์หลอมเหลวก่อนไหลเข้าสู่หัวขึ้นรูป นอกจากนี้ชุดปรับทิศทางกรไหลยังทำหน้าที่สำหรับยึดกับ

แผ่นกรอง โดยแผ่นกรองทำหน้าที่กรองเศษโลหะหรือเม็ดพลาสติกที่ยังหลอมไม่สมบูรณ์ ไม่ให้ไหลเข้าสู่หัวขึ้นรูป

(e) หัวขึ้นรูป (Die) อยู่ในตำแหน่งหน้าสุดของเครื่องอัดรีดเพื่อกำหนดรูปร่างผลิตภัณฑ์ที่ได้

4.1 กระบวนการอัดรีดร่วม (Coextrusion)

กระบวนการอัดรีดร่วมเป็นกระบวนการที่ได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติของผลิตภัณฑ์รวมถึงการลดต้นทุนการผลิต โดยมีหลักการทำงานคืออัดรีดพอลิเมอร์จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว 2 เครื่องขึ้นไปผ่านหัวขึ้นรูปแบบร่วม ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีดร่วมสามารถแบ่งออกเป็น ชั้นผิวนอก (Skin layer) และชั้นแกนกลาง (Core layer) โดยทั้ง 2 ชั้น อาจเป็นพอลิเมอร์ต่างชนิดกันได้ นอกจากนี้ยังสามารถทำการอัดรีดผลิตภัณฑ์ให้มีจำนวนชั้นที่มากกว่า 2 ชั้นยกตัวอย่างเช่น การผลิตท่อหรือฟิล์ม 3 ชั้น เป็นต้น ซึ่งในผลิตภัณฑ์ท่อ 3 ชั้น สามารถอัดรีดพอลิเมอร์ชั้นผิวนอกเพื่อเพิ่มสมบัติการต้านทานการขีดข่วน ทนต่อสภาพแวดล้อมหรือเพิ่มสีให้กับผลิตภัณฑ์ ในชั้นแกนกลางสามารถอัดรีดพอลิเมอร์ที่ผสมสารเสริมแรงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงหรืออัดรีดพอลิเมอร์รีไซเคิลเพื่อลดต้นทุนในการผลิต ในขณะที่ชั้นด้านใน (Inner layer) สามารถอัดรีดพอลิเมอร์เกรดที่ใช้สัมผัสอาหารได้ (Food grade) รวมถึงการอัดรีดพอลิเมอร์ผสมสารต้านจุลชีพ (Antibacteria) ภาพที่ 13 แสดงหัวขึ้นรูปในกระบวนการอัดรีดร่วมและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการอัดรีดร่วมในปัจจุบันมีการประยุกต์ระบบอัดรีดร่วมเข้ากับกระบวนการอัดรีดประเภทต่างๆ เช่น กระบวนการเป่าขึ้นรูปขวดบรรจุภัณฑ์ และแผ่นฟิล์มแบบหลายชั้น เป็นต้น

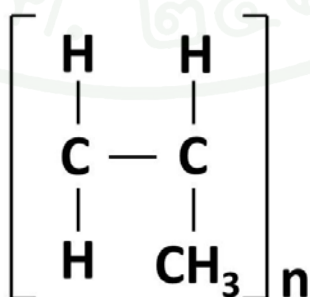


ภาพที่ 13 หัวขึ้นรูปแบบร่วม และผลิตภัณฑ์ท่อ 3 ชั้น

5. พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP)

จัดอยู่ในประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) แสดงลักษณะโครงสร้างโมเลกุลดัง

ภาพที่ 14



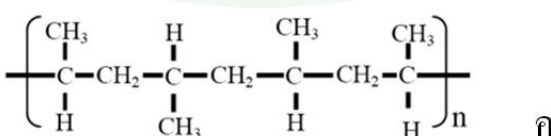
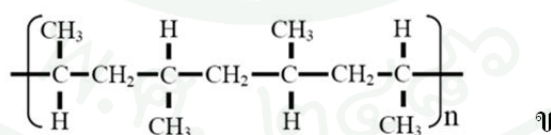
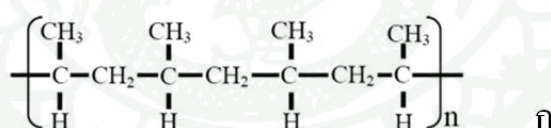
ภาพที่ 14 ลักษณะโครงสร้างของโมเลกุลของพอลิโพรพิลีน

ในปัจจุบันพอลิโพรพิลีนมีการใช้งานอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีจุดเด่นในเรื่องการทนทานต่อสารเคมีต่างๆ ทนทานต่อการขีดข่วน และมีความแข็งแรงที่สูง เป็นต้น ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ได้ ขวดแชมพู กล่องบรรจุอาหาร อุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นต้น และเมื่อพิจารณาถึงลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบน สายโซ่โมเลกุลหลักสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน (Isotactic polypropylene) โดยโครงสร้างลักษณะนี้มีการเกาะของหมู่เมทิลด้านเดียวกันบนสายโซ่โมเลกุลหลัก ลักษณะ โครงสร้างเช่นนี้มีความเป็นระเบียบสูงส่งผลให้มีการตกผลึกดีที่สุด ดังภาพที่ 15(ก)

2. ซินดิโอแทคติกพอลิโพรพิลีน (Syndiotactic polypropylene) โครงสร้างนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลสลับกันบนสายโซ่พอลิเมอร์หลักอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งลักษณะเช่นนี้ทำให้โครงสร้างมีความเป็นระเบียบลดลง ดังแสดงในภาพที่ 15(ข)

3. อะแทคติกพอลิโพรพิลีน (Atactic polypropylene) โครงสร้างนี้มีลักษณะการเกาะของหมู่เมทิลบนสายโซ่พอลิเมอร์หลักอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งลักษณะเช่นนี้เป็นผลให้เกิดการตกผลึกน้อยที่สุด โดยโครงสร้างอะแทคติกพอลิโพรพิลีนแสดงในภาพที่ 15(ค)



ภาพที่ 15 ลักษณะโครงสร้างของพอลิโพรพิลีน (ก) ไอโซแทคติกพอลิโพรพิลีน

(ข) ซินดิโอ-แทคติกพอลิโพรพิลีน (ค) อะแทคติกพอลิโพรพิลีน

6. เส้นใยเสริมแรงในพอลิเมอร์ (Fiber reinforced polymer, FRP)

วัสดุเชิงประกอบ (Composite materials) คือ วัสดุที่ประกอบด้วยการรวมวัสดุมากกว่า 2 ชนิดเข้าด้วยกัน โดยที่วัสดุประเภทนี้มีการแยกเฟสไม่เป็นเนื้อเดียวกัน แบ่งเป็น วัสดุที่เป็นเนื้อพื้น (Matrix) กับวัสดุที่เป็นเฟสกระจาย (Dispersed phase) หรือวัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ที่กระจายอยู่ในวัสดุเนื้อพื้นนั้น วัสดุที่เป็นเนื้อพื้นทำหน้าที่รองรับวัสดุที่เป็นเฟสกระจายให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ในขณะที่วัสดุที่เป็นเฟสกระจาย ทำหน้าที่เพิ่มเนื้อ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต หรือใช้เป็นวัสดุเสริมแรง ที่ทำหน้าที่ช่วยเพิ่มหรือปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุเนื้อพื้นให้สูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็น อนุภาค เกร็ด เส้นใยแบบสั้นและแบบยาว (Short and long fiber) แทรกตัวอยู่ในวัสดุเนื้อพื้น โดยสมบัติของวัสดุเชิงประกอบขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเนื้อพื้น รวมถึงปริมาณ และการจัดเรียงตัวของเฟสที่กระจายตัวอยู่ วัสดุเชิงประกอบสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ วัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยอนุภาค ซึ่งแบ่งออกเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ที่ใส่เข้าไปเพื่อเพิ่มเนื้อ และอนุภาคที่ใส่เข้าไปเพื่อกระจายแรง ส่วนวัสดุเชิงประกอบเสริมแรงด้วยเส้นใยสามารถแบ่งออกเป็นเส้นใยแบบต่อเนื่อง (Continuous fiber) และแบบไม่ต่อเนื่อง (Discontinuous fiber) ซึ่งมีทิศทางการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกับการรับแรง (Uni-directional alignment) และแบบสุ่ม (Random alignment) (Callister W.D., 2003)

6.1 ประโยชน์ของวัสดุเสริมแรง

การผสมเส้นใยเสริมแรงเข้ากับวัสดุพลาสติกเนื้อพื้นมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติทางกล (Mechanical properties) ในด้านต่างๆ ให้แก่วัสดุ เช่น สมบัติการต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ความแกร่ง (Toughness) หรือความต้านทานต่อแรงกระแทก (Impact) เป็นต้น ซึ่งส่งผลให้วัสดุมีเสถียรภาพในการคงรูปเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้ไม่เกิดการหดหรือยืดตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อน มีสมบัติที่ดีขึ้นในด้านการล้า (Fatigue) โดยสามารถกล่าวได้ว่าสมบัติที่ดีขึ้นนี้เนื่องจาก เส้นใยเสริมแรงมีค่ามอดุลัส (Modulus) ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ และในส่วนของเรซินมีความสามารถในการยึดหยุ่นได้ดี

6.2 องค์ประกอบของวัสดุเสริมแรง

ส่วนประกอบต่างๆ ในพลาสติกเสริมแรงนั้นมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่งส่วนประกอบของพลาสติกเสริมแรงออกเป็น 2 ส่วน คือ

6.2.1 สารเสริมแรง (Reinforcement) เป็นวัสดุที่ใช้เพื่อเสริมแรงในเนื้อพลาสติก ซึ่งผลิตขึ้นจากวัสดุรูปแบบต่างๆ โดยทั่วไปแล้วไม่มีความต่อเนื่องกัน เช่น เส้นใย (Reinforcing agent) ผง (Powdered) หรือมีลักษณะเป็นแผ่นชิ้นเล็กๆ (Flake) เป็นต้น โดยเส้นใยเสริมแรงที่นิยมใช้กับพลาสติกมากที่สุดคือ เส้นใยแก้ว (Glass fiber) เนื่องจากเส้นใยแก้วมีค่ามอดุลัสค่อนข้างสูง และมีราคาต่ำ ซึ่งนอกจากนี้ยังมีเส้นใยชนิดอื่นๆ ที่นิยมใช้ เช่น เส้นใยคาร์บอนกราไฟต์ (Graphite fiber) เส้นใยอะรามิด (Aramid fiber) เป็นต้น

เส้นใยแก้วเส้นใยแก้วเป็นวัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะการนำมาผสมกับวัสดุเนื้อพื้นที่เป็นพลาสติก เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีคือ ทนแรงดึงได้สูงมาก มีความแข็งแรง เป็นฉนวนความร้อน และไม่ดูดซับความชื้น นอกจากนี้ยังมีต้นทุนการผลิตต่ำ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ เช่น อ่างอาบน้ำ ชิ้นส่วนเครื่องบินเล็ก ถังน้ำขนาดใหญ่ ชิ้นส่วนรถแข่ง เป็นต้น เส้นใยแก้วที่สำคัญแบ่งออกเป็น 4 ชนิดด้วยกัน

1. A Glass (Alkali grade) ใช้สำหรับงานที่ต้องทนสารเคมีที่เป็นด่าง
2. C Glass (Chemical grade) ใช้สำหรับงานที่ต้องทนสารเคมีที่เป็นกรดและสารกัดกร่อน
3. E Glass (Electrical grade) ใช้สำหรับงานที่ต้องการรับแรงและเป็นฉนวนป้องกันกระแสไฟฟ้าได้ดี
4. S Glass (High strength grade) ใช้สำหรับงานที่ต้องการรับแรงสูงกว่าชนิด E

เส้นใยคาร์บอน กราไฟต์การใช้งานส่วนใหญ่ของวัสดุเสริมแรงที่มีเส้นใยคาร์บอน กราไฟต์เป็นส่วนประกอบนั้น มักใช้ในงานทางด้านอวกาศ เช่น การผลิตจรวด สถานี

อวกาศ หรืออากาศยาน เป็นต้น เนื่องจากเส้นใยมีน้ำหนักเบากว่าเมื่อเทียบกับการผลิตด้วยโลหะ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุเสริมแรงด้วยเส้นใยคาร์บอน กราไฟต์มาผลิตเป็นอุปกรณ์กีฬา เช่น ไม้เบดมินตัน หรือไม้กอล์ฟ เป็นต้น โดยเส้นใยคาร์บอนกราฟิตมีสมบัติเด่น คือ สามารถทนต่อการผุกร่อนได้ดีเมื่ออยู่ในอุณหภูมิปกติ ทนทานต่อความล้า และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวต่ำมาก ดังนั้นจึงถูกใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความเที่ยงตรงของขนาด

เส้นใยอะรามิดเส้นใยประเภทนี้มีชื่อเรียกทางการค้าว่าเคฟลาร์ (Kevlar) มีสมบัติทนความร้อนสูง และสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 400°C ซึ่งการใช้งานต่อเนื่องของวัสดุที่มีเส้นใยอะรามิดเป็นส่วนประกอบอยู่ที่ประมาณ 180°C อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิการใช้งานอาจสูงถึง 300°C ขึ้นอยู่กับวัสดุเนื้อพื้น โดยเส้นใยอะรามิดมีหลายรูปแบบ เช่น เส้นใยยาวต่อเนื่อง เส้นใยสั้น เส้นใยถักเป็นผืน เป็นต้น เส้นใยอะรามิดมีสมบัติเด่น คือ มีความคงทนต่อสารเคมี ยกเว้นกรดและด่างที่มีความเข้มข้นสูง และมีความแข็งแรงเฉพาะด้านการต้านทานแรงดึงยืดสูงสุด

6.2.2 เรซินเป็นองค์ประกอบหลักของวัสดุผสม ทำหน้าที่เป็นวัสดุเนื้อพื้น (Matrix) เพื่อส่งถ่ายแรงที่กระทำสู่เส้นใยทำให้สามารถรับแรงได้เพิ่มมากขึ้น และห่อหุ้มเส้นใยเพื่อป้องกันความเสียหายจากสภาวะแวดล้อม โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) พอลิเมอร์ประเภทนี้หลอมเหลวเมื่อได้รับความร้อน และขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้เมื่อเย็นตัวลง โดยวัสดุเทอร์โมพลาสติกที่นิยมใช้ได้แก่ พอลิโพรพิลีน พอลิเอไมด์ (Polyamide, PA) และพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) เป็นต้น

เทอร์โมเซต (Thermosets) พอลิเมอร์ประเภทนี้คงรูปได้เมื่อได้รับความร้อน หรือมีการเกิดปฏิกิริยาเคมี และไม่สามารถหลอมเหลวได้อีก โดยวัสดุเทอร์โมเซตที่นิยมใช้ได้แก่ อีพอกซี (Epoxy) เมลามีน (Melamine) และซิลิโคน (Silicone) เป็นต้น

7. ตรวจสอบเอกสาร

Wong *et al.* (1997) ได้ทำการศึกษาลักษณะของโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกันของพอลิเอทีลีน และอุณหภูมิหัวขึ้นรูปที่มีต่อความแข็งแรงของพอลิเอทีลีนหลอมเหลว จากการทดลองพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิหัวขึ้นรูปส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของพอลิเอทีลีนหลอมเหลวมี

แนวโน้มลดลง และเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่แตกต่างกันของพอลิเอทิลีนพบว่า ที่สภาวะการทดสอบเดียวกันการเกี่ยวพันของสายโซ่โมเลกุลมีอิทธิพลอย่างมากต่อความแข็งแรงของพอลิเมอร์หลอมเหลวกล่าวคือในกรณีที่สายโซ่โมเลกุลมีลักษณะเป็นกิ่งก้านสาขา (Branch chain) เช่นในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) สามารถเกี่ยวพันกันได้ดีกว่าในกรณีที่สายโซ่โมเลกุลเป็นแบบเชิงเส้น (Linear chain) ในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เนื่องจากเกิดการเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายกว่า ส่งผลให้ความแข็งแรงของ LDPE หลอมเหลวสูงกว่า HDPE

Sombatsompopet *et al.* (2005) ได้ทำการวิเคราะห์อัตราส่วนการบวมตัวที่เกิดขึ้นของพอลิสไตรีน (PS) ในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์และเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว จากการเปรียบเทียบที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูป และอัตราความเร็วเหมือนกัน พบว่า อัตราส่วนการบวมที่เกิดขึ้นจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดียวกว่าค่าที่ได้จากเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ประมาณ 20-25% ทั้งนี้เนื่องจากความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจากเครื่องอัดรีดแบบเกลียวนอนเดี่ยวที่มากกว่าเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบความเร็วของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Velocity profile) ภายในหัวขึ้นรูป พบว่าความเร็วของพอลิเมอร์หลอมเหลว ณ ตำแหน่งกึ่งกลางหัวขึ้นรูปที่ได้จากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดียวกว่าค่าที่มากกว่าเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอิทธิพลของความเข้มสนามแม่เหล็กบริเวณหัวขึ้นรูป (Magnetic die) ที่มีต่ออัตราส่วนการบวมตัวพบว่า การเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กที่ 1.6 Tesla ส่งผลให้ PS มีการบวมตัวมากที่สุด โดยอัตราส่วนการบวมตัวที่ได้จากเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์มีค่ามากกว่าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากหัวขึ้นรูปของเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์มีส่วนที่เป็นโลหะมากกว่าเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวซึ่งได้รับอิทธิพลจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่มากกว่า

Intawonget *et al.* (2008) ได้ศึกษาสมบัติการไหลของยางธรรมชาติ ซึ่งได้แก่ รูปแบบการไหลและพฤติกรรมการบวมตัวในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์โดยใช้หัวขึ้นรูปแบบหมุน (Rotating die) จากผลการทดสอบพบว่ายางธรรมชาติมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic) และการเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนของหัวขึ้นรูปส่งผลให้ค่าอัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์การไหลวน (Vortex) เพิ่มขึ้นที่บริเวณก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูป ในขณะที่การเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนของหัวขึ้นรูปส่งผลให้ความดันตกคร่อม (Entrance pressure drop) ซึ่งวัดได้ที่บริเวณก่อนทางเข้าหัวขึ้นรูปมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือนที่ผนัง (Wall shear rate) ในระหว่างการหมุนหัวขึ้นรูป นอกจากนี้การ

เพิ่มความเร็วรอบการหมุนของหัวขึ้นรูปส่งผลให้แรงที่ใช้ในการอัดรีด (Extrusion force) มีแนวโน้มลดลง

Lianget al.(1998) ได้ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรพิลีน และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยใช้เครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์ จากผลการทดลองพบว่า อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงอย่างเป็นเส้นตรง (Linearly) เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและความยาวของหัวขึ้นรูปในขณะที่การเพิ่มความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall shear stress) และความดันที่สูญเสีย (Pressure losses) ทำให้อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างไม่เป็นเส้นตรง (Non-linearly) และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณการผสมพอลิโพรพิลีนในพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่า อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลง โดยมีค่าอัตราส่วนการบวมตัวต่ำที่สุดเมื่อผสมพอลิโพรพิลีนที่ 20 %wt ทั้งนี้เนื่องมาจากพลังงานยืดหยุ่นสะสม (Elastic stored energy) และสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) ระหว่างพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิด

Lianget al. (2002) ศึกษาอิทธิพลของการผสมเส้นใยแก้ว และอัตราการอัดรีด (Extrusion rate) ที่มีต่อความดันตกคร่อมที่บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (Entrance pressure drop) และพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิทดสอบ 190°C จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราความเร็วเฉือน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่ออัตราความเร็วเฉือนต่ำกว่า 6000 s⁻¹ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราความเร็วเฉือนในช่วงนี้ส่งผลให้เกิดเสียรูปแบบเฉือน (Shear deformation) และเมื่อพิจารณาถึงปริมาณการผสมเส้นใยแก้วพบว่า การบวมตัวมีแนวโน้มลดลงอย่างไม่เป็นเส้นตรง เนื่องจากการผสมเส้นใยแก้วส่งผลให้สายโซ่โพลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ผ่านกัน (Slippage) ได้ยากขึ้น ดังนั้น เมื่อพอลิเมอร์ออกจากหัวขึ้นรูปจึงไม่สามารถแสดงความเป็นอีลาสติกได้ดีเมื่อเทียบกับในกรณีที่ไม่ผสมเส้นใยแก้ว

Han (1975) ทำการศึกษาสมบัติการไหล และลักษณะของพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อผ่านกระบวนการอัดรีดร่วมโดยใช้พอลิเมอร์ 3 ชนิดได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง และพอลิสไตรีนจากผลการวิเคราะห์พบว่าอัตราการอัดรีดพอลิเมอร์ที่มีความหนืดมากในชั้นผิวส่งผลให้ความหนืดโดยรวมของระบบอยู่ระหว่างความหนืดของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด ในขณะที่เมื่อทำการอัดรีดพอลิเมอร์ที่มีความหนืดน้อยกว่าในชั้นผิวส่งผลให้ความหนืดโดยรวมมีค่าต่ำกว่าความหนืดของพอลิเมอร์ที่น้อยที่สุด นอกจากนี้ยังได้พิจารณาถึงการเสียรูปที่บริเวณผิวสัมผัส (Interfacial instability) ของพอลิเมอร์หลอมเหลวเมื่อผ่านกระบวนการอัด

รีดร่วมแบบ Conjugate จากผลการวิเคราะห์พบว่าในการอัดรีดพอลิเมอร์ที่มีความหนืดต่ำมีแนวโน้มการเคลื่อนล้อมรอบ (Encapsulation) พอลิเมอร์ที่มีความหนืดสูงกว่า ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีความหนืดมากมีทิศทางการเคลื่อนที่เข้าสู่ศูนย์กลาง (Convex) ซึ่งสามารถสังเกตได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อเพิ่มความยาวหัวขึ้นรูป นอกจากนี้จากงานวิจัยของ Han (1976) ยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความเร็วในการดึงยืดพอลิเมอร์หลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมไม่มีผลต่อลักษณะของการการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผิวสัมผัส บริเวณผิวสัมผัสระหว่างพอลิเมอร์ชั้นผิวและชั้นแกนกลางที่เกิดขึ้น

Gupta *et al.* (2007) ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดและลักษณะหัวขึ้นรูปที่มีต่อความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลว จากผลการทดลองพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูปมีอิทธิพลต่อความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวมากกว่าการเพิ่มความยาวหัวขึ้นรูป นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของมุมทางเข้าหัวขึ้นรูป จากการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวมีค่าไม่แตกต่างกันที่มุมทางเข้าหัวขึ้นรูปต่างๆ กัน ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการใช้หัวขึ้นรูปที่มีค่า L/D ratio มากในการทดลอง ทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการคลายตัว ดังนั้นจึงเป็นผลให้ปลดปล่อยความเครียดออกมานอกจากนี้การเพิ่มอัตราการอัดรีด (Extrusion rate) ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากสายโซ่โมเลกุลมีการจัดเรียงตัวตามทิศทางการไหลขณะอยู่ภายในหัวขึ้นรูปที่เพิ่มมากขึ้น

Yao *et al.* (2008) ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณผงไม้ ความหนาของพอลิเมอร์ชั้นผิว และชนิดของพอลิเมอร์ชั้นแกนกลาง ซึ่งได้แก่ พอลิเมอร์ผสมระหว่าง HDPE และ LDPE ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ที่มีต่อสมบัติเชิงกล และการดูดซับน้ำ (Water absorption) จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณผงไม้ในพอลิเอทิลีนชั้นผิวส่งผลให้ค่าความต้านทานการดัดโค้ง (Flexural strength) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณผงไม้ในชั้นแกนกลางไม่ส่งผลต่อค่ามอดูลัสการดัดโค้ง ในขณะที่การดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับในกรณีที่ไม่มีพอลิเอทิลีนในชั้นผิว นอกจากนี้การเพิ่มความหนาของพอลิเอทิลีนในชั้นผิวส่งผลให้การต้านทานการดัดโค้งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

อุปกรณ์และวิธีการ

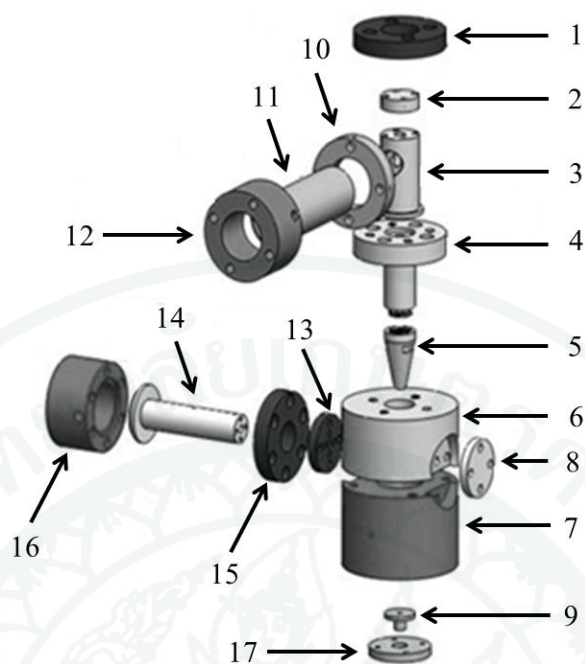
อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1.1 เครื่องอัดรีดขึ้นรูปแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) ของบริษัทเอ็นแมช จำกัด
- 1.2 ชุดควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controller) ของบริษัทเอ็นแมช จำกัด
- 1.3 ชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม
- 1.4 ชุดตรวจวัดความดัน (Pressure transducer) ยี่ห้อ Dynisco รุ่น PT460E-2CB-6
- 1.5 เม็ดพอลิโพรพิลีนเกรด HP400K ของบริษัท Basel จำกัด
- 1.6 เม็ดพอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 30 %wt เกรด 1111KXGA6 ของบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด

2. ชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและจัดสร้างชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม (Coextrusion rig) เพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติการไหลในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม โดยอาศัยหลักการอัดรีดพอลิเมอร์หลอมเหลวจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว 2 เครื่อง เพื่อใช้ในการอัดรีดพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวชั้นผิว และชั้นแกนกลาง ตามลำดับ ส่วนประกอบของชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วมแสดงในภาพที่ 16 โดยมีรายละเอียดของส่วนประกอบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 16 ส่วนประกอบของชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบต่างๆของชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม

หมายเลข	ชื่อ / หน้าที่ของอุปกรณ์
1	แผ่นประกบยึดช่องทางการไหลชั้นแกนกลาง
2	ฝาปิดช่องทางการไหลชั้นแกนกลาง
3	ช่องทางการไหลชั้นแกนกลาง 3
4	ช่องทางการไหลชั้นแกนกลาง 4
5	หัวควบคุมอัตราส่วนระหว่างชั้นแกนกลางและชั้นผิววนอก
6	ส่วนอัดรีดร่วม 1
7	ส่วนอัดรีดร่วม 2
8	ฝาปิดช่องทางการไหลชั้นผิววนนอกชุดเสริม
9	หัวขึ้นรูป
10	แผ่นประกบยึดเครื่องอัดรีดชั้นแกนกลาง
11	ช่องทางการไหลชั้นแกนกลาง 2
12	ช่องทางการไหลชั้นแกนกลาง 1

ตารางที่ 1 (ต่อ)

หมายเลข	ชื่อ / หน้าที่ของอุปกรณ์
13	แผ่นประกบยึดส่วนอัตริตร่วม
14	ช่องทางการไหลชั้นผิวนอก 2
15	แผ่นประกบยึดเครื่องอัตริตร่วมชั้นผิวนอก
16	ช่องทางการไหลชั้นผิวนอก 1
17	ที่นั่งหัวขึ้นรูป

2.1 ชุดทางเดินชั้นผิวและชั้นแกนกลาง

ภาพที่ 17 แสดงชุดทางเดินชั้นผิว และชั้นแกนกลางซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวจากเครื่องอัตริตร่วมแบบสกรูเดี่ยวทั้งสองเครื่องให้ไหลมารวมกันในชุดอัตริตร่วม โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางการไหลเท่ากับ 15 mm โดยที่บริเวณตรงกลางของชุดทางเดินได้ทำการเจาะรูเพื่อติดตั้งชุดตรวจวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) และในส่วนของชุดทางเดินชั้นแกนกลางต้องการประกอบเข้ากับชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของพอลิเมอร์ชั้นแกนกลาง ดังแสดงในภาพที่ 18



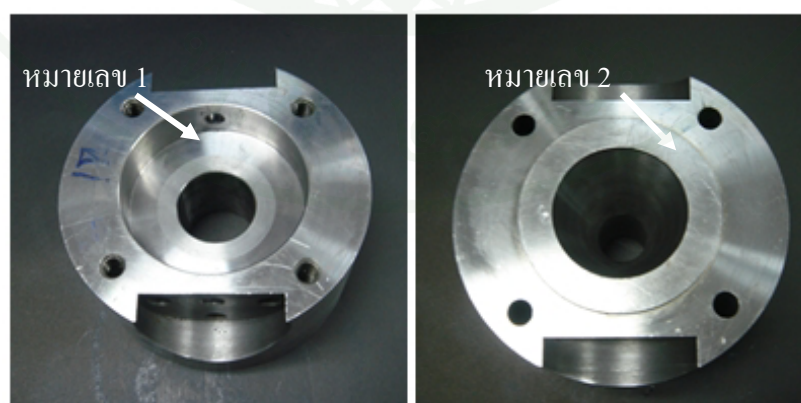
ภาพที่ 17 ชุดทางเดินพอลิเมอร์หลอมเหลว (ก) ชุดทางเดินชั้นแกนกลาง และ (ข) ชุดทางเดินชั้นผิว



ภาพที่ 18 ชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของพอลิเมอร์ชั้นแกนกลาง

2.2 ชุดอัดรีดร่วม

ภาพที่ 19 แสดงชุดอัดรีดร่วมซึ่งทำหน้าที่รวมพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวจากเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวทั้งสองเครื่อง โดยในชุดอัดรีดร่วมประกอบด้วยชุดประกอบทางด้านบนและทางด้านล่าง หมายเลข 1 แสดงตำแหน่งการไหลเข้าของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวชั้นผิวเพื่อเข้าสู่ชุดอัดรีดร่วม และหมายเลข 2 แสดงตำแหน่งที่พอลิโพรพิลีนหลอมเหลวชั้นผิว และชั้นแกนกลางไหลรวมกันและเข้าสู่หัวขึ้นรูป



ภาพที่ 19 แผ่นประกอบชุดอัดรีดร่วม

2.3 หัวขึ้นรูป

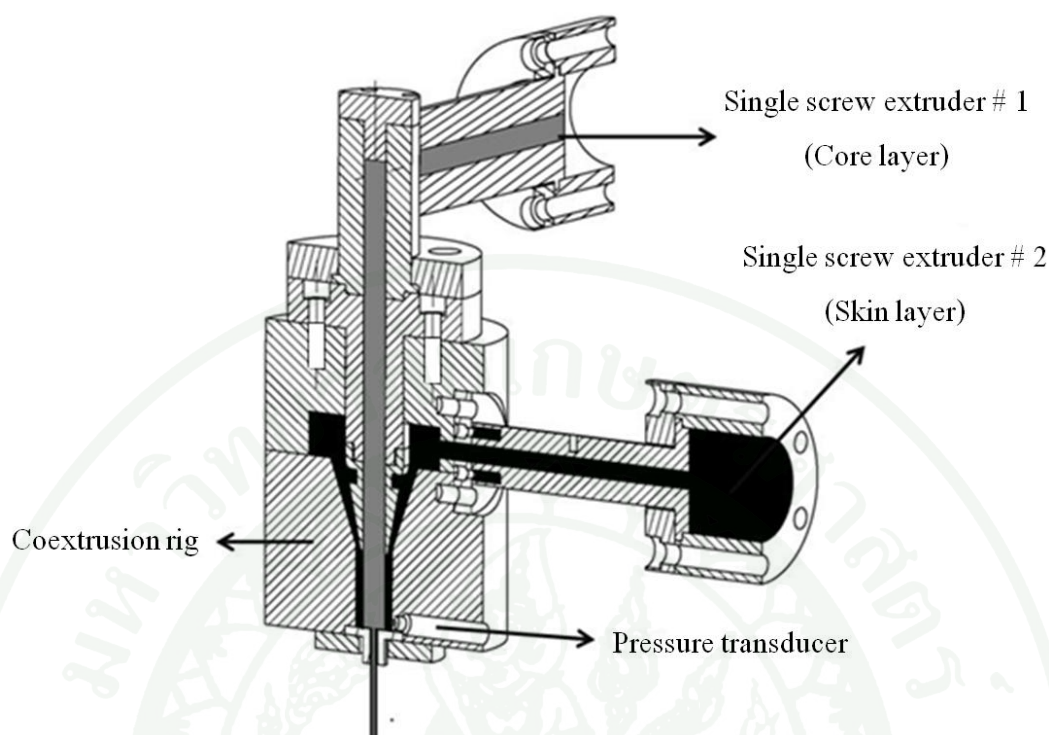
งานวิจัยนี้ได้ใช้หัวขึ้นรูปซึ่งมีลักษณะแบบกลม (Circular die) ดังแสดงในภาพที่ 20 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และความยาวของหัวขึ้นรูปเท่ากับ 5 และ 20 mm ตามลำดับ



ภาพที่ 20 หัวขึ้นรูปแบบกลม

2.4 ชุดควบคุมอุณหภูมิและชุดให้ความร้อน

ชุดควบคุมอุณหภูมิทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วมให้คงที่ตลอดการทดสอบ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดเทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Thermocouple type K) เป็นชุดตรวจวัดอุณหภูมิตามบริเวณต่างๆ ของชุดทดสอบสมบัติการไหล และในส่วน of ชุดให้ความร้อนแก่พอลิเมอร์หลอมเหลวเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนแบบเข็มขัด (Heater band) รััดภายนอกของชุดทางเดินและชุดอัดรีดร่วม โดยลักษณะเส้นทางกรไหลของพอลิโพรพีลีนหลอมเหลวภายในชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วมแสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ภาพตัดขวางเพื่อแสดงเส้นทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในชุดทดสอบ สมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม

3. เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว

งานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวของ บริษัท เอ็นแมช จำกัด โดยมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของสกรู (L/D ratio) เท่ากับ 23.2 (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm) มีแผ่นให้ความร้อนแบบเข็มขัด 3 แผ่น ติดตั้งตลอดความยาวของห้องหลอมเหลว ดังแสดงในภาพที่ 22 การปรับความเร็วรอบการหมุนของสกรูสามารถทำได้โดยการปรับความถี่ของชุดควบคุม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 22 เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างการปรับความถี่ของชุดควบคุมและความเร็วรอบการหมุนของสกรู

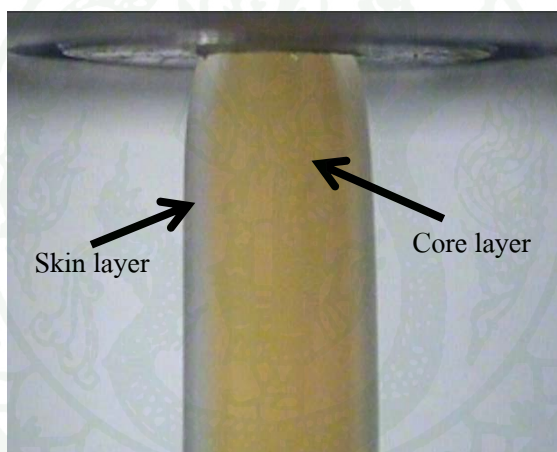
Frequency (Hz)	Screw rotation speed (rpm)
15	5
30	10
45	15
60	20
75	25

การวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของสภาวะในการทดสอบ และปริมาณเส้นใยแก้วในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางที่มีต่อสมบัติการไหล โดยงานวิจัยนี้ได้กำหนดสี่แทนปริมาณเส้นใยแก้วต่างๆ ในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลาง ดังแสดงในตารางที่ 3 จากนั้นจึงทำการติดตั้งชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วมเข้ากับเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวทั้ง 2 เครื่องเพื่อทดสอบสมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีน โดยลักษณะของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม (Coextrudate)

เมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูปแบบกลมแสดงในภาพที่ 23 และภาพที่ 24 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ตารางที่ 3 การจำแนกสีของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วปริมาณต่างๆ ในชั้นแกนกลาง

Glass fiber content (%wt)	Color
0	Yellow
10	Orange
20	Green
30	Blue

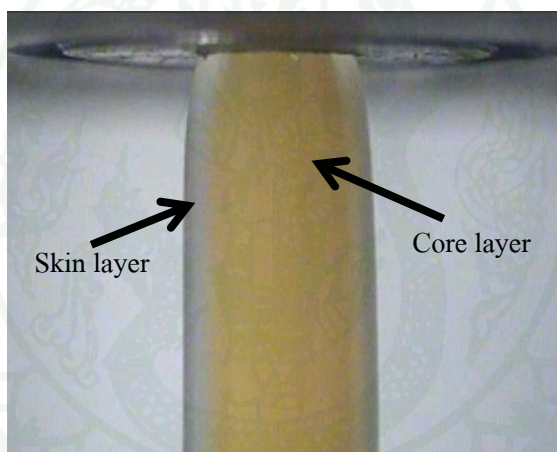


ภาพที่ 23 พอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมในขณะที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูปแบบกลม

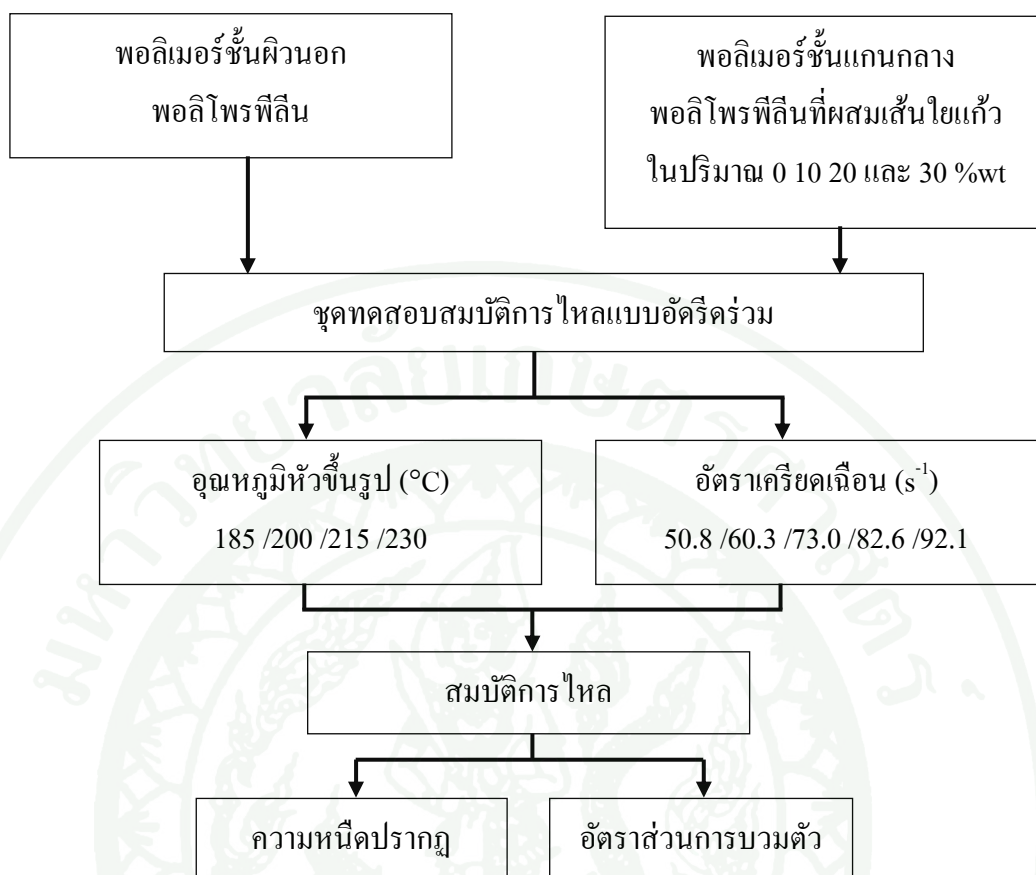
เมื่อไหลผ่านหัวขึ้นรูปแบบกลมแสดงในภาพที่ 23 และภาพที่ 24 แสดงแผนผังการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

ตารางที่ 3 การจำแนกสีของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วปริมาณต่างๆ ในชั้นแกนกลาง

Glass fiber content (%wt)	Color
0	Yellow
10	Orange
20	Green
30	Blue



ภาพที่ 23 พอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมในขณะที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูปแบบกลม



ภาพที่ 24 แผนผังการดำเนินการวิจัย

วิธีการ

1. การเตรียมเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในปริมาณต่างๆกัน

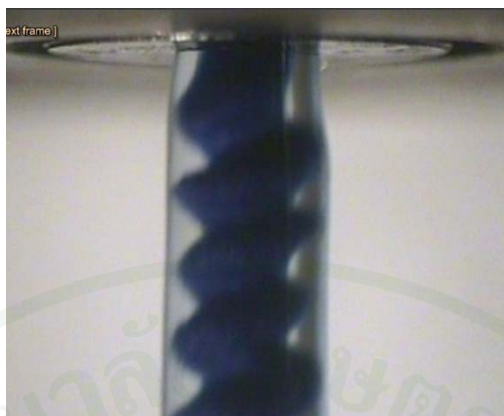
งานวิจัยนี้ได้ใช้พอลิโพรพิลีน (เกรด HP400K) และพอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้น 30%wt (เกรด 1111KXGA6) เพื่อเตรียมให้เป็นเม็ดพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วในปริมาณ 10 และ 20%wt ตามลำดับ โดยใช้อัตราส่วนผสมดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้ว 30%wt

ปริมาณเส้นใยแก้วในพอลิโพรพิลีนชั้น แกนกลาง	อัตราส่วนผสมระหว่างพอลิโพรพิลีนและ พอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้ว 30%wt
พอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้ว 10%	2:1
พอลิโพรพิลีนผสมเส้นใยแก้ว 20%	1:2

2. การทดสอบสมบัติการไหล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติการไหลซึ่งได้แก่ ความหนืดปรากฏและอัตราส่วนการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดรวมเมื่อผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในปริมาณ 10 20 และ 30%wt ภายในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลาง โดยที่ความหนืดปรากฏสามารถคำนวณได้จากอัตราการไหลและความดันที่เกิดขึ้นบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป โดยใช้สมการที่ 4 5 และ 6 ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์อัตราส่วนการบวมตัวดังแสดงในสมการที่ 15 สามารถทำได้โดยการนำภาพถ่ายจากกล้องวิดีโอ เมื่อพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดรวมถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูป ไปวัดขนาดโดยใช้โปรแกรม Image Pro Plus อย่างไรก็ตาม จากผลการทดสอบที่ได้จากงานวิจัยนี้ เมื่อผสมเส้นใยแก้วในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลาง พบว่าเกิดปรากฏการณ์การเสียรูปของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในชั้นแกนกลาง (Internal melt fracture) ดังแสดงในภาพที่ 25 โดยจากปัญหาที่พบดังกล่าว ผู้วิจัยได้วิเคราะห์และศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหานั้น ซึ่งได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป



ภาพที่ 25 การเกิดปรากฏการณ์การเสียรูปภายในของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวเมื่อผสมเส้นใยแก้ว
แบบในชั้นแกนกลางขณะผ่านกระบวนการอัดรีดร่วม

ผลและวิจารณ์

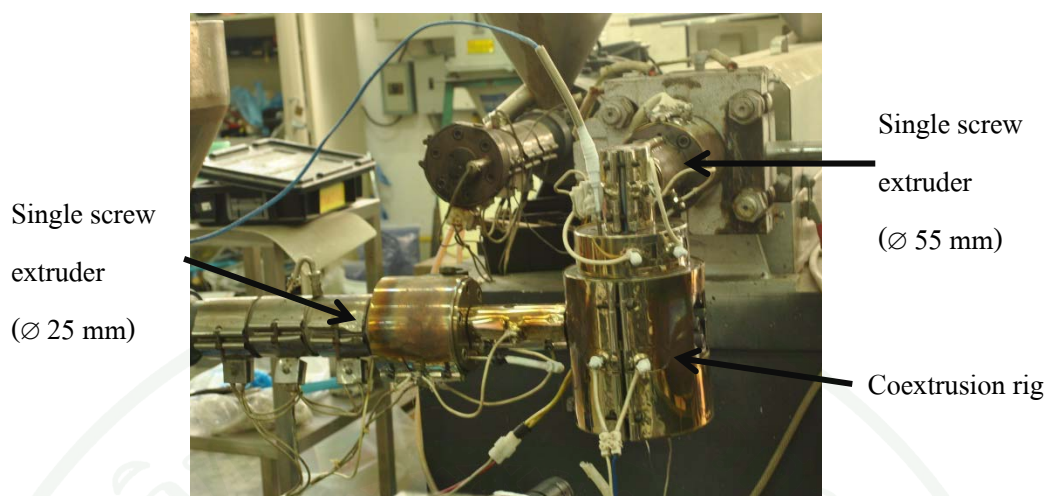
1. การทดลองประสิทธิภาพชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม

การทดสอบประสิทธิภาพชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วมเริ่มต้นจากการหาอัตราครีดยื่นที่เกิดขึ้น โดยในงานวิจัยใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว 2 เครื่องที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 และ 55 mm ซึ่งทำหน้าที่อัดรีดพอลิเมอร์ขึ้นผิว และชั้นแกนกลางตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 26 การหาอัตราครีดยื่นที่เกิดขึ้นในชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี ได้แก่

1. หาผลรวมอัตราครีดยื่น (Total shear rate) ที่เกิดขึ้นจากเครื่องอัดรีดในแต่ละเครื่องที่ความเร็วรอบการหมุนสกรู (Screw rotation speed, N) ต่างๆ กัน โดยอัดรีดผ่านชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม

2. หาอัตราครีดยื่นโดยรวม (Overall shear rate) ที่เกิดขึ้นเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบของเครื่องอัดรีดทั้งสองเครื่องพร้อมกัน โดยอัดรีดผ่านชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม

จากการหาค่าอัตราครีดยื่นทั้ง 2 กรณี ได้แสดงผลการทดลองดังในตารางที่ 5 6 และ 7 ตามลำดับ โดยในตารางที่ 7 แสดงตัวอย่างของค่าผลรวมอัตราครีดยื่นที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ความเร็วรอบการหมุนของสกรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm เท่ากับ 5 rpm และการเปรียบเทียบค่าผลรวมอัตราครีดยื่นและอัตราครีดยื่นโดยรวมที่เกิดขึ้น จากตารางพบว่าอัตราครีดยื่นที่เกิดขึ้นทั้ง 2 กรณี มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าผลรวมอัตราครีดยื่นที่เกิดจากการรวมกันของเครื่องอัดรีดแต่ละเครื่อง (กรณีที่ 1) เพื่อให้ง่ายและสะดวกต่อการคำนวณค่าต่างๆ



ภาพที่ 26 การติดตั้งชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วมเข้ากับเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 และ 55 mm ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ความเร็วรอบการหมุนของสกรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm และอัตราเคียวเฉือนที่เกิดจากชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 160°C

N (rpm)	Shear rate (s^{-1})
5	8.0
10	18.2
15	26.3
20	34.7
25	44.4

ตารางที่ 6 ความเร็วรอบการหมุนของสกรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 mm และอัตราเครียดเฉือนที่เกิดจากชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัตราร่วม ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 160°C

N (rpm)	Shear rate (s^{-1})
3	56.3
5	121.0
7	161.8
9	199.0
11	232.8

ตารางที่ 7 ความเร็วรอบการหมุนของสกรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 และ 55 mm ผลรวมอัตราเครียดเฉือนและอัตราเครียดเฉือนโดยรวมที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัตราร่วม ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 160°C

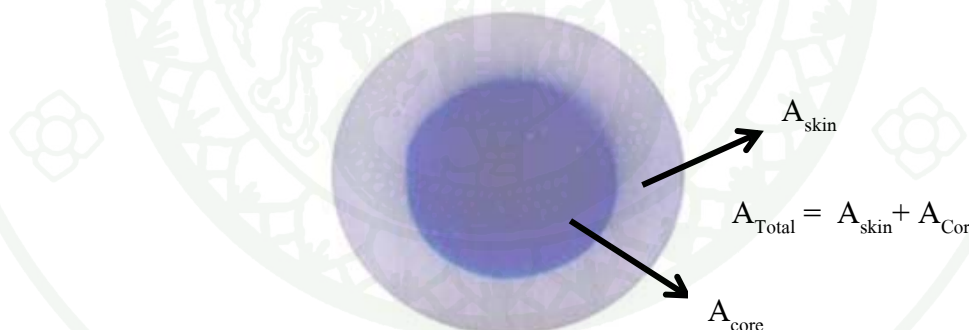
Extruder $\varnothing$ 25 mm (Skin layer) N (rpm)	Extruder $\varnothing$ 55 mm (Core layer) N (rpm)	Total shear rate (s^{-1})	Overall shear rate (s^{-1})
5	3	74.0	65.3
5	5	122.1	129.9
5	7	161.8	170.8
5	9	201.4	108.0
5	11	240.9	241.8

ขั้นตอนการหาผลรวมอัตราเครียดเฉือนที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติการไหลและความแข็งแรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว พิจารณาโดยทำการศึกษ้อัตราส่วนพื้นที่ของพอลิเมอร์ชั้นแกนกลางต่อพื้นที่ทั้งหมด (A_{core}/A_{total}) ดังแสดงในตารางที่ 8 และภาพที่ 27 แสดงภาพตัดขวางของพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการอัตราร่วม จากผลการทดสอบพบว่า ที่อัตราเครียดเฉือนขึ้นผิวคงที่เท่ากับ $9.0 s^{-1}$ อัตราส่วนของพื้นที่ของพอลิเมอร์ชั้นแกนกลางต่อพื้นที่ทั้งหมดมีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และมีค่าใกล้เคียง 1 ซึ่งหมายถึง พื้นที่ของพอลิเมอร์ชั้นผิวมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมด และเมื่อพิจารณาที่อัตราเครียดเฉือนขึ้นแกนกลางคงที่เท่ากับ $232.8 s^{-1}$ พบว่ามีแนวโน้มการ

เปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้อุณหภูมิหัวขึ้นรูป อัตราความเร็วชั้นผิวและชั้นแกนกลางที่เหมาะสมซึ่งแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 8 อัตราส่วนพื้นที่ของพอลิเมอร์ชั้นแกนกลางต่อพื้นที่ทั้งหมด เมื่อผ่านชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 160°C

Shear rate of skin layer (s^{-1})	A_{core} / A_{total}				
	Shear rate of core layer (s^{-1})				
	56.3	121.0	161.8	199.0	232.8
9.0	0.861	0.930	0.932	1	1
18.2	0.778	0.854	0.898	0.944	0.946
26.3	0.670	0.805	0.847	0.873	0.880
34.7	0.666	0.741	0.802	0.849	0.849
44.4	0.559	0.708	0.753	0.791	0.758

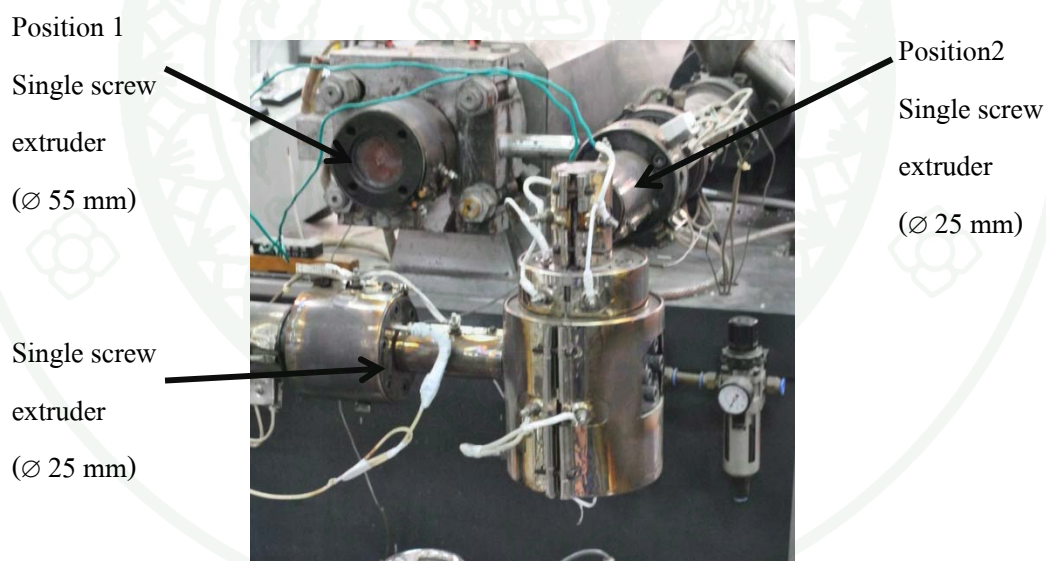


ภาพที่ 27 ภาพตัดขวางของพอลิเมอร์แบบอัดรีดร่วมที่ได้จากชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม

ตารางที่ 9 สถานะการทดสอบที่ใช้ในกระบวนการอัดรีดร่วมเมื่อใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 และ 55 mm ตามลำดับ

Shear rate of skin layer (s^{-1})	Shear rate of core layer (s^{-1})
18.2 / 26.3 / 34.7 / 44.4	56.3 / 121.0 / 161.8 / 199.0

เมื่อได้สภาวะการทดสอบที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 9 ทางผู้วิจัยเริ่มทำการทดสอบความแข็งแรงของพอลิเมอร์หลอมเหลวจากสภาวะการทดสอบดังกล่าว จากการทดสอบที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูป 150°C ที่ความเร็วรอบการหมุนลูกกลิ้งสูงสุดเท่ากับ 325 rpm พบว่าไม่สามารถยึดดึงให้พอลิเมอร์หลอมเหลวแบบอครีกร่วมขาดออกจากกันได้ในทุกผลรวมอัตราความเร็วเคลื่อนจากปัญหาที่เกิดขึ้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการแก้ไขโดยการเปลี่ยนเครื่องอครีกรูปแบบสกรูเดี่ยวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 mm ซึ่งทำหน้าที่อครีพอลิเมอร์ขึ้นแกนกลาง ดังแสดงในภาพที่ 28 (Position1) เป็นเครื่องอครีกรูปแบบสกรูเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm (Position 2) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับเครื่องอครีกรูปแบบสกรูเดี่ยวที่ใช้ในการอครีพอลิเมอร์ชั้นผิว นอกจากนี้ยังได้ออกแบบชุดทางเดินขึ้นแกนกลางใหม่เพื่อให้เกิดความเหมาะสม จากนั้นทำการติดตั้งชุดทดสอบสมบัติการไหลเข้ากับเครื่องอครีกรูปแบบสกรูเดี่ยวทั้ง 2 เครื่อง และทำการหาค่าผลรวมอัตราความเร็วเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการอครีกร่วม



ภาพที่ 28 การติดตั้งชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอครีกร่วมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 10 แสดงผลรวมอัตราความเร็วเคลื่อนที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการหมุนสกรูของเครื่องอครีกรูปแบบสกรูเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ทั้ง 2 เครื่อง จากผลการทดลองพบว่าอัตราความเร็วเคลื่อนโดยรวมที่เกิดขึ้นมีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับอัตราความเร็วเคลื่อนที่ได้จากเครื่องอครีกรูปแบบสกรูเดี่ยวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 mm นอกจากนี้ยังพบว่าในทุกผลรวมอัตราความเร็วเคลื่อน

และทุกอุณหภูมิหัวขึ้นรูป สามารถดึงยืดพอลิเมอร์หลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมให้ขาดได้ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้กำหนดสภาวะการทดสอบใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 10 ความเร็วรอบการหมุนของสกรูที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm ทั้งสองเครื่อง และผลรวมอัตราเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นเมื่อผ่านชุดทดสอบสมบัติการไหลแบบอัดรีดร่วม ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 160°C

Extruder 25 mm (Skin layer)	Extruder 25 mm (Core layer)	Overall shear rate
N (rpm)	N (rpm)	(s ⁻¹)
5	5	28.6
10	10	47.6
15	15	73.0
20	20	92.1
25	25	111.1

ตารางที่ 11 สภาวะการทดสอบที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการไหลและความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม

Test condition	
Die temperature (°C)	185 / 200 / 215 / 230
Shear rate of skin layer (s ⁻¹)	14.3 / 23.8 / 36.5 / 46.1 / 55.6
Shear rate of core layer (s ⁻¹)	14.3 / 23.8 / 36.5 / 46.1 / 55.6

2. ปัญหาและอุปสรรคที่พบในระหว่างการศึกษาทดสอบ

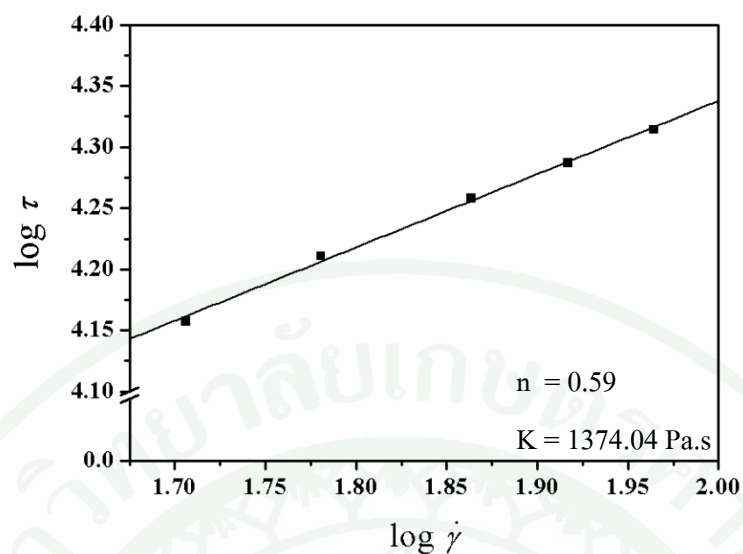
ในขั้นตอนการศึกษาความแข็งแรงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วมพบว่าพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวไม่สามารถดึงยืดผ่านลูกกลิ้งได้เนื่องจากพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวไม่ไหลผ่านลูกกลิ้งซึ่งทำหน้าที่ตรวจวัดแรงทั้งนี้มีความสาเหตุมาจากพอลิโพรพิลีนซึ่งมีโครงสร้างสายโซ่โมเลกุลที่เป็นเส้นตรง (Linear chain) เป็นผลให้เมื่อมีแรงมากระทำ สายโซ่โมเลกุลจึงสามารถเคลื่อนผ่านกันได้ง่าย (Charles *et al.*, 2006) ดังนั้นความแข็งแรงของพอลิโพรพิ

ลีนหลอมเหลวจึงมีค่าไม่สูงมากนักเช่นเดียวกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High density polyethylene, HDPE) ทั้งนี้อาจมีแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับกระบวนการขึ้นรูปเส้นใยพอลิโพรพิลีนหรือฟิล์มพอลิโพรพิลีน กล่าวคือ การลดอุณหภูมิของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวลง (ประมาณ 80 ถึง 100°C) ก่อนทำการดึงหรือเป่าขึ้นรูป แล้วเข้าสู่เครื่องตรวจวัดความแข็งแรงของพอลิเมอร์หลอมเหลว อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ไม่สามารถทำได้เนื่องจากความข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ และหากทดสอบโดยวิธีดังกล่าว สมบัติที่ได้อาจไม่ใช่สมบัติของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวอย่างแท้จริง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการศึกษาเฉพาะสมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม ซึ่งได้แก่ ความหนืดปรากฏ อัตราส่วนการบวมตัว และแนวทางการแก้ปัญหาการเสีรูปของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในชั้นแกนกลาง

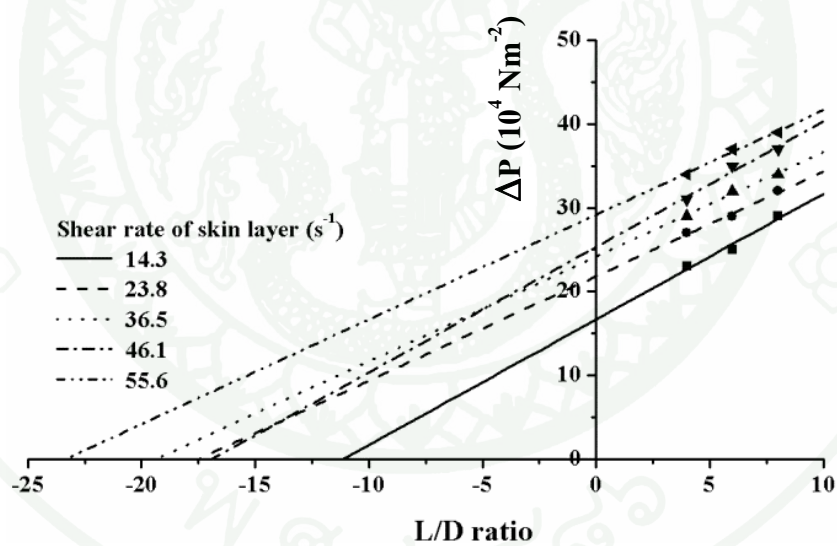
3. สมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในกระบวนการอัดรีดร่วม

3.1 การปรับแก้อัตราเครีชเคีและค่าความเค้นเคีเพื่อวิเคราะห์สมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม

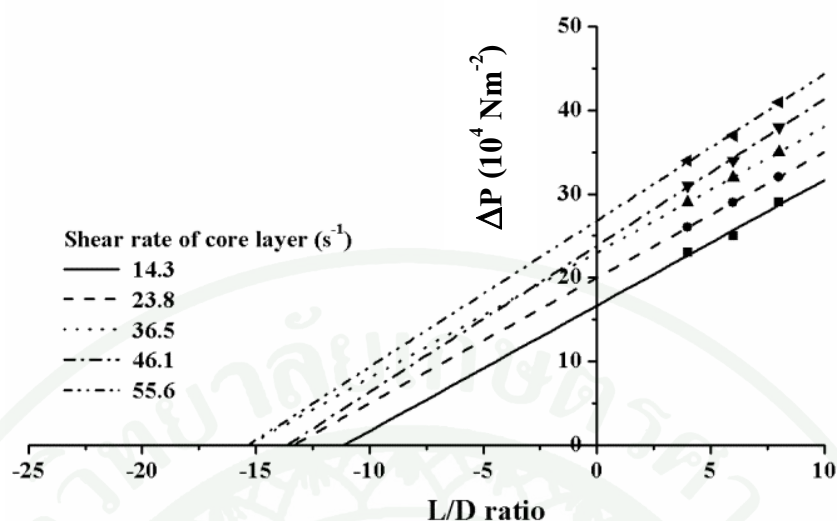
จากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\log \tau$ และ $\log \dot{\gamma}$ ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วมดังแสดงในภาพที่ 29 พบว่า ค่าดัชนีการไหล (Power law index, n) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวมีค่าเท่ากับ 0.6 ซึ่งแสดงสมบัติความเป็นซูโดพลาสติกของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมโดยค่า n ที่คำนวณได้สามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราเครีชเคีแท้จริง (True shear rate, $\dot{\gamma}_{true}$) จากสมการการปรับแก้แบบราบิโนวิทซ์ สำหรับการปรับแก้อัตราเครีชเคี (Rabinowitsch's corrections) ดังแสดงในสมการที่ 10 นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์การปรับแก้ค่าความเค้นเคีที่บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป (Entrance correction) โดยสามารถคำนวณหาค่าความเค้นเคีแท้จริง (True shear stress, τ_{true}) จากสมการของ "Bagley's correction" ดังสมการที่ 11 ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นและอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูปดังภาพที่ 30 และ 31



ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\log \tau$ และ $\log \dot{\gamma}$ ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลว



ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นและอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูปเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราความเร็วเฉือนในชั้นผิว

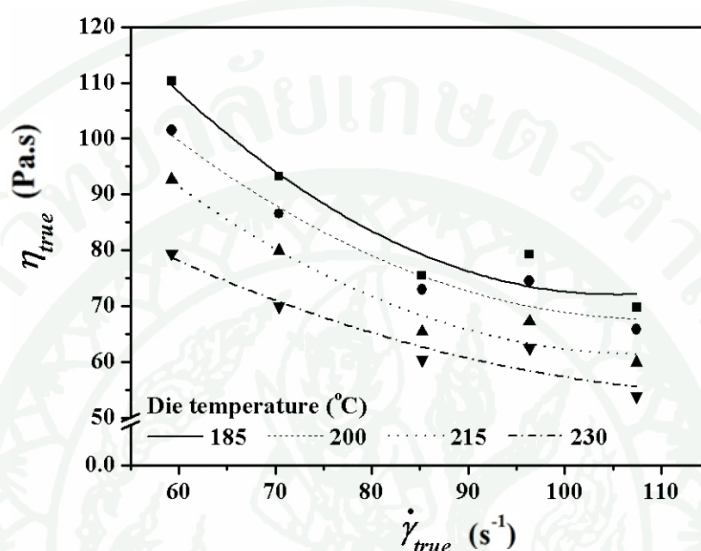


ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นและอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวขึ้นรูปเมื่อปรับเปลี่ยนอัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลาง

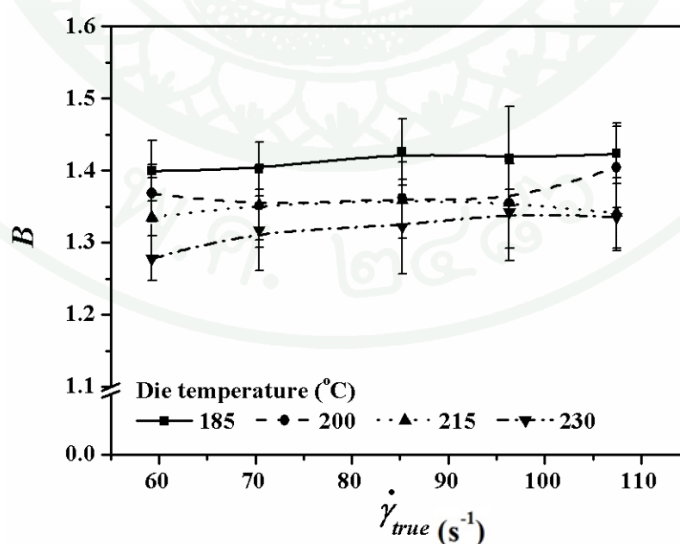
3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิหัวขึ้นรูปที่มีต่อสมบัติการไหลพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม

จากผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดที่แท้จริงและอัตราส่วนการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม เมื่อใช้อัตราความเร็วเฉือนชั้นผิวเท่ากับ 36.5 s^{-1} และอัตราความเร็วเฉือนชั้นแกนกลางในช่วงระหว่าง 14.3 ถึง 55.6 s^{-1} ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพที่ 32 และ 33 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิหัวขึ้นรูปส่งผลให้ความหนืด และอัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลคลายตัว (Relaxation) และเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น หากพิจารณาอิทธิพลของการเพิ่มอัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลาง ที่มีต่อความหนืดและอัตราส่วนการบวมตัว พบว่า ความหนืดของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มอัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลาง ทั้งนี้เนื่องจากสมบัติความเป็นซูโดพลาสติกของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลว จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมเมื่อเพิ่มอัตราความเร็วเฉือนในชั้นแกนกลาง พบว่าอัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ทั้งนี้โดยทั่วไปแล้วการเพิ่มอัตราความเร็วเฉือนหรือความเร็วในการไหลส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีการสะสมพลังงานในสายโซ่โมเลกุลเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวออกจากหัวขึ้นรูปจึงคลายพลังงานออกมาในรูปแบบการบวมตัว (Cogswell, 1981) อย่างไรก็ตาม ระบบการอัดรีดร่วม ทางผู้วิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราความเร็ว

เฉือนเฉพาะในชั้นแกนกลาง และใช้อัตราเครียดเฉือนในชั้นผิวคงที่ ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของความเค้นเฉือนบริเวณผนังภายในหัวขึ้นรูปจึงไม่สูงมากนัก เมื่อเทียบกับการปรับเปลี่ยนอัตราเครียดเฉือนในชั้นผิว ซึ่งจะแสดงการเปรียบเทียบอิทธิพลของอัตราเครียดเฉือนชั้นผิวและชั้นแกนกลางในหัวข้อ 3.3 ต่อไป



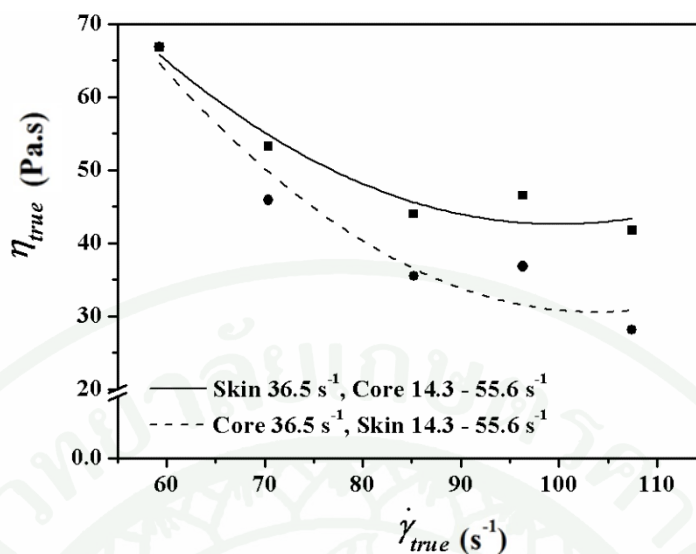
ภาพที่ 32 อิทธิพลของอุณหภูมิหัวขึ้นรูปและอัตราเครียดเฉือนในชั้นแกนกลางที่มีต่อความหนืดที่แท้จริงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม



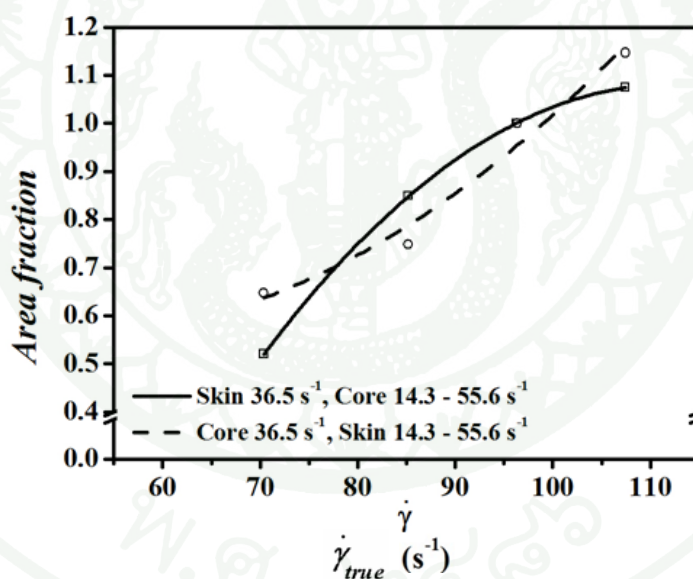
ภาพที่ 33 อิทธิพลของอุณหภูมิหัวขึ้นรูปและอัตราเครียดเฉือนในชั้นแกนกลางที่มีต่ออัตราส่วนการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม

3.3 อิทธิพลของอัตราเครียดเฉือนชั้นผิวและชั้นแกนกลางที่มีต่อสมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม

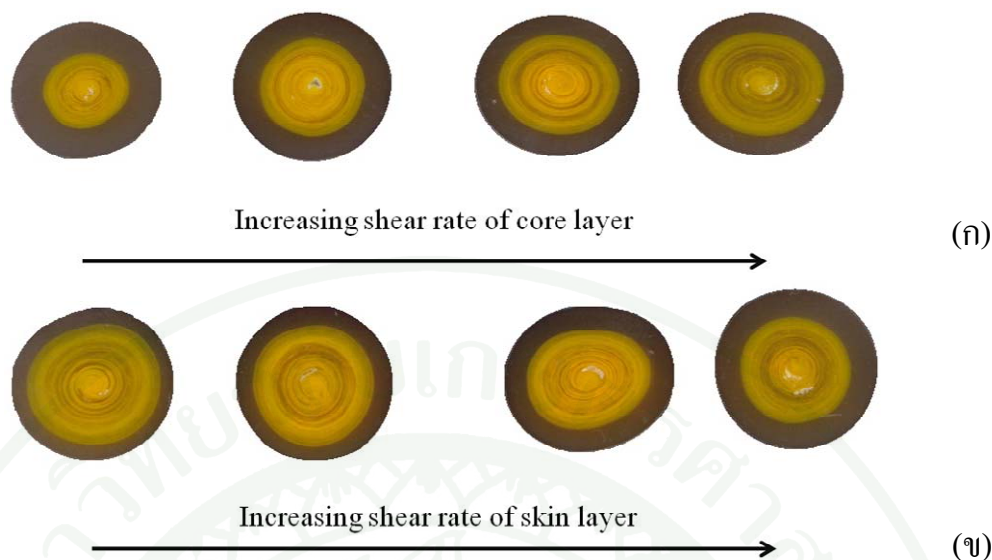
ภาพที่ 34 ถึง 36 แสดงถึงอิทธิพลของอัตราเครียดเฉือนชั้นผิว และชั้นแกนกลาง ที่มีต่อความหนืดที่แท้จริง และพฤติกรรมการบวมตัวโดยพิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดของพอลิเมอร์ชั้นผิวและชั้นแกนกลาง เมื่อใช้อุณหภูมิหัวขึ้นรูปกับ 200°C จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอัตราเครียดเฉือนชั้นผิวนอก และชั้นแกนกลางส่งผลให้ค่าความหนืดของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวมีแนวโน้มลดลงโดยการลดลงของค่าความหนืดจากการเพิ่มอัตราเครียดเฉือนชั้นผิวมีแนวโน้มลดลงมากกว่าการเพิ่มขึ้นอัตราเครียดเฉือนในชั้นแกนกลาง ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มอัตราเครียดเฉือนที่ชั้นผิวส่งผลให้เกิดความร้อนเฉือน (Shear heating) ที่ผนังขณะไหลที่มากกว่า นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมการบวมตัวโดยพิจารณาจากพื้นที่หน้าตัดของพอลิโพรพิลีนชั้นผิวและชั้นแกนกลาง พบว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราเครียดเฉือนชั้นผิวส่งผลต่อการบวมตัวมากกว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราเครียดเฉือนชั้นแกนกลางดังแสดงในภาพที่ 36 ทั้งนี้เมื่อพิจารณาในภาพที่ 35 ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนของพื้นที่ชั้นแกนกลางที่อัตราเครียดเฉือนต่างๆ ต่อพื้นที่ชั้นแกนกลางที่อัตราเครียดเฉือน 36.5s^{-1} และอัตราส่วนของพื้นที่ชั้นผิวที่อัตราเครียดเฉือนต่างๆ ต่อพื้นที่ชั้นผิวที่อัตราเครียดเฉือน 36.5s^{-1} จากผลการวิเคราะห์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราเครียดเฉือนในชั้นแกนกลาง การบวมตัวมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นที่อัตราเครียดเฉือนช่วงต้น และเริ่มคงที่ที่อัตราเครียดเฉือนสูงๆ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่เพิ่มอัตราเครียดเฉือนชั้นผิวส่งผลให้การบวมตัวเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราเครียดเฉือนชั้นผิวส่งผลให้เกิดพลังงานสะสมในสายโซ่โมเลกุลจากการเร่งความเร็วของพอลิเมอร์ที่บริเวณทางออกหัวขึ้นรูป (ดังแสดงในภาพที่ 10) ส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการปลดปล่อยพลังงานในรูปแบบของการบวมตัวที่มากกว่า นอกจากนี้การที่อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มคงที่เมื่อเพิ่มอัตราเครียดเฉือนชั้นแกนกลางยังอาจเป็นผลมาจากพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางถูกปกคลุมด้วยพอลิโพรพิลีนชั้นผิว ส่งผลให้การบวมตัวของพอลิโพรพิลีนในชั้นแกนกลางไม่ไปอย่างอิสระ



ภาพที่ 34 อิทธิพลของอัตราเฉือนชั้นผิวและชั้นแกนกลางที่มีต่อความหนืดที่แท้จริง



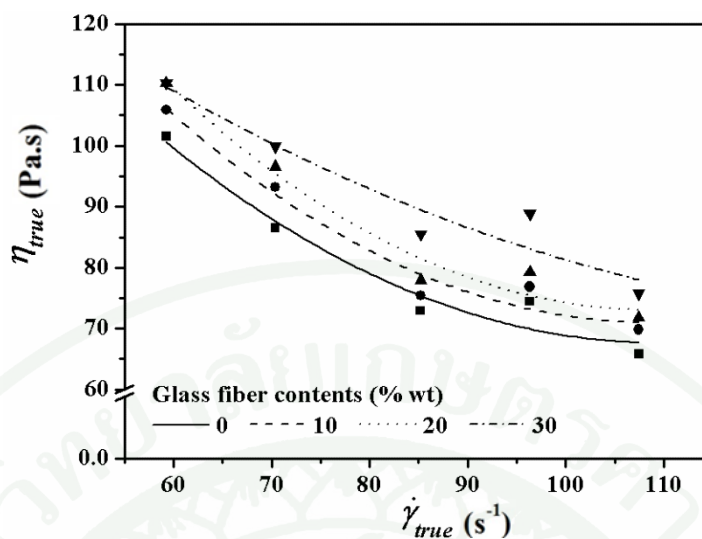
ภาพที่ 35 อิทธิพลของอัตราเฉือนชั้นผิวและชั้นแกนกลางที่มีต่ออัตราส่วนของพื้นที่ชั้นแกนกลางและชั้นผิวที่อัตราเฉือนต่างกัน ต่อพื้นที่ชั้นแกนกลางและชั้นผิวที่อัตราเฉือนเท่ากับ $36.5 s^{-1}$



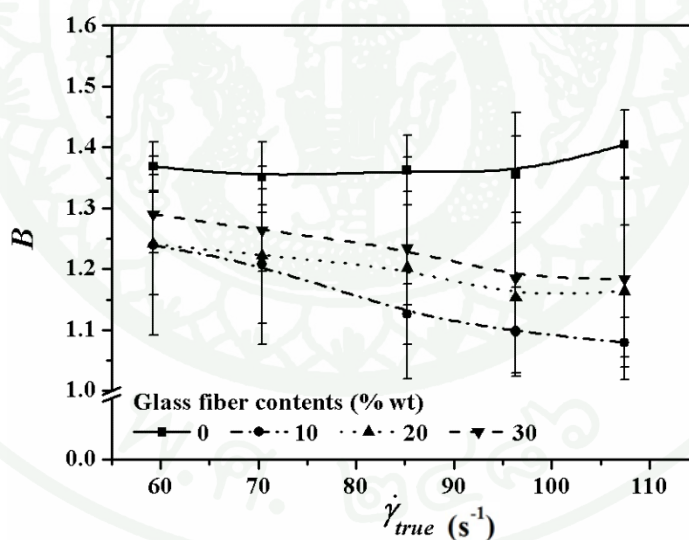
ภาพที่ 36 พฤติกรรมการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัครีคร่วมเมื่อ
(ก) เพิ่มอัตราเคียดชั้นแกนกลาง และ (ข) เพิ่มอัตราเคียดเนื้อชั้นผิว

3.4 อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นที่ผสมในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางที่มีต่อสมบัติการไหลในระหว่างกระบวนการอัครีคร่วม

ภาพที่ 37 และ 38 แสดงค่าความหนืดที่แท้จริง และอัตราส่วนการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัครีคร่วมที่ผสมเส้นใยแก้วในปริมาณต่างๆ กันที่ชั้นแกนกลาง โดยใช้อัตราเคียดเนื้อชั้นผิวเท่ากับ 36.5 s^{-1} และอัตราเคียดเนื้อชั้นแกนกลางในช่วงระหว่าง 14.3 ถึง 55.6 s^{-1} ที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 200°C จากผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วในพอลิโพรพิลีนชั้นกลางส่งผลให้ความหนืดมีค่าเพิ่มมากขึ้นทั้งนี้เนื่องจากการผสมเส้นใยแก้วในชั้นแกนกลางของพอลิโพรพิลีนทำให้เกิดการขัดขวางทิศทางการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในชั้นแกนกลางดังนั้นความหนืดจึงมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้หากพิจารณาถึงอัตราส่วนการบวมตัวพบว่าอัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเส้นใยแก้วในพอลิโพรพิลีนในชั้นแกนกลางเนื่องจาก การเติมเส้นใยแก้วส่งผลให้พอลิโพรพิลีนมีความเป็นอีลาสติกที่ลดน้อยลง เนื่องจากปรากฏการณ์ไคลูชั่น (Dilution effect) (ณรงค์ฤทธิ์ 2548)



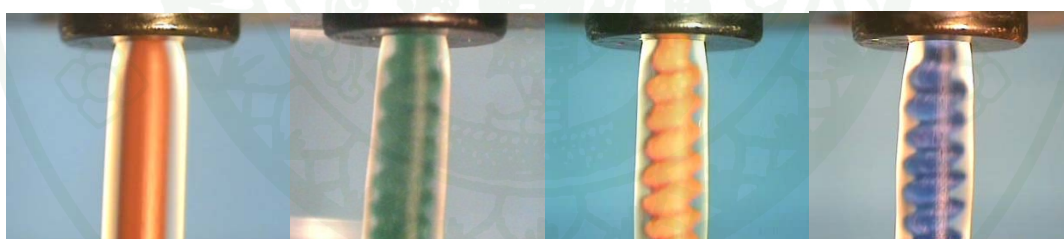
ภาพที่ 37 อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางที่มีต่อความหนืดที่แท้จริงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมเมื่อใช้อัตราเครียดเฉือนขึ้นฟิวเท่ากับ $36.5 s^{-1}$ และอัตราเครียดเฉือนชั้นแกนกลางต่างๆ กัน



ภาพที่ 38 อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางที่มีต่ออัตราส่วนการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม เมื่อใช้อัตราเครียดเฉือนขึ้นฟิวเท่ากับ $36.5 s^{-1}$ และอัตราเครียดเฉือนชั้นแกนกลางต่างๆ กัน

4. การเสีรูปร่างของพอลิโพรพีลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมเมื่อผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในชั้นแกนกลาง

จากการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิโพรพีลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมเมื่อผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในชั้นแกนกลางที่ปริมาณต่างๆ กันพบว่า พอลิโพรพีลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมที่ไหลผ่านหัวขึ้นรูปเกิดการเสีรูปร่างภายใน (Internal melt fracture) แบบเกลียวดังแสดงในภาพที่ 39 นอกจากนี้เมื่อพอลิโพรพีลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมที่ไหลออกจากหัวขึ้นรูปเกิดการยื่นตัวลงยังพบว่าเกิดการเสีรูปร่างของพอลิโพรพีลีนที่บริเวณผิวหน้า (Gross melt fracture) เนื่องจากพอลิโพรพีลีนชั้นผิวเกิดการหดตัวรัดพอลิโพรพีลีนชั้นแกนกลางจึงทำให้ผิวหน้ามีความไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 40 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิเคราะห์ และศึกษาแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยวิเคราะห์จากความสูงของร่องเกลียว (Amplitude, A) และความกว้างของร่องเกลียว (Period, λ) ดังแสดงในภาพที่ 41 โดยหากความกว้างของร่องเกลียวมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงการเสีรูปร่างของพอลิโพรพีลีนหลอมเหลวมีแนวโน้มลดน้อยลง เนื่องจากความถี่ (Frequency, f) ของการเกิดการเสีรูปร่างมีค่าลดน้อยลง และเมื่อพิจารณาถึงความสูงของร่องเกลียว หากค่าดังกล่าวมีค่าลดต่ำลง แสดงถึงการเกิดการเสีรูปร่างที่ลงน้อยลงเช่นกัน



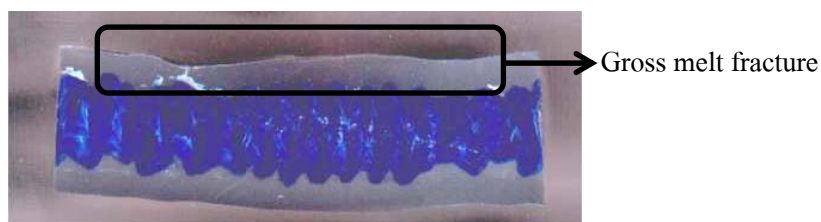
PP

PP + GF 10%wt

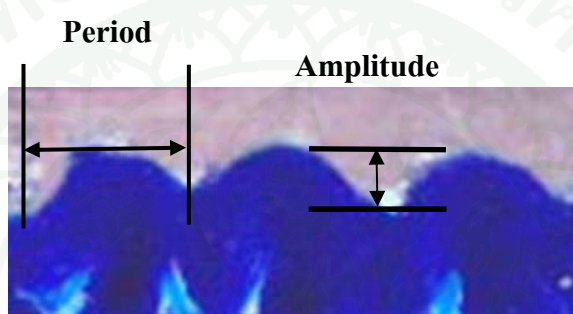
PP + GF 20%wt

PP + GF 30%wt

ภาพที่ 39 ลักษณะการเกิดการเสีรูปร่างในชั้นแกนกลางของพอลิโพรพีลีนที่ผสมเส้นใยแก้วปริมาณต่างๆ กัน



ภาพที่ 40 การเสียรูปบริเวณผิวหน้าเมื่อเกิดการเย็นตัวของพอลิโพรพิลีนแบบอัดรีดร่วมที่ผสมเส้นใยแก้วภายในชั้นแกนกลาง



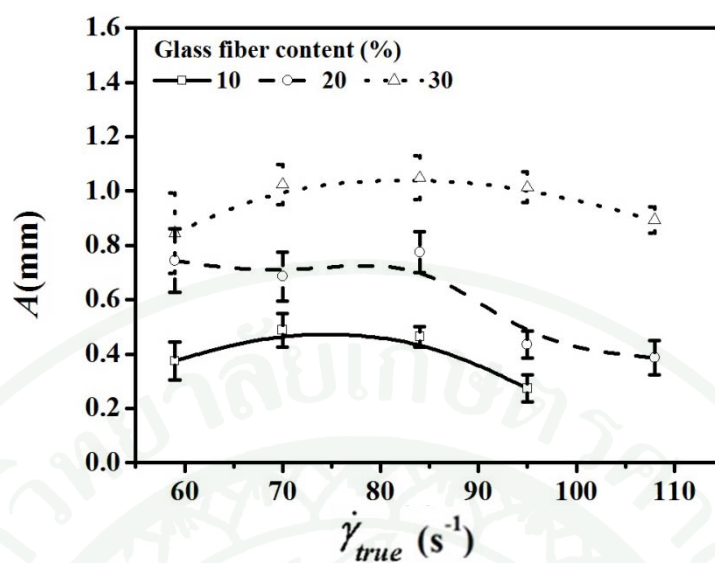
ภาพที่ 41 ความสูงและความกว้างของร่องเกลียวจากการเสียรูปภายในชั้นแกนกลางของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม เมื่อผสมเส้นใยแก้วแบบสั้นในชั้นแกนกลาง

ทั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดสมมติฐานการเกิดปรากฏการณ์เสียรูปภายใน 3 ข้อ ได้แก่

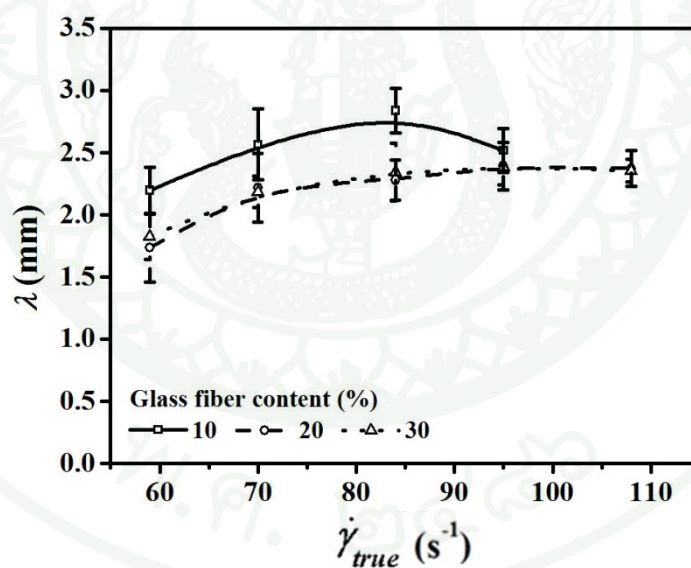
1. ความแตกต่างกันของความหนืดระหว่างชั้นผิวและชั้นแกนกลาง ซึ่งความหนืดของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วในชั้นแกนกลางสูงกว่าพอลิโพรพิลีนชั้นผิว
2. ความแตกต่างกันของความเร็วการไหลภายในหัวขึ้นรูปของพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางและชั้นผิว โดยพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางอาจมีความเร็วการไหลสูงกว่าชั้นผิวเนื่องจากรูปแบบการไหลเป็นการไหลแบบลู่เข้าสู่หัวขึ้นรูป
3. ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วในขณะไหล ซึ่งผู้วิจัยคาดว่า การเสียรูปภายในที่เกิดขึ้นซึ่งมีลักษณะเป็นเกลียว เกิดจากการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วตามการหมุนของสกรู

4.1 อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วที่มีต่อการเสียรูปร่างภายในของพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางแบบอัดรีดร่วม

ภาพที่ 42 และ 43 แสดงค่าความสูงของร่องเกลียว (A) และความกว้างของร่องเกลียว (λ) ของพอลิโพรพิลีนเมื่อทำผ่านกระบวนการอัดรีดร่วมที่อุณหภูมิหัวขึ้นรูปเท่ากับ 200°C โดยใช้ อัตราการยืดเค้นขึ้นผิวคงที่เท่ากับ 36.5 s^{-1} และอัตราการยืดเค้นขึ้นแกนกลางในช่วงระหว่าง 14.3 ถึง 55.6 s^{-1} จากผลการวิเคราะห์พบว่าเมื่อปริมาณเส้นใยแก้วเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ A มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น และค่า λ มีแนวโน้มลดต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเส้นใยแก้วส่งผลให้เกิดการเสียรูปภายในของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากความแตกต่างของความหนืดระหว่างพอลิโพรพิลีนชั้นผิวและพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางที่ผสมเส้นใยแก้วซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานและหากพิจารณาในกรณีที่อัตราการยืดเค้นสูงๆ พบว่า ค่า A มีแนวโน้มลดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดความร้อนเฉือน (Shear heating) ที่บริเวณผนังหัวขึ้นรูป และจากสมบัติความเป็นซูโดพลาสติกของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวเมื่ออัตราการยืดเค้นเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดมีแนวโน้มลดต่ำลง การเสียรูปจึงมีแนวโน้มดีขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปทางผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของห้องหลอมเหลวในชั้นผิวนอกและชั้นแกนกลาง โดยใช้อัตราการยืดเค้นแกนกลางเท่ากับ 36.5 s^{-1} และที่ปริมาณการผสมเส้นใยแก้วในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางเท่ากับ 30 %wt



ภาพที่ 42 อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นในชั้นแกนกลางที่มีต่อความสูงของร่องเกลียวภายในพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม

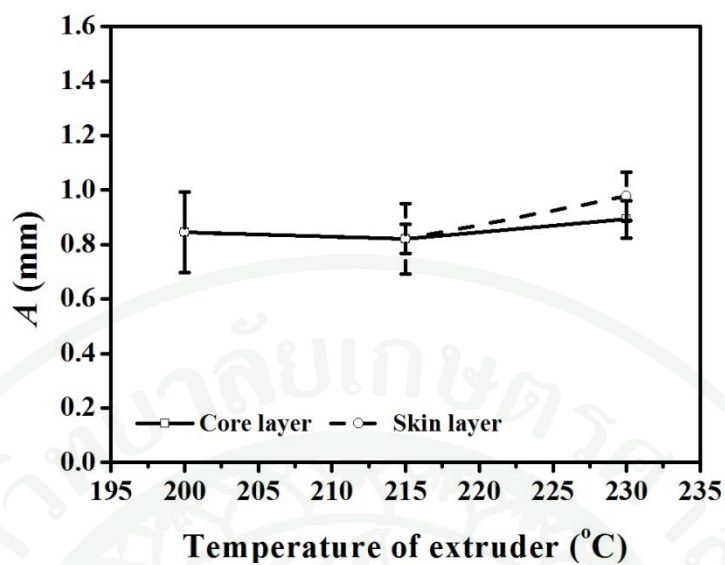


ภาพที่ 43 อิทธิพลของปริมาณเส้นใยแก้วแบบสั้นในชั้นแกนกลางที่มีต่อความกว้างของร่องเกลียวภายในพอลิโพรพิลีนหลอมเหลว

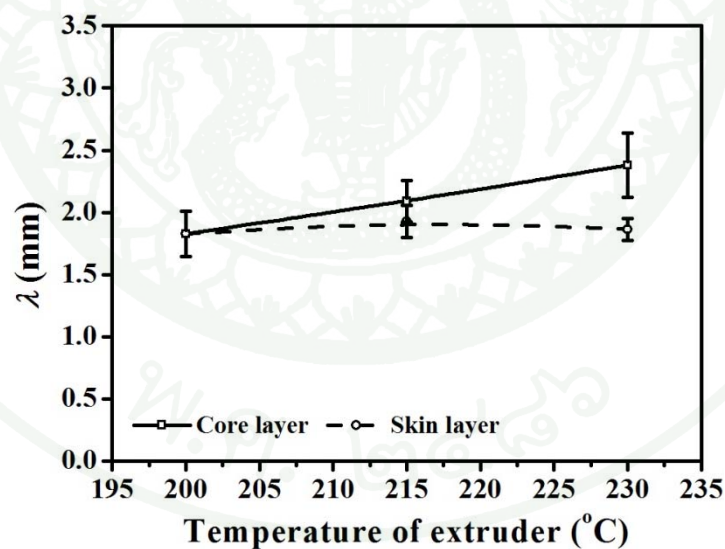
4.2 อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องอัดรีดที่มีต่อการเสีรูปร่างภายในของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วในชั้นแกนกลางแบบอัดรีดร่วม

จากการวิเคราะห์การเสีรูปร่างของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวที่ผสมเส้นใยแก้วในชั้นแกนกลางพบว่าอาจเกิดจากความแตกต่างของความหนืดระหว่างพอลิโพรพิลีนชั้นผิวและพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางที่ผสมเส้นใยแก้ว 30 %wt ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงมีแนวทางการแก้ปัญหาโดยการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดในชั้นแกนกลางเพื่อลดความแตกต่างของความหนืดที่อัตราครีดยกเนื่องชั้นผิวคงที่เท่ากับ 36.5 s^{-1} และอัตราครีดยกเนื่องชั้นแกนกลางในช่วงระหว่าง 14.3 ถึง 55.6 s^{-1} โดยใช้อุณหภูมิเครื่องอัดรีดเท่ากับ 200-215 และ 230°C ตามลำดับ จากผลการทดลองดังแสดงในภาพที่ 44 และ 45 พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดในชั้นแกนกลางส่งผลให้ A มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในขณะที่ λ มีแนวโน้มลดลงทั้งนี้มีส่วนมาจากการความหนืดของพอลิโพรพิลีนชั้นผิวและพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางที่ผสมเส้นใยแก้วมีค่าที่ใกล้เคียงกันเพิ่มมากขึ้น

นอกจากนี้จากสมมติฐานข้อที่ 2 เมื่อพิจารณาถึงรูปแบบการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวภายในห้องหลอมเหลวพบว่าพอลิโพรพิลีนในชั้นแกนกลางมีการไหลแบบลู่เข้า (Convergent flow) ที่มากกว่าจึงส่งผลให้ความเร็วของพอลิโพรพิลีนในชั้นแกนกลางมีความเร็วที่มากกว่า ในขณะที่รูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ชั้นผิวมีแรงดันที่เกิดจากการต้านทานการไหลที่มากกว่าความเร็วของพอลิโพรพิลีนที่ไหลผ่านหัวรูปจึงมีค่าที่น้อยกว่า ดังนั้น จึงเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดชั้นผิวเพื่อลดความหนืดลงเป็นผลให้ความเร็วของพอลิโพรพิลีนชั้นผิวเพิ่มสูงขึ้น จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดชั้นผิวไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า A และ λ นอกจากนี้อีกแนวทางหนึ่งในการลดความแตกต่างของความเร็วการไหลระหว่างพอลิโพรพิลีนชั้นผิวและชั้นแกนกลางคือ การเพิ่มและลดอัตราครีดยกเนื่องของพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลาง โดยสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 42 ในกรณีผสมเส้นใยแก้ว 20%wt พบว่า บริเวณจุดกึ่งกลางซึ่งแสดงถึงกรณีที่อัตราครีดยกเนื่องในชั้นแกนกลางและชั้นผิวมีค่าเท่ากัน จุดด้านซ้ายแสดงถึงกรณีที่อัตราครีดยกเนื่องชั้นผิวสูงกว่าอัตราครีดยกเนื่องชั้นแกนกลาง และจุดด้านขวาแสดงถึงกรณีที่อัตราครีดยกเนื่องชั้นแกนกลางสูงกว่าอัตราครีดยกเนื่องชั้นผิว จากผลการวิเคราะห์พบว่า เมื่ออัตราครีดยกเนื่องชั้นผิวสูงกว่าชั้นแกนกลาง แนวโน้มการเสีรูปร่างกลับไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มอัตราครีดยกเนื่องชั้นแกนกลางสูงกว่าชั้นผิว การเสีรูปร่างในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางกลับมีแนวโน้มที่ดีขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจากแนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวทั้งสองแนวทางในสมมติฐานด้านความแตกต่างกันของความเร็วการไหล ทำให้สามารถสรุปได้ว่าสมมติฐานดังกล่าวไม่เป็นจริง



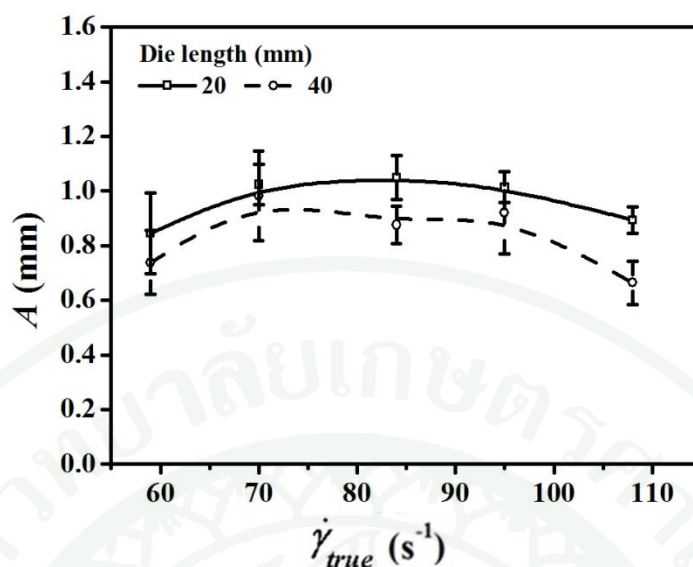
ภาพที่ 44 อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องอัดรีดในชั้นผิวและชั้นแกนกลางที่มีต่อการเลี้ยวรูปภายใน ในลักษณะความสูงของเกลียว (Amplitude, A) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีด ร่ว



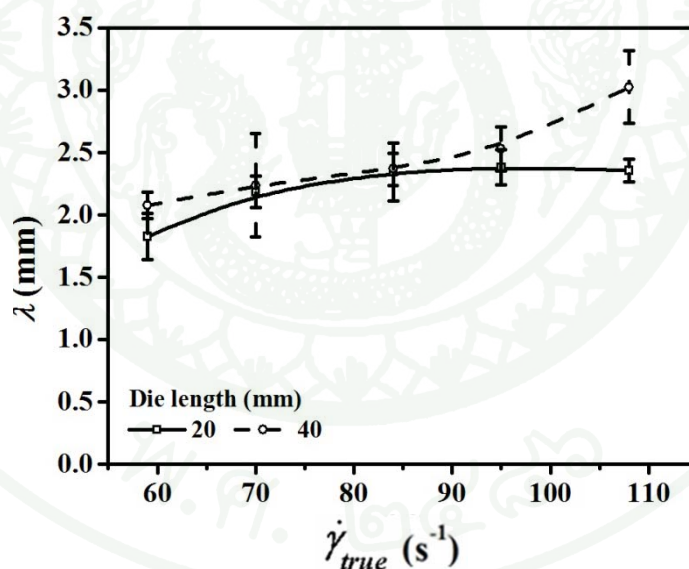
ภาพที่ 45 อิทธิพลของอุณหภูมิเครื่องอัดรีดในชั้นผิวและชั้นแกนกลางที่มีต่อการเลี้ยวรูปภายใน ใน ลักษณะความกว้างร่องเกลียว (Period, λ) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีด ร่ว

4.3 อิทธิพลของความยาวหัวขึ้นรูปที่มีต่อการเสียรูปร่างภายในของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วในชั้นแกนกลางแบบอัตราร่วม

การปรับแก้โดยการเพิ่มความยาวหัวขึ้นรูปส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวมีระยะเวลาในการไหลภายในหัวขึ้นรูปยาวนานขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการลดลงของการเสียรูปร่างภายใน ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้เพิ่มความยาวหัวขึ้นรูปจาก 20 เป็น 40 mm เมื่อทดสอบที่อุณหภูมิเท่ากับ 200°C โดยใช้อัตราความเร็วเคลื่อนขึ้นผิวคงที่เท่ากับ 36.5 s^{-1} และอัตราความเร็วเคลื่อนขึ้นแกนกลางในช่วงระหว่าง 14.3 ถึง 55.6 s^{-1} จากผลการทดลองซึ่งแสดงในภาพที่ 46 และ 47 พบว่า การเพิ่มความยาวหัวขึ้นรูปส่งผลให้ A มีแนวโน้มลดลง ในขณะที่ λ มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเสียรูปมีแนวโน้มที่ลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจาก การเพิ่มความยาวหัวขึ้นรูปส่งผลให้พอลิโพรพิลีนหลอมเหลวมีระยะเวลาที่ไหลอยู่ในระบบนานมากขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้มีระยะเวลาการคลายตัว (Relaxation time) เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังส่งผลให้เส้นใยแก้วสามารถจัดเรียงตัว (Fiber orientation) ตามทิศทางการไหลได้เพิ่มมากขึ้น การเสียรูปจึงมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่อัตราความเร็วเคลื่อนสูงในกรณีการใช้หัวขึ้นรูปที่มีความยาวเท่ากับ 40 mm พบว่าค่า λ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเทียบกับที่อัตราความเร็วเคลื่อนต่ำ ซึ่งหมายความว่า การเสียรูปมีแนวโน้มลดน้อยลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความยาวหัวขึ้นรูปส่งผลให้เกิดความร้อนเนื่องที่ เกิดจากการเสียดสีที่เพิ่มมากขึ้น (Sombatsompop, N. and W. Chaiwattanpipat., 2000)



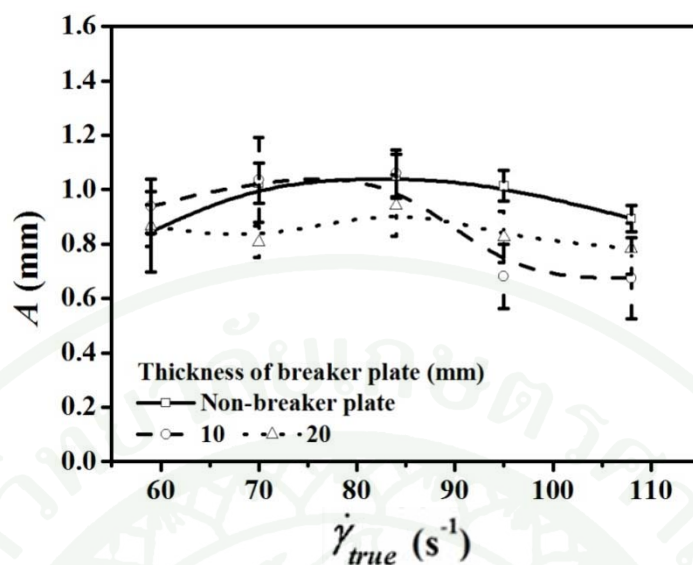
ภาพที่ 46 อิทธิพลของความยาวหัวขึ้นรูปที่มีต่อการเลี้ยวภายใน ในลักษณะความสูงของเกลียว (Amplitude, A) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม



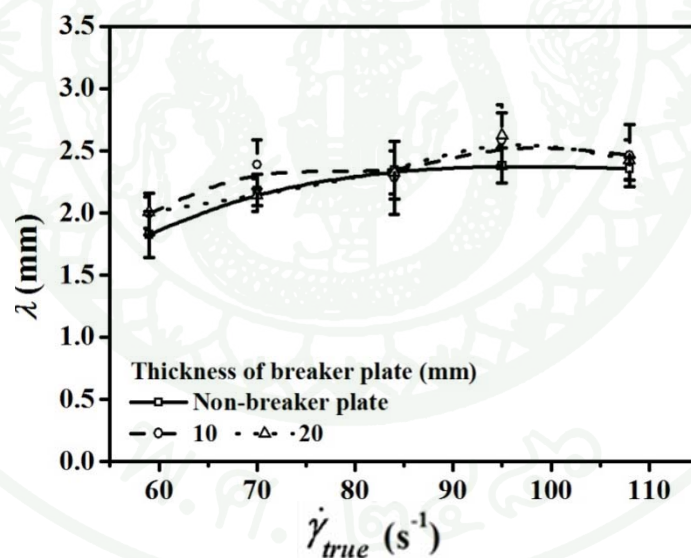
ภาพที่ 47 อิทธิพลของความยาวหัวขึ้นรูปที่มีต่อการเลี้ยวภายใน ในลักษณะความกว้างร่องเกลียว (Period, λ) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม

4.4 อิทธิพลของชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลที่มีต่อการเสีรูปร่างภายในของ พอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วในชั้นแกนกลาง

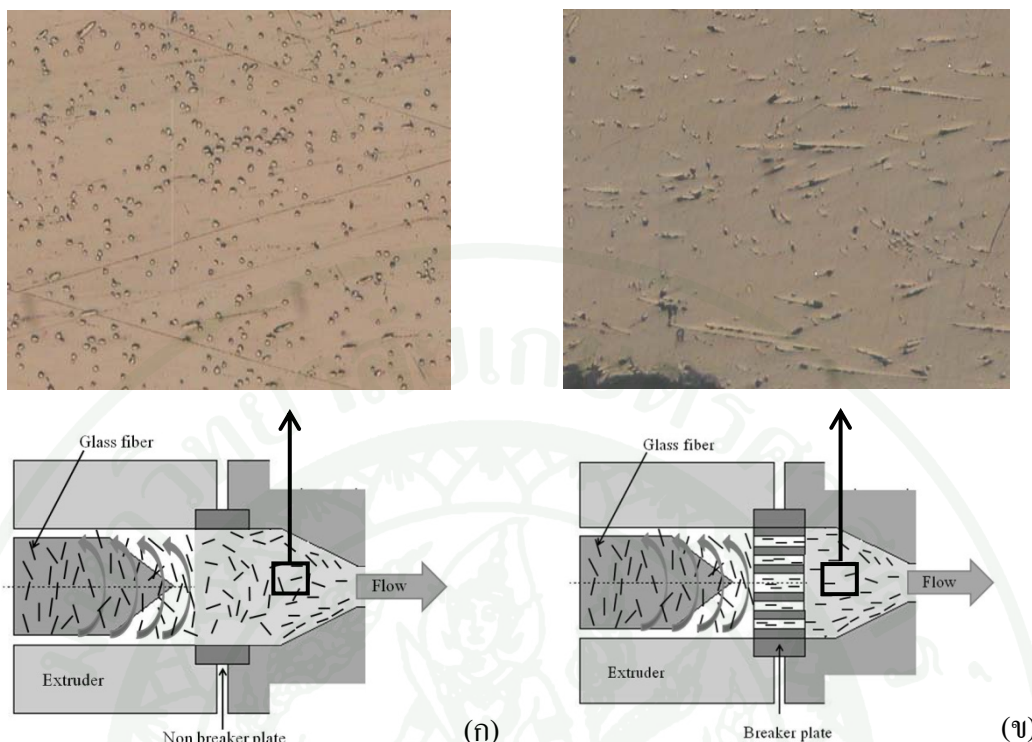
เมื่อพิจารณาการเสีรูปร่างภายในของพอลิโพรพิลีนพบว่าเกิดการเสีรูปร่างแบบหมุนเป็นเกลียวตามทิศทางการหมุนของสกรูซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานข้อที่ 3 ดังนั้น ทางผู้วิจัยได้ติดตั้งชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลเพื่อจัดทิศทางการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วให้มีทิศทางเดียวกับการไหลเพิ่มมากขึ้น โดยใช้อุณหภูมิเท่ากับ 200°C อัตราความเร็วเฉือนชั้นผิวคงที่เท่ากับ 36.5 s^{-1} และใช้อัตราความเร็วเฉือนชั้นแกนกลางในช่วงระหว่าง 14.3 ถึง 55.6 s^{-1} เมื่อใช้ความหนาของชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลเท่ากับ 0 10 และ 20 mm ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงในภาพที่ 48 และ 49 พบว่าค่า A มีแนวโน้มลดลงในขณะที่ λ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการติดตั้งชุดปรับปรุงทิศทางการไหลส่งผลให้เส้นใยแก้วจัดเรียงตัวตามทิศทางการไหลที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วในพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวทั้งในกรณีที่ไม่ทำการติดตั้งชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหล และในกรณีติดตั้งชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลโดยกล้องจุลทรรศน์ (Optical microscope) ดังแสดงในภาพที่ 50 พบว่าในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งชุดปรับปรุงทิศทางการไหลเส้นใยแก้วมีการจัดเรียงที่ดังฉากกับทิศทางการไหล เป็นผลให้เส้นใยแก้วจัดวางทิศทางการไหลมากกว่าในกรณีที่ติดตั้งชุดปรับปรุงทิศทางการไหลซึ่งเส้นใยแก้วมีการจัดเรียงตัวเป็นไปตามทิศทางการไหล



ภาพที่ 48 อิทธิพลของชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลที่มีต่อการเสียรูปภายใน ในลักษณะความสูงของเกลียว (Amplitude, A) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม



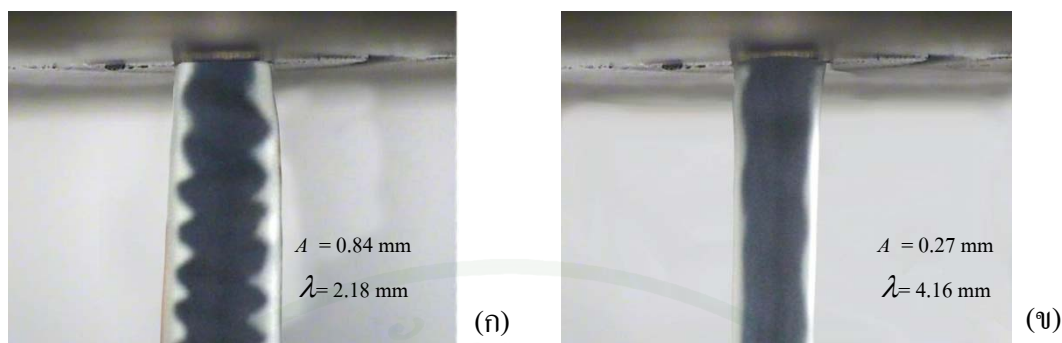
ภาพที่ 49 อิทธิพลของชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลที่มีต่อการเสียรูปภายใน ในลักษณะความกว้างร่องเกลียว (Period, λ) ของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม



ภาพที่ 50 การจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วในพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวเมื่อ (ก) ไม่ติดตั้งชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหล (ข) ติดตั้งชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลที่มีความหนาเท่ากับ 20 mm

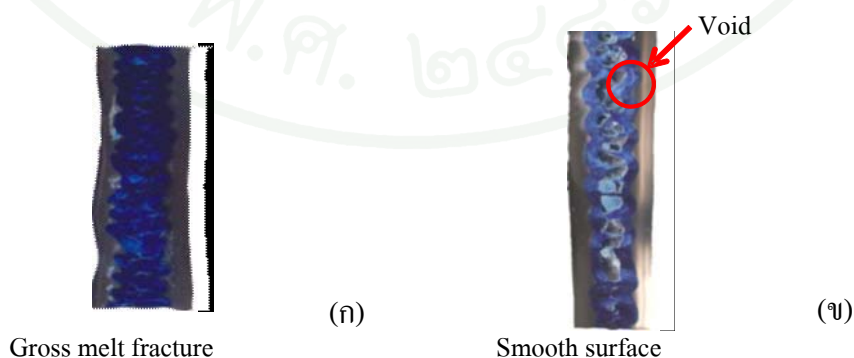
4.5 แนวทางการแก้ไขปัญหการเกิดการเสีรูปของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวที่ผสมเส้นใยแก้วในชั้นแกนกลาง โดยวิธีอื่นๆ

จากการแก้ไขปัญหการเกิดการเสีรูปของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวที่ผสมเส้นใยแก้วในชั้นแกนกลางที่ผ่านมา ซึ่งเป็นการแก้ไขจากสภาวะการผลิตต่างๆ เพื่อลดการเกิดการเสีรูป นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการดึงยึดพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวหลังผ่านการขึ้นรูป เพื่อลดการเกิดการเสีรูป ซึ่งการดึงพอลิเมอร์หลอมเหลวเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตโดยทั่วไป เช่นในส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมขนาด (Sizing unit) และชุดลากดึง (Haul-off unit) ซึ่งเป็นการลดการเกิดการบวมตัวที่เกิดขึ้น ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการดึงพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมด้วยความเร็วในการดึงยึดเท่ากับ 0.14m/s โดยใช้อุณหภูมิเท่ากับ 200°C อัตราความเร็วขึ้นชิ้นผิวและชั้นแกนกลางคงที่เท่ากับ 36.5 s^{-1} ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าความสูงร่องเกลียว (A) มีแนวโน้มลดลง และระยะห่างระหว่างร่องเกลียว (λ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมาก ดังแสดงในภาพที่ 51



ภาพที่ 51 การดึงพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมผ่านลูกกลิ้ง (ก) ก่อนการดึงยืด และ (ข) ดึงยืดที่ความเร็ว 0.14 m.s^{-1}

นอกจากนี้การปัญหาการเกิดการเสียรูปภายในอาจปิดบังได้ด้วยการใส่สีในพอลิเมอร์ชั้นผิว ซึ่งอาจทำให้ไม่เห็นการเสียรูปในชั้นแกนกลาง อย่างไรก็ตาม พบว่าพอลิเมอร์หลอมเหลวหดตัวลงเมื่อเกิดการเย็นตัวลง โดยพอลิเมอร์ชั้นผิวเกิดการหดพอลิเมอร์ชั้นแกนกลางซึ่งมีการเสียรูปอยู่ เป็นผลให้พอลิเมอร์ชั้นผิวเกิดปรากฏการณ์เสียรูปที่บริเวณผิวหน้า (Gross melt fracture) ดังแสดงในภาพที่ 52(ก) ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการแก้ไขโดยให้เกิดการเย็นตัวอย่างรวดเร็ว (Quench) โดยใช้น้ำที่อุณหภูมิประมาณ 2°C พบว่าบริเวณผิวหน้าของพอลิเมอร์มีลักษณะที่เรียบขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 52(ข) อย่างไรก็ตาม การเย็นตัวอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดโพรงสุญญากาศภายในพอลิเมอร์ชั้นแกนกลาง ซึ่งเป็นผลมาจากการที่พอลิเมอร์ชั้นผิวแข็งตัวอย่างรวดเร็ว โดยที่พอลิเมอร์ชั้นแกนกลางยังมีอุณหภูมิสูงอยู่ ดังนั้น เมื่อพอลิเมอร์ชั้นแกนกลางเย็นตัวและเกิดการหดตัวลง จึงไม่สามารถดึงพอลิเมอร์ชั้นผิวให้หดตัวตามได้ ทำให้เกิดโพรงสุญญากาศขึ้นภายในพอลิเมอร์ชั้นแกนกลาง (จรรธิญา 2553)



ภาพที่ 52 การเย็นตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวโดย (ก) การเย็นตัวลงในอากาศที่อุณหภูมิห้อง (ข) การเย็นตัวลงในน้ำที่อุณหภูมิ 2°C

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. สมบัติการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วม

1.1 ความหนืดที่แท้จริงและอัตราส่วนการบวมตัวของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวในระหว่างกระบวนการอัดรีดร่วมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหัวขึ้นรูปเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิหัวขึ้นรูปส่งผลให้สายโซ่โมเลกุลสามารถคลายตัวได้ดีขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอัตราครีดยืดส่งผลให้ความหนืดมีแนวโน้มลดลงทั้งนี้มีความเสี่ยงจากความเปราะบางของพอลิโพรพิลีนและการเพิ่มอัตราครีดยืดในชั้นผิวส่งผลต่อการบวมตัวมากกว่าการเพิ่มอัตราครีดยืดในชั้นแกนกลาง

1.2 การผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้นในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางส่งผลให้ ความหนืดที่แท้จริงของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเส้นใยแก้ว ทั้งนี้เนื่องมาจากเส้นใยแก้วมีการจัดเรียงตัวที่ขัดขวางทิศทางการไหลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ อัตราส่วนการบวมตัวมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเส้นใยแก้วภายในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลางเนื่องจากปรากฏการณ์ใดลูชั่น

2. การเกิดการเสีรูปร่างของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วในชั้นแกนกลาง

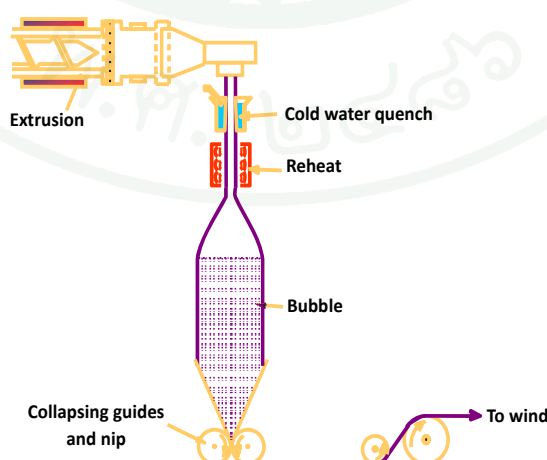
2.1 การผสมเส้นใยแก้วชนิดสั้นในพอลิโพรพิลีนชั้นแกนกลาง ส่งผลให้เกิดการเสีรูปร่างภายในพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวแบบอัดรีดร่วม ซึ่งมีความเสี่ยงจากความแตกต่างกันของความหนืดของพอลิโพรพิลีนในชั้นแกนกลางและชั้นผิว

2.2 การเสีรูปร่างภายในของพอลิโพรพิลีนที่ผสมเส้นใยแก้วในกระบวนการอัดรีดร่วม มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องอัดรีดชั้นแกนกลาง เพิ่มความยาวหัวขึ้นรูป และติดตั้งชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่งเป็นผลให้ความหนืดลดลงและการจัดเรียงตัวของเส้นใยแก้วเป็นไปในทิศทางการไหลมากขึ้น

1. การแก้ไขปัญหาการเสียรูปของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวที่ผสมเส้นใยแก้วในชั้นแกนกลางที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้ทดลองแก้ไขด้วยวิธีต่างๆ ซึ่งสามารถลดปัญหาการเสียรูปได้ส่วนหนึ่ง ทั้งนี้ผู้วิจัยได้เสนอแนวคิดเพื่อแก้ไขปัญหาการเสียรูปดังกล่าวโดยรวมวิธีที่ใช้แก้ไขปัญหาลำดับ (Combined effect) ซึ่งมีสภาวะการทดสอบดังนี้

- อุณหภูมิเครื่องอัดรีดในชั้นแกนกลางเท่ากับ 230°C
- หัวขึ้นรูปความยาว 40 mm
- ติดตั้งชุดปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลหนา 20 mm
- ดึงยึดพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวหลอมเหลวด้วยความเร็ว 0.14 m/s
- นำพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวที่ผ่านการดึงยึดมาลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว

2. การแก้ไขปัญหาการไหลของพอลิโพรพิลีนหลอมเหลวบริเวณลูกกลิ้งตรวจวัดแรง ซึ่งผู้วิจัยมีแนวคิดที่ใช้แก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยการใช้เทคนิคการขึ้นรูปของเส้นใย (Melt spinning) และถุง (Blown film extrusion) ของพอลิโพรพิลีนในภาคอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้ ดังแสดงในภาพที่ 53 กล่าวคือ เมื่อพอลิโพรพิลีนไหลผ่านหัวขึ้นรูปในแนวตั้ง พอลิโพรพิลีนจำเป็นต้องเกิดการเย็นตัว (Cooling) และทำให้ความร้อนอีกครั้ง (Reheat) เพื่อให้อยู่ในสถานะเดียวกับการขึ้นรูป ซึ่งการผ่านกระบวนการดังกล่าวนี้ เป็นผลให้พอลิโพรพิลีนหลอมเหลวมีความแข็งแรงเพิ่มสูงขึ้น เพียงพอที่จะทำการตรวจวัดความแข็งแรงจากชุดทดสอบที่ได้จัดสร้างขึ้น



ภาพที่ 53 กระบวนการขึ้นรูปแบบ Blown film extrusion ของพอลิโพรพิลีน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

จรรชนีญา กริ่งเกษมศรี. 2553. การศึกษาการเกิดโพรงอากาศภายในชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกคอมโพสิตที่ผ่านกระบวนการฉีดขึ้นรูป. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ. 2548. พฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวและการนำไปใช้งาน. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

Brydson, J.A. 1981. **Flow Properties of Polymer Melts**. George Godwin, London.

Callister, William D. 2003. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. Wiley, New York.

Cantor, K. 2006. **Blown Film Extrusion**. Hanser publishers, Munich.

Charles, A.H., 2006, **Handbook of Plastic Technology**. McGraw-Hill, New York.

Cogswell, F.N. 1981. **Polymer Melt Rheology**. George Godwin, London.

Gupta, R.K. and S.N. Bhattacharya. 2007. The Effect of Die Geometries and Extrusion Rates on Melt Strength of High Melt Strength Polypropylene. **Polymer Engineering and Science**. 27: 27-89.

Han, C.D. and T.W. Kim. 1976. Further Observations of the Interfacial Shape of Conjugate Fiber. **Journal of Applied Polymer Science**. 20: 2609-2614.

Han, C.D. 1975. A Study of Co extrusion in a Circular Die. **Journal of Applied Polymer Science**. 19: 1875-1883.

- Intawong, N-T., C.Wongchaleo and N.Sombatsompop. 2008. Rheological Properties, Flow Visualization and Extrudate Swell of NR Compound by Rotating-Die Rheometer. **Polymer Engineering and Science**. 48: 1191-1198.
- John, M.D. 1982. **Rheometers for Molten Plastic**. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Kaewkanoksilp, C., W. Apimonsiri, S. Patcharaphun and N. Sombatsompop. 2011. Rheological Properties and Melt Strength of LDPE during Coextrusion Process. **Journal of Applied Polymer Science**. Article in press.
- Levy, S. and Carley, J.F. 1989. **Plastics Extrusion Technology Handbook**. Industrial Press Inc, New York.
- Liang, J.Z. and J.N.Ness. 1998. The Melt Die-Swell Behavior during Capillary Extrusion of LDPE/PP Blends. **Polymer Testing**. 17: 179-189.
- _____. 2002. The Melt Elastic Behavior of Polypropylene/Glass Bead Composites in Capillary Flow. **Polymer Testing**. 21: 927-931.
- Sombatsompop, N. and N-T.Intawong. 2005. A Comparative Study on Extrudate Swell Ratio of Polystyrene in a Capillary Rheometer and a Single Screw Extruder. **Polymer testing**. 24: 948-952.
- _____. and W. Chaiwattanpipat. 2000. Temperature profiles of glass fibre filled polypropylene melts in injection moulding. **Polymer testing**. 19: 713-724.
- Tadmor, Z. and C.Gogos. 2006. **Principles of Polymer Processing**. John Wiley & Sons, New York.

Tim, A.O. and P.H. Juan. 2006. **Polymer Processing-Modeling and Simulation**. Hanser publishers, Munich.

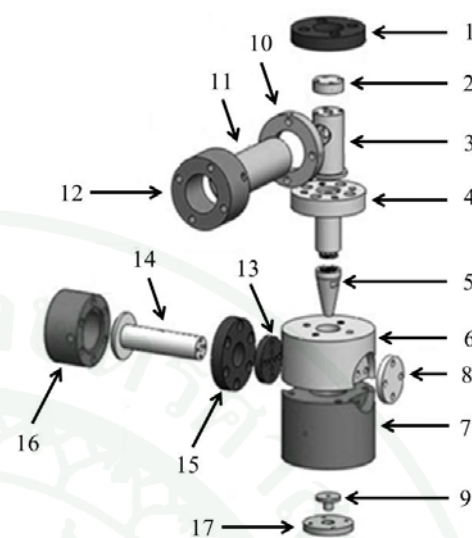
Wong, A.C-Y. and V.H.K. Cheung. 1997. Elongational Strength of Polyethylene Melt. **Journal of Materials Processing Technology**. 67: 117-119.

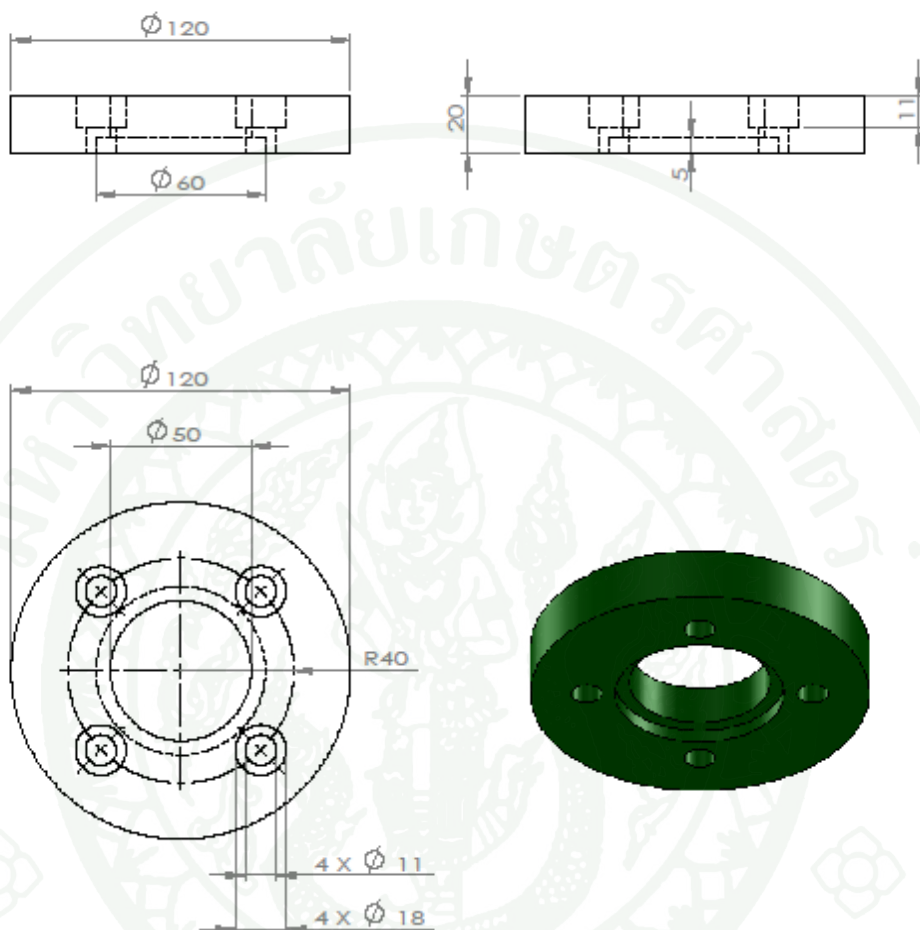
Yao, F. and Q.Wu. 2010. Coextruded Polyethylene and Wood-Flour Composite: Effect of Shell Thickness, Wood Loading and Core Quality. **Journal of Applied Polymer Science**. 118: 3594-3601.



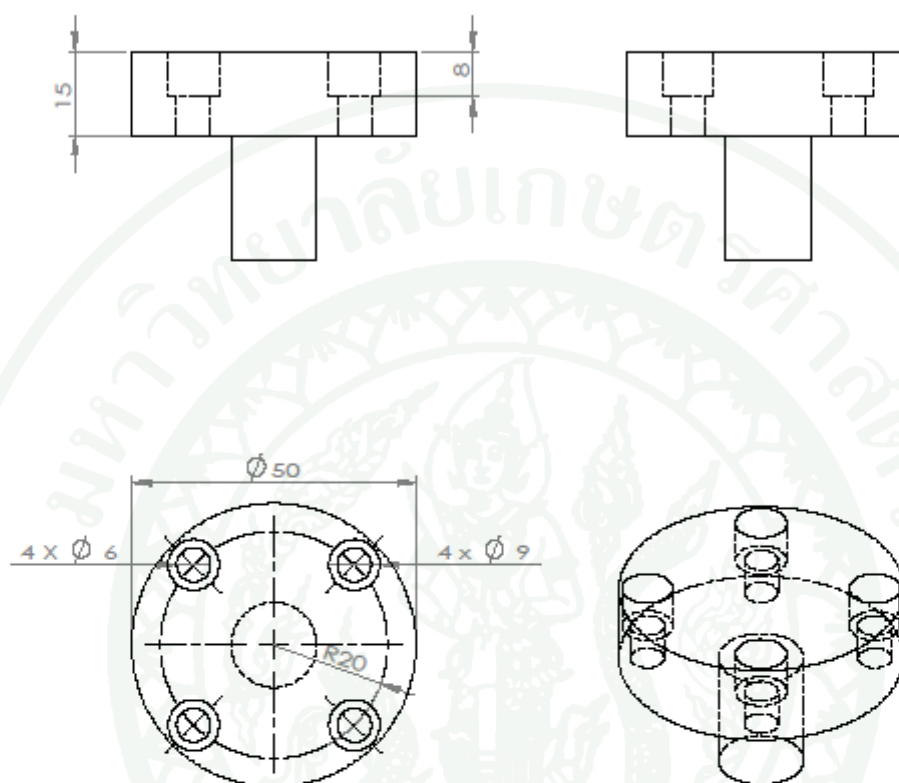


หมายเลข	ชื่อ / หน้าที่ของอุปกรณ์
1	แผ่นประกบยึดช่องทางการไหลชั้น แกนกลาง
2	ฝาปิดช่องทางการไหลชั้น แกนกลาง
3	ช่องทางการไหลชั้นแกนกลาง 3
4	ช่องทางการไหลชั้นแกนกลาง 4
5	หัวควบคุมอัตราส่วนระหว่างชั้น แกนกลางและชั้นผิวนอก
6	ส่วนอัดรีดร่วม 1
7	ส่วนอัดรีดร่วม 2
8	ฝาปิดช่องทางการไหลชั้นผิวนอก ชุดเสริม
9	หัวขึ้นรูป
10	แผ่นประกบยึดเครื่องอัดรีดชั้น แกนกลาง
11	ช่องทางการไหลชั้นแกนกลาง 2
12	ช่องทางการไหลชั้นแกนกลาง 1
13	แผ่นประกบยึดช่องทางการไหลชั้น ผิวนอก
14	ช่องทางการไหลชั้นผิวนอก 2
15	แผ่นประกบยึดเครื่องอัดรีดชั้นผิว นอก
16	ช่องทางการไหลชั้นผิวนอก 1
17	ที่นั่งหัวขึ้นรูป

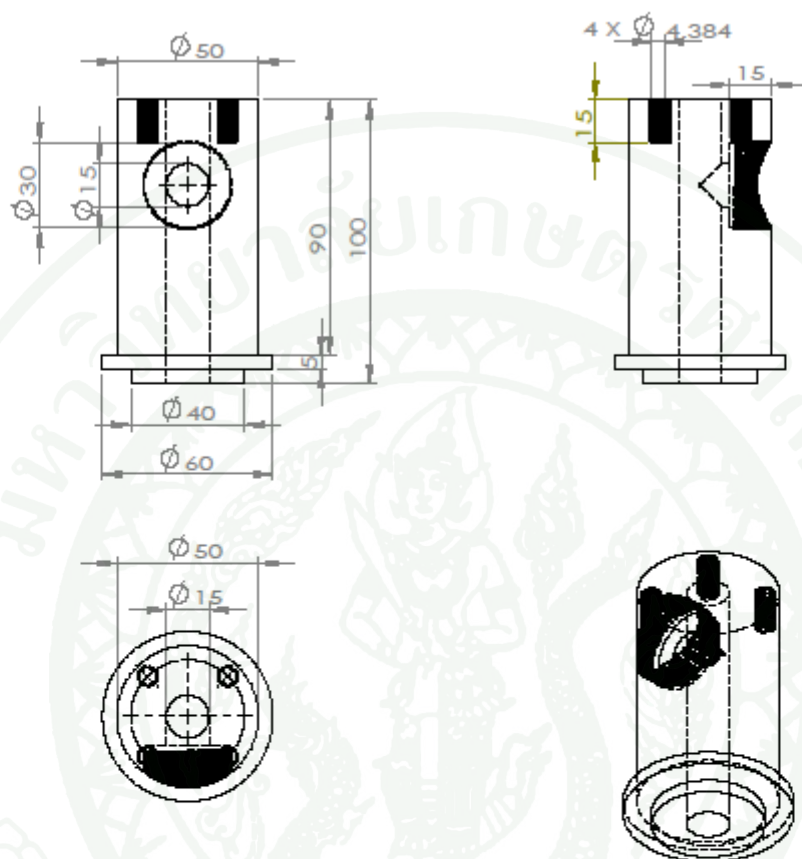




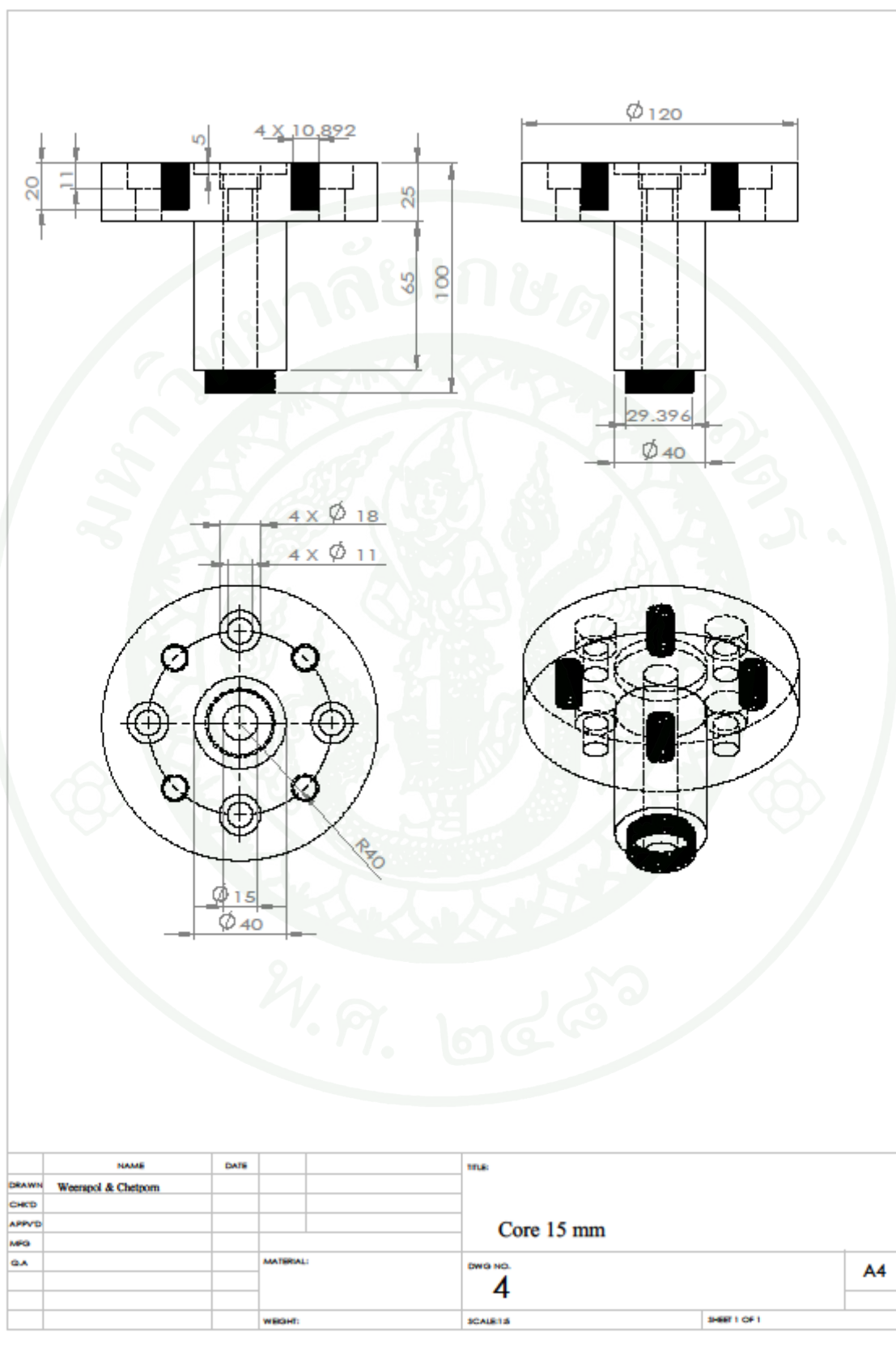
	NAME	DATE			TITLE
DRAWN	Weerapol & Chetporm				Middle plate
CHECK					
APPROV					
INFO					
Q.A			MATERIAL:	DWG NO.	A4
				1	
			WEIGHT:	SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1

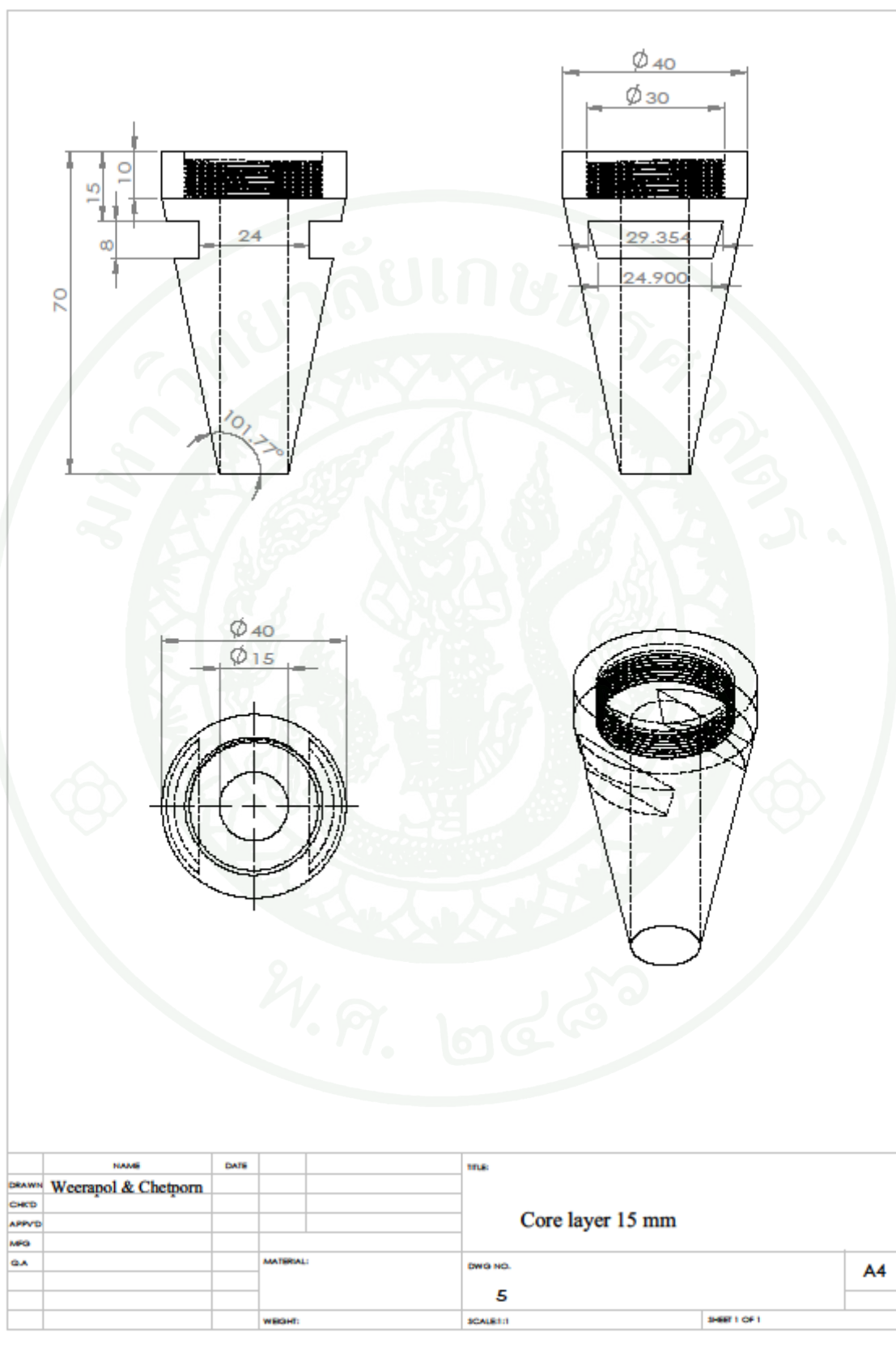


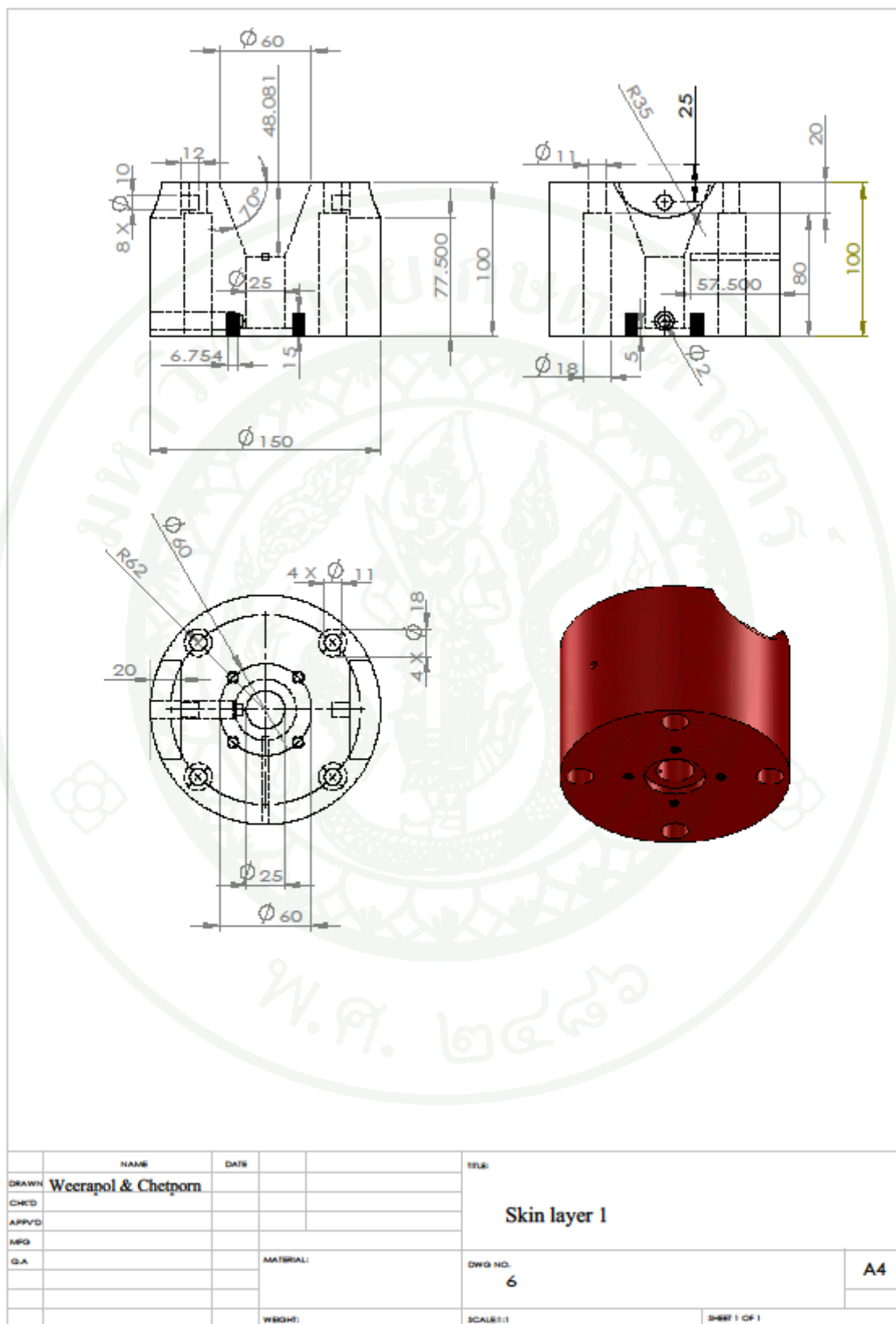
	NAME	DATE		TITLE
DRAWN	Weerapol & Chetporm			Connect mid plate lid
CHECK				
APPROV				
INQ				
Q.A			MATERIAL:	DWG NO.
				2
				A4
			WEIGHT:	SCALE:1
				SHEET 1 OF 1

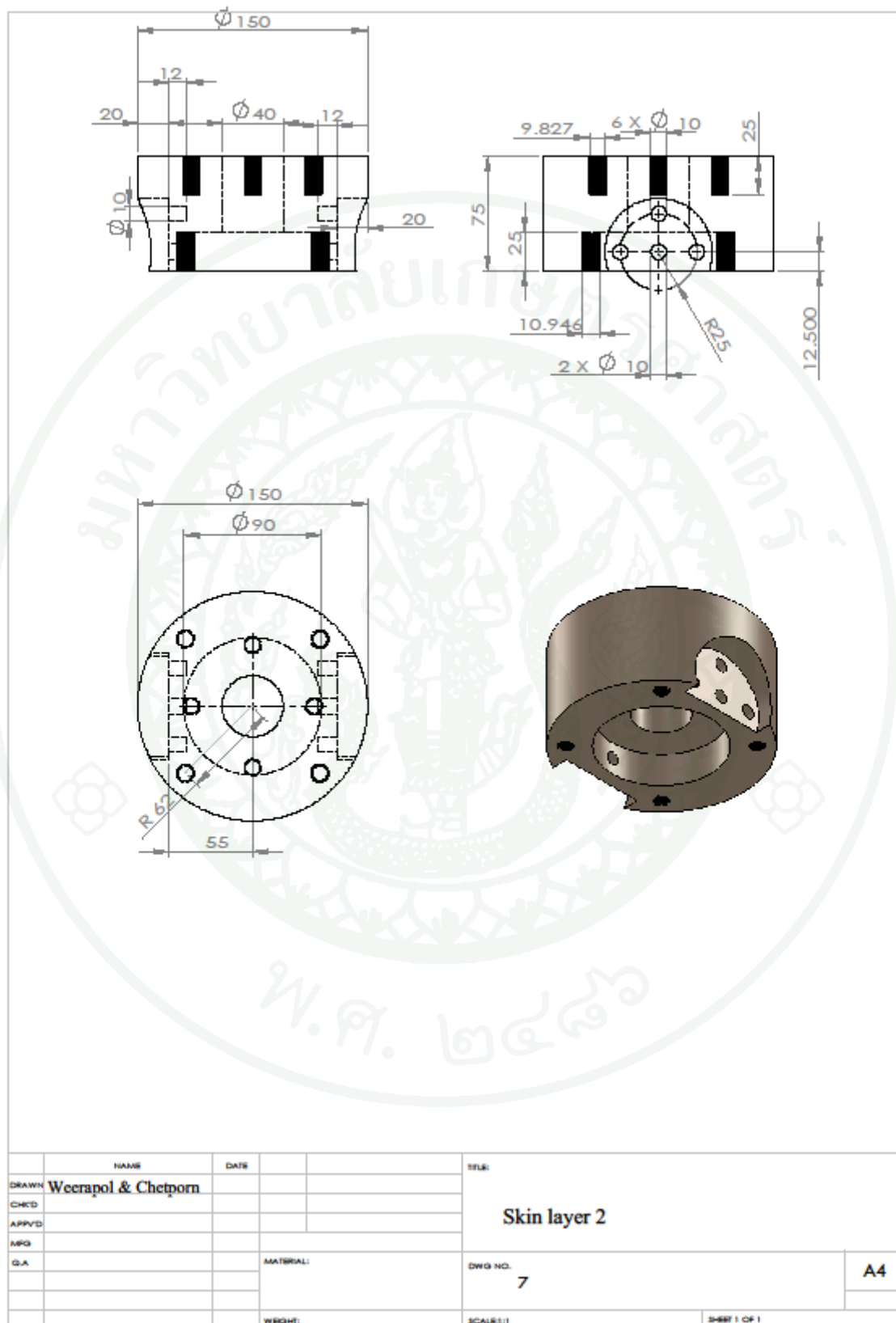


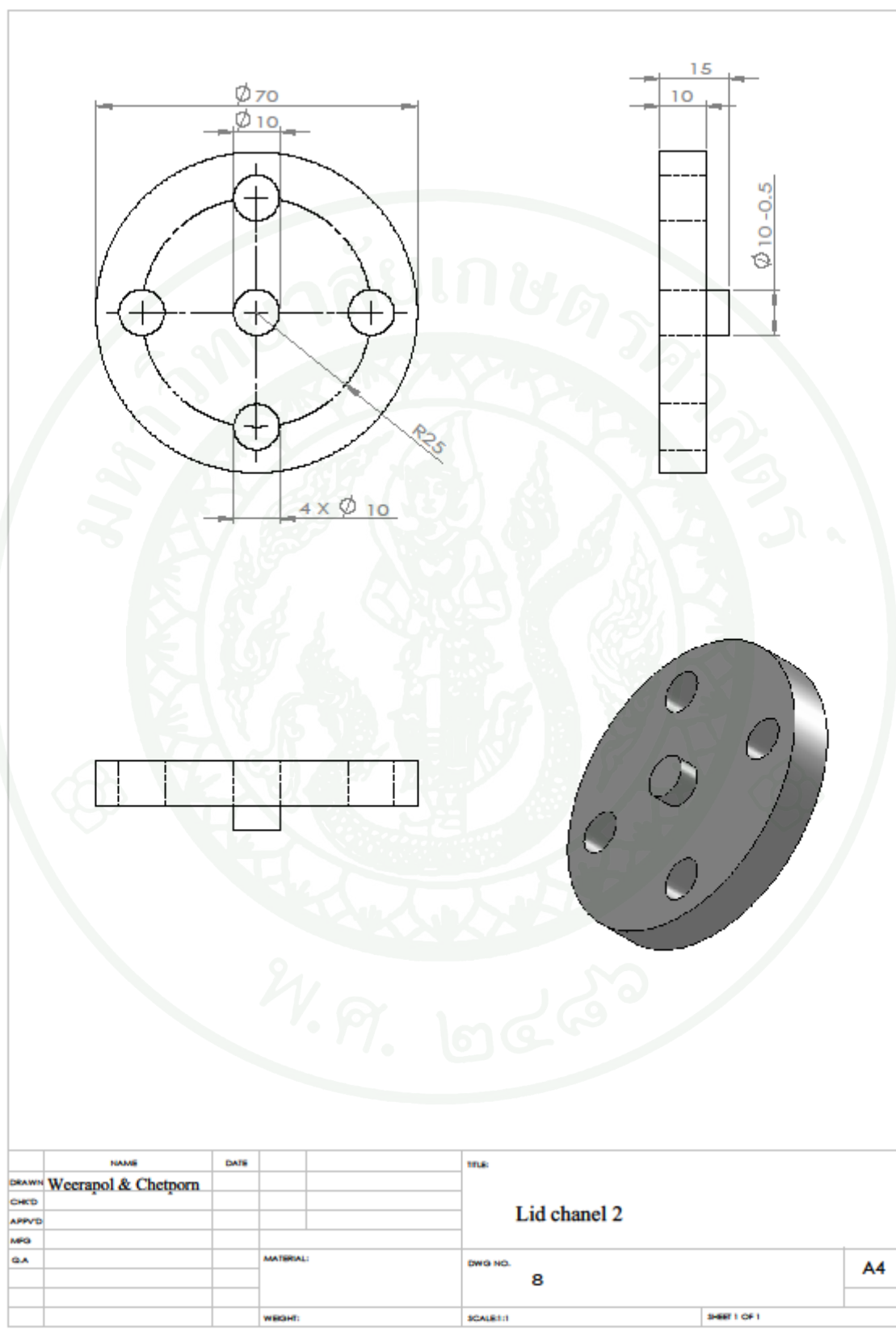
NAME	DATE		TITLE
DRAWN: Weerapol & Chetporm			Connect mid plate
CHECKED			
APPROVED			
MPG			
G.A.		MATERIAL:	DWG. NO. 3
			A4
		WEIGHT:	SCALE: 1:2
			SHEET 1 OF 1

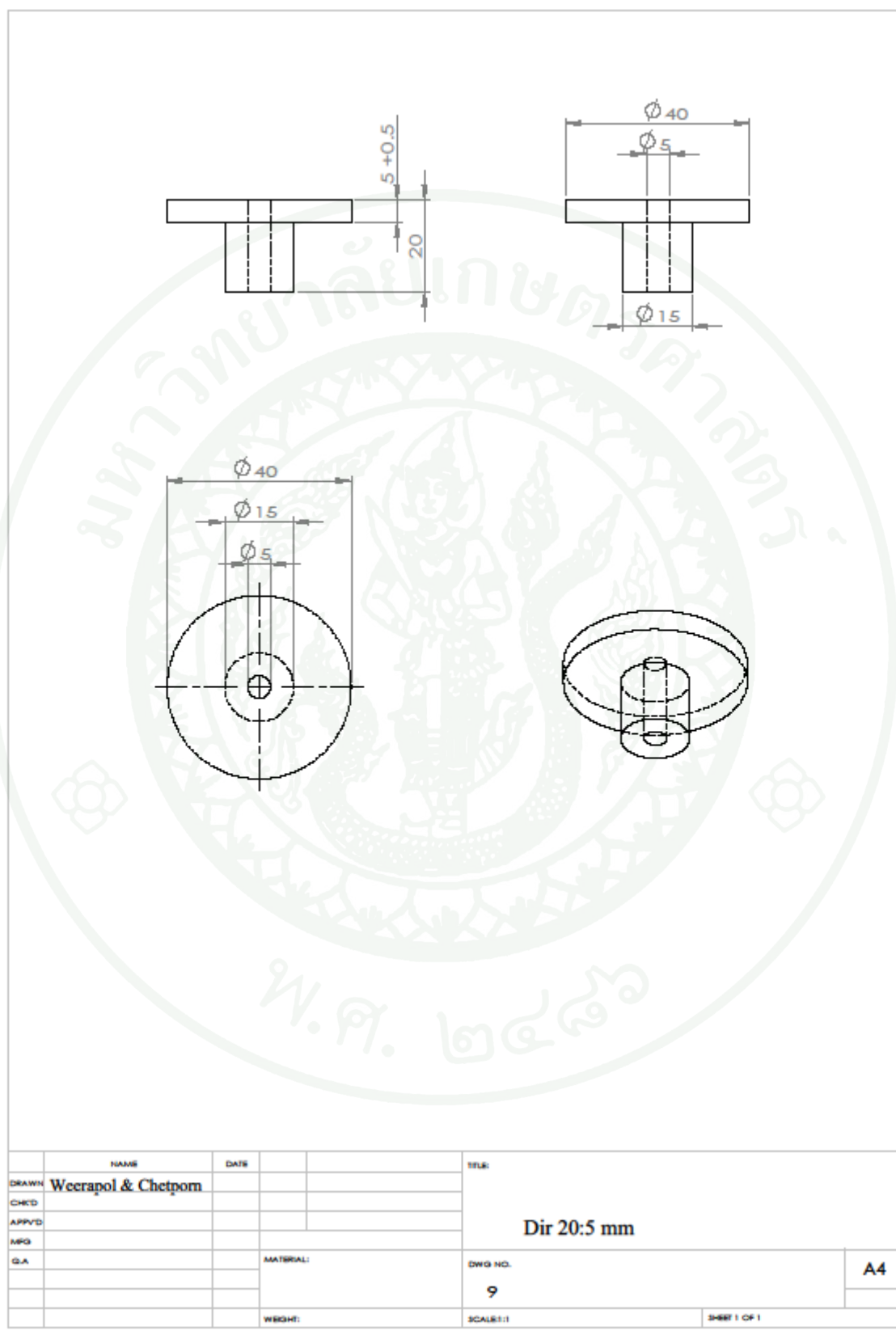


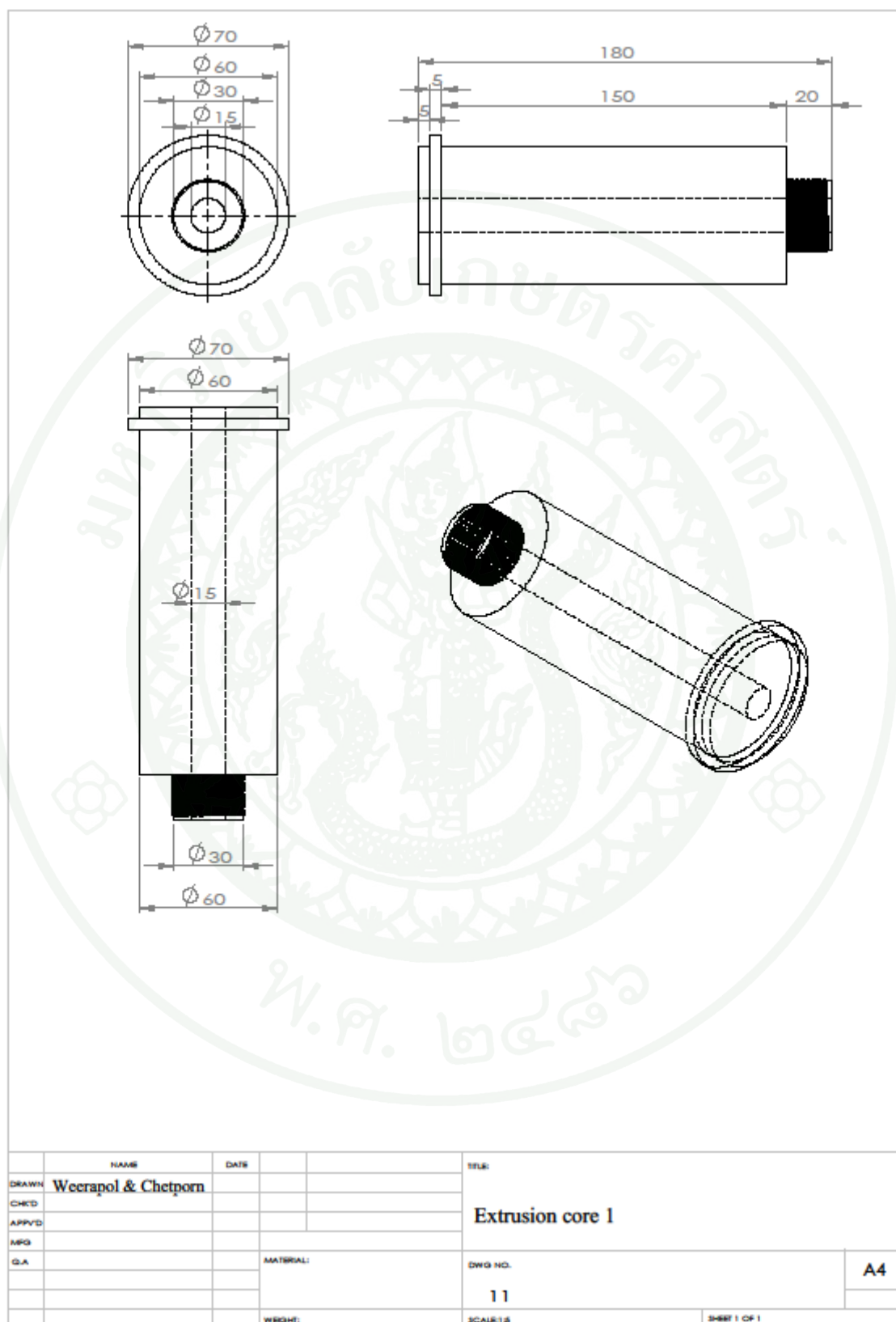


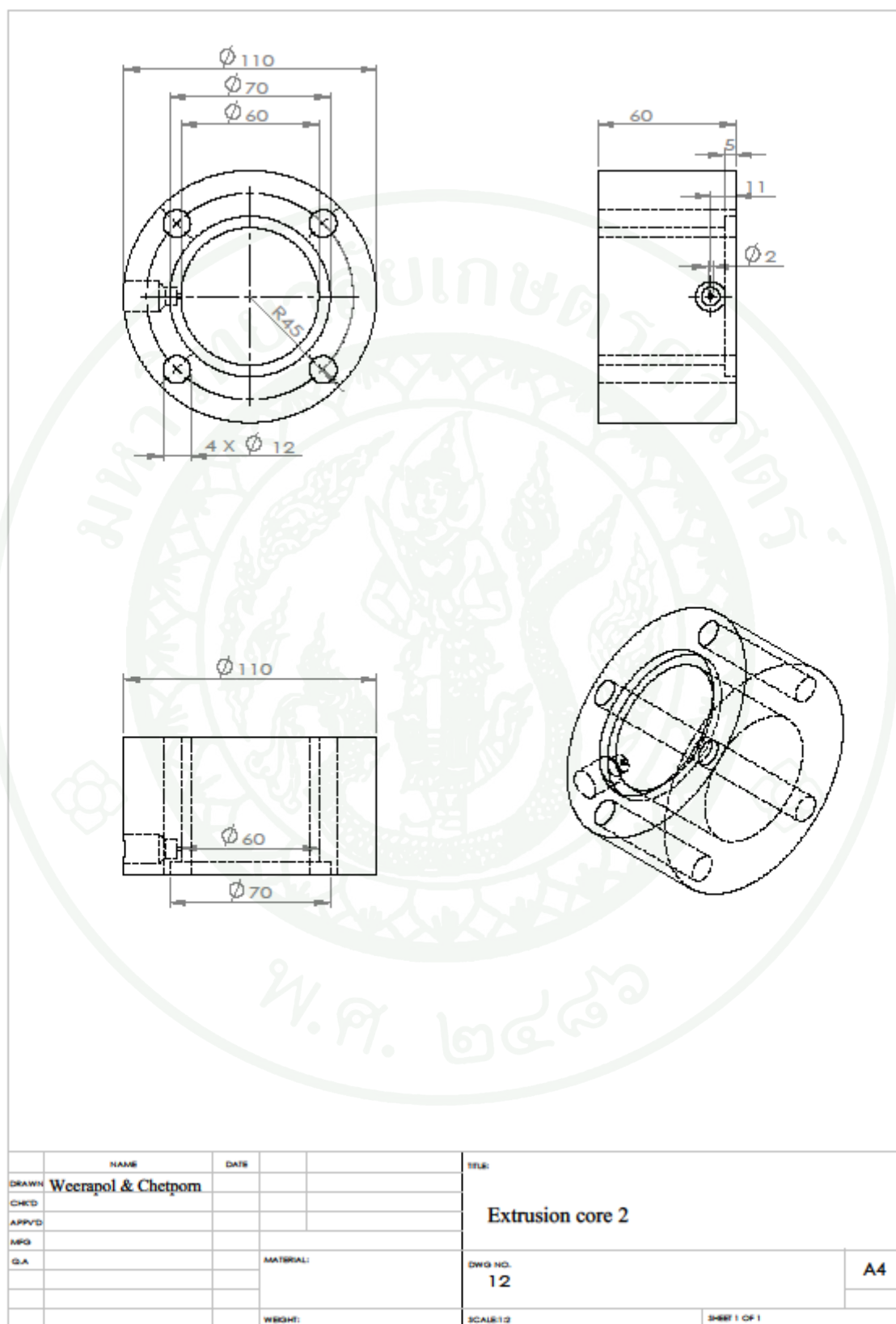


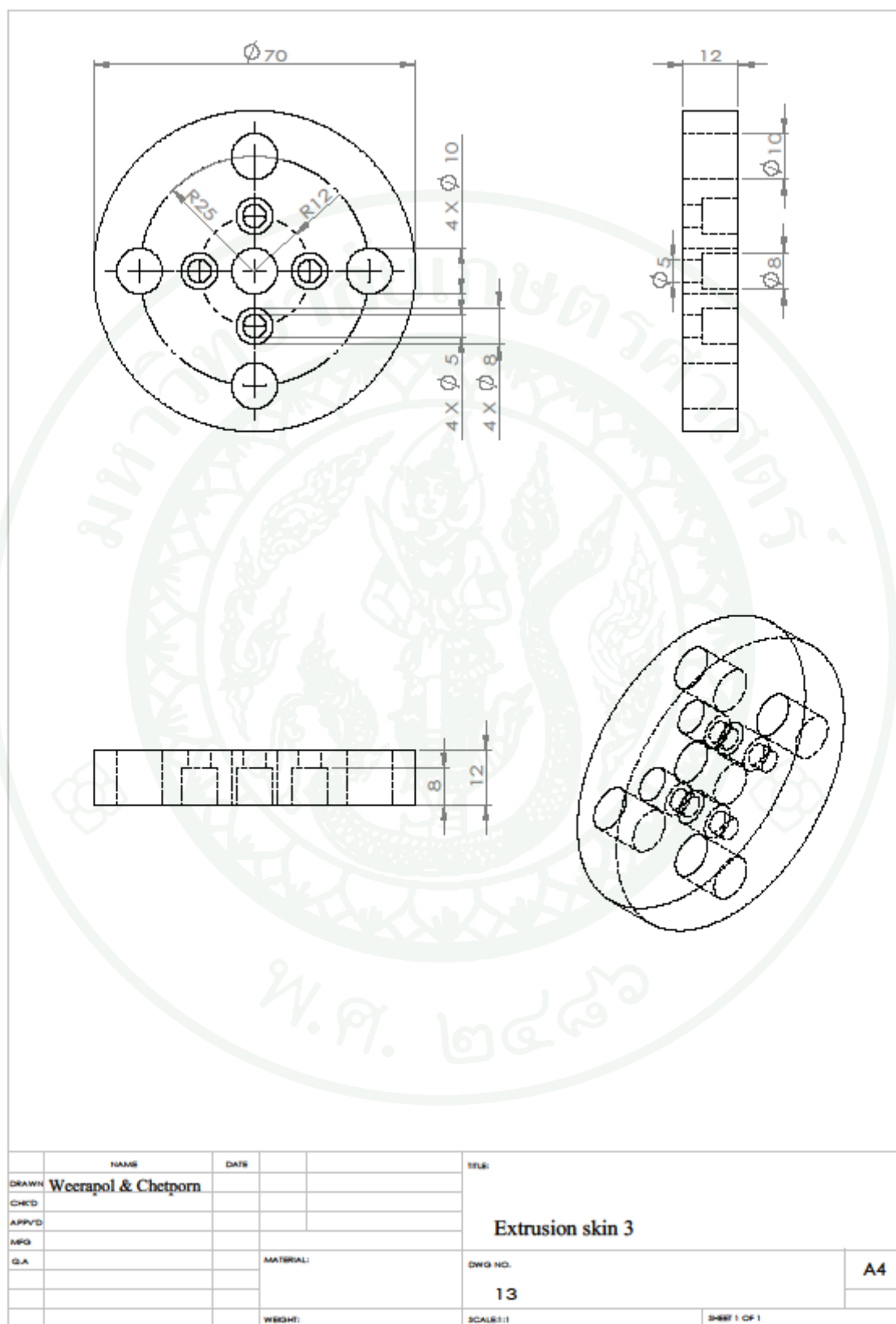


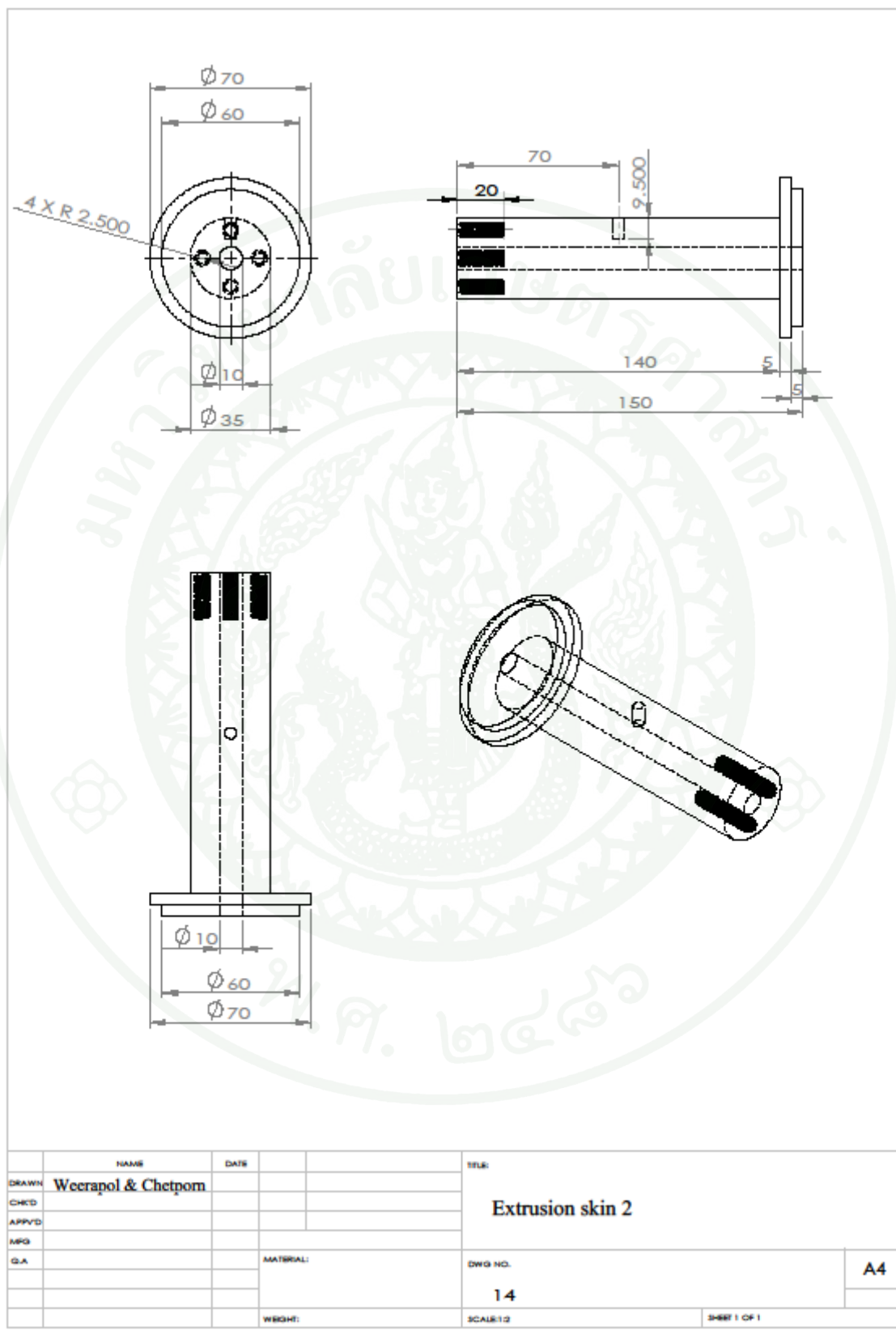


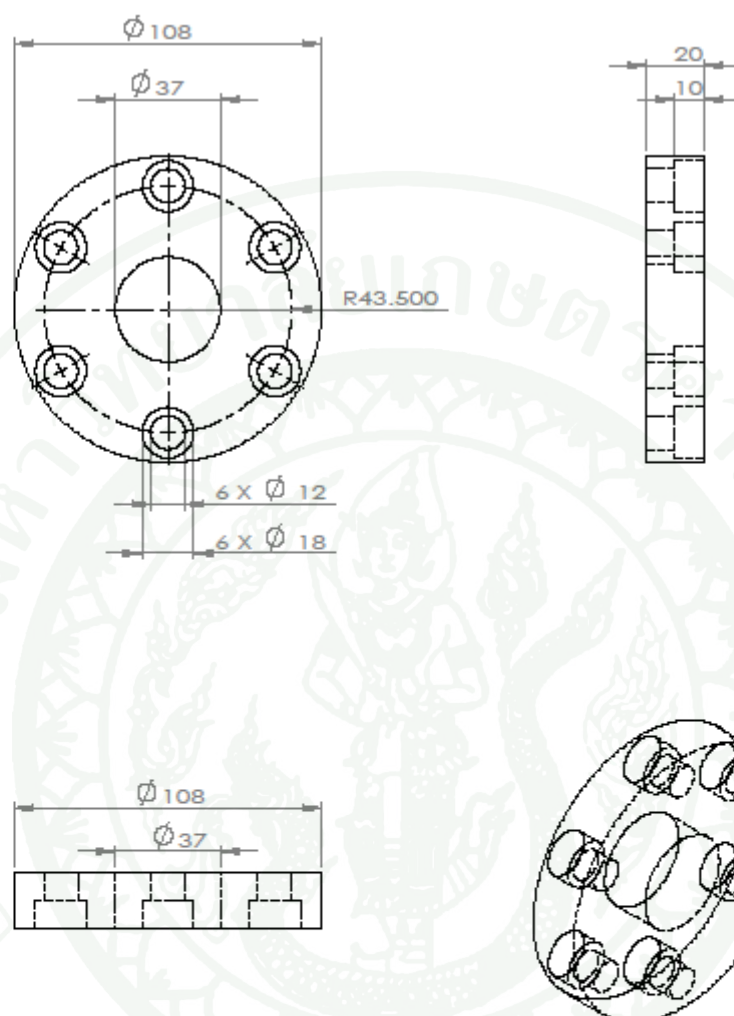




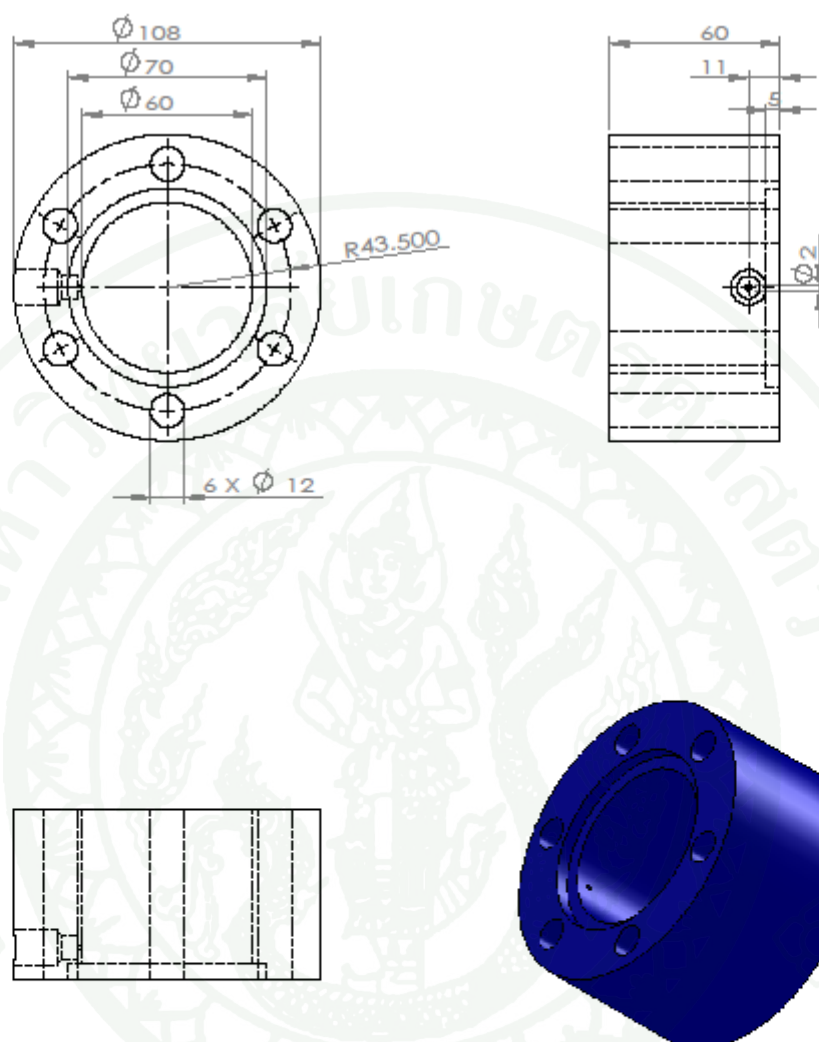




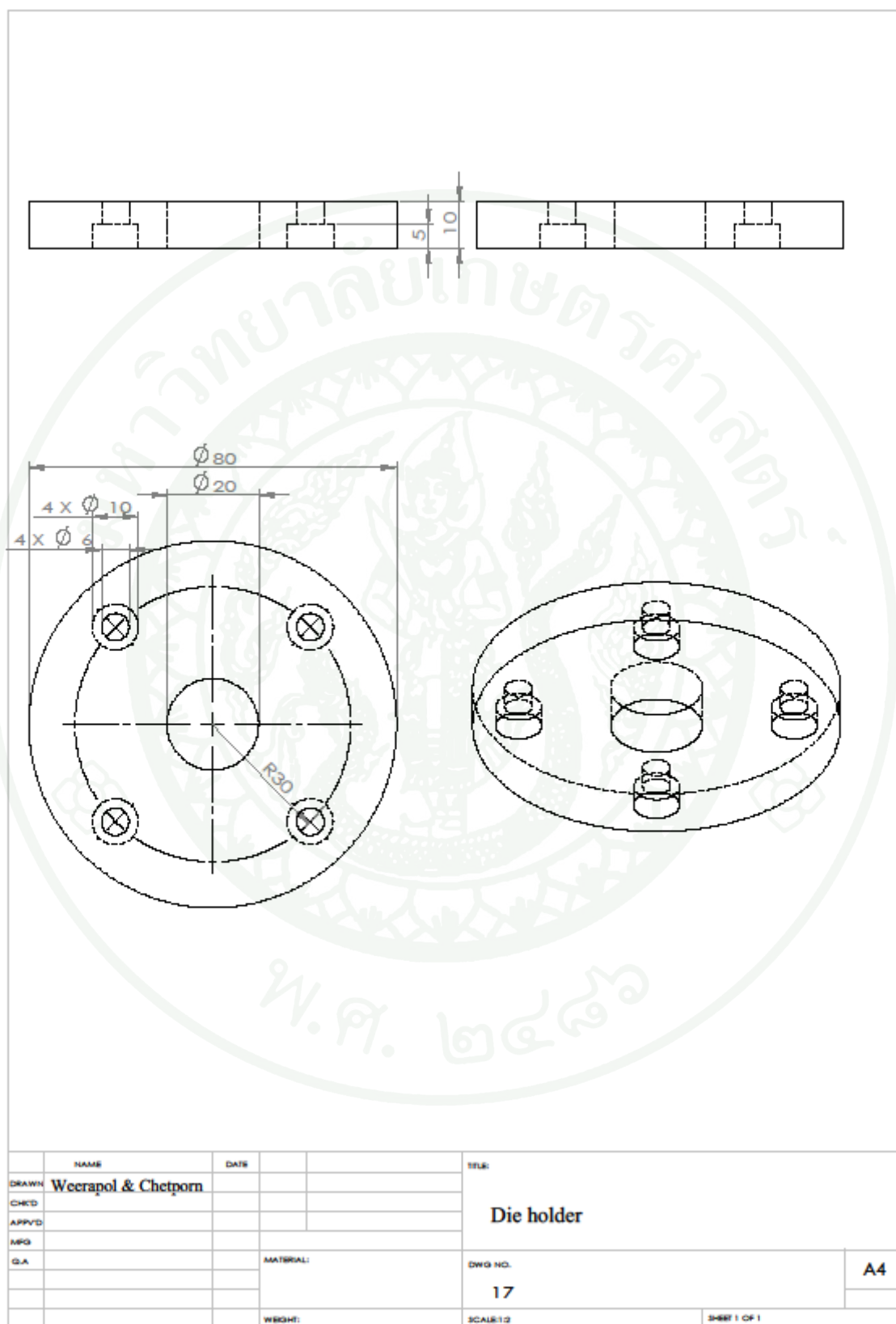




	NAME	DATE		TITLE
DRAWN	Weerapol & Chetporm			Extrusion skin lid
CHECK				
APPROV				
MRG				
Q.A			MATERIAL:	DWG NO.
				15
			WEIGHT:	SCALE: 1:2
				SHEET 1 OF 1



	NAME	DATE		TITLE
DRAWN	Weerapol & Chetpoom			Extrude skin 1
CHECKED				
APPROVED				
INQ				
Q.A			MATERIAL:	DWG NO.
				16
				A4
			WEIGHT:	SCALE: 1:2
				SHEET 1 OF 1





ตารางผนวกที่ ข1 ค่า P_0 และ e ที่ได้จากการปรับแก้ข้อมูลบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป กรณีปรับเปลี่ยนอัตราเคียดเคียนในชั้นแกนกลาง

Shear rate of core layer (s^{-1})	P_0 (Nm^{-2})	e (mm)
14.3	166600	11.13
23.8	218300	17.44
36.5	214600	19.34
46.1	253300	16.87
55.6	291600	23.34

ตารางผนวกที่ ข2 ค่า P_0 และ e ที่ได้จากการปรับแก้ข้อมูลบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูป กรณีปรับเปลี่ยนอัตราเคียดเคียนในชั้นชั้นผิว

Shear rate of skin layer (s^{-1})	P_0 (Nm^{-2})	e (mm)
14.3	166600	11.11
23.8	200000	13.33
36.5	230000	15.33
46.1	238300	13.62
55.6	268300	15.33

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล	นายวีรพล อภิมนสิริ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	28 มิถุนายน 2530
สถานที่เกิด	เขตบางรัก จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่ปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษา	-