



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์แบบอัดส่งชนิดหลายเบ้าที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่มีความเที่ยงตรงสูง

The Development on Design and Manufacturing of the Multi-Cavity Transferred
Moulds for Precision Rubber Products

นามผู้วิจัย นายณัฐพงศ์ จรุงรักษ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุกสิณี รอดขวัญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ชนะ รักเกียรติ, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์แบบอัดส่งชนิดหลายเบ้าที่ใช้
ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่มีความเที่ยงตรงสูง

The Development on Design and Manufacturing of the Multi-Cavity
Transferred Moulds for Precision Rubber Products

โดย

นายณัฐพงศ์ จรุงรักษ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

นัฐพงษ์ จรุงรักษ์ 2555: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์แบบอัดสังชนิตหลายเบ้า
ที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความเที่ยงสูง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมเครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุกสิณี รอดขวัญ, Ph.D. 160 หน้า

โดยทั่วไปแล้วการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยแม่พิมพ์อัดนั้นเหมาะสมกับการผลิตผลิตภัณฑ์
ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อน และมีปริมาณการผลิตที่ไม่สูงมากนัก แต่สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง
มีขนาดเล็กและมีความบาง เช่นผลิตภัณฑ์ภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จำเป็นต้องขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ฉีด
หรืออัดสลับแทนการใช้แม่พิมพ์อัด อย่างไรก็ตามในการผลิตชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์อัดสังชนิตหลายเบ้า
มักเกิดความไม่สมดุลของความดันในแต่ละเบ้าขณะขึ้นรูป ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้ไม่มีคุณภาพตามที่
ต้องการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์แบบอัดสังชนิตหลาย
เบ้าที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง โดยมีกรณีศึกษาได้แก่ ผลิตภัณฑ์ยางซิลิโคนปุ่มกด
ภายในกล้องถ่ายรูป โดยมุ่งไปที่การศึกษาลักษณะของประเภทของทางเข้าและรูปร่างที่มีผลต่อการขึ้นรูป
ด้วยแม่พิมพ์อัดสังชนิตผลิตภัณฑ์แบบหลายเบ้าที่มีความเที่ยงตรงสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำคอมพิวเตอร์
ช่วยในการออกแบบและผลิต มาช่วยในการสร้างแม่พิมพ์ที่มีทางเข้าลักษณะเป็นแบบพัดและแบบฟิล์ม
ซึ่งมีความกว้าง 6.00 8.00 และ 10.00 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยกำหนดความหนาเท่ากับ 0.05
มิลลิเมตร ส่วนรูปร่างมีสองประเภทที่มีลักษณะแบบตัวเอช และกากบาท ที่มีรูปร่างเป็นแบบ บอลโนส
สัดส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 0.90 และใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม
ในการจำลองวิเคราะห์การไหล ผลการวิจัยพบว่ารูปร่างแบบตัวเอชที่ไม่สมดุลทางกายภาพแบบที่ 2 ซึ่งมี
ทางเข้าแบบฟิล์มที่มีความกว้าง 8 มิลลิเมตร มีความสมดุลในการเติมเนื้อยางใกล้เคียงกันในทุกเบ้าของ
แม่พิมพ์ โดยมีความดันสูญเสียภายในเบ้าแม่พิมพ์ที่ 531 บาร์ ความเค้นเฉือนของยางที่ไหลเข้าเบ้า
แม่พิมพ์ที่ 229 กิโลปาสกาล ความเร็วของยางที่ไหลเข้าเบ้าแม่พิมพ์ที่ 406 มิลลิเมตรต่อวินาที เวลาใน
การเติมยาง 4.99 วินาที และอุณหภูมิการคงรูปร่าง 180 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการจำลองสอดคล้องกัน
กับผลการทดสอบขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยแม่พิมพ์อัดสังชนิตจริง นอกจากนั้นกระบวนการการศึกษาใน
งานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาการผลิตแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น
ให้มีคุณภาพที่สูงขึ้นได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมแม่พิมพ์
ผลิตภัณฑ์ยางของประเทศให้สามารถแข่งขันระดับนานาชาติต่อไป

Nattapong Charungruk 2012: The Development on Design and Manufacturing of the Multi-Cavity Transferred Moulds for Precision Rubber Products. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Supasit Rodkwan, Ph.D. 160 pages.

Generally, compression moulding process of rubber is widely used for conventional products with less complicated shape and less precision requirement. Nevertheless, for most rubber products used in electronics and electrical industries, where smaller product size and high accuracy of part dimensions are usually found, transferred and injection moulding are often utilized instead. Moreover, in transferred moulding, unbalanced pressure in each cavity of the mould is still the challenging major task for operators to overcome. Therefore, in this research, the design and manufacturing of the multi-cavity transferred moulds for precision rubber products is proposed. The silicone rubber product used as a component in cameras is chosen as a case study. The main investigated mould design parameters include the gate types: fan and film gates, with various widths of 6.00, 8.00, 10.00 mm. at the constant thickness of 0.05 mm., as well as the runner geometry types: H and X ball nose shapes with the width per height ratio of 0.90. In this work, Computer Aided Design/Manufacturing (CAD/CAM) techniques were used to assist in 24 cavity mould design and production process; in addition, Computer Aided Engineering (CAE) was also performed to study rheology behavior of silicone during moulding process. Both experimental and simulation work were carried out. The numerical results show that the mould with a film gate with the width of 8 mm. and a H runner type 2 provides the optimized balancing of silicone rubber filling in each mould cavity. Such a case, the pressure loss, shear stress of incoming silicone rubber into the cavity, speed of rubber material running into the cavity, filling time, and curing temperature were found as 531 bar, 229 kPa, 406 mm./s, 4.99 seconds, and 180 degree Celsius, respectively. The empirical data correlates well with the predicted numerical result. Consequently, it can be seen that the procedure used in this research can be further developed for rubber products in other industries; as a result, Thai rubber product manufacturers can compete in the international marketing level in the near future.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอขอบพระคุณ ดร.ชนะ รัชศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และ รองศาสตราจารย์สถาพร ชาดาคม ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย (สกว.) ประเภททุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (TRF Master Research Grants: TRF-MAG Window I ประจำปี พ.ศ. 2552) เลขที่สัญญา WRG-WI525E032 สำหรับทุนในการศึกษาของข้าพเจ้าและดำเนินงานทางวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณ คุณชุต สุวรรณพิมลกุล กรรมการผู้จัดการ บริษัท เอส เค โพลีเมอร์ จำกัด และ คุณสุนทร รอดวิสัย วิศวกร บริษัท ไทยรับเทค จำกัด ที่ให้ความช่วยในการดำเนินการวิจัย รวมถึงการคัดเลือกโจทย์งานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านจากศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันคั่นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ ที่ให้การสนับสนุนให้คำปรึกษา และอนุเคราะห์ในด้านคำแนะนำ เครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ เป็นอย่างดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ได้ให้การอบรมและให้กำลังใจผู้วิจัยมาตลอดในทุกเรื่อง

ณัฐพงศ์ จรุงรักษ์

เมษายน 2555

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	61
อุปกรณ์	61
วิธีการ	66
ผลและวิจารณ์	82
สรุปและข้อเสนอแนะ	110
สรุป	110
ข้อเสนอแนะ	115
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	116
ภาคผนวก	120
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบคุณสมบัติของยางซิลิโคน	121
ภาคผนวก ข แบบผลิตภัณฑ์ปั๊มกดภายในที่ใช้กลึงถ่ายรูป และแบบแม่พิมพ์ อัดส่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางปั๊มกดภายในที่ใช้กลึงถ่ายรูป	143
ภาคผนวก ค ขั้นตอนการใช้งานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ CADMOULD	149
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	160

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 ขั้นตอนในการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป	21
2 ข้อดีและข้อจำกัดของแม่พิมพ์แบบอัด	22
3 ข้อดีและข้อจำกัดของแม่พิมพ์แบบอัดส่ง	24
4 ขั้นตอนในการขึ้นรูปยางด้วยการขึ้นรูปแบบอัดส่ง	24
5 ขั้นตอนในการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูป	28
6 ข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง	29
7 รายละเอียดการแบ่งเอลิเมนต์ตามความกว้าง 24 มิลลิเมตร ยาว 47 มิลลิเมตร สูง 0.30 มิลลิเมตร และเส้นทแยงมุม 52.64 มิลลิเมตร	72
8 ประเภทแบบรูว้าง ลักษณะชนิดทางเข้าและขนาดทางเข้าชิ้นงาน 12 แบบ	74
9 ขั้นตอนการทำงานเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการฉีดกับกระบวนการอัดส่ง	77
10 ค่าเริ่มต้นต่างๆ ในการจำลองการอัดส่งขึ้นรูป	78
11 การเปรียบเทียบค่าตัวแปรตามต่างๆ ที่ตำแหน่งทางเข้าของชิ้นงาน	86
12 ตารางจัดอันดับลักษณะรูว้างและทางเข้า	94
13 ขั้นตอนการอัดส่งขึ้นรูปชิ้นงาน	104
14 น้ำหนักของยางคอมพาวด์ในตำแหน่งต่างๆ และของเสียที่เกิดขึ้นจากการอัดส่งชิ้นงาน	105
15 การเปรียบเทียบในตำแหน่งที่ตรวจรับชิ้นงานกับแบบชิ้นงาน	108
16 ขั้นตอนการเลือกรูปแบบที่ผลิตแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูป	109

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ตัวอย่างเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าในงานความละเอียดสูง (Micro EDM)	2
2 ตัวอย่างขนาดระยะและผลิตภัณฑ์ข้างปุมกภายในกล้องถ่ายรูป	3
3 โครงสร้างโพลีไอโซพรีน	7
4 โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน	8
5 กระบวนการผลิตชิ้นงานยาง	10
6 การเกิด Velocity Gradient เมื่อมีแรงมากระทำในแนวนอนกับพื้นผิวของของไหล	12
7 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของเหลว	14
8 การทดลองของเรย์โนลด์	16
9 สมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้นและการยืดหยุ่นไม่เชิงเส้นของวัสดุ	18
10 ขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์ยาง	19
11 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป	20
12 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป	21
13 ตัวอย่างเครื่องอัดยางแบบอัดขึ้นรูป	22
14 การขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดส่ง	23
15 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดส่ง	23
16 ตัวอย่างเครื่องอัดยางแบบอัดส่ง	25
17 ส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้งและแนวนอน	26
18 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง	26
19 เครื่องฉีดยาง (ก) เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง และ (ข) เครื่องฉีดยางแบบแนวนอน	27
20 ขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์เบื้องต้น	30
21 รูปทรงหน้าตัดของรูว้าง (ก) แบบกลม (ข) แบบตัวยู (ค) แบบสี่เหลี่ยมคางหมู (ง) แบบครึ่งวงกลม และ (จ) แบบสี่เหลี่ยมคางหมูแปรชนิดเบน	31
22 ขนาดความกว้างรูว้างเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง	32
23 รูว้างที่ออกแบบให้สมดุลทางเรขาคณิต (ก) แบบเอช และ (ข) แบบกากบาท	33
24 รูว้างที่ออกแบบให้สมดุลทางเรขาคณิตมี 64 หลุมแสดงในภาพครึ่งแม่พิมพ์	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
25 รูวี่งที่ออกแบบให้ไม่สมดุลทางเรขาคณิตมี 64 หลุมแบบก้างปลาในภาพครึ่งแม่พิมพ์	34
26 การสมดุลระบบป้อน	34
27 การกำหนดตำแหน่งของรูเข้า (ก) ใช้รูเข้าขอบกับชิ้นงานรูปถ้วย ทำให้เกิดรอยเชื่อมตรงตำแหน่งที่หลอมไหลมาบรรจบกัน (ข) ชิ้นงานแบบเดียวกัน แต่ใช้รูเข้าแบบรูฉีด ทำให้หลอมไหลอย่างสม่ำเสมอ	35
28 ทางเข้าแบบรูฉีด	36
29 ทางเข้าขอบแบบสี่เหลี่ยม (ก) ทำรูเข้าบนแผ่นเบ้า (ข) ชิ้นงานที่มีแกนรูเข้าติดอยู่ (ค) ภาพตัดของแม่พิมพ์ (ง) และ (จ) ทางเข้าขอบแบบสี่เหลี่ยมรูปทรงอื่น	37
30 ทางเข้าแบบเหลี่ยม (ก) รูปร่างของเบ้า (ข) ชิ้นงานที่มีแกนทางเข้าติดอยู่ (ค) ทางเข้าแบบเหลี่ยมตัดเนื้อมบนผิวราบของแผ่นแม่พิมพ์ (ง) ภาพตัดแสดงทางเข้าแบบเหลี่ยมในแม่พิมพ์	37
31 ทางเข้าแบบพัด	38
32 ทางเข้าแบบแถบ	39
33 ทางเข้าแบบม่าน การเลือกทางเข้าแบบ (ก) หรือ (ข) ขึ้นอยู่กับวิธีนำไปใช้งานของท่อ	39
34 ทางเข้าแบบวงแหวน	40
35 ทางเข้าแบบฟิล์ม	40
36 ทางเข้าแบบเข็ม	41
37 ทางเข้าขอบแบบกลม	42
38 ทางเข้าใต้ผิวแม่พิมพ์	42
39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเนื่องกับการฉีด โดย Carreau Viscosity Model	46
40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิที่ความดันค่าต่างๆ PvT diagram	49
41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคงรูปและเวลาที่ทำให้ยางสุกตัว	51
42 แสดงผลการเกิดการบิดงอ (Warpage) จากการจำลองด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
43 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของทางวิ่งกับการเกิดการบิดงอ	54
44 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทางวิ่งกับการเกิดการบิดงอ	55
45 การเปรียบเทียบการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรม ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม เพื่อคุณลักษณะการไม่สมดุลของการเติมเนื้อพลาสติก	58
46 การเปรียบเทียบการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรม ช่วยวิเคราะห์ เพื่อคุณลักษณะการไม่สมดุลของการเติมเนื้อพลาสติก	59
47 การเปรียบเทียบการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรม ช่วยวิเคราะห์ เพื่อคุณลักษณะการสมดุลของการเติมเนื้อพลาสติก จากการแก้ไข ด้วยวิธียกทางวิ่งเข้าด้านบนจนถึงที่จะถึงแยกของทางวิ่ง (Overtum)	60
48 หลักการทำงานของโปรแกรม CADMOULD	61
49 เครื่อง Electronic Densimeter (MD-200S) มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 297	62
50 เครื่อง Capillary Rheometer มาตรฐานการทดสอบ: ASTM D 5099	63
51 เครื่อง Moving Die Rheometer มาตรฐานการทดสอบ: ASTM D 5289	63
52 เครื่อง Mettler Toledo DSC 882 มาตรฐานการทดสอบ: DIN 51007	64
53 เครื่อง Thermoflizer (SWO Polymertechnik GmbH) มาตรฐานการทดสอบ: DIN 51007	64
54 เครื่องอัดส่งผลิตภัณฑ์ยาง ยี่ห้อ Lin Cheng P100	65
55 แผนภาพขั้นตอนในการปฏิบัติงานวิจัย	66
56 ผลิตภัณฑ์ยางป้อนกดในกล้องถ่ายรูปที่ใช้เป็นกรณีศึกษา	67
57 ลักษณะผลิตภัณฑ์ยางป้อนกดในกล้องถ่ายรูป ภาพ (ก) ด้านหน้า ภาพ (ข) ด้านหลัง แบบ 3 มิติ	67
58 แผนภาพก้างปลาแสดงปัญหาตามสาเหตุชิ้นงานไม่ได้ขนาดตามที่กำหนด	69
59 แบบ 2 มิติของผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง	70
60 แบบ 3 มิติ แบบทรงตันของผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง	71
61 กล่องขอบเขต (Bounding Box) ที่สัมผัสกับขอบชิ้นงาน	71
62 ลักษณะ (ก) ทางเข้าแบบพัด (Fan Gate) และ (ข) ทางเข้าแบบฟิล์ม (Film Gate)	72
63 ลักษณะการสมดุลรูว้าง 2 แบบ (ก) สมดุลรูว้างแบบกากบาท (ข) สมดุลรูว้างแบบเอช	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
64	ลักษณะรูปร่างหน้าตัดแบบด้วย	73
65	การเปรียบเทียบค่าปริมาตรรวมของรูปร่างทั้ง 12 แบบ	75
66	ตำแหน่งทางเข้าของยางคอมพาวด์ เข้าที่ชิ้นงานแผ่นปั๊มกดในกล้องถ่ายภาพ	76
67	การเปรียบเทียบลักษณะกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีดและแบบอัดส่งเพื่อคำนวณหา ค่าความดันอัดส่งสูงสุด	76
68	วิธีการใส่ข้อมูลในโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม	80
69	แบบประกอบชิ้นส่วนแม่พิมพ์	81
70	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของยางคอมพาวด์กับอัตราเลื่อน จากการทดสอบ และค่าที่คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมคำนวณ	82
71	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคงรูปยางคอมพาวด์กับเวลาที่ได้จากการทดสอบ	83
72	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับจำนวนเอลิเมนต์	84
73	ระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณกับจำนวนเอลิเมนต์	85
74	ตำแหน่งทางเข้าของยางคอมพาวด์ เข้าที่ชิ้นงานแผ่นปั๊มกดในกล้องถ่ายภาพ	86
75	ลักษณะรูปร่างทั้ง 2 แบบ ภาพ (ก) แบบที่ 1 ระยะรูปร่างเท่ากันและมีความสมดุล ทางกายภาพ ภาพ (ข) แบบที่ 2 ระยะรูปร่างไม่เท่ากันและไม่เกิดความสมดุล ทางกายภาพ (ค) การจำลองการไหลของระยะทางรูปร่างแบบที่ 1 และ (ง) การจำลอง การไหลของระยะทางรูปร่างแบบที่ 2	87
76	ตำแหน่งที่ตรวจสอบช่วงการเติมเต็มของชิ้นงาน	88
77	การเปรียบเทียบความดันที่ใช้เติมเนื้อยางแต่ละเบ้าของระยะทางรูปร่างแบบที่ 1 กับระยะทางรูปร่างแบบที่ 2	89
78	ความดันสูญเสียที่ใช้ในการเติมยางเข้ากับรูปร่างและทางเข้าของชิ้นงาน	90
79	เวลาในการเติมเต็มที่ใช้ในการอัดส่งกับรูปร่างและทางเข้าชิ้นงาน	91
80	ความเค้นเฉือนที่ใช้ในการอัดส่งกับลักษณะรูปร่างและทางเข้าชิ้นงาน	92
81	ความเร็วที่ใช้ในการอัดส่งกับรูปร่างและทางเข้าชิ้นงาน	93
82	ลักษณะรูปร่างและทางเข้าแบบ H-Film-08 ที่ได้จากการจำลองการไหลในส่วน (ก) ความดันสูญเสียภายในเบ้าแม่พิมพ์ (ข) เวลาในการเติมเต็มภายในเบ้าแม่พิมพ์	95

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
83	ลักษณะรูปร่างและทางเข้าแบบ H-Film-08 ที่ได้จากการจำลองการไหลในส่วน (ก) ความเค้นเฉือนภายในเบ้าแม่พิมพ์ (ข) กราฟแสดงอัตราคงรูปของยาง	83
84	แบบ 3 มิติของแม่พิมพ์อัดส่งผลิตภัณฑ์ปุ่มกดภายในกล่องถ้วยรูป	97
85	แบบรูปร่าง ทางเข้า และขนาดทางเข้า ของแม่พิมพ์จำนวน 24 เบ้า	97
86	แบบแม่พิมพ์แผ่นล่างจำนวนเบ้าแม่พิมพ์ 24 เบ้า	98
87	ลักษณะแม่พิมพ์แผ่นบนที่ได้จากกระบวนการผลิตแม่พิมพ์	98
88	แบบแม่พิมพ์แผ่นบนจำนวนเบ้าแม่พิมพ์ 24 เบ้า	99
89	ลักษณะแม่พิมพ์แผ่นบนที่ได้จากกระบวนการผลิตแม่พิมพ์	99
90	แบบแม่พิมพ์แผ่นกลางจำนวนเบ้าแม่พิมพ์ 24 เบ้า	100
91	ลักษณะแม่พิมพ์แผ่นกลางที่ได้จากกระบวนการผลิตแม่พิมพ์	100
92	ลักษณะอุปกรณ์ดันปลดให้แม่พิมพ์สมดุล	101
93	ลักษณะแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตแม่พิมพ์	101
94	การติดตั้งแม่พิมพ์และส่วนประกอบของแม่พิมพ์	102
95	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เครื่องอัดส่งยางและแม่พิมพ์	103
96	ภาพตัดภายในแม่พิมพ์บอกตำแหน่งของยางคอมพาวด์	105
97	การตรวจวัดความหนาของขนาดกระดาษมาตรฐาน A4 เปรียบเทียบกับความหนาของชิ้นงาน	106
98	ตำแหน่งระยะที่ตรวจสอบชิ้นงานกับแบบชิ้นงาน 2 มิติ	107
99	กราฟ (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของยางคอมพาวด์กับอัตราเฉือน และ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคงรูปยางคอมพาวด์กับเวลา	110
100	ขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่นำมาวิจัยและการวิจัย	111
101	ตำแหน่งทางเข้า ระยะทางรูปร่าง ลักษณะทางเข้า และขนาดทางเข้าที่เลือกในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์อัดส่ง	112
102	ผลการจำลองการไหลของรูปร่างและทางเข้าแบบ H-Film-08 ที่ใช้ในการออกแบบและการผลิตแม่พิมพ์อัดส่ง	113
103	การออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ 2 มิติ และ 3 มิติ	113
104	แม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดในกล่องถ้วยรูปที่ได้จากการผลิต	114

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 ผลการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นของยางซิลิโคน	122
ก2 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	123
ก3 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส	124
ก4 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	125
ก5 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	126
ก6 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	127
ก7 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	128
ก8 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	129
ก9 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	130
ก10 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	131
ก11 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส	132
ก12 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	133
ก13 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	134
ก14 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส	135
ก15 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส	136
ก16 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส	137
ก17 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส	138
ก18 ผลการทดสอบหาค่าการคงรูปของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส	139
ก19 ผลการทดสอบหาค่าการคงรูปของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส	140
ก20 ผลการทดสอบหาค่าการคงรูปของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	141
ก21 ผลการทดสอบหาค่าการคงรูปของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส	142
ข1 แบบ 2 มิติ ของผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูป	144
ข2 แบบ 2 มิติ แม่พิมพ์ประกอบผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูป	145
ข3 แบบ 2 มิติ แม่พิมพ์แผ่นบนของผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูป	146
ข4 แบบ 2 มิติ แม่พิมพ์แผ่นกลางของผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูป	147
ข5 แบบ 2 มิติ แม่พิมพ์แผ่นล่างของผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูป	148

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค1 เปิดไฟล์ที่เป็นนามสกุล *.stl	150
ค2 แบบที่ใช้ในการจำลองการวิจัย	150
ค3 ขั้นตอนการสร้างเอลิเมนต์	151
ค4 บล็อกชื่อ Mesh Prepare	152
ค5 ขั้นตอนป้อนค่าลงในบล็อกชื่อ Mesh Prepare	152
ค6 การปรากฏบล็อกชื่อ Gate Editor และ Point on	153
ค7 การวางตำแหน่ง Gate (ทางเข้า) ที่ขึ้นงาน	154
ค8 ขั้นตอนการเปิดไฟล์ Runner System	154
ค9 การปรากฏบล็อกชื่อ Runner System เพื่อสร้าง Runner	155
ค10 การปรากฏบล็อก Cadmould Material Database ที่เลือกวัสดุที่ใช้จำลองการไหล	155
ค11 การปรากฏบล็อก Process Parameter เพื่อป้อนข้อมูลเงื่อนไขในการอัดส่ง	156
ค12 การปรากฏบล็อก Flow-Rate/Pressure Input เพื่อป้อนข้อมูลของเครื่องอัดส่ง	157
ค13 การปรากฏบล็อก Simulation Description ทำการตั้งชื่อเพื่อบันทึกเก็บไว้	158
ค14 ผลที่ใช้การวิเคราะห์ ความดันสูญเสีย ความเค้นเฉือน ความเร็วในการเติม เนื้อยาง เวลาในการเติมเนื้อยาง และอัตราการผลิตของยาง	159

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

a	=	ค่าการกระจายความร้อน (Thermal Diffusivity)
A	=	พื้นที่หน้าตัดของรูว้าง (Cross-Section Area)
A	=	พื้นที่ภาพฉาย (Project Area)
A_1	=	พื้นที่ถูกสูบลมไฮโดรลิกตำแหน่งที่ 1 ของเครื่องฉีดและเครื่องอัดตั้ง (Area ₁)
A_2	=	พื้นที่ถูกสูบลมไฮโดรลิกตำแหน่งที่ 2 ของเครื่องฉีดและเครื่องอัดตั้ง (Area ₂)
CAD	=	คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (Computer Aided Design)
CAM	=	คอมพิวเตอร์ช่วยการผลิต (Computer Aided Manufacturing)
CAE	=	คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering)
C_p	=	ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity)
D	=	เส้นทแยงมุม (Diagonal Line)
D_h	=	ขนาดความกว้างของรูว้าง (Width of Hole)
E	=	ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Kinetic Constants Independent of Temperature)
E	=	ค่ายังโมดูลัส (Young's Modulus)
F	=	แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force)
F'	=	แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ (Shear Force)
FEM	=	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)
F_1	=	แรงดันที่กระทำต่อลูกสูบลมไฮโดรลิก ตำแหน่งที่ 1 (Forec ₁)
H	=	ความสูง (Height)
IGES	=	มาตรฐานการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิว (Initial Graphic Exchange Standard)
k_0	=	ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Kinetic Constants Independent of Temperature)
k_{th}	=	ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)
L	=	ความยาวเส้นทแยงมุม (Length)
l	=	ความยาวของท่อ (Length of Tube)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\bar{k}$	=	ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Kinetic Constants Independent of Temperature)
P	=	ความดันในแม่พิมพ์
P_1	=	ความดันปัมไฮโดรลิกสูงสุดของเครื่องฉีดและเครื่องอัดส่งตำแหน่งที่ 1 (Pressure ₁)
P_2	=	ความดันปัมไฮโดรลิกสูงสุดของเครื่องฉีดและเครื่องอัดส่งตำแหน่งที่ 2 (Pressure ₂)
σ	=	ความเค้น (Stress)
$\dot{Q}$	=	อัตราการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาจากการคงรูปยาง (Rate of Heat generated by Reaction of Vulcanization)
R	=	รัศมีหน้าตัดของท่อ (Radius of the Tube Cross-Section)
S	=	อัตราเฉือน (Shear Rate)
STL	=	มาตรฐานการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่เป็นรายละเอียดของแบบจำลอง (Stereolithography)
$t_i(T)$	=	ช่วงเวลาริเริ่มต้น ขณะเกิดกระบวนการคงรูปยางที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ (Induction Time on the Temperature during Isothermal Vulcanization)
t_i	=	ช่วงเวลาริเริ่มต้น (Induction Time)
t_0	=	ค่าคงที่ของเวลาที่ใช้วัสดุที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Material Constants Independent of Temperature)
t_{scorch}	=	ช่วงเวลาที่สิ้นสุดของการคงรูป (Scorch Time)
T_0	=	ค่าคงที่ของวัสดุที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Material Constants Independent of Temperature)
$\bar{t}$	=	ช่วงเวลาในรูปแบบของอินทิกรัล (Induction Time in Integral Term)
u	=	ความเร็วในแนวแกน x (Velocity Component in the X Axis)
u	=	ความเร็วในแนวแกนท่อ (Velocity in the Length Direction)
$\bar{u}$	=	ความเร็วเฉลี่ย (Average Velocity)
v	=	ความเร็วในแนวแกน y (Velocity Component in the y Axis)
ν	=	ความหนืดจลนศาสตร์ของของเหลว (Dynamic Viscosity)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$\bar{V}$	=	ความเร็วเฉลี่ยของของเหลว (Viscosity Average)
w	=	ความเร็วในแนวแกน z (Velocity Component in the z Axis)
W	=	ความกว้าง (Width)
y_i	=	ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในแต่ละครั้ง (Sampling Data)
$\dot{\gamma}$	=	อัตราเฉือน (Shear Rate)
η	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนืด (Coefficient of Viscosity)
ρ	=	ความหนาแน่น (Density)
Φ	=	ความหนืดจากการให้ความร้อน (Viscous Heating)
χ	=	ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)
ϵ	=	ความเครียด (Strain)
μ	=	ความหนืดของของเหลว (Viscosity of Liquid)
λ	=	ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์แบบอัดส่งชนิดหลายเบ้าที่ใช้ ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง

The Development on Design and Manufacturing of the Multi-Cavity Transferred Moulds for Precision Rubber Products

คำนำ

ในปัจจุบันมีความต้องการทั้งในประเทศและต่างประเทศใช้ผลิตภัณฑ์ยางเพิ่มสูงมากขึ้น โดยอุตสาหกรรมหลักที่มีผลิตภัณฑ์ยางเป็นส่วนประกอบ ได้แก่ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมการแพทย์ อุตสาหกรรมอุปโภคและบริโภค อุตสาหกรรมก่อสร้าง อุตสาหกรรมป้องกันประเทศ และ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่นำมาเป็นกรณีศึกษาสำหรับโครงการวิจัยนี้เป็นแผ่นยางปุ่มกดภายในกล่องถ้ำรูป เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเที่ยงตรงที่รูปร่างของชิ้นงาน การออกแบบแม่พิมพ์ และการผลิตที่ต้องมีความเที่ยงตรงตามแบบผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเที่ยงตรงสูงนี้ยังมีอยู่จำกัด ซึ่งในปัจจุบันมักอาศัยเพียงประสบการณ์และการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ทำให้แม่พิมพ์ที่ผลิตได้ยังขาดประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดการสูญเสียต้นทุนมาก ทั้งในด้านเวลาการทดสอบแม่พิมพ์ก่อนผลิตที่มีการทดลองหลายครั้ง รวมทั้งเสียต้นทุนด้านวัสดุเนื่องจากชิ้นงานที่ผลิตได้ไม่ได้ขนาดที่เที่ยงตรงตามแบบ ซึ่งเมื่อนำไปใส่ร่วมกับอุปกรณ์อื่นที่อยู่ในกล่องถ้ำรูปจะไม่สามารถประกอบรวมกันได้ ซึ่งในปัจจุบันได้มีเทคโนโลยีที่ทันสมัย เช่น การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ/วิศวกรรม/ผลิต (Computer Aided Design/Engineering/Manufacturing, CAD/CAE/CAM) เข้ามาช่วยในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและทำให้ลดกระบวนการทดสอบแม่พิมพ์ก่อนผลิตจริง รวมถึงเป็นการสร้างองค์ความรู้ในด้านออกแบบและการผลิต อีกทั้งยังเพิ่มโอกาสของผู้ประกอบการผลิตภัณฑ์ยางในประเทศสามารถแข่งขันได้ในระดับนานประเทศต่อไป

งานวิจัยในโครงการนี้จึงเป็นการสร้างองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบพัฒนาและผลิตแม่พิมพ์แบบอัดส่งที่มีความเที่ยงตรงสูง (Precision Transferred Mould) ของผลิตภัณฑ์ชิ้นส่วนแผ่นปุ่มกดภายในกล่องถ้ำรูปที่ทำด้วยซิลิโคนความแข็งที่ 70 ชอร์ เอ จากการรวบรวมข้อมูลพบว่า สำหรับผลิตภัณฑ์ดังกล่าวยังไม่สามารถผลิตได้อย่างมีคุณภาพภายในประเทศ เนื่องจากขาดความเที่ยงตรงของเทคโนโลยีเครื่องในการทำงานระดับไมโครเมตร (Micrometer) โดยการสร้างแม่พิมพ์ที่มี

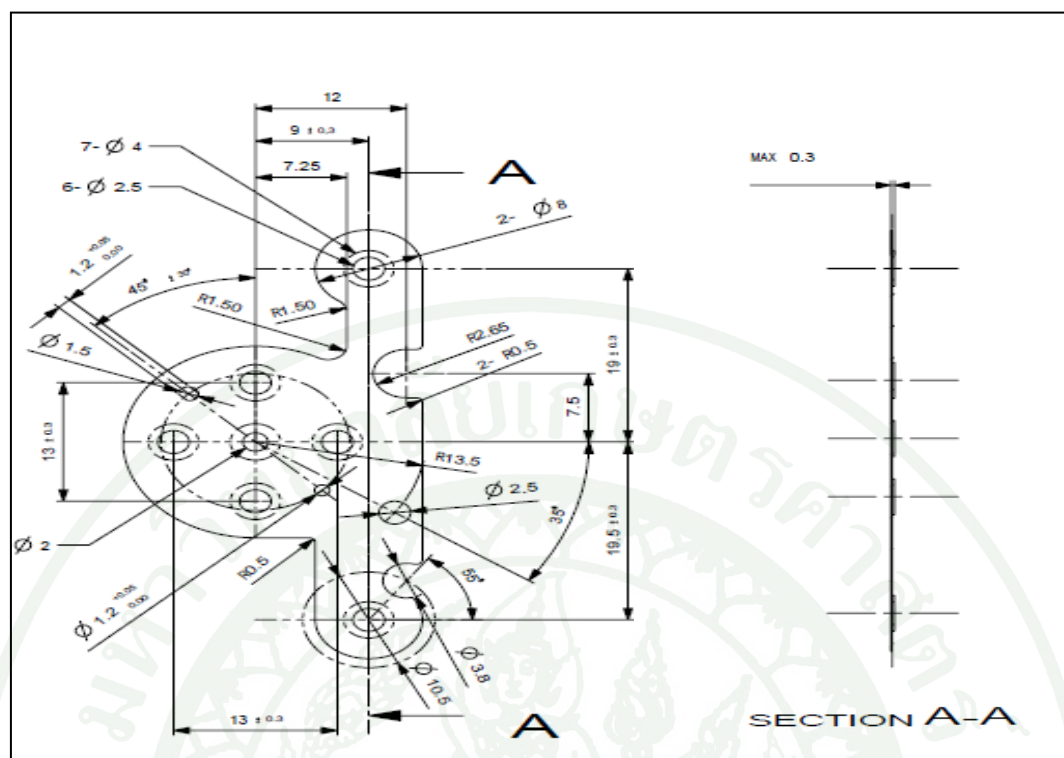
ความเที่ยงตรงสูงนั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องจักรที่มีความแม่นยำสูง เช่น เครื่องกัดเซาะโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าในงานความละเอียดสูง (Micro Electrical Discharge Machining, Micro EDM) แสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งสามารถขึ้นรูปชิ้นงานในระดับความละเอียดระดับ ไมครอน



ภาพที่ 1 ตัวอย่างเครื่องกัดเซาะโลหะด้วยกระแสไฟฟ้าในงานความละเอียดสูง (Micro EDM)

ที่มา: สถาบันไทย-เยอรมัน (2553)

โดยชิ้นงานที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ได้ โดยได้รับความร่วมมือจากบริษัท เอส เค โพลีเมอร์ จำกัด สถาบันไทย-เยอรมัน กระทรวงอุตสาหกรรม และศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ โดยชิ้นงานแสดงตามภาพที่ 2 ชิ้นงานมีความหนาสูงสุดประมาณ 0.30 มิลลิเมตร และหนาดำสุดประมาณ 0.10 มิลลิเมตร กว้าง 24 มิลลิเมตร ยาว 47 มิลลิเมตร และมีค่าพิคัดความเผื่อ 0.03 มิลลิเมตร ซึ่งเครื่องจักรโดยทั่วไปจะไม่สามารถผลิตแม่พิมพ์ความเที่ยงตรงสูงนี้ได้ ทำให้นำเข้าแม่พิมพ์จากต่างประเทศและสูญเสียรายได้ของประเทศเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 2 ตัวอย่างขนาดระยะและผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดภายในกล้องถ่ายรูป

ที่มา: บริษัท เอส เค โพลีเมอร์ จำกัด (2553)

จากหลักการและเหตุผลดังกล่าว ทางคณะผู้เสนอโครงการและบริษัทผู้ร่วมโครงการนี้ มีความเห็นว่าหากมีการนำเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีเครื่องจักรเข้ามาช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์ (Computer Aided Design, CAD) การวิเคราะห์การจำลองการไหลของยาง (Computer Aided Engineering, CAE) และผลิตแม่พิมพ์แบบอัดสั่งที่มีความเที่ยงตรงสูง (Computer Aided Manufacturing, CAM) ซึ่งจะสามารถทำให้ผลิตชิ้นงานที่มีความถูกต้องของขนาด นอกจากนี้ยังเป็นการสนับสนุนให้มีการสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบพัฒนาและผลิตแม่พิมพ์แบบอัดสั่งตามหลักวิชาการและสามารถถ่ายทอดและเผยแพร่ความรู้ในเรื่องการพัฒนาแม่พิมพ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงและวิธีออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์ยางในประเทศต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์แบบอัดส่งชนิดหลายเบ้าที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง

ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาวิจัยพฤติกรรมและวิเคราะห์การไหลของชิ้นงานในแม่พิมพ์โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ร่วมกับการทดสอบขึ้นรูปจริงด้วยเครื่องอัดส่งผลิตภัณฑ์ยาง
2. ผลิตภัณฑ์ที่เลือกมาเป็นกรณีศึกษา คือ ชิ้นส่วนยางภายในกล้องถ่ายรูป ทำจากยางซิลิโคน (Silicone) ความแข็ง 70 ชอร์ เอ และผลิตแม่พิมพ์อัดส่งที่มีจำนวน 24 เบ้า

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีการพัฒนากระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงได้ และสามารถถ่ายทอดองค์ความรู้ไปยังผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง รวมถึงลดการนำเข้าแม่พิมพ์จากต่างประเทศ
2. เป็นการเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์โดยได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเที่ยงตรงและมีคุณภาพสูง

การตรวจเอกสาร

1. สมบัติทั่วไปของยาง

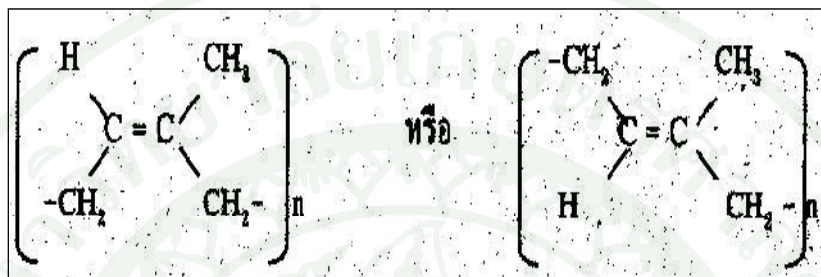
1.1 ประเภทของยาง

ยาง (Rubber) หรืออีลาสโตเมอร์ (Elastomer) เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก มีสมบัติเด่นโดยเฉพาะเรื่อง ความยืดหยุ่น (Elasticity) จัดเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นหรือมีสภาพอีลาสติก (Elastic) สูงมาก คือ ความสามารถยืดออกเมื่อได้รับแรง และหดตัวกลับสู่สภาพเดิมเมื่อเอาแรงออก สมบัติเด่นอื่นๆ คือ มีความเหนียว (Toughness) และมีความทนทานต่อการขัดสี (Abrasion Resistance) สูง สามารถป้องกันการซึมผ่านของน้ำและอากาศได้ดี มีความสามารถในการยึดติดกับวัสดุอื่น เช่น โลหะหรือสิ่งทอ จะทำให้ความแข็งแรงของยางสูง สามารถนำไปใช้ในงานวิศวกรรมได้หลากหลายยิ่งขึ้น โดยทั่วไปแล้วยางแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) และยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber)

1.1.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) ได้มาจากต้นยาง (Hevea Braziliensis) ที่มีต้นกำเนิดมาจากกลุ่มน้ำอะเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ น้ำยางสดที่กรีดยได้จากต้นยางมีลักษณะขาวขุ่น (Latex) น้ำยางขาวขุ่น มีความหนาแน่น 0.975-0.980 กรัม/มิลลิเมตร มีความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6.50-7.00 ประกอบด้วยน้ำประมาณ 70% อนุภาคยางหรือนี้อย่างแห้ง (Dry Rubber) 30% โดยน้ำหนัก แวนดอลอยอยู่ในน้ำอนุภาคยางมีรูปร่างกลม มีขนาด 0.05-5 ไมครอน ผิวของอนุภาคยางมีเชื้อหุ้มที่ประกอบด้วย โปรตีนและไขมันหุ้มอยู่รอบนอกของนี้อย่างแห้ง

โครงสร้างของยางธรรมชาติชื่อทางเคมี คือ Cis-1,4-Polyisoprene (C_5H_8)_n ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยที่ n มีค่าอยู่ในช่วง 200,000-400,000 ซึ่งจะเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว จึงละลายได้ในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน ยางธรรมชาติ มีโครงสร้างโมเลกุลแบบอสัณฐาน (Amorphous) มีสายโซ่ที่เคลื่อนไหวหักงอไปมาได้ง่าย ทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี มีอุณหภูมิของการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ประมาณ 75 องศาเซลเซียส สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก แต่ในบางสภาวะ โมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบ ที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด มันจึงสามารถเกิดผลึก (Crystallize) ได้ ซึ่งการเกิดผลึกที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Crystallization) จะทำให้ยางแข็งแรงมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นยางก็จะอ่อนตัวและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัวยังทำให้ยางคงรูปมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น นั่นคือ ยางจะมีความ

ทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความทนทานต่อการฉีกขาด (Tear Resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion Resistance) สูงขึ้น ซึ่งในโครงสร้างของยาง 1 หน่วยไอโซพรีน (Isoprene) จะมีพันธะคู่และหมู่เมทิลที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาทำให้ยางธรรมชาติเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เซชัน (Vulcanization) กับกำมะถันได้ง่าย หรือยางธรรมชาติเกิดการเสื่อมสภาพเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือโอโซน (พรพรรณ, 2528) ดังแสดงในภาพที่ 3

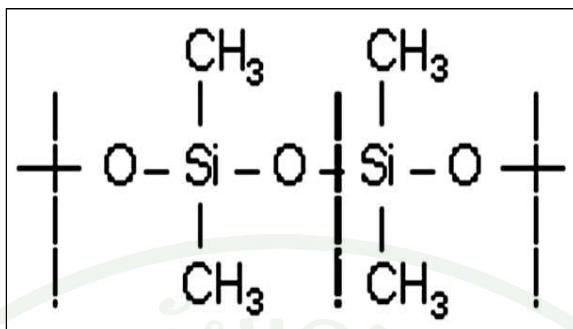


ภาพที่ 3 โครงสร้างโพลิไอโซพรีน

ที่มา: พรพรรณ (2528)

1.1.2 ยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber, SR) เป็นยางสังเคราะห์ได้จากปฏิกิริยาเคมี รวมถึงยางเทียมที่มีลักษณะทางเคมีและสมบัติที่คล้ายคลึงกับยางธรรมชาติ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้มีการผลิตยางสังเคราะห์ออกมาในเชิงการค้าเป็นเพราะเกิดจากปัญหาการขาดแคลนยางธรรมชาติที่จำเป็นต้องใช้ในการผลิตยางธรรมชาติ รวมถึงความต้องการยางที่มีคุณสมบัติพิเศษบางประการ เช่น มีความทนทานต่อน้ำมัน เคมี และความร้อนสูงๆ เป็นต้น การผลิตยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่แบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกคือผลิตมอนอเมอร์ และขั้นต่อมาคือการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งยางสังเคราะห์แต่ละชนิดแตกต่างกันที่ชนิดของมอนอเมอร์ ถ้ายางสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยโมโนเมอร์ 1 ชนิด และมากกว่า 1 ชนิด ในที่นี้จะกล่าวถึงยางซิลิโคนที่เป็นวัสดุที่ใช้ในการผลิตกันชนในงานวิจัยนี้

ยางซิลิโคน (Silicone Rubber, Q) ยางซิลิโคนเป็นยางที่มีความทนทานต่อแรงดึง ความต้านทานต่อการขัดถู และความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำมาก สามารถทนต่อน้ำมันปานกลาง แต่ไม่ทนต่อกรด ด่าง ไขมัน และน้ำมันเชื้อเพลิง ดังนั้นการใช้งานจะถูกจำกัดอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้ยางชนิดอื่นๆ ได้ เพราะมีราคาค่อนข้างสูง ส่วนใหญ่จะใช้ในการผลิตชิ้นส่วนของยานอวกาศ เครื่องบิน รถยนต์ และใช้งานทางด้านการแพทย์และเกษตรกรรม รวมไปถึงผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องสัมผัสกับอาหาร ภาพโครงสร้างทางเคมี (พงษ์ธร, 2547) ดังแสดงภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของยางซิลิโคน

ที่มา: พงษ์ธร (2547)

แกนสายโซ่หลัก (Main Chain) ของยางซิลิโคนไม่ได้ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนเหมือนยางชนิดอื่นๆ แต่จะประกอบด้วย อะตอมของซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) ยางซิลิโคนมีหลายเกรดแต่เกรดที่ใช้กันมากที่สุดจะเป็นโพลิเมอร์ของ Dimethyl Siloxane ยางซิลิโคนเป็นยางที่มีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลต่ำ ส่วนใหญ่จึงไม่อยู่ในรูปของแข็ง แต่จะอยู่ในรูปของเหลวที่มีความหนืดสูงมาก และค่าความหนืดก็ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ยางซิลิโคนจะมีสมบัติความยืดหยุ่นดีจำเป็นต้องทำให้ คงรูปโดยกระบวนการวัลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์ เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะระหว่าง Si-O สูงกว่า C-C และไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล ยางซิลิโคนจึงทนต่อสภาพอากาศ โอโซน แสงแดด และความร้อนได้ดีกว่ายางที่เป็นพวกไฮโดรคาร์บอน ยางชนิดนี้จึงเป็นยางชนิดพิเศษที่สามารถ ใช้งานได้ในที่อุณหภูมิสูงมากๆ (และต่ำมากๆ) อย่างไรก็ดียางซิลิโคนมีค่าความทนต่อแรงดึง (Tensile Strength) ความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion Resistance) และความทนต่อแรงกระแทก (Impact Resistance) ต่ำมาก ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารเสริมแรง เช่น ซิลิกา ให้ความช่วย ยางซิลิโคนมีความเป็นฉนวนที่ดีมาก มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซและของเหลวสูง (ประมาณ 100 เท่าของยางบิวไทล์) แต่ว่ายางชนิดนี้ไม่ทนต่อกรดและด่าง สารเคมีจำพวกเอสเทอร์ คีโตน และอีเทอร์ การใช้งานของยางซิลิโคนจะถูกจำกัดอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้อย่างชนิดอื่นๆ ได้ เพราะยางชนิดนี้มีราคาสูงมาก

สมบัติเชิงกลของยางซิลิโคนมีค่าความทนทานต่อแรงดึง ความสามารถต้านทานต่อการขัดถู และความต้านทานต่อแรงกระแทกต่ำมาก ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสารตัวเสริมแรงเช่นซิลิกา ให้ความช่วย แต่ที่อุณหภูมิสูงๆ เช่น ที่ 150 องศาเซลเซียส (°C) สมบัติเชิงกลของยางจะเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย

ทำให้ยางซิลิโคนมีสมบัติเชิงกลที่อ่อนนุ่มดังกล่าวยกกว่ายางชนิดอื่นๆ โดยทั่วไปยางซิลิโคนที่ทรงรูปแล้วส่วนใหญ่จะมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 30 ถึง 80 ชอร์ เอ แต่ยางซิลิโคนที่มีสมบัติเชิงกลดีๆ นั้นส่วนใหญ่จะมีค่าความแข็งประมาณ 50 ถึง 60 ชอร์ เอ

สมบัติทางพื้นผิว ของยางซิลิโคนมีสมบัติพิเศษอีกอย่างคือมีพื้นผิวที่ลื่น (Surface Release Property) และไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ยางชนิดนี้จึงไม่เกาะติดกับพื้นผิวที่เหนียวรวมถึงน้ำแข็ง ดังนั้นจึงนิยมใช้ยางซิลิโคนเป็นสารที่ป้องกันการเกาะติดกันของวัสดุบางประเภทหรือใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในตู้เย็น อย่างไรก็ตามยางซิลิโคนสามารถเกาะติดกับแก้วได้ (ถ้าเวลาที่ยางสัมผัสกับแก้วนานเพียงพอ) เนื่องจากยางซิลิโคนและแก้วมีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน

การใช้งานของยางซิลิโคนจะถูกจำกัดอยู่ในผลิตภัณฑ์ที่ไม่สามารถใช้อย่างชนิดอื่นๆ ได้ เพราะยางชนิดนี้มีราคาสูงมาก ส่วนใหญ่จะใช้ในการผลิตชิ้นส่วนของยานอวกาศ เครื่องบิน และรถยนต์ ใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิล ยางโอริง เป็นกคของโทรศัพท์ รวมถึงผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องสัมผัสกับอาหาร เพราะยางซิลิโคนไม่มีกลิ่น ไม่มีรสชาติ และไม่เป็นพิษ

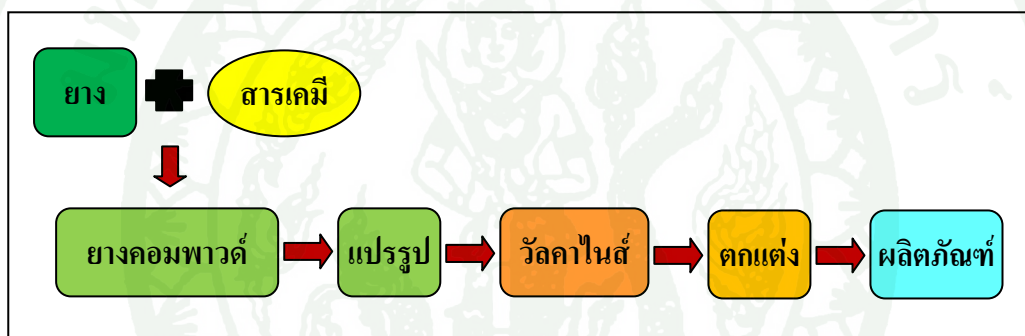
1.2 การผสมเคมียาง เป็นยางดิบจะมีขีดจำกัดในการใช้งานเนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำและมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เสถียร โดยสมบัติต่างๆ จะแปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมาก คือ ยางจะอ่อนตัวและเหนียวเย็นเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะที่อุณหภูมิต่ำ เหตุนี้การใช้ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น หลังจากการผสมเคมียาง ยางผสมที่ได้จะเรียกว่า ยางคอมพาวด์ (Rubber Compound) ยางคอมพาวด์นี้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่ากระบวนการคงรูปยางหรือกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ยางที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวแล้วจะเรียกว่า ยางสุกหรือยางคงรูป ซึ่งสมบัติของยางคงรูปที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนักและสมบัติเชิงกลดีขึ้น สารเคมีที่ใส่เพิ่มเข้าไปจะมีคุณสมบัติดังนี้

1.2.1 ผงกำมะถัน ผสมลงในเนื้อยางดิบ เพื่อให้ยางมีความแข็งเพิ่มขึ้น ถ้าผสมกำมะถันลงไปเนื้อยางประมาณ 3-20 เปอร์เซนต์ จะได้ยางอ่อนที่ยืดหยุ่นตัวได้ดี เรียกว่า ยางอ่อน ถ้าผสมกำมะถันลงไปเนื้อยาง 30-50 เปอร์เซนต์ จะได้ยางที่มีเนื้อแข็ง เรียกว่า ยางแข็ง

1.2.2 สารเคมีที่ทำให้เกิดฟอง เมื่อผสมลงในยางดิบขณะผ่านกระบวนการอบร้อน จะได้ยางที่มีรูพรุน ยืดหยุ่นตัวได้ ประเภทฟองน้ำ

1.2.3 ผงคาร์บอน ผสมลงไปเพื่อต้องการให้ยางที่ได้มีสีดำ

1.2.4 ผงอลูมิเนียมซิลิเกต ผสมลงไปเพื่อให้ยางสำเร็จรูปที่ได้มีสีขาวกระบวนการ การอบร้อนโดยทั่วไปการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ แบบอัด (Compression Moulding) แบบกึ่งอัด (Trabsferred Moulding) และแบบฉีด (Injection Moulding) ถ้านำยางดิบที่ได้ จากยางธรรมชาติไปใช้งานโดยตรง คุณภาพจะไม่ดีพอเมื่อถูกความร้อนจะอ่อนตัว และทิ้งไว้ใน อากาศนานๆ จะแข็งกรอบ ดังนั้นจึงต้องนำเอายางดิบไปผ่านกระบวนการอบร้อนเสียก่อนยางดิบ ที่จะนำไปใช้งานได้นั้น จะต้องผ่านกระบวนการอบร้อน ในอุณหภูมิประมาณ 100-140 องศาเซลเซียส เพื่อเพิ่มความทนทานในการใช้งาน ดังแสดงภาพที่ 5 แสดงกระบวนการผลิตขึ้นงานยาง (พงษ์ธร, 2547)



ภาพที่ 5 กระบวนการผลิตขึ้นงานยาง

1.3 การเก็บรักษายาง การเก็บรักษายางธรรมชาติ และยางสังเคราะห์ ให้คงสภาพเดิมอยู่ ได้นานนั้น มีวิธีการเก็บรักษาดังนี้

1.3.1 ควรเก็บไว้ให้ห่างจากน้ำมันแร่ เช่น น้ำมันก๊าด น้ำมันเบนซิน เพราะจะทำให้ ยางบวม หรือพองตัว (ยกเว้นยางสังเคราะห์บางชนิด)

1.3.2 ควรเก็บไว้ในที่มีอุณหภูมิปกติ (20-25 องศาเซลเซียส) มีอากาศถ่ายเทได้ดี ไม่เก็บไว้ในที่มีอากาศร้อนจัด เพราะจะทำให้ยางยืดและเปื่อยยุ่ยง่าย (ยกเว้นยางสังเคราะห์บางชนิด)

1.3.3 ควรคลุกผิวยางด้วยแป้ง เช่น แป้งมัน เมื่อต้องการเก็บไว้นาน การคลุกผิวยางด้วยแป้งนั้น เพื่อป้องกันออกซิเจนในอากาศ เข้าไปทำปฏิกิริยากับยางเพราะจะทำให้ยางแข็งตัวและแตกลายงาเสื่อมคุณภาพ

1.3.4 ควรเก็บยางไม่ให้กระทบกับสารทองแดง และสารแมงกานีส ซึ่งจะทำให้ยางเกิดการแข็งตัว เสื่อมคุณภาพ

1.3.5 ควรเก็บยางไว้ให้ห่างจากเปลวไฟ เพราะยางเป็นเชื้อเพลิงที่ดีและติดไฟได้ง่าย

1.4 สมบัติเชิงฟิสิกส์และรีโอโลยีของยาง เป็นความหนืดและคุณลักษณะเฉพาะของของไหล มีรายละเอียดดังนี้

1.4.1 ความหนืด (Viscosity) คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล เมื่อมีแรงมากระทำ (ของไหล หมายถึง สารที่สามารถไหลได้ เช่น ก๊าซ และของเหลว) ของไหลที่มีความหนืดสูง จะมีค่าความต้านทานการไหลสูง ของไหลที่มีความหนืดต่ำ จะมีค่าความต้านทานต่อการไหลต่ำ ของไหลธรรมดาสามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ แต่ในขณะที่ของไหลที่มีส่วนผสมของสารหลายตัวจะมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อน และไม่สามารถแสดงค่าความหนืดค่าเดียวได้

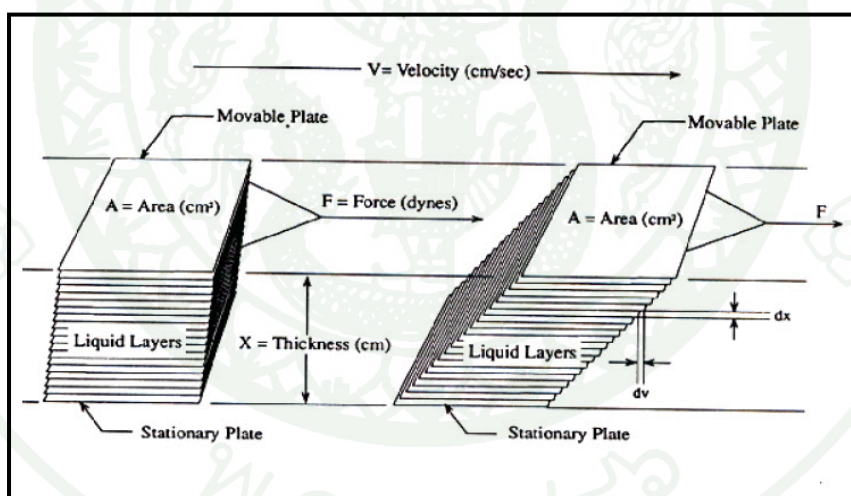
การวัดความหนืดทำได้โดยการวัดแรงต้านทานการไหลภายในของของไหล เมื่อมีแรงมากระทำ (F) ในแนวนานกับพื้นผิว เรียกแรงต้านที่เกิดขึ้นนี้ว่า แรงเฉือน (Shear Force) เมื่อพิจารณาถึงก้อนของไหลซึ่งประกอบด้วยแผ่นโมเลกุลที่ขนานกัน ดังแสดงในภาพที่ 6 ชั้นที่อยู่ล่างสุดของของไหล จะถูกยึดไว้ถ้าแผ่นด้านบนของของไหล ได้รับแรงกระทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ แผ่นด้านล่างถดถอยไปจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแผ่นของไหล ชั้นล่างสุดที่ไม่เคลื่อนที่ ความแตกต่างของความเร็ว (dv) ระหว่างของไหลสองแผ่นกับระยะทางที่เปลี่ยนไป (dx) ก็คือ อัตราเฉือน (Shear Rate) ที่อยู่ในเทอมของ Velocity Gradient (dv/dx, S) ค่าแรงต่อหน่วยพื้นที่ (F/A) ที่ทำให้เกิดการไหล เรียกว่า แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ (Shear Stress, F') ถ้าของไหลมีความหนืดสูงขึ้น ก็ต้องใช้แรงเฉือนที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้อัตราเฉือนเท่าเดิม ดังนั้นอัตราเฉือนจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ แรงเฉือน ดังสมการที่ (1)

$$\frac{F}{A} = \eta \left(\frac{dv}{dx} \right) \quad (1)$$

η คือ สัมประสิทธิ์ของความ (Coefficient of Viscosity) หรือเรียกว่า ความหนืด ตามหลักของ เซอร์ไอแซกนิวตัน (Isaac Newton) หน่วยของความหนืด dyne.sec.cm⁻² หรือ gram.cm⁻¹.sec⁻¹ เรียกเป็น poise โดย 1 poise คือ แรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 cm/sec (1 poise = 100 centipoise) ความหนืดสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ดังสมการที่ (2)

$$\eta = \frac{F'}{S} \quad (2)$$

เมื่อ F' คือ แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น dynes/cm².s หรือ Pascal (Pa)
 S คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น sec⁻¹



ภาพที่ 6 การเกิด Velocity Gradient เมื่อมีแรงมากระทำในแนวนานกับพื้นผิวของของไหล

ที่มา: สมบัติ (2545)

1.4.2 ลักษณะการไหลของของไหล โดยทั่วไปแบ่งได้ 2 แบบ คือ แบบนิวโตเนียน และแบบไม่เป็นนิวโตเนียน โดยแบบไม่เป็นนิวโตเนียนแบ่งเป็น 4 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 7

1) ของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของ นิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลจะมีค่าความหนืด (η_0) เป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน หรือความเร็วในการกวน ไม่ว่าจะกวนเร็วหรือกวนช้า ตัวอย่างเช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำผลไม้ น้ำผึ้ง นม กาแฟ กลีเซอริน แอลกอฮอล์ เป็นต้น

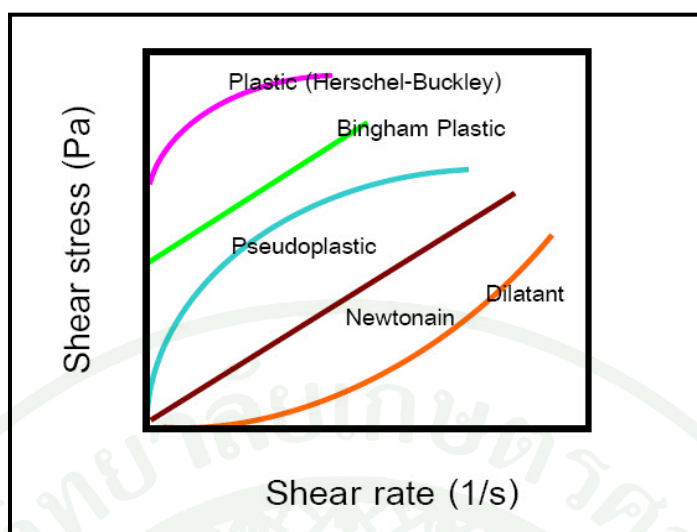
2) ของไหลแบบไม่เป็นนิวโตเนียน (Non-newtonian Fluid) เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ ของไหลจะมีค่าความหนืด (η_0) เป็นค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน หรือความเร็วในการกวน ลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งเป็น 4 แบบ

2.1) ของเหลวชีวโค (Pseudoplastic Liquid) ของไหลที่มีค่าความหนืด (η_0) ลดลง เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือยิ่งกวนเร็ว ยิ่งไหลง่าย พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น Shear Thinning ตัวอย่างเช่น น้ำผลไม้เข้มข้น กาวน้ำใส สารช่วยแขวนตะกอน สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ สารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น

2.2) ของเหลวดิลาแตนท์ (Dilatant Liquid) ของไหลที่มีค่าความหนืด (η_0) เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือยิ่งกวนเร็ว ยิ่งหนืด พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น Shear Thickening ตัวอย่างเช่น น้ำดินขี้้น น้ำแป้ง เป็นต้น

2.3) ของเหลวบิงแฮมพลาสติก (Bingham Plastic) ของเหลวที่เมื่อมีแรงกระทำสูงพอจึงจะเกิดลักษณะการไหลแบบนิวโตเนียน ตัวอย่างเช่น ยาสีฟัน น้ำสลিপของเซรามิก นมช็อกโกแลต เป็นต้น

2.4) ของเหลวพลาสติก (Plastic Lerschel-Buckley) ของเหลวที่เมื่อมีแรงกระทำสูงพอเพื่อเอาชนะค่าความเค้น ณ จุดคราก (Yield Stress) ถึงจะเริ่มไหลได้ และจะไหลแบบชีวโคพลาสติก หรือตามโมเดลของ Herschel-Buckley ตัวอย่างเช่น ไขมัน น้ำมันหล่อลื่น ยาสีฟัน ลิปสติก ยางผสมผงถ่าน พลาสติกบางชนิด เป็นต้น



ภาพที่ 7 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของเหลว

ที่มา: สมบัติ (2545)

เนื่องจากความหนืดเป็นลักษณะเฉพาะตัวของของไหลแต่ละชนิด การวัดค่าความหนืดจึงเป็นการหาลักษณะเฉพาะของของไหล ลักษณะการไหลจะเป็นการตอบสนองคุณสมบัติต่างๆ ของของไหล เช่น น้ำหนักโมเลกุล การกระจายตัวของโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งจากความสัมพันธ์นี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในขบวนการผลิตภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับของเหลว เช่น สาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีในขบวนการผลิต การสังเคราะห์พอลิเมอร์ การขึ้นรูปพอลิเมอร์ การตรวจสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์ระหว่างกระบวนการผลิต และควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นยังใช้ประโยชน์ได้กับการเตรียมวัตถุดิบที่เป็นของเหลวเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตและการควบคุมคุณภาพของยางได้อีกด้วย

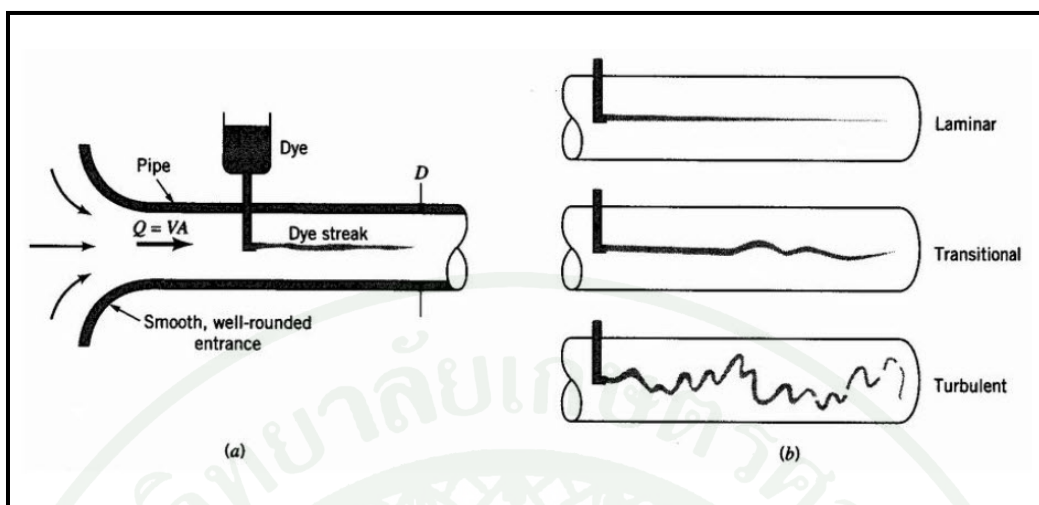
1.4.3 ชนิดของการไหล สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ คือ แบบที่หนึ่ง เป็นการไหลในหนึ่งมิติ สองมิติ และสามมิติ (One Two and Three Dimensional Flows) แบบที่สอง เป็นการไหลแบบหนืด และไม่หนืด (Viscous and Inviscous Flows) แบบที่สาม เป็นการไหลแบบราบเรียบ และปั่นป่วน (Laminar and Turbulent Flows) และแบบที่สี่ เป็นการไหลแบบอัดไม่ได้ และอัดได้ (Incompressible and Compressible Flows)

การไหลแบบแรกเป็นการไหลตามแกนที่กำหนด โดยแกนการไหลจะประกอบด้วย แกน x แกน y และแกน z ดังนั้น การไหลแบบหนึ่ง สอง และสามมิติ จึงเป็นการไหลตาม แกนแกนดังกล่าวตามมิติการไหล รูปแบบการไหลที่ง่ายที่สุดเป็นการไหลหนึ่งมิติ ตัวอย่างของการไหล แบบนี้ได้แก่การไหลแบบราบเรียบในท่อตรง

การไหลแบบที่สอง เป็นการไหลแบบหนืด และไม่หนืด การไหลที่ความหนืด มีผลและไม่มีผลต่อการไหลของของไหล การไหลแบบที่สาม การไหลแบบราบเรียบ และปั่นป่วน เป็นการไหลที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ตามกันไปเป็นแผ่น หรือชั้นที่ราบ อนุภาคของของไหล มีหรือไม่มีการผสมกัน และการไหลแบบที่สี่ การไหลแบบอัดไม่ได้ และอัดได้เป็นการไหลที่ของ ไหลมีการยุบตัวหรือไม่ ขณะที่ของไหลเคลื่อนที่

ของไหลสามารถไหลผ่านท่อ หรือทางน้ำไหล ในสองเส้นทางซึ่งแตกต่างกัน ที่อัตราการไหลต่ำ ความดันของของไหลตกลงเมื่อของไหลไหลผ่านไปไกลขึ้น ที่อัตราการไหลสูง ความดันของของไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความแตกต่างระหว่างการไหลของของไหลทั้งสองแบบ ได้รับการนำเสนอด้วยการทดลองของ ออสบอร์น เรย์โนลด์ (Osborne Reynolds) ในปี ค.ศ. 1883 ซึ่งได้รายงานการศึกษาชนิดของการไหลของของไหล ผ่านท่อโปร่งใสที่วางในแนวราบที่บรรจุน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 8(a) เมื่อเริ่มปล่อยน้ำจากภาชนะที่บรรจุให้ไหลผ่านท่อแก้วและควบคุมการไหล ของน้ำด้วยวาล์วที่ด้านปลายท่อโปร่งใส ขณะปล่อยน้ำไหลผ่านท่อโปร่งใส ทำการฉีดน้ำสีที่มีความ ถ่วงจำเพาะเท่ากับน้ำเข้าไปที่บริเวณกลางท่อ เรย์โนลด์ พบว่า เมื่อเปิดวาล์วให้น้ำไหลที่อัตราการไหล ต่ำ ทำให้เห็นน้ำสีไหลเป็นเส้นตรงตามแนวทางการไหลของน้ำเป็นเส้นขนานกับท่อโดยไม่มีการ กระจายออกนอกแนวทิศทางการไหลด้านข้าง จนไหลออกไปจากท่อ พฤติกรรมของแถบน้ำสีเห็นเด่นชัดว่า น้ำไหลเป็นแนวเส้นตรงขนานตามทิศทางการวางตัวของท่อแก้ว และเรียกการไหลแบบนี้ ว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขึ้นโดยการเปิดวาล์วเพิ่มขึ้น น้ำสีเริ่มไหลไม่เป็น แนวตรง ขนานตามทิศทางการวางตัวของท่อแก้ว น้ำสีไหลออกไปมาเรย์โนลด์เรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition Flow) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขึ้นอีกจนน้ำมีความเร็ว ถึงจุดจุดหนึ่งที่เรียกว่า ความเร็ววิกฤติ (Critical Velocity) ที่ความเร็วนี้ น้ำสีเริ่มไหลไม่เป็นแนวตรง น้ำสีเริ่มกระจายตัว เริ่มมีการไหลแปรปรวนเกิดขึ้น น้ำสีกระจายตัวออกไปที่ด้านข้างท่อแก้วมาก ยิ่งขึ้นเรย์โนลด์เรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) การทดลองของเรย์ โนลด์แสดงการไหลทั้งสามแบบ ดังแสดงในภาพที่ 8(b)



ภาพที่ 8 การทดลองของเรย์โนลด์

ที่มา: สมบัติ (2545)

เรย์โนลด์ได้ศึกษาสถานะที่ของเหลวไหลแบบราบเรียบ เปลี่ยนรูปแบบไปเป็นแบบปั่นป่วน พบว่า ความเร็ววิกฤติที่เป็นการไหลแบบราบเรียบขึ้นอยู่กับปริมาณ 4 ชนิด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความหนืด ความหนาแน่น และความเร็วเชิงเส้นเฉลี่ยของของเหลว นอกจากนี้เรย์โนลด์พบว่า ตัวประกอบทั้งสี่ สามารถรวมกันเป็นค่าค่าหนึ่ง และเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล ค่าที่ได้แสดงรูปแบบการไหล เรียกว่า เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ (3) ดังนี้

$$Re = \frac{D\bar{V}\rho}{\mu} \quad (3)$$

ความหนืดของของเหลวหาได้จากสมการ (4)

$$\mu = \nu\rho \quad (4)$$

ดังนั้น เมื่อแทนค่าสมการที่ (4) ลงในสมการที่ (3) จะได้ สมการที่ (5)

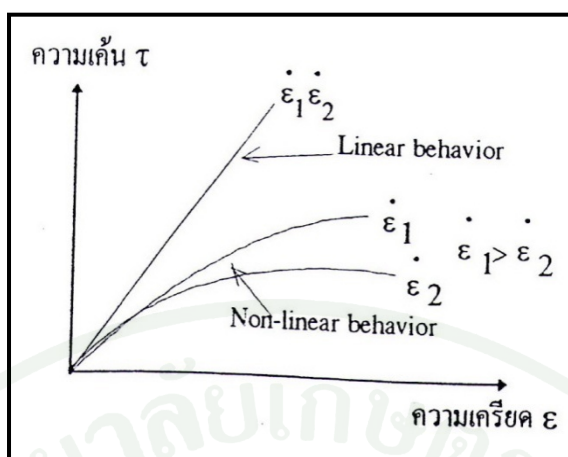
$$Re = \frac{D\bar{V}}{\nu} \quad (5)$$

กำหนดให้ D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
$\bar{V}$	คือ	ความเร็วเฉลี่ยของของเหลว
μ	คือ	ความหนืดของของเหลว
ρ	คือ	ความหนาแน่นของของเหลว
ν	คือ	ความหนืดจลนศาสตร์ของของเหลว

ซึ่งค่า	Re_0	อาจเป็น 10, 1000, 100000...
	$Re > Re_0$	เกิดการไหลปั่นป่วน
	$Re < Re_0$	เกิดการไหลลามินาร์
	$Re_0 = 2000$	สำหรับพอลิเมอร์

โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์จะมีความหนืดสูงมากมีค่าประมาณ 10^2 - 10^3 และจากค่าเลขเรย์โนลด์ของพอลิเมอร์มีค่าสูง เมื่อพิจารณาตามสมการที่ (3) จะเห็นได้ว่าการเกิดการไหลปั่นป่วนในการไหลของพอลิเมอร์นั้นผลคูณของ $\bar{V}$ กับ D ต้องมีค่าสูงมาก เพราะพอลิเมอร์มีความหนืดสูงมาก ในเรื่องนี้จะพบว่าในกระบวนการผลิตกัณฑ์พอลิเมอร์นั้น จะไม่อยู่ในขอบเขตของการไหลปั่นป่วนเลย ขอบเขตทั่วไปของการไหลของพอลิเมอร์จึงเป็นการไหลแบบลามินาร์

3.4 สมบัติแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น วัสดุพอลิเมอร์มีสมบัติเชิงวิสโคอีลาสติก คือ มันจะแสดงสมบัติผสมระหว่างสมบัติการยืดหยุ่นและการไหลหนืด พอลิเมอร์จะแสดงสมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elasticity) ในขอบเขตที่มีความเครียดต่ำๆ (Small Strains) แต่เมื่อมีความเครียดเพิ่มขึ้นเกินค่าจำกัดหนึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะหมดไป ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่เป็นฟังก์ชันของอัตราการผิดรูป (Rate of Deformation) จะแสดงสมบัติการไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้น (Non-Linear Elasticity) ดังแสดงในภาพที่ 9 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์



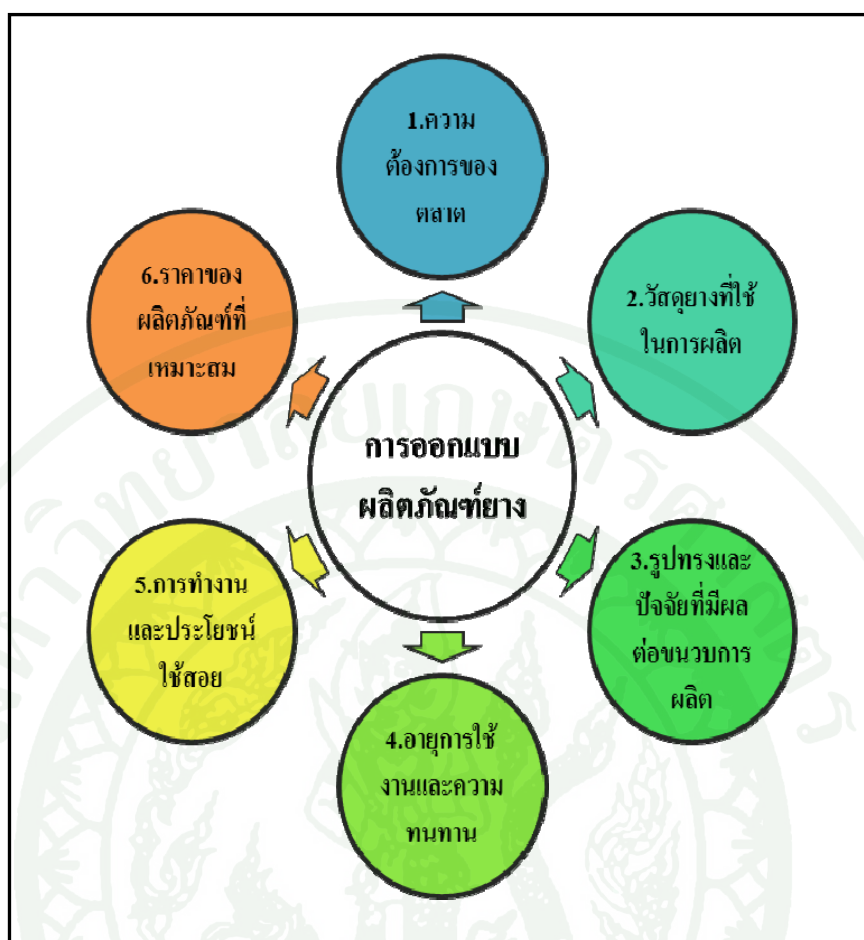
ภาพที่ 9 สมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้นและการยืดหยุ่นไม่เชิงเส้นของวัสดุ

ที่มา: มนัส (2538)

2. หลักการออกแบบผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนการดำเนินการออกแบบอย่างเป็นระบบจะช่วยให้ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ ใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ได้แบบแปลน 2 มิติ (Drawing) ในทางวิศวกรรมจะเรียกแบบแปลนของผลิตภัณฑ์ว่า แบบ และเรียกภาพวาดเบื้องต้น (Sketches) ว่า แบบร่าง แบบและแบบร่างถูกใช้เพื่อการสื่อสารในการดำเนินการออกแบบ ตั้งแต่ขั้นตอนความคิดเริ่มต้นในการออกแบบ ตลอดไปจนถึงเสร็จสิ้นกระบวนการออกแบบ การดำเนินการออกแบบในสมัยก่อนเริ่มจากขั้นตอนการร่างรายละเอียดที่ต้องการอย่างคร่าวๆ หลังจากนั้นก็เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ขั้นตอนพัฒนา และตัดสินใจในส่วนของรายละเอียดเพื่อนำไปเขียนแบบเมื่อปฏิบัติงานตามขั้นตอนการออกแบบ คือ ข้อมูลเพื่อเชื่อมโยงไปสู่เรื่องของเงินทุน และขั้นตอนของการปฏิบัติงาน

การออกแบบผลิตภัณฑ์ข้าง เป็นการใช้ความคิดสร้างผลิตภัณฑ์ข้าง ซึ่งหลักการทำงานที่ได้ออกแบบมานั้นต้องสามารถตอบสนองกับความต้องการของผู้ใช้ ราคาของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสม วิธีการทำงานต้องให้ผู้ใช้สามารถเข้าใจถึงหลักการทำงานของผลิตภัณฑ์ (วรสิทธิ์, 2525) จากนั้นตรวจสอบหาข้อผิดพลาด ลำดับต่อมา นำข้อผิดพลาดไปเขียนเป็นแบบออกมาเป็นต้นแบบในการผลิต ผลิตภัณฑ์ข้างออกสู่ตลาด สามารถดูขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์ข้างดังภาพที่ 10

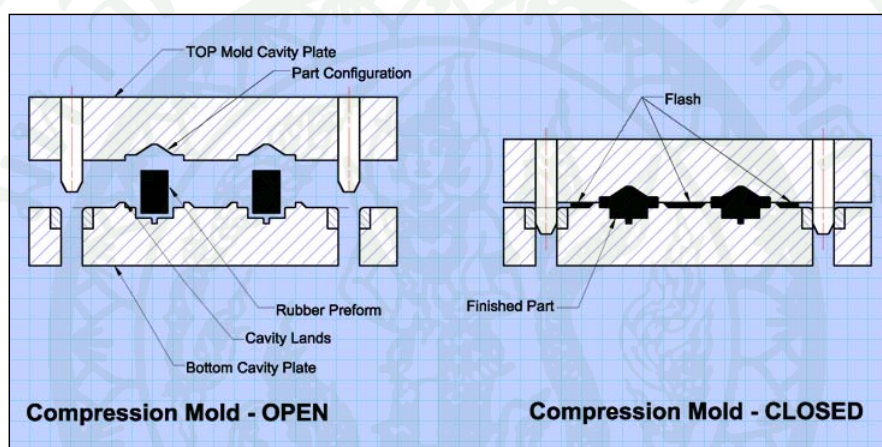


ภาพที่ 10 ขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์อย่าง

3. วิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

วิธีการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางมีดังนี้

3.1 การอัดขึ้นรูป (Compression Moulding) นั้นเป็นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนมาก และแม่พิมพ์มีราคาไม่สูง โดยขนาดของแม่พิมพ์จะขึ้นกับชิ้นงานซึ่งมีตั้งแต่ขนาดประมาณ 10 กรัม จนถึง 10 กิโลกรัม เครื่องจักรที่ใช้สำหรับอัดขึ้นรูปเป็นเครื่องจักรที่อัดด้วยระบบไฮดรอลิกส์ทั่วไป ตัวอย่างแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์แบบอัดขึ้นรูป

ที่มา: Hawthorne Rubber Mfg. Corp. (2011)

ขั้นตอนการขึ้นรูปนั้นเริ่มจากนำชิ้นงานที่ยังไม่สุกใส่เข้าไปในเบ้าของแม่พิมพ์ จากนั้นทำการปิดแม่พิมพ์ที่ใส่เข้าไปในเครื่องอัด เครื่องอัดจะใช้แรงดันกดปิดแม่พิมพ์จนสนิท โดยก่อนจะกดปิดแม่พิมพ์จะมีการกด-คลาย (Bumping) ก่อนเพื่อให้อากาศออกให้เนื้อยางไหลได้เต็มเบ้า หลังจากได้รับความร้อนจากเครื่องอัดและใช้เวลาระยะหนึ่งจนยางสุกแล้ว แม่พิมพ์จะถูกเปิดออกและผู้ปฏิบัติงานสามารถหยิบชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จากนั้นแม่พิมพ์ก็จะพร้อมสำหรับการอัดขึ้นรูปในรอบต่อไป ดังแสดงขั้นตอนในตารางที่ 1 และภาพตัวอย่างแม่พิมพ์ ดังแสดงภาพที่ 12

ตารางที่ 1 ขั้นตอนในการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป

ขั้นตอนการทำงาน	รายละเอียด
	ขั้นตอนที่ 1 นำยางที่ตัดได้น้ำหนัก วางลงในเบ้าด้านล่างของแม่พิมพ์อัด
	ขั้นตอนที่ 2 แม่พิมพ์ประกบเข้าด้วยกัน โดยใช้แรงดันจากกระบอกไฮดรอลิก ของเครื่องอัดยาง อัดยางค้างไว้ที่อุณหภูมิ เวลาและแรงดันที่เหมาะสมในการขึ้นรูป
	ขั้นตอนที่ 3 เมื่อแม่พิมพ์เปิดออกยางจะสุกตัวและมีลักษณะเป็นของแข็งมีรูปร่างตามพิมพ์โดยรอบชิ้นงานจะมีครีบยางที่เกิดจากยางลื่นออกจากเบ้าของแม่พิมพ์



ภาพที่ 12 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป

ที่มา: Lin Cheng Mfg. (2010)

ขั้นตอนการขึ้นรูปเริ่มจากนำชิ้นยางที่ยังไม่สุกใส่ลงไปในเบ้า (Cavity) ของแม่พิมพ์ จากนั้นทำการปิดแม่พิมพ์ที่ใส่เข้าไปในเครื่องอัด โดยใช้แรงดันกดปิดแม่พิมพ์จนสนิท ก่อนจะกดปิดแม่พิมพ์ จะมีการกด-คลาย ก่อนเพื่อให้อากาศออกให้เนื้อยางไหลได้เต็มเบ้า หรืออาจให้อากาศออกจากแม่พิมพ์ โดยใช้ระบบสูญญากาศที่ติดตั้งในแม่พิมพ์หรือที่เครื่องอัดยางก็ได้ หลังจากได้รับความร้อนจากเครื่องอัดและใช้เวลาระยะหนึ่งจนยางสุก แม่พิมพ์จะถูกเปิดออกและผู้ปฏิบัติงานสามารถหยิบชิ้นงาน

ออกจากแม่พิมพ์ และทำความสะอาดแม่พิมพ์ จากนั้นแม่พิมพ์ก็จะพร้อมสำหรับการอัดขึ้นรูปในรอบต่อไป (Wheelans, 1974) ตัวอย่างเครื่องอัดยางขึ้นรูปยาง แสดงตามภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ตัวอย่างเครื่องอัดยางแบบอัดขึ้นรูป

ที่มา: Lin Cheng Mfg. (2010)

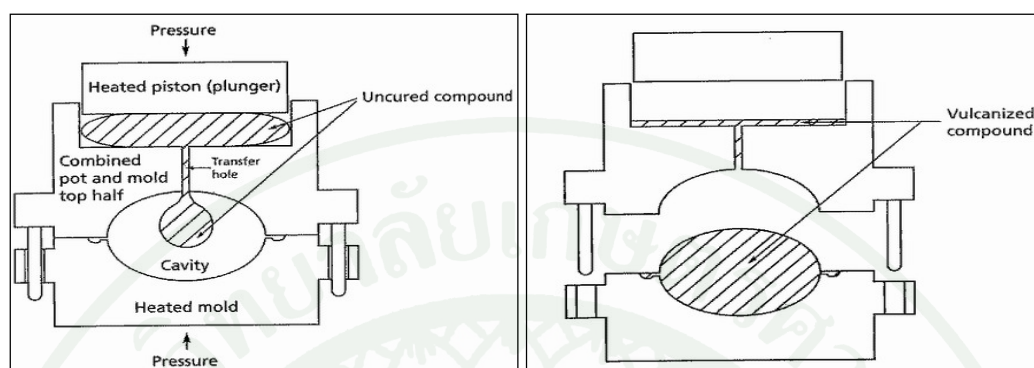
ตารางที่ 2 ข้อดีและข้อจำกัดของแม่พิมพ์แบบอัด

ข้อดี	ข้อจำกัด
1. ราคาถูก	1. ชิ้นงานไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ
2. ออกแบบง่ายสำหรับชิ้นงานที่ไม่ซับซ้อน	2. แม่พิมพ์มีน้ำหนักรวมมาก
3. มีช่องอัดยางมากกว่าแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด	3. ใช้เวลานานในการเปลี่ยนยางเข้า-ออกแต่ละครั้ง
4. มียางเสียน้อยกว่า	4. ไม่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและบาง
5. วางชิ้นส่วนโลหะที่จะประกอบได้ง่าย	

ที่มา: พงษ์ธร (2547)

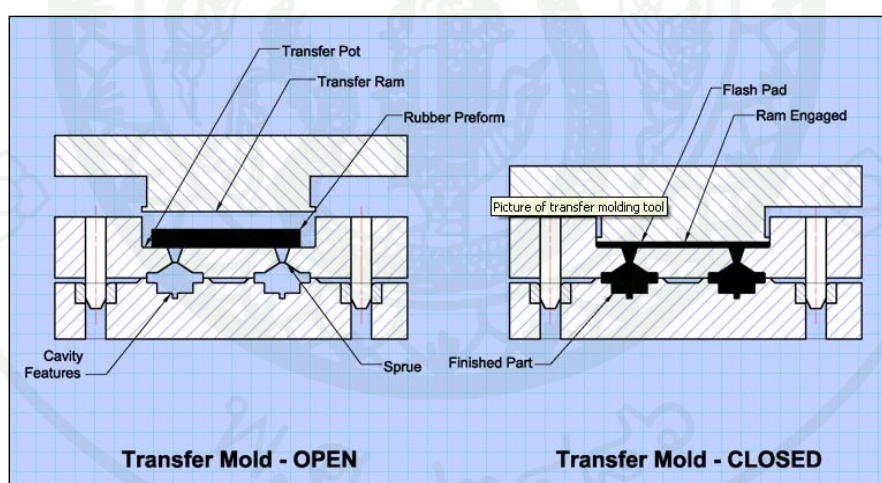
3.2 การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (Transferred Moulding) นั้นชิ้นงานที่ได้จะมีความแม่นยำมากกว่าแบบอัด และสามารถควบคุมรอบเวลาผลิตได้ดีกว่า หลักการที่สำคัญของการขึ้นรูปแบบอัดส่งนั้นคือ จะมีช่องว่างสำหรับใส่ยาง 1 ช่อง โดยช่องดังกล่าวนี้จะเชื่อมต่อกับเบ้าด้วยทางวิ่ง ซึ่งมีทั้งเบ้าเดี่ยวหรือหลายเบ้าก็ได้ เมื่อใส่ยางที่ยังไม่สุกลงไปในช่องใส่ยาง ส่วนอัด (Plunger) ก็จะอัดเนื้อยางผ่าน

ทางวิ่งเข้าไปสู่เบ้า หลังจากนั้นก็จะให้ความร้อนจนยางสุก นำชิ้นงานออกจากเบ้าโดยผู้ปฏิบัติงาน ตัวอย่างแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัดส่ง และการขึ้นรูปแบบอัดส่ง แสดงในภาพที่ 14-16



ภาพที่ 14 การขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดส่ง

ที่มา: Ciesielski (1999)



ภาพที่ 15 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดส่ง

ที่มา: Hawthorne Rubber Mfg. Corp. (2011)

รายละเอียดข้อดีและข้อจำกัดของแม่พิมพ์แบบอัดส่ง ดังแสดงตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อดีและข้อจำกัดของแม่พิมพ์แบบอัดส่ง

ข้อดี	ข้อจำกัด
1. คุณสมบัติเนื้อยางจะผสมผสานดีกว่า การขึ้นรูป โดยการอัดขึ้นรูป	1. สูญเสียน้ำหนักยางไปกับยางในเบ้าอัด
2. เวลาที่ใช้ขึ้นไม่เกิดรอยของเนื้อยาง	2. เวลาที่ใช้ขึ้นรูปต่อรอบมากกว่าการขึ้นรูป โดยการฉีดขึ้นรูป
3. ควบคุมความหนา บาง ของครีบบาง ได้ง่ายกว่า	3. คุณสมบัติในการยืด-หยุ่นตัวต่ำกว่า การขึ้นรูป โดยการฉีดขึ้นรูป

รายละเอียดขั้นตอนการทำงานการขึ้นรูปของแม่พิมพ์แบบอัดส่ง ดังแสดงตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ขั้นตอนในการขึ้นรูปยางด้วยการขึ้นรูปแบบอัดส่ง

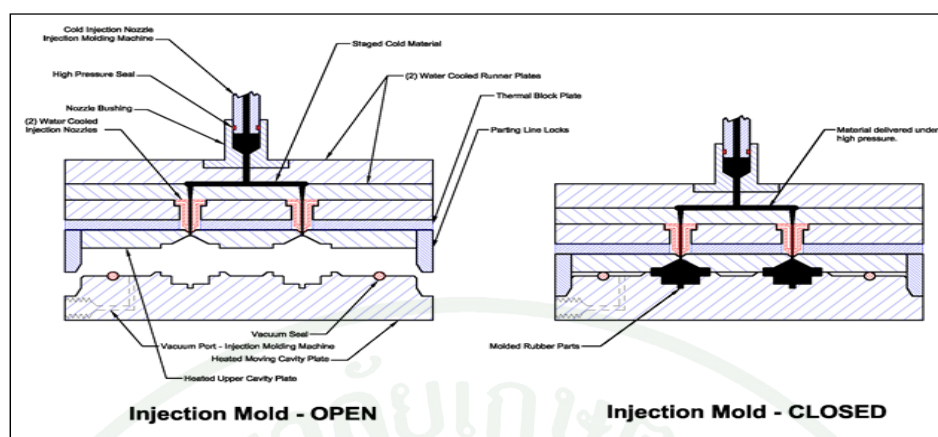
ขั้นตอนการทำงาน	รายละเอียดการทำงาน
	ขั้นตอนที่ 1 นำยางที่ตัดได้น้ำหนัก อัดวางลงบนส่วนของแม่พิมพ์ ที่เรียกว่า ชูอัดส่ง (Pot) ซึ่งอยู่ด้านบนสุดของแม่พิมพ์ จะลงมาประกบกับส่วนของเบ้าวางยางเพื่อดันยางผ่านรูเล็กๆ เรียกว่ารูฉีดลงในเบ้าของแม่พิมพ์
	ขั้นตอนที่ 2 แม่พิมพ์ประกบเข้าด้วยกันโดยใช้แรงดันจากกระบอกไฮดรอลิกของเครื่องอัดยาง โดยยางจะไหล ผ่านรูเล็กๆ เพื่อไหลเข้าสู่เบ้าในแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะประกบกันสนิทและอัดยางค้างไว้ที่อุณหภูมิ เวลาและแรงดันที่เหมาะสมในการขึ้นรูป
	ขั้นตอนที่ 3 เมื่อแม่พิมพ์เปิดออกยางจะสุกตัวและมีลักษณะเป็นของแข็ง มีรูปร่างตามพิมพ์ ส่วนของ ลูกสูบจะถูกยกขึ้นพร้อมกับนำส่วนของแผ่นยาง (Transferred Pad) ออกจากเบ้าในชูอัดส่ง
	ขั้นตอนที่ 4 เปิดพิมพ์ส่วนของเบ้าขึ้นงานเพื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



ภาพที่ 16 ตัวอย่างเครื่องอัดยางแบบอัดส่ง

ที่มา: Lin Cheng Mfg. (2010)

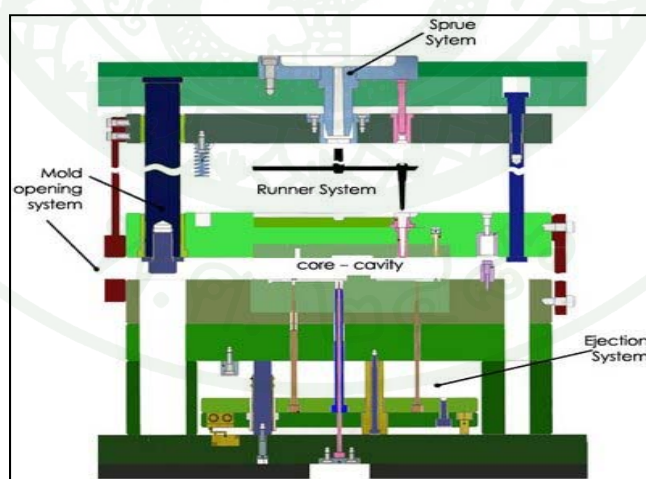
3.3 การขึ้นรูปด้วยการฉีด (Injection Moulding) นั้นเป็นการฉีดเนื้อยางจากกระบอกฉีด (Injection Barrel) ด้วยกระบอกสูบ (Ram) หรือสกรู (Screw) ที่อยู่ภายใน เนื้อยางจะถูกฉีดผ่านหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งเป็นส่วนปลายสุดเข้าสู่รูฉีดของแม่พิมพ์ โดยรูฉีดนี้จะเชื่อมต่อกับทางวิ่ง และรูเข้าก่อนเข้าโพรงแม่พิมพ์ต่อไป โดยที่แม่พิมพ์จะมีตัวทำความร้อนที่มีลักษณะเป็นแท่ง (Heater Rod) ติดอยู่เพื่อทำให้ยางเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ หลังจากยางสุกแล้วแม่พิมพ์จะเปิดออกเพื่อปลดชิ้นงานโดยสามารถนำชิ้นงานออกมาด้วยผู้ปฏิบัติงาน หรือใช้แขนหุ่นยนต์หยิบออกแบบอัตโนมัติก็ได้ ตัวอย่างส่วนประกอบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้งและแนวนอน

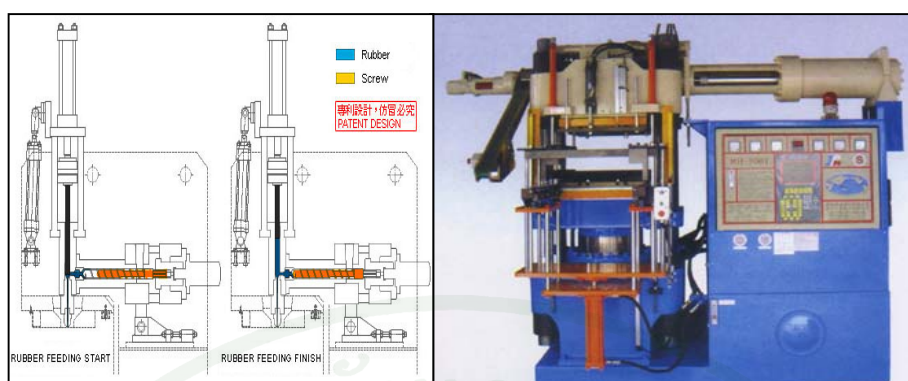
ที่มา: Hawthorne Rubber Mfg. Corp. (2004)

นอกจากนั้นการเติมเนื้อยางจะเป็นแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะเป็นแบบสายยาวเข้าสู่กระบอกลีดหรือเป็นเม็ดเล็กผ่านกรวย (Hopper) คล้ายการฉีด เครื่องฉีดยางแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เครื่องฉีดแบบแนวตั้ง (Vertical Injection Machine) และเครื่องฉีดยางแบบแนวนอน (Horizontal Injection Machine) ดังแสดงตามภาพที่ 18-19



ภาพที่ 18 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง

ที่มา: Lin Cheng Mfg. (2010)



ก

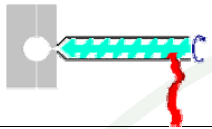
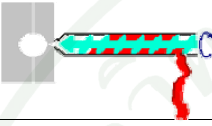
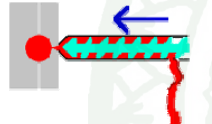
ข

ภาพที่ 19 เครื่องฉีดยาง (ก) เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง และ (ข) เครื่องฉีดยางแบบแนวนอน

ที่มา: Lin Cheng Mfg. (2010)

รายละเอียดแสดงขั้นตอนการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูป ดังแสดงตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ขั้นตอนในการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการฉีดขึ้นรูป

ขั้นตอนการทำงาน	รายละเอียดขั้นตอนการทำงาน
	ขั้นตอนที่ 1 นำยางที่ตัดเป็นเส้น ใส่ลงในสกรู โดยยางจะต้อง ถูกใส่ในสกรูอย่างต่อเนื่อง
	ขั้นตอนที่ 2 ยางที่ตัดเป็นเส้น จะถูกถ้ำเลี้ยงและกวนยางให้เข้ากันที่อุณหภูมิ 60-70 องศาในกระบอกสกรู
	ขั้นตอนที่ 3 เพื่อให้เกิดแรงอัดส่งยาง สกรูจะเคลื่อนที่ออกจากกระบอก ตามปริมาณยางที่ต้องการให้มีในกระบอกสูบ และพร้อมที่จะฉีด
	ขั้นตอนที่ 4 เมื่อแม่พิมพ์ถูกปิดสนิทด้วยแรงดันที่ตั้งไว้เท่ากับแรงดันของสกรู สกรูจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เพื่ออัดยางผ่านรูฉีดเข้าสู่เบ้าในแม่พิมพ์
	ขั้นตอนที่ 5 ขณะที่กำลังให้ความร้อนกับยาง สกรูจะเคลื่อนที่ออกจากกระบอกตามปริมาณยางที่ต้องการให้มีในกระบอกสูบอีกครั้ง
	ขั้นตอนที่ 6 แม่พิมพ์เปิดออกเพื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และสามารถฉีดยางขึ้นรูปครั้งต่อไปได้

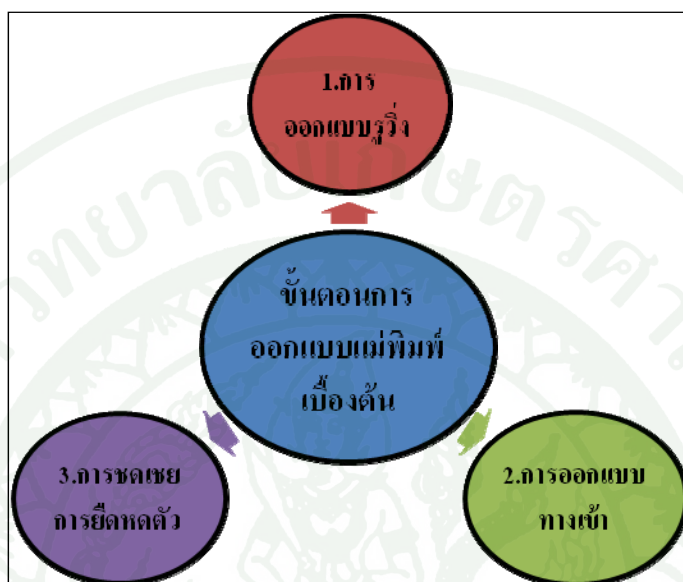
รายละเอียดข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง แสดงตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ข้อดีและข้อจำกัดของกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง

ข้อดีของกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง
1. อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเนื้อยางสูงกว่าที่ใช้ในวิธีการอัดและอัดส่ง ซึ่งส่งผลให้ยางสุกตัวเร็วกว่า 2. เนื่องจากอุณหภูมิของเนื้อยางที่ถูกฉีดเข้าเบ้าใกล้เคียงกับอุณหภูมิฉีด ทำให้ร่างกายถ่ายเทอุณหภูมิระหว่างการบ่มมีน้อยมาก ดังนั้นจึงเกิดแรงดันภายในน้อยมาก ซึ่งเป็นผลให้เกิดรอยร้าว หรือรอยแตกบริเวณแนวส่วนแบ่งแม่พิมพ์ลดลงได้มาก 3. ไม่จำเป็นต้องตัดแบ่ง หรือทำรูปทรงก่อนฉีด เพราะสามารถป้อนเนื้อยางแบบสายยาว หรือเป็นเม็ดได้เลย 4. ลดปริมาณครีบกาว 5. ลดการเกิดคาร์บอนของอากาศ 6. รอบการฉีดลดลง ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนมาก
ข้อจำกัดของกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง
1. แม่พิมพ์จำเป็นต้องทนต่อแรงดันสูง ทำให้ต้องใช้เหล็กที่มีความแข็งแรงมาก และใช้ความละเอียดสูง 2. เนื่องจากแม่พิมพ์ฉีดยางมีระบบทางวิ่งทำให้เสียเนื้อยางในส่วนดังกล่าว เป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตมากกว่าการอัดและการอัดส่ง

4. การออกแบบแม่พิมพ์

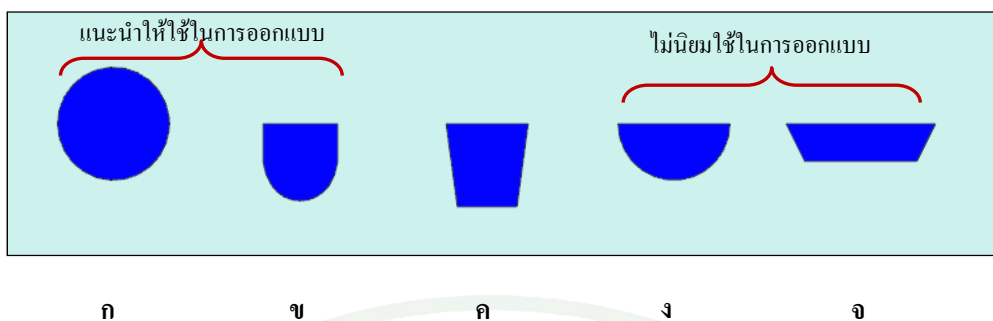
มีขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์เบื้องต้น ดังแสดงภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์เบื้องต้น

4.1 การออกแบบรูวิ่ง (Runner) เป็นร่องที่ตัดเฉือนในแผ่นแม่พิมพ์เพื่อให้รูฉีดและรูโพรงแม่พิมพ์ติดต่อถึงกันได้สำหรับแม่พิมพ์แบบสองส่วน รูวิ่งจะอยู่บนผิวแบ่งส่วนแม่พิมพ์ในขณะที่แม่พิมพ์ที่มีการออกแบบค่อนข้างซับซ้อน รูวิ่งอาจอยู่ในตำแหน่งใต้ผิวแบ่งส่วนแม่พิมพ์ ผิวหรือผนังของรูวิ่งจะต้องเรียบเพื่อป้องกันการกีดขวางการไหลของเนื้อยางและรูวิ่งนี้จะต้องปลดออกจากแม่พิมพ์ ดังนั้น รูวิ่งจะต้องไม่มีรอยที่เกิดจากการตัดเฉือนด้วยเครื่องมือต่างๆ หลงเหลืออยู่ซึ่งมักจะดึงให้รูวิ่งติดอยู่กับแม่พิมพ์ (ชาติ, 2539)

4.1.1 รูปทรงหน้าตัดของรูวิ่ง (Runner Cross-Section Shape) รูปทรงหน้าตัดของรูวิ่งที่ใช้ในแม่พิมพ์ฉีด โดยปกติจะเลือกใช้แบบใดแบบหนึ่งใน 4 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 21 คือ (ก) แบบกลม (Round) (ข) แบบตัวยู (Ball Nose) (ค) แบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) (ง) แบบครึ่งวงกลม (Half Round) และ (จ) แบบสี่เหลี่ยมคางหมูแปรรูป (Modified Trapezoidal) เหตุผลที่ทำไม่จึ่งนิยมใช้รูวิ่งแบบต่างๆ ดังกล่าวมากกว่าแบบอื่นๆ มีดังนี้



ภาพที่ 21 รูปทรงหน้าตัดของรูวิ่ง (ก) แบบกลม (ข) แบบถ้วย (ค) แบบสี่เหลี่ยมคางหมู (ง) แบบครึ่งวงกลม และ (จ) แบบสี่เหลี่ยมคางหมูแปรชนิดแบน

4.1.2 ขนาดของรูวิ่ง (Runner Size) เมื่อผู้ออกแบบจะเลือกใช้ขนาดของรูวิ่งจะต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ดังนี้ รูวิ่งควรมีพื้นที่หน้าตัดโคที่ต่ำสุดเมื่อพิจารณาจากการส่งถ่ายแรงดันและเมื่อพิจารณาจากการส่งถ่ายความร้อนของรูวิ่งที่ดีควรมีพื้นที่ผิวสัมผัสกันน้อยที่สุด อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อพื้นที่ผิวสัมผัสโดยรอบของรูวิ่งซึ่งจะช่วยชี้บอกถึงประสิทธิภาพของการออกแบบรูวิ่ง โดยการคำนวณหาขนาดของรูวิ่งจะนิยมใช้การหาระยะความกว้างและความยาวที่เหมาะสมกับรูวิ่งแต่ละแบบโดยระบุพื้นที่หน้าตัดที่ต้องการดังสมการที่ (6)

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (6)$$

กำหนดให้ D_h คือ ขนาดความกว้างของรูวิ่ง (มิลลิเมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรูวิ่ง (ตารางมิลลิเมตร)

P คือ ความยาวเส้นรอบวงของรูวิ่ง (มิลลิเมตร)

จากสมการที่ (6) ใช้สำหรับหาขนาดความกว้างของรูวิ่ง (D_h) โดยรูวิ่งแต่ละแบบจะมีค่าที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 22

Cross Section				
D_h	D	0.9523D	0.9116D	0.8862D

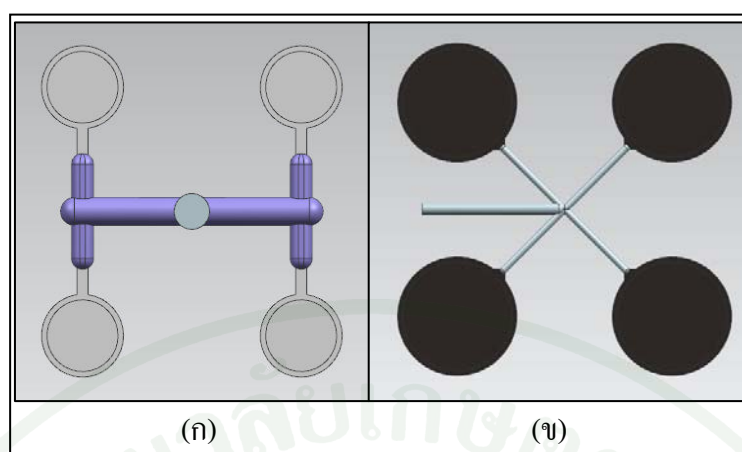
Cross Section				
D_h	0.8771D	0.8642D	0.8356D	0.7090D

ภาพที่ 22 ขนาดความกว้างรูวิ่งเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลาง

ที่มา: Shoemaker (2004)

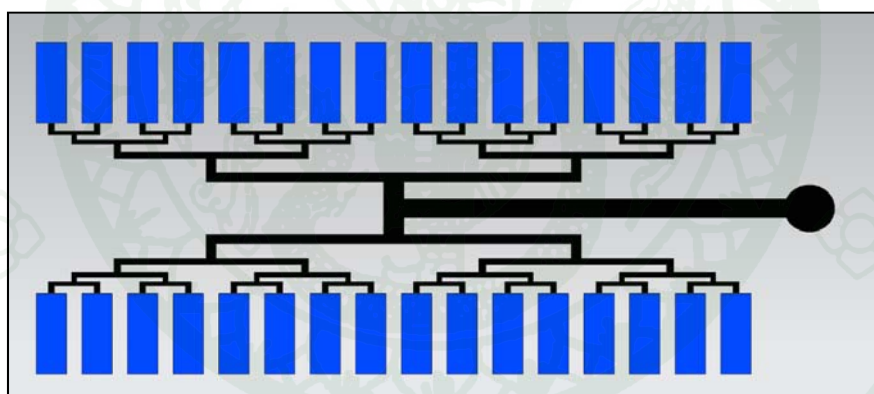
4.1.3 พื้นที่หน้าตัดของรูวิ่ง จะต้องมีความใหญ่เพียงพอที่จะให้ยางหลอมไหลผ่านได้ และเติมเข้าแม่พิมพ์ก่อนที่แกนรูวิ่งจะแข็งตัวและสามารถอัดเพิ่มแรงดันเพื่อแก้ไขขนาด เนื่องจากการหดตัวได้หากต้องการยางหลอมที่วิ่งไหลไปตามรูวิ่ง หากรูวิ่งที่ยาวจะมีความต้านทานในการไหล ยิ่งมาก ดังระยะห่างระหว่างโพรงแม่พิมพ์กับรูฉีดของแม่พิมพ์จึงมีความเกี่ยวพันโดยตรงกับขนาดหน้าตัดของรูวิ่งขนาดพื้นที่หน้าตัดของรูวิ่ง ไม่ควรจะออกแบบจนมีผลต่อการควบคุมวงจรการฉีด แม้ว่าในบางครั้งจะไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยเฉพาะกับชิ้นงานที่มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา ขนาดพื้นที่หน้าตัดของรูวิ่งยิ่งโตก็จะมีเนื้อแข็งตัวอยู่ในรูวิ่งมากขึ้นด้วย และต้องใช้เวลาเย็นตัวเพื่อให้เนื้อของชิ้นงานและรูวิ่งแข็งเพียงพอที่จะเปิดแม่พิมพ์และดันปลดออก

4.1.4 การร่างแบบรูวิ่ง (Runner Layout) การร่างแบบระบบรูวิ่งจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้ จำนวนเข้าแม่พิมพ์ รูปทรงของชิ้นงาน ชนิดของแม่พิมพ์ (คือ แม่พิมพ์แบบสองแผ่นหรือแม่พิมพ์แบบหลายแผ่น) ชนิดของรูเข้าสู่สมดุลรูวิ่งตามเรขาคณิต (Geometrical Balance Runners) โดยส่วนมากจะนิยมออกแบบ รูวิ่งที่สมดุลทางเรขาคณิตเป็นแบบ เอช (H) หรือกากบาท (X) (Beaumont, 2004) ดังแสดงในภาพที่ 23



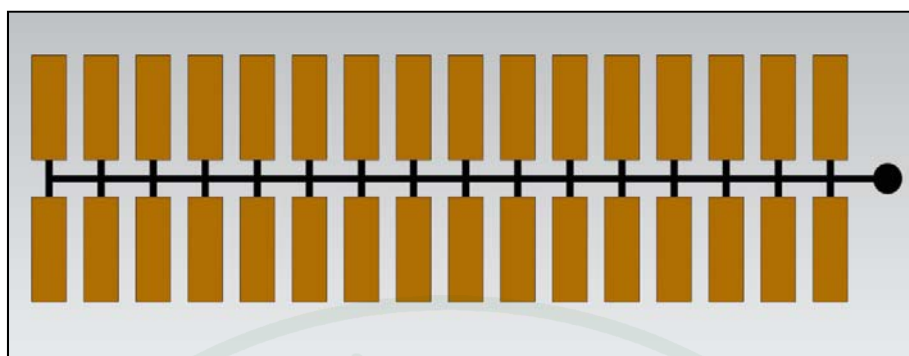
ภาพที่ 23 รูวี่งที่ออกแบบให้สมดุลทางเรขาคณิต (ก) แบบเอช และ (ข) แบบกากบาท

ในลักษณะของการออกแบบให้รูวี่งสำหรับจำนวนเบ้าแม่พิมพ์หลายหลุม จะมีการออกแบบรูวี่งให้สมดุล ให้ระยะทางของรูวี่งเท่ากันทุกหลุม ดังภาพที่ 24



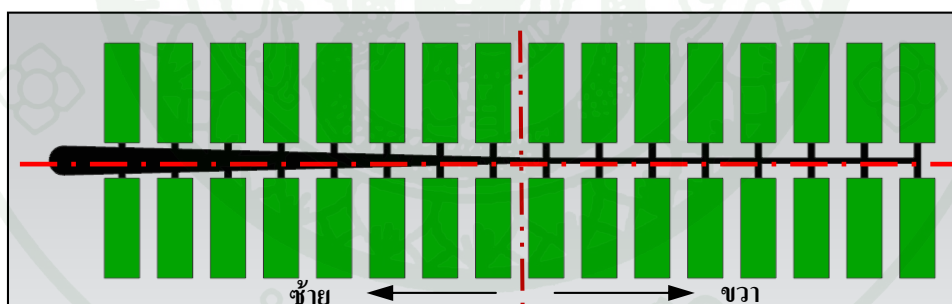
ภาพที่ 24 รูวี่งที่ออกแบบให้สมดุลทางเรขาคณิตมี 64 หลุมแสดงในภาพครึ่งแม่พิมพ์

รูวี่งแบบไม่สมดุลทางเรขาคณิต (Non-geometrical Balance Runners) จะมีลักษณะที่ไม่เท่ากันของระยะรูวี่ง ทำให้ไม่สมดุล นิยมออกแบบเป็นลักษณะก้างปลา (Fishbone) หรือต้นไม้ (Tree) ดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 รูปร่างที่ออกแบบให้ไม่สมดุลทางเรขาคณิตมี 64 หลุมแบบก้างปลาในภาพครึ่งแม่พิมพ์

การออกแบบระบบรูปร่างลักษณะดังภาพที่ 26 จะทำให้เกิดการเติมน้ำเข้าโพรงแม่พิมพ์ไม่พร้อมกัน กล่าวคือ โพรงแม่พิมพ์ที่มีขนาดเล็กหรือโพรงแม่พิมพ์ที่อยู่ใกล้กับรูฉีดจะเต็มก่อน ลักษณะเช่นนี้สามารถออกแบบระบบป้อนให้การเติมน้ำเข้าโพรงแม่พิมพ์พร้อมๆ กันได้หรือสมดุลกันเพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพและความเที่ยงขนาดที่เหมือนกัน โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของรูฉีก เรียกว่า การสมดุลรูฉีกและอีกวิธีหนึ่งทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของรูเข้า ซึ่งเรียกว่า การสมดุลรูเข้า



ภาพที่ 26 การสมดุลระบบป้อน

4.2 การออกแบบลักษณะทางเข้า (Gate) เป็นร่องหรือรูเล็กที่ต่อระหว่างรูวิ่งกับเบ้าแม่พิมพ์ ซึ่งขนาดพื้นที่หน้าตัดจะมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับรูเข้าส่วนอื่น ซึ่งจะแสดงดังต่อไปนี้

- แกนรูเข้าจะแข็งตัวได้เร็วหลังจากที่เบ้าแม่พิมพ์ถูกเติมเนื้อจนเต็มทำให้สามารถยกก้านฉีด (Injection Plunger) ของเครื่องฉีดยางออกได้โดยไม่ทำให้เกิดเป็นช่องว่างหรือแอ่งบนชิ้นงาน เนื่องจากการดูดกลับ (Suck-Back) ของเนื้อ

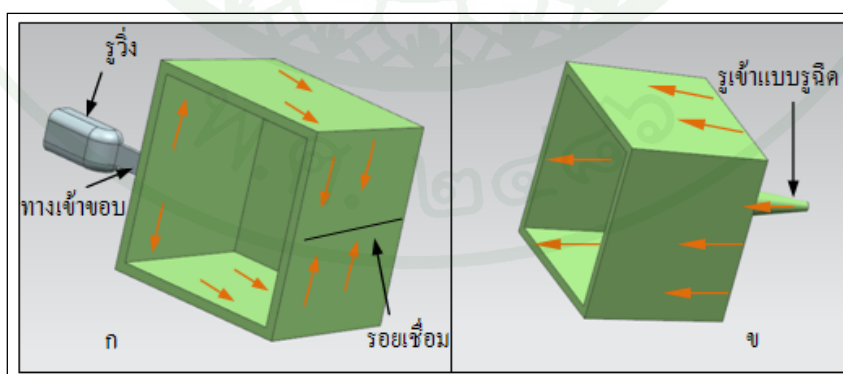
- ทำให้สามารถปลดแกนรูเข้าได้ง่ายและในแม่พิมพ์บางแบบสามารถปลดแกนรูเข้าได้โดยอัตโนมัติ

- หลังจากปลดแกนรูเข้าแล้วจะเหลือรอยตำหนิบนชิ้นงานเล็กๆ เท่านั้น

- สามารถควบคุมการเติมเนื้อภายในแม่พิมพ์แบบหลายโพรงแม่พิมพ์ได้ดี

- ความจำเป็นที่จะต้องอัดเนื้อเข้าไปในเบ้าแม่พิมพ์มากกว่าที่ต้องการ เพื่อแก้ไขขนาด เนื่องจากการหดตัวจะมีน้อยลง

4.2.1 การกำหนดตำแหน่งของรูเข้า (Positioning of Gate) ตำแหน่งของรูเข้าควรจะอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้เกิดการไหลเติมเนื้อภายในเบ้าแม่พิมพ์อย่างสม่ำเสมอ และกระจายการไหลของเนื้อเข้าไปยังส่วนต่างๆ ของเบ้าแม่พิมพ์ในเวลาใกล้เคียงกันที่สุดหรือเกือบจะเป็นเวลาเดียวกัน โดยวิธีนี้การกระจายการไหลของเนื้อที่ไหลมาบรรจบกัน จะไม่ทำให้เกิดเป็นรอยเชื่อมของเนื้อ (Welded Line) ซึ่งต่อมากจะกลายเป็นจุดอ่อนทางกลและเป็นรอยมลทินบนผิวงาน ดังแสดงในภาพที่ 27 ตำแหน่งของรูเข้าที่ดีตามลักษณะนี้ จะใช้ได้เฉพาะกับรูปทรงของชิ้นงานบางแบบเท่านั้น (ชาลี, 2539)



ภาพที่ 27 การกำหนดตำแหน่งของรูเข้า (ก) ใช้รูเข้าขอบกับชิ้นงานรูปถ้วย ทำให้เกิดรอยเชื่อมตรงตำแหน่งที่หลอมไหลมาบรรจบกัน (ข) ชิ้นงานแบบเดียวกัน แต่ใช้รูเข้าแบบรูฉีด ทำให้หลอมไหลอย่างสม่ำเสมอ

4.2.2 ชนิดของทางเข้า (Gate Type) มีด้วยกันดังต่อไปนี้

ก. ทางเข้าแบบรูด (Sprue) คือ การฉีดยางหลอมเข้าชิ้นงานโดยตรงจากรูด หรือ รูดรอง (Secondary Sprue) ส่วนของรูดเข้าแบบรูด ข้อเสียของวิธีนี้คือ หลังขบวนการฉีดจะมีรอยตำหนิขนาดใหญ่ของรูดเข้าบนผิวชิ้นงาน ขนาดของรอยตำหนิจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านเล็กของรูด มุมเรียวของรูด ความยาวของรูดสำหรับแม่พิมพ์แบบสองแผ่นรูดเข้าแบบรูดจะใช้เฉพาะกับแม่พิมพ์แบบเป่าชั้นเดียวเท่านั้น ในกรณีนี้ตำแหน่งของเป่าจะอยู่ตรงศูนย์กลางของแม่พิมพ์ และรูดจะป้อนเข้าเป่าโดยตรง ดังแสดงในภาพที่ 28

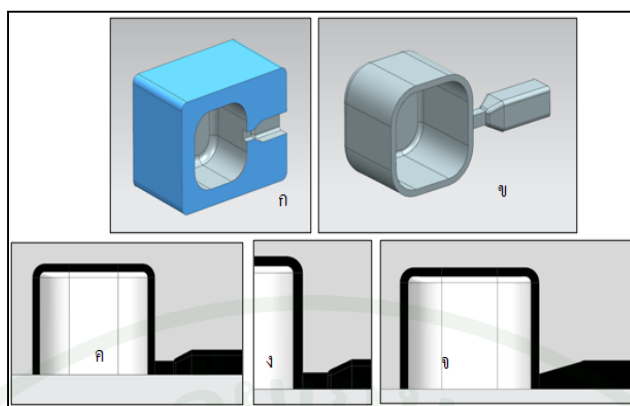


ภาพที่ 28 ทางเข้าแบบรูด

ข. ทางเข้าขอบแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Edge Gate) ทางเข้าแบบนี้มีข้อดีที่เหนือทางเข้าแบบอื่นๆ ดังนี้

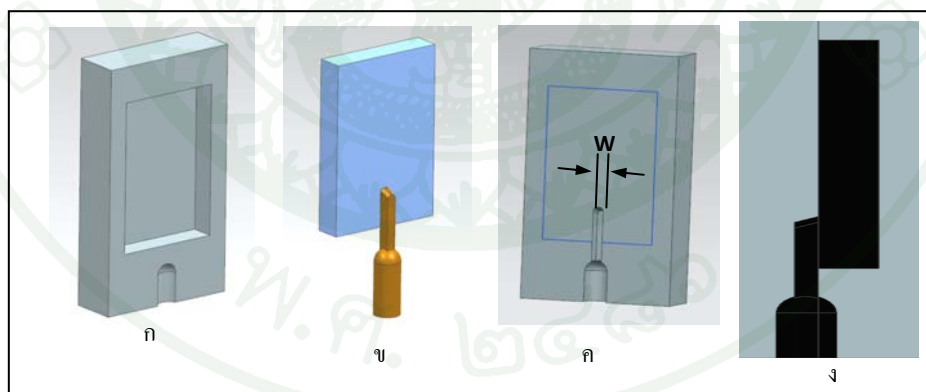
- ทางเข้าแบบนี้มีรูปหน้าตัดแบบง่าย ๆ ดังนั้นจึงมีราคาในการตัดแผ่นถูก
- ขนาดของทางเข้าสามารถทำให้ได้ขนาดถูกต้องได้ง่าย
- ขนาดของทางเข้าสามารถปรับปรุงแก้ไขได้ง่าย และรวดเร็ว
- อัตราความเร็วในการเติมน้ำยางสามารถควบคุมได้อย่างอิสระ

ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของรูดเข้าแบบนี้ก็คือ หลังจากการปลดแกนรูดออกจะเหลือเป็นรอยตำหนิบนผิวงานและจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนในวัสดุบางชนิด ดังภาพที่ 29



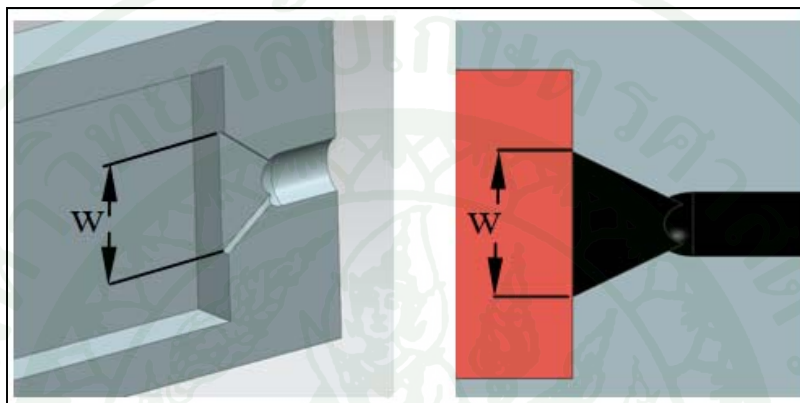
ภาพที่ 29 ทางเข้าขอบแบบสไลด์ (ก) ทำรูเข้าบนแผ่นเบ้า (ข) ชิ้นงานที่มีแกนรูเข้าติดอยู่ (ค) ภาพตัดของแม่พิมพ์ (ง) และ (จ) ทางเข้าขอบแบบสไลด์รูปทรงอื่น

ค. ทางเข้าแบบเหลื่อม (Overlapped Gate) ทางเข้าแบบนี้เป็นแบบที่พัฒนามาจากทางเข้าแบบสไลด์และใช้ในระบบป้อนของชิ้นงานบางแบบเท่านั้น รูเข้าแบบเหลื่อมซึ่งมีรูปร่างทั่วไปเป็นแบบสไลด์ที่ตัดเลื่อนบนผิวราบของแผ่นแม่พิมพ์ ในตำแหน่งที่เชื่อมต่อระหว่างปลายของรูวิ่งกับขอบผนังของเบ้า (ค) ลักษณะการจัดรูปแบบทั่วไปแสดงในรูป (ง) ซึ่งแสดงภาคตัดของแม่พิมพ์ตรงตำแหน่งนี้ ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ทางเข้าแบบเหลื่อม (ก) รูปร่างของเบ้า (ข) ชิ้นงานที่มีแกนทางเข้าติดอยู่ (ค) ทางเข้าแบบเหลื่อมตัดเลื่อนบนผิวราบของแผ่นแม่พิมพ์ (ง) ภาพตัดแสดงทางเข้าแบบเหลื่อมในแม่พิมพ์

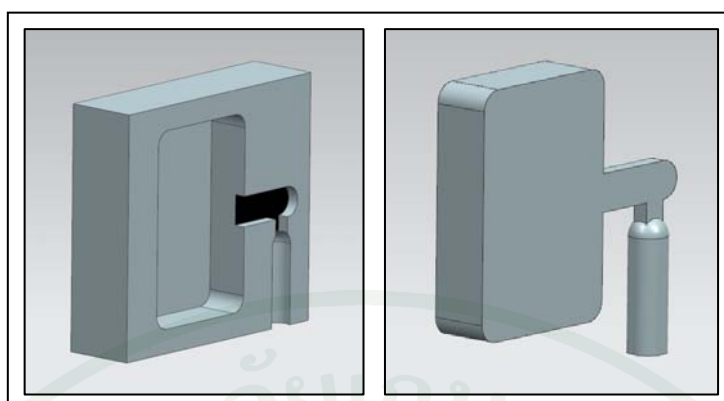
ง. ทางเข้าแบบพัด (Fan Gate) เป็นทางเข้าขอบอีกแบบหนึ่งแต่ไม่เหมือนกับทางเข้าแบบสี่เหลี่ยมที่มีขนาดความกว้างและความลึกคงที่ ขนาดความกว้างและความลึกของทางเข้าแบบพัดจะมีขนาดไม่คงที่ แสดงภาพที่ 31 ขนาดความกว้าง (W) จะขยายโตขึ้นเรื่อยๆ (โดยปกติจะเริ่มขยายจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูวิ่งที่ใช้) ในขณะที่ขนาดของความลึกจะค่อยๆ ลดลง ทั้งนี้ เพื่อรักษาให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดของทางเข้ามีขนาดคงที่ตลอดความยาวของทางเข้า



ภาพที่ 31 ทางเข้าแบบพัด

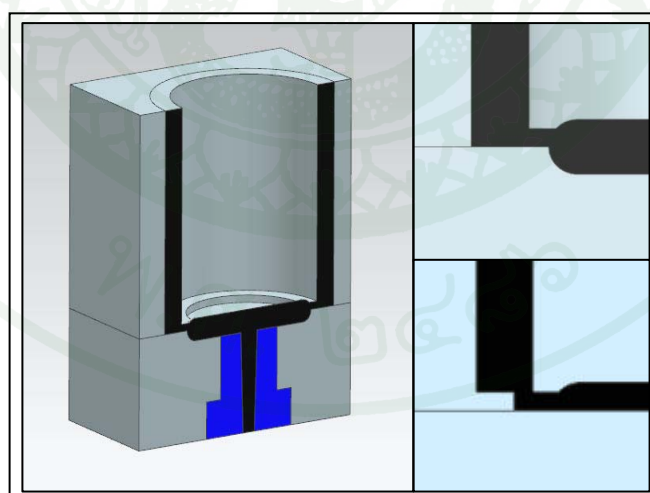
ความกว้างของทางเข้าส่วนที่อยู่ติดกับเบ้าจะมีขนาดค่อนข้างกว้าง และเพราะเหตุนี้ทำให้สามารถฉีดหลอมเข้าไปในเบ้าได้เป็นปริมาณที่มากในช่วงระยะเวลาอันสั้น ดังนั้นทางเข้าแบบนี้จึงเหมาะกับชิ้นงานที่มีพื้นที่โตและมีผนังบาง รูปร่างของทางเข้าแบบพัดจะช่วยกระจายการไหลหลอมเข้าไปในเบ้า ทำให้การไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอรอยทางการไหลและรอยมลทินบนผิวงานจะเกิดขึ้นน้อยมาก

จ. ทางเข้าแบบแถบ (Tab Gate) เป็นเทคนิคการออกแบบทางเข้าที่ใช้เฉพาะกับระบบป้อนของชิ้นงานที่เป็นแท่งตัน แผ่นยื่นหรือแถบฉีดทางเข้าด้านข้างของชิ้นงาน ภาพแสดงที่ 32 และทางเข้าขอบแบบสี่เหลี่ยมจะใช้ต่อระหว่างแถบกับรูวิ่ง รอยต่อระหว่างทางเข้าขอบแบบสี่เหลี่ยมทำเป็นมุมฉากเพื่อป้องกันไม่ให้พุ่งเข้าเบ้าและแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้หลอมไหลเข้าเบ้าอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้น ทางเข้าแบบแถบจึงเป็นการออกแบบใช้งานในลักษณะเดียวกันกับทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม ดังนั้นการออกแบบจะเลือกใช้แบบใดแบบหนึ่งจะขึ้นอยู่กับรอยดำหนิที่ค่อนข้างโตเหมือนกัน (ชาติ, 2539)



ภาพที่ 32 ทางเข้าแบบแถบ

จ. ทางเข้าแบบม่าน (Diaphragm Gate) ทางเข้าแบบนี้ใช้สำหรับชิ้นงานที่เป็นลักษณะท่อในแม่พิมพ์แบบสองแผ่นที่มาเข้าเดี่ยว และอาจใช้ได้กับแม่พิมพ์แบบป้อนด้านได้และแม่พิมพ์แบบปรากฏากรูปร่างที่มีหลายใบ รูธิดจะต่อถึงรูวังวงแหวน แสดงภาพที่ 33 ที่มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางด้านในของท่อเล็กน้อย รูวังวงแหวนนี้จะทำให้น้ำวัสดุรูปงานและมีหน้าที่เหมือนกับรูวังที่ทำให้หลอมไหลจากรูธิดออกไปรอบๆ เป็นรัศมีเข้าไปยังทางเข้า ทางเข้าอาจทำบนแผ่นคอร์ หรือแผ่นเบ้า ก็ได้ ทั้งสองกรณีจะรูวังวงแหวนเข้ากับเบ้า

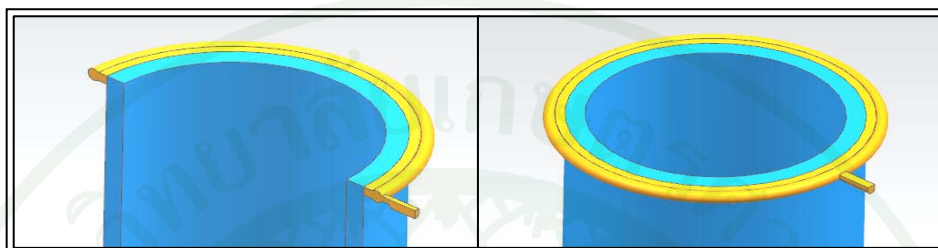


(ก)

(ข)

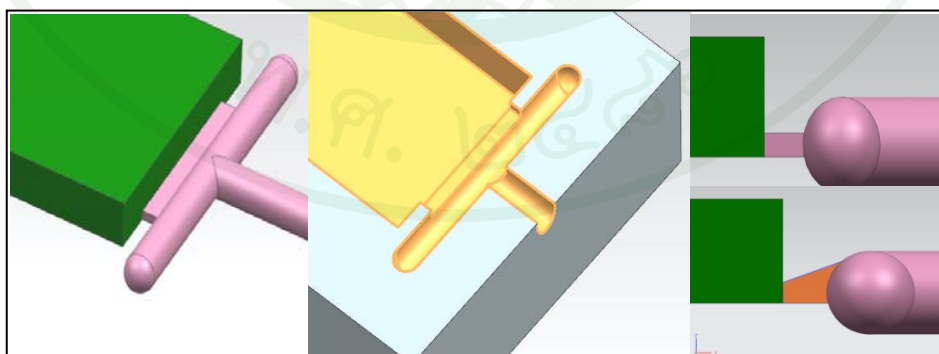
ภาพที่ 33 ทางเข้าแบบม่าน การเลือกทางเข้าแบบ (ก) หรือ (ข) ขึ้นอยู่กับวิธีนำไปใช้งานของท่อ

ข. ทางเข้าแบบวงแหวน (Ring Gate) หน้าที่ใช้และวิธีการใช้งานของทางเข้าแบบนี้จะเหมือนกับทางเข้าแบบม่านที่กล่าวไว้ข้างต้น ทางเข้าแบบนี้จะใช้กับชิ้นงานที่เป็นท่อเมื่อต้องการอิมเพรสชันมากกว่าหนึ่งอิมเพรสชันในแม่พิมพ์แบบสองแผ่น ทางเข้าแบบนี้จะจัดเตรียมทางเข้าของรอบๆ ผิวเส้นรอบวงด้านนอกของชิ้นงาน และสามารถใช้รูวิ่งแบบที่ใช้กันทั่วไปได้ ดังแสดงภาพที่ 34



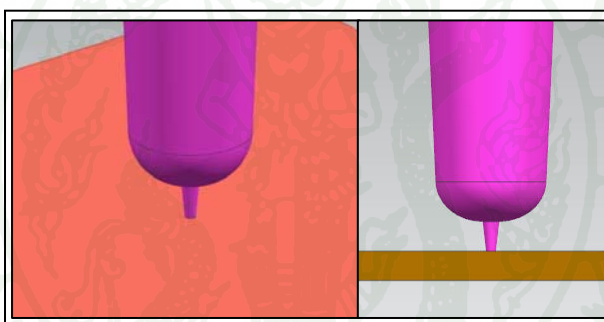
ภาพที่ 34 ทางเข้าแบบวงแหวน

ข. ทางเข้าแบบฟิล์ม (Film Gate) ทางเข้าของแบบสี่เหลี่ยมที่ขนาดยาวและใช้สำหรับการผลิตชิ้นงานขนาดใหญ่ที่มีผนังบางซึ่งสามารถยืดหยุ่นได้ โดยปกติจะวางตำแหน่งทางเข้าขนานไปตลอดความกว้าง (ด้านแคบ) ของชิ้นงาน รูเข้าแบบนี้จะมีหลักการที่คล้ายคลึงกันกับทางเข้าแบบม่านและทางเข้าแบบวงแหวนเพราะมีพื้นที่ทางไหลขนาดใหญ่ ทำให้สามารถเติมในเข้าได้เต็มในเวลาอันรวดเร็ว รูวิ่งจะวางขนานไปกับผิวด้านข้างของเบ้าเพื่อป้อนให้กับทางเข้าอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในภาพที่ 35 ซึ่งหมายความว่า จะเหลือเนื้อเหล็กบางๆ ระหว่างรูวิ่งกับเบ้า ดังนั้นเพื่อป้องกันความเสียหายในขณะใช้งาน ความยาวเขตทางเข้าอย่างน้อยที่สุด 1.30 มิลลิเมตร (0.050 นิ้ว)



ภาพที่ 35 ทางเข้าแบบฟิล์ม

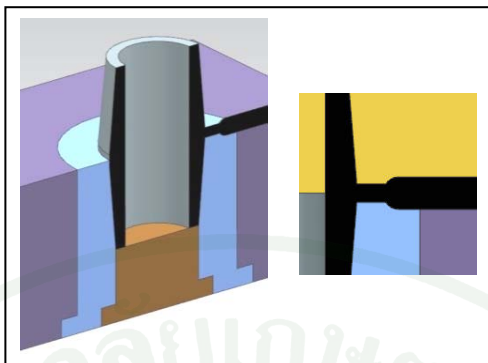
ข. ทางเข้าแบบเข็ม (Pin Gate) ทางเข้าแบบนี้เป็นแบบกลมที่ใช้ป้อนเข้าทางด้านใต้ของชิ้นงานและเพราะทางเข้าแบบนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางค่อนข้างเล็ก ดังนั้นจึงมักนิยมใช้มากกว่ารูเข้าแบบรูฉีกซึ่งต้องปรับแต่งผิวในภายหลัง อย่างไรก็ตามทางเข้าแบบเข็มจะใช้ได้กับแม่พิมพ์บางแบบเท่านั้น และโดยทั่วไปการออกแบบแม่พิมพ์จะซับซ้อนกว่าแบบที่ใช้รูเข้าแบบรูฉีกหรือใช้เทคนิครูเข้าด้านข้าง ทางเข้าแบบเข็มนอกจากใช้ป้อนเข้าตรงศูนย์กลางของชิ้นงานแล้วยังใช้ในลักษณะเป็นทางเข้าแบบหลายจุดและทางเข้าแบบจุดเดียวแต่เอียงศูนย์ แสดงภาพที่ 36 ซึ่งเป็นแม่พิมพ์แบบสามแผ่นที่ป้อนเข้าทางด้านใต้ ทางเข้าจะเป็นรูกลมเล็กๆ ซึ่งต่อระหว่างปลอกรูฉีกตรงกับบ้ำเพื่อป้องกันไม่ให้ทางเข้าทำผิวส่วนที่อยู่ติดกับรูเข้าเกิดรอยแตกโดยเฉพาะเมื่อนิดที่มีความเปราะบางมาก จึงนิยมทำรูเข้าให้เป็นรีว ซึ่งจะทำให้แกนรูเข้าหักที่รอยต่อระหว่างรูเข้ากับปลารูฉีกตรง ในการออกแบบชิ้นงานที่ใช้ทางเข้าแบบนี้มักจะแนะนำให้เพิ่มขนาดความหนาของผนังชิ้นงานด้านที่อยู่ตรงข้ามกับทางเข้าเพื่อให้การไหลเข้าบ้ำเป็นไปอย่างอิสระ (ชาลี, 2539)



ภาพที่ 36 ทางเข้าแบบเข็ม

ฅ. ทางเข้าขอบแบบกลม (Round Edge Gate) ทางเข้าแบบนี้จะทำขึ้นโดยตัดเนื้อเป็นร่องครึ่งวงกลมบนแผ่นแม่พิมพ์ทั้งสองในตำแหน่งระหว่างปลารูฉีกกับอิมเพรสชั่น และนำมาประกบเข้าด้วยกัน แสดงภาพที่ 37 ปลารูเข้าส่วนที่ติดกับบ้ำจะทำโค้งเป็นรัศมีเล็กๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานเสียหายเมื่อปลดแกนทางเข้าออก แต่เนื่องจากรูปร่างของรูปแบบนี้ทำให้มีข้อเสียหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับทางเข้าขอบแบบสี่เหลี่ยมขนาดเดียวกัน ดังนี้

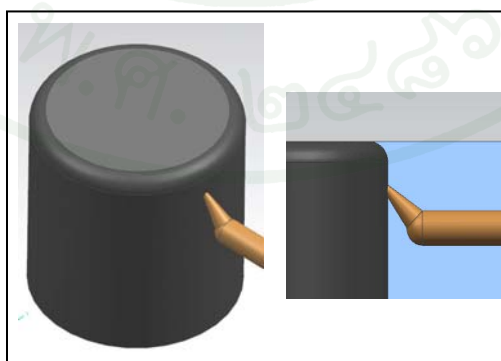
- รอยต่อที่นำมาประกบให้แนบสนิทกันจะทำให้ยาก
- ขนาดของทางเข้าที่ถูกต้องทำได้ยาก
- อัตราการไหลของเดิมเนื้อยางเข้าบ้ำไม่สามารถควบคุมได้อย่างอิสระด้วยเวลาการแข็งหรือคงรูป



ภาพที่ 37 ทางเข้าขอบแบบกลม

ณ. ทางเข้าแบบใต้ผิวแม่พิมพ์ (Subsurface Gate) ทางเข้าใต้ผิวแม่พิมพ์เป็นทางเข้าแบบกลมหรือวงรีที่ฝังอยู่ใต้ผิวแบ่งส่วนแม่พิมพ์เพื่อป้องกันเนื้อยางหลอมเข้าเบ้าแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 38 รูเข้าแบบนี้จะคล้ายคลึงกับรูเข้าแบบกลมตรงที่มีรูปร่างเหมือนกันหรือเกือบจะเหมือนกันและป้องกันเข้าทางด้านข้างเบ้าแม่พิมพ์ รูเข้าแบบนี้มีข้อดีเหนือว่ารูเข้าแบบกลมอยู่หลายประการคือ

- รูปร่างของทางเข้าใต้ผิวแม่พิมพ์ทำขึ้นอยู่ในแม่พิมพ์แผ่นเดียวกัน ซึ่งตัดปัญหาของรอยต่อของทางเข้าและสามารถทำให้ได้ขนาดที่ถูกต้องได้ง่าย
- หากใช้เป็นทางเข้าใต้ผิวแม่พิมพ์แบบวงรี จะทำให้สามารถควบคุมอัตราการไหลเต็มของหลอมเข้าอิมเพรสชั่นด้วยเวลาในการแข็งตัวของแกนรูเข้าได้อย่างอิสระ
- แกนทางเข้าจะขาดออกจากชิ้นงานในระหว่างขั้นตอนการดันปลด



ภาพที่ 38 ทางเข้าใต้ผิวแม่พิมพ์

4.3 การชดเชยการยืดหดตัว ในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับผลิตภัณฑ์ยางนั้นไม่มีทฤษฎีการออกแบบและวิธีการคำนวณที่ชัดเจน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะใช้แนวทางการออกแบบแม่พิมพ์ของพลาสติกมาประกอบในการออกแบบแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการมีดังต่อไปนี้

- กำหนดจำนวนเข้าแม่พิมพ์ และการวางเข้าแม่พิมพ์
- ขนาดของแม่พิมพ์
- กำหนดแนวแยกแม่พิมพ์
- กำหนดชนิด ตำแหน่ง จำนวนของรูวิ่ง และรูเข้า
- กำหนดระบบควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์

วัสดุที่ต้องการนำมาใช้ขึ้นรูปจะต้องใช้สมบัติต่างๆ เหล่านี้มาใช้ในการคำนวณ และออกแบบแม่พิมพ์มีดังนี้

4.3.1 ค่าความหดตัวของวัสดุ (Shrinkage) นำค่าความหดตัวของวัสดุนี้ไปเพื่อขนาดในการออกแบบแม่พิมพ์ เมื่อเวลาที่เราขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว ชิ้นงานนั้นจะได้มีขนาดตรงตามที่เราได้ออกแบบไว้ การเผื่อขนาดของแม่พิมพ์นั้น จะเราบวกค่าความหดตัวของวัสดุไปที่ชิ้นงาน

4.3.2 แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force) ในการออกแบบแม่พิมพ์เราจะใช้ค่าความดันในแม่พิมพ์มาใช้ในการคำนวณแรงปิดแม่พิมพ์ ความดันที่เกิดขึ้นแม่พิมพ์จะขึ้นอยู่กับความดันของเครื่องฉีด, ความหนาของชิ้นงาน และวัสดุที่เรานำมาใช้ฉีด แรงที่ใช้ปิดแม่พิมพ์สามารถคำนวณได้จากสมการ (7)

$$F = A \times P \quad (7)$$

กำหนดให้ A คือ พื้นที่ภาพฉาย

P คือ ความดันในแม่พิมพ์

F คือ แรงปิดแม่พิมพ์

แรงปิดแม่พิมพ์ที่ใช้ต้องมากกว่าแรงดันในการฉีดยางเข้าในเบ้าแม่พิมพ์ ซึ่งแรงดันในการฉีดเกิดจากการสร้างแรงดันจากปั๊มน้ำมันไฮดรอลิกส่งผ่านเข้าสู่กระบอกลูกสูบไฮดรอลิก ซึ่งกระบอกลูกสูบไฮดรอลิกทำหน้าที่ส่งผ่านแรงให้กระบอกลูกสูบเคลื่อนที่ ทำให้เกิดแรงดันสำหรับฉีดยางเข้าในแม่พิมพ์ ซึ่งโดยทั่วไปความดันที่กระบอกลูกสูบจะมากกว่าแรงดันในกระบอกลูกสูบประมาณ 10 เท่า

4.3.3 ค่าความแข็งแรงของชุดแม่พิมพ์ เมื่อแม่พิมพ์ปิดแรงของเครื่องที่กระทำกับแม่พิมพ์ล่างและแม่พิมพ์บนอาจจะทำความเสียหายให้กับแม่พิมพ์ได้ ดังนั้นเหล็กที่ใช้ทำแม่พิมพ์จะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะรับแรงดังกล่าวได้ องค์ประกอบสำคัญที่ต้องพิจารณาของเหล็กที่ใช้ทำแม่พิมพ์

4.3.4 การคำนวณความกว้างและยาวของแผ่นแม่พิมพ์ ถ้าแม่พิมพ์กว้างหรือยาวหรือหนาน้อยเกินไปจะทำให้ชิ้นงานที่ฉีดออกมามีรูปร่างผิดไปได้ หรือแม้แต่กระทั่งอาจทำให้แม่พิมพ์แตกชำรุดเสียหาย เมื่อความดันในแม่พิมพ์ กระทำต่อแม่พิมพ์ส่วนล่าง (Core Plate) และแม่พิมพ์ส่วนบน (Cavity Plate) จะมีลักษณะคล้ายคานที่ถูกยึดแน่นที่ปลายทั้งสองข้าง (Fixed Supports-Uniform Load) ค่าโก่งตัวสูงสุด

4.3.5 การคำนวณหาความร้อนในการทำให้อย่างคงรูป ในกระบวนการการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการฉีดนั้น เมื่อเราฉีดยางเข้าไปในแม่พิมพ์แล้ว ยางนั้นจะยังไม่สามารถคงรูปด้วยตัวมันเองได้ จึงจำเป็นต้องใส่ความร้อนค่าหนึ่งเข้าไปเพื่อที่จะนำไปให้อย่างคงรูป หรือทำให้ยางสุกนั่นเอง เช่นเดียวกับการฉีดพลาสติกที่จำเป็นต้องมีการหล่อเย็นเพื่อที่พลาสติกจะได้คงรูปได้เร็วขึ้น การคำนวณหาความร้อนที่จะนำไปใช้ในการคงรูปของยาง

5. หลักการทำงานของโปรแกรมของ CADMOULD

งานวิจัยนี้จะนำการวิเคราะห์การไหลของยางโดยใช้โปรแกรม CADMOULD เข้ามาแก้ปัญหาเพื่อหาสถานะการฉีดที่เหมาะสม โดยเป็นโปรแกรมช่วยในการวิเคราะห์ (Computer Aided Engineering, CAE) ที่อยู่บนพื้นฐานการวิเคราะห์เป็นแบบ 2 มิติครึ่ง กล่าวคือ จะนำแบบสามมิติ (Solid Model) ของชิ้นงานมาแบ่งเป็นชั้นๆ (Layer) แล้วนำหลายๆ ชั้น (Multilayer) มาซ้อนกันเพื่อคำนวณหาค่าอีกมิติ (Simcon, 2002)

ในส่วนของโปรแกรมสามารถจำลองการไหลของยางที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์ฉีดซึ่งเป็นวิธีที่ดีกว่าการสุ่มทำการทดลองจริงจากเครื่องฉีด บ่อยๆ ที่มีการเกิดจุดดักอากาศ และรอยเชื่อมประสาน ซึ่งอาจจะส่งผลต่อชิ้นงานโดยรวมได้ โปรแกรมนี้สามารถเปลี่ยนตำแหน่งการฉีด หรือแม้กระทั่งเปลี่ยนความหนาของชิ้นงานได้โดยส่งผลต่อการลดจำนวนจุดดักอากาศ และรอยเชื่อมประสาน หรือหลีกเลี่ยงการเกิดในตำแหน่งที่อาจเกิดวิกฤติต่อชิ้นงานโดยรวมได้ การทำการจำลองการไหลแทนการลองฉีดจริงนั้นจะส่งผลให้สามารถลดค่าใช้จ่ายต่างๆ ของกระบวนการผลิตได้ และทำให้ได้ชิ้นงานจริงที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น ในการจำลองการไหลนั้นต้องมีแบบสามมิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งนำมาจากการเขียน (Computer Aided Design, CAD) จากโปรแกรมต่างๆ จัดเก็บในรูปแบบของแบบ Stereolithography, STL โดยป้อนข้อมูลของวัสดุ (Material Data) ที่จะจำลองการไหลต่างๆ ดังนี้

- ข้อมูลเกี่ยวกับรีโอโลยี (Rheological Data)
- ข้อมูลเกี่ยวกับความร้อน (Thermal Data)
- ตัวแปรความดัน, ปริมาตร และอุณหภูมิ (PvT-Parameters)
- ข้อมูลเชิงกล (Mechanical Data)
- ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยา (Reactivity Data)

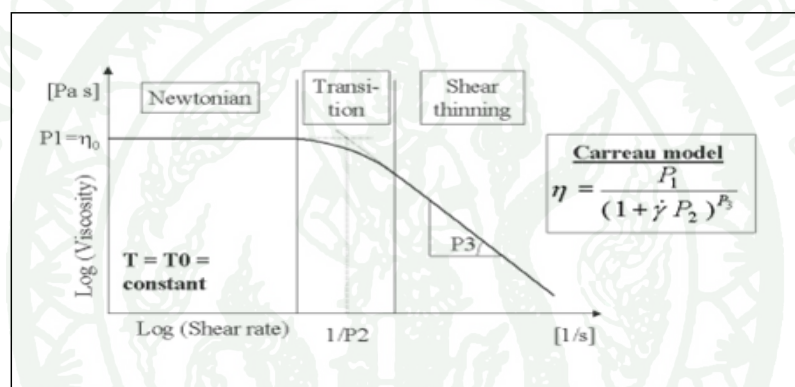
5.1 ข้อมูลเกี่ยวกับรีโอโลยี ข้อมูลเกี่ยวกับรีโอโลยีเป็นข้อมูลที่จำเป็นในการจำลองการไหลของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงการเติมเนื้อวัสดุ (Filling Phase) และในช่วงบีบอัด (Packing Phase) วัสดุที่มีความหนืดมากจะต้องการแรงดันในการฉีดมากกว่าวัสดุซึ่งมีความหนืด หรืออาจกล่าวได้ว่า วัสดุที่มีความหนืดน้อยสามารถไหล หรือฉีดได้ง่ายกว่า (Easy Flow) ในโปรแกรมนั้นค่าตัวแปรที่จำเป็นต้องป้อนให้โปรแกรม เพื่อใช้ในการจำลองการไหล ได้แก่

- ค่าความหนืด (Viscosity) มีหน่วยเป็น Pa s
- ค่าอัตราเฉือน (Shear rate) มีหน่วยเป็น 1/s
- อุณหภูมิ (Temperature) มีหน่วยเป็น (°C)

วัสดุชนิดเทอร์โมพลาสติก มีคุณลักษณะเฉพาะซึ่งเรียกว่า Shear Thinning กล่าวคือ ยิ่งค่าอัตราเฉือน สูง ค่าความหนืดก็ยิ่งต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำไปเขียนกราฟระหว่างค่าอัตราเฉือน และค่าความหนืดก็จะยิ่งเห็นได้ชัดยิ่งขึ้น ทั้งนี้ เพราะมักจะต้องใช้ Double Logarithm scale ขณะที่ น้ำ มีคุณลักษณะเป็นของเหลวนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) กล่าวคือ ค่าความหนืดไม่ขึ้นกับค่าอัตราเฉือน วัสดุพอลิพลาสติกก็จะประพฤติเป็นแบบนิวโตเนียน ที่อัตราเฉือนต่ำๆ และยังพบในช่วงการ

บีบอัดที่แกนของชิ้นงาน (Core Layer of a Part) ระหว่างการฉีดด้วยความเร็วสูง ซึ่งสามารถอธิบายลักษณะการประพฤติตัวแบบนี้ได้ด้วย Carreau Viscosity Model แสดงดังภาพที่ 39 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ 3 ค่า ได้แก่ P_1 , P_2 และ P_3 ซึ่งจะมีค่าเฉพาะ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ กำหนดให้เป็น T_0 เป็นอุณหภูมินั้น (Relating Temperature)

- P_1 จะอธิบายค่าความหนืดที่ค่าอัตราเฉือนต่ำๆ ซึ่งเรียกว่า Zero Viscosity
- P_2 จะเป็นจุดที่เปลี่ยนจากการประพฤติแบบนิวโตเนียน ซึ่งค่าความหนืดไม่ขึ้นกับค่าอัตราเฉือน ไปเป็นแบบ Shear Thinning ซึ่งค่าความหนืดจะมีค่าน้อยเมื่อค่าอัตราเฉือนสูง
- P_3 จะเป็นค่าเกรเดียน (Gradient) ของความโค้งในช่วง Shear Thinning



ภาพที่ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับการฉีด โดย Carreau Viscosity Model

ที่มา: Simcon kunststofftechnische Software GmbH. (2002)

สำหรับวัสดุพอลาสติกค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ สามารถเปลี่ยนแปลงได้เป็นช่วงกว้าง อย่างไรก็ตาม ค่า P_3 จะมีค่าสูงกว่าค่า P_1 ไม่ได้ และค่า P_3 ต้องมีค่าต่ำกว่า 0.9 ซึ่งอาจทำให้เข้าใจคลาดเคลื่อนได้ว่าที่อุณหภูมิต่ำวัสดุสามารถไหลได้ดีกว่า โดยผลของความร้อนที่มีต่อความหนืดสามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนอุณหภูมิของ Carreau Curve ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ที่ต้องพิจารณาเพิ่มขึ้นอีก 1 ค่า ได้แก่ ค่า T_s หรือค่าอุณหภูมิมาตรฐาน (Standard Temperature) ซึ่งเป็นค่าที่ต้องใส่ให้แก่ โปรแกรมในส่วนของฟังก์ชัน WLF Temperature สามารถนำไปคำนวณหาค่า aT หรือค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังสมการที่ (8) ซึ่งเป็นสมการ Carreau

$$\log_{10}(a_T) = \frac{8.86(T_0 - T_S)}{101.6 + (T_0 - T_S)} - \frac{8.86(T - T_S)}{101.6 + (T - T_S)} \quad (8)$$

อุณหภูมิจะมีผลต่อค่าความหนืดมากน้อยเพียงใดขึ้นกับค่าผลต่างระหว่าง T_0 และ T_S โดยค่าผลต่างของอุณหภูมิมิมีค่ามากก็ยังมีผลต่อค่าความหนืดน้อย ส่วนความดันเป็นอีกตัวแปรที่จำเป็นต้องคำนึงถึงเพื่อช่วยแก้ไขค่าอุณหภูมิมาตรฐาน T_S แต่เนื่องจากไม่ค่อยมีผลมากนักจึงมักจะไม่นำมาคิด ในการเปรียบเทียบวัสดุ 2 ชนิดสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบเส้นโค้งทั้งหมดที่อุณหภูมิเดียวกัน ไม่ใช่โดยการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ที่จุดใดจุดหนึ่ง ค่าความหนืดเป็นค่าที่ขึ้นกับเกรดของวัสดุ เช่น การเพิ่มสี (Colorant) ก็มีผลอย่างมากต่อค่าความหนืดดังนั้นเพื่อผลการจำลองการไหลที่มีความถูกต้องมากขึ้น ควรจะทำการทดสอบวัสดุที่จะทำการจำลองเพื่อให้ได้ค่าความหนืดของวัสดุที่แท้จริง

5.2 ข้อมูลเกี่ยวกับความร้อน (Thermal Data) เป็นข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการไหลในช่วงการเย็นตัว (Cooling) จนถึงช่วงการเค็มเนื้อวัสดุ และช่วงการบีบอัด จนถึงการโก่งงอหรือบิด (Warpage) ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานโดยแม่พิมพ์ โดยข้อมูลที่ต้องป้อนให้โปรแกรม แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ต้องระบุให้ และส่วนที่ไม่จำเป็นต้องระบุ ค่าที่ต้องระบุ ได้แก่

5.2.1 ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity, λ) จะเกี่ยวข้องกับการไหลคงตัว (Steady Flow) ของความร้อนในช่วงที่วัสดุอยู่ในช่วง

5.2.2 ค่าการกระจายความร้อน (Thermal Diffusivity, a) ได้มาจากค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Heat Capacity, c_p) ของวัสดุและค่าความหนาแน่น (Density, ρ) ดังสมการที่ (9)

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (9)$$

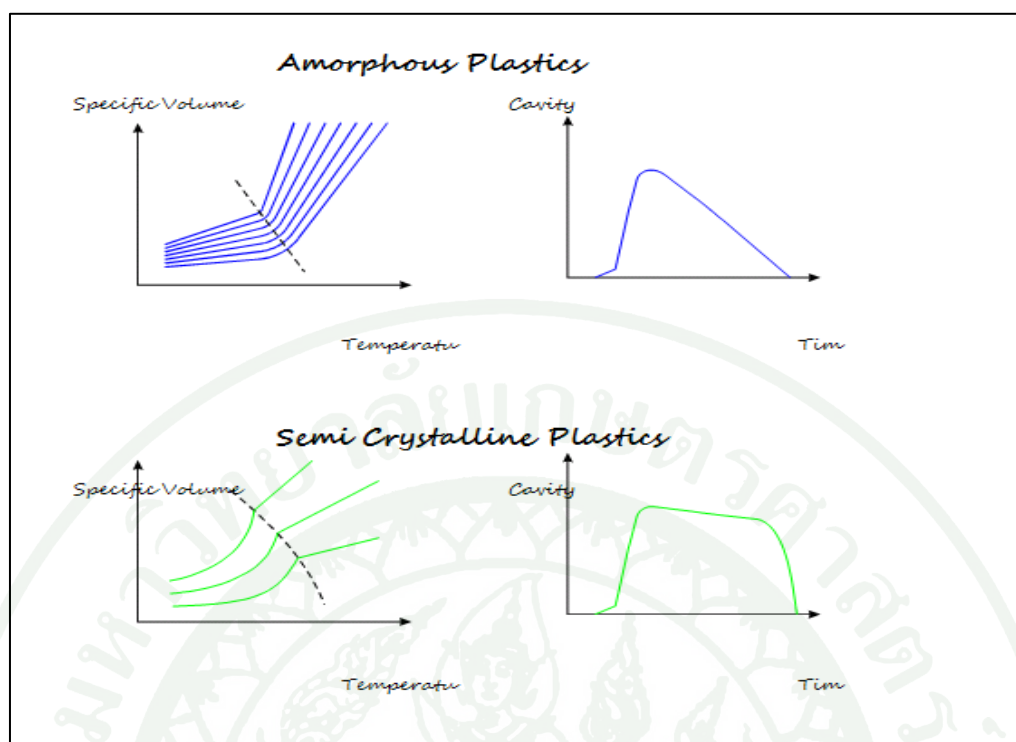
ยิ่งวัสดุมีการนำความร้อนและค่าการกระจายความร้อนยิ่งมีค่าสูง การเย็นตัวของวัสดุก็ยิ่งเร็ว ซึ่งหมายความว่าวัสดุที่หลอมจะไหลที่อุณหภูมิต่ำ ในโปรแกรมนี้จะกำหนดค่าการนำความร้อนและการกระจายความร้อนไม่ขึ้นกับค่าความดัน แต่ให้ขึ้นกับค่าอุณหภูมิ ในการจำลองการไหลค่าการกระจายความร้อนจะเกี่ยวข้องกับการลดลงของความดันในการอธิบายความร้อนที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเฉือน ซึ่งมีผลต่อการหลอมเหลวและการเย็นตัวของวัสดุในแม่พิมพ์

5.2.3 อุณหภูมิเมื่อไม่มีการไหล (No flow Temperature) เป็นจุดที่วัสดุที่หลอมหยุดไหล ซึ่งจำเป็นในการจำลองการไหลเพื่อระบุความหนาของชั้นที่แข็งตัว (Frozen Layer) ที่ผนังชิ้นงาน ยิ่งค่า No Flow Temperature มีค่าสูงก็ยิ่งมีโอกาสเกิดชั้นที่แข็งตัวสูงขึ้น เพราะช่องทางไหลแคบลงซึ่งส่งผลให้ความดันยิ่งลดลง สำหรับยางแล้วค่านี้ไม่มี จึงไม่จำเป็นต้องระบุ

ค่าที่ไม่จำเป็นต้องระบุ ได้แก่ ค่า Recommended Processing Data ซึ่งจะเป็นค่าที่ปรากฏที่เมนู Process Parameter ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้โปรแกรมที่ไม่มีประสบการณ์ในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานให้สามารถกำหนดค่าต่างๆ ของกระบวนการได้เหมาะสมยิ่งขึ้น

5.3 ตัวแปรความดัน, ปริมาตร และอุณหภูมิ (PvT-Parameters) สมบัติวัสดุในส่วนของความดัน, ปริมาตร และอุณหภูมิ (PvT Material Properties, PvT) จำเป็นต้องใช้ในการจำลองการไหลในช่วงการบีบอัด และในช่วงการหดตัว (Shrinkage) ในช่วงการเติมเนื้อวัสดุ ก็สามารถปรับปรุงผลการจำลองการไหลให้ดีขึ้นได้โดยการพิจารณาค่า PvT ของวัสดุ

ค่า PvT แสดงให้เห็นว่า ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume, v) ขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน โดยค่าปริมาตรจำเพาะนั้นเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าความหนาแน่น วัสดุพลาสติกส่วนมาก ปริมาตรจะลดลงเมื่อวัสดุเย็นตัวลงและมีปริมาตรเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และสามารถกดอัดได้ (Compressible) การฉีดขึ้นรูปผ่านแม่พิมพ์ หรือกระบวนการที่คล้ายกันจะชดเชยการหดตัวของวัสดุ โดยการเพิ่มวัสดุให้แก่แม่พิมพ์เท่าที่จำเป็น วัสดุชนิดเทอร์โมพลาสติกจะมี 2 สถานะในขณะการฉีดขึ้นรูป คือ ช่วงหลอมเหลว และช่วงแข็งตัว (Melt and Solid State) ซึ่งทั้ง 2 สถานะค่าปริมาตรจำเพาะจะมีคุณลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้อนข้อมูลให้แก่โปรแกรมแยกเป็น 2 สถานะ กราฟระหว่างค่าปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิที่ความดันต่างๆ หรือแผนภาพ PvT (PvT-Diagram) ของวัสดุที่มีโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) และแบบกึ่งโครงสร้าง (Semi-Crystalline) แสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรจำเพาะและอุณหภูมิที่ความดันค่าต่างๆ
PvT diagram

ที่มา: Kistler Instrument (Thailand) Co., Ltd. (2010)

แผนภาพ PvT ใช้อธิบายการหดตัวของวัสดุทั้งโครงสร้างผลึกและวัสดุอสัณฐาน ซึ่งการแข็งตัวมักจะเกิดใกล้ๆ กับเส้นการเปลี่ยนแปลงสถานะ (Transition Line) ซึ่งเป็นจุดที่ปริมาตรมีค่าคงที่ เมื่อทำการเปรียบเทียบใกล้เส้นการเปลี่ยนแปลงสถานะที่ฝั่งของแข็งและฝั่งที่หลอมของวัสดุทั้งสองจะเห็นว่าปริมาตรทั้ง 2 จุดนี้แตกต่างกันมาก ซึ่งเป็นสาเหตุของการหดตัว (Volume Shrinkage) ค่า PvT ซึ่งใช้ในการจำลองการไหลในช่วงการเติมเนื้อวัสดุและช่วงการบีบอัดเพื่อเป็นการระบุปริมาตรการหดตัวของวัสดุและผลกระทบของแรงดันอัด นอกจากนี้ค่า PvT ยังใช้คำนวณหาการหดตัวเชิงเส้นของวัสดุ ซึ่งมีสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic) กล่าวคือ สมบัติของผลึกไม่ขึ้นกับทิศทางในโครงสร้างผลึก ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการจำลองการไหลช่วงการหดตัวและการบิด/โก่งตัว

5.4 ข้อมูลเชิงกล ใช้ในการวิเคราะห์การหดตัวและการบิด/โก่งตัว ในช่วงที่มีสมบัติเชิงกลเป็นเชิงเส้น (Linear Elastic) โดยกฎของฮุก (Hooke's Law) ดังสมการที่ (10)

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (10)$$

กำหนดให้ σ คือ ความเค้น (Stress)

E คือ ค่ายังโมดูลัส (Young's Modulus)

ϵ คือ ความเครียด (Strain)

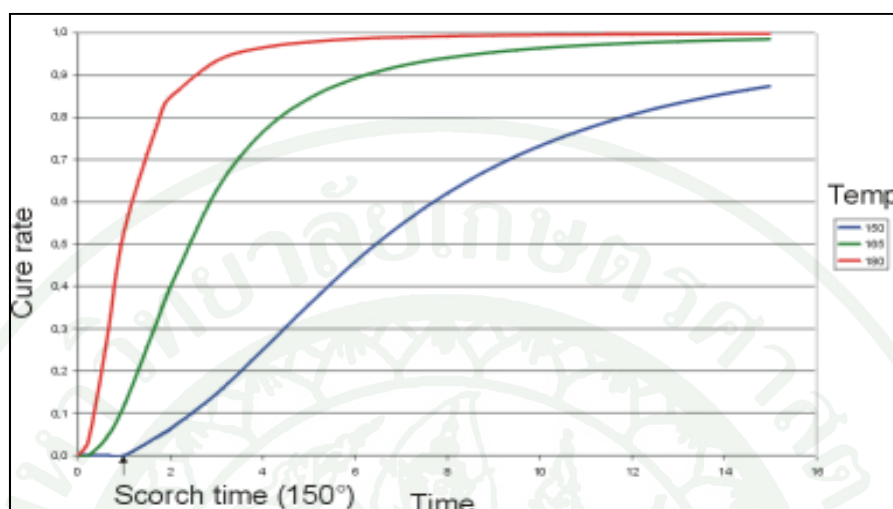
การหดตัวของวัสดุเมื่อเย็นตัวจะก่อให้เกิดความเค้น ซึ่งความเค้นที่เกิดขึ้นในชิ้นงานจะก่อให้เกิดการผิดรูป (Deform) ความเค้นและความเครียดของชิ้นงานจะเกิดเมื่อค่าโมดูลัสการดึง (Tensile Modulus) มีค่าไม่เป็นศูนย์ โดยค่าโมดูลัสการดึงจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ดังแสดงในสมการที่ (11)

$$E(T) = E_0 + E_1 \cdot T + E_2 \cdot T^2 + E_3 \cdot T^3 \quad (11)$$

ค่าโมดูลัสการดึงอธิบายลักษณะของชิ้นงานซึ่งจะเกิดขึ้น เมื่อมีแรงกระทำโดยลักษณะของการผิดรูปจะเป็นไปในทิศทางเดียวกับทิศของแรงกระทำ ซึ่งขึ้นกับค่าอัตราส่วนปัวซอง (Poisson's Ratio) ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิด้วย สำหรับวัสดุ Isotropic โดยทั่วไปแล้วค่าสัมประสิทธิ์ตัวแรกจะมีค่าระหว่าง 0.30 ถึง 0.45 (มักจะใช้ค่าประมาณ 0.35) และค่าสัมประสิทธิ์อื่นๆ ให้เป็นศูนย์ สำหรับวัสดุ Anisotropic ซึ่งมีวัสดุซึ่งมีสมบัติต่างกันในแต่ละทิศทางของโครงสร้างผลึกจำเป็นต้องกำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแรกสำหรับทิศทางที่เส้นใย (Fibers) วางตัวและสัมประสิทธิ์ตัวที่สองจะเป็นค่าโมดูลัสการดึง ซึ่งอธิบายความแข็งแรงในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของเส้นใย โดยวัสดุ Anisotropic จะมีค่าการหดตัวที่ไม่สม่ำเสมอ ค่าการยืดตัวเนื่องจากความร้อนเชิงเส้นในทิศทางที่เส้นใยวางตัวจะต้องกำหนดให้กับโปรแกรมซึ่งจะนำไปใช้คำนวณต่อไป

5.5 ข้อมูลการเกิดปฏิกิริยา ข้อมูลชนิดนี้จะใช้เฉพาะกับวัสดุชนิดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ระหว่างการรอให้วัสดุคงรูป (Curing) ได้แก่ ยาง (Rubber), ยางซิลิโคน (Liquid Silicon Rubber, LSR), เทอร์โมเซต และวัสดุ Reaction Injection Moulding (RIM) เช่น โพลียูรีเทน (Polyurethanes)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วง Scorch ซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มเกิดปฏิกิริยา และช่วงที่เกิดปฏิกิริยา (Reaction Phase) ซึ่งแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคงรูป และเวลาที่ใช้ที่ทำให้ยางสุกตัว

ที่มา: Simcon kunststofftechnische Software GmbH. (2002)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในช่วง Scorch สามารถอธิบายด้วย Arrhenius Type Function แสดงดังสมการที่ (12) ซึ่งใช้ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง 2 ตัว ในกรณีที่เกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วจะต้องให้ทั้งสองค่านี้เป็นศูนย์

$$t_{scorch} = t_0 \cdot \exp(T / T_0) \quad (12)$$

เมื่อปฏิกิริยาในช่วง Scorch สิ้นสุดลง การคงรูปจะเริ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยหลายแบบ (Model) ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะพิจารณา

5.5.1 Deng/Isayev Model เป็นวิธีที่ดีที่สุดในการอธิบายพฤติกรรม Curing ของยาง และ LSR โดยปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นและจบลงอย่างช้าๆ แสดงดังสมการที่ (13) และ (14)

$$U = \frac{K(T) \cdot t^n}{1 + K(T) \cdot t^n} \quad (13)$$

$$K(T) = K_0 \cdot \exp(-Ea / RT) \quad (14)$$

5.5.2 DIN 53529 Model วิธีนี้เริ่มต้นที่ความเร็วไม่เท่ากับศูนย์และหยุดลงอย่างช้าๆ จนเป็น ศูนย์ โดยใช้ค่าต่างๆ และตัวเลขสัมประสิทธิ์ในการคำนวณเช่นเดียวกับวิธีของ Deng/Isayev แต่ ความหมายของแต่ละค่าจะต่างกันและไม่สามารถใช้แทนกันได้ แสดงดังสมการที่ (15) และ (16) ตามลำดับ

$$\frac{dU}{dt} = K(T) \cdot (1-U)^n \quad (15)$$

$$K(T) = K_0 \cdot \exp(-Ea / RT) \quad (16)$$

5.5.3 Kamal Model จะใช้กับวัสดุพวกรubber โดยจะมีสัมประสิทธิ์ที่อธิบายการคง รูปได้ดีกว่า โดย DIN 53529 Model ก็เป็นซัพเซตของวิธีนี้ แสดงดังสมการที่ (17) (18) และ (19)

$$\frac{dU}{dt} = (K_1(T) + K_2(T) \cdot U^m) \cdot (1-U)^n \quad (17)$$

$$K_1(T) = K_{10} \cdot \exp(-Ea_1 / RT) \quad (18)$$

$$K_2(T) = K_{20} \cdot \exp(-Ea_2 / RT) \quad (19)$$

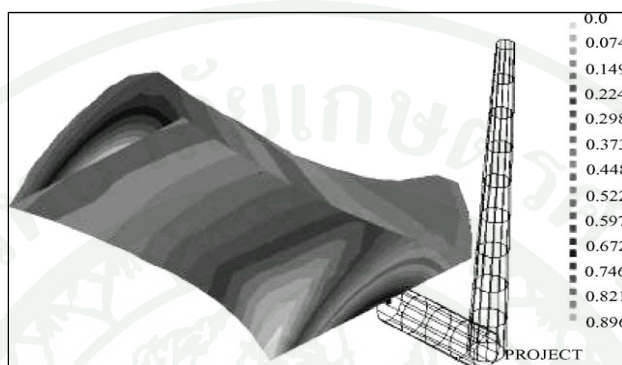
กระบวนการเกิดปฏิกิริยานี้ เป็นกระบวนการที่ก่อให้เกิดความร้อน (Exothermal Reaction) แต่ ในกรณีของยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) จะมีความร้อนเกิดขึ้นน้อยมากจนไม่สามารถวัดได้ จึงไม่ต้องนำมาคิดในการจำลองการไหล หากเป็นวัสดุเทอร์โมเซตและวัสดุที่ฉีดขึ้นรูปแบบทำปฏิกิริยา (RIM) จะต้องนำมาคิดในการจำลองการไหล

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hanspal and Ghoreishy (2004) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกนำมาใช้กับแบบจำลองการไหลพื้นผิวอิสระแสดงให้เห็นการฉีดด้วยแม่พิมพ์ฉีดของวัสดุที่เป็นยาง เช่น ยางคอมปาวด์ สิ่งที่มีความแตกต่างกันอย่างมากของก็คือ พฤติกรรมของยาง ที่มีผลต่อความยืดหยุ่นของวัสดุในการยึดและความคงทนต่อการเสียดรูปจากการตัดเฉือนด้วย ของไหลเนื่องจากการไหล ในการศึกษาวิจัยในปัจจุบัน คุณสมบัตินี้ได้รับการแก้ปัญหา ตลอดจนถึงการใช้แบบจำลอง Criminale-Erickson-Fibley (CEF) มีการรายงานบนพื้นฐานของเทคนิคของปริมาตรของของไหลที่มีการพัฒนาสำหรับการติดตามพื้นผิวอิสระ ผลลัพธ์ที่แสดงอยู่ในเอกสารนี้ได้มีการเทียบกับแบบจำลอง Phan-Thien/Tanner และปรากฏอยู่ในข้อตกลงใกล้ความคาดหวังเชิงทฤษฎีสมการ ผลลัพธ์ที่ได้มีการพิสูจน์ความสามารถการนำไปปรับใช้เพื่อพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้กับอุตสาหกรรม

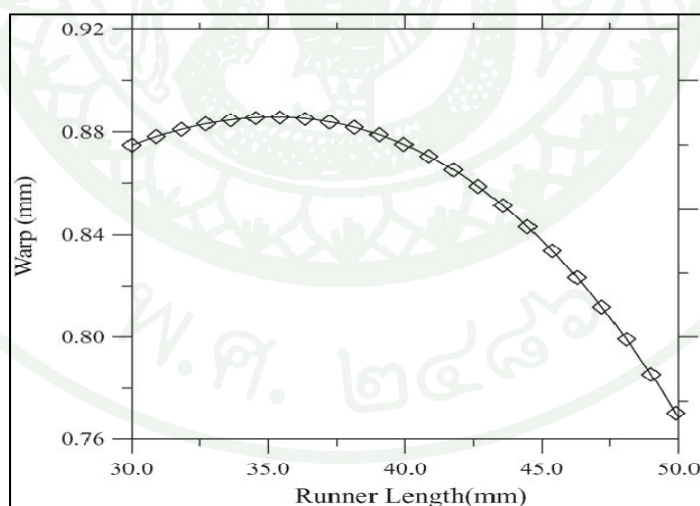
Yen (2006) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้วิธีเครือข่ายประสาท เพื่อการออกแบบขนาดทางวิ่งเพื่อลดการเกิดการบิดงอ ในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ได้กล่าวว่าในอุตสาหกรรมพลาสติกสำหรับการฉีดพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ที่ซับซ้อน ตัวอย่างเช่น การขึ้นรูปพลาสติกของกล่อง คอมพิวเตอร์ และส่วนอื่นที่ทำการขึ้นรูปจากฉีดพลาสติก การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะพัฒนาระบวนการฉีดให้สินค้ามีคุณภาพก่อนเข้าสู่การผลิต สิ่งที่สำคัญในการพิจารณา คือ การลดต้นทุนและเวลา โดยใช้โปรแกรมและแบบจำลองเครือข่ายประสาทสำหรับการคาดการณ์ของการออกแบบ ระบบการหดตัว และการบิดงอของชิ้นงาน ปัจจัยที่กระทบต่อการฉีดยังมีมากมาย เช่น ความเร็วในการเติมเนื้อยาง ความดันในการฉีด และอุณหภูมิของการหลอมละลายในช่วงควบคุมความดัน การหล่อเย็น และการเลือกสภาวะในการฉีด ซึ่งเหล่านี้มีผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน ซึ่งขึ้นอยู่กับทางเลือกแบบทางวิ่ง และขนาดรูทางเข้า เพื่อให้ได้สินค้าคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด หน้าที่หลักในระบบทางวิ่งและขนาดของรูทางเข้านี้เป็นการทำให้พลาสติกที่ละลายไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ ในกระบวนการของความเร็วจึงและอัตราการไหลของสารสำคัญมาก ถ้าเติมเนื้อช้าจะทำให้สูญเสียความร้อนมากเป็นผลให้เย็นช้าลง อัตราความเร็วในการเติมเนื้อสารยังมีส่วนทำให้ระบบการไหลไม่ต่อเนื่องได้ เนื่องจากเกิดสารที่ฉีดเข้าไปติดกับตัวโมล โดยปรกติแล้วบริเวณพื้นที่หน้าตัดของทางระบบทางวิ่งและขนาดของรูทางเข้า นั้นมีการแบ่งให้ได้สินค้าที่มีคุณภาพอยู่แล้ว

ในการศึกษานี้แนวคิดที่สมบูรณ์และละเอียดเป็นครั้งแรก แนวคิดที่สำคัญขึ้นอยู่กับความหมายของการทฤษฎีหล่อขึ้น ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนของรูปทรง 3 มิติ ทฤษฎีการไหลในสองมิติของ Hele-Shaw ใช้เพื่อจำลองการไหลที่อาจเกิดขึ้นเพื่อหาประสิทธิภาพการไหล วิธีที่ใช้กันมากที่สุดในการแก้ปัญหาทางการไหล เช่น การใช้ C-Flow และ Mould Flow Software ดังแสดงภาพที่ 42-44



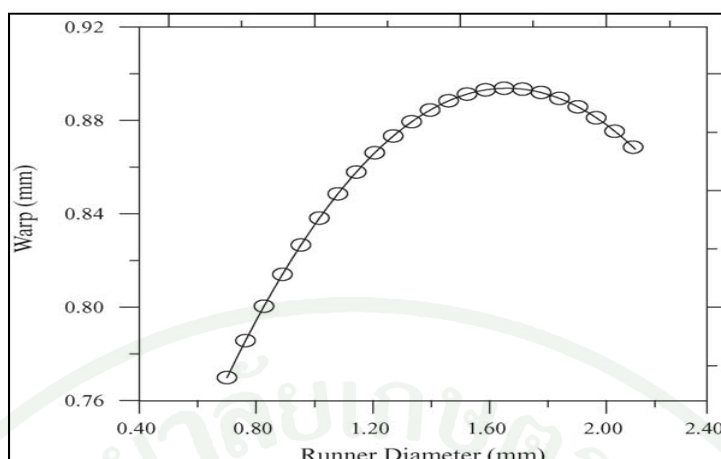
ภาพที่ 42 แสดงผลการเกิดการบิดงอ (Warpage) จากการจำลองด้วยโปรแกรม

ที่มา: Yen (2006)



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของทางวิ่งกับการเกิดการบิดงอ

ที่มา: Yen (2006)



ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางวิ่งกับการเกิดการบิดงอ

ที่มา: Yen (2006)

Ozcelik and Sonat (2009) ได้ทำการศึกษาฝักรอบโทรศัพท์แบบเซลล์เปลือกบาง (Thin Shell Shone Cover) ที่ผลิตด้วยโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และ ABS เพื่อที่ตัดสินใจว่าจะเลือกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) แบบใด ประการแรกผลกระทบของพารามิเตอร์ของการฉีดต่อการโก่งงอที่ความหนาที่มีค่าแตกต่างกันที่ตรวจสอบโดยวิธีของทาทุชิ ค่าความโก่งงอจะถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Mold Flow (MPI) 4.0 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อการโก่งงอของวัสดุ PC/ABS คือ ความดันในการอัด ประการที่สอง กำหนดแรงที่เป็นสาเหตุที่ทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกเกิดการเสียหายตามจุดที่กำหนดบนผิวของฝักรอบโทรศัพท์แบบเซลล์เปลือกบาง โดยใช้โปรแกรม ABS, PC/ABS ถูกใช้ในการผลิตโทรศัพท์จะเป็นบอกระดับที่กำหนดความมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาว่าการวิเคราะห์โครงสร้างจะเห็นได้ว่า วัสดุที่แข็งแรงที่สุดเสริม 15 เปอร์เซ็นต์ ของใยคาร์บอน เสริมเข้าไปใน PC/ABS, 15 เปอร์เซ็นต์ ของใยคาร์บอน เสริมเข้าไปใน ABS, PC, PC/ABS และ ABS ตามลำดับ และสามารถวิเคราะห์จุดที่มีความวิกฤตมากที่สุดบนผิวของฝักรอบโทรศัพท์แบบเซลล์เปลือกบางได้

Tang (2006) ได้นำเสนอการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับผลิตชิ้นตัวอย่างการทดสอบการบิดงอ (Warpage) ของชิ้นงาน และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความร้อนสำหรับแม่พิมพ์ เข้ากับผลของความเครียดที่หลงเหลืออยู่ของความร้อนในแม่พิมพ์ โดยใช้เทคนิค ทฤษฎี วิธีการ ตลอดจนพิจารณาความจำเป็นในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก การแสดงการออกแบบแม่พิมพ์ได้ถูกนำมาเข้ามาใช้ในโปรแกรมซอฟต์แวร์ Unigraphics Version 13.0 เพื่อการพาณิชย์ ในรูปแบบการจำลองการวิเคราะห์ความเครียดที่หลงเหลืออยู่ที่ชิ้นงาน เนื่องจากความร้อนและเย็นที่ไม่เท่ากันของชิ้นงาน

ตัวอย่าง ซึ่งได้รับการพัฒนาและแก้ไขโดยใช้ซอฟต์แวร์มาวิเคราะห์หาค่าประกอบเชิงพาณิชย์ ซึ่งเรียกว่า การวิเคราะห์แบบ LUSAS Version 13.5 โดยซอฟต์แวร์จะแสดงเส้นรูปร่างของการกระจายอุณหภูมิ ในแบบจำลองได้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทุกรอบของการฉีดพลาสติก โดยบันทึกผลของกราฟเทียบกับเวลาในการอบชิ้นงาน (Curve) ผลปรากฏว่า การหดตัวมีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นในพื้นที่ใกล้เคียงกับช่วงระบายความร้อนของระบบหล่อเย็นเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นๆ ของแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นผลกระทบมาจากตำแหน่งของการวางท่อหล่อเย็นชิ้นงาน ซึ่งจากผลการทดลองใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการเกิด Warpage ที่ชิ้นงานได้

Chen *et. al.* (2005) ได้ทำประยุกต์คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ร่วมกับเทคนิคทางสถิติ (Statistical Technique) เพื่อลดรูปแบบการโค้งงอของชิ้นงานที่ขึ้นกับพารามิเตอร์ (Parameter) ของกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกของเปลือกบาง (Thin Shell) โดยใช้โปรแกรม Mold Flow การร่วมกันของพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ 3 ระดับ L 18 ออกทอกอนอล อะเรย์ โดยทำการออกแบบการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ในการวิจัยนี้จะเห็นได้ว่ารูปแบบที่ถดถอย (Regression Model) นั้นเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ที่ถูกควบคุมซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ ส่วนรูปแบบที่ยังไม่ได้กำหนดสามารถใช้คาดการณ์การโค้งงอของชิ้นงานที่เงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปในแบบต่างๆ อุณหภูมิในการหลอมเหลวและความดันการอัดเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญมากที่สุดทั้งในส่วนของการจำลองการฉีด และการฉีดจริงสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกของเปลือกบาง

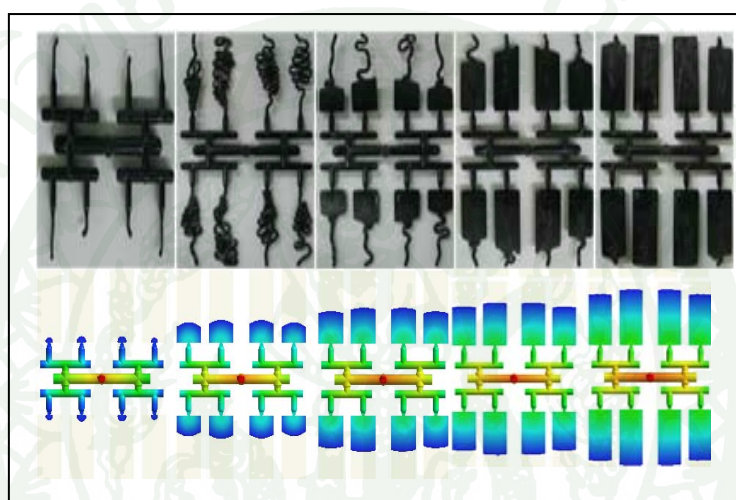
Hoang (2007) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering) ร่วมกับวิธีของทาคุชิ (Taguchi Method) ในการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกของจอยสติ๊ก (Joy Stick) ในการศึกษาจะใช้โปรแกรม Mold Flow จำลองกระบวนการขึ้นรูปในเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น เวลาในการฉีด ความเร็วในการฉีด อุณหภูมิในการหลอมเหลว ความดันในการอัด และเวลาการทำงานทั้งวงจร เนื่องจากบริเวณของชิ้นงานที่ปริมาตรมีการหดตัวสูงจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาชิ้นงานโค้งงอ (Warpage) การวิจัยนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบวัสดุพลาสติก 2 ชนิด คือ โพลีสไตรีน (Polystyrene, PS) กับอะครีโลไนไตรส์ บิวทาไดน สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styene, ABS) จากการวิจัยพบว่าผลลัพธ์ที่ขึ้นอยู่กับ การกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดจะมิต่อการผลิต ปัจจัยบางส่วนจะถูกพิจารณาร่วมกัน เช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature) อุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melt Temperature) ความดันในการอัด (Packing Pressure) เวลาในการอัด (Packing Time) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time) เวลาในการฉีด (Injection Time) ความดันในการฉีด (Injection Pressure) และเวลาของการเปิด

แม่พิมพ์ (Open Time) เนื่องจากผลกระทบหลักของการโค้งงอของชิ้นงานเป็นผลมาจากอุณหภูมิในการหลอมเหลวและความดันในการดันอัด อันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอุณหภูมิของแม่พิมพ์และอุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการหลอมเหลวและความดันในการอัด และอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบของเวลาการทำงานทั้งวงจร ผลการตรวจสอบพฤติกรรมระหว่างกลุ่มปัจจัยดังกล่าวที่มีผลกระทบต่อการโค้งงอของชิ้นงาน PS ที่ออกแบบโดย Orthogonal Array ของ L27 (312) จะถูกเลือกในการผลิตจอยสติค ส่วน ABS ที่ออกแบบโดย Orthogonal Array ของ L18 (38) ปัจจัยมีผลกระทบมากต่อการโค้งงอของชิ้นงาน

Kwon (1988) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบระบบทำความเย็นแม่พิมพ์ โดยใช้วิธี Boundary Element Method (BEM) ได้กล่าวว่าในการออกแบบระบบหล่อเย็นในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากมันมีผลกระทบมากต่อผลผลิตและคุณภาพของส่วนท้ายสุดของกระบวนการผลิตชิ้นงาน จึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่ช่วยสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ (CAD) เพื่อกำหนดตำแหน่งของช่องระบายความร้อนและเงื่อนไขของการดำเนินการเพื่อให้ได้เวลาที่ใช้หล่อเย็นน้อยที่สุด ซึ่งเป็นเป้าหมายในการทำวิจัย วิธี Boundary Element Method (BEM) ได้ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์เพื่อการระบายความร้อนโดยระบบ System Design Programs (a) โปรแกรมการออกแบบเชิงโต้ตอบโดยใช้ BEM แบบสองมิติและ (ข) โปรแกรมวิเคราะห์ระบบหล่อเย็นโดยใช้ BEM แบบสามมิติ ในการออกแบบ ในงานปัจจุบันกระบวนการหล่อเย็นในแม่พิมพ์ฉีดเป็นระบบง่ายๆ โดยใช้หลักการถ่ายเทความร้อนแบบ Steady State ในการหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิในแต่ละรอบในการทำงาน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ ความร้อนได้อินถ่ายระหว่างแม่พิมพ์กับวัสดุ Polymeric ในข้อมูลปัจจุบันได้มีการสร้างแบบจำลองพื้นฐานของการทำความเย็นและการออกแบบระบบหล่อเย็นในแม่พิมพ์โดยวิธี BEM

Min and Lyu (2008) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเค้นเนื้อที่ไม่สมดุลและขนาดที่หลากหลายของชิ้นงานในแม่พิมพ์ฉีดแบบหลายเบ้า ที่เป็นแม่พิมพ์สำหรับขนาดชิ้นงานที่เล็ก เช่น เลนส์ และชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งส่วนมากจะเป็นแม่พิมพ์แบบหลายเบ้า ปัญหาที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์แบบหลายเบ้า คือ การไหลของพลาสติกเข้าเบ้าแม่พิมพ์ไม่สมดุลกันทุกหลุม ผลกระทบที่เกิดขึ้นของการไหลที่ไม่สมดุลมีผลต่อขนาดและสมบัติทางกายภาพของแม่พิมพ์ ประการแรก ถ้าต้นกำเนิดของการไหลไม่สมดุล จะทำให้เสียดุลทางเรขาคณิตของระบบทางวิ่งอย่างไรก็ตามเรขาคณิตของระบบทางวิ่งที่สมดุลดี ก็อาจเกิดการเสียสมดุลที่เบ้าแม่พิมพ์ได้ ซึ่งเกิดมาจากการกระจายตัวของอุณหภูมิในพื้นที่หน้าตัดของทางวิ่ง การกระจายตัวของอุณหภูมิขึ้นอยู่กับความเร็วในการฉีดขณะนั้น เนื่องจากความร้อนที่ใกล้ผนังทางวิ่งมีค่ามากกว่าความเร็วในการฉีดสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขในการฉีด

ความเร็วในการฉีดเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการที่สุดที่ทำให้เกิดความไม่สมดุลในแม่พิมพ์ฉีดแบบหลายเบ้า ในการศึกษาจะศึกษาการทดลองการไหลที่ไม่สมดุลที่สภาวะต่างๆ ในการฉีด ได้แก่ ความเร็ว และ วัสดุ ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังนำผลการเดิมเนื้อในเบ้าแม่พิมพ์ที่ไม่สมดุลมาเทียบกับผลจากการจำลองการไหล (CAE) มีการตรวจสอบขนาดและน้ำหนักของชิ้นงานที่ได้จากแม่พิมพ์แบบหลายเบ้า พบว่า สภาวะที่ไม่สมดุลในทางวิ่งเกิดจากความเร็วในการฉีดที่แตกต่างกัน เกิดจากความดันที่กระจายตัวในแต่ละเบ้าแม่พิมพ์ ซึ่งมีผลต่อขนาดและสภาวะทางกายภาพของชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ดังแสดงภาพที่ 45

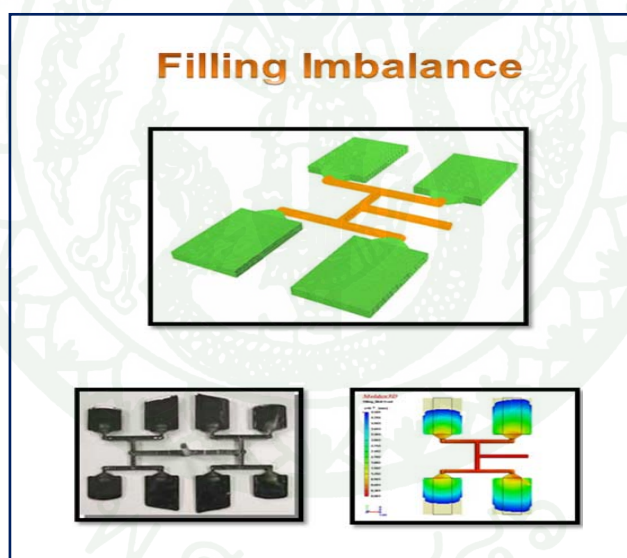


ภาพที่ 45 การเปรียบเทียบการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรมช่วงวิเคราะห์ เพื่อดูลักษณะการไม่สมดุลของการเติมเนื้อพลาสติก

ที่มา: Min and Lyu (2008)

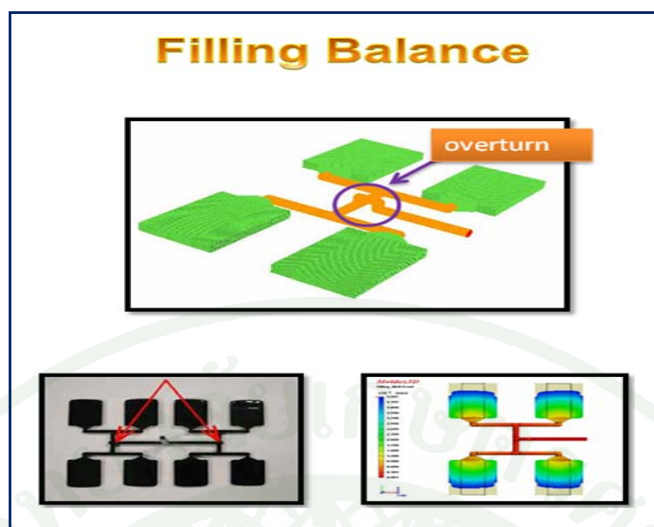
Rutkauskas and Bargelis (2007) ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับองค์ความรู้ที่ใช้ในวิธีการออกแบบรูทางเข้า และทางวิ่งเย็นสำหรับแม่พิมพ์พลาสติกเพื่อใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก รายงานวิจัยนี้เหมือนกับการประยุกต์กับการใช้ระบบอัจฉริยะสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด การพัฒนาองค์ความรู้ของระบบของการทำแม่พิมพ์ ตามโมดูลสำหรับแม่พิมพ์ฉีดและรายละเอียดที่เพิ่มเติม สำหรับจุดมุ่งหมายวิธีการ ทฤษฎีที่รู้จักของรูทางเข้า และกำหนดทางวิ่งเย็น ทั้งข้อเท็จจริงและกฎ Systematized ผู้ใช้ต้องมีความเชี่ยวชาญ การคำนวณความถูกต้องของรูทางเข้า และทางวิ่ง ถูกทดสอบด้วยการพัฒนาองค์ความรู้ที่ใช้ในวิธีการออกแบบด้วยวิธี Comparing กับข้อมูลจริง

Chien *et al.* (2009) ได้ร่วมกันทำงานวิจัยเรื่อง การใช้โปรแกรมวิเคราะห์ความไม่สมดุลของการเติมเนื้อพลาสติก ในรูปทรงทางวิ่งที่สมดุลด้วยภาพเสมือนจริง 3 มิติ ได้กล่าวไว้ว่าการเติมเนื้อในทางวิ่ง ที่ไม่สมดุลในรูปทรงเรขาคณิต ที่สมดุลของรูวิ่ง แบบแม่พิมพ์หลายเบ้า (Cavity) ซึ่งเป็นเรื่องที่ยากสำหรับแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก นักวิจัยก่อนหน้านี้ได้เปิดเผยว่า ปัญหาการไหลที่ไม่สมดุลเกี่ยวข้องกับความร้อนที่สะสมใน 3 มิติ (x, y, z) และการกระจายตัวของแรงเนื่องจากการไหลของเนื้อวัสดุในการวิ่ง และได้เสนอนวัตกรรมทางวิ่งแบบย้อนกลับ (Over Turn) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหานี้ ในเอกสารฉบับนี้ได้เสนอวิธีการใหม่ในการวิเคราะห์กระบวนการฉีดนี้ ประการแรก ใช้วิธีการสร้าง Meshing แบบยึดหยุ่นชนิด Topologies ซึ่งเป็น Mesh ชนิดนี้มีความละเอียดสูง สำหรับทางวิ่งและเบ้า เมื่อแสดงและยืนยันความคิด จึงได้ทำการพิสูจน์โดยการเปรียบเทียบระหว่าง ผลการจำลองโดยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์กับการทดลองจริง ซึ่งพิสูจน์ให้เห็นและสร้างความเข้าใจมากขึ้น ว่าการใช้เครื่องมือมากขึ้นช่วยในการวิเคราะห์ (CAE) มีประโยชน์และมีประสิทธิภาพเชื่อถือได้ ดังแสดงภาพที่ 46-47



ภาพที่ 46 การเปรียบเทียบการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ เพื่อดุลลักษณะการไม่สมดุลของการเติมเนื้อพลาสติก

ที่มา: Chien *et al.* (2009)



ภาพที่ 47 การเปรียบเทียบการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานจริงกับการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ เพื่อดูลักษณะการสมดุลของการเติมเนื้อพลาสติก จากการแก้ไขด้วยวิธียกทางวิ่งเข้าด้านบนก่อนถึงที่จะถึงแยกของทางวิ่ง (Overturn)

ที่มา: Chien *et al.* (2009)

Griffiths *et al.* (2008) ได้ทำการวิจัยเรื่องแม่พิมพ์ฉีดสำหรับชิ้นงานขนาดเล็ก ระดับจุลภาพ (Micro) โดยศึกษาและทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการเติมเนื้อในชิ้นงานขนาด Micro และการออกแบบทางวิ่ง ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าในการเพิ่มผลผลิตโดยการลดจำนวนแม่พิมพ์เพื่อลดต้นทุน ส่วนมากมักจะออกแบบแม่พิมพ์ให้มีหลายเบ้า (Cavity) ซึ่งจำเป็นจะต้องเลือกและออกแบบทางวิ่ง ให้มีการไหลของเนื้อวัสดุได้สะดวก จากกระบอกสูบไหลเข้าหัวฉีด และฉีดเข้า ทางวิ่งไหลเข้าสู่เบ้าแม่พิมพ์ ในบทความนี้ได้ทำการศึกษาและทดลองพฤติกรรมการไหลของเนื้อวัสดุ Micro Cavity ซึ่งจะเน้นเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างการเติมเนื้อในชิ้นงาน Micro และขนาดของระบบทางวิ่ง โดยกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ขนาดของทางวิ่ง อุณหภูมิที่แม่พิมพ์ ความเร็วในการฉีด และความดันในการเปิดแม่พิมพ์ ผลของการวิเคราะห์การทดลองที่ได้นำไปเพิ่มเติม เพื่อระบุผลของคุณสมบัติของการไหลตัวของพลาสติก PP และ ABS ในพฤติกรรมของกระบวนการฉีดแม่พิมพ์ฉีดขนาดไมครอน

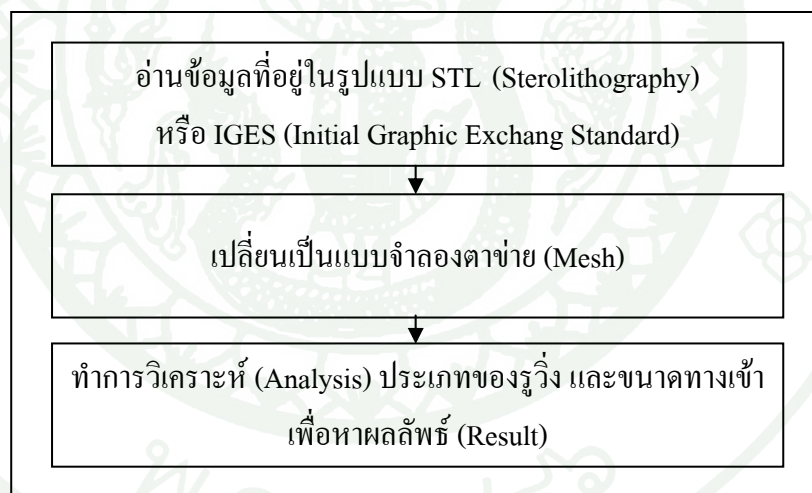
อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์หลักสำหรับการทำวิจัยการพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์แบบอัดส่งชนิดหลายเบ้าที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีความเที่ยงตรงสูง เพื่อศึกษาประเภทของรูปร่างทางเข้าและขนาดของทางเข้า ซึ่งจะวิเคราะห์การไหลของผลิตภัณฑ์ข้าง มีรายละเอียดดังนี้

1. โปรแกรม CADMOULD

CADMOULD เป็นโปรแกรมจำลองการประยุกต์อัดส่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ใช้หลักการพื้นฐานของการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยมีหลักการทำงานของโปรแกรม แสดงดังภาพที่ 48



ภาพที่ 48 หลักการทำงานของโปรแกรม CADMOULD

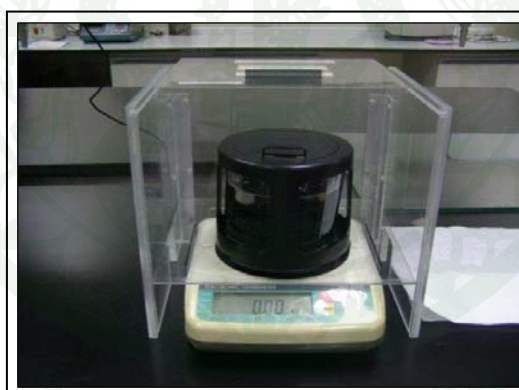
2. คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การไหลของยางขณะขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์

โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- Intel Xeon W3503 (R) 2.4 GHz
- หน่วยความจำขนาด 12 Gigabyte
- ฮาร์ดดิสก์ ขนาด 500 Gigabyte
- การ์ดแสดงผล หน่วยความจำขนาด 512 Megabyte
- ระบบปฏิบัติการ Window XP Professional 64 bit

3. เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง

3.1 เครื่อง Electronic Densimeter (MD-200S) วัดค่าความหนาแน่นของยาง (Hydrostatic Method) โดยใช้ที่อุณหภูมิตั้งที่ 25 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 49



ภาพที่ 49 เครื่อง Electronic Densimeter (MD-200S) มาตรฐานการทดสอบ: ASTM D 297

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย มหาวิทยาลัยมหิดล (2553)

3.2 เครื่อง Capillary Rheometer (RHEO-TESTER 2000) วิเคราะห์คุณสมบัติการไหล (Rheology) ของยาง ดังแสดงในภาพที่ 50



ภาพที่ 50 เครื่อง Capillary Rheometer มาตรฐานการทดสอบ: ASTM D 5099

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย มหาวิทยาลัยมหิดล (2553)

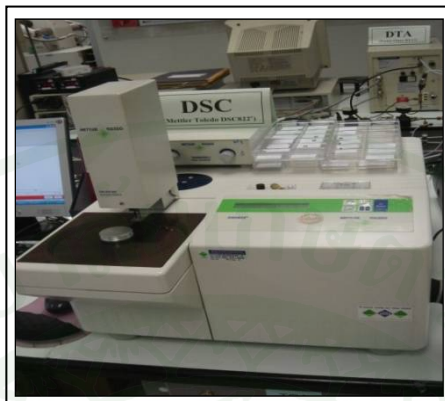
3.3 เครื่อง Moving Die Rheometer (TECHPRO, Roheotech MD+) วัดลักษณะการคงรูปของยาง ดังแสดงในภาพที่ 51 อุปกรณ์วิเคราะห์วัดลักษณะการคงรูปของยาง



ภาพที่ 51 เครื่อง Moving Die Rheometer มาตรฐานการทดสอบ: ASTM D 5289

ที่มา: ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย มหาวิทยาลัยมหิดล (2553)

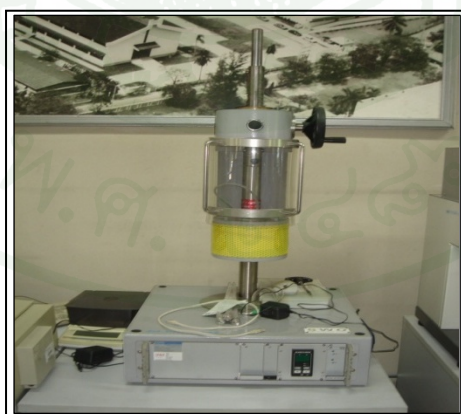
3.4 เครื่อง Mettler Toledo DSC882 วัดค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, Cp) ดังแสดงในภาพที่ 52



ภาพที่ 52 เครื่อง Mettler Toledo DSC 882 มาตรฐานการทดสอบ: DIN 51007

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2553)

3.5 เครื่อง Thermoflizer (SWO Polymertechnik Gmbh) วัดค่าการนำความร้อน (Specific Heat Conductivity, λ) ตามมาตรฐานการทดสอบ ANTEC 88/609-611 ดังแสดงในภาพที่ 53



ภาพที่ 53 เครื่อง Thermoflizer (SWO Polymertechnik Gmbh) มาตรฐานการทดสอบ: DIN 51007

ที่มา: สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย กระทรวงอุตสาหกรรม (2553)

4. เครื่องอัดสังขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

ภาพแสดงลักษณะเครื่องอัดสังขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแนวตั้ง ยี่ห้อ Lin Cheng แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force) 100 ตัน ความดันไฮดรอลิก (Hydraulic Pressure) 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 54

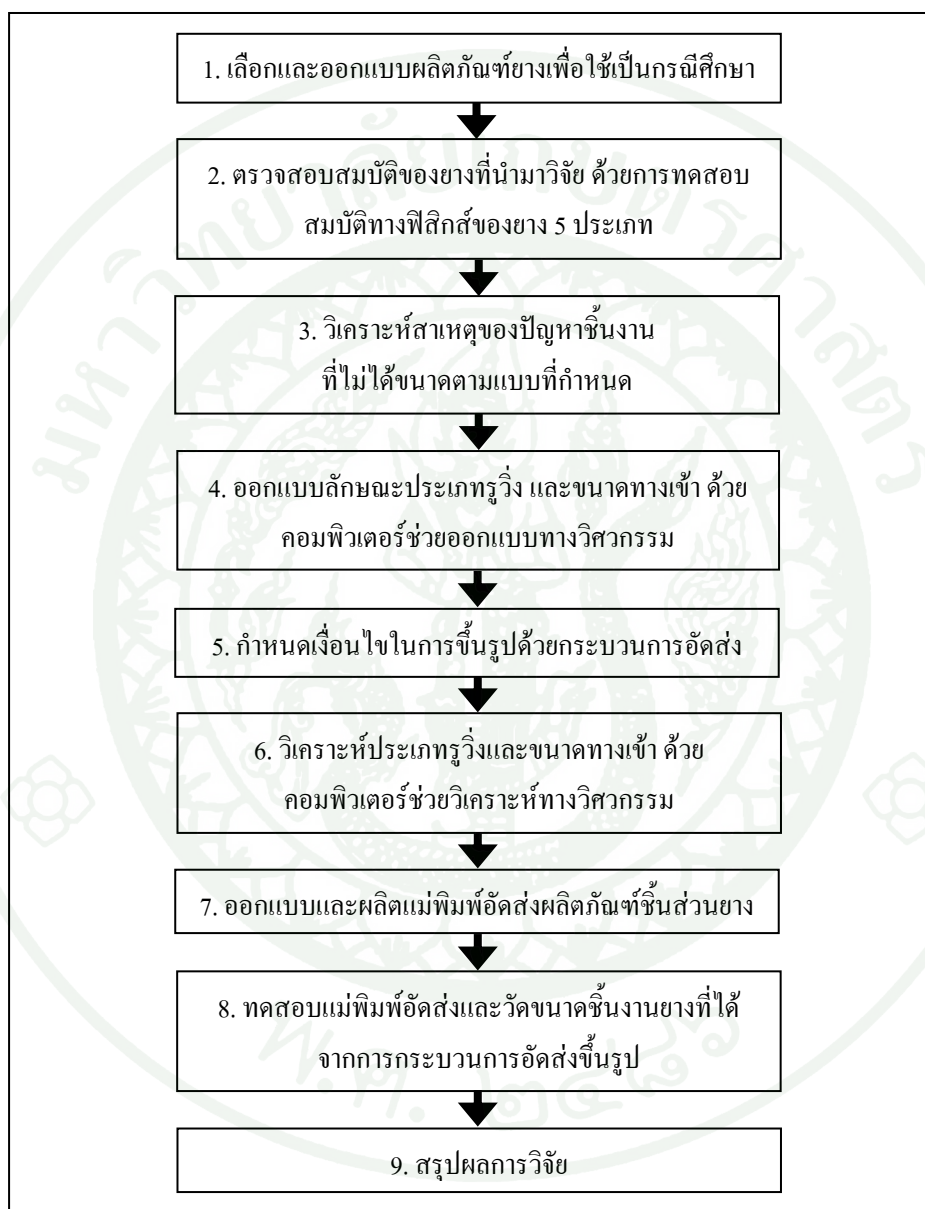


ภาพที่ 54 เครื่องอัดสังผลิตภัณฑ์ยาง ยี่ห้อ Lin Cheng P100

ที่มา: บริษัท เอส เค โพลีเมอร์ จำกัด (2553)

วิธีการ

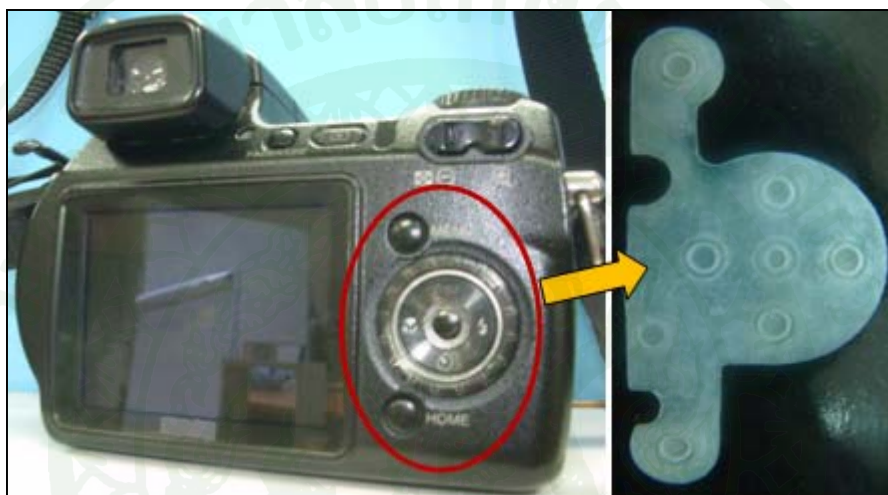
โดยมีลำดับที่เป็นขั้นตอนในการปฏิบัติงานวิจัยตามแผนภาพที่ 55 ดังต่อไปนี้



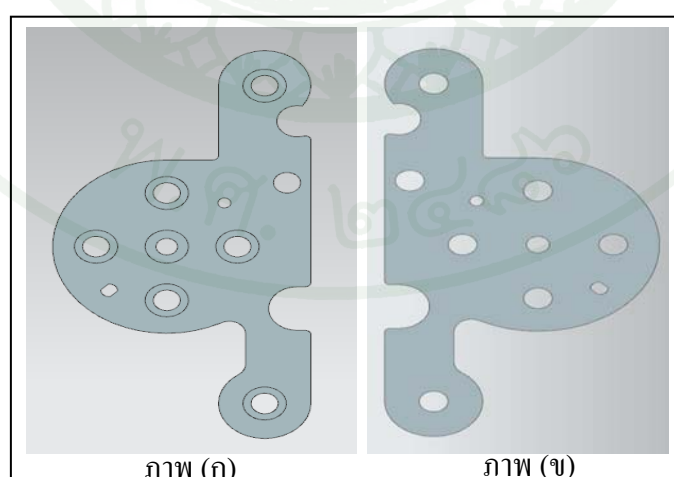
ภาพที่ 55 แผนภาพขั้นตอนในการปฏิบัติงานวิจัย

1. เลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา

ขั้นตอนการวิจัยเริ่มด้วยการเลือกชิ้นงานที่นำมาเป็นกรณีศึกษาจากบริษัทร่วมวิจัย คือ ผลิตภัณฑ์ยางปั๊มกดในกล้องถ่ายรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงแสดงดังภาพที่ 56 ต่อมาทำการสร้างแบบชิ้นงาน ออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในออกแบบ (CAD) เป็น 3 มิติ แสดงตามภาพที่ 57 โดยอ้างอิงขนาดต่างๆ ตามแบบชิ้นงานที่เป็น 2 มิติ ต่อไป



ภาพที่ 56 ผลิตภัณฑ์ยางปั๊มกดในกล้องถ่ายรูปที่ใช้เป็นกรณีศึกษา



ภาพที่ 57 ลักษณะผลิตภัณฑ์ยางปั๊มกดในกล้องถ่ายรูป ภาพ (ก) ด้านหน้า ภาพ (ข) ด้านหลัง
แบบ 3 มิติ

2. ตรวจสอบสมบัติของยางที่นำมาวิจัย

นำยางซิลิโคนความแข็งที่ 70 ชอร์ A ด้วยการทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง 5 ประเภท

2.1 ค่าความหนาแน่น (Density, ρ) ของยางซิลิโคน ด้วยเครื่อง Electronic Densimeter

2.2 วิเคราะห์สมบัติการไหลของยางซิลิโคน เพื่อวัดค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือน (Viscosity as Function of Shear Rate) ที่ 3 อุณหภูมิของยาง ด้วยเครื่อง Capillary Rheometer

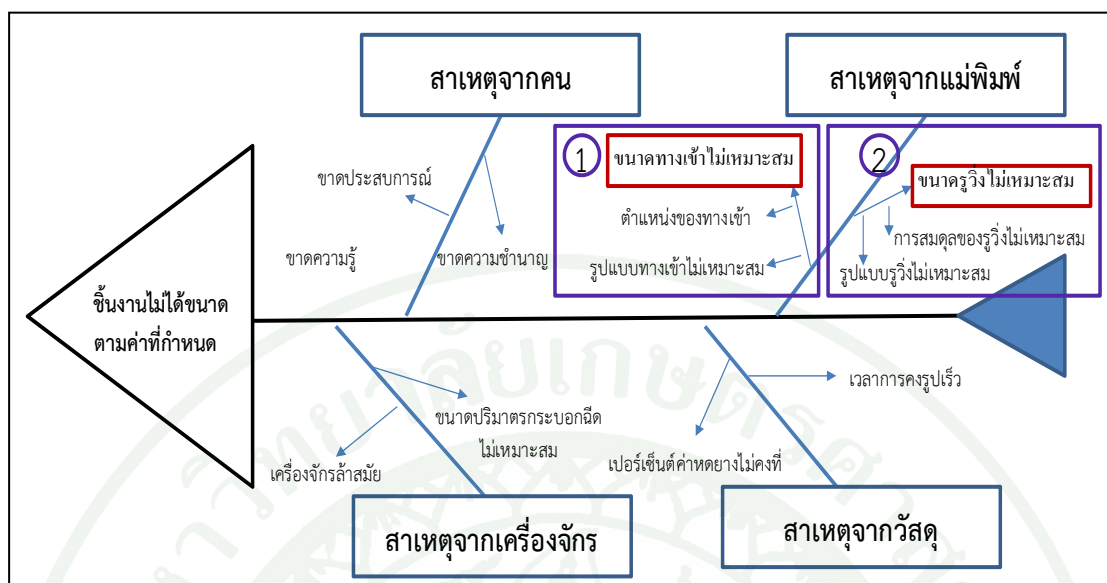
2.3 วิเคราะห์สมบัติการคงรูปของยางซิลิโคน เพื่อวัดค่าอัตราการคงรูป (Curing Rate) ของยาง ด้วยเครื่อง Moving Die Rheometer

2.4 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางซิลิโคน (Specific heat Capacity, C_p) ด้วยเครื่อง Mettler Toledo DSC 882

2.5 ค่าการนำความร้อนของยางซิลิโคน (Specific Heat Conductivity, λ) ด้วยเครื่อง Thermoflizer

3. วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาชิ้นงานที่ไม่ได้ขนาดตามที่กำหนด

การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาชิ้นงานไม่ได้ขนาดตามที่กำหนดโดยใช้แผนภูมิแกงปลา (Pareto Chart) วิเคราะห์หาสาเหตุ ดังแสดงภาพที่ 58



ภาพที่ 58 แผนภาพก้างปลาแสดงปัญหาตามสาเหตุชิ้นงานไม่ได้ขนาดตามที่กำหนด

จากการวิเคราะห์สามารถสรุปสาเหตุเพื่อใช้ในการวิจัยที่มีผลต่อคุณภาพชิ้นงาน ได้แก่

- สาเหตุจากแม่พิมพ์ที่มีการออกแบบรูวิ่งไม่เหมาะสม
- สาเหตุจากแม่พิมพ์ที่มีการออกแบบทางเข้าไม่เหมาะสม

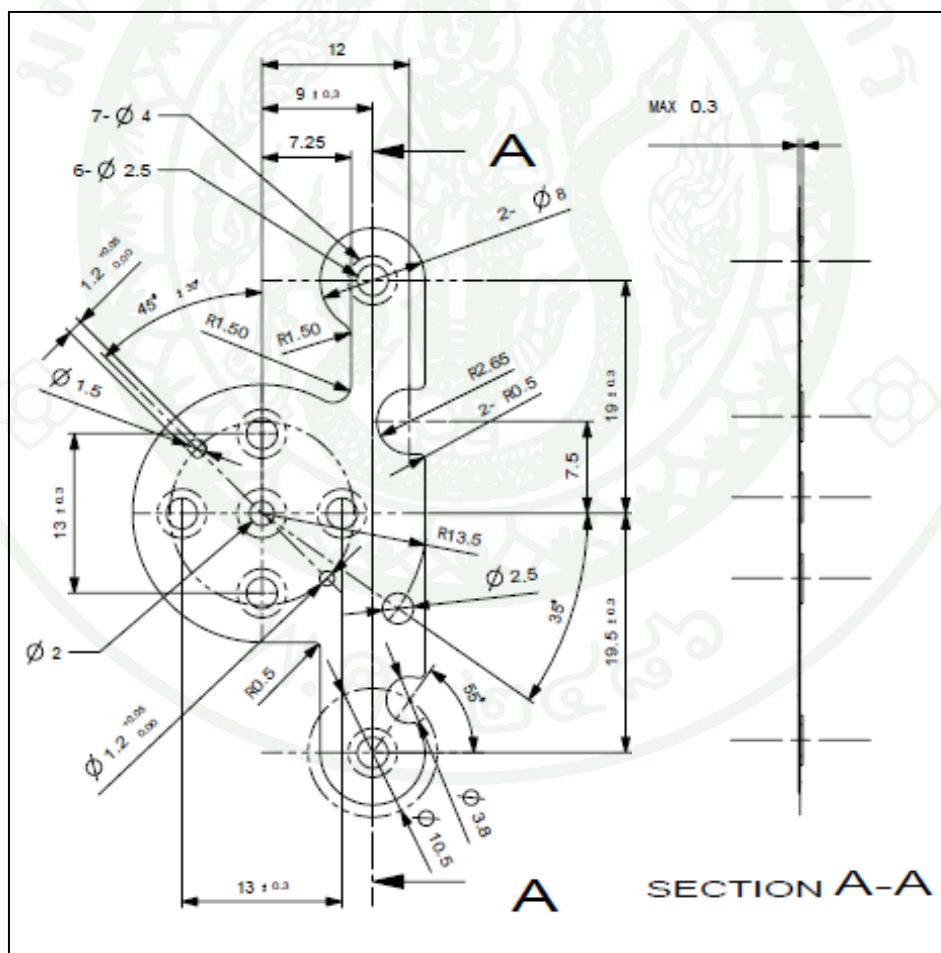
สาเหตุที่จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพชิ้นงาน ได้แก่

- ยางคอมพาวด์คงรูปก่อนไหลเต็มเบ้าแม่พิมพ์ ยางไม่เต็ม
- ยางคอมพาวด์ใหม่ มีตำหนิ นึกขาด
- ใช้เวลาในการบ่มยางคอมพาวด์นาน
- ชิ้นงานยังมีการหดตัวไม่เท่ากัน
- เกิดโพรงอากาศที่ชิ้นงาน
- เกิดรอยประสานที่ชิ้นงาน

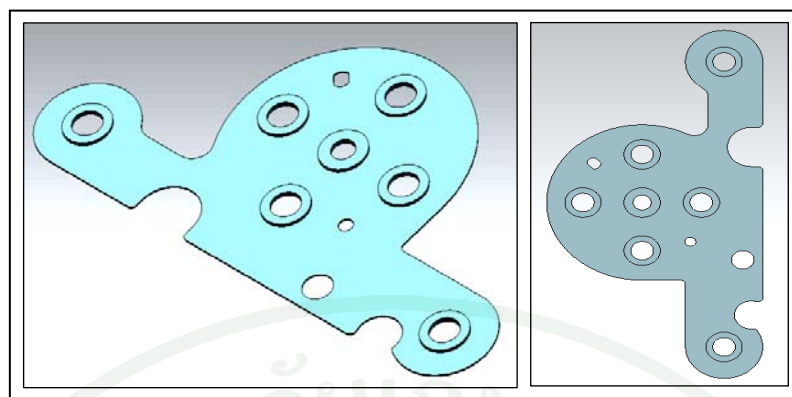
4. ออกแบบชิ้นงาน ลักษณะประเภทรูปร่าง และขนาดทางเข้า ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบทางวิศวกรรม

มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 สร้างแบบ 3 มิติแบบทรงตัน (Solid Model) ของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างศึกษาเนื่องจากผลิตภัณฑ์ข้างตัวอย่างที่นำมาเป็นกรณีศึกษาไม่มีแบบ 3 มิติแบบทรงตัน โดยทางสถานประกอบการมีเพียงแบบ 2 มิติ แสดงดังภาพที่ 59 ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเขียนแบบทรงตัน 3 มิติ ของผลิตภัณฑ์ ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบแสดงดังภาพที่ 60 เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนของกระบวนการจำลองการอัดสังขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยแม่พิมพ์ต่อไป

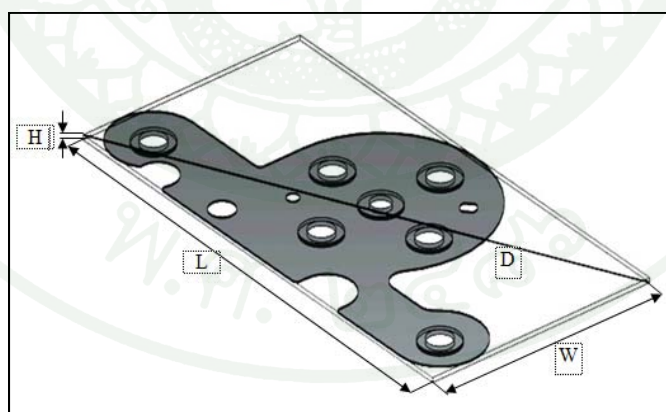


ภาพที่ 59 แบบ 2 มิติของผลิตภัณฑ์ข้างตัวอย่าง



ภาพที่ 60 แบบ 3 มิติ แบบทรงตันของผลิตภัณฑ์ตัวอย่าง

4.2 สร้างแบบ 3 มิติทรงตัน ชนิด Stereolithography (STL) ของผลิตภัณฑ์ข้าง โดยแบ่งขนาดเอลิเมนต์ (Enmeshment) รวมทั้งการสร้างทางเข้า และรูว้าง แบบ 3 มิติ ทรงตัน STL ที่ใช้ในการจำลองการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ข้าง ทำการแบ่งขนาดเอลิเมนต์ชนิดสามเหลี่ยม (Triangular Elements) เป็น 1.00 1.20 1.40 1.60 1.80 2.00 2.20 2.40 2.80 และ 3.00 เพอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ของความยาวเส้นทแยงมุม (Diagonal Line, D) ของกล่องขอบเขต (Bounding Box) ที่สัมผัสกับขอบชิ้นงาน ความกว้าง (Width, W) ความยาว (Length, L) และความสูง (Height, H) แสดงในภาพที่ 61 ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ในการแบ่งเอลิเมนต์ แสดงดังตารางที่ 7

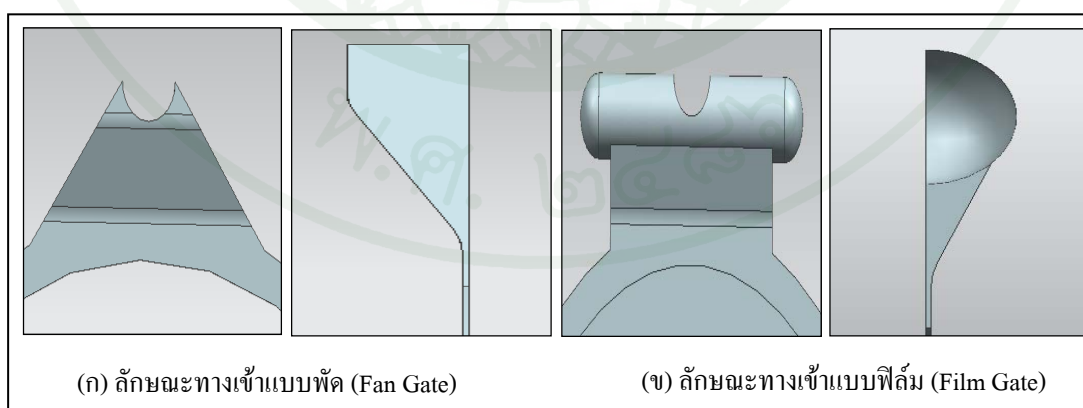


ภาพที่ 61 กล่องขอบเขต (Bounding Box) ที่สัมผัสกับขอบชิ้นงาน

ตารางที่ 7 รายละเอียดการแบ่งเอลิเมนต์ตามความกว้าง 24 มิลลิเมตร ยาว 47 มิลลิเมตร สูง 0.30 มิลลิเมตร และเส้นทแยงมุม 52.64 มิลลิเมตร

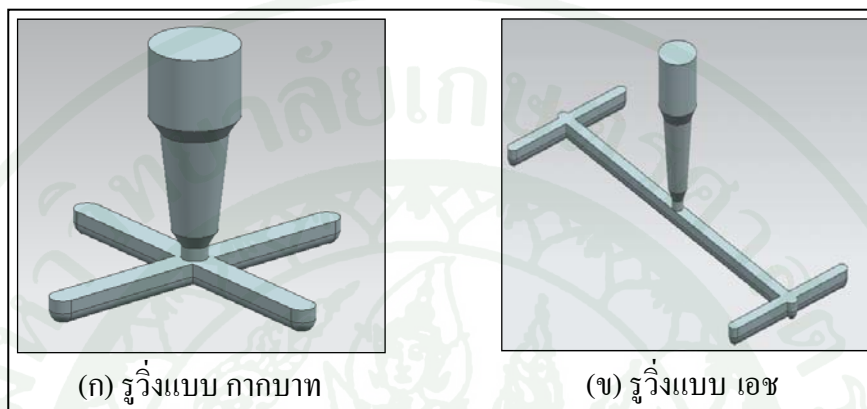
ขนาดเอลิเมนต์ (เปอร์เซ็นต์)	ระยะระหว่างจุดของเอลิเมนต์ (มิลลิเมตร)	จำนวน (เอลิเมนต์)
1.00	5.2640	576,493
1.20	6.3168	405,878
1.40	7.3696	300,629
1.60	8.4224	240,085
1.80	9.4752	200,132
2.00	10.5280	167,281
2.20	11.5808	145,125
2.40	12.6336	127,391
2.60	13.6864	101,511
2.80	14.7392	98,712
3.00	15.7920	97,881

4.3 ศึกษาการออกแบบทางเข้าชิ้นงาน 2 แบบ ซึ่งเหมาะสมกับชิ้นงานที่มีความหนาที่ค่อนข้างบางได้แก่ทางเข้าแบบพัด (Fan Gate) และทางเข้าแบบฟิล์ม (Film Gate) ตามภาพที่ 62



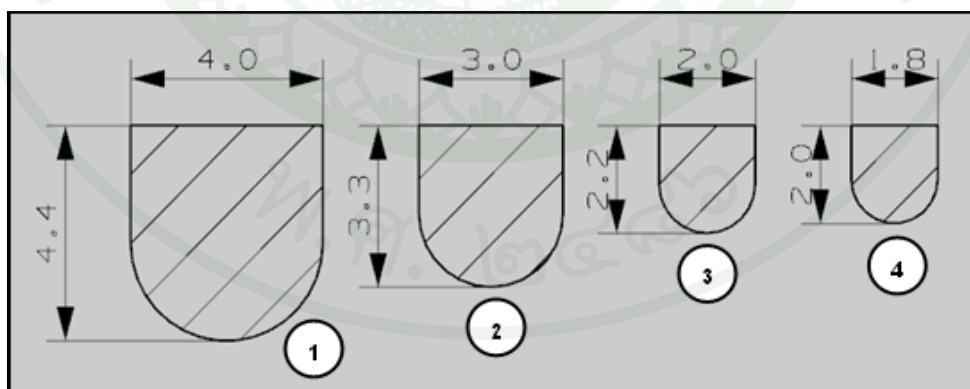
ภาพที่ 62 ลักษณะ (ก) ทางเข้าแบบพัด (Fan Gate) และ (ข) ทางเข้าแบบฟิล์ม (Film Gate)

4.4 ศึกษาการออกแบบรูว้าง โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมจำลองการไหลของยาง ซึ่งแบบรูว้างที่มีความสมดุลรูว้างตามเรขาคณิต มีอยู่ 2 แบบ คือ แบบรูว้างที่มีรูปร่างกากบาท และแบบรูว้างที่มีรูปร่างตัวเอช ตามภาพที่ 63 ซึ่งเป็นแบบรูว้างที่ใช้ในการวางชิ้นงานทั่วไปและสะดวกต่อการกระบวนการผลิต



ภาพที่ 63 ลักษณะการสมดุลรูว้าง 2 แบบ (ก) สมดุลรูว้างแบบกากบาท (ข) สมดุลรูว้างแบบเอช

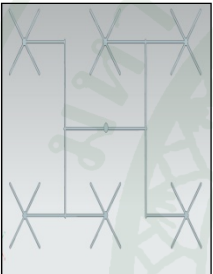
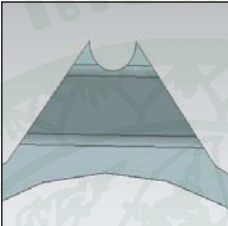
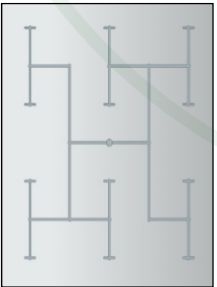
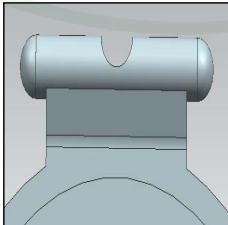
4.5 การออกแบบหน้าตัดของรูว้าง แบบตัวยู (U) ซึ่งเป็นแบบพื้นหน้าตัดที่ส่งถ่ายแรงดัน และการถ่ายโอนความร้อนของรูว้างที่ดี ง่ายต่อการกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 64



ภาพที่ 64 ลักษณะรูว้างหน้าตัดแบบตัวยู

สามารถเขียนแผนผังแสดงการออกแบบประเภทรูว้าง ลักษณะทางเข้าและขนาดทางเข้า
ชั้นงานได้ 12 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 8

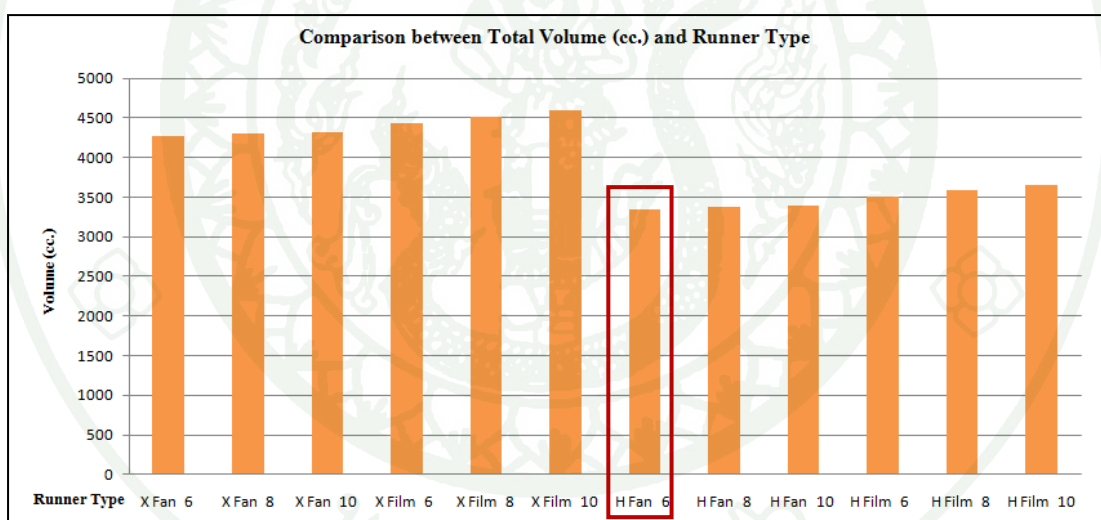
ตารางที่ 8 ประเภทแบบรูว้าง ลักษณะชนิดทางเข้าและขนาดทางเข้าชั้นงาน 12 แบบ

ประเภทแบบรูว้าง	ลักษณะชนิดทางเข้า	ขนาดความกว้างของ ทางเข้า (มิลลิเมตร)	รหัสอ้างอิง
 แบบ X	 แบบพัด (Fan Gate)	6.00	X-Fan-06
		8.00	X-Fan-08
		10.00	X-Fan-10
	 แบบฟิล์ม (Film Gate)	6.00	X-Film-06
		8.00	X-Film -08
		10.00	X-Film -10
 แบบ H	 แบบพัด (Fan Gate)	6.00	H-Fan -06
		8.00	H-Fan -08
		10.00	H-Fan -10
	 แบบฟิล์ม (Film Gate)	6.00	H-Film -06
		8.00	H-Film -08
		10.00	H-Film -10

5. กำหนดเงื่อนไขในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดสัง

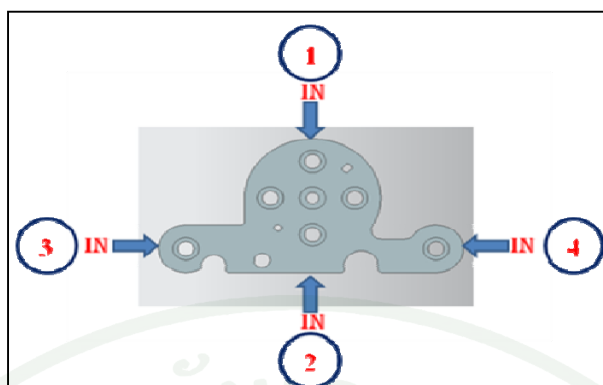
มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 การเลือกจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม การกำหนดค่าของเอลิเมนต์ในโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม จะกำหนดค่าเอลิเมนต์เป็นเปอร์เซ็นต์ ค่าที่ใส่จำนวนน้อยจะให้ความละเอียดแม่นยำมากขึ้น อย่างไรก็ตามการมีจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้นจะส่งผลต่อการวิเคราะห์ของโปรแกรม ทำให้ใช้ระยะเวลายาวนานขึ้น และในบางกรณีอาจไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากหน่วย ความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ไม่เพียงพอ และเอลิเมนต์ที่ไม่เหมาะสม จะทำให้ผลที่ได้ของยางคลาดเคลื่อนไม่แม่นยำ ซึ่งได้ทำการเลือกรูปร่างแบบ เอช และทางเข้าแบบพัด ที่มีความกว้าง 6 มิลลิเมตร พิจารณาจากปริมาตรรวมของรูปร่างที่น้อยที่สุด ส่งผลให้การวิเคราะห์มีความละเอียดแม่นยำมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 65



ภาพที่ 65 การเปรียบเทียบค่าปริมาตรรวมของรูปร่างทั้ง 12 แบบ

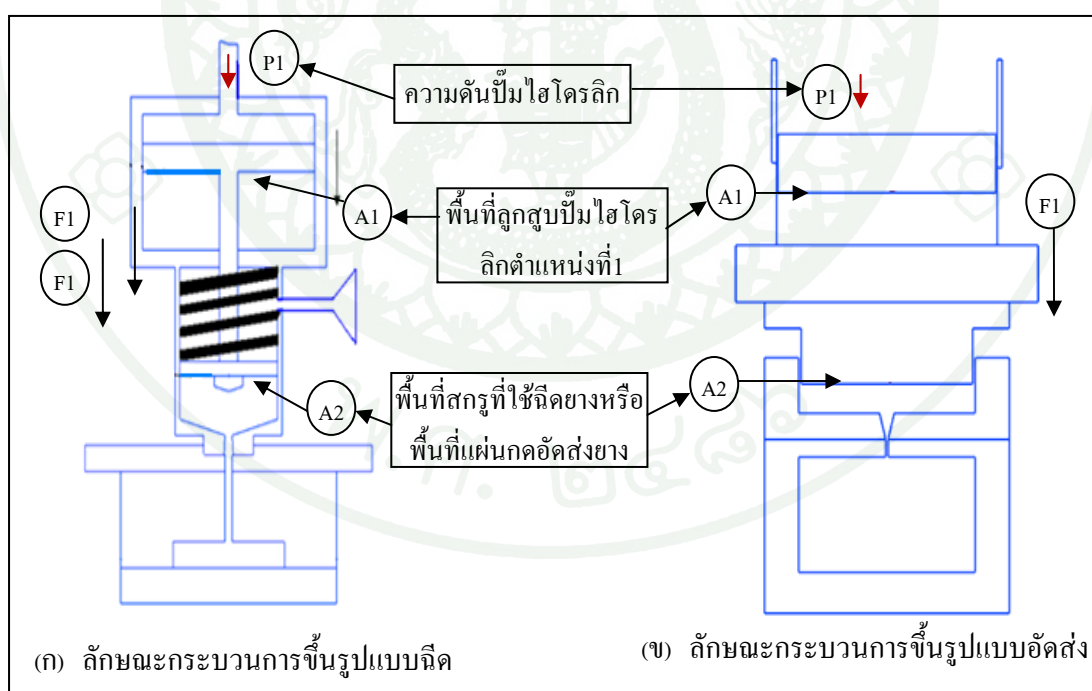
5.2 การเลือกตำแหน่งทางเข้า โดยการกำหนดตำแหน่งทางเข้าของยางคอมพาวด์เข้าที่ตัวชิ้นงาน ที่จะทำให้ขนาดและคุณภาพของชิ้นงานแผ่นกดปั๊มในกล้องถ่ายภาพได้ตามแบบที่กำหนดและตามที่ลูกค้าต้องการ โดยกำหนดตำแหน่งทางเข้า 4 ตำแหน่ง ตามภาพที่ 66



ภาพที่ 66 ตำแหน่งทางเข้าของยางคอมพาวด์ เข้าที่ขึ้นงานแผ่นปั๊มกดในกล้องถ่ายภาพ

5.3 กำหนดเงื่อนไขของการอัดส่ง

พิจารณาเปรียบเทียบจำลองขั้นตอนการฉีดเพื่อนำข้อมูลที่ได้จำลองการอัดส่ง เพื่อคำนวณหาค่าความดันอัดส่งสูงสุด แสดงตามภาพที่ 67



ภาพที่ 67 การเปรียบเทียบลักษณะกระบวนการขึ้นรูปแบบฉีดและแบบอัดส่งเพื่อคำนวณหาค่าความดันอัดส่งสูงสุด

การทำงานระหว่างกระบวนการฉีดกับการทำงานกระบวนการอัดส่ง แสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ขั้นตอนการทำงานเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการฉีดกับกระบวนการอัดส่ง

การทำงานของกระบวนการฉีด	การทำงานของกระบวนการอัดส่ง
1. นำยางที่ตัดเป็นเส้นใส่ลงในสกรูอย่างต่อเนื่อง	1. นำยางที่ตัดให้ได้น้ำหนักชิ้นงานรวมกับรูว้างและทางเข้า โดยอุ่นยางตามอุณหภูมิวางลงในเบ้าอัดส่ง
2. ยางจะถูกดูดด้วยสกรู และสกรูจะเคลื่อนที่หมุนจากความดันจากปั๊มไฮโดรลิก P_1 ของเครื่องฉีด เกิดแรง F_1 ดันลูกสูบ A_1 เคลื่อนที่ลง	2. ยางจะถูกอัดส่ง ด้วยความดันจากปั๊มไฮโดรลิก P_1 ของเครื่องอัดส่ง ดันลูกสูบ A_1 ให้มีแรงดันที่ F_1 ส่งผ่านไปยังแผ่นกดอัดส่ง A_2 ซึ่งจะมียางที่วางอยู่ในเบ้าแม่พิมพ์อัดส่ง
3. ยางที่อยู่ในสกรูจะถูกตัดเฉือนด้วยแรงหมุนจนเกิดความร้อนภายในจนถึงเริ่มร้อนจนถึงอุณหภูมิฉีดยาง	3. เมื่อแม่พิมพ์แผ่นล่างกับแผ่นกลางที่เป็นเบ้ารูอัดส่งประกบเข้ากันสนิท แผ่นกดอัดส่ง A_2 เคลื่อนลงเกิดแรงดัน F_1 ดันยางที่อยู่ในเบ้าผ่านรูอัดส่ง (รูฉีด) เข้าไปในแม่พิมพ์ที่มีความร้อนตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้
4. เมื่อแม่พิมพ์ถูกปิดสนิทด้วยแรงดันที่ตั้งไว้ให้พร้อมกับเกิดแรงดัน F_1 ที่สกรูซึ่งมีพื้นที่ A_2 ในกระบอกสูบเคลื่อนที่ตามปริมาณยางที่ต้องการและพร้อมที่จะฉีด P_2 ผ่านรูฉีดเข้าเบ้าในแม่พิมพ์ที่มีความร้อนตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้	4. แม่พิมพ์จะประกบกันสนิทและอัดอย่างค้างไว้ให้ยางคงรูป (Cure) ตามที่อุณหภูมิและเวลาที่ตั้งไว้
5. แม่พิมพ์ที่มีความร้อนตามอุณหภูมิที่ตั้งไว้ ความร้อนที่ส่งผ่านไปที่ยาง (Cure) ที่อยู่ในแม่พิมพ์ สกรูจะเคลื่อนที่ออกจากกระบอกตามปริมาณยางที่ต้องการให้มีในกระบอกสูบอีกครั้ง	5. แม่พิมพ์เปิดออกยางจะคงรูป ส่วนแผ่นกดอัดส่ง A_2 จะถูกยกขึ้นพร้อมกับนำส่วนแผ่นยางออกจากเบ้าอัดส่ง
6. แม่พิมพ์จะเปิดออกตามเวลาที่ตั้งไว้ เพื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และสามารถฉีดยางขึ้นรูปครั้งต่อไป	6. เปิดแม่พิมพ์แผ่นกลางหรือเบ้าอัดส่งเพื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แผ่นล่าง

จากตารางที่ 9 เปรียบเทียบขั้นตอนการทำงานระหว่างกระบวนการฉีดกับกระบวนการอัดส่ง พบว่า มีส่วนที่คล้ายคลึงกันที่ใช้ความดันปั๊มไฮโดรลิก P_1 ของเครื่องฉีดและเครื่องอัดส่ง ดันลูกสูบ A_1 ให้เคลื่อนที่ลง เกิดแรง F_1 ดันสกรูในเครื่องฉีดหรือแผ่นกดอัดส่ง ดันยางให้ผ่านรูฉีดหรือรูอัดส่ง ซึ่งเกิดความดันสูงสุดให้ยางไหลผ่านเข้าเบ้าในแม่พิมพ์ ซึ่งนำสมการของการฉีดมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าความดันอัดส่งสูงสุด เพื่อนำไปป้อนในคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การไหลของยาง

จากภาพที่ 67 นำสมการคำนวณหาค่าอัดส่งสูงสุดที่ในเบ้าแม่พิมพ์ได้จากสูตร

$$F_1 = P_1 \times A_1 \quad (20)$$

P_1 คือ ความดันปั๊มไฮดรอลิกสูงสุด ของเครื่องอัดส่ง (กิโลกรัมแรง/ ตารางเซนติเมตร)

F_1 คือ แรงดันที่กระทำต่อลูกสูบปั๊มไฮดรอลิก ตำแหน่ง 1 (กิโลกรัมแรง)

A_1 คือ พื้นที่ลูกสูบปั๊มไฮดรอลิกตำแหน่ง 1 (ตารางเซนติเมตร)

$$\begin{aligned} F_1 &= 200 \times 509.65 \\ &= 101,930 \text{ กิโลกรัมแรง} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ค่าอัดส่งที่ในเบ้าแม่พิมพ์ } P_2 &= F_1 / A_2 \\ &= 101,930 / 100 \\ &= 1,019.30 \text{ กิโลกรัมแรง/ ตารางเซนติเมตร} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\therefore \text{แปลงหน่วยเป็น } 1,019.30 \times 0.981 = 999.93 \approx 1,000 \text{ บาร์}$$

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นที่จำเป็นในการจำลองการอัดส่งขึ้นรูป แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าเริ่มต้นต่างๆ ในการจำลองการอัดส่งขึ้นรูป

ค่าเริ่มต้น	ค่าที่กำหนด
ความดันในการอัดส่งสูงสุดของเครื่องอัดส่ง (บาร์)	1,000
เวลาในการคงรูป (วินาที)	180
แรงปิดแม่พิมพ์ (นิวตัน)	2,000
อัตราการคงรูปที่น้อยที่สุด (เปอร์เซ็นต์)	75
อัตราการคงรูปเฉลี่ย (เปอร์เซ็นต์)	95
อัตราการคงรูปมากที่สุด (เปอร์เซ็นต์)	100
อุณหภูมิแม่พิมพ์ (องศาเซลเซียส)	180
อุณหภูมิการคงรูปยาง (องศาเซลเซียส)	180
อุณหภูมิเริ่มต้นยาง (องศาเซลเซียส)	35
เวลาในการอัดส่ง (วินาที)	5

6. วิเคราะห์ประเภทรูปร่างและขนาดทางเข้า ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

การเลือกลักษณะรูปร่างและทางเข้าชิ้นงาน เมื่อได้ค่าจำนวนของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมแล้วจึงทำการเปรียบเทียบการออกแบบรูปร่างและทางเข้าที่เหมาะสมทั้ง 12 แบบ โดยกำหนดตัวแปรต่างๆ ดังนี้

ตัวแปรต้น โดยแบ่งเป็นตัวแปรที่ควบคุมได้ กับตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้

ตัวแปรที่ควบคุมได้ คือ ตัวแปรที่กำหนดขึ้นเพื่อใช้กำหนดปัจจัยในการทำงาน ได้แก่

- ลักษณะรูปร่าง 2 แบบ ได้แก่ แบบกากบาท และแบบเอช
- ลักษณะทางเข้าชิ้นงาน 2 แบบ ได้แก่ แบบพัด และแบบฟิล์ม
- ขนาดทางเข้าชิ้นงาน 3 ขนาด ได้แก่ ความกว้างที่ 6.00 8.00 10.00 มิลลิเมตร

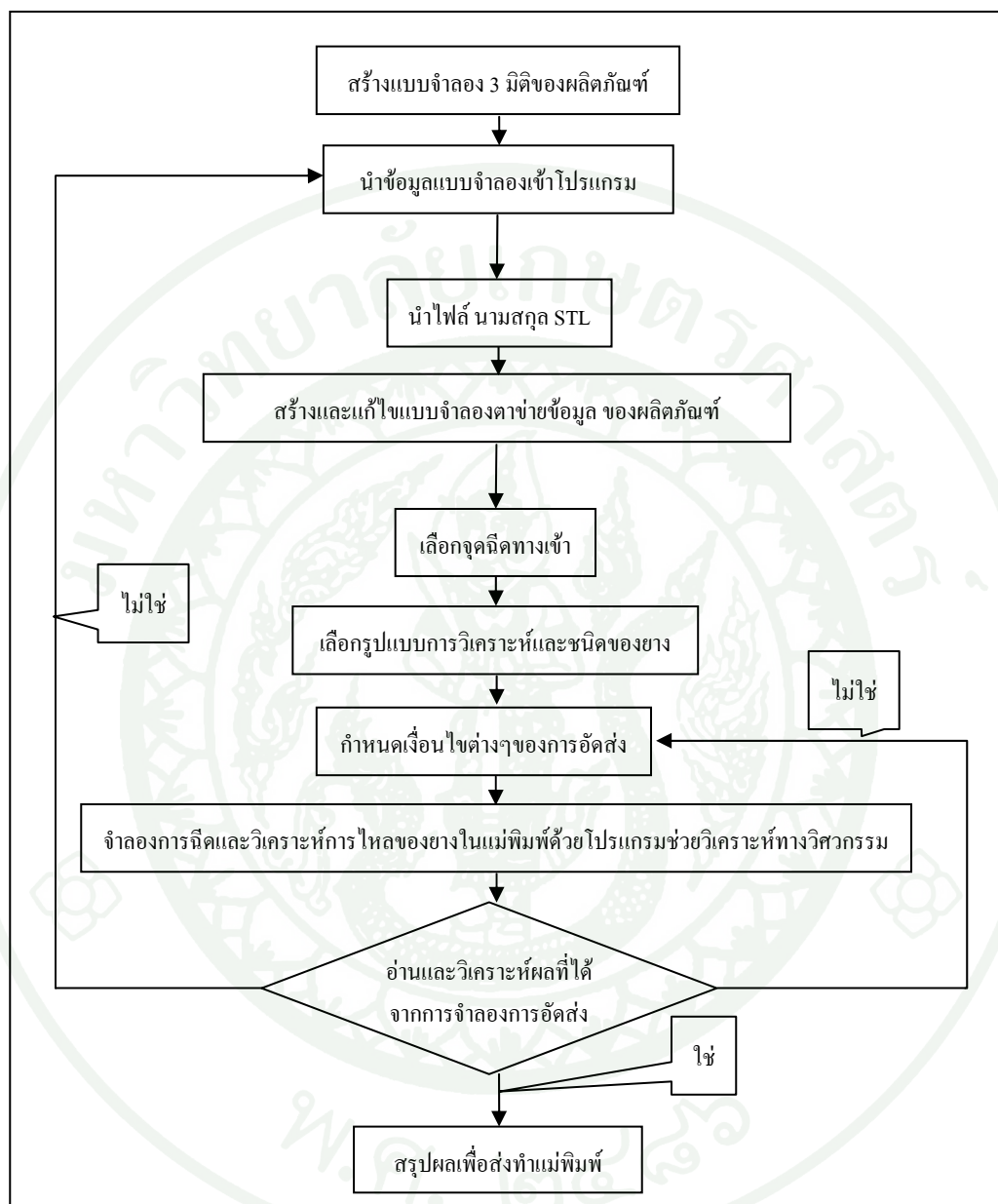
ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ คือ ตัวแปรที่เกิดขึ้นและมีผลกระทบต่อปัจจัยที่กำหนดในการทำงาน ได้แก่

- อุณหภูมิภายนอก คือ สภาพภูมิอากาศที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน มีทั้งอุณหภูมิสูง-ต่ำ และฝนตก
- ความชื้นสัมพัทธ์ หมายถึง ค่าความหนาแน่นของไอน้ำในอากาศคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของความหนาแน่นอิ่มตัวของไอน้ำ
- พิจารณาผลที่จะการวิเคราะห์จากคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม

ตัวแปรตาม คือ ผลที่เกิดจากตัวแปรต้น โดยพิจารณารายละเอียดดังนี้

- เวลาการเติมน้ำมัน คือ ระยะเวลาที่ยางคอมพาวด์ไหลตามรูฉีด รูปร่าง และทางเข้าชิ้นงานจนเต็มเบ้าแม่พิมพ์ตามจำนวนที่กำหนด
- ความดันที่สูงเกินไป คือ ความดันที่ใช้ในการเติมน้ำมันให้เต็มเบ้าแม่พิมพ์
- ความเค้นเฉือน คือ ความเค้นที่เกิดจากการไหลของการเติมน้ำมันคอมพาวด์ให้เต็มเบ้าแม่พิมพ์
- ความเร็ว คือ ความเร็วที่ใช้ในการเติมน้ำมันคอมพาวด์ให้เต็มเบ้าแม่พิมพ์

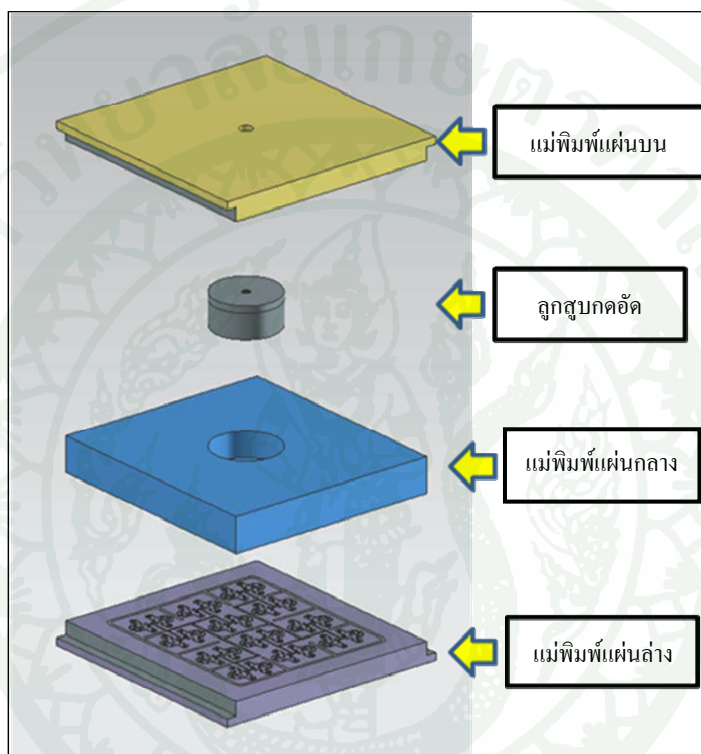
ขั้นตอนการป้อนข้อมูลในโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม แสดงดังภาพที่ 68



ภาพที่ 68 วิธีการใส่ข้อมูลในโปรแกรมวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม

6. ออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ตามลักษณะรูปร่าง และขนาดทางเข้าชิ้นงานที่เหมาะสม

หลังจากได้แบบของรูปร่าง ทางเข้า และขนาดทางเข้า จากผลการวิเคราะห์การไหลของยาง ด้วยโปรแกรม จึงนำผลที่ได้มาออกแบบแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์แผ่นปุ่มกดในกล้องถ่ายรูป ซึ่งจะเป็นแบบที่จะใช้ในการผลิตแม่พิมพ์จริง ตัวอย่างแบบแม่พิมพ์อัดส่ง แสดงในภาพที่ 69



ภาพที่ 69 แบบประกอบชิ้นส่วนแม่พิมพ์

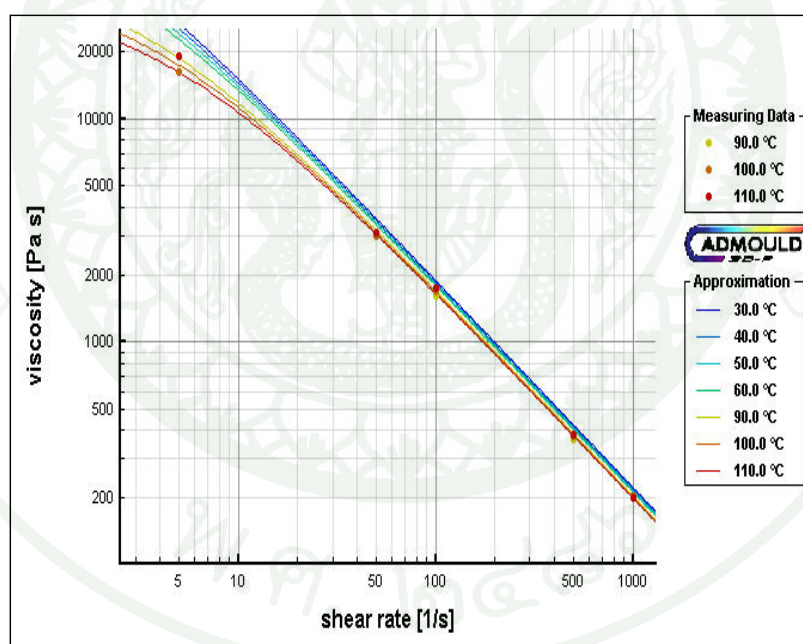
ผลและวิจารณ์

1. ผลที่นำมายทดสอบสมบัติทางเชิงกล

นำยางซิลิโคนความแข็งที่ 70 ชอร์ เอ ทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง 5 ประเภท มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

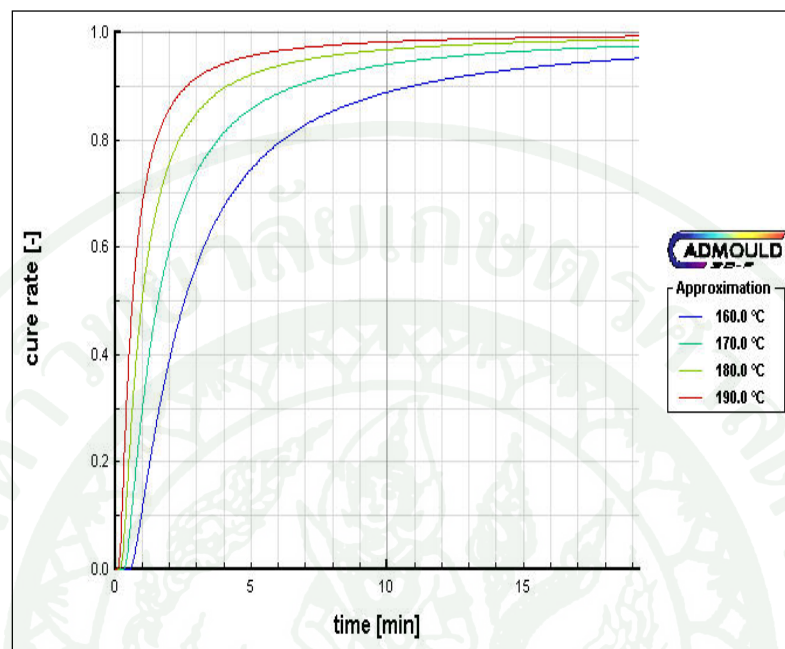
1.1 ค่าความหนาแน่นของยางซิลิโคน 70 ชอร์ เอ มีค่า 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยวัดจากเครื่อง Electronic Densimeter

1.2 วิเคราะห์สมบัติการไหลของยางซิลิโคน เพื่อวัดค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่ 3 อุณหภูมิของยาง ดังแสดงภาพที่ 70 โดยวัดจากเครื่อง Capillary Rheometer



ภาพที่ 70 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของยางคอมพาวด์กับอัตราเฉือน จากการทดสอบและค่าที่คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมคำนวณ

1.3 วิเคราะห์สมบัติการคงรูปของยางซิลิโคน เพื่อวัดค่าอัตราการคงรูปของยาง ซึ่งแสดงดังภาพที่ 71



ภาพที่ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคงรูปยางคอมพาวด์กับเวลาที่ได้จากการทดสอบ

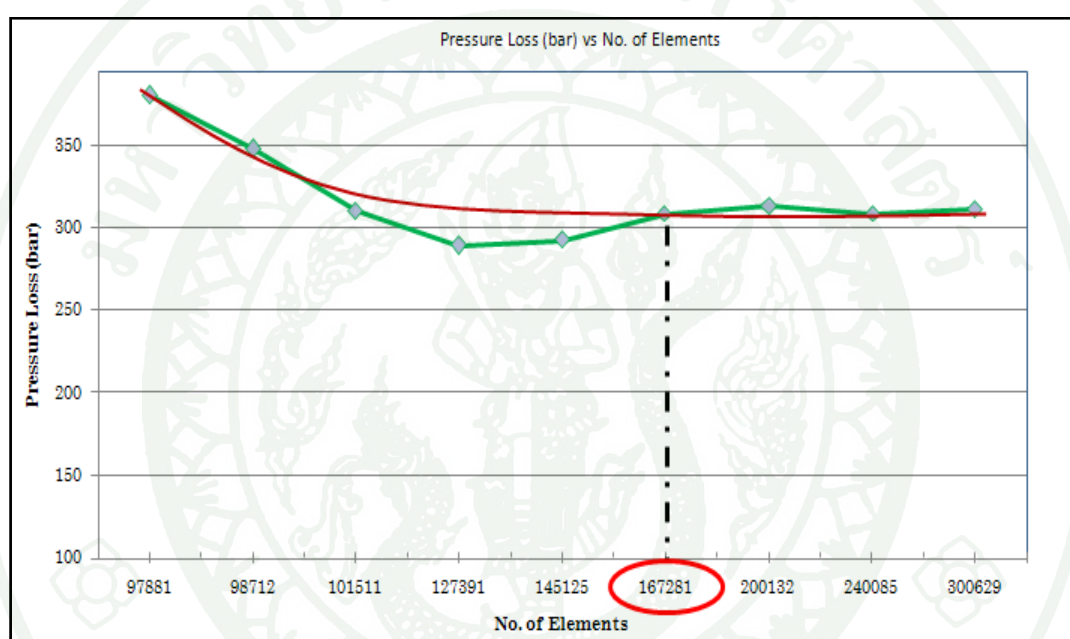
1.4 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางซิลิโคน มีค่า มีค่า 1.783 จูลต่อกรัม-องศาเซลเซียส โดยวัดจากเครื่อง Mettler Toledo DSC 882

1.5 ค่าการนำความร้อนของยางซิลิโคน มีค่า 0.22 วัตต์ต่อเมตร-องศาเซลวิน โดยวัดจากเครื่อง Thermoflizer

2. ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบขนาดเอลิเมนต์

จากการวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบการแบ่งเอลิเมนต์ เพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมได้ผลดังนี้

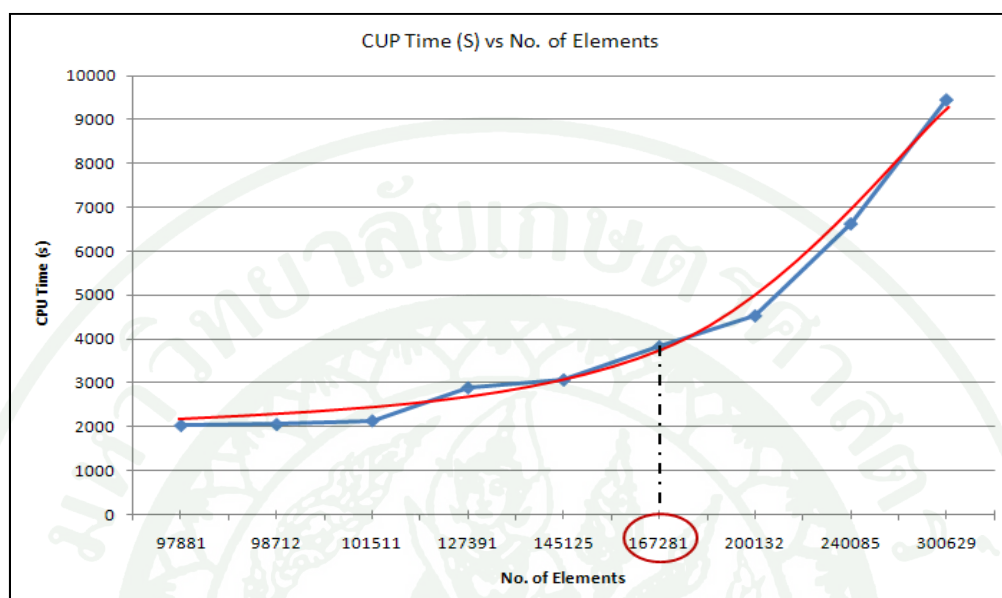
2.1 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์
ดังแสดงภาพที่ 72



ภาพที่ 72 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับจำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับจำนวนเอลิเมนต์ พบว่า ความดันสูญเสียมีค่าต่ำสุด เมื่อจำนวนเอลิเมนต์มีค่า 145,125-300,629 โดยที่จำนวนเอลิเมนต์มีค่าคงที่ที่ 167,281 และมีค่าความดันสูญเสีย 308.10 บาร์

2.2 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการเปรียบเทียบกับจำนวนเอลิเมนต์ ดังแสดงตามภาพที่ 73



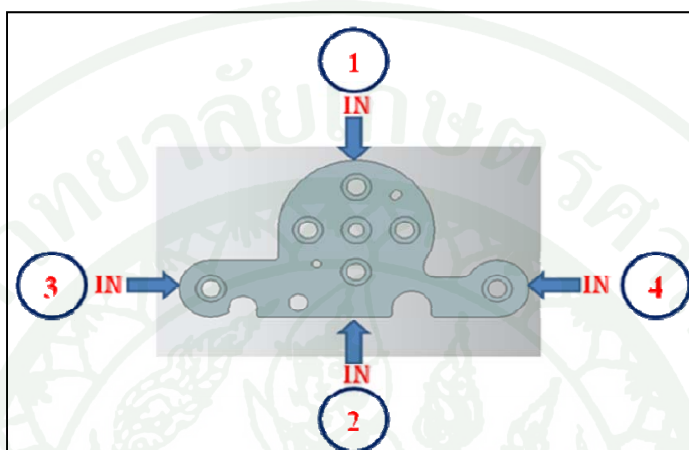
ภาพที่ 73 ระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณกับจำนวนเอลิเมนต์

จากกราฟได้แสดงระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณกับจำนวนเอลิเมนต์ พบว่า เวลาที่ใช้ประมวลผลกลางอยู่ที่ 2,035 วินาที กับ 42,497 วินาที โดยเลือกเวลาที่ใช้ในการประมวลผลกลางที่ 3,837 วินาที ในช่วงจำนวนเอลิเมนต์ที่ 167,281 เอลิเมนต์

นำผลที่ได้มาพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสีย ระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณ และจำนวนเอลิเมนต์ แสดงดังภาพที่ 72 และ 73 ตามลำดับ พบว่าความดันสูญเสียมีค่าเข้า เมื่อจำนวนเอลิเมนต์มีค่า 145,125-300,629 โดยที่จำนวนเอลิเมนต์ 167,281 ให้ค่าความดันสูญเสีย 308.10 บาร์ ในขณะที่จำนวนเอลิเมนต์ 240,085 ให้ค่าความดันสูญเสีย 307.90 บาร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าจำนวนเอลิเมนต์ยิ่งมาก ค่าความดันสูญเสียที่ได้จากการวิเคราะห์ในการจำลองการอัดส่งขึ้นรูปไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณคือ 3,837 วินาที กับ 6,645 วินาที นั้นแตกต่างกัน ถึง 1.73 เท่า ดังนั้นจึงเลือกใช้จำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม คือ 167,281 เพื่อให้การทดลองได้ผลที่ถูกต้องและแม่นยำ

2.3 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบตำแหน่งทางเข้าชิ้นงาน

จากการวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบตำแหน่งทางเข้าชิ้นงาน โดยกำหนดทางเข้าไว้ 4 ทางเข้า ดังภาพที่ 74 และแสดงรายละเอียดที่ได้จากการจำลองการไหล ในตารางที่ 11 ดังนี้



ภาพที่ 74 ตำแหน่งทางเข้าของยางคอมพาวด์เข้าที่ชิ้นงานแผ่นปุ่มกดในกล้องถ่ายรูป

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบค่าตัวแปรตามต่างๆ ที่ตำแหน่งทางเข้าของชิ้นงาน

ตำแหน่งทางเข้าชิ้นงาน	1	2	3	4
ความดันสูญเสีย (บาร์)	144.30	132.10	201.10	202.80
ความเค้นเฉือน (กิโลปาสกาล)	240	196	296	506
ความเร็ว (เมตร/วินาที)	63.90	60.50	61.40	69.10

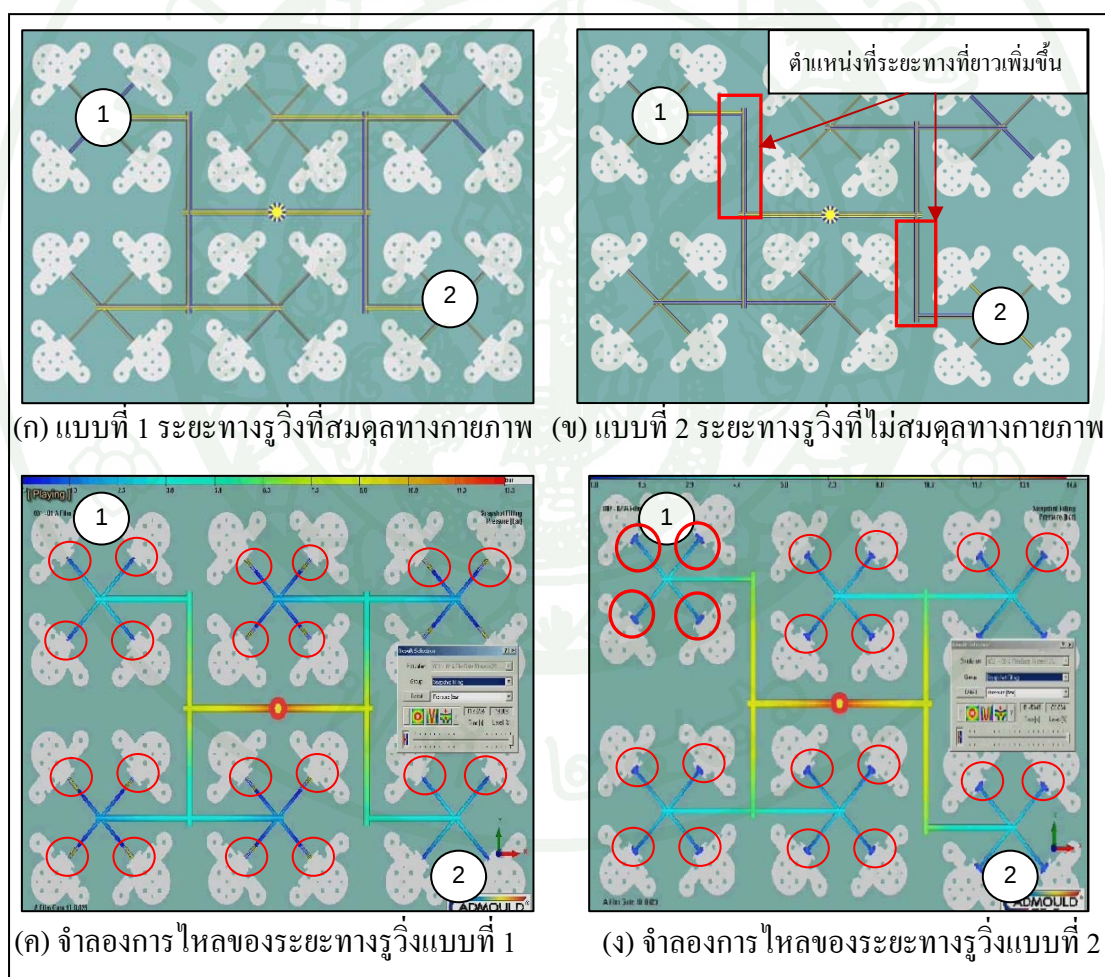
จากตารางที่ 11 ผลการเปรียบเทียบตำแหน่งทางเข้าชิ้นงาน ซึ่งพบว่าตำแหน่งทางเข้าที่ 2 มีค่าความดันสูญเสียที่ 132.10 บาร์ ค่าความเค้นเฉือนที่ 196 กิโลปาสกาล และค่าความเร็ว 60.50 มิลลิเมตรต่อวินาที มีค่าน้อยกว่าทางเข้าชิ้นงานทั้ง 3 ตำแหน่ง

นำผลมาพิจารณาเมื่อความดันสูญเสียภายในเบ้าชิ้นงานจะส่งผลให้แรงที่กระทำให้ยางไหลได้ช้าและไม่เกิดแรงดันภายในเบ้าทำให้ยางไหลเข้าเต็มเบ้าชิ้นงาน ถ้าความดันสูญเสียมีมากจะส่งผลให้แรงที่กระทำให้ยางไหลได้เร็วทำให้เกิดแรงดันภายในเบ้าชิ้นงาน ทำให้ยางไหลเข้าไม่เต็มเบ้าชิ้นงาน และในส่วนความเร็วที่น้อยจะทำให้ยางไหลช้า ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยตาม ทำให้

ยางไหลเข้าเต็มเข้าชิ้นงาน แต่ถ้าความเร็วที่มีค่ามาก ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นจะมีมาก ซึ่งทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในยาง เกิดการคงรูปก่อน ก็จะทำให้ยางไหลเข้าไม่เต็มเข้าชิ้นงาน

2.4 ผลการวิเคราะห์สมดุลระยะรูปร่างที่เหมาะสม

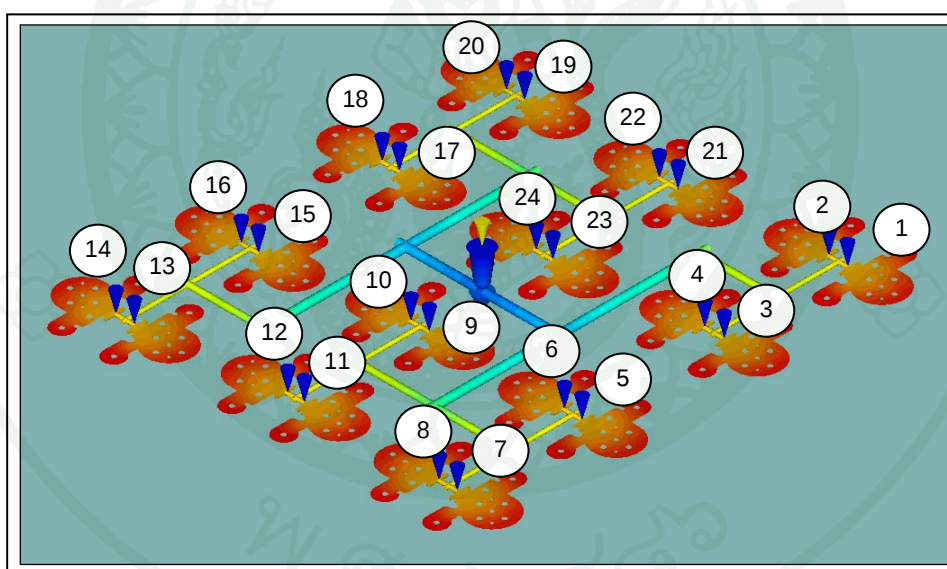
การออกแบบระยะทางรูปร่างจะมีอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่ 1 ระยะรูปร่างเท่ากันที่มีความสมดุลทางกายภาพ ดังภาพที่ 75(ก) และแบบที่ 2 ระยะรูปร่างไม่เท่ากันที่ไม่เกิดความสมดุลทางกายภาพ ดังภาพที่ 75(ข) การจำลองการไหลของระยะทางรูปร่างแบบที่ 1 ดังภาพที่ 75(ค) และการจำลองการไหลของระยะทางรูปร่างแบบที่ 2 ดังแสดงภาพที่ 75(ง)



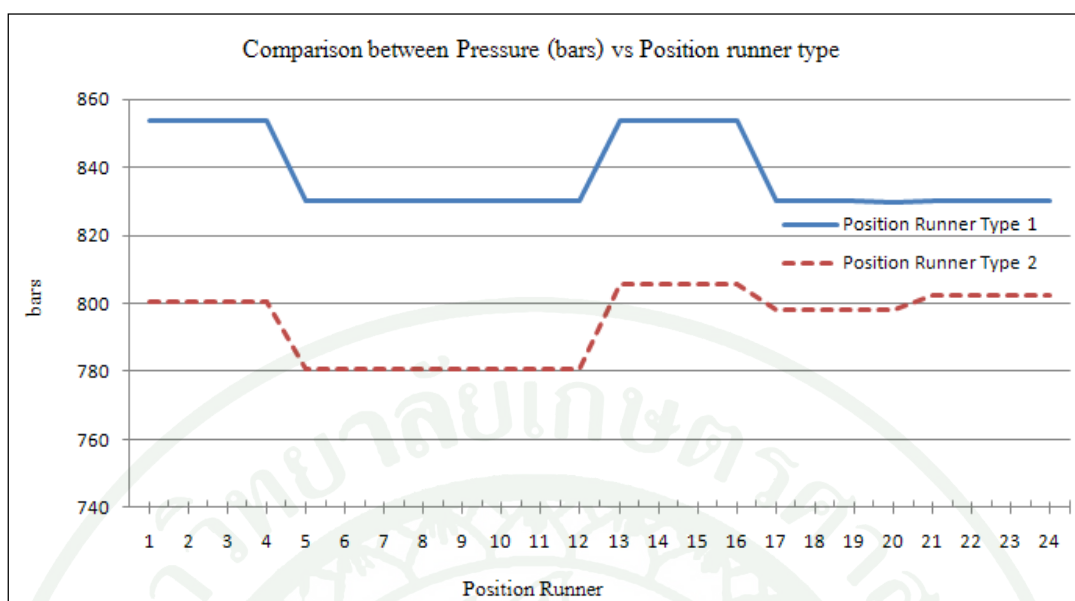
ภาพที่ 75 ลักษณะรูปร่างทั้ง 2 แบบ ภาพ (ก) แบบที่ 1 ระยะรูปร่างเท่ากันและมีความสมดุลทางกายภาพ ภาพ (ข) แบบที่ 2 ระยะรูปร่างไม่เท่ากันและไม่เกิดความสมดุลทางกายภาพ (ค) การจำลองการไหลของระยะทางรูปร่างแบบที่ 1 และ (ง) การจำลองการไหลของระยะทางรูปร่างแบบที่ 2

จากภาพที่ 75 ผลที่ได้จากการจำลองการไหลของยางพบว่า ระยะทางรูว์แบบที่ 1 การไหลเต็มเนื้อของยางจะไหลเข้าไม่พร้อมกันตำแหน่งระยะทางรูว์ด้านบนซ้ายหมายเลข 1 และระยะทางรูว์ด้านล่างขวาหมายเลข 2 การไหลของยางจะไหลเข้าเต็มเบ้าขึ้นงานก่อนเบ้าอื่นทำให้เบ้าขึ้นงานที่เหลือยางไหลไม่เต็มเบ้าขึ้นงานส่งผลให้ได้ชิ้นงานที่ไม่ดี ดังนั้นจึงออกแบบระยะทางรูว์แบบที่ 2 โดยทำการเพิ่มระยะทางของเบ้าหมายเลข 1 และหมายเลข 2 ให้ยาวขึ้นจากนั้นนำมาจำลองการไหลของยาง พบว่าจากจำลองการไหลของยางไหลเข้าเต็มเบ้าขึ้นงานพร้อมกันทุกเบ้าส่งผลทำให้ได้ชิ้นงานที่เต็มเบ้าขึ้นงาน

ใช้อุปกรณ์ตรวจสอบช่วงการเติมเต็มของยางที่มีอยู่ในโปรแกรมวิเคราะห์การของยางทำการตรวจสอบการไหลของยางเข้าในเบ้าขึ้นงาน ภาพที่ 76 แสดงตำแหน่งที่ใช้ตรวจสอบความดันที่ใช้ในการเติมเนื้อยางและภาพที่ 77 แสดงการเปรียบเทียบความดันที่ใช้ในการเติมเนื้อยางแต่ละเบ้าของระยะรูว์แบบที่ 1 และแบบที่ 2



ภาพที่ 76 ตำแหน่งที่ตรวจสอบช่วงการเติมเต็มของขึ้นงาน



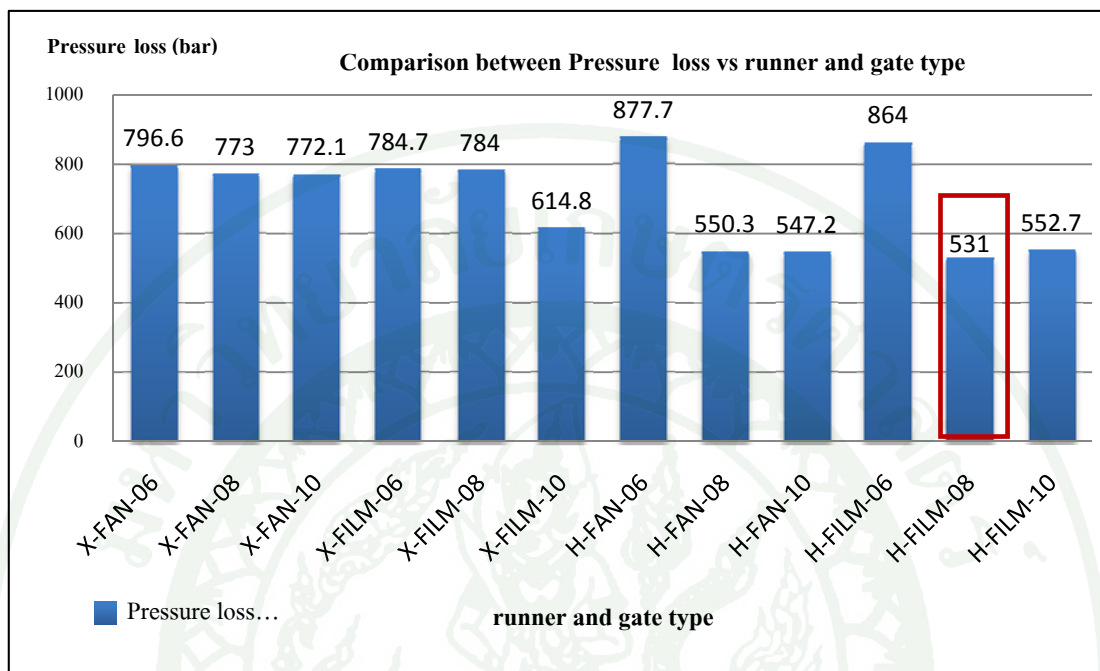
ภาพที่ 77 การเปรียบเทียบความดันที่ใช้เติมน้ำอย่างแต่ละเบ้าของระยะทางรูวิ่งแบบที่ 1 กับ ระยะทางรูวิ่งแบบที่ 2

จากภาพที่ 77 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันที่ใช้เติมน้ำอย่างระหว่างระยะทางรูวิ่งแบบที่ 1 กับ รูวิ่งแบบที่ 2 พบว่า ค่าความดันในการเติมน้ำอย่างเฉลี่ยรวมทั้ง 24 เบ้าของรูวิ่งแบบที่ 1 มีค่า 837.95 บาร์ ซึ่งมีค่ามากกว่า รูวิ่งแบบที่ 2 มีค่าความดันในการเติมน้ำอย่างเฉลี่ยรวมทั้ง 24 เบ้า มีค่า 794.58 บาร์ ดังนั้นรูวิ่งแบบที่ 2 เหมาะสมที่จะใช้ในออกแบบแม่พิมพ์ เพราะการไหลของยางมีความสมดุลในการเติมน้ำอย่างเข้าพร้อมกันทุกเบ้าแล้ว ความดันที่ใช้ในการเติมน้ำอย่างที่น้อยจะส่งผลให้การไหลของยางที่ไหลช้าจะไม่ทำให้เกิดความเค้นเฉือนที่สูง ไม่เกิดความร้อนที่จะทำให้ยางคงรูปและทำให้ยางไหลเข้าเต็มเบ้าชิ้นงานทุกเบ้า

2.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะรูวิ่งและทางเข้าที่เหมาะสม

ลำดับต่อมาวิเคราะห์ลักษณะรูวิ่งและทางเข้าทั้ง 12 แบบ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมกรไหลของยางจากความดันสูญเสีย เวลาในการเติมเต็ม ความเค้นเฉือนและความเร็วในการเติมน้ำ ซึ่งผลการวิเคราะห์มีดังนี้

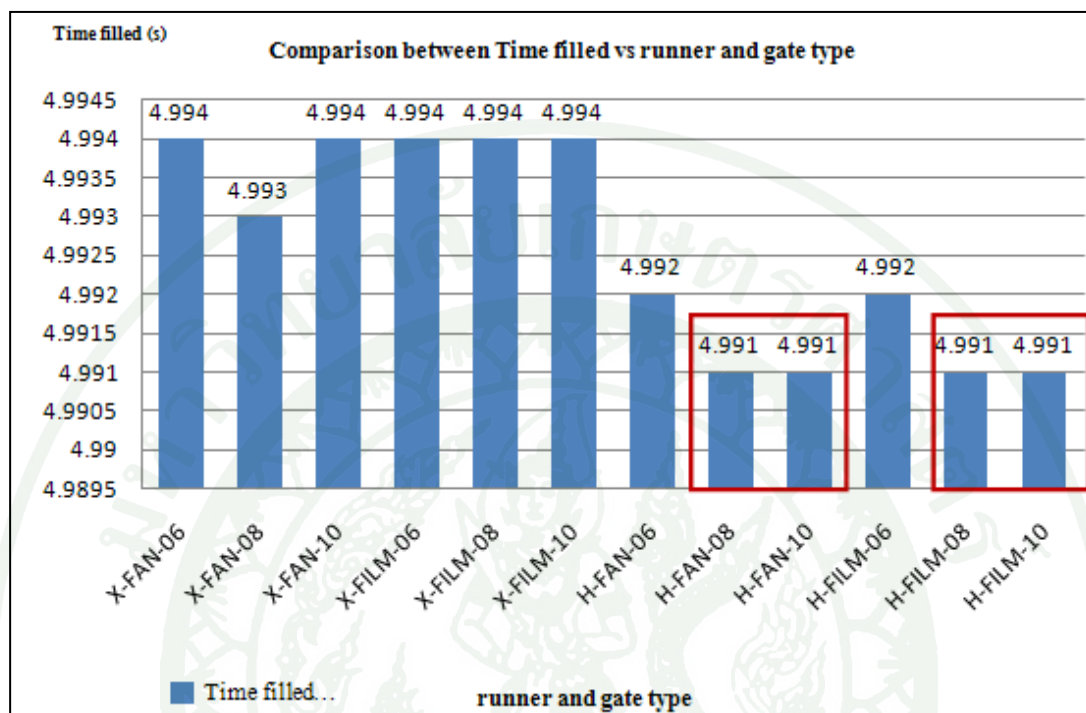
2.5.1 ผลการวิเคราะห์ความดันสูญเสีย (Pressure Loss) ที่ใช้ในการอัดส่งกับลักษณะรูปร่างและทางเข้าชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 78



ภาพที่ 78 ความดันสูญเสียที่ใช้ในการเติมยางเข้ากับรูปร่างและทางเข้าของชิ้นงาน

จากภาพที่ 78 ความดันสูญเสียที่ใช้ในการเติมเนื้อยางเข้ากับรูปร่างและทางเข้าของชิ้นงานแบบ H-Film-08 พบว่ามีค่าความดันสูญเสียที่ 531 บาร์ ซึ่งน้อยกว่าแบบอื่น ซึ่งความดันสูญเสียที่น้อยสามารถทำให้ยางไหลเต็มเบ้าชิ้นงานในแม่พิมพ์อัดส่ง โดยไม่เกิดแรงดันภายในเบ้าชิ้นงานส่งผลทำให้ยางไหลเข้าเบ้าชิ้นงานได้เต็มทุกเบ้า

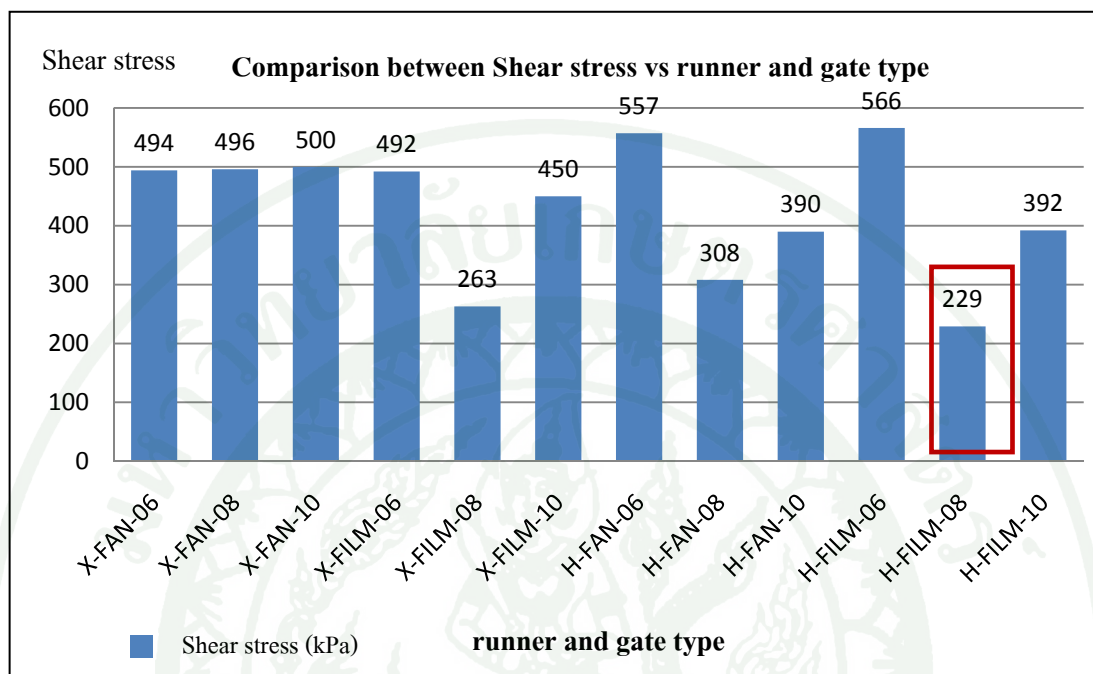
2.5.2 ผลการวิเคราะห์เวลาในการเติมเต็ม (Time Filled) ที่ใช้ในการอัดส่งกับลักษณะรูปร่างและทางเข้าชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 79



ภาพที่ 79 เวลาในการเติมเต็มที่ใช้ในการอัดส่งกับรูปร่างและทางเข้าชิ้นงาน

จากภาพที่ 79 เวลาที่ใช้ในการเติมเนื้ออย่างเข้ากับรูปร่างและทางเข้าชิ้นงาน พบว่า รูปร่างและทางเข้าทุกแบบมีเวลาใกล้เคียงไม่แตกต่างกันและไม่เกินค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งหมายถึงการไหลของยางจะไหลเข้าเต็มเบ้าชิ้นงานทุกเบ้า ถ้าใช้เวลาในการเติมเต็มมากกว่าค่าที่กำหนดหมายถึงการไหลของยางไหลเข้าไม่เต็มเบ้าชิ้นงาน และการป้อนค่าความดันฉีดสูงสุดในการจำลองน้อยเกินไปก็จะทำให้ใช้เวลานาน ส่งผลให้การไหลของยางไหลเข้าไม่เต็มเบ้าชิ้นงานได้ชิ้นงานที่มีตำหนิ หรือไม่ได้คุณภาพ

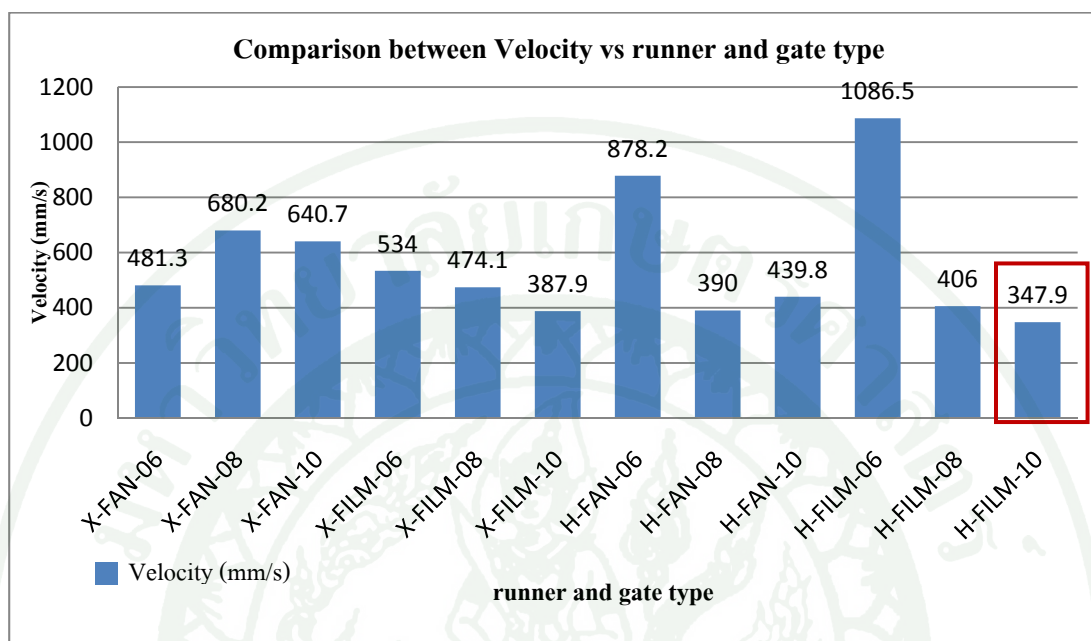
2.5.3 ผลการวิเคราะห์ความเค้นเฉือน (Shear Stress) ที่ใช้ในการอัดส่งกับลักษณะรูวิ่งและทางเข้าชิ้นงาน ดังแสดงในภาพที่ 80



ภาพที่ 80 ความเค้นเฉือนที่ใช้ในการอัดส่งกับลักษณะรูวิ่งและทางเข้าชิ้นงาน

จากภาพที่ 80 แสดงความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นในการเติมเนื้ออย่างเข้ากับรูวิ่งและทางเข้าชิ้นงานพบว่า รูวิ่งและทางเข้าแบบ H-Film-08 มีความเค้นเฉือนในการเติมเนื้ออย่างน้อยกว่า 11 แบบ ที่มีค่า 229 กิโลปาสกาล ซึ่งส่งผลทำให้ยางไหลได้ดีไม่เกิดความร้อนสะสมภายในยางซึ่งความร้อนที่เกิดอาจจะทำให้ยางคงรูปก่อนเป็นผลให้ยางไหลไม่เต็มเบ้าชิ้นงานได้ชิ้นงานยางที่มีตำหนิ หรือไม่ได้คุณภาพ การเกิดความเค้นเฉือนน้อยทำให้การไหลของยางไหลเข้าเต็มเบ้าชิ้นงานทุกเบ้า

2.5.4 ผลการวิเคราะห์ความเร็ว (Velocity) ใช้ในการอัดส่งเข้ากับรูว้างและทางเข้าชิ้นงาน
 ดังแสดงในภาพที่ 81



ภาพที่ 81 ความเร็วที่ใช้ในการอัดส่งกับรูว้างและทางเข้าชิ้นงาน

จากภาพที่ 81 แสดงความเร็วที่ใช้ในการเติมเนื้ออย่างเข้ากับรูว้างและทางเข้า พบว่า รูว้างและทางเข้าแบบ H-Film-10 ใช้ความเร็วในการเติมเนื้ออย่างน้อยกว่า 11 แบบ ที่ 347.90 มิลลิเมตรต่อวินาที ความเร็วในการเติมเนื้อน้อยทำให้ยางไหลได้สม่ำเสมอ ไม่เกิดการคงรูปการไหลของยางจะไหลเข้าเต็มเบ้าชิ้นงานทุกเบ้า และถ้าความเร็วในการไหลของยางที่มากส่งผลให้เกิดความร้อนภายในเนื้อยางทำให้ยางคงรูปก่อนเวลาที่ยางจะไหลเข้าเต็มเบ้าชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้ได้ชิ้นงานที่ไม่เต็มหรือได้ชิ้นงานที่มีตำหนิไม่ผ่าน

2.5.5 จัดอันดับลักษณะรูปร่างและทางเข้าที่เหมาะสม

นำผลจากการจำลองการไหลมาจัดอันดับรูปร่างและทางเข้าเพื่อเลือกรูปร่างและทางเข้าที่เหมาะสมที่จะนำไปผลิตแม่พิมพ์อัดส่ง แสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ตารางจัดอันดับลักษณะรูปร่างและทางเข้า

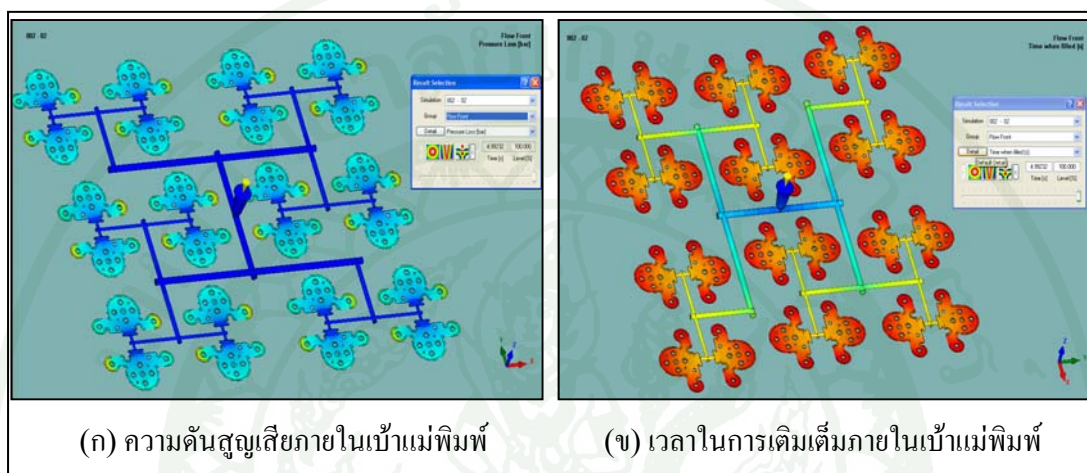
แบบรูปร่างและทางเข้า	ตัวแปร	ความดัน สูญเสีย	เวลาในการ เติมเต็ม	ความเค้นเฉือน	ความเร็วใน การเติมเนื้อ
	X-Fan-06	10	4	8	7
	X-Fan-08	7	3	9	10
	X-Fan-10	6	4	10	9
	X-Film-06	9	4	7	8
	X-Film-08	8	4	2	6
	X-Film-10	5	4	6	2
	H-Fan-06	12	2	11	11
	H-Fan-08	3	1 (ดีมาก)	3	3
	H-Fan-10	2	1 (ดีมาก)	4	5
	H-Film-06	11	2	12	12
	H-Film-08	1 (ดีมาก)	1 (ดีมาก)	1 (ดีมาก)	4
H-Film-10	4	1 (ดีมาก)	5	1 (ดีมาก)	

หมายเหตุ 1 = ดีมาก 6 = พอใช้ 12 = ไม่ดี

ผลการจัดอันดับลักษณะรูปร่างและทางเข้าจากตารางที่ 12 พบว่า รูปร่างและทางเข้าแบบ H-Film-08 มีค่าความดันสูญเสีย เวลาในการเติมเต็ม และความเค้นเฉือนที่ใช้ในการอัดส่งดีที่สุด รูปร่างและทางเข้า แบบ H-Film-10 มีค่าความเร็วในการเติมเนื้อดีที่สุด จากผลจัดอันดับลักษณะรูปร่างและทางเข้าที่ได้จากการจำลองการไหล ทำให้สรุปได้ว่า ลักษณะรูปร่างและทางเข้าที่เหมาะสมที่สุด คือ H-Film-08 อย่างไรก็ตามค่าที่ให้ผลไม่ดี เช่น ค่าความเร็วในการเติมเนื้ออย่าง ที่ใช้เวลามากกว่าแบบ H-Film-10 ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพโดยรวมน้อยมาก จึงนำมาใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ อัดส่งต่อไป

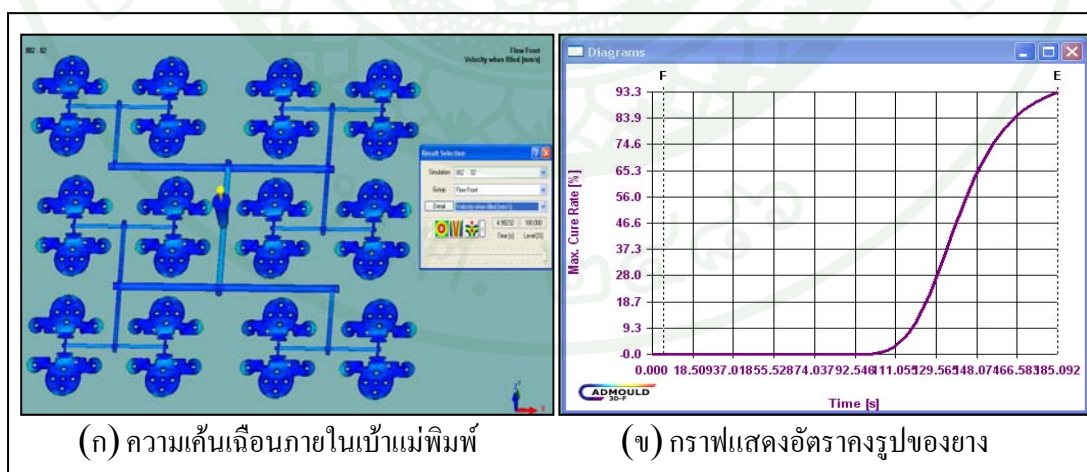
2.5.6 ลักษณะรูปร่างและทางเข้าที่นำไปผลิตแม่พิมพ์อัดส่ง

รูปร่างและทางเข้าที่นำไปผลิตแม่พิมพ์อัดส่งเป็นแบบ H-Film-08 ซึ่งได้วิเคราะห์จำลองพฤติกรรมการไหลของยางจากความดันสูญเสีย เวลาในการเติมเต็ม ความเค้นเฉือน และกราฟแสดงการคงรูปของยาง ดังแสดงภาพที่ 82 และ 83



ภาพที่ 82 ลักษณะรูปร่างและทางเข้าแบบ H-Film-08 ที่ได้จากการจำลองการไหลในส่วน

(ก) ความดันสูญเสียภายในเบ้าแม่พิมพ์ (ข) เวลาในการเติมเต็มภายในเบ้าแม่พิมพ์



ภาพที่ 83 ลักษณะรูปร่างและทางเข้าแบบ H-Film-08 ที่ได้จากการจำลองการไหลในส่วน

(ก) ความเค้นเฉือนภายในเบ้าแม่พิมพ์ (ข) กราฟแสดงอัตราคงรูปของยาง

2.5.7 การคำนวณแรงปิดแม่พิมพ์

การคำนวณหาขนาดของแรงปิดแม่พิมพ์จะหาได้จากสูตรที่คำนวณดังนี้

$$F = \frac{A \times P}{100} \quad (23)$$

เมื่อ F = แรงปิดแม่พิมพ์ (กิโลนิวตัน)

A = พื้นที่ภาพฉายของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)

P = ความดันภายในเบ้า (บาร์)

พื้นที่ภาพฉายของชิ้นงานแบบรูว์ิงและทางเข้าใช้แบบ H-Film-08 มีพื้นที่ 216.14 ตารางเซนติเมตร

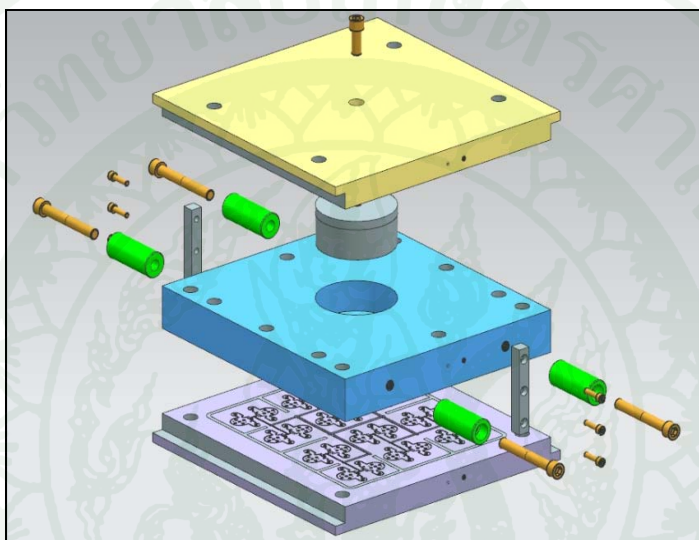
ความดันภายในเบ้าได้จากการจำลองการไหลที่นำมาใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์อัดส่ง คือ รูว์ิงและทางเข้า แบบ H-Film-08 ความดันสูญเสียภายในเบ้ามีค่า 531 บาร์

$$\begin{aligned} &= \frac{216.14 \times 531}{100} \\ &= 1,147.7 \text{ กิโลนิวตัน} \\ &= 11.47 \text{ ตัน} \approx 12 \text{ ตัน} \end{aligned}$$

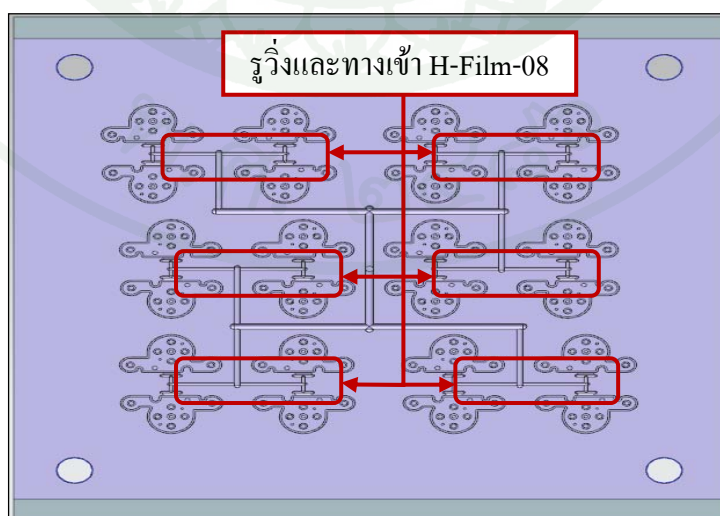
ดังนั้น จะต้องใช้เครื่องอัดส่งที่เกิน 12 ตันขึ้นไป ที่จะสามารถอัดส่งยางให้ไหลผ่านเข้าเบ้าแม่พิมพ์อัดส่งได้

3. ผลออกแบบแม่พิมพ์และผลิตแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบผลิต

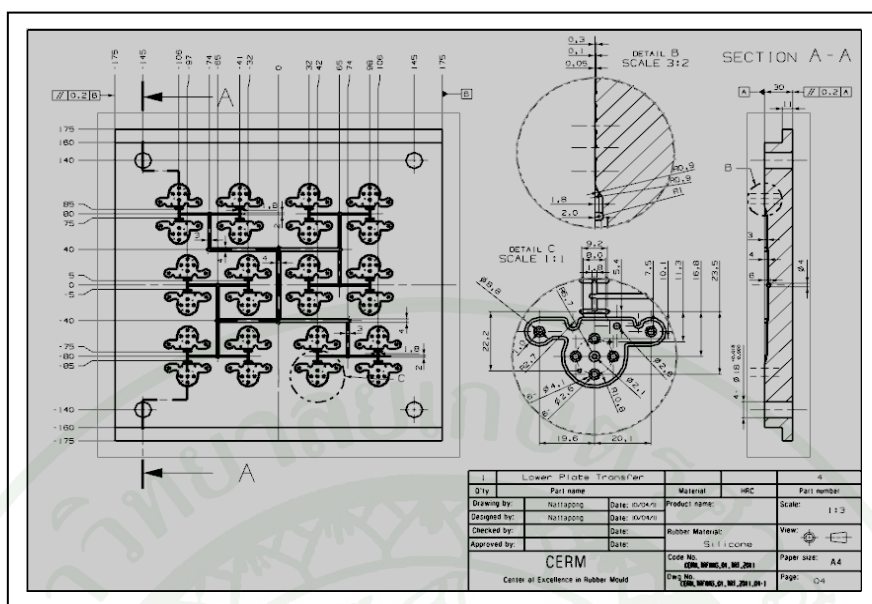
ทำการออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้ลักษณะรูปร่างและทางเข้าแบบ H-Film-08 ซึ่งเป็นแบบที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของยางตามสมการ มาเข้าสู่กระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูปให้เป็นแบบ 2 มิติ และ 3 มิติที่ใช้ในการผลิตจริง จำนวนของเบ้าขึ้นงานภายในแม่พิมพ์ทั้งหมด 24 เบ้า ดังแสดงภาพที่ 84 ถึง 93



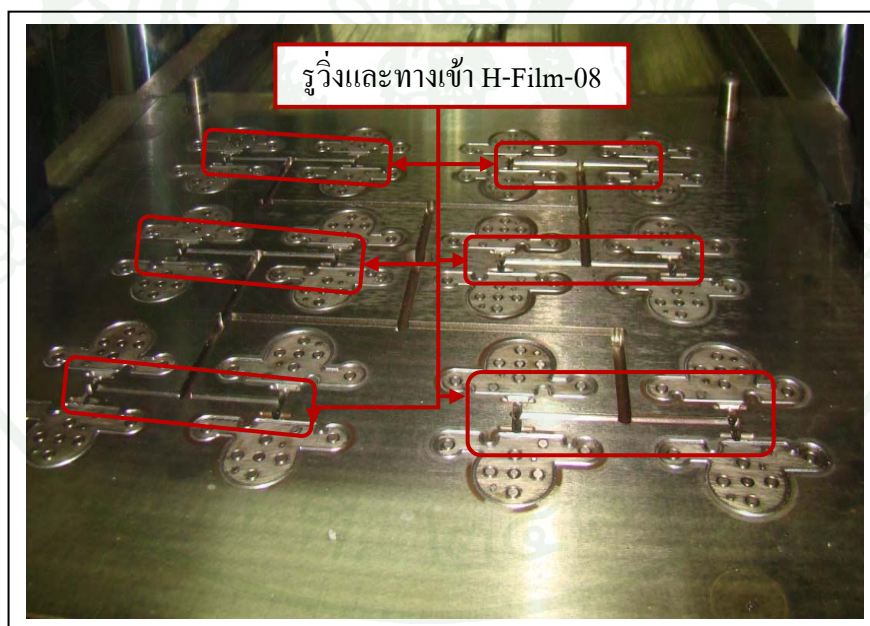
ภาพที่ 84 แบบ 3 มิติของแม่พิมพ์อัดส่งผลิตภัณฑ์ปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูป



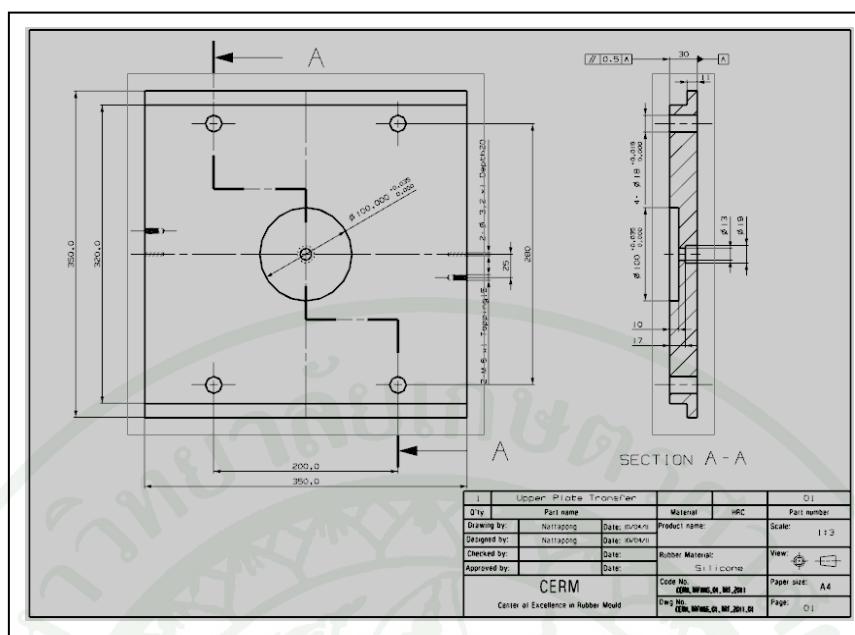
ภาพที่ 85 แบบรูปร่าง ทางเข้า และขนาดทางเข้า ของแม่พิมพ์จำนวน 24 เบ้า



ภาพที่ 86 แบบแม่พิมพ์แผ่นล่างจำนวนเข้าแม่พิมพ์ 24 ใบ



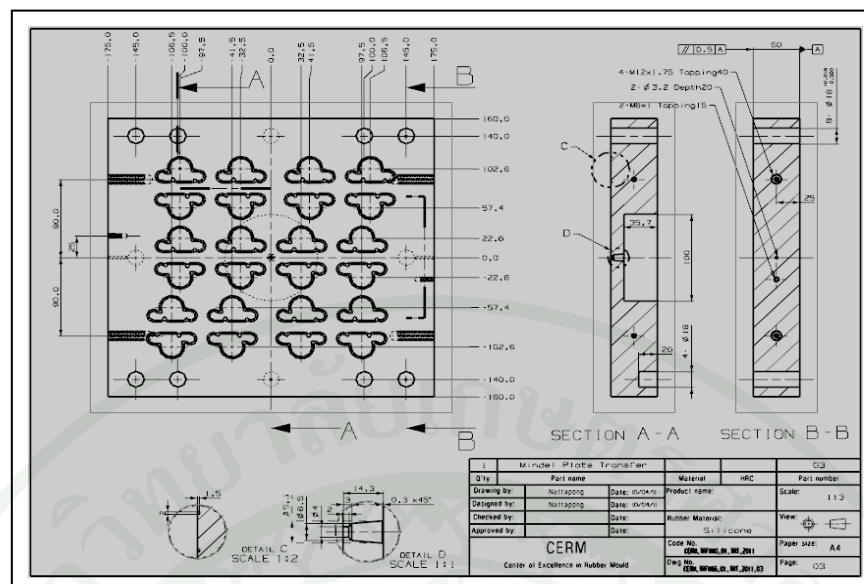
ภาพที่ 87 ลักษณะแม่พิมพ์แผ่นบนที่ได้จากระบวนการผลิตแม่พิมพ์



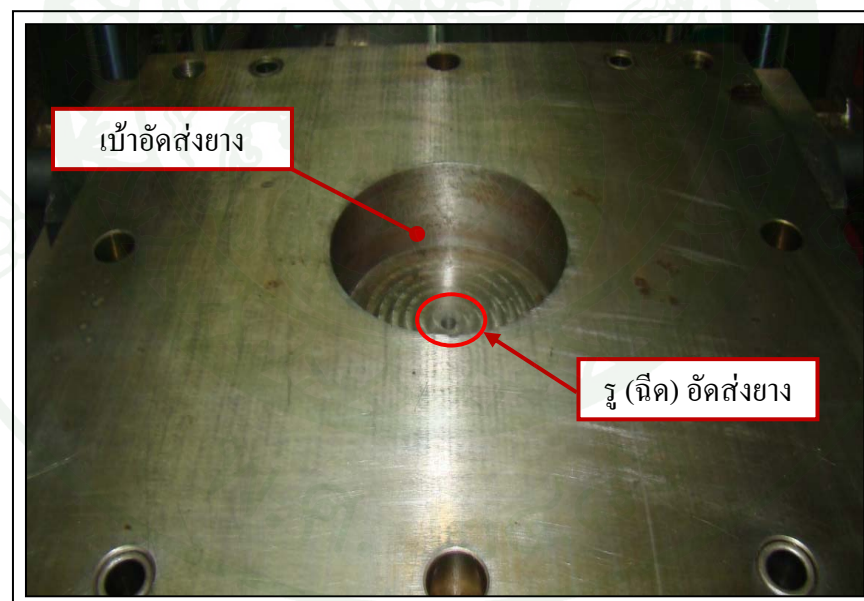
ภาพที่ 88 แบบแม่พิมพ์แผ่นบนจำนวนเบ้าแม่พิมพ์ 24 เบ้า



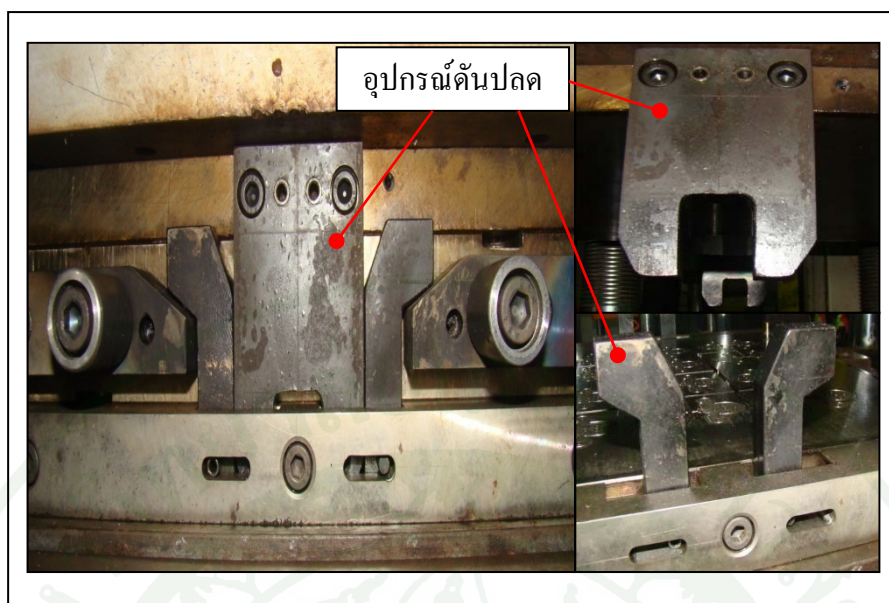
ภาพที่ 89 ลักษณะแม่พิมพ์แผ่นบนที่ได้จากกระบวนการผลิตแม่พิมพ์



ภาพที่ 90 แบบแม่พิมพ์แผ่นกลางจำนวนเบ้าแม่พิมพ์ 24 เบ้า



ภาพที่ 91 ลักษณะแม่พิมพ์แผ่นกลางที่ได้จากกระบวนการผลิตแม่พิมพ์



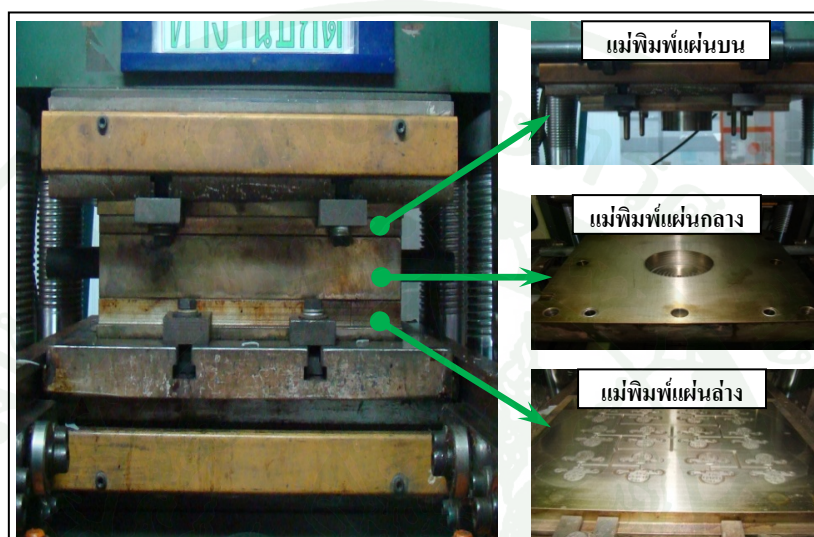
ภาพที่ 92 ลักษณะอุปกรณ์ดันปลดให้แม่พิมพ์สมบูรณ์



ภาพที่ 93 ลักษณะแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่สมบูรณ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตแม่พิมพ์

4. ผลการทดสอบขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ชิ้นงานยางด้วยแม่พิมพ์อัดส่ง

4.1 ทำการติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องอัดส่งยาง แสดงในภาพที่ 94 และการปรับเงื่อนไขค่าต่างๆ ที่ใช้ในการอัดส่งขึ้นรูป แสดงในภาพที่ 95



ภาพที่ 94 การติดตั้งแม่พิมพ์และส่วนประกอบของแม่พิมพ์

กำหนดค่าพารามิเตอร์ของเครื่องอัด โดยปรับตั้งความดันอัด 180 บาร์ อุณหภูมิแม่พิมพ์ทั้งแผ่นบนและแผ่นล่างที่ 180 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการคงรูปร่าง 180 วินาที โดยอุ่นยางคอมพาวด์ก่อนใส่ลงในเบ้าอัดส่งประมาณ 35 องศาเซลเซียส ดังแสดงภาพที่ 95

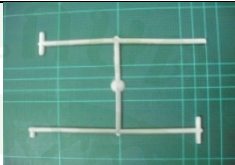
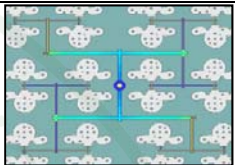
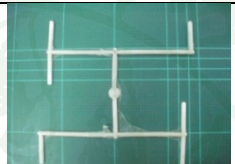
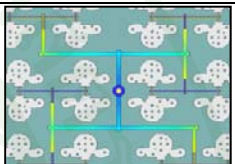
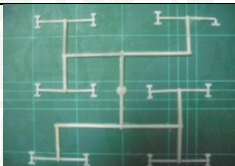
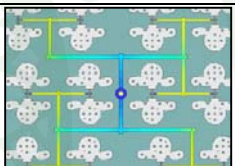
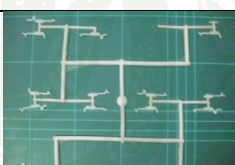
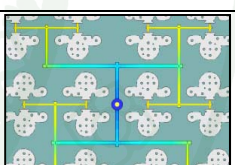
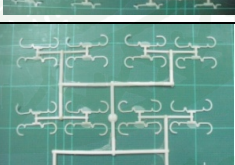
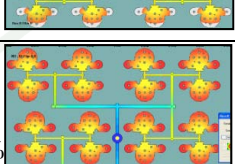


ภาพที่ 95 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เครื่องอัดส่งยางและแม่พิมพ์

4.2 ทดลองการอัดส่งขึ้นรูปชิ้นงานยาง

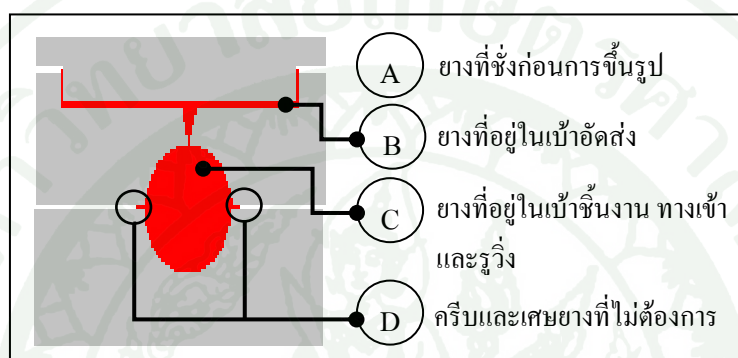
เมื่อทำการติดตั้งแม่พิมพ์และกำหนดเงื่อนไขในการอัดส่งขึ้นรูป จากนั้นบันทึกผลลักษณะการไหลที่ได้จากแม่พิมพ์อัดส่ง ดังแสดงตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ขั้นตอนการอัดส่งขึ้นรูปชิ้นงาน

ลำดับขั้นตอนการอัดขึ้นรูป	น้ำหนักยาง (กรัม) เปรียบเทียบ (เปอร์เซ็นต์)	ลักษณะการไหลของยาง คอมพาวด์ในแม่พิมพ์ อัดส่ง จากการใส่น้ำหนัก ยางในแต่ละครั้ง	ลักษณะการไหลของยาง คอมพาวด์จากการจำลอง การไหลของเวลาเริ่มต้น การไหลถึงเวลาสิ้นสุด (เปอร์เซ็นต์)
1. เตรียมแผ่นยางคอมพาวด์ ที่ใช้ในการอัดส่งตาม น้ำหนักที่ต้องการ	10.07 27.58 %		50 % 
	14.98 41.04 %		60 % 
2. นำยางคอมพาวด์ที่เตรียม ไว้ในข้อ 1. ใส่งลงในเบ้า แม่พิมพ์อัดส่ง	20.26 55.50 %		70 % 
	25.22 69.09 %		80 % 
3. ทำการปิดแม่พิมพ์อัดส่ง ยางคอมพาวด์และคงรูป ยางตามเงื่อนไขที่ได้ กำหนดไว้	30.15 82.52 %		90 % 
	36.50 100 %		100 % 

จากตารางที่ 13 แสดงถึงลักษณะการไหลของยางคอมพาวด์ที่ไหลเข้าในแม่พิมพ์อัดส่ง พบว่าการไหลในแต่ละช่วงมีการไหลที่สมดุล มีความสอดคล้องกับผลของการจำลองการไหลของยาง

ผลการทดสอบอัดส่งขึ้นรูปที่แสดงถึงลักษณะภายในที่เกิดจากการอัดส่ง ดังภาพที่ 96 และตารางที่ 14 แสดงถึงน้ำหนักของยางคอมพาวด์ในตำแหน่งต่างๆ และสัดส่วนของเสียที่เกิดจากการอัดส่ง



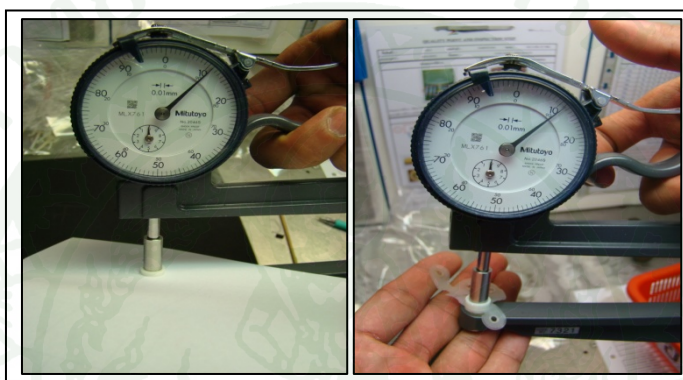
ภาพที่ 96 ภาพตัดภายในแม่พิมพ์บ็อกตำแหน่งของยางคอมพาวด์

ตารางที่ 14 น้ำหนักของยางคอมพาวด์ในตำแหน่งต่างๆ และของเสียที่เกิดขึ้นจากการอัดส่งขึ้นงาน

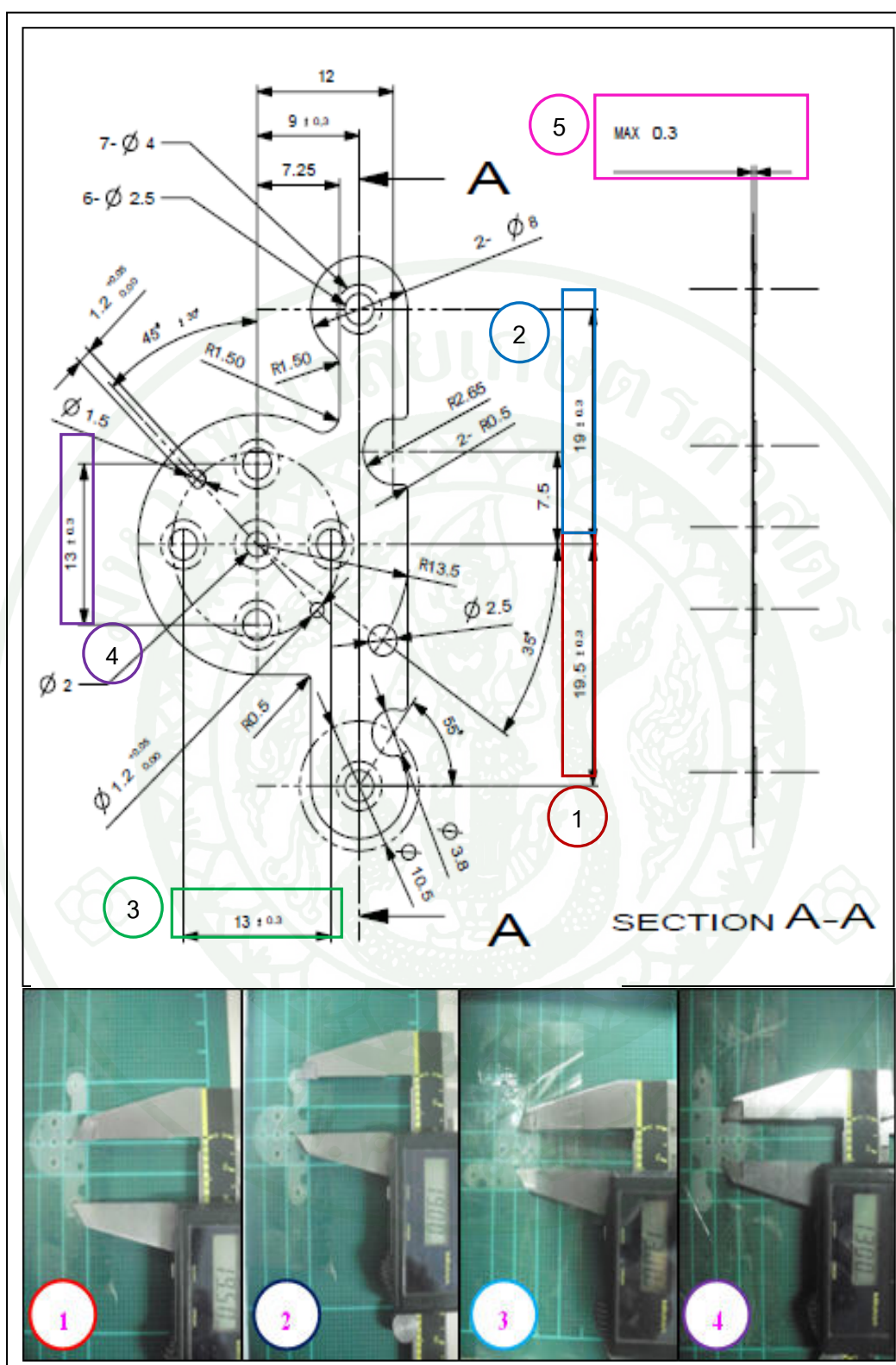
A (กรัม)	C (กรัม)	B + C (กรัม)	D (กรัม)	สัดส่วนของเสีย (%)
10.07	8.16	10.04	0.03	0.30
14.98	12.8	14.94	0.04	0.26
20.26	17.91	20.2	0.06	0.30
25.22	22.92	25.18	0.04	0.16
29.94	27.37	29.90	0.04	0.13
35.01	32.97	34.96	0.05	0.14

ผลการอัดส่งข้างขึ้นรูปแสดงลักษณะภายในที่เกิดจากการอัดส่ง แสดงดังภาพที่ 96 และ ตารางที่ 14 แสดงถึงน้ำหนักของยางคอมพาวด์ในตำแหน่งต่างๆ และของเสียที่เกิดจากการอัดส่ง ขึ้นงาน พบว่า ของเสียที่เกิดขึ้นน้อยมากในด้านการเกิดเศษยางที่ตัวขึ้นงาน โดยที่มากที่สุดอยู่ที่ 0.30 เปอร์เซ็นต์ จากการอัดส่งขึ้นรูปทั้งหมด ซึ่งปริมาณของเสียลดลง

4.3 สอบเทียบเครื่องมือวัดความหนาขึ้นงานระหว่างความหนาขนาดกระดาศมาตรฐาน A4 (80 กรัม) กับความหนาขึ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปอัดส่งขึ้นงาน ดังแสดงภาพที่ 97 และ 98



ภาพที่ 97 การตรวจวัดความหนาของขนาดกระดาศมาตรฐาน A4 เปรียบเทียบกับความหนาของขึ้นงาน



ภาพที่ 98 ตำแหน่งระยะที่ตรวจสอบชิ้นงานกับแบบชิ้นงาน 2 มิติ

ตารางการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปแม่พิมพ์อัดส่ง เปรียบเทียบกับแบบชิ้นงาน 2 มิติ ในตำแหน่งที่ตรวจวัดสำหรับชิ้นงาน ดังแสดงตารางที่ 15

ตารางที่ 15 การเปรียบเทียบในตำแหน่งที่ตรวจรับชิ้นงานกับแบบชิ้นงาน

ตารางการตรวจสอบชิ้นงาน			
ตำแหน่งที่ ตรวจสอบ	ระยะที่กำหนด จากแบบ 2 มิติ (มิลลิเมตร)	ระยะที่วัด จากชิ้นงาน (มิลลิเมตร)	ระยะ การคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)
1	19.50 ± 0.3	19.60	+ 0.10
2	19.00 ± 0.3	19.10	+ 0.10
3	13.00 ± 0.3	13.10	+ 0.10
4	13.00 ± 0.3	13.10	+ 0.10
5	0.30 ± 0.05	0.31	+ 0.01
ความหนาตลอดชิ้นงาน	0.10 ± 0.05	0.11	+ 0.01

ผลการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ชิ้นงานปั๊มกดภายในกล้องถ่ายรูปกับแบบผลิตภัณฑ์ชิ้นงานปั๊มกดภายในกล้องถ่ายรูป 2 มิติ พบว่า ขนาดและระยะที่วัดจากชิ้นงานเปรียบเทียบกับในแบบ 2 มิติ ในตำแหน่งที่ตรวจสอบ ที่ 1 2 3 4 5 และความหนาตลอดชิ้นงาน อยู่ในค่าพิสัยความเผื่อตามแบบ 2 มิติที่ได้กำหนด จากนั้นนำผลที่ได้มาเขียนผลการเลือกรูปแบบที่จะนำมาผลิตแม่พิมพ์ ซึ่งแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ขั้นตอนการเลือกรูปแบบที่ผลิตแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูป

ขั้นตอนการเลือกรูปร่างแบบ เอช ทางเข้าแบบ ฟิล์ม และขนาดทางเข้า 8 มิลลิเมตร (H-Film-08) ที่ใช้ผลิตแม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูป	
วิธีการกำหนดการจำลองการไหลของยาง	วิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองการไหลของยาง
1. ตำแหน่งทางเข้าของยางอยู่ตำแหน่งที่ 2	ค่าความดันสูญเสีย ค่าความเค้นเฉือน และความเร็ว น้อยกว่าตำแหน่งอื่น เครื่องอัดส่งไม่ต้องใช้ความดัน ที่มาก ความเค้นเฉือน และความเร็วในเดิมเนื้อยางที่น้อย ก็จะไม่ทำให้เกิดความร้อนภายในยางที่จะทำให้ยางสุก ก่อนที่จะเต็มเบ้าขึ้นงาน
2. รูปร่างรูปร่างแบบที่ 2 ที่ไม่สมดุลทางกายภาพ	การไหลของยางจะไหลเข้าสมดุลกันทุกเบ้าขึ้นงาน และความดันในการเติมเนื้อยางน้อยกว่ารูปร่างแบบที่ 1 ที่จะใช้ความดันที่น้อยที่จะทำให้ขึ้นงานเต็มเบ้า และ ไม่เกิดความร้อนที่จะทำให้ยางสุกก่อนที่จะเต็มเบ้าขึ้นงาน
3. รูปร่างแบบ H ทางเข้าแบบ Film ขนาดกว้าง 8 มิลลิเมตร	ความดันสูญเสียที่น้อยสามารถทำให้ยางไหลเต็มเบ้า ขึ้นงาน เวลาที่ใช้ในการเติมเนื้ออยู่ในเวลาที่ทำให้ขึ้นงาน ไหลเต็มเบ้า ถ้าใช้เวลาเกินกว่าที่กำหนดขึ้นงานก็จะไหล ไม่เต็มเบ้าขึ้นงาน ความเค้นเฉือนน้อยกว่าแบบอื่น ก็จะ ไม่เกิดความร้อนภายในยางที่จะทำให้ยางสุก เป็นสาเหตุ ที่ทำให้ขึ้นงานยางไหลไม่เต็มเบ้าขึ้นงาน ความเร็วใน การเติมเนื้อก็อยู่ในเกณฑ์ที่น้อยถึงไม่น้อยที่สุด จะเป็น สาเหตุที่ทำให้ขึ้นงานยางไหลไม่เต็มเบ้าขึ้นงาน

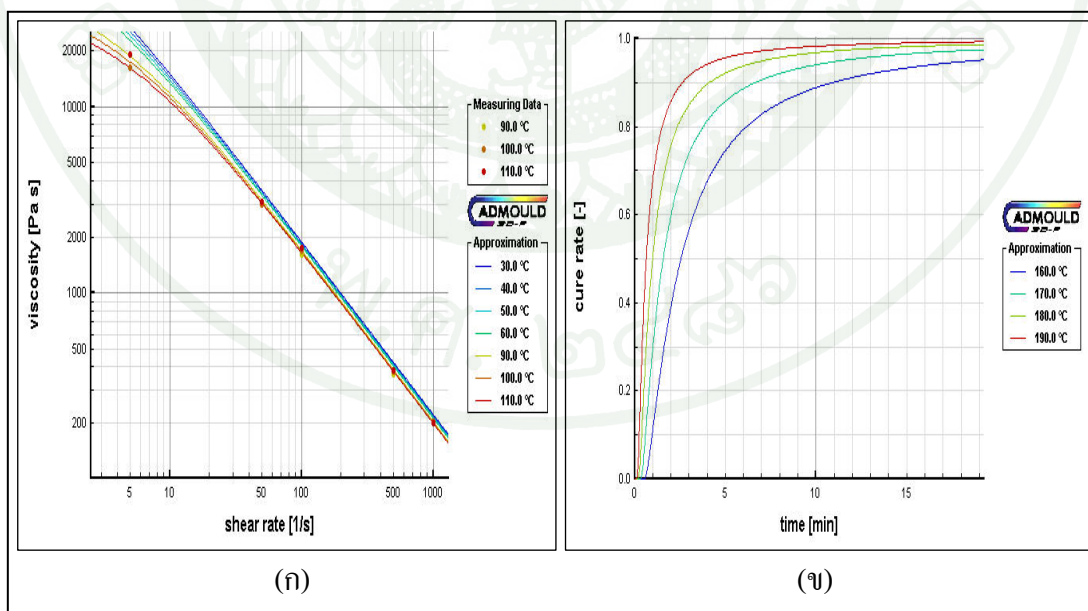
ผลการวิเคราะห์แบบรูปร่างและทางเข้าที่เหมาะสม เปรียบเทียบแบบทั้ง 12 แบบ แบบ H-Film-08 มีค่าความดันสูญเสีย และความเค้นเฉือนน้อยกว่าแบบอื่น เมื่อนำมาจัดอันดับอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม จึงนำไปสร้างเป็นแม่พิมพ์อัดส่ง ต่อจากนั้นนำแม่พิมพ์ที่ได้จากการผลิตมาอัดส่งขึ้นรูป ได้ผลิตลักษณะยางปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูป และนำผลิตภัณฑ์ยางแผ่นปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูปมาทำการตรวจสอบขนาด พบว่าอยู่ในค่าที่แบบขึ้นงาน 2 มิติ กำหนด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

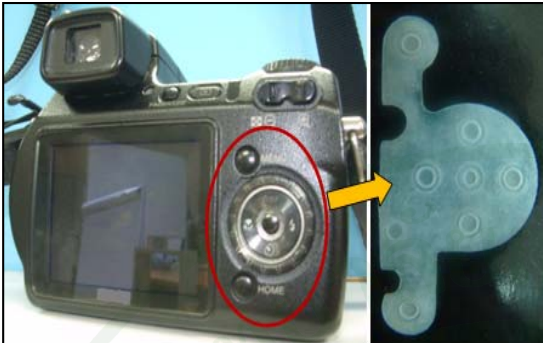
ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์แบบอัดสังชนิดหลายเบ้าที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่มีความเที่ยงตรงสูง ซึ่งเป็นการออกแบบขึ้นงานแผ่นยางกดป้อนภายในถ้อยถ่ายรูปที่มีขนาดเล็กและบาง จึงนำเสนอวิธีการออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและผลิตมาช่วยในการขึ้นรูปขึ้นงาน ซึ่งสามารถสรุปผลได้ตามขั้นตอนดังนี้

1. นำยางซิลิโคน 70 ชอร์ เอ ไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกล 5 ประเภท คือ
 - ค่าความหนาแน่น มีค่า 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
 - ค่าความจุความร้อนจำเพาะ มีค่า 1.783 จูลต่อกรัม-องศาเซลเซียส
 - ค่าการนำความร้อน มีค่า 0.22 วัตต์ต่อเมตร-องศาเคลวิน
 - ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือน ที่ 3 อุนหนุมิของยาง ดังแสดงภาพที่ 99(ก)
 - ค่าการคงรูปของยาง เพื่อวัดค่าอัตราการคงรูปของยาง ดังแสดงภาพที่ 99(ข)

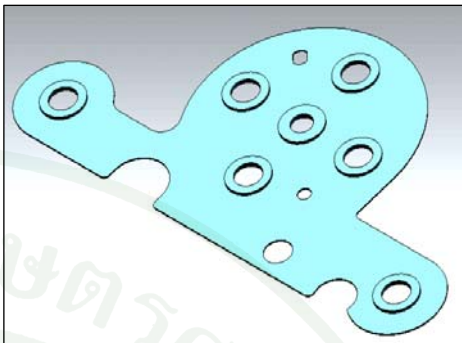


ภาพที่ 99 กราฟ (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของยางคอมพาวด์กับอัตราเฉือน และ
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคงรูปของยางคอมพาวด์กับเวลา

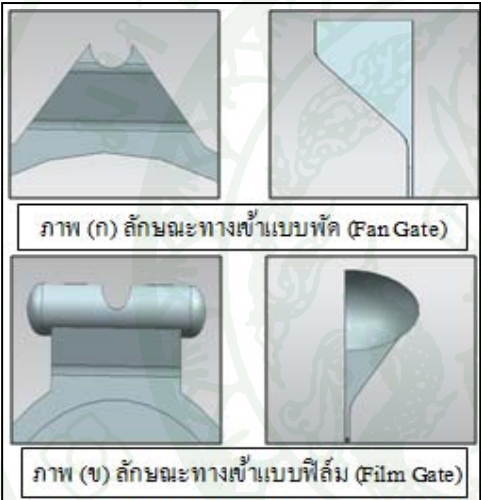
2. ขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่นำมาวิจัยและการวิจัย แสดงภาพที่ 100



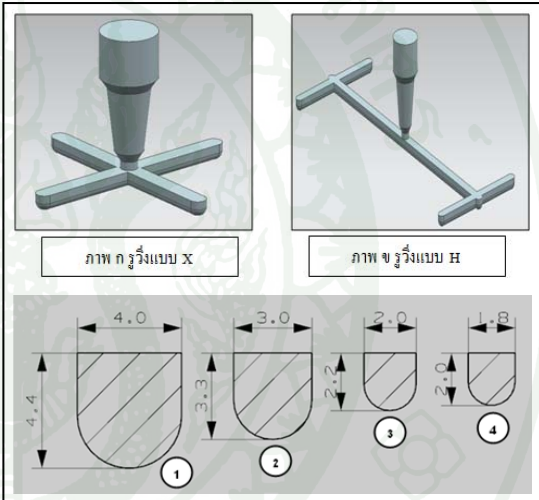
1. คัดเลือกผลิตภัณฑ์ที่นำมาศึกษาการวิจัย



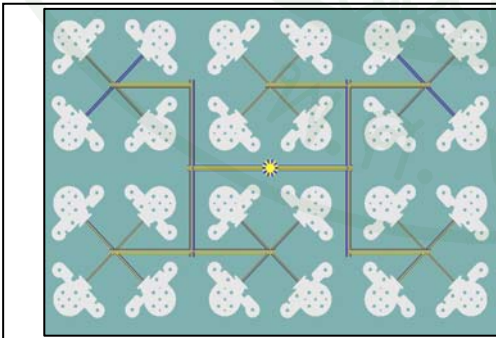
2. ออกแบบผลิตภัณฑ์เป็นแบบ 3 มิติ



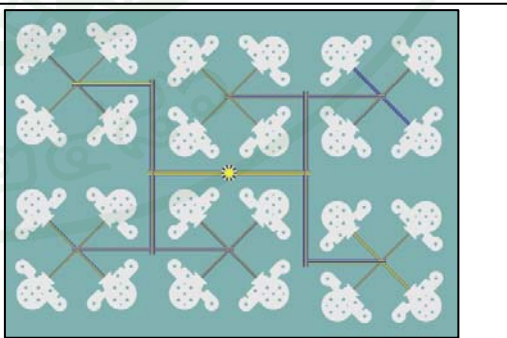
3. ออกแบบทางเข้าที่ใช้ในการวิจัย



4. ออกแบบรูวิ่งที่ใช้ในการวิจัย



(ก) แบบที่ 1 ระยะทางรูวิ่งที่สมดุลทางกายภาพ

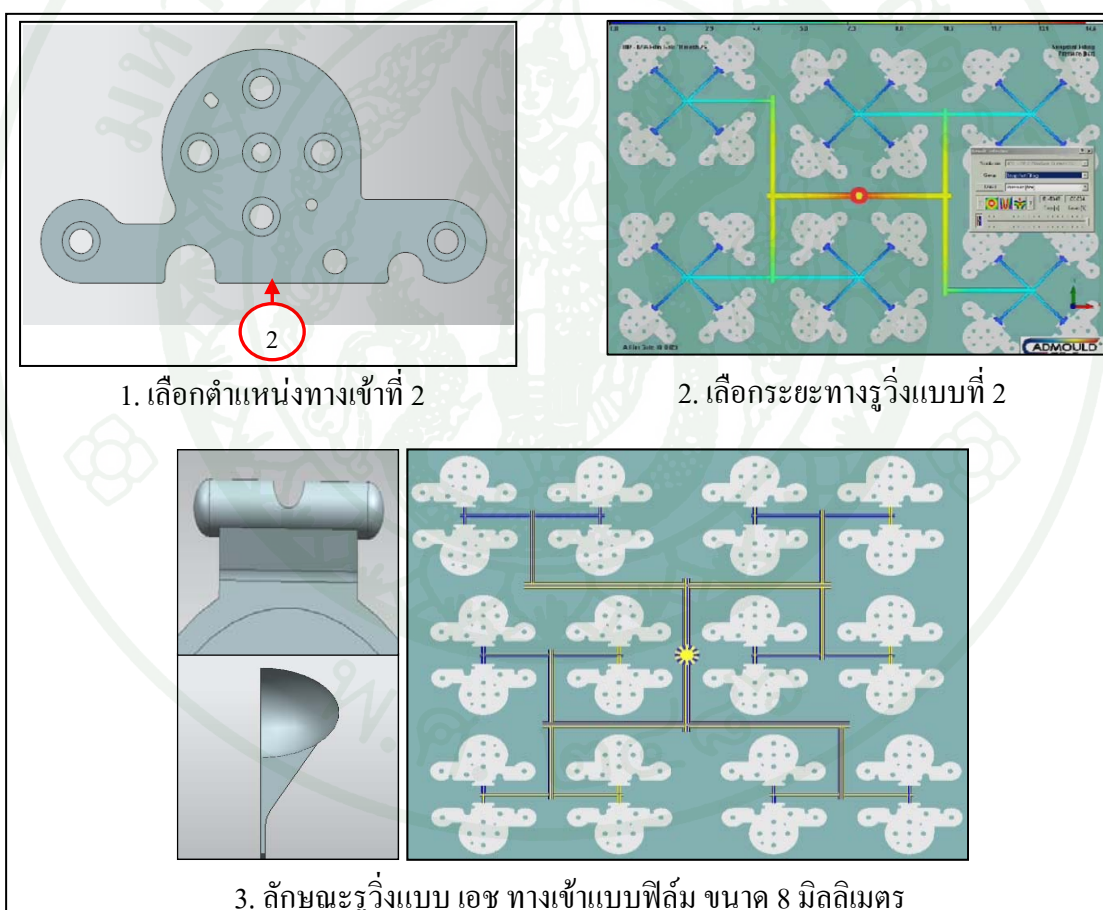


(ข) แบบที่ 2 ระยะทางรูวิ่งที่ไม่สมดุลทางกายภาพ

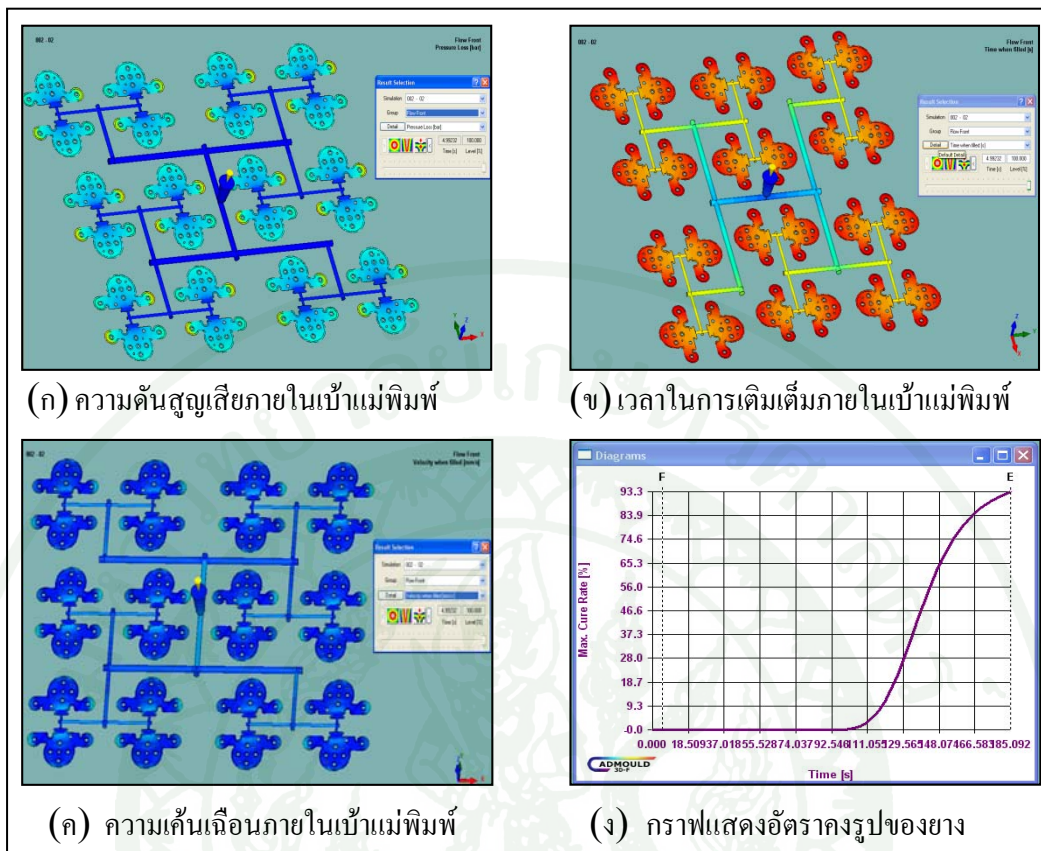
5. ออกแบบทางวิ่ง แบบที่สมดุล กับไม่สมดุล

ภาพที่ 100 ขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่นำมาวิจัยและการวิจัย

3. ผลการวิเคราะห์พบว่า ทางเข้าที่ตำแหน่งที่ 2 มีค่าดันสูญเสีย ค่าความเค้นเฉือน และความเร็ว น้อยกว่าที่ตำแหน่งอื่น มีผลให้การไหลตัวของยางไหลได้ดีกว่า รูปร่างไม่สมดุลทางกายภาพแบบที่ 2 มีความสมดุลในการเติมเนื้อยางใกล้เคียงกันในทุกเบ้าของแม่พิมพ์ ลักษณะทางเข้าแบบฟิล์มที่มีขนาดความกว้าง 8.00 มิลลิเมตร โดยมีความหนาเท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร ส่วนรูปร่างเป็นแบบบอลโนส ที่มีสัดส่วนความกว้างต่อความสูงเท่ากับ 0.90 ดังแสดงภาพที่ 101 และขั้นตอนต่อมาใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการจำลองวิเคราะห์การไหล ผลการวิจัยพบว่า ซึ่งเกิดความดันสูญเสียภายในเบ้าแม่พิมพ์ที่ 531 บาร์ ความเค้นเฉือนของยางที่ไหลเข้าเบ้าขึ้นงานที่ 229 กิโลปาสกาล ความเร็วของยางที่ไหลเข้าเบ้าขึ้นงานที่ 406 มิลลิเมตรต่อวินาที และเวลาในการเติมเนื้อ 4.99 วินาที อุณหภูมิการคงรูปยาง 180 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 102

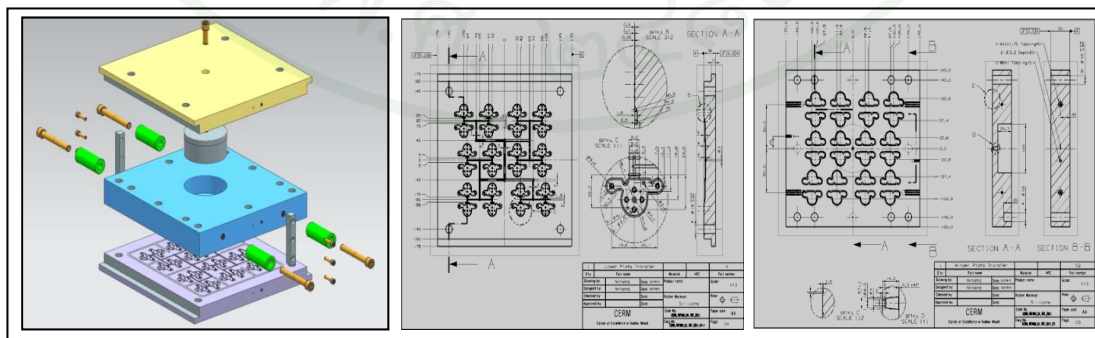


ภาพที่ 101 ตำแหน่งทางเข้า ระยะทางรูปร่าง ลักษณะทางเข้า และขนาดทางเข้าที่เลือกในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์อัดส่ง



ภาพที่ 102 ผลการจำลองการไหลของรูวี่งและทางเข้าแบบ H-Film-08 ที่ใช้ในการออกแบบและการผลิตแม่พิมพ์อัดส่ง

ออกแบบแม่พิมพ์อัดส่งด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ และผลิตแม่พิมพ์อัดส่งแสดงดังภาพที่ 103 และ 104



ภาพที่ 103 ออกแบบแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตแม่พิมพ์ 2 มิติ และ 3 มิติ



ภาพที่ 104 แม่พิมพ์อัดส่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดในกลึงถ่ารูปที่ได้จากการผลิต

ผลการจำลองสอดคล้องกันกับผลการทดสอบขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ด้วยแม่พิมพ์อัดส่งได้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพที่สมบูรณ์ มีขนาดเท่าตามแบบที่กำหนด มีสัดส่วนของเสียที่เป็นครีบลดลงจากการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดขึ้นรูปจากของเดิม ดังนั้นจะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาการผลิตแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ให้มีคุณภาพที่สูงขึ้น

ข้อเสนอแนะ

จากโครงการวิจัยดังกล่าว มีข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในส่วนที่จะดำเนินการต่อไปดังนี้

1. ควรมีการศึกษาถึงผลกระทบและปัจจัยด้านอื่นๆ เช่น ปัญหาด้านการจ้างงานและบิดตัวเพิ่มเติมจากผลกระทบที่เกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ภายนอกเหนือจากรอยประสาน
2. ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบกับกรณีศึกษารูปด้วยแม่พิมพ์เลือกเปรียบเทียบกับการอัดสังขึ้นรูปสำหรับผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูป มาเป็นกรณีศึกษา
3. ควรมีการศึกษาวิธีเพิ่มจำนวนเข้าชิ้นงานในการผลิต เนื่องจากในบางกรณีอาจถูกจำกัดด้วยระยะของเสาของเครื่องฉีด ทำให้การฉีดขึ้นรูปเป็นแบบชั้นเดียว ผลผลิตที่ได้อาจจะได้น้อยหรือไม่ทันต่อความต้องการของตลาด ดังนั้น ควรทดลองการออกแบบ การจำลองการไหลการฉีดขึ้นรูปแบบสองชั้น และผลิตแม่พิมพ์ฉีดสองชั้นจะได้ผลผลิตที่มากและรวดเร็วขึ้นทันต่อความต้องการของตลาด
4. ควรมีการศึกษาจัดขนาดพื้นที่ในบ่ออัดสังให้สอดคล้องกับอัตราการไหลของยางที่จะทำการอัดสัง เพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการที่จะนำมาใช้ในการผลิตแม่พิมพ์อัดสังต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชาลี ตระการกุล. 2539. การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

นุชนาฏ ฌ ระนอง. 2542. การทดสอบสมบัติทางกายภาพของยาง. เอกสารประกอบการบรรยาย ในการฝึกอบรม โครงการพัฒนาผู้ประกอบการอุตสาหกรรมรุ่นใหม่ หลักสูตรการจัดการผลิตภัณฑ์ยางโดยเทคนิคการใช้แม่พิมพ์, กรุงเทพฯ.

ดำรง ไชยธีรานุวัฒน์ศิริ. 2540. การออกแบบแม่พิมพ์พลาสติก. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

พงษ์ธร แซ่ฮุย. 2547. ยาง ชนิด สมบัติ และการใช้งาน. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สวทช. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

พรพรรณ นิธิอุทัย. 2540. เทคนิคการออกสูตรยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, ปัตตานี.

มนัส แซ่ด่าน. 2538. รีโอโลยีเบื้องต้น. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, ปัตตานี.

วรวิทย์ อึ้งภากรณ์. 2525. การออกแบบผลิตภัณฑ์ด้วยโปรแกรมเชิงวิศวกรรม. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

วราภรณ์ ขจรไชยกุล. 2552. ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักนายกรัฐมนตรี, กรุงเทพฯ.

สมบัติ พุทธจักร. 2545. สมบัติเชิงฟิสิกส์และเชิงรีโอโลยีของยาง. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี, ปัตตานี.

เสกสรรค์ วินยางค์กุล. 2552. การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง. คณะเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย, เชียงราย.

บริษัท เอส เค โพลีเมอร์ จำกัด. 2553. เอกสารภายใน. บางขุนเทียน, กรุงเทพฯ.

ประพัทธ์ คุ่มปลื้มวงศ์. 2553. การเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันไทย-เยอรมัน. 2553. เอกสารภายใน. กระทรวงอุตสาหกรรม, ชลบุรี.

สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร. 2552. สถิติยางประเทศไทย. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์,
กรุงเทพฯ.

สุนทร รอดวิสัย. 2553. การออกแบบระบบทางวิ่งเย็นสำหรับแม่พิมพ์ฉีดยางหลายเบ้าชิ้นงาน
แหวนยางที่มีความละเอียดสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมบัติ พุทธจักร. 2545. สมบัติเชิงฟิสิกส์และเชิงรีโอโลยีของยาง. โรงพิมพ์ฝ่ายเทคโนโลยี
ทางการศึกษา สำนักวิทยบริการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.

Beaumont, J. P. 2004. **Runner and Gating Design Handbook**. Hanser Publishers, Munich,
Germany.

Chen, C. C., C. C. Chiang and W. H. Yang. 2005. True 3D CAE Visualization of Filling
Imbalance in Geometry-Balanced Runners. **Annual Technical Conference-ANTEC**.
Boston, U.K.

Chuang, M. T. 2009. Simulation and Experimental Study in Determining Injection Moulding
Process Parameters for Thin-Shell Plastic Parts via Design of Experiments Analysis.
Expert Systems with Applications. 36: 10752-10759.

Ciesielski, A. 1999. **An Introduction to Rubber Technology**. Rapra Technology Limited, U.K.

Griffiths, C. A., S. S. Dimov and E. B. Brousseau. 2008. Micro Injection Moulding: An Experimental Study on the Relationship between the Filling of Micro Parts and Runner Designs. **Fourth International Conference on Multi-Material Micro Manufacture**. Cardiff, U.K.

Hawthorne Rubber Mfg. Corp. 2004. **Information about Compression, Transfer and Injection Moulding**. Hawthorne Rubber Manufacturing Corporation.
Available Source: <http://www.hawthornerubber.com/index.html>, July 29, 2011.

Hoang, A. T. 2007. Optimization of the Injection Moulding Process of Joystick Product by using Taguchi Method. **Master Thesis**. Southern Taiwan University of Technology, Taiwan.

Isayev, A. I. 1990. **Modeling of Polymer Processing**. Hanser Publishers, Munich, Germany.

Kwon, T. H. 1988. Mould Cooling System Design Using Boundary Element Method. **Journal of Engineering for Industry** 110 (4): 384-394.

Kistler Instrument (Thailand) Co., Ltd. 2010. **Cavity Pressure Measurement**. Available Source: http://www.kistler.com/th_th/Plastics_Basics_WID/Fundamentals-of-Measurement-Technology.html, June 12, 2010.

Lin Cheng Corporation. 2011. Available Source: <http://www.lincheng.com>, November 15, 2010.

Min A. K. and M.-Y. Lyu. 2008. Investigation of the Filling Unbalance and Dimensional Variations in Multi-Cavity Injection Moulded Parts. **Rapra Review Report**. 32 (6): 501-508.

Ozcelik, B. and I. Sonat. 2009. Warpage and Structural Analysis of Thin Shell Plastic in the Plastic Injection Moulding. **International Journal for Materials in Engineering Applications**. 30: 367-375.

Rutkauskas, A. B. 2007. Knowledge-Based Method for Gate and Cold Runner Definition in Injection Mould Design. **Mechanika** 66 (4): 49-54.

Shoemaker, J. 2004. **Moldflow Corporation**. Framingham, MA, USA.

Simcon Kunstsofftechnische Software GmbH. 2002. **Cadmould Rubber User's Manual**, Simcon Herzogenrath, Germany.

Sommer, J. G. 2003. **Elastomer Molding Technology**. Elastech Hudson. Ohio, USA.

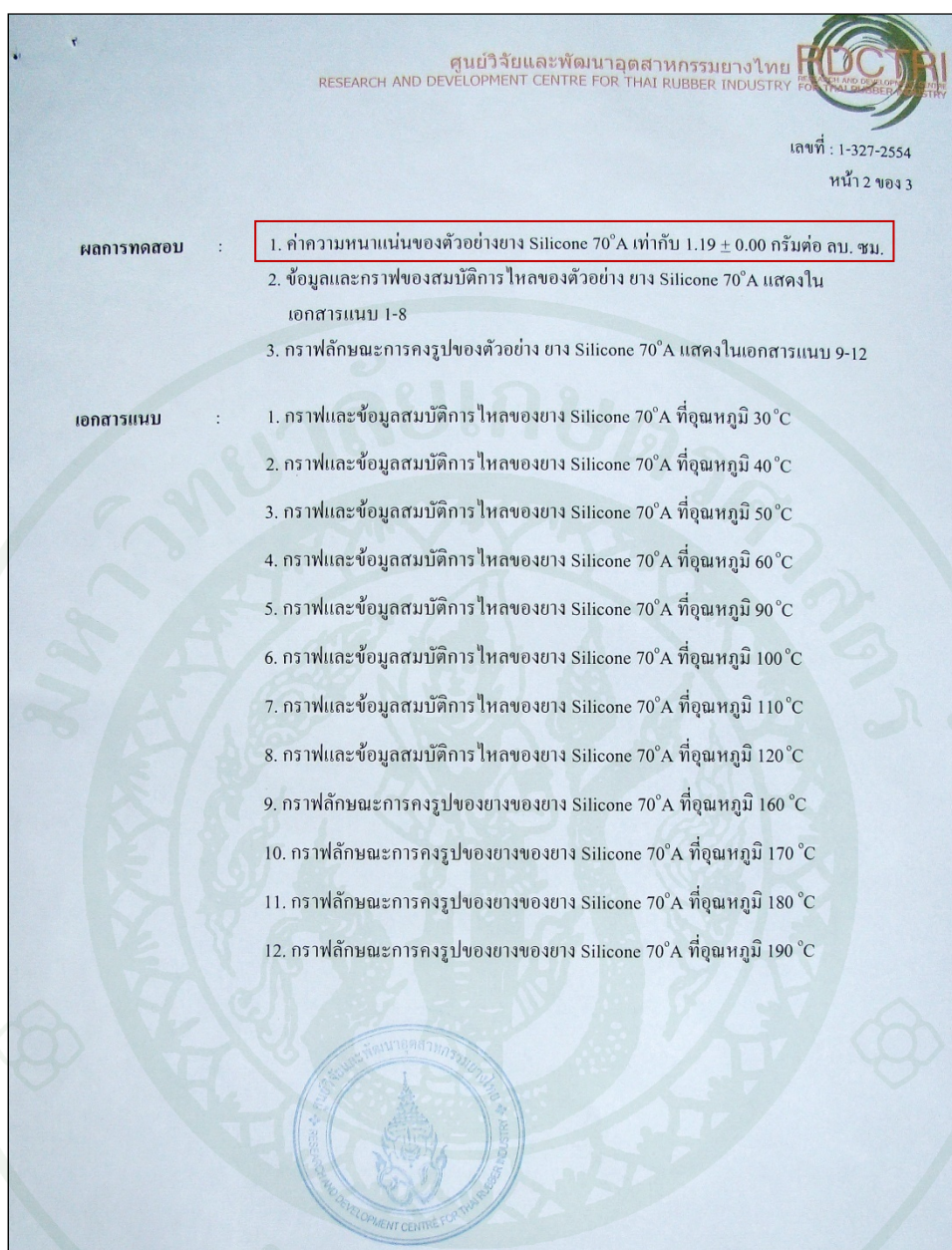
Tang, S. H. and Y. M. Kong. 2006. Design and Thermal Analysis of Plastic Injection Mould. **Journal of Materials Processing Technology** 171 (2): 259-267.

Yen, C., and J. C. Lin. 2006. An Abductive Neural Network Approach to the Design of Runner Dimensions for the Minimization of Warpage in Injection Mouldings. **Journal of Materials Processing Technology** 174 (1-3): 22-28.

Wheelans, M.A. 1974. **Injection Moulding of Rubber**. Butterworth, London, U.K.







ภาพผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบวัดค่าความหนาแน่นของยางซิลิโคน

เอกสารแนบ 1

RHEO-TESTER 2000

Company: University MAHIDOL Labor: Research & Development
Street: Rama VI Road City: 10400 Bangkok

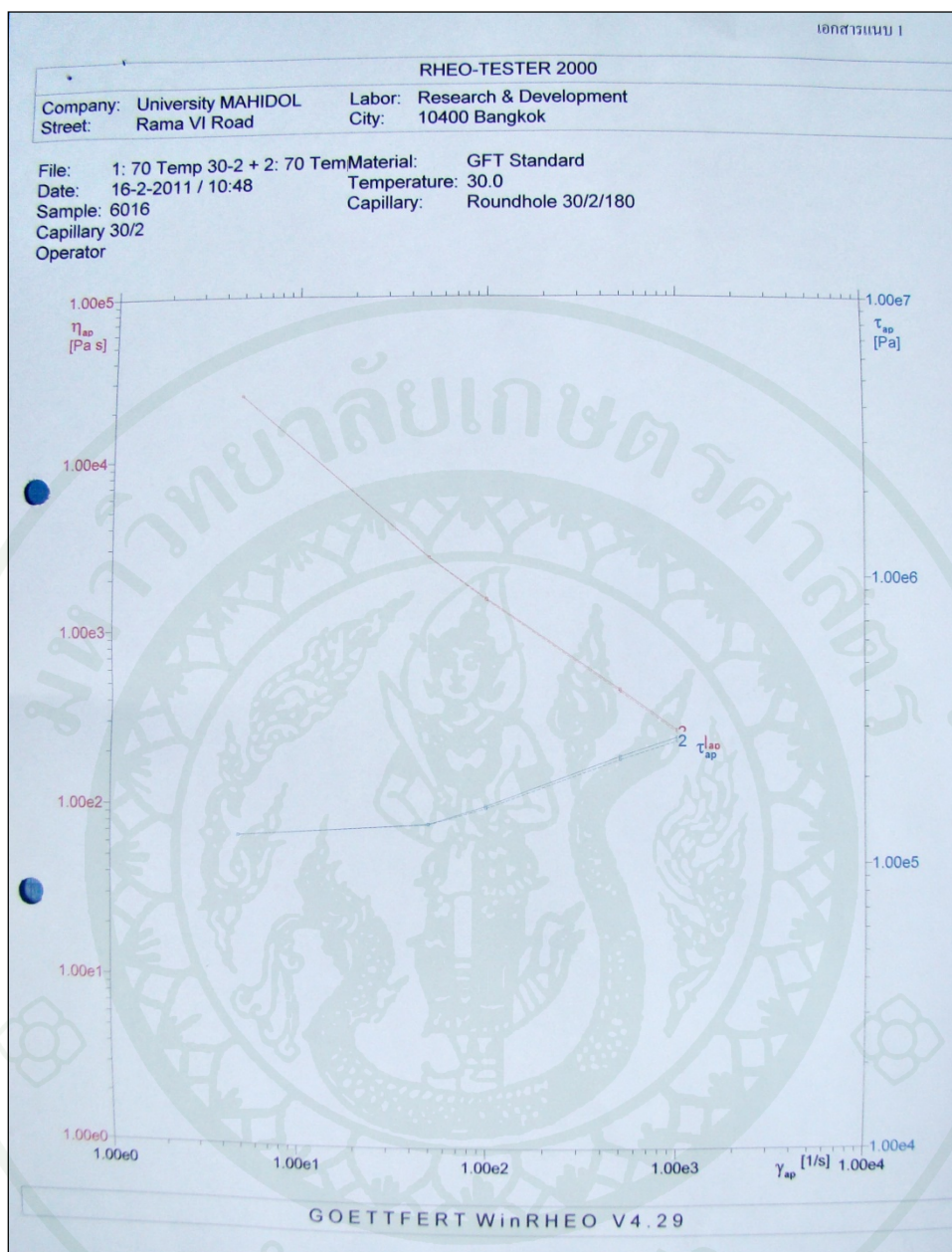
File: C:\Documents and Settings\Material\ktop\KGFT Standard53-54\70 Temp 30-1
Date: 16-2-2011 / 10:48 Temperature: 30.0
Sample: 6016 Capillary: Roundhole 30/2/180
Capillary 30/2
Operator

v [mm/s]	P _{ber} [bar]	F _{st} [N]	P _{st} [bar]	PT100 ₁ [°C]	PT100 ₂ [°C]	PT100 ₃ [°C]	t [sec]
3.4700e-2	7.4363e1	4.4000e0	3.8905e-1	2.9900e1	3.0200e1	2.9900e1	4.5000e2
3.4720e-1	8.0859e1	4.4000e0	3.8905e-1	2.9900e1	3.0200e1	2.9800e1	5.1100e2
6.9440e-1	9.2154e1	4.4000e0	3.8905e-1	3.0000e1	3.0200e1	2.9800e1	5.3400e2
3.4722e0	1.3643e2	4.4000e0	3.8905e-1	2.9900e1	3.0200e1	2.9800e1	5.4100e2
6.9444e0	1.5892e2	4.4000e0	3.8905e-1	2.9900e1	3.0200e1	2.9800e1	5.4700e2

γ_{ap} [1/s]	τ_{ap} [Pa]	η_{ap} [Pa s]	M [1]	γ [1/s]	τ [Pa]	η [Pa s]	SW _{calc} [1]
4.9968e0	1.2394e5	2.4804e4	0.0000e0	1.5243e1	1.2394e5	8.1310e3	2.8231e0
9.997e1	1.3477e5	2.6955e3	2.7501e1	1.4544e2	1.3477e5	9.2663e2	1.7655e0
9.9994e1	1.5359e5	1.5360e3	5.3011e0	2.6155e2	1.5359e5	5.8723e2	2.4799e0
5.0000e2	2.2739e5	4.5478e2	4.1020e0	8.3477e2	2.2739e5	2.7239e2	2.0800e0
9.9999e2	2.6487e5	2.6487e2	4.5430e0	1.6695e3	2.6487e5	1.5865e2	2.3376e0

m = 5.9846e0 [1]	A = 6.9159e4 [Pa s ¹ /m]	B = -8.3290e-1 [1]	r ² = 9.9174e-1 [1]	Φ = 0.0000e0 [Pa ¹ ·m s ¹ ·1]
η_s = 0.0000e0* [Pa s]	λ = 0.0000e0* [s]	m _c = 0.0000e0* [1]	r ² _c = 0.0000e0 [1]	
A ₀ = 0.0000e0 [1]	A ₁ = 0.0000e0 [1]	A ₂ = 0.0000e0 [1]	A ₃ = 0.0000e0 [1]	A ₄ = 0.0000e0 [1]
d ₁ = 0.0000e0 [1]	d ₂ = 0.0000e0 [°C]	T ₀ = 0.0000e0 [°C]	r ² _w = 0.0000e0 [1]	E _A = 0.0000e0 [kJ/mol]
				r ² _p = 0.0000e0 [1]
				r ² _a = 0.0000e0 [1]

ภาพผนวกที่ ก2 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ก3 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

RHEO-TESTER 2000							
Company: University MAHIDOL		Labor: Research & Development					
Street: Rama VI Road		City: 10400 Bangkok					
File: C:\Documents and Settings\laMaterial\ktop\KGFT Standard\53-54\70 Temp 40-1							
Date: 16-2-2011 / 11:44		Temperature: 40.0					
Sample: 6016		Capillary: Roundhole 30/2/180					
Capillary 30/2							
Operator							
v [mm/s]	P _{bet} [bar]	F _{st} [N]	P _{st} [bar]	PT100 ₁ [°C]	PT100 ₂ [°C]	PT100 ₃ [°C]	t [sec]
3.4700e-2	7.0665e1	4.4000e0	3.8905e-1	3.9800e1	4.0200e1	3.9900e1	4.8100e2
3.4720e-1	7.9260e1	4.4000e0	3.8905e-1	3.9800e1	4.0200e1	3.9800e1	5.2300e2
6.9440e-1	9.2853e1	4.4000e0	3.8905e-1	3.9800e1	4.0200e1	3.9800e1	5.4600e2
3.4722e0	1.3333e2	4.4000e0	3.8905e-1	3.9900e1	4.0200e1	3.9800e1	5.5400e2
6.9444e0	1.5792e2	4.4000e0	3.8905e-1	3.9900e1	4.0200e1	3.9800e1	5.6000e2
$\dot{\gamma}_{ap}$ [1/s]	τ_{ap} [Pa]	η_{ap} [Pa s]	M [1]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	η [Pa s]	SW _{calc} [1]
4.9968e0	1.1778e5	2.3570e4	0.0000e0	1.4891e1	1.1778e5	7.9089e3	2.7881e0
9.997e1	1.3210e5	2.6422e3	2.0065e1	1.2233e2	1.3210e5	1.0798e3	1.9167e0
9.9994e1	1.5476e5	1.5477e3	4.3791e0	2.6818e2	1.5476e5	5.7706e2	2.5039e0
5.0000e2	2.2222e5	4.4445e2	4.4482e0	8.3605e2	2.2222e5	2.6580e2	2.1399e0
9.9999e2	2.6320e5	2.6320e2	4.0955e0	1.6721e3	2.6320e5	1.5741e2	2.3083e0
m = 5.7209e0 [1]	A = 6.5465e4 [Pa s ⁴ /m]	B = -8.2520e-1 [1]	r ² = 9.9384e-1 [1]	$\Phi = 0.0000e0$ [Pa ⁴ ·m s ⁴ ·1]			
$\eta_0 = 0.0000e0^*$ [Pa s]	$\lambda = 0.0000e0^*$ [s]	m _c = 0.0000e0 [*] [1]	r _c ² = 0.0000e0 [1]				
A ₀ = 0.0000e0 [1]	A ₁ = 0.0000e0 [1]	A ₂ = 0.0000e0 [1]	A ₃ = 0.0000e0 [1]	A ₄ = 0.0000e0 [1]	r _p ² = 0.0000e0 [1]		
d ₁ = 0.0000e0 [1]	d ₂ = 0.0000e0 [°C]	T ₀ = 0.0000e0 [°C]	r _w ² = 0.0000e0 [1]	E _A = 0.0000e0 [kJ/mol]	r _a ² = 0.0000e0 [1]		

ภาพผนวกที่ ก4 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ก5 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

RHEO-TESTER 2000

Company: University MAHIDOL
Street: Rama VI Road

Labor: Research & Development
City: 10400 Bangkok

File: C:\Documents and Settings\Material\ktop\GFT Standard\3-54\70 Temp 50-1
Date: 16-2-2011 / 13:14 Temperature: 50.0
Sample: 6016 Capillary: Roundhole 30/2/180
Capillary 30/2
Operator

v	P _{bet}	F _{St}	P _{St}	PT100 ₁	PT100 ₂	PT100 ₃	t
[mm/s]	[bar]	[N]	[bar]	[°C]	[°C]	[°C]	[sec]
3.4700e-2	6.6767e1	4.4000e0	3.8905e-1	4.9900e1	5.0000e1	5.0000e1	4.5000e2
3.4720e-1	8.2459e1	4.4000e0	3.8905e-1	4.9900e1	5.0000e1	5.0000e1	4.7400e2
6.9440e-1	9.3153e1	4.4000e0	3.8905e-1	5.0000e1	5.0000e1	4.9900e1	4.9700e2
3.4722e0	1.2334e2	4.4000e0	3.8905e-1	4.9900e1	5.0000e1	4.9900e1	5.0400e2
6.9444e0	1.5252e2	4.4000e0	3.8905e-1	4.9900e1	5.0000e1	4.9900e1	5.1000e2

γ_{ap}	τ_{ap}	η_{ap}	M	γ	τ	η	SW _{calc}
[1/s]	[Pa]	[Pa s]	[1]	[1/s]	[Pa]	[Pa s]	[1]
4.9968e0	1.1128e5	2.2270e4	0.0000e0	1.3868e1	1.1128e5	8.0240e3	2.6689e0
9.97e1	1.3743e5	2.7488e3	1.0911e1	1.1172e2	1.3743e5	1.2302e3	1.8869e0
9.9994e1	1.5526e5	1.5527e3	5.6842e0	3.3136e2	1.5526e5	4.6855e2	2.6779e0
5.0000e2	2.0556e5	4.1113e2	5.7342e0	8.4241e2	2.0556e5	2.4402e2	2.2764e0
9.9999e2	2.5421e5	2.5421e2	3.2635e0	1.6848e3	2.5421e5	1.5088e2	2.2198e0

m = 6.0083e0	A = 6.6660e4	B = -8.3356e-1	r ² = 9.9653e-1	Φ = 0.0000e0
[1]	[Pa s ¹ /m]	[1]	[1]	[Pa ¹ -m s ⁻¹]
η^0 = 0.0000e0*	λ = 0.0000e0*	m _c = 0.0000e0*	r _c ² = 0.0000e0	
[Pa s]	[s]	[1]	[1]	
A ₀ = 0.0000e0	A ₁ = 0.0000e0	A ₂ = 0.0000e0	A ₃ = 0.0000e0	A ₄ = 0.0000e0
[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
d ₁ = 0.0000e0	d ₂ = 0.0000e0	T ₀ = 0.0000e0	r _w ² = 0.0000e0	E _A = 0.0000e0
[1]	[°C]	[°C]	[1]	[kJ/mol]
				r _a ² = 0.0000e0
				[1]

ภาพผนวกที่ ก6 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ก7 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

RHEO-TESTER 2000

Company: University MAHIDOL
Street: Rama VI Road

Labor: Research & Development
City: 10400 Bangkok

File: C:\Documents and Settings\Material\ktop\KGFT Standard\3-54\70 Temp 60
Date: 17-2-2011 / 09:31 Temperature: 60.0
Sample: 6016 Capillary: Roundhole 30/2/180
Capillary 30/2
Operator

v	P _{ref}	F _{st}	P _{st}	PT100 ₁	PT100 ₂	PT100 ₃	t
[mm/s]	[bar]	[N]	[bar]	[°C]	[°C]	[°C]	[sec]
3.4700e-2	6.6067e1	4.4000e0	3.8905e-1	5.9900e1	6.0000e1	6.0000e1	4.5000e2
3.4720e-1	9.4952e1	4.4000e0	3.8905e-1	5.9900e1	5.9900e1	6.0000e1	4.9400e2
6.9440e-1	1.0165e2	4.4000e0	3.8905e-1	5.9900e1	5.9900e1	6.0000e1	5.1600e2
3.4722e0	1.1454e2	4.4000e0	3.8905e-1	5.9900e1	6.0000e1	6.0000e1	5.2300e2
6.9444e0	1.4963e2	4.4000e0	3.8905e-1	5.9900e1	6.0000e1	6.0000e1	5.2800e2

$\dot{\gamma}_{sp}$	τ_{sp}	η_{sp}	M	$\dot{\gamma}$	τ	η	SW _{calc}
[1/s]	[Pa]	[Pa s]	[1]	[1/s]	[Pa]	[Pa s]	[1]
4.9968e0	1.1011e5	2.2036e4	0.0000e0	1.2444e1	1.1011e5	8.8483e3	2.4870e0
9.997e1	5.825e5	3.1653e3	6.3500e0	1.0087e2	1.5825e5	1.5688e3	1.7922e0
9.9994e1	6.942e5	1.6943e3	1.0170e1	6.5871e2	1.6942e5	2.5719e2	2.7539e0
5.0000e2	9.091e5	3.8181e2	1.3477e1	9.1219e2	1.9091e5	2.0928e2	2.3688e0
9.9999e2	2.4938e5	2.4938e2	2.5943e0	1.8244e3	2.4938e5	1.3669e2	2.0812e0

m = 7.1874e0 [1]	A = 7.7944e4 [Pa s ¹ /m]	B = -8.6087e-1 [1]	r ² = 9.9694e-1 [1]	ϕ = 0.0000e0 [Pa ¹ -m s ¹ -1]
η_0 = 0.0000e0* [Pa s]	λ = 0.0000e0* [s]	m_c = 0.0000e0* [1]	r_c^2 = 0.0000e0 [1]	
A ₀ = 0.0000e0 [1]	A ₁ = 0.0000e0 [1]	A ₂ = 0.0000e0 [1]	A ₃ = 0.0000e0 [1]	A ₄ = 0.0000e0 [1]
d ₁ = 0.0000e0 [1]	d ₂ = 0.0000e0 [°C]	T ₀ = 0.0000e0 [°C]	r _w ² = 0.0000e0 [1]	E _A = 0.0000e0 [kJ/mol]
				r _a ² = 0.0000e0 [1]

ภาพผนวกที่ ๓ ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ก9 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

RHEO-TESTER 2000							
Company: University MAHIDOL			Labor: Research & Development				
Street: Rama VI Road			City: 10400 Bangkok				
File: C:\Documents and Settings\laMaterial\ktop\KGFT Standard5-54\70 Temp 90-1							
Date: 16-2-2011 / 14:47			Temperature: 90.0				
Sample: 6016			Capillary: Roundhole 30/2/180				
Capillary 30/2							
Operator							
v	P _{ref}	F _{St}	P _{St}	PT100 ₁	PT100 ₂	PT100 ₃	t
[mm/s]	[bar]	[N]	[bar]	[°C]	[°C]	[°C]	[sec]
3.4700e-2	4.8676e1	4.4000e0	3.8905e-1	8.9800e1	9.0000e1	8.9900e1	4.5000e2
3.4720e-1	8.8855e1	4.4000e0	3.8905e-1	8.9800e1	9.0000e1	8.9800e1	4.9700e2
6.9440e-1	9.6951e1	4.4000e0	3.8905e-1	8.9800e1	9.0000e1	8.9800e1	5.1900e2
3.4722e0	1.1025e2	4.4000e0	3.8905e-1	8.9800e1	9.0000e1	8.9800e1	5.2700e2
6.9444e0	1.2194e2	4.4000e0	3.8905e-1	8.9800e1	9.0000e1	8.9800e1	5.3200e2
$\dot{\gamma}_{ap}$	τ_{ap}	η_{sp}	M	$\dot{\gamma}$	τ	η	SW _{calc}
[1/s]	[Pa]	[Pa s]	[1]	[1/s]	[Pa]	[Pa s]	[1]
4.9968e0	8.1127e4	1.6236e4	0.0000e0	1.0595e1	8.1127e4	7.6572e3	2.2001e0
9.997e1	1.4809e5	2.9620e3	3.8270e0	8.1210e1	1.4809e5	1.8236e3	1.7021e0
9.9994e1	1.6159e5	1.6159e3	7.9489e0	5.8491e2	1.6159e5	2.7626e2	2.9207e0
5.0000e2	1.8374e5	3.6749e2	1.2525e1	1.3677e3	1.8374e5	1.3435e2	2.6448e0
9.9999e2	2.0323e5	2.0323e2	6.8754e0	2.7354e3	2.0323e5	7.4298e1	2.6341e0
m = 6.6188e0	A = 6.3263e4	B = -8.4892e-1	r ² = 9.9674e-1	$\Phi = 0.0000e0$			
[1]	[Pa s ^{1/m}]	[1]	[1]	[Pa ⁿ ·m s ⁿ⁻¹]			
$\eta^0 = 0.0000e0^*$	$\lambda = 0.0000e0^*$	$m_c = 0.0000e0^*$	r ² = 0.0000e0				
[Pa s]	[s]	[1]	[1]				
A ₀ = 0.0000e0	A ₁ = 0.0000e0	A ₂ = 0.0000e0	A ₃ = 0.0000e0	A ₄ = 0.0000e0	r ² = 0.0000e0		
[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]		
d ₁ = 0.0000e0	d ₂ = 0.0000e0	T ₀ = 0.0000e0	r ² = 0.0000e0	E _A = 0.0000e0	r ² = 0.0000e0		
[1]	[°C]	[°C]	[1]	[kJ/mol]	[1]		

ภาพผนวกที่ ก10 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ก11 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส

RHEO-TESTER 2000

Company: University MAHIDOL
Street: Rama VI Road

Labor: Research & Development
City: 10400 Bangkok

File: C:\Documents and Settings\Material:ktop\GFT Standard53-54\70 Temp 100-1

Date: 16-2-2011 / 15:36

Temperature: 100.0

Sample: 6016

Capillary: Roundhole 30/2/180

Capillary 30/2

Operator

v	P _{ref}	F _{st}	P _{st}	PT100 ₁	PT100 ₂	PT100 ₃	t
[mm/s]	[bar]	[N]	[bar]	[°C]	[°C]	[°C]	[sec]
3.4700e-2	4.8576e1	4.4000e0	3.8905e-1	9.9900e1	1.0000e2	9.9800e1	4.5000e2
3.4720e-1	8.9955e1	4.4000e0	3.8905e-1	1.0000e2	1.0010e2	9.9900e1	4.9700e2
6.9440e-1	1.0045e2	4.4000e0	3.8905e-1	1.0000e2	1.0010e2	1.0000e2	5.3800e2
3.4722e0	1.1254e2	4.4000e0	3.8905e-1	9.9900e1	1.0010e2	1.0000e2	5.4500e2
6.9444e0	1.2114e2	4.4000e0	3.8905e-1	9.9900e1	1.0010e2	1.0000e2	5.5100e2

$\dot{\gamma}_{ap}$	τ_{ap}	η_{ap}	M	$\dot{\gamma}$	τ	η	SW _{calc}
[1/s]	[Pa]	[Pa s]	[1]	[1/s]	[Pa]	[Pa s]	[1]
4.9968e0	8.0960e4	1.6202e4	0.0000e0	1.0497e1	8.0960e4	7.7125e3	2.1776e0
9.997e1	1.4993e5	2.9987e3	3.7378e0	7.8681e1	1.4993e5	1.9055e3	1.7059e0
9.9994e1	1.6742e5	1.6743e3	6.2813e0	5.7527e2	1.6742e5	2.9102e2	2.8823e0
5.0000e2	1.8757e5	3.7515e2	1.4158e1	1.5989e3	1.8757e5	1.1731e2	2.7116e0
9.9999e2	2.0190e5	2.0190e2	9.4185e0	3.1979e3	2.0190e5	6.3135e1	2.7249e0

m = 6.7940e0	A = 6.4960e4	B = -8.5281e-1	r ² = 9.9642e-1	$\Phi = 0.0000e0$	
[1]	[Pa s ^{1/m}]	[1]	[1]	[Pa ^{1/m} s ^{1/m}]	
$\eta_0 = 0.0000e0^*$	$\lambda = 0.0000e0^*$	$m_c = 0.0000e0^*$	r _c ² = 0.0000e0		
[Pa s]	[s]	[1]	[1]		
A ₀ = 0.0000e0	A ₁ = 0.0000e0	A ₂ = 0.0000e0	A ₃ = 0.0000e0	A ₄ = 0.0000e0	r _p ² = 0.0000e0
[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]
d ₁ = 0.0000e0	d ₂ = 0.0000e0	T ₀ = 0.0000e0	r _w ² = 0.0000e0	E _A = 0.0000e0	r _a ² = 0.0000e0
[1]	[°C]	[°C]	[1]	[kJ/mol]	[1]

ภาพผนวกที่ ก12 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ก13 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

RHEO-TESTER 2000							
Company: University MAHIDOL		Labor: Research & Development					
Street: Rama VI Road		City: 10400 Bangkok					
File: C:\Documents and Settings\Material\ktop\KGFT Standard\3-54\70 Temp 110-1							
Date: 17-2-2011 / 13:17		Temperature: 110.0					
Sample: 6016		Capillary: Roundhole 30/2/180					
Capillary 30/2							
Operator							
V	P _{ref}	F _{St}	P _{St}	PT100 ₁	PT100 ₂	PT100 ₃	t
[mm/s]	[bar]	[N]	[bar]	[°C]	[°C]	[°C]	[sec]
3.4700e-2	5.7471e1	4.4000e0	3.8905e-1	1.0980e2	1.1000e2	1.0990e2	4.2000e2
3.4720e-1	9.1754e1	4.4000e0	3.8905e-1	1.0990e2	1.1010e2	1.0990e2	4.6500e2
6.9440e-1	1.0475e2	4.4000e0	3.8905e-1	1.0980e2	1.1010e2	1.0990e2	4.8800e2
3.4722e0	1.1474e2	4.4000e0	3.8905e-1	1.0990e2	1.1010e2	1.0990e2	4.9500e2
6.9444e0	1.2024e2	4.4000e0	3.8905e-1	1.0990e2	1.1010e2	1.0990e2	5.0400e2
γ _{ap}	τ _{ap}	η _{ap}	M	γ	τ	η	SW _{calc}
[1/s]	[Pa]	[Pa s]	[1]	[1/s]	[Pa]	[Pa s]	[1]
4.9968e0	9.5785e4	1.9169e4	0.0000e0	1.1577e1	9.5785e4	8.2740e3	2.3415e0
9.997e1	1.5292e5	3.0587e3	4.9231e0	8.3589e1	1.5292e5	1.8295e3	1.8172e0
9.9994e1	1.7458e5	1.7459e3	5.2334e0	5.8759e2	1.7458e5	2.9711e2	2.6898e0
5.0000e2	1.9124e5	3.8248e2	1.7660e1	2.0415e3	1.9124e5	9.3676e1	2.7670e0
9.9999e2	2.0040e5	2.0040e2	1.4812e1	4.0830e3	2.0040e5	4.9082e1	2.8099e0
m = 8.4702e0	A = 7.9240e4	B = -8.8194e-1	r ² = 9.9818e-1	Φ = 0.0000e0			
[1]	[Pa s ^{1/m}]	[1]	[1]	[Pa ^{1/m} ·m s ^{1/m}]			
η ₀ = 0.0000e0*	λ = 0.0000e0*	m _c = 0.0000e0*	r _c ² = 0.0000e0				
[Pa s]	[s]	[1]	[1]				
A ₀ = 0.0000e0	A ₁ = 0.0000e0	A ₂ = 0.0000e0	A ₃ = 0.0000e0	A ₄ = 0.0000e0	r _p ² = 0.0000e0		
[1]	[1]	[1]	[1]	[1]	[1]		
d ₁ = 0.0000e0	d ₂ = 0.0000e0	T ₀ = 0.0000e0	r _w ² = 0.0000e0	E _a = 0.0000e0	r _a ² = 0.0000e0		
[1]	[°C]	[°C]	[1]	[kJ/mol]	[1]		

ภาพผนวกที่ ก14 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ก15 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส

RHEO-TESTER 2000

Company: University MAHIDOL
Street: Rama VI Road

Labor: Research & Development
City: 10400 Bangkok

File: C:\Documents and Settings\laMaterial\ktop\KGFT Standard53-54\70 Temp 120-1
Date: 17-2-2011 / 14:42 Temperature: 120.0
Sample: 6016 Capillary: Roundhole 30/2/180
Capillary 30/2
Operator

v [mm/s]	P _{ber} [bar]	F _{st} [N]	P _{st} [bar]	PT100 ₁ [°C]	PT100 ₂ [°C]	PT100 ₃ [°C]	t [sec]
3.4700e-2	5.0575e1	4.4000e0	3.8905e-1	1.1980e2	1.2000e2	1.1990e2	4.2000e2
3.4720e-1	8.7956e1	4.4000e0	3.8905e-1	1.1980e2	1.2000e2	1.1990e2	4.6700e2
6.9440e-1	1.0175e2	4.4000e0	3.8905e-1	1.1980e2	1.2000e2	1.1990e2	5.1000e2
3.4722e0	1.1524e2	4.4000e0	3.8905e-1	1.1980e2	1.2000e2	1.1990e2	5.1700e2
6.9444e0	1.1944e2	4.4000e0	3.8905e-1	1.1980e2	1.2000e2	1.1990e2	5.2300e2

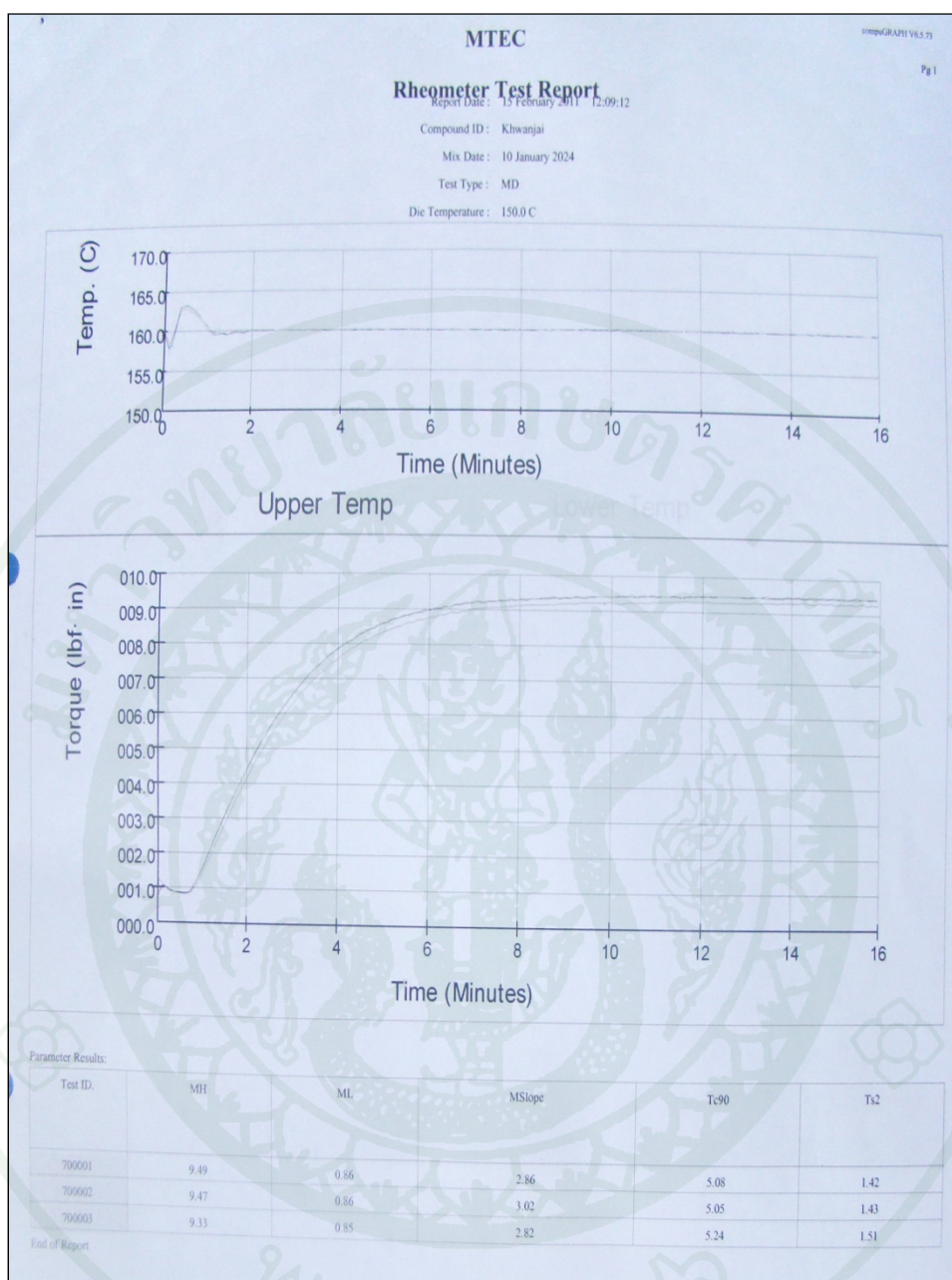
$\dot{\gamma}_{ap}$ [1/s]	τ_{ap} [Pa]	η_{sp} [Pa s]	M [1]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	η [Pa s]	SW _{calc} [1]
4.9968e0	8.4292e4	1.6869e4	0.0000e0	1.0935e1	8.4292e4	7.7086e3	2.2379e0
9.997e1	1.4659e5	2.9321e3	4.1620e0	7.8317e1	1.4659e5	1.8718e3	1.7711e0
9.9994e1	1.6958e5	1.6959e3	4.7583e0	4.9451e2	1.6958e5	3.4293e2	2.7771e0
5.0000e2	1.9207e5	3.8414e2	1.2925e1	1.8407e3	1.9207e5	1.0435e2	2.6799e0
9.9999e2	1.9907e5	1.9907e2	1.9372e1	3.6814e3	1.9907e5	5.4074e1	2.8210e0

m = 7.1561e0 [1]	A = 6.8010e4 [Pa s ¹ /m]	B = -8.6026e-1 [1]	r ² = 9.9718e-1 [1]	Φ = 0.0000e0 [Pa ¹ -m s ¹ -1]	
η_0 = 0.0000e0* [Pa s]	λ = 0.0000e0* [s]	m _c = 0.0000e0* [1]	r _c = 0.0000e0 [1]		
A ₀ = 0.0000e0 [1]	A ₁ = 0.0000e0 [1]	A ₂ = 0.0000e0 [1]	A ₃ = 0.0000e0 [1]	A ₄ = 0.0000e0 [1]	r _p = 0.0000e0 [1]
d ₁ = 0.0000e0 [1]	d ₂ = 0.0000e0 [°C]	T ₀ = 0.0000e0 [°C]	r _w = 0.0000e0 [1]	E _A = 0.0000e0 [kJ/mol]	r _a = 0.0000e0 [1]

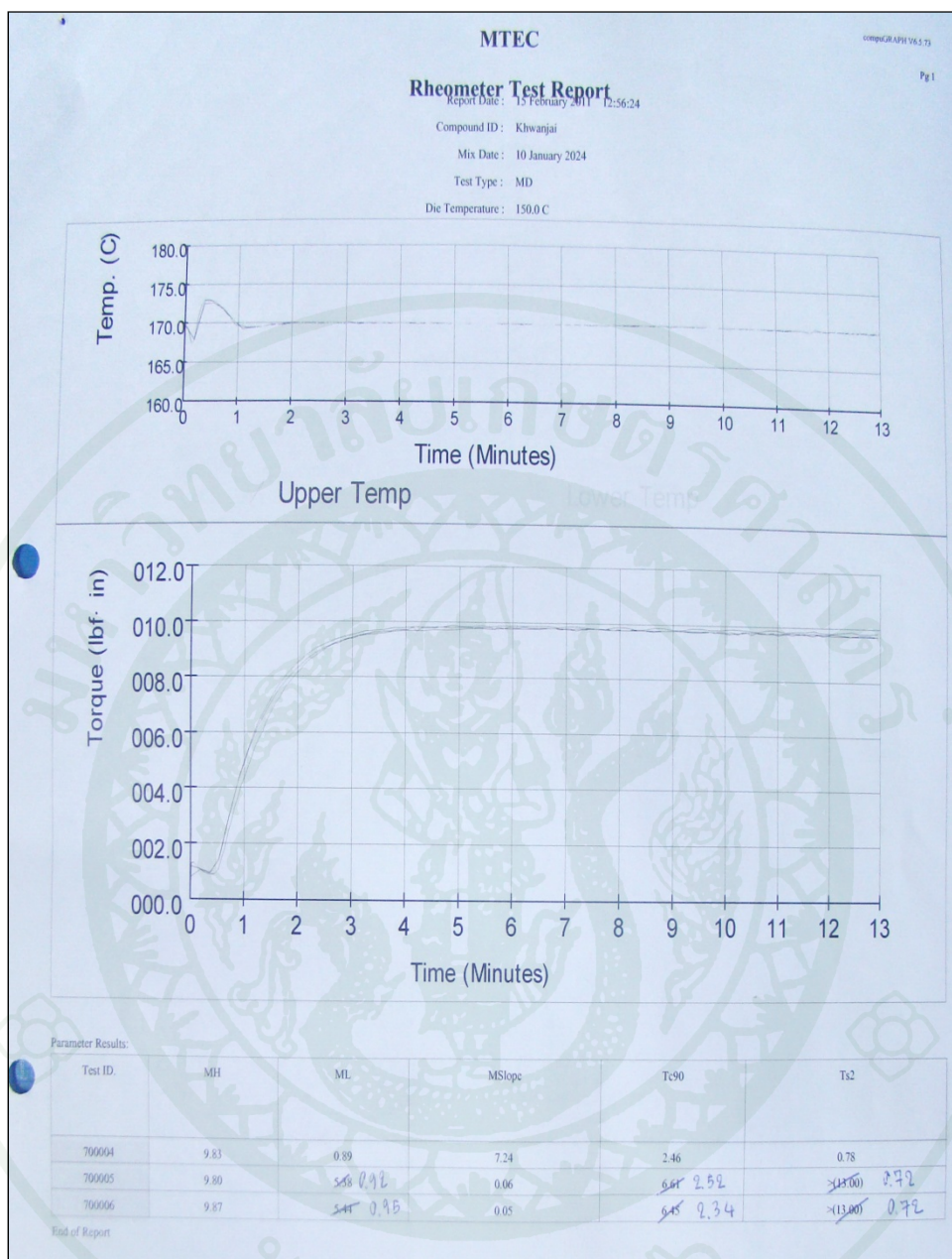
ภาพผนวกที่ ก16 ผลการวัดค่าคุณสมบัติการไหลของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



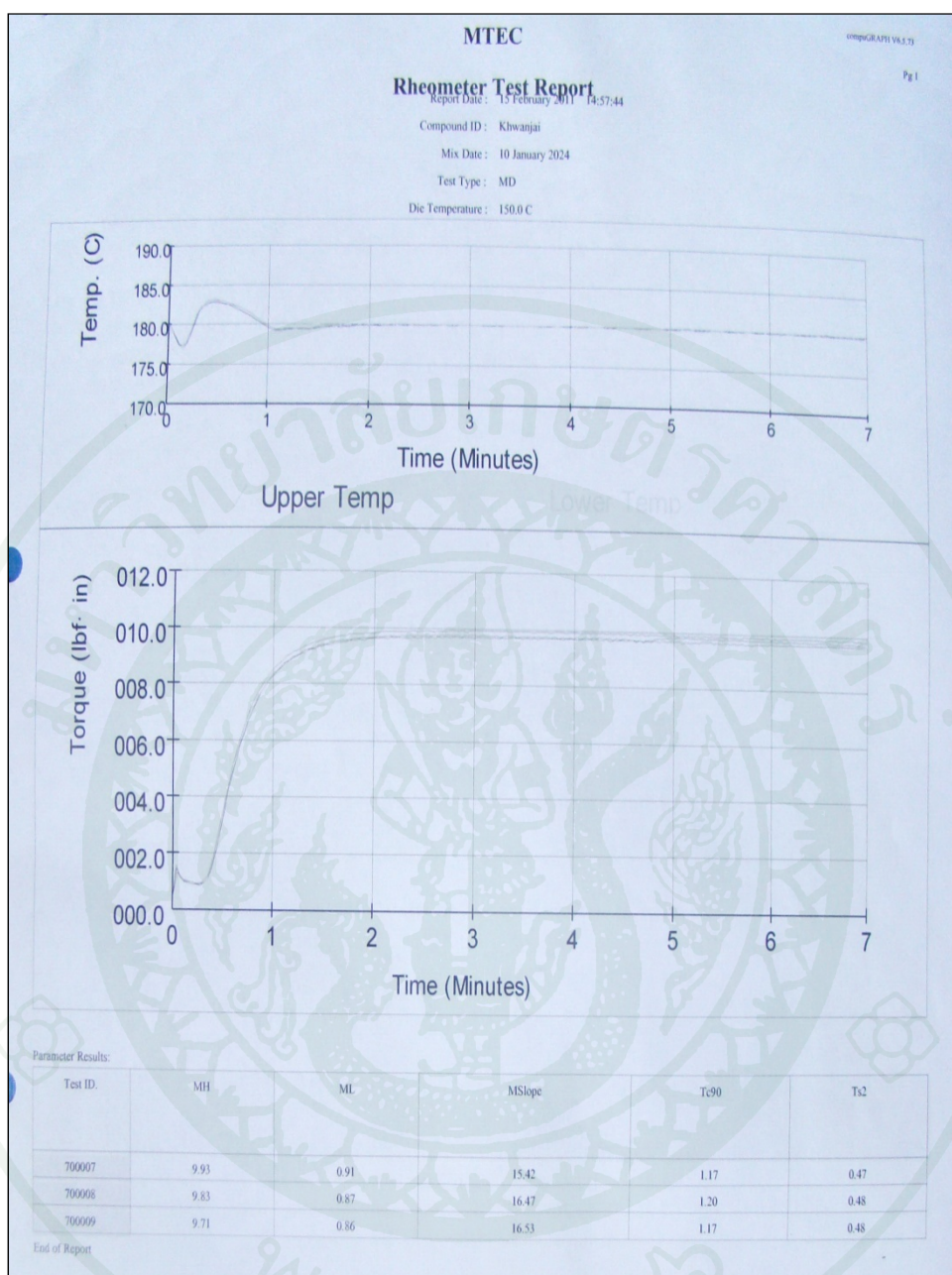
ภาพผนวกที่ ก17 กราฟแสดงค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส



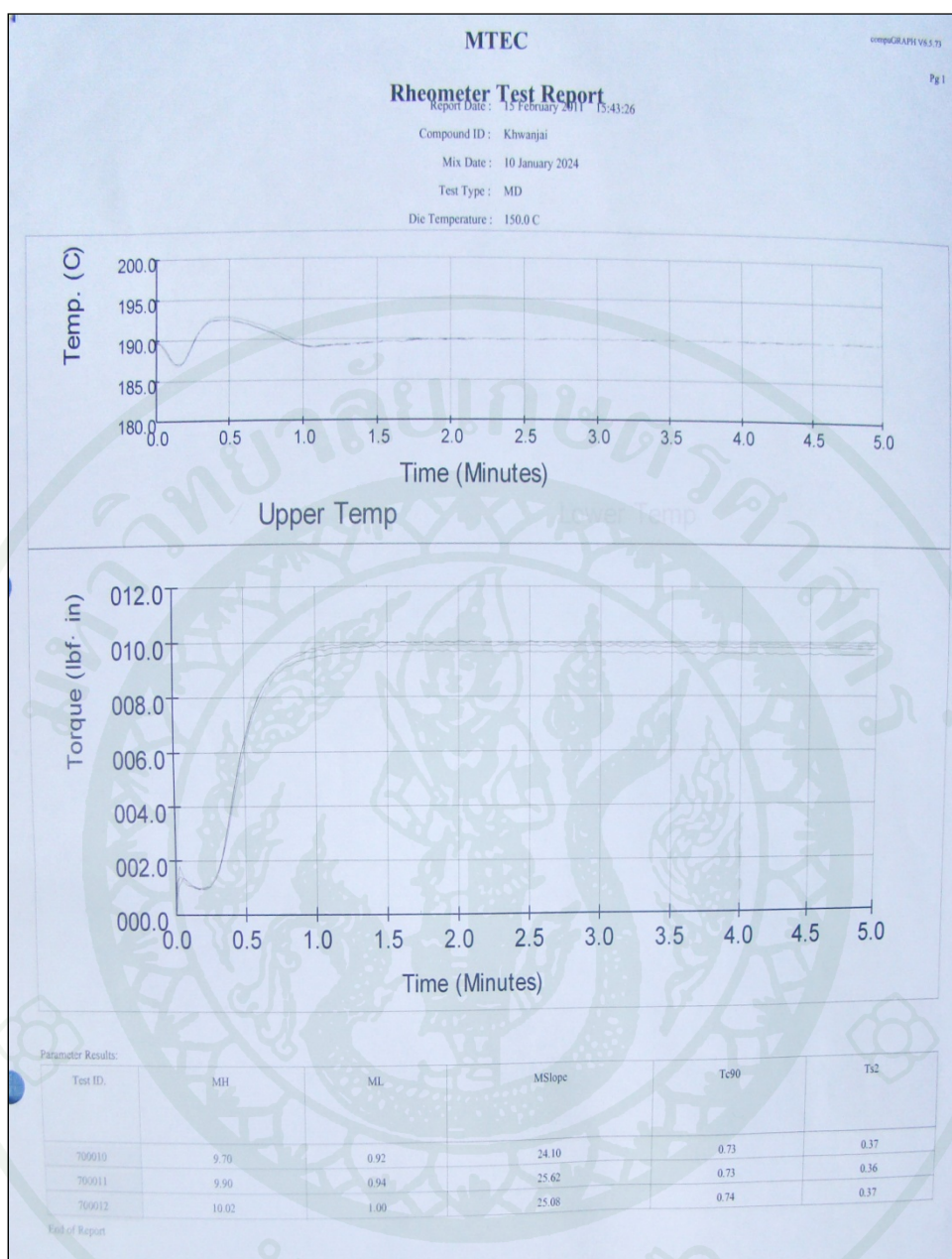
ภาพผนวกที่ ก18 ผลการทดสอบหาค่าการคงรูปของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส



ภาพผนวกที่ ก19 ผลการทดสอบหาค่าการคงรูปของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

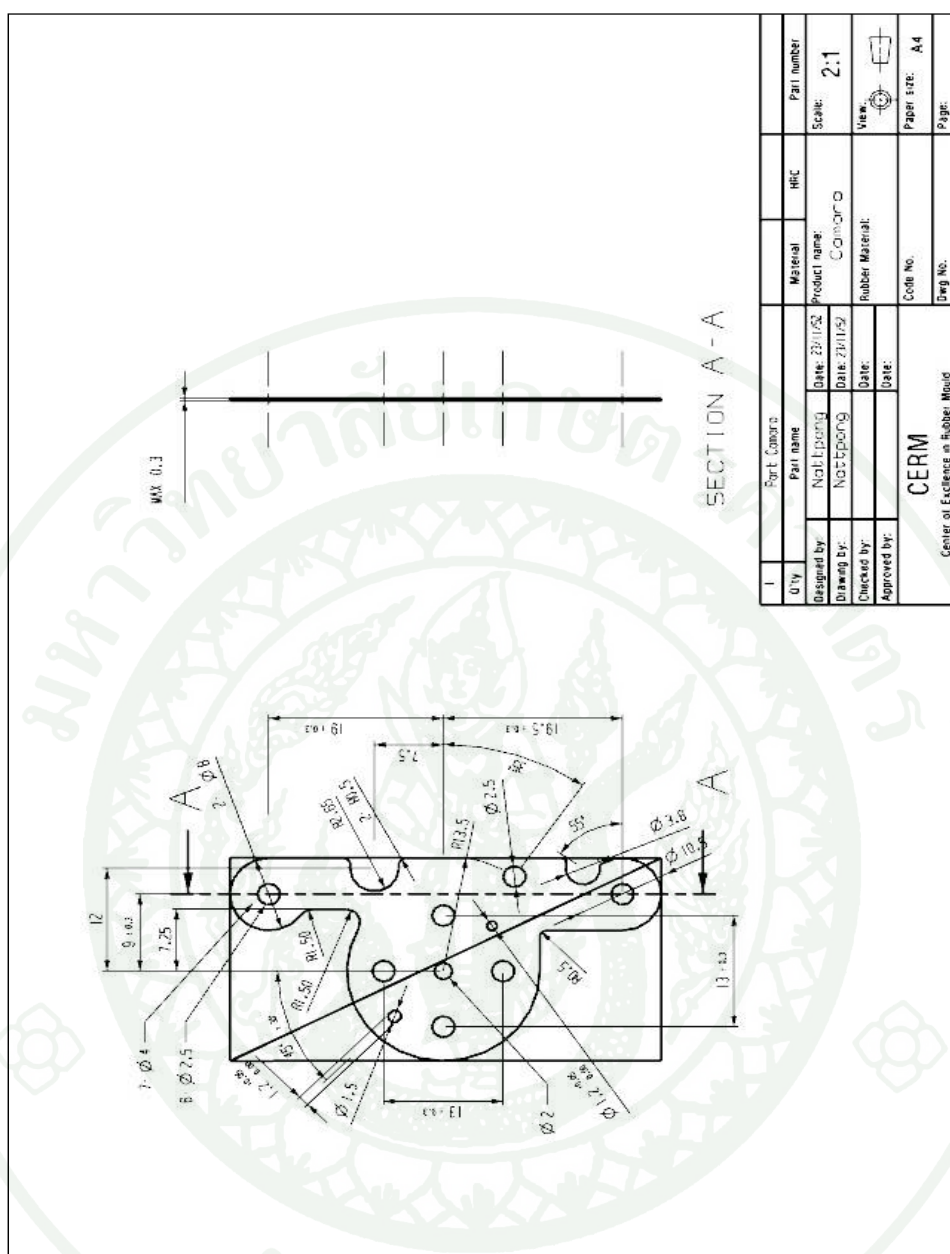


ภาพผนวกที่ ก20 ผลการทดสอบหาค่าการคงรูปของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

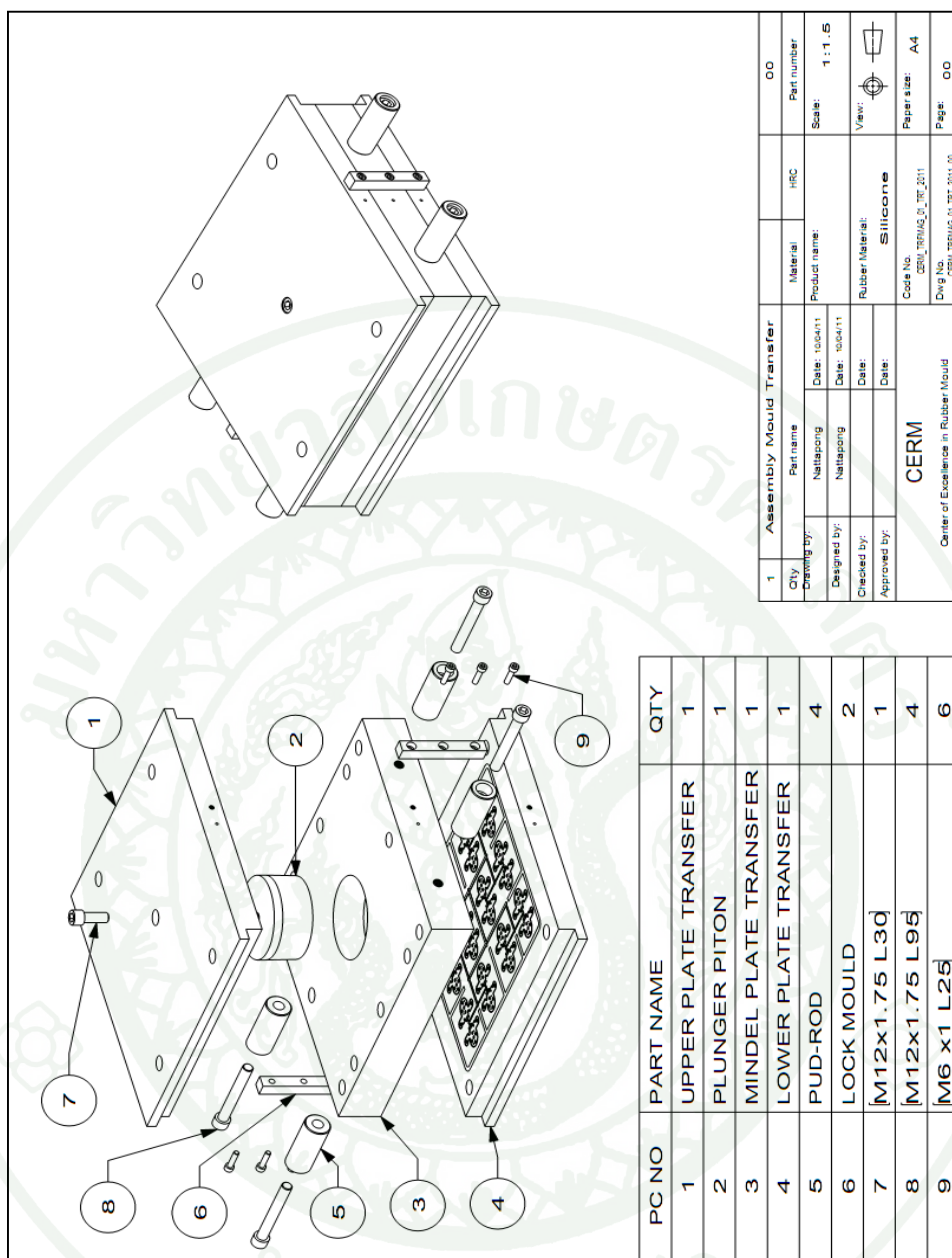


ภาพผนวกที่ ก21 ผลการทดสอบหาค่าการคงรูปของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

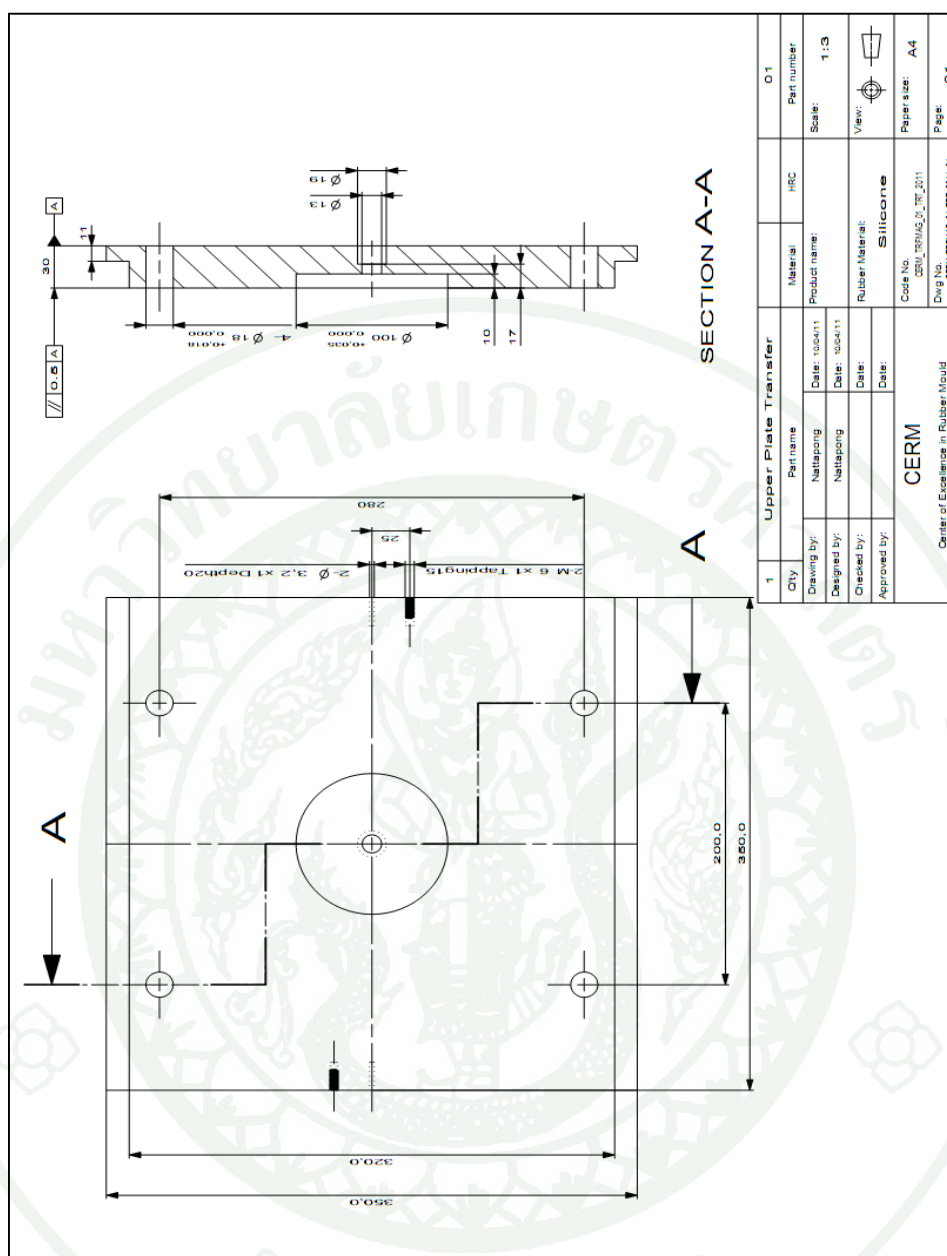




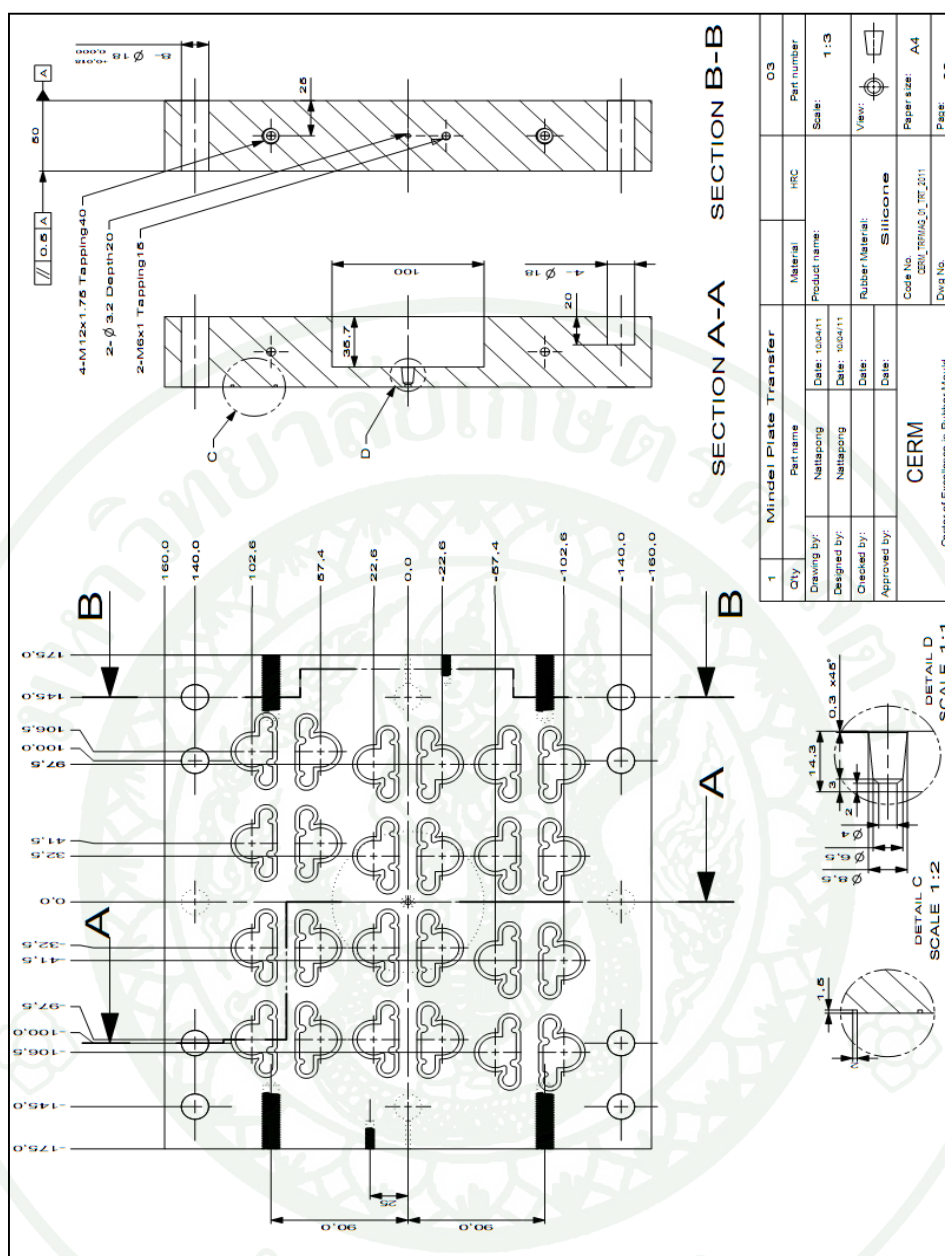
ภาพผนวกที่ ข1 แบบ 2 มิติ ของผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูป



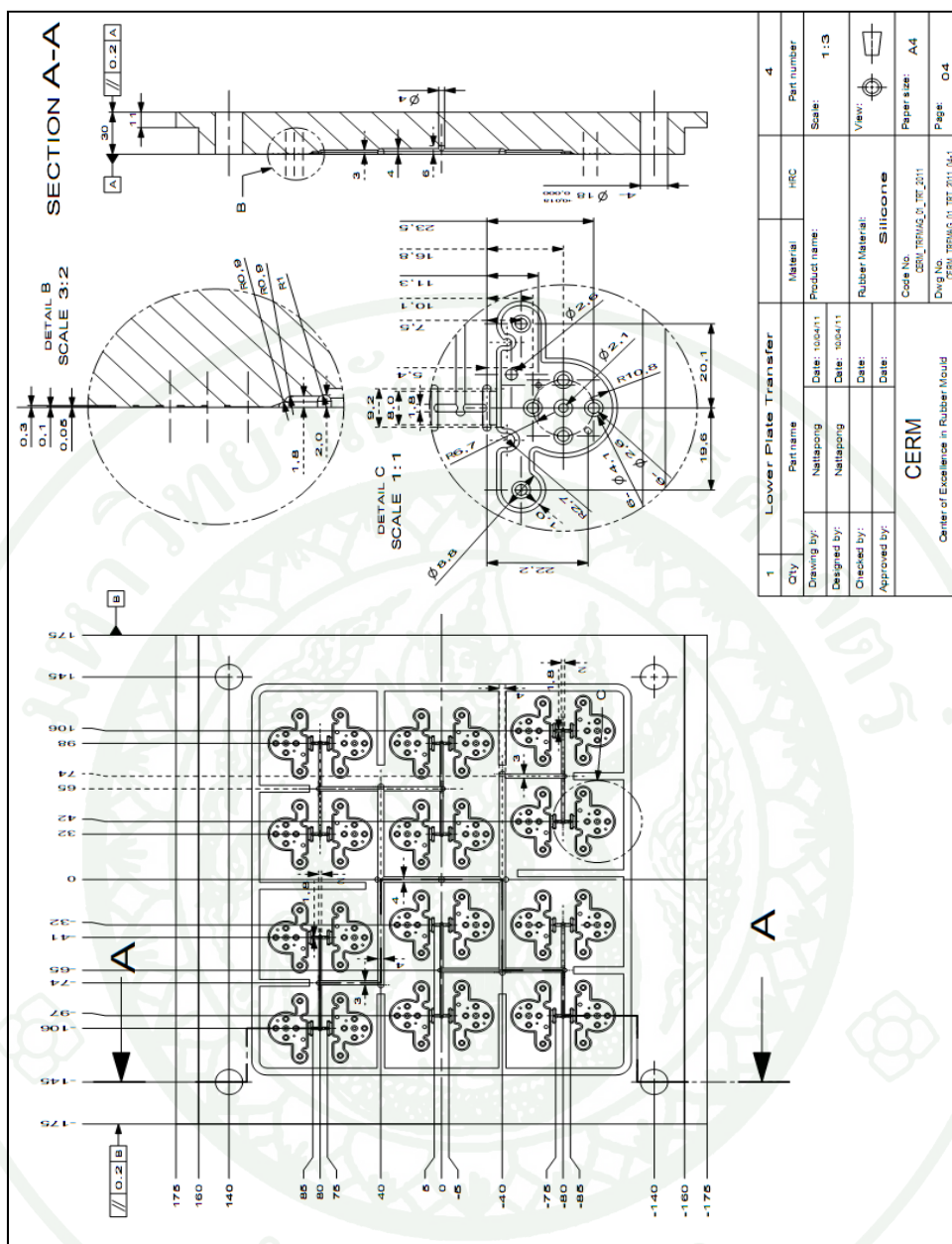
ภาพผนวกที่ ข2 แบบ 2 มิติ ของแม่พิมพ์ประกอบผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูป



ภาพผนวกที่ ข3 แบบ 2 มิติ แม่พิมพ์แผ่นบนของผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดภายในกล่องถ้วยรูป



ภาพผนวกที่ ข4 แบบ 2 มิติ แม่พิมพ์แผ่นกลางของผลิตภัณฑ์ยางปุ่มกดภายในกล่องถ่ายรูป

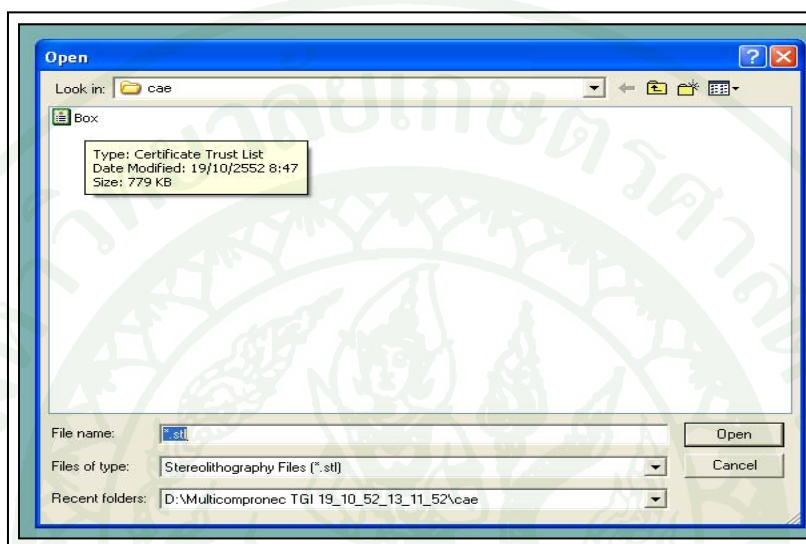


ภาพผนวกที่ ข5 แบบ 2 มิติ แม่พิมพ์แผ่นล่างของผลิตภัณฑ์ข้างปมกดภายในกล่องถ้ำรูป



ขั้นตอนการใช้งานของโปรแกรม CADMOULD

1. เปิดโปรแกรม CAD Mold โดยเปิดไฟล์ที่เป็นนามสกุล *.stl เลื่อนกดที่ภาพคำสั่ง STL เลือกไฟล์นามสกุล *.stl มาเปิด ดังแสดงภาพผนวกที่ ค1



ภาพผนวกที่ ค1 การเปิดไฟล์ที่เป็นนามสกุล *.stl

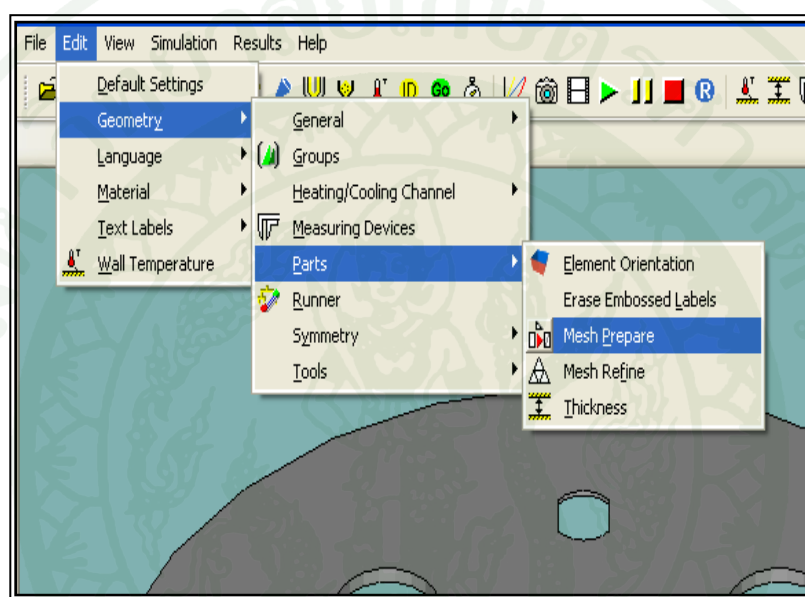
2. เปิดไฟล์ที่มีนามสกุล *.stl ปรากฏแบบที่ใช้ในการจำลองการวิจัย ดังภาพผนวกที่ ค2



ภาพผนวกที่ ค2 แบบที่ใช้ในการจำลองการวิจัย

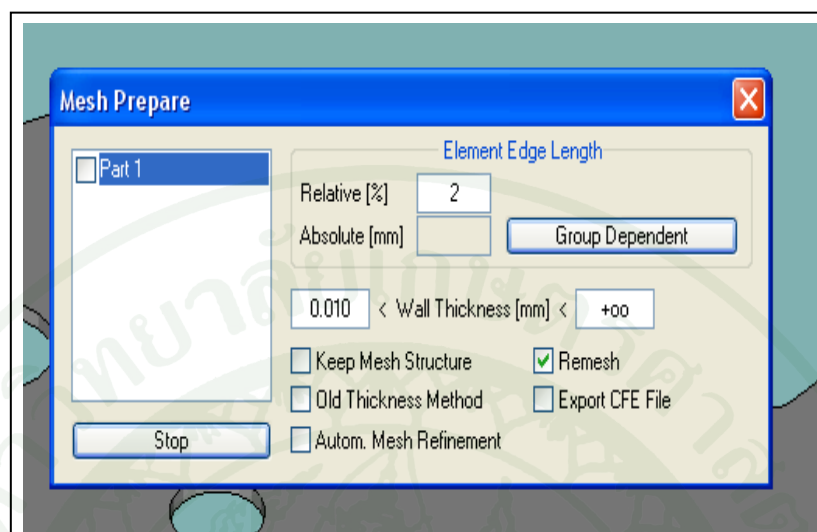
3. ตรวจสอบความถูกต้องของ Parts ที่นำเข้ามาว่าถูกต้องหรือไม่ โดยตรวจเช็คที่ Parts Volume ว่าปริมาตรของชิ้นงาน ตรวจสอบหน่วยที่ใช้เป็นมิลลิเมตร (mm) หรือเป็นเซนติเมตร (cm) จากนั้น กด OK

4. การสร้างเอลิเมนต์ โดยเลื่อนกดที่คำสั่ง Edit เลื่อนมา Geometry เลื่อนมา Parts เลื่อนมา Mesh Prepare ตามภาพผนวกที่ คว ด้านล่าง



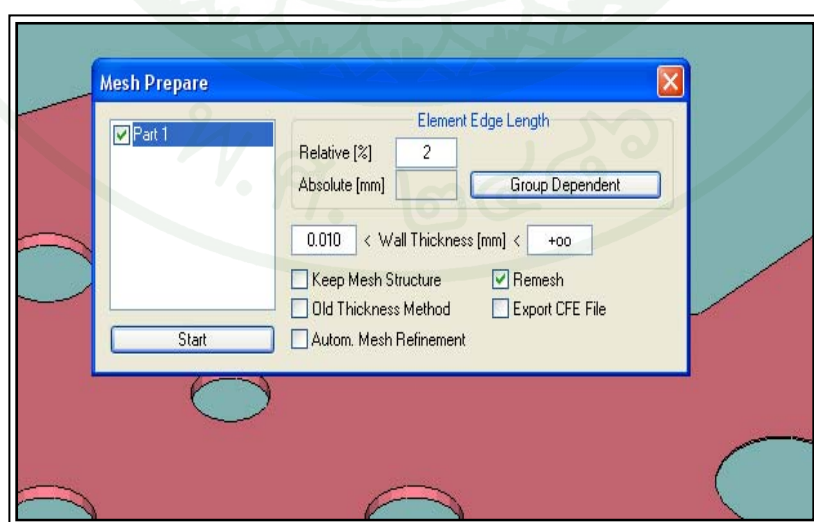
ภาพผนวกที่ คว ขั้นตอนการสร้างเอลิเมนต์

5. ต่อมาจะปรากฏบล็อกชื่อ Mesh Prepare ขึ้นมาตามภาพผนวกที่ ค4 ด้านล่าง



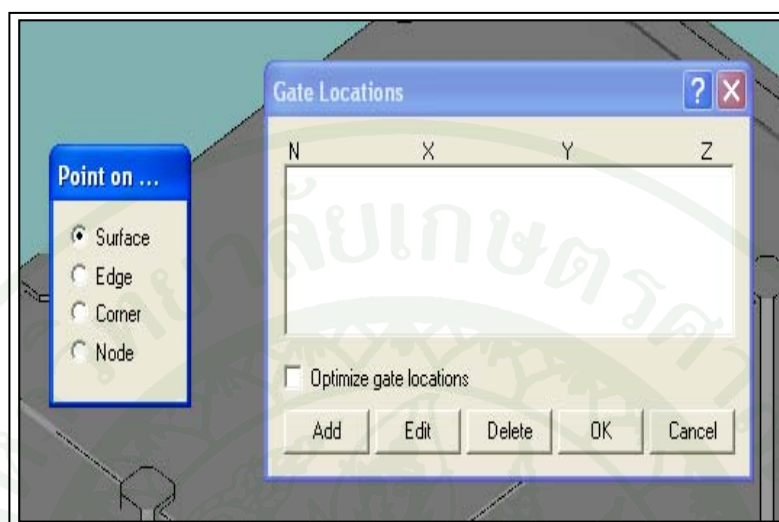
ภาพผนวกที่ ค4 บล็อกชื่อ Mesh Prepare

6. การกำหนดค่า Relative Element Size เป็นการป้อนความละเอียดของ Mesh ถ้าหมายเลข 1 จะมีความละเอียด และเรียงลำดับจนถึง หมายเลข 10 จะมีความหยาบมากที่สุด จากนั้นเครื่องหมาย ถูกในช่องสี่เหลี่ยมหน้า Part1 แล้วกดที่ Start จากนั้นจะขึ้นคำว่า Stop รอจนกว่าจะเปลี่ยนเป็นUndo จากนั้นกดกากบาทปิดบล็อก ดังภาพผนวกที่ ค5



ภาพผนวกที่ ค5 ขั้นตอนป้อนค่าลงในบล็อกชื่อ Mesh Prepare

7. ลำดับต่อมาคลิกเลือกภาพคำสั่ง Gate Editor จะปรากฏบล็อก 2 บล็อกตามภาพผนวกที่ ค6 ด้านล่าง



ภาพผนวกที่ ค6 การปรากฏบล็อกชื่อ Gate Editor และ Point on

ความหมายของคำสั่งที่ใช้งานในบล็อก Point on

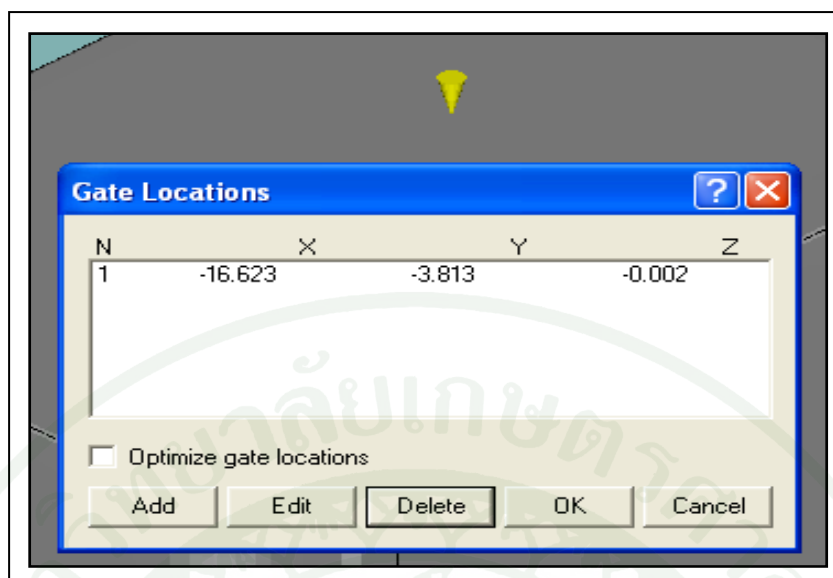
Surface หมายถึง สามารถนำ Gate ไปวางได้ที่ผิวของชิ้นงาน

Edge หมายถึง สามารถนำ Gate ไปวางได้ที่บริเวณของชิ้นงาน

Corner หมายถึง สามารถนำ Gate ไปวางได้ที่บริเวณมุมของชิ้นงาน

Node หมายถึง สามารถนำ Gate ไปวางได้ที่บริเวณ Node ของ Elements

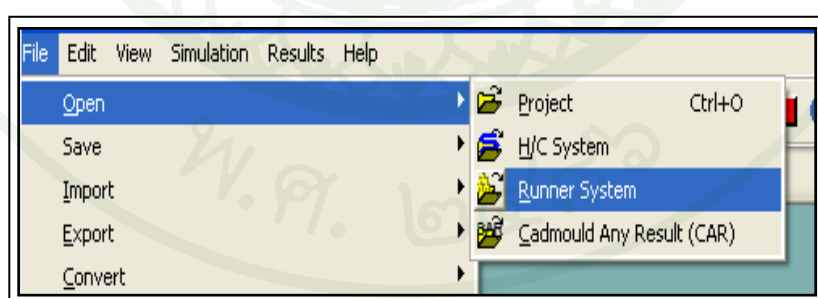
หมายเหตุ ถ้าจะนำ Gate ไปวางต้องกด Ctrl ค้างไว้ แล้วคลิกเมาส์ซ้าย เพื่อไปชี้ตำแหน่งที่ต้องการจะวาง ดังแสดงภาพผนวกที่ ค7



ภาพผนวกที่ ค7 การวางตำแหน่ง Gate (ทางเข้า) ที่ขึ้นงาน

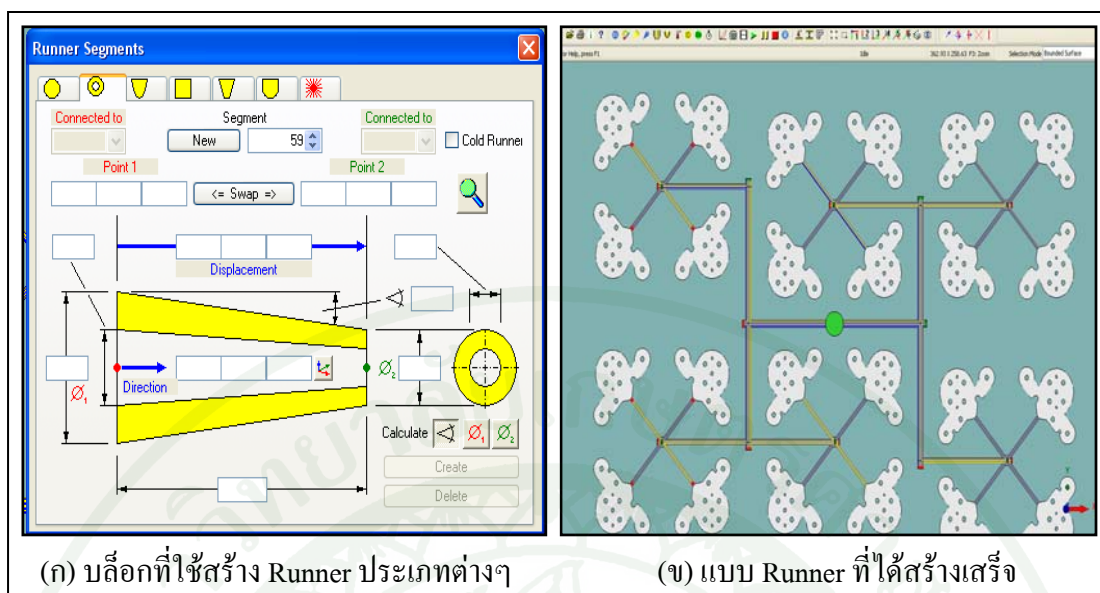
8. เมื่อนำ Gate ไปวางแล้วจะปรากฏตำแหน่งของ Gate ค่าของ X Y Z ที่ไปวาง สามารถลบออก หรือทำการแก้ไข ตำแหน่งของ Gate จะเปลี่ยนไป

9. ทำการเปิดไฟล์ที่ได้สร้าง Runner (รูว้าง) ทั้ง 12 แบบ โดยไปที่ File เลื่อนมาที่ Open เลื่อนมาที่ Runner System ดังภาพผนวกที่ ค8



ภาพผนวกที่ ค8 ขั้นตอนการเปิดไฟล์ Runner System

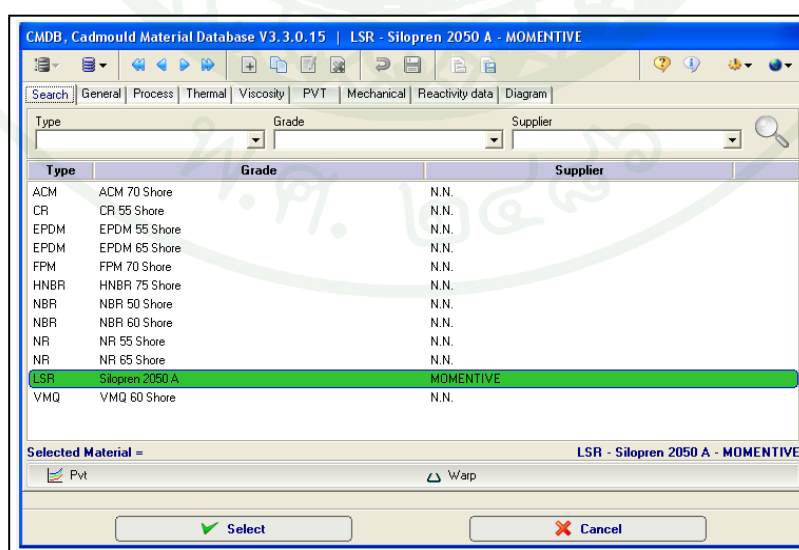
10. จากนั้นจะปรากฏบล็อกชื่อ Runner System ขึ้นมาตามภาพผนวกที่ ค9 ด้านล่าง สร้าง Runner (รูว้าง) ประเภทต่างๆ และความยาวของ Runner ตามแบบที่กำหนด



ภาพผนวกที่ ๙ การปรากฏบล็อกชื่อ Runner System เพื่อสร้าง Runner

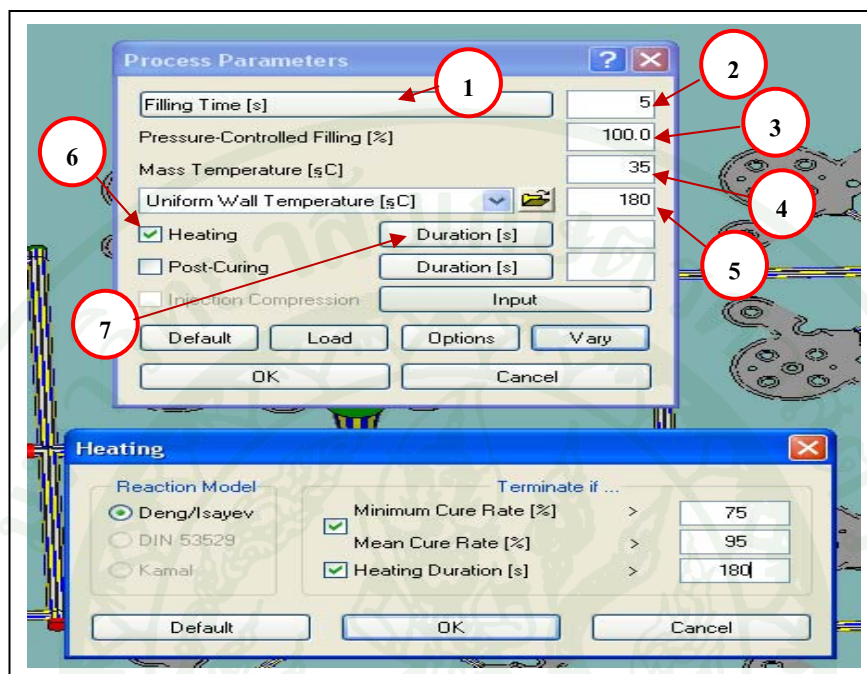
11. ลำดับต่อมาเลือกภาพคำสั่ง Material Selection จะปรากฏบล็อก Choice เป็นการเลือกวัสดุของชิ้นงานว่าชิ้นงานเป็นประเภทไหน จากนั้นกดเลือก Elastomer ที่เป็นวัสดุประเภทยาง

12. จากนั้นจะปรากฏบล็อก Cadmould Metrial Database (CMDB) ให้เลือกวัสดุที่ใช้ในการจำลองการวิจัย โดยกด Select ดังภาพผนวกที่ ๑๐



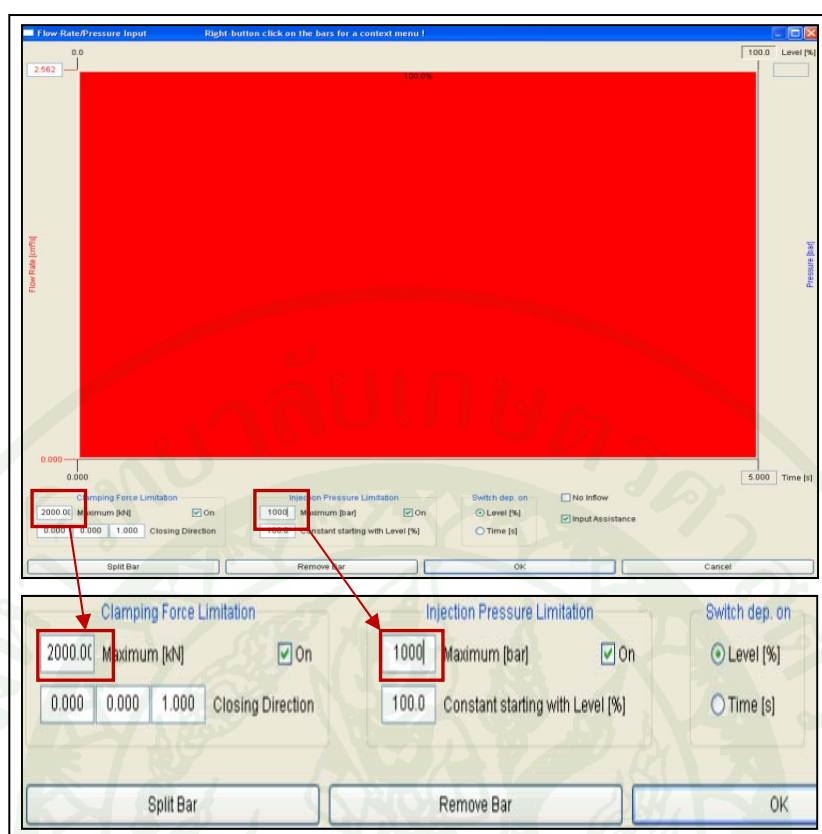
ภาพผนวกที่ ๑๐ การปรากฏบล็อก Cadmould Material Database ที่เลือกวัสดุที่ใช้จำลองการไหล

13. ต่อมากดเลือกภาพคำสั่ง Process Parameter ปรากฏบล็อกขึ้น เพื่อป้อนข้อมูลเงื่อนไขในการอัดสัง ดังภาพผนวกที่ ค11



ภาพผนวกที่ ค11 การปรากฏบล็อก Process Parameter เพื่อป้อนข้อมูลเงื่อนไขในการอัดสัง

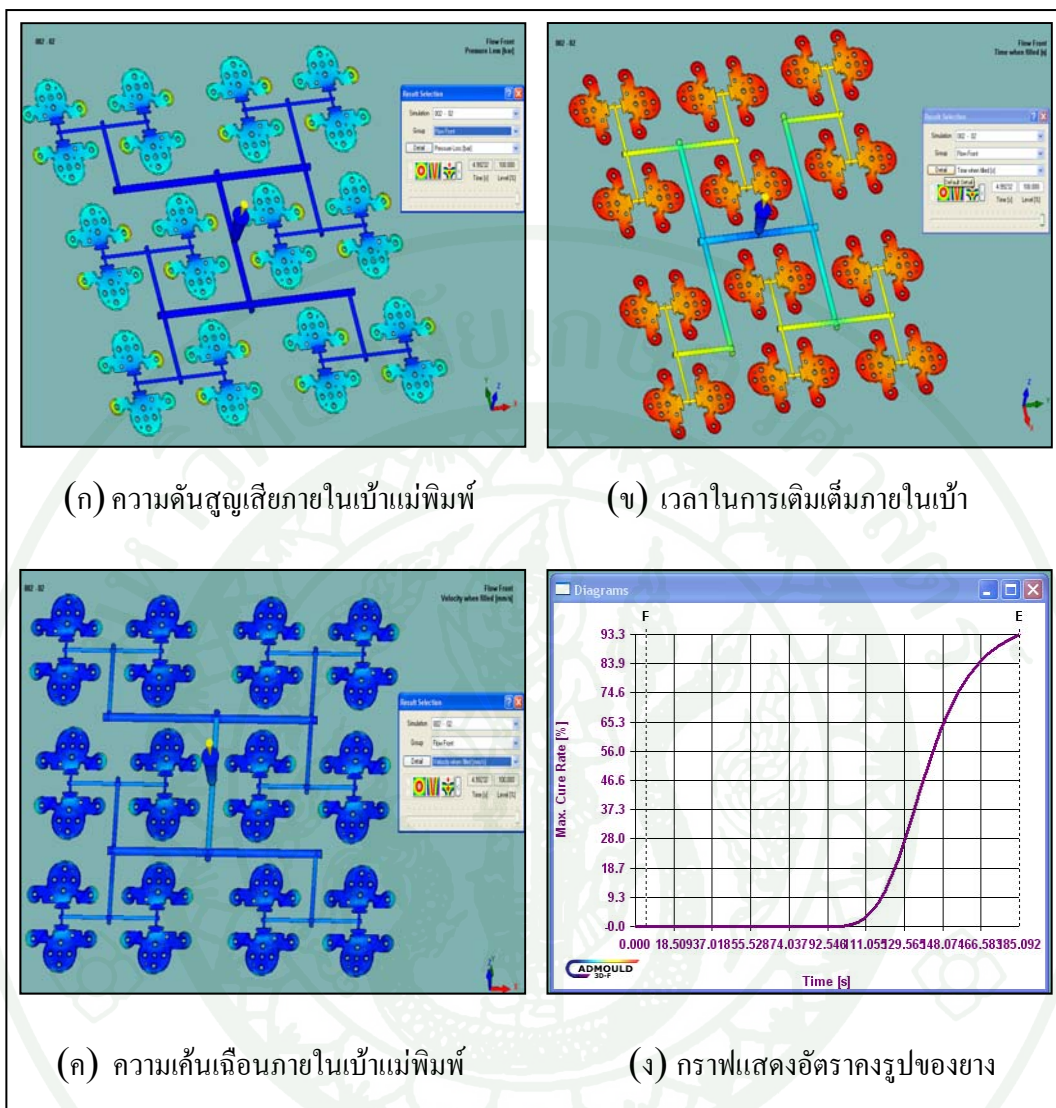
14. จากภาพผนวกที่ ค11 ให้กดที่ตำแหน่งหมายเลข 1 จะปรากฏบล็อก Flow-Rate/Pressure Input ดังแสดงภาพผนวกที่ ค12 เพื่อป้อนข้อมูลเครื่องอัดสังที่ใช้ในการจำลองการไหล โดยป้อนค่า Clamping Force Limitation ที่ 2,000 กิโลนิวตัน และป้อนค่า Injection Pressure Limitation ที่ 1,000 บาร์ จากนั้นกด OK



ภาพผนวกที่ ค12 การปรากฏบล็อก Flow-Rate/Pressure Input เพื่อป้อนข้อมูลของเครื่องอัดส่ง

15. ขั้นตอนต่อมาเลือกภาพคำสั่ง Simulation Description เพื่อบันทึกข้อมูล

16. ปรากฏบล็อก Simulation Description ดังแสดงภาพผนวกที่ ค13 ให้ตั้งชื่อโดยพิมพ์ที่ Title เพื่ตั้งชื่อ จากนั้นกด OK



ภาพผนวกที่ ค14 ผลที่ใช้การวิเคราะห์ ความดันสูญเสีย ความเค้นเฉือน ความเร็วในการเติม
เนื้อยาง เวลาในการเติมเนื้อยาง และอัตราการคงรูปของยาง

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายณัฐพงศ์ จรุงรักษ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	5 เมษายน พ.ศ. 2519
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วท.บ. เทคโนโลยีอุตสาหกรรม (เทคโนโลยีเครื่องกล) สถาบันราชภัฏพระนคร กรุงเทพฯ ปี พ.ศ. 2543 วศ.ม. เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ ปี พ.ศ. 2550
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	วิศวกรวิจัยและพัฒนา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันค้นคว้า และพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (TRF Master Research Grants: TRF-MAG Window I) ประจำปี พ.ศ. 2552 เลขที่สัญญา WRG-WI525E032 ภายใต้โครงการเชื่อมโยง ภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว.-อุตสาหกรรม