

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรมในการทำนายขนาดความหนาของทางเข้าของแม่พิมพ์และความดันฉีดที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แหวนยางกระดิกน้ำเก็บความร้อน-เย็น

An Application of Computer Aided Engineering in Prediction of the Size of Gate Thickness and Injection Pressure in Injection Moulding of Rubber Seals used in Hot and Cold Beverage Dispensers

ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ^{1,2}, นักฎพงษ์ จรุงรักษ์^{1,2}, ประพัทธ์ คัมปสียงศ์^{1,2} และ ปวเรศ ชมเดช^{2,3*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม

³ ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

* E-mail: fengpac@ku.ac.th, โทรศัพท์: (662) 9427188 โทรสาร: (662) 9427189

บทคัดย่อ

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูปเป็นวิธีที่สามารถควบคุมขนาดของผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตามในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้ยังมีปัญหาที่สำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยาง ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ไม่ได้ขนาดตามแบบ การเกิดฟองอากาศในชิ้นงาน เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำกรณีศึกษาของแหวนยางในกระดิกน้ำเก็บความร้อน-เย็น ที่ทำจากยางซิลิโคนที่มีความแข็ง 50 ชอร์ เอ โดยศึกษาผลกระทบขนาดความหนาของทางเข้าและความดันฉีดที่มีผลต่อการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง ด้วยการจำลองการขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมและเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบฉีดจริง ซึ่งศึกษาขนาดความหนาของทางเข้าในแม่พิมพ์แบบฟิล์ม ที่ 0.08 และ 0.12 มิลลิเมตร โดยมีความกว้างคงที่ 2 มิลลิเมตร และศึกษาการใช้ความดันฉีดที่ 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของการตั้งค่าที่เครื่องฉีด โดยกำหนดความดันฉีดสูงสุดไว้ที่ 700 บาร์ และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ใช้คงรูปของยางที่ 175 องศาเซลเซียส จากผลการวิจัยพบว่าในกรณีของทางเข้าแบบฟิล์มนี้ ที่ความหนา 0.08 มิลลิเมตร ความดันฉีดที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเกิดความดันสูญเสีย 131.40 บาร์ ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาการผลิตแม่พิมพ์และผลิตภัณฑ์ยางให้สามารถแข่งขันได้ต่อไป

คำหลัก: ยาง กระบวนการฉีดขึ้นรูป ทางเข้า ความดันฉีด แม่พิมพ์

Abstract

Generally, injection moulding is widely used in manufacturing of complicated parts. However, there are still some problems associated with part quality such as inaccuracy of part dimension, air trap in part. In this work, the injection of silicone seals with 50 shore A hardness used in beverage dispenser was investigated both numerically and empirically. The effects of thickness of gate and injection pressure on injection process were studied. With a constant gate width of 2 mm, maximum injection pressure of 700 bar, curing temperature of 175 degree Celsius, and film gate type, analyses of thicknesses of gate of 0.08 and 0.12 mm as well as injection pressure of 40, 60, 80, 100 % were carried out. The results show that the gate thickness of 0.08 mm. with an injection pressure of 100 % resulting of pressure loss of 131.40 bar can lead to part with good quality. Therefore, this research can provide contribution in mould design and manufacturing process of rubber products.

Keywords: Rubber, Injection Moulding, Gate, Injection Pressure, Mould

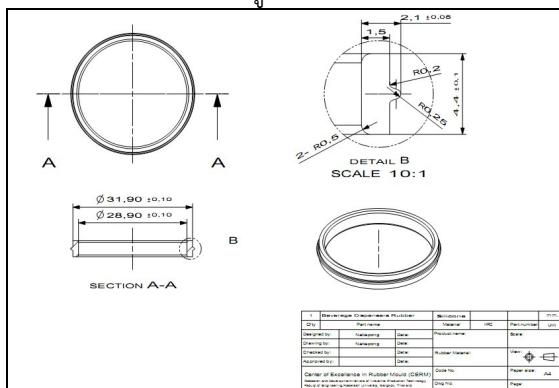
1. บทนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์บางส่วนมากได้มาจากการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์อัด ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีขนาดใหญ่ มีครีบนานาขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ และไม่ตรงตามแบบที่กำหนด ส่งผลให้ส่งมอบไม่ทันตามเวลาที่กำหนด ไม่สามารถแข่งขันกับตลาดอุตสาหกรรม ทั้งภายในและนอกประเทศได้ ซึ่งจะต้องหาวิธีการหรือกระบวนการที่จะผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพได้ขนาดที่ตรงตามแบบที่กำหนด ลดของเสียจากการผลิต และทำให้ลดต้นทุนในการผลิต จึงได้เลือกใช้วิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการกระบวนการฉีดขึ้นรูป และยังต้องให้ความสมดุลระบบรูว้าง (Runner) และทางเข้า (Gate) ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้กรณีศึกษาเป็นแหวนยางในกระตักน้ำเก็บความร้อน-เย็น และการวิจัยนี้ยังได้นำเทคโนโลยีโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) และคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) เข้ามาศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้ในการทำนายพฤติกรรมกลไกของยางในแม่พิมพ์ที่เหมาะสม มาออกแบบแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งในการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบแม่พิมพ์ และองค์ความรู้ที่ได้จากโครงการวิจัยเพื่อสร้างความยั่งยืนให้กับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางในประเทศต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเลือกผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

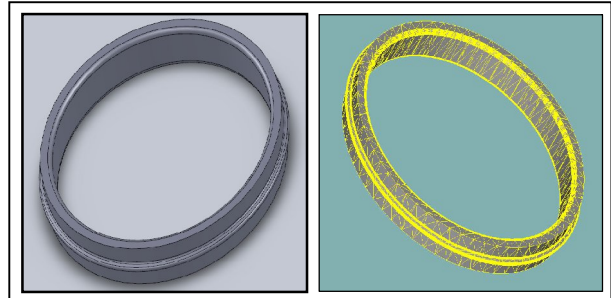
การเลือกผลิตภัณฑ์ที่ผลิตออกมาพบว่าส่วนใหญ่มีครีบนานา ขนาดไม่สม่ำเสมอ ไม่ตรงตามแบบที่กำหนด เมื่อนำไปประกอบร่วมกับผลิตภัณฑ์อื่นไม่ได้ และขึ้นรูปด้วยวิธีการอัด ซึ่งผลสรุปการเลือกผลิตภัณฑ์เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา คือแหวนยางกระตักน้ำเก็บความร้อน-เย็น เป็นยางซิลิโคน ที่มีความแข็ง 50 ชอร์ เอ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบ 2 มิติแหวนยางกระตักน้ำเก็บความร้อน-เย็น

2.2 การออกแบบผลิตภัณฑ์

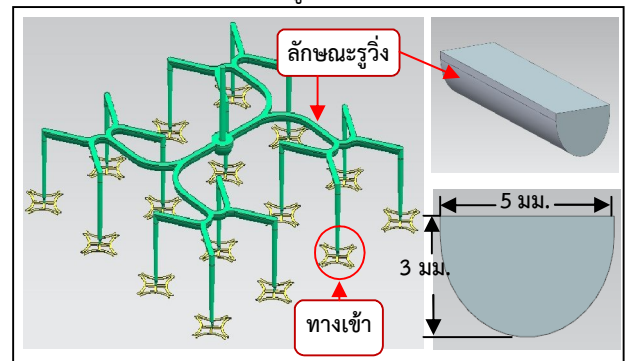
การออกแบบผลิตภัณฑ์ด้วยโปรแกรมช่วยออกแบบ (CAD) โดยสร้างแบบจำลองผลิตภัณฑ์ที่แสดงตามรูปที่ 2 และบันทึกข้อมูลเก็บไฟล์เป็นนามสกุล STL (Stereolithography)



รูปที่ 2 แบบ 3 มิติ ของแหวนยางกระตักน้ำเก็บความร้อน-เย็น

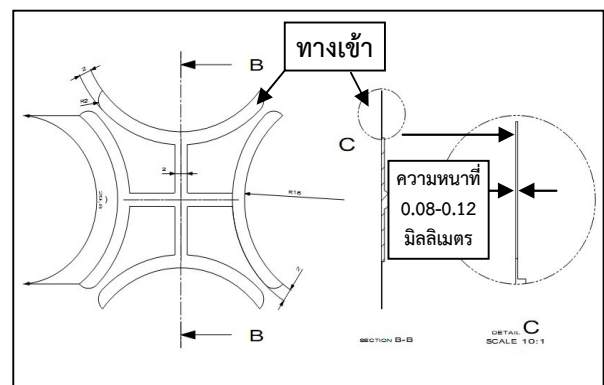
2.3 การออกแบบรูว้างและทางเข้าของผลิตภัณฑ์

การออกแบบรูว้างโดยหน้าตัดของรูว้างเป็นแบบบอลโนส [1]-[4] ดังแสดงตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปแบบรูว้างและลักษณะรูว้างแบบบอลโนส

การออกแบบทางเข้าชิ้นงานเป็นทางเข้าแบบฟิล์ม (Film Gate) [1]-[4] โดยมีขนาดความหนาทางเข้าในแม่พิมพ์แบบฟิล์ม ที่ 0.08 และ 0.12 มิลลิเมตร ความกว้างคงที่ 2 มิลลิเมตร ดังแสดงตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะทางเข้าแบบฟิล์มที่ใช้ในการทดลอง

2.4 การออกแบบการทดลอง

2.4.1 กำหนดตัวแปรต้นที่ควบคุมได้ คือ ขนาดความหนาทางเข้าผลิตภัณฑ์ และความดันฉีด ดังตารางที่ 1 ตารางที่ 1 ความหนาทางเข้า และความดันฉีด

ความหนาทางเข้า (mm)	0.08				0.12			
ความดันฉีด* (%)	100	80	60	40	100	80	60	40

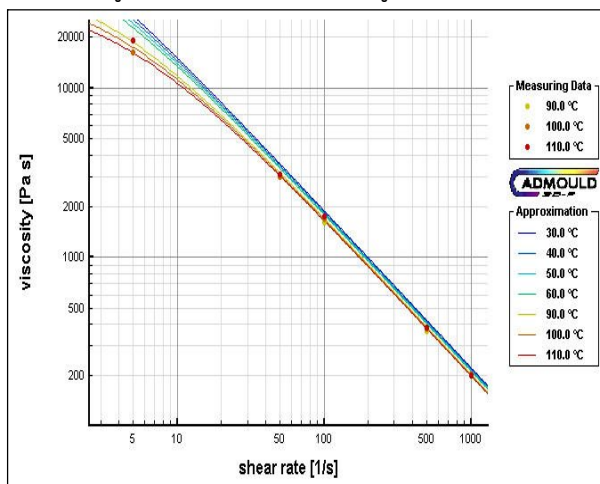
หมายเหตุ* ความดันฉีดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความดันที่ตั้งค่าให้กับเครื่องฉีด

2.4.2 กำหนดผลกระทบที่เกิดจากการออกแบบความหนาของทางเข้าผลิตภัณฑ์ และความดันฉีด ได้แก่ ความดันสูญเสีย ระยะเวลาในการเติมเต็มเนื้อมาจนพาวด์และความเร็วในการเติมเต็ม ซึ่งส่งผลต่อการบิดตัว และได้ผลิตภัณฑ์ที่ดีไม่เต็ม

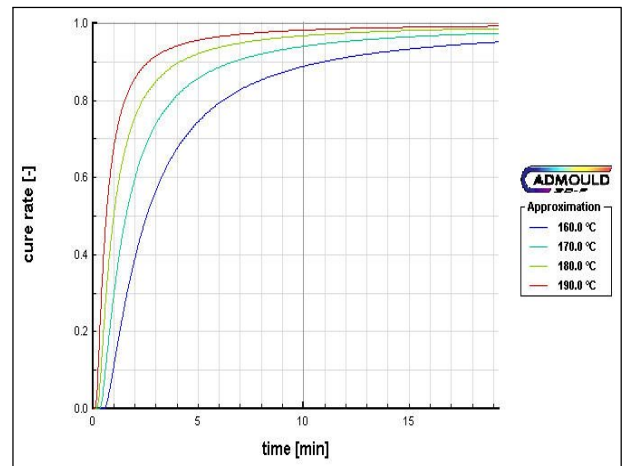
2.5 การจำลองการไหลของยางในแม่พิมพ์ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม

2.5.1 กำหนดขนาดของเอลิเมนต์ให้เป็น 1 เปอร์เซ็นต์ของความยาวเส้นทแยงมุมที่สัมผัสกับขอบของชิ้นงาน ที่เหมาะสมกับขนาดความหนาของชิ้นงาน 0.1-5 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้แบ่งได้ทั้งสิ้น 38,890 เอลิเมนต์

2.5.2 กำหนดสมบัติของวัสดุยางซิลิโคน ความแข็ง 50 ชอร์เอ ที่ได้จากการทดสอบและค่าเริ่มต้นต่างๆ ในการจำลองการฉีดขึ้นรูป [5] แสดงดังตารางที่ 2 รูปที่ 5 และ 6



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด (Viscosity) กับอัตราเฉือน (Shear Rate) ของยางที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคงรูป (Cure Rate) กับเวลา (Time) ของยางที่ได้จากการทดสอบ ตารางที่ 2 ค่าเริ่มต้นต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูป

ค่าเริ่มต้น	ค่าที่กำหนด
1.แรงบีดแม่พิมพ์ (tons)	200
2.ความดันไฮดรอลิกในการอัดสูงสุด (kg/cm ²)	180
3.ความดันฉีดสูงสุด (bar)	700
4.เวลาในการฉีด (s)	10
5.อุณหภูมิในการฉีด (°C)	80
6.อุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ใช้ในการคงรูป (°C)	175
7.เวลาในการคงรูป (s)	180
8.อัตราการคงรูปที่น้อยที่สุด (%)	75
9.อัตราการคงรูปเฉลี่ย (%)	95
10.ความหนาแน่น (g/cm ³)	1.15
11.สัมประสิทธิ์การนำความร้อน W/(m-K)	0.3

2.5.3 การจำลองและวิเคราะห์ผลการไหลของยางคอมพาวด์ในแม่พิมพ์ ด้วยสมการควบคุม (Governing Equation) ของพฤติกรรมการไหล อธิบายด้วยสมการของการอนุรักษ์มวล สมการโมเมนตัม และสมการพลังงาน ซึ่งเรียกว่าสมการกฎทรงมวลสำหรับการไม่อัดตัว ดังสมการที่ (1)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

เมื่อ u, v, w เป็นความเร็วตามแกน x, y, z ตามลำดับ

ซึ่งการจำลองการเติมเต็มด้วยสมการโมเมนตัมสำหรับของไหลที่ไม่หนืดหยุดแบบ นอน-นิวตันเนียน (Non - Newtonian) และแรงเฉื่อย (Inertial forces) ดังสมการที่ (2) และ (3)

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

เมื่อ P คือ ความดัน และ η คือ ความหนืด

ส่วน นอน-ไอโซเทอร์มอล (Non – Isothermal) ในช่วงการเติมเต็ม ด้วยสมการพลังงาน ดังแสดงสมการที่ (4)

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k_{th} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \Phi + \dot{Q} \quad (4)$$

กำหนดให้ ρ, C_p, k_{th}, Φ และ $\dot{Q}$ ตามลำดับเป็นความหนาแน่น ความจุร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความหนืดจากการให้ความร้อนและอัตราการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาจากการคงรูปตามลำดับ

สำหรับแบบจำลองจลศาสตร์ของการคงรูป (Curing Kinetic Model) ดังสมการที่ (5)

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\bar{n}}{k} t^{-(1+\bar{n})} \alpha^2 \quad (5)$$

ให้ $\alpha = Q/Q_\infty$ เป็นลำดับขั้นของการคงรูป โดยที่ Q คือ ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาที่ขึ้นกับเวลา t และ Q_∞ คือปริมาณความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา

เมื่อ t เป็นการเทียบระยะเวลาที่เกิดปฏิกิริยา ซึ่งการไหล แสดงดังสมการที่ (6)

$$\alpha = \frac{kt^{\bar{n}}}{1 + kt^{\bar{n}}} \quad (6)$$

โดย α เป็นปริมาตรที่ขึ้นกับเวลา t

ซึ่งปฏิกิริยาการคงรูปเกิดขึ้นในสภาวะการเติมเนื้อยางคอมพาวด์เข้าเบ้าพิมพ์ (Cavity-Filling Stage) ดังแสดงสมการที่ (7)

$$k = k_0 \exp \{ -E / RT \} \quad (7)$$

ให้ $k_0, E, \bar{n}$ คือค่าคงที่จลศาสตร์ (Kinetic Constant) ที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ [6] จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการไหลดังกล่าวข้างต้นกับการทดสอบการฉีดขึ้นรูป (Injection Moulding)

3. ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการจำลองการขึ้นรูป

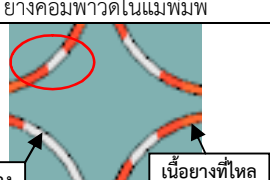
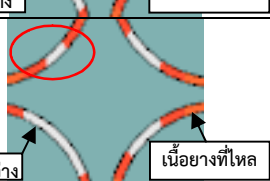
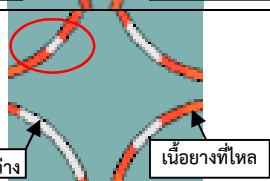
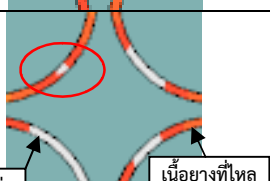
ผลการจำลองการขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของไหลตัว

ต่างๆ ของยางคอมพาวด์ที่จำเป็นต้องนำไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อลดปัญหาในงานฉีดขึ้นรูป แสดงดังตารางที่ 3 และ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่าลักษณะการไหลตัวของยางคอมพาวด์ไม่เต็มพร้อมกันของการขึ้นรูปของงานแหวนยางกระดิกน้ำเก็บความร้อน-เย็น เกิดการบิดงอและการโก่งตัว ไม่สามารถนำไปประกอบร่วมกับชิ้นงานอื่นได้

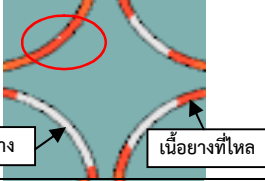
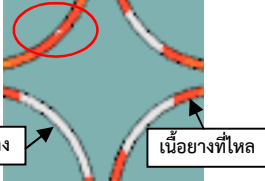
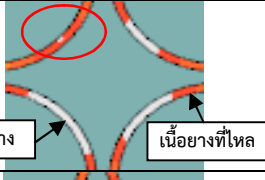
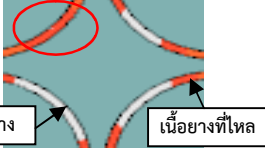
ตารางที่ 3 ค่าเวลาในการเติมเต็ม ความดันสูญเสีย และความเร็วในการเติมเต็ม ที่ได้จากการจำลองการไหลของยางคอมพาวด์ในแม่พิมพ์

ความหนาทางเข้า (mm)	ความดันฉีด (%)	เวลาในการเติมเต็ม (s)	ความดันสูญเสีย (bar)	ความเร็วในการเติมเต็ม (mm/s)
0.08	100	9.93	131.40	190.70
	80	12.49	196.20	151.50
	60	16.66	164.80	113.70
	40	24.99	88.50	76.00
0.12	100	9.76	156.80	238.60
	80	12.20	135.8	232.00
	60	16.27	64.60	140.60
	40	24.41	73.3	99.90

ตารางที่ 4 ลักษณะการไหลเติมเต็มเนื้อยางคอมพาวด์ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ 98 เปอร์เซ็นต์ ของเวลาเติมเต็มจากการจำลองการไหล

ความหนาของทางเข้า (mm)	ความดันฉีด (%)	ลักษณะการไหลเติมเต็มเนื้อยางคอมพาวด์ในแม่พิมพ์
0.08	100	
	80	
	60	
	40	

ตารางที่ 4 ลักษณะการไหลเติมเต็มเนื้อมายคอมพาวด์ในการขึ้นรูปชิ้นงานที่ 98 เปอร์เซ็นต์ ของเวลาเติมเต็มจากการจำลองการไหล (ต่อ)

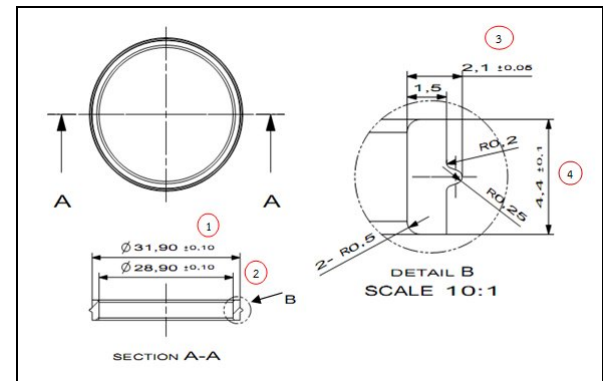
ความหนาของทางเข้า (mm)	ความดันฉีด (%)	ลักษณะการไหลเติมเต็มเนื้อมายคอมพาวด์ในแม่พิมพ์
0.12	100	 ช่องว่าง เนื้อยางที่ไหล
	80	 ช่องว่าง เนื้อยางที่ไหล
	60	 ช่องว่าง เนื้อยางที่ไหล
	40	 ช่องว่าง เนื้อยางที่ไหล

พิจารณาลักษณะการเติมเต็มของเนื้อมายคอมพาวด์ในเบ้าแม่พิมพ์ขึ้นรูปที่ 98 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพิจารณาความดันฉีดที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของความดันที่ตั้งค่าให้กับเครื่องฉีด ที่ความหนาของทางเข้า 0.08 มม. จะมีช่องว่างจำนวน 4 เบ้าของยางที่จะไหลเข้าสมดุลง่ายใกล้เคียงกัน ส่วนกรณีความหนาของทางเข้า 0.12 มม. ยางไหลเต็มไปแล้ว 1 เบ้า(ในส่วนที่อยู่ในวงรี) และอีก 3 เบ้าที่เหลือยังไม่เกิดการเติมเต็ม แสดงว่าเป็นการเติมเต็มที่ไม่สมดุลง่าย ดังนั้นการไหลของยางที่สมดุลง่ายเข้าช่องว่างประสานพร้อมกันหรือใกล้เคียงกันถึงจะดี เพราะจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพที่ดี ปัจจัยที่ควรพิจารณาต่อมาคือเวลาในการเติมเต็ม ความดันสูญเสีย และความเร็วในการเติมเต็มของเนื้อมายคอมพาวด์ ตามลำดับ ซึ่งภาคอุตสาหกรรมต้องการใช้เวลาน้อยในการเติมเต็มของ 1 รอบการทำงาน ทำให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นทันต่อความต้องการของตลาด จากการจำลองการไหลของยางทั้ง 8 กรณี พบว่าทางเข้าแบบฟิล์มที่ความหนา 0.08 มิลลิเมตร ความดันฉีดที่ 100 เปอร์เซ็นต์ของความดันที่ตั้งค่าให้กับเครื่องฉีด ที่เวลาในการเติมเต็มที่ 9.93 วินาที ความดันสูญเสียที่ 131.40 บาร์ และความเร็วในการเติมเต็มของเนื้อมายคอมพาวด์ที่ 190.70 มิลลิเมตรต่อวินาที

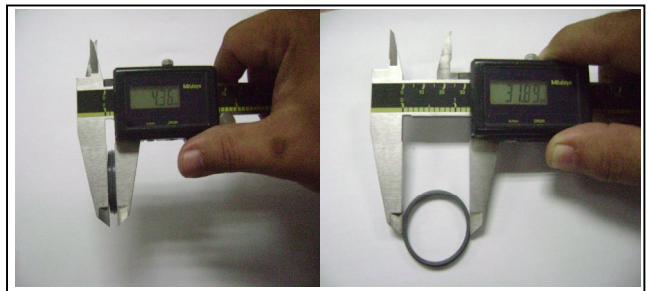
ทำให้การไหลตัวของยางคอมพาวด์สม่ำเสมอมากที่สุด ใช้เวลาน้อย ส่งผลให้เกิดการบิดงอ และการโก่งตัวของผลิตภัณฑ์น้อยกว่าแบบอื่น จึงนำไปออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปต่อไป

3.2 ผลการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ชิ้นงาน

ผลการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปจากแม่พิมพ์ฉีด เปรียบเทียบแบบผลิตภัณฑ์ชิ้นงานในตำแหน่งที่ตรวจวัดสำหรับชิ้นงานดังแสดงตารางที่ 5 รูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 จุดที่ตรวจสอบของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 8 การตรวจสอบผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 5 การตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปกับแบบของผลิตภัณฑ์

ตารางการตรวจสอบผลิตภัณฑ์			
จุดที่ตรวจสอบ	ระยะที่กำหนดจากแบบ 2 มิติ (mm.)	ระยะที่วัดจากชิ้นงาน (mm.)	ผลการตรวจสอบ*
1	31.90 ± 0.10	31.89	(√)
2	28.90 ± 0.10	28.83	(√)
3	2.10 ± 0.05	2.07	(√)
4	4.40 ± 0.10	4.36	(√)

หมายเหตุ* (√) และ (X) คือ อยู่ และ ไม่อยู่ ในค่าพิสัยความเผื่อตามลำดับ

ผลการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ชิ้นงานแหวนยางกระดิกน้ำเก็บความร้อน-เย็น พบว่าขนาดและระยะที่ได้ตรวจสอบชิ้นงานเปรียบเทียบกับแบบ 2 มิติ ในตำแหน่งที่ตรวจสอบ ที่ 1 ถึง 4 อยู่ในค่าพิสัยความเผื่อตามแบบ 2 มิติที่กำหนด

4. สรุป

จากการจำลองพฤติกรรมการไหลของยางในเบ้าแม่พิมพ์ โดยกำหนดความดันฉีดสูงสุดไว้ที่ 700 บาร์ และอุณหภูมิคงรูปของยางที่ 175 องศาเซลเซียส ซึ่งทางเข้าและความดันฉีดที่เหมาะสมที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมการไหลของยางในงานวิจัยนี้คือ ทางเข้าแบบฟิล์มที่มีความหนา 0.08 มิลลิเมตร ความดันฉีดที่ 100 บาร์เซ็นต์ของความดันที่ตั้งค่าให้กับเครื่องฉีด ส่งผลให้การไหลตัวของยางคอมพาวด์สม่ำเสมอ เกิดการบิดงอ และการโก่งตัวของชิ้นงานน้อยลงจากเดิม ของเสียน้อยลง ผลลัพธ์ที่ได้ อยู่ค่าในพิกัดความเผื่อ ทำให้ได้ต้นทุนที่ถูกลง ดังนั้นจะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มศักยภาพของผู้ออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ ทำให้อุตสาหกรรมแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง สามารถแข่งขันได้ต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัยโครงการวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ ยุทธศาสตร์ที่ 2 การยกระดับความสามารถด้านเทคโนโลยีการผลิตแม่พิมพ์ความเที่ยงตรง และ ความซับซ้อนสูงผ่านสถาบันไทย-เยอรมัน (TGI) กระทรวงอุตสาหกรรม ประจำปี 2554 และศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง (CERM) สถาบันคีนคัว และพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RDIP) สำหรับความช่วยเหลือด้าน สถานที่ ข้อมูล และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Gent, A.N. (2001). *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*, 2nd, Hanser, Munich, Germany.
- [2] Menges, G., and Mohren, P. (1993). *How to Make Injection Molds*, Hanser, Munich, Germany.
- [3] Beaumont, J.P. (1952). *Runner and Gating Design handbook: Tools for successful injection molding*. Hanser, Munich, Germany.
- [4] ชาลี ตระการกุล (2542). การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- [5] Simcon Kunststoffechnische Software GmbH. (2002). *Cadmould Rubber User's Manual*, Simcon Herzogenrath, Germany.

- [6] Isayev, A.I. (1991). *Modeling of Polymer Processing*, Hanser Publishers, Munich, Germany.