



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)

ปริญญา

เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาการออกแบบและผลิตรบบทางวิ่งเย็นสำหรับแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป
ผลิตภัณฑ์ยาง

A Development of Design and Making of the Cold Runner System for Rubber
Injection Moulds

นามผู้วิจัย นายพงศัวิชญ์ สกกุลเพชรอร่าม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชพล ชังชู, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กาญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาการออกแบบและผลิตระบบทางวิ่งเย็นสำหรับแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

A Development of Design and Making of the Cold Runner System
for Rubber Injection Moulds

โดย

นายพงศัวิษณุ สกุลเพชรอร่าม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พงศวิษณุ สกุลงเพชรอร่าม 2553: การพัฒนาการออกแบบและผลิตรบบทางวิ่งเย็นสำหรับ
แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิต
ทางอุตสาหกรรม) สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม โครงการสหวิทยาการ
ระดับบัณฑิตศึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D. 91 หน้า

ในการพัฒนาการออกแบบและผลิตรบบทางวิ่งเย็น สำหรับแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์
ยาง ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางนั้น การสูญเสียวัตถุดิบไปเป็นส่วนหนึ่งของระบบทางวิ่งย่อม
ส่งผลต่อต้นทุนในการผลิต ยิ่งวัตถุดิบที่มีราคาสูงหรือมีปริมาณการผลิตสูงยิ่งมีผลกระทบมาก
ดังนั้นแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นจึงถูกนำมาใช้เพื่อลดปริมาณยางที่สูญเสียลง อย่างไรก็ตามการ
ออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นมีความซับซ้อนและต้องใช้องค์ความรู้อย่างมาก ทำให้
แม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นที่ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางนั้นส่วนใหญ่นำเข้าจากต่างประเทศหรือ
ผลิตตามการออกแบบของผู้ออกแบบต่างประเทศ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเป็นการออกแบบและ
พัฒนาแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยางระบบทางวิ่งเย็น โดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม
เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของยาง และผลกระทบของอุณหภูมิขณะฉีดขึ้นรูป ซึ่ง
ผลการวิจัยพบว่าแม่พิมพ์และระบบหล่อเย็นที่ออกแบบขึ้นมาสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามที่
ต้องการ ทำให้ยางในระบบทางวิ่งที่ถูกคลุมด้วยระบบทางวิ่งเย็นจะไม่เกิดการคงรูปขณะทำการฉีด
ขึ้นรูป ดังนั้นการพัฒนาองค์ความรู้ในด้านการออกแบบระบบทางวิ่งเย็นของแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง
จะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ รวมทั้งสามารถสร้างโอกาสในการ
แข่งขันระดับนานาชาติต่อไป

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Phongwchit Sakunpet-alam 2010: A Development of Design and Making of the Cold Runner System for Rubber Injection Moulds. Master of Engineering (Industrial Production Technology), Major Field: Industrial Production Technology, Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Assistant Professor Supasit Rodkwan, Ph.D. 91 pages.

Generally, the excessive rubber material loss in the runner system in the injection moulding process significantly leads to increasing raw material cost. Therefore, the application of the novel cold runner system is recently used to reduce the waste of rubber in the runner. However, the cold runner assembled moulds are mostly imported from Taiwan and Japan. Consequently, this research is proposed to develop the design and manufacturing of the cold runner system used in rubber injection moulding with the application of CAD/CAM/CAE techniques. The characteristics of the rubber rheology and the temperature profile during injection were investigated. It was found that the temperature profile during injection controls the heat distribution in the runner system leading to prohibiting the rubber to scorch before it was subsequently injected into the mould. As a result, the better understanding of the cold runner system design and fabrication can be gained in this work so the wasted rubber raw material can be greatly reduced.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และอาจารย์จักรพันธ์ อร่ามพงษ์พันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ และอาจารย์กิตตินันท์ อ้นนานนท์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำเพิ่มเติมในขั้นสุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย โครงการวิจัยมหัศจรรย์ สกว.สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี 2551 (MRG-WI515E023) สำหรับการให้ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยนี้ รวมทั้งบริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย และสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือพร้อมทั้งอุปกรณ์ทดลองต่างๆ ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ บริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย และสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ซึ่งได้ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง คุณแม่ ผู้บังคับบัญชา และพี่ๆ ทุกคน ที่ให้โอกาสและเวลาในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

พงศ์วิษณุ สกุลเพชรอร่าม

ตุลาคม 2553

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการ	44
ผลและวิจารณ์	60
สรุปและข้อเสนอแนะ	86
สรุป	86
ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	88
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	91

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าเริ่มต้นของการวิเคราะห์	58
2	กระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่สำคัญของแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นกรณีศึกษา	75
3	เงื่อนไขการอบที่ 60 วินาที	78
4	เงื่อนไขการอบที่ 120 วินาที	80
5	เงื่อนไขการอบที่ 200 วินาที	82
6	การเปรียบเทียบปริมาณของเสีย	85

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ภาพจำลองอนุหภูมิของแม่พิมพ์ฉีดยางระบบทางวิ่งเย็นด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA	2
2	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางระบบทางวิ่งเย็น	2
3	สูตรโครงสร้างของยาง EPM	6
4	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป	7
5	ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป	7
6	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดส่ง	8
7	แสดงการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดส่ง	9
8	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง (ก) และแนวนอน (ข)	10
9	การขึ้นรูปยางด้วยวิธีการฉีด (ก) สกรูดันยางเข้าไปในเบ้าแม่พิมพ์ (ข) สกรูดันยาง จนเต็มเบ้าแม่พิมพ์ (ค) ยางคงรูป สกรูหมุนกลับ แม่พิมพ์เปิดและชิ้นงานหลุดออก จากแม่พิมพ์	11
10	เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง	12
11	เครื่องฉีดยางแบบแนวนอน	12
12	แม่พิมพ์ฉีดยางระบบทางวิ่งเย็น	14
13	ระบบทางวิ่งเย็น	15
14	แสดงอนุหภูมิของแม่พิมพ์ขณะติดตั้งบนเครื่องฉีด	15
15	แม่พิมพ์อัดส่งแบบระบบทางวิ่งเย็น	16
16	ลักษณะการปรับปรุงระบบทางวิ่งเย็น	17
17	กลไกของระบบหัวฉีดในแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็น	17
18	ขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์	19
19	แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์	20
20	ลักษณะน้ำระบบหล่อเย็นแบบอนุกรม	25
21	ลักษณะน้ำระบบหล่อเย็นแบบขนาน	27
22	ลักษณะน้ำระบบหล่อเย็นแบบผสมขนานและอนุกรม	27
23	การเกิด velocity gradient เมื่อมีแรงกระทำในแนวขนานกับพื้นผิวของไหล	29
24	กราฟแสดงลักษณะการไหลของของเหลว	31

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
25 การทดลองของเรย์โนลด์	33
26 สมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้นและการยืดหยุ่นไม่เชิงเส้นของวัสดุ	35
27 คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การไหลของยาง และการออกแบบแม่พิมพ์	36
28 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม 3D-SIGMA	37
29 แบบและรายละเอียดเครื่องฉีดยาง	39
30 ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์	40
31 เครื่อง Electronic Densimeter (MD-200S)	41
32 เครื่อง Capillary Rheometer (RHEO – TESTER 2000)	41
33 เครื่อง Moving Die Rheometer (TECHPRO, Roheotech MD+)	42
34 เครื่อง Mettler Toledo DSC882	43
35 เครื่อง Thermofliker (SWO Polymertechnik Gmbh)	43
36 ขั้นตอนการพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็น	44
37 กระบวนการออกแบบระบบทางวิ่งเย็นของแม่พิมพ์	45
38 ท่อภายในเครื่องชักผ้าที่นำมาเป็นกรณีศึกษา	46
39 แบบ 2 มิติของชิ้นงานท่อภายในเครื่องชักผ้า	47
40 แบบ 3 มิติ ท่อภายในเครื่องชักผ้าที่นำมาเป็นกรณีศึกษา	48
41 แบบ 2 มิติของชิ้นงานท่อภายในเครื่องชักผ้าที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม CAD	48
42 แบบก่อนมีระบบทางวิ่งเย็น	49
43 ระบบทางวิ่งเย็นที่มีชุดหัวฉีดทางวิ่งเย็น 8 หัว	50
44 ลักษณะชิ้นส่วนหัวฉีดทางวิ่งเย็นที่ประกอบในแม่พิมพ์	50
45 ระบบทางวิ่งเย็นที่มีชุดหัวฉีดทางวิ่งเย็น 4 หัว	51
46 ลักษณะทางวิ่งส่วนทางวิ่งเย็น	52
47 ลักษณะทางวิ่งร้อนและรูเข้า	52
48 ระบบน้ำหล่อเย็นและเส้นทางไหลของน้ำหล่อเย็น	53
49 แสดงแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (P/L)	54
50 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของแบบร่างแม่พิมพ์ที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม	54

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
51	แม่พิมพ์ที่ใช้ในการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA	56
52	ระบบน้ำหล่อเย็นในแม่พิมพ์	57
53	ค่าการแบ่งเอลิเมนต์	57
54	แผนการวิเคราะห์การไหล	59
55	ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในแม่พิมพ์ก่อนมีระบบทางวิ่งเย็น	60
56	กราฟแสดงความสมดุลของความร้อนในแต่ละรอบการฉีด	61
57	ลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ ของการฉีด	62
58	ลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ของการฉีด	62
59	ลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์ที่ 75 เปอร์เซ็นต์ ของการฉีด	63
60	ลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ของการฉีด	63
61	ลักษณะการไหลของยางในชิ้นงาน	64
62	กราฟแสดงอุณหภูมิแม่พิมพ์ชุดทางวิ่งเย็น	65
63	Scorch Index ของยางเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการฉีด	66
64	ค่า Scorch Index ที่บริเวณต่างๆขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 60 วินาที	66
65	ค่า Scorch Index ที่บริเวณต่างๆขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 120 วินาที	67
66	ค่า Scorch Index ที่บริเวณต่างๆขณะเสร็จสิ้นกระบวนการคงรูปที่เวลา 200 วินาที	67
67	บริเวณคงรูปที่มีค่าน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 60 วินาที	68
68	บริเวณคงรูปที่มีค่าน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 120 วินาที	68
69	บริเวณคงรูปที่มีค่าน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ขณะเสร็จสิ้นกระบวนการคงรูปที่เวลา 200 วินาที	69
70	อุณหภูมิของยางขณะเริ่มต้นกระบวนการคงรูป	70
71	อุณหภูมิของยางขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 60 วินาที	70
72	อุณหภูมิของยางขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 120 วินาที	71
73	อุณหภูมิของยางขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 200 วินาที	71
74	อุณหภูมิของหัวฉีดทางวิ่งเย็น	72
75	การกระจายของอุณหภูมิในแม่พิมพ์ขณะฉีด	72

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
76	แบบ 3 มิติ ภายนอกของระบบทางวิ่งเย็น	73
77	แม่พิมพ์ส่วนคอร์ที่มีระบบลมในการปลดชิ้นงาน	73
78	ระบบลมสำหรับปลดชิ้นงาน	74
79	ส่วนหัวฉีดทางวิ่งเย็นและระบบหล่อเย็น	76
80	แม่พิมพ์ส่วนทางวิ่งเย็น	76
81	แม่พิมพ์ส่วนคอร์	77
82	การประกอบแม่พิมพ์ส่วนคอร์และคาร์วิตี้	77
83	ชิ้นงานที่ได้จากเงื่อนไขการอบที่ 60 วินาที (ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จาก Software (ข) ผลที่ได้จากการทดลองฉีดชิ้นงานจริง	79
84	ชิ้นงานที่ได้จากเงื่อนไขการอบที่ 120 วินาที (ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จาก Software (ข) ผลที่ได้จากการทดลองฉีดชิ้นงานจริง	81
85	ชิ้นงานที่ได้จากเงื่อนไขการอบที่ 200 วินาที (ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จาก Software (ข) ผลที่ได้จากการทดลองฉีดชิ้นงานจริง	83
86	กราฟน้ำหนักของชิ้นงาน	84
87	ของเสียที่ระบบทางวิ่ง (ก) ก่อนใช้ระบบทางวิ่งเย็น (ข) หลังใช้ระบบทางวิ่งเย็น	85
88	กราฟน้ำหนักของยางเหลือทิ้ง	85

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

<i>A</i>	=	พื้นที่ (Area)
ASTM	=	มาตรฐานของสมาคมทดสอบวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials)
<i>b</i>	=	ความกว้าง (Width)
<i>B</i>	=	ความยาวตามแนวหมอนรองแม่พิมพ์ (Length Along the Spacer Block)
CAD	=	คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design)
CAE	=	คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering)
CAM	=	คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing)
<i>dv</i>	=	ความแตกต่างของความเร็ว (Difference of Speed)
<i>dx</i>	=	ระยะทางที่เปลี่ยนไป (Distance has Changed)
<i>D</i>	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter)
DIN	=	มาตรฐานทางอุตสาหกรรมของเยอรมัน (Deutsches Institut für Normung)
<i>E</i>	=	โมดูลัสของการยืดหยุ่นเหล็ก (Modulus of Elasticity)
EDM	=	การใช้ไฟฟ้าในการตัด (Electrical Discharge Machining)
EPDM	=	ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene Diene Rubber)
EPM	=	ยางเอทิลีนโพรพิลีน (Ethylene-Propylene Rubber)
<i>F</i>	=	แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force)
<i>F'</i>	=	แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ (Shear Stress)
<i>h</i>	=	ความหนาของหมอนรองแม่พิมพ์ (Thickness of Spacer Block)
<i>I</i>	=	โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)
ISO	=	มาตรฐานสากลเป็นมาตรฐานกลางที่ใช้อ้างอิงทั่วโลก (International Standards Organization)
<i>J</i>	=	จูล (Joule)
<i>m</i>	=	เมตร (Meter)
<i>N</i>	=	จำนวน (Number)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

kg	=	กิโลกรัม (kilogram)
kW	=	กิโลวัตต์ (kilowatt)
l	=	ความยาว (Length)
L	=	ระยะห่างระหว่างหมอนรองแม่พิมพ์ (Distance Between the Spacer Block)
P	=	ความดัน (Pressure)
Re	=	เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)
S	=	อัตราเฉือน (Shear Rate)
STL	=	มาตรฐานการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่เป็นรายละเอียดของแบบจำลอง (Stereo Lithography)
W	=	แรงที่กระทำ (Force)
η	=	สัมประสิทธิ์ของความหนืด (Coefficient of Viscosity)
ρ	=	ความหนาแน่น (Density)
δ	=	ค่าโก่งตัว (Deflection)
δ_{\max}	=	ค่าโก่งตัวสูงสุด (Maximum Deflection)
\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ย (Average Speed)
μ	=	ความหนืด (Viscosity)
$^{\circ}C$	=	องศาเซลเซียส (Degree Celsius)
ν	=	ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematics Viscosity)
C_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity)
ΔT	=	ผลต่างอุณหภูมิ (Temperature Difference)

การพัฒนาการออกแบบและผลิตระบบทางวิ่งเย็น สำหรับแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

A Development of Design and Making of the Cold Runner System for Rubber

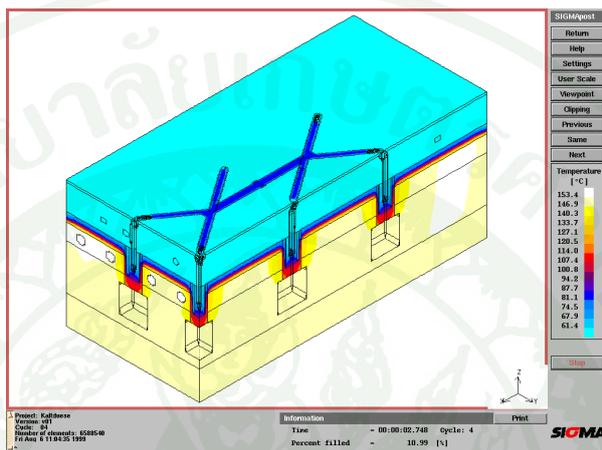
Injection Moulds

คำนำ

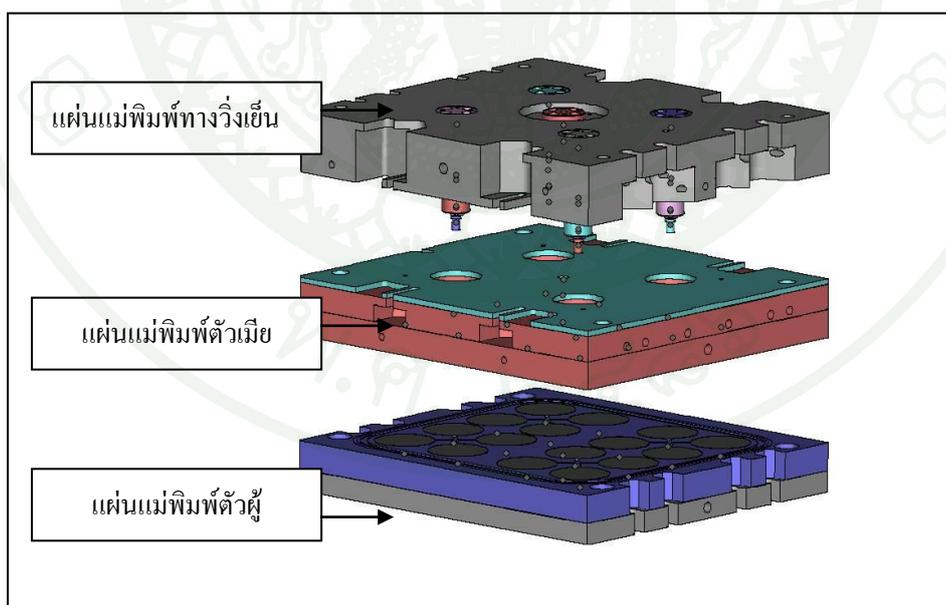
ปัจจุบันมีความต้องการผลิตภัณฑ์ยางในตลาดเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีความจำเป็นในการนำเทคโนโลยีใหม่ๆเข้ามาเพื่อพัฒนาและปรับปรุงการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ยางมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถลดเวลา และต้นทุนในการผลิตลงได้ ทั้งยังเพิ่มองค์ความรู้ให้แก่บุคลากรในอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ในประเทศด้วย การใช้แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบระบบทางวิ่งเย็น (Cold Runner System) ก็เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่ช่วยลดต้นทุนการผลิตลงได้ เนื่องจากระบบทางวิ่งเย็นจะช่วยให้เนื้อยางที่อยู่ในระบบทางวิ่งได้รับการควบคุมอุณหภูมิไว้ไม่ให้ยางสุก ทำให้สามารถใช้ได้ในการฉีดรอบต่อไป และเป็นการลดต้นทุนด้านวัตถุดิบลงด้วย โดยแม่พิมพ์ฉีดแบบระบบทางวิ่งเย็นเหมาะสำหรับการผลิต ผลิตภัณฑ์ยางที่มีปริมาณการผลิตสูง ค่าต้นทุนวัตถุดิบราคาแพง หรือแม่พิมพ์ที่มีระบบทางวิ่งขนาดใหญ่หรือยาว ทำให้ผู้ประกอบการสามารถผลิตชิ้นส่วนได้เป็นจำนวนมาก และยังสามารถลดปริมาณยางเสียลงได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นมีการออกแบบและผลิตที่ซับซ้อน รวมทั้งมีราคาสูง ดังนั้นหากสามารถออกแบบและผลิตระบบทางวิ่งเย็นที่เป็นขนาดมาตรฐาน เพื่อให้ผู้ผลิตและผู้ประกอบการแม่พิมพ์สามารถเลือกขนาดมาตรฐานไปใช้ ในลักษณะเดียวกันกับระบบทางวิ่งร้อน (Hot Runner) ในแม่พิมพ์พลาสติกที่มีขนาดมาตรฐานจากผู้ผลิตให้เลือกใช้ ซึ่งง่ายต่อการออกแบบแม่พิมพ์ นอกจากนี้แผ่นทางวิ่งเย็น (Cold Runner Block) ยังสามารถถอดเปลี่ยนกับแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์อื่นได้ ซึ่งสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการผลิตลงได้

จากหลักการและเหตุผลดังกล่าว ทางคณะผู้เสนอโครงการและบริษัทผู้ร่วมโครงการนี้มีความเห็นว่าหากมีการนำเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ (CAD/CAM) รวมทั้งการนำคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (CAE) เข้ามาทำนายพฤติกรรมการไหลของยาง และผลกระทบทางด้านอุณหภูมิของแม่พิมพ์ในแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็น จะสามารถทำให้ได้แม่พิมพ์ฉีดที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น และการทำแผ่นแม่พิมพ์ทางวิ่งเย็นมาตรฐานสำหรับแม่พิมพ์

ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ซึ่งจะสามารถเพิ่มความสะดวกรวดเร็วในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ นอกจากนี้ยังเป็นการสนับสนุนให้มีการสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่ดีตามหลักวิชาการและสามารถสรุปเป็นคู่มือสำหรับการถ่ายทอดและเผยแพร่ความรู้ในเรื่องการพัฒนาแม่พิมพ์และวิธีออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 1 และ 2



ภาพที่ 1 ภาพจำลองอุณหภูมิของแม่พิมพ์ฉีดยางระบบทางวิ่งเย็นด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางระบบทางวิ่งเย็น

วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาระบบทางวิ่งเย็นสำหรับแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การไหลของยาง และอุณหภูมิของเนื้อยางในแม่พิมพ์ เพื่อลดปริมาณยางเหลือทิ้งในส่วนของการทางวิ่งเย็นจากการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ผลิตภัณฑ์ที่เลือกมาเป็นกรณีศึกษา คือ ท่อยางในเครื่องซักผ้า โดยใช้วัสดุเป็นยาง EPDM
2. ศึกษากระบวนการคงรูปในระบบทางวิ่งเย็นซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ใช้น้ำที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียสในกระบวนการหล่อเย็น และใช้เวลาอบยางที่ 60 120 และ 200 วินาที
3. ทำการวิเคราะห์การไหล และอุณหภูมิแม่พิมพ์ด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA เพื่อลดปริมาณยางเหลือทิ้งในการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

การตรวจเอกสาร

1. บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kwon ได้ทำการศึกษาการออกแบบระบบระบายความร้อนโดยใช้วิธีการแบ่งเอลิเมนต์ (Kwon, 1988) Wang ได้ทำการศึกษาใช้คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบการระบายความร้อนสำหรับแม่พิมพ์ฉีด (Wang, 1990) Li ได้ทำการศึกษาออกแบบแม่พิมพ์ฉีดระบบทำความเย็นอย่างง่าย (Li, 2001) Fadel ได้ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบการระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์ฉีด (Fadel, 2001) Lin และ Chou ได้ทำการศึกษาการออกแบบช่องระบายความร้อนในแม่พิมพ์พลาสติกฉีดสี่เหลี่ยมแบน (Lin and Chou, 2002) Porfyrakis ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างจุลภาคเงื่อนไขการประมวลผลและสมบัติเชิงกลสำหรับการฉีดขึ้นรูปยาง (Porfyrakis *et.al.*, 2002) Yan ได้ทำการศึกษาเครือข่ายประสาทเทียมการออกแบบเพื่อลดการโก่งงอในแม่พิมพ์ฉีด (Yan *et.al.*, 2006) Juang ได้ทำการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิ แม่พิมพ์ฉีดยาง โดย ที่เอสเคแบบเครือข่ายพีซีนิวรัล (Juang *et.al.*, 2006) Smith ได้ทำการศึกษาการคำนวณขั้นตอนการระบายความร้อนของการฉีดขึ้นรูป (Smith *et.al.*, 2008) Hassan ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการระบายความร้อนในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก แบบ 3 มิติ (Hassan *et.al.*, 2010)

2. คุณสมบัติเบื้องต้นของยางและยางอีพีดีเอ็ม

อีลาสโตเมอร์ (Elastomers) เป็นโพลิเมอร์แบบอสัณฐาน (Amorphous Polymers) โดยอีลาสโตเมอร์สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมเซต (Thermosets) และเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) โดยเทอร์โมเซตจะมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ (3D Network) มีสายโมเลกุลยาวซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะทางเคมี และสามารถดูดซับสารละลายได้ดี แต่ไม่สามารถขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้ด้วยการให้ความร้อน ส่วนโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกนั้นจะแตกต่างกันออกไปเพราะแต่ละโมเลกุลจะเชื่อมกันทางกายภาพเท่านั้น และสามารถดูดซับสารละลายได้บางอย่างเท่านั้น นอกจากนั้นเทอร์โมพลาสติกสามารถทำการขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้ด้วยการให้ความร้อน ทั้งเทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกถูกนำไปใช้แตกต่างกันตามคุณสมบัติ นั้นๆ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้ว ความต้องการที่จะนำไปใช้เป็นยางรถยนต์ และยางรองแท่นเครื่องยนต์นั้น เทอร์โมเซตจะเหมาะสมกว่าเนื่องมาจากคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น (Elasticity) และความทนทาน (Durability) โดยหลังจากการเติมสารเคมีต่างๆ เข้าไปผสมกับอีลาสโตเมอร์ จะ

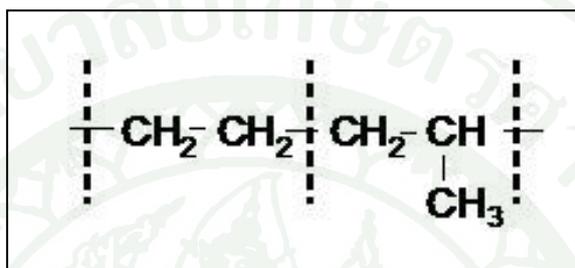
ได้สิ่งที่เรียกว่า คอมพาวนด์ (Compound) และเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนและกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) แล้วจะได้สิ่งที่เรียกว่า ยาง (Rubber) (Gent, 2001) นอกจากนั้นยังสามารถนิยามความหมายของอีลาสโตเมอร์และยางตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials, ASTM) (ASTM, 1990) ได้ดังนี้

“อีลาสโตเมอร์สามารถนิยามได้ว่า วัสดุที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยที่อุณหภูมิห้องทั้งรูปร่างและขนาดสามารถคืนตัวได้หลังจากนำแรงที่มากระทำออก ส่วนยางก็สามารถนิยามได้ด้วยมาตรฐานเดียวกัน คือ วัสดุที่สามารถคืนตัวจากการเสียรูปได้อย่างรวดเร็วและแรง และสามารถปรับปรุงสภาพได้แม้ว่าโดยพื้นฐานแล้วจะไม่สามารถละลาย (แต่สามารถเกิดการบวมได้) ได้ในสารละลายที่เดือด เช่น เบนซีน (Benzene) เมทิล เอทิลคีโตน (Methyl Ethylketone) หรือ เอทานอล-โทลูอีน อะเซโอโทรป (Ethanol-Toluene Azeotrope) ยางในสถานะที่แปรสภาพแล้ว ซึ่งปราศจากการเจือจาง จะหดตัวเหลือเพียงไม่ถึง 1.5 เท่าของความยาวเริ่มต้นภายในเวลาหนึ่งนาทีก่อนที่จะได้รับการยืดออกเป็นสองเท่าที่อุณหภูมิห้อง และคงตัวเอาไว้หนึ่งนาทีก่อนที่จะปล่อย” (ASTM, 1990)

ยาง EPDM : Ethylene-Propylene Diene Rubber (ยางอีพีดีเอ็มหรือยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน) เป็นยางสังเคราะห์ที่พัฒนามาจากยาง EPM โดยเติมโมโนเมอร์ตัวสาม คือ ไดอีน ลงไปเล็กน้อยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน ทำให้ยางที่ได้มีส่วนที่ไม่อิ่มตัว (พันธะคู่) อยู่ในสายโซ่โมเลกุล ยางชนิดนี้จึงสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถัน แต่ไดอีนที่เติมลงไปไม่ได้ไปแทรกอยู่ที่สายโซ่หลักของโมเลกุล ดังนั้นสายโซ่หลักก็ยังคงเหมือนเดิมหรือไม่มีผลต่อสายโซ่หลักมากนัก จึงทำให้ยาง EPDM ยังคงมีสมบัติเด่นในเรื่องการทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน แสงแดด ออกซิเจน โอโซน สารเคมี กรด ด่าง ได้ดีมาก และมีความยืดหยุ่นตัวได้ดีที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับ ยางธรรมชาติ มักใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ภายนอกเนื่องจากทนต่อสภาพอากาศได้ดีและใช้ผลิต ชิ้นส่วนยานยนต์เป็นส่วนใหญ่ เช่น ยางขอบกระจก ยางปิดน้ำฝน ท่อยางของหม้อน้ำรถยนต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นฉนวนหุ้มสายเคเบิล สายพานลำเลียง แผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางมุงหลังคา

ยาง EPM : Ethylene-Propylene Rubber (ยางอีพีเอ็มหรือยางเอทิลีนโพรพิลีน) เป็นยางสังเคราะห์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาโคโพลิเมอไรเซชันระหว่างโมโนเมอร์ของเอทิลีน (Ethylene) กับโพรพิลีน (Propylene) มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐานและมีสมบัติเป็นยาง

แต่ไม่มีส่วนที่ไม่อิ่มตัว (ไม่มีพันธะคู่) จึงทำให้มีสมบัติเด่นในเรื่องความทนทานต่อการเสื่อมสภาพ อันเนื่องมาจากแสง แดง ออกซิเจน ความร้อน โอโซน และสารเคมี แต่อย่างชนิดนี้มีข้อเสีย คือ ไม่สามารถใช้กำมะถันในการคงรูปได้ (เนื่องจากไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล) ดังนั้นการทำให้ยางคงรูป จึงต้องใช้เปอร์ออกไซด์เท่านั้น การใช้งานนิยมใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่ใช้งานภายนอก เช่น ยางขอบประตู ยางขอบหน้าต่าง โอริง ทนความร้อนสายเคเบิล เป็นต้น



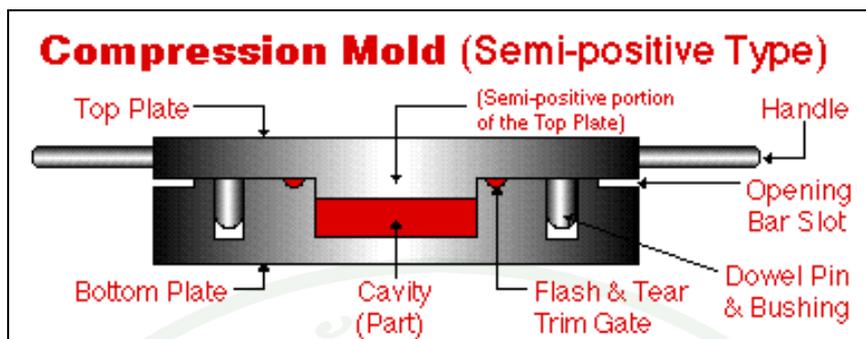
ภาพที่ 3 สูตรโครงสร้างของยาง EPM

3. กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (Moulding) คือการขึ้นรูปยางให้เป็นชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างที่แน่นอนโดยใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป โดยเปลี่ยนยางเทอร์โมเซตจากสถานะที่เป็นของเหลวไปสู่สถานะของแข็งหลังจากเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Crosslinking) ซึ่งเรียกว่า กระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanizing) หรือ การอบบ่ม (Curing) โดยการขึ้นรูปยางนั้นจะมีอยู่ 3 แบบ คือ การอัดขึ้นรูป (Compression Moulding) การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (Transfer Moulding) และการฉีดขึ้นรูป (Injection Moulding) (Sommer, 2003)

3.1 การอัดขึ้นรูป (Compression Moulding)

การขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดนั้น เป็นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนมาก และแม่พิมพ์มีราคาไม่สูง โดยขนาดของแม่พิมพ์จะขึ้นกับชิ้นงานซึ่งมีตั้งแต่ขนาดประมาณ 10 กรัม จนถึง 10 กิโลกรัม เครื่องจักรที่ใช้สำหรับอัดขึ้นรูปเป็นเครื่องอัดด้วยระบบไฮดรอลิกส์ทั่วไป ตัวอย่างแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป

ที่มา: Hawthorne Rubber Manufacturing Corp. (2004)



ภาพที่ 5 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป

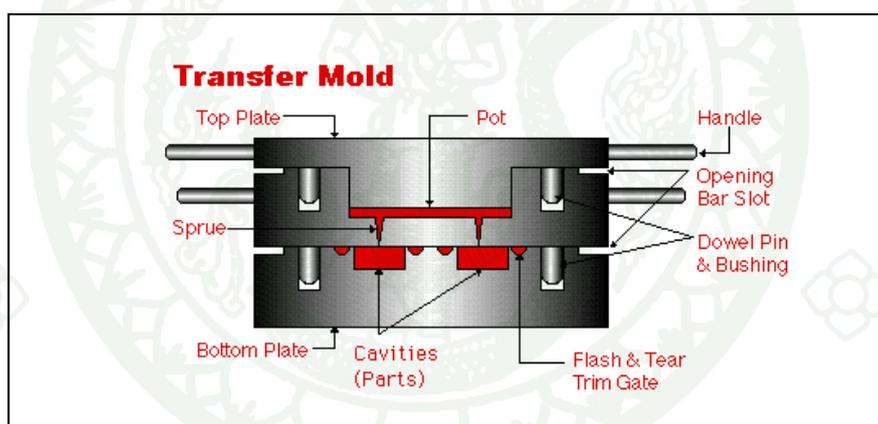
ที่มา: Straton Industries Inc. (2005)

ขั้นตอนการขึ้นรูปนั้นเริ่มจากนำชิ้นยางที่ยังไม่สุกใส่ลงไปในเบ้า (Cavity) ของแม่พิมพ์ จากนั้นทำการปิดแม่พิมพ์ที่ใส่เข้าไปในเครื่องอัด เครื่องอัดจะใช้แรงดันกดปิดแม่พิมพ์จนสนิท โดยก่อนจะกดปิดแม่พิมพ์จะมีการกด-คลาย (Bumping) ก่อนเพื่อให้อากาศออกให้เนื้อยางไหลได้เต็มที่ เบ้า หลังจากได้รับความร้อนจากเครื่องอัดและใช้เวลาระยะหนึ่งจนยางสุกแล้ว แม่พิมพ์จะถูกเปิด

ออกและผู้ปฏิบัติงานสามารถหยิบชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และทำความสะอาดแม่พิมพ์ จากนั้นแม่พิมพ์ก็จะพร้อมสำหรับการอัดขึ้นรูปในรอบต่อไป (Wheelans, 1974)

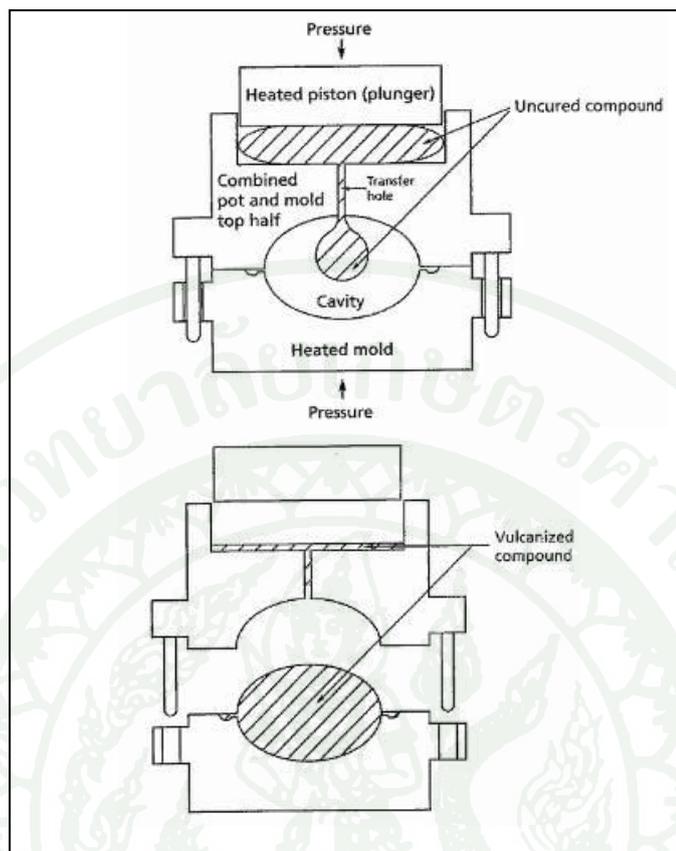
3.2 การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (Transfer Moulding)

การขึ้นรูปแบบอัดส่งนั้นชิ้นงานที่ได้จะมีความแม่นยำมากกว่าแบบอัด และสามารถควบคุมรอบเวลาการผลิตได้ดีกว่า หลักการที่สำคัญของการขึ้นรูปแบบอัดส่งนั้นคือจะมีช่องสำหรับหรับใส่ยาง 1 ช่อง (Pot) โดยช่องดังกล่าวนี้จะเชื่อมต่อกับเข้าด้วยทางวิ่งซึ่งมีทั้งเข้าเดียวหรือหลายเข้าก็ได้ เมื่อใส่ยางที่ยังไม่สุกลงไปในช่องใส่ยาง ส่วนอัด (Plunger) ก็จะอัดเนื้อยางผ่านทางวิ่งเข้าไปสู่เบ้า หลังจากนั้นก็จะให้ความร้อนจนยางสุก นำชิ้นงานออกจากเบ้าโดยผู้ปฏิบัติงาน (Wheelans, 1974) ตัวอย่างแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัดส่ง และการขึ้นรูปแบบอัดส่งแสดงดังภาพที่ 6 และ 7



ภาพที่ 6 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดส่ง

ที่มา: Hawthorne Rubber Manufacturing Corp. (2004)



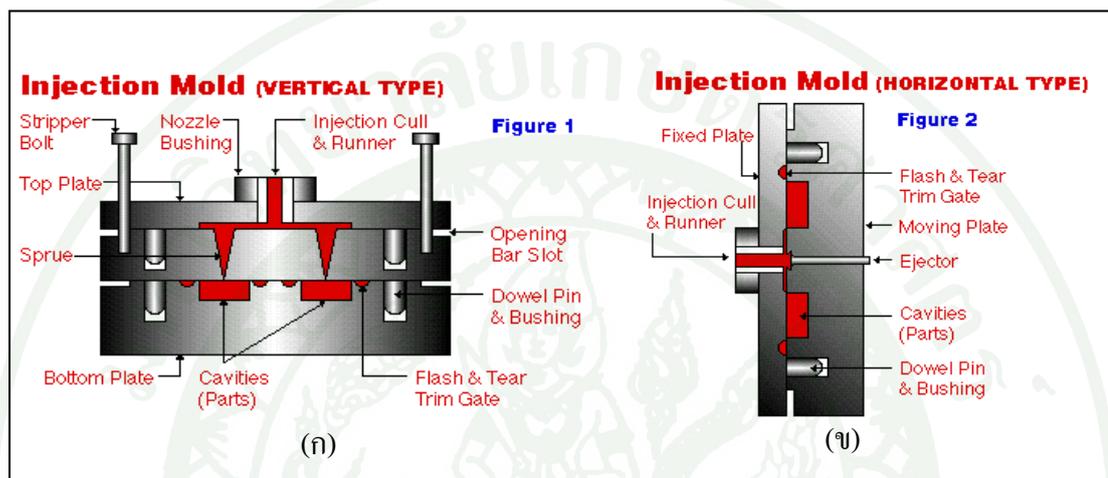
ภาพที่ 7 แสดงการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดส่ง

ที่มา: Ciesielski (1999)

3.3 การฉีดขึ้นรูป (Injection Moulding)

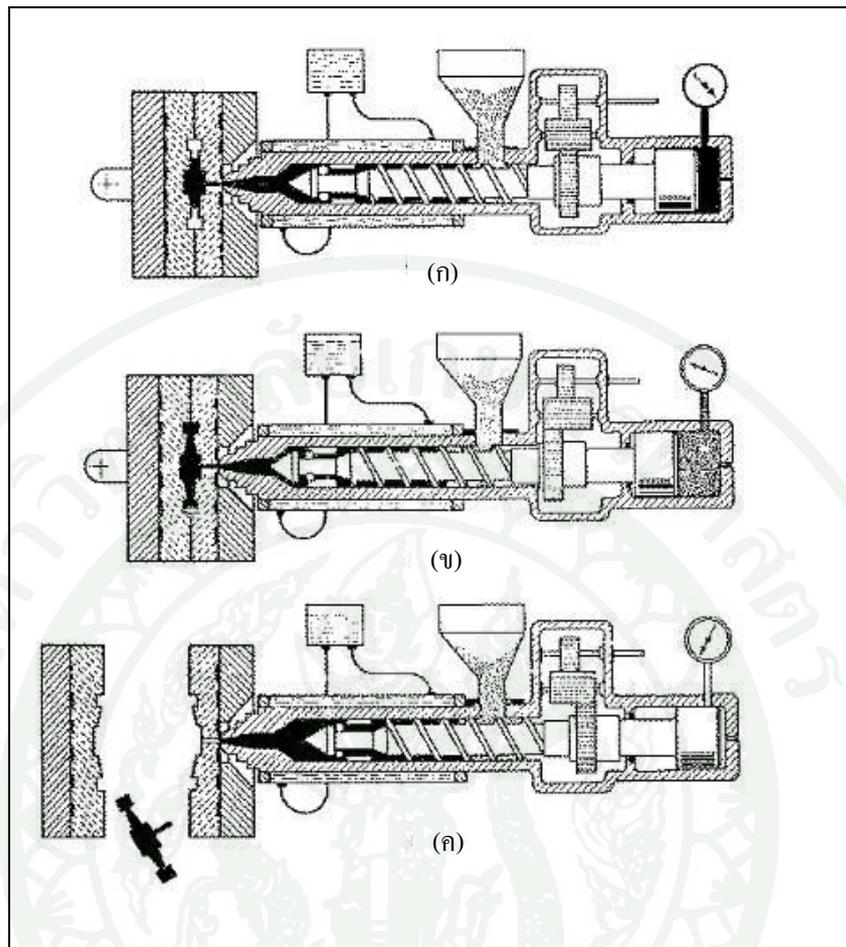
การฉีดขึ้นรูปนั้นเป็นการฉีดเนื้อยางจากกระบอกฉีด (Injection Barrel) ด้วยกระบอกสูบ (Ram) หรือสกรู (Screw) ที่อยู่ภายใน เนื้อยางจะถูกฉีดผ่านหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งเป็นส่วนปลายสุดเข้าสู่รูฉีดของแม่พิมพ์ โดยรูฉีดนี้จะเชื่อมต่อกับทางวิ่ง (Runner) และรูเข้า (Gate) ก่อนเข้าสู่เบ้า (Cavity) ของแม่พิมพ์ต่อไป โดยที่แม่พิมพ์จะมีตัวทำความร้อนที่มีลักษณะเป็นแท่ง (Heater Rod) ติดอยู่เพื่อทำให้ยางเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ หลังจากยางสุกแล้วแม่พิมพ์จะเปิดออกเพื่อปลดชิ้นงาน โดยสามารถนำชิ้นงานออกมาด้วยผู้ปฏิบัติงาน หรือใช้แขนหุ่นยนต์หยิบออกแบบอัตโนมัติก็ได้ ตัวอย่างแม่พิมพ์และกระบวนการฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 8 และ 9

นอกจากนี้การเติมเนื้อยางจะเป็นแบบอัตโนมัติซึ่งจะเป็นแบบสายยาวเข้าสู่กระบอกลีดหรือเป็นเม็ดเล็กผ่านกรวย (Hopper) คล้ายการฉีดพลาสติก เครื่องฉีดยางแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง (Vertical Injection Machine) และเครื่องฉีดยางแบบแนวนอน (Horizontal Injection Machine) (Ciesielski, 1999) ดังแสดงในภาพที่ 10 และ 11



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง (ก) และแนวนอน (ข)

ที่มา: Hawthorne Rubber Manufacturing Corp. (2004)



ภาพที่ 9 การขึ้นรูปยางด้วยวิธีการฉีด (ก) สกรุดันยางเข้าไปในเบ้าแม่พิมพ์ (ข) สกรุดันยางจนเต็มเบ้าแม่พิมพ์ (ค) ยางคงรูป สกรูหมุนกลับ แม่พิมพ์เปิดและชิ้นงานหลุดออกจากแม่พิมพ์

ที่มา: Wheelans (1974)



ภาพที่ 10 เครื่องนีดยงแบบแนวตั้ง

ที่มา: Sanjo Seiki Co. (1997)



ภาพที่ 11 เครื่องนีดยงแบบแนวนอน

ที่มา: Nissei America Inc. (2005)

3.3.1 ข้อดีของกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง (Ciesielski, 1999)

3.3.1.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเนื้อยางสูงกว่าที่ใช้ในวิธีการอัดและอัดส่ง ซึ่งส่งผลให้ยางสุกตัวเร็วกว่า

3.3.1.2 เนื่องจากอุณหภูมิของเนื้อยางที่ถูกฉีดเข้าเบ้าใกล้เคียงกับอุณหภูมิฉีด ทำให้การถ่ายเทอุณหภูมิระหว่างการบ่มมีน้อยมาก ดังนั้นจึงเกิดแรงดันภายในน้อยมาก ซึ่งเป็นผลให้การเกิดรอยฉีก หรือรอยกัด (Backrind) บริเวณแนวส่วนแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line) ลดลงได้มาก

3.3.1.3 ไม่จำเป็นต้องตัดแบ่ง หรือทำรูปทรงก่อนฉีด เพราะสามารถป้อนเนื้อยางแบบสายยาว หรือเป็นเม็ดได้เลย

3.3.1.4 ลดปริมาณครีป (Flash) ยาง

3.3.1.5 ลดการเกิดการอุดตันของอากาศ (Air Traps)

3.3.1.6 สามารถใช้ระบบการผลิตแบบอัตโนมัติได้

3.3.1.7 รอบการฉีด (Cycle Time) ลดลง ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนมาก

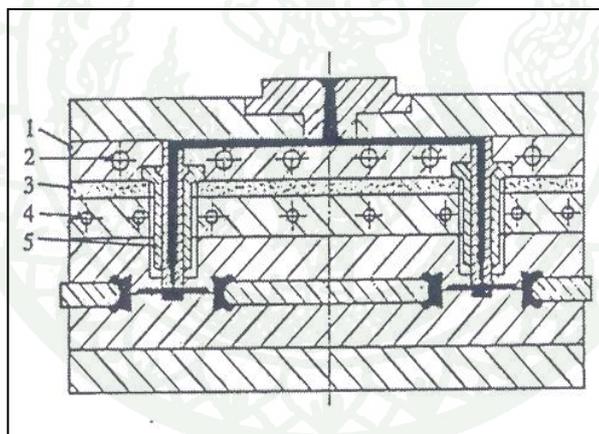
3.3.2 ข้อเสียของกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง

3.3.2.1 แม่พิมพ์จำเป็นต้องทนต่อแรงดันสูง ทำให้ต้องใช้เหล็กที่มีความแข็งแรงมาก และใช้ความละเอียดสูง

3.3.2.2 เนื่องจากแม่พิมพ์ฉีดยางมีระบบทางวิ่งทำให้เสียเนื้อยางในส่วนดังกล่าว เป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตมากกว่าการอัดและการอัดส่ง

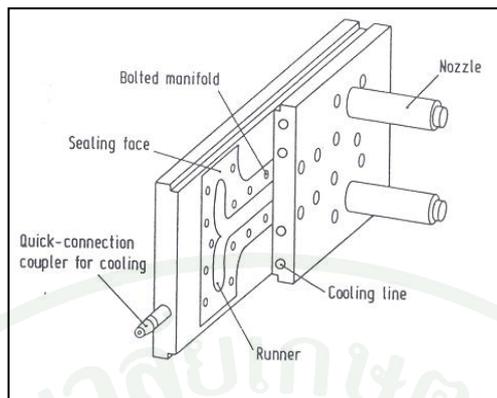
4. แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบระบบทางวิ่งเย็น

ระบบทางวิ่งเย็น (Cold Runner) ในแม่พิมพ์ฉีดยางมีจุดมุ่งหมายคล้ายกับระบบทางวิ่งร้อน (Hot Runner) ในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก คือ ต้องการที่จะลดการสิ้นเปลืองวัตถุดิบเนื่องมาจากส่วนของระบบทางวิ่งหลังจากการขึ้นรูปแล้ว โดยลักษณะของแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบระบบทางวิ่งเย็นแสดงดังภาพที่ 12 ถึง 14 เนื่องจากในระบบทางวิ่งจะถูกควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำเพื่อไม่ให้เกิดกระบวนการวัลคาร์ไนซ์ ซึ่งอุณหภูมิของแผ่นแม่พิมพ์ที่ฝังระบบทางวิ่งเย็น (1) ว่าจะถูกควบคุมด้วยระบบหล่อเย็น (2) และแผ่นฉนวนกันความร้อน (3) ซึ่งจะป้องกันความร้อนจากแผ่นแม่พิมพ์อุณหภูมิสูง (4) ที่ทำให้เกิดกระบวนการวัลคาร์ไนซ์ โดยยางจะไหลผ่านทางวิ่งดังกล่าวผ่านเข้าสู่หัวฉีดทางวิ่งเย็น (Cold Runner Nozzle) (5) ซึ่งมีช่องอากาศเป็นฉนวนกันความร้อนก่อนที่จะเข้าสู่ช่องขึ้นงานต่อไป โดยจุดต่อระหว่างยางที่จะถูกและไม่ถูกวัลคาร์ไนซ์คือส่วนปลายสุดของหัวฉีด



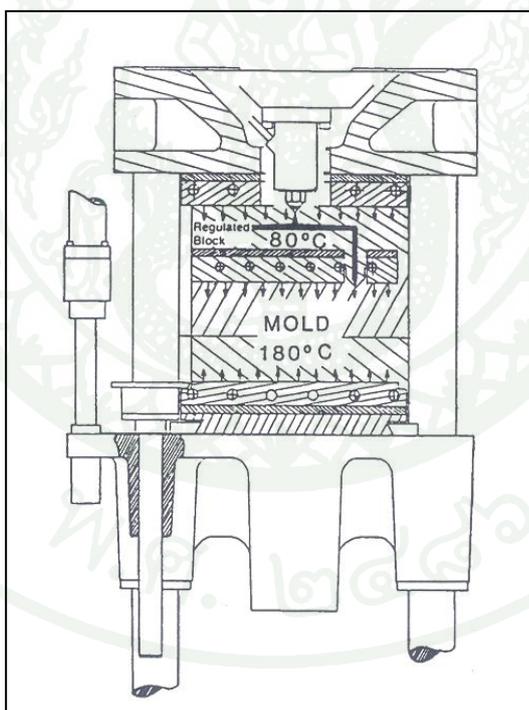
ภาพที่ 12 แม่พิมพ์ฉีดยางระบบทางวิ่งเย็น: (1) แผ่นทางวิ่งเย็น; (2) ช่องหล่อเย็น; (3) แผ่นฉนวน;
(4) ช่องใส่อุปกรณ์สร้างความร้อน; (5) หัวฉีดทางวิ่งเย็น

ที่มา: Sommer (2003)



ภาพที่ 13 ระบบทางวิ่งเย็น

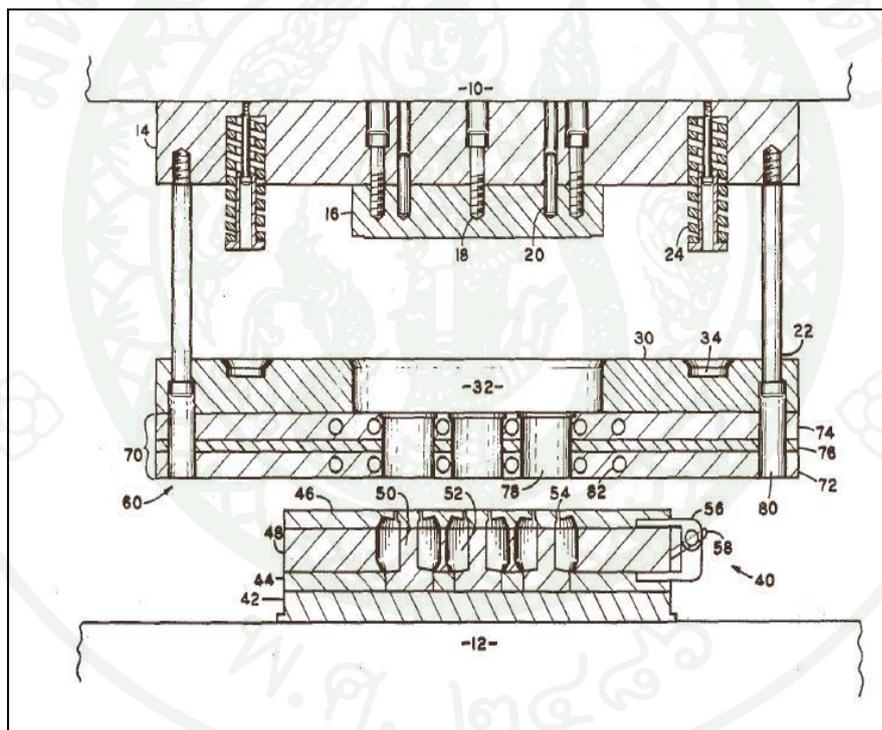
ที่มา: Menges and Mohren (1993)



ภาพที่ 14 แสดงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ขณะติดตั้งบนเครื่องฉีด

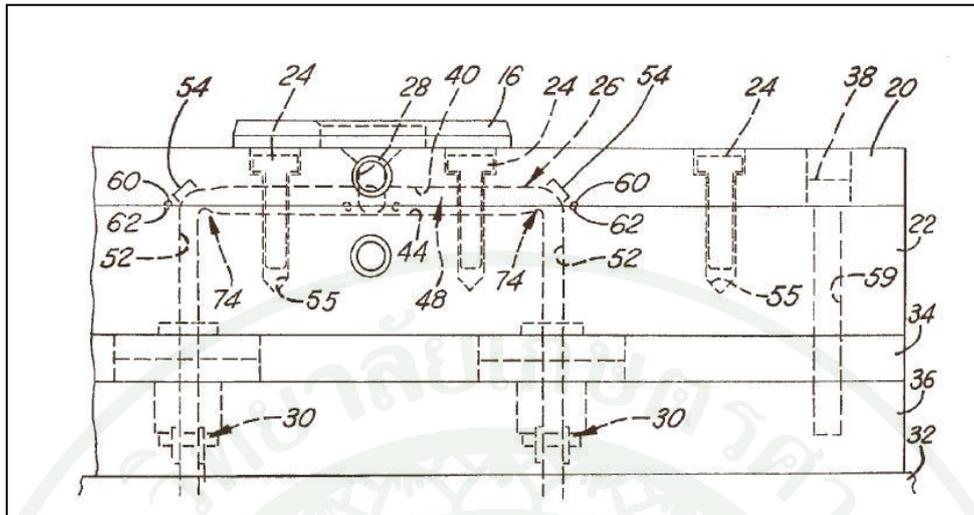
ที่มา: Menges and Mohren (1993)

Thomas W. Fazekas ได้จดสิทธิบัตรการนำระบบหล่อเย็นเข้ามาควบคุมอุณหภูมิให้กับแม่พิมพ์แบบอัดส่ง (Transfer Mold) เพื่อให้ยางในช่องเดิมยาง (Pot) และทางวิ่งไม่เกิดการสึกตัว โดยลักษณะแม่พิมพ์อัดส่งแบบทางวิ่งเย็น (Cold Transfer Mold) (Fazekas, 1975) ดังแสดงในภาพที่ 15 Richard R. Kring ได้ทำการปรับปรุงระบบทางวิ่งของระบบทางวิ่งเย็น ซึ่งลักษณะร่องทางวิ่งอยู่ระหว่างแม่พิมพ์ 2 แผ่น โดยการเจาะร่องรอบๆ ทางวิ่ง และใส่ตัวป้องกันไม่ให้ยางรั่วออกระหว่างแผ่นแม่พิมพ์ โดยตัวป้องกันสามารถทำจากเทฟลอน ทองแดง เหล็ก ทองเหลือง ซิลิโคน หรือโพลีเมอร์บางชนิด (Kring, 2001) ดังแสดงในภาพที่ 16 Matsumoto Yoshiharu และ Tsujimoto Yoshikazu ได้เสนอระบบกลไกของหัวฉีดในแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นดังแสดงในภาพที่ 17 (Matsumoto and Tsujimoto, 2003)



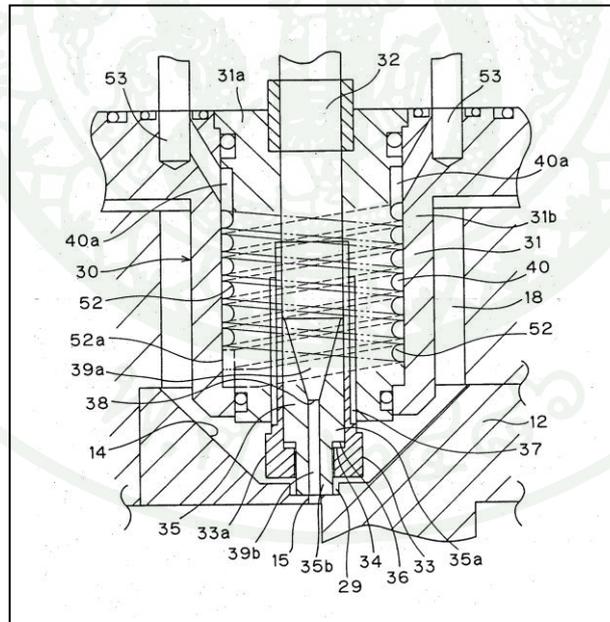
ภาพที่ 15 แม่พิมพ์อัดส่งแบบระบบทางวิ่งเย็น

ที่มา: Fazekas (1975)



ภาพที่ 16 ลักษณะการปรับปรุงระบบทางวงเวียน

ที่มา: Kring (2001)



ภาพที่ 17 กลไกของระบบหัวฉีดในแม่พิมพ์ระบบทางวงเวียน

ที่มา: Matsumoto and Tsujimoto (2003)

5. การออกแบบแม่พิมพ์

ขั้นตอนการดำเนินงานการออกแบบอย่างเป็นระบบ จะช่วยให้ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ ใช้เป็นเครื่องมือในการดำเนินการออกแบบผลิตภัณฑ์ทำให้ได้แบบแปลน 2 มิติ (Drawing) ในทางวิศวกรรมจะเรียกแบบแปลนของผลิตภัณฑ์ว่า แบบ และเรียกภาพวาดคร่าว ๆ (Sketches) ว่า แบบร่าง แบบและแบบร่างถูกใช้เพื่อการสื่อสารในการดำเนินการออกแบบ ตั้งแต่ขั้นตอนความคิด เริ่มต้นในการออกแบบ ตลอดไปจนถึงเสร็จสิ้นกระบวนการออกแบบ การดำเนินการออกแบบในสมัยก่อนเริ่มจากขั้นตอนการร่างรายละเอียดที่ต้องการอย่างคร่าว ๆ หลังจากนั้นก็เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ ขั้นตอนพัฒนา และตัดสินใจในส่วนของรายละเอียดเพื่อนำไปเขียนแบบเมื่อปฏิบัติงานตามขั้นตอนการออกแบบทั้ง 4 ที่กล่าวมาผลที่ได้ก็คือ ข้อมูลเพื่อเชื่อมโยงไปสู่เรื่องของเงินทุน และขั้นตอนของการปฏิบัติงาน

การออกแบบผลิตภัณฑ์ คือ การคิดสร้างสรรค์ส่วนของวัตถุขึ้นมาใหม่แล้วนำวัตถุที่ได้คิดสร้างสรรค์นำไปสร้างแบบจำลอง (Model) ขึ้นมาใช้มาทดสอบหาข้อผิดพลาด หลังจากนั้นก็จะนำข้อผิดพลาดที่ได้จากการทดสอบไปพัฒนาแล้วเขียนแบบที่สมบูรณ์ออกมาเป็นต้นแบบในการผลิตผลิตภัณฑ์ออกสู่ตลาด โดยปกติแล้วผลิตภัณฑ์ที่ผู้ออกแบบเลือกที่จะผลิตหรือสร้างขึ้นมาจะต้องมีลักษณะการทำงานหลัก เพื่อเป็นการสื่อความหมายให้กับผู้บริโภคแล้วได้ทราบว่าคุณสมบัตินี้มีไว้ใช้งานอะไรหรือใช้ประโยชน์อะไร เมื่อผลิตภัณฑ์มีลักษณะการทำงานหลักแล้ว ก็จะต้องมีการทำงานอิสระ (Independent Function) หรือการทำงานเสริมจากการทำงานหลักของผลิตภัณฑ์นั่นเอง การทำงานอิสระนี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ว่ามีคุณภาพเป็นอย่างไร สาเหตุที่เรียกว่าการทำงานอิสระก็เพราะว่าการทำงานเสริมนี้จะมีหรือไม่มีก็ได้เป็นแค่การทำงานที่มีการตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคเท่านั้น สรุปก็คือ เป็นลักษณะการทำงานที่เสริมขึ้นมาจากลักษณะการทำงานหลักเพื่อเพิ่มทางเลือกให้กับผู้บริโภค

นอกจากเรื่องของหลักการทำงานหลักและการทำงานอิสระแล้ว ผู้ออกแบบควรจะคำนึงถึงเรื่องของการตลาดว่าผลิตภัณฑ์ของเรานั้นเป็นไปตามความต้องการของตลาดหรือไม่ จากหลักการทำงานที่ได้ออกแบบมานั้นสามารถตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคได้หรือไม่ และราคาของผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมที่สุดควรจะเป็นเท่าใด มีวิธีการทำงานให้ผู้บริโภคสามารถเข้าใจถึงหลักการทำงานได้อย่างไร ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินการออกแบบผลิตภัณฑ์ ออกเป็น 6 ขั้นตอนดังภาพที่ 18

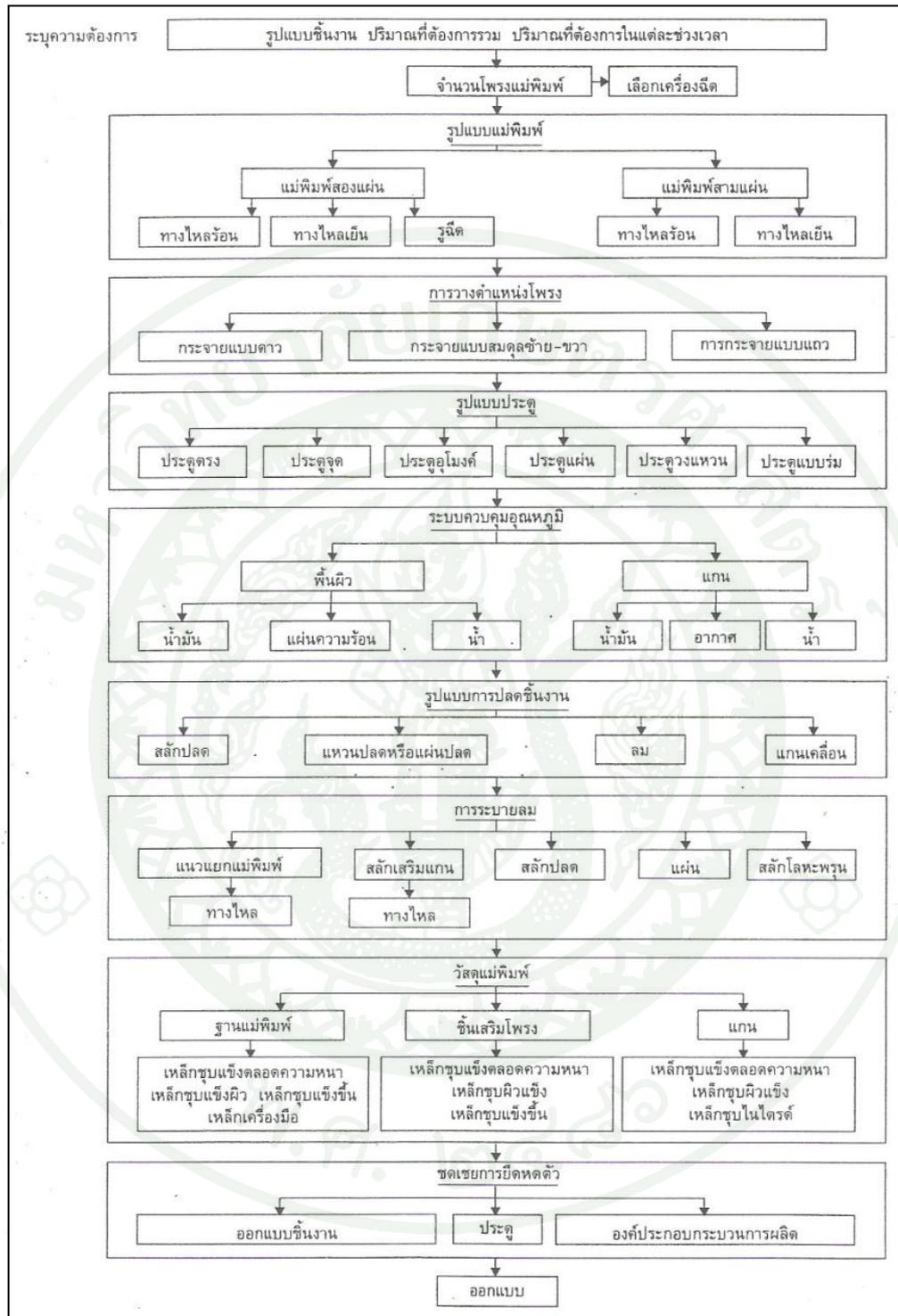


ภาพที่ 18 ขั้นตอนการออกแบบผลิตภัณฑ์

ที่มา: คำรง (2540)

5.1 หลักการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยาง

หลักการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดมีกระบวนการและขั้นตอนต่างๆตามลำดับงาน ดังแสดงในภาพที่ 19 กระบวนการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด จากภาพจะเห็นได้ว่า ขั้นตอนในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกบางหัวข้อ สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับแม่พิมพ์ฉีดยางได้



ภาพที่ 19 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการออกแบบแม่พิมพ์

ที่มา: คำรง (2540)

5.2 หลักการออกแบบและองค์ประกอบที่สำคัญของแม่พิมพ์

การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดสำหรับผลิตภัณฑ์ยางนั้น ไม่มีทฤษฎีการออกแบบและวิธีการคำนวณที่ชัดเจน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะใช้แนวทางการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดของพลาสติกมาใช้ประกอบในการออกแบบแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง

การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด สิ่งที่เราควรคำนึงถึงในการออกแบบแม่พิมพ์มีดังต่อไปนี้

- กำหนดจำนวนโพรงแม่พิมพ์ (Cavity) และการวางโพรงแม่พิมพ์ (Layout) ขนาดของแม่พิมพ์
- กำหนดแนวแยกแม่พิมพ์ (Parting Line)
- กำหนดชนิด, ตำแหน่ง, จำนวนของรูวิ่ง (Runner) และรูเข้า (Gate)
- กำหนดระบบควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์

สิ่งสำคัญที่เราจะต้องทราบในการออกแบบแม่พิมพ์นั้นก็คือ วัสดุที่ต้องการนำมาใช้ขึ้นรูป และแรงปิดแม่พิมพ์ เพื่อที่เราจะได้นำค่าคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้มาใช้ในการคำนวณและออกแบบแม่พิมพ์

หลักในการออกแบบแม่พิมพ์มีดังนี้

5.2.1 ค่าความหดตัวของวัสดุ (Shrinkage) นำค่าความหดตัวของวัสดุนี้ไปเผื่อขนาดในการออกแบบแม่พิมพ์ เมื่อเวลาที่เราขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว ชิ้นงานนั้นจะได้มีขนาดตรงตามที่เราได้ออกแบบไว้ การเผื่อขนาดของแม่พิมพ์นั้น จะเราบวกค่าความหดตัวของวัสดุไปที่ชิ้นงาน

5.2.2 แรงปิดแม่พิมพ์ (Clamping Force) ในการออกแบบแม่พิมพ์เราจะใช้ค่าความดันในแม่พิมพ์มาใช้ในการคำนวณแรงปิดแม่พิมพ์ ความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์จะขึ้นอยู่กับความดันของเครื่องฉีด ความหนาของชิ้นงาน และวัสดุที่เรานำมาใช้ฉีด แรงที่ใช้ปิดแม่พิมพ์สามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$F = A \times P \quad \dots\dots\dots (1)$$

กำหนดให้ A คือ พื้นที่ (Area) ภาวนาย

P คือ ความดัน (Pressure) ในแม่พิมพ์

5.2.3 ค่าความแข็งแรงของชุดแม่พิมพ์ เมื่อแม่พิมพ์ปิดแรงของเครื่องที่กระทำกับแม่พิมพ์ล่างและแม่พิมพ์บนอาจจะทำความเสียหายให้กับแม่พิมพ์ได้ ดังนั้นเหล็กที่ใช้ทำแม่พิมพ์จะต้องมีความแข็งแรงพอที่จะรับแรงดังกล่าวได้

องค์ประกอบสำคัญที่ต้องพิจารณาของเหล็กที่ใช้ทำแม่พิมพ์ได้แก่

- ความต้านทานการกัดกร่อนเนื่องจากการขีดสีของวัสดุในแม่พิมพ์
- การขึ้นรูป
- การชุบ
- ความคงทน
- การนำความร้อน
- ชนิดของยาง

5.3 การคำนวณความกว้างและยาวของแผ่นแม่พิมพ์

ถ้าแม่พิมพ์กว้างหรือยาวหรือหนาน้อยเกินไปจะทำให้ชิ้นงานที่ฉีดออกมามีรูปร่างผิดไปได้ หรือแม้แต่กระทั่งอาจทำให้แม่พิมพ์แตกชำรุดเสียหาย

เมื่อความดันในแม่พิมพ์ กระทำต่อแม่พิมพ์ส่วนล่าง (Core Plate) และแม่พิมพ์ส่วนบน (Cavity Plate) จะมีลักษณะคล้ายคานที่ถูกยึดแน่นที่ปลายทั้งสองข้าง (Fixed Supports-Uniform Load) ค่าโก่งตัวสูงสุด (Maximum Deflection) คือ δ_{\max} ดังสมการ (2)

$$\delta_{\max} = -\frac{1}{384} \frac{W}{EI} l^4 \quad \dots\dots\dots (2)$$

กำหนดให้ w คือ แรงที่กระทำ (Force) ในที่นี้จะมามีค่าเท่ากับ Pl

E คือ โมดูลัสของการยืดหยุ่นเหล็ก (Modulus of Elasticity)

$$I \text{ คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) } = \frac{ym^3}{12} = \frac{ym^3}{12}$$

ดังนั้นจะได้สมการที่ (3)

$$\delta_b = \frac{1}{32} \frac{Pb^5}{Eym^3} \quad \text{หรือ} \quad m = \sqrt[3]{\frac{1}{32} \frac{Pb^5}{Ey \delta_b}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ใช้เพื่อหาระยะโค้งของความกว้าง b และหาขนาดของ m ตามสมการที่ (4)

$$\delta_l = \frac{1}{32} \frac{Pl^5}{Eyn^3} \quad \text{หรือ} \quad n = \sqrt[3]{\frac{1}{32} \frac{Pl^5}{Ey \delta_l}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ใช้เพื่อหาระยะโค้งของความยาว l และหาขนาดของ n

กำหนดให้ m, n คือ ระยะห่างจากขอบของแม่พิมพ์

b, l คือ ความกว้างและความยาวของของชิ้นงาน

5.4 การคำนวณความหนาของแผ่นรองรับแม่พิมพ์ล่าง

ในการออกแบบแม่พิมพ์จะต้องคำนึงถึงความหนาของแผ่นรองรับแม่พิมพ์ล่าง ซึ่งจะต้องมีความหนาเพียงพอที่จะรองรับแรงดันเพื่อไม่ให้โก่งงอได้ ในการออกแบบที่คตินั้นระยะความกว้างของรูวิ่ง ควรจะมากกว่าระยะความห่างของหมอนรอง เพื่อให้หมอนรองเป็นจุดรองรับแม่พิมพ์เมื่อความดันในแม่พิมพ์กระทำต่อ Core Support Plate จะมีลักษณะคล้ายคานที่ถูกแรงกระจายกระทำ (Simple Supports - Uniform Load) ค่าโก่งตัวสูงสุดคือ δ_{\max} จากสมการที่ (5)

$$\delta_{\max} = -\frac{5}{384} \frac{Wl^4}{EI} \quad \dots\dots\dots (5)$$

กำหนดให้ W คือ แรงที่กระทำ (Force) ในที่นี้จะมีค่าเท่ากับ Pl

E คือ โมดูลัสของการยืดหยุ่นเหล็ก (Modulus of Elasticity)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia) = $\frac{Bh^3}{12}$

ดังนั้นจะได้สมการที่ (6)

$$\delta_L = \frac{5}{32} \frac{PL^5}{EBh^3} \quad \text{หรือ} \quad h = \sqrt[3]{\frac{5}{32} \frac{PL^5}{EB\delta_L}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

กำหนดให้ L คือ ระยะห่างระหว่างหมอนรองแม่พิมพ์ (Distance Between the Spacer Block)

B คือ ความยาวตามแนวหมอนรองแม่พิมพ์ (Length Along the Spacer Block)

h คือ ความหนาของหมอนรองแม่พิมพ์ (Thickness of Spacer Block)

5.5 การคำนวณหาค่าความร้อนในการทำให้ยางคงรูป

ในกระบวนการการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการถีดนั้น เมื่อฉีดยางเข้าไปในแม่พิมพ์แล้ว ยางนั้นจะยังไม่สามารถคงรูปด้วยตัวมันเองได้ จึงจำเป็นต้องใส่ความร้อนค่าหนึ่งเข้าไปเพื่อที่จะนำไปทำให้ยางคงรูป หรือทำให้ยางสุกตัวนั่นเอง เช่นเดียวกับการฉีดพลาสติกที่ต้องมีการหล่อเย็นเพื่อที่พลาสติกจะได้คงรูปได้เร็วขึ้น การคำนวณหาค่าความร้อนที่จะนำไปใช้ในการคงรูปของยาง ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่จะทำให้ยางคงรูปจากสมการที่ (7)

$$\text{Power (kW)} = \frac{\text{Weight of Material (kg)} \times \text{Specific Heat (J/kg } ^\circ\text{C)} \times \text{Temperature Difference (} ^\circ\text{C)}}{3.6 \times 10^6 \text{ (J/kWhr)} \times \text{Time Allowed of Heat (hr)}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ขั้นตอนที่ 2 คำนวณหาค่าพลังงานความร้อนที่ทำให้ยางเปลี่ยนสถานะจากสมการที่ (8)

$$\text{Power (kW)} = \frac{\text{Weight of Material (kg)} \times \text{Heat of Fusion (J/kg)}}{3.6 \times 10^6 \text{ (J/kWhr)} \times \text{Time Allowed of Heat (hr)}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่าพลังงานสูญเสียจากสมการที่ (9)

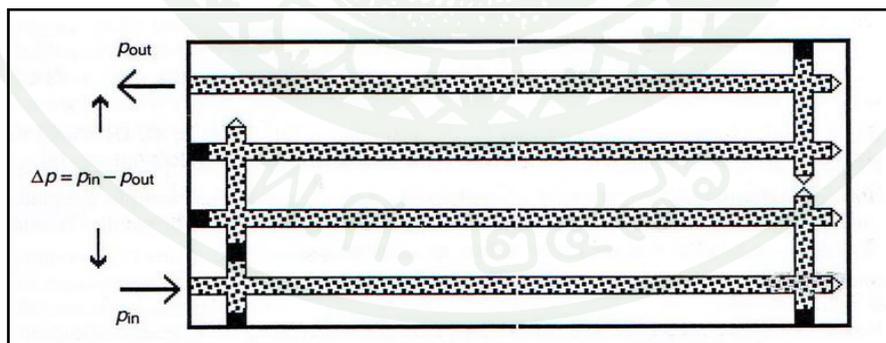
$$\text{Power (kW)} = \frac{\text{Thermal Conductivity (J/hr} \cdot \text{m} \cdot \text{°C)} \times \text{Surface area (m}^2\text{)} \times \text{Temperature Difference (°C)}}{3.6 \times 10^6 \text{ (J/kWhr)} \times \text{Thickness of Material (m)}} \dots\dots\dots (9)$$

ขั้นตอนที่ 4 นำค่าพลังงานความร้อนตามขั้นตอนที่ 1-3 มาคำนวณดังสมการที่ (10)

$$\text{Power (kW)} = (\text{Step 1} + \text{Step 2} + 3/4 \text{ Step 3}) \times 1.5 \dots\dots\dots (10)$$

6. ระบบหล่อเย็นแบบอนุกรม และแบบขนาน

น้ำหล่อเย็นเป็นของไหลอย่างหนึ่งดังนั้นย่อมจะไหลไปยังช่องทางที่สะดวก หรือมีการต้านทานน้อยที่สุด ซึ่งการไหลจะขึ้นกับความดันที่แตกต่างกันของทางเข้าและทางออก และความต้านทานภายในช่องหล่อเย็น เช่น ช่องที่มีความยาวมาก จะมีความต้านทานสูงกว่า และช่องที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า ก็จะมีค่าความต้านทานน้อยกว่า น้ำหล่อเย็นจะไหลผ่านช่องหล่อเย็นและนำความร้อนจากรอบๆ เหล็กโดยการเพิ่มอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นที่บริเวณทางเข้าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าบริเวณทางออกที่มีอุณหภูมิที่สูงกว่า เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่างกัน (ΔT) ของน้ำหล่อเย็นและแม่พิมพ์ที่มากกว่า ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ควรทำให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันมีค่าอยู่ระหว่าง 5 - 6 องศาเซลเซียส ภาพที่ 20 แสดงลักษณะน้ำระบบหล่อเย็นแบบอนุกรม



ภาพที่ 20 ลักษณะน้ำระบบหล่อเย็นแบบอนุกรม

ที่มา: Sommer (2003)

สำหรับระบบน้ำหล่อเย็นแบบขนาน ดังภาพที่ 21 พื้นที่หน้าตัดของช่องน้ำหล่อเย็นเข้าและออก (D) มีความสำคัญ โดยพื้นที่หน้าตัดจะต้องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของพื้นที่หน้าตัดของน้ำหล่อเย็นย่อย (d) ถ้า d มีขนาดเท่ากับ D แล้วน้ำหล่อเย็นจะไหลไปในช่องทางที่สั้นที่สุดจากทางเข้าไปทางออก และทำให้ไม่มีการหล่อเย็นทั่วบริเวณแผ่นแม่พิมพ์ ประสิทธิภาพของการหล่อเย็นไม่ได้ขึ้นกับ (ΔT) เพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นกับปริมาณของน้ำหล่อเย็นที่ไหลผ่านในแต่ละช่อง รวมถึงพื้นที่สัมผัสของน้ำหล่อเย็นด้วย ปริมาณของน้ำหล่อเย็นขึ้นอยู่กับพื้นที่หน้าตัดของช่อง ในกรณีของช่องกลมจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ D_2 ส่วนพื้นที่สัมผัสเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ D หรือสรุปได้ว่าพื้นที่หล่อเย็นจะเพิ่มตามเส้นผ่านศูนย์กลาง ขณะที่พื้นที่หน้าตัด (หรือการไหล) เพิ่มขึ้นตามกำลังสองของเส้นผ่านศูนย์กลาง ตัวอย่างเช่น เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องหล่อเย็นเป็นสองเท่า การไหลจะเป็นสี่เท่า แต่พื้นที่จะเพิ่มเพียงสองเท่า (โดยประมาณ) ทั้งนี้การเลือกขนาดของช่องหล่อเย็นจะต้องคำนึงถึงขนาดของหัวเจาะมาตรฐานด้วย

ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ช่องหล่อเย็นย่อยสำหรับช่องหล่อเย็นแบบผสมขนานและอนุกรม ดังภาพที่ 22 สามารถหาได้จากสมการที่ 11 และ 12

$$D_2 = \sqrt{\frac{D_1^2}{N_2}} \quad \text{และ} \quad \dots\dots\dots (11)$$

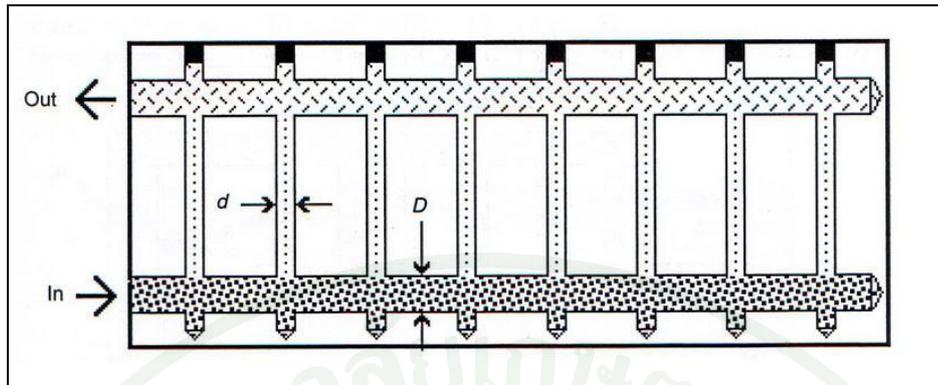
$$D_3 = \sqrt{\frac{D_1^2}{N_2 N_3}} \quad \dots\dots\dots (12)$$

โดย N_2, N_3 คือ จำนวน(Number) ของช่องน้ำหล่อเย็นย่อย

D_1, D_2, D_3 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(Diameter) ของช่องน้ำหล่อเย็น

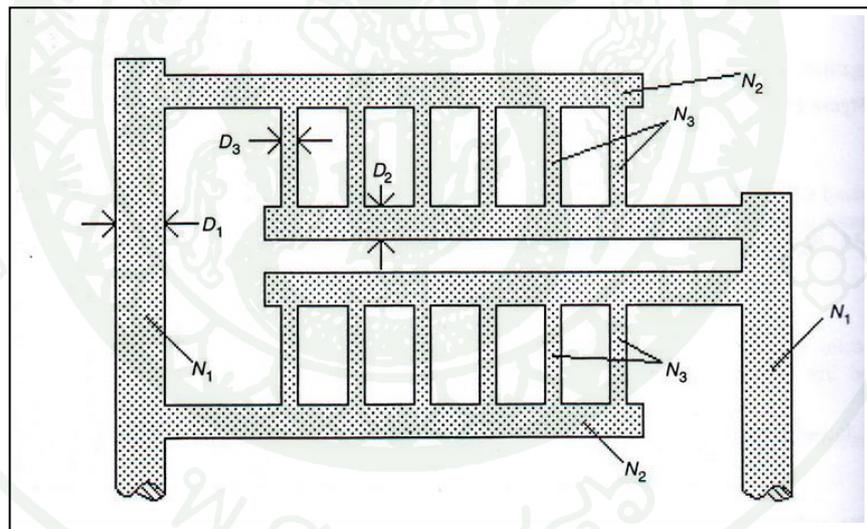
โดยทั่วไปขนาดของ D_1 จะอยู่ระหว่าง 12 – 50 มิลลิเมตรระบบหล่อเย็นแบบขนานและแบบอนุกรมถูกใช้ผสมกันอยู่บ่อยครั้ง โดยการออกแบบจะพิจารณาถึง

- 1) คุณภาพของการหล่อเย็นที่ต้องการ
- 2) พื้นที่สำหรับช่องน้ำหล่อเย็น
- 3) ความแข็งแรงของวัสดุแม่พิมพ์
- 4) จำนวนหัวต่อระบบน้ำหล่อเย็นของเครื่องจักรที่ใช้
- 5) จำนวนหัวต่อระบบน้ำหล่อเย็นที่ต้องการให้ติดตั้งได้ง่ายและสะดวก



ภาพที่ 21 ลักษณะน้ำระบบหล่อเย็นแบบขนาน

ที่มา: Sommer (2003)



ภาพที่ 22 ลักษณะน้ำระบบหล่อเย็นแบบผสมขนานและอนุกรม

ที่มา: Sommer (2003)

7. สมบัติเชิงฟิสิกส์ และรีโอโลยีของยาง

7.1 ความหนืดและคุณลักษณะเฉพาะของของไหล

7.1.1 ความหนืด

ความหนืด (Viscosity) คือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล เมื่อมีแรงกระทำ (ของไหล หมายถึง สารที่สามารถไหลได้ เช่น ก๊าซ และของเหลว) ของไหลที่มีความหนืดสูง จะมีค่าความต้านทานการไหลสูง ของไหลที่มีความหนืดต่ำ จะมีค่าความต้านทานต่อการไหลต่ำ ของไหลธรรมดาสามารถที่จะแสดงค่าความหนืดสัมบูรณ์ได้ แต่ในขณะที่ของไหลที่มีส่วนผสมของสารหลายตัวจะมีลักษณะการไหลที่ซับซ้อนและไม่สามารถแสดงค่าความหนืดค่าเดียวได้

การวัดความหนืดทำได้โดยการวัดแรงต้านทานการไหลภายในของของไหล เมื่อมีแรงกระทำ (F) ในแนวขนานกับพื้นผิว เรียกแรงต้านที่เกิดขึ้นนี้ว่า แรงเฉือน (Shear force) เมื่อพิจารณาถึงก้อนของไหลซึ่งประกอบด้วยแผ่นโมเลกุลที่ขนานกัน ดังแสดงในภาพที่ 23 ชั้นที่อยู่ล่างสุดของของไหล จะถูกยึดไว้ถ้าแผ่นด้านบนของของไหล ได้รับแรงกระทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ แผ่นด้านล่างถดถอยไปจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะทางจากแผ่นของไหลชั้นล่างสุดที่ไม่เคลื่อนที่ 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 ดังนั้น อัตราเฉือนจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ แรงเฉือน ดังสมการที่ (13)

$$\frac{F}{A} = \eta \left(\frac{dv}{dx} \right) \dots\dots\dots (13)$$

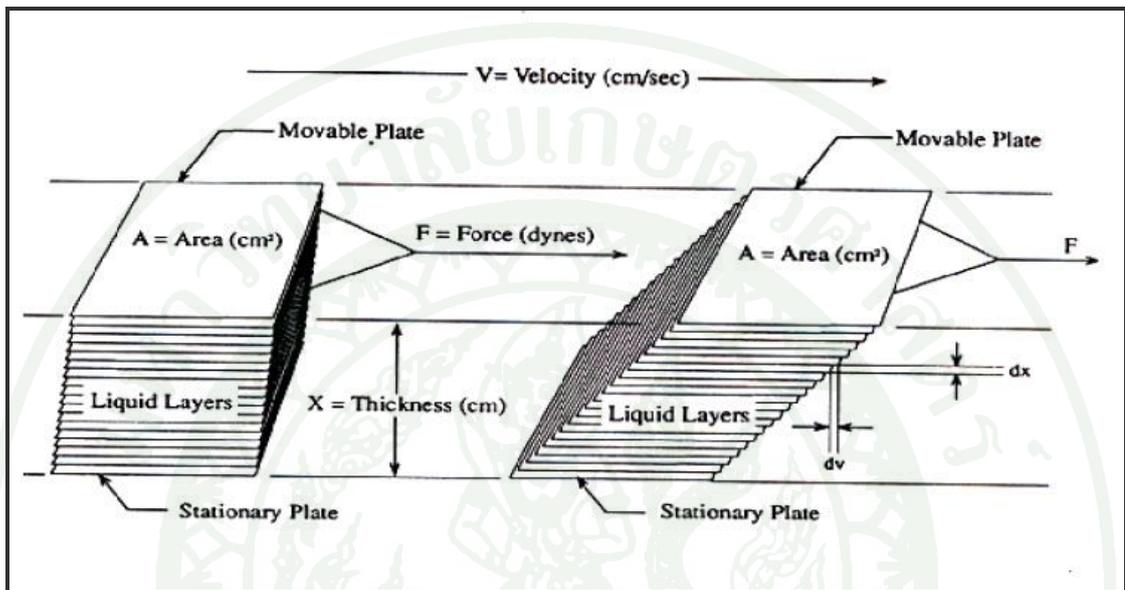
η คือ สัมประสิทธิ์ของความหนืด (Coefficient of Viscosity) หรือเรียกว่า “ความหนืด” ตามหลักของ ไอแซก นิวตัน (Isaac Newton) คำจำกัดความของความหนืดสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ ดังสมการที่ (14)

$$\eta = \frac{F'}{S} \dots\dots\dots (14)$$

เมื่อ F' คือ แรงเฉือนต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น ปาสคาล

η คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น หนึ่งต่อวินาที

หน่วยของความหนืด คือ กรัมต่อเซนติเมตรต่อวินาที แรงที่ใช้ทำให้ของเหลวที่มีพื้นที่หน้าตัด 1 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 เซนติเมตรต่อวินาที



ภาพที่ 23 การเกิด Velocity Gradient เมื่อมีแรงกระทำในแนวนานกับพื้นผิวของของไหล

ที่มา: มนัส (1994)

7.1.2. ลักษณะการไหลของของไหล

ลักษณะการไหลของของไหลโดยทั่วไปแบ่งได้ 2 แบบ คือแบบนิวโตเนียน และแบบไม่เป็นนิวโตเนียน โดยแบบไม่เป็นนิวโตเนียนแบ่งเป็น 4 แบบ ดังแสดงในภาพที่ 24

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

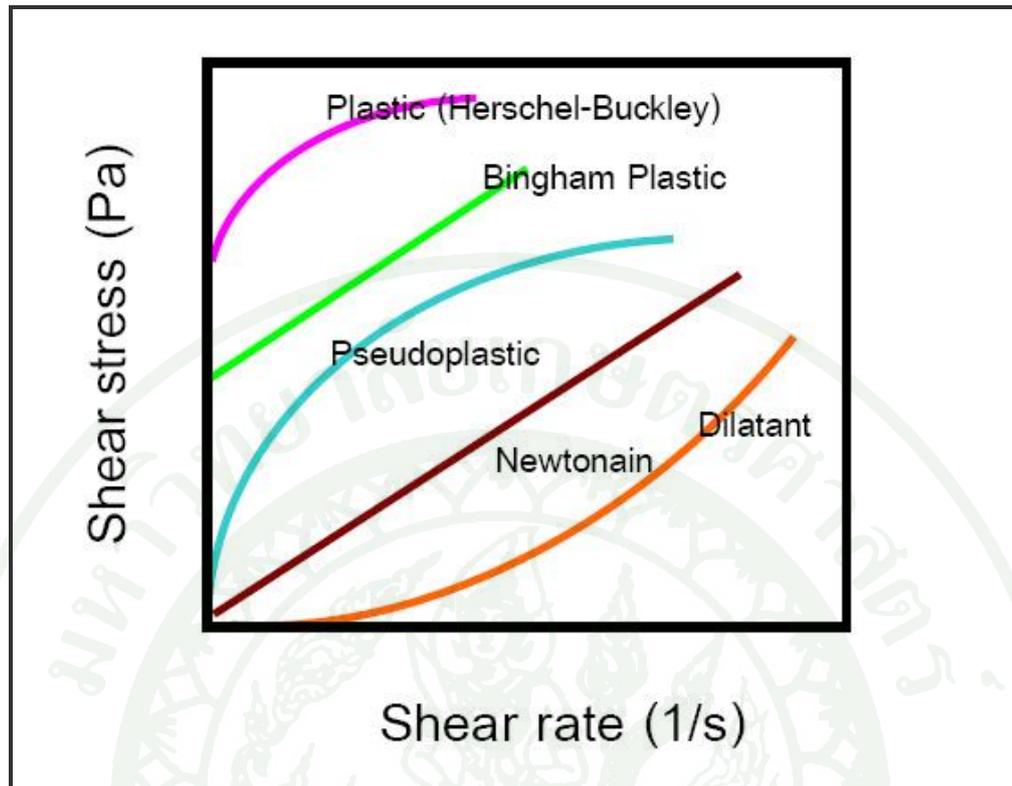
2) ของไหลแบบไม่เป็นนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid) เป็นลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของ นิวตัน คือ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆของไหลจะมีค่าความหนืด (η_0) เป็นค่าไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นกับอัตราเฉือน หรือ ความเร็วในการกวน ลักษณะการไหลแบบนี้แบ่งเป็น 4 แบบ

2.1) ของเหลวชีวโดพลาสติก (Pseudoplastic Liquid) ของไหลที่มีค่าความหนืด (η_0) ลดลง เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือ ยิ่งกวนเร็ว ยิ่งไหลง่าย พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “Shear Thinning” ตัวอย่างเช่น น้ำผลไม้เข้มข้น กาวน้ำใส สารช่วยแขวนตะกอน สารละลายพอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ สารละลายพอลิเมอร์สังเคราะห์ เป็นต้น

2.2) ของเหลวคิลาตัม (Dilatant Liquid) ของไหลที่มีค่าความหนืด (η_0) เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราเฉือน หรือยิ่งกวนเร็ว ยิ่งหนืด พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “Shear Thickening” ตัวอย่างเช่น น้ำคินซัน น้ำแป้ง เป็นต้น

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

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



ภาพที่ 24 กราฟแสดงลักษณะการไหลของของเหลว

ที่มา: มนัส (1994)

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

7.2 ชนิดของการไหล

การไหลของของไหล สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 แบบ คือ แบบที่หนึ่ง เป็นการไหลในหนึ่งมิติ สองมิติ และสามมิติ (One Two and Three Dimensional Flows) แบบที่สอง เป็นการไหลแบบหนืด และไม่หนืด (Viscous and Inviscid Flows) แบบที่สาม เป็นการไหลแบบราบเรียบและปั่นป่วน (Laminar and Turbulent Flows) และแบบที่สี่ เป็นการไหลแบบอัดไม่ได้ และอัดได้ (Incompressible and Compressible Flows)

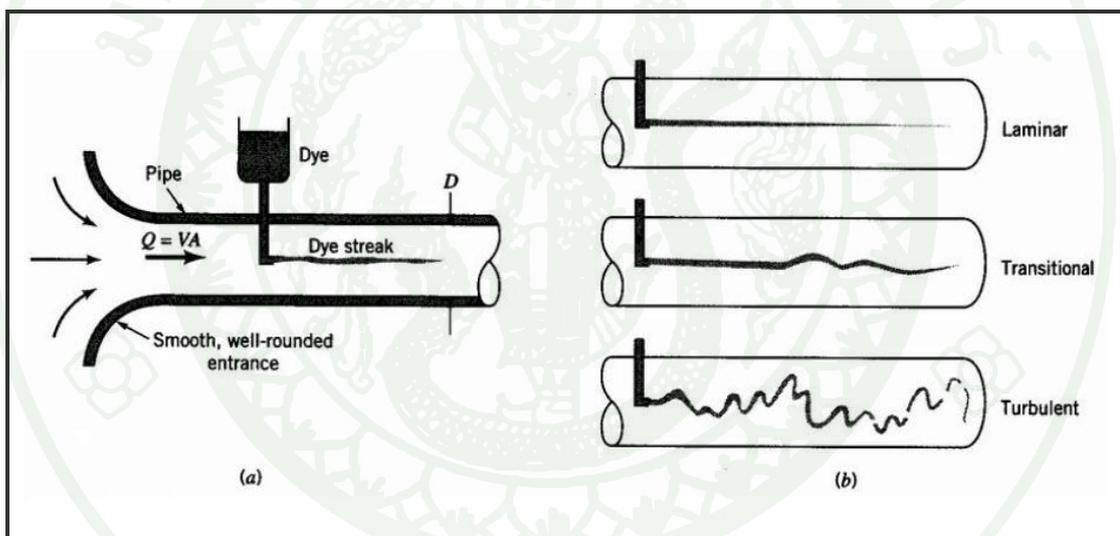
การไหลแบบแรก เป็นการไหลตามแกนที่กำหนด โดยแกนการไหลจะประกอบด้วยแนวแกน x แกน y และแกน z ดังนั้น การไหลแบบหนึ่ง สอง และ สามมิติ จึงเป็นการไหลตามแนวแกนดังกล่าวตามมิติการไหล รูปแบบการไหลที่ง่ายที่สุดเป็นการไหลหนึ่งมิติ ตัวอย่างของการไหลแบบนี้ได้แก่การไหลแบบราบเรียบในท่อตรง

การไหลแบบที่สอง เป็นการไหลแบบหนืด และไม่หนืด การไหลที่ความหนืดมีผลและไม่มีผลต่อการไหลของของไหล การไหลแบบที่สาม การไหลแบบราบเรียบ และปั่นป่วน เป็นการไหลที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ตามกันไปเป็นแผ่น หรือชั้นที่ราบ อนุภาคของของไหลมีหรือไม่มีการผสมกัน และการไหลแบบที่สี่ การไหลแบบอัดไม่ได้ และอัดได้เป็นการไหลที่ของไหลมีการยุบตัวหรือไม่ ขณะที่ของไหลเคลื่อนที่

เป็นที่ทราบกันมานานแล้วว่า ของไหลสามารถไหลผ่านท่อ หรือทางน้ำไหล ในสองเส้นทางซึ่งแตกต่างกัน ที่อัตราการไหลต่ำ ความดันของของไหลตกลงเมื่อของไหลไหลผ่านไปไกลขึ้น ที่อัตราการไหลสูง ความดันของของไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ความแตกต่างระหว่างการไหลของของไหลทั้งสองแบบได้รับการนำเสนอด้วยการทดลองของ ออสบอร์น เรย์โนลด์ (Osborne Reynolds) ในปี ค.ศ. 1883 ซึ่งได้รายงานการศึกษาชนิดของการไหลของของไหล ผ่านท่อโปร่งใสที่วางในแนวราบที่บรรจุน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 25(a) เมื่อเริ่มปล่อยน้ำจากภาชนะที่บรรจุให้ไหลผ่านท่อแก้วและควบคุมการไหลของน้ำด้วยวาล์วที่ด้านปลายท่อโปร่งใส ขณะปล่อยน้ำไหลผ่านท่อโปร่งใส ทำการฉีดน้ำสีที่มีความถ่วงจำเพาะเท่ากับน้ำเข้าไปที่บริเวณกลางท่อ เรย์โนลด์ พบว่า เมื่อเปิดวาล์วให้น้ำไหลที่อัตราการไหลต่ำทำให้เห็นน้ำสีไหลเป็นเส้นตรงตามแนวทางการไหลของน้ำเป็นเส้นขนานกับท่อโดยไม่มีการกระจายออกนอกแนวทิศทางการไหลด้านข้าง จนไหลออกไปจาก

ท่อ พฤติกรรมของแถบน้ำสีเห็นเด่นชัดว่า น้ำไหลเป็นแนวเส้นตรงขนานตามทิศทางการวางตัวของท่อแก้ว และเรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขึ้น โดยการเปิดวาล์วเพิ่มขึ้น น้ำสีเริ่มไหลไม่เป็นแนวตรงขนานตามทิศทางการวางตัวของท่อแก้ว น้ำสีไหลออกไปมาเร่ย์โนลด์์เรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition Flow) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำขึ้นอีกจนน้ำมีความเร็วถึงจุดจุดหนึ่งที่เรียกว่า ความเร็ววิกฤติ (Critical Velocity) ที่ความเร็วนี้ น้ำสีเริ่มไหลไม่เป็นแนวตรง น้ำสีเริ่มกระจายตัว เริ่มมีการไหลแปรปรวนเกิดขึ้น น้ำสีกระจายตัวออกไปที่ด้านข้างท่อแก้วมากยิ่งขึ้นเร่ย์โนลด์์เรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) การทดลองของเร่ย์โนลด์์แสดงการไหลทั้งสามแบบ ดังแสดงในภาพที่ 25(b)



ภาพที่ 25 การทดลองของเร่ย์โนลด์์

ที่มา: Young (2004)

เร่ย์โนลด์์ได้ศึกษาสถานะที่ของเหลวไหลแบบราบเรียบ เปลี่ยนรูปแบบไปเป็นแบบปั่นป่วน พบว่า ความเร็ววิกฤติที่เป็นการไหลแบบราบเรียบขึ้นอยู่กับปริมาณ 4 ชนิด คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความหนืด ความหนาแน่น และความเร็วเชิงเส้นเฉลี่ยของของเหลว นอกจากนี้เร่ย์โนลด์์พบว่า ตัวประกอบทั้งสี่ สามารถรวมกันเป็นค่าหนึ่ง และเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล

ค่าที่ได้แสดงรูปแบบการไหล เรียกว่า เลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการ(15) ดังนี้

$$Re = \frac{D \bar{V} \rho}{\mu} \dots\dots\dots (15)$$

ความหนืดของของเหลวหาได้จากสมการ (16)

$$\mu = \nu \rho \dots\dots\dots (16)$$

ดังนั้น เมื่อแทนค่าสมการที่ 17 ลงในสมการที่ 15 จะได้

$$Re = \frac{D \bar{V}}{\nu} \dots\dots\dots (17)$$

เมื่อ

D	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) ท่อ
\bar{V}	=	ความเร็วเฉลี่ย (Average Speed) ของของเหลว
μ	=	ความหนืด (Viscosity) ของของเหลว
ρ	=	ความหนาแน่น (Density) ของของเหลว
ν	=	ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematics Viscosity) ของของเหลว

ซึ่งค่า Re_0 อาจเป็น 10, 1000, 100000...

$Re > Re_0$ เกิดการไหลปั่นป่วน

$Re < Re_0$ เกิดการไหลลามินาร์

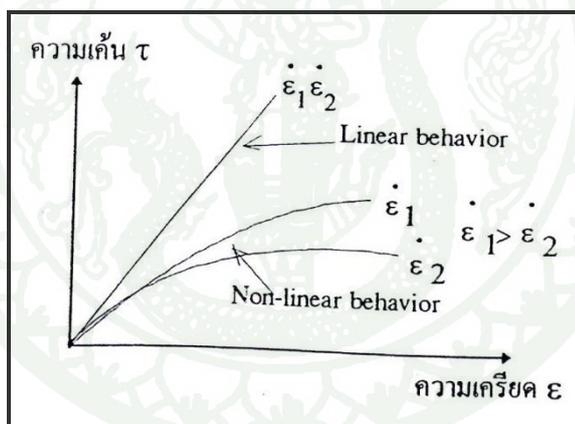
$Re_0 = 2000$ สำหรับพอลิเมอร์

โดยทั่วไปแล้วพอลิเมอร์จะมีความหนืดสูงมาก และจากค่าเลขเรย์โนลด์ของพอลิเมอร์มีค่าสูง เมื่อพิจารณาตามสมการที่ (15) จะเห็นได้ว่าการเกิดการไหลปั่นป่วนในการไหลของพอลิเมอร์นั้นผลคูณของ \bar{V} กับ D ต้องมีค่าสูงมากเพราะพอลิเมอร์มีความหนืดสูงมาก ในเงื่อนไขนี้จะพบว่า

ในกระบวนการผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์นั้นจะไม่อยู่ในขอบเขตของการไหลบั้นป่วนเลย ขอบเขตทั่วไปของการไหลของพอลิเมอร์จึงเป็นการไหลแบบลามินาร์

7.3 สมบัติแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น

วัสดุพอลิเมอร์มีสมบัติเชิงวิสโคอีลาสติก คือ จะแสดงสมบัติผสมระหว่างสมบัติการยืดหยุ่นและการไหลหนืด พอลิเมอร์จะแสดงสมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้น (Linear Elasticity) ในขอบเขตที่มีความเครียดต่ำๆ (Small Strains) แต่เมื่อมีความเครียดเพิ่มขึ้นเกินค่าจำกัดหนึ่ง ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดจะหมดไป ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่เป็นฟังก์ชันของอัตราการผิดรูป (Rate of Deformation) จะแสดงสมบัติการไม่ยืดหยุ่นเชิงเส้น (Non-Linear Elasticity) ดังแสดงในภาพที่ 26 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุพอลิเมอร์



ภาพที่ 26 สมบัติการยืดหยุ่นเชิงเส้นและการยืดหยุ่นไม่เชิงเส้นของวัสดุ

ที่มา: มนัส (1994)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การไหลของยาง และการออกแบบแม่พิมพ์

เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับการติดตั้งโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 27 โดยมีคุณสมบัติดังนี้



ภาพที่ 27 คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การไหลของยาง และการออกแบบแม่พิมพ์

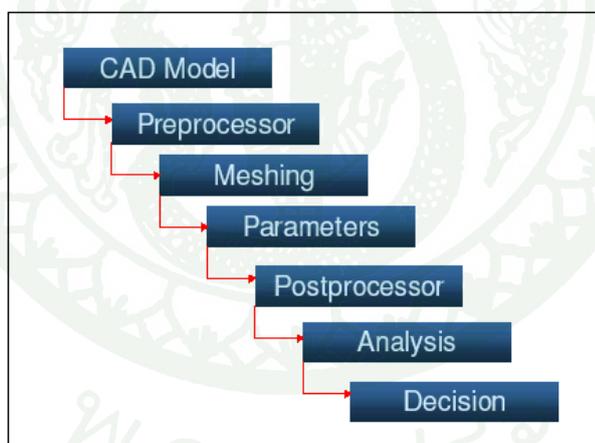
- 1.1 Intel Xeon W3503 (R) 2.4 GHz.
- 1.2 หน่วยความจำขนาด 16 Gigabyte
- 1.3 ฮาร์ดดิสก์ ขนาด 320 Gigabyte
- 1.4 การ์ดแสดงผล หน่วยความจำ ขนาด 512 Megabyte
- 1.5 ระบบปฏิบัติการ Window XP Professional 64 BIT

2. โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

โปรแกรม Unigraphics NX5 เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการการสร้างชิ้นงาน 3 มิติ ซึ่งเป็นชิ้นงานที่จะนำไปใช้ในการจะทำการวิเคราะห์สำหรับวิเคราะห์การไหลของยางในแม่พิมพ์ โดยข้อมูลที่ส่งไปวิเคราะห์นั้นจะต้องเป็นข้อมูลนามสกุล STL (Stereo Lithography)

3. โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์การไหลของยางในแม่พิมพ์ และผลกระทบด้านอุณหภูมิของแม่พิมพ์

โปรแกรม 3D-SIGMA Release 4.6 เป็นโปรแกรมที่อยู่บนพื้นฐาน 3D Volume Elements ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์หาคูการงานที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์และยาง (Polymer and Rubber Injection Moulding) ซึ่งโปรแกรมจะทำการจำลองรูปแบบของการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงาน โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม 3D-SIGMA มีขั้นตอนดังแสดงใน ภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม 3D-SIGMA

ความหมายและขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรม 3D-SIGMA

3.1 CAD Model คือ ชิ้นงานที่เราต้องการจะทำการวิเคราะห์ผล โดยข้อมูลที่เราจะนำมาวิเคราะห์นั้นจะต้องเป็นข้อมูลนามสกุล STL (Stereo Lithography)

3.2 Preprocessor เป็นขั้นตอนเริ่มต้นก่อนการวิเคราะห์ โดยนำไฟล์ชิ้นงานที่จะทำการวิเคราะห์มารวมกับส่วนของทางวิ่งของชิ้นงานและสร้างส่วนที่เป็นทางเข้าแม่พิมพ์ของน้ำยาง แล้วกำหนดส่วนต่างๆเหล่านั้นลงในโปรแกรมว่าส่วนไหนเป็นชิ้นงาน, เป็นรูวิ่ง, เป็นทางเข้าน้ำยางหรือเป็นส่วนของแม่พิมพ์ด้านคอร์และคาร์วีดี

3.3 Meshing เป็นขั้นตอนของการแบ่งจำนวนชิ้นงานออกเป็นชิ้นส่วนเล็กสำหรับการวิเคราะห์ผล

3.4 Parameter เป็นขั้นตอนการนำค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการคิดยางเช่น เวลาในการปิดแม่พิมพ์และค่าความร้อนที่ใช้ในการคงรูปของยาง และนำค่าคุณสมบัติของยางที่ได้ทดสอบ เช่น Heat Conductivity, Density, Specific Heat Capacity, Cure Time และ Viscosity ใส่ในโปรแกรม 3D-SIGMA เพื่อทำการวิเคราะห์ผล

3.5 Postprocessor เป็นขั้นตอนหลังจากการวิเคราะห์ว่า วิเคราะห์แล้วมีผลอย่างไร ในส่วนนี้จะแสดงผลต่างๆเช่น จำนวนเอลิเมนต์ที่เราแบ่ง, ผลการแบ่งเอลิเมนต์, แสดงจำนวนเวลาที่คิดยางเต็มโพรงแม่พิมพ์, แสดงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆของชิ้นงาน, แสดงค่าแรงปิดแม่พิมพ์ของชิ้นงาน และแสดงค่าแรงดันภายในแม่พิมพ์

3.6 Analysis คือ ขั้นตอนที่เราจะวิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในโปรแกรมว่า มีผลเป็นอย่างไร เราพอใจกับผลการวิเคราะห์หรือไม่

3.7 Decision คือ ขั้นตอนการตัดสินใจว่าเราจะยอมรับและจะนำผลการวิเคราะห์ที่ได้นี้ไปใช้งานหรือไม่

4. เครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

เครื่องฉีดยางที่ใช้ทดลองมีลักษณะเครื่องฉีดยางแนวตั้งกระบอกสกรูแนวนอนและกระบอกฉีดอยู่แนวตั้ง ผู้ผลิต Kuemin Machinery Co., Ltd. รุ่น KM 250 แรงอัด 250 ตัน ความจุกระบอกสูบ 1,500 ซีซี ดังแสดงในภาพที่ 29

Spec./Model	KM-250	
Clamping Force	250 tons	
Downward Force	5.1 tons	
Daylight	450 mm	
Heated Platens	550 mm x 600 mm	
Heating Power	15.6 kW	
Motor	11.1 kW/hr	
Injection Pressure	1890 kgf/cm ²	
Injection Volume	1400/1800 cm ³	
Screw Diameter	Dia. 45 mm	
Control System	PLC + proportional	
Standard Device	Ejector/ emergency stop/ 24hr preheating timer / injection compression method/ alarm/ counter/ data access unit/ rotary encoder/ auto charge	
Optional Device	Touch panel/ photoelectric safety system/ liner position transducers/ heating digital setting/ alarm for cutting rubber strip/ memory/ cold runner device	
Dimensions / Width A	2885 mm	
Dimensions / Depth B	2010 mm	
Dimensions / Height C	3750/4020 mm	
Weight	7500 kg	
Tank Volume	400l	

ภาพที่ 29 แบบและรายละเอียดเครื่องฉีดยาง

5. ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์

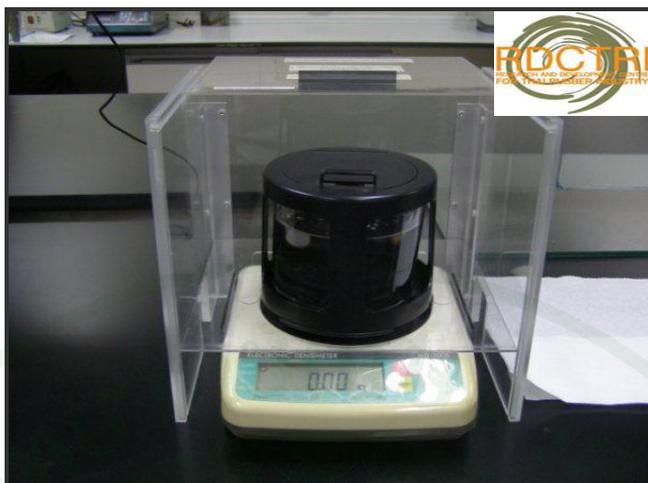
การควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้อยู่ในอุณหภูมิที่กำหนดโดยใช้ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์

6. เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยาง

6.1 เครื่อง Electronic Densimeter (MD-200S) วัดค่าความหนาแน่นของยาง (Hydrostatic Method) โดยใช้ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 2781/ASTM D 297 สามารถทดสอบได้ที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย โดยตัวเครื่องได้แสดงในภาพที่ 31



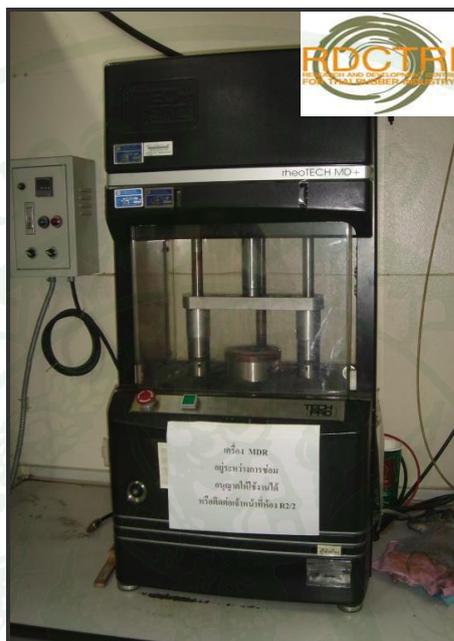
ภาพที่ 31 เครื่อง Electronic Densimeter (MD-200S)

6.2 เครื่อง Capillary Rheometer (RHEO – TESTER 2000) วิเคราะห์คุณสมบัติการไหล (Rheology) ของยาง ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D 5099 สามารถทดสอบได้ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ หรือศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย โดยตัวเครื่องได้แสดงในภาพที่ 32



ภาพที่ 32 เครื่อง Capillary Rheometer (RHEO – TESTER 2000)

6.3 เครื่อง Moving Die Rheometer (TECHPRO, Roheotech MD+) วัดลักษณะการคงรูปของยาง ตามมาตรฐานการทดสอบ DIN 51007 สามารถทดสอบได้ที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย โดยตัวเครื่องได้แสดงในภาพที่ 33



ภาพที่ 33 เครื่อง Moving Die Rheometer (TECHPRO, Roheotech MD+)

6.4 เครื่อง Mettler Toledo DSC882 วัดค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, Cp) ตามมาตรฐานการทดสอบ DIN 51007 สามารถทดสอบได้ที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ โดยตัวเครื่องได้แสดงในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 เครื่อง Mettler Toledo DSC882

6.5 เครื่อง Thermoflizer (SWO Polymertechnik GmbH) วัดค่าการนำความร้อน (Specific Heat Conductivity, Lambda) ตามมาตรฐานการทดสอบ ANTEC '88/609-611 สามารถทดสอบได้ที่สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย โดยตัวเครื่องได้แสดงในภาพที่ 35



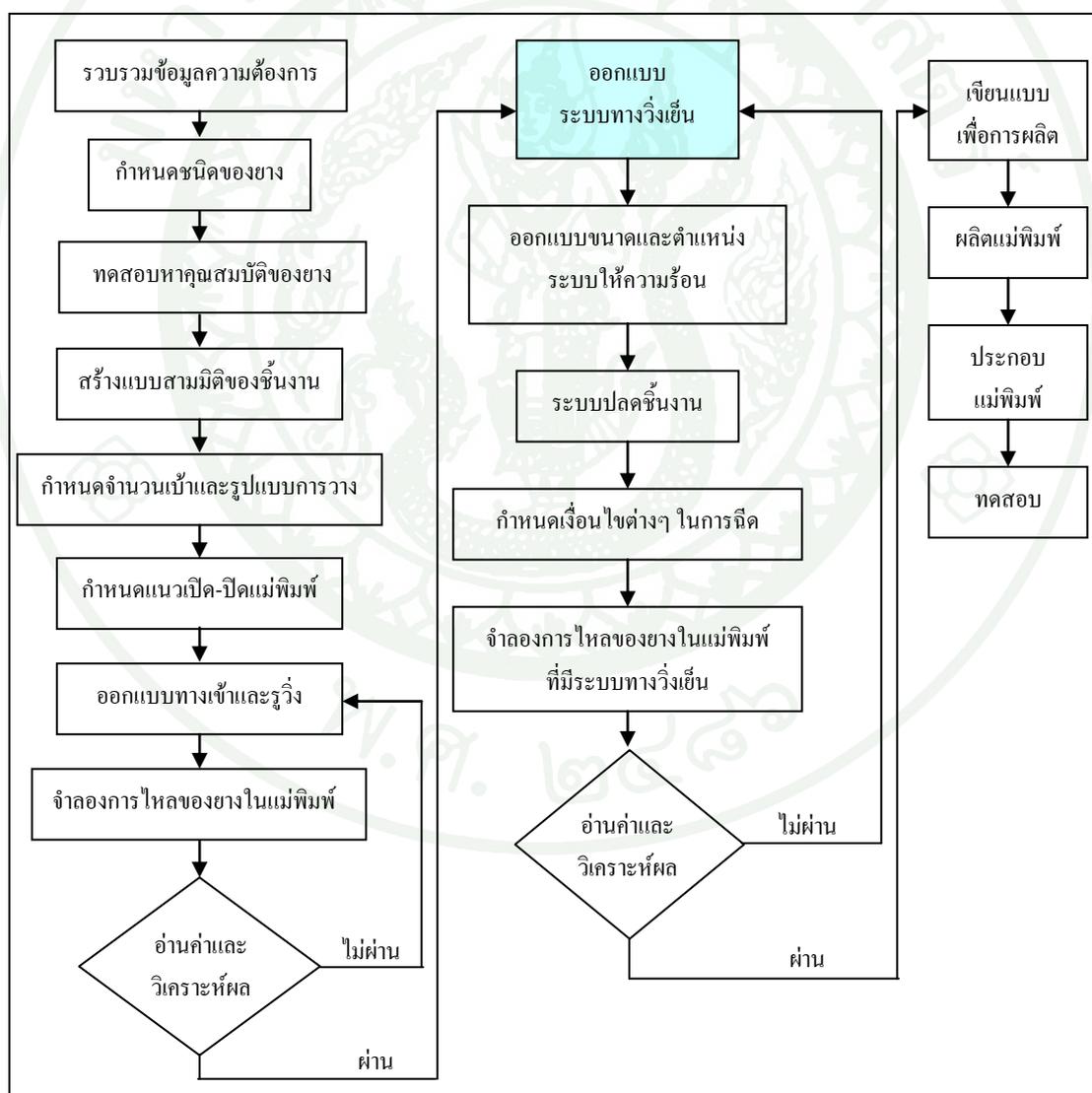
ภาพที่ 35 เครื่อง Thermoflizer (SWO Polymertechnik GmbH)

7. เครื่องจักรสำหรับการขึ้นรูปแม่พิมพ์

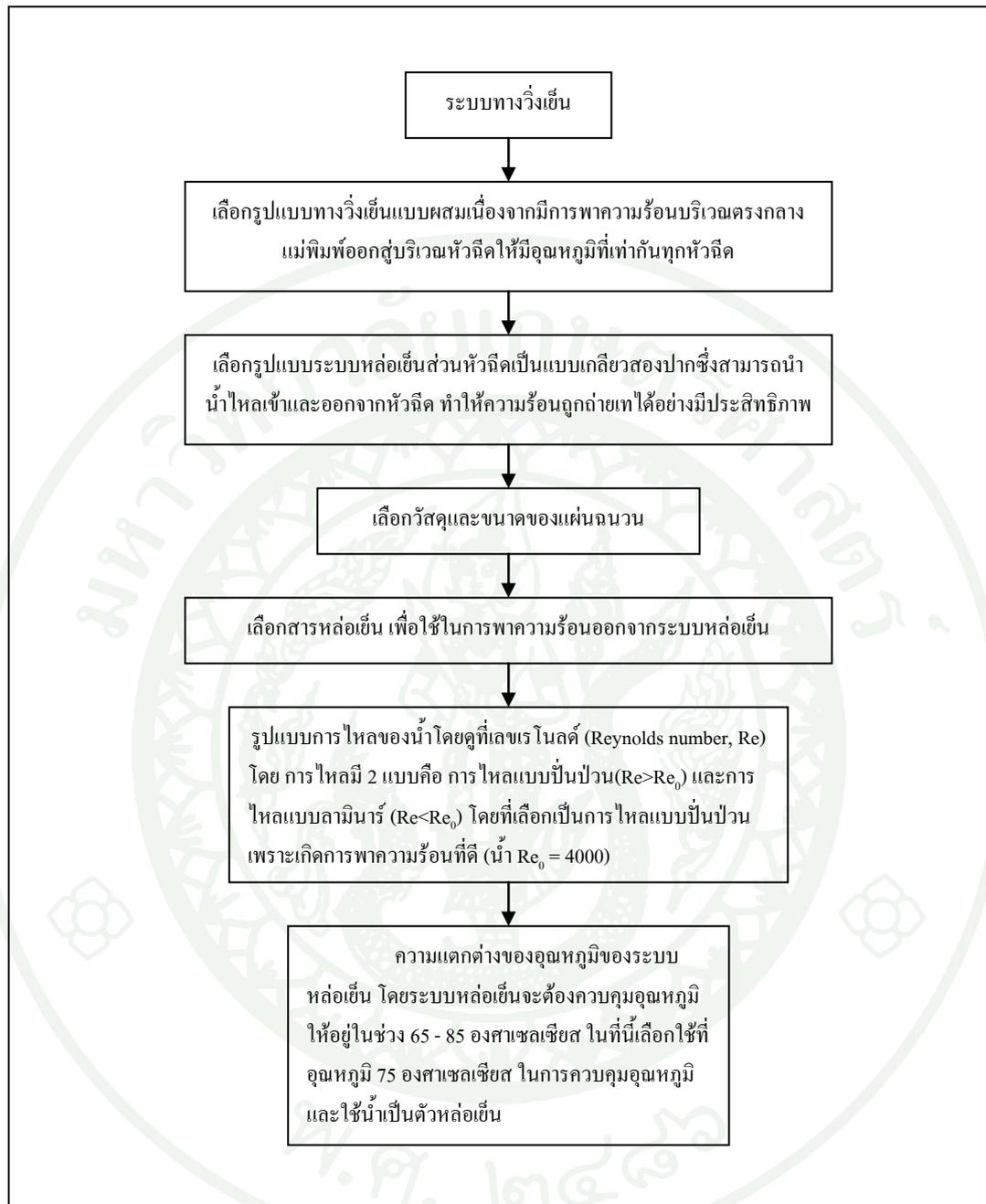
เครื่องจักรต่างๆ ได้แก่ เครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC Milling) เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC Turning) เครื่องอีดีเอ็ม (Electrical Discharged Machine, EDM) และเครื่องเจาะ เป็นต้น

วิธีการ

แนวทางในการวิจัยสามารถสรุปได้ดังภาพที่ 36 และภาพที่ 37



ภาพที่ 36 ขั้นตอนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็น



ภาพที่ 37 กระบวนการออกแบบทางวึ่งเย็นของแม่พิมพ์

การดำเนินการวิจัย

1. เลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา และการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์

การวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือและการสนับสนุนจาก บริษัท เอส เค โพลีเมอร์ จำกัด และ บริษัท ฟรีโซส์ เอ็นจิเนียริง จำกัด ซึ่งเป็นผู้ประกอบการที่ดำเนินธุรกิจในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยใช้แม่พิมพ์ในการอัดและฉีดขึ้นรูป ซึ่งโรงงานตั้งอยู่ที่เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร ซึ่งจากการเยี่ยมชมโรงงาน และประชุมร่วมกันได้ผลสรุปในการเลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา คือ ท่อยางในเครื่องซักผ้า (P.V.Bellow) โดยใช้วัสดุเป็น ยางอีพีดีเอ็ม (EPDM - Ethylene Propylene Diene Monomer) ดังแสดงในภาพที่ 38

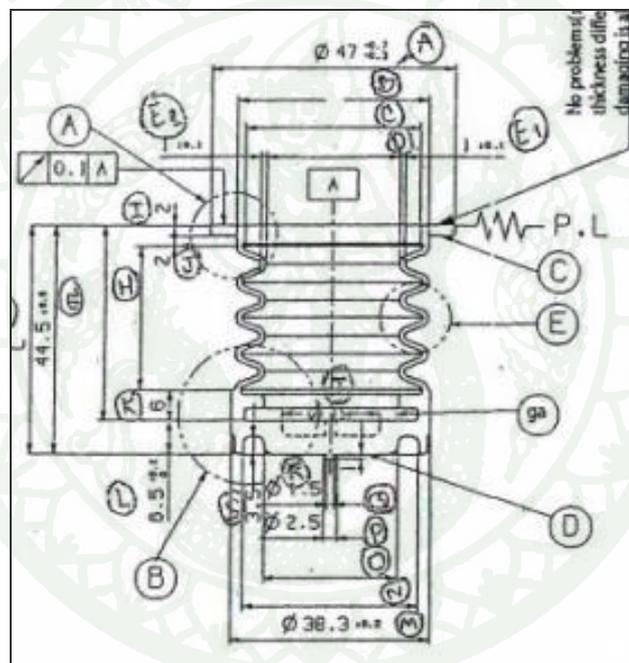


ภาพที่ 38 ท่อยางในเครื่องซักผ้าที่นำมาเป็นกรณีศึกษา

จากการเก็บข้อมูลผลิตภัณฑ์ ณ บริษัทผู้ร่วมการวิจัย แม่พิมพ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นแม่พิมพ์แบบฉีดขึ้นรูป โดยแม่พิมพ์ไม่ได้เป็นแบบระบบทางวิ่งเย็น ซึ่งทางบริษัทพบปัญหาการเกิดครีป และต้องการลดต้นทุนในการผลิตเนื่องจากชิ้นงานกรณีศึกษามีปริมาณในการผลิตสูง ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงได้ทำการสรุปร่วมกับทางบริษัทในการดำเนินการออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นมาใหม่โดยใช้ระบบทางวิ่งเย็นเข้ามาช่วยแก้ไขปัญหาดังกล่าว

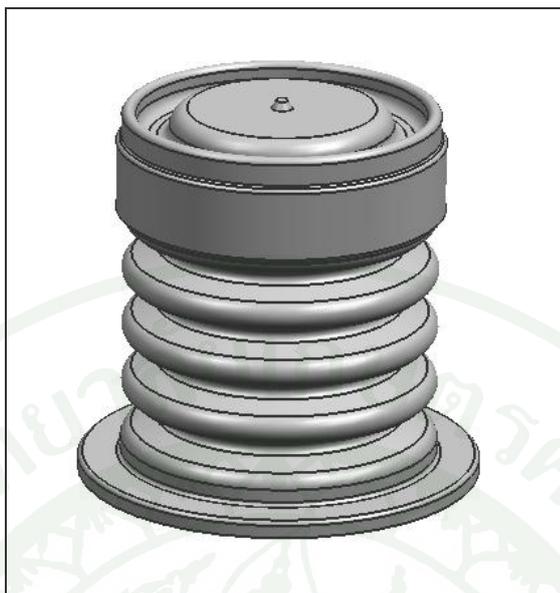
2. การสร้างแบบ 3 มิติของผลิตภัณฑ์

เนื่องจากทางบริษัทเป็นผู้รับจ้างผลิตท่อภายในเครื่องซักผ้าที่นำมาเป็นกรณีศึกษาทำให้ทางบริษัทไม่มีแบบชิ้นงาน 3 มิติ โดยทางบริษัทมีเพียงแบบชิ้นงาน 2 มิติ ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องทำการเขียนแบบชิ้นงาน 3 มิติขึ้น เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ รวมถึงการจำลองการไหลของยางในแม่พิมพ์ด้วย แบบ 3 มิติ ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Unigraphics NX5 โดยอ้างอิงขนาดต่างๆ จากแบบ 2 มิติ จากนั้นจึงนำแบบดังกล่าวมาสร้างแบบ 3 มิติ ดังแสดงในภาพที่ 39 ถึง 41 ซึ่งเป็นแบบ 2 มิติ และ 3 มิติของท่อภายในเครื่องซักผ้า

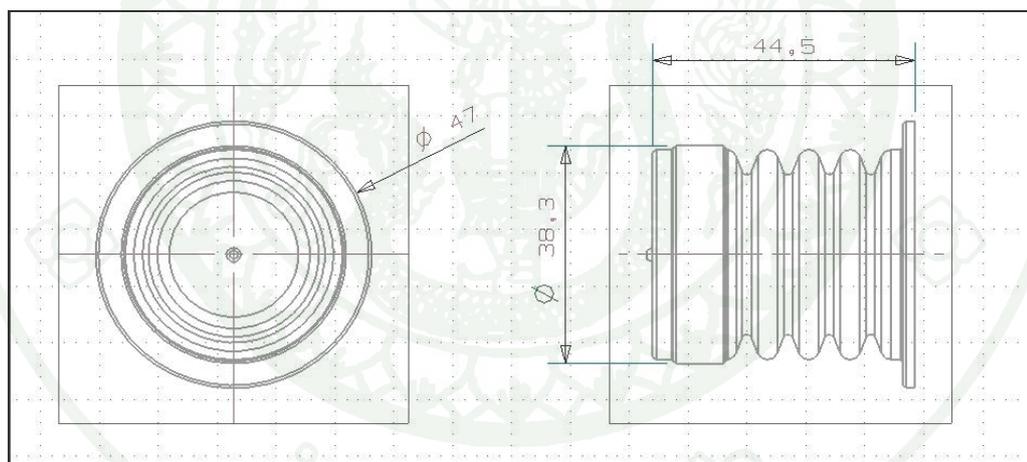


ภาพที่ 39 แบบ 2 มิติของชิ้นงานท่อภายในเครื่องซักผ้า

ที่มา: บริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด (2009)



ภาพที่ 40 แบบ 3 มิติ ท่อยางในเครื่องจักรที่นำมาเป็นกรณีศึกษา

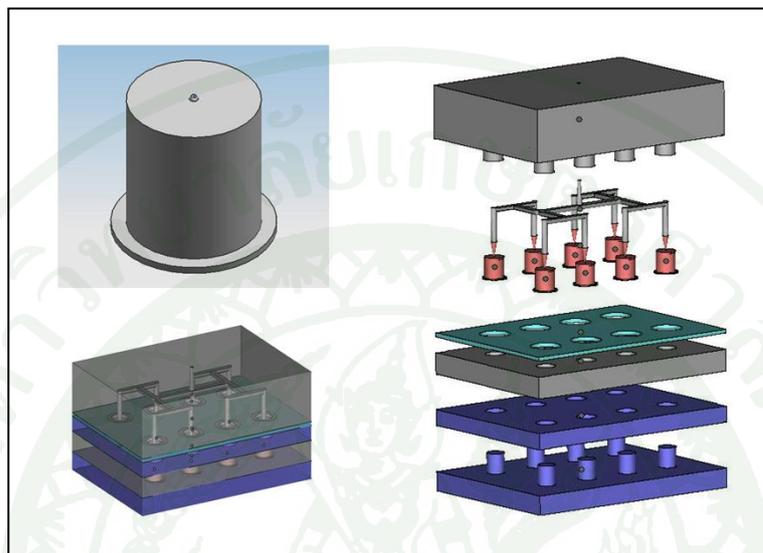


ภาพที่ 41 แบบ 2 มิติของชิ้นงานท่อยางในเครื่องจักรที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม CAD

3. การออกแบบร่างแม่พิมพ์ระบบทางวงเวียน

3.1 แบบก่อนมีระบบทางวงเวียน

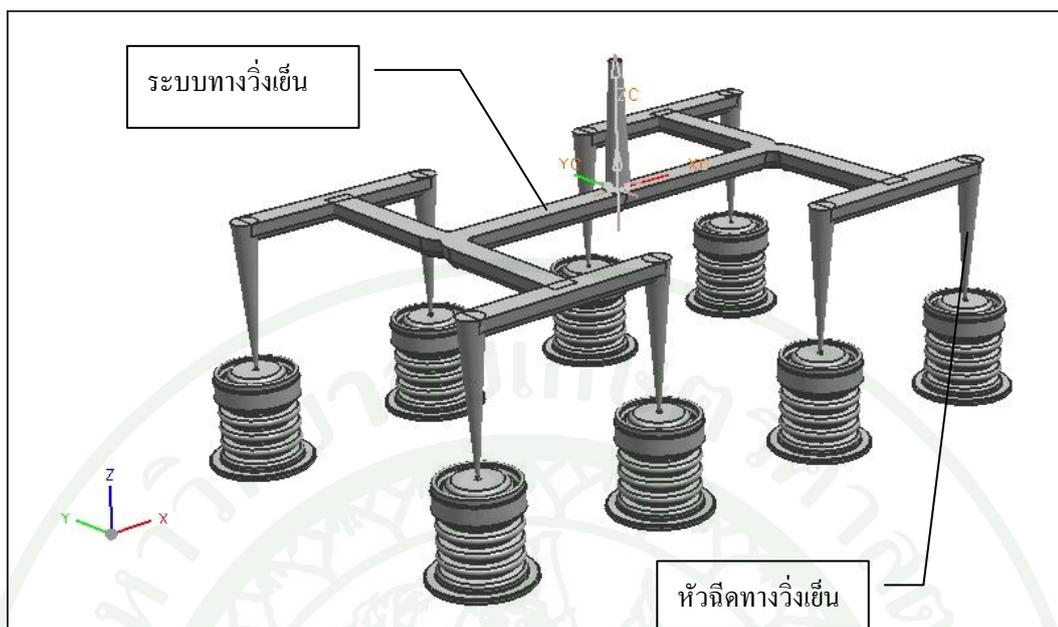
ในการจำลองการไหลจำเป็นต้องใช้แบบเพื่อดูผลการกระจายตัวของอุณหภูมิโดยแบบจะเป็นแบบที่ไม่ต้องลงรายละเอียดมากนัก แต่จะเป็นตัวช่วยให้เห็นรูปแบบของระบบเพื่อนำไปทำแบบที่เสมือนจริงต่อไป ซึ่งได้แสดงดังภาพที่ 42



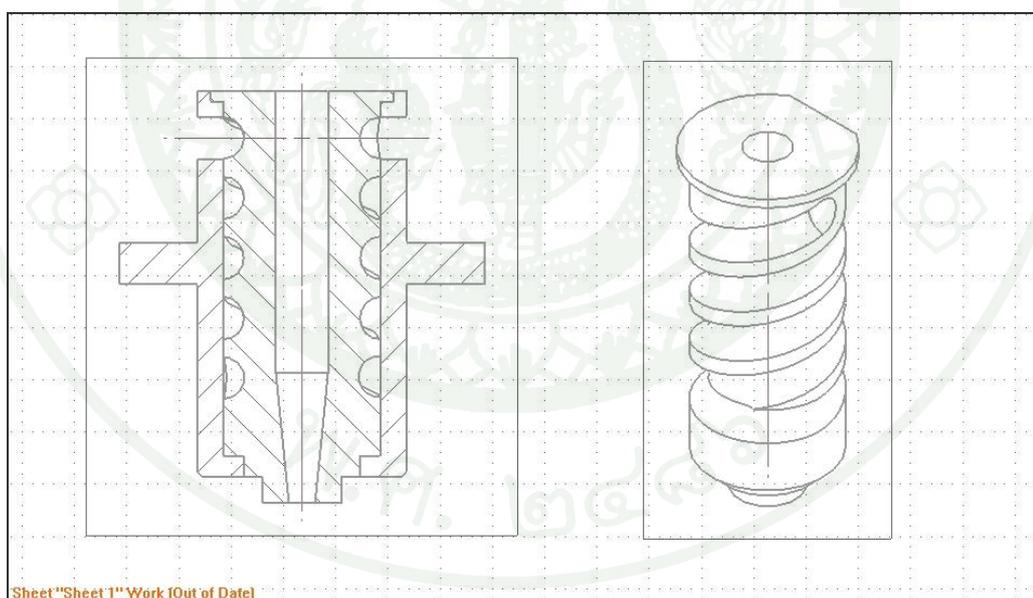
ภาพที่ 42 แบบก่อนมีระบบทางวิ่งเย็น

3.2 ระบบทางวิ่งเย็น

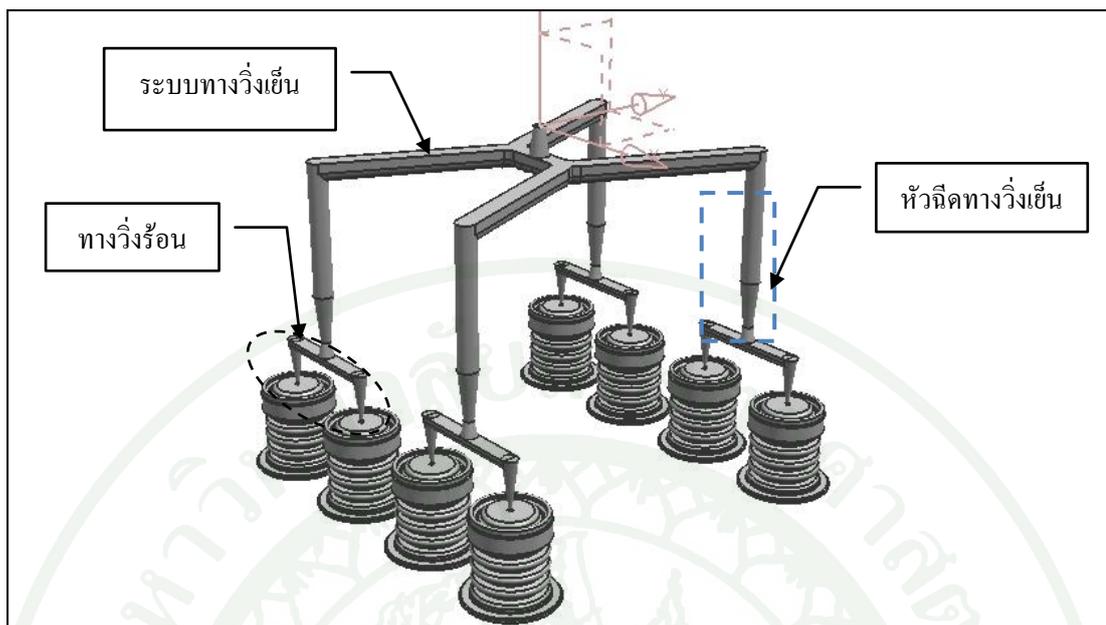
ครั้งแรกได้ทำการออกแบบให้ระบบทางวิ่งเย็นมีจำนวนหัวฉีดทางวิ่งเย็น (Cold Runner Nozzle) จำนวน 8 หัวเท่ากับชิ้นงาน ดังภาพที่ 43 ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถลดปริมาณยางเสียลงได้มาก อย่างไรก็ตามเนื่องจากหัวฉีดทางวิ่งเย็นมีความซับซ้อนและยากในการผลิต รวมทั้งมีข้อจำกัดด้านขนาดในการออกแบบซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 44 ดังนั้นการที่มีจำนวนหัวฉีดทางวิ่งเย็นมากจะส่งผลให้การออกแบบแม่พิมพ์มีความซับซ้อนมากขึ้น เสียค่าใช้จ่าย และเวลาในการผลิตมากขึ้น ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงให้จำนวนหัวฉีดทางวิ่งเย็นเหลือเพียง 4 หัว ดังภาพที่ 45 ซึ่งเหมาะสมกว่า



ภาพที่ 43 ระบบทางวิ่งเย็นที่มีชุดหัวฉีดทางวิ่งเย็น 8 หัว



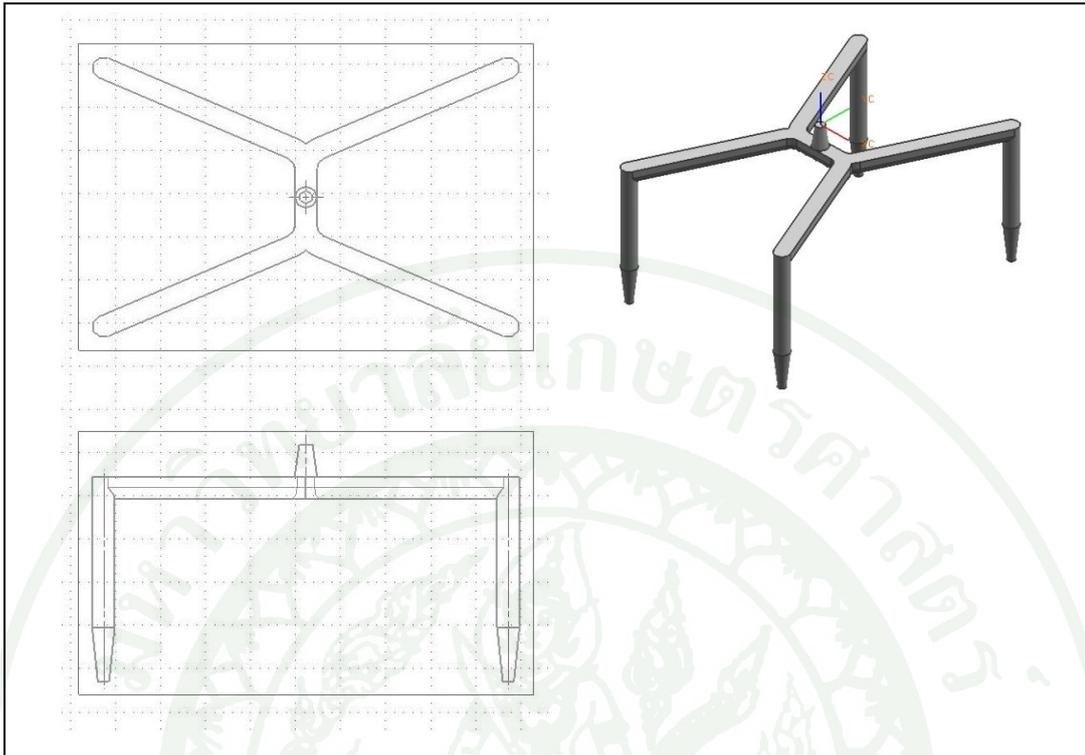
ภาพที่ 44 ลักษณะชิ้นส่วนหัวฉีดทางวิ่งเย็นที่ประกอบในแม่พิมพ์



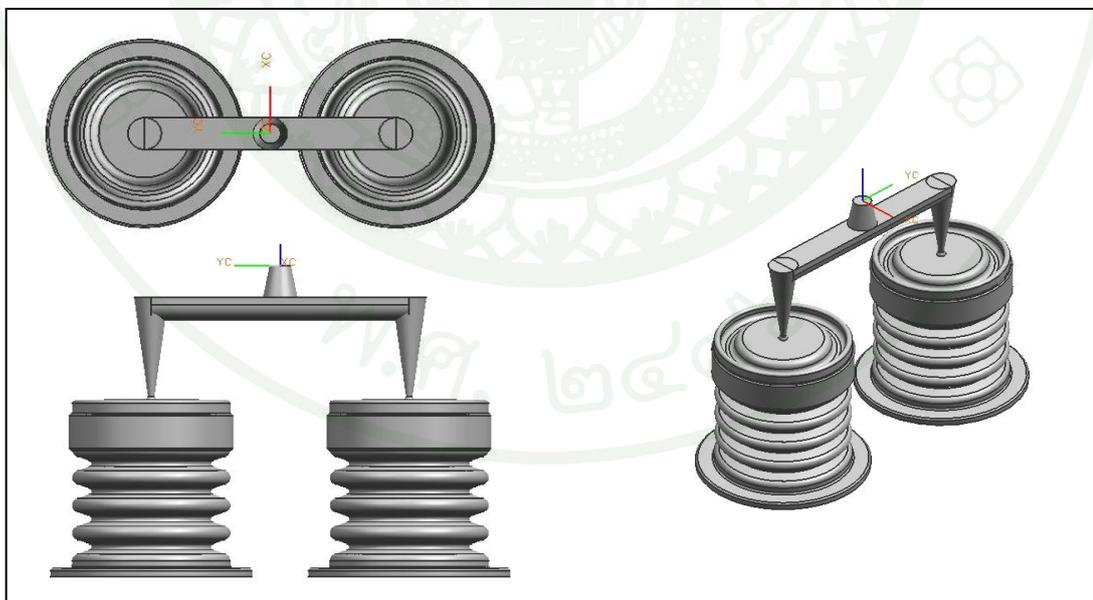
ภาพที่ 45 ระบบทางวิ่งเย็นที่มีชุดหัวฉีดทางวิ่งเย็น 4 หัว

3.3 ระบบทางวิ่ง และรูเข้า

ในการออกแบบทางวิ่งนั้นจะมีอยู่ 2 ส่วน คือส่วนทางวิ่งเย็น และส่วนทางวิ่งร้อน ซึ่งในส่วนของทางวิ่งเย็น ดังภาพที่ 46 ได้ทำการออกแบบให้ลักษณะทางวิ่งมีความโค้ง และให้ไม่เป็นมุมฉากเพื่อลดความแตกต่างของอัตราเฉือนที่เกิดขึ้นในทางวิ่ง ซึ่งอัตราเฉือนที่แตกต่างกันจะทำให้ยางมีความเร็วในการไหลที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงทำการออกแบบให้ยางไหลได้แตกต่างกันน้อยที่สุด ส่วนของทางวิ่งร้อนนั้นจะเป็นส่วนที่ต่อมาจากหัวฉีดทางวิ่งเย็นของระบบทางวิ่งเย็น เพื่อแยกไหลเข้าในเบ้าขึ้นงาน ส่วนของรูเข้านั้นจะเข้าทางด้านบนของขึ้นงาน โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในภาพที่ 47



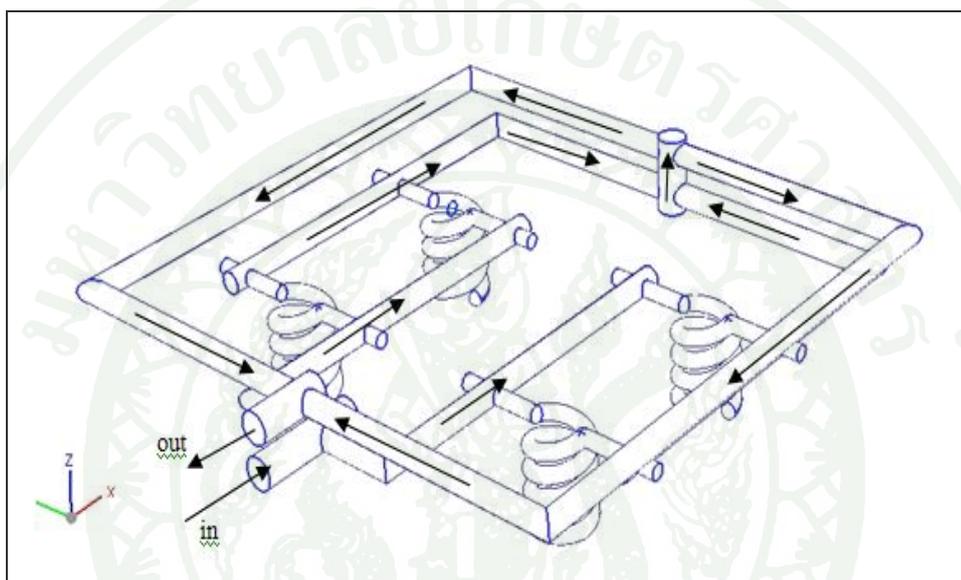
ภาพที่ 46 ลักษณะทางวิงส่วนทางวิงเข็น



ภาพที่ 47 ลักษณะทางวิงรื้อนและรูเข้า

3.4 ระบบน้ำหล่อเย็น

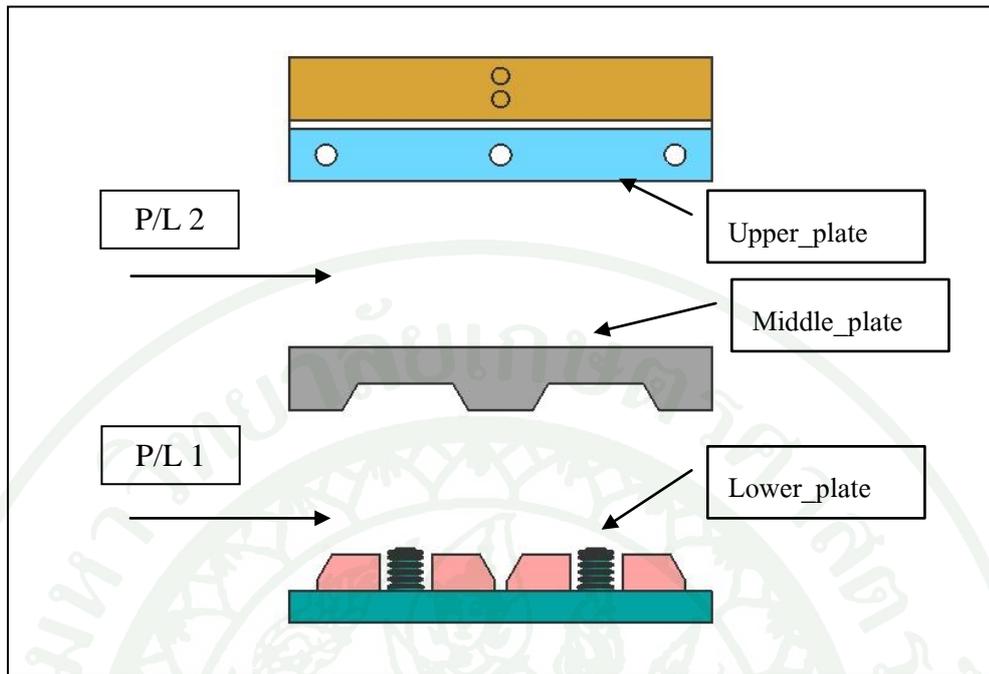
การออกแบบระบบน้ำหล่อเย็นได้ทำการออกแบบให้ทางน้ำหล่อเย็นมี 2 ชั้นเพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ทางวิ่งเย็นได้ทั่วถึง ภาพที่ 48 แสดงทิศทางการไหลของน้ำหล่อเย็น รวมถึงมีการหล่อเย็นบริเวณหัวฉีดทางวิ่งเย็นเพื่อควบคุมให้ยางไม่เกิดการคงรูป



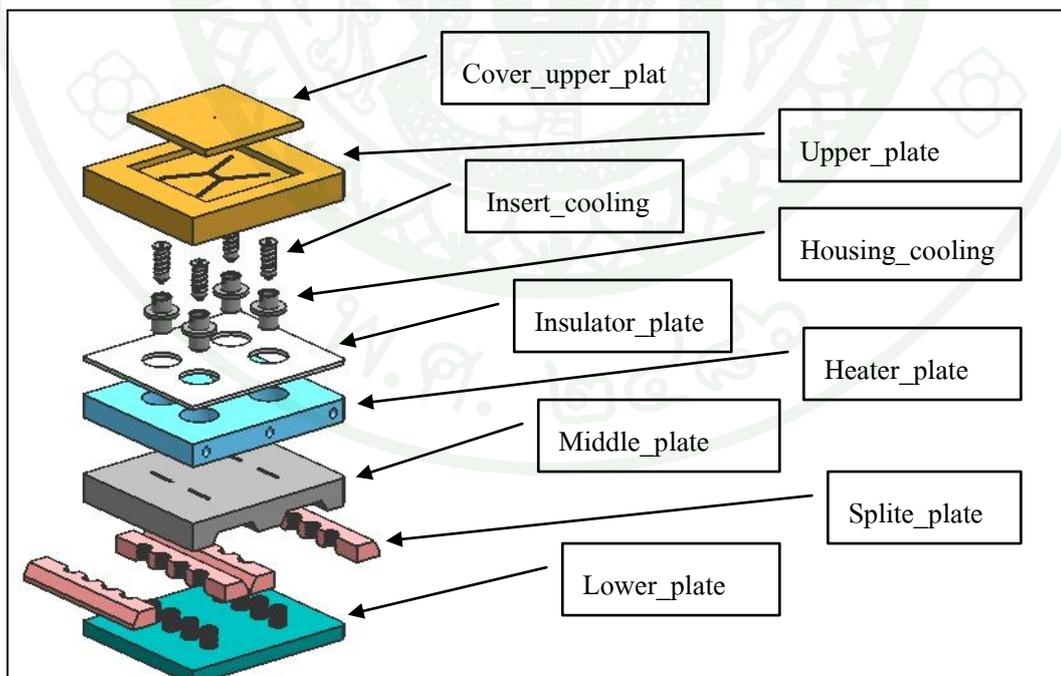
ภาพที่ 48 ระบบน้ำหล่อเย็นและเส้นทางการไหลของน้ำหล่อเย็น

3.5 ระบบแม่พิมพ์

จากการออกแบบทางวิ่ง และรูเข้าทำให้ระบบแม่พิมพ์เป็นแบบ 3 แผ่น มีเส้นแนวแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line) 2 เส้น ดังภาพที่ 49 และเนื่องจากลักษณะชิ้นงานที่มีอันเดอร์คัตทำให้แม่พิมพ์ต้องมีระบบสไลด์เพื่อปลดชิ้นงาน ภาพที่ 50 แสดงส่วนประกอบร่างของแม่พิมพ์ก่อนที่จะนำไปจำลองการไหลด้วยโปรแกรม (แบบร่างแม่พิมพ์แสดงในภาคผนวก ก)



ภาพที่ 49 แสดงแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (P/L)



ภาพที่ 50 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของแบบร่างแม่พิมพ์ที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

4. การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA

4.1 การเตรียมค่าที่จำเป็นในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์โดยโปรแกรม 3D-SIGMA นั้น แบ่งออกเป็นการแบ่งเอลิเมนต์ การกำหนดค่ากระบวนการฉีด ได้แก่ วัสดุที่ใช้งานการสร้างแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็น (ยาง เหล็ก น้ำ และอื่นๆ) อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุ และค่าต่างๆ ของกระบวนการฉีด วัสดุที่เลือกใช้กับชิ้นงานเป็น วัสดุที่ใช้กับผลิตภัณฑ์จริง คือ ยาง EPDM ซึ่งไม่มีฐานข้อมูลของโปรแกรมจึงต้องนำเข้าไปทดสอบ เพื่อหาค่าคุณสมบัติบางประการที่จำเป็นในการวิเคราะห์ของโปรแกรม ซึ่งค่าที่จำเป็นได้แก่ ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการฉีด (Initial Temperature) และข้อมูลที่ต้องการของการสร้างฐานข้อมูลภายในโปรแกรมของยาง EPDM ได้แก่

ค่าการนำความร้อน (Heat Conductivity, Lambda)

ค่าความหนาแน่น (Density, Rho)

ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity, Cp)

ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราการเฉือน (Viscosity as Function of Shear Rate)

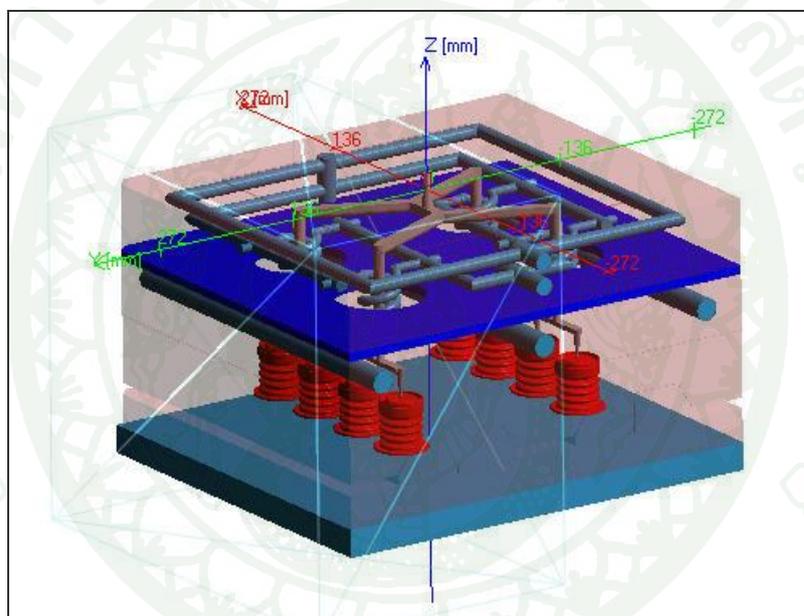
อัตราการบ่มที่ขึ้นกับเวลา (Curing Rate as Function of Time)

โดยในการทดสอบ นั้นควรจะทำที่อุณหภูมิอย่างน้อย 3 ค่าและในแต่ละช่วงของ อุณหภูมิหนึ่งควรมีการเก็บข้อมูลไม่น้อยกว่า 5 ค่า

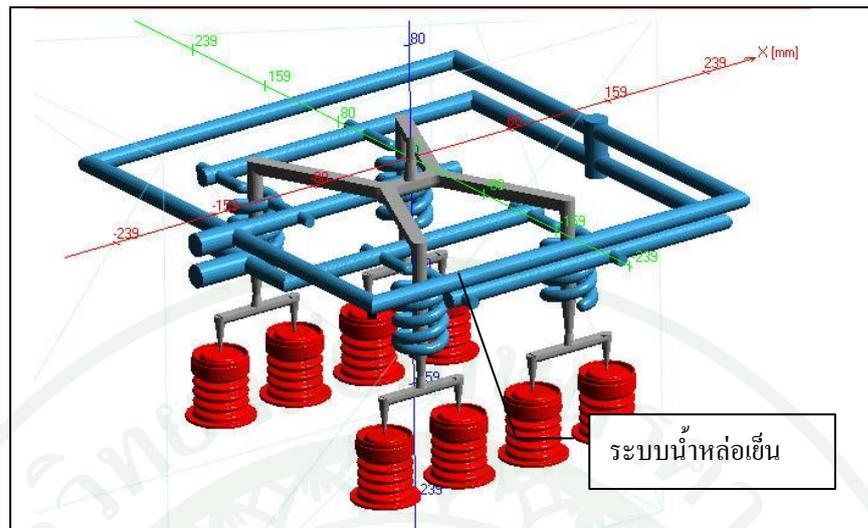
จากนั้นทำการจำลองการไหลของยางที่ผ่านระบบทางวิ่งเย็นเข้าไปในแม่พิมพ์ โดยใช้ โปรแกรม 3D-SIGMA และกำหนดค่าตัวแปรของเครื่องฉีดยางที่ใช้ เช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ความดันที่ใช้ในการฉีด เวลาที่ใช้ในการฉีด รวมถึงตัวแปรของตำแหน่งช่องทางวิ่ง ช่องทางเข้า จุดที่ให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์

4.2 การเตรียมการวิเคราะห์

โปรแกรม 3D-SIGMA มีการจำกัดไฟล์ของแบบที่จะใช้จำลองเป็นแบบ STL (STL File Format) ซึ่งสามารถจัดเก็บเป็น STL ได้ตั้งแต่ขั้นตอนของการสร้างแบบด้วยคอมพิวเตอร์ โปรแกรม CAD ต่างๆ รองรับการจัดเก็บไฟล์แบบ STL หลังจากนั้นจะนำไฟล์ของส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์เข้ามาทำการกำหนดค่าต่างๆ ในส่วนของ Preprocessor ดังภาพที่ 51 ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการกำหนดชนิดของแต่ละชิ้นส่วน เช่น การกำหนดทางวิ่ง การกำหนดครู่เข้า และการกำหนดส่วนแม่พิมพ์ เป็นต้น ในภาพที่ 52 แสดงระบบน้ำหล่อเย็นในแม่พิมพ์



ภาพที่ 51 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA



ภาพที่ 52 ระบบน้ำหล่อเย็นในแม่พิมพ์

4.3 การแบ่งเอลิเมนต์

ในการแบ่งเอลิเมนต์จะมีการแบ่งส่วนต่างๆ ให้แตกต่างกันเพื่อให้การคำนวณมีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น ส่วนของชิ้นงานจะมีความละเอียดกว่าส่วนอื่น เป็นต้น ภาพที่ 53 แสดงการแบ่งเอลิเมนต์ในส่วนต่างๆ ซึ่งค่าเลขยิ่งน้อยจะยิ่งมีความละเอียดของเอลิเมนต์มาก ซึ่งจำนวนเอลิเมนต์ที่ได้มีค่าเท่ากับ 14,254,500 เอลิเมนต์

Material	ID Label	Parameter set	Accuracy	Minimum wall thickn	Minimum subdivision
Part class					
Part	ID 1	advanced2	3/3/3	0.5/0.5/0.5	0.5/0.5/0.5
Part	ID 2	advanced2	3/3/3	0.5/0.5/0.5	0.5/0.5/0.5
Part	ID 3	advanced2	3/3/3	0.5/0.5/0.5	0.5/0.5/0.5
Part	ID 4	advanced2	3/3/3	0.5/0.5/0.5	0.5/0.5/0.5
Part	ID 5	advanced2	3/3/3	0.5/0.5/0.5	0.5/0.5/0.5
Part	ID 6	advanced2	3/3/3	0.5/0.5/0.5	0.5/0.5/0.5
Part	ID 7	advanced2	3/3/3	0.5/0.5/0.5	0.5/0.5/0.5
Part	ID 8	advanced2	3/3/3	0.5/0.5/0.5	0.5/0.5/0.5
Inlet	ID 1	advanced	3/3/3	2/2/2	2/2/2
Runner	ID 1	advanced	3/3/3	2/2/2	2/2/2
Runner	ID 2	advanced	3/3/3	2/2/2	2/2/2
Ingate	ID 1	advanced	3/3/3	2/2/2	2/2/2
Ingate	ID 2	advanced	3/3/3	2/2/2	2/2/2

ภาพที่ 53 ค่าการแบ่งเอลิเมนต์

4.4 การกำหนดค่าการฉีด

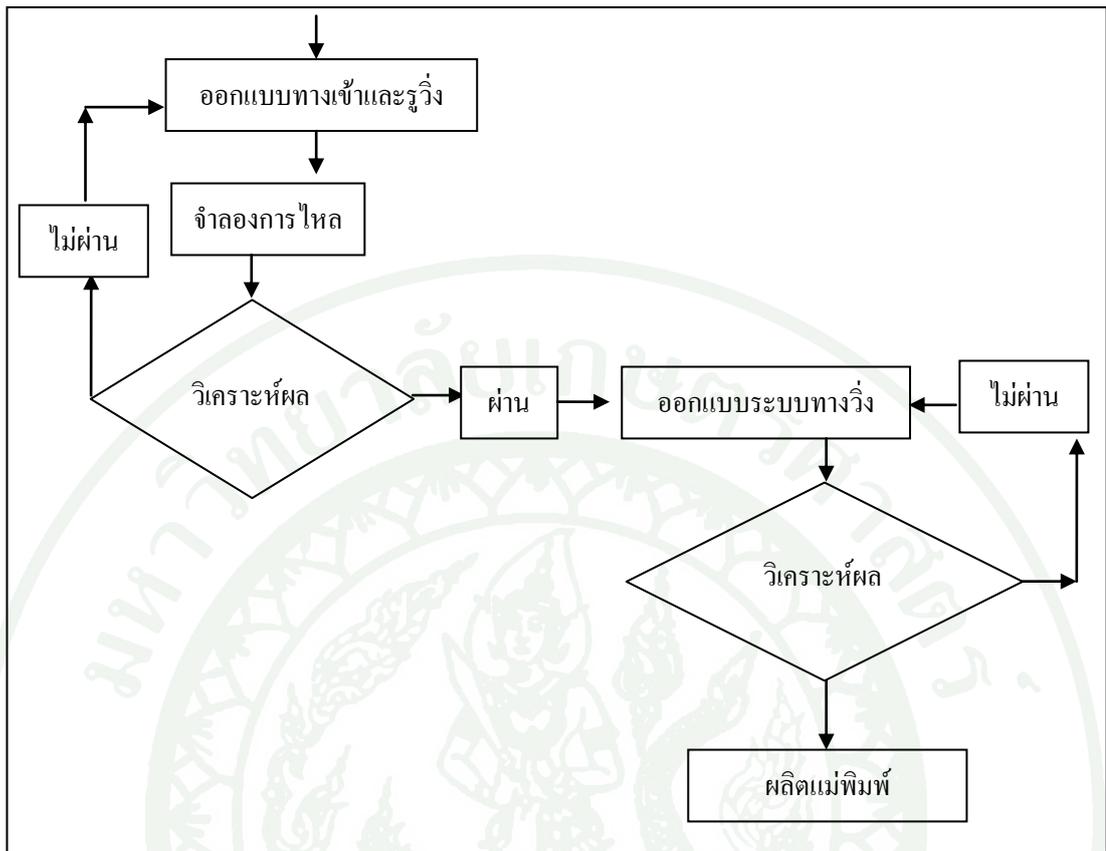
สำหรับการกำหนดค่าการฉีด ได้ทำการกำหนดให้ค่าเริ่มต้นต่างๆ ดังตารางที่ 1 และได้กำหนดให้วิเคราะห์ทั้งหมด 15 รอบการฉีด เพื่อให้ความร้อนของระบบเสถียรทำให้ผลที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น

ตารางที่ 1 ค่าเริ่มต้นของการวิเคราะห์

รายการ	ฐานข้อมูลที่ใช้	อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)
1. ชีงงาน	ยาง EPDM	100
2. แผ่นฉนวน	Insulation	35
3. แม่พิมพ์	S45C	180
4. แม่พิมพ์ทางวิ่งเย็น	S45C	30
5. น้ำหล่อเย็น	น้ำ	75
6. ตัวทำความร้อน	Heater	180

4.5 แผนการออกแบบระบบทางวิ่งเย็น

ทำการออกแบบและวิเคราะห์การไหลในส่วนของทางวิ่งก่อนมีระบบทางวิ่งเย็นจากนั้นจะเป็นการวางทางวิ่งและรูเข้า หลังจากนั้นจะได้ขนาดและระบบทางวิ่งเย็น จึงทำการวิเคราะห์แม่พิมพ์ที่มีส่วนประกอบต่างๆ โดยแสดงแผนการวิเคราะห์ดังภาพที่ 54



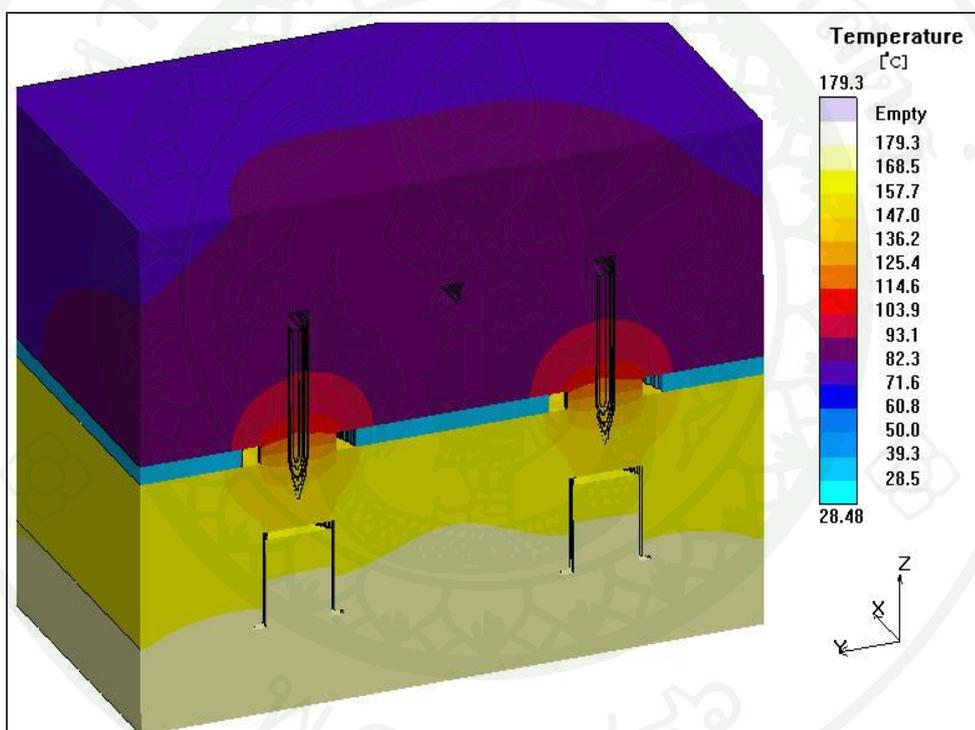
ภาพที่ 54 แผนการวิเคราะห์การไหล

ผลและวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์การไหลด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA

1. ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในแม่พิมพ์ก่อนมีระบบทางวิ่งเย็น

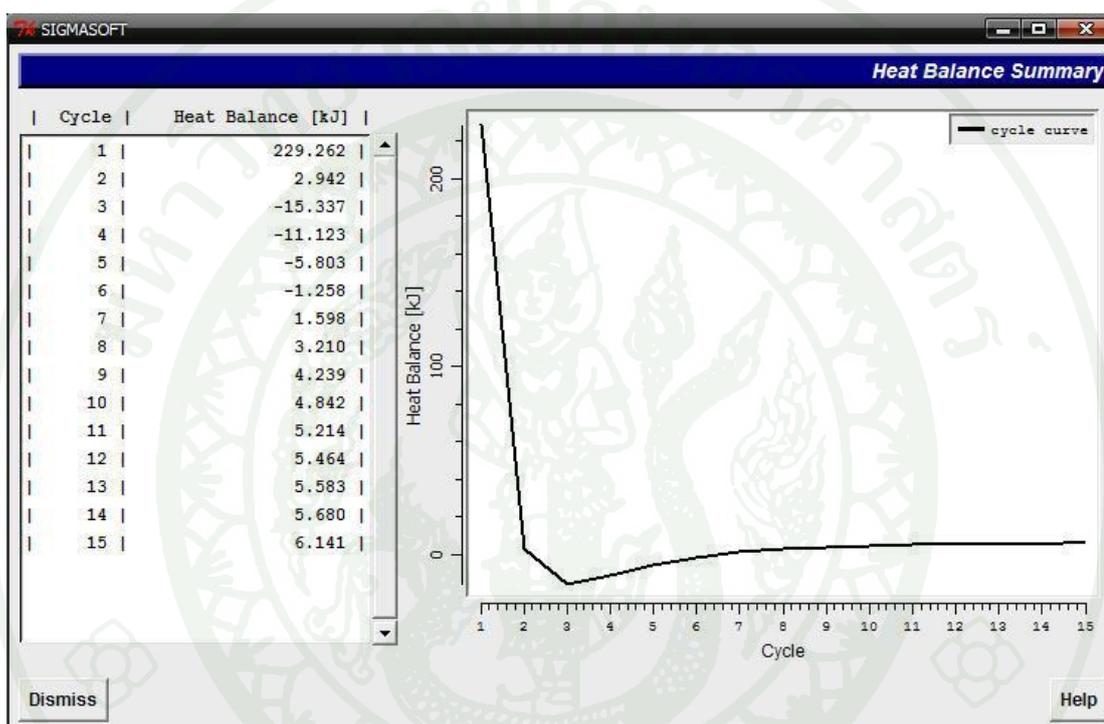
ในการดูผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในแม่พิมพ์ก่อนมีระบบทางวิ่งเย็นจะพบได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิจะสูงบริเวณทางวิ่งของยางซึ่งจะแสดงดังภาพที่ 55



ภาพที่ 55 ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิในแม่พิมพ์ก่อนมีระบบทางวิ่งเย็น

2. สมดุลของความร้อนในแต่ละรอบการฉีด

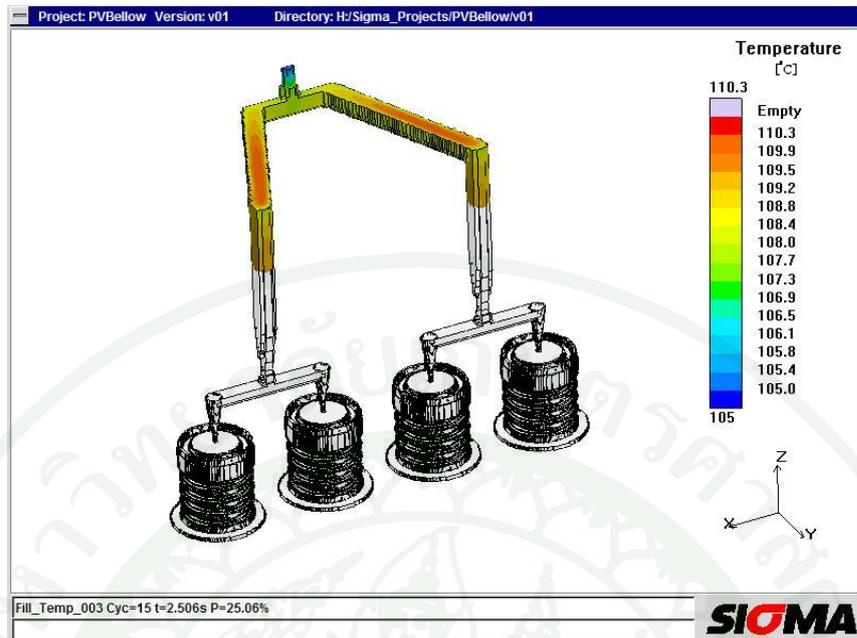
ในการดูผลการวิเคราะห์จะดูผลที่รอบการฉีดที่ 15 เนื่องจากความร้อนของระบบมีความเสถียร ดังภาพที่ 56 เป็นกราฟแสดงความสมดุลของความร้อนของระบบแม่พิมพ์จะเห็นได้ว่าที่รอบฉีดที่ 15 ความร้อนของแม่พิมพ์มีความเสถียรดีแล้ว



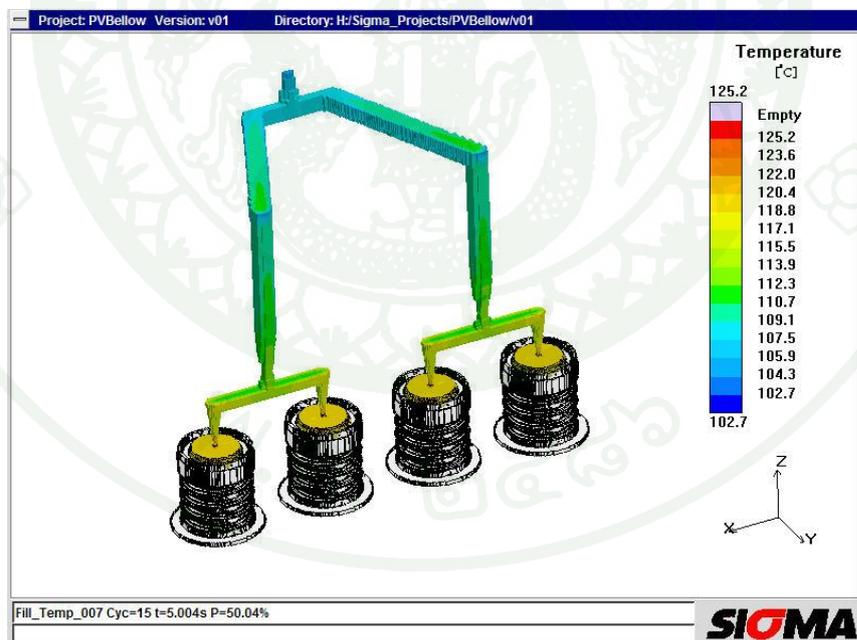
ภาพที่ 56 กราฟแสดงความสมดุลของความร้อนในแต่ละรอบการฉีด

3. ลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์

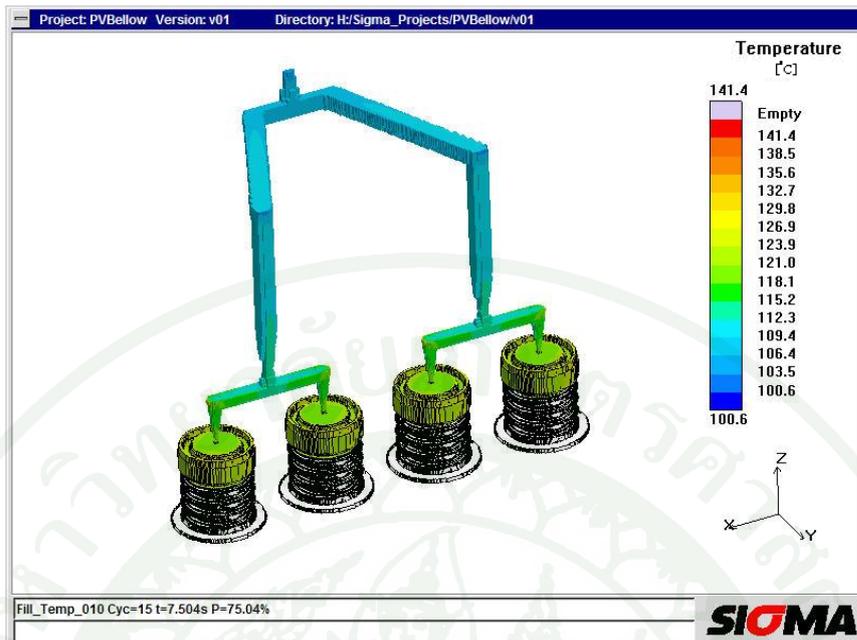
ภาพที่ 57 ถึง 60 แสดงการไหลของยางในแม่พิมพ์ ซึ่งจากรูปแสดงให้เห็นว่ายางไหลเข้าไปแต่ละเบ้าพร้อมกัน ซึ่งสามารถการเกิดปัญหาในชิ้นงานได้ เช่น การเกิดครีบ หรือการฉีดไม่เต็ม ส่วนในภาพที่ 61 แสดงการไหลของยางเข้าไปในชิ้นงาน



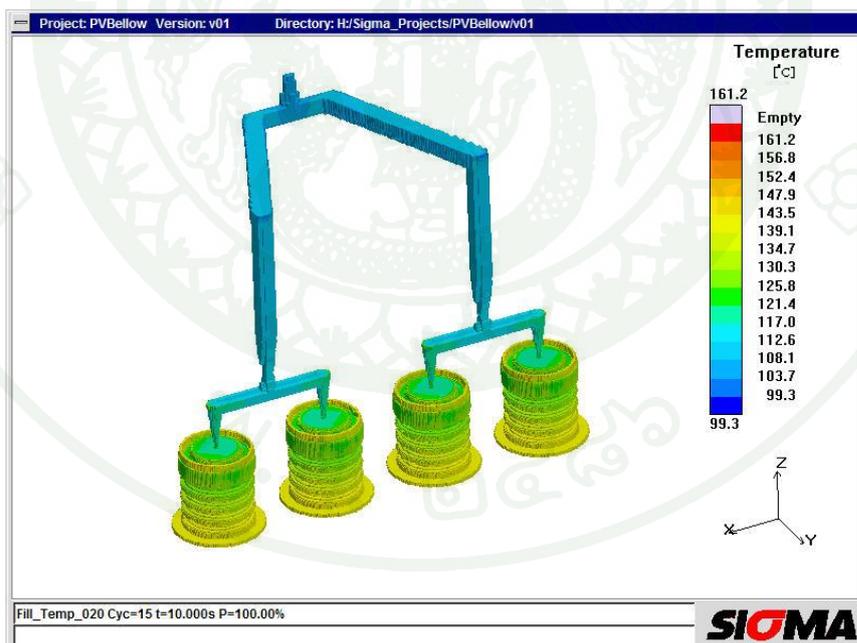
ภาพที่ 57 ลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์ที่ 25 เปอร์เซ็นต์ ของการฉีด



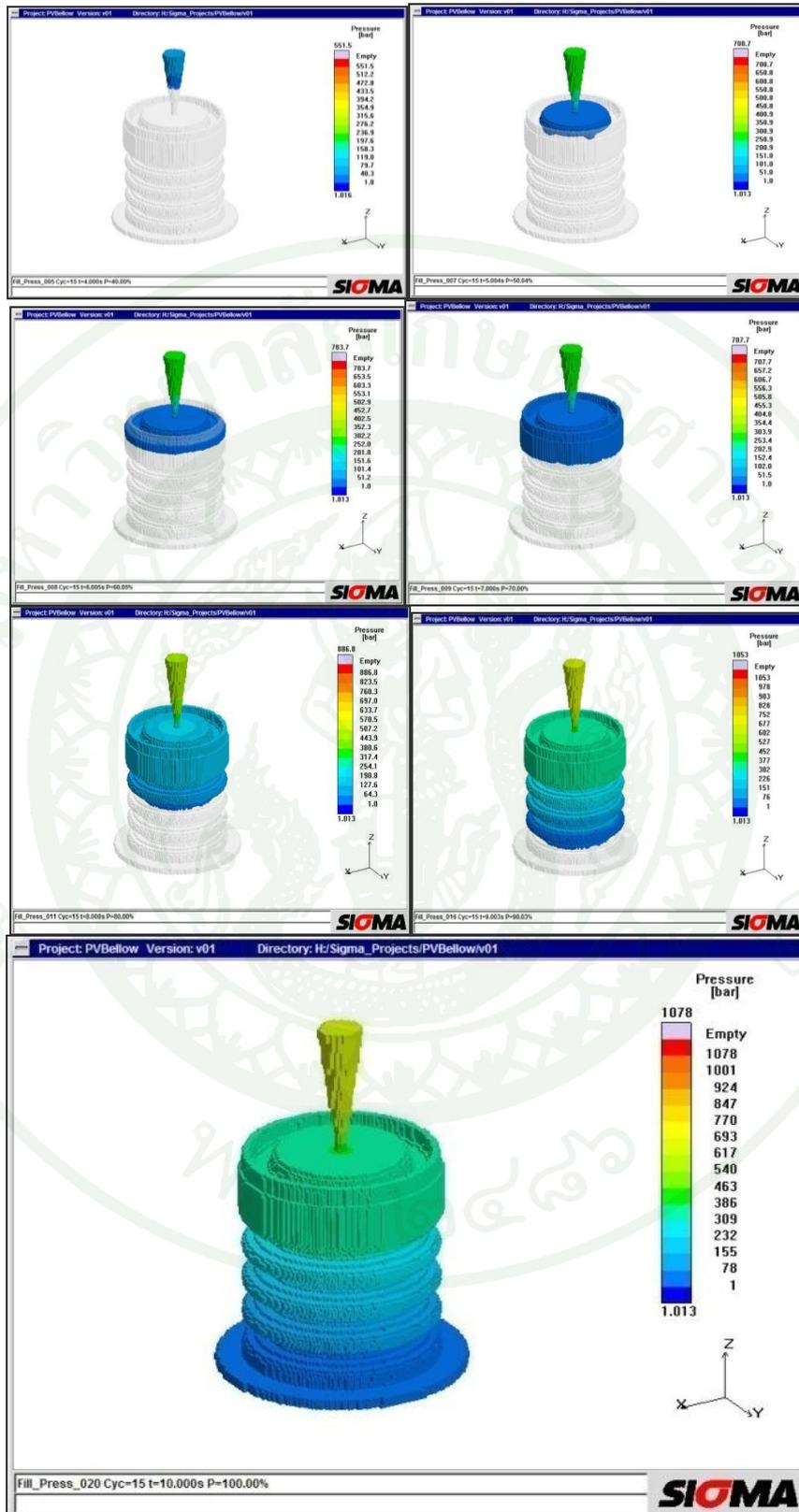
ภาพที่ 58 ลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์ที่ 50 เปอร์เซ็นต์ ของการฉีด



ภาพที่ 59 ลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์ที่ 75 เปอร์เซ็นต์ ของการฉีด



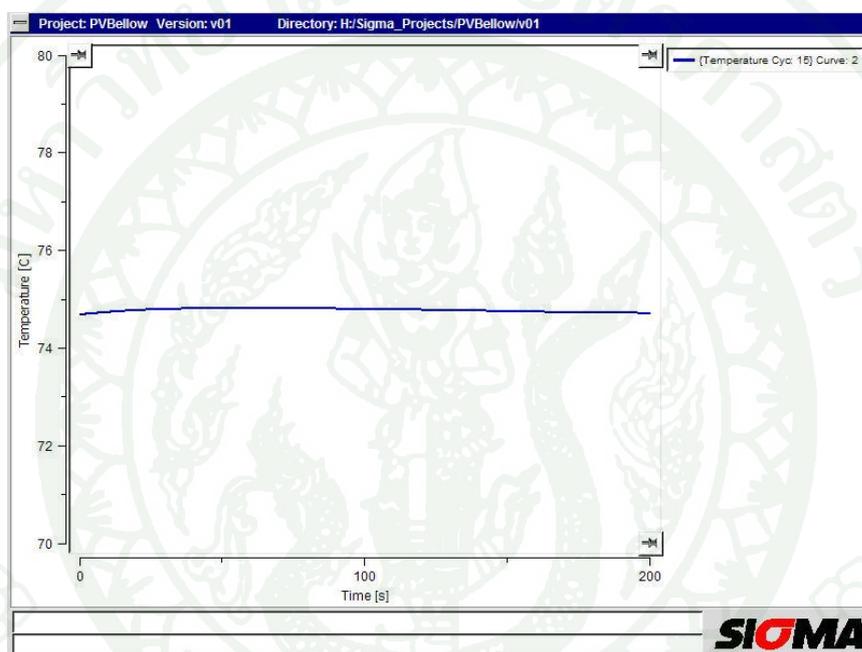
ภาพที่ 60 ลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ของการฉีด



ภาพที่ 61 ลักษณะการไหลของยางในชิ้นงาน

3. อุณหภูมิของแม่พิมพ์ชุดทางวิ่งเย็น

สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็น อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องระวังเป็นพิเศษ ซึ่งแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นจะต้องควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำ เพื่อให้ยางไม่เกิดการคงรูปก่อน จากภาพที่ 62 กราฟอุณหภูมิของแม่พิมพ์แสดงให้เห็นว่าชุดทางวิ่งเย็นสามารถรักษาอุณหภูมิให้ต่ำไว้ได้อย่างคงที่มีค่าประมาณ 75 องศาเซลเซียส

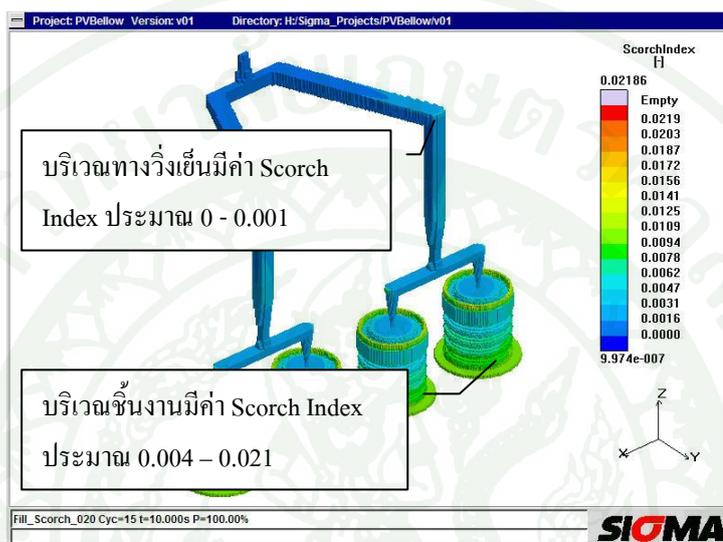


ภาพที่ 62 กราฟแสดงอุณหภูมิแม่พิมพ์ชุดทางวิ่งเย็น

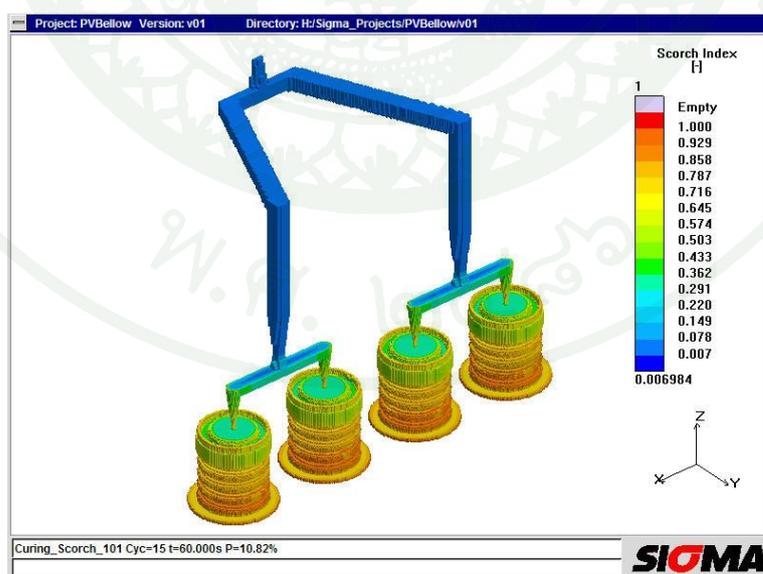
4. ค่า Scorch Index และ เปอร์เซ็นต์ของการคงรูป

เมื่อมาดูในส่วนของการคงรูปของยางจะเห็นได้ว่า ที่เวลาสิ้นสุดการฉีดยางยังไม่มี การเกิดปฏิกิริยาขึ้น ดังภาพที่ 63 ซึ่งมีค่า Scorch Index สูงสุดเพียง 0.021 และเกิดในบริเวณชิ้นงาน จากนั้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการคงรูป (Curing Phase) ยางในส่วนของทางวิ่งเย็นจะต้องได้รับการ ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิดปฏิกิริยา จากภาพที่ 64 ถึง 66 แสดงค่า Scorch Index ขณะกระบวนการคง ภาพที่เวลาต่างๆ จนเสร็จสิ้นรอบการฉีด แสดงให้เห็นว่าบริเวณทางวิ่งเย็นแสดงเป็นสีน้ำเงินมีค่า Scorch Index น้อยกว่า 0.001 ซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยา ใดๆก็ตามในส่วนของชิ้นงานมีค่า Scorch Index มากกว่า 0.930 แสดงว่าชิ้นงานเกิดปฏิกิริยาเรียบร้อยแล้ว นอกจากนี้ยังสามารถดูในส่วนของ

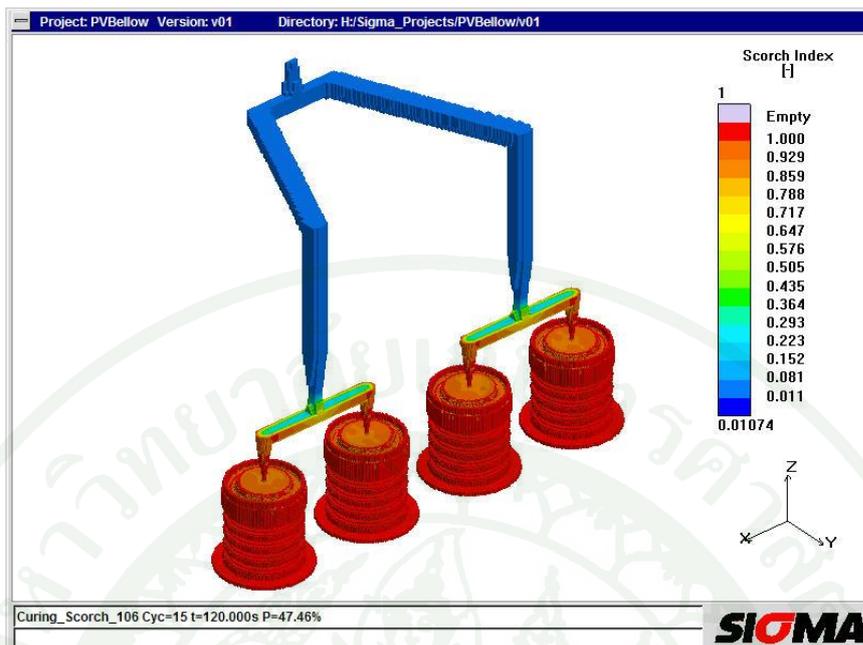
เปอร์เซ็นต์ของการคงรูปได้ดังภาพที่ 67 ถึง 69 ที่แสดงบริเวณของยางที่มีการคงรูปน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งบริเวณชิ้นงานหายไปแสดงว่ายางในส่วนของชิ้นงานมีการคงรูปมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ และยางในส่วนของทางวิ่งเย็นยังแสดงอยู่และมีค่าอยู่ที่ 0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นไปตามความต้องการของการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็น



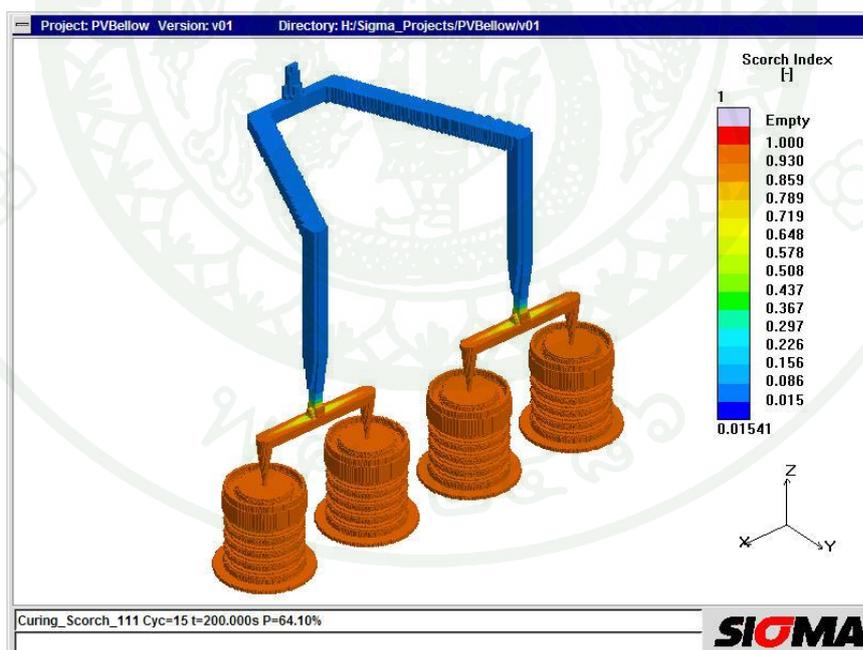
ภาพที่ 63 Scorch Index ของยางเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการฉีด



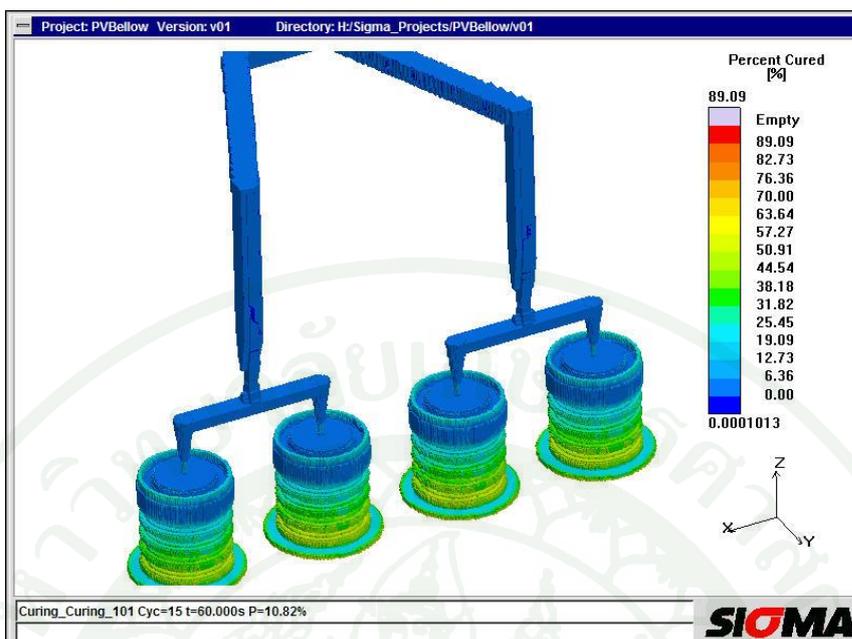
ภาพที่ 64 ค่า Scorch Index ที่บริเวณต่างๆ ขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 60 วินาที



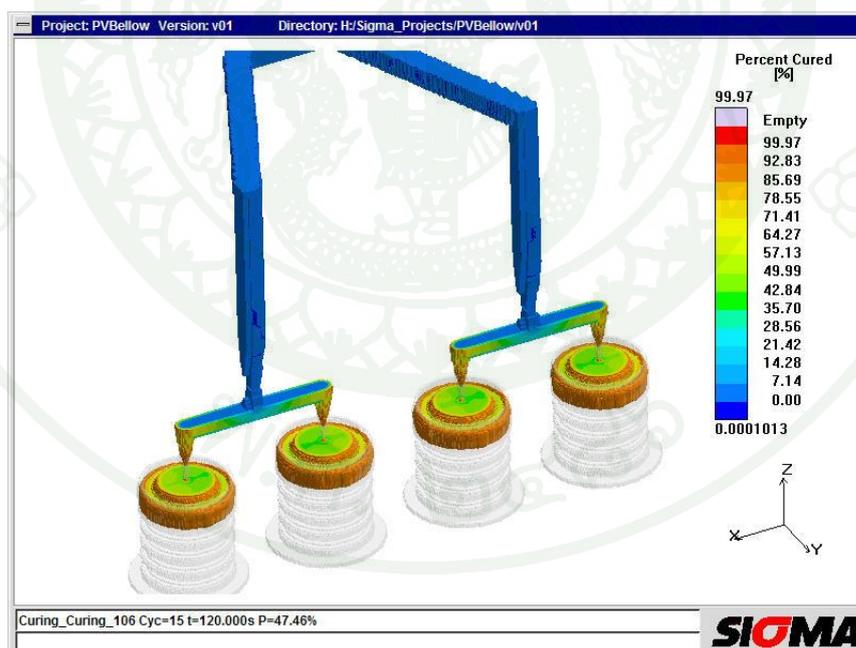
ภาพที่ 65 ค่า Scorch Index ที่บริเวณต่างๆ ขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 120 วินาที



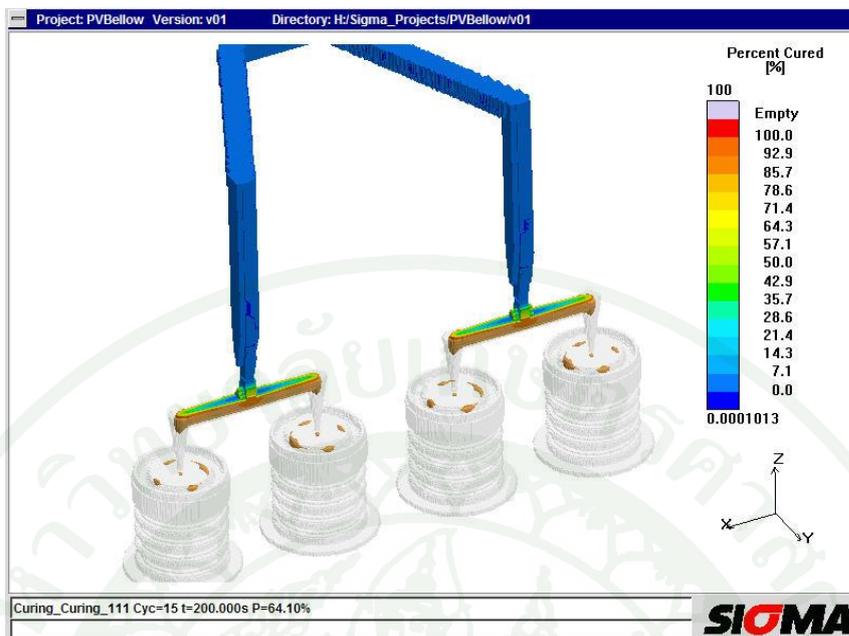
ภาพที่ 66 ค่า Scorch Index ที่บริเวณต่างๆ ขณะเสร็จสิ้นกระบวนการคงรูปที่เวลา 200 วินาที



ภาพที่ 67 บริเวณคงรูปที่มีค่าน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 60 วินาที

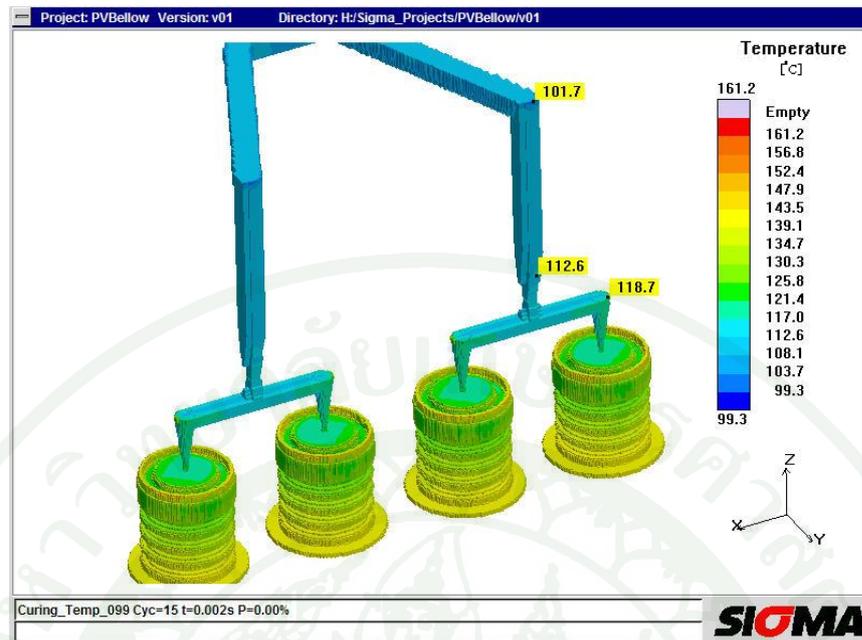


ภาพที่ 68 บริเวณคงรูปที่มีค่าน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 120 วินาที

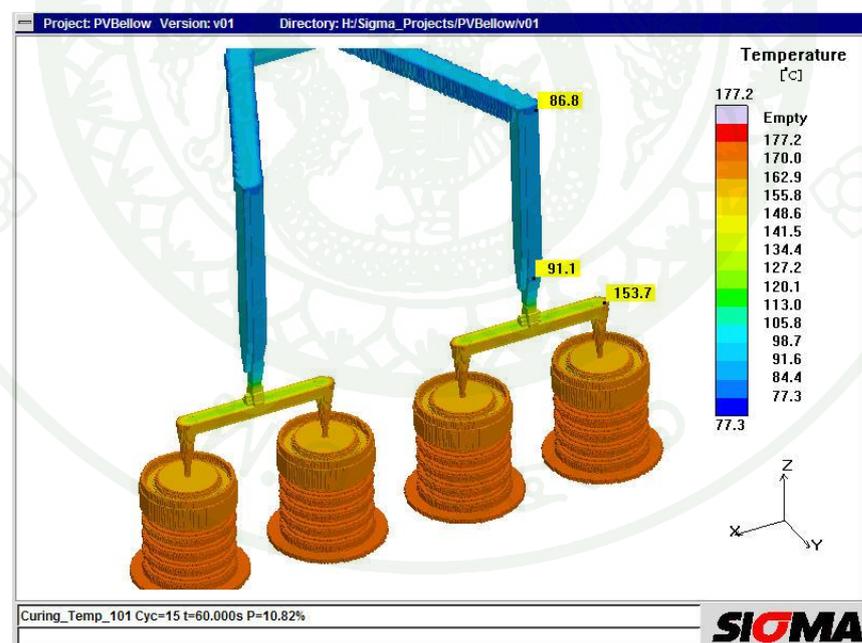


ภาพที่ 69 บริเวณคงรูปที่มีค่าน้อยกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ขณะเสร็จสิ้นกระบวนการคงรูปที่เวลา 200 วินาที

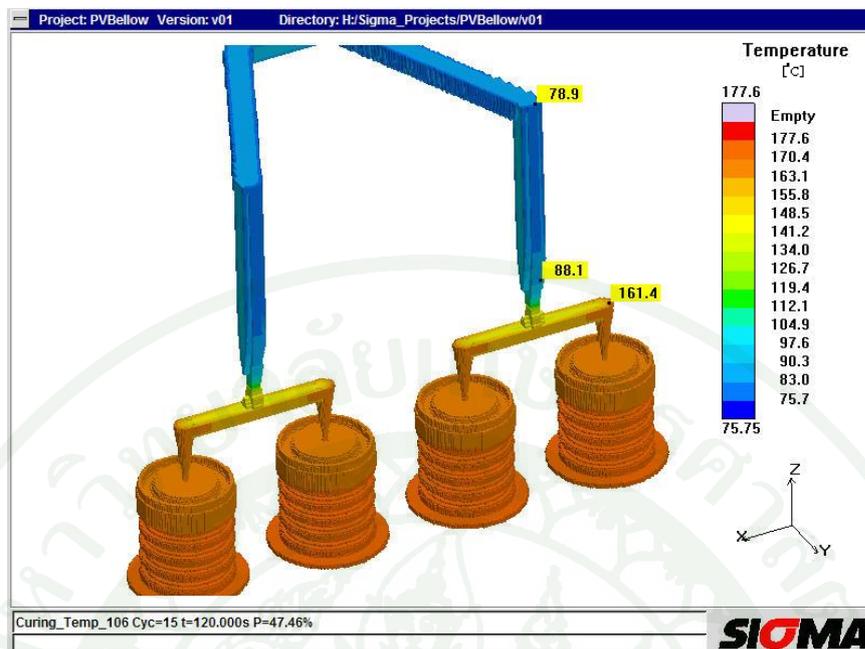
ภาพที่ 70 ถึง 73 แสดงอุณหภูมิของยางที่บริเวณทางวิ่งเย็น หัวฉีดทางวิ่งเย็น และชิ้นงานที่เวลา 0 60 120 และ 200 วินาทีของกระบวนการคงรูป ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าอุณหภูมิของทางวิ่งเย็นและหัวฉีดทางวิ่งเย็นถูกควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำได้ตลอดกระบวนการคงรูป และในส่วนของชิ้นงานยางก็มีความร้อนสูงพอที่จะเกิดการคงรูป ภาพที่ 74 และ 75 แสดงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ในส่วนของหัวฉีดทางวิ่งเย็น และการกระจายตัวของอุณหภูมิในแม่พิมพ์แผ่นทางวิ่งเย็นที่แสดงให้เห็นว่าการควบคุมอุณหภูมิเป็นไปตามความต้องการ คือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ส่วนทางวิ่งเย็นมีอุณหภูมิต่ำเพียงพอให้ยางไม่เกิดการคงรูป และอุณหภูมิแม่พิมพ์ส่วนคอร์และคาวิตีมีอุณหภูมิสูงเพียงพอที่จะทำให้ยางเกิดการคงรูป



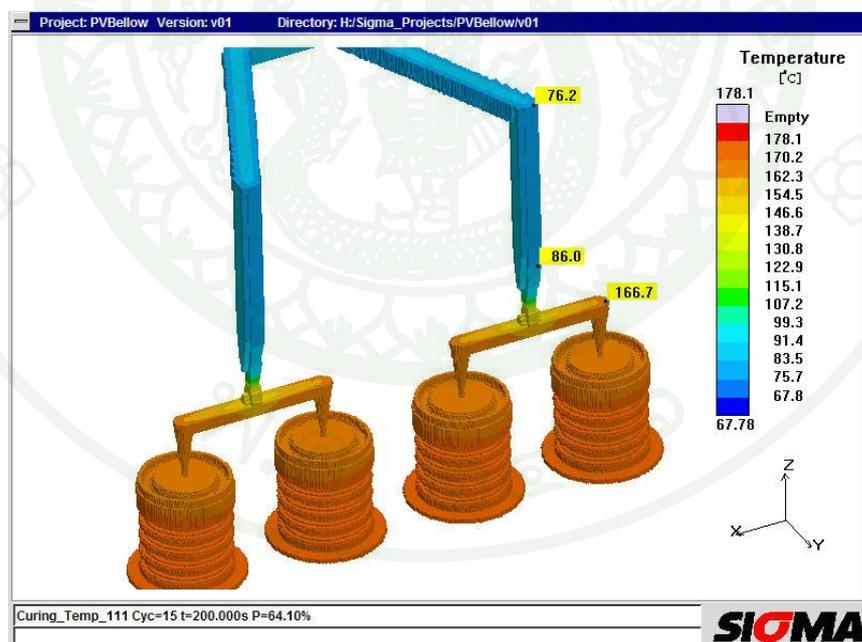
ภาพที่ 70 อุณหภูมิของยางขณะเริ่มต้นกระบวนการคงรูป



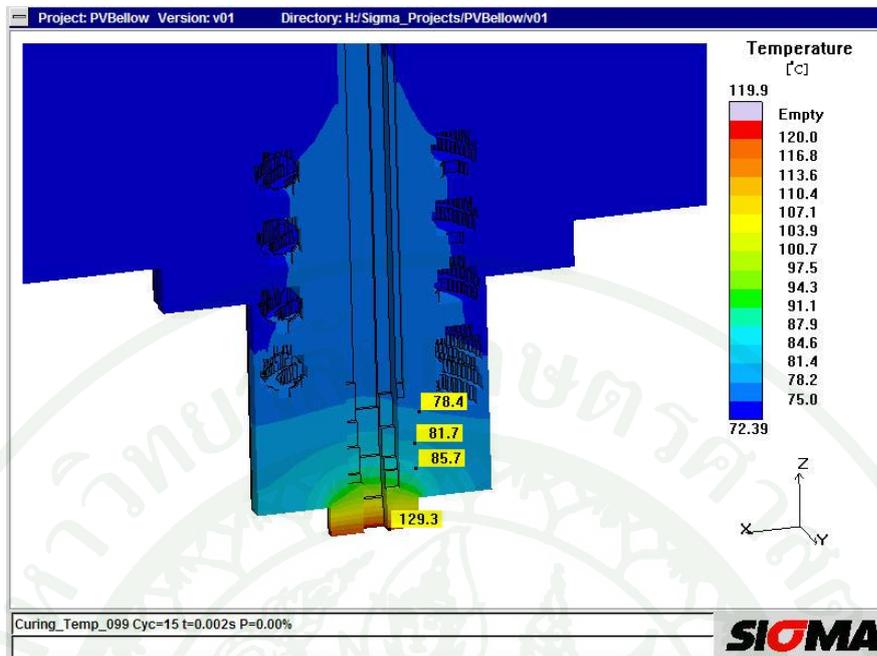
ภาพที่ 71 อุณหภูมิของยางขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 60 วินาที



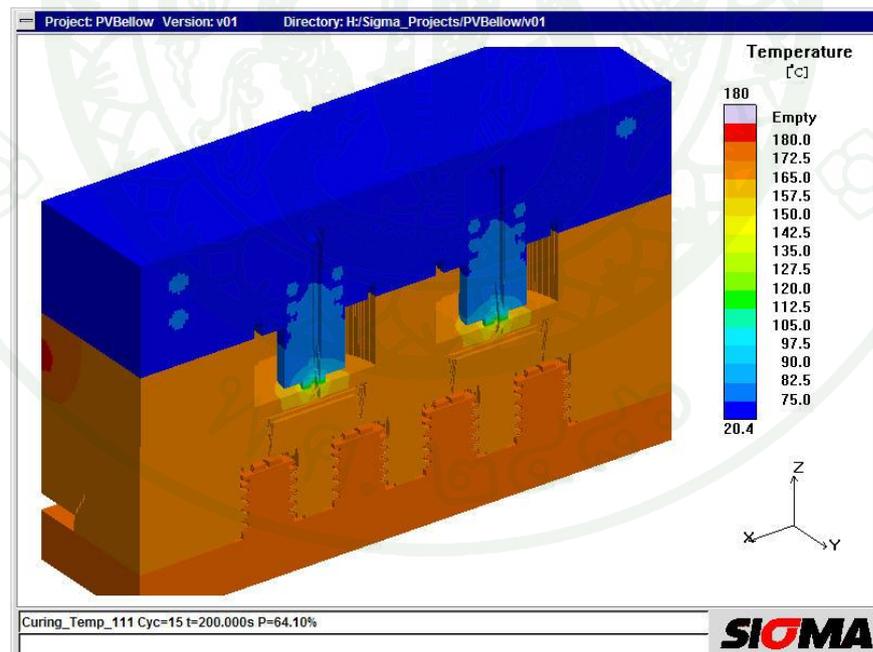
ภาพที่ 72 อุณหภูมิของยางขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 120 วินาที



ภาพที่ 73 อุณหภูมิของยางขณะกระบวนการคงรูปที่เวลา 200 วินาที



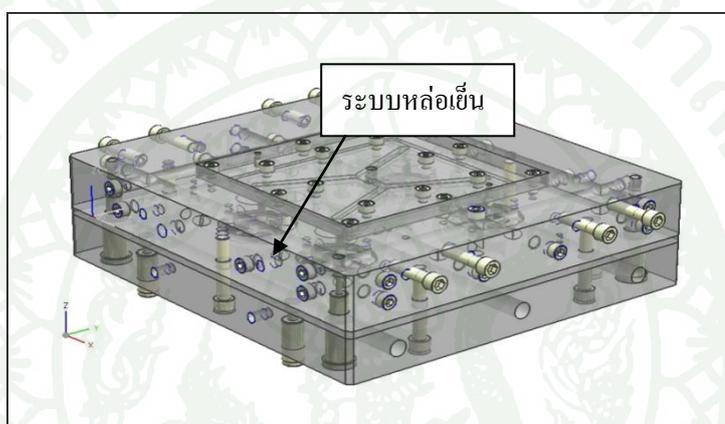
ภาพที่ 74 อุณหภูมิของหัวฉีดทางวงเวียน



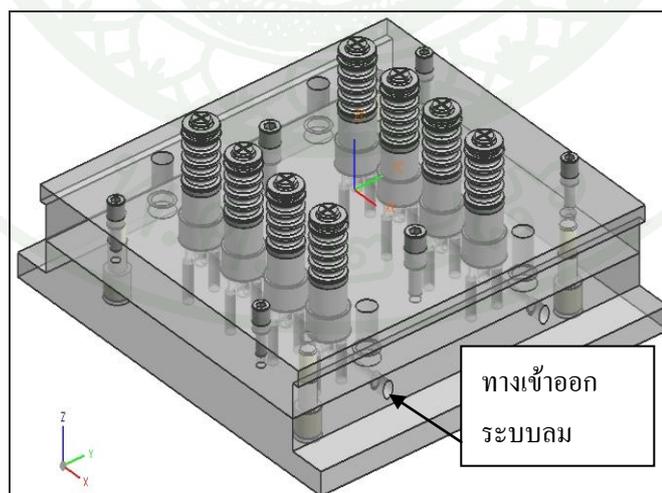
ภาพที่ 75 การกระจายของอุณหภูมิในแม่พิมพ์ขณะฉีด

การออกแบบแม่พิมพ์

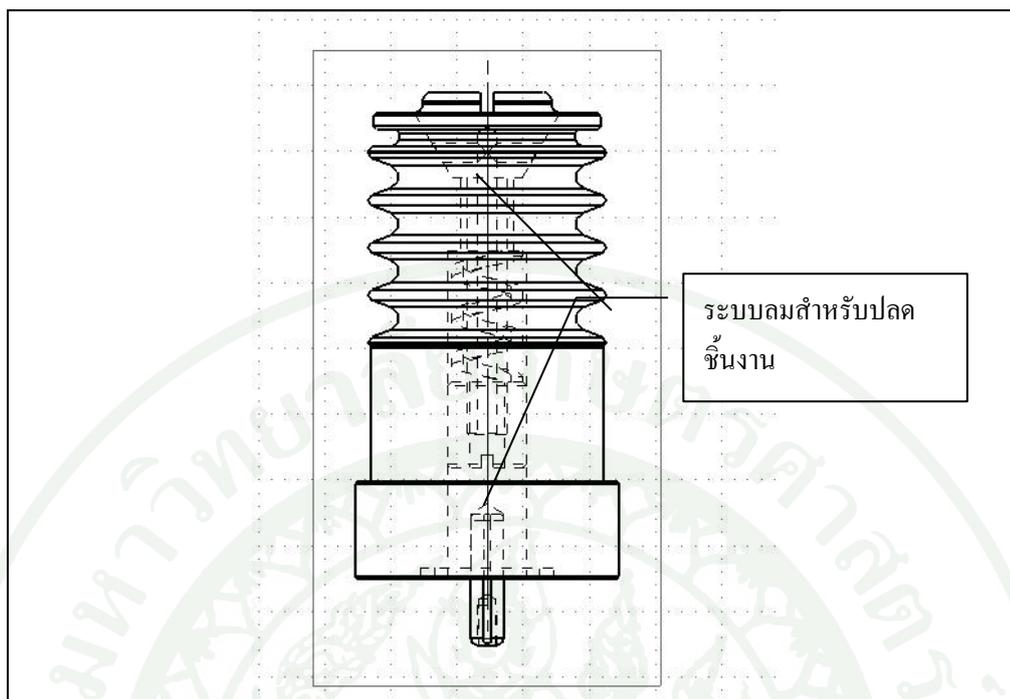
หลังจากการวิเคราะห์ผลการไหลของยางในแม่พิมพ์เพื่อดูผลกระทบด้านต่างๆ แล้ว จึงนำแบบร่างแม่พิมพ์ และผลการวิเคราะห์มาออกแบบแม่พิมพ์และส่วนประกอบต่างๆ สำหรับการผลิตแม่พิมพ์จริง ซึ่งในการออกแบบแม่พิมพ์จริงจะมีส่วนประกอบและระบบต่างๆ มากขึ้นและซับซ้อนขึ้นเพื่อให้สามารถนำไปผลิตชิ้นงานได้จริง นอกจากระบบทางวิ่งเย็น ดังภาพที่ 76 แล้วในแม่พิมพ์จริงจะมีระบบลมในแม่พิมพ์แผ่นคอร์เพื่อช่วยในการปลดชิ้นงาน ดังภาพที่ 77 และ 78



ภาพที่ 76 แบบ 3 มิติ ภายนอกของระบบทางวิ่งเย็น



ภาพที่ 77 แม่พิมพ์ส่วนคอร์ที่มีระบบลมในการปลดชิ้นงาน

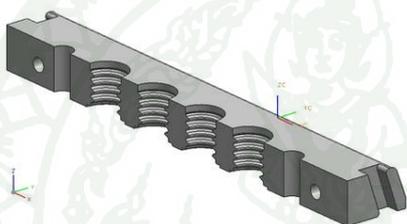
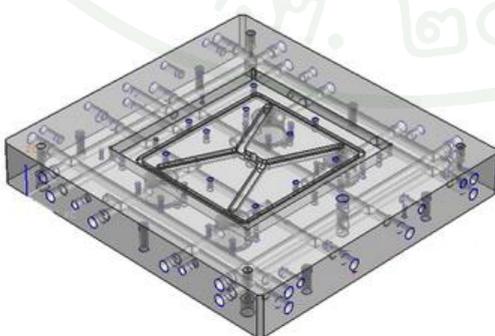


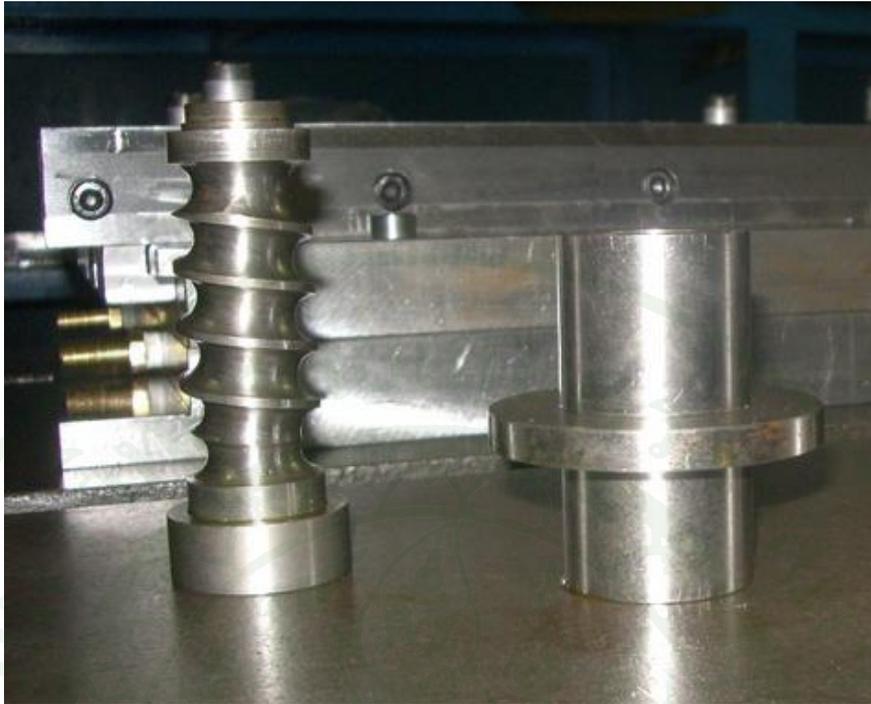
ภาพที่ 78 ระบบลมสำหรับปลดชิ้นงาน

การผลิตแม่พิมพ์

หลังจากได้แบบแม่พิมพ์สำหรับผลิตแล้ว ต่อไปจะเป็นขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ซึ่งในการผลิตแม่พิมพ์ก็จะมีกระบวนการแตกต่างกันไปในแต่ละชิ้นส่วน โดยส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 79 ถึง 82 และตารางที่ 2 ได้สรุปกระบวนการขึ้นรูปของชิ้นส่วนที่สำคัญของแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นกรณีศึกษา ดังนี้

ตารางที่ 2 กระบวนการขึ้นรูปชิ้นส่วนที่สำคัญของแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นกรณีศึกษา

ลำดับที่	รายการ	กระบวนการหลัก
1	 <p>Core Insert</p>	<ul style="list-style-type: none"> - การกลึง - การเจาะ
2	 <p>Slide</p>	<ul style="list-style-type: none"> - EDM - การเจาะ - การกัด
3	 <p>Cold Runner Nozzle Cooling</p>	<ul style="list-style-type: none"> - การกลึง - การเจาะ
4	 <p>Cold Runner Plate</p>	<ul style="list-style-type: none"> - การเจาะ - การกัด



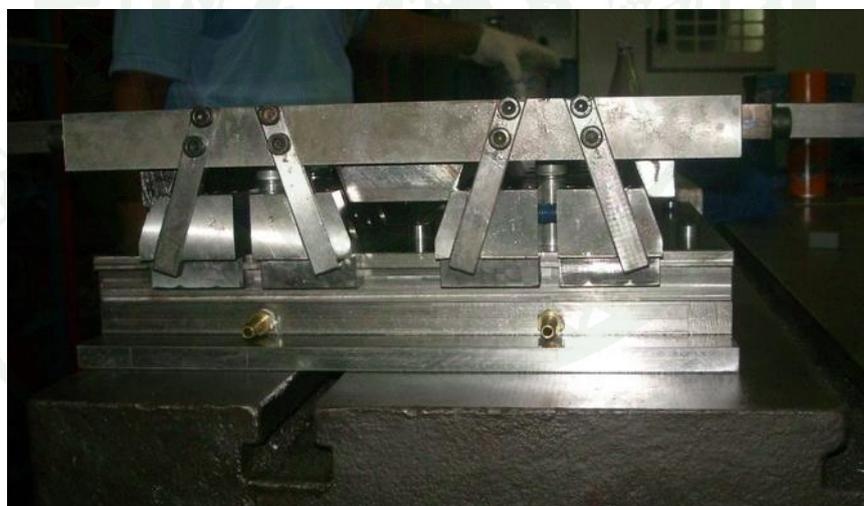
ภาพที่ 79 ส่วนหัวฉีดทางวิ่งเย็นและระบบหล่อเย็น



ภาพที่ 80 แม่พิมพ์ส่วนทางวิ่งเย็น



ภาพที่ 81 แม่พิมพ์ส่วนคอร์



ภาพที่ 82 การประกอบแม่พิมพ์ส่วนคอร์และคาร์วิตี

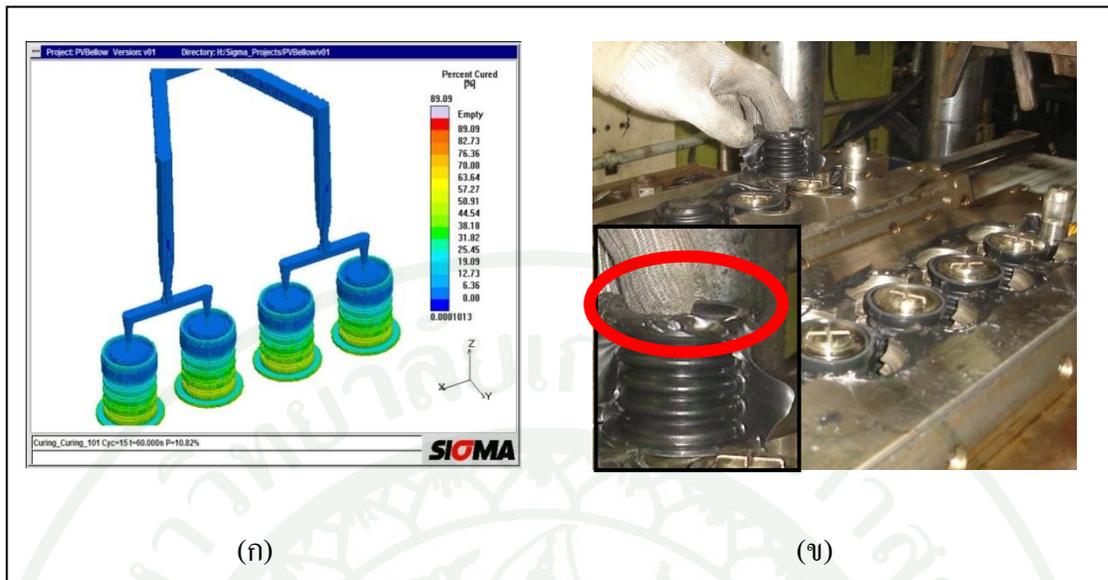
การทดสอบฉีดขึ้นงาน

ในการทดสอบฉีดขึ้นงานด้วยเครื่อง รุ่น KM 250 หลังจากที่ได้แม่พิมพ์ที่ผลิตเสร็จแล้ว มีการทดสอบแม่พิมพ์ที่ได้ทำการติดตั้งชุดควบคุมอุณหภูมิได้ผลดังต่อไปนี้

1. เมื่อกำหนดเงื่อนไขให้เวลาในการอบที่ 60 วินาที จะได้ผลดังตารางที่ 3 โดยจะสังเกตได้ว่าขึ้นงานยังมีการสุกตัวที่ไม่สมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 83

ตารางที่ 3 เงื่อนไขการอบที่ 60 วินาที

	ครั้งที่	1	2	3	เฉลี่ย
เวลาน็อค	จำลอง	150	150	150	150
	ค่าที่ตั้ง	150	150	150	150
	วัดจริง	145	153	151	150
เวลาอบ	จำลอง	60	60	60	60
	ค่าที่ตั้ง	60	60	60	60
	วัดจริง	65	62	63	63
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	จำลอง	75	75	75	75
	ค่าที่ตั้ง	75	75	75	75
	วัดจริง	79	80	81	80
อุณหภูมิแม่พิมพ์บน	จำลอง	180	180	180	180
	ค่าที่ตั้ง	74	74	74	74
	วัดจริง	140	141	140	140
อุณหภูมิแม่พิมพ์ล่าง	จำลอง	180	180	180	180
	ค่าที่ตั้ง	180	180	180	180
	วัดจริง	176	177	176	176

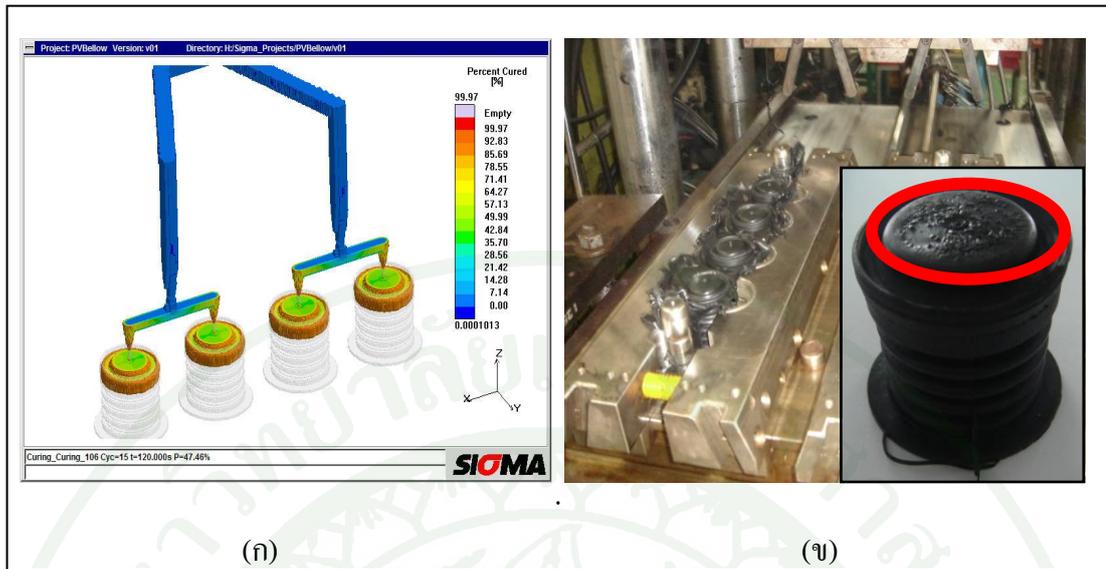


ภาพที่ 83 ชิ้นงานที่ได้จากเงื่อนไขการอบที่ 60 วินาที (ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จาก Software (ข) ผลที่ได้จากการทดลองฉีดชิ้นงานจริง

2. เมื่อกำหนดเงื่อนไขให้เวลาในการอบที่ 120 วินาที จะได้ผลดังตารางที่ 4 โดยจะสังเกตได้ว่าชิ้นงานยังมีการสุกตัวที่ไม่สมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 84

ตารางที่ 4 เงื่อนไขการอบที่ 120 วินาที

	ครั้งที่	1	2	3	เฉลี่ย
เวลานึ่ง	จำลอง	150	150	150	150
	ค่าที่ตั้ง	150	150	150	150
	วัดจริง	155	154	160	156
เวลาอบ	จำลอง	120	120	120	120
	ค่าที่ตั้ง	120	120	120	120
	วัดจริง	125	130	124	126
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	จำลอง	75	75	75	75
	ค่าที่ตั้ง	75	75	75	75
	วัดจริง	81	83	83	82
อุณหภูมิแม่พิมพ์บน	จำลอง	180	180	180	180
	ค่าที่ตั้ง	74	74	74	74
	วัดจริง	141	140	141	141
อุณหภูมิแม่พิมพ์ล่าง	จำลอง	180	180	180	180
	ค่าที่ตั้ง	180	180	180	180
	วัดจริง	177	176	177	177

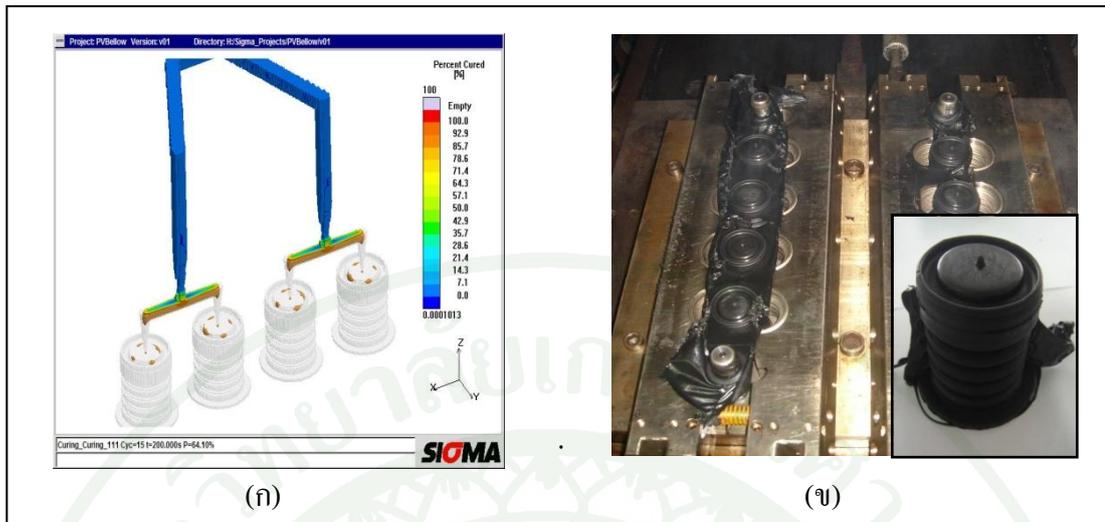


ภาพที่ 84 ชิ้นงานที่ได้จากเงื่อนไขการฉีดที่ 120 วินาที (ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จาก Software (ข) ผลที่ได้จากการทดลองฉีดชิ้นงานจริง

3. เมื่อกำหนดเงื่อนไขให้เวลาในการอบที่ 200 วินาที จะได้ผลดังตารางที่ 5 โดยจะสังเกตได้ว่าชิ้นงานยังมีการสุกตัวที่สมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 85

ตารางที่ 5 เงื่อนไขการอบที่ 200 วินาที

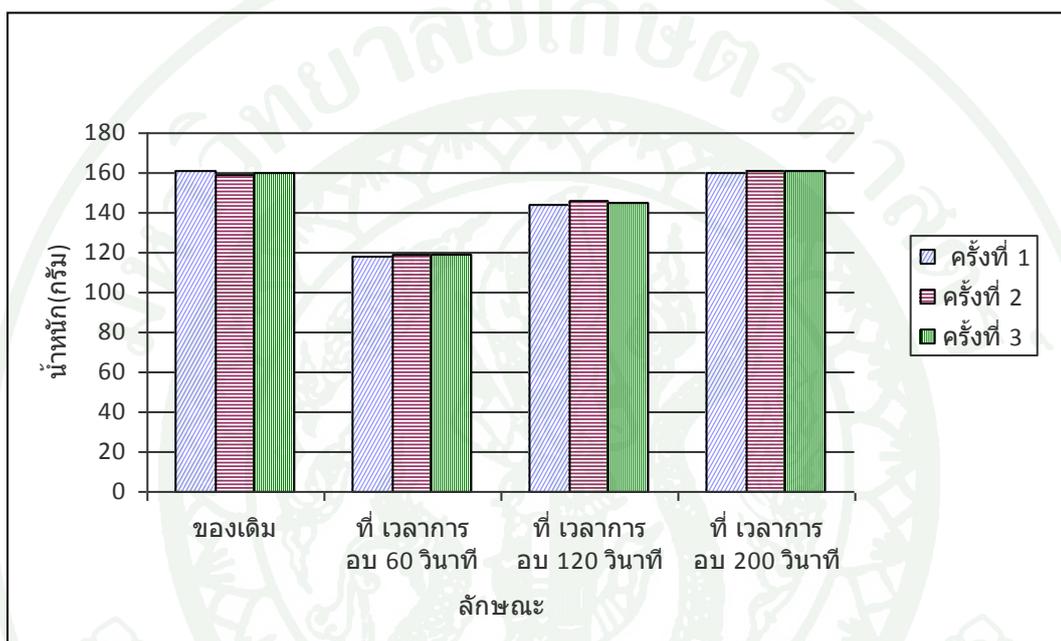
	ครั้งที่	1	2	3	เฉลี่ย
เวลานึ่ง	จำลอง	150	150	150	150
	ค่าที่ตั้ง	150	150	150	150
	วัดจริง	145	155	154	151
เวลาอบ	จำลอง	200	200	200	200
	ค่าที่ตั้ง	200	200	200	200
	วัดจริง	207	205	210	207
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น	จำลอง	75	75	75	75
	ค่าที่ตั้ง	75	75	75	75
	วัดจริง	85	85	86	85
อุณหภูมิแม่พิมพ์บน	จำลอง	180	180	180	180
	ค่าที่ตั้ง	74	74	74	74
	วัดจริง	142	141	141	141
อุณหภูมิแม่พิมพ์ล่าง	จำลอง	180	180	180	180
	ค่าที่ตั้ง	180	180	180	180
	วัดจริง	177	178	177	177



ภาพที่ 85 ชิ้นงานที่ได้จากเงื่อนไขการอบที่ 200 วินาที (ก) ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จาก Software (ข) ผลที่ได้จากการทดลองฉีดชิ้นงานจริง

4. น้ำหนักของชิ้นงาน

ในการทดสอบนี้พบว่าน้ำหนักของชิ้นงานมีความสัมพันธ์กับเวลาในการอบ เมื่อเทียบเวลาในการอบพบว่าเมื่อเวลาการอบที่ 200 วินาที จะได้น้ำหนักของชิ้นงานใกล้เคียงกับชิ้นงานเดิม ดังแสดงในภาพที่ 86



ภาพที่ 86 กราฟน้ำหนักของชิ้นงาน

ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น

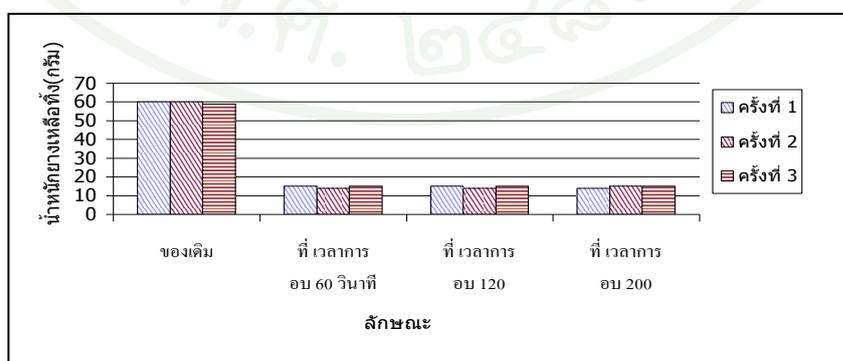
ในการทดสอบนี้คยงแต่ละครั้งจะเกิดของเสียขึ้นในระบบ มีทั้งของเสียในระบบทางวิ่ง และของเสียอื่นๆ เมื่อทำการเทียบกันระหว่างก่อนการใช้ระบบทางวิ่งเย็นและหลังการใช้ระบบทางวิ่งเย็น ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยก่อนใช้ระบบทางวิ่งเย็นจะเกิดของเสียที่ระบบทางวิ่ง และหลังใช้ระบบทางวิ่งเย็นจะเกิดของเสียที่ระบบทางวิ่ง ดังภาพที่ 87 และกราฟแสดงภาพที่ 88

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบปริมาณของเสีย

	ของเสียที่ระบบทางวิ่ง (กรัม)	ของเสียอื่นๆ (กรัม)
ก่อนใช้ระบบทางวิ่งเย็น	60	10
หลังใช้ระบบทางวิ่งเย็น	15	3



ภาพที่ 87 ของเสียที่ระบบทางวิ่ง (ก) ก่อนใช้ระบบทางวิ่งเย็น (ข) หลังใช้ระบบทางวิ่งเย็น



ภาพที่ 88 กราฟนำหนักของยางเหลือทิ้ง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นสำหรับแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้ในงานท่อภายในถังซักผ้า (P.V. Bellow) เป็นกรณีศึกษา โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบระบบน้ำหล่อเย็นของระบบทางวิ่งเย็น โดยทำการหาขนาดของรูนํ้าหล่อเย็นได้เท่ากับ 8 12 และ 16 มิลลิเมตรตามลำดับ จากนั้นจึงใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (CAE) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การไหลและอุณหภูมิของยางและแม่พิมพ์ขณะฉีด

จากผลการวิเคราะห์โดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม แสดงให้เห็นว่าระบบน้ำหล่อเย็นสามารถควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์และยางให้ต่ำประมาณ 75 องศาเซลเซียส จนยางไม่เกิดการคงรูปก่อนเสร็จสิ้นรอบการฉีด ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคงรูปคือ 200 วินาที ในส่วนของชนิดของยางที่ใช้ในการวิเคราะห์ คือ ยาง EPDM โดยทำการรักษาอุณหภูมิของยางไม่ให้เกิดการคงรูปในทางวิ่งเย็นก่อนเสร็จสิ้นกระบวนการฉีด นอกจากนั้นผลของการไหลยังแสดงให้เห็นว่ายางไหลเข้าเต็มแต่ละเบ้าพร้อมกัน ซึ่งสามารถลดการเกิดปัญหาที่มีครีบ และฉีดไม่เต็มลงได้อีกด้วย หลังจากนั้นจึงนำแบบชิ้นงานไปทำการผลิตแม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์ชิ้นงานกรณีศึกษาจะมีส่วนประกอบสำคัญ เช่น หัวฉีดทางวิ่งเย็น ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบสไลด์ และระบบปลดชิ้นงานด้วยลม เป็นต้น โดยการขึ้นรูปแม่พิมพ์ก็จะมีกระบวนการแตกต่างกันไปตามลักษณะชิ้นงาน เช่น ส่วนสไลด์ขึ้นรูปด้วยการอีดีเอ็ม (EDM) เป็นต้น หลังจากขึ้นรูปชิ้นส่วนแต่ละชิ้นเรียบร้อยแล้ว จึงนำแต่ละชิ้นส่วนมาปรับแต่งและประกอบเป็นแม่พิมพ์ จากนั้นจึงทำการส่งไปให้ทางโรงงานทดสอบฉีดหลังจากทำการฉีดพบว่าระบบน้ำหล่อเย็นสามารถควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์และยางให้ต่ำประมาณ 75 องศาเซลเซียส จนยางไม่เกิดการคงรูปก่อนเสร็จสิ้นรอบการฉีด ซึ่งเวลาที่ใช้ในการคงรูปคือ 200 วินาที ทำให้ชิ้นงานสมบูรณ์ และระบบทางวิ่งเย็นสามารถช่วยลดปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นได้ 75 เปอร์เซ็นต์จากปริมาณของเสียเดิม สามารถเพิ่มรายได้ 1.125 บาทต่อชิ้น

ดังนั้นจากโครงการการออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ฉีดยางระบบทางวิ่งเย็นมาตรฐานที่นำเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การไหลของยาง และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นสามารถช่วยให้การออกแบบระบบน้ำหล่อเย็นมีประสิทธิภาพมากขึ้น และลดปัญหาจากการออกแบบแม่พิมพ์ระบบทางวิ่งเย็นลงได้

ข้อเสนอแนะ

ควรมีการพัฒนาใช้วิธีการหล่อเย็นบริเวณหัวฉีดทางวิ่งเย็นให้มีการผลิตที่ง่ายและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจะสามารถลดข้อจำกัดในเรื่องของขนาด และความซับซ้อนของชิ้นส่วนดังกล่าวลงได้



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ดำรง ไชยธีรานุกูลศิริ. 2540. การออกแบบแม่พิมพ์พลาสติก. ซีเอ็ดยุคเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- มนัส สติรจินดา. 2536. โลหะนอกกลุ่มเหล็ก. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- American Society for Testing and Materials. 1990. **Standard Terminology Relating to Rubber.** ASTM 1566.
- Ciesielski, A. 1999. **An Introduction to Rubber Technology.** Rapra Technology Limited, United Kingdom.
- Chia, Shui and Fun. 2006. Mold temperature control of a rubber injection-molding machine by TSK-type recurrent neural fuzzy network. **Neurocomputing** 70: 559-567
- Chiaming Yen, J.C. Lin, Wujeng Li, M.F. Huang. 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: 23-28.
- Fazekas, T.W. 1975. **Cold Transfer Molding Apparatus,** U.S. Patent 3,876,356.
- Gent, A.N. 2001. **Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components.** 2nd ed. Hanser Publishers, Munich.
- Georges M. Fadel. 2001. Bi-Objective Optimization Design of Heterogeneous Injection Mold cooling Systems. **Journal of Mechanical Design** 123: 226-239
- Hawthorne Rubber Mfg. Corp. 2004. **Information about Compression, Transfer, and Injection Moulding.** Hawthorne Rubber Manufacturing Corporation. Available Source: <http://www.hawthornerubber.com/index.html>, November 30, 2005.

- K.Porfyraakis, H.E. Assender, I.M. Robinson. 2002. The interrelationship between processing conditions, microstructure and mechanical properties for injection moulded rubber-toughened poly(methyl methacrylate) (RTPMMA) Samples. **Polymer** 43: 4769-4781.
- Kring, R.R. 2001. **Rubber Mold Cold Runner System**, U.S. Patent 6,179,603 B1.
- Kwon. 1988. Mold Cooling System Design Using Boundary Element Method. **Journal of Engineering for Industry** 110: 384-394
- L.S. Turng, K.K. Wang. 1990. A Computer-Aided Cooling-Line Design System for Injection Molds. **Journal of Engineering for Industry** 112: 161-167
- Li. C.L. 2001. A feature-based approach to injection mould cooling system design. **Computer-Aided Design** 33: 1073-1091
- Matsumoto, Y. and Y. Tsujimoto. 2003. **Nozzle Mechanism for Cold Runner Device in Injection Mold Arrangement**, U.S. Patent 20040161488.
- Menges, G. and P. Mohren. 1993. **How to Make Injection Molds**. Hanser, New York, USA.
- Nissei America inc. 2005. **Rubber Injection Molding Machine**. Available Source: <http://www.nisseiamerica.com>, November 30, 2005.
- Rees, H. 2002. **Mold Engineering**, 2nd ed. Hanser Publishers, Munich.
- Sanjo Seiki co. 1997. **Injection Machine**. Available Source: <http://www.sanjo.co.jp>, November 30, 2005.
- Sommer, J.G. 2003. **Elastomer Molding Technology**. Elastech Hudson. Ohio, USA.

Smith A.G., Wrobel L.C., McCalla B.A., Allan P.S. and Hornsby P.R.. 2008. A computational model for the cooling phase of injection moulding. **Journal of Materials Processing Technology** 195: 305-313.

Straton Industries co. n.d. **Rubber Mold Design & Construction and Composite Mould.** Rubber Mould Design & Construction. Available Source: <http://www.straton.com/rubber.htm>, November 30, 2005.

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

Hamdy Hassan, Nicolas Regnier, Cedric Le Bot, Guy Defaye. 2010. 3D study of cooling system effect on the heat transfer during polymer injection molding. **International Journal of Thermal Sciences** 49: 161-169.

Zone-Ching Lin and Ming-Ho Chou. 2002. Design of the Cooling Channels in Nonrectangular Plastic Flat Injection Mold. **Journal of Manufacturing Systems** 21: 167-186.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายพงศัวิชญ์ สกกุลเพชรอร่าม
เกิดวันที่	16 มีนาคม 2528
สถานที่เกิด	อำเภอพระพุทธบาท จังหวัดสระบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุนสกว. – อุตสาหกรรม (MRG-WI515E023)