



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการศึกษาสมบัติความเป็นอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะ
ไหล ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนในกระบวนการผลิตแบบอัดรีด
**Investigations into elastic behavior of flowing polymer melt in
the annular rotating die of extrusion processes.**

หัวหน้าโครงการผู้รับทุน
ผศ.ดร. นเรศ อินตะวงศ์
นักวิจัยที่ปรึกษา
ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2555

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการศึกษาสมบัติความเป็นอีลาสติกของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะ
ไหล ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนในกระบวนการผลิตแบบอัดรีด
Investigations into elastic behavior of flowing polymer melt in
the annular rotating die of extrusion processes.

หัวหน้าโครงการผู้รับทุน

ผศ.ดร. นเรศ อินตะวงศ์

นักวิจัยที่ปรึกษา

ศ.ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา สำนักงานกองทุน

สนับสนุนการวิจัยและ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: MRG5380252

ชื่อโครงการ: การศึกษาสมบัติความเป็นอีลาสติคของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลในหัวขึ้นรูปวงแหวน
แบบหมุนในกระบวนการผลิตแบบอัดรีด

ชื่อนักวิจัย และสถาบัน: ผศ.ดร. นเรศ อินตะวงศ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา 128 ถนนห้วย
แก้ว ต. ช้างเผือก อ. เมือง จ. เชียงใหม่

อีเมล: naret_i@yahoo.com

ระยะเวลาโครงการ: 2 ปี

บทคัดย่อ:

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและจัดสร้างหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนเพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติการไหล การเปลี่ยนแปลงของค่าความดันตกคร่อม และพฤติกรรมการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ผลการทดลองพบว่าค่าความดันตกคร่อม ที่ตรวจวัดได้ในระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ (0 rpm) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราหมุนและมีค่าลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิทดสอบ ในขณะที่ค่าความดันตกคร่อมที่ตรวจวัดได้ในระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนหัวขึ้นรูป โดยตรวจพบได้อย่างชัดเจนในสภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำและที่อัตราหมุนในช่วง 22 s^{-1} ถึง 29 s^{-1} ซึ่งพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 45 % การลดลงของค่าความดันตกคร่อมในระบบหัวขึ้นรูปแบบหมุนส่งผลกระทบโดยตรงกับสมบัติการไหลและสมบัติการบวมตัวการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter Swell) และการบวมตัวแบบความหนา (Thickness Swell) อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ค่าความเค้นเฉือนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความเร็วในการหมุนหัวขึ้นรูปวงแหวนสูงสุดประมาณ 43% ที่ความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป 70 rpm นอกจากนี้ยังพบว่าการบวมตัวแบบ Diameter Swell มีค่าลดลงเมื่อถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบหมุนในขณะที่การบวมตัวแบบ Thickness Swell มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป ผลการวิจัยดังกล่าวนี้ทำให้เห็นแนวทางของการควบคุมขนาดของชิ้นงานที่ผลิตจากหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน เช่น กระบวนการผลิตแบบอัดรีดเป่า (Extrusion Blow Moulding) หรือ การผลิตท่อ (Pipe Extrusion Process) โดยใช้เทคนิคการหมุนหัวขึ้นรูป ซึ่งสามารถปรับขนาดของแท่งพาริสันได้ทั้งในด้านความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกได้โดยไม่ต้องปรับพารามิเตอร์สภาวะการผลิตใด ๆ ในเครื่องอัดรีดพอลิเมอร์

คำหลัก : ค่าความดันตกคร่อม พอลิเมอร์หลอมเหลว การบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง การบวมตัวแบบความหนา หัวขึ้นรูปแบบวงแหวน การออกแบบหัวขึ้นรูป

Abstract

Project Code : MRG5380252

Project Title : Investigations into elastic behavior of flowing polymer melt in the annular rotating die of extrusion processes.

Investigator : Asst. Prof. Dr. Naret Intawong Department of industrial engineering, faculty of engineering, rajamangala university of technology lanna 128 Huay Kaew Road, Chiang Mai, 50300, THAILAND.

E-mail Address : naret_i@yahoo.com

Project Period : 2 Years

Abstract:

This research concerns with design and construction of annular rotating die used for studying rheological property, pressure drop, and swell behavior of melt HDPE in single screw extruder. Results of the experiment showed that pressure drop found in normal annular die (0 rpm) increased with the increase of shear rate, but decreased with the increase of tested temperature. On the contrary, pressure drop found in annular rotating die tended to decrease steadily with the increase of rotating speed. Particularly at low tested temperature and shear rate of 22 s^{-1} to 29 s^{-1} , the decreasing percentage of pressure drop rose up to 45%. The decrease of pressure drop in annular rotating die had significant direct effect on rheological property and both Diameter and Thickness swell behaviors. That is, shear stress tended to decrease with the increase of rotating speed, up to 43% at 70 rpm. In addition, it was also found that Diameter Swell decreased when pressed through rotating die, whereas the Thickness Swell increased with the increase of rotating speed. These results could be utilized for the control of work produced with annular die, for example, extrusion blow moulding or pipe extrusion process using rotating die. The size of parison bar could be adjusted both in thickness and outer diameter, with no need to change any production parameter of the polymer extrusion process.

Key words: Pressure Drop, Polymer Rheology, Diameter Swell, Thickness Swell, Single Screw Extruder, Die Design.

1. บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและจัดสร้างหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนเพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติการไหล การเปลี่ยนแปลงของค่าความดันตกคร่อม และพฤติกรรมการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ผลการทดลองพบว่าค่าความดันตกคร่อม ที่ตรวจวัดได้ในระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ (0 rpm) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือนและมีค่าลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิทดสอบ ในขณะที่ค่าความดันตกคร่อมที่ตรวจวัดได้ในระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนหัวขึ้นรูป โดยตรวจพบได้อย่างชัดเจนในสภาวะการทดสอบที่อุณหภูมิต่ำและที่อัตราเฉือนในช่วง 22 s^{-1} ถึง 29 s^{-1} ซึ่งพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 45 % การลดลงของค่าความดันตกคร่อมในระบบหัวขึ้นรูปแบบหมุนส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับสมบัติการไหลและสมบัติการบวมตัวการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter Swell) และการบวมตัวแบบความหนา (Thickness Swell) อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ค่าความเค้นเฉือนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความเร็วในการหมุนหัวขึ้นรูปวงแหวนสูงสุดประมาณ 43% ที่ความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป 70 rpm นอกจากนี้ยังพบว่าการบวมตัวแบบ Diameter Swell มีค่าลดลงเมื่อถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบหมุนในขณะที่การบวมตัวแบบ Thickness Swell มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป ผลการวิจัยดังกล่าวนี้ทำให้เห็นแนวทางของการควบคุมขนาดของชิ้นงานที่ผลิตจากหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน เช่น กระบวนการผลิตแบบอัดรีดเป่า (Extrusion Blow Moulding) หรือ การผลิตท่อ (Pipe Extrusion Process) โดยใช้เทคนิคการหมุนหัวขึ้นรูป ซึ่งสามารถปรับขนาดของแท่งพาริสันได้ทั้งในด้านความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกได้โดยไม่จำเป็นต้องปรับพารามิเตอร์สภาวะการผลิตใด ๆ ในเครื่องอัดรีดพอลิเมอร์

คำหลัก : ค่าความดันตกคร่อม พอลิเมอร์หลอมเหลว การบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง การบวมตัวแบบความหนา หัวขึ้นรูปแบบวงแหวน การออกแบบหัวขึ้นรูป

Abstract:

This research concerns with design and construction of annular rotating die used for studying rheological property, pressure drop, and swell behavior of melt HDPE in single screw extruder. Results of the experiment showed that pressure drop found in normal annular die (0 rpm) increased with the increase of shear rate, but decreased with the increase of tested temperature. On the contrary, pressure drop found in annular rotating die tended to decrease steadily with the increase of rotating speed. Particularly at low tested temperature and shear rate of 22 s^{-1} to 29 s^{-1} , the decreasing percentage of pressure drop rose up to 45%. The decrease of pressure drop in annular rotating die had significant direct effect on rheological property and both Diameter and Thickness swell behaviors. That is, shear stress tended to decrease with the increase of rotating speed, up to 43% at 70 rpm. In addition, it was also found that Diameter Swell decreased when pressed through rotating die, whereas the Thickness Swell increased with the increase of rotating speed. These results could be utilized for the control of work produced with annular die, for example, extrusion blow moulding or pipe extrusion process using rotating die. The size of parison bar could be adjusted both in thickness and outer diameter, with no need to change any production parameter of the polymer extrusion process.

Key words: Pressure Drop, Polymer Rheology, Diameter Swell, Thickness Swell, Single Screw Extruder, Die Design.

2. Executive summary

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและจัดสร้างหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนเพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติการไหล การเปลี่ยนแปลงของค่าความดันตกคร่อม และพฤติกรรมการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว โดยระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนที่ได้จัดสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ได้จำลองรูปแบบของการผลิตท่อ เพื่อให้ได้ข้อมูลผลการวิจัยที่ใกล้เคียงกับกระบวนการผลิตจริง ผลการทดลองพบว่าค่าความดันตกคร่อมที่ตรวจวัดได้ในระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนหัวขึ้นรูปสูงสุดประมาณ 45 % และค่าความเค้นเฉือนมีแนวโน้มลดลงสูงสุด 43% ตามการเพิ่มความเร็วในการหมุนหัวขึ้นรูปวงแหวนในทุก ๆ สภาวะอุณหภูมิการทดสอบเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการบวมตัวแบบ Diameter Swell ของ HDPE หลอมเหลวมีค่าลดลงเมื่อถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบหมุนในขณะที่การบวมตัวแบบ Thickness Swell มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป ซึ่งสามารถอธิบายด้วยการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการไหลของ HDPE หลอมเหลวขณะไหลในหัวขึ้นรูปแบบหมุน คณะวิจัยได้วิเคราะห์ผลการทดลองและเรียบเรียงเป็นบทความวิจัยเพื่อเสนอตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ *Polymer Engineering and Science* เรื่อง *“Effect of the Annular Rotating Die on Pressure Drop, Rheological Properties and Extrudate Swell Behavior of HDPE Melt in the Single Screw Extruder”* ในวันที่ 8 กรกฎาคม 2555 หมายเลขบทความ (Manuscript ID) PES-12-0520

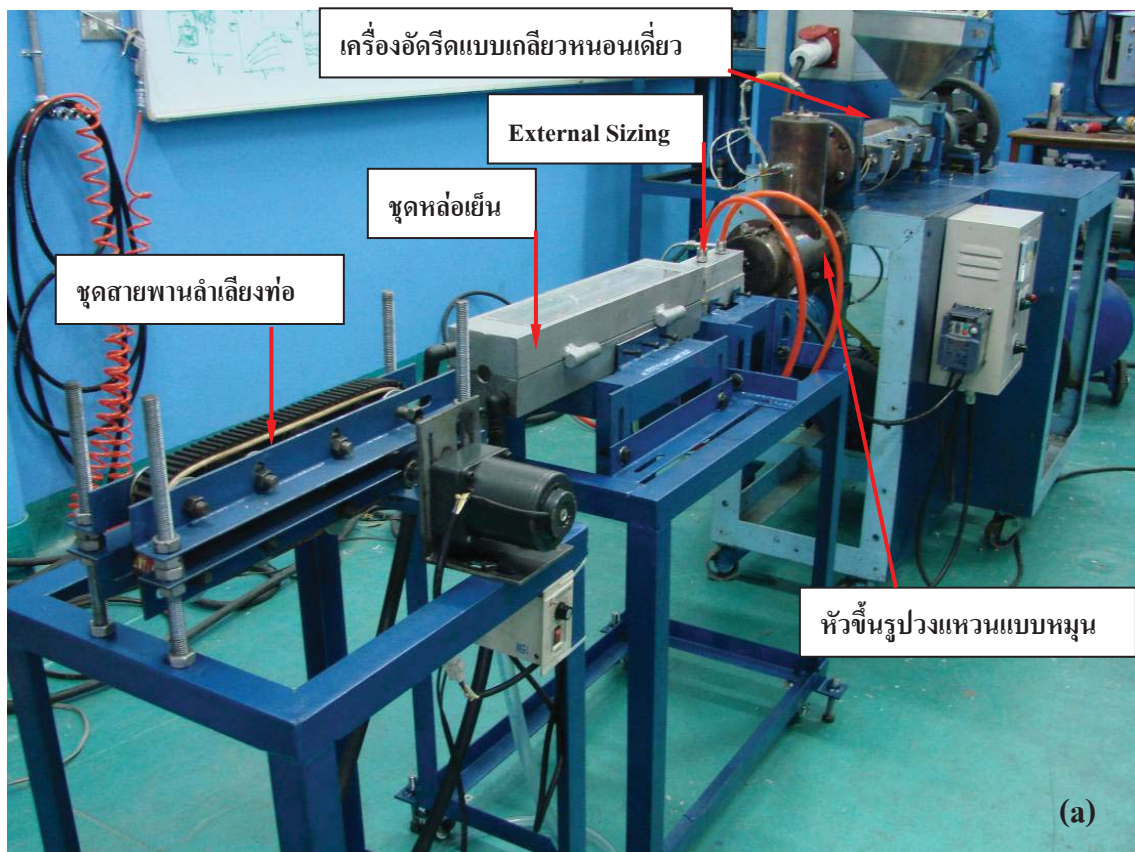
3. วัตถุประสงค์

- 3.1. ออกแบบและจัดสร้างหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนแท่ง Mandrel เพื่อใช้ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว
- 3.2. ศึกษาสมบัติการไหล การเปลี่ยนแปลงของค่าความดันตกคร่อม และพฤติกรรมการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวจากเครื่องมือที่จัดสร้างขึ้น

4. วิธีทดลอง

4.1 การออกแบบและจัดสร้างหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน

รูปที่ 1(a) และ (b) แสดงภาพรวมของระบบการขึ้นรูปด้วยหัวขึ้นรูปแบบหมุนซึ่งประกอบด้วยชุดหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนที่ออกแบบให้เชื่อมต่อกับเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว ระบบ Sizing ชุดหล่อเย็นชิ้นงาน และระบบสายพานลำเลียงที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

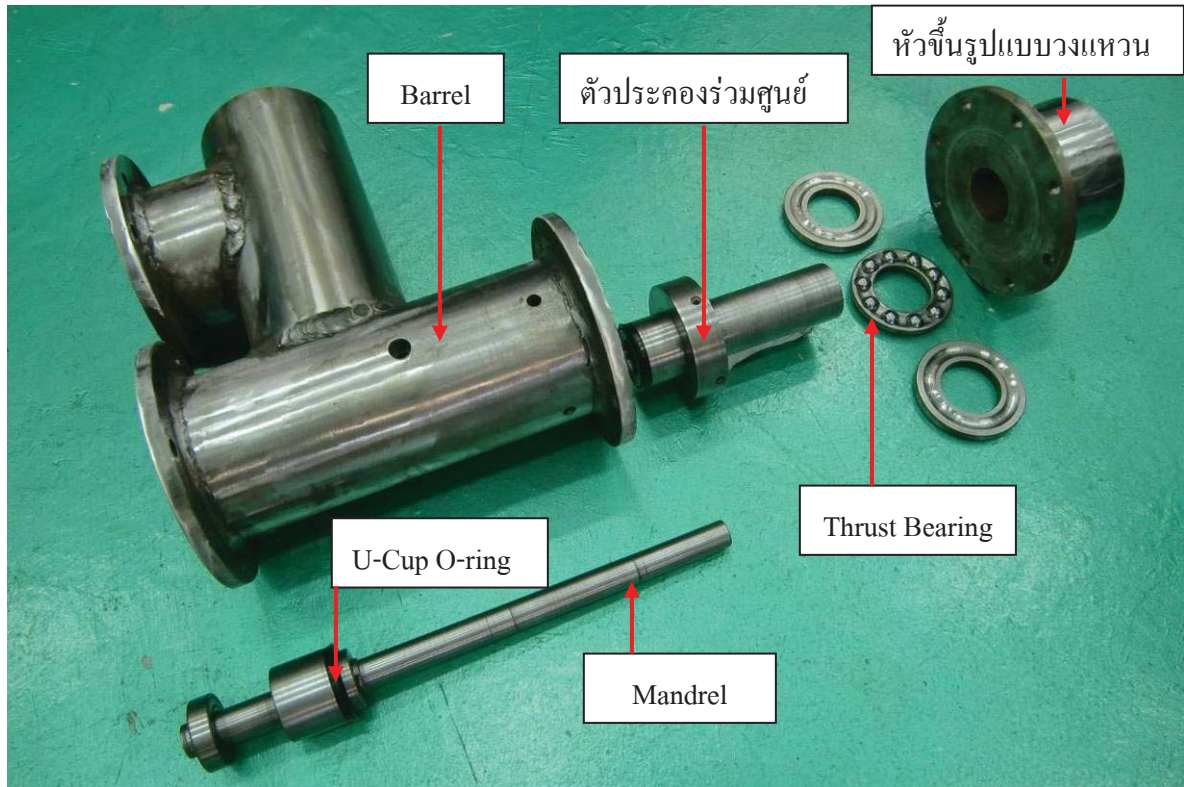




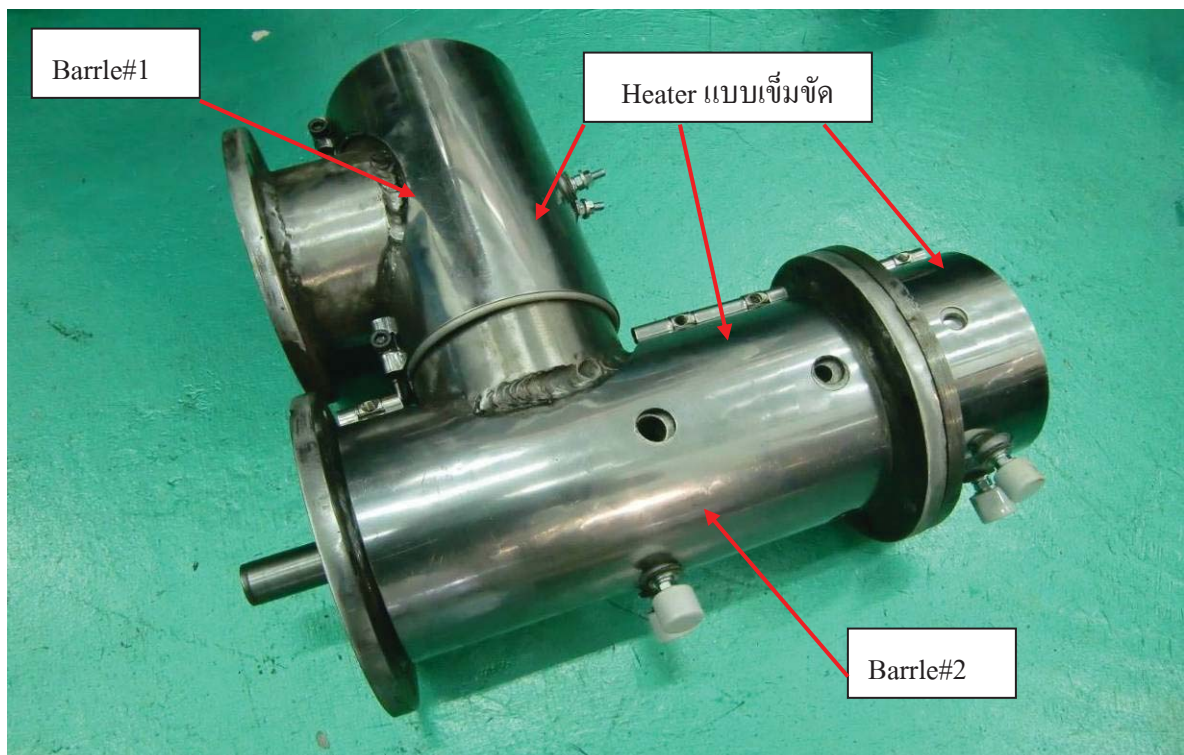
รูปที่ 1. ภาพรวมของระบบลำเลียงท่อ ชุดหล่อเย็น และ Sizing ที่ประกอบเข้าต่อเนื่องจากหัวขึ้นรูปแบบหมุนและเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว

4.1.1. ระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน(Annular Rotating Di System)

รูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบภายในของระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน ประกอบด้วย ห้องหล่อเหลวทรงกระบอกรูปทรงตัว L ที่ปลายด้านหนึ่งของเป็นจุดเชื่อมต่อกับเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวเพื่อเป็นท่อนำพอลิเมอร์หล่อเหลวมายังชุดหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนที่ประกอบอยู่ในห้องหล่อเหลวทรงกระบอกด้านล่าง โดยภายในห้องหล่อเหลวทรงกระบอกด้านล่าง ประกอบด้วยแกนหมุน Mandrel ที่ ถูกออกแบบให้หมุนอย่างอิสระภายใน โดยมีแบร์ริงรับแรงกด(Thrust Bearing) และตัวประกอบร่วมศูนย์เป็นตัวประกอบให้อยู่ในแนวศูนย์กลาง ชุดหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนคือชิ้นส่วนที่ประกอบอยู่ส่วนปลายของห้องหล่อเหลวทรงกระบอกทำหน้าที่ร่วมกับแท่ง Mandrel เพื่อสร้างรูปร่างของชิ้นงานพอลิเมอร์หล่อเหลวที่ให้ไหลออกมาเป็นรูปทรงกระบอก โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนเท่ากับ 20 mm และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 18 mm(เท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Mandrel) นอกจากนี้ได้ใช้ระบบกันการรั่วไหลของพอลิเมอร์หล่อเหลวบริเวณที่เป็นจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ โดยใช้โอริงทนความร้อนชนิดรูปทรงตัว U (U-Cup O-ring) อีกด้วย



รูปที่ 2. แสดงชิ้นส่วนภายในของระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน



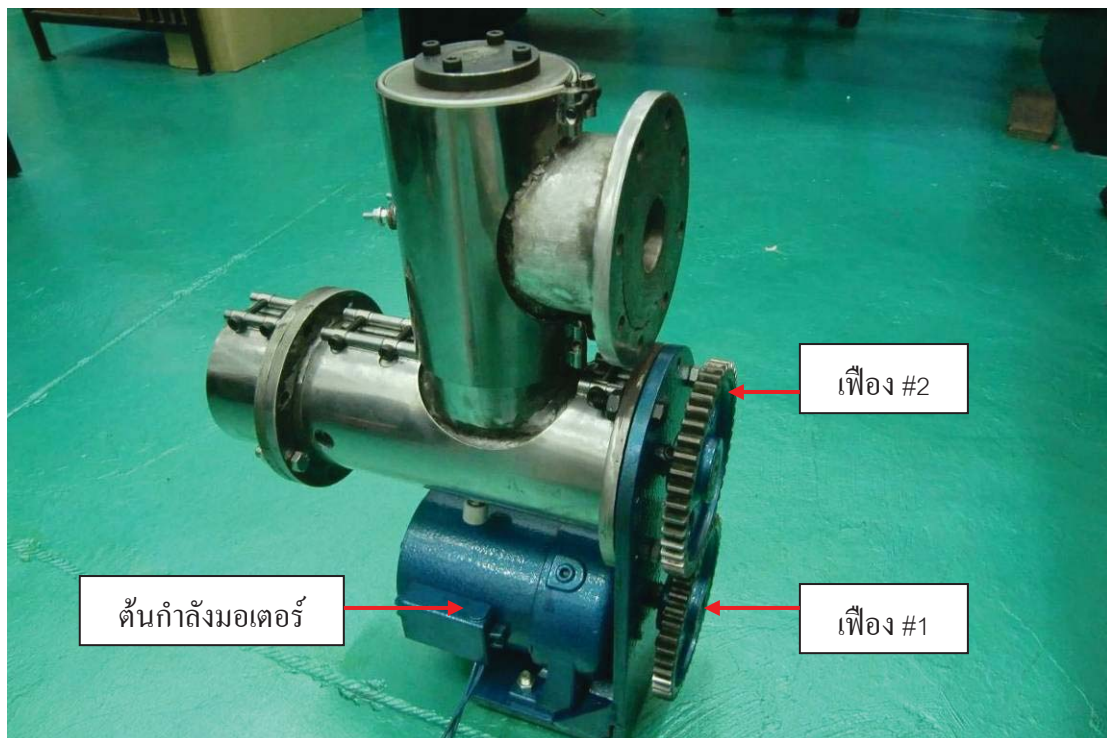
รูปที่ 3. แสดงห้องหลอมเหลวทรงกระบอกที่ประกอบเข้ากับ Heater

- **ห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (Barrel)**

รูปที่ 3. แสดงห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (Barrel) รูปทรงแบบตัว L ที่มี Barrel สองชุด ประกอบกันคือ Barrel#1 และ Barrel#2 ตามลำดับโดยผลิตจากเหล็กเครื่องมือ (Tool Steel) เกรด SKD61 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm Barrel#1 ถูกออกแบบให้เชื่อมต่อกับ Barrel ของเครื่องอัดรีดแบบเกลียว หนองเดี่ยวโดยทำหน้าที่เป็นช่องการไหล (Flow Charnel) เพื่อส่งผ่าน HDPE หลอมเหลวจาก barrel ของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนองเดี่ยวมายัง Barrel#2 ชุดขับเคลื่อนการหมุนหัวขึ้นรูปประกอบอยู่ในบริเวณส่วนท้ายของ Barrel#2 ภายนอกของ barrel ใช้ Heater แบบเข็มขัดจำนวน 3 ตัว เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับให้ความร้อนแก่ Barrel ทั้งสองและหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน

- **ระบบส่งกำลังการหมุนหัวขึ้นรูปวงแหวน**

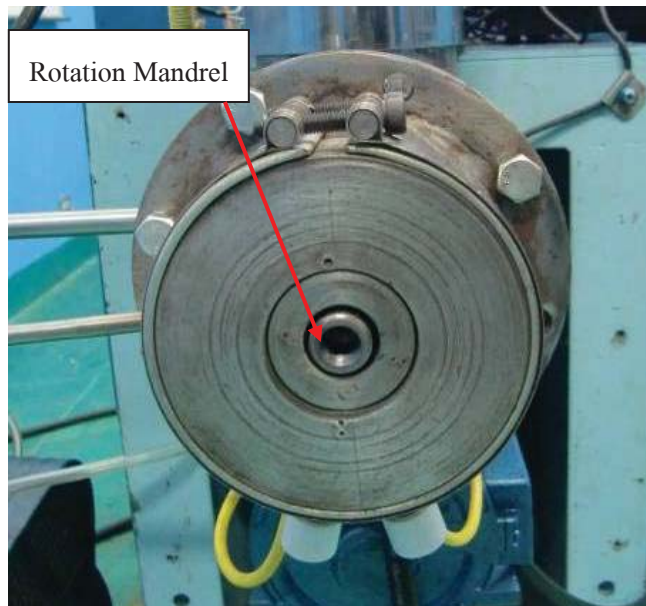
รูปที่ 4 แสดงการติดตั้งมอเตอร์ส่งกำลังและระบบเฟืองส่งกำลังของหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน ซึ่งใช้มอเตอร์ AC 220 V มอเตอร์ดังกล่าวทำหน้าที่เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนเฟืองที่ 1 (Gear 1 #) ให้ส่งกำลังไปยังเฟืองที่ 2 (Gear 2 #) ด้วยอัตราทด 1:1 เพื่อหมุนแท่ง Mandrel ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 mm ที่ออกแบบให้หมุนอย่างอิสระอยู่ภายใน Barrel#2 โดยมีแบริ่งรับแรงกด (Thrust Bearing) เป็นตัวประกอบให้อยู่ในแนวศูนย์กลาง Annular Die ถูกประกอบเข้ากับด้านหน้าของ Barrel#2 และใช้โอริงทนความร้อนสูงแบบรูปถ้วย (U-cup O-Ring) ประกอบเข้ากับแท่ง Mandrel บริเวณจุดเชื่อมต่อระหว่าง Barrel#2 กับ Annular Die เพื่อป้องกันการ leak ของพอลิเมอร์หลอมเหลว ขณะทำการอัดรีดพอลิเมอร์



รูปที่ 4. ระบบส่งกำลังของหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน

- หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน

รูปที่ 5. แสดงส่วนประกอบของหัวขึ้นรูปแบบหมุนที่ประกอบอยู่บริเวณส่วนหน้าของ Barile#2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 20 mm และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 18 mm (Rotation Mandrel Part) และมีความยาว 200 mm แท่ง Mandrel ทำหน้าที่เป็นท่อนำอากาศ (air tube) และปรับความดันของอากาศเพื่อใช้ในการพองแท่งพาริสัน (Parison) ภายหลังจากอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูปซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ใช้ความดันอากาศคงที่ที่ 2 bar ในทุกสภาวะการทดสอบ



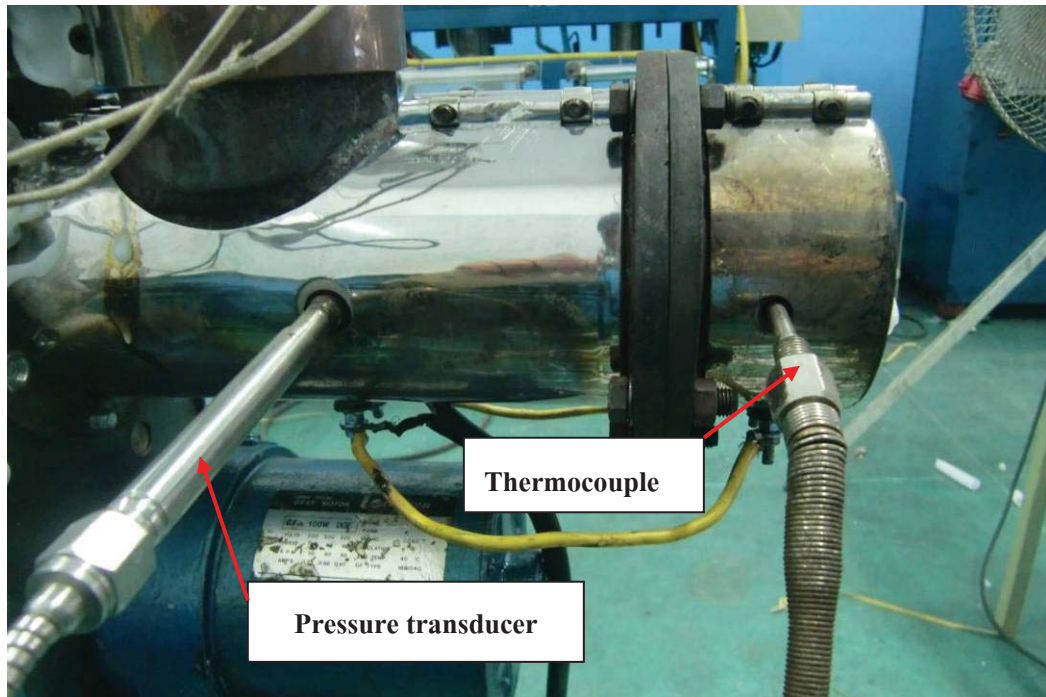
รูปที่ 5. แสดงส่วนประกอบของหัวขึ้นรูปแบบหมุน

- เครื่องมือวัดความดัน *Pressure transducer*

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้นบริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปโดยงานวิจัยนี้เลือกใช้เครื่องมือวัดความดันชนิดไดอะแฟรม (Dynisco, Model PT460E-2CB-6, Franklin, MA). โดยตำแหน่งของเครื่องมือวัดความดันนี้ประกอบเข้ากับด้านข้างของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกในตำแหน่งที่อยู่เหนือทางเข้าหัวขึ้นรูป ประมาณ 5 mm ดังแสดงในรูปที่ 6

- เครื่องมือวัดอุณหภูมิ *Thermocouple*

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิของหัวขึ้นรูปโดยงานวิจัยนี้เลือกใช้ Thermocouple sensor ชนิด K Type และใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิรุ่น DD6 Temperature Controller จากบริษัทแสงชัย มิเตอร์ จำกัด โดยสามารถตั้งอุณหภูมิทดสอบได้จากช่วงอุณหภูมิห้องถึง 300 °C ในความละเอียดถึง ± 0.5 °C. Thermocouple sensor ดังกล่าวประกอบเข้ากับด้านข้างของหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6. แสดงตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือวัดความดันและเครื่องมือวัดอุณหภูมิ Thermocouple

- **ระบบควบคุมและเก็บข้อมูลผลการทดลอง**

การเก็บข้อมูลผลการทดลองในงานวิจัยนี้ สามารถตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สนใจ ได้แก่ ค่าความดันตกคร่อม ค่าความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูป การบันทึกภาพ และอุณหภูมิการทดสอบได้ตามเวลาจริง โดยระบบการตรวจวัดดังกล่าวนี้ประกอบด้วย อุปกรณ์เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบของการหมุนหัวขึ้นรูป Pressure transducer และกล้อง VDO บันทึกภาพ ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูลความเร็วสูง และแสดงผลข้อมูลด้วยจอแสดงผลของเครื่องคอมพิวเตอร์ ที่มีลักษณะการแสดงผลและบันทึกข้อมูลการทดลองเป็นแบบ Real time จาก Software ที่พัฒนาขึ้นเอง การจัดวางระบบควบคุมการทำงานและเก็บข้อมูลงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 7

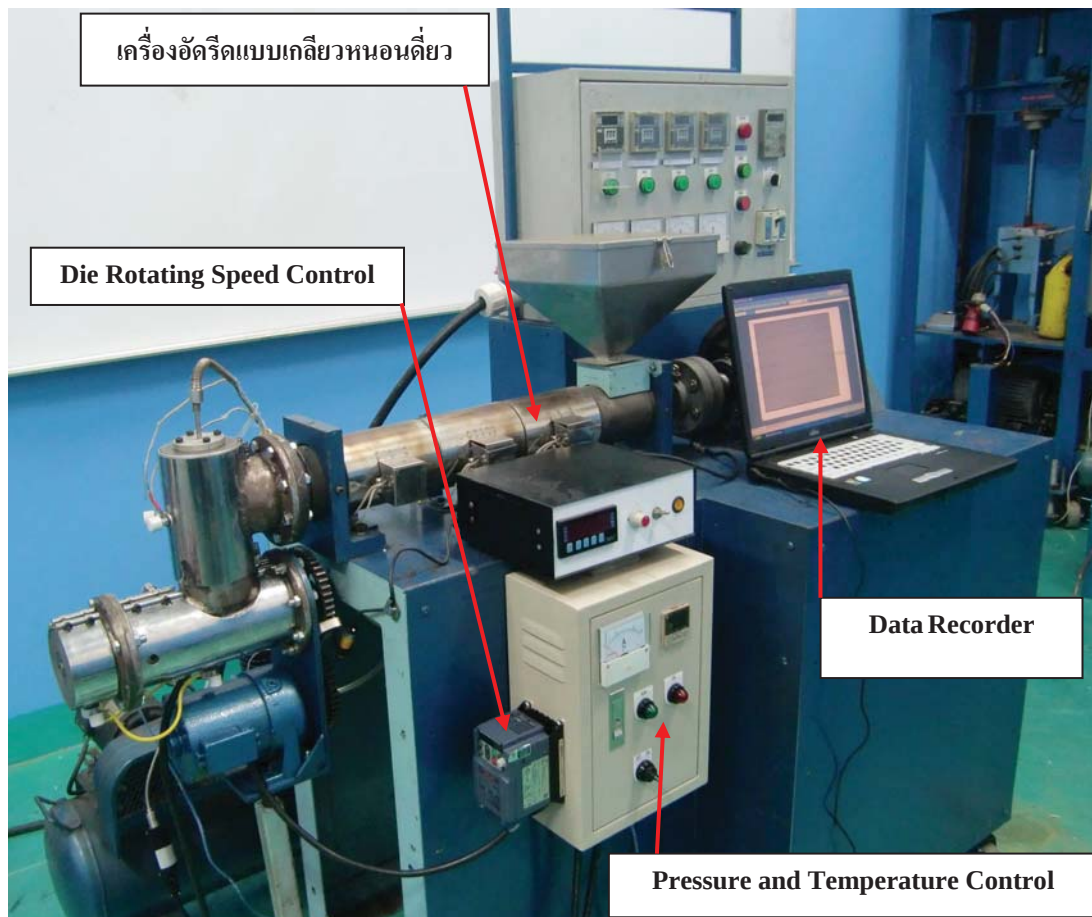
- **อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบหัวขึ้นรูป(Die Rotating Speed Control)**

การควบคุมความเร็วรอบของ Rotating Die อาศัยหลักการปรับความเร็วรอบทางไฟฟ้าโดยการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ต้นกำลังโดยใช้อุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ (Inverter, FRENIC-MINI 4C1S-7J)

- **เครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยว(Single screw extruder)**

รูปที่ 7 แสดงเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ RMUTL-SE001 MUSHKING PolyLab RMUTL.[1] มีขนาดความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Length-to-diameter (L/D) ratio) เท่ากับ 600/25 mm/mm. สามารถปรับตั้งอุณหภูมิของ Barrel ทั้ง 3 ช่วงตลอดความยาวจาก

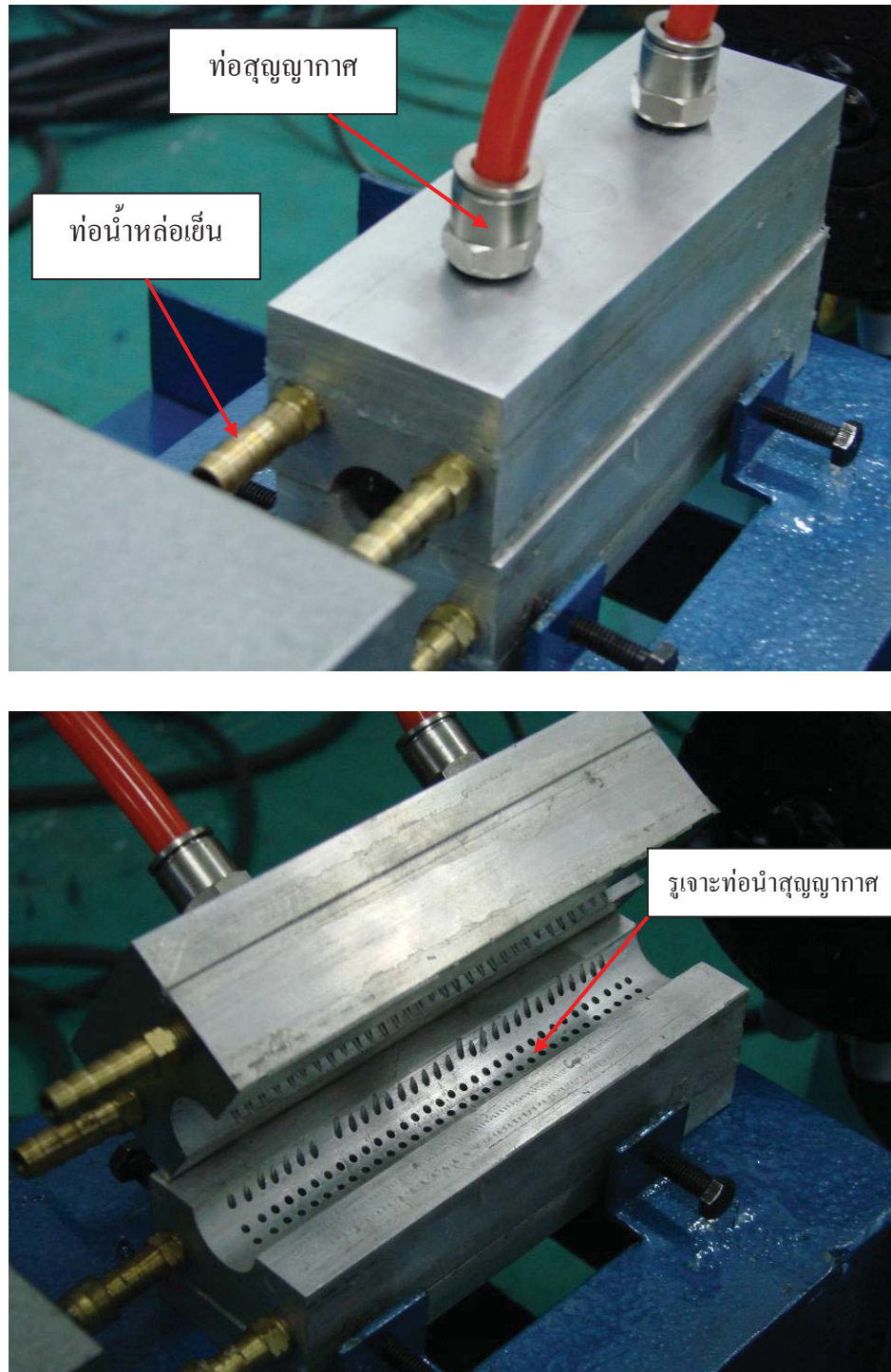
ทางเข้าเม็ดพอลิเมอร์ถึงหัวขึ้นรูป ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้กำหนดอุณหภูมิการทดสอบในช่วง 210 to 230°C. ความเร็วรอบการหมุนสกรูกำหนดให้อยู่ในช่วง 10 ถึง 40 rpm หรือที่อัตราเฉือน (Shear rates) 22 ถึง 50 s⁻¹



รูปที่ 7. แสดงการจัดวางระบบควบคุมและเก็บข้อมูลงานวิจัย

4.1.2. อุปกรณ์กำหนดขนาดภายนอกชิ้นงาน (External Sizing)

รูปที่ 8. อุปกรณ์กำหนดขนาดภายนอก ติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าของหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน ทำหน้าที่กำหนดขนาดของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่ไหลออกมาจากหัวขึ้นรูปและหล่อเย็นชิ้นงานให้คงรูปเป็นชิ้นงานท่อ เครื่องมือดังกล่าวผลิตจากอลูมิเนียมหล่อและออกแบบให้เป็นแบบแยกชิ้น 2 ชุด (บน-ล่าง) เพื่อง่ายต่อการปฏิบัติงาน โดยเมื่อนำมาประกอบเข้าด้วยกันแล้วจะได้ช่องว่างรูปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm ยาว 200 mm ซึ่งเท่ากับขนาดของท่อที่ต้องการ ภายในช่องว่างได้เจาะรูขนาด 1 mm ตามแนวรัศมีเพื่อเป็นท่อนำสัญญาณสำหรับวัดให้ผิวภายนอกของชิ้นงานท่อพอลิเมอร์สัมผัสกับผนังอลูมิเนียมที่ทำให้เย็นประมาณ 10 °C ด้วยระบบน้ำหล่อเย็นและหมุนเวียนน้ำผ่านตัว Sizing ทั้งสองเพื่อระบายความร้อนหรือหล่อเย็นชิ้นงานพอลิเมอร์ให้คงรูปเป็นท่อทรงกระบอก

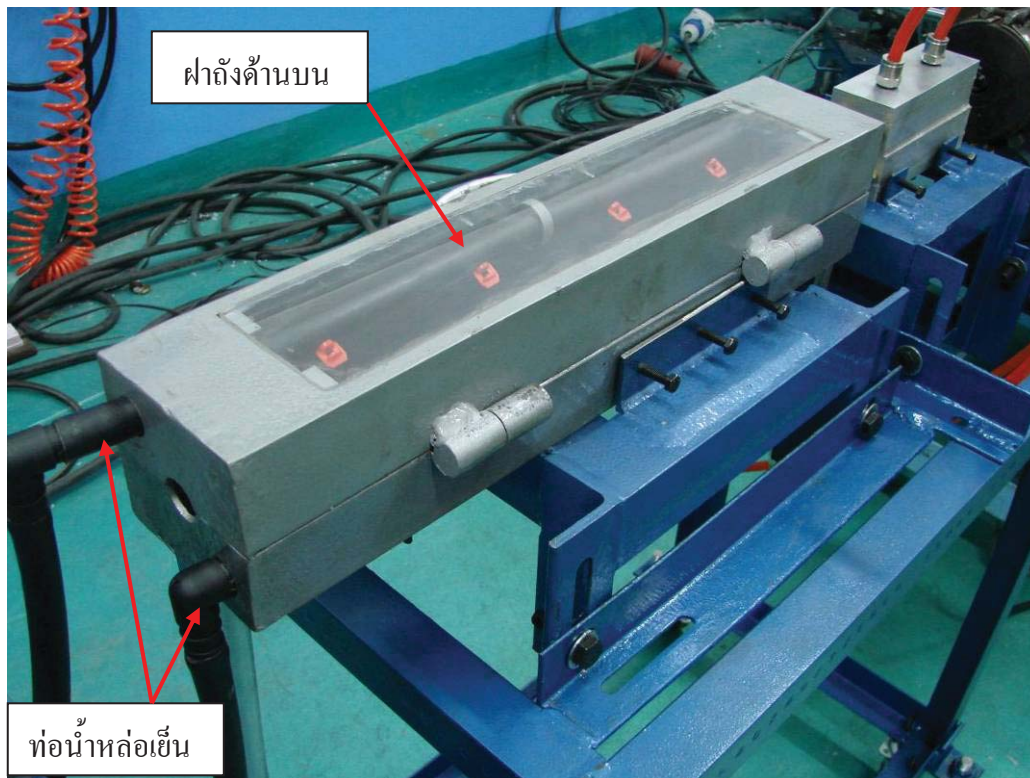


รูปที่ 8. อุปกรณ์กำหนดขนาดภายนอก (External Sizing)

4.1.3. อุปกรณ์หล่อเย็นชิ้นงานท่อ (Cooling Unit)

หลังจากชิ้นงานพอลิเมอร์รูปทรงท่อถูกทำให้เย็นตัวด้วย External Sizing แล้ว จะถูกลำเลียงให้เคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์หล่อเย็นชิ้นงานท่อ ซึ่งมีหน้าที่หล่อเย็นชิ้นงานให้เย็นตัวลงมาที่อุณหภูมิห้องอย่าง

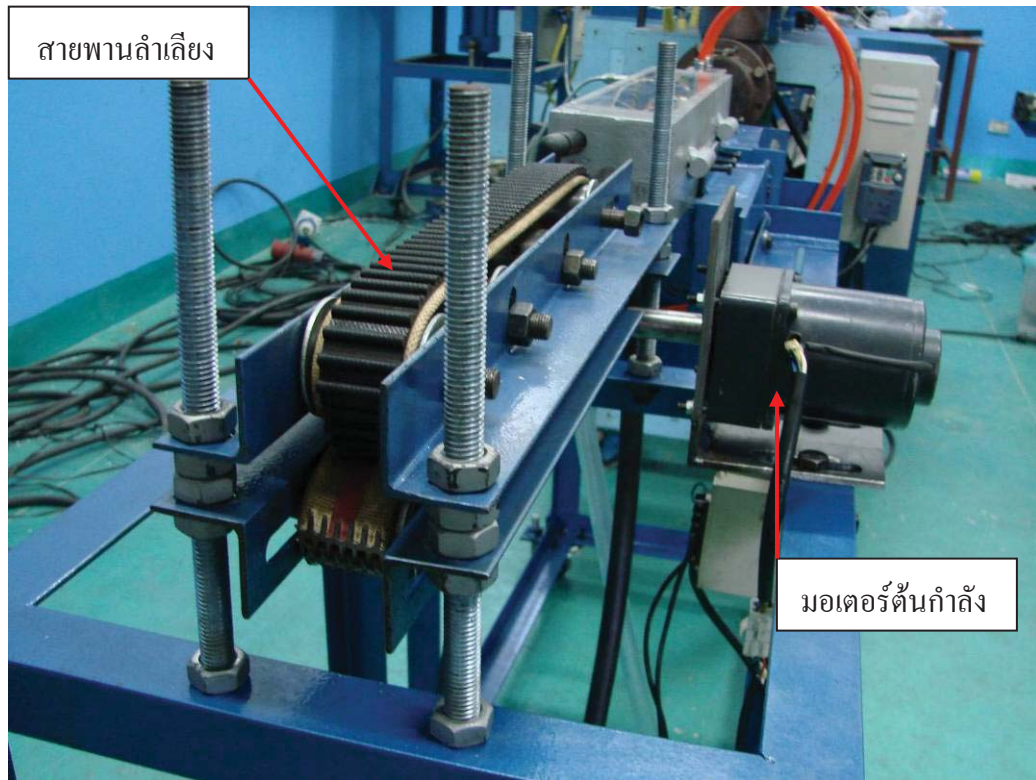
สมบูรณ์ด้วยการใช้น้ำอุณหภูมิห้องเป็นสารหล่อเย็นโดยจะถูกฉีดผ่านท่อน้ำหล่อเย็น 2 ท่อที่ประกอบอยู่ภายในถึงขนาดความกว้างและความสูง 100 mm ยาว 1000 mm อุปกรณ์ดังกล่าวออกแบบให้สามารถแยกออกจากกันได้ในลักษณะของฝาเปิดเพื่อให้ง่ายต่อการปฏิบัติงาน และนอกจากนี้ฝาดังด้านบนออกแบบให้โปร่งแสงเพื่อให้สามารถมองเห็นชิ้นงานท่อที่เคลื่อนที่อยู่ภายในถังได้ตลอดการผลิต ลักษณะของอุปกรณ์หล่อเย็นชิ้นงานท่อดังแสดงในรูปที่ 9.



รูปที่ 9. อุปกรณ์หล่อเย็นชิ้นงานท่อ (Cooling Unit)

4.1.4. ชุดสายพานลำเลียงท่อ

รูปที่ 10 แสดงส่วนประกอบของชุดสายพานลำเลียงชิ้นงาน โดยเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ส่วนหน้าสุดของระบบการขึ้นรูปท่อ มีขนาดความกว้าง 200 mm และยาว 600 mm ส่วนประกอบสำคัญคือมอเตอร์ต้นกำลังขนาด 60 W ที่ใช้การขับเคลื่อนชุดสายพานลำเลียงท่อ 2 ชุดที่ประกอบอยู่ด้านบนและด้านล่างตามแนวราบ โดยระหว่างช่องว่างสายพานทั้งสองเป็นแนวของท่อที่ถูกบังคับให้เคลื่อนที่ผ่านด้วยแรงลากจากสายพานด้วยความเร็วคงที่เพื่อให้เกิดการขึ้นรูปชิ้นงานท่อย่างต่อเนื่อง ระยะห่างของสายพานทั้งสองสามารถปรับตั้งได้ตามขนาดของท่อ และความเร็วของสายพาน (ความเร็วการเคลื่อนที่ของท่อ) สามารถปรับได้จากการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ต้นกำลัง ซึ่งสามารถปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ได้ 50 – 500 mm/min



รูปที่10 แสดงส่วนประกอบของชุดสายพานลำเลียงชิ้นงาน

4.2 การออกแบบการทดลอง

4.2.1. วัสดุทดลอง

วัสดุพอลิเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE) เกรด HD5000S ใช้ผลิตท่อน้ำความดันสูงจาก บริษัท จาก PTT Chemical Thailand (Bangkok, Thailand) มีค่าดัชนีการไหล (Melt Flow Index) เท่ากับ 0.8 ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1238 และค่าความหนาแน่นเท่ากับ 0.954 g/cm^3 ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1505

4.2.2. การทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว

การทดสอบสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้จากเครื่องมือหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนที่ได้จัดสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ จากหลักการวัดความดันตกคร่อม (Pressure Drop) บริเวณทางเข้า Die ด้วยเครื่องมือวัดความดัน ค่าความดันที่ตรวจวัดได้จากการทดสอบจะนำมาในการคำนวณหาความเค้นเฉือน ณ อัตราการไหลต่าง ๆ โดยในทางปฏิบัติสามารถคำนวณหาความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนที่มีค่าสูงสุด ซึ่งจะเกิดขึ้นบริเวณผนัง Die ซึ่งเรียกว่า Wall Shear Stress (τ_w) และ Wall Shear Rate ($\dot{\gamma}_w$) อัตราส่วนระหว่าง τ_w กับ $\dot{\gamma}_w$ คือค่าความหนืด (Viscosity, η) โดยสามารถแสดงได้ในสมการที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับต่อไปนี้ [2, 3]

$$\tau_w = \frac{H\Delta P_{ent}}{2L} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma}_w = \frac{6Q}{C_m H^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} \quad (3)$$

เมื่อ τ_w = ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผนังของ Die (N/m^2)

H = ขนาดความหนาของช่องการไหล (Die Gap) (m)

P = ความดันตกที่เกิดขึ้น (N/m^2)

L = ความยาว Die (m)

$\dot{\gamma}_w$ = อัตราการเฉือนที่เกิดขึ้นบริเวณผนัง Die (s^{-1})

Q = อัตราการเร็วในการไหล (Volumetric Flow Rate, m^3/s)

η = ความหนืด Ns/m

$C_m = \pi(R_1 + R_2)$, R_1 and R_2 = รัศมีของ Mandrel และ รัศมีภายนอกของ annular die (m)

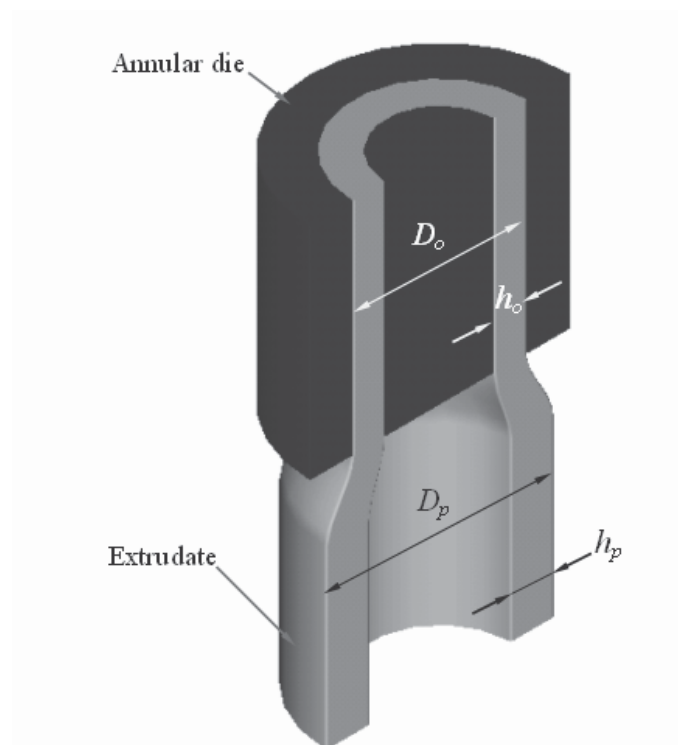
4.2.3. การศึกษาอัตราการบวมตัวของพอลิเมอร์

การศึกษ้อัตราการบวมตัวของพอลิเมอร์หลังจากถูกอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนในงานวิจัยนี้จะทำการวัดการบวมตัว 2 แบบคือ แบบโดยรวม (Diameter Swell) และการบวมตัวด้านความหนา (Thickness Swell) ดังแสดงในรูปที่ 11. โดยอัตราส่วนการบวมตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ [4,5]

$$\text{Diameter Swell} = \frac{D_p}{D_o} \quad (4)$$

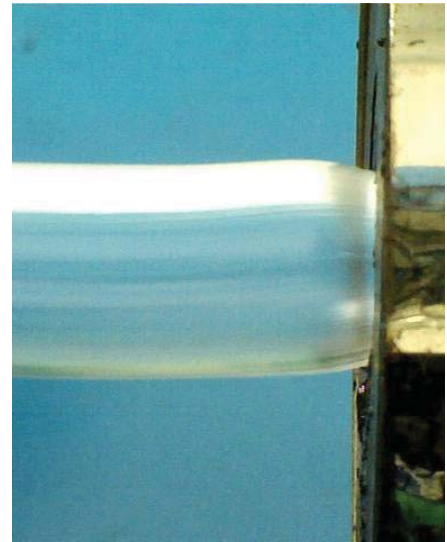
$$\text{Thickness Swell} = \frac{h_p}{h_o} \quad (5)$$

เมื่อ D_p = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของ Extrudate
 D_o = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ Die
 h_p = ขนาดความหนาของ Extrudate
 h_o = ขนาดความหนาของช่องการไหลใน Die



รูปที่ 11. แสดงตำแหน่งการวัดปริมาณการบวมตัวของพอลิเมอร์ แบบ Diameter swell และแบบ Thickness Swell

การตรวจวัดปริมาณการบวมตัวแบบ Overall Swell ทำโดยเทคนิคการบันทึกภาพจากกล้อง (VDO Recorder) ขณะที่พอลิเมอร์ถูกอัดรีดออกมาจาก Rotating Die ตามเวลาจริง (Real Time) โดยใช้ กล้อง VDO รุ่น 1.3 MP USB DIGITAL MICROSCOPE 20X to 400X ดังแสดงในรูปที่ 12 จากนั้นทำการจับภาพ (Visualization Capture) ในเวลาการไหลที่สนใจโดยภาพที่ได้จะนำมาวัดและประมวลผลด้วย เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณการบวมตัวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 สำหรับการตรวจวัดปริมาณการบวมตัวแบบ Thickness Swell ไม่สามารถตรวจวัดด้วยวิธีการบันทึกภาพด้วย VDO ได้เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ไหลออกมาจากหัวขึ้นรูปมีความขุ่นซึ่งไม่สามารถแยกแยะด้วยภาพจากกล้องได้ ดังนั้นคณะวิจัยได้ตรวจวัดจากชิ้นงานจริงโดยการตัดชิ้นงานและวัดความหนาด้วยเวอเนียร์คาลิเปอร์ดิจิทัล ความละเอียด 0.01 mm ตามระยะของชิ้นงานที่ถูกกำหนดด้วยเวลาของการอัดรีดอัดรีดที่สนใจ ตัวอย่างของชิ้นงานที่ตรวจวัดดังแสดงในรูปที่ 13

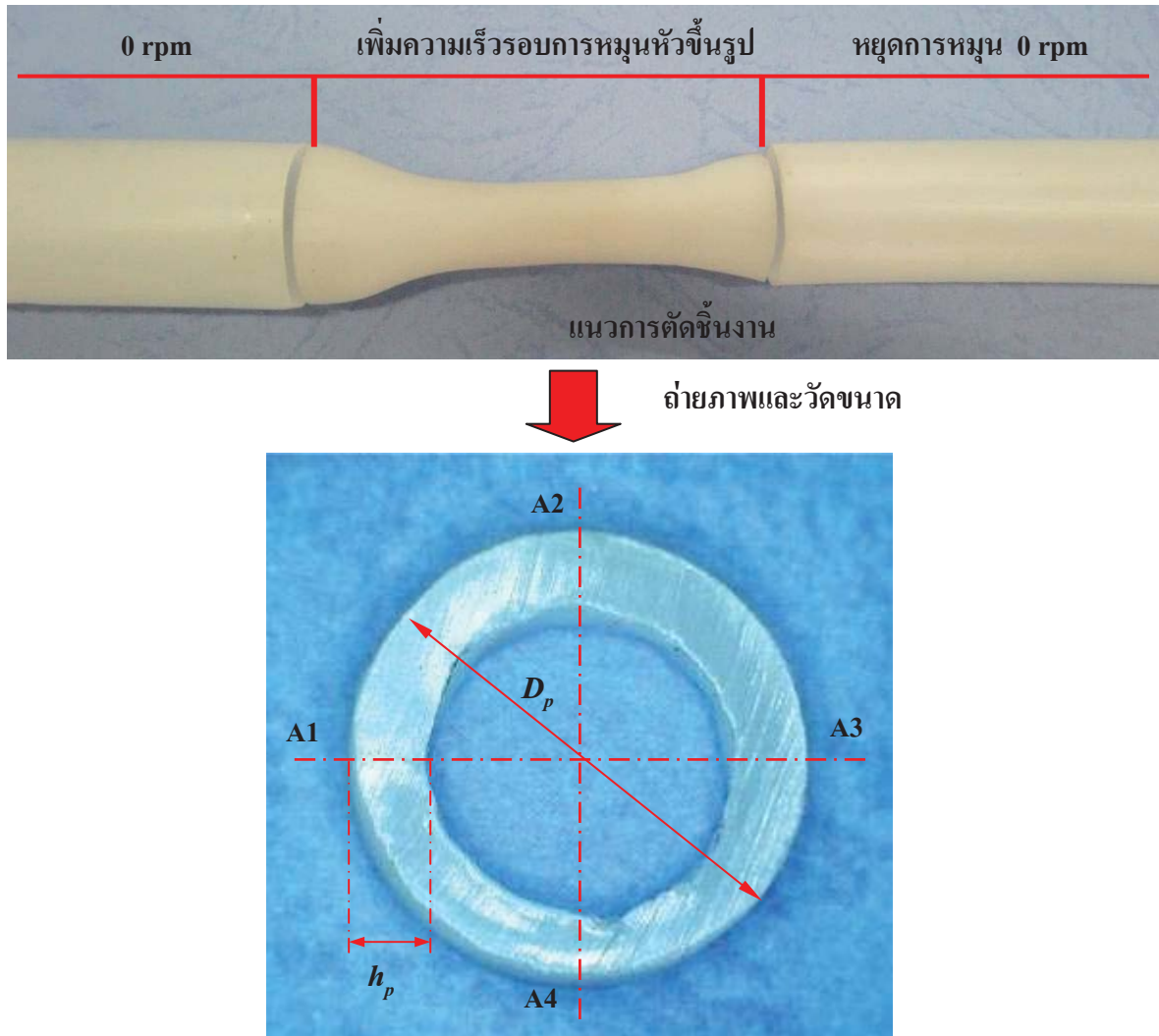


รูปที่ 12. กล้อง VDO ที่ใช้ในการบันทึกภาพเพื่อตรวจวัดปริมาณการบวมตัวแบบ Diameter Swell



รูปที่ 13. ตัวอย่างชิ้นงานตัดจากชิ้นงานจริงตามกำหนดด้วยเวลาของการอัดรีดอัดรีดเพื่อตรวจวัดปริมาณการบวมตัวแบบ Thickness Swell

รูปที่ 14. แสดงตำแหน่งการตัดเพื่อการวัดขนาดชิ้นงานตัวอย่างเพื่อตรวจวัดปริมาณการบวมตัวแบบ Thickness Swell โดยทำการตัดชิ้นงานที่ทำให้เย็นตัวแล้วในระยะเวลาที่สัมพันธ์กับเวลาจากภาพที่บันทึกจากกล้อง VDO เพื่อให้ได้ตำแหน่งเดียวกันกับการวัดขนาดจากภาพ วัดขนาดความหนาผนังชิ้นงาน h_p จากการหาค่าเฉลี่ยทั้งหมด 4 แห่งจาก A1-A4



รูปที่ 14. แสดงตำแหน่งการตัดชิ้นงานและตำแหน่งการวัดขนาดชิ้นงาน

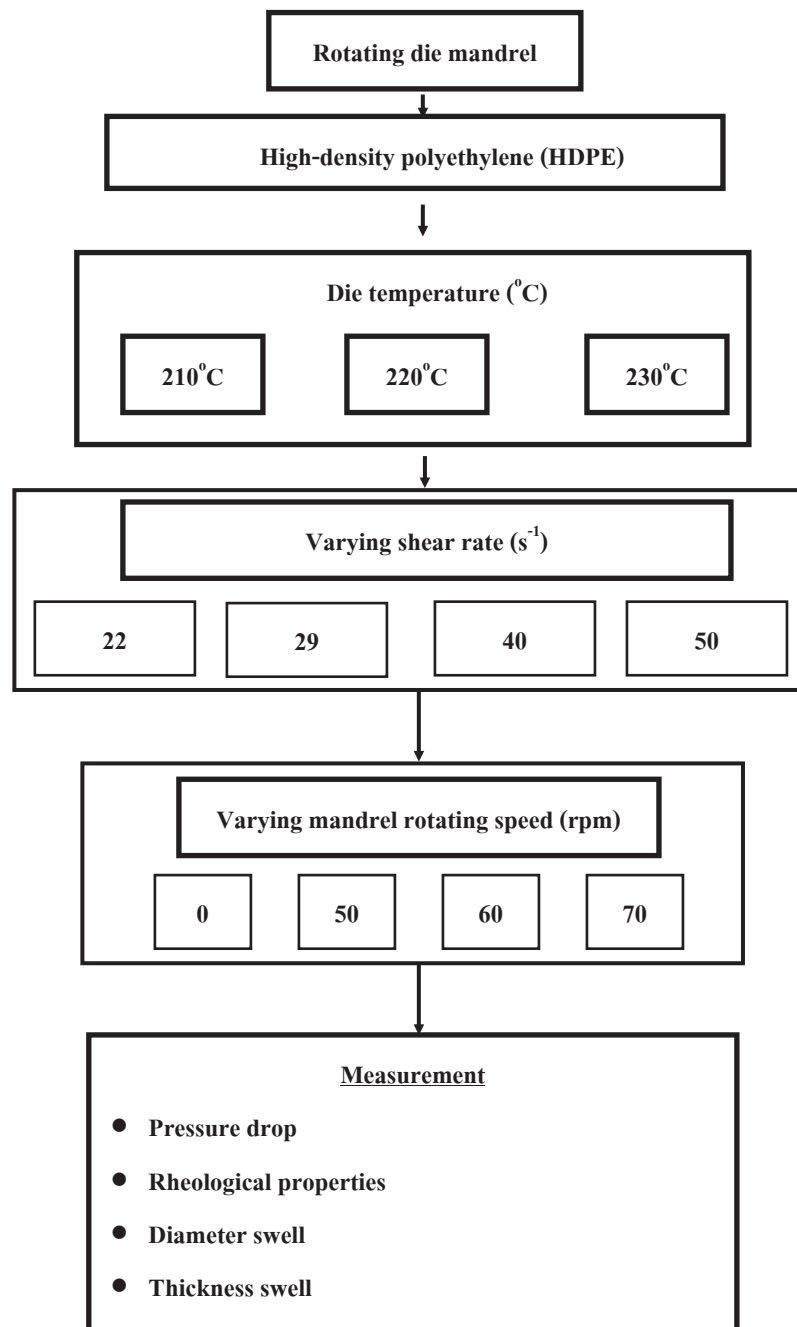
4.2.3. ระบบตรวจวัดค่าความดันตกคร่อม(Pressure Drop) ด้วยอุปกรณ์เก็บข้อมูลความเร็วสูง (Data Logger)

การเก็บข้อมูลผลการทดลองในงานวิจัยนี้ สามารถตรวจวัดค่าความดันตกคร่อมที่ใช้ในการอัดรีดในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวได้ตามเวลาจริง (Real time) ด้วยระบบการเก็บข้อมูลความเร็วสูง (Data Logger) โดยระบบการตรวจวัดดังกล่าวนี้ทำงานร่วมกับเซ็นเซอร์วัดความดัน Pressure transducer ซึ่งติดตั้งเพื่อตรวจวัดบริเวณทางเข้า Die โดยข้อมูลจาก Sensor จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์เก็บข้อมูล

ความเร็วสูง Data logger และบันทึกข้อมูลการทดลองและแสดงผลข้อมูลด้วยจอแสดงผลของเครื่องคอมพิวเตอร์ในเวลาเดียวกันจาก Software ที่พัฒนาขึ้นเอง

4.3. การออกแบบการทดลองและทดสอบ

รูปที่ 15 แสดงภาพรวมของการออกแบบการทดลองและทดสอบสมบัติต่าง ๆ โดยผลการทดลองที่ได้จะแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของการหมุนหัวขึ้นรูปที่มีผลต่อสมบัติการไหล การเปลี่ยนแปลงของค่าความดันตกคร่อม รวมทั้งพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์ในแบบ Diameter Swell และการบวมตัวแบบ Thickness Swell ที่สภาวะการผลิตต่าง ๆ



รูปที่ 15. ภาพรวมการออกแบบการทดลองและการทดสอบ

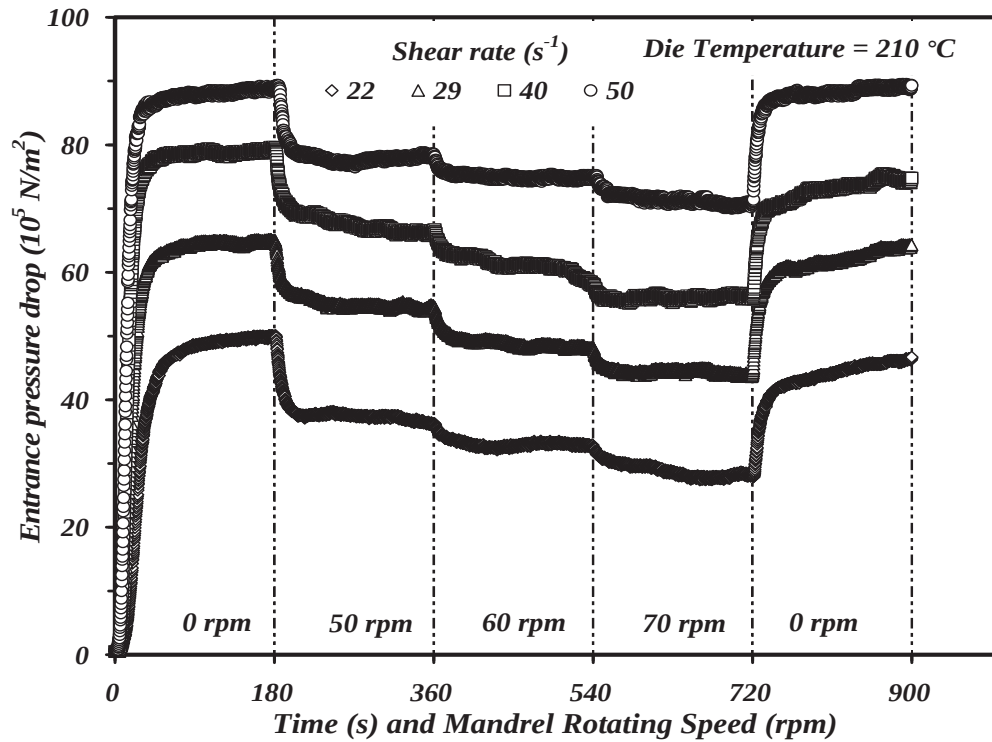
5. ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

5.1. อิทธิพลของการหมุนหัวขึ้นรูปที่มีต่อค่าความดันตกคร่อม(Pressure Drop) ของ HDPE

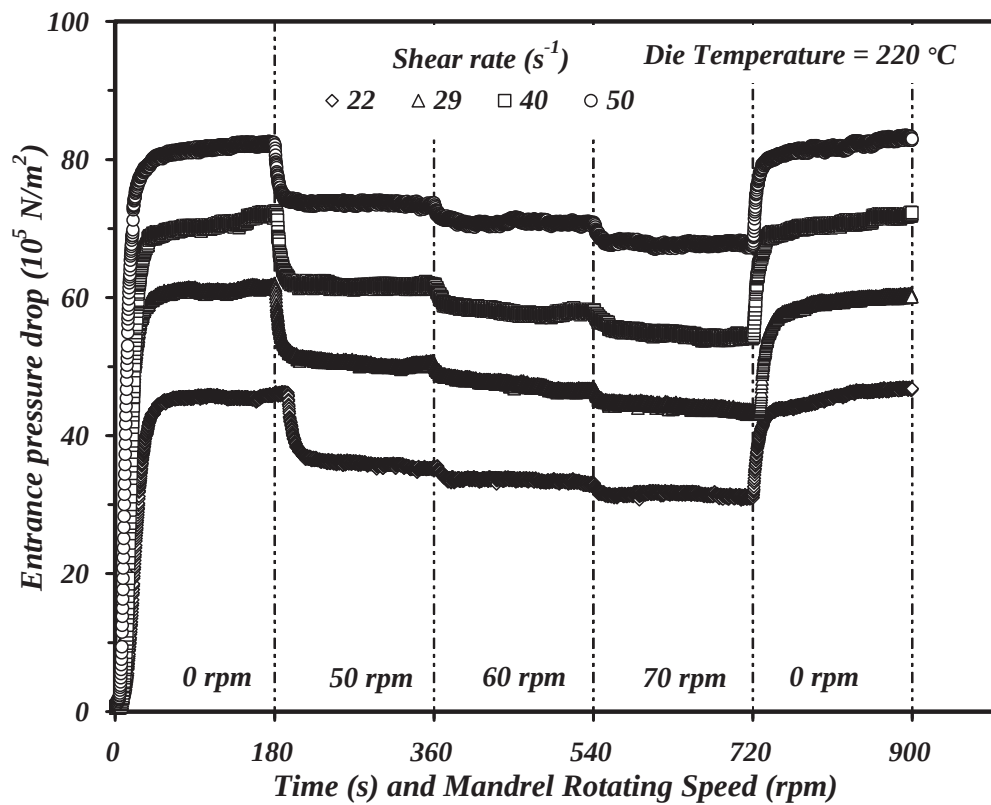
หลอมเหลวที่ถู้อัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน

รูปที่ 16 ถึงรูปที่ 18 แสดงผลการตรวจวัดค่าความดันตกคร่อม(Pressure drop) บริเวณทางเข้าหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนของ HDPE หลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนอนเดี่ยวตามเวลาจริงของการอัดรีด ที่อัตราเลื่อนช่วง 20 s^{-1} , 29 s^{-1} , 40 s^{-1} และ 50 s^{-1} ด้วยความเร็วในการหมุนแท่ง Mandrel เท่ากับ 0 rpm, 50 rpm, 60 rpm และ 70 rpm อุณหภูมิการทดสอบ 210°C , 220°C และ 230°C ตามลำดับ ผลการทดลองโดยทั่วไปพบว่าค่า Pressure drop ที่ตรวจวัดได้ในระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ(0 rpm) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเลื่อนในทุก ๆ อุณหภูมิการทดสอบ เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุนแท่ง Mandrel พบว่าค่า Pressure drop มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนหัวขึ้นรูปจาก 50 rpm, 60 rpm ถึง 70 rpm และเมื่อหยุดหมุนหัวขึ้นรูปพบว่าค่า Pressure drop มีค่าเพิ่มขึ้นมาอยู่ในระดับเดิมก่อนการหมุนหัวขึ้นรูป ปรากฏการณ์ดังกล่าวตรวจพบได้ในทุกอุณหภูมิและทุก ๆ อัตราเลื่อนของการทดสอบ

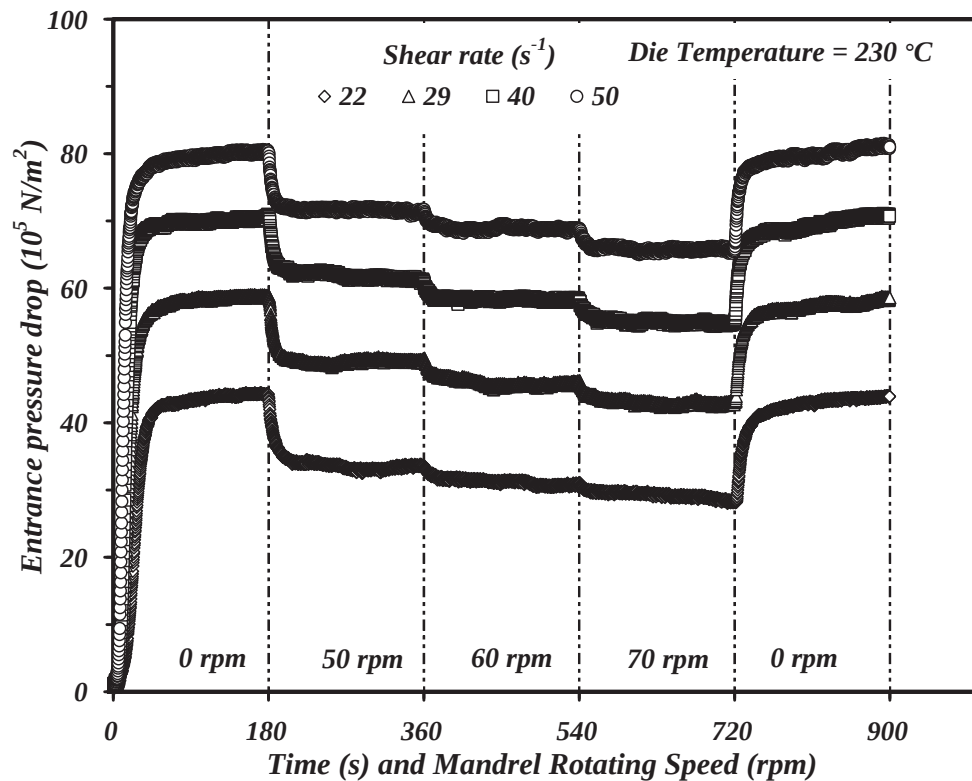
การลดลงของค่า Pressure drop นี้สามารถอธิบายได้ด้วยความแตกต่างกันของรูปแบบการไหลในหัวขึ้นรูปทั้งสองแบบดังแสดงในแบบจำลองรูปแบบการไหลในรูปที่ 19 คือ การไหลในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ(0 rpm) HDPE หลอมเหลวมีรูปแบบการไหลแบบเฉือน(Shear Flow) เนื่องจากว่าไหลอยู่ในช่องการไหลที่มีผิวของแท่ง Mandrel และผิวด้านนอกสุดของหัวขึ้นรูปแบบวงแหวน(D_o)เป็นผนัง ซึ่งค่า Pressure drop ที่เกิดขึ้นในระบบได้รับอิทธิพลมาจากแรงที่อยู่ในแนวแกน(Axial Force, AF) (รูปที่ 19(a)) ในขณะที่การไหลในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนมีรูปแบบการไหลแบบเฉือนร่วมกับรูปแบบการไหลแบบลาก(Drag Flow)ในเวลาเดียวกัน(รูปที่ 19(b)) โดย Drag Flow ดังกล่าวพัฒนาจากการที่ Mandrel เกิดการหมุนแต่ผิวด้านนอกสุดของหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนไม่มีการเคลื่อนที่ซึ่งมีผลทำให้แรงในแนวแกนถูกเบี่ยงเบน(กระจายแรง)ไปในแนวรัศมี(Radial Force, RF) เพื่อใช้ในการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของ HDPE หลอมเหลวไปในแนวรัศมี(Radial Flow) [6,7] การเกิดขึ้นของ Radial Force นี้เองเสมือนเป็นการลดแรงกระทำในแนวแกนที่อยู่ในรูปของความดันของระบบ และเมื่อหยุดหมุนหัวขึ้นรูปค่า Pressure drop ในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นมาอยู่ในระดับเดิม(ก่อนการหมุนหัวขึ้นรูป) แสดงให้เห็นว่าแรงในแนวแกนกลับมามีอิทธิพลต่อค่าความดันทั้งหมดอีกครั้ง เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ไหลใน Die ไม่ได้รับอิทธิพลจากการกระจายแรงไปในแนวรัศมีนั่นเอง



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกคร่อมของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนที่ความเร็วรอบ 0-70 rpm อัตราเฉือน 22 s^{-1} - 50 s^{-1} อุณหภูมิทดสอบ 210 °C

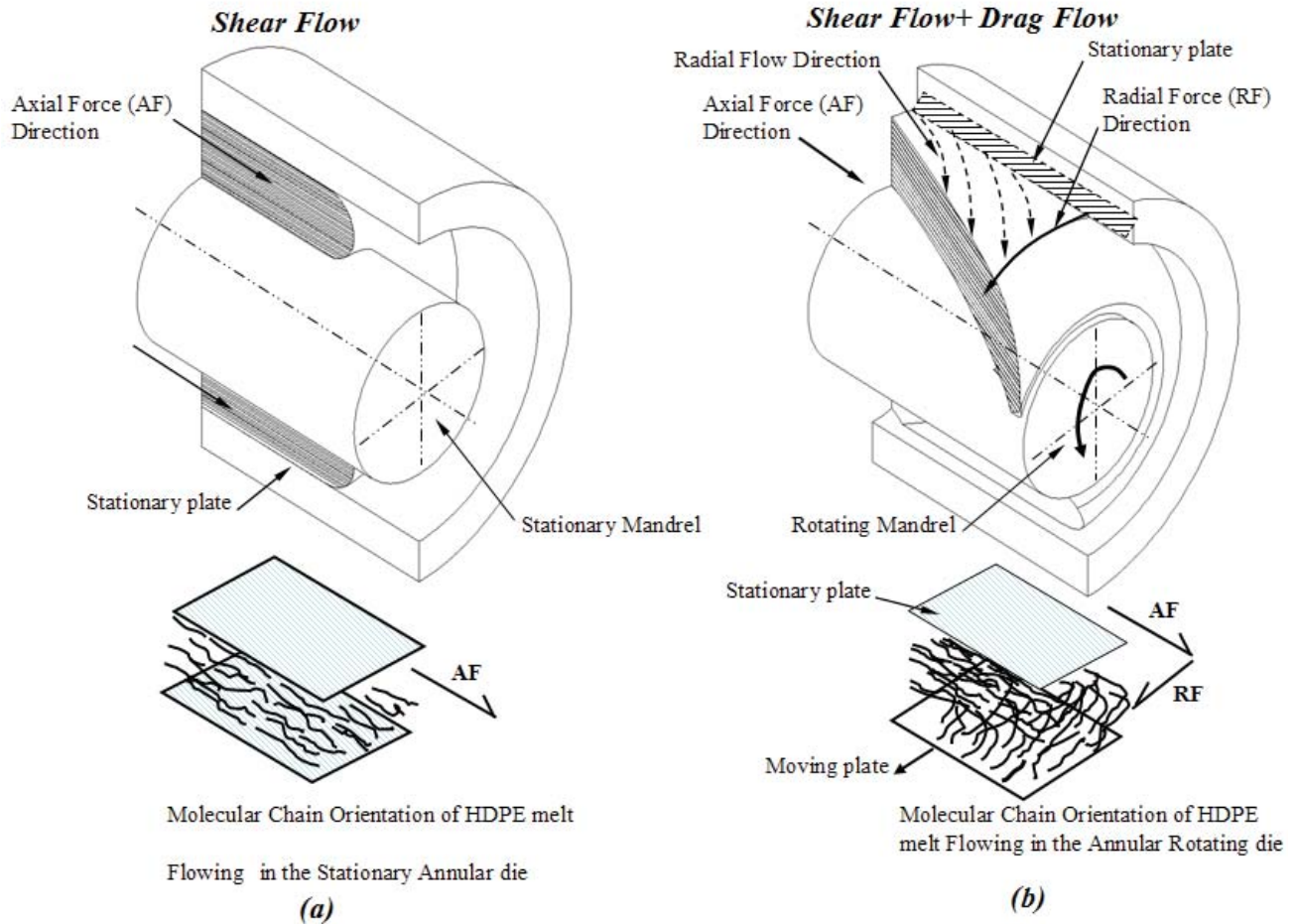


รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกคร่อมของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนที่ความเร็วรอบ 0-70 rpm อัตราเฉือน 22 s^{-1} - 50 s^{-1} อุณหภูมิทดสอบ 220 °C



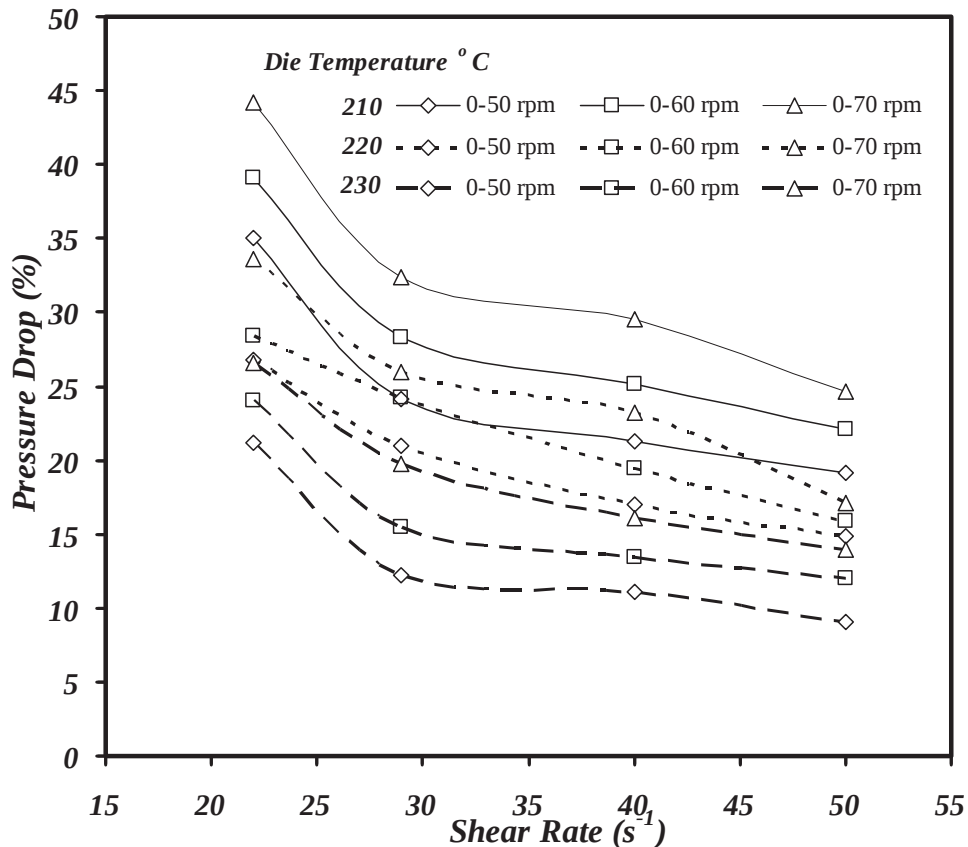
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันตกคร่อมของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนที่ความเร็วรอบ 0-70 rpm อัตราเฉือน 22 s^{-1} - 50 s^{-1} อุณหภูมิทดสอบ 230°C

นอกจากนี้การเปลี่ยนทิศทางของแรง AF ไปในแนวรัศมียังก่อให้เกิดการจัดเรียงตัวใหม่ของสายโซ่โมเลกุล(Molecular chain orientation)ในแนวรัศมีตามแนวแรง RF ดังแสดงในรูปที่ 19 ซึ่งก่อให้เกิดการดึงยืดของสายโซ่โมเลกุลด้วยแรงเฉือน(Shear force)ในสองทิศทาง(AR และ RF) สองทิศทางพร้อมกันทำให้เกิดการเสียดสีกันของสายโซ่โมเลกุลจนเกิดอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Shear heating) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเป็นการเพิ่มขึ้นของสมบัติความเป็นวิสคัส (Viscous Properties) [6]ใน HDPE หลอมเหลว ซึ่งมีผลทำให้ค่าความดันในระบบการอัดรีดลดลงในที่สุด



รูปที่ 19 แสดงแบบจำลองรูปแบบการไหลแบบ Shear Flow ในหัวขึ้นรูปวงแหวนปกติ (a) และรูปแบบการไหลแบบผสม Shear Flow + Drag Flow ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน (b)

รูปที่ 20 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความดันตกคร่อม (Pressure drop) ของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน ซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูป ค่าอัตราเฉือน และอุณหภูมิการทดสอบ โดยพบว่าที่อัตราเฉือนเดียวกันของทุก ๆ อุณหภูมิการทดสอบ เปอร์เซ็นต์ Pressure drop มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูป เช่นที่อุณหภูมิการทดสอบ 210°C อัตราเฉือน 22 s^{-1} ความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป 0-50 rpm มีค่า Pressure drop ที่ 35 % และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูปเป็น 0-60 rpm และ 0-70 rpm พบว่า Pressure drop มีค่าเพิ่มขึ้น 40 % และ 45 % ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มความเร็วการหมุน Die (แท่ง Mandrel) เสมือนเป็นการเพิ่มการกระจายแรงในแนวแกนไปในแนวรัศมีให้มากขึ้นตามสัดส่วนความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูปที่เพิ่มขึ้น เมื่อแรงในแนวแกนถูกกระจายไปในแนวรัศมีมากขึ้นเป็นผลทำให้ค่า Pressure drop มีค่าลดลงตามสัดส่วนของความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูปเช่นกัน



รูปที่ 20 ความเร็วรอบของการหมุนหัวขึ้นรูปที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความดันตกคร่อมของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน ที่อัตราเฉือน 22 s^{-1} - 50 s^{-1} อุณหภูมิทดสอบ 230°C

เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า Pressure drop ในระบบหัวขึ้นรูปแบบหมุนสามารถตรวจพบมากที่สุดที่อุณหภูมิการทดสอบต่ำ เช่นที่อุณหภูมิการทดสอบ 210°C มีระดับเปอร์เซ็นต์ Pressure drop อยู่ในช่วง 25%-45 % ในขณะที่อุณหภูมิการทดสอบ 230°C มีระดับเปอร์เซ็นต์ Pressure drop ที่ต่ำกว่าอยู่ในช่วง 10 %-25 % เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบทำให้สมบัติความเป็นวิสคัส (Viscous Properties) ของ HDPE หลอมเหลวเพิ่มขึ้น ประกอบกับการหมุนหัวขึ้นรูปยังส่งเสริมให้เกิดการเสียดสีกันของสายโซ่โมเลกุล (Shear Heating) ที่เกิดขึ้นจากแรงในแนวรัศมีที่มากขึ้นตามไปด้วย ผลการวิจัยที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ N-T. Intawong และคณะ [7] ที่พบว่าค่าความดันตกคร่อมที่วัดได้ในหัวขึ้นรูปแบบหมุนมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญในสภาวะที่พอลิเมอร์หลอมเหลวมีความหนืดสูง เช่น พอลิเมอร์ผสมวัสดุเสริมแรง และพอลิเมอร์ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำ

นอกจากนี้ยังพบว่าภายใต้สภาวะการอัดรีดพอลิเมอร์ผ่านหัวขึ้นรูปแบบหมุน เปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือนในทุก ๆ อุณหภูมิทดสอบ ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยใช้สมมติฐานจากการเปลี่ยนแปลงแนวแรงและรูปแบบการไหลคือ จากที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น เรื่องทิศทางของแนวแรงที่ประกอบด้วยแรงในแนวแกนและแรงในแนวรัศมี หากพิจารณาที่ความเร็วรอบการหมุนแท่ง Mandrel ด้วยความเร็วคงที่ค่าหนึ่งมีความหมายเป็นนัยว่าความสามารถในการกระจาย

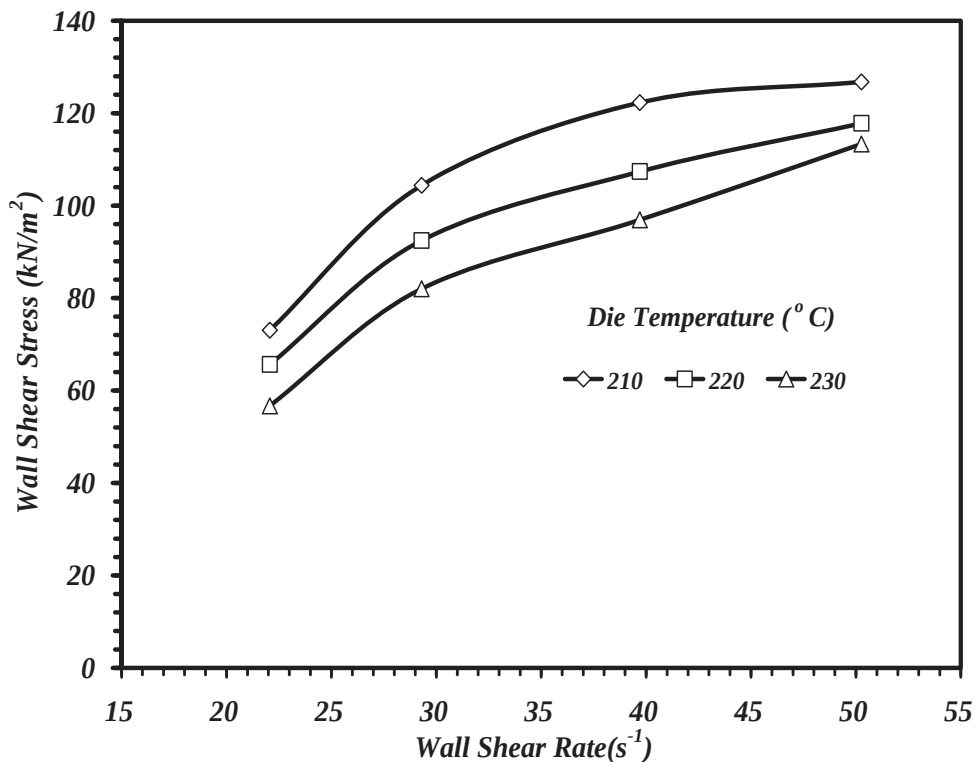
แรงจากแนวแกนไปในแนวรัศมีได้มากที่สุดค่าหนึ่งเช่นกัน และเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน(ในที่นี้คือการเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนสกรูของเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวให้พอลิเมอร์ไหลเร็วขึ้น) เสมือนเป็นการเพิ่มแรงในแนวแกนให้มีค่ามากขึ้น ในขณะที่ความสามารถในการกระจายแรงไปในแนวรัศมีมีค่าเท่าเดิม เช่น ที่อุณหภูมิการทดสอบ 210 °C ณ. ความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป 0-70 rpm มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop ลดลงที่ 45 % ,32 % ภายใต้อัตราเฉือนในช่วง 22 s⁻¹ ถึง 29 s⁻¹ แต่เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนต่อไปจาก 40 s⁻¹ และ 50 s⁻¹ พบว่าค่าค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop มีค่าลดลงไม่แตกต่างกันมากนักที่ 29 % และ 24 % ตามลำดับเท่านั้น โดยตรวจพบได้ในทุก ๆ สถานะการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 20. ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอัตราเฉือนในช่วง 22 s⁻¹ ถึง 29 s⁻¹ การหมุนหัวขึ้นรูปมีผลทำให้เกิดการลดลงของค่า Pressure drop อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด โดยในอีกแง่มุมหนึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงอัตราเฉือนในช่วง 22 s⁻¹ ถึง 29 s⁻¹ การหมุนหัวขึ้นรูปทุกความเร็วรอบและทุก ๆ อุณหภูมิการทดสอบให้ผลในการกระจายแรงในแนวแกนไปในแนวรัศมีมากที่สุด ส่วนการเพิ่มอัตราเฉือนที่มากกว่า 29 s⁻¹ ให้ผลของค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop ที่ต่ำกว่าและไม่แตกต่างกันมากนัก ซึ่งมีผลเนื่องมาจากระบบการไหลอยู่ในสถานะที่ได้รับอิทธิพลจากแรงในแนวแกนมากกว่านั่นเอง

5.2. อิทธิพลของการหมุนหัวขึ้นรูปที่มีต่อสมบัติการไหล(Rheological properties) ของ HDPE

หลอมเหลว

5.2.1. สมบัติการไหลของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบปกติ

รูปที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือน(Shear Stress)กับอัตราเฉือน(Shear Rate)ของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบปกติ ที่อัตราเฉือน 22 s⁻¹ ถึง 50s⁻¹ และอุณหภูมิการทดสอบ 210 °C, 220 °C, และ 230 °C ตามลำดับ ผลการทดลองโดยทั่วไปพบว่า HDPE หลอมเหลวแสดงสมบัติความเป็น non-Newtonian ในพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudoplastic กล่าวคือความหนืดลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นเฉือน(Shear Stress) มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการทดสอบ [8]

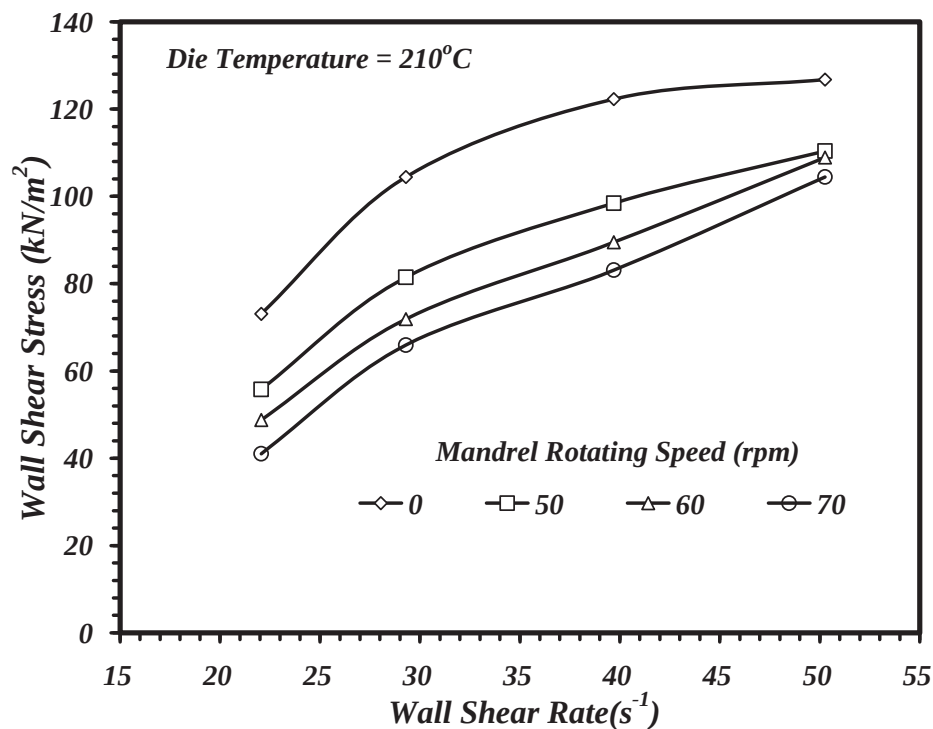


รูปที่ 21. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบปกติที่อุณหภูมิการทดสอบ 210 °C, - 230 °C

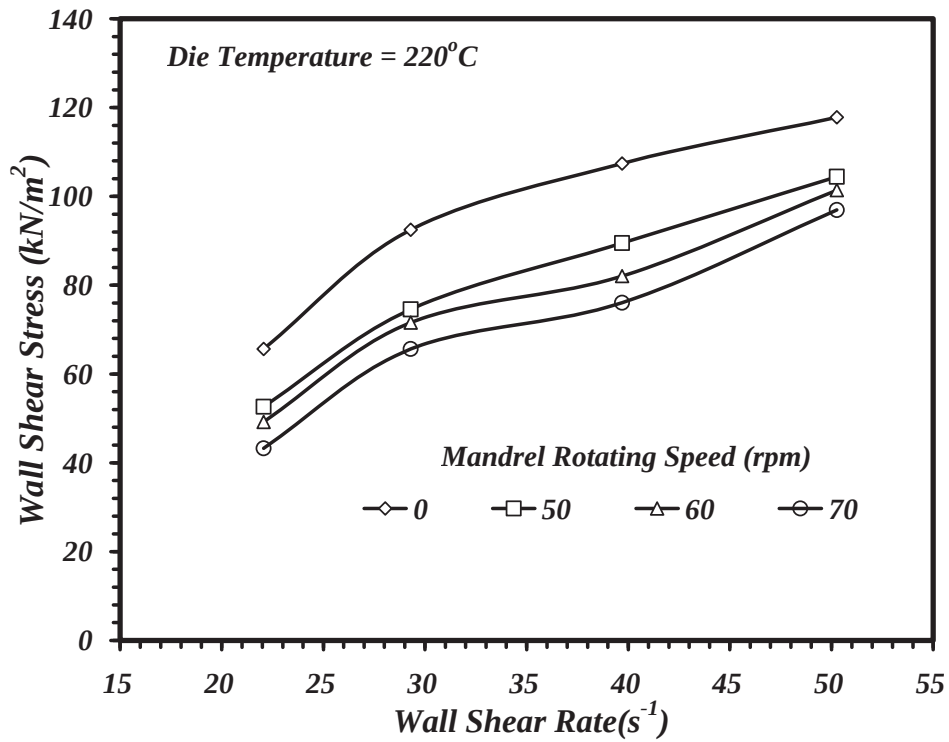
5.2.1. สมบัติการไหลของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน

รูปที่ 22. ถึง รูปที่ 24. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนที่ความเร็วรอบการหมุนแท่ง Mandrel เท่ากับ 50 rpm , 60 rpm และ 70 rpm ที่อัตราเฉือน $22 s^{-1}$ ถึง $50 s^{-1}$ และอุณหภูมิการทดสอบ 210°C, 220°C, และ 230°C ตามลำดับ ผลการทดลองดังกล่าวถูกเปรียบเทียบกับสมบัติการไหลของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบปกติ (0 rpm) โดยทั่วไปพบว่าสมบัติการไหลของ HDPE หลอมเหลวที่ได้จากการทดสอบในหัวขึ้นรูปทั้งสองแบบยังคงแสดงสมบัติความเป็น non-Newtonian ในพฤติกรรมกการไหลแบบ Pseudoplastic โดยค่าความหนืดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือน [9] ในทุก ๆ สถานะอุณหภูมิการทดสอบ เมื่อเปรียบเทียบผลการตรวจวัดสมบัติการไหลของ HDPE หลอมเหลวจากหัวขึ้นรูปทั้งสองพบว่ามีความแตกต่างอย่างชัดเจนกล่าวคือ ค่าอัตราเฉือนที่ตรวจวัดได้จากหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนมีค่าต่ำกว่าที่ตรวจวัดได้จากหัวขึ้นรูปแบบปกติ และที่อัตราเฉือนเดียวกันค่าอัตราเฉือนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความเร็วในการหมุนหัวขึ้นรูปวงแหวนในทุก ๆ สถานะอุณหภูมิการทดสอบ เช่น ในสถานะอุณหภูมิการทดสอบ 210 °C ที่ค่าอัตราเฉือน $22 s^{-1}$ พบว่าค่าความเค้นเฉือนที่ตรวจวัดได้ในหัวขึ้นรูปแบบหมุนที่ความเร็วรอบ 50 rpm, 60 rpm และ 70 rpm มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับค่าความเค้นเฉือนในหัวขึ้นรูปแบบปกติประมาณ 27%, 38% และ 43% ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าอัตราเฉือนแปรผันโดยตรงกับค่า Pressure drop ที่เกิดขึ้นในระบบการอัดรีด ซึ่งจากผลการวัดค่าความดันที่ได้กล่าวมา

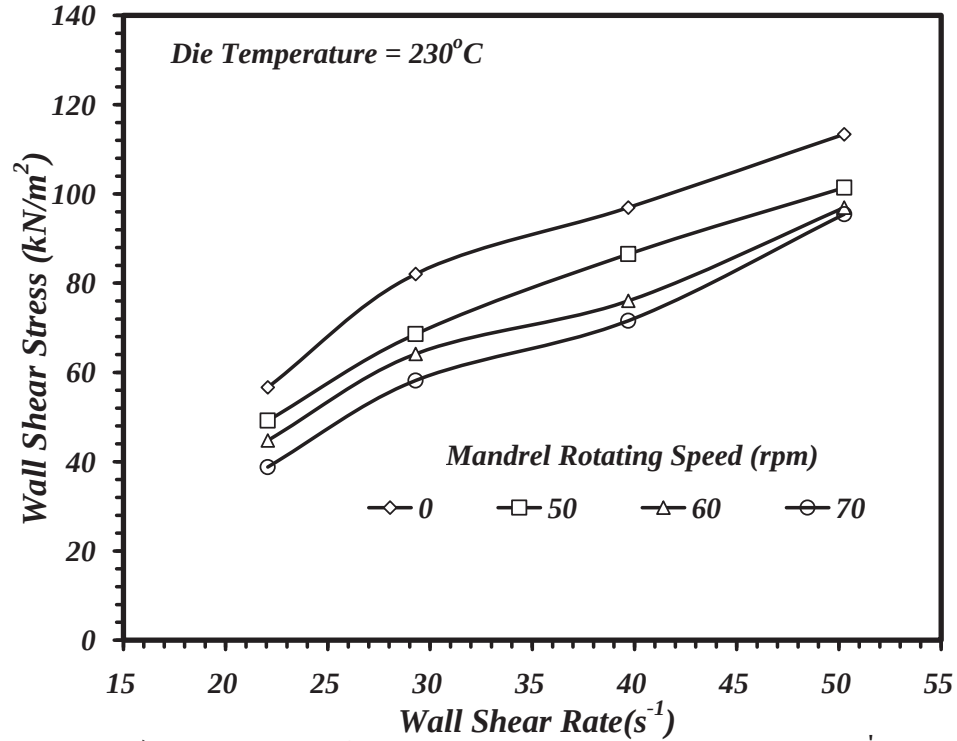
ข้างต้นพบว่าการเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนหัวขึ้นรูปทำให้ค่า Pressure drop มีค่าลดลงในอัตราส่วนเดียวกัน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยเสริมที่ทำให้ค่าอัตราเฉือนมีค่าลดลงตามการเพิ่มความเร็วยรอบการหมุนหัวขึ้นรูปคือ การหมุนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลไปในแนวรัศมี ดังนั้นสายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์ที่ได้รับแรงเฉือนในแนวแกนอยู่แล้วจะถูกแรงเฉือนในแนวตั้งฉากกับทิศทางการไหลไปในเวลาเดียวกัน ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวก่อให้เกิด Shear Heating มากขึ้นกว่าเดิมระหว่างการไหล อันนำมาซึ่งการเพิ่มขึ้นของสมบัติความเป็นวิสคัส (Viscous Properties) ใน HDPE หลอมเหลว โดยมีผลโดยตรงต่อการลดลงของค่าความเค้นเฉือนในที่สุด



รูปที่ 22. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนด้วยความเร็วยรอบการหมุนแท่ง Mandrel ตั้งแต่ 0 rpm ถึง 70 rpm ที่อุณหภูมิการทดสอบ 210 °C



รูปที่ 23. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนด้วยความเร็วรอบการหมุนต่าง Mandrel ตั้งแต่ 0 rpm ถึง 70 rpm ที่อุณหภูมิการทดสอบ 220 °C

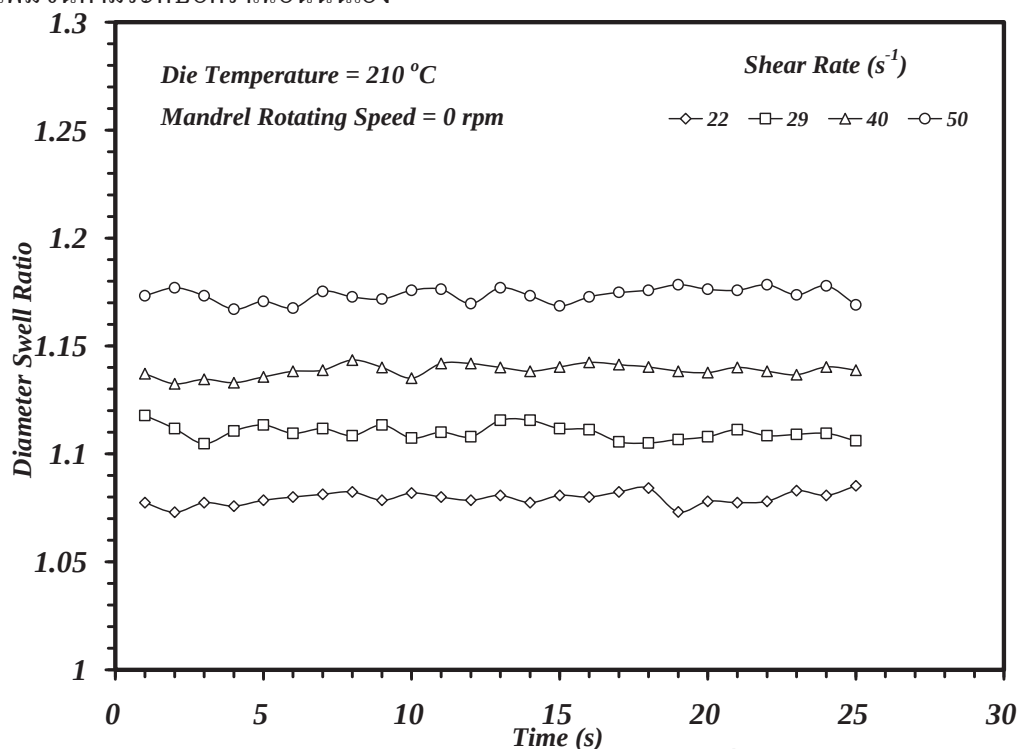


รูปที่ 24. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนด้วยความเร็วรอบการหมุนต่าง Mandrel ตั้งแต่ 0 rpm ถึง 70 rpm ที่อุณหภูมิการทดสอบ 230 °C

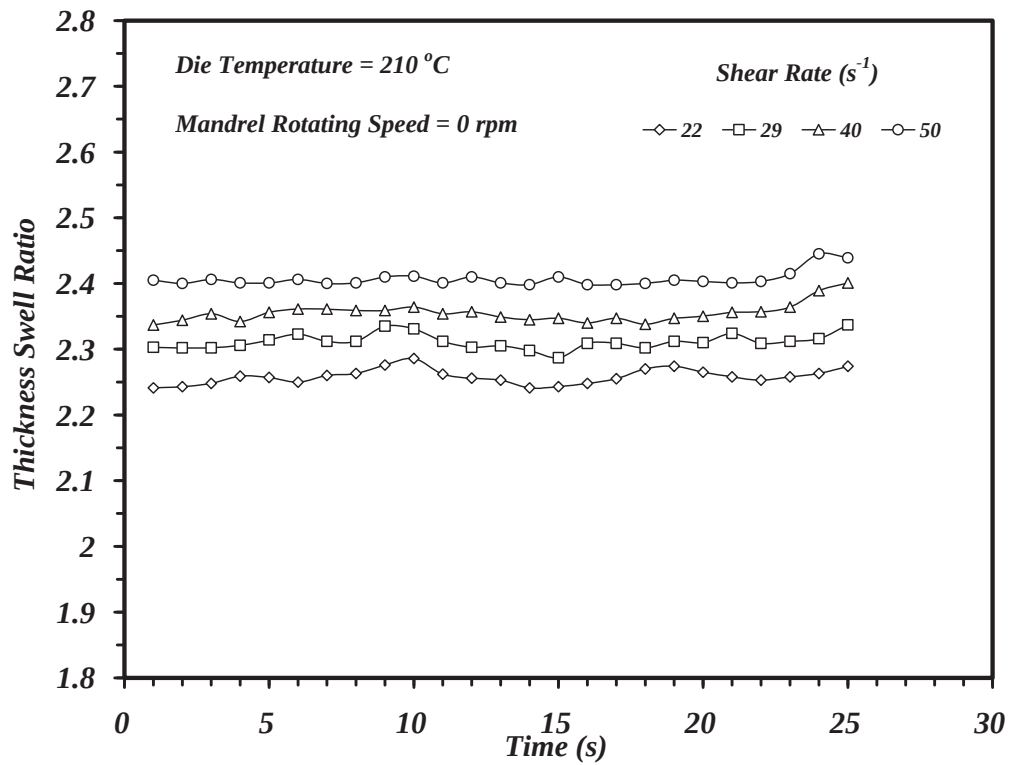
5.3. พฤติกรรมการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ

5.3.1. อิทธิพลของอัตราเฉือนที่มีผลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ

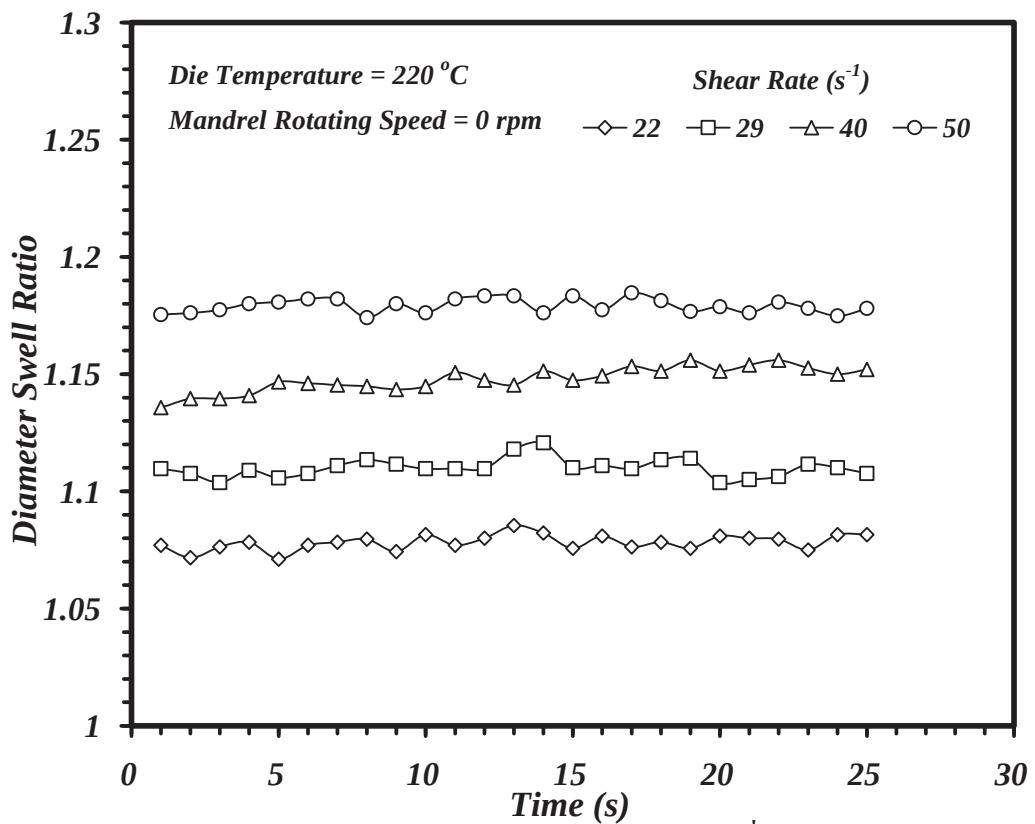
รูปที่ 25. ถึงรูปที่ 30. แสดงพฤติกรรมการบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter Swell) และการบวมตัวแบบความหนา (Thickness Swell) ของ HDPE หลอมเหลวๆ ตามระยะเวลาจริงของการอัดรีดในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ และอุณหภูมิการทดสอบ 210 °C ถึง 230 °C ที่ระดับอัตราเฉือน 22 s⁻¹ ถึง 50 s⁻¹ ผลการทดลองพบว่าการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวทั้งสองรูปแบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราเฉือนในทุก ๆ สภาวะอุณหภูมิการทดสอบโดยสาเหตุของการบวมตัวทั้งสองแบบของ HDPE หลอมเหลวสามารถอธิบายได้ด้วยกลไกการเก็บสะสมพลังงานกล่าวคือ ในขณะที่ HDPE หลอมเหลวไหลอยู่ภายในหัวดายจะถูกแรงเฉือนที่เกิดจากการไหล ซึ่งแรงดังกล่าวนี้จะส่งผลให้การพันกันของสายโซ่โมเลกุลของ HDPE เกิดการคลายตัว (Molecular disentanglement) ในขณะที่ไหลอยู่ในหัวดายและมีการสะสมพลังงานบางส่วนไว้ จากนั้นเมื่อ HDPE หลอมเหลวไหลออกมาบริเวณทางออกหัวขึ้นรูป พลังงานที่สะสมอยู่จะถูกปลดปล่อย โดยพลังงานส่วนนี้จะถูกใช้ในการคืนสภาพของสายโซ่โมเลกุลของ HDPE หลอมเหลวกลับสู่การม้วนพันกัน (Molecular entanglement) ดังเดิมในขณะที่ไหลออกมาจากหัวขึ้นรูป [10] และส่งผลให้เกิดการบวมตัวในที่สุด[2,3] ดังนั้นหากเพิ่มอัตราเฉือน(เพิ่มแรงในการอัดรีด) เสมือนเป็นการเพิ่มระดับการสะสมพลังงานให้กับ HDPE หลอมเหลวให้มากขึ้นและเมื่อพลังงานที่สะสมอยู่จะถูกปลดปล่อยออกมาภายหลังถูกอัดรีดพ้นจากหัวขึ้นรูปย่อมแสดงออกให้เห็นในรูปแบบของการบวมตัวที่เพิ่มขึ้นตามระดับอัตราเฉือนนั่นเอง



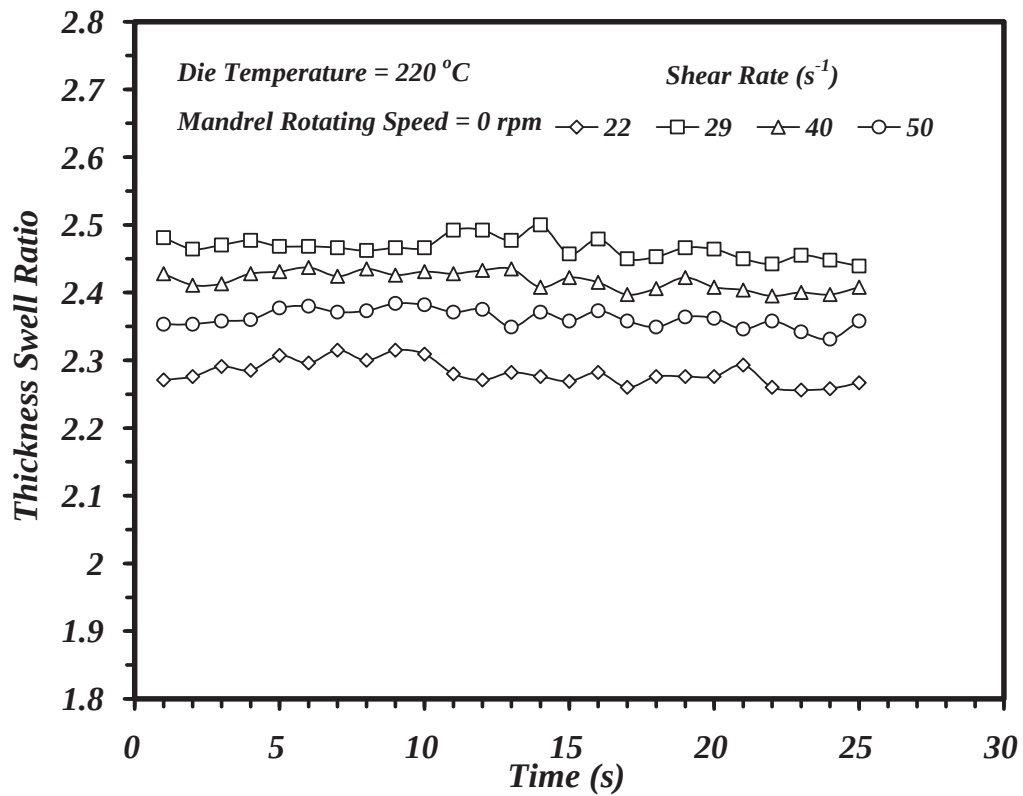
รูปที่ 25. การบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลางของ HDPE หลอมเหลว ที่ระดับอัตราเฉือนต่าง ๆ ตามระยะเวลาจริงของการอัดรีดในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบ 210 °C



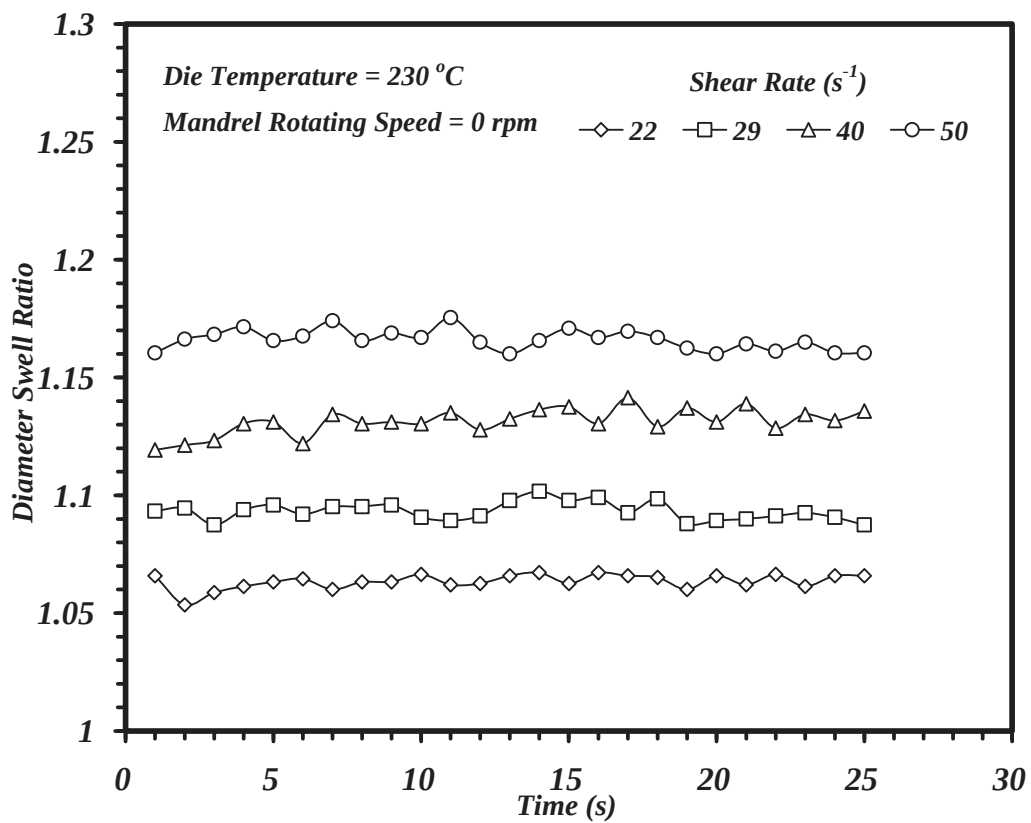
รูปที่ 26. การบวมตัวแบบความหนาของ HDPE หลอมเหลวที่ระดับอัตราเฉือนต่าง ๆ ตามระยะเวลาจริงของการอัดรีดในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบ 210 °C



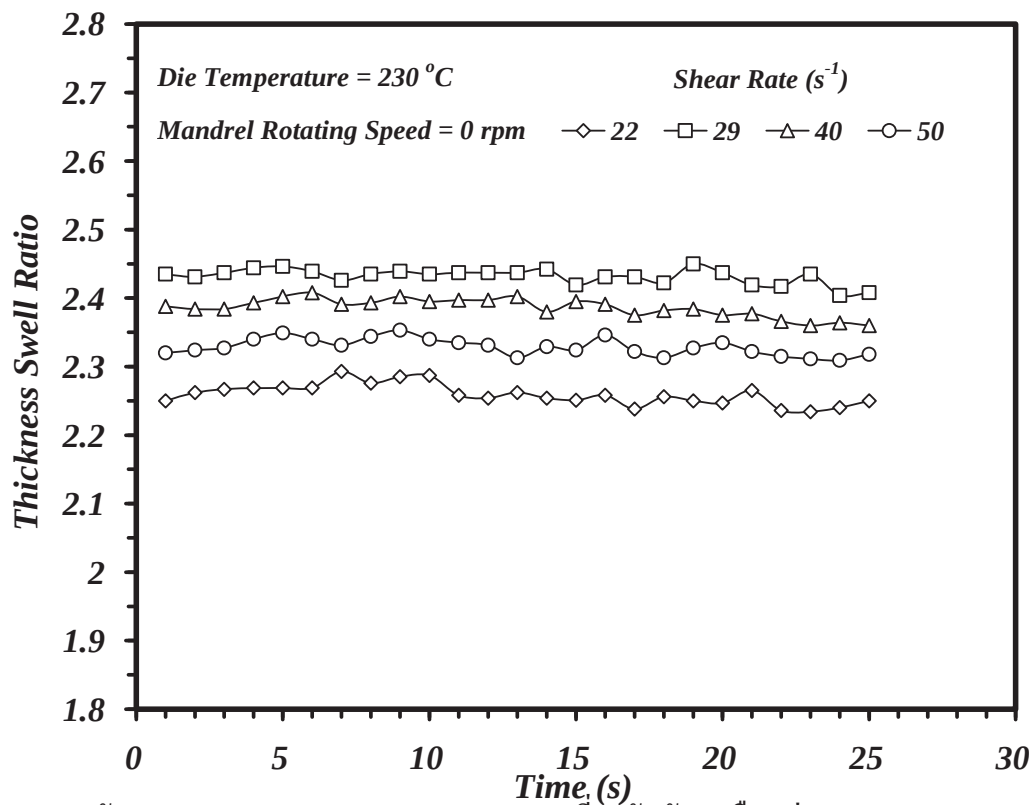
รูปที่ 27. การบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ HDPE หลอมเหลว ที่ระดับอัตราเฉือนต่าง ๆ ตามระยะเวลาจริงของการอัดรีดในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบ 220 °C



รูปที่ 28. การบวมตัวแบบความหนาของ HDPE หลอมเหลวที่ระดับอัตราเฉือนต่าง ๆ ตามระยะเวลาจริงของการอัดรีดในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบ 220 °C



รูปที่ 29. การบวมตัวแบบเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของ HDPE หลอมเหลว ที่ระดับอัตราเฉือนต่าง ๆ ตามระยะเวลาจริงของการอัดรีดในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบ 230 °C



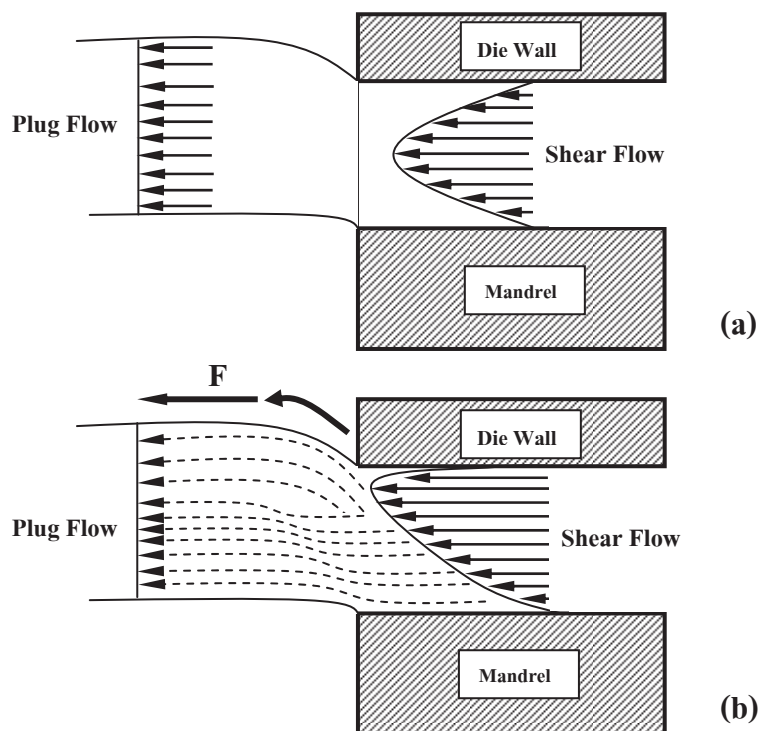
รูปที่ 30. การบวมตัวแบบความหนาของ HDPE หลอมเหลวที่ระดับอัตราเฉือนต่าง ๆ ตามระยะเวลาจริงของการอัดรีดในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ ที่อุณหภูมิการทดสอบ 230 °C

5.3.2. พฤติกรรมการบวมแบบ Diameter Swell และแบบ Thickness Swell ของ HDPE

หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ

ผลการทดลองพบว่าการบวมตัวแบบ Diameter Swell มีค่าต่ำกว่าการบวมตัวแบบ Thickness Swell ในทุก ๆ อุณหภูมิทดสอบ โดยการบวมตัวแบบ Diameter Swell อยู่ในช่วง 1-1.2 ในขณะที่การบวมตัวแบบ Thickness Swell มีค่าอยู่ในช่วง 2.2-2.5 ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากแบบจำลองการพัฒนารูปแบบการไหล (Flow Development) ในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนตามรูปที่ 31. จะเห็นได้ว่ารูปแบบการไหลภายในหัวขึ้นรูปเป็นแบบเฉือน (Shear Flow) ที่มีความเร็วสูงสุดในบริเวณส่วนกลางช่องการไหลและต่ำสุดที่ผนัง และหลังจาก HDPE หลอมเหลวไหลพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูปแล้วจะมีลักษณะการไหลแบบอิสระ (Free Flow) ส่วนรูปแบบการไหลจะพัฒนาเป็น Plug Flow ด้วยการปรับความเร็วบริเวณผนังให้เท่ากับความเร็วบริเวณส่วนกลางช่องการไหลดังแสดงในรูปที่ 31 (a) [11,12] แต่เนื่องจากเครื่องมือทดลองที่ได้จัดสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ได้จำลองจากกระบวนการผลิตท่อ (Pipe Extrusion Process) ดังนั้นชิ้นงาน HDPE หลอมเหลวที่ไหลพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูปจะถูกดึงด้วยแรง (F) จากระบบลำเลียงชิ้นงานด้วยความเร็วคงที่ตลอดเวลาการอัดรีด ทำให้ขนาดภายนอกของชิ้นงานถูกควบคุมด้วยแรงที่ใช้ในการดึงชิ้นงาน ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ขนาดภายนอกของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงมากนักซึ่งแสดงให้เห็นในรูปของ Diameter Swell ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการบวมตัวแบบ Thickness Swell

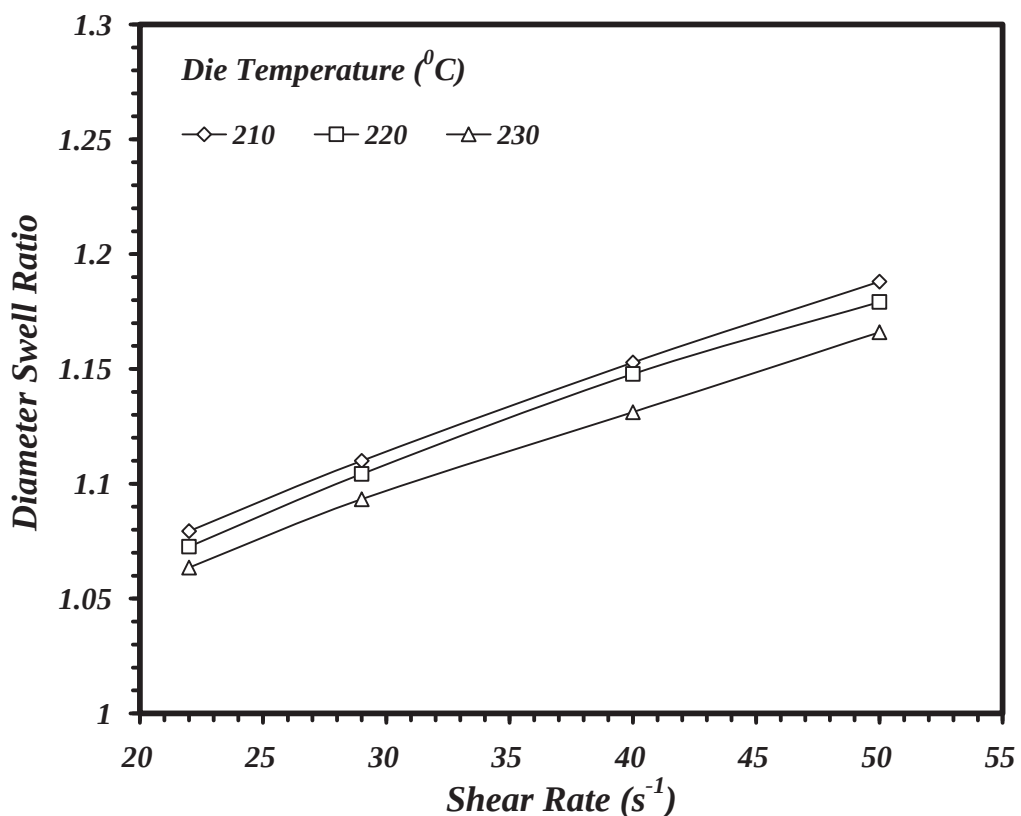
สำหรับการการบวมตัวแบบ Thickness Swell การที่ชิ้นงาน HDPE หลอมเหลวถูกดึงภายหลังจากถูกอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูปจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็วของ HDPE หลอมเหลวภายในช่องการไหลดังแสดงในรูปที่ 31 (b) กล่าวคือ ความเร็วของ HDPE หลอมเหลวบริเวณผนัง (Die Wall) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ HDPE หลอมเหลวบริเวณผนังของแกน Mandrel ต้องเร่งความเร็วเพื่อปรับความเร็วการไหลให้เท่ากันในรูปแบบ Plug Flow ภายหลังจากไหลพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูป การเร่งความเร็วของ HDPE หลอมเหลวดังกล่าวนี้ก่อให้เกิดปรากฏการณ์ที่สนับสนุนให้ค่าการบวมตัวแบบ Thickness Swell มีค่ามากขึ้นอยู่ 2 ปัจจัยคือ ปัจจัยที่หนึ่ง การเร่งความเร็วทำให้เกิดการดึงยืดตัวของสายโซ่โมเลกุลขณะไหล (Molecular disentanglement) ในปริมาณที่มากขึ้นบริเวณผนังด้านแท่ง Mandrel ดังนั้นพลังงานที่สะสมเพิ่มขึ้นดังกล่าวนี้ได้ถูกใช้ในการคืนสภาพของสายโซ่โมเลกุลของ HDPE หลอมเหลวยอมก่อให้เกิดการบวมตัวทางด้านความหนาที่มากขึ้น คำอธิบายดังกล่าวนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yue Mu และคณะ [13] ที่ได้ศึกษาการกระจายตัวของความเค้นเฉือน (Shear Stress Distributions) ระหว่างที่ LDPE หลอมเหลวไหลในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ FES/BPNN/NSGA-II จำลองภาพสามมิติการกระจายตัวของค่าความเค้นเฉือนที่พบที่เกิดขึ้นมากที่สุดบริเวณผิวด้านแท่ง Mandrel ปัจจัยที่สองคือ การที่ HDPE หลอมเหลวบริเวณผนังด้านแท่ง Mandrel เร่งความเร็วให้เท่ากับ HDPE หลอมเหลวบริเวณ Die wall มีผลทำให้เกิดการชะลอความเร็วเพื่อปรับให้เท่ากัน (Plug Flow) ภายหลังจากถูกอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูป การชะลอตัวของ HDPE หลอมเหลวนี้เองมีผลทำให้เกิดการไหลสะสมบริเวณทางออกหัวขึ้นรูป [12] ซึ่งเป็นสาเหตุของการเพิ่มความหนาของชิ้นงานอันนำมาซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าการบวมตัวแบบ Thickness Swell ในที่สุด



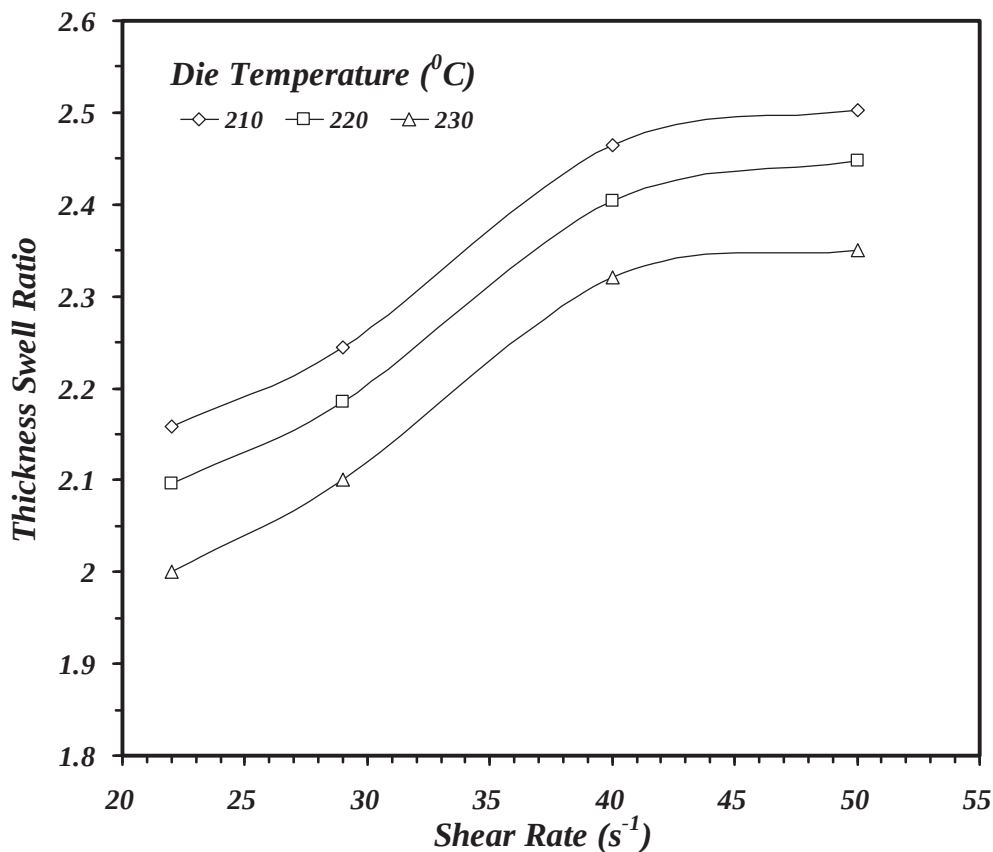
รูปที่ 31. แบบจำลองการพัฒนาการไหล (Flow Development) ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ

5.3.3. อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ

รูปที่ 32 ถึงรูปที่ 33 แสดงพฤติกรรมการบวมตัวแบบ Diameter Swell และแบบ Thickness Swell ของ HDPE หลอมเหลว ที่อัตราเฉือน 22 s^{-1} ถึง 50 s^{-1} อุณหภูมิการทดสอบ 210°C , 220°C และ 230°C ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าระดับค่าการบวมตัวแบบ Thickness Swell ยังมีค่าสูงกว่าการบวมตัวแบบ Diameter Swell และที่อัตราเฉือนเดียวกันการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวทั้งสองรูปแบบมีค่าลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิของหัวขึ้นรูป ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิหัวขึ้นรูปทำให้สมบัติความเป็นวิสคัสของ HDPE หลอมเหลวขณะไหลในหัวขึ้นรูปเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ โดยแสดงให้เห็นในลักษณะการลดลงของค่าความเค้นเฉือน (Shear Stress) ที่ตรวจวัดได้ในรูปผลการทดลองที่ 21 ซึ่งการลดลงของค่าความเค้นเฉือนนี้เองเสมือนเป็นการลดการสะสมพลังงานอีลาสติก (Elastic Energy) ของ HDPE หลอมเหลวขณะไหลในหัวขึ้นรูปลง จึงไม่ส่งผลต่อขนาดการบวมตัวของชิ้นงานมากนัก



รูปที่ 33 แสดงพฤติกรรมการบวมตัวแบบ Diameter Swell ของ HDPE หลอมเหลว ที่อัตราเฉือน 22 s^{-1} ถึง 50 s^{-1} อุณหภูมิการทดสอบ 210°C , 220°C และ 230°C



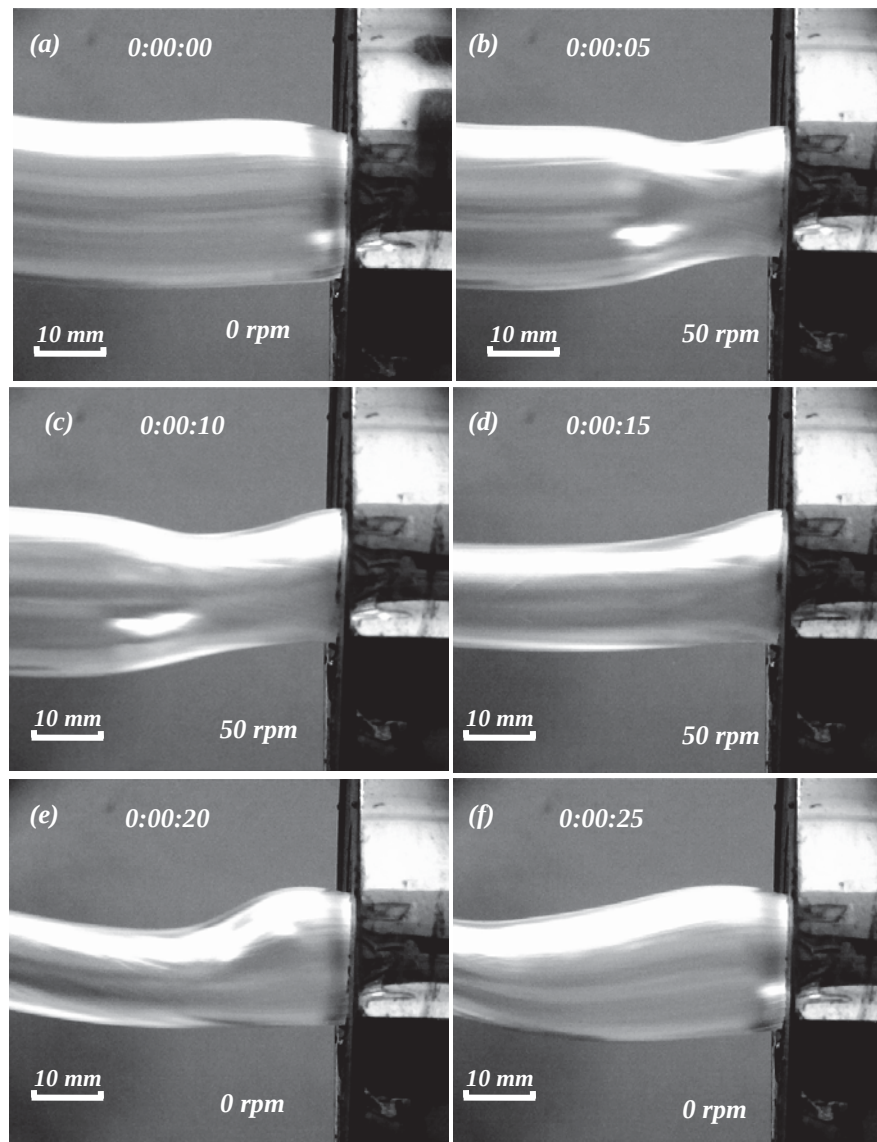
รูปที่ 34 แสดงพฤติกรรมการบวมตัวแบบ Thickness Swell ของ HDPE หลอมเหลว ที่อัตราเฉือน $22 s^{-1}$ ถึง $50 s^{-1}$ อุณหภูมิการทดสอบ $210^{\circ}C$, $220^{\circ}C$ และ $230^{\circ}C$

5.4. พฤติกรรมการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน

5.4.1. ลักษณะทั่วไปของแท่ง HDPE พาริสัน (HDPE Parison) ที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน

รูปที่ 35 แสดงการพัฒนารูปร่างแท่ง Parison ภายใต้สภาวะที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกสุดเท่ากับ 20 mm ที่ความเร็วรอบเท่ากับ 0-50 rpm อัตราเฉือน $22 s^{-1}$ และอุณหภูมิการทดสอบ $210^{\circ}C$ โดยทำการบันทึกภาพด้วยกล้อง VDO ความละเอียดสูงตามเวลาจริงของการอัดรีดเริ่มตั้งแต่ความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูปเท่ากับ 0 rpm (หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ) ใช้เวลาของการบันทึกภาพทั้งหมด 25 วินาที จากภาพผลการทดลองที่ได้พบว่ารูปร่างของ แท่ง Parison มีการเปลี่ยนแปลงขนาดอย่างเห็นได้ชัดระหว่างถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน โดยจากรูปที่ 35 (a) คือช่วงเริ่มต้นก่อนการหมุนหัวขึ้นรูปโดยแท่ง Parison ถูกอัดรีดออกมาจากหัวขึ้นรูปแบบปกติที่ 0 rpm ซึ่งวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางได้เท่ากับ 23.2 mm จากนั้นเริ่มต้นหมุนแท่ง Mandrel ด้วยความเร็วรอบ 50 rpm พบว่าขนาดของ แท่ง Parison มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 5 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 35 (b) จากนั้นขนาดของแท่ง Parison มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจนมีขนาดคงที่ค่าหนึ่งถึง 14.5

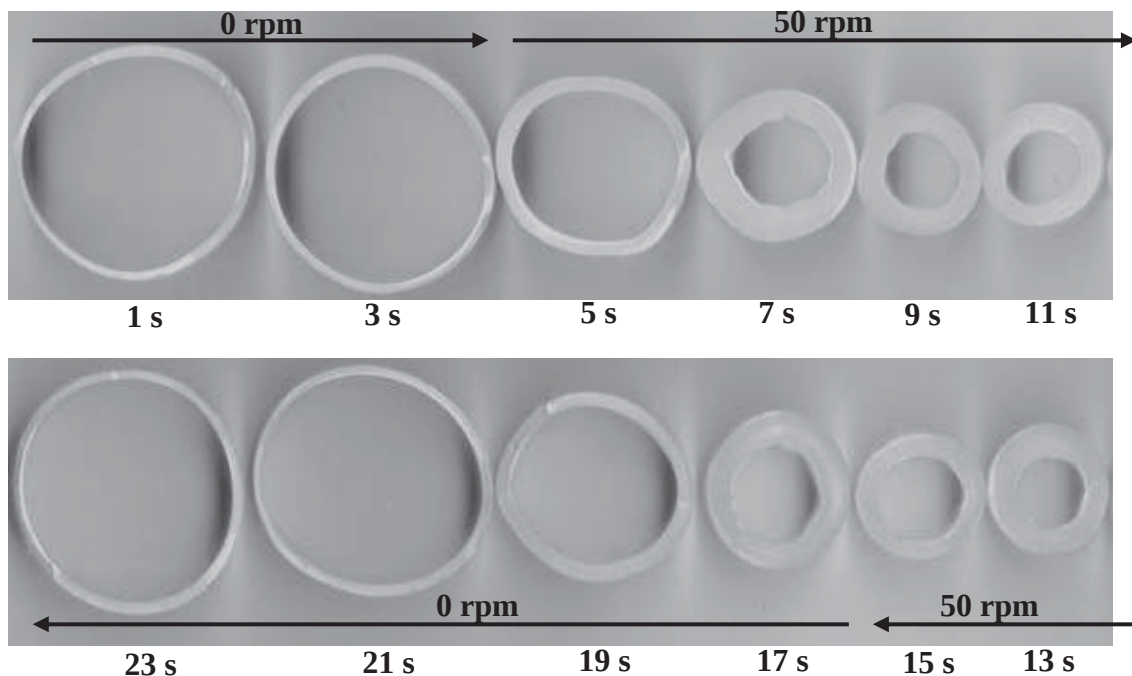
mm ในช่วงระยะเวลาการทดลองที่ 15 วินาทีจึงหยุดหมุนหัวขึ้นรูปดังแสดงในรูปที่ 35 (c-d) และหลังจากหยุดหมุนหัวขึ้นรูปพบว่าขนาดของแท่ง Parison มีการปรับขนาดกลับมาเท่ากับขนาดเดิมก่อนการหมุนหัวขึ้นรูปที่เวลา 20 วินาทีดังแสดงในรูปที่ 35 (e) และมีการปรับขนาดอย่างต่อเนื่องไปสู่ขนาดเดิมเท่ากับ 23.2 mm ซึ่งเป็นขนาดก่อนเริ่มต้นหมุนหัวขึ้นรูปแสดงในรูปดังแสดงในรูปที่ 35 (f) ปรากฏการณ์ที่เกิดดังกล่าวนี้ขึ้นก่อนให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการบวมตัวทั้งในแบบ Diameter Swell และแบบ Thickness Swell ของ แท่ง Parison อย่างมีนัยสำคัญซึ่งได้อธิบายในหัวข้อผลการทดลองต่อไป



รูปที่ 35. ลำดับการพัฒนารูปร่างของแท่ง HDPE Parison ภายใต้สภาวะที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน

5.4.2. พฤติกรรมการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน

รูปที่ 36. แสดงภาพพื้นที่หน้าตัดของแท่ง Parison ที่ตัดจากชิ้นงานทดสอบในตำแหน่งที่สัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการอัดรีดโดยเลือกมาทั้งหมด 12 ชิ้นงาน จากสภาวะการทดสอบที่ความเร็วรอบการหมุนแท่ง Mandrel เท่ากับ 50 rpm อัตราเลื่อน 22 s^{-1} และอุณหภูมิการทดสอบ 210°C ผลการทดลองพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของชิ้นงานมีขนาดลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูปไปที่ 50 rpm ในขณะที่ชิ้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และหลังจากหยุดหมุนหัวขึ้นรูปพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของชิ้นงานมีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนมีขนาดเท่ากับขนาดก่อนการหมุนหัวขึ้นรูป รวมทั้งความหนาของชิ้นงานมีขนาดลดลงตามไปด้วยเช่นกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวตรวจพบได้ในการทดลองทุกสภาวะการทดสอบ



รูปที่ 36. แสดงภาพพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน HDPE ที่ตัดจากชิ้นงานทดสอบในตำแหน่งที่สัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการอัดรีด

การเปลี่ยนแปลงขนาดของแท่ง Parison ภายใต้สภาวะการอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบหมุนดังกล่าวนี้มีผลกระทบโดยตรงต่อพฤติกรรมการบวมตัวทั้งในแบบ Diameter Swell และแบบ Thickness Swell อย่างมีนัยสำคัญ ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองในรูปที่ 37 ถึง รูปที่ 41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการบวมตัวทั้งในแบบ Diameter Swell และแบบ Thickness Swell ของแท่ง Parison ที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนในเวลา 0 วินาที ถึง 25 วินาที ที่ความเร็วรอบการหมุนแท่ง Mandrel เท่ากับ 0 rpm, 50 rpm, 60 rpm และ 70 rpm ที่อัตราเลื่อน 22 s^{-1} , 29 s^{-1} , 40 s^{-1} และ 50 s^{-1} ตามลำดับ โดยเลือกอุณหภูมิการทดสอบที่ 210°C ประกอบการอธิบาย ผลการทดลองโดยทั่วไปพบว่าเมื่อเริ่มต้นหมุนหัว

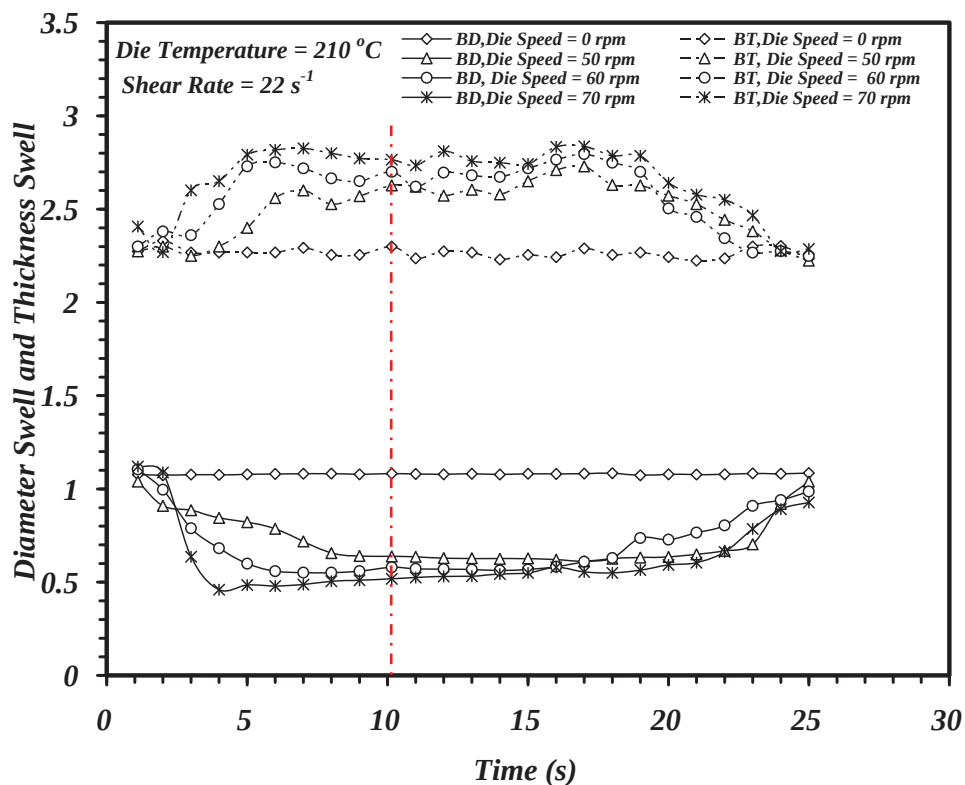
ขึ้นรูปการบวมตัวทั้งสองแบบมีการเปลี่ยนแปลงทันทีภายใน 5 วินาที จากนั้นมีระดับคงที่ต่อเนื่องไปจนถึงระยะเวลาการทดสอบที่ 20 วินาที(หยุดการหมุนหัวขึ้นรูป) ระดับการบวมตัวทั้งสองแบบมีการปรับค่ามาอยู่ในระดับเดิมภายในช่วงเวลา 5 วินาทีเช่นกัน สำหรับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของการบวมตัวทั้งสองพบว่า การบวมตัวแบบ Diameter Swell มีค่าลดลงเมื่อถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบหมุน ในขณะที่การบวมตัวแบบ Thickness Swell มีค่าเพิ่มขึ้นในทุก ๆ ความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การบวมตัวในหัวขึ้นรูปแบบปกติ พบการบวมตัวทั้งสองแบบระดับการบวมตัวไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาของแท่ง Parison ตามผลการทดลองในรูปที่ 36 นอกจากนี้ยังพบว่าที่อัตราเร็วเดียวกันค่าการบวมตัวแบบ Diameter Swell มีค่าลดลงตามการเพิ่มความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูป ในขณะที่การบวมตัวแบบ Thickness Swell ให้ผลในทางกลับกันคือการบวมตัวมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูป เช่นที่ อัตราเร็ว 22 s⁻¹ ค่าเริ่มต้นของการบวมตัวแบบ Diameter Swell และแบบ Thickness Swell คือ 1.1 และ 2.3 ตามลำดับ พิจารณาที่ระยะเวลาการทดสอบ 10 วินาทีภายใต้สภาวะการหมุนหัวขึ้นรูปที่ 50 rpm, 60 rpm และ 70 rpm การบวมตัวแบบ Diameter Swell มีค่าลดลงที่ 0.63, 0.58, และ 0.51 ในขณะที่การบวมตัวแบบ Thickness Swell มีค่าการบวมตัวเพิ่มขึ้นที่ 2.63, 2.7, และ 2.77 ตามลำดับ

พฤติกรรมของการบวมตัวที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถอธิบายได้คือ จากรูปที่ 41 แสดงแบบจำลองการเปลี่ยนแปลงทิศทางการไหลของ HDPE หลอมเหลวขณะไหลในหัวขึ้นรูปแบบหมุน จากแบบจำลองจะเป็นได้ว่าเมื่อทำการหมุนหัวขึ้นความเร็วของพอลิเมอร์บริเวณผิวของแท่ง Mandrel แปรผันตามค่าความเร็วเชิงมุมตามสมการ $v = \omega R$ (ω แปรผันตามค่าการปรับความเร็วรอบ Mandrel) ในขณะที่ HDPE หลอมเหลวที่อยู่บริเวณผนังด้านนอกสุดของหัวขึ้นรูปวงแหวนมีความเร็วเท่ากับศูนย์ ทำให้ระหว่างการไหลมีความเร็วแตกต่างกันสองตำแหน่งทำให้ HDPE หลอมเหลวที่อยู่ในบริเวณผนังเกิดการไหลขวาง (Crossflow) (Christodoulou, K.J) [14]จากผนังมายังบริเวณที่มีความเร็วสูงกว่าคือบริเวณผิวของ Mandrel หรือการหมุน Mandrel ในรูปแบบการไหลแบบหมุนวน (Spiral Form)จากผนังด้านนอกเข้ามารวมกันในบริเวณส่วนกลางช่องการไหล ซึ่งมีผลทำให้ผนังของชิ้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องภายหลังจากไหลพ้นออกมาจากหัวขึ้นรูป และในขณะเดียวกันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของแท่ง Parison มีขนาดลดลงเพื่อปรับปริมาตรการไหล (Volumetric Flow Rate, Q) ให้สมดุลในขณะไหล โดยคำอธิบายดังกล่าวนี้ยืนยันได้จากผลการวัดขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงาน HDPE ที่ผ่านการอัดรีดจากหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ (0 rpm) เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ผ่านการอัดรีดที่ความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป 50 rpm อุณหภูมิทดสอบ 210 °C ที่อัตราเร็วต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 42. กล่าวคือจากสมการที่ 6 [6] เป็นการคำนวณค่าปริมาตรการไหล (Q) โดยสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัด (A) และความเร็วเฉลี่ย (v) ของพอลิเมอร์หลอมเหลว ตัวแปรที่คงที่คือความเร็วการไหลของพอลิเมอร์ซึ่งเท่ากันเสมอในอัตราเร็วเดียวกัน ดังนั้นหากพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่วัดจากในหัวขึ้นรูปแบบปกติเท่ากับพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานจากหัวขึ้นรูปแบบ

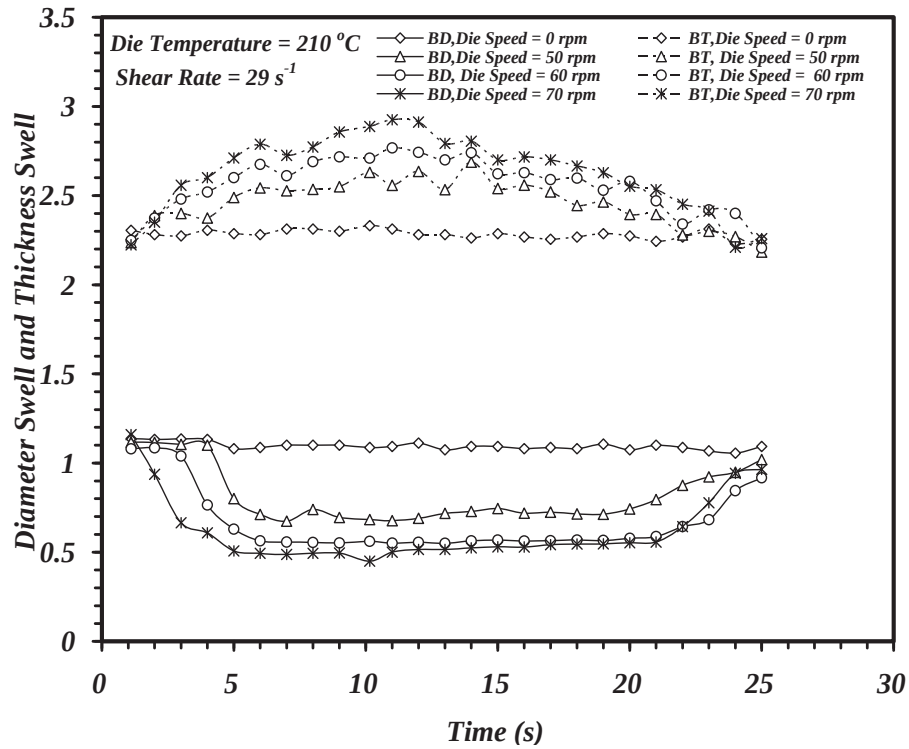
หมุนแสดงว่าปริมาตรการไหลมีค่าคงที่ โดยจากผลการวัดขนาดพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานดังกล่าวแสดงในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าพื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานที่วัดได้ในแต่ละอัตราเร็วเปรียบเทียบกับกันระหว่างชิ้นงานจากหัวขึ้นรูปแบบปกติ 0 rpm และชิ้นงานที่ได้จากการหมุนหัวขึ้นรูปด้วยความเร็วรอบ 50 rpm มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักโดยรวมพบว่ามีค่าต่างกันประมาณ 3.7 % เท่านั้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการไหลที่อัตราเร็วเดียวกันปริมาตรการไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลง หากแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและความหนาของชิ้นงานเปลี่ยนแปลงไปจากการได้รับอิทธิพลของการหมุนหัวขึ้นรูปอย่างชัดเจน ในทางปฏิบัติผลการทดลองดังกล่าวนี้ทำให้เห็นแนวทางการควบคุมขนาดของชิ้นงานที่ผลิตจากหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนเช่นกระบวนการผลิตแบบอัดรีดเป่า (Extrusion Blow Moulding) หรือการผลิตท่อ (Pipe Extrusion) โดยเทคนิคดังกล่าวสามารถปรับขนาดของแท่งพาริสันได้ทั้งในด้านความหนาและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกได้โดยไม่ต้องปรับสภาวะการผลิตใด ๆ ในเครื่องอัดรีดพอลิเมอร์

$$Q = vA$$

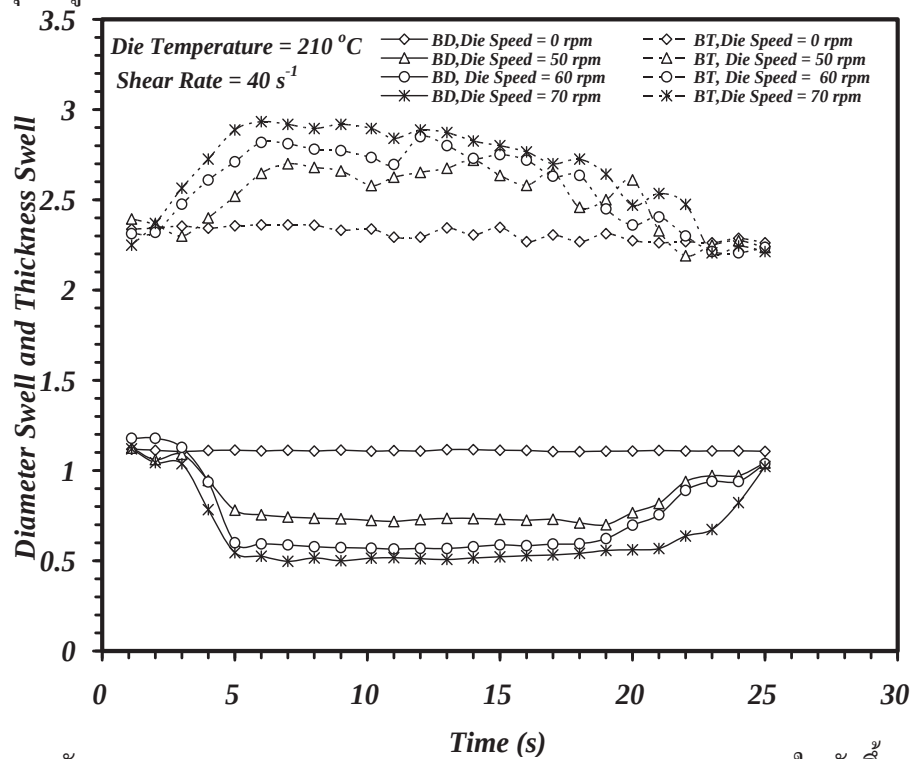
สมการที่ 6



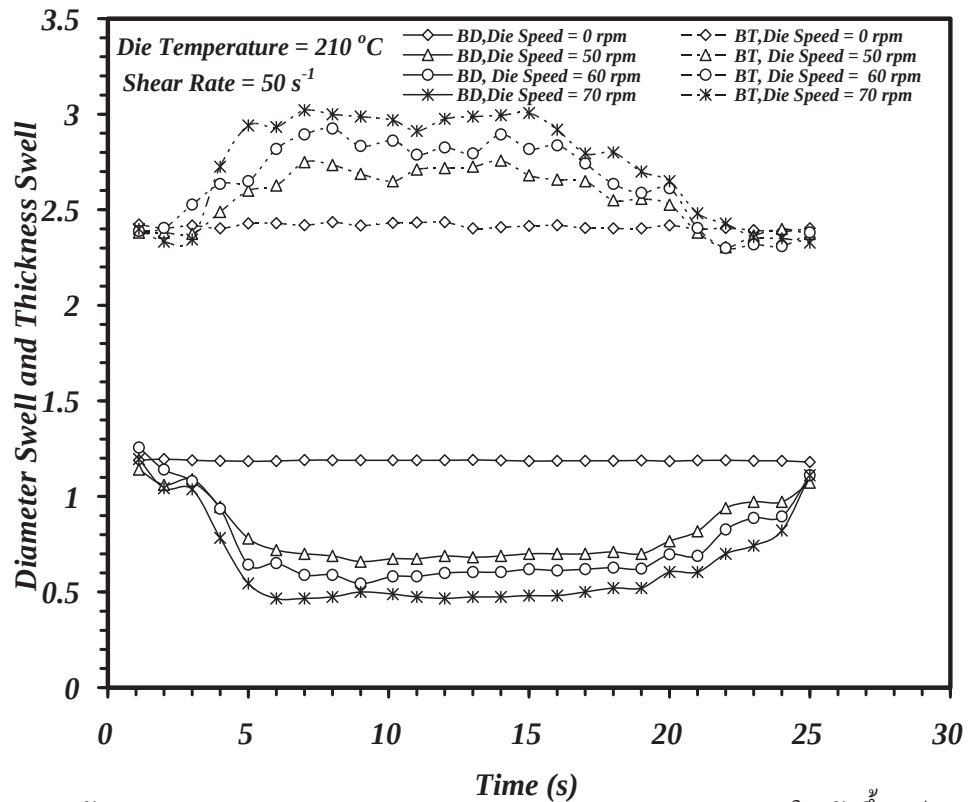
รูปที่ 37 การบวมแบบ Diameter Swell และแบบ Thickness Swell ของ HDPE ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนในเวลา 0 วินาที ถึง 25 วินาที ที่ความเร็วรอบ 0 rpm ถึง 70 rpm อัตราเฉือน 22 s^{-1} และอุณหภูมิการทดสอบที่ 210°C



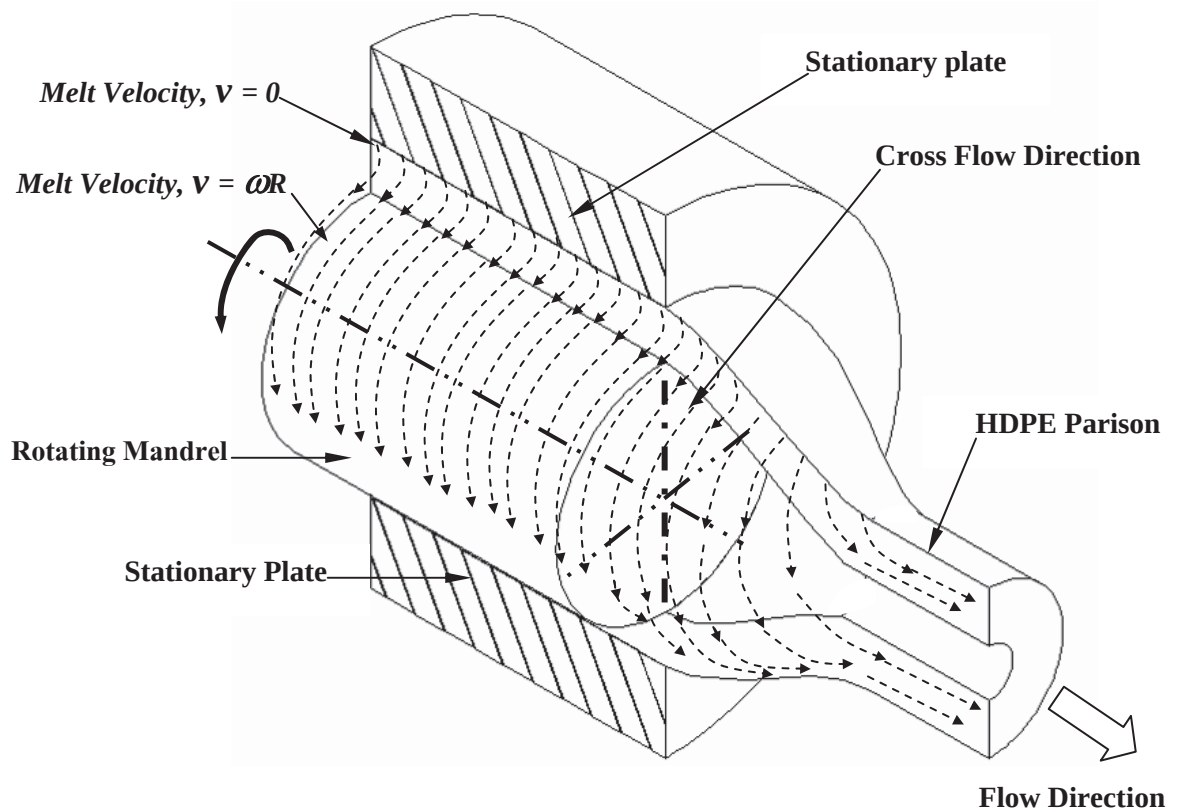
รูปที่ 38 การบวมตัวแบบ Diameter Swell และแบบ Thickness Swell ของ HDPE ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนในเวลา 0 วินาที ถึง 25 วินาที ที่ความเร็วรอบ 0 rpm ถึง 70 rpm อัตราเฉือน 29 s⁻¹ และอุณหภูมิการทดสอบที่ 210°C



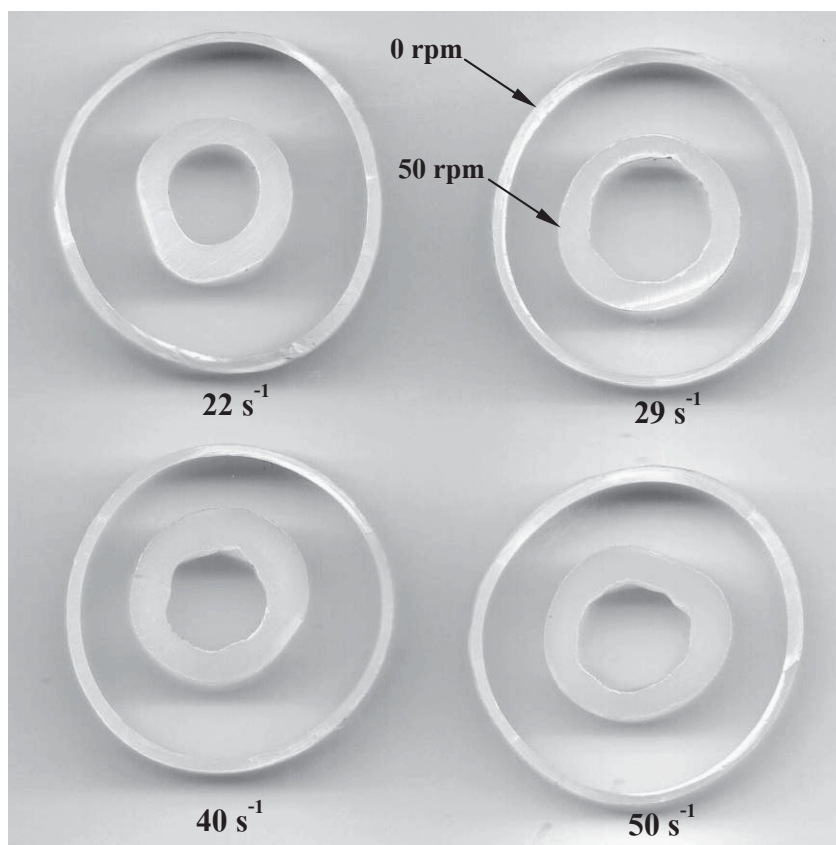
รูปที่ 39 การบวมตัวแบบ Diameter Swell และแบบ Thickness Swell ของ HDPE ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนในเวลา 0 วินาที ถึง 25 วินาที ที่ความเร็วรอบ 0 rpm ถึง 70 rpm อัตราเฉือน 40 s⁻¹ และอุณหภูมิการทดสอบที่ 210°C



รูปที่ 40 การบวมตัวแบบ Diameter Swell และแบบ Thickness Swell ของ HDPE ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนในเวลา 0 วินาที ถึง 25 วินาที ที่ความเร็วรอบ 0 rpm ถึง 70 rpm อัตราเฉือน 50 s⁻¹ และอุณหภูมิการทดสอบที่ 210 °C



รูปที่ 41 แบบจำลองการไหลของ HDPE หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปในระหว่างหมุนแท่ง Mandrel



รูปที่ 42. พื้นที่หน้าตัดของแท่ง Parison ที่ผ่านการอัดรีดจากหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ (0 rpm) และที่ความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป 50 rpm อุณหภูมิทดสอบ 210 °C อัตราเฉือน 22 s⁻¹ ถึง 50 s⁻¹

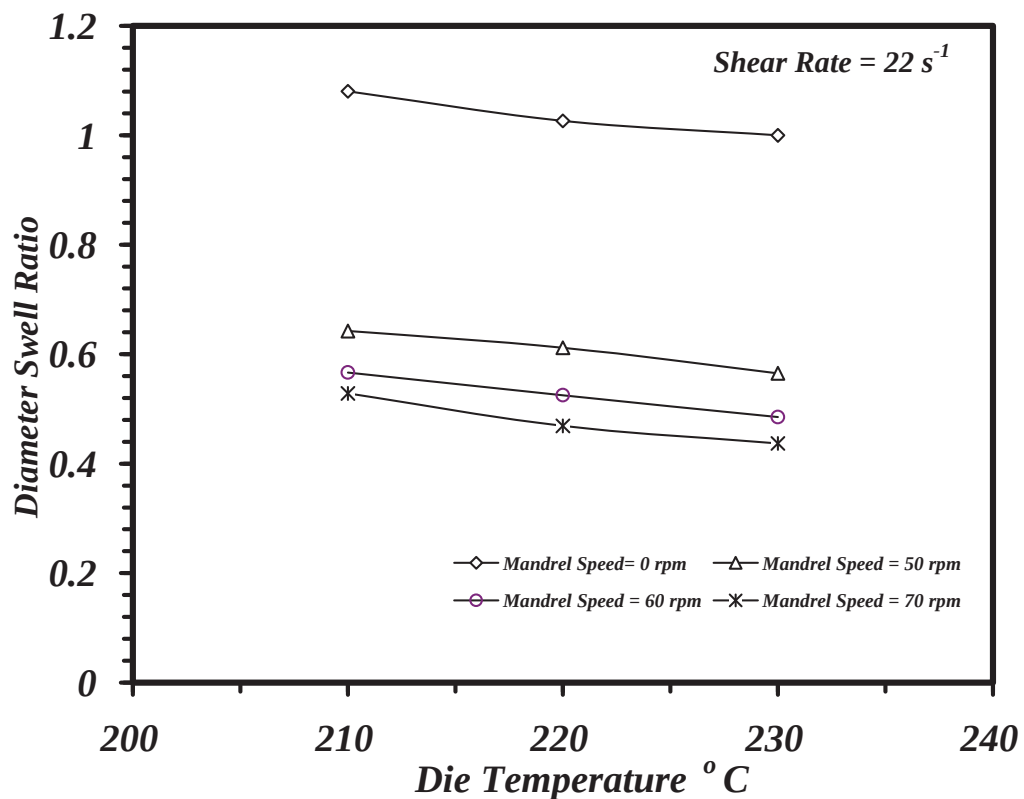
ตารางที่ 1. การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดชิ้นงานที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนระหว่างความเร็วรอบ 0 rpm และ 50 rpm อุณหภูมิทดสอบ 210 °C ที่อัตราเฉือน ต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ IMAGE J

Shear Rate (s ⁻¹)	Cross Section Area(cm ³)		
	0 rpm	50 rpm	% differences
22	0.588	0.559	4.931973
29	0.615	0.604	1.788618
40	0.642	0.681	6.074766
50	0.684	0.671	1.900585

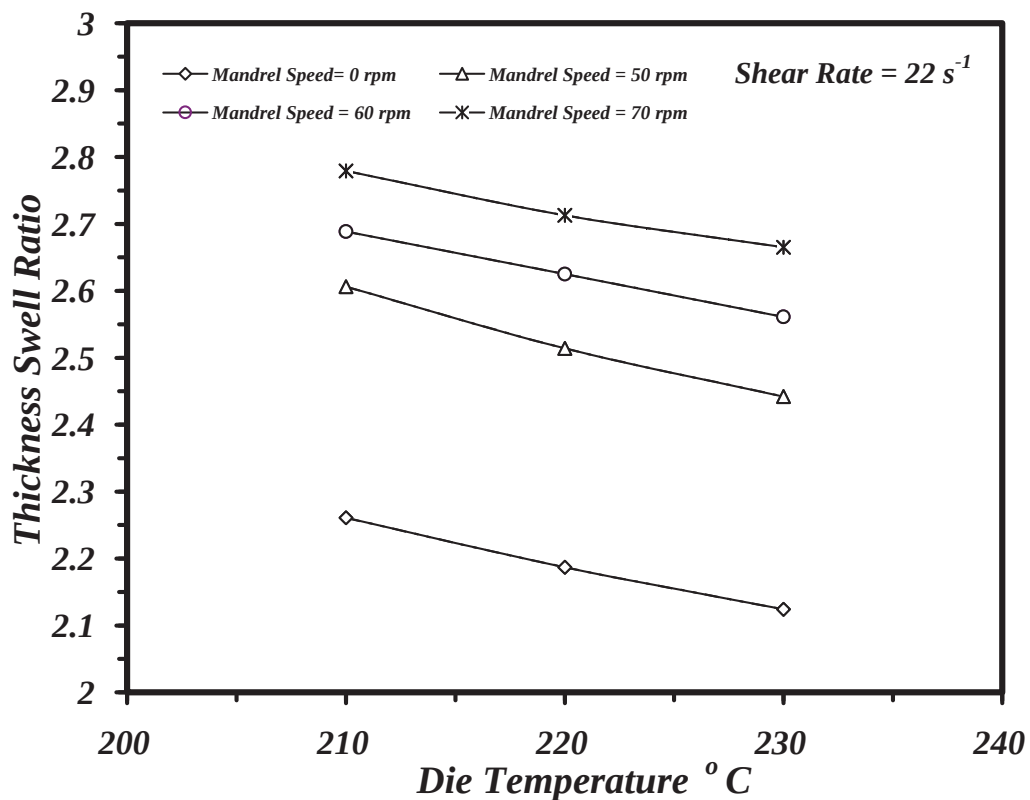
% Average difference = 3.7%

5.4.2. อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของแท่ง Parison ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน

รูปที่ 43 ถึงรูปที่ 44 แสดงพฤติกรรมการบวมตัวของแท่ง Diameter Swell และแบบ Thickness Swell ของแท่ง Parison ตามลำดับ ที่ตรวจวัดได้จากหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนด้วยความเร็วรอบ 0 rpm ถึง 70 rpm โดยเลือกที่อัตราเฉือน 22 s^{-1} มาประกอบการอธิบาย ผลการทดลองพบว่าการหมุนหัวขึ้นรูปยังคงมีอิทธิพลต่อการบวมตัวของแท่ง Parison กล่าวคือ ระดับค่าการบวมตัวของแบบ Thickness Swell มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่การบวมตัวของแบบ Diameter Swell มีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูปในทุก ๆ อุณหภูมิทดสอบ พิจารณาที่อัตราเฉือนเดียวกันที่ 22 s^{-1} การบวมตัวของแบบ Diameter Swell และการบวมตัวของแบบ Thickness Swell มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบประมาณ 5% ต่อการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมิหัวขึ้นรูปทำให้สมบัติความเป็นวัสดุของ HDPE หลอมเหลวขณะไหลมีค่าลดลง ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.3.3



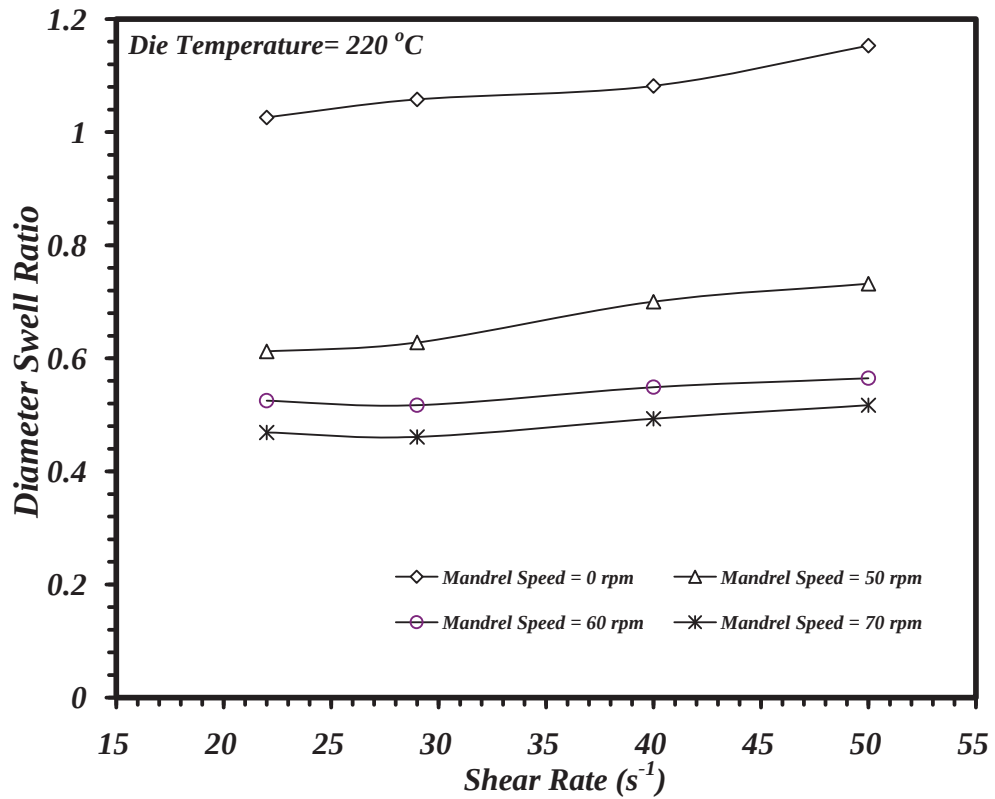
รูปที่ 43 การบวมตัวของแบบ Diameter Swell ของแท่ง Parison ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนที่ 0 rpm ถึง 70 rpm อัตราเฉือน 22 s^{-1}



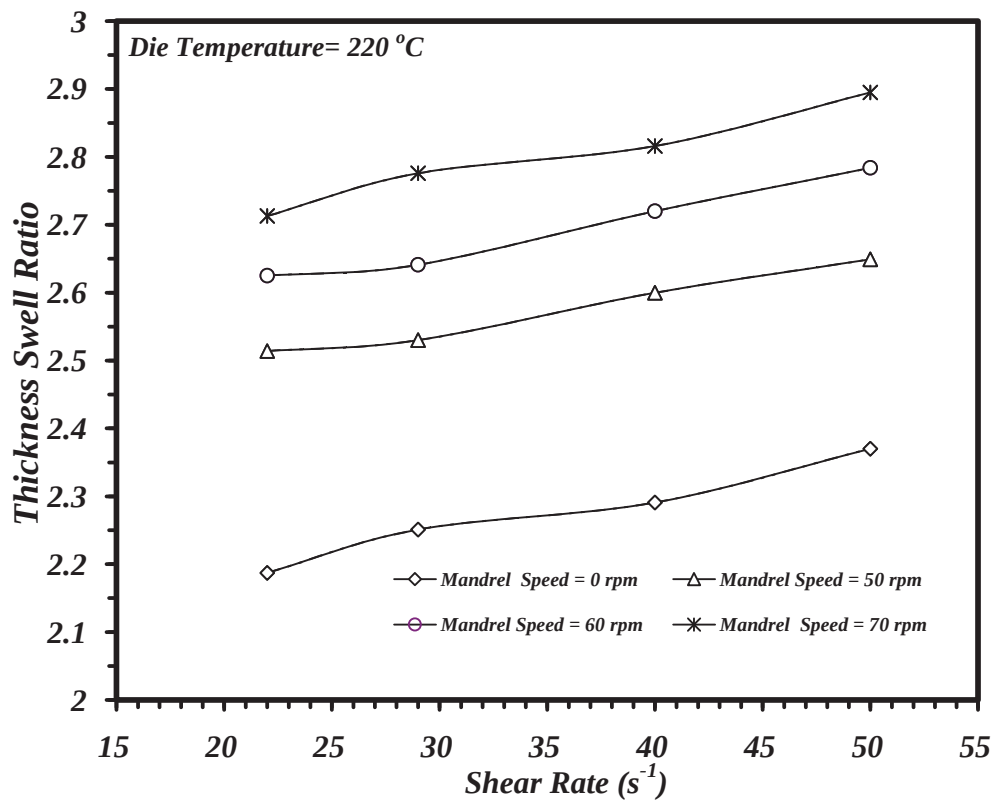
รูปที่ 43 การบวมตัวแบบ Thickness Swell ของแท่ง Parison ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนที่ 0 rpm ถึง 70 rpm อัตราเฉือน 22 s⁻¹

5.4.2. อิทธิพลของอัตราเฉือนที่มีผลต่อพฤติกรรมการบวมตัวของแท่ง Parison ในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน

รูปที่ 44 ถึงรูปที่ 45 แสดงพฤติกรรมการบวมตัวแบบ Diameter Swell และแบบ Thickness Swell ของ HDPE หลอมเหลวในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนด้วยความเร็วรอบ 0 rpm ถึง 70 rpm ที่อัตราเฉือน 22 s⁻¹, 29 s⁻¹, 40 s⁻¹ และ 50 s⁻¹ ตามลำดับ โดยเลือกที่อุณหภูมิการทดสอบ 220 °C มาอธิบาย ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิทดสอบเดียวกัน HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนทุกความเร็วรอบ ค่าการบวมตัวแบบ Diameter Swell และการบวมตัวแบบ Thickness Swell มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราเฉือน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอัตราเฉือนเสมือนเป็นการเพิ่มระดับการสะสมพลังงานให้กับ HDPE หลอมเหลวให้มากขึ้นและเมื่อพลังงานที่สะสมอยู่จะถูกปลดปล่อยออกมาภายหลังถูกอัดรีดพ้นจากหัวขึ้นรูปย่อมแสดงออกให้เห็นในรูปแบบของการบวมตัวที่เพิ่มขึ้น ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.3.1



รูปที่ 47 การบวมตัวแบบ Diameter Swell ของ HDPE หลอมเหลว ในหัวขึ้นรูปแบบหมุน 0 rpm ถึง 70 rpm อุณหภูมิการทดสอบ 220 °C ที่อัตราเฉือนต่าง ๆ



รูปที่ 48 การบวมตัวแบบ Thickness Swell ของ HDPE หลอมเหลว ในหัวขึ้นรูปแบบหมุน 0 rpm ถึง 70 rpm อุณหภูมิการทดสอบ 220 °C ที่อัตราเฉือนต่าง ๆ

เอกสารอ้างอิง

1. Sitticharoen, W., Harnnarongchai, W., Intawong, N-T and Sombatsompop, N., 2012, "Melt Strength, Local Velocity, and Elongational Viscosity Profiles of Low-density Polyethylene Filaments Affected by the Die Design and Process Conditions" **Journal of Applied Polymer Science**, Vol.124, No 5, pp. 3751-3764.
2. Brydson, J.A., 1981, "Flow Properties of Polymer Melts," 2nd ed., Gorge Godwin, London.
3. Cogswell, F.N., 1981, "Polymer Melt Rheology," George Godwin, London.
4. Han C.D., 1976, "Rheology in Polymer Processing," Academic Press, New York.
5. Morton-Jones D. H., 1989, "Polymer Processing," TJ Press (Padstow) Ltd, Cornwall, Britain.
6. Intawong N-T, Wongchaleo C. & Sombatsompop N., 2008, "Rheological Properties, Flow Visualization and Extrudate Swelling of NR Compound by Rotating-Die Rheometer", **Polymer Engineering and Science**, Vol. 48 No.6, pp. 1191-1198.
7. Intawong, N-T., Kantala, C., Lotaisong W. and Sombatsompop, N., 2009, "Moderation of Entrance Pressure Drop and Extrudate Swelling of Wood Fiber/Polypropylene Composites Melt in Rotating-Die Extrusion Process ", **The 2nd International Conference on Multi-functional Materials and Structures**, 9-12 October 2009 Qingdao, China.
8. Sombatsompop, N. and Intawong N-T., 2000, "Flow Properties and Entrance Corrections of Polymer Melts in A Mobile Barrel Capillary Rheometer," **Polymer Testing** , Vol. 20, pp. 97-10.
9. Sombatsompop, N. and Intawong, N-T., 1999, "A Novel Capillary Rheometer for Measurement of Flow Properties of Polymer Melts," **Materials Research Innovations**, Vol.3, pp.150-155.
10. Intawong, N-T., M.Eng Thesis, 1999, "Novel Design and Deveropment of a Capillary Rheometer," KMUTT, Bangkok, Thailand.
11. Intawong N-T. and Sombatsompop N., 2004, "A Parallel Co-extrusion Technique for Simultaneous Measurements of Radial Extrudate Swell and Velocity Profiles of a Polymer Melt in a Capillary Rheometer", **Polymer Engineering and Science**, Vol.44, No.10, pp. 1960-1969.
12. Intawong N-T. and Sombatsompop N., 2004, "Experimental Studies on Radial Extrudate Swell and Velocity Profiles of Flowing PS Melt in an Electro-magnetized Die of an Extrusion Rheometer", **Polymer Engineering and Science**, Vol.44, No.12, pp. 2298-2307.
13. Yue Mu, Guoqun Zhao, Xianghong Wu and Chengrui Zhang, 2010, "An optimization strategy for die design in the low-density polyethylene annular extrusion process based on FES/BPNN/NSGA-II" **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol.50, pp.517-532.

14. Christodoulou, K.J., Wood, A.K. and Sombatsompop, N., 1998, "Novel Techniques for the Measurement of Die Swell in Polymer Melts," *SPE ANTEC*, Vol. 44, pp.915-919.

6. สรุปผลการวิจัย

- 6.1. หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนแท่ง Mandrel ที่ได้จัดสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถใช้ศึกษาสมบัติการไหล การเปลี่ยนแปลงของค่าความดันตกคร่อม และพฤติกรรมการบวมตัวของ HDPE หลอมเหลวในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนเดี่ยวได้ตามวัตถุประสงค์ของโครงการ
- 6.2. ค่า Pressure drop ที่ตรวจวัดได้ในระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ(0 rpm) มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราเฉือนและมีค่าลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิทดสอบ
- 6.3. ค่า Pressure drop มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มความเร็วรอบในการหมุนหัวขึ้นรูป ปรากฏการณ์ดังกล่าวตรวจพบได้ในทุกอุณหภูมิและทุก ๆ อัตราเฉือนของการทดสอบ ซึ่งสามารถอธิบายโดยใช้หลักการกระจายแรงจากแนวแกนไปในแนวรัศมี
- 6.4. ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูป ในทุกสถานะการทดสอบ เช่นที่อุณหภูมิการทดสอบ 210 °C อัตราเฉือน 22 s⁻¹ ความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป 0-50 rpm มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop ที่ 35 % และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบการหมุนหัวขึ้นรูปเป็น 0-60 rpm และ 0-70 rpm พบว่าค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop มีค่าเพิ่มขึ้น 40 % และ 45 % ตามลำดับ
- 6.5. ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop ในระบบหัวขึ้นรูปแบบหมุนสามารถตรวจพบมากที่สุดที่อุณหภูมิการทดสอบต่ำ เช่นที่อุณหภูมิการทดสอบ 210 °C มีระดับเปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop อยู่ในช่วง 25%-45 % ในขณะที่อุณหภูมิการทดสอบสูง เช่นที่ อุณหภูมิสูง 230 °C มีระดับเปอร์เซ็นต์ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop ที่ต่ำกว่าอยู่ในช่วง 10 %-25 %
- 6.6. ที่อัตราเฉือนในช่วง 22 s⁻¹ ถึง 29 s⁻¹ การหมุนหัวขึ้นรูปมีผลทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop มีประสิทธิภาพที่สุด โดยอัตราเฉือนที่มากกว่า 29 s⁻¹ ให้ผลของค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของ Pressure drop ที่ต่ำกว่าและไม่แตกต่างกันมากนัก
- 6.7. สมบัติการไหลของ HDPE หลอมเหลวที่ถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติและแบบวงแหวนแบบหมุนแสดงสมบัติความเป็น non-Newtonian ในพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudoplastic กล่าวคือ ความหนืดลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ค่าความเค้นเฉือน มีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิการทดสอบ
- 6.8. ค่าอัตราเฉือนที่ตรวจวัดได้จากหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนมีค่าต่ำกว่าที่ตรวจวัดได้จากหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบปกติ และที่อัตราเฉือนเดียวกันค่าอัตราเฉือนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มความเร็วในการหมุนหัวขึ้นรูปวงแหวนในทุก ๆ สถานะอุณหภูมิการทดสอบ เช่น ในสถานะอุณหภูมิการทดสอบ 210 °C ที่ค่าอัตราเฉือน 22 s⁻¹ พบว่าค่าความเค้นเฉือนที่ตรวจวัดได้ในหัวขึ้นรูปแบบหมุนที่ความเร็วรอบ 50 rpm, 60 rpm และ 50 rpm มีค่าลดลงอย่าง

ต่อเนื่องเมื่อเทียบกับค่าความเค้นเฉือนในหัวขึ้นรูปแบบปกติประมาณ 27%, 38% และ 43% ตามลำดับ

- 6.9. การบวมตัวของแท่ง Parison ทั้งแบบเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter Swell) และการบวมตัวแบบความหนา (Thickness Swell) ในหัวขึ้นรูปแบบปกติมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราเฉือนและมีค่าลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบ
- 6.10. การบวมตัวของแท่ง Parison แบบ Diameter Swell มีค่าต่ำกว่าการบวมตัวแบบ Thickness Swell ในทุก ๆ อุณหภูมิทดสอบ โดยการบวมตัวแบบ Diameter Swell อยู่ในช่วง 1-1.2 ในขณะที่การบวมตัวแบบ Thickness Swell มีค่าอยู่ในช่วง 2.2-25
- 6.11. ขนาดภายนอกของแท่ง Parison มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดระหว่างถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน โดยพบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง Parison มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 5 วินาทีหลังจากเริ่มหมุนหัวขึ้นรูปจนมีขนาดคงที่ค่าหนึ่ง และเมื่อหยุดหมุนหัวขึ้นรูปพบว่าขนาดของแท่ง Parison มีการปรับขนาดกลับมาเท่ากับขนาดเดิมก่อนการหมุนหัวขึ้นรูป ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงระดับของค่า Pressure Drop ที่ตรวจวัดได้
- 6.12. การบวมตัวแบบ Diameter Swell มีค่าลดลงเมื่อถูกอัดรีดผ่านหัวขึ้นรูปแบบหมุน ในขณะที่การบวมตัวของแท่ง Parison แบบ Thickness Swell มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วการหมุนหัวขึ้นรูป เช่นที่ อัตราเฉือน 22 s^{-1} ภายใต้สภาวะการหมุนหัวขึ้นรูปที่ 50 rpm, 60 rpm และ 70 rpm การบวมตัวแบบ Diameter Swell มีค่าลดลงที่ 0.63, 0.58, และ 0.51 ในขณะที่การบวมตัวแบบ Thickness Swell มีค่าการบวมตัวเพิ่มขึ้นที่ 2.63, 2.7, และ 2.77 ตามลำดับ
- 6.13. การบวมตัวของแท่ง Parison ทั้งแบบ Diameter Swell และการบวมตัวแบบ Thickness Swell ในหัวขึ้นรูปแบบวงแหวนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราเฉือนและมีค่าลดลงตามการเพิ่มอุณหภูมิการทดสอบ

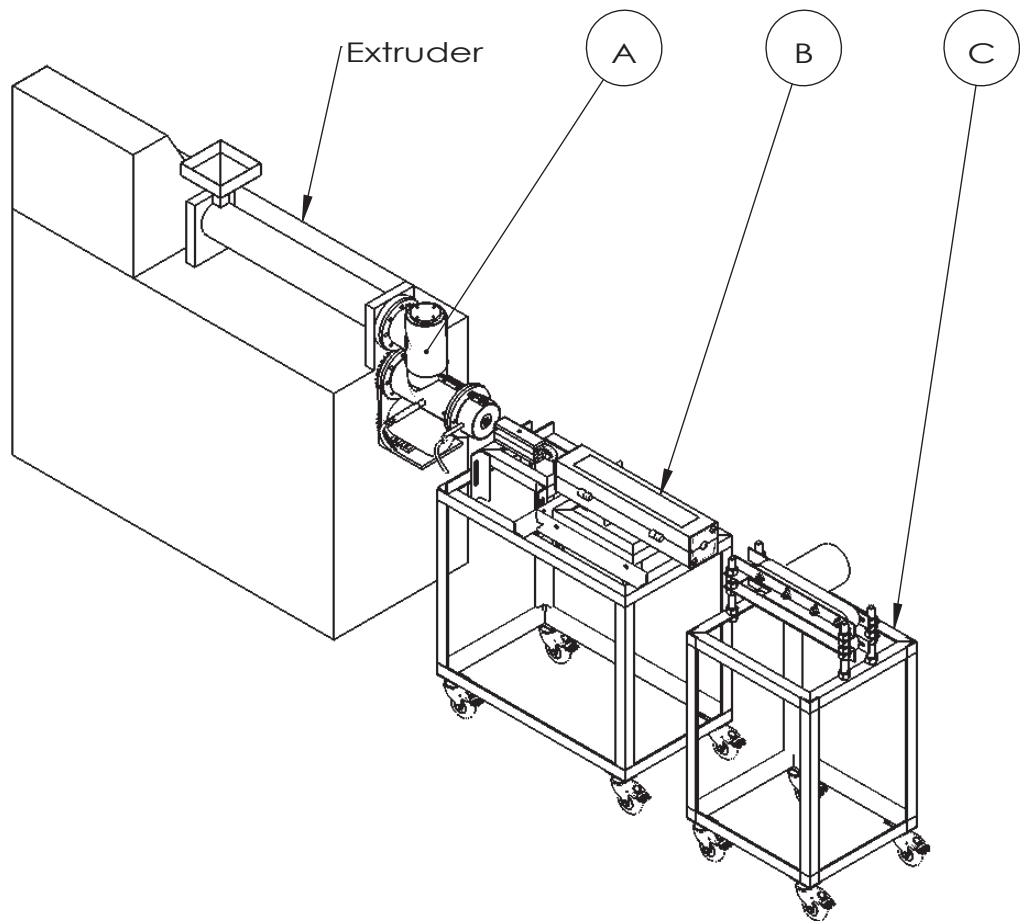
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

1. งานวิจัยต่อเนื่องโดยการศึกษารูปแบบการไหลและความเร็วของพอลิเมอร์ขณะไหลในหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน
2. ประยุกต์ใช้หัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุนในกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์แบบอัดรีดเป่า (Extrusion Blow Moulding) เพื่อปรับขนาดความหนาชิ้นงาน

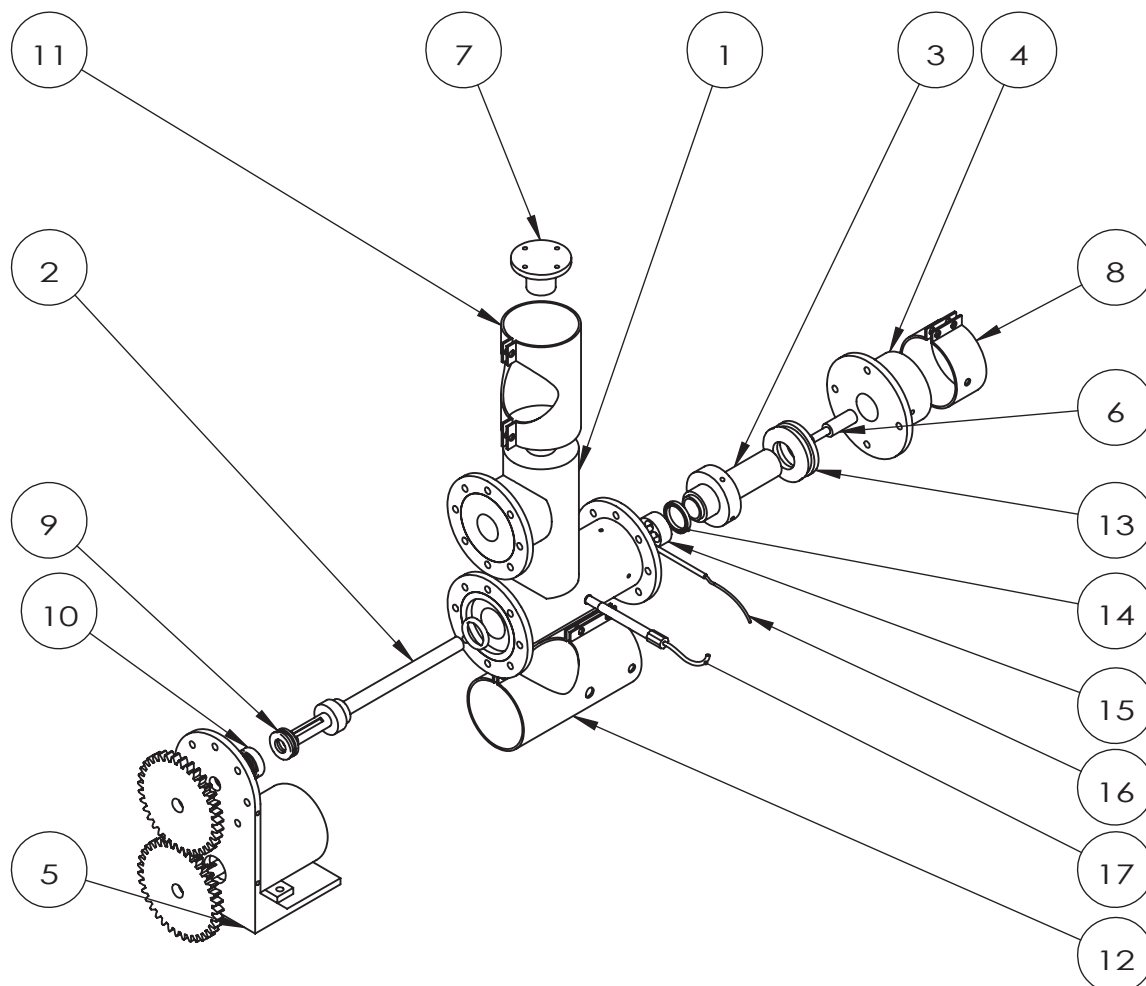
7. ภาคผนวก :

7.1 แบบทางวิศวกรรมของระบบหัวขึ้นรูปวงแหวนแบบหมุน (ตามเอกสารแนบ)

7.2 ดัชนีบทความวิจัยเรื่อง “*Effect of the Annular Rotating Die on Pressure Drop, Rheological Properties and Extrudate Swell Behavior of HDPE Melt in the Single Screw Extruder*” ซึ่งอยู่ในขั้นตอนส่งต้นฉบับเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ ***Polymer Engineering and Science***.

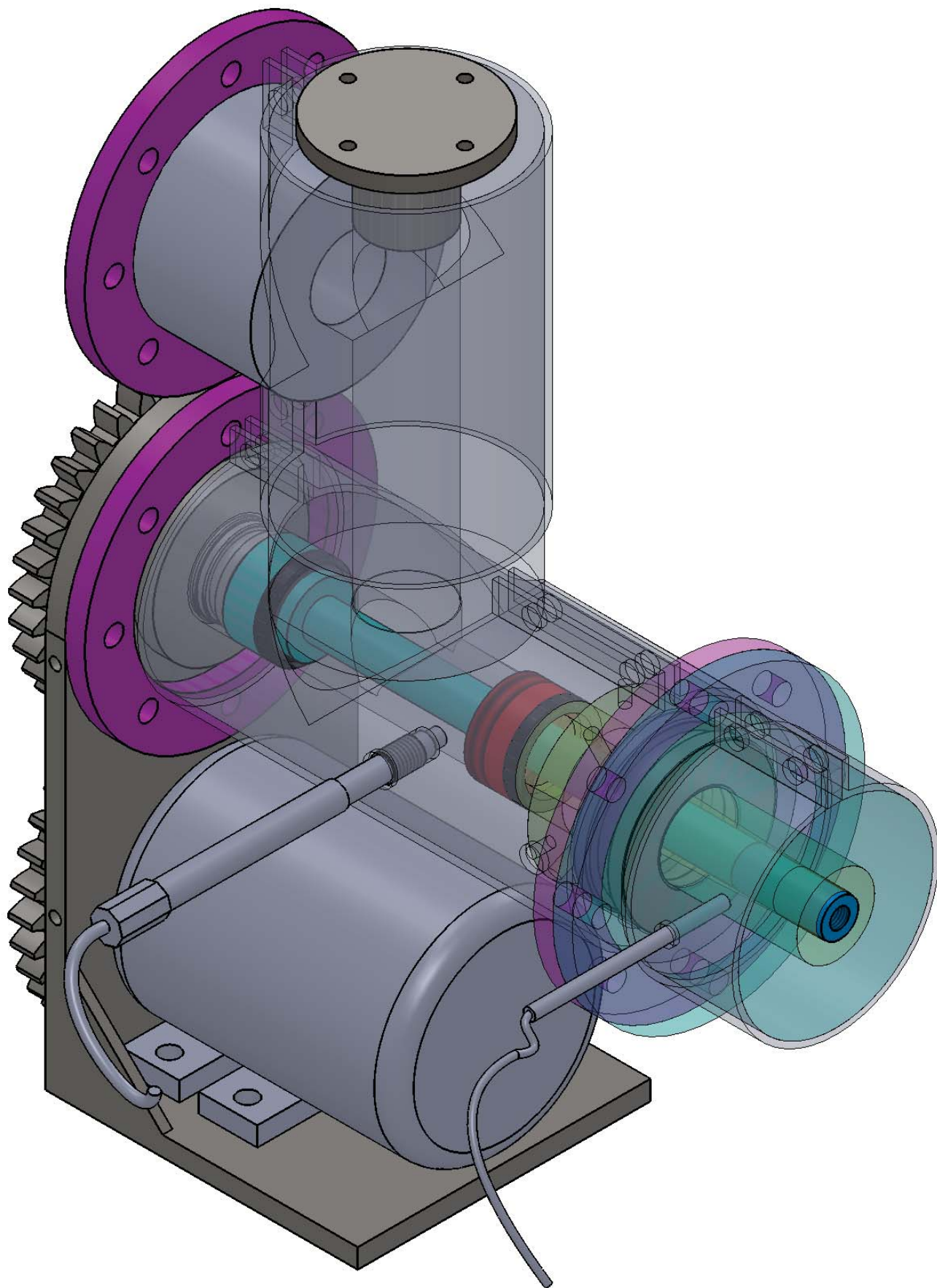


ชั้นที่	รายการ	วัสดุ	หมายเลขแบบ
ผู้เขียน	นเรศ อินตะวงศ์	รหัส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่
ผู้ตรวจ			
ผู้ตรวจ มช		รับงาน	
ผู้ออกแบบ		ส่งงาน	
มาตราส่วน 1:20	ชื่อชิ้นงาน ทั้งระบบ		หมายเลขแบบ

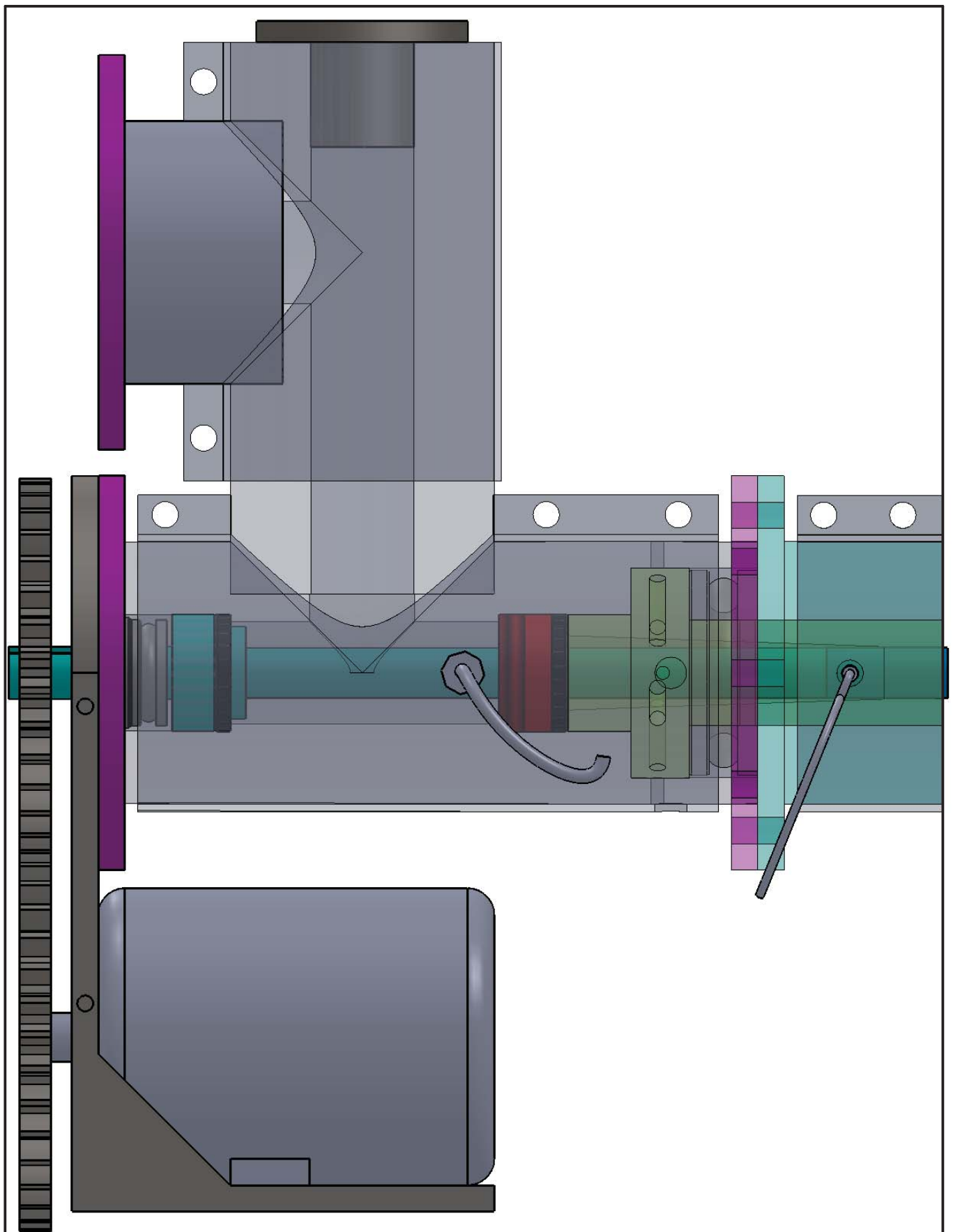


17	วัดแรงอัด				1
16	เทอร์โมคัปเปิล				1
15	แหวนประกอบเมลเดิล	st37		A12	1
14	โอริง U-cup	Rubber		A11	1
13	Touch bearing				1
12	Heater ส่วนล่าง			A10	1
11	Heater ส่วนบน			A09	2
10	Bearing				1
9	Touch bearing				1
8	Heater ส่วนหน้า			A08	1
7	ลูกปิดตาย	st37		A07	1
6	หัวเมลเดิล	st37		A06	3
5	ฐานมอเตอร์	st37		A05	1
4	ปลอกตาย	st37		A04	1
3	คายนหมุน	st37		A03	1
2	เมนเดล	st37		A02	1
1	บอร์ดีตาย	st37		A01	1
ชั้นที่	รายการ	วัสดุ	ขนาดวัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน

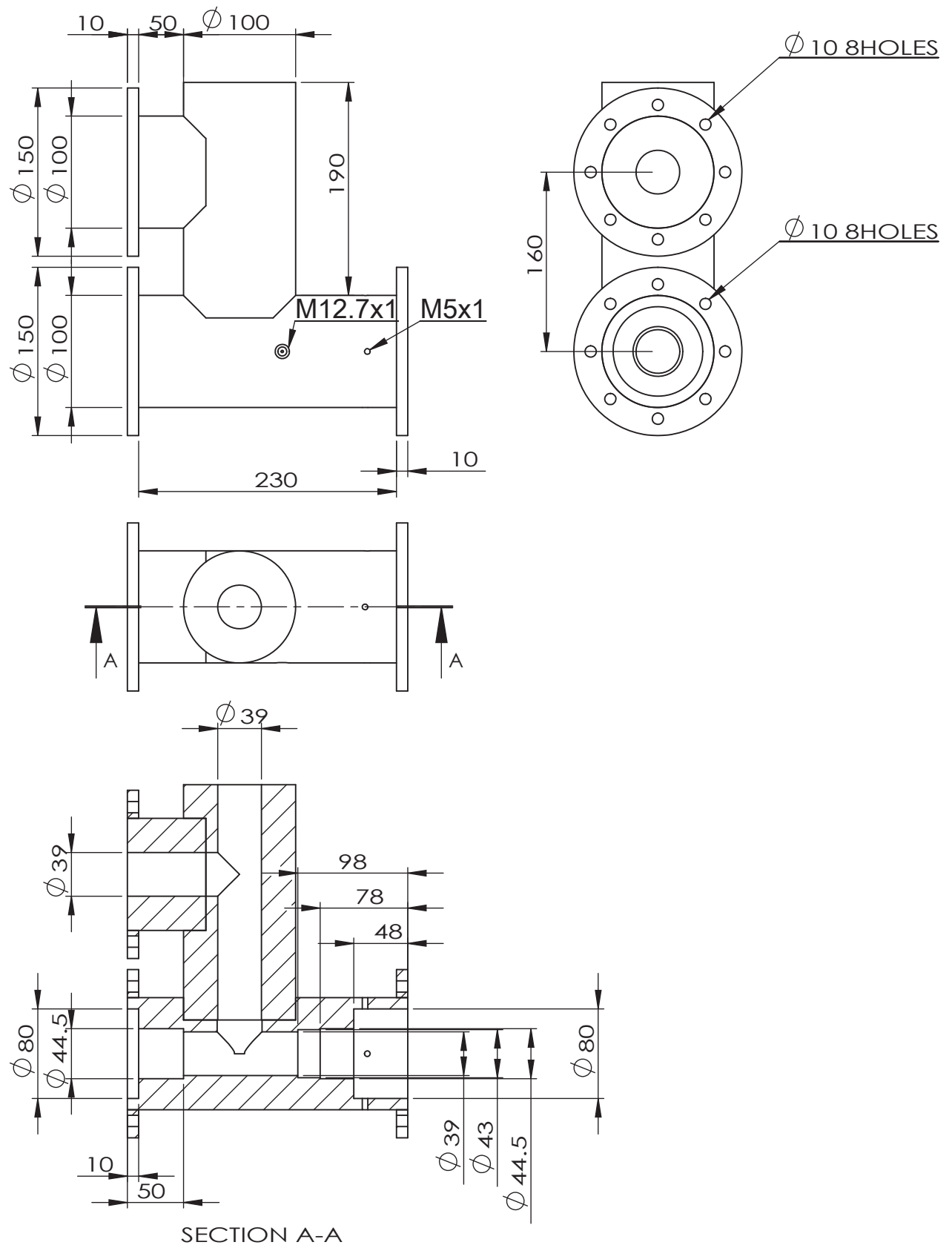
ผู้เขียน	นเรศ อินตะวงษ์	รหัส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่
ผู้ตรวจ			
ผู้ตรวจ มช		รับงาน	
ผู้ออกแบบ		ส่งงาน	
มาตราส่วน 1:10	ชื่อชิ้นงาน คายน		หมายเลขแบบ A



ชั้นที่	รายการ	วัสดุ	ขนาดวัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นเรศ อินตะวงศ์	รหัส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่		
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ มช		รับงาน			
ผู้ออกแบบ		ส่งงาน			
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน		หมายเลขแบบ		

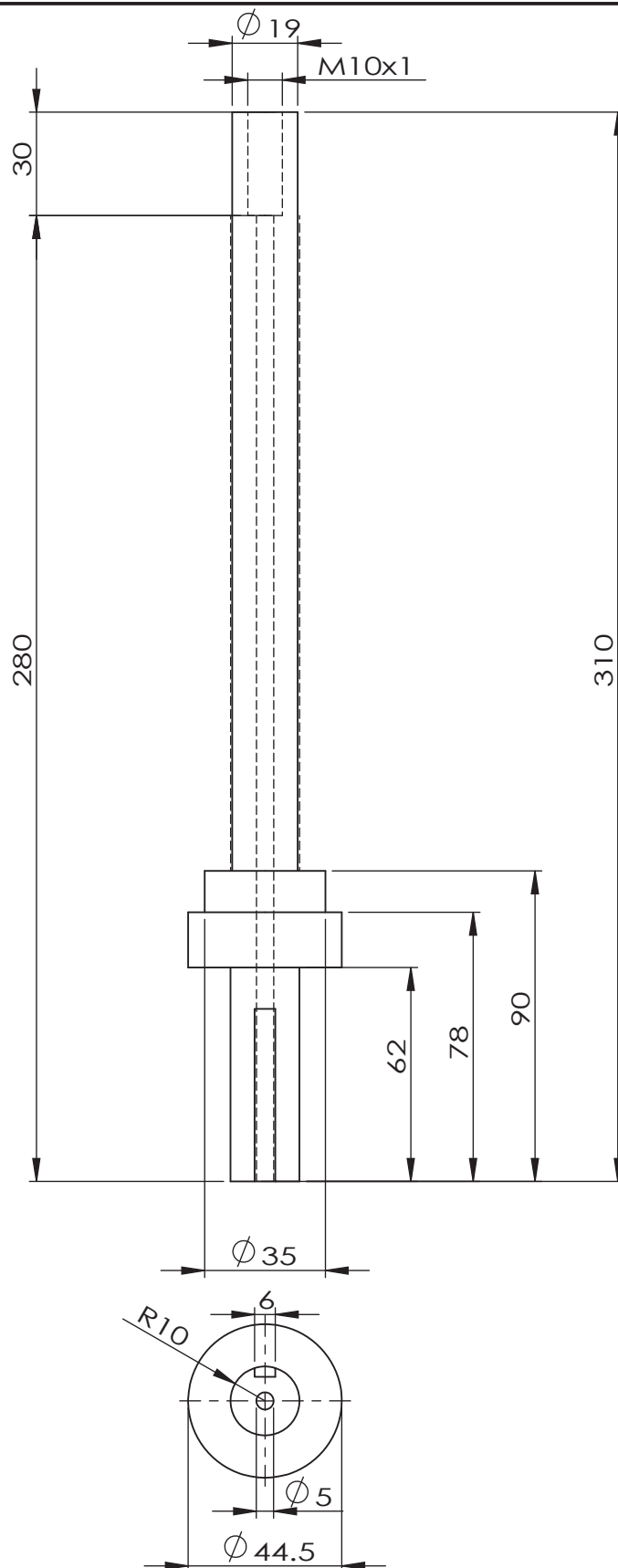


ชั้นที่	รายการ	วัสดุ	ขนาดวัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นเรศ อินตะวงศ์	รหัส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่		
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ มช		รับงาน			
ผู้ออกแบบ		ส่งงาน			
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน		หมายเลขแบบ		

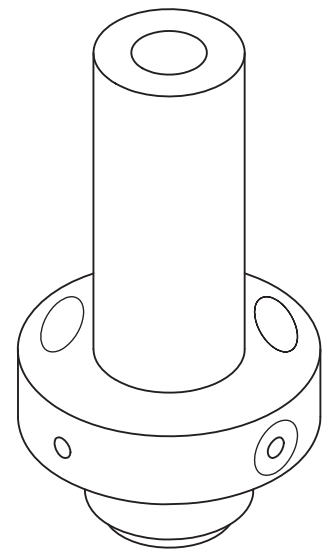
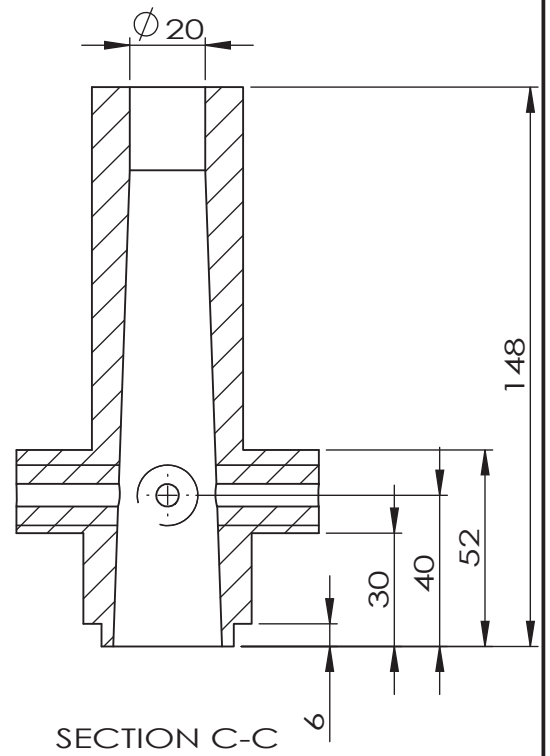
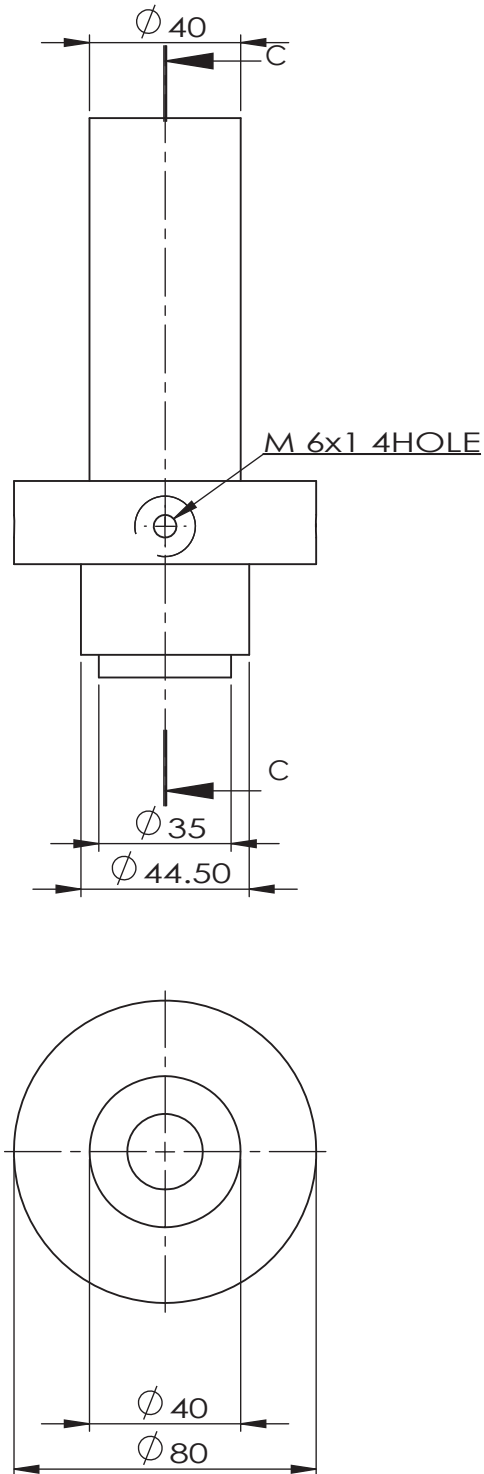


SECTION A-A

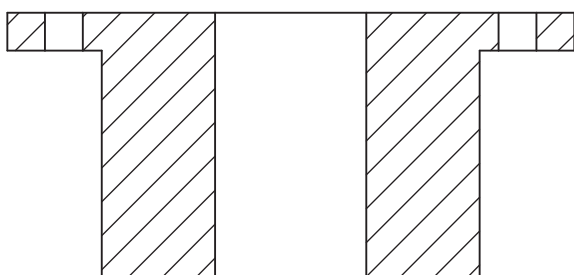
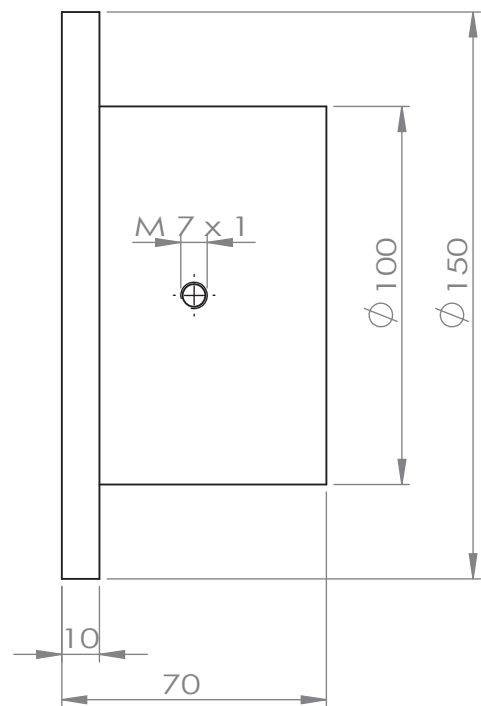
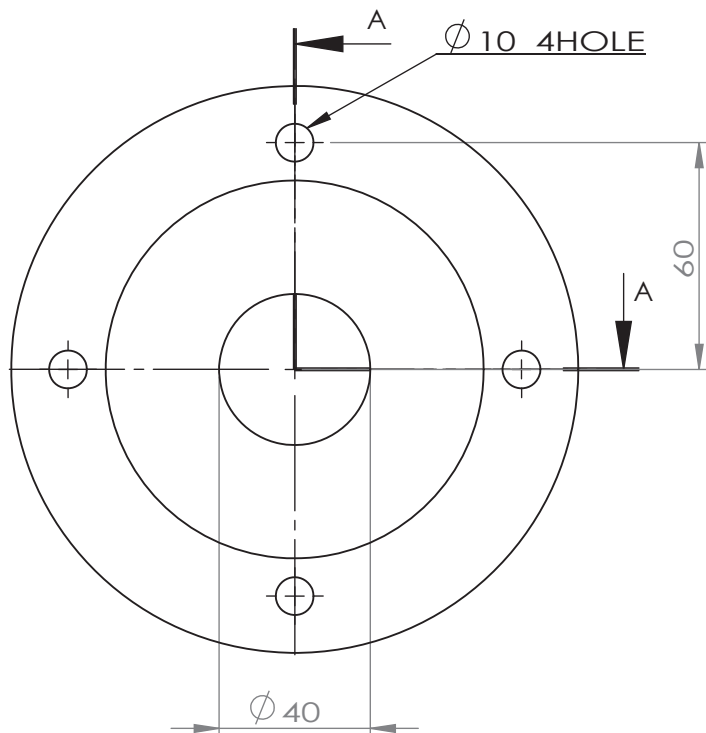
ชั้นที่	รายการ	วัสดุ	ขนาดวัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นเรศ อินตะวงศ์	รหัส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่		
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ มช		รับงาน			
ผู้ออกแบบ		ส่งงาน			
มาตราส่วน 1:5	ชื่อชิ้นงาน บอร์ติด้าย		หมายเลขแบบ A01		



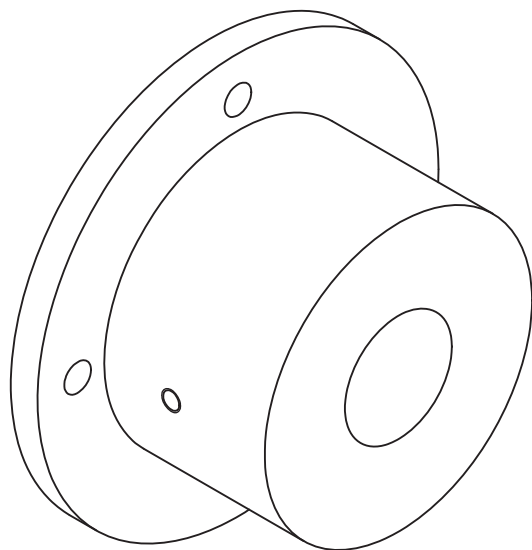
ชั้นที่	รายการ	วัสดุ	ขนาดวัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นเรศ อินตะวงศ์	รหัส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่		
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ มช		รับงาน			
ผู้ออกแบบ		ส่งงาน			
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน เมนเดล		หมายเลขแบบ A02		



ชั้นที่	รายการ	วัสดุ	ขนาดวัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นเรศ อินตะวงศ์	รหัส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่		
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ มช		รับงาน			
ผู้ออกแบบ		ส่งงาน			
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน ปลอกตายหมุน		หมายเลขแบบ	A03	



SECTION A-A



ชั้นที่	รายการ	วัสดุ	ขนาดวัสดุ	หมายเลขแบบ	จำนวน
ผู้เขียน	นเรศ อินตะวงศ์	รหัส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาคพายัพเชียงใหม่		
ผู้ตรวจ					
ผู้ตรวจ มช		รับงาน			
ผู้ออกแบบ		ส่งงาน			
มาตราส่วน	ชื่อชิ้นงาน		หมายเลขแบบ		
1 : 2	ปลอกหัวตาย		A04		