



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการ

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม

ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

**(An Application of Computer Aided Engineering, CAE, in  
Rubber Injection Mould Design)**

โดย

ผศ. ดร. สุภสิทธิ์ รอดขวัญ และคณะ

พฤษภาคม 2549

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม  
ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- |                             |               |
|-----------------------------|---------------|
| 1. ผศ.ดร. สุภสิทธิ์ รอดขวัญ | ม.เกษตรศาสตร์ |
| 2. ดร. ชนะ รักษ์ศิริ        | ม.เกษตรศาสตร์ |
| 3. นาย รุ่งธรรม ปัญญาวิภาต  | ม.เกษตรศาสตร์ |

ชุดโครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)  
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	i
สารบัญตาราง	iv
สารบัญรูปภาพ	v
หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)	xii
1. บทคัดย่อ	1
2. บทนำ	2
2.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	2
2.2 วัตถุประสงค์	3
2.3 เป้าหมาย	3
2.4 สมมติฐานและขอบเขตของการวิจัย	3
2.5 นิยามคำศัพท์	5
2.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	8
2.7 ผลกระทบที่จะเกิดกับอุตสาหกรรมแม่พิมพ์	9
3. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเอกสารที่เกี่ยวข้อง	10
3.1 ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
3.2 แนวคิดในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการฉีดยางขึ้นรูป	14
3.3 วิธีการเชิงตัวเลขและการนำไปใช้ในปรากฏการณ์การฉีด	16
3.4 คุณสมบัติพื้นฐานของยาง	31
3.5 รีโอโลยีของยาง	34
3.6 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์	43
3.7 การออกแบบแม่พิมพ์	49
3.8 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปและการออกแบบแม่พิมพ์	75

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>4. วิธีการดำเนินการวิจัยและเครื่องมือที่ใช้</b>	<b>92</b>
4.1 การออกแบบวิธีการวิจัย	92
4.2 รายละเอียดวิธีการวิจัย	96
4.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้	97
4.4 ตัวอย่าง ตัวแปรและการควบคุม	111
<b>5. การวิเคราะห์และการอภิปรายผล</b>	<b>113</b>
5.1 การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA	113
5.2 การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	121
5.3 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม และการทดลองฉีดจริง	123
5.4 ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA	126
<b>6. สรุปผลการวิจัย</b>	<b>163</b>
6.1 คุณสมบัติของสโไลด์และแม่พิมพ์ที่เวลาต่างๆ	164
6.2 การสุกตัวของชิ้นงาน	165
6.3 โลหะที่เลือกใช้ในการสร้างแม่พิมพ์	165
6.4 ตัวแปรที่ทำการควบคุมในการฉีด	165
6.5 การใช้งานโปรแกรม 3D-SIGMA	166
<b>7. ข้อเสนอแนะ</b>	<b>169</b>
7.1 ข้อเสนอแนะจากทางโรงงาน	169
7.2 ข้อเสนอแนะจากทางคณะผู้วิจัย	169
<b>8. การเผยแพร่ผลงานโครงการวิจัย</b>	<b>169</b>

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการ มาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ	171
ภาคผนวก ข แบบแม่พิมพ์จัดขึ้นรูปที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	175
ภาคผนวก ค ปัญหาและแนวทางแก้ไขของความล่าช้าในการดำเนินงาน	198
ภาคผนวก ง ข้อมูลปัญหาของที่วางเท้ารถจักรยานยนต์ที่ได้รับแจ้งจากทางโรงงาน	202
ภาคผนวก จ ผลการตรวจสอบขนาดชิ้นงาน	205
ภาคผนวก ฉ บทความสำหรับการเผยแพร่งานวิจัย	208
เอกสารอ้างอิง	

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันในสมการการส่งถ่าย	26
2	ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์แบบอัด	45
3	ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด	46
4	แสดงถึงผลกระทบของความลึกของรูเข้าที่ความลึกต่างๆ	67
5	แสดงถึงผลกระทบของขนาดที่เปลี่ยนแปลงของขนาดหัวฉีด	67
6	ผลกระทบของอุณหภูมิของกระบอกฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มเนื้อยาง ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีดกับอุณหภูมิ	80
7	ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีด	84
8	แผนงานดำเนินงานโครงการวิจัย (ปรับปรุง/เพิ่มเติมจากฉบับข้อเสนอโครงการวิจัย	88
9	ม.ย. 2548)	96
10	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลของยาง แรงดันฉีด และเวลาฉีด	123
 ตารางภาคผนวกที่		
ก-1	ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์และผลที่ได้รับ	172
ก-2	ตารางเปรียบเทียบแผนงานและผลงานของโครงการวิจัย	173
ค-1	ปัญหาและแนวทางแก้ไขของความล่าช้าในการดำเนินงาน	199
ง-1	ปัญหาของเสียจากการฉีดขึ้นงานยางวางเท้ารถจักรยานยนต์	203
จ-1	ตารางเปรียบเทียบขนาดของชิ้นงานของโครงการวิจัยและชิ้นงานของโรงงาน	206

## สารบัญรูปภาพ

รูปที่		หน้า
1	แสดงถึงการไหลเข้าและออกของมวลที่กระทำกับเอลิเมนต์ของไหล	17
2	แสดงองค์ประกอบของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของอนุภาคของไหล	18
3	แสดงถึงองค์ประกอบของความเค้นในแนวแกน x	19
4	แสดงเวกเตอร์การไหลของความร้อน	23
5	a) การสร้างกริดแบบพิกัด (Cartesian Grid)	27
	b) การสร้างกริดแบบเข้ารูป (Body-Fitted Grid)	27
6	แสดงการเก็บค่าของตัวแปร	28
7	แสดงรูปแบบเฉพาะของเอลิเมนต์ในวิธีปริมาตรจำกัด	28
8	แสดงถึงความแตกต่างกันของอุณหภูมิของแม่พิมพ์กับเนื้อยาง	31
9	การทดสอบหาค่าความหนืดในรูปแบบต่างๆ	35
10	แสดงส่วนประกอบต่างๆและการทำงานของเครื่องคาปิลารีวิสโคมิเตอร์	35
11	แสดงการทดสอบค่าความหนืดของเนื้อยางที่มีความหนืดสูงที่อัตราเฉือนต่างๆในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ	36
12	แสดงการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนและอัตราเฉือนของไหลแบบนิวโตเนียนและแบบนอนนิวโตเนียน	36
13	แสดงถึงอัตราเฉือนโดยจะขึ้นอยู่กับความเร็วและความหนา	37
14	แรงดึงยางขนาดของยางชนิดต่างๆ ในสภาพอุณหภูมิต่างๆ	40
15	แสดงลักษณะที่เกิดขึ้นของเนื้อยางเมื่อผ่านการอบ (Vulcanization)	42
16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาในการฉีด	43
17	ส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์แบบอัดขึ้นรูป	44
18	ตัวอย่างแม่พิมพ์แบบอัดขึ้นรูป	44
19	ส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์แบบอัดส่ง	45
20	แสดงการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดส่ง (Transfer Moulding)	45
21	ส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์แบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง และแนวนอน	47
22	แสดงการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการฉีด (Injection Moulding)	47
23	เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง (Vertical Injection Machine) และแบบแนวนอน (Horizontal Injection Machine)	48
24	แสดงถึงเส้นความสัมพันธ์ของความเค้น - ความเครียด	53
25	แสดงการจัดวางเข้าชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์ฉีด	56

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
26	แสดงถึงระบบการไหลของแม่พิมพ์แบบฉีด	60
27	ภาพหน้าตัดของทางวิ่ง 'a' รูปครึ่งวงกลม, 'b', วงกลม 'c' ครึ่งทรงกลมที่มีการขยาย แนวยาว และ 'd' รูปทรงสี่เหลี่ยม	61
28	แม่พิมพ์ฉีดเป็นแบบสองชั้น	63
29	แม่พิมพ์ฉีดเป็นแบบสามชั้น	63
30	การทำงานของแม่พิมพ์ฉีดเมื่อมีการแยกส่วน	64
31	ชนิดของช่องทางไหลและรูเข้าในรูปแบบต่างๆ	66
32	ทางไหลเข้าแบบพัดที่มีความลึก 0.254 มม. (0.01 นิ้ว) และทำการเปลี่ยนแปลงความ ลึกที่ขนาด 0.508 มม. (0.02 นิ้ว), 0.762 มม. (0.03 นิ้ว), 1.016 มม. (0.04 นิ้ว)	67
33	ขั้นตอนของการไหลของเนื้อยางที่เข้าไปภายในแม่พิมพ์ฉีด	68
34	หน้าตัดของแม่พิมพ์ฉีดของยางเครื่องสูบลมซึ่งแสดงตำแหน่งช่องทางเข้า	68
35	แกนแบบแท่งในแม่พิมพ์ของยางเครื่องสูบลม	70
36	ทางเข้าของเนื้อยางในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของยางปิดผนึกด้านข้าง	71
37	ทางวิ่งและรูเข้าและตัวรูปทรงขึ้นงานภายในแม่พิมพ์	71
38	รูเข้าแบบเอียงทำมุมเข้าด้านล่าง (Submarine Gate)	72
39	แสดงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการฉีดยางในขั้นตอนต่างๆ	75
40	การเพิ่มขึ้นของความเร็วของตัวสกรูในเครื่อง Peco ที่มีผลต่ออุณหภูมิในการฉีดและ เวลาในการบ่มตัวของเนื้อยางในตำแหน่งต่างๆ	76
41	ค่าความจุของเนื้อยางตามปกติโดยตั้งค่าความเร็วของสกรูและความดันกลับของสกรู โดยใช้การจ่ายแบบเต็ม	77
42	ผลของอุณหภูมิกับความเร็วของสกรูที่มีผลกระทบต่อการฉีดเนื้อยาง	78
43	อุณหภูมิในการฉีดที่สูงขึ้นโดยทำให้ความร้อนของกระบอกสูบสูงขึ้น	79
44	การสูงขึ้นของอุณหภูมิของกระบอกฉีดโดยเพิ่มข้อกำหนดโดยเพิ่มอุณหภูมิในการ ฉีดและลดเวลาในการฉีดกับเวลาในการบ่ม	80
45	แสดงถึงการควบคุมเครื่อง Peco โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการฉีด	81
46	แสดงแรงดันกลับของสกรูของเครื่อง Ankerwerk ที่มีผลกับอุณหภูมิของเนื้อยาง	82
47	ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น	83
48	ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการฉีด	84
49	ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีผลต่อเวลาในการฉีดโดยการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิกระบอกฉีดและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด	85



## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
50	ผลกระทบของความดันในการฉีดต่อเวลาในการฉีดของเนื้อยางชนิดต่างๆ	86
51	ผลกระทบของความดันในการฉีดต่ออุณหภูมิในการฉีดของเนื้อยางชนิดต่างๆ	86
52	ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่ออุณหภูมิและเวลาในการฉีด	87
53	ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีด	88
54	อุณหภูมิในการฉีดสำหรับยาง Butyl กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่ความดันคงที่	89
55	ปริมาตรในการฉีดเนื้อยางกับอุณหภูมิในการฉีดที่หัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ	89
56	ผลกระทบของความเร็วในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มเนื้อยาง	90
57	ชิ้นงานที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	92
58	แบบชิ้นงานที่สร้างด้วยโปรแกรม CAD	92
59	แม่พิมพ์ของทางบริษัทร่วมวิจัย	93
60	แบบชิ้นงาน ทางวิ่ง และรูเข้าที่สร้างด้วยโปรแกรม CAD	93
61	แสดงลำดับการดำเนินการวิจัย	95
62	แสดงถึงขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม 3D-SIGMA	99
63	แสดงถึงขั้นตอนการทำงานโปรแกรม 3D-SIGMA ก่อนทำการจำลองการไหล	100
64	ยางรองเท้าจักรยานยนต์ที่ใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบเขียนขึ้น	101
65	แสดงหน้าต่างของขั้นตอน Preprocessor	101
66	แสดงการกำหนดค่าความหนาของชิ้นงานให้เหมาะสม (Wall Thickness)	102
67	แสดงถึงการเลือกของชนิดของยางที่จะทำการจำลองการไหล	103
68	แสดงค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการฉีด (Initial Temperature)	104
69	แสดงค่าของ Heat Conductivity (Lambda) ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ (W/mK)	104
70	แสดงค่าของ Density (Rho) as Function of Temperature ( $\text{g/cm}^3$ , $^{\circ}\text{C}$ )	105
71	แสดงค่าของ Heat Capacity (Cp) as Function of Temperature ( $\text{J/kg K}$ , $^{\circ}\text{C}$ )	105
72	แสดงค่าของ Density (Rho) x Heat Capacity (Cp) as Function of Temperature	106
73	แสดงค่าของ Dynamic Viscosity at 100.00 $^{\circ}\text{C}$ : Viscosity as Function of Shear Rate	106
74	แสดงค่าของ Dynamic Viscosity: Viscosity as Function of Shear Rate	107
75	แสดงค่าของ Measured Curing Rate at 150.00 $^{\circ}\text{C}$ : Curing Rate as Function of Time	107
76	แสดงค่าของ Weighting Factor	108
77	แสดงค่าของ Incubation Time (Scorch-Index) (min, K) และค่าของ Reaction-Kinetics (Deng-Isayev) ( $1/\text{min}$ , $\text{J/mol}$ )	108

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
78	แสดงค่าของ Curing Rate: Curing Rate as Function of Time	108
79	แสดงกำหนดค่าของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์ และต้องกำหนดค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นของทั้งชิ้นงานและของแม่พิมพ์	109
80	แสดงการกำหนดค่าของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ หรือแม่พิมพ์ตัวที่คงที่กับแม่พิมพ์ตัวที่เคลื่อนที่	109
81	แสดงการกำหนดรอบการทำงานที่ต้องการจำลองการไหล	110
82	เครื่องฉีดยางแนวตั้ง ขนาด 100 ตัน	111
83	ชิ้นงานที่ได้จากการฉีด	111
84	แสดงตัวแปรที่ควบคุม	112
85	แสดงการตั้งค่าอุณหภูมิของส่วนต่างๆ	112
86	แสดงการกำหนดเอลิเมนต์	113
87	แสดงลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์ของชิ้นงาน	114
88	แสดงการกำหนดค่าทั่วไปของยาง	114
89	แสดงการกำหนดค่า Heat Conductivity (Lambda)	115
90	แสดงการกำหนดค่า Density (Rho)	115
91	แสดงการกำหนดค่า Heat Capacity (Cp)	116
92	แสดงการกำหนดค่า Dynamic Viscosity	116
93	แสดงการกำหนดค่า Curing Rate	117
94	แสดงการกำหนดค่าการถ่ายเทความร้อนของแต่ละส่วน	118
95	แสดงหน้าต่างการกำหนดค่าการฉีด	119
96	แสดงการกำหนดค่าการฉีดที่ควบคุมด้วยอัตราฉีด	119
97	แสดงการกำหนดค่าการเก็บผลการวิเคราะห์	120
98	หน้าต่างแสดงสถานะขณะทำการวิเคราะห์	120
99	ลักษณะรูเข้า	121
100	ส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ที่วางแท็กรถจักรยานยนต์	121
101	แผ่นแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ (Core Plate)	122
102	แผ่นแม่พิมพ์ส่วนตัวเมีย (Cavity Plate)	122
103	แสดงกราฟแรงดันฉีดที่ได้จากโปรแกรม 3D-SIGMA	125
104	หน้าต่างแสดงผลของโปรแกรม 3D-SIGMA	126
105	แสดงผลของระยะเวลาที่สัมผัสอากาศ (Air Contact)	128

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
106	แสดงผลของระยะเวลาฉีดในแต่ละส่วนของชิ้นงาน	129
107	แสดงผลความยาวของเส้นทางการไหลของยาง	130
108	แสดงอายุของยางในแต่ละส่วนของชิ้นงาน	131
109	แสดงผลของเวลาที่ยางสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ (Wall Contact)	133
110	แสดงรอยต่อของเนื้อยางที่อาจจะเกิดขึ้น (Weldline)	134
111	แสดงผลการไหลของอนุภาค (Tracers) ของยาง	135
112	แสดงอุณหภูมิของยางขณะฉีด ที่ 25% ของการฉีด	136
113	แสดงอุณหภูมิของยางขณะฉีด ที่ 50% ของการฉีด	137
114	แสดงอุณหภูมิของยางขณะฉีด ที่ 75% ของการฉีด	137
115	แสดงอุณหภูมิของยางขณะฉีด ที่ 100% ของการฉีด	138
116	แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลาเริ่มต้น (0 วินาที)	139
117	แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลา 60 วินาที	139
118	แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลา 120 วินาที	140
119	แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลา 180 วินาที	140
120	แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลา 240 วินาที	141
121	แสดงอุณหภูมิของชิ้นงานขณะอบบ่มที่เวลา 300 วินาที	141
122	แสดงอุณหภูมิของสไลด์ของ 1 รอบการฉีด	143
123	แสดงอุณหภูมิของแม่พิมพ์ขณะอบยาง โดยแสดงทุกๆ 1 นาที	145
124	แสดงผลของแรงดันฉีดที่ 25% ของการฉีด	146
125	แสดงผลของแรงดันฉีดที่ 50% ของการฉีด	147
126	แสดงผลของแรงดันฉีดที่ 75% ของการฉีด	147
127	แสดงผลของแรงดันฉีดที่ 100% ของการฉีด	148
128	แสดงผลของความเร็วฉีดที่ 25% ของการฉีด	149
129	แสดงผลของความเร็วฉีดที่ 50% ของการฉีด	149
130	แสดงผลของความเร็วฉีดที่ 75% ของการฉีด	150
131	แสดงผลของความเร็วฉีดที่ 100% ของการฉีด	150
132	แสดงเส้นทางการไหลของยางขณะฉีด	151
133	แสดงผลของอัตราความเค้นเนื้อที่ 25% ของการฉีด	152
134	แสดงผลของอัตราความเค้นเนื้อที่ 50% ของการฉีด	153
135	แสดงผลของอัตราความเค้นเนื้อที่ 75% ของการฉีด	153

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
136	แสดงผลของอัตราความเค้นเฉือนที่ 100% ของการฉีด	154
137	แสดงผลของเนื้อเยื่อที่จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาหลังจากฉีดเต็ม	155
138	แสดงบริเวณที่เนื้อเยื่อจะเริ่มปฏิกิริยาก่อน	155
139	แสดงบริเวณที่เนื้อเยื่อจะเริ่มปฏิกิริยาก่อน โดยแสดงเป็นลักษณะแบบเอลิเมนต์	156
140	แสดงบริเวณที่เนื้อเยื่อจะเริ่มปฏิกิริยาก่อน เนื่องจากการแบ่งเอลิเมนต์	156
141	แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อเยื่อภายในชิ้นงาน ที่เวลาเริ่มต้น	157
142	แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อเยื่อภายในชิ้นงาน ที่เวลา 60 วินาที	158
143	แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อเยื่อภายในชิ้นงาน ที่เวลา 120 วินาที	158
144	แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อเยื่อภายในชิ้นงาน ที่เวลา 180 วินาที	159
145	แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อเยื่อภายในชิ้นงาน ที่เวลา 240 วินาที	159
146	แสดงเปอร์เซ็นต์การสุกของเนื้อเยื่อภายในชิ้นงาน ที่เวลา 300 วินาที	160
147	แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 60 วินาที	161
148	แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 120 วินาที	161
149	แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 180 วินาที	162
150	แสดงบริเวณที่ยางสุกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 240 วินาที	162
151	ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดยาง	165
152	ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง	165
<b>รูปภาคผนวกที่</b>		
ข-1	แสดงส่วนประกอบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์	176
ข-2	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์	177
ข-3	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์	178
ข-4	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์	179
ข-5	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์	180
ข-6	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์	181
ข-7	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์	182
ข-8	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์	183
ข-9	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์	184
ข-10	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์	185
ข-11	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางแท่งจักรยานยนต์	186

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาคผนวกที่	หน้า
ข-12	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์187
ข-13	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์188
ข-14	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์189
ข-15	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์190
ข-16	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์191
ข-17	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์192
ข-18	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์193
ข-19	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์194
ข-20	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์195
ข-21	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์196
ข-22	แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์197
ค-1	แผนภูมิ Pareto Chart ของปัญหาในการฉีดขึ้นงานยาง200
ค-2	แผนภูมิ Pareto Chart ของปัญหาในการฉีดขึ้นงานยาง (ต่อ)201
ง-1	ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน โดยเกิดการขาดของชิ้นงานที่บริเวณ204
ง-2	ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจากการฉีดอย่างไม่เต็มแม่พิมพ์204

## หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

### 1. ชื่อโครงการ

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง  
An Application of Computer Aided Engineering, CAE, in Rubber Injection Mould Design

### 2. ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานที่สังกัด ที่อยู่ หมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และอีเมล

ผศ.ดร. ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ

ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันค่นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม  
และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนพหลโยธิน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

โทรศัพท์ 0-2942-7188 โทรสาร 0-2942-7189 อีเมล fengssr@ku.ac.th

### 3. สาขาวิชาที่ทำการวิจัย

โครงการวิจัยแห่งชาติ: ยางพารา

### 4. คำหลัก (keyword) ของโครงการวิจัย

แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม การจำลองการไหล

### 5. งบประมาณทั้งโครงการ

2,030,700 บาท

### 6. ระยะเวลาดำเนินโครงการ

14 เดือน

### 7. ได้เสนอโครงการนี้หรือโครงการที่มีส่วนเหมือนกับเรื่องนี้บางส่วนเพื่อขอทุนต่อแหล่งทุนอื่นที่ใดบ้าง

☐ ไม่ได้เสนอต่อแหล่งทุนอื่น

☒ เสนอต่อ สถาบันไทยเยอรมัน และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ชื่อโครงการที่เสนอ      การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด  
ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

## 8. ความเชื่อมโยงกับต่างประเทศ (ถ้ามี)

-

## 9. ปัญหาที่ทำการวิจัยและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตและมีปริมาณการส่งออกยางธรรมชาติมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยในปี พ.ศ. 2544 นั้นประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติได้ 2.36 ล้านตันหรือประมาณ 33% ของปริมาณการผลิตทั่วโลก อย่างไรก็ตามในปี พ.ศ.2544 นั้นมีปริมาณการใช้ยางธรรมชาติเพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพียง 0.36 ล้านตัน หรือประมาณ 15% ของปริมาณยางธรรมชาติที่ผลิตได้ ดังนั้นคณะกรรมการนโยบายยางธรรมชาติจึงได้กำหนดยุทธศาสตร์การพัฒนายางพาราครบวงจร เพื่อให้การพัฒนายางพาราของประเทศไทยมีทิศทางที่ชัดเจน โดยในส่วนของยุทธศาสตร์ด้านอุตสาหกรรมยางนั้น มีมาตรการดำเนินการทั้งในระยะสั้นและระยะกลางที่ต้องการพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปยางดิบของประเทศเพื่อเพิ่มมูลค่าและนำยางดิบไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีสัดส่วนการใช้เพิ่มเป็น 20% ของปริมาณยางธรรมชาติที่ผลิตได้ของประเทศไทย

ในกระบวนการแปรรูปยางพาราด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป (Moulding) เพื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ แบบอัด (Compression Moulding) แบบกึ่งอัด (Transfer Moulding) และแบบฉีด (Injection Moulding) โดยแม่พิมพ์แบบอัดเป็นแม่พิมพ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีราคาถูกกว่าแบบอื่นเหมาะสำหรับใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ไม่มี ความซับซ้อนของรูปร่างมากนัก ในขณะที่แม่พิมพ์กึ่งฉีดนั้นจะ ใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนปานกลาง และใช้เวลาที่สั้นกว่าแบบอัด ส่วนแบบฉีดนั้นเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนสูง โดยมีราคาของแม่พิมพ์ที่สูงด้วยเช่นกัน ด้วยความต้องการในด้านความซับซ้อนของรูปร่างคุณภาพ และปริมาณของผลิตภัณฑ์ยางในปัจจุบัน มีส่วนทำให้ความต้องการแปรรูปแบบฉีดมีเพิ่มมากขึ้น แต่ความรู้ด้านการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ รวมทั้งการนำเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์ไปช่วยเพื่อทำให้แม่พิมพ์ที่ได้มีประสิทธิภาพ และใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการยังมีอยู่จำกัดทำให้เกิดปัญหาการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่ขาดประสิทธิภาพทำให้เกิดการแก้ไขแม่พิมพ์บ่อยครั้งซึ่งเกิดจากการขาดความสามารถในการทำนายพฤติกรรมกลไกของยางภายในตัวแม่พิมพ์เมื่อทำการฉีดขึ้นรูปทำให้เกิดปัญหา เช่น ชิ้นงานไม่เต็ม ชิ้นงานเกิดรอยไหม้ เป็นต้นจากปัญหาดังกล่าวทำให้ผู้ประกอบการต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจนบางครั้งไม่สามารถรับงานจากลูกค้าที่เป็นชิ้นงานที่มีคุณภาพค่อนข้างสูงและกำหนดพิถีพิถันความคลาดเคลื่อนที่แคบมากๆ ได้รวมทั้งการแก้ไขปัญหาในปัจจุบันเป็นในลักษณะการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ซึ่งในบางครั้งคำตอบที่ได้จะไม่สม่ำเสมอและไม่สามารถใช้ได้ ในบางโอกาส ทำให้ใช้เวลานานและสูญเสียโอกาสทางการผลิตไม่สามารถสนองความต้องการของตลาดได้อย่างทันทั่วถึง

จากหลักการและเหตุผลที่ได้กล่าวไว้เบื้องต้นแล้ว ทางคณะผู้เสนอโครงการนี้เห็นว่ามี ความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการพัฒนาและนำเอาเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัย เช่น การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM)

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) รวมทั้งการใช้เครื่องจักรกลที่ควบคุมอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control, CNC) เข้าไปช่วยในกระบวนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) โดยพิจารณาทั้งขนาดและโครงสร้างของแม่พิมพ์โดยโครงการนี้จึงเป็นโครงการที่มุ่งเน้นการนำคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (CAE) ร่วมกับเทคโนโลยี CAD/CAM ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อสนับสนุนให้มีการสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดตามหลักวิชาการและสามารถสรุปเป็นคู่มือสำหรับการถ่ายทอดและเผยแพร่ความรู้ในเรื่องการพัฒนาแม่พิมพ์และวิธีออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

## 10. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของเทคโนโลยีในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางจากงานวิจัย ข้อมูลจากเอกสารและจากอินเทอร์เน็ตทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องรวมถึงข้อมูลจากโรงงานแปรรูปผลิตผลิตภัณฑ์ยาง
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาหาคำแนวทางแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยางโดยมุ่งเน้นไปที่ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์
3. เพื่อพัฒนากระบวนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การไหลของเนื้อยางในแม่พิมพ์ในสถานะเงื่อนไขต่างๆ
4. เพื่อสร้างองค์ความรู้และเอกสารคู่มือที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางและทำการถ่ายทอดไปยังบุคลากรรวมถึงการให้คำปรึกษาแก่ผู้ประกอบการให้เกิดความเข้มแข็งและความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) ในระดับนานาชาติต่อไป

## 11. ระเบียบวิธีวิจัย

กิจกรรมที่ 1 วางแผนการดำเนินการวิจัย

- ประชุมวางแผนความรับผิดชอบ และกำหนดการติดตามงาน

กิจกรรมที่ 2 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องของงานวิจัยร่วมกับบริษัทผู้ร่วมโครงการ

- ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นจากการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดยาง
- รวบรวมข้อมูลงานวิจัยในอดีตและปัจจุบัน

กิจกรรมที่ 3 เลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา

- ประสานงานกับบริษัทผู้ร่วมโครงการเพื่อเลือกชิ้นงานที่จะทำการศึกษา

กิจกรรมที่ 4 ออกแบบและใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์

- ทำการสร้างแบบจำลองชิ้นงานที่ต้องการสร้างแม่พิมพ์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ



- ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเพื่อทำการออกแบบแม่พิมพ์ โดยใช้โปรแกรม 3D-SIGMA

#### กิจกรรมที่ 5 ผลิตแม่พิมพ์

- ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตเพื่อสร้างโปรแกรมควบคุมเครื่องจักรกลอัดโน้มติสำหรับชิ้นส่วนที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสูง และมีรูปร่างซับซ้อน
- ทำการผลิตแม่พิมพ์นิตยง

#### กิจกรรมที่ 6 ทดสอบการใช้งานแม่พิมพ์และปรับปรุงแก้ไข

- ทดสอบการทำงานของแม่พิมพ์
- ปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องของแม่พิมพ์นิตยง

#### กิจกรรมที่ 7 สรุปผลการวิจัย

- อภิปรายผลการวิจัยและจัดทำเป็นเอกสารเพื่อเป็นตัวอย่างในการนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นที่ใกล้เคียงกัน
- สรุปผลการดำเนินงานโครงการวิจัย

#### กิจกรรมที่ 8 จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

12. จำนวนโครงการที่คณะผู้วิจัยกำลังดำเนินการอยู่ โดยขอให้ระบุระยะเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของแต่ละโครงการแหล่งทุนและงบประมาณสนับสนุนที่ได้รับ เวลาที่ใช้ทำโครงการวิจัยในแต่ละโครงการเป็นกี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ ทั้งในฐานะหัวหน้าโครงการ ผู้ร่วมโครงการของแต่ละโครงการที่กำลังดำเนินการอยู่

12.1 สำหรับหัวหน้าโครงการโปรดระบุรายละเอียดแต่ละโครงการที่ดำเนินการอยู่ดังต่อไปนี้

1) ผศ.ดร. ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ

ชื่อโครงการ: การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการออกแบบแม่พิมพ์นิตยงขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางหุ้มโลหะ

ระยะเวลาโครงการ 11 เดือน ตั้งแต่ เมษายน 2549 ถึง กุมภาพันธ์ 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 832,700 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

☒ หัวหน้าโครงการ

☐ ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อโครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบระบบทางวิ่งเย็น

ระยะเวลาโครงการ 11 เดือน ตั้งแต่ เมษายน 2549 ถึง กุมภาพันธ์ 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 942,700 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

☒ หัวหน้าโครงการ

☐ ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อโครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่

ระยะเวลาโครงการ 9 เดือน ตั้งแต่ มกราคม 2550 ถึง กันยายน 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 904,200 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

☒ หัวหน้าโครงการ

☐ ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อโครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางรองถังเครื่องซักผ้า (อยู่ระหว่างแก้ไขข้อเสนอโครงการ)

ระยะเวลาโครงการ 12 เดือน ตั้งแต่ มกราคม 2550 ถึง ธันวาคม 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

งบประมาณที่ได้รับ 1,712,100 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

☒ หัวหน้าโครงการ

☐ ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

12.2 สำหรับผู้ร่วมโครงการแต่ละท่านโปรดระบุรายละเอียดแต่ละโครงการที่ดำเนินการอยู่ดังต่อไปนี้

1) ดร. ชนะ รักษ์ศิริ

ชื่อโครงการ: การประยุกต์ใช้วิศวกรรมย้อนรอยสำหรับการพัฒนาการออกแบบและการตรวจสอบแม่พิมพ์ยาง

ระยะเวลาโครงการ 12 เดือน ตั้งแต่ มิถุนายน 2548 ถึง พฤษภาคม 2549

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 1,379,200 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

☒ หัวหน้าโครงการ

☐ ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อโครงการ: การประยุกต์ใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีห้าแกนสำหรับการพัฒนาการผลิตแม่พิมพ์ยางรองเท้า

ระยะเวลาโครงการ 9 เดือน ตั้งแต่ เมษายน 2549 ถึง ธันวาคม 2549

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 739,200 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

☒ หัวหน้าโครงการ

☐ ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อโครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปยางพื้นรองเท้าแบบใช้วัสดุ 2 ชนิด

ระยะเวลาโครงการ 9 เดือน ตั้งแต่ มกราคม 2550 ถึง กันยายน 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 805,200 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

☒ หัวหน้าโครงการ

☐ ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อโครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์อัดขึ้นรูปยางของตลับผงหมึกที่ใช้ในเครื่องพิมพ์กระดาษเลเซอร์ (อยู่ระหว่างแก้ไขข้อเสนอโครงการ)

ระยะเวลาโครงการ 12 เดือน ตั้งแต่ มกราคม 2550 ถึง ธันวาคม 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

งบประมาณที่ได้รับ 837,600 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

☒ หัวหน้าโครงการ

☐ ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ \_\_\_\_\_ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

## 2) นาย รุ่งธรรม ปัญญาวิภาต

ชื่อโครงการ: การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางหุ้มโลหะ

ระยะเวลาโครงการ 11 เดือน ตั้งแต่ เมษายน 2549 ถึง กุมภาพันธ์ 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 832,700 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

☐ หัวหน้าโครงการ

☒ ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ \_\_\_\_\_ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อโครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบระบบทางวิ่งเย็น

ระยะเวลาโครงการ 11 เดือน ตั้งแต่ เมษายน 2549 ถึง กุมภาพันธ์ 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 942,700 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

☐ หัวหน้าโครงการ

☒ ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ \_\_\_\_\_ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อโครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่

ระยะเวลาโครงการ 2 เดือน ตั้งแต่ มกราคม 2550 ถึง กันยายน 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 904,200 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

☐ หัวหน้าโครงการ

☒ ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

## 1. บทคัดย่อ

โดยทั่วไปการสร้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปของผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมแปรรูปยางในประเทศไทยนั้นมักจะทำให้ผู้รับจ้างจากภายนอกโรงงานซึ่งทำการออกแบบแม่พิมพ์โดยอาศัยทักษะความชำนาญของพนักงานปฏิบัติงาน และการลองผิดลองถูก รวมถึงใช้เครื่องมือและเครื่องจักรในการผลิตต่างๆที่ต้องควบคุมด้วยพนักงาน จึงทำให้เกิดปัญหาในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางอันเนื่องมาจากการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ เช่น ชิ้นงานเกิดครีบที่มากเกินไปจนความจำเป็น ชิ้นงานมีฟองอากาศ เป็นต้น ส่งผลให้ต้องทำการแก้ไขแม่พิมพ์และสูญเสียต้นทุนด้านวัสดุยางโดยไม่จำเป็น ดังนั้นโครงการวิจัยนี้เป็นการนำคอมพิวเตอร์ช่วยงานออกแบบและงานวิเคราะห์มาประยุกต์ใช้เพื่อหาสภาวะเหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยทำการจำลองการไหลของยางที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ ทำให้สามารถทราบถึงพฤติกรรมของการไหลของยางในแม่พิมพ์ได้ก่อนทำการผลิตจริง ซึ่งสามารถช่วยให้แม่พิมพ์ที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ยางที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้เป็นยางธรรมชาติ (NR40) โดยที่ค่าตัวแปรต่างๆที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ในโปรแกรม เช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ความเร็วที่ใช้ในการฉีด เวลาที่ใช้ในการฉีด และค่าคุณสมบัติของยางที่ได้จากการทดสอบ เป็นต้น ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จากการจำลองการไหลของยางในแม่พิมพ์นี้ได้แก่ การกระจายตัวของความดันที่เกิดในชิ้นงาน ความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ทิศทางของการไหล เวลาที่ไปถึงของเนื้อยางภายในแม่พิมพ์ และการกระจายตัวของอุณหภูมิของชิ้นงานยางและแม่พิมพ์ เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองนี้มาเปรียบเทียบกับการผลิตจริงจากเครื่องฉีดและแม่พิมพ์จริงก็พบผลที่ได้มีความสอดคล้องกันในระดับหนึ่ง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานออกแบบและงานวิเคราะห์เป็นประโยชน์ต่อการหาสภาวะเหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้

Rubber moulds used in the injection moulding process in Thai rubber product industry are usually manufactured by the mould makers who often use skilled and experienced workers with trial-and-error method including conventional tools/ machines in mould design and manufacturing processes. As a result, various defects of the rubber products such as excessive flash and air trap are occurred. This leads to several mould try-outs and loss of raw materials used in the process. Therefore, this research aims to apply the Computer Aided Design/ Engineering (CAD/CAE) techniques for optimized injection conditions. The significant input variables include material properties of the natural rubber (NR40) such as heat conductivity, viscosity and shear rate, curing time and operating conditions like mould temperature, injection pressure, injection time including the gating and runner positions. The numerical results are also correlated well with the empirical data using the rubber injection machine. This research provides rubber researchers the tools to seek the best operating conditions in injection moulding.

## 2. บทนำ

### 2.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการผลิตและมีปริมาณการส่งออกยางธรรมชาติมากเป็นอันดับหนึ่งของโลก โดยในปี พ.ศ. 2544 นั้นประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติ ได้ 2.36 ล้านตันหรือประมาณ 33% ของปริมาณการผลิตทั่วโลก [1] อย่างไรก็ตามในปี พ.ศ.2544 นั้นมีปริมาณการใช้ยางธรรมชาติเพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพียง 0.36 ล้านตัน หรือประมาณ 15% ของปริมาณยางธรรมชาติที่ผลิตได้ ดังนั้นคณะกรรมการนโยบายยางธรรมชาติจึงได้กำหนดยุทธศาสตร์การพัฒนายางพาราครบวงจร [2] เพื่อให้การพัฒนายางพาราของประเทศไทยมีทิศทางที่ชัดเจน โดยในส่วนของยุทธศาสตร์ด้านอุตสาหกรรมยางนั้น มีมาตรการดำเนินการทั้งในระยะสั้นและระยะกลางที่ต้องการพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปยางดิบของประเทศเพื่อเพิ่มมูลค่าและนำยางดิบไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีสัดส่วนการใช้เพิ่มเป็น 20% ของปริมาณยางธรรมชาติที่ผลิตได้ของประเทศ

ในกระบวนการแปรรูปยางพาราด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป (Moulding) เพื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี [3] คือ แบบอัด (Compression Moulding) แบบกึ่งอัด (Transfer Moulding) และแบบฉีด (Injection Moulding) โดยแม่พิมพ์แบบอัดเป็นแม่พิมพ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีราคาถูกกว่าแบบอื่นเหมาะสำหรับใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่มีความซับซ้อนของรูปร่างมากนัก ในขณะที่แม่พิมพ์กึ่งฉีดนั้นจะเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนปานกลาง และใช้เวลาที่สั้นกว่าแบบอัด ส่วนแบบฉีดนั้นเหมาะกับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนสูง โดยมีราคาของแม่พิมพ์ที่สูงด้วยเช่นกัน ด้วยความต้องการในด้านความซับซ้อนของรูปร่างคุณภาพ และปริมาณของผลิตภัณฑ์ยางในปัจจุบัน มีส่วนทำให้ความต้องการแปรรูปแบบฉีดมีเพิ่มมากขึ้น แต่ความรู้ด้านการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ รวมทั้งการนำเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์ไปช่วยเพื่อให้แม่พิมพ์ที่ได้มีประสิทธิภาพ และใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการยังมีอยู่จำกัดทำให้เกิดปัญหาการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่ขาดประสิทธิภาพทำให้เกิดการแก้ไขแม่พิมพ์บ่อยครั้งซึ่งเกิดจากการขาดความสามารถในการทำนายพฤติกรรมการทำงานของยางภายในตัวแม่พิมพ์เมื่อทำการฉีดขึ้นรูปทำให้เกิดปัญหา เช่น ชิ้นงานไม่เต็ม ชิ้นงานเกิดรอยไหม้ เป็นต้นจากปัญหาดังกล่าวทำให้ผู้ประกอบการต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจนบางครั้งไม่สามารถรับงานจากลูกค้าที่เป็นชิ้นงานที่มีคุณภาพค่อนข้างสูงและกำหนดพิถีพิถันความคลาดเคลื่อนที่แคบมากๆ ได้รวมทั้งการแก้ไขปัญหาก็ในปัจจุบันเป็นในลักษณะการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ซึ่งในบางครั้งคำตอบที่ได้จะไม่สม่ำเสมอและไม่สามารถใช้ได้บ่อยโอกาส ทำให้ใช้เวลานานและสูญเสียโอกาสทางการผลิตไม่สามารถสนองความต้องการของตลาดได้อย่างทันทั่วถึง

จากหลักการและเหตุผลที่ได้กล่าวไว้เบื้องต้นแล้ว ทางคณะผู้เสนอโครงการนี้เห็นว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการพัฒนาและนำเอาเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัย เช่น การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM) การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) รวมทั้งการใช้เครื่องจักรกลที่ควบคุมอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control, CNC) เข้าไปช่วยในกระบวนการออกแบบ

และสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) โดยพิจารณาทั้งขนาดและโครงสร้างของแม่พิมพ์โดยโครงการนี้จึงเป็นโครงการที่มุ่งเน้นการนำคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (CAE) ร่วมกับเทคโนโลยี CAD/CAM ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อสนับสนุนให้มีการสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดตามหลักวิชาการและสามารถสรุปเป็นคู่มือสำหรับการถ่ายทอดและเผยแพร่ความรู้ในเรื่องการพัฒนาแม่พิมพ์และวิธีออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

## 2.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของเทคโนโลยีในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางจากงานวิจัย ข้อมูลจากเอกสารและจากอินเทอร์เน็ตทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องรวมถึงข้อมูลจากโรงงานแปรรูปผลิตผลิตภัณฑ์ยาง
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัญหา รวมถึงหาแนวทางแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยาง โดยมุ่งเน้นไปที่ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์
3. เพื่อพัฒนากระบวนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การไหลของเนื้อยางในแม่พิมพ์ในสถานะเงื่อนไขต่างๆ
4. เพื่อสร้างองค์ความรู้และเอกสารคู่มือที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางและทำการถ่ายทอดไปยังบุคลากรรวมถึงการให้คำปรึกษาแก่ผู้ประกอบการให้เกิดความเข้มแข็งและความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) ในระดับนานาชาติต่อไป

## 2.3 เป้าหมาย

ทำการศึกษาและวิจัยพัฒนาการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) โดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAE) มาช่วยเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพรวมถึงเผยแพร่องค์ความรู้ที่ได้สู่ผู้ประกอบการแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง

## 2.4 สมมติฐานและขอบเขตของการวิจัย

### 2.4.1 สมมติฐาน

การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการศึกษาและวิเคราะห์สามารถแก้ไขปัญหาของผลิตภัณฑ์ยางในการฉีดขึ้นรูปได้ และสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปใช้ในงานออกแบบแม่พิมพ์ผลิตผลิตภัณฑ์ยาง



#### 2.4.2 ขอบเขตในการวิจัยนี้สามารถสรุปได้เป็นกรณีใหญ่ๆ ดังนี้

##### 1) การศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์การไหลของยางในแม่พิมพ์โดยการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (3D-SIGMA)

- เพื่อรวบรวมข้อมูลของปัญหาที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์และแม่พิมพ์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง
- เพื่อศึกษาถึงสถานะและพฤติกรรมของการไหลของยางขณะทำการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์
- เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการฉีดขึ้นรูป ดังต่อไปนี้
  - ขนาดและตำแหน่งของรูเข้า (Gate)
  - ขนาดและตำแหน่งของทางวิ่ง (Runner)
  - เวลาฉีด (Fill Time)
  - ความเร็วฉีด (Injection Velocity)
  - ความดันฉีด (Injection Pressure)
  - อุณหภูมิฉีด (Injection Temperature)

##### 2) การผลิตแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

- ทำการประสานงานกับผู้ประกอบการเพื่อทำการเลือกชิ้นงานที่จะมาเป็นกรณีศึกษาในโครงการวิจัยนี้
- เพื่อทำการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยางที่ได้เลือกไว้โดยใช้องค์ความรู้ที่ได้จากข้อ 1) ในการหาตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการฉีด

##### 3) กระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางและตรวจสอบคุณภาพ

- ทำการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โดยใช้ตัวแปรต่างๆ ที่ได้เลือกไว้แล้ว
- ทำการตรวจสอบตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ในขณะที่ทำการฉีดจริง
- ตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานที่ได้เมื่อเทียบกับแบบจำลองจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA

##### 4) การรวบรวมองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยาง รวมถึงการเผยแพร่

- จัดทำคู่มือในการออกแบบและผลิตแม่
- พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยาง
- จัดทำเอกสารประกอบการอบรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ผู้ประกอบการ

## 2.5 นิยามคำศัพท์

**การกำหนดรูปทรง (Geometry Definition)** ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเป็นการกำหนดรูปร่างของระบบในการคิดในปัจจุบันการใช้โปรแกรมในการจำลองการไหลนั้นจะนำรูปทรงมาจากข้อมูล CAD

**การสร้างเอลิเมนต์ของรูปทรงที่สร้างขึ้น (Geometry Enmeshment)** การกำหนดรูปร่างของระบบในการคิดขึ้นแล้วรูปร่างนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นจำนวนของเอลิเมนต์ปริมาตรสำหรับที่จะทำการคำนวณ

**ขั้นตอนก่อนที่จะดำเนินการ (Pre-Processor)** ขั้นตอนในการสร้างรูปทรงของชิ้นงานและการกำหนดชิ้นส่วนต่างที่จะทำการวิเคราะห์ในโปรแกรม เช่น ชิ้นงาน, ช่องทางวิ่ง, รูฉีด, แม่พิมพ์ และช่องทางเข้า

**วัสดุและการกำหนดปัจจัยในขั้นตอนของกระบวนการ (Material and Process Parameter Definition)** การกำหนดวัสดุและการกำหนดปัจจัยในขั้นตอนของกระบวนการซึ่งเป็นค่าที่ต้องการสำหรับการนำไปใช้ในการหาคำตอบของระบบสมการของการไหลเข้าภายในแม่พิมพ์และขั้นตอนของการบ่มเนื้ออย่าง

**สมการพลังงาน (Energy Equation)** การสมดุลของอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหลกับผลรวมของอัตราสุทธิต่อของงานที่กระทำกับอนุภาคของไหลและอัตราสุทธิของความร้อนที่เพิ่มในของไหลและอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานโดยได้จากแหล่งจ่าย

**สมการของความต่อเนื่อง (Continuity Equation)** อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์ของไหลจะเท่ากับอัตราสุทธิในการไหลของมวลที่เข้าไปในเอลิเมนต์ของไหล

**สมการ โมเมนตัม (Momentum Equation)** อัตราที่เพิ่มขึ้นของโมเมนตัมของอนุภาคของไหลจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำกับอนุภาค

**วิธีการปริมาตรควบคุม (Control Volume Approach)** การแปลงสมการในรูปแบบต่อเนื่องให้อยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่องในรูปของสมการเชิงพีชคณิตและจะแสดงวิธีในการทำการแบบไม่ต่อเนื่องของค่าตัวแปรในระบบสมการควบคุมการไหลโดยใช้หลักการของปัญหาเป็นปริมาตรเล็กๆ

**ค่าความจุความร้อน (Thermal Capacitance)** คุณสมบัติในการเก็บความร้อนไว้ภายในของเนื้อวัสดุ

**ค่าความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)** คุณสมบัติในการป้องกันไม่ให้ความร้อนไหลผ่านถ้าวัสดุเป็นตัวนำความร้อนจะมีค่าน้อย

ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivities) คุณสมบัติในการส่งถ่ายความร้อนของวัสดุถ้าเป็นตัวนำความร้อนจะมีค่ามาก

การกำหนดค่าเริ่มต้นและค่าของขอบเขต (Initial and Boundary Conditions) การกำหนดค่าตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการเพื่อใช้ในการหาคำตอบ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว จะเป็นค่า ของ อุณหภูมิ ความดัน เวลา และระยะทาง

ความหนาแน่น (Density) มวลของวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุนั้น

ของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) ของไหลที่เมื่ออยู่ภายใต้ความดันที่สูงแล้วปริมาตรนั้นจะเท่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบกับแต่ก่อน

การสร้างกริดแบบพิกัด (Cartesian Grid) การสร้างอิเลเมนต์ปริมาตรที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรืออยู่ในพิกัดแกนตั้งฉาก

การสร้างกริดแบบเข้ารูป (Body-Fitted Grid) การสร้างอิเลเมนต์ปริมาตรที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายชิ้นงานจริงมีส่วนโค้งเว้าตามชิ้นงาน

อีลาสโตเมอร์ (Elastomers) โพลีเมอร์แบบอสัณฐาน โดยมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ มีสายโมเลกุลยาวซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะทางเคมี และสามารถดูดซับสารละลายได้ดี แต่ไม่สามารถขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้ด้วยการให้ความร้อน มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นดี ทนต่อแรงขัดสี

ยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) ยางดิบที่ได้มาจากต้นยางตามธรรมชาติ

รีโอโลยี (Rheology) เป็นการศึกษาลักษณะการไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุโดยจะหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น, ความเครียดและเวลาในการศึกษา รีโอโลยีของยางนั้นจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และการเพิ่มองค์ประกอบต่างๆ

คาปิลารีวิสโคมิเตอร์ (Capillary Viscometers) เครื่องจะใช้ค่าความหนืดของยางโดยหลักการของการใช้ความดันดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ของไหลที่มีความหนืดมากต้องใช้ความดันมากในการดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ความหนืดจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกลับอัตราส่วนของความดันต่ออัตราการไหล

**การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (Moulding)** การขึ้นรูปยางให้เป็นชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างที่แน่นอน โดยเปลี่ยนยางเทอร์โมเซตจากสถานะที่เป็นของเหลวไปสู่สถานะของแข็ง

**การอัดขึ้นรูป (Compression Moulding)** การขึ้นรูปนั้นเริ่มจากนำชิ้นยางที่ยังไม่สุกใส่ลงไปในเบ้า (Cavity) เครื่องอัดจะใช้แรงดันกดปิดแม่พิมพ์จนสนิท หลังจากได้รับความร้อนจากเครื่องอัดและใช้เวลาระยะหนึ่งจนยางสุกตัว

**การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (Transfer Moulding)** การขึ้นรูปแบบอัดส่งจะมีช่องสำหรับรับใส่ยาง 1 ช่อง (Pot) โดยช่องดังกล่าวนี้จะเชื่อมต่อกับเบ้าด้วยทางวิ่งซึ่งมีทั้งเบ้าเดียวหรือหลายเบ้าก็ได้ เมื่อใส่ยางที่ยังไม่สุกลงไปในช่องใส่ยางและจะทำการอัดเนื้อยางผ่านทางวิ่งเข้าไปสู่เบ้า

**การฉีดขึ้นรูป (Injection Moulding)** การฉีดเนื้อยางจากกระบอกฉีดด้วยกระบอกสูบหรือสกรูที่อยู่ภายในเนื้อยางจะถูกฉีดผ่านหัวฉีด ซึ่งเป็นส่วนปลายสุดเข้าสู่รูฉีดของแม่พิมพ์ โดยรูฉีดนี้จะเชื่อมต่อกับทางวิ่งและรูเข้าก่อนเข้าสู่เบ้าต่อไป

**ช่องนำฉีด (Sprue)** เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องฉีดกับแม่พิมพ์ฉีดยางซึ่งสามารถที่จะพิจารณาได้จากชิ้นงานและแม่พิมพ์ลักษณะทางเข้าจะมีลักษณะที่เข้าไปในช่องรูที่เล็กแล้วขยายออกไปจนใหญ่ มีลักษณะเป็นรูที่เรียว

**ระบบทางวิ่ง (Runner System)** ช่องทางไหลของเนื้อยางภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะต้องออกแบบให้มีความสมดุลของการไหลของเนื้อยาง

**ทางวิ่ง (Runner)** มีลักษณะเป็นช่องภายในแม่พิมพ์โดยจะได้รับความร้อนจากช่องทางจ่ายที่จุดศูนย์กลาง

**รูเข้า (Gate)** ทางไหลเข้าที่รูปทรงของชิ้นงานในแม่พิมพ์ซึ่งจะเป็นช่องทางที่เนื้อยางจะไหลเข้าไปในรูปทรงของชิ้นงานในแม่พิมพ์

**การไหลออกมาอย่างรวดเร็ว (Jetting Filling)** การไหลของเนื้อยางออกมาจากช่องทางจ่ายและช่องทางเข้าแม่พิมพ์เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงมากกระทบที่บริเวณผิวของแม่พิมพ์ชิ้นงาน

**เบ้าชิ้นงาน (Cavities)** รูปร่างของตัวเนื้อยางที่อยู่ภายในแม่พิมพ์ตามที่ได้ออกแบบไว้

การเกิดเศษยาง (Flash) เป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบางๆ ของบริเวณภายนอกของเนื้อยางที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวแม่พิมพ์ภายในรูปทรง

ความเร็วของสกรู (Screw Speed) ความเร็วของสกรูที่เคลื่อนที่ฉีดเนื้อยางออกมาสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้โดยการควบคุมที่เครื่องฉีดยาง

อุณหภูมิของกระบอกฉีด (Barrel Temperature) อุณหภูมิภายในกระบอกฉีดที่จะทำให้ยางที่อยู่ภายในได้รับความร้อนในช่วงแรกก่อนที่จะทำการฉีด

แรงดันด้านการถอยกลับของสกรู (Screw Back Pressure) จะเป็นแรงที่จะไปไล่อากาศให้ออกจากเนื้อยาง (เกิดจากการป้อนเนื้อยางเร็ว) และไล่ความร้อนที่ผ่านเข้ามาในทางวิ่ง

## 2.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลลัพธ์	ตัวชี้วัด
1. เทคโนโลยีใหม่ เทคโนโลยีในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) โดยใช้เทคโนโลยี CAE ร่วมกับ CAD/CAM	แม่พิมพ์ที่ผลิตได้จำนวน 1 ชุด
2. กระบวนการใหม่ แนวทางการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง	คู่มือการออกแบบ 1 ชุด
3. อื่น ๆ คู่มือสำหรับการถ่ายทอดและเผยแพร่ ความรู้ในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง	เอกสารประกอบการอบรม 1 ชุด

## 2.7 ผลกระทบที่จะเกิดกับอุตสาหกรรมแม่พิมพ์

### 2.7.1 ผลกระทบเชิงเศรษฐกิจ / เชิงพาณิชย์

จากความสำคัญของการพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่อระบบเศรษฐกิจโดยรวมของไทยนั้น เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางธรรมชาติที่ยังไม่ได้แปรรูปให้มีมูลค่าที่สูงขึ้น จากการส่งออกยางดิบที่ยังไม่ได้มีการแปรรูปนั้น ในปี 2544 ประเทศไทยส่งออกประมาณ 2,042,079 เมตริกตัน รวมเป็นมูลค่าประมาณ 46,692.9 ล้านบาท

บาท [1] ส่วนการส่งออกผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปและผลิตภัณฑ์ยางของไทยนั้น ส่งออกประมาณ 253,105 เมตริกตัน รวมเป็นมูลค่า 48,484.18 ล้านบาท [2] ซึ่งจะเห็นได้ว่ามูลค่าที่เพิ่มขึ้นประมาณ 10 เท่า ต่อเมตริกตัน ในการพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางนั้นจะส่งผลดีต่อเกษตรกรเนื่องจากความต้องการยางธรรมชาติในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์นั้นมีมากขึ้นส่วนในโรงงานที่แปรรูปก็จะทำให้มีประสิทธิภาพของการแปรรูปยางดิบและมาตรฐานคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นดีขึ้น และจะส่งผลทำให้ผู้ส่งออกสามารถที่จะส่งออกได้มากขึ้นด้วย ดังนั้นโครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะสามารถช่วยสร้างความเข้มแข็งและความสามารถในการแข่งขันในอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางและอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ของประเทศได้ในอนาคตอันใกล้

#### 2.7.2 ผลกระทบด้านการพัฒนาเทคโนโลยี

โครงการวิจัยนี้จะก่อให้เกิดผลกระทบด้านการพัฒนาเทคโนโลยีในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) ได้โดยตรง โดยในปัจจุบันผู้ประกอบการยังขาดองค์ความรู้ในเทคโนโลยีดังกล่าวรวมถึงไม่มีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและผลิตจึงทำให้แม่พิมพ์ที่ผลิตได้มีคุณภาพค่อนข้างต่ำและทำให้เกิดปัญหาต่างๆของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ เช่น ปัญหาการไหลไม่เต็มของเนื้อยางในแม่พิมพ์หลังจากทำการขึ้นรูปแล้ว เป็นต้น ทำให้ผู้ประกอบการส่วนใหญ่จะนำเข้าแม่พิมพ์จากต่างประเทศทำให้ไม่สามารถที่จะสร้างองค์ความรู้เพื่อที่จะพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตของตนเองได้ นอกจากนั้นโครงการวิจัยนี้ยังเป็นการส่งเสริมให้มีการนำเทคโนโลยีด้าน CAD/CAM/CAE มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ของประเทศอีกด้วย รวมถึงถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ได้สู่ภาคเอกชนเพื่อก่อให้เกิดความสามารถในการแข่งขันได้อย่างยั่งยืน

#### 2.7.3 ผลกระทบด้านการพัฒนาบุคลากร

เนื่องจากในปัจจุบันยังมีความขาดแคลนบุคลากรในทุกระดับฝีมือในด้านแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง ดังนั้นโครงการนี้จึงมีความมุ่งหวังที่จะเป็นโครงการนำร่องที่จะสร้างนักวิจัยจากหน่วยงานของรัฐและบุคลากรจากภาคอุตสาหกรรมให้มีความสามารถในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง รวมถึงเป็นส่วนหนึ่งในการจัดทำหลักสูตรเพื่อพัฒนาบุคลากรในด้านแม่พิมพ์อย่างต่อเนื่องในอนาคต นอกจากนั้นยังเป็นการสร้างความร่วมมือระหว่างนักวิจัยจากสถานศึกษา หน่วยงานต่างๆ กับผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

### 3. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review) และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบผลงานวิจัย และเอกสารต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งเท่าที่ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการค้นหาพบว่าผลงานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับแม่พิมพ์ยางโดยตรงนั้นยังไม่อยู่ไม่มาก โดยได้สรุปออกมาเป็นหัวข้อต่างๆที่มีความสำคัญต่อกระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ยาง ในหัวข้อแรกจะแสดงให้เห็นถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องว่าที่ผ่านมาได้มีการทำวิจัยที่เกี่ยวข้องแม่พิมพ์ยางอย่างไรบ้าง จากนั้นจะกล่าวถึงแนวคิดในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการฉีดยางในการขึ้นรูป (Modeling of Injection Rubber Processes) ต่อจากนั้นจะกล่าวถึงวิธีการเชิงตัวเลขและการนำไปใช้ในปรากฏการณ์การฉีดซึ่งจะแสดงถึงทฤษฎีและสมการต่างๆที่ใช้ในการจำลองกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง จากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงคุณสมบัติพื้นฐานและชนิดของยาง รวมถึงรีโอโลยีของยางที่มีความสำคัญต่อการศึกษารูปแบบการขึ้นรูปยาง เช่น ความหนืด ความเค้น อัตราเฉือน และคุณสมบัติอื่นๆ เป็นต้น เมื่อเราทราบถึงพื้นฐานต่างๆของยางแล้ว จากนั้นจะกล่าวถึงกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ และการออกแบบแม่พิมพ์ยาง และท้ายสุดจะกล่าวถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปและการออกแบบแม่พิมพ์

#### 3.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

R. P. Brown [4] กล่าวถึงเหตุผลและสาเหตุการเสียหายของผลิตภัณฑ์ยาง แนวทางการป้องกันและตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะกับผลิตภัณฑ์ยางที่เป็นล้อรถและซีล โดยความเสียหายดังกล่าวนี้เกิดจากการออกแบบที่ผิดพลาด การเลือกวัสดุที่ไม่เหมาะสม ความบกพร่องในขั้นตอนการผลิต การติดตั้งที่ไม่ถูกต้อง สภาพการใช้งานที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้ การใช้งานที่ผิดวิธีหรือไม่ระมัดระวัง รวมไปถึงการออกแบบในลักษณะที่มีจุดบกพร่อง (Strategic Weakness)

J. A. Lindsay [5] ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความสูญเสียในกระบวนการฉีดผลิตภัณฑ์ยาง ตั้งแต่ช่วงของการออกแบบผลิตภัณฑ์ไปจนถึงการปรับตั้งเงื่อนไขการฉีดของเครื่องจักร อิทธิพลของส่วนผสมและสารเติมเต็ม (Additives) บางตัว ที่มีผลต่อเสถียรภาพในปั๊มแม่พิมพ์ รวมทั้งเกิดตำหนิในชิ้นงานที่ฉีด นอกจากนี้ Lindsay ยังกล่าวถึงการนำระบบบริหารงานคุณภาพ ISO 9001 มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และให้ตระหนักถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงและเกิดความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ รวมไปถึงความร่วมมือกันระหว่างตัวผู้ผลิตและลูกค้าในแต่ละขั้นตอนเพื่อให้ผู้ผลิตสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามความต้องการของลูกค้า ทั้งในด้านของคุณภาพ ราคา ระยะเวลาในการส่งมอบ และจำนวนที่ต้องการ

E. Bociaga [6] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลกับคุณภาพในงานฉีดและใช้ในการอ้างอิงกระบวนการฉีด คือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ความดันที่ใช้ในการฉีด ความเร็วฉีด และรอบการฉีด โดยทดลองชิ้นงานตัวอย่างที่เป็น

HDPE โดยกำหนดปัจจัยคงที่ในการฉีด คือ อุณหภูมิฉีด ความดันฉีด ความดันฉีดย้ำ (Holding Pressure) เวลาฉีดย้ำ เวลาหล่อเย็น และรอบการฉีด และปัจจัยแปรผันในการฉีด คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ และความเร็วฉีด นอกจากนี้

E. Bociaga [7] ยังได้ศึกษาถึงรูปแบบของการฉีดที่ได้จากวิธีการฉีดเข้าเบ้าที่ต่างกัน เช่น ฉีดเข้าจุดเดียว ด้านข้าง ฉีดเข้าสองจุดด้านข้าง ซึ่งมีอิทธิพลต่อโครงสร้างและการเกิด Crystallinity ของโพลิเมอร์ ลักษณะของรอยเชื่อมประสาน (Weld Lines) ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน รวมทั้งระดับการเกิด Crystallinity ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแม่พิมพ์

D. E. Packham [8] ได้ศึกษาปัญหาในระหว่างกระบวนการฉีดต่างๆ ซึ่งมีสาเหตุได้หลายประการ โดยได้ศึกษาปัญหาการติดของหน้าแม่พิมพ์ (Mould Sticking) ปัญหาเศษตกค้าง (Mould Fouling) และปัญหาการทำความสะอาด ที่เกิดในงานแม่พิมพ์ของวัสดุพอลิเมอร์ โดยได้ทำการศึกษาถึงกระบวนการปลดชิ้นงานในแม่พิมพ์ (Mould Release) ปัจจัยจากชนิดของวัสดุและเงื่อนไขการฉีดที่ส่งผลต่อพฤติกรรมดังกล่าว รวมทั้งความสัมพันธ์ของกรรมวิธีการปรับปรุงผิว (Surface Treatment) ของหน้าสัมผัสแม่พิมพ์ การเลือกสารช่วยปลดชิ้นงาน (Release Agents) วิธีการทำความสะอาดแม่พิมพ์ และการพิจารณาการวัดค่าการปลดชิ้นงานและการตกค้างของเศษ (Fouling)

M. J. Forrest [9] ศึกษาส่วนผสมและผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อช่วยในงานควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงค้นหาสาเหตุการเสียหายที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ยางและส่วนผสมของยาง V. Goodship [10] ศึกษาถึงการเลือกใช้วัสดุในกระบวนการฉีดที่ใช้วัสดุหลายชนิด เช่น เทคนิค Coinjection, Bi-injection และ Interval Injection โดยเฉพาะคุณสมบัติด้านการเชื่อมประสาน (Bonding Properties) ของวัสดุ นอกจากนั้น S. L. Kushnarenko [11] ได้ทดสอบเวลาในการบ่มยางให้สุกของร่องเท้ายางที่มีส่วนผสมของโลหะ ซึ่งวางในตัวเบ้าขณะทำการฉีด โดยเกิดปัญหาทางความร้อนอันเนื่องมาจากวัสดุที่ไม่ใช่เนื้อเดียว (Inhomogeneous) ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์ ทำให้สามารถพยากรณ์เวลาที่เหมาะสมในการบ่มยางให้สุกของผลิตภัณฑ์ยาง

E. Haberstroh and I. Kleba [12] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้นำมาใช้ในการทำนายการบิดตัว (Warpage) ในโครงสร้าง Pur Sandwich ของชิ้นส่วนยานยนต์ การศึกษาหาลักษณะการบิดตัวของพลาสติกเสริมใยแก้ว [13] ของชิ้นส่วน Motor Vehicle Radiator Tank ซึ่งเกิดจากอิทธิพลการเรียงตัวของเส้นใยอันเกิดจากการวางตำแหน่งทางวิ่ง (Runner) ในตัวแม่พิมพ์ โดยนำระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองการเรียงตัวของเส้นใยเพื่อทำนายพฤติกรรม การหดตัว (Shrinkage) และการเสียรูป (Deformation) ชิ้นงานฉีด ซึ่งวัสดุที่ใช้ทดสอบคือวัสดุผสม Polypropylene เกรด Armlen PP SV 2T ที่ผลิตโดย Poliplastik แล้วทำการทดสอบด้วยตำแหน่งทางวิ่ง 3 แบบ



ผลคำนวณที่ได้แสดงให้เห็นว่า Transverse Rigidity ของ Radiator Tank เพิ่มขึ้น และการบิดตัวลดลงอย่างชัดเจน การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการพยากรณ์การเรียงตัว (Orientation) ของเส้นใยระหว่างการไหลของสารประกอบโพลิเมอร์ผ่านช่องทางขนาดเล็ก (Narrow Channel) ซึ่งได้แสดงผลการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เกิดขึ้นในเบ้าแม่พิมพ์ โดยใช้สัดส่วนความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยที่แตกต่างกัน 3 แบบ ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของการเรียงตัวของเส้นใยต่อสัดส่วนของความยาวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใย [14]

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในอดีตรูปแบบชิ้นส่วนและแม่พิมพ์เป็นเรื่องที่ยากต่อการเข้าใจ และไม่ได้ใช้การออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม [15] โปรแกรม CADMOULD ได้ถูกนำมาช่วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์อย่างให้กับวิศวกรผู้ออกแบบ โดยสามารถทำนายลักษณะการไหล อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ เวลาที่ใช้ในการบ่ม ปฏิกิริยาการกระจายตัว (Jetting) อาจเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยคำนวณผลกระทบของการไหลในลักษณะ 3 มิติ [16,17] ค่าการกระจายความร้อนและการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ ตำแหน่งของรูระบายอากาศที่เหมาะสมในตัวเบ้า ตำแหน่งรูเข้า การสร้างสมดุลของรูวิ่งและคำนวณค่ารอบการฉีด การบ่ม (Curing) การหล่อเย็น จนถึงการเอ้าชิ้นงานออกจากตัวเบ้า ตัวอย่างเช่น ชิ้นงานตัวอย่างระบบยางกันซึมที่ประตู (Door Sealing System) โดยสามารถทำนายตำแหน่งที่เกิดความเสียหายขณะขึ้นรูปที่อาจเกิดขึ้น ค่าความดัน ค่าอุณหภูมิ ค่าของเวลาที่ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขการผลิต ผลกระทบของอัตราเฉือน (Local Shear Effect) และยังสามารถคำนวณค่าของ Cross-linking Reaction ที่เกิดขึ้นและปัญหาที่เกี่ยวข้อง ค่าความดันอากาศภายในตัวแม่พิมพ์ ค่าความร้อนและที่ทำให้เกิดเค้นภายในขณะที่ทำการหล่อเย็น ผลกระทบทางความร้อนของชิ้นโลหะที่เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ (Metal Insert) และประมาณเวลาของรอบการฉีด นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณและทำนายลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยและวิเคราะห์ค่าความเค้นของชิ้นงานจากกระบวนการฉีดขึ้นรูป ช่วยลดเวลาการออกแบบและทำให้ลดปัญหาการแก้ไขชิ้นงานหลังจากที่มีการผลิตออกไปแล้ว รวมถึงเป็นการลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาที่เกิดขึ้น การนำโปรแกรม CADMOULD มาใช้จำลองกระบวนการผลิต [18] สามารถทำนายสิ่งที่จะเกิดขึ้นในการผลิตจริง ทำให้ช่องว่างระหว่างงานออกแบบและงานผลิตผลิตภัณฑ์ลดลง ผู้ออกแบบสามารถเห็นปัญหาที่อาจเกิดขึ้นหากนำชิ้นงานที่ออกแบบไปทำการผลิตจริง จึงสามารถทำการแก้ไขปรับปรุงการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบ และลดค่าใช้จ่ายจากความผิดพลาดเมื่อไปสู่ขั้นตอนของการผลิต

นริศรา รอดเดชา (2546) [19] ศึกษาแรงกระทำระหว่างยางกับเขม่าดำของคอมโพสิตยางธรรมชาติ (NR) และยางอะคริลิก (ACM) และคอมโพสิตยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิก (NR/ACM) โดยวิธีทดสอบค่าบดรับเบอร์และสมบัติเชิงไดนามิกส่วรวมทั้งศึกษาการกระจายพันธะข้ามและปริมาณพันธะข้ามโดยวิธีทดสอบสมบัติเชิงไดนามิกส่วตลอดจนความเข้ากันได้ของยางผสมที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัลคาไนเซชันยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิกพบว่าเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นค่าบดรับเบอร์ของคอมโพสิตยางธรรมชาติมีแนวโน้มคงที่ ส่วนคอมโพสิตยางอะคริลิกลดลงแสดงว่าแรงกระทำระหว่างยางกับเขม่าดำของคอม

โพลีเอทิลีนธรรมชาติและยางอะคริลิกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเกิดการรวมตัวของเขม่าดำจากการศึกษาการกระจายพันธะข้ามและปริมาณพันธะข้ามของวัลคาไนเซชันยางผสม NR/ACM โดยวิธีทดสอบสมบัติเชิงไดนามิกพบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความสูงของพีค  $\tan\delta$  ของยางอะคริลิกเพิ่มขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความสูงของพีค  $\tan\delta$  ของยางธรรมชาติลดลง แสดงว่าเมื่อปริมาณยางอะคริลิกเพิ่มขึ้น มีการกระจายพันธะข้ามและปริมาณพันธะข้ามของวัลคาไนเซชันยางอะคริลิกมากกว่ายางธรรมชาติ จากการศึกษาความเข้ากันได้ของวัลคาไนเซชันยางผสม NR/ACM พบว่าเขม่าดำทำให้ยางผสม NR/ACM เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น เมื่อผสมยางอะคริลิกลงไปในผลิตภัณฑ์ยาง NR/ACM ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดก่อนและหลังการเสื่อมสภาพทางความร้อนมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด และเมื่อปริมาณเขม่าดำเพิ่มขึ้นความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถในการยืดจนขาดของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติและยางอะคริลิกลดลงส่วนสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางอะคริลิกมีความแตกต่างก่อนและหลังการเสื่อมสภาพทางความร้อนน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

รัชดา และ อุดมเกียรติ (2546) [20] ศึกษาการถ่ายโอนความร้อนจากเบ้าพิมพ์สู่ล้อยางต้นขณะอบคงรูปและตัวแทนสมบัติของยางพบว่ามิลักษณะคั่งนี้คือขณะอบคงรูปล้อยางต้น ยางจะมีความสามารถในการนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงก่อนการเกิดเชื่อมโยงโซ่โมเลกุล คือช่วงอุณหภูมิ 60-110 °C หลังช่วงอุณหภูมิคงรูป (120-150 °C) ค่าการนำความร้อนค่อนข้างคงที่แต่จะเกิดการคายพลังงานความร้อนออกมาส่วนหนึ่งอันเนื่องมาจากการสลายและสร้างพันธะใหม่ระหว่างโซ่โมเลกุลของยางสำหรับในการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในล้อยางต้นขณะอบคงรูปเพื่อทำนายระดับการสุกตัวของยาง ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในล้อยาง เพื่อความง่ายและสะดวกต่อการคำนวณจะสามารถสมมุติให้ค่าการนำความร้อนของยางมีค่าคงที่เป็นค่าที่อุณหภูมิห้องและค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นเป็นค่าคงที่เท่ากับ 6000 W/m<sup>3</sup> จะทำให้ได้ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิซึ่งนำมาหาระดับการสุกตัวของยางโดยใช้ทีทีซีชาร์ตได้อย่างถูกต้อง

อรรถพล (2545) [21] ได้ศึกษาขั้นตอนการประยุกต์ใช้ CAD/CAE/CAM สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและการปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติกที่จะเป็นแนวทางการนำเสนอเกี่ยวกับภาคอุตสาหกรรมที่ผลิตชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกโดยความรู้ขั้นตอนการออกแบบรวมไปถึงทำอย่างไรให้ได้ผลิตภัณฑ์นั้นตรงตามความต้องการการใช้งานของลูกค้าและทำให้สามารถประมาณคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นว่าจะอยู่ในระดับใดหรือโรงงานสามารถผลิตได้หรือไม่ โดยจะต้องมีการคำนึงถึงองค์ประกอบต่อไปนี้

1. ชนิดพลาสติกและคุณสมบัติ
2. การออกแบบผลิตภัณฑ์ของพลาสติกและการสร้างแม่พิมพ์
3. เงื่อนไขการฉีดและการวิเคราะห์จำลองสถานะการฉีด
4. การวางแผนขบวนการผลิตและกรรมวิธีการผลิต
5. ประสิทธิภาพเครื่องฉีดและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการผลิต

### 3.2 แนวคิดในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการฉีดยางในการขึ้นรูป (Modeling of Injection Rubber Processes)

ในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการฉีดนั้นจะต้องเริ่มจากขั้นตอนการกำหนดรูปทรง (Geometry Definition), การสร้างเอลิเมนต์ของรูปทรงที่สร้างขึ้น (Geometry Enmeshment), วัสดุและการกำหนดปัจจัยให้กับกระบวนการ (Material and Process Parameter Definition), การจำลองการไหลและผลเฉลยของสมการ (Simulation/Solution of the Governing Equations) และการประเมินผลของคำตอบ (Evaluation of the Results)

#### 3.2.1 การกำหนดรูปทรง (Geometry Definition)

ในขั้นตอนแรกของการสร้างแบบจำลองของกระบวนการจะเป็นการกำหนดรูปร่างของระบบในการฉีด ในปัจจุบันการใช้โปรแกรมในการจำลองการไหลนั้นจะนำรูปทรงมาจากข้อมูล CAD ซึ่งจะอยู่ในขั้นตอนก่อนที่จะดำเนินการ (Pre-processor) สำหรับการนำข้อมูลเข้ามาภายในโปรแกรมและนำรูปทรงของรูเข้า (Gating System), ระบบทางวิ่ง (The Runner System) เป็นต้น ซึ่งจะเป็นส่วนประกอบต่างๆภายในระบบฉีดเพื่อให้ไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ ข้อสำคัญระหว่างการสร้างแบบรูปทรงของแบบจำลองโดยการรวมเอลิเมนต์ทั้งหมดของระบบเข้าด้วยกันจะต้องให้ความสำคัญในการไหลของเนื้อยางภายในรูปทรงของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์และการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานในการฉีด

#### 3.2.2 การสร้างเอลิเมนต์ของรูปทรงที่สร้างขึ้น (Geometry Enmeshment)

หลังจากการกำหนดรูปร่างของระบบในการฉีดขึ้นแล้วรูปร่างนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นจำนวนของเอลิเมนต์ปริมาตรสำหรับที่จะทำการคำนวณ ข้อสำคัญนั้นจะต้องพิจารณาถึงจุดที่ละเอียดและหยابในการสร้างกริดเพื่อที่จะทำการคำนวณ ความแม่นยำของคำตอบจะสูงถ้ามีการแบ่งปริมาตรที่มีความละเอียด ในการสร้างความละเอียดถ้ายังมีความละเอียดสูงเวลาในการคำนวณก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยโดยทั่วไปแล้วจะต้องทำการสมดุลกันระหว่างความแม่นยำที่ต้องการกับเวลาในการคำนวณ สำหรับในการพิจารณาการจำลองการไหลหนึ่งๆ

#### 3.2.3 วัสดุและการกำหนดปัจจัยในขั้นตอนของกระบวนการ (Material and Process Parameter Definition)

ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดวัสดุและการกำหนดปัจจัยในขั้นตอนของกระบวนการซึ่งเป็นค่าที่ต้องการสำหรับการนำไปใช้ในการหาคำตอบของระบบสมการของการไหลเข้าภายในแม่พิมพ์และขั้นตอนของการบ่มเนื้อยาง ขั้นตอนแรกจะทำการกำหนดค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุในระบบการฉีดทำการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับปริมาตรที่ไม่รู้ค่า เช่น อุณหภูมิเริ่มต้น และการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับตัวไม่รู้ค่า เช่น ความร้อนหรือความดันสำหรับเนื้อยางที่จุดเริ่มต้นของกระบวนการฉีดหรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่หน้าสัมผัสระหว่างวัสดุในกระบวนการฉีด กระบวนการที่สำคัญที่จะต้องใส่เข้าไปจะเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการไหลและการบ่มของระบบการฉีด ตัวอย่าง เวลาในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์, ผลกระทบทั้งหมดของการสมดุลทางความร้อนของแม่พิมพ์ ในการเข้าใจถึงผลของขั้นตอนในการจำลองการไหลของเนื้อยางเข้า

ไปภายในแม่พิมพ์จะต้องรู้และเข้าใจในวัสดุ และปัจจัยของขั้นตอนที่ใช้ในการจำลองการไหลสำหรับเหตุผลที่สำคัญจะต้องใช้ค่าคุณสมบัติทางความร้อนที่ถูกต้องและขั้นตอนในการคิดนั้นจะต้องมีความเป็นไปได้ ถ้าทำได้ดังที่กล่าวมาจะทำให้ได้ผลของการวิเคราะห์การจำลองการไหลได้แม่นยำมากขึ้น

#### 3.2.4 การจำลองการไหลและผลเฉลยของสมการ (Simulation/Solution of the Governing Equations)

ในสมการที่ครอบคลุมทั้งหมดของขั้นตอนของการไหลและการบ่มตัวของเนื้อยางของกระบวนการฉีด จะทำการแบ่งกริดในการคำนวณ ซึ่งเมื่อมีการกำหนดวัสดุและปัจจัยในขั้นตอนต่างๆจะได้มาซึ่งผลคำตอบของตัวแปรที่ไม่รู้ค่าในลักษณะต่างๆที่เกิดขึ้นในเวลาต่างๆกันของการไหลเข้าและการประเมินผลในแต่ละช่วงเวลาของการบ่มเนื้อยาง

#### 3.2.5 การประเมินผลของคำตอบ (Evaluation of the Results)

ผลที่ได้ของการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์หรือการบ่มเนื้อยางโดยการจำลองการไหล ค่าที่ใช้เริ่มต้นได้แก่ อุณหภูมิ, ความดัน และความเร็วคิดในการคำนวณ ในการประเมินผลนั้นเมื่อเสร็จสิ้นการประมวลผลแล้ว จะแสดงให้เห็นโดยสายตาโดยค่าต่างๆจะแสดงในแนวแกนสามมิติโดยจะแสดงค่าที่ได้แยกกันตามค่าที่ต้องการในการประเมินของการจำลองการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ส่วนที่จะต้องคำนึงถึงคือช่องทางการไหลในแต่ละระดับของเนื้อยางที่ไหลเข้าไปในเบ้าจนเต็มแม่พิมพ์ ในการไหลเข้าของเนื้อยางโดยความเร็วที่สูงจะทำให้เกิดการหมุนวนของเนื้อยางซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาที่ตามมากับตัวชิ้นงานได้ เช่น โพรงของอากาศที่บริเวณผิวของชิ้นงาน และช่วงของอุณหภูมิที่กระจายภายในเนื้อยางระหว่างการไหลซึ่งจะเป็นตัวชี้บอกว่าควรที่จะระบายความร้อนที่ตำแหน่งใดและต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิหลังจากการไหลนั้นจะเป็นตัวกำหนดในการบ่มตัวที่จะทำให้เกิดค่าการหดตัว ในการประเมินผลของการจำลองการบ่มเนื้อยาง ในขั้นตอนของการบ่มเนื้อยางที่เกิดขึ้น การทำนายการบ่มนั้นจะพิจารณาถึงขั้นตอนการสุกตัวและการเคลื่อนที่ในตัวชิ้นงานตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดและในการประเมินผลในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันและอัตราการให้ความร้อนซึ่งจะนำไปเป็นข้อมูลในการไหลซ้ำของเนื้อยาง

### 3.3 วิธีการเชิงตัวเลขและการนำไปใช้ในปรากฏการณ์การฉีด (Numerical Methods Application to Injection Rubber Phenomena; Fluid – Dynamics, Thermal Fields)

#### 3.3.1 พื้นฐานสมการอนุรักษ์ที่แสดงปรากฏการณ์ของการไหลของความร้อนและการไหล (Basic Conservation Equations Describing Thermal and Fluid Flow Phenomena)

กฎของการอนุรักษ์ทั่วไปของ มวล โมเมนตัม และ พลังงาน (Mass, Momentum and Energy) จะถูกกำหนดโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์และการบ่มตัวของเนื้อยางหลังการฉีด

ในบริบทของการอนุรักษ์นั้นจะคงความสมดุลของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่กระทบ ในกฎของการอนุรักษ์ที่สำคัญในการพิจารณาอยู่สามกฎดังที่กล่าวมา

กฎของการอนุรักษ์มวลจะนำมาใช้กับปัญหาของการไหลของของไหลโดยผลลัพธ์ในสมการของความต่อเนื่อง (Continuity Equation) การอนุรักษ์โมเมนตัมแสดงโดยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน สามารถนำมาใช้กับปัญหาการไหลของของไหลโดยสมการโมเมนตัม (Momentum Equation) การนำกฎการอนุรักษ์พลังงานมาใช้จะแสดงโดยกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์จะก่อให้เกิดสมการพลังงาน วิธีการนำกฎของการอนุรักษ์ไปใช้ในปริมาตรที่เล็ก (ปริมาตรจำกัด) ซึ่งจะได้จากสมการอนุพันธ์ (Differential Equations)

สำหรับการอนุรักษ์มวลในสามมิตินั้นสมการในตอนเริ่มต้นจะทำการสมดุลกันของเอลิเมนต์ของไหลได้ดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์ของไหล = อัตราสุทธิในการไหลของมวลที่เข้าไปในเอลิเมนต์ของไหล

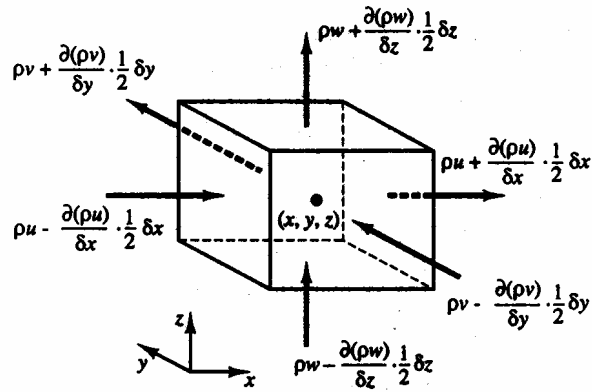
อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์ของไหลแสดงได้ดังสมการที่ 1

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (1)$$

อัตราการไหลที่ผ่านผิวของเอลิเมนต์โดยได้จากรูปที่ 1 จะได้อัตราสุทธิในการไหลของมวลที่เข้าไปในเอลิเมนต์ผ่านขอบเขตได้ดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned} & \left( \rho u - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z - \left( \rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \delta y \delta z + \left( \rho v - \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z \\ & - \left( \rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left( \rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y - \left( \rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y \end{aligned} \quad (2)$$

การไหลในทิศทางที่ไหลเข้าเอลิเมนต์จะทำให้มวลเพิ่มขึ้นจะมีเครื่องหมายเป็นบวกส่วนการไหลที่ไหลออกจากเอลิเมนต์จะให้เครื่องหมายเป็นลบ



**รูปที่ 1** แสดงถึงการไหลเข้าและออกของมวลที่กระทำกับเอลิเมนต์ของไหล

จากสมการที่ 1 นั้นจะเท่ากับสมการที่ 2 ในรูปของผลเฉลยของการสมดุลของมวลโดยย้ายสมการมาอยู่ด้านซ้ายแล้วหารด้วยปริมาตรของเอลิเมนต์  $\Delta x \Delta y \Delta z$  จะได้สมการที่ 3

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

เขียนให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ 4

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (4)$$

ในสมการที่ 4 เรียกว่าการอนุรักษ์มวลในสามมิติ (Three-Dimensional Mass Conservation) หรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) ในเทอมซ้ายมือสุดจะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของความหนาแน่น (Density) (มวลต่อหน่วยปริมาตร) และในเทอมที่สองจะแสดงถึงการไหลสุทธิของมวลที่ออกจากเอลิเมนต์ที่ผ่านขอบเขตและเรียกว่าเทอมของการพา (Convection Term)

สำหรับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) เช่นของเหลวค่าความหนาแน่น  $\rho$  นั้นจะคงที่ สมการที่ 4 เขียนใหม่ได้ดังสมการ 5 และ 6

$$\text{div} \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

สมการโมเมนตัมโดยการใช้กฎข้อที่สองของนิวตันในการเคลื่อนที่โดยการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอนุภาคของไหลจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำกับอนุภาค

อัตราที่เพิ่มขึ้นของโมเมนตัมของอนุภาคของไหล = ผลรวมของแรงที่กระทำกับอนุภาค

ในอัตราการเพิ่มขึ้นของ  $x, y$  และ  $z$  โมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรของอนุภาคของไหลให้ป็นดังสมการ 7

$$\rho \frac{Du}{Dt} , \rho \frac{Dv}{Dt} , \rho \frac{Dw}{Dt} \quad (7)$$

ซึ่งจะจำแนกแรงที่กระทำกับอนุภาคของไหลออกเป็นสองชนิดได้แก่

1) แรงที่กระทำกับผิว (Surface Force)

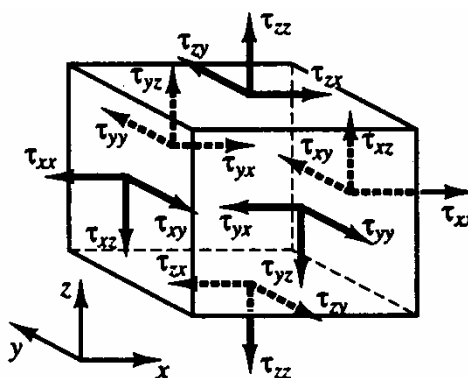
- แรงจากคามดัน (Pressure Force)
- แรงเนื่องจากความหนืด (Viscous Force)
- แรงดึงระหว่างผิว (Surface Force)

2) แรงที่กระทำกับปริมาตร (Body Force)

- แรงโน้มถ่วง (Gravity Force)
- แรงหนีจากศูนย์กลาง (Centrifugal Force)
- แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force)

โดยปกติอนุภาคจะถูกกระทำจากแรงที่บริเวณผิวโดยจะแยกแยะแอมของสมการ โมเมนตัมและจะเพิ่มผลกระทบจากแรงที่กระทำกับปริมาตรอีกแอมหนึ่ง

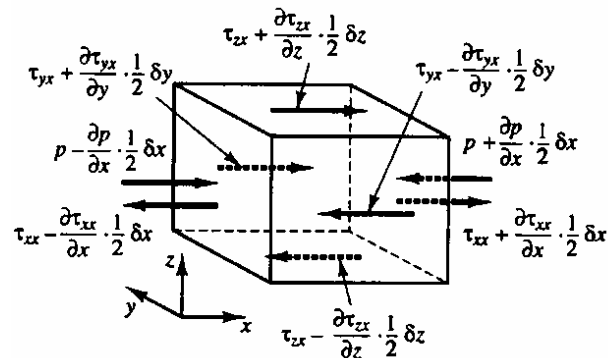
ในสภาวะของความเค้นที่กระทำกับอนุภาคของไหลจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของความดันและองค์ประกอบของความเค้นที่เกิดขึ้นจากความหนืดดังแสดงในรูปที่ 2 ความดันจะเป็นความเค้นในแนวแกนโดยแสดงเป็นตัว  $p$  ความเค้นเนื่องจากความหนืดให้เป็น  $\tau$  และจะกำหนดทิศทางของความเค้นเนื่องจากความหนืดเป็น  $\tau_{ij}$  โดยที่  $i$  แสดงแนวแกนที่เกิดความเค้นในแนวแกนหลักและ  $j$  จะเป็นทิศทางที่เกิดในแนวแกนต่างๆ



**รูปที่ 2** แสดงองค์ประกอบของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของอนุภาคของไหล

พิจารณาในแนวแกน  $x$  ดยแรงที่เกิดจากความดันและความเค้นประกอบซึ่งได้แก่  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$  และ  $\tau_{xz}$  ดังแสดงในรูปที่ 3 ขนาดของผลจากแรงความเค้นที่ผิวโดยได้จากความเค้นและพื้นที่ที่กระทำ โดยให้แรงที่กระทำ

ในทิศทางแกนบวกจะให้เครื่องหมายเป็นบวกและทิศทางที่สวนทางให้เป็นลบ ผลสุทธิของแรงในทิศทาง x โดยการรวมองค์ประกอบของแรงที่กระทำในแต่ละทิศทางของอนุภาคของไหล



**รูปที่ 3** แสดงถึงองค์ประกอบของความเค้นในแนวแกน x

ในการจับคู่กันที่ผิวด้านซ้ายกับขวาจะได้สมการที่ 8

$$\left[ \left( p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) - \left( \tau_{xx} - \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z + \left[ - \left( p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) + \left( \tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \frac{1}{2} \delta x \right) \right] \delta y \delta z = \left( - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \right) \delta x \delta y \delta z \quad (8)$$

แรงที่กระทำในทิศทาง x ในแนวผิวด้านบนกับด้านล่างจะได้สมการที่ 9

$$- \left( \tau_{yx} - \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z + \left( \tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \frac{1}{2} \delta y \right) \delta x \delta z = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \delta x \delta y \delta z \quad (9)$$

แรงที่กระทำในทิศทาง x ในแนวผิวด้านหน้าและด้านหลังจะได้สมการที่ 10

$$- \left( \tau_{zx} - \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y + \left( \tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \frac{1}{2} \delta z \right) \delta x \delta y = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \delta x \delta y \delta z \quad (10)$$

เมื่อรวมแรงต่อหน่วยปริมาตรเข้าด้วยกันทั้งสามสมการ 8, 9 และ 10 และหารด้วยปริมาตร  $\delta x \delta y \delta z$  จะได้สมการที่ 11

$$\frac{\partial (-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (11)$$



และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของแรงที่กระทำกับปริมาตรผลกระทบทั้งหมดจะให้  $S_{Mx}$  ในทิศทางของแกน x โมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา

ในองค์ประกอบของแกน x ของสมการโมเมนตัมโดยจะกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมในแนวแกน x ของอนุภาคของไหลสมการที่ 7 จะเท่ากับผลรวมของแรงในทิศทางแกน x ที่กระทำกับเอลิเมนต์โดยตรงของความเค้นที่ผิวคือสมการที่ 10 บวกกับอัตราในการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมในแกน x ของแรงที่กระทำกับปริมาตรจะได้สมการที่ 12

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (12)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถจะสร้างในทิศทางแนวแกน y โดยจะได้สมการโมเมนตัมดังสมการที่ 13

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (13)$$

แนวแกน z สมการโมเมนตัมจะได้ดังสมการ 14

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (14)$$

ในกรณีของแรงที่กระทำกับปริมาตรที่เป็นแรงโน้มถ่วงเพียงอย่างเดียวจะได้ว่า

$$S_{Mx} = 0, S_{My} = 0 \text{ และ } S_{Mz} = -\rho g$$

และสามารถที่จะเขียนรวมกันได้ในทุกแนวแกนได้ดังสมการ 15

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho u_1 u_i) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho u_2 u_i) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\rho u_3 u_i) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\rho g) + \frac{\partial \tau_{1i}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{2i}}{\partial x_2} + \frac{\partial \tau_{3i}}{\partial x_3} + X_i \end{aligned} \quad (15)$$

ในสมการที่ 15 แรงโน้มถ่วง (g) แสดงในทิศทาง i ในแต่ละแนวแกน ความเค้นสถิต (p) องค์ประกอบของความเค้นเนื่องจากความหนืดในรูปของเทนเซอร์  $\tau_{ij}$ ,  $X_i$  เป็นผลรวมของแรงที่เพิ่มขึ้นมา เช่น แรงจากแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นต้นในแนวแกน i ซึ่งในความเค้นที่เกิดจากความหนืดจะเขียนในรูปของความเร็ว, โดยปกติจะสมมุติให้การจำลองการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์จะเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian Fluid) ทำการเพิ่มความสัมพันธ์แบบนิวโตเนียนเข้าไปในสมการที่ 19 จะได้ทิศทางของโมเมนตัมตามทิศทาง i ดังสมการที่ 16

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho g_i) + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho u_1 u_i) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho u_2 u_i) + \frac{\partial}{\partial x_3}(\rho u_3 u_i) = \\ -\frac{\partial p}{\partial x_i} + (\rho g_i) + \left[ \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_3} \right) \right] + S_i^\mu + S_i^d + X_i \end{aligned} \quad (16)$$

ในสมการที่ 16 ด้านซ้ายจะอยู่ในเทอมแรกจะอยู่ในรูปของการเก็บสะสมของโมเมนตัมและในเทอมของการพาความร้อนส่วนทางขวามือจะอยู่ในรูปของความดัน, แรงโน้มถ่วง, การแพร่ ( $S_i^\mu$ ) และในเทอมของการเคลื่อนที่โดยความเร็วซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบไม่อิสระ ( $S_i^d$ ) และแรงพิเศษ ( $X_i$ ) โดยที่เทอมในการแพร่หลักเขียนในรูปของวิธีการแบบลาปลาซโดยความเร็วคงที่สามารถที่จะเขียนได้ในสมการที่ 17

$$S_i^\mu = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_3} \right) \quad (17)$$

สำหรับปัญหาในการคิด ในเทอมของการแพร่ ( $S_i^\mu$ ) จะต้องนำเอาค่าความหนืดที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิมาพิจารณาด้วย ในเทอมของความเร็วที่เคลื่อนที่ไม่อิสระสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 18

$$S_i^d = \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) \right] \quad (18)$$

ในสมการอนุรักษ์พลังงานจะเป็นการสมดุลกันของผลรวมพลังงานทั้งหมดในปริมาตรจำกัด (Control Volume) ซึ่งจะมาจากกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยที่

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของไหลเท่ากับอัตราสุทธิของความร้อนรวมของอนุภาคของไหลบวก  
อัตราสุทธิต่อของงานที่เกิดจากอนุภาคของไหล

ในอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตรจะได้ดังสมการที่ 19

$$\rho \frac{DE}{Dt} \quad (19)$$

งานที่เกิดจากแรงที่ผิว (Work Done by Surface Force) ในอัตราของงานที่กระทำกับอนุภาคของไหลใน  
เอลิเมนต์โดยแรงที่กระทำที่ผิวจะเกิดจากผลของความเร็วมวลและแรงในทิศทางของแรง ตัวอย่างของแรงในสมการ  
8, 9 และ 10 กระทำในทิศทาง x จะได้งานที่เกิดขึ้นจากแรงได้ดังสมการ 20

$$\left[ \frac{\partial [u(-p + \tau_{xx})]}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (20)$$

ในทำนองเดียวกันกับทิศทาง y และ z จะได้สมการที่ 21 และ 22

$$\left[ \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial [v(-p + \tau_{yy})]}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (21)$$

$$\left[ \frac{\partial (w\tau_{zx})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial [w(-p + \tau_{zz})]}{\partial z} \right] \delta x \delta y \delta z \quad (22)$$

ผลรวมสุทธิของงานต่อปริมาตรที่เกิดจากอนุภาคของไหลทุกแรงที่กระทำกับผิวโดยทำการรวมสมการที่ 20, 21 และ 22 และหารด้วยปริมาตร และในเทอมของความดันสามารถเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ 23

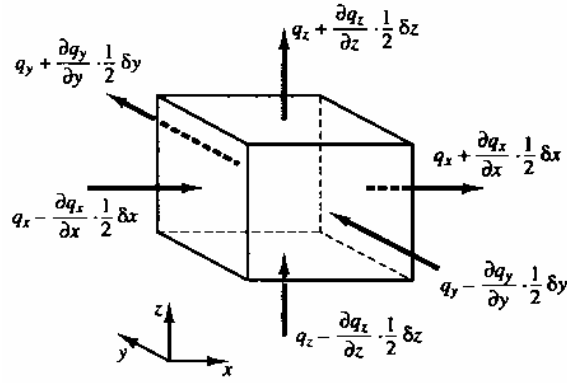
$$-\frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} - \frac{\partial (wp)}{\partial z} = -div(pu) \quad (23)$$

ผลรวมของงานที่กระทำกับอนุภาคของไหลโดยความเค้นที่ผิวสามารถเขียนได้ในสมการที่ 24

$$\begin{aligned} [-div(pu)] + & \left[ \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yy})}{\partial y} \right. \\ & \left. + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (24)$$

### 3.3.2 การไหลของพลังงานที่เกิดจากการนำความร้อน (Energy Flux Due to Heat Conduction)

การไหลของความร้อนโดยเวกเตอร์  $q$  ในองค์ประกอบสามส่วน  $q_x$ ,  $q_y$  และ  $q_z$  ดังแสดงในรูปที่ 4



**รูปที่ 4** แสดงเวกเตอร์การไหลของความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคของไหลโดยการไหลของของไหลในแนวแกน x โดยความแตกต่างระหว่างอัตราของความเร็วที่ไหลผ่านเข้าทางด้านซ้ายและอัตราของความร้อนที่ผ่านออกทางด้านขวาสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 25

$$\left[ \left( q_x - \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \Delta x \right) - \left( q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{1}{2} \Delta x \right) \right] \Delta y \Delta z = - \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (25)$$

ในทำนองเดียวกันในทิศทางของ y และ z จะได้สมการที่ 26 และ 27

$$- \frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (26)$$

$$- \frac{\partial q_z}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (27)$$

ผลรวมของอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นในอนุภาคของไหลต่อหน่วยปริมาตรโดยการไหลของความร้อนผ่านขอบเขตโดยรวมสมการที่ 25, 26 และ 27 จะได้สมการที่ 28

$$- \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} = -\text{div} q \quad (28)$$

กฎของฟูเรียร์ของการนำความร้อนเกี่ยวกับการไหลของความร้อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันเขียนได้ดังสมการที่ 29

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (29)$$

เขียนให้อยู่ในรูปเวกเตอร์จะได้สมการที่ 30

$$q = -kgradT \quad (30)$$

รวมสมการที่ 28 และสมการที่ 30 จะได้อัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนของอนุภาคโดยการนำความร้อนผ่านขอบเขตจะได้สมการที่ 31

$$-divq = div(kgradT) \quad (31)$$

### 3.3.3 สมการพลังงาน (Energy Equation)

พลังงานของของไหลจะเป็นผลรวมของพลังงานภายใน (Internal Energy (  $i$  )) พลังงานการเคลื่อนที่  $\frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)$  และพลังงานศักย์ แต่ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์นั้นจะมีค่าน้อยและพลังงานที่จ่ายให้กับอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา  $S_E$  การอนุรักษ์พลังงานของอนุภาคของไหลโดยการสมดุลของอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหลกับผลรวมของอัตราสุทธิของงานที่กระทำกับอนุภาคของไหลและอัตราสุทธิของความร้อนที่เพิ่มในของไหลและอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงาน โดยได้จากแหล่งจ่าย โดยจะเรียกสมการนี้ว่าสมการพลังงาน (Energy Equation) ดังแสดงในสมการที่ 32

$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} = & -div(pu) + \left[ \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} \right. \\ & \left. + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right] + div(kgradT) + S_E \end{aligned} \quad (32)$$

ในสมการที่ 32 ค่า  $E = i + \frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)$

สามารถที่จะแยกการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของการเคลื่อนที่, พลังงานภายใน  $i$  หรืออุณหภูมิ  $T$  โดยในสมการพลังงานของการเคลื่อนที่สามารถรวมสมการ 12, 13 และ 14 ซึ่งจะได้สมการอนุรักษ์สำหรับพลังงานจลน์ดังสมการที่ 33

$$\begin{aligned} \rho \frac{D\left[\frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)\right]}{Dt} = & -u \cdot gradp + u\left[\frac{\partial\tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z}\right] + v\left[\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} \right. \\ & \left. + \frac{\partial\tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z}\right] + w\left[\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z}\right] + u \cdot S_M \end{aligned} \quad (33)$$

และเขียนในรูปของสมการพลังงานภายในได้ดังสมการที่ 34

$$\rho \frac{Di}{Dt} = -p \operatorname{div} u + \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i \quad (34)$$

โดยที่  $S_i = S_E - u S_M$

ในกรณีของไหลที่อัดตัวไม่ได้  $i = cT$  โดยที่  $c$  คือค่าความจุความร้อนและ  $\operatorname{div} u$  จะได้ค่าเท่ากับศูนย์ สามารถที่จะเขียนสมการ 34 ได้ใหม่เป็นสมการในรูปของอุณหภูมิดังสมการที่ 35

$$\rho c \frac{DT}{Dt} = \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + \tau_{xx} \frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz} \frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz} \frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial w}{\partial z} + S_i \quad (35)$$

เมื่อนำสมการของการอนุรักษ์พลังงานในรูปของอุณหภูมิมายเขียนในรูปของการจืดสามารถที่จะเขียนได้ดังสมการที่ 36

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1}(u_1 \rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_2}(u_2 \rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_3}(u_3 \rho c_p T) = \left[ \frac{\partial}{\partial x_1} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) \right] + \mu \Phi_T + L \frac{\partial f_s}{\partial t} + S_T \quad (36)$$

ค่า  $k$  คือค่าการนำความร้อนโดยที่เทอมที่สองของสมการขวามือเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานภายในของความหนืดที่ค่อยๆลดลง เพราะพลังงานกล (ความเสียดทาน) จะตรงข้ามกับพลังงานภายใน โดยจะมีค่าเป็นบวกเสมอและไม่สามารถย้อนกลับได้ ความหนืดที่ลดลงจะอยู่ในรูปของ Viscosity Times ( $\Phi_T$ ) ได้ดังสมการที่ 37

$$\Phi_T = \left[ \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right)^2 - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right)^2 \quad (37)$$

โดยปกติทั่วไปในแบบจำลองสำหรับการเคลื่อนที่ของผิวอิสระที่เข้าไปภายในแม่พิมพ์จะใช้แบบจำลองของปริมาตรของไหล (Volume-of-Fluid (VOF) Model) โดยแบบจำลอง VOF จะใช้ตัวแปร “F” เป็นตัวกำหนดอัตราส่วนของปริมาตรของไหลภายในเอลิเมนต์ต่อหน่วยปริมาตรของรูปทรงเอลิเมนต์ VOF ในรูปของ  $f$  สามารถเขียนได้จากสมการพลังงานจลน์ดังสมการที่ 38

$$\frac{Df}{Dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + u_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + u_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} + u_3 \frac{\partial f}{\partial x_3} = 0 \quad (38)$$

สมการ VOF ที่อยู่ในตัวแปรของ “f” จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 “f” จะมีค่าเท่ากับ 0.0 สำหรับเอลิเมนต์ที่ว่าง และมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับเอลิเมนต์ที่เต็ม ซึ่งช่วงระหว่าง 0.0 และ 1.0 นั้นเอลิเมนต์จะถูกจัดด้วยผิวอิสระ ตัวอย่างเช่นเมื่อ ที่ f เท่ากับ 0.6 ซึ่งจะมีปริมาตรที่ 60% และจะมีพื้นที่ว่างเหลืออีก 40%

สมการที่ครอบคลุมทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนได้ในสมการที่ 39

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S^\phi \quad (39)$$

เมื่อค่า  $\phi$  คือตัวแปรทั่วไป

ในสมการที่ 39 นั้นจะมีอยู่ด้วยกันสี่เทอมได้แก่

- อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$  ในอนุภาคของไหล
- อัตราสุทธิการไหลของ  $\phi$  ที่ออกจากอนุภาคของไหล
- อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$  โดยการแพร่
- อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$  โดยแหล่งจ่าย

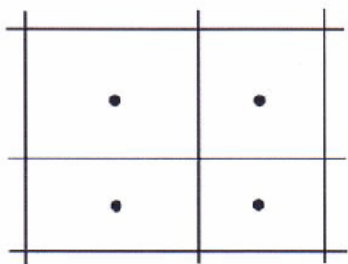
สมการอนุพันธ์ของสมการความต่อเนื่อง, สมการโมเมนตัม, สมการพลังงาน และสมการ VOF แตกต่างกันที่ตัวแปร  $\phi$  ในแต่ละสมการ, สัมประสิทธิ์ของการแพร่  $\Gamma^\phi$  และของแหล่งจ่าย  $S^\phi$  ในตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันของสมการอนุพันธ์

**ตารางที่ 1** แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันในสมการการส่งถ่าย

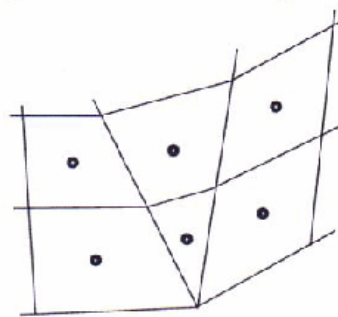
Equation name	$\phi$	$\Gamma^\phi$	$S^\phi$
Continuity	1	0	0
Momentum	$u_i$	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + S_i^\mu + S_i^d + X_i$
Energy	T	$\frac{k}{c_p}$	$\frac{1}{c_p} \left( \mu \Phi_T + L \frac{\partial f_s}{\partial t} + S_T \right)$
Volume fraction (VOF)	$\frac{f}{\rho}$	0	0

### 3.3.4 วิธีการปริมาตรควบคุม (Control Volume Approach)

จากสมการอนุพันธ์ย่อยที่กล่าวมานั้นจะเป็นสมการในรูปแบบที่ต่อเนื่องในการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ นั้นจะสามารถที่จะหาได้โดยวิธีการปริมาตรจำกัดซึ่งจะทำการแปลงสมการในรูปแบบต่อเนื่องให้อยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่องในรูปของสมการเชิงพีชคณิต (Algebraic Equation) ซึ่งวิธีการปริมาตรจำกัดจะแสดงวิธีในการทำการแบบไม่ต่อเนื่องค่าตัวแปรในระบบสมการควบคุมการไหลโดยใช้หลักการของปัญหาเป็นปริมาตรเล็กๆ โดยที่ตัวแปรที่จะทำการคำนวณจะถูกเก็บค่าอยู่ที่จุดศูนย์กลางของแต่ละปริมาตรจำกัดย่อยๆ ที่ได้ทำการแบ่งไว้โดยค่าของปัจจัยที่มีผลกระทบต่างๆ จะถูกทำการเฉลี่ยค่าการคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ จะอาศัยหลักของความสมดุลของปัจจัยที่มีผลกระทบที่ถ่ายเทเข้าและออกจากปริมาตรจำกัดหนึ่งๆ ทำให้การคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ เป็นไปตามหลักทางฟิสิกส์คือมีการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมภายในปริมาตรจำกัดหนึ่งๆ รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการสร้างกริดในรูปที่ 5a เป็นการสร้างกริดแบบพิกัด (Cartesian Grid) และ 5b เป็นการสร้างกริดแบบเข้ารูป (Body-Fitted Grid)



**รูปที่ 5a** การสร้างกริดแบบพิกัด  
(Cartesian Grid)



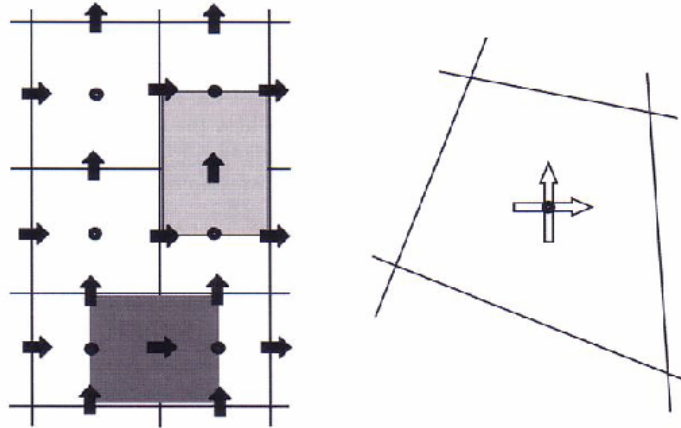
**รูปที่ 5b** การสร้างกริดแบบเข้ารูป  
(Body-Fitted Grid)

ในการสร้างกริดโดยทั่วไปนั้นที่นิยมใช้ในวิธีปริมาตรจำกัดนั้นมีอยู่ด้วยกันสองวิธีคือการสร้างกริดแบบพิกัดฉากและการสร้างแบบเข้ารูปข้อดีของการสร้างกริดแบบพิกัดฉากคือจะทำให้ง่ายต่อการคำนวณและไม่ซับซ้อนเช่นการสร้างกริดสำหรับการไหลผ่านทางวิ่งที่เป็นสี่เหลี่ยมและข้อดีของการสร้างกริดแบบเข้ารูปจะช่วยให้การลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าในบริเวณขอบเขตต่างๆ ที่เป็นส่วนโค้งของกระบวนการสร้างกริดแบบพิกัดฉาก

ส่วนในการเลือกลักษณะการไหลของปัจจัยที่มีผลกระทบจะแบ่งออกได้เป็นสองวิธีวิธีแรกจะเป็นการจัดเตรียมแนวของกริดในแนวแกนพิกัดฉากซึ่งลักษณะของปัจจัยที่มากกระทบจะกระทำที่บริเวณด้านข้างและแบบวิธีการเข้าใกล้จุดศูนย์กลางซึ่งจะใช้กับการสร้างกริดแบบเข้ารูป ซึ่งในรูปที่ 6 จะแสดงให้เห็นการเก็บค่าของปัจจัยที่มากกระทบของทั้งสองวิธีสำหรับรูปที่ 6a เป็นการวางกริดแบบพิกัดฉากและปัจจัยที่มากกระทบจะเป็นแบบสเกลาร์ ซึ่งได้ค่า ความดันสถิต, อุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งจะทำการเฉลี่ยค่าไว้ที่จุดกลางของเอลิเมนต์ซึ่งส่วนประกอบของความเร็วจะถูกเก็บไว้ที่ผิวหน้าของเอลิเมนต์และจะถูกส่งถ่ายไปดังแสดงให้เห็นดังรูปซึ่งจะเรียกว่า

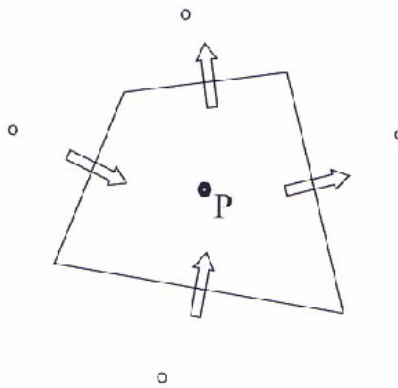


ปริมาตรจำกัดสำหรับองค์ประกอบความเร็ว ในรูปที่ 6b จะแสดงให้เห็นตัวแปรที่เก็บไว้คู่ของความเร็วและความดันของของไหลซึ่งจะใช้เอลิเมนต์ในปริมาตรการควบคุมสำหรับทุกค่าตัวแปร



**รูปที่ 6 a, b** แสดงการเก็บค่าของตัวแปร

ในรูปแบบเฉพาะของปริมาตรจำกัดดังแสดงในรูปที่ 7 จะแสดงค่าตัวแปรที่ไม่รู้โดยจะแสดงค่าอยู่ในตำแหน่งลูกน้ำที่จุดศูนย์กลาง และที่ปริมาตรจำกัดรอบข้างจะแสดงที่จุดวงกลมเช่นเดียวกัน ส่วนลูกศรจะแสดงถึงผลของจุดที่อยู่รอบข้างที่กระทำบนผิวของปริมาตรจำกัดซึ่งจะคำนวณ โดยลักษณะของการไหลเข้าและออก



**รูปที่ 7** แสดงรูปแบบเฉพาะของเอลิเมนต์ในวิธีปริมาตรจำกัด

วิธีการปริมาตรจำกัดจะมีอยู่ด้วยกันสองขั้นตอนในขั้นตอนที่หนึ่งจะใช้สมการการส่งถ่ายเฉพาะในสมการที่ 39 โดยจะทำการอินทิเกรตรอบปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 7 โดยทำการอินทิเกรตสมการที่ 39 ค่า  $\phi$  จะเป็นตัวแปรของการไหลจะได้สมการที่ 40

$$\begin{aligned} \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dt dV_p + \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j \phi) dt dV_p = \\ \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dt dV_p + \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} S^\phi dt dV_p \end{aligned} \quad (40)$$

จากสมการที่ 40 ใช้วิธีของเกาส์ไดเวอร์เจนจากการอินทิเกรตเป็นการอินทิเกรตที่ผิวจะได้สมการที่ 41

$$\begin{aligned} \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} \frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) dt dV_p + \int_{\Omega_p} \int_t^{t+\delta t} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u} \cdot \bar{n}) dt d\Omega_p = \\ \int_{\Omega_p} \int_t^{t+\delta t} (\Gamma^\phi \nabla \phi) \cdot \bar{n} dt d\Omega_p + \int_{V_p} \int_t^{t+\delta t} S^\phi dt dV_p \end{aligned} \quad (41)$$

ค่า  $V^p$  และ  $\Omega^p$  ในสมการ 41 แสดงถึงค่าของปริมาตรจำกัดที่จุดศูนย์กลาง P

ในขั้นตอนที่หนึ่งจะใช้วิธีการอินทิเกรตค่ากลาง (Generalized Mean Value of Integration Theorem (GMVIT)) โดยวิธีการนี้จะคำนวณจากสมการที่ 41 ในการนำสมการ GMUIT ไปใช้ในตอนแรกจะทำการเพิ่มตำแหน่งที่ไม่รู้ค่าในจุดที่จะทำการอินทิเกรต (ในตำแหน่งของลูกศรของรูป 7) ในขั้นตอนที่สองนั้นค่าที่ไม่รู้ที่จุดจะทำการอินทิเกรตที่ตำแหน่งตรงกลางของปริมาตรควบคุม

ในปัญหาทางฟิสิกส์ของการไหลนั้นจะใช้สมการเชิงอนุพันธ์หลายสมการ (กฎการอนุรักษ์) สมการที่จะใช้หาคำตอบนั้นได้แก่ สมการโมเมนตัม รวมทั้งหมดสามสมการในแนวแกนสามแกน, สมการพลังงาน และสมการ VOF ซึ่งค่าตัวแปรที่ไม่รู้ค่าของสมการทั้งหมดนั้นจะแยกได้เป็นสมการโมเมนตัมซึ่งจะไม่รู้ค่าของความเร็ว และความดันสถิต สมการพลังงานคือค่าของอุณหภูมิ และสมการ VOF คือองค์ประกอบของ  $f$  ที่ไม่รู้ค่าซึ่งเราจะมีสมการอยู่ห้าสมการแต่มีตัวแปรที่ไม่รู้ค่าอยู่หกแต่ยังมีสมการของความต่อเนื่อง (การอนุรักษ์มวล) แต่สมการความต่อเนื่องจะประกอบด้วยความเร็วเท่านั้นและต้องใช้สมการโมเมนตัมในสมการสำหรับส่วนประกอบความเร็วสำหรับการไหลที่อัดตัวไม่ได้ จะทำการจัดรูปสมการใหม่สำหรับสมการความต่อเนื่องสำหรับความดันสามารถทำได้ดังนี้คือการอินทิเกรตสมการต่อเนื่องตลอดสมการทั้งปริมาตรสเกลาร์ของปริมาตรจำกัดจะได้สมการที่ 42

$$\sum_e m_e = 0 \quad (42)$$

โดยที่ผลรวมของตลอดผิวหน้า (ตำแหน่ง “e”) ของปริมาตรสเกลาร์ของปริมาตรจำกัด

อัตราการไหลที่ผ่าน “e” ผิวหน้าของปริมาตรควบคุมจะมีความสัมพันธ์กับการอนุรักษ์มวลกับความเร็วดังสมการที่ 43

$$m_e = \int_{\Omega_p} \rho \bar{u} \cdot \bar{n} d\Omega_p \quad (43)$$

สามารถเขียนสมการโมเมนต์ที่ตำแหน่ง “e” ของผิวปริมาตรจำกัดแบบสเกลาร์จะได้ดังสมการที่ 44

$$u_{i,e} = \frac{1}{a_e^{u_i}} \left[ \sum_{nb} a_{nb}^{u_i} u_{i,nb} + \left( \frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_e + S_e^{u_i} \right] \quad (44)$$

ในสมการที่ 44 จะเป็นความแตกต่างของความดันบนผิวหน้า “e” ของปริมาตรควบคุม ความแตกต่างกันของความดันระหว่างความดันสถิตในผิวของเอลิเมนต์ของผิวหน้า “e” นำไปแทนในสมการที่ 43 และในสมการ 44 และแทนที่องค์ประกอบความเร็วในรูปเวกเตอร์โดยที่สมการโมเมนต์ที่ผิวหน้าในสมการที่ 44 ค่าที่ไม่รู้คือความดันทำการเคลื่อน ทำการเคลื่อนความแตกต่างของความดันไปทางซ้ายของสมการ จะได้ผลของสมการที่อยู่ในรูปของความดันสถิตย์ (หรือความดันที่เปลี่ยนแปลง) เป็นตัวไม่รู้ค่าดังสมการ 45

$$a_p^p P_p = \sum_{nb} a_{nb}^p P_{nb} + S_p^p \quad (45)$$

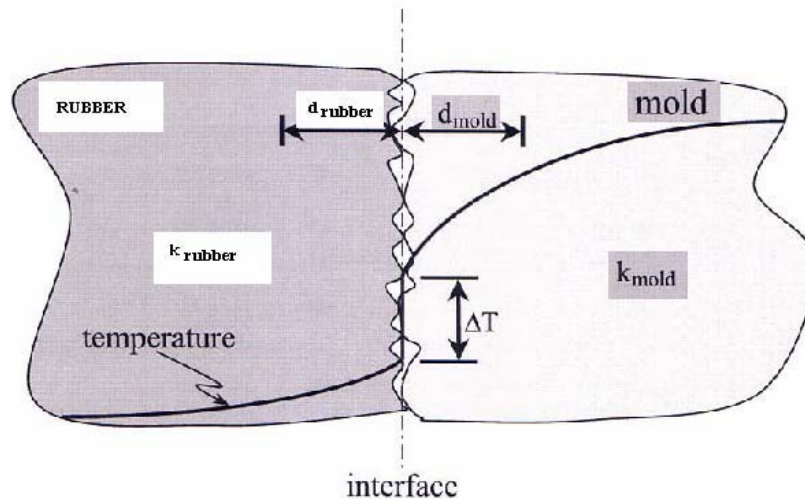
เมื่อรวมสมการความดันเข้าไปก็จะมีจำนวนสมการเป็นหกสมการเท่ากับตัวแปรที่รู้ค่า

### 3.3.5 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermophysical Properties)

ก่อนที่จะหาคำตอบของสมการที่ครอบคลุมการไหลและการเย็นตัวสิ่งที่สำคัญคือค่าของคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่มีอยู่ สำหรับการคำนวณขอบเขตของอุณหภูมิในระบบการฉีดนั้นข้อมูลที่ต้องการนั้นได้แก่ ความหนาแน่น (Densities) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacities) และค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivities) ทั้งหมดของวัสดุในระบบของการฉีดเช่น เนื้อยางและแม่พิมพ์ เป็นต้น ที่จะนำเพิ่มเข้าไปและค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวของเนื้อยางในการคำนวณความเร็วและความดันระหว่างการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ของเนื้อยาง ค่าความหนืดของเนื้อยางซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของอุณหภูมิและที่สำคัญคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิที่จะต้องพิจารณาขึ้นงานขณะจำลองการไหล สำหรับวัสดุที่เป็นนอนนิวโตเนียนรีโอโลยี ค่าของความหนืดจะเป็นองค์ประกอบของอัตราการเฉือน

### 3.3.6 การถ่ายเทความร้อนระหว่างวัตถุ (The Heat Transfer between Materials)

ภายในแม่พิมพ์นั้นหลังจากกระบวนการฉีดได้เริ่มขึ้นจะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นของวัตถุอยู่ภายในระบบคือจะมีการถ่ายเทจากที่อุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิต่ำ เช่น จากแม่พิมพ์ไปที่ตัวเนื้อยาง เป็นต้น การสัมผัสกันระหว่างวัตถุสองชนิดนั้นจะมีช่วงการลดลงของอุณหภูมิที่ผ่านผิวหน้าสัมผัสกลไกการถ่ายเทความร้อนบริเวณหน้าสัมผัสของวัตถุเกิดอยู่สองแบบคือการพาความร้อนผ่านช่องอากาศเล็กๆ ไปยังเนื้อยางและการแผ่รังสีข้ามช่องอากาศเนื่องจากความแตกต่างกันของอุณหภูมิของวัตถุทั้งสองโดยปกติจะเรียกความต้านทานของการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (HTC) ระหว่างวัตถุดังแสดงในรูปที่ 8



**รูปที่ 8** แสดงถึงความแตกต่างกันของอุณหภูมิของแม่พิมพ์กับเนื้อยาง

ตัวอย่างของการสัมผัสกันของสองวัสดุที่มีการถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของเนื้อยางกับแม่พิมพ์ ซึ่งผลรวมของความต้านทานของการถ่ายเทความร้อนระหว่างตำแหน่งจากแม่พิมพ์จากแม่พิมพ์ไปยังเนื้อยางแสดงได้ดังสมการที่ 46

$$R_{total} = \left[ \frac{d_{rubber}}{k_{rubber}} + \frac{1}{h_{interface}} + \frac{d_{mould}}{k_{mould}} \right] \quad (46)$$

โดยที่  $h_{interface}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณหน้าสัมผัส  
 $d_{rubber}$  และ  $d_{Mold}$  คือ ระยะทางภายในเนื้อยางและแม่พิมพ์ในทิศทางหน้าสัมผัส  
 $k_{rubber}$  และ  $k_{Mold}$  คือ ค่าการนำความร้อนของยางและแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 8

### 3.4 คุณสมบัติพื้นฐานของยาง

อีลาสโตเมอร์ (Elastomers) เป็นโพลิเมอร์แบบอสัณฐาน (Amorphous Polymers) โดยมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ (3D Network) มีสายโมเลกุลยาวซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะทางเคมี และสามารถดูดซับสารละลายได้ดี แต่ไม่สามารถขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้ด้วยการให้ความร้อน มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นดี ทนต่อแรงขัดสี หลังจากการเติมสารเคมีต่างๆ เข้าไปผสมกับอีลาสโตเมอร์ จะได้สิ่งที่เรียกว่า คอมพาวนด์ (Compound) และเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนและกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) แล้วจะได้สิ่งที่เรียกว่า ยาง (Rubber) (Gent, 2001) นอกจากนั้นยังสามารถนิยามความหมายของอีลาสโตเมอร์และยางตามมาตรฐานของ ASTM (ASTM, 1999) ได้ดังนี้

“อีลาสโตเมอร์สามารถนิยามได้ว่า วัสดุที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยที่อุณหภูมิห้องทั้งรูปร่างและขนาดสามารถคืนตัวได้หลังจากนำแรงที่มากระทำออก ส่วนยางก็สามารถนิยามได้ด้วยมาตรฐานเดียวกัน คือ วัสดุที่สามารถคืนตัวจากการเสียรูปได้อย่างรวดเร็วและแรง และสามารถปรับปรุงสภาพได้แม้ว่าโดยพื้นฐานแล้วจะไม่

สามารถละลาย (แต่สามารถเกิดการบวมได้) ได้ในสารละลายที่เคื่อง เช่น เบนซีน (Benzene) เมทิล เอทิลคีโตน (Methyl Ethylketone) หรือ เอทานอล-โทลูอิน อะเซโอโทรป (Ethanol-toluene Azeotrope) ยางในสถานะที่แปรสภาพแล้ว ซึ่งปราศจากการเจือจาง จะหดตัวเหลือเพียงไม่ถึง 1.5 เท่าของความยาวเริ่มต้นภายในเวลาหนึ่งนาที่ หลังจากได้รับการยืดออกเป็นสองเท่าที่อุณหภูมิห้อง และคงตัวเอาไว้หนึ่งนาที่ก่อนที่จะปล่อย” (ASTM, 1999)

#### 3.4.1 ชนิดของยาง

องค์ความรู้เรื่องของยางนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลักๆ [22] ได้แก่ การผลิตยางดิบ (Raw Rubber) และการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber Product) ในส่วนของยางดิบนั้นสามารถแบ่งยางดิบออกได้เป็นสองประเภทคือ ยางดิบที่ได้มาจากต้นพืชเรียกว่ายางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) และยางดิบที่ได้จากการสังเคราะห์โดยกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เรียกว่ายางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber, SR) ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์อาจอยู่ในรูปของยางแห้ง (Dry Rubber) หรือน้ำยาง (Latex) ก็ได้ สำหรับในส่วนของการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางนั้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ยางออกได้เป็นสองกลุ่มตามลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้ คือ กลุ่มผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบที่เป็นยางแห้งและกลุ่มผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบที่เป็นน้ำยาง

ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ต่างก็มีคุณสมบัติเด่นที่แตกต่างกัน เช่น ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ที่สูงมากโดยไม่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงอันเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือ เป็นต้น ส่วนยางสังเคราะห์นั้นมีมากมายหลายชนิด ซึ่งยางสังเคราะห์ในแต่ละชนิดนั้นจะมีความแตกต่างกันไป เช่น ยางบิวตาไดอิน (BR) ที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความต้านทานต่อการขีดถูหรือยางไนไตรล์ (NBR) ที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความต้านทานต่อน้ำมัน เป็นต้น

เนื่องจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์แต่ละชนิดต่างก็มีข้อดีข้อด้อยที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทจึงจำเป็นต้องนำยางมากกว่าหนึ่งชนิดมาผสมกันเพื่อให้ยางผสมที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ในการเลือกชนิดของยางที่จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ใดๆ ได้อย่างเหมาะสมนั้น ผู้ผลิตจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจในคุณสมบัติของยางแต่ละชนิดโดยละเอียด นอกจากนี้ผู้ผลิตยังต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องร่วมด้วย เช่น ความยากง่ายในด้านกระบวนการการผลิต (Processability) ของยางที่จะเลือกใช้ ราคาต้นทุนของการผลิต รวมถึงความยากง่ายในการจัดหาวัตถุดิบ

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางนั้นจะมีพื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารต่างๆ ดังนี้

ยาง	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ยางธรรมชาติ</li> <li>2. ยางสังเคราะห์</li> <li>3. ยางรีแคลม</li> </ol>
สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanising Agent)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ซัลเฟอร์</li> <li>2. สารอื่นๆ (ขึ้นอยู่กับชนิดของยางที่ใช้)</li> </ol>
สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerator)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. พวกช่วยให้เกิดปฏิกิริยาช้า</li> <li>2. พวกช่วยให้เกิดปฏิกิริยาปานกลาง</li> <li>3. พวกช่วยให้เกิดปฏิกิริยาเร็ว</li> </ol>
สารกระตุ้นสารเร่ง (Activator)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. พวกอินทรีย์สาร</li> <li>2. พวกอนินทรีย์สาร</li> </ol>
สารเพิ่ม (Filler)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เขม่าดำ <ul style="list-style-type: none"> <li>- ช่วยเพิ่มความแข็งแรง</li> <li>- ไม่เพิ่มความแข็งแรง</li> </ul> </li> <li>2. พวกสีไม่ดำ <ul style="list-style-type: none"> <li>- ช่วยเพิ่มความแข็งแรง</li> <li>- ไม่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง</li> </ul> </li> <li>3. Extender</li> </ol>
สารช่วยในกรรมวิธีการผลิต (Processing Aids)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. พวกช่วยฉีกขาดโมเลกุลยาง</li> <li>2. พวกช่วยหล่อลื่นในโมเลกุลยาง</li> <li>3. พวกช่วยให้คุณสมบัติเหนียวติดกันดีขึ้น</li> </ol>
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Age - Resistors)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Staining</li> <li>2. Non - Staining</li> <li>3. ต้านทานการแตก</li> </ol>
สารอื่นๆ	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ช่วยฉีกขาดโมเลกุล</li> <li>2. ช่วยให้ยางแข็ง</li> <li>3. ไม่ติดเปลวไฟ</li> <li>4. พวกสีต่างๆ</li> <li>5. ช่วยให้เกิดความเหนียวติด</li> <li>6. ช่วยให้เกิดฟอง</li> <li>7. ช่วยการเชื่อมต่อ</li> <li>8. ช่วยระงับกลิ่น</li> </ol>

### 3.5 รีโอโลยีของยาง (Rubber Rheology)

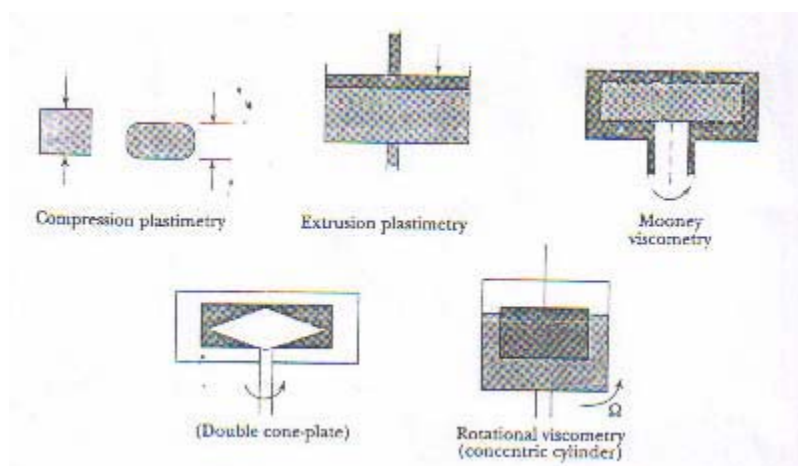
รีโอโลยีเป็นการศึกษาลักษณะการไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุโดยจะหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดและเวลาในการศึกษารีโอโลยีของยางนั้นจะศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิ และการเพิ่มองค์ประกอบต่างๆ เข้าไปแต่เนื่องจากยางนั้นจะมีคุณสมบัติที่เป็นทั้งของเหลวและเป็นของแข็งเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น (ดังนั้นต้องศึกษาพฤติกรรมรวมทั้งคู่ของความหนืดและความยืดหยุ่น) ในการศึกษารีโอโลยีของยาง เช่น การศึกษาอัตราการไหลภายใต้ข้อกำหนดต่าง ๆ ของความเค้น อุณหภูมิ และเวลา ในการศึกษารีโอโลยีของยางจะศึกษาความสัมพันธ์ ของตัวแปร 4 ตัว ที่สำคัญคือ เวลา อุณหภูมิ ความเค้นและความเครียด ซึ่งจะสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ขึ้นมาได้ นิยมเรียกว่า สมการ “Rheology Equation of State” หรือ “Constitutive Equation”

ในการศึกษารีโอโลยีของยางยังมีคุณสมบัติที่สำคัญของยางที่ต้องศึกษาดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

#### 3.5.1 ความหนืด (Viscosity)

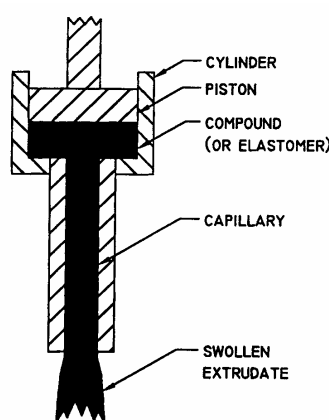
สมบัติความหนืดของยางเป็นสมบัติพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตมากการเลือกยางที่มีความหนืดอย่างถูกต้องจะทำให้การบดและการขึ้นรูปยางถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ความหนืดของยางมักวัดด้วยเครื่อง Viscometer อ่านค่าเป็น Mooney Viscosity ML (1+4) 100°C (M = Mooney, L = Large Rotor, 1 = Pre-Heat Time (min), 4 = ระยะเวลาการหมุนโรเตอร์ min, ที่อุณหภูมิ 100°C) ยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีค่าความหนืดประมาณ 50 ถ้าต้องการสูตรยางที่บดผสมง่าย เช่น สูตรยางที่ใช้สารตัวเติม (Filler) ปริมาณมาก หรือสูตรยางฟองน้ำที่ต้องการการพองตัวที่สม่ำเสมอ ควรใช้ยางที่มีความหนืดประมาณ 30 และในทางตรงกันข้ามควรใช้ยางที่มีความหนืดมากประมาณ 100 สำหรับสูตรยางที่ผสมน้ำมันเพื่อการลดต้นทุน หรือสำหรับสูตรยางที่ต้องการความแข็งแรงของยางที่ยังไม่คงรูป (Green Strength of Unvulcanised Rubber)

ยางธรรมชาติที่ผลิตโดยทั่วไปมีค่า Mooney Viscosity ประมาณ 90 ซึ่งค่อนข้างจะสูงเกินกว่าที่จะสามารถนำไปบดผสมโดยตรงนอกจากจะเป็นยางที่ได้ทำการผสมน้ำมันมาแล้วโดยปกติจะต้องทำการลดความหนืดของยางธรรมชาติโดยการใช้เครื่องบด (Mechanical Working) ซึ่งเป็นการทำให้ยางนิ่ม (Mastication) ก่อนที่จะผสมสารต่างๆ ประสิทธิภาพการทำให้ยางนิ่มอาจใช้สารพวกทำให้ยางนิ่มนอกจากนี้อาจจะเลือกใช้ยางธรรมชาติชนิดที่มีค่าความหนืดเสถียร (Viscosity-Stabilised Grade of CV Rubber) และมีค่าความหนืด 55-65 ซึ่งไม่จำเป็นต้องบดยางให้นิ่มก่อน และเพื่อให้การขึ้นรูปสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้



**รูปที่ 9** การทดสอบหาค่าความหนืดในรูปแบบต่างๆ

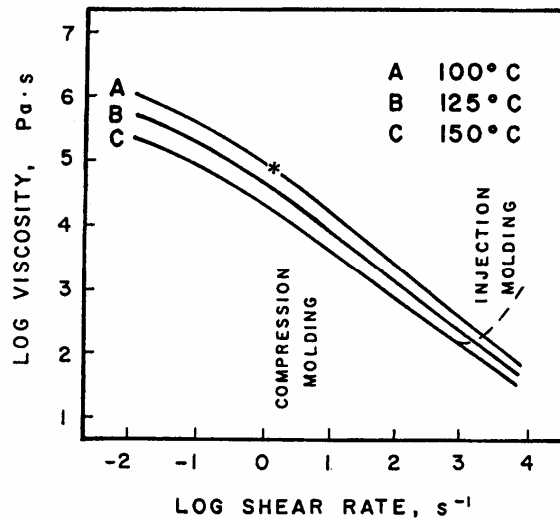
จากรูปที่ 9 จะแสดงถึงการวัดค่าความหนืดในลักษณะต่างๆ กันแต่การทดสอบค่าความหนืดที่จะใช้สำหรับการไหลของเนื้อยางจะเป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องคาปิลารีวิสโคมิเตอร์ (Capillary Viscometers) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 9 หลักการทำงานของเครื่องจะใช้ความดันดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ของไหลที่มีความหนืดมากต้องใช้ความดันมากในการดันให้ของไหลไหลผ่านท่อคาปิลารี ความหนืดจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกลับอัตราส่วนของความดันต่ออัตราการไหล



**รูปที่ 10** แสดงส่วนประกอบต่างๆและการทำงานของเครื่องคาปิลารีวิสโคมิเตอร์

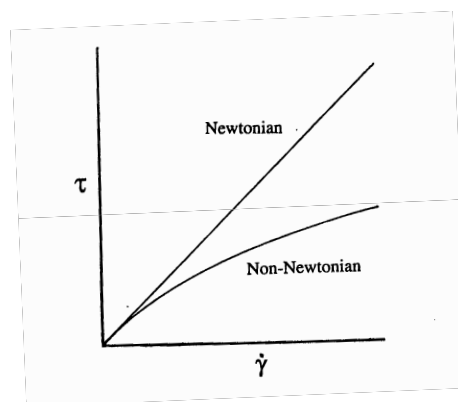
ในการใช้เครื่องคาปิลารีวิสโคมิเตอร์ในการทดสอบนั้นสามารถที่จะปรับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด และความยาว ในช่วงความดันที่แตกต่างกันและอุณหภูมิได้โดยในการทดสอบสามารถที่จะควบคุมปัจจัยต่างๆนี้ได้โดยทั้งไปจะทำการทดสอบค่าความหนืดให้ขึ้นอยู่กับอัตราเนื้อดังที่แสดงในรูปที่ 11 จะเป็นการทดสอบค่าความหนืดของเนื้อยางที่มีความหนืดสูงที่อัตราเนื้อต่างๆในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ





**รูปที่ 11** แสดงการทดสอบค่าความหนืดของเนื้อยางที่มีความหนืดสูงที่อัตราเฉือนต่างๆในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับอัตราเฉือนได้ซึ่งจะบอกลักษณะของไหลว่าเป็นแบบนิวโตเนียนหรือแบบนอนนิวโตเนียนดังแสดงในรูปที่ 12



**รูปที่ 12** แสดงการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนและอัตราเฉือนของไหลแบบนิวโตเนียนและแบบนอนนิวโตเนียน

### 3.5.2 ความเครียดเฉือน (Shear Strain)

กรณีที่วัสดุเคลื่อนที่แบบลามินาร์ซึ่งวัสดุมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันในระหว่างชั้นบางที่ขนานกันในการกำหนดความเครียดเฉือน โดยพิจารณาว่าที่เวลา  $t$  อนุภาคที่ตำแหน่ง  $x$  จะมีการเคลื่อนที่ออกไปจากเดิม (ตำแหน่งเมื่อเวลา  $t = 0$ ) ไปทางขวามือเป็นระยะทาง  $U(x,t)$  เมื่อ  $x$  เป็นระยะห่างจากตำแหน่งที่อยู่นิ่ง ( $x=0$ ) ในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่

ความเครียดเฉือน  $\tau(x,t)$  กำหนดด้วยความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1

$$\tau(x,t) = \frac{dU(x,t)}{dx} \quad (47)$$

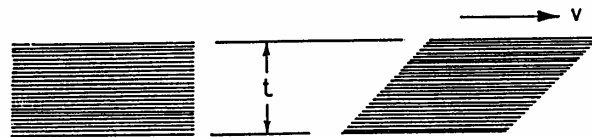
ค่าความเครียดเฉือนนี้จะไม่ขึ้นกับระยะการเคลื่อนที่  $U(x,t)$  โดยตรงแต่ขึ้นกับอัตราของผลต่างการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นที่ติดกันของการเคลื่อนที่แบบลามินาร์กับระยะห่างระหว่างชั้น จึงเป็นที่แน่นอนว่าความเครียดเฉือน  $\tau(x,t)$  โดยทั่วไปอาจจะขึ้นกับเวลาและระดับชั้นที่พิจารณาด้วย

### 3.5.3 อัตราเฉือน (Shear Rate)

อัตราเฉือนเป็นอัตราความเครียดเฉือนในหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งความสัมพันธ์ได้เป็นดังสมการที่ 48

$$\dot{\gamma} = \frac{d\tau}{dt} (s^{-1}) \quad (48)$$

หรือสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13



$$\text{SHEAR RATE} = \frac{v}{t} = \frac{\text{mm/s}}{\text{mm}} = s^{-1}$$

**รูปที่ 13** แสดงถึงอัตราเฉือนโดยจะขึ้นอยู่กับความเร็วและความหนา

### 3.5.4 การคืนตัวของยางดิบ (Nerve)

การคืนตัวของยางดิบ คือ ลักษณะที่ยางดิบซึ่งยังไม่ได้ทำให้คงรูปมีสมบัติคืนตัวได้มาก (High Elastic Recovery on Deformation) ยางดิบที่มีการคืนตัวสูงจะบดผสมกับสารเคมีได้ยากขณะการบดบนลูกกลิ้งจะติดจากผิวหน้าลูกกลิ้งและพันรอบลูกกลิ้งได้ยากซึ่งจำเป็นต้องลดการคืนตัวให้อยู่ในระดับที่จะทำการบดผสมได้ และเพื่อให้การขึ้นรูปสามารถควบคุมขนาดของชิ้นงานได้

สามารถทำให้การคืนตัวของยางดิบลดลงได้โดยวิธีต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยางการลดความคืนตัวของยางดิบ เช่น การบดให้ยางนิ่ม การเพิ่มสารตัวเติม การเลือกชนิดสารตัวเติม (เช่น ใช้เขม่าดำที่มีโครงสร้างสูง แทนการใช้ชนิดที่มีโครงสร้างธรรมดา) ใช้สารพวก Mineral Rubber หรือ แฟกทิส (Factice) หรืออาจใช้ยางที่ได้มีการคงรูปบ้างแล้ว (Partially Crosslinked) ผสม

### 3.5.5 ความแข็งและโมดูลัส (Hardness and Modulus)

ในการทำผลิตภัณฑ์ยางความแข็งของยางมักจะเป็นสมบัติแรกที่สำคัญที่สุดที่ต้องการทราบการวัดความแข็งเป็นการวัดโมดูลัสที่แรงยืดเพียงเล็กน้อย (Low Strains) การวัดที่เป็นมาตรฐาน คือ วัดเป็น IRHD (International Rubber Hardness Degree) และ Shore Hardness ซึ่งแบ่งเป็น A, B, C, D และ O

ค่าความแข็งโดยทั่วไปในระบบ IRHD และ Shore A จะใกล้เคียงกันในระบบ Shore Hardness แบ่งเป็นระดับต่างๆ เพื่อการวัดยางที่มีความแข็งช่วงต่างๆ กัน A – สำหรับยางที่มีความแข็งปกติ B – สำหรับยางที่มีความแข็งพิเศษ เช่น ยางลูกกลิ้งพิมพ์ดีด C – สำหรับยางที่แข็งมาก เช่น เปลือกลูกกอล์ฟ สันรองเท้า D – สำหรับยางที่แข็งจนเปราะ และ O – สำหรับยางพองน้ำ

ความแข็งของยางที่ยืดหยุ่นโดยทั่วไปจะประมาณ 35-75 IRHD ผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการนิ่ม เช่น ยางลบ ดินสอ ถุงมือ ลูกโป่ง ยางรัดของ และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแข็ง เช่น ยางรถยนต์ พื้นรองเท้า และยางลบหมึก เป็นต้น

ผู้ออกสูตรยางส่วนใหญ่นอกจากจะสนใจวัดโมดูลัสที่ Low Strain แล้วยังสนใจที่จะวัดโมดูลัสที่ Higher Strain ซึ่งจะระบุไม่เป็น True Modulus แต่จะระบุเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ที่ใช้ยืดยางออกความยาวที่กำหนด เช่น 100, 300, 500% ของความยาวเดิม เป็นต้น สารต่างๆ ที่ทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มก็จะทำให้ยางมีโมดูลัสเพิ่มด้วย ปกติความแข็งและโมดูลัสของยางขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ชนิดของยาง และสามารถทำให้เพิ่ม โดยการใส่สารตัวเติมพวกช่วยเสริมความแข็งแรงให้ยาง หรือใช้สารระบบการคงรูปเป็นพวก Resin เช่น Phenolic Resin สารเรซินพวกไม่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น High-Styrene Resin เมื่อใช้กับสูตรยางธรรมชาติ และสูตรยางเอสบีอาร์ จะทำให้ยางแข็งได้ PVC อาจผสมทำให้สูตรยางเอ็นบีอาร์ มีความแข็ง

### 3.5.6 ความยืดหยุ่น (Elasticity)

ยางมีเอกลักษณ์ด้านสมบัติทางกายภาพคือสามารถเปลี่ยนรูปได้มาก (Large Deformation) โดยไม่เสียหรือฉีกขาด มีสมบัติด้านความหนืด (Viscosity) เหมือนกับเป็นของเหลวในขณะที่เดียวกันก็มีความสามารถในการคืนตัวสู่ขนาดหรือสภาพเดิมได้ทันทีเมื่อแรงเค้นหยุดกระทำ ทำให้ยางมีสมบัติของแข็งด้วย คือ มีความยืดและหยุ่นได้ (Elasticity) ดังนั้น เมื่อรวมสมบัติทั้ง 2 ด้านนี้เข้าด้วยกัน จึงมักเรียกว่า ยางมีสมบัติเป็น Viscoelastic Material

สูตรยางที่ทำให้การคงรูปยางลักษณะที่การเชื่อมโยงโมเลกุลอย่างหนาแน่น (Tightly Knit Crosslinking System) จะเพิ่มความยืดหยุ่นของยาง ซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของยางที่มีคุณสมบัติการกระด้าง (Resilience) ดี ถ้าลักษณะการเชื่อมโยงโมเลกุลมีความเสถียรต่อการเสื่อมสภาพได้ดีมากยางนั้นก็จะมีสมบัติด้าน Creep, Stress Relaxation และ Set ลดลงด้วยนอกจากนี้สารป้องกันยางเสื่อมจะช่วยปรับปรุงสมบัติดังกล่าวนี้อีกด้วย

Creep คือ สมบัติที่ยางจะเกิดการแบนต่อไปอีกอย่างช้าๆ ภายหลังจากที่ถูกกดและยุบหรือแบนลงตามแรงกดจนถึงจุดๆ หนึ่ง แล้วทิ้งไว้แรงกดนั้นยังคงอยู่ต่อไป ความสำคัญของ Creep ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานยาง โดยเฉพาะในกรณีต้องรับน้ำหนักตลอดเวลา เช่น ยางรองคอสพาน ยางรองแท่นเครื่อง และรองเท้า เป็นต้น

ยางรองคอสพาน ถ้ามี Creep มากจะทำให้รอยต่อของสะพานมีความสูงหรือต่ำไม่เท่ากัน กรณีรองเท้าก็จะแบนบานออกไป

Stress Relaxation เป็นสมบัติของยางที่เกิดเมื่อมีการกดยางลงไปให้มีความสูงหรือหนาระดับหนึ่ง ซึ่งจะต้องใช้แรงกดระดับหนึ่ง และถ้ายังคงกดยางให้อยู่ในระดับความสูงคงที่ขนาดนั้น จะพบว่าแรงที่ต้องกดยางค่อยๆ ลดลงตามลำดับ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Stress Relaxation ความสำคัญของ Stress Relaxation เห็นได้ชัดในกรณียางซีลหรือปะเก็นยาง คือ ในระยะแรกของการใช้ยางที่มีการกดให้ยางซีลยางแน่น การกดทำให้เกิดแรงดันขึ้นในยาง จึงเกิดการกันของเหลวไหลผ่านปะเก็นยางได้ แต่เมื่อทิ้งไว้นานๆ แรงดันของยางจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งในที่สุดความดันของเหลวจะมากกว่าความดันที่มีอยู่ในยาง ทำให้ของเหลวไหลออกได้

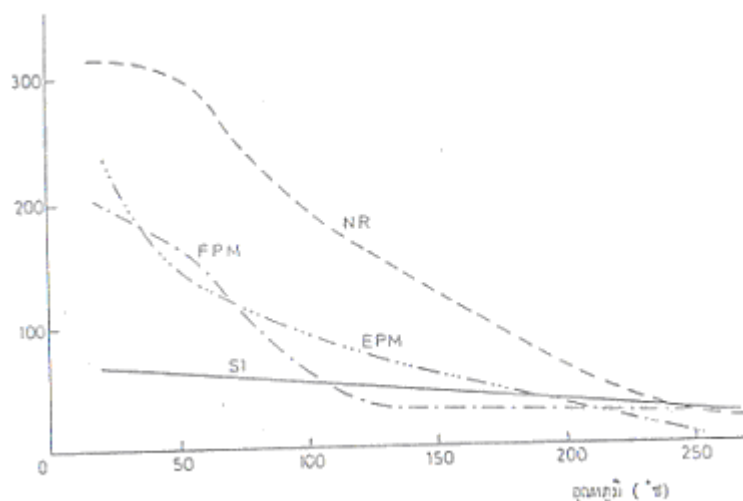
Set เป็นสมบัติด้านการคืนรูปรูปร่าง หรือขนาดหลังจากถูกแรงกดกระทำระยะเวลาหนึ่ง สมบัติด้าน Set ของยางเกิดขึ้นเมื่อกดยางแล้วตั้งไว้ระยะหนึ่ง เช่น เป็นวัน เป็นสัปดาห์ เมื่อปล่อยแรงกดออกจะพบว่ายางไม่คืนรูปร่างเท่าเดิม ขนาดที่เปลี่ยนไปนี้เรียกว่า การคืนรูป หรือ Set ในโรงงานอุตสาหกรรมยางนิยมนทดสอบ Set มากกว่า Creep หรือ Stress Relaxation เพราะใช้เครื่องมือที่ง่าย และให้ผลที่จะเป็นตัวบอกได้ว่ายางจะซีลได้ดีหรือไม่ในทันที แม้ว่าอาจจะไม่ได้วัดแรงที่ยางกระทำในขณะซีลก็ตาม

### 3.5.7 ความแข็งแรงต่อการยืดยาง (Tensile Properties)

การทำยางให้มีความแข็งแรงต่ำ เช่น ต่ำกว่า 50 IRHD สำหรับยางที่มีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วน (Pure Gum Strength) สูง นั้น ทำได้ง่าย ในกรณีการใช้ยางที่มีโมเลกุลสามารถตกผลึก หรือเรียงตัวเป็นระเบียบเมื่อยืดยาง (Crystalline on Stretching) ได้แก่ ยางธรรมชาติ ไอโซพรีน คลอโรพรีน และบิวไทล์ ส่วนยางอื่น เช่น เอสบีอาร์ เอ็นบีอาร์ และบิวทาไดอิน ซึ่งมีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วนต่ำ จะต้องใช้สารตัวเติมชนิดที่มีประสิทธิภาพเสริมแรงดี เพื่อปรับความแข็งแรงต่อการยืดยาง ซึ่งสารตัวเติมดังกล่าวก็จะเพิ่มสมบัติด้าน โมดูลัส และความแข็งแรงด้วย

การปรับความแข็งแรงให้ยางทั้งสองกลุ่มดังกล่าวทำได้โดยการใช้สารตัวเติม เขม่าดำที่มีอนุภาคละเอียด หรือใช้พวกซิลิกา ข้อสำคัญจะต้องบดผสมให้ตัวเติมกระจายในยางอย่างดี ปริมาณที่พอเหมาะขึ้นอยู่กับชนิดของยางและชนิดของสารตัวเติม โดยปกติจะใช้สารตัวเติมในระดับ 30-60 phr สารเรซินบางตัว สามารถผสมทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เช่น High-Styrene Resin ทำให้ยางเอส บี อาร์ มีความแข็งแรงดีขึ้น และฟีนอลิครีซินที่สามารถเชื่อมโมเลกุลได้ (Crosslinkable Phenolic Resin) เพิ่มความแข็งแรงในยางเอ็น บี อาร์ ได้

ข้อพึงระวังด้านความแข็งแรงของยางที่ได้ออกสูตรเพื่อให้มีความแข็งแรงมาก คือ การใช้งานที่สถานะอุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 14 แสดงความแข็งแรงของยางบางชนิดในสภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูงต่าง ๆ กัน



**รูปที่ 14** แรงดึงยางขนาดของยางชนิดต่างๆ ในสภาพอุณหภูมิต่างๆ

### 3.5.8 ความทนต่อแรงกระทำเป็นรอบๆ แรงหักงอ รอยแตก และการล้าตัว (Cyclic Stressing, Flex Cracking, Cut Growth and Fatigue)

เมื่อผลิตภัณฑ์ยางถูกแรงกระทำระหว่างการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นแรงกระทำซ้ำๆ ในลักษณะทำให้ขึ้นยางหัก – งอ หรือกดขึ้นยางก็ตาม มักจะเป็นผลให้ยางเกิดรอยแตก และอยู่ในสภาพใช้งานไม่ได้ในที่สุด นอกจากนี้ ในสภาพของการหัก – งอ ด้วยอัตราสูง เช่น การหมุนของยางล้อรถ หรือการวิ่งของสายพาน จะมีความร้อนสะสมเกิดขึ้นในยาง ดังนั้น การออกสูตรยางจะต้องคำนึงเกี่ยวกับสมบัติเหล่านี้

นอกจากชนิดของยางที่ใช้ สารเคมีต่างๆ ก็มีผลต่อสมบัติการแตกของยาง ระบบของสารทำให้ยางคงรูป การเลือกชนิดของสารป้องกันยางเสื่อม การกระจายของสารเคมีต่างๆ ในเนื้อยาง ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อแรงเค้นดึง (Strains) ในยาง ซึ่งจะกระทบต่อสมบัติด้านการหักงอยาง สารเคมีที่ลดการกระเดิง ก็จะเพิ่มความร้อนสะสมเมื่อหักงอยาง และถ้าหากสภาพการหักงอรุนแรงก็จะทำให้ยางเกิดรอยแตกอย่างรวดเร็ว

ในการออกสูตรยาง จะต้องพิจารณาสภาพการใช้งานผลิตภัณฑ์ก่อนจึงจะสามารถเลือกชนิดยางได้ถูกต้อง ถ้าหากสภาพการใช้งานจะต้องเสี่ยงต่อการเกิดรอยแตก การถูกสิ่งทิ่มแทงยาง ก็ควรพิจารณาเลือกยางที่มีความแข็งแรงของยางล้วนๆสูง เช่น ยางธรรมชาติ และยางคลอ โรพรีน และเลือกสารตัวเติมที่ให้ความสมดุลย์ด้านสมบัติโมดูลัสต่ำได้ดี และขณะเดียวกันก็ทนต่อการฉีกขาดดี

ได้มีการศึกษากันมาช้านาน พบว่าระบบการอบยางให้คงรูปโดยไม่ใช้ซัลเฟอร์ แต่ใช้สาร TMTD (Teramethyl Thiuram Disulphide) ตามคำพิง จะให้สมบัติด้านการล้าตัวเสื่อมสรูปที่จะใช้ยางได้เร็วกว่าการอบยางคงรูปโดยระบบใช้ซัลเฟอร์ตามปกติ (Conventional System) ซึ่งอาจอธิบายได้ว่า เนื่องจากสายเชื่อมโยงโมเลกุลที่เกิดโดยระบบการใช้ TMTD เป็น “Monosulphide” มีความเคลื่อนไหวตัวได้จำกัดกว่าสายเชื่อมโยงโมเลกุลแบบ “Polysulphide” ที่เกิดจากการใช้ระบบซัลเฟอร์ตามปกติ

### 3.5.9 ความทนต่อการเสื่อมสภาพและสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ

ความทนต่อการเสื่อมสภาพของยาง เช่น ทนต่อความร้อน เปลวไฟ สารเคมี แสงโอโซน บรรยากาศทั่วไปและสมบัติทางฟิสิกส์บางประการ เช่น การพองตัวในน้ำมัน ความหนาแน่น ตลอดจนสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น สมบัติเหล่านี้ของผลิตภัณฑ์ยางจะขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ระบบการใช้สารทำให้ยางคงรูป เช่น ระบบสารทำให้ยางคงรูปในยางธรรมชาติที่ให้พันธะเคมีเชื่อมโยงโมเลกุลยางเป็นแบบ Monosulphidi จะให้ความทนทานต่อความร้อนดีกว่าระบบที่ให้พันธะเคมีเป็นแบบ Polysulphidic การใช้ยางที่มีองค์ประกอบในโมเลกุลเป็นพวก Halogen เช่น ยางคลอโรพรีน (CR) ก็สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ไฟจะดับได้เมื่อไม่มีเปลว คือไม่ลุกไหม้เป็นเปลว การใช้สารตัวเติมพวกเขม่าคาร์บอนิก Furnace และ Acetylene จะสนับสนุนสมบัติต้านทานไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic) และต้านตัวนำไฟฟ้า ส่วนสารตัวเติมพวก Mineral เช่น Clays, Whiting, Coated Silicas ที่มีส่วนผสมของสารที่ละลายน้ำได้ออยู่ในปริมาณน้อยจะสนับสนุนสมบัติด้าน Electrical Resistance และ Dielectric Characteristics ดีกว่าเขม่าคาร์บอนิก Synthetic Aluminium Silicate บางชนิดสามารถใช้ผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการมีสีอื่น ๆ ที่ไม่ใช่สีดำ และต้องการสมบัติต้านทานไฟฟ้าสถิตย์

### 3.5.10 การอบยาง (Vulcanization and Kinetic Model Verification)

กรรมวิธีของการอบยางนั้นเป็นการเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีของยางเพื่อที่จะทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของยางประสานกันเป็นโครงข่ายซึ่งลักษณะที่สำคัญที่เกิดขึ้นในยางที่ผ่านกรรมวิธีการอบแล้วนั้นจะอยู่ในรูปของโมเลกุลของโพลิเมอร์ (Polymer molecule) จุดตัดที่เชื่อมติดกัน (Crosslink) โครงข่าย (Network chain) โครงข่ายที่ซ้อนทับกัน (Chain entanglement) จุดสิ้นสุดของโครงข่าย (Chain end) โครงข่ายพิเศษ (Extra-network material) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 15

ในการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของความร้อนของกรรมวิธีการอบยางกับแม่พิมพ์ชนิดนั้นจะดูที่สภาวะของการให้ความร้อน ( $\alpha$ ) ซึ่งถูกกำหนดโดยระยะเวลาในการให้ความร้อน ( $t_r$ ) , ระยะเวลาในการเข้ามาในแม่พิมพ์ของยาง ( $t_{or}$ ) และค่าคงที่ของผลกระทบในการให้ความร้อน ( $k_r$ ) ซึ่งจะสามารถเขียนได้เป็นสมการที่ 49 และ 50 ดังนี้

$$\alpha = 1 - \exp \left[ -k_r \left( t_r - t_{or} \right) \right] \quad (49)$$

และ

$$t_r = t_k \exp \left[ \left( \frac{E}{2} \right) \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (50)$$

โดยที่

$\alpha$  = State of cure time

$k_r$  = Rate constant for the curing reaction

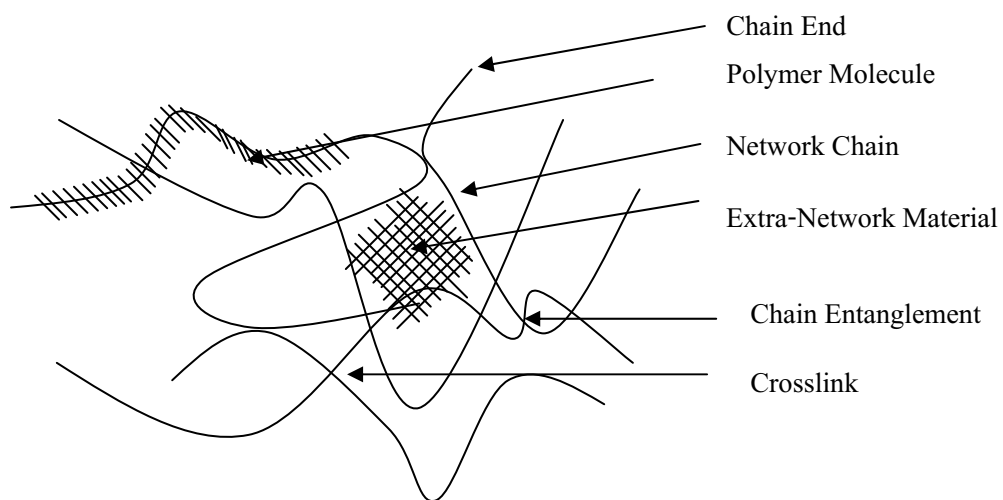
$t_r$  = Cure time

$t_k, t_{or}$  = Induction period

$E$  = Activation energy

$T_r$  = Reference temperature

$T$  = temperature



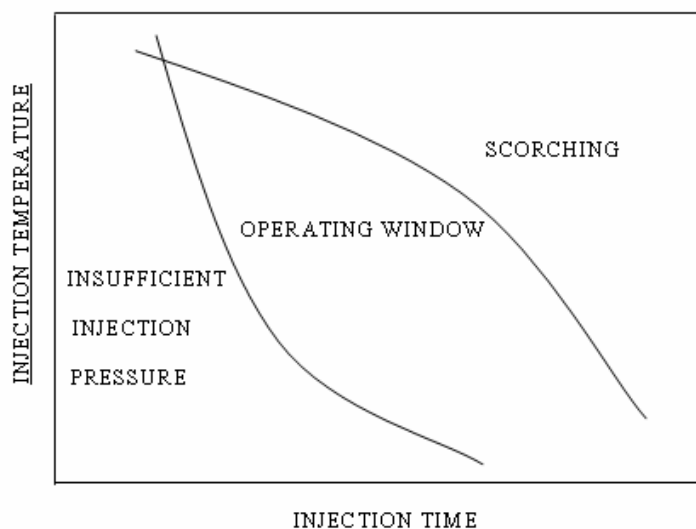
**รูปที่ 15** แสดงลักษณะที่เกิดขึ้นของเนื้อยางเมื่อผ่านการอบ (Vulcanization)

### 3.5.11 การเกิดสภาวะยางตาย (Scorch and Moldability)

การเกิดลักษณะของยางที่เรียกว่ายางตายนั้นเป็นสาเหตุจากการที่ยางได้รับความร้อนที่สูงหรือระยะเวลาในการฉีดยางเข้าไปในแม่พิมพ์นานเกินไปซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 16

ในการเกิดการตายของยางในแม่พิมพ์ฉีดนั้นมีสาเหตุสำคัญมาจาก

- ความเร็วในการฉีดสูง ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในเนื้อยางขณะที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์
- ความเร็วในการฉีดต่ำ ซึ่งจะทำให้การใช้เวลาในการฉีดยางเข้าไปในแม่พิมพ์ยาวนานขึ้น
- อุณหภูมิของเนื้อยางที่จะทำการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์สูง
- อุณหภูมิของแม่พิมพ์สูง



**รูปที่ 16** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาในการฉีด

### 3.6 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ (Elastomer Moulding)

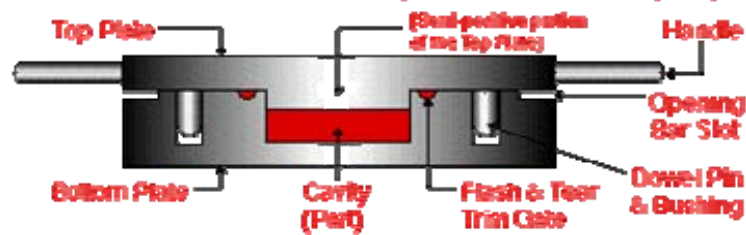
การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (Moulding) คือการขึ้นรูปยางให้เป็นชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างที่แน่นอน โดยเปลี่ยนยางเทอร์โมเซตจากสถานะที่เป็นของเหลวไปสู่สถานะของแข็งหลังจากเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Crosslinking) ซึ่งเรียกว่า กระบวนการวัลคาไนซ์ (Vulcanizing) หรือ การอบบ่ม (Curing) โดยการขึ้นรูปยางนั้นจะมีอยู่ 3 แบบ คือ การอัดขึ้นรูป (Compression Moulding) การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (Transfer Moulding) และการฉีดขึ้นรูป (Injection Moulding) [23]

#### 3.6.1 การอัดขึ้นรูป (Compression Moulding)

การขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดนั้น เป็นการขึ้นรูปที่ง่ายที่สุด และแม่พิมพ์ก็มีราคาไม่สูงมากนัก ส่วนรูปทรงของชิ้นงานจะมีความซับซ้อนไม่มากนัก อย่างไรก็ตามก็มากพอสำหรับผลิตภัณฑ์หลายๆประเภทที่ถูกนำไปใช้ โดยขนาดของแม่พิมพ์จะขึ้นกับชิ้นงานซึ่งมีตั้งแต่ขนาดเพียงไม่กี่กรัมจนถึง 10 กิโลกรัม เครื่องสำหรับอัดขึ้นรูปก็เป็นเพียงเครื่องอัดด้วยไฮดรอลิกส์แบบง่ายๆ ไม่ซับซ้อน ตัวอย่างแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 17 และ 18



### Compression Mold (Semi-positive Type)



รูปที่ 17 ส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป [24]



รูปที่ 18 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป [25]

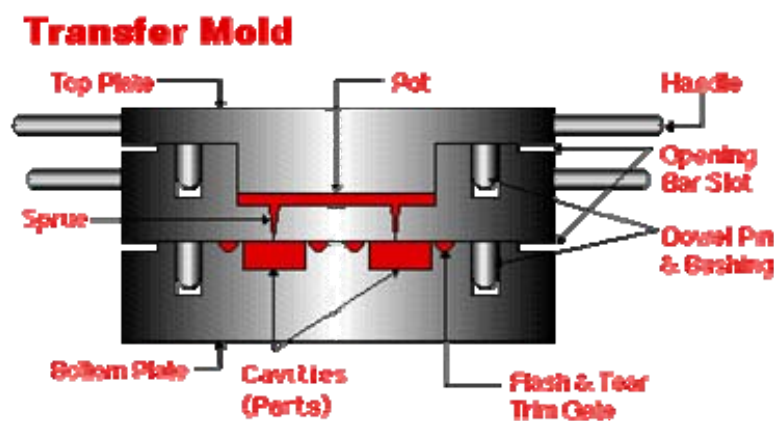
ขั้นตอนการขึ้นรูปนั้นเริ่มจากนำชิ้นยางที่ยังไม่สุกใส่ลงไปในเบ้าแม่พิมพ์ (Cavity) โดยผู้ปฏิบัติงาน จากนั้นปิดแม่พิมพ์ใส่เข้าไปในเครื่องอัด เครื่องอัดจะใช้แรงดันกดปิดแม่พิมพ์จนสนิท โดยก่อนจะกดปิดแม่พิมพ์จะมีการกดและคลาย (Bumping) ก่อนเพื่อให้อากาศออกให้เนื้อยางไหลได้เต็มเบ้า หลังจากได้รับความร้อนจากเครื่องอัดและใช้เวลาระยะหนึ่งจนยางสุกแล้ว ก็เปิดแม่พิมพ์และหยิบชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โดยผู้ปฏิบัติงาน ทำความสะอาดแม่พิมพ์ จากนั้นแม่พิมพ์ก็จะพร้อมสำหรับการอัดขึ้นรูปในรอบต่อไป [26]

**ตารางที่ 2** ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์แบบอัด

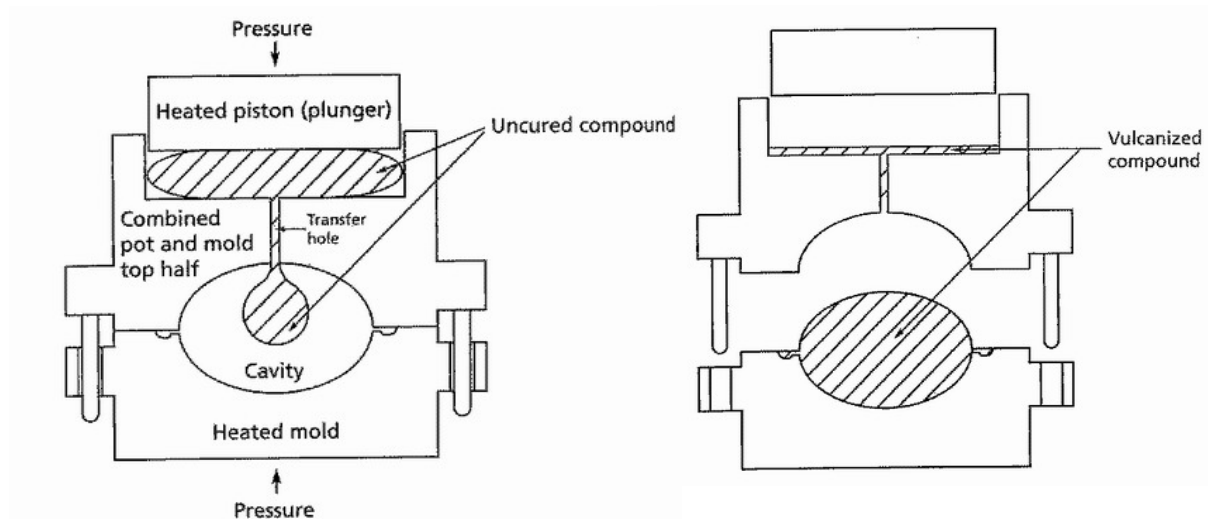
ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ราคาถูก</li> <li>2. ออกแบบง่ายสำหรับชิ้นงานที่ไม่ซับซ้อน</li> <li>3. มีช่องอัดอย่างมากเมื่อกว่าแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด</li> <li>4. มียางเสียน้อยกว่า</li> <li>5. วางชิ้นส่วนโลหะที่จะประกอบได้ง่าย</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ชิ้นงานไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ</li> <li>2. แม่พิมพ์มีน้ำหนักมาก</li> <li>3. ใช้เวลานานในการเปลี่ยนยางเข้า-ออกแต่ละครั้ง</li> <li>4. ไม่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและบาง</li> </ol>

### 3.6.2 การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (Transfer Moulding)

การขึ้นรูปแบบอัดส่งนั้นชิ้นงานที่ได้จะมีความแม่นยำมากกว่าแบบอัด [26] และสามารถควบคุมรอบเวลาการผลิตได้ดีกว่า หลักการที่สำคัญของการขึ้นรูปแบบอัดส่งนั้นคือจะมีช่องสำหรับรับใส่ยาง 1 ช่อง (Pot) โดยช่องดังกล่าวนี้จะเชื่อมต่อกับเบ้าด้วยทางวิ่งซึ่งมีทั้งเบ้าเดียวหรือหลายเบ้าก็ได้ เมื่อใส่ยางที่ยังไม่สุกลงไปในช่องใส่ยาง ส่วนอัด (Plunger) ก็จะอัดเนื้อยางผ่านทางวิ่งเข้าไปสู่เบ้า หลังจากนั้นก็จะให้ความร้อนจนยางสุก นำชิ้นงานออกจากเบ้าโดยผู้ปฏิบัติงาน ตัวอย่างแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัดส่ง และการขึ้นรูปแบบอัดส่งแสดงดังรูปที่ 19 และ 20 [26]



**รูปที่ 19** ส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์ยางแบบอัดส่ง [24]



**รูปที่ 20** แสดงการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดส่ง (Transfer Moulding) [27]

**ตารางที่ 3** ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. เตรียมชิ้นงานได้ง่าย เพราะเตรียมขึ้นใหญ่เพียงชิ้นเดียว</li> <li>2. ใช้ระยะเวลาสั้นในการอบยางให้คงรูป</li> <li>3. ยางเชื่อมกับโลหะได้ดีกว่า</li> <li>4. มียางเสียน้อยกว่า</li> <li>5. วางชิ้นส่วนคละที่จะประกอบได้ง่าย</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ราคาแพง</li> <li>2. แม่พิมพ์มีน้ำหนักรมาก</li> <li>3. ใช้เวลานานในการเปลี่ยนยางเข้า-ออกแต่ละครั้ง</li> <li>4. มักมีช่องอัดยางน้อยกว่าแม่พิมพ์แบบอัดธรรมดา</li> </ol>

### 3.6.3 การฉีดขึ้นรูป (Injection Moulding)

การฉีดขึ้นรูปนั้นเป็นการฉีดเนื้อยางจากกระบอกฉีด [28] (Injection Barrel) ด้วยกระบอกสูบ (Ram) หรือสกรู (Screw) ที่อยู่ภายใน เนื้อยางจะถูกฉีดผ่านหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งเป็นส่วนปลายสุดเข้าสู่รูฉีดของแม่พิมพ์ โดยรูฉีดนี้จะเชื่อมต่อกับทางวิ่ง (Runners) และรูเข้า (Gates) ก่อนเข้าสู่เบ้า (Cavity) ต่อไป โดยที่แม่พิมพ์จะมีตัวทำความร้อนที่มีลักษณะเป็นแท่ง (Heater Rods) ติดอยู่เพื่อทำให้ยางเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ หลังจากยางสุกแล้วแม่พิมพ์จะเปิดออกเพื่อปลดชิ้นงาน โดยสามารถนำชิ้นงานออกมาด้วยผู้ปฏิบัติงาน หรือใช้แขนหุ่นยนต์หยิบออกแบบอัตโนมัติก็ได้ ตัวอย่างแม่พิมพ์และกระบวนการฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 21 และ 22

การเติมเนื้อยางจะเป็นแบบอัตโนมัติซึ่งจะเป็นแบบสายยางเข้าสู่กระบอกฉีด หรือเป็นเม็ดเล็กผ่านกรวย (Hopper) คล้ายการฉีดพลาสติก เครื่องฉีดยางแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง (Vertical Injection Machine) และเครื่องฉีดยางแบบแนวนอน (Horizontal Injection Machine) ดังแสดงในรูปที่ 23 [27]

### Injection Mold (VERTICAL TYPE)

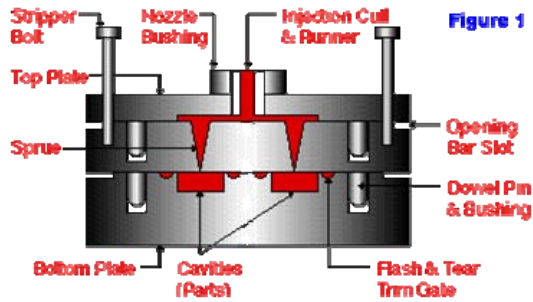


Figure 1

### Injection Mold (HORIZONTAL TYPE)

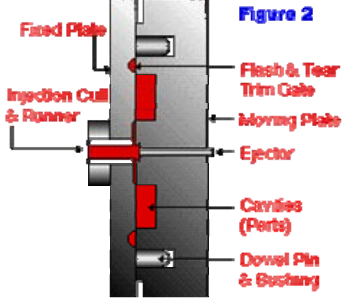
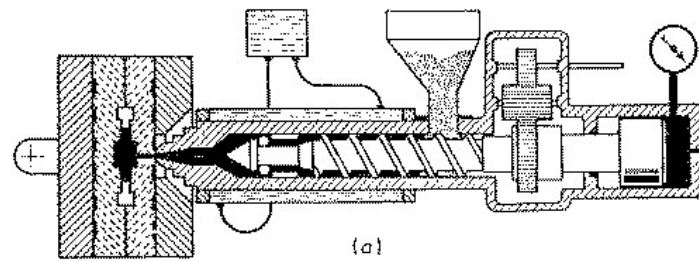
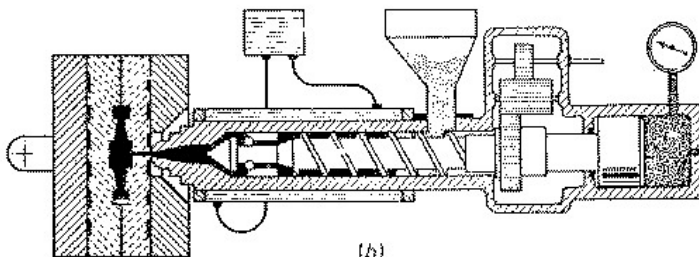


Figure 2

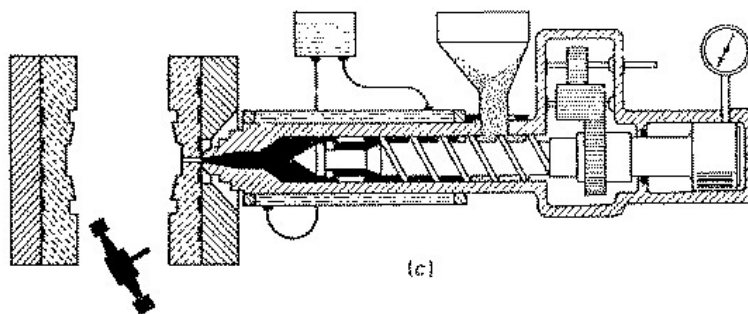
รูปที่ 21 ส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง และแนวนอน [24]



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 22 แสดงการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการฉีด (Injection Moulding) [26]



**รูปที่ 23** เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง (Vertical Injection Machine) และแบบแนวนอน (Horizontal Injection Machine) [29]

ข้อดีของกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง

- อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเนื้อยางสูงกว่าที่ใช้ในวิธีการอัดและอัดส่ง
- เนื่องจากอุณหภูมิของเนื้อยางที่ถูกฉีดเข้าเบ้าใกล้เคียงกับอุณหภูมิฉีด ทำให้การถ่ายเทอุณหภูมิระหว่างการบ่มมีน้อยมาก ดังนั้นจึงเกิดแรงดันภายในน้อยมาก ซึ่งเป็นผลให้เกิดรอยฉีกหรือรอยกัด (Backrind) บริเวณแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line) ลดลงได้มาก
- ไม่จำเป็นต้องตัดแบ่ง หรือทำรูปทรงก่อนฉีด เพราะสามารถป้อนเนื้อยางแบบสายยาวหรือเป็นเม็ดได้เลย
- ไม่มีเศษยาง (Flash) ยาง หรือลดน้อยลงมาก
- ลดการเกิดการอันของอากาศ (Air Traps)
- สามารถใช้ระบบการผลิตแบบอัตโนมัติได้
- รอบการฉีด (Cycle Time) เร็ว สามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนมาก

ข้อเสียของกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง

- แม่พิมพ์จำเป็นต้องทนต่อแรงดันสูง ทำให้ต้องใช้เหล็กที่มีความแข็งแรงมาก และใช้ความละเอียดสูงในการผลิต
- เนื่องจากแม่พิมพ์ฉีดยางมีระบบทางวิ่งทำให้เสียเนื้อยางในส่วนดังกล่าว เป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตมากกว่าการอัดและการอัดส่ง [27]

### 3.7 การออกแบบแม่พิมพ์ (Mould Design)

สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบแม่พิมพ์คือการออกแบบแม่พิมพ์ชนิดนั้นจะต้องพิจารณาถึงการเชื่อมโยงกันของส่วนประกอบต่างๆทั้งหมดในการทำงานและควบคุมแม่พิมพ์ โดยทั่วไปแล้วในการเปลี่ยนชิ้นงานไปจากเดิมนั้นจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ซึ่งจะต้องคิดถึงจำนวนของผลกระทบของส่วนผสมของยางที่ไหลไปในช่องทางไหลในช่องนำฉีด (Sprue) [30] และตลอดทางเดินของยางภายในเครื่องฉีดอย่างต่อเนื่องที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์จนเต็มแม่พิมพ์

ในการฉีดยางนั้นจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดทั้งหมด ซึ่งมีความสำคัญมาก เพราะในการออกแบบแม่พิมพ์จะต้องออกแบบระยะเวลาในการทำงานของขั้นตอนต่างๆของแม่พิมพ์ฉีดจนเสร็จสิ้นกระบวนการ ในความสำเร็จของการควบคุมแม่พิมพ์ฉีดนั้นจะขึ้นอยู่กับกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์ที่ดี

Mulligan กล่าวว่าไม่มีหนังสือคู่มือในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์แม่พิมพ์ฉีดยาง การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดนั้นจะต้องใช้ความสามารถและการทดลองเท่านั้น ซึ่งการออกแบบแม่พิมพ์นั้นจะเป็นกุญแจสำคัญในการช่วยลดกำลังคนลงซึ่งจะขึ้นอยู่กับระบบในการออกแบบว่าดีมาน้อยแค่ไหน

ในเบื้องต้นนั้นจะเริ่มค้นหาที่เครื่องฉีดก่อนว่าจะเป็เครื่องที่ฉีดในแนวตั้งหรือแนวนอน เนื่องจากจะต้องพิจารณาในการเปิดแม่พิมพ์ออก เครื่องที่เปิดแม่พิมพ์ในแนวนอนจะได้เปรียบโดยที่เมื่อขณะที่แม่พิมพ์เปิดออก แม่พิมพ์จะแยกจากกันได้ง่ายโดยน้ำหนักของตัวเองหรือจะใช้กลไกอัตโนมัติในการแยกออกจากกัน โดยอุปกรณ์ในการเคลื่อนที่ขึ้นลง แม่พิมพ์ที่เปิดในแนวตั้งโดยปกติจะจ่ายเนื้ยางไปในช่องทางที่เชื่อมต่อกันเข้าไปในผิวของรูปทรงชิ้นงาน โดยจะเข้าไปพบกันที่กึ่งกลางของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ที่เปิดในแนวนอนโดยปกติจะจ่ายเนื้ยางผ่านเข้าไปในช่องทางจ่ายผ่านทางวิ่งซึ่งจะสร้างขึ้น จะตัดกันที่ครึ่งของแม่พิมพ์

ในการพิจารณาที่ความต้องการ โดยให้ขนาดของเรื่องฉีดในการใช้ขึ้นอยู่กับ

- 1) ขนาดและปริมาตรขององค์ประกอบในการสร้าง
- 2) จำนวนของแม่พิมพ์ในการสร้างต่อครั้ง
- 3) พื้นที่ของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์และแรงที่ใช้ในการเลือกแม่พิมพ์
- 4) การฉีดหรือการส่งถ่ายความดันนั้นจะสำคัญต่อเนื้ยางที่จะไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ

ธรรมชาติของแม่พิมพ์และตัวเนื้ยาง

ที่เห็นได้ชัดเจนแบบคร่าวๆ คือ ความจุของเนื้ยางภายในเบ้าชิ้นงาน (Shot Capacity) แรงดันในการกดและแรงดันในการฉีดของเครื่องจักร กฎในการออกแบบแม่พิมพ์ ผลที่เกิดจากแรงดันในการฉีด และพื้นที่ผิวของแม่พิมพ์รวมกับทางวิ่งน้อยกว่าแรงปิดของแม่พิมพ์มาก

วัสดุที่จะนำมาสร้างแม่พิมพ์นั้นมีส่วนสำคัญมาก แม่พิมพ์ที่ดีนั้นจะทำให้เกิดเศษยาง (Flash) หรือแฟลชแบบอิสระทั่วทั้งหมดยของผิวแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องสร้างจากเหล็กที่แข็งแรงทนต่อแรงดันในการฉีด 137-206 MN/m<sup>2</sup> (20,000 – 30,000 lbf/in<sup>2</sup>) ที่กระทำ การปิดตัวจะทำให้เกิดแฟลช และความเค้นจะต้องไม่มีก่อนที่จะเสร็จ และจะต้องหลีกเลี่ยงการปิดตัวเนื่องจากความร้อน และแรงที่กดและบริเวณผิวที่ประกบกันนั้นจะต้องเรียบสนิท



กัน แรงกดที่กระทำนั้นจะต้องทำในบริเวณผิวรอบๆ ผิวรูปทรงชิ้นงาน ทางวิ่ง ช่องทางเข้า และช่องทางจ่าย และต้องทำให้พื้นที่ส่งจ่ายและรอยต่อนั้นแนบสนิทกันเวลาปิดแม่พิมพ์

การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดสำหรับยางนั้นสำคัญที่จะต้องคำนึงถึง

(1) การควบคุมอุณหภูมิสูงในการทำงานบ่อยครั้ง  $200-230^{\circ}\text{C}$  ( $392-446^{\circ}\text{F}$ )

(2) การเป็นของเหลวของเนื้อยาง

(3) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหลว (เนื้อยาง) โดยรวดเร็ว

เมื่อแม่พิมพ์มีความร้อนเกินกว่า  $200^{\circ}\text{C}$  ( $392^{\circ}\text{F}$ ) แม่พิมพ์จะเกิดจากการขยายตัวให้มีการเคลื่อนตัวที่สูง ทำให้ตำแหน่งต่างๆ นี้ไม่ได้แนวตามเดิมซึ่งไม่เป็นที่ต้องการชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ ส่วนฉีดกระทุ้ง (Ejectors) จะต้องทำให้มีค่าเผื่อที่เพียงพอ ถ้าหากไปขัดขวางการเคลื่อนของแม่พิมพ์ขณะปิดก็ควรที่จะแก้ไขให้ถูกต้อง

ในกรณีที่ไม่ได้ขนาดของแม่พิมพ์ตามที่กำหนด อาจจะทำให้เกิดเพลชขึ้นอย่างมากได้ แท่งเหล็กในการกำหนดระยะหรือหมุดนำศูนย์นั้นทำขึ้นเพื่อที่จะทำให้ตำแหน่งนั้นแม่นยำ และจะต้องพิจารณาถึงของการขยายตัวระหว่างวัตถุทั้งสอง ซึ่งจะต้องสร้างระยะเผื่อระหว่างหมุดนำศูนย์ ซึ่งอาจจะสูญเสียแนวเส้นในการปิดตัวแท่งเหล็กกำหนดระยะตัวเมียนั้นจะสวมอยู่รอบตัวผู้เนื้อยางจะไหลเข้าไปในช่อง วิธีการในการกำหนดตำแหน่งจะทำการกำหนดที่ตำแหน่งที่มุมด้านขวาของแต่ละชิ้น และทำการจำกัดการขยายตัวให้หมดไปในทิศทางการเคลื่อนที่ โดยแนะนำให้ใช้พินและหมุดในการให้ตำแหน่งที่ถูกต้องซึ่งจะมีลักษณะที่ดีในการสวมกัน และที่สำคัญจะต้องมีความแข็งเพื่อที่จะรักษารูขนาดเดิมไว้เมื่อมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ระดับของเหล็กที่ใช้จะต้องดีกว่าโดยปกติทั่วไปที่ใช้ทำแม่พิมพ์อัด เช่น ต้องการ Stainless เพื่อป้องกันสนิม มีความแข็ง มีการทำให้แข็งและเหล็กนั้นจะต้องเรียบ เหล็กที่มีความทนทานสูงนั้นจะช่วยให้ระยะเวลาในการใช้แม่พิมพ์นานขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่สัมผัสกับเนื้อยาง ในการเพิ่มขึ้นของอายุการใช้งานของพื้นที่สัมผัสกับยางนั้นควรที่จะทำการขัดให้มีความมันวาวที่สูง และควรทำในชุด Pins และตัวแผ่นประกบด้วยการขัดให้มันวาวขึ้นจะทำให้คุณสมบัติในการไหลดีขึ้นในทางวิ่ง

### 3.7.1 การหดตัวของยางที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ (Mould Shrinkage)

ปัญหาเกี่ยวกับการหดตัวของผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญ โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์พวกชิ้นส่วนที่ใช้งานเครื่องกลและงานวิศวกรรม เช่น ยางอะไหล่ ยางซีล และยางปะเก็น ฯลฯ โดยปกติแล้วผลิตภัณฑ์ยางมักหดตัวภายหลังจากการอบคงรูปขึ้นงานแล้ว เพราะระหว่างการอบคงรูปยางใช้ความร้อน ซึ่งจะก่อให้เกิดการขยายตัวของทั้งแม่พิมพ์ (กรณีการอัดคงรูปโดยแม่พิมพ์) และยาง แต่การขยายตัวของทั้งสองสิ่งนี้มีความต่างกัน การหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางแม่พิมพ์จะมากน้อยอย่างไร ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of Expansion) ของยางที่คงรูปแล้ว และสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแม่พิมพ์ รวมทั้งอุณหภูมิของการอัดยางให้คงรูป ส่วนของยางที่อยู่ภายในแม่พิมพ์อย่างเต็มพิมพ์ ขณะการอบให้คงรูปจะหดตัวขณะที่เย็นตามอุณหภูมิห้อง การหดตัวของยางจะมากกว่าการหดตัวของแม่พิมพ์ เพราะยางมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวมากกว่าแม่พิมพ์ นั่นคือการหดตัวของยางจะยิ่งมากเมื่อยางและโลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวแตกต่างกันมาก และเมื่ออุณหภูมิของการ

อบให้ยางคงรูปต่างกับอุณหภูมิห้องมาก อย่างไรก็ตามการคำนวณหาองศาของการหดตัวของยางว่าจะมากหรือน้อยเพียงใดให้ได้ค่าที่แน่นอนนั้นค่อนข้างยาก เพราะสัมประสิทธิ์การขยายตัวของยางคงรูปจะเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนประกอบของสูตร

โดยปกติแล้วสูตรยางที่มีเนื้อยางมาก จะให้ยางคงรูปที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงสารตัวเดิมมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ สารอื่นๆ ซึ่งจะละลายได้ในอะซิโตน ได้แก่ สารตัวเร่ง สารป้องกันยางเสื่อม สารช่วยทำให้ยางนุ่ม เรซิน จีฟิ่ง ซัลเฟอร์ แพลทิส และยางรีเคลม เหล่านี้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวใกล้เคียงกับยาง ฉะนั้นในการคำนวณหาการหดตัวของยางจึงนับสารเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของยาง

### 3.7.2 วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์

ในการเลือกใช้วัสดุที่จะมาทำแม่พิมพ์ชนิดนั้นจะต้องคำนึงถึงจุดวิกฤตที่มีมากกว่าแม่พิมพ์อัดและแม่พิมพ์ส่งถ่าย ซึ่งในแม่พิมพ์ชนิดนั้นจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขของการควบคุม ซึ่งจะมีความดันที่สูง, อุณหภูมิที่สูงและความถี่ของไซเคิลการทำงาน ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวนี้จะทำให้เกิดอัตราการสึกหรอที่สูง โดยเฉพาะจุดวิกฤตของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line) ดังนั้นในการเลือกเหล็กที่จะนำมาทำแม่พิมพ์นั้นจะต้องมีคุณสมบัติที่สูงซึ่งจะทำให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุน ในการสร้างแม่พิมพ์จากวัสดุที่มีคุณภาพในตอนต้นอาจจะเปลี่ยนบางแม่พิมพ์ที่มีจุดวิกฤตสูงๆก่อน และต่อจากนั้นทำการเปลี่ยนทั้งหมด ซึ่งจะทำให้คุณภาพของแม่พิมพ์สูงขึ้นและจะทำให้ผลิตชิ้นงานได้นานขึ้น [31]

ความเค้นตกค้าง (Residual Stress) ในแม่พิมพ์จะเกิดจากการขึ้นรูปของแม่พิมพ์ หรือกระบวนการทางความร้อนที่เกิดขึ้นตอนสร้างแม่พิมพ์ หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเหล็ก เช่น การรีดเย็น หรือการโก่งงอ, ในกรณีของการเกิดความเค้นตกค้างก่อนขึ้นรูปแม่พิมพ์ คือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างสูงของชิ้นแม่พิมพ์ เช่น การเชื่อม การขึ้นรูป และการชุบแข็ง (Hardenning) ในกรณีของความดันที่เกิดจากความร้อน (Thermal Stress) ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ซึ่งจะทำให้ค่า Yield Strength เพิ่มขึ้น วิธีการ Subharmonic Stress จะเป็นวิธีการที่จะทำให้ความเค้นตกค้างนี้ลดลง

เหล็กที่ใช้ทำแม่พิมพ์ชนิดยางนั้นต้องการเนื้อเหล็กที่สะอาดและปราศจากสิ่งปลอมปน รูพรุนเล็กๆที่เนื้อเหล็ก (Porosity) และความบกพร่องอื่นๆ ซึ่งจะมีผลต่อการสร้างแม่พิมพ์เป็นอย่างมาก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับทางเลือกเหล็กที่ใช้ผลิต เหล็กที่ผ่านกระบวนการทำให้แข็งนั้นจะขึ้นรูปได้ยากกว่าเหล็กอ่อน ซึ่งจะต้องการเวลามากกว่าการขึ้นรูปเหล็กอ่อนประมาณ 28% เหล็กที่ผ่านกระบวนการทำให้แข็งนั้นจะนิยมใช้สร้างแม่พิมพ์ชนิดเพราะจะให้ความทนทานที่สูง ในกระบวนการสร้างในปัจจุบันและการปรับปรุงคุณภาพของเหล็กนั้นต่างจากสมัยก่อน

ซึ่งจะมีความยากมากกว่าโดยมีความยากในการขึ้นรูปเหล็กที่นำมาใช้ทำแม่พิมพ์ ซึ่งต้องการลักษณะจำเพาะของเหล็กที่จะนำมาสร้างแม่พิมพ์โดยต้องการความมั่นคงและความง่ายในการเชื่อมประสานเหล็ก เหล็ก NAK 55, นั้นจะครอบคลุมคุณลักษณะที่ต้องการของเหล็กที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ซึ่งจะใช้แทนเหล็ก 4140 และ P20



เหล็กบางชนิดสามารถนำผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (การปรับปรุงทางความร้อน) ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของความแข็งนั้นจะเกิดขึ้นจากบริเวณผิวที่ลึกลงไปภายในผิวของแม่พิมพ์ ซึ่งต้องการความแข็งที่มีลักษณะคงที่เท่าๆ กันตลอดในทุกระดับของความลึก ความแข็งสูงของแม่พิมพ์นั้นจะช่วยให้บริเวณพื้นที่ภายในของแม่พิมพ์จะทนต่อแรงกดที่เกิดขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดรอยร้าวขึ้น ซึ่งเกิดจากการทำงานของวงจรการทำงานของแม่พิมพ์ รอยกดที่จะทำให้เกิดการสึกหรอที่มีรอยร้าวในส่วนมากจะเกิดในจุดที่เป็นรอยกดของบริเวณพื้นที่ๆ เป็นจุดวิกฤตในแม่พิมพ์ที่ใช้เหล็กอ่อนในการทำ การที่จะลดรอยร้าวที่เกิดจากการกดนั้นจะสำคัญมาก ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์นั้นสูงขึ้นส่วนใหญ่แล้วจะใช้ชนิดของเหล็กในการทำแม่พิมพ์นี้ตาม American National Standards Institute (ANSI)

- 4140 และ 4130 Alloy Steel สำหรับตัวแม่พิมพ์ที่ต้องการความทนทาน
- 420 และ P10 Tool Steel สำหรับรูปทรงของชิ้นงานในแม่พิมพ์
- H13 Hot - Rolled Steel สำหรับตัวดันชิ้นงานออก (Ejectors)
- 6150 Alloy Steel สำหรับหัวฉีด (Nozzles)

ข้อมูลเกี่ยวกับการเลือกใช้เหล็กในการผลิตแม่พิมพ์สามารถที่จะเลือกได้จากผู้จัดจำหน่ายและมาตรฐานต่างๆ ของแม่พิมพ์ และการสร้างแม่พิมพ์ ตัวอย่างในเหล็กคาร์บอนสามารถที่จะแบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

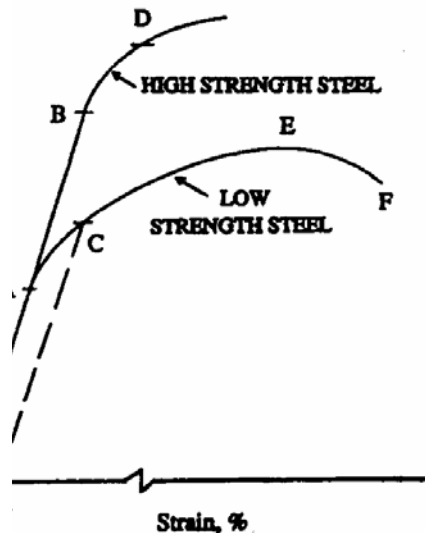
- กลุ่มที่มีคาร์บอนต่ำ (Low Carbon (มีคาร์บอนไม่เกิน 0.35%)) จะมีราคาถูกที่สุด และสามารถเพิ่มความแข็งแรงได้โดยการเพิ่มคาร์บอน (Carburizing) เท่านั้น
- กลุ่มที่มีคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon (0.35% ถึง 0.5%)) สามารถที่จะทำให้แข็งแรงได้ประมาณ 54 Rc ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคาร์บอนที่มีอยู่
- กลุ่มที่มีคาร์บอนสูง (Carbon (0.5 ถึง 1%)) สามารถที่จะทำให้ความแข็งแรงที่สูงได้

คาร์บอนที่มีอยู่ประมาณ 0.3% สามารถที่จะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ โดยปริมาณคาร์บอนที่มีอยู่สูงจะทำให้ผลกระทบในการปรับปรุงความแข็งนั้นน้อยลง ซึ่งระบบ ANSI จะอธิบายได้ดังนี้ ตัวอย่างเหล็ก 4140, 41 เป็นตัวเลขที่บอกชนิดของโลหะผสมที่มีอยู่ ซึ่งในที่นี้จะได้แก่ Chromium และ Molybdenum, และ 40 จะบอกถึงเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอน คือ มีคาร์บอนอยู่ 0.4%

การสึกหรอที่เกิดขึ้นนั้นโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในรูปของการสึกหรอของการขูดขีด (Abrasive (Crosive) Wear) และการสึกหรอโดยการยึดติด (Adhesive Wear) การสึกหรอโดยการขูดขีดนั้นจะเกิดเมื่อส่วนที่แข็งกดลงไปบนบริเวณของแม่พิมพ์ โดยสังเกตได้จากบริเวณที่โดนกดนั้นจะมีลักษณะเป็นรอยมันวาวเกิดขึ้นในลักษณะที่เพิ่มขึ้น การสึกหรอโดยการยึดติด (Adhesive Wear) ลักษณะการเกิดจะเกิดขึ้นคล้ายกันทั้งในวัสดุที่มีความแข็งและอ่อน ซึ่งจะเกิดที่หน้าสัมผัสของแม่พิมพ์ที่มีความแข็งที่แตกต่างกัน 4 ถึง 8 จุดในความแข็ง Rc ซึ่งจุดที่จะเกิดการสึกหรอนั้นจะเกิดกับเหล็กที่มีความแข็งแรงที่ต่ำกว่า

Yield Strength เป็นค่าที่สำคัญตัวหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบแม่พิมพ์ ซึ่งค่า Yield Strength ของเหล็กนั้นจะทำการวัดโดยการดึงหรือการอัด โดยการกำหนดในตัววัสดุถ้าจุดนั้นได้รับแรงและกลับมามีจุดเดิม นั้นเราจะเรียกว่าอยู่ในช่วงของการยืดตัวในช่วงอีลาสติก (Elastic Deformation) หรือช่วงอีลาสติก และ

ในช่วงที่ค่าความเค้นของวัตถุนั้นอยู่เหนือจุด Yield Strength จะเกิดการยืดตัวอย่างถาวร โดยปกติค่าของ Yield Strength ในรูปของ Offset Yield Strength โดยจะอยู่ที่ 0.10% ถึง 0.2% ของความเครียด ดังรูปที่ 24 จะแสดงเส้นโค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น - ความเครียดของเหล็กซึ่งจะมีความสัมพันธ์กัน



**รูปที่ 24** แสดงถึงเส้นความสัมพันธ์ของความเค้น - ความเครียด

เหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกับต่ำและแสดงเส้นเสื่อมของเส้นสำหรับความเครียดที่ 0.2% ที่เหล็กความแข็งแรงต่ำที่จุด A นั้นจะแสดงถึงจุด Yield Strength ของเหล็กที่มีความแข็งแรงต่ำ B Yield Strength สำหรับเหล็กที่มีความแข็งแรงสูง C เป็นจุดแสดงเส้นที่ 0.2% ของ Yield Strength ของเหล็กความแข็งแรงต่ำ D แสดงเส้นที่ 0.2% ของจุด Yield Strength สำหรับเหล็กที่มีความแข็งแรงสูง E เป็นจุดสูงสุดของความเค้นของเหล็กที่แข็งแรงต่ำ F ความเค้นที่จะทำให้เกิดการขาดสำหรับเหล็กความแข็งแรงต่ำ

โดยทั่วไปแล้วที่ความเค้นที่เกิดขึ้น 10,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) จะนิยมใช้ความแข็งแรงที่ 44 Rc และใช้เหล็กที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งโดยทั่วไปในการควบคุมการทำงานที่อุณหภูมิห้องนั้นจะสำคัญมากสำหรับวัสดุที่เป็นยาง (TSEs) ค่า Young's Modulus สำหรับเหล็กคาร์บอนจะลดลงประมาณ 10% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิปกติไปเป็น 250°C หรือ 400°F และสำหรับแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กสแตนเลส ค่าจะเพิ่มเป็น 10.9% ที่อุณหภูมิ 68°F ไปเป็น 400°F สิ่งสำคัญคืออุณหภูมิจะทำให้เหล็กเกิดการขยายตัวซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบทั้งแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่าง

ส่วนใหญ่แล้วแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กหล่อจะมีค่า Yield Strengths จะอยู่ประมาณ 50,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ซึ่งจะมีค่าความปลอดภัยอยู่ที่ 7 โดยความเค้นที่ใช้ในการทำงานโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในประมาณ 700 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) ควรที่จะทำหน้าที่สัมผัสของแม่พิมพ์ตัวบนให้มีหน้าสัมผัสที่น้อยในการที่จะสัมผัส

กับแม่พิมพ์ตัวล่างเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความเสียหายหน้าสัมผัสของแม่พิมพ์ตัวล่างพื้นส่วนใหญ่จะเกิดการสึกหรอเมื่อมีการใช้งานไปแล้วระยะหนึ่ง

ที่สำคัญต้องพิจารณาว่าการเลือกยางนั้นเลือกชนิดไหนและมีส่วนผสมอะไรบ้างแล้วจึงพิจารณาในการที่จะเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์และดูความสะดวกในการขึ้นรูปและความแตกต่างในระดับของการขัดเงา (Polishing) ในเหล็ก P20 และการดูแลรักษาแม่พิมพ์

### 3.7.3 แบบของแม่พิมพ์ (Mould Layout)

แบบของแม่พิมพ์นั้นจะต้องพิจารณาถึงการออกแบบสำหรับรูปทรงเบ้าขึ้นงานในแม่พิมพ์ (Cavities) ชุดให้ความร้อน (Heaters) เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouples) ตำแหน่งของ dowels ฉนวน (insulation) ปลอกนำฉีด (Sprue) ทางวิ่ง (Runners) รูฉีด (Gates) ชุดกระทุ้งออก (Ejectors) ช่องอากาศ (Vents) ช่องในการหนีอากาศ (Fear Off Grooves) และระบบสุญญากาศ (Vacuum Attachments)

### 3.7.4 แบบของเบ้าขึ้นงานภายในแม่พิมพ์ (Cavity Layout)

แบบของเบ้าขึ้นงานที่ดีนั้นจะต้องพิจารณาโดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนของเบ้าขึ้นงานภายในแม่พิมพ์ เพราะจะคุ้มค่าในการลงทุนซึ่งจะต้องมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ภายในแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องพิจารณาในการออกแบบของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมและต้องมีประสิทธิภาพด้วย ในการไหลของยางเข้าไปในรูปทรงของขึ้นงานภายในแม่พิมพ์นั้นต้องการการไหลเข้าไปในแต่ละเบ้าขึ้นงานนั้นเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ ต้องเท่ากัน อัตราการไหลต้องเท่ากันโดยจะต้องทำการควบคุมสมดุลกันของการไหลรอบๆ จุดศูนย์กลางในการจ่ายยาง

### 3.7.5 เบ้าขึ้นงานภายในแม่พิมพ์ (Cavities)

เบ้าของขึ้นงานภายในแม่พิมพ์จะแสดงให้เห็นรูปร่างของตัวเนื้อยางซึ่งจะสำคัญสำหรับความทนทานต่อการเกิดความดันที่สูงและความเค้นที่เกิดขึ้นหลังจากที่เนื้อยางไหลเข้าไป และอากาศที่กักภายในแม่พิมพ์

เวลาที่ไม่สม่ำเสมอของการไหลเข้าของเนื้อยางที่เข้าไปในแม่พิมพ์สามารถทำให้ผนังของเบ้าขึ้นงานเกิดจุด Yield Point ซึ่งความหนานี้จะไม่พอเพียงในการเพิ่มเติม ตัวแม่พิมพ์นั้นจะห่อหุ้มเบ้าของขึ้นงานอยู่ความหนาที่พอเพียงนั้นจะต้องทนต่อการเกิดการบิดงอซึ่งจะมีส่วนทำให้เกิดผิวที่มีลักษณะมันวาวเนื่องจากการกระแทก รอยขีดขีด ความหนาต่ำสุดอยู่ที่ 0.875 นิ้ว ซึ่งจะแนะนำให้ใช้กับแม่พิมพ์ตัวบน ตัวแม่พิมพ์นั้นจะต้องมีความทนทาน และทนต่อจำนวนรอบในการทำงานที่สูงซึ่งจะต้องมีการบำรุงรักษาตามระยะเวลาที่กำหนด

องค์ประกอบความสำคัญอื่นๆ ได้แก่ รูปแบบในการวางของเบ้าภายในแม่พิมพ์ (Cavity Layout) และพื้นที่ภายในเบ้าของขึ้นงานในแม่พิมพ์ (Cavity Spacing) ในการวางรูปแบบของเบ้าขึ้นงานในแม่พิมพ์และช่องทางวิ่งต้องการผลที่ได้คือต้องการที่จะทำให้ความดันที่กระจายตัวนั้นค่อนข้างที่จะคงที่โดยกระทำตามขวางกับพื้นผิวของแม่พิมพ์บริเวณเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line) การกระจายตัวที่ไม่ได้รูปมีแนวโน้มที่จะทำให้

แม่พิมพ์มีการเปิดตัวออกจากกันที่บริเวณเส้นแบ่งแม่พิมพ์ซึ่งจะทำให้เกิดการสึกหรอที่ผิวได้ เช่นเกิดการมันวาวขึ้น เป็นต้น

การเกิดเศษยาง (Flash) เป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบางๆ ของบริเวณภายนอกของเนื้อยางที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวแม่พิมพ์ภายในรูปทรง ในการกำหนดการเกิดฟิล์มบางๆ ในชิ้นงานบางชนิดนั้นจำเป็นที่จะต้องเกิดขึ้นตัวอย่างเช่น ในฉนวนกันกระแสไฟฟ้าในการออกแบบแม่พิมพ์ฉนวนโดยปกติจะออกแบบให้ตัวยึด (Clamped) รวมกันในแนวแกนของชิ้นงาน การเกิดฟิล์มบางๆ ที่รอยต่อของแม่พิมพ์ชิ้นงานฉนวนในแม่พิมพ์ทรงบริเวณนี้จะต้องขัดให้มีผิวเรียบเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดรอยต่อของชิ้นงานขึ้นเป็นแนวยาวในแนวแกนตอนเมื่อเกิดรอยต่อชิ้นงานจะต้องทำการแก้ไข ในการปรับปรุงออกแบบแม่พิมพ์เปลี่ยนตำแหน่งของการประกอประกบของแม่พิมพ์จากแนวนอนเป็นแนวเส้นรอบวงและลดแนวการประกอประกบของกันแนวนอนของแม่พิมพ์

แผ่นฟิล์มบางๆ เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด เช่น การออกแบบโอริง (O-ring) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโอริงที่มีขนาดเล็ก (Small O-ring) แผ่นฟิล์มบางๆ ที่เกิดบนโอริงจะเกิดที่บริเวณด้านในสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กของโอริง (Inside Diameters, I.D.) เป็นอย่างมากและเป็นการยากที่จะทำให้ลดลง ในการออกแบบแม่พิมพ์ที่จะทำให้ลดปัญหานี้เมื่อใช้แท่งสอดแทรกตรงกลางของชิ้นงาน (Pin Pierces) และทำการลดฟิล์มบางๆ ลงโดยทำให้หลังการเกิดปฏิกิริยา (Cross Linking) แผ่นฟิล์มบางๆ ที่ผิวด้านนอก (O.D.) สามารถลดลงได้โดยวิธีการธรรมดา เช่น การ Cryogenic Tumbling

(ความสมมาตรที่เท่ากันนั้นจำเป็นในการออกแบบรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ เช่น แผงหน้าปิดด้านหน้าของรถ การขัดให้ชิ้นงานภายในรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ในการขัดนั้นเมื่อเสร็จแล้วความละเอียดจะอยู่ที่ 10 ถึง 20 ไมโครนิ้ว ก็จะเป็นที่ยอมรับได้ ข้อที่ควรจำในการขัดเงาที่จะได้ผลดีจะต้องทำโดยวิธีการที่ถูกต้องและใช้กระดาษทรายเบอร์ 320 ในขั้นตอนสุดท้าย)

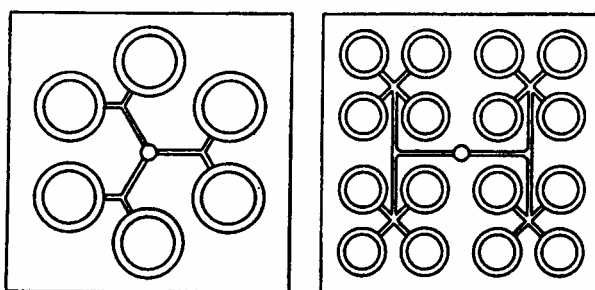
ในความเป็นไปได้ของการมีจำนวนเข้าชิ้นงานภายในแม่พิมพ์มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้นั้นยังเป็นปัญหาอยู่ในหลายข้อ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ แรงกระทำกับผิวที่รอบของรูปทรง เช่น งานที่บริเวณริมขอบของแม่พิมพ์ตอนแม่พิมพ์ปิด ซึ่งจะทำให้การควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในรูปทรงชิ้นงานนั้นยากโดยจะเกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งของรูปทรงชิ้นงานและยังมีปัญหาต่อชิ้นงานอยู่ที่บริเวณมุมของแม่พิมพ์ สำหรับแม่พิมพ์พลาสติกระยะทางการอยู่ที่ 3 นิ้ว จากผิวของรูปทรงแม่พิมพ์กับผิวนอกสุดของแม่พิมพ์ แต่ควรจะเริ่มที่สี่นิ้วขึ้นไป การทำให้แม่พิมพ์มีความเที่ยงตรงในการลงมาประกบกัน ซึ่งจะทำให้พื้นที่ที่ออกแบบไว้ตรงกันสามารถกำหนดได้หลายวิธี เช่น ให้เข็มนำ (Leader Pins) ใช้บล็อกนำ (Bushing) และการใช้สลักกร้อย การใช้สลักกร้อยนั้นจะเป็นตัวกลางในการเลื่อนขึ้นลงระหว่างแม่พิมพ์ที่อยู่กับที่กับตัวที่เคลื่อนที่ และต้องพิจารณาตอนประกอประกบกันของช่องจะต้องตัดกันที่บริเวณขอบ การเชื่อมต่อสำหรับท่อสุญญากาศ และระบบทางวิ่ง การวางตำแหน่งของทางวิ่งเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาในการเชื่อมต่อกันของช่องว่างซึ่งต้องพิจารณาดังตัวอย่างช่องทางวิ่งของของไหลที่ถ่ายเทความร้อนและชุดการให้ความร้อนนั้นจะออกแบบให้ผนังของรูปทรงชิ้นงานนั้นจะต้องมีความหนาแน่นพอเพื่อที่จะขัดขวางการเปลี่ยนแปลงรูปทรงไปของผนังในรูปทรงชิ้นงาน ในการออกแบบแม่พิมพ์นั้นจะต้องคำนึงถึงกฎเกณฑ์ข้อบังคับในการออกแบบและพิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ ประกอบด้วยโดย

อาจจะเปรียบเทียบกับระบบของเทอร์โมพลาสติก ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดยางได้เป็นอย่างดี

กฎเกณฑ์ในการออกแบบสำหรับระบบทางวิ่งพิจารณาในรายละเอียดดังนี้

- ออกแบบให้ระบบทางวิ่งให้มีปริมาณน้อยที่สุด
- ออกแบบสำหรับทางวิ่งให้ความดันสูญเสียค่อนข้างดี
- พิจารณาการเชื่อมต่อของตำแหน่งรูเข้า (Gate) ทุกๆตำแหน่ง

ความพร้อมกันของการไหลเข้าที่ภายในแม่พิมพ์ของเนื้อยางภายในแม่พิมพ์เป็นจุดมุ่งหมายหลักสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ การทำให้ทางวิ่งมีการสอดคล้องกันของการไหลนั้นสำคัญ แต่ยังไม่พอเพียงที่จะทำให้บรรลุถึงจุดมุ่งหมายที่จะทำให้เนื้อยางไหลเข้าพร้อมๆ กันเพราะยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น ขนาดของรูเข้าและอุณหภูมิเนื้อยางที่มีผลกระทบต่อการไหลเข้าไปในเบ้าขึ้นงาน รูปที่ 25 แสดงการจัดวางเบ้าขึ้นงานสำหรับแม่พิมพ์ฉีด



**รูปที่ 25** แสดงการจัดวางเบ้าขึ้นงานสำหรับแม่พิมพ์ฉีด

แม่พิมพ์ฉีดที่แสดงในรูปที่ 25 จะแสดงให้เห็นการเชื่อมต่อในแต่ละเบ้าขึ้นงานภายในแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงความสมดุลกันควบคู่ไปกับความสมมาตรกันของจำนวนรูปทรงขึ้นงานหลังจากการทดสอบการไหลแล้วรูปทรง H จะขาดความสมดุลดังแสดงในรูปที่ 25 ซึ่งผลสรุปคือการออกแบบนี้ใช้กับการออกแบบที่เป็นแม่พิมพ์ของเทอร์โมพลาสติกและก็สามารถที่จะเริ่มนำไปใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์เป็นยางได้

ความเค้นเฉือนและความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตลอดในตัวโพลิเมอร์ในการไหลไปในทางวิ่ง ทำให้เกิดการไหลที่ไม่สมดุลภายในแม่พิมพ์ที่มีรูปร่างแบบ H จะแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นกับการไหลไม่สมดุลว่า “Melt Flipper” (การละลายของครีป) การทำให้โพลิเมอร์เกิดการหมุนและวิธีการในการที่จะทำให้เกิดการไหลที่สมดุลกันนั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น การที่มุมที่เป็นกึ่งเพิ่มเข้าไปในตัวทางวิ่งและอัตราส่วนของการฉีดที่จะต้องสัมพันธ์กัน มุมที่เป็นกึ่งนั้นจะเป็นมุมที่อยู่ระหว่างช่องไหลที่เชื่อมต่อกับตัวขึ้นงานและตัวกึ่งเอง การเพิ่มขึ้นของมุมที่กึ่งจะทำให้การควบคุมการเพิ่มขึ้นและการไหลไม่สมดุลภายในรูปทรงแม่พิมพ์

มีหลายวิธีที่แตกต่างกันในการใช้สร้างเบ้าขึ้นงานภายในแม่พิมพ์ โดยการขึ้นรูปโดยเครื่องจักรเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด วิธีการขึ้นรูปสามารถทำรวมกันได้โดยการขึ้นรูปโดยเครื่องจักรแล้วตามด้วยวิธีการ Hobbing ทำโดยการลดความแข็งแรงลงโดยการให้แรงกระทำให้เหล็กนั้นอ่อนลงบริเวณภายในรูปทรงของขึ้นงาน การทำ

Hobbing จะเหมาะสมกับที่จะใช้กับแม่พิมพ์ที่มีจำนวนชิ้นงานมากและมีความซับซ้อนของความโค้งสูง แต่มีข้อกำหนดในรูปทรงที่มุมแหลมคม และมีส่วนตัดภายใน (Under Cuts) และแม่พิมพ์มีการขัดเงาที่สูงและมีการทำมุมทุกด้าน

การขึ้นรูปโดยใช้กระแสไฟในการขบไล่โลหะออก (EDM) เป็นวิธีใหม่ที่เป็นที่นิยมในการขึ้นรูปร่างชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ EDM ต่างจากการทำ Hobbing ในการที่จะสร้างรูปร่างของตัวชิ้นงานนั้นจะต้องนำขั้วไฟฟ้าจมลงไปบนแผ่นเหล็กที่ต้องการขึ้นรูปหรือใช้เส้นลวดลากผ่านแผ่นโลหะ ในการขึ้นรูปแบบ EDM นี้จะไปทำให้เกิดแรงที่กระทำสูงในขณะที่ทำการควบคุมการขึ้นรูปซึ่งปกติจะเกิดการขึ้นรูปโดยเครื่องจักรและแบบ Hobbing การ EDM สามารถใช้ในการขึ้นรูปร่วมกับวิธีการขึ้นรูปอื่นๆในการสร้างร่องที่มีความลึก ซึ่งถ้าต้องการความลึกในแม่พิมพ์ที่กำหนดไว้ครั้งหนึ่งซึ่งสามารถใช้หัวกันได้ แต่ต้องสร้างร่องต่อโดยใช้ EDM ก็จะใช้เวลาการขึ้นรูปเท่าๆ กัน โดยปกติแล้วแนวทางการเลือกในการทำร่องจะต้องใช้หัวกับความเร็วสูง (High-Speed Milling) ในการกัดร่องให้ลึกลงไป 30 mm. ต่อจากนั้นใช้ EDM ตามจนได้ความลึกตามที่ต้องการ

แม่พิมพ์สำหรับผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่เป็นแนวหน้าปิดด้านหน้าของรถ (Fascia) ซึ่งต้องการความเที่ยงตรงเป็นอย่างสูงและต้องการแข็งแรง และความต้านทานต่อลมที่ปะทะซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างระหว่างที่เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูง ขนาดของอนุภาคที่กำหนดกันที่จะบรรจุนั้นจะอยู่ในระดับสูงภายในตัวเนื้อยาง (Compound) ซึ่งสามารถทำให้เกิดความแข็งแรงได้แต่ถ้ามากเกินไปจะทำให้ตัวเนื้อยางมีความหนืดสูงภายในตัวแม่พิมพ์ฉีด ในการเลือกตัวผสมที่เป็นโพลีเมอร์ และส่วนผสมอื่นๆ ในเนื้อยางผสมแบบ EPDM เพื่อจะทำให้เกิดความสมดุลในการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ ระยะเวลาในการไหลของยาง ความแข็งแรงและอื่นๆ ที่ต้องการตามคุณสมบัติ สำหรับวิธีการและเหตุผลทางเศรษฐกิจเป็น EPDM ในภายหลังใช้โพลิโพรไพรีน (Polypropylene) ในการสร้างเทอร์โมพลาสติก โพลีโอลิฟีน (Thermoplastic Polyolefin (TPO) เป็นองค์ประกอบ

### 3.7.6 ช่องนำฉีดในแม่พิมพ์ (Sprue)

ตัวช่องนำฉีดนั้นจะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องฉีดกับแม่พิมพ์ฉีดยางซึ่งสามารถที่จะพิจารณาได้จากชิ้นงานและแม่พิมพ์ลักษณะทางเข้าจะมีลักษณะที่เข้าไปในช่องรูที่เล็กแล้วขยายออกไปจนใหญ่ มีลักษณะเป็นรูที่เรียว (Taper) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นทางเข้าและออกหลังจากเสร็จ วงจรการทำงานซึ่งบางทีเราสามารถที่จะออกแบบช่องนำฉีดให้ตรงกับตัวเบ้าของชิ้นงานได้เลยถ้าอยู่ในลักษณะของชิ้นงานเดียว แต่โดยปกติแล้วชิ้นงานจะมีอยู่หลายชิ้นซึ่งจะต้องทำช่องทางวิ่งให้เนื้อยางไหลเข้าไปในตัวแม่พิมพ์

### 3.7.7 การออกแบบช่องทางวิ่ง (Runner Design)

โดยทั่วไปแล้วการออกแบบช่องทางวิ่งนั้นจะออกแบบเป็นทรงกลมซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการไหลของเนื้อยางและง่ายต่อการเปลี่ยนทิศทางแต่จะทำให้ต้นทุนของการทำแม่พิมพ์สูงขึ้นโดยทั่วไปจะออกแบบทั้งเป็นแบบช่องทางวิ่งที่ร้อนหรือช่องทางวิ่งที่เย็น (Hot or Cold Runner) ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดยาง เนื้อยาง



(Compound) ในช่องทางวังที่ร้อนจะเกิดการยึดตัวกันภายในเนื้อเยื่อเมื่อโดนความร้อน (Cross Links) และที่อยู่  
ในกระบวนการทำงาน แต่ในระบบทางวังเย็นนั้นจะไม่เกิดขึ้น

ในการพิจารณาระยะทางระหว่างหัวฉีดจนถึงตัวชิ้นงานต้องมีการออกแบบที่เหมาะสม โดยปกติชิ้นการ  
ไหลของเนื้อเยื่อจะไหลออกจากหัวฉีดเข้าไปในช่องนำฉีดผ่านเข้าไปในช่องทางวังไหลผ่านเข้าไปในรูเข้าและ  
จะไหลผ่านเข้าไปในเบ้าชิ้นงานในแม่พิมพ์ ทางวังมีลักษณะเป็นช่องภายในแม่พิมพ์โดยจะได้รับเนื้อเยื่อจากช่อง  
นำฉีดที่จุดศูนย์กลาง ทางวังนั้นจะต้องพิจารณาถึงฉนวนที่อยู่รอบๆ ทางวังต้องการการออกแบบให้มีระยะทาง  
สั้นที่สุดและตรงกับเบ้าชิ้นงานภายในแม่พิมพ์มากที่สุดเพื่อที่จะเป็นการลดของเสียจากเนื้อเยื่อให้น้อยที่สุด ซึ่ง  
จะทำให้ระยะเวลาในการฉีดเนื้อเยื่อเข้าไปในแม่พิมพ์นั้นสั้นลงด้วย ในการเลือกทางวังที่ดีนั้นจะต้องเหมาะสม  
ว่าจะเลือกใช้หน้าตัดของทางวังแบบไหน ซึ่งจะแบ่งเป็นแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม เป็นทรงกลม และครึ่งวงกลม ใน  
การไหลนั้นจะต้องไหลผ่านโดยง่ายและที่มุมจะต้องทำเป็นแนวโค้งเพื่อลดความดันที่สูญเสียไป

ในการออกแบบทางวังนั้นสามารถใช้สมการในการช่วยได้โดยใช้คุณสมบัติของการไหล สมการ  
Poiseuille's สำหรับการไหลแบบราบเรียบ (Laminar (Non-Turbulent) การไหลของของไหลแบบนิว  
โตเนียนในท่อ Capillary แสดงดังสมการที่ 51

$$\frac{P}{\pi r^4} = 8L\mu V \quad (51)$$

โดยที่	P	=	ความดันที่แตกต่างกันระหว่างจุดปลายและในท่อ
	L	=	ความยาวของท่อ
	$\mu$	=	ค่าความหนืดของของไหล
	V	=	ปริมาตรอัตราการไหล
	r	=	รัศมีของท่อ

การไหลของปริมาตรของของไหลแบบนิวโตเนียนจะเป็นอัตราส่วนของกำลังสี่ของรัศมีของท่อหรือ  
พื้นที่หน้าตัดของท่อ โดยที่จะไม่มีการเพิ่มขึ้นของรัศมีของหัวฉีด ช่องทางวัง และรูเข้า ซึ่งจะหาค่าของความ  
แตกต่างในอัตราส่วนการไหลของของไหลผ่านเข้าไปในตัวชิ้นงาน

ความดันที่สูญเสียไปหรือความต้านทานของการไหลจะเกิดที่บริเวณรอบๆ ท่อซึ่งจะขนานไปกับท่อซึ่ง  
จะเป็นไปตามสัดส่วนของความยาวจะเป็นเหตุผลที่จะต้องออกแบบให้ทางวังที่มีความยาวน้อยที่สุดเท่าที่จะ  
เป็นไปได้ ความดันที่ใช้ในการฉีดจะสูญเสียไปโดยไม่มีประโยชน์สำหรับช่องทางที่ยาวและแคบ ความดันของ  
เครื่องฉีดมีข้อกำหนดโดยความดันที่ลดลงขณะที่ไหลไปในทางวัง แต่ถ้าใช้ความดันสูงสุดของเครื่องในการฉีด  
เนื้อเยื่อเข้าไปในตัวแม่พิมพ์แล้วยังไม่สามารถที่จะชนะแรงดันที่สูญเสียไปนั้น ควรที่จะแก้ไขที่การเพิ่มขนาด  
ของเส้นผ่านศูนย์กลางช่องนำฉีดและทางวัง และจะต้องพิจารณาถึงขนาดที่ใหญ่ขึ้น

สมการที่กล่าวมานั้นในรายละเอียดของทางวิ่งนั้นไม่สามารถที่จะนำไปใช้ได้กับของไหลที่ไม่ใช่ของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non – Newtonian) ตัวอย่างของความหนืดของยางนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนแต่ในการกำหนดความหนืดของยางให้ขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน (อัตราการไหล) นั้นไม่ยากในกระบวนการคิด ในการใช้สมการนั้นจะมีความยุ่งยากที่จะนำไปใช้ในช่วงที่มีอุณหภูมิที่ค่อยเพิ่มขึ้น (และทำให้ความหนืดนั้นสูงขึ้นด้วย) และความดันที่ค่อย ๆ ลดลงในทางวิ่ง และเป็นการยากที่สมการกับการไหลแบบปั่นป่วน

ตัวอย่างของพฤติกรรมการไหลของยางที่เป็นแบบนอนนิวโตเนียน ซึ่งจะทำให้เข้าใจถึงสรุปที่เกิดขึ้นของไหลนิวโตเนียนนั้นจะไหลแบบราบเรียบภายในท่อและใช้ความดันตามหลังเพิ่มขึ้น 25% จะทำให้อัตราส่วนในการไหลเพิ่มขึ้น 25% การเพิ่มขึ้น 25% ของการไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian) นั้นจะทำให้อัตราการไหลเพิ่มเป็น 40-50%

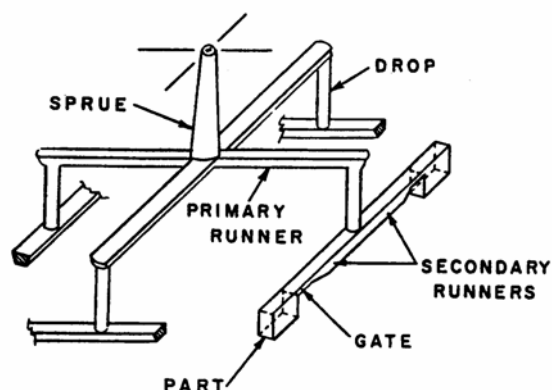
### 3.7.8 ระบบทางวิ่งร้อน (Hot Runner)

การให้ความร้อนแก่เนื้อยาง (Compound) ในช่องทางวิ่งร้อนโดยทั่วไปแล้วจะทิ้งยางส่วนนี้ออกไปเมื่อเสร็จกระบวนการแต่บางเวลาจะทำให้เกิดการติดของเศษชิ้นยางที่ตายแล้วผสมกับเนื้อยางที่เข้ามาใหม่ในการผลิตครั้งต่อไปเศษชิ้นยางที่ติดเข้าไปจากช่องทางวิ่งร้อนจะเป็นข้อเสียเปรียบหลักๆ เพราะจะทำให้เกิดการเสียดันทุนในมูลค่าของเมื่อยางที่เสียไปแต่จะแก้ไขได้โดยการกำจัดเนื้อยางที่ติดอยู่ออกไปก่อนที่จะทำการผลิตครั้งต่อไป

ระบบทางวิ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการกระจายแจกจ่ายน้ำในท่อประปาโดยการไหลของน้ำที่มาก ๆ จะไหลภายในท่อหลักซึ่งมีขนาดใหญ่ (เปรียบได้กับรูเข้า) และท่อหลักที่เล็กลงมาอีกที่จะจ่ายให้กับแต่ละบ้าน (ทางวิ่งหลัก (Primary Runner)) และแจกจ่ายไปตามท่อรอบๆ เพื่อที่จะจ่ายให้บ้านแต่ละหลัง (ทางวิ่งรอง (Secondary Runner)) และท่อทางวิ่งภายในบ้าน (ช่องทางเข้า (Gates)) เป็นลำดับต่อมา รูเข้าที่ปรับได้ (Adjustable Gates) ในแต่ละแม่พิมพ์ฉีดนั้นจะเป็นตัวควบคุมการไหลของยางที่จะเข้าไปในรูปทรงชิ้นงานเปรียบเสมือนก๊อกน้ำที่ควบคุมการไหลของน้ำดังแสดงตัวอย่างไว้ในรูปที่ 26

ผสมของยางนั้นจะมีความหนืดที่สูงซึ่งจะมีลักษณะเป็นของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian) ซึ่งหลักของการไหลจะมีความซับซ้อนมากกว่าน้ำซึ่งจะต้องทำการออกแบบช่องทางวิ่งที่ซับซ้อนกว่า ซึ่งโดยทั่วไปจะออกแบบช่องทางวิ่งเป็นลักษณะวงกลมหรือโค้ง ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนทิศทางการวิ่งดีกว่าแบบอื่น แต่ก็ทำให้มีราคาที่สูงขึ้นซึ่งในหน้าตัดนั้นไม่สามารถที่จะทำให้เล็กลงได้เพราะจะมีลักษณะการทำงานโดยการประกบกันทั้งสองส่วน



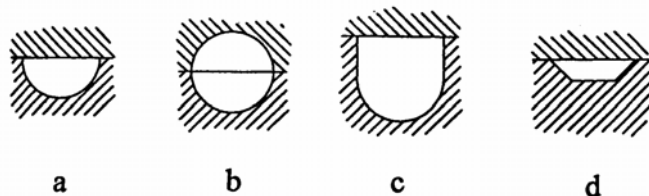


**รูปที่ 26** แสดงถึงระบบการไหลของแม่พิมพ์แบบฉีด

วัตถุประสงค์ของการออกแบบระบบช่องทางวิ่งเพื่อที่จะทำให้เนื้อยางไหลเข้าไปในรูปทรงชิ้นงานของแม่พิมพ์ฉีดในลักษณะที่พร้อมกันเพื่อที่จะทำให้เนื้อยางนั้นมีสถานะที่เหมือนกันทุกๆ ส่วนในช่วงเวลาที่ให้ความร้อน ในออกแบบระบบทางไหลให้สมดุลย์กันของการไหลของเนื้อยางนั้นเป็นข้อกำหนดที่สำคัญและเป็นวัตถุประสงค์หลักของการออกแบบช่องทางเข้าและองค์ประกอบอื่นๆ เช่น อุณหภูมินี้จะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมกรไหลของเนื้อยาง

ในการออกแบบช่องทางวิ่งจะมีลักษณะที่คล้ายๆ กันของทั้ง TSEs และ TPEs ซึ่งในการออกแบบนั้นจะต้องเข้าใจในพฤติกรรมกรไหลของระบบและตัวเนื้อยางและดูที่ความสมดุลย์ของการไหลที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์ของแต่และชนิดของตัวเนื้อยาง

โดยปกติแล้วการออกแบบช่องทางวิ่งนั้นเราจะออกแบบตามหลักเกณฑ์การออกแบบที่กำหนดไว้และบ่อยครั้งที่จะออกแบบตามรูปทรงของแม่พิมพ์โดยการใช้ประสบการณ์เพราะบางทีการออกแบบโดยการใช้หลักเกณฑ์นั้นอาจจะไม่พอเพียงในการออกแบบที่จะทำแม่พิมพ์ที่จะทำแม่พิมพ์ฉีดนั้นจะออกแบบให้ช่องทางวิ่งนั้นมีขนาดเล็กกว่าขนาดธรรมดาเพื่อที่จะดูลักษณะการไหลก่อนแต่ก็สามารถที่จะทำให้ช่องทางของทางไหลมีขนาดใหญ่ขึ้นตามที่ต้องการได้ เป็นการง่ายที่จะทำการขึ้นรูปทางวิ่งใหม่โดยทำการเชื่อมโลหะเข้าไปในทางวิ่งและนำมาทำการขึ้นรูปช่องทางวิ่งใหม่ ดังรูปที่ 27 ซึ่งจะแสดงให้เห็นหน้าตัดของช่องทางวิ่งในรูปแบบต่างๆ ในการออกแบบ



**รูปที่ 27** ภาพหน้าตัดของทางวิ่ง ‘a’ รูปครึ่งวงกลม, ‘b’, วงกลม ‘c’ ครึ่งทรงกลมที่มีการขยายแนวยาว และ ‘d’ รูปทรงสี่เหลี่ยม

รูปแบบความแตกต่างกันของพื้นที่หน้าตัดของช่องทางวิ่งจะมีทั้งข้อได้เปรียบและเสียเปรียบซึ่งช่องทางวิ่งแบบครึ่งวงกลมดังรูป “a” จะทำการขึ้นรูปที่แม่พิมพ์ที่แม่พิมพ์อันเดียว ตัวอย่างเช่น การใช้หัวกดเป็นรูปทรงกลม (Ball-Shaped End Mill) ซึ่งการขึ้นรูปแบบนี้จะไม่ค่อยได้ความแม่นยำในการสร้างแนวเส้นตรงเท่าไร การให้ความร้อนกับทางวิ่งจะความสัมพันธ์กันของการเคลื่อนที่กับการเข้าและออกของเนื้อยางที่อยู่ภายในในแม่พิมพ์ซึ่งมีขนาดที่เล็กจะต้องออกแบบแม่พิมพ์ไม่ให้อัตราส่วนของปริมาตรของช่องทางวิ่งสูงเมื่อเทียบกับปริมาตรของแม่พิมพ์และในช่องทางวิ่งที่เล็กภายในแม่พิมพ์ที่มีส่วนผสมของยางที่โหลมีความหนืดสูง (High Viscosity) อาจจะทำให้ยางโหลช้าก่อนที่จะไปถึงภายในเป่าของแม่พิมพ์ซึ่งจะต้องดูช่องทางวิ่งให้เหมาะสมกับเวลาในการสุกตัวของยางภายในแม่พิมพ์ช่องทางวิ่งแบบทรงครึ่งวงกลมจะทำให้การสุกตัวของยางนั้นเร็วกว่าแบบทรงกลมเมื่อมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเดียวกันในการให้ความร้อนแก่ยางในเวลาเดียวกันหน้าตัดแบบครึ่งวงกลมนั้นจะได้เปรียบกว่าแบบวงกลมถ้าไม่คิดถึงความดันที่เพิ่มขึ้นอย่างสูงของช่องทางวิ่งแบบครึ่งวงกลม

ค่าข้อมูลของรีโอมิเตอร์นั้นจะใช้คำนวณค่าความดันที่สูญเสียไป (Pressure Drop) ที่ขนาดของความแตกต่างของขนาดช่องทางวิ่งในหน้าตัดแบบครึ่งวงกลม วงกลม และแบบสี่เหลี่ยมสำหรับยางนีโอพรีน (Neoprene Elastomer) ดังตัวอย่างความดันที่ตกลงของทางวิ่งแบบครึ่งวงกลมและแบบวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 นิ้ว จะอยู่ที่ 13,827 และ 11,686 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เมื่อเปรียบเทียบกันดูแล้วที่เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันแบบครึ่งวงกลมนั้นจะมีความดันที่ตกลงน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับด้านเดียว และความดันจะลดลง 14,124 ปอนด์ต่อตารางนิ้วที่ช่องทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยม ความกว้าง 0.2 นิ้ว และลึก 0.133 นิ้ว

ในช่องทางวิ่งแบบวงกลม “b” ดังแสดงในรูปที่ 27 นั้นจะต้องขึ้นรูปในแม่พิมพ์ทั้งตัวล่างและตัวบนให้มีแนวเดียวกันซึ่งในปัจจุบันพื้นที่ที่สามารถที่จะทำการขึ้นรูปช่องทางวิ่งให้ตรงกันได้อย่างแม่นยำ ช่องทางวิ่งแบบ “b” สามารถที่จะให้การโหลได้ง่ายกว่าแบบ “a” ซึ่งจะเหมือนเอาแบบ “a” มาปะกบกันสองด้าน

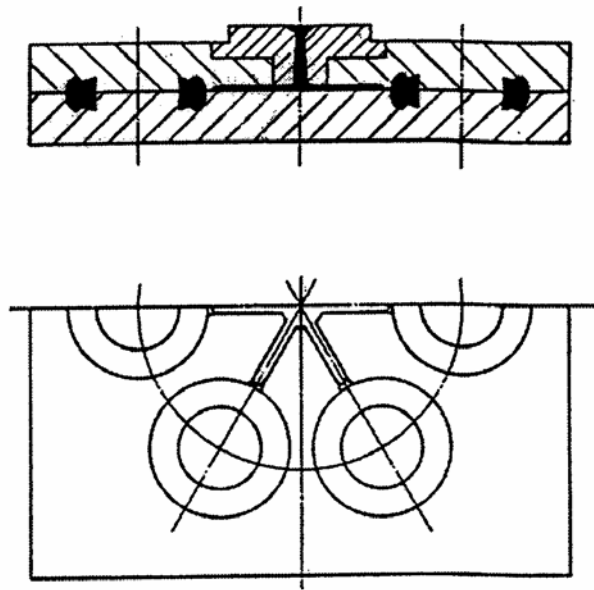
ในการปรับปรุงช่องทางวิ่งแบบครึ่งวงกลมแบบ “c” นั้นจะทำให้ลึกลงไปอีก โดยการสร้างนี้จะทำได้ยากกว่าช่องทางวิ่งแบบ “a” หรือ “b” เพราะความลึกของทางวิ่ง “c” นั้นจะลึกเกินกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางหรือเท่ากับพื้นที่ฉายของวงกลม ซึ่งจะมีปริมาตรของทางวิ่งมากกว่าแบบ “a” ซึ่งจะสามารถที่จะให้แรงกดของแคว้น (Clamping Force) ได้ เพราะในการเพิ่มปริมาตรนั้นจะไม่ต้องการแรงกดของแคว้นที่เพิ่มขึ้นในตอนปิดแม่พิมพ์และแรงที่ใช้ในตอนเปิดแม่พิมพ์ออกนั้นจะใช้ความดันของยางซึ่งเป็นอิสระต่อช่องทางวิ่งที่ลึกลงไป

สำหรับแม่พิมพ์ที่มีความบางซึ่งไม่สามารถที่จะทำช่องทางวิ่งให้มีลักษณะเป็นทรงกลมได้ ซึ่งจะสามารถทำเป็นช่องสี่เหลี่ยมดังรูป “d” ได้ โดยสามารถสร้างช่องสี่เหลี่ยมโดยใช้หัวกัดแบบเอียง (Tapered End Mill) โดยขึ้นรูปไปบนผิวหน้าของแม่พิมพ์ สำหรับช่องทางวิ่งแบบ “d” มีโอกาสทำให้เนื้อยางที่อ่อนนิ่มขาดได้ขณะที่ทำการไหลเนื่องจากมีมุมที่คมที่ร่องทั้งสองด้านและจะมีโอกาสที่จะทำให้เกิดสิ่งสกปรกไปติดอยู่ในมุมของร่องทางวิ่งได้ การกำจัดมุมที่คมออกโดยทำให้มีลักษณะโค้งจะทำให้ลดปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งสองได้

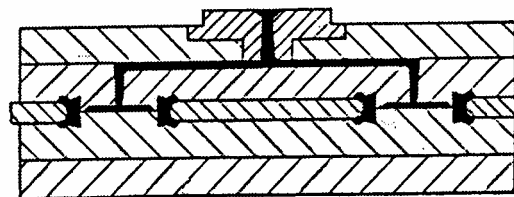
การออกแบบนั้นจะต้องทำให้ช่องทางวิ่งมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และยังสามารถที่จะควบคุมความสมดุลของการไหลของระบบสำหรับแม่พิมพ์แบบฉีดที่จะฉีดเข้าไปในเบ้าของชิ้นงาน โดย ใช้ วิ ธี ก า ร พื้นฐานที่ขึ้นอยู่กับความหนืดในการไหลโดยให้กฎการยกกำลัง (Power-Law Viscosity Model) ภายใต้ข้อกำหนดที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะไม่มีผลกระทบที่สำคัญต่อค่าความหนืดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางวิ่งในทิศตามน้ำจากการเชื่อมต่อกันสามารถคำนวณโดยการหารเส้นผ่านศูนย์กลางของทางวิ่งที่ทวนน้ำ และรากที่สามของจำนวนท่อทางวิ่งที่ตามน้ำที่เชื่อมต่อกัน ต่อมาในภายหลังได้กำหนดกฎสำหรับการออกแบบช่องทางวิ่งให้มีปริมาณเล็กที่สุดโดยใช้หลักการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

ในความแตกต่างของยางโดยตัวอย่าง ในแม่พิมพ์แบบสี่เบ้า (ชิ้นงาน) โดยใช้การทางวิ่งสั้นสองและแบบยาวสองในการกำหนดพฤติกรรมการไหลในช่องทางวิ่ง ตัวอย่างของความแตกต่างกันของยาง NR และยางซิลิโคน (Silicone Compound) แสดงให้เห็นความแตกต่างกันภายในแม่พิมพ์ อธิบายโดยการพิจารณาคูณสมบัติทางรีโอโลยีของยางเมื่อออกแบบแม่พิมพ์

ระบบช่องทางวิ่งแบบร้อนสามารถออกแบบเป็นระบบสองหรือสามชั้นของแม่พิมพ์แบบฉีดในรูปที่ 28 แสดงการออกแบบเป็นแบบสองแผ่นโดยเนื้อยางจะไหลจากหัวฉีด (Injection Nozzle) เข้าไปในช่องทางวิ่งหกทางและไหลผ่านรูเข้าเพื่อที่จะเข้าไปภายในเบ้าชิ้นงาน หลังจากที่เนื้อยางไหลเข้าไปภายในเบ้าแม่พิมพ์แล้วตอนแรกจะเกิดการทำปฏิกิริยาของเนื้อยาง (Crosslinks) ที่บริเวณรูเข้าก่อนเพราะว่าที่รูเข้านั้นจะมีความหนาที่น้อยกว่าช่องทางวิ่งและควรทำให้มีกระจายความร้อนที่ต่ำเพราะเนื้อยางภายในรูเข้าจะมีความบางและจะทำให้เกิดปฏิกิริยาของเนื้อยาง ก่อนและเกิดการทำปฏิกิริยาภายในตัวชิ้นงานเนื่องจากพื้นที่ของรูเข้ามีขนาดเล็ก ชั้นของแม่พิมพ์จะแยกออกจากช่องทางวิ่งที่รูเข้า รูเข้าที่เล็กนั้นเป็นตัวกันเศษสิ่งสกปรกที่จะไหลเข้าไปในตัวชิ้นงานที่กล่าวมาเป็นแบบง่ายโดยใช้ต้นทุนต่ำสำหรับแบบสองชั้น และแบบสามชั้นจะแสดงดังรูปที่ 29

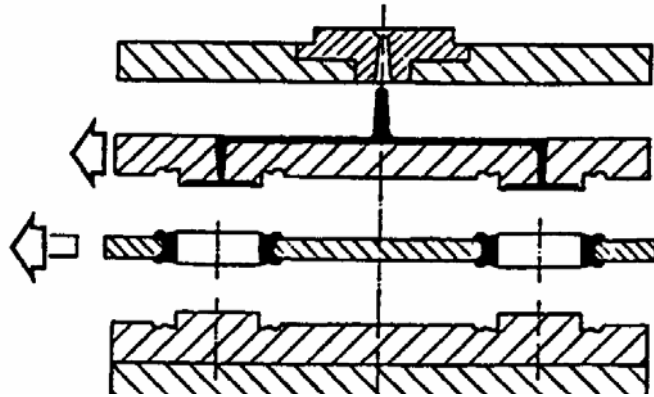


**รูปที่ 28** แม่พิมพ์ฉีดเป็นแบบสองชั้น



**รูปที่ 29** แม่พิมพ์ฉีดเป็นแบบสามชั้น

เนือยงจะไหลเข้าที่ช่องนำฉีดและไหลลงไปในช่องทางวิ่งเพื่อที่จะเข้าไปในตัวชิ้นงานแต่ละตัวภายในแม่พิมพ์ รูปที่ 27 จะแสดงระบบช่องทางวิ่งที่มีช่องทางวิ่งไหลลงเพื่อที่จะจ่ายให้ช่องทางวิ่งที่สองก่อนที่เข้าไปภายในตัวเป้าชิ้นงานจะต้องผ่านรูเข้า ในความแตกต่างกันของการออกแบบขอบทางเข้าแสดงดังรูปที่ 28 จะมีลักษณะรูเข้าเป็นทรงวงแหวนเพื่อที่จะผ่านเนือยงที่เข้าไปในตัวชิ้นงานหลังจากนั้นจะทำการบ่มโดยการให้ความร้อนเพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาของเนือยงแม่พิมพ์ที่แยกส่วนเปิดออกมาแสดงในรูปที่ 30



**รูปที่ 30** การทำงานแม่พิมพ์ฉีดเมื่อมีการแยกส่วน

ทิศทางของลูกศรแสดงถึงทิศทางในการเคลื่อนที่ของแผ่นแม่พิมพ์สำหรับการเคลื่อนที่ซึ่ง อาจทำให้เกิดเศษสกรปรกหรือการเสียดสีกันของแม่พิมพ์สิ่งที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์ร่วมกันของแม่พิมพ์ทั้ง 2 แผ่น ในการที่จะแก้ไขปรับปรุงลักษณะของการไหลเข้าให้มีลักษณะที่เข้าในแต่ละโมดูลเท่าๆ กัน นั้นจะทำโดยการปรับปรุงรูปร่างของหัวฉีด และการทำให้สิ่งปลอมปนน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นจากแม่พิมพ์โดยปกติ จะเกิดขึ้นโดยการมีรูเข้าแบบพัดหรือแบบเข็ม (Fan Gate or Pin Gate) ในการใช้ระบบทางวิ่งแบบเย็น (Cold Runner) นั้นจะเป็นการลดปริมาณของเสียภายในช่องทางวิ่งลงกว่าแบบระบบทางวิ่งแบบร้อน

### 3.7.9 ระบบทางวิ่งเย็น (Cold Runner System)

ของเสียที่เกิดจากเนื้อวัสดุในขั้นตอนในการฉีดจะเกิดขึ้นในทางวิ่งและช่องนำฉีด ซึ่งของเสียนั้นจะทำให้หน้าหนักของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเสร็จกระบวนการ ระบบทางวิ่งเย็นได้คิดขึ้นมาเพื่อที่จะลดของเสียที่เกิดจากการไหลของเนื้อภายในระบบทางวิ่ง โดยทั่วไปจะทำให้เย็นช่องภายในแม่พิมพ์โดยการขยายกระบวนการของเครื่องจักร โดยจะทำการฉีดเนื้อเข้าไปในรูปทรงชิ้นงานโดยตรงในแต่ละขั้นตอนที่เปิดแม่พิมพ์ออก แม่พิมพ์จะแยกเนื้ออย่างทีไหลไปในช่องและจะมีระยะทางที่สั้นในแต่ละชิ้น

แม่พิมพ์จะประกอบด้วย

- 1) พื้นที่ของรูปทรงภายในแม่พิมพ์ฉีด
- 2) มีบริเวณฉนวนกันความร้อน
- 3) มีบริเวณที่กักเก็บเนื้ออย่างที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่จะทำให้เนื้อเกิดการเกิดปฏิกิริยา

ในการที่จะทำให้ปลอดภัยของความหลากหลายของอุณหภูมิที่จะทำให้ต่ำกว่าจุดที่จะทำให้เนื้อเกิดการเกิดปฏิกิริยา (Vulcanisation) อุณหภูมิจะอยู่ที่ประมาณ  $120 - 130^{\circ}\text{C}$  ( $248 - 266^{\circ}\text{F}$ ) ในการที่จะตรวจเช็คดู อาจจะได้จากการดูเนื้อที่เก็บไว้ในหัวฉีดของเครื่องฉีดหลังจากการหน่วงเวลาการหมุนของสกรู โดยจะดูได้จากลักษณะของยางว่าเกิด fresh และสังเกตจากสีที่เกิดขึ้น

การใช้ระบบทางวิ่งแบบเยื่อนั้นจะทำให้ประหยัดเนื้อที่ในการฉีดแต่ละครั้งของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ ซึ่งจะเป็นส่วนที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาสำหรับการออกแบบที่ดี ในการออกแบบทางวิ่งของเนื้อที่ที่ฉีดยังจะต้องดูนอกเหนือจากการคำนวณด้วยซึ่งจะต้องพิจารณาถึงการช่วยในการควบคุมชิ้นงานที่จะออกมาจากแม่พิมพ์

### 3.7.10 การออกแบบรูเข้า (Gate Design)

ทางวิ่งจะไปสิ้นสุดที่รูเข้าที่เข้าชิ้นงานในแม่พิมพ์ซึ่งจะเป็นช่องทางที่เนื้อยางจะไหลเข้าไปในรูปทรงของชิ้นงานในแม่พิมพ์ รูเข้าจะมีหน้าที่คล้ายกับหัวฉีด และสามารถออกแบบขนาดและรูปร่าง และจะเป็นช่วงสุดท้ายของเนื้อที่ที่จะได้รับความร้อนก่อนที่เนื้อยางจะเข้าไปในแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามจะเป็นการยากที่จะรู้ถึงอุณหภูมิที่สูงขึ้นที่จุดนี้เพราะไม่สามารถที่จะวัดตัววัดอุณหภูมิในตำแหน่งนี้ได้ ดังนั้นจึงแก้ไขโดยการติดตั้งวัดไว้ที่แม่พิมพ์รอบๆ จุดรูเข้าแต่อย่างไรก็ตามในการเปิดแม่พิมพ์อย่างรวดเร็วตัววัดอุณหภูมิจะไม่สามารถอุณหภูมิตอนสุดท้ายได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นอุณหภูมิสุดท้ายจึงกำหนดให้เป็นอุณหภูมิของเนื้อยางที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ และกำหนดให้ค่าการนำความร้อนของยางนั้นค่าดังนั้นจะทำให้ความร้อนที่ผิวของแม่พิมพ์จะใช้เวลานานในการเข้าไปถึงตำแหน่งตรงกลางของแม่พิมพ์

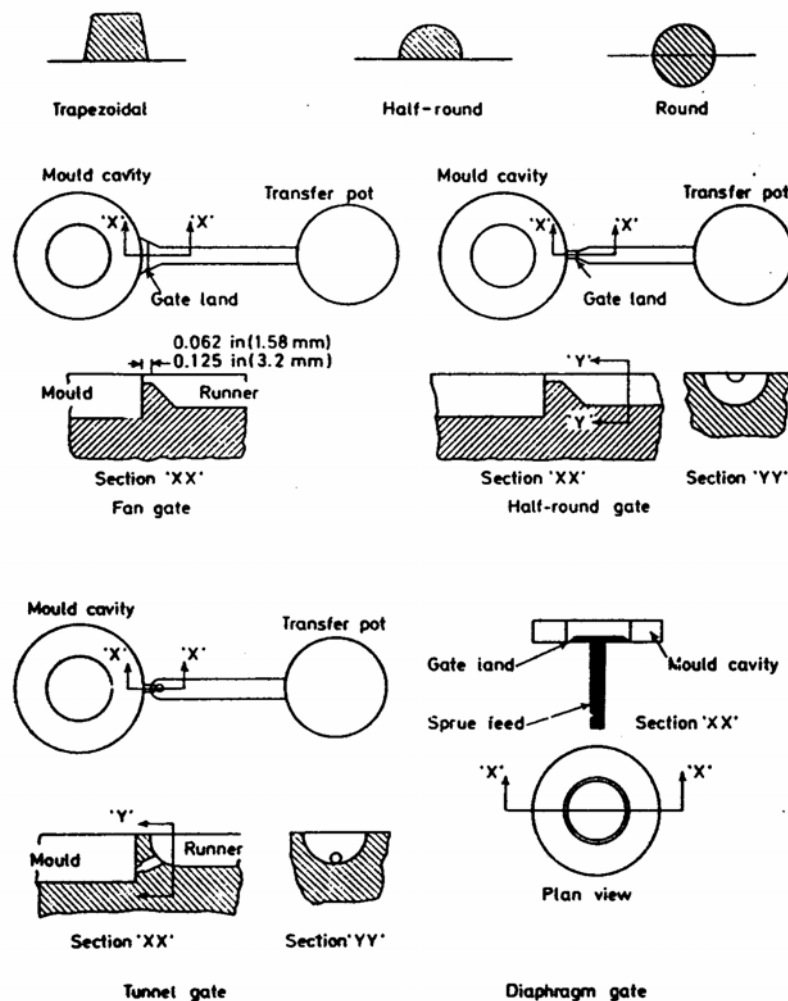
ปัจจัยอื่นๆ ของรูเข้าที่ควรพิจารณาถึงขนาดที่เล็กที่เพียงพอที่จะทำให้เนื้อยางไหลเข้าไปได้ง่ายและมีลักษณะที่เป็นระเบียบที่แน่นอนและไม่จำเป็นที่จะต้องตกแต่งชิ้นงานอีกหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ ในการออกแบบรูเข้านั้นควรจะไม่มีผลกระทบต่อองค์ประกอบอื่นๆ ในการออกแบบถึงแม้ว่าการออกแบบรูเข้านั้นจะมีขนาดและรูปร่างไม่แน่นอนในการออกแบบแต่ก็ควรที่จะมีขนาดที่ใหญ่พอที่จะทำให้เนื้อยางไหลเข้าไปในปริมาตรที่ต้องการของรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์และต้องสอดคล้องกับระยะเวลาในการไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ รูเข้าควรมีความแข็งแรงที่พอเพียงที่จะรับแรงของเนื้อยางในการไหลซึ่งจะทำให้การไหลเข้าไปในแม่พิมพ์นั้นคงที่และรวดเร็วและจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ที่ต่อเนื่องกัน แต่ถ้ามีความแข็งแรงไม่พอเพียงจะทำให้เนื้อยางที่เข้าไปมีลักษณะที่เป็นกิ่งหรือเป็นก้อน ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตไม่ดีในการผลิต

หน้าตัดของรูเข้าโดยทั่วไปจะทำให้มีพื้นที่หน้าตัดเหมือนกับทางวิ่ง (Runner) แต่จะลดขนาดลงมาเหลือประมาณ 0.25 – 0.38 มม. (0.010 – 0.015 นิ้ว) สำหรับความหนาที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มม. ( 1/32 นิ้ว) ขนาดสุดท้ายของรูเข้านั้นต้องทดสอบเพื่อที่จะให้แน่ใจว่าจะไม่ทำให้เกิดความร้อนที่เกินความจำเป็นในการไหลของยางที่จะเข้าไปภายในแม่พิมพ์ สำหรับการออกแบบตอนแรกจะทำให้รูเข้ามีขนาดที่เล็กก่อนและทำการทดลองจริงแล้วค่อยขยายขนาดของรูเข้าให้ใหญ่ขึ้นตามความเหมาะสม รูเข้าของแม่พิมพ์แบบฉีดนั้นจะต้องมีการออกแบบที่ดีซึ่งการไหลของเนื้อยางที่จะเข้าไปภายในรูปทรงชิ้นงานนั้นจะเป็นการไหลโดยการฉีดเข้าแบบต่อเนื่องเข้าไปไม่ใช่การไหลแบบรวดเร็วทันทีทันใด ในการเลือกทางวิ่ง และระบบรูเข้า จะพิจารณาได้ในรูปที่ 31

จากการหาผลกระทบของรูเข้าแบบพัด (Fan gate) ดังแสดงในรูปที่ 32 ที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความลึกโดยใช้เนื้อยางในการทดสอบเป็น Butyl ความลึกของช่องทางจ่ายที่ 0.254 0.508 0.762 และ 1.016 มม

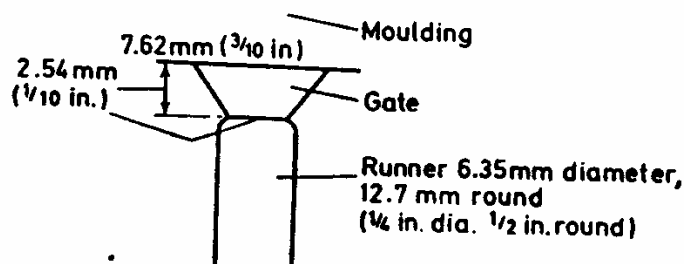
(0.01 0.02 0.03 และ 0.04 นิ้ว) และจะแสดงถึงผลกระทบของเวลาในการฉีดและเวลาของการเกิดปฏิกิริยาของเนื้อยาง (Vulcanisation) ซึ่งจะแสดงให้เห็นในตารางที่ 4

ในความลึกของรูเข้าที่ 1.016 มม. (0.04 นิ้ว) ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการฉีดมีความรวดเร็วและเวลาในการบ่มตัวของเนื้อยางจะเร็วขึ้นรูเข้าที่ใช้ในการเชื่อมต่อโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดดังแสดงในตารางที่ 5 ที่การฉีดแบบเร็วที่หัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.18 มม. (1/8 นิ้ว) และอุณหภูมิในการฉีดต่ำและเวลาในการบ่มเนื้อยางนานขึ้นที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กจะให้อุณหภูมิในตอนที่สูงและเวลาในการบ่มที่สั้นลง



**รูปที่ 31** ชนิดของช่องทางไหลและรูเข้าในรูปแบบต่างๆ





**รูปที่ 32** ทางไหลเข้าแบบพัดที่มีความลึก 0.254 มม. (0.01 นิ้ว) และทำการเปลี่ยนแปลงความลึกที่ขนาด 0.508 มม. (0.02 นิ้ว), 0.762 มม. (0.03 นิ้ว), 1.016 มม. (0.04 นิ้ว)

**ตารางที่ 4** แสดงถึงผลกระทบของความลึกของรูเข้าที่ความลึกต่างๆ

Fan gate depth		Injection time	Vulcanising time
(mm)	(in)	(s)	(s)
0.254	0.010	5.4	35
0.508	0.020	2.8	35
0.762	0.030	2.1	35
1.015	0.040	2.0	30

ในตารางที่ 4 นั้นจะเป็นการทดสอบทางวิ่งแบบครึ่งวงกลม (Half Round) 6.35 มม. (1/4 นิ้ว) เครื่องฉีด Daniels Edgwick 45 SR; อุณหภูมิของกระบอกฉีด 113°C (235°F); อุณหภูมิของแม่พิมพ์ 204 °C (400°F); ความเร็วของสกรู 100 รอบต่อนาที; ความดันในการฉีดของเนื้อยาง 108 MN/m<sup>2</sup> (15,640 lbf/in<sup>2</sup>); เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด 1.98 มม. (5/64 นิ้ว); ปริมาตรในการฉีด 48 ลูกบาศก์เซนติเมตร (2.93 ลูกบาศก์นิ้ว); ยาง Butyl ที่ 40 ชอร์

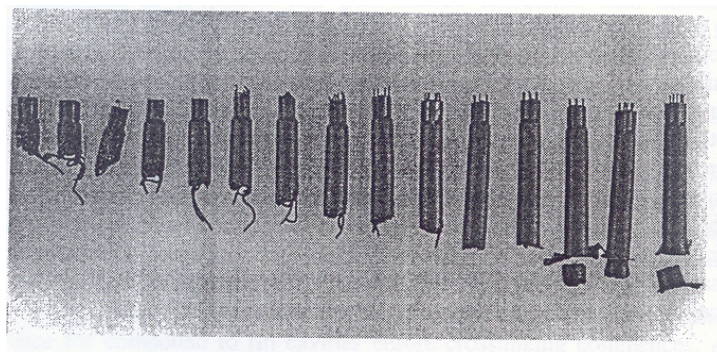
**ตารางที่ 5** แสดงถึงผลกระทบของขนาดที่เปลี่ยนแปลงของขนาดหัวฉีด

Nozzle diameter		Injection time (s)		Injection temperature		Vulcanising time (s)
mm	in	into air	into mould	°C	°F	
1.19	3/64	16.3	23.5*	146	295	<35*
1.59	1/16	3.8	5.3	151	304	35
1.98	5/64	1.9	2.9	145.5	294	35
2.38	3/32	1.5	2.2	140.5	285	35
3.17	1/8	1.0	1.3	132	270	45



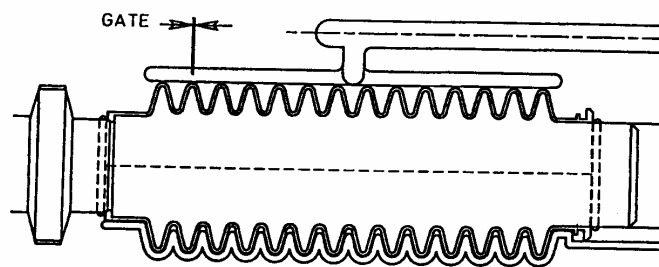
ในตารางที่ 5 จะใช้เครื่องฉีด Daniels Edgwick 45 SR; อุณหภูมิของกระบอกฉีด  $107^{\circ}\text{C}$  ( $225^{\circ}\text{F}$ ); อุณหภูมิของแม่พิมพ์  $204^{\circ}\text{C}$  ( $400^{\circ}\text{F}$ ); ความเร็วของสกรู 100 รอบต่อนาที; ความดันในการฉีดของเนื้อยาง  $113\text{ MN/m}^2$  ( $16,320\text{ lbf/in}^2$ ); ทางวิ่งแบบครึ่งวงกลม (half round) 6.35 มม. (0.25 นิ้ว) ความลึกของรูเข้าแบบพัด 1.015 มม. (0.040 นิ้ว); ยาง Butyl ที่ 40 ชอร์

ในตำแหน่งของช่องทางเข้านั้นจะมีผลต่อการไล่อากาศออกขณะที่เนื้อยางไหลเข้ามาในเป่าขึ้นงาน อากาศที่อยู่ภายในจะถูกไล่ออกไป การเพิ่มปริมาณของเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์ฉีดจะช่วยกำหนดตำแหน่งของช่องลมซึ่งจะเป็นวิธีการในการกำหนดสร้างขั้นตอนในการไหลดังแสดงให้เห็นในรูป 33



**รูปที่ 33** ขั้นตอนของการไหลของเนื้อยางที่เข้าไปภายในแม่พิมพ์ฉีด

ในรูปที่ 34 เป็นตัวอย่างของหน้าตัดของแม่พิมพ์ฉีดของยางเครื่องสูบลมซึ่งในตำแหน่งช่องทางเข้าจะอยู่ในตำแหน่งที่สูงสุดที่ความยาวของด้านบนสุด



**รูปที่ 34** หน้าตัดของแม่พิมพ์ฉีดของยางเครื่องสูบลมซึ่งแสดงตำแหน่งช่องทางเข้า

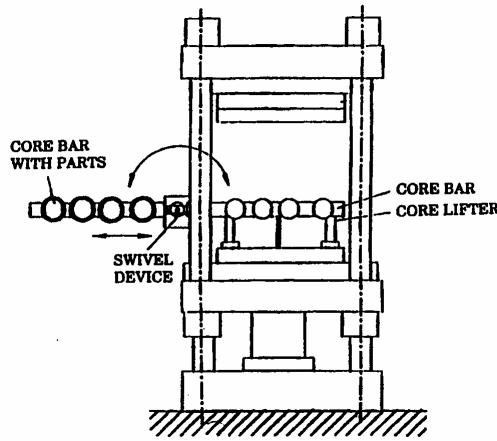
ในการออกแบบรูเข้า การไหลของเนื้อยางจะเข้าไปในแม่พิมพ์ที่กึ่งกลางในแนวแกนของยางเครื่องสูบลม ลักษณะการไหลจะไหลไปตามแนวแกน อากาศจะถูกไล่ออกไปยังที่ริมสุดของแม่พิมพ์เพื่อที่จะออกไปจากแม่พิมพ์ และจะเกิดการไหลตัวของเนื้อยางไปในทิศทางรอบๆ เส้นรอบวงของด้ามยึด ช่วงสุดท้ายของตำแหน่ง

การไหลจะสิ้นสุดที่ตำแหน่งด้านล่างสุดของชิ้นงานที่ตรงกันข้ามกับทางวิ่ง การไหลของเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์จากทางด้านบนและด้านล่างพร้อมๆ กันนั้นก็สามารถที่จะเพิ่มเป็นแบบสองรูเข้าซึ่งก็จะต้องการเนื้อยางในการไหลมากขึ้นซึ่งจะทำให้การทำงานนั้นเร็วขึ้น

การรักษาความดันของอากาศจะนำไปใช้ในการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดที่สุดของชิ้นงาน (ยางเครื่องสูบลม) และค้ำจับยึด, การกระทำของสารหล่อลื่นจะทำให้การเคลื่อนย้ายชิ้นงานออกมาได้ง่าย, ตำแหน่งที่บริเวณผิวของชิ้นงานจะเกิดการฉีกขาดบริเวณทางเข้าหรือบางที่จะเกิดตำแหน่งจากการไหลของเนื้อยางออกมาที่ค้ำจับยึด โดยอากาศที่ถูกบีบอัด ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ต้องการการออกแบบใหม่ของรูเข้าโดยการลดความดันที่ตกค้างบริเวณทางเข้า

รูปทรงของตัวชิ้นงานและตำแหน่งของรูเข้าจะส่งผลกระทบกับการไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ของตัวเนื้อยางระหว่างการไหลพฤติกรรมของการไหลแบ่งออกได้หลายชนิด เช่น การไหลออกมาอย่างรวดเร็ว (Jetting Filling) จะเกิดขึ้นเมื่อการไหลของเนื้อยางออกมาจากช่องทางจ่ายและช่องทางเข้าแม่พิมพ์เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงมากระทบที่บริเวณผิวของแม่พิมพ์ชิ้นงาน การไหลเข้าจะเพิ่มขึ้นโดยเนื้อยางที่พุ่งไปชนแม่พิมพ์นั้นจะพับตัวขึ้นเป็นชั้นๆ การไหลออกมาอย่างรวดเร็วจะเกิดในรูปทรงชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดที่กว้างการไหลแบบเร็วนี้จะเป็นที่ต้องการ ระหว่างการไหลแบบเร็วเข้าไปในแม่พิมพ์เนื้อยางจะมีลักษณะเปื่อยที่ผนังของแม่พิมพ์หลังจากออกมาจากช่องนำฉีด (Sprue) หรือรูเข้า (Gate) จะทำให้เกิดการอัดแน่นตัวของเนื้อยางขณะที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ หลังจากการอัดแน่นเนื้อยางจะไหลเข้ามาเลื่อนที่ผิวหน้าทำให้ระดับผิวหน้าของเนื้อยางเคลื่อนที่และบังคับอากาศและช่วยเหลือการผลิตให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูง การไหลของเนื้อยางแบบผิวหน้า (Frontal Filling) นิยมใช้กับชิ้นงานที่มีหน้าตัดเล็ก ๆ เช่น ยางปั้มน้ำฝน เป็นต้น

ในการใช้แกนแบบหมุนหรือแกนแบบแท่งเป็นการเพิ่มผลผลิตชิ้นงานในแม่พิมพ์ของยางเครื่องสูบลม การใช้แท่งแบบธรรมดาเปรียบเทียบกับแบบแท่งกึ่ง และแกนแบบหมุนที่มีแกนยื่นออกมา (แกนแบบกึ่งไม้) ชิ้นงานสามารถที่จะนำออกมาได้ในด้านหนึ่งของแกนหมุนและอีกด้านหนึ่งของแกนหมุนก็จะทำขบวนการในการผลิตต่อไป ขั้นตอนของช่วงเวลาในขั้นตอนที่จะเอาชิ้นงานออกและทำความสะอาดนั้นจะสั้นกว่าเวลาในการบ่มยาง ดังในรูปที่ 35



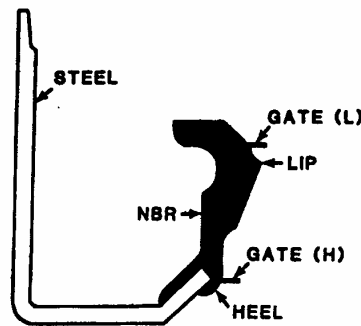
**รูปที่ 35** แกนแบบแท่งในแม่พิมพ์ของยางเครื่องสูบลม

หลังจากเสร็จกระบวนการจนครบวงจร แกนแท่งของเหล็กจะเคลื่อนที่ไปทางซ้ายเพื่อนำชิ้นงานออก และทำความสะอาด ซึ่งเวลานี้น้อยกว่าการหมุนในอีกรอบหนึ่ง

เมื่อพิจารณาที่รูเข้าเดียนั้นเมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการฉีดและจะเห็นชิ้นงานที่ทางเข้าจุดศูนย์ด้วยคล้ายเข็ม บางๆ ตำแหน่งเดียวในการไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ของยางแบบช่องทางเดียว (Pin) นั้นจะสนใจบริเวณที่ยังไม่มีการเติมของเนื้อยาง รูฉีดที่มีขนาดเล็กควรจะยึดติดอย่างมั่นคงที่บริเวณปลายหรือทำเป็นทรงเรียว (tapered) เพื่อที่จะลดการงอตัวของเนื้อยาง, ในการออกแบบควรได้รับการพิจารณาเป็นอย่างมากในตำแหน่งของทางเข้า

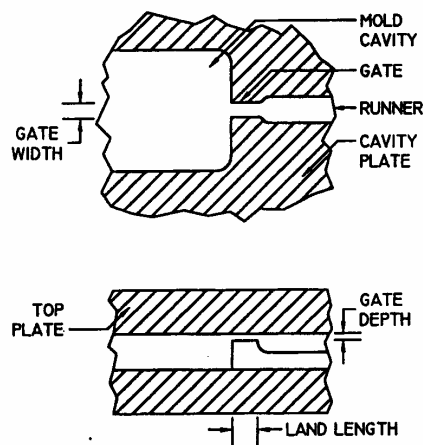
ตำแหน่งของอินเสิร์ท (Insert) ภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะรวมเข้าไปในตัวชิ้นงานภายในชั้นแม่พิมพ์จำเป็นจะต้องเป็นวัตถุที่แข็งแรงทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งภายในแม่พิมพ์นั้นจะมีความดันที่สูงโดยเฉพาะการพิจารณาที่จะใช้พลาสติกแทนเหล็กเป็นอินเสิร์ทภายในชิ้นงาน ตัวอย่างเช่นการใช้อินเสิร์ทในการปิดผนึกต่างๆ (Seal)

ในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับยางปิดผนึกด้านข้าง (Lip Seal) ดังรูปที่ 36 แสดงตัวอย่าง และให้ความสำคัญของตำแหน่งทางเข้าของเนื้อยางในตำแหน่งที่จะเข้าสู่ชิ้นงานมีความสำคัญต่อผลกระทบซึ่งอาจเกิดการรั่วไหลของเนื้อยางหลังจากการทดสอบ ช่องทางเข้าในบริเวณลาดเอียง (Heel-Gated) ของตัวปิดผนึกจะรั่วหลังจากการทดสอบในระยะเวลา 15 ถึง 18 นาที และช่องทางเข้าที่เข้าจากด้านข้างจะไม่รั่วหลังจากทดสอบไปแล้วนานเกิน 300 ชม. สิ่งอื่นๆ จะต้องพิจารณาคือรอยตำหนิที่เกิดขึ้นบริเวณรูเข้าและสิ่งมลทินที่เกิดจากแม่พิมพ์ หลังจากการแยกแม่พิมพ์ออกจากกันในขั้นตอนการผลิต



**รูปที่ 36** ทางเข้าของเนือยางในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของยางปิดผนึกด้านข้าง

เนือยาง (Compound) ที่แข็งจะสร้างผลกระทบให้เกิดรอยที่บริเวณผิวด้านบนของรูเข้าของตัวแม่พิมพ์, ตำแหน่งที่เกิดจะเกิดขึ้นชัดเจน คือ เกิดการยุบตัวลงไปที่บริเวณผิวหรือเกิดเป็นลักษณะเหมือนภาพฉายทำให้เกิดเงาที่บริเวณผิว เนือยางที่อ่อนกว่า 50 ชอร์ (Shore) จะทำให้เกิดลักษณะของการยุบตัวหรือภาพฉายขึ้น (Depression or Projection) จากผิวอยู่ที่ประมาณ 0.015 นิ้ว และถ้าแข็งกว่า 50 ชอร์ ค่าจะอยู่ที่ 0.007 นิ้ว ในรูปที่ 37 แสดงทางวิ่ง และรูเข้าและเบ้าขึ้นงานภายในแม่พิมพ์



**รูปที่ 37** ทางวิ่งและรูเข้าและตัวรูปทรงขึ้นงานภายในแม่พิมพ์

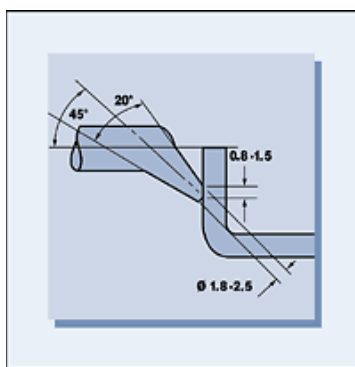
ในทางวิ่งแบบครึ่งวงกลม (Semi Circular) ดังรูปสามารถออกแบบให้การส่งผ่านเนือยางไปยังช่องทางจ่ายโดยมีความแตกต่างที่บริเวณหน้าตัดช่องทางเข้าขนาดของรูเข้า ขนาดของรูเข้าควรจะสัมพันธ์กับเวลาและปริมาตรของรูปทรงขึ้นงาน บ่อยครั้งที่สร้างมีขนาดเล็กกว่าในขั้นต้นซึ่งสามารถที่จะทำให้ใหญ่ขึ้นได้ในภายหลัง สำหรับรูเข้าที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่หน้าตัด (Tap Gate) สำหรับความยาวของพื้นที่หน้าตัดที่ 0.125 นิ้ว ซึ่งความลึกทั้งสองฝั่งของช่องทางเข้าจะเท่ากัน ซึ่งทางเข้าจะลึกอยู่ 0.01 ถึง 0.015 นิ้ว ช่องทางเข้าที่ลึกจะทำให้เหมาะสมกับค่าปัจจัยในการสร้างแม่พิมพ์ เช่น ใช้สำหรับเนือยางที่มีความหนืดสูง ความลึกนั้นจะมีความสำคัญ

สำหรับรูเข้าที่มีขนาดเล็กซึ่งจะเป็นตัวกำหนดเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในเนื้อยาง (Crosslinking Time) สำหรับเนื้อยางในช่องไหลเข้า ช่องทางที่ไหลเข้าที่เล็ก 0.02 นิ้ว และน้อยกว่า จะทำให้เวลาในการฉีดสัมพันธ์กับเนื้อยางที่มีความอ่อน ดังนั้นความลึกของรูเข้าจะเป็นผลกระทบกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในเนื้อยางและเวลาในการเติมเนื้อยางเข้าไปในรูปทรงแม่พิมพ์ ในทางวิ่งครึ่งวงกลมที่เป็นร่องทั้งด้านบนและด้านล่างมาประกบกันจะเป็นรูปทรงวงกลมและรูเข้าแบบรูเข็ม (Pin gates) โดยที่รูเข้าแบบรูเข็มนั้น จะมีขนาดอยู่ที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.010 ถึง 0.150 นิ้ว ควรที่จะใช้ในตำแหน่งที่มีผลกระทบน้อยที่สุดที่จะเกิดกับแม่พิมพ์ โดยปกติจะใช้เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.032 นิ้ว ลักษณะของรูเข้าแบบครึ่งวงกลมสองด้านประกอบและแบบวงกลมนั้นจะสร้างได้โดยการใช้หัวกัดแบบวงกลม แต่จะมีราคาที่สูงกว่าการใช้หัวกัดแบบราบเรียบที่ให้ขึ้นรูปช่องทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม ข้ออื่น ๆ ที่ควรพิจารณา

- การใช้เครื่องมือที่เป็นขนาดมาตรฐานจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายลง
- หัวกัดแบบทรงกลมสามารถสร้างทางวิ่งที่มีขนาดเล็กลงทันทีทันใดได้สะดวก
- ช่องทางเข้าแบบวงกลมจำกัดการไหลน้อยกว่าช่องทางเข้าแบบครึ่งวงกลมและแบบสี่เหลี่ยมที่มี

พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

ร่องของรูเข้าที่อยู่เหนือเนื้อยางที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ที่ตำแหน่งเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Mould Parting Line) หลังจากการสุกตัวของเนื้อยางเสร็จสิ้นลงแล้ว แม่พิมพ์จะเปิดออกและทางวิ่งจะแยกตัวออกจากชิ้นงานโดยการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ โดยการขยายตัวและการฉีกขาดของเนื้อยางที่สุกแล้วในรูเข้า (Gates) การฉีกขาดของเนื้อยางจำเป็นที่จะเกิดขึ้นไม่ว่าจะด้านบนหรือด้านล่างของผิวยาง ส่วนที่ฉีกขาดออกเช่นช่องทางไหลจะถูกนำแยกออกไปส่วนมากจะใช้ช่องทางเข้าแบบเอียงทำมุมเข้าด้านล่าง (Submarine Gate) ดังแสดงในรูปที่ 38 จะดีกว่าในการควบคุมด้านที่จะฉีกขาดออกไป



**รูปที่ 38** รูเข้าแบบเอียงทำมุมเข้าด้านล่าง (Submarine Gate)

รูเข้าแบบเอียงทำมุมเข้าด้านล่างจะจ่ายเนื้อยางเข้าไปในตัวแม่พิมพ์ในตำแหน่งที่ไกลจากเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line) และจะมีมุมประมาณ 45 องศา เพราะว่ารูเข้าแบบเอียงเข้า (Submarine Gate) นั้นจะฉีกขาดด้วยแรงเลื่อนแทนแรงดึงการเอียงตัวของรูเข้าจะทำให้เนื้อยางไหลเข้าไปที่ผนังจะคงที่ทำให้ชิ้นงานดีขึ้น

ช่องทางแบบเฉียงเข้าสามารถที่ขยายตัวได้โดยการขึ้นรูป เพราะสามารถที่จะทำการเอียงตัวแม่พิมพ์ระหว่างทำการขึ้นรูปได้ ควรจะหลีกเลี่ยงในการสร้างรูเข้าที่แม่พิมพ์มีขนาดเล็ก ควรที่จะสร้างตัวแผ่นเหล็กแทรกเข้าไปในช่องภายในแม่พิมพ์ รูเข้าแบบวงแหวนก็แสดงให้เห็นและขึ้นรูปทรงอื่น ๆ ของทางเข้าที่ใช้กับแม่พิมพ์ฉีด โดยหมุนตรงกลาง เช่น ตรงรอบแหวน (Washers) และสำหรับร้อยสายไฟฟ้าผ่าน แผ่นโลหะ (Gronnets)

#### 3.7.11 ช่องระบายอากาศภายในแม่พิมพ์ (Mould Venting)

สำหรับการผลิตที่มีอัตราส่วนของชิ้นงานที่สูงและจะต้องใช้เวลาในการไหลเข้าที่ควบคุมให้มีระยะเวลาที่สั้นที่สุดในการไหลของเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์ในเวลาที่น้อยกว่าหนึ่งวินาทีและอากาศที่อยู่ภายในแม่พิมพ์จะต้องไหลออกไปสู่ภายนอกในเวลาเดียวกันด้วยดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องสร้างช่องระบายอากาศของช่องลมไว้

ในเวลาที่มีการฉีดแบบเร็วขึ้นนั้นในการฉีดนั้นบ่อยครั้งจะมีความยุ่งยากของตำแหน่งของช่องลมภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะต้องทำการออกแบบโดยวิธีการนำพาอากาศออกแบบ Diamond – Scratching ในการเปลี่ยนแปลงของอากาศเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาของเนื้อยางกับออกซิเจนได้รุนแรง

ช่องระบายอากาศนั้นจะมีลักษณะที่แคบเป็นท่อเล็กๆส่วนใหญ่จะทำการออกแบบให้อยู่ในแนวรอยต่อกันของแม่พิมพ์ โดยปกติตำแหน่งของช่องลมนั้นจะอยู่ตรงกันข้ามกับรูเข้าหรือจุดจ่ายและในระบบการจ่ายเนื้อยางแบบหลายทางนั้นจะให้ช่องลมอยู่ระหว่างจุดจ่าย ขนาดของช่องลมจะขึ้นอยู่กับปริมาตรของอากาศที่เคลื่อนที่ออกแต่ละจะอยู่ประมาณ 0.05 มม. (0.002 นิ้ว) สำหรับความกว้าง และจะลึก 3.2 มม. (1/8 นิ้ว) โดยทั่วไปในการผลิตนั้นจะไม่ค่อยได้สังเกตตำแหน่งของช่องลมเพราะในแบบนั้นช่องลมจะมีลักษณะที่เล็กและการกำหนดลงไปภายในแบบของแม่พิมพ์ซึ่งจะทำให้เกิดการละเลยขึ้นได้

การอั้นของอากาศ (Air trapping) ภายในตัวชิ้นงานที่อยู่ภายในแม่พิมพ์จะเกิดเป็นแนวยาวและลึกลงไปภายในชิ้นงาน ในการที่จะลดการเกิดนั้นจะต้องมีการเลือกระบบสุญญากาศที่ติดตั้งไว้ในช่องลมซึ่งปั๊มสุญญากาศนั้นจะต้องพิจารณาถึงอากาศที่ไหลออกที่ต้องใช้เวลาน้อยกว่าหนึ่งวินาทีภายหลังจากทำการปิดแม่พิมพ์และจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างสูงที่สุด

#### 3.7.12 การให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ (Mould Heating)

ในการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์โดยทั่วไปแล้ว จะเลือกใช้แบบการใช้ไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดให้ความร้อนเป็นแผ่นหรือแบบปลอกในการให้ความร้อน ซึ่งจะเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อย ๆ คือการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ที่มีพื้นที่ที่กว้าง และการทำให้อุณหภูมิคงที่ในการจะส่งถ่ายความร้อนให้แก่แม่พิมพ์เครื่องจ่ายความร้อนที่บิดตัวตามรูปทรงภายในชิ้นงานสามารถที่จะทำให้เกิดจุดความร้อนที่บริเวณต่าง ๆ ได้ การระบายความร้อนสามารถที่จะลดอุณหภูมิที่จะผ่านไปยังผิวของแม่พิมพ์ที่จะไหลผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์

การให้ความร้อนโดยกระแสไฟฟ้าโดยความต้านทานหรือการนำปฏิกิริยาจะใช้แหล่งจ่ายให้กับตัวรับประมาณ 1.22 วัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{w/cm}^3$ ) หรือ 20 วัตต์ต่อลูกบาศก์นิ้ว ( $\text{w/in}^3$ ) ชุดโทโมกับเปิดจะเป็นตัวที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิในการเปิดและปิด ขดลวดให้ความร้อนที่อยู่รอบๆ แม่พิมพ์จะทำให้ความร้อนที่จ่ายคงที่ และจะค่อยๆ จ่ายความร้อนน้อยลง และตัดการจ่ายไฟเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ในการสูญเสียตำแหน่งที่เกิดจะเกิดกับแม่พิมพ์ที่มีความยาว การจ่ายความร้อนโดยใช้ขั้วคาร์โทดจะใช้คลื่นความถี่ในแม่พิมพ์ที่มีความบาง (หนาสูงสุดประมาณ 7.6 ซม. (3 นิ้ว) ต่อหนึ่งด้าน) ความร้อนภายในแม่พิมพ์นั้นไม่จำเป็นโดยจะจ่ายความร้อนโดยใช้แผ่นประกบให้ความร้อนแทน

### 3.7.12 สารหล่อลื่นแม่พิมพ์ (Mould Lubricant)

สารใช้เป็นตัวช่วยในการทำให้แม่พิมพ์ลื่น เพื่อช่วยการแกะชิ้นงานยางที่อบคงรูปแล้วออกได้ง่ายเป็นสารพวก Surface-Active เช่น พวกน้ำยาล้าง (Detergents) สบู่ (Wetting Agent) ซิลิโคน ดิสเพ็นซันของพวกแป้ง ทาลค์ ไมคา และสารพวกกรดไขมัน การใช้อาจฉีด พ่นหรือชุบแปรงทา สารหล่อลื่นอีกพวกหนึ่งจะเป็นพวกที่มีลักษณะ “แข็ง” ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสาร PTFE (Polytetrafluoroethylene) หรือ Polyethylene ที่มักจะทำในรูปสารละลายและใช้จาก Aerosol ปริมาณการใช้สารช่วยการหล่อลื่นแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ รูปร่างของแม่พิมพ์ ชนิดของสารหล่อลื่น ชนิดและเกรดของยาง

ข้อเสียประการสำคัญของการใช้สารช่วยการหล่อลื่น คือ เกิดการฟอร์มสารบางอย่างที่ผิวแม่พิมพ์ สารเหล่านี้มาจากสารหล่อลื่นที่ตกค้างสะสม และอาจเปลี่ยนแปลงสภาพซึ่งจำเป็นต้องคอยเอาออก มิฉะนั้นจะทำให้ผิวแม่พิมพ์เป็นรอยได้ ดังนั้นการใช้สารหล่อลื่น ควรพยายามใช้น้อยที่สุด มิฉะนั้น จะเกิดปัญหากับชิ้นงานยางที่อัดออกมาอาจเชื่อมกันไม่ดี นอกจากนี้ในการใช้ซิลิโคนหรือสารหล่อลื่นอื่นๆ สามารถที่จะทำให้เกิดข้อเสียที่ยางจะเชื่อมติดโลหะไม่ดี และอาจเกิดปัญหาการสุกก่อนเมื่อนำชิ้นงานยางติดโลหะนี้ไปใช้ในงานที่เกี่ยวข้องด้านไฟฟ้า

### 3.7.13 การทำความสะอาดแม่พิมพ์

การใช้แม่พิมพ์นานๆ ไป จะมีสารอินทรีย์จากส่วนผสมที่ใช้ในยางหรือสารสะสมจากตัวที่ใช้หล่อลื่นแม่พิมพ์ติดอยู่ที่ผิวแม่พิมพ์ แม้การใช้ซิลิโคนเป็นตัวช่วยหล่อลื่นก็สามารถเกิดสิ่งสกปรกสะสมบนผิวแม่พิมพ์หลังจากใช้ไปนาน ๆ ได้ จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดแม่พิมพ์ให้อัดชิ้นงานยางได้ดี ความถี่ของการทำความสะอาดขึ้นอยู่กับการใช้งานแม่พิมพ์

ในการทำความสะอาดแม่พิมพ์ ให้ใส่แม่พิมพ์ลงในอ่างล้าง ในสมัยก่อนมักใช้แช่ในอ่างกรด Chromic อุ่น 60 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากกรดมักทำลายเนื้อแม่พิมพ์ ปัจจุบันจึงใช้แช่ในด่างแทน ซึ่งมักจะใช้ด่างพวก โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) โดยจะแช่แม่พิมพ์ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำ

หลังการทำความสะอาดเบื้องต้นดังกล่าวแล้ว จะใช้น้ำฉีดล้างแม่พิมพ์อีก อุปกรณ์ฉีดนี้ประกอบด้วย การใช้น้ำที่มีเม็ดแก้วละเอียดฉีดด้วยแรงดันประมาณ 8 บาร์ หรือต่ำเพียง 3 บาร์ สำหรับแม่พิมพ์ที่บาง จากนั้นจึงทำให้



แม่พิมพ์แห้ง แล้วเคลือบผิวแม่ด้วยซิลิโคน เพื่อกันแม่พิมพ์เป็นสนิม จะใช้น้ำมันหรือน้ำยากันสนิมทาผิวแม่พิมพ์ การใช้แม่พิมพ์ที่หลังการทำความสะอาดจะป้องกันแม่พิมพ์ขึ้นสนิม

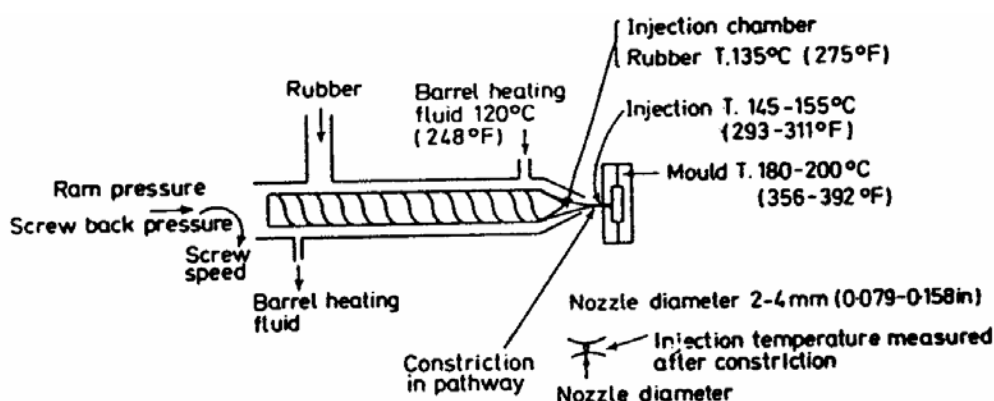
### 3.8 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปและการออกแบบแม่พิมพ์

เมื่อพิจารณาคู่กันระหว่างตัวแปรต่างๆ ของเครื่องจักรและตัวแปรของเนื้อยางซึ่งทั้งคู่จะมีผลกระทบกับอัตราส่วนของการบ่มตัวของยาง อัตราส่วนของการไม้ และประสิทธิภาพทั่วไปของแม่พิมพ์ฉีด ในตอนแรกของการทดสอบจะทำการควบคุมตัวแปรต่างๆของเนื้อยางโดยให้เป็นเนื้อยางธรรมชาติ (Natural Rubber Compound) และดูผลกระทบหลักของกระบวนการต่างๆของเครื่อง ซึ่งจะต้องกำหนดตัวแปรของเครื่องให้สะดวกในการทดสอบต่อจากนั้นค่อยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในเนื้อยาง บางทีจะต้องใช้ตัวอย่างที่เป็นมาตรฐานในการทดสอบ

การเปลี่ยนแปลงตัวแปรของเครื่องฉีดยางนั้นจะต้องพิจารณาในขั้นตอนการทำงานที่จะเกิดในแต่ละกระบวนการซึ่งจะพิจารณาไว้ 2 กลุ่ม

1. โดยการควบคุมการให้ความร้อนและช่วงหลอมเหลวของยางขณะที่อยู่ในช่วงแรกของการฉีดขณะที่ปริมาตรที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์จะถูกบรรจุอยู่บริเวณผิวหน้าของก้านกระทุ้ง (Ram) ภายในกระบอกฉีด (Injection Chamber) ตัวอย่างความเร็วของสกรู (Screw Speed) อุณหภูมิของกระบอกฉีด (Barrel Temperature) และ แรงดันด้านการถอยกลับของสกรู (Screw Back Pressure)

2. การกำหนดขั้นตอนต่างๆ ในการไหลเข้าแม่พิมพ์ (Mould Filling) ตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลางของรูฉีดเข้า (Nozzle Orifice Diameter) แรงดันตอนฉีดและความเร็วของด้ามกระทุ้งในการฉีด (Injection Pressure and Injection Ram Speed) ในการเปลี่ยนแปลงในกลุ่มที่ 2 จะพึงพาอาศัยซึ่งกันและกันการเปลี่ยนแปลงผลกระทบจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 39



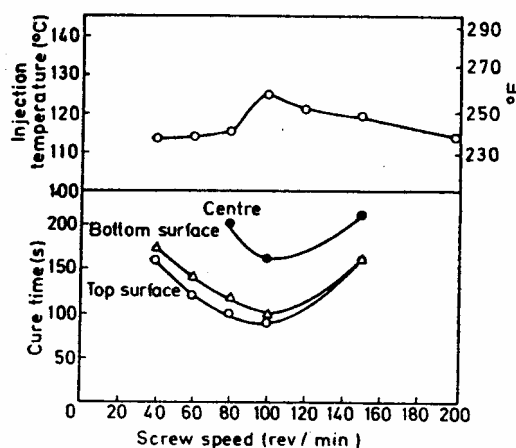
รูปที่ 39 แสดงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการฉีดยางในขั้นตอนต่างๆ



ในช่วงแรกนั้นจะพิจารณาถึงอุณหภูมิกระบอกฉีดเป็นตัวแปรสำคัญตัวเดียวที่มีผลกระทบกับอุณหภูมิในการฉีด ในอุณหภูมิที่ต่ำของกระบอกฉีดนั้น จะมีผลต่อองค์ประกอบของยางภายในกระบอกฉีด และในด้านหน้าของตัวสกรูที่ใช้ฉีดในการฉีด และจะตัดผลกระทบตัวอื่นๆ ของการเปลี่ยนแปลงของเครื่องฉีดออก โดยเฉพาะเมื่อสกรูหมุนหรือสกรูเลื่อนมาข้างหลัง (Screw Back) การควบคุมโดยการเลื่อนสกรูกลับมาหลังจากที่ฉีดไปแล้ว จะมีการถ่ายเทความร้อนก่อนที่จะทำการฉีดในกระบวนการต่อไป

### 3.8.1 ผลกระทบของความเร็วของสกรู (Effect of Screw Speed)

การทำงานของสกรูจะทำการส่งถ่ายตัวเนื้อยางไปยังตำแหน่งที่พร้อมจะฉีดออกไป ที่สำคัญในการเครื่องฉีดยางนั้นสามารถที่จะควบคุมความเร็วของสกรูโดยผ่านชุดเครื่องควบคุมความเร็ว ในรูปที่ 40 แสดงการเพิ่มขึ้นของความเร็วของตัวสกรูในเครื่อง Peco ยางในกระบอกฉีดนั้นจะมีความร้อน และจะทำให้อุณหภูมิในการฉีดสูง และเวลาในการฉีดเนื้องานนั้นสั้นลง เวลาในการบ่มจะกำหนดโดยค่าความแข็งของตำแหน่งบนกลาง และล่าง ของแม่พิมพ์ที่กำลังปิดอยู่และมีอุณหภูมิของการฉีดและสภาวะที่อยู่ภายใต้ความดันทั่วไปของ ความดันกลับ และอุณหภูมิของกระบอกสูบ



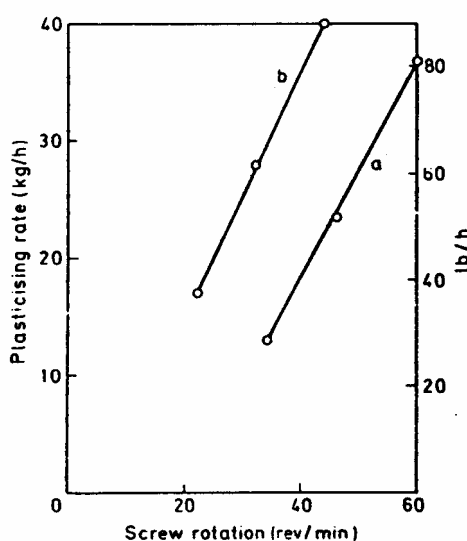
**รูปที่ 40** การเพิ่มขึ้นของความเร็วของตัวสกรูในเครื่อง Peco ที่มีผลต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มตัวของเนื้อยางในตำแหน่งต่างๆ

จากกราฟจะได้จุดเหมาะสมของความเร็วของสกรูที่ 100 รอบต่อนาที (rev/min) ความเร็วที่สูงกว่า 100 รอบต่อนาที จะทำให้การส่งถ่ายเนื้อยางเร็ว ซึ่งอาจจะทำให้เกิดช่องทางของอากาศภายในชิ้นงาน (Some Air Trapping) ความสูงของแรงดันกลับจะช่วยทำให้อากาศที่เกิดขึ้นขณะทำการฉีดยางเข้าไปในแม่พิมพ์ลดลงและช่วยให้ความเร็วของสกรูเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิที่เป็นไปได้

ในความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์กันระหว่างอุณหภูมิในการฉีด และเวลาในการบ่ม และการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการฉีดประมาณ  $10^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะมีผลกระทบสูงในการลดของเวลาในการบ่มลง จากกราฟจะให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงตัวแปรของเครื่องฉีด และผลกระทบของเวลาในการบ่ม

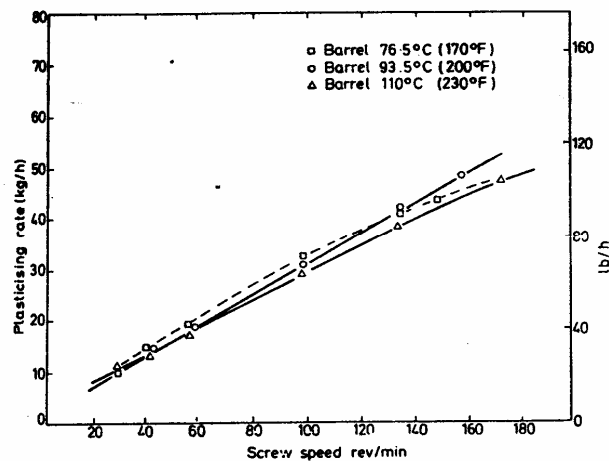
ในการเลือกความเร็วของสกรูจะขึ้นอยู่กับเครื่องฉีด และส่วนผสมของเนื้อยางแต่การเลือกที่ดีที่สุดจะอยู่บนพื้นฐานของความเป็นจริงที่สามารถที่จะทำได้ โดยที่จุดที่เหมาะสมของความเร็วของสกรูในเครื่อง Desma 900 ให้ความเร็วระหว่าง 50 ถึง 125 รอบต่อนาที ที่ความเร็วต่ำแนะนำสำหรับส่วนผสมที่มีความหนืดสูง

Klein-Albers and Franck ได้ทำการใช้ความเร็วของสกรูระหว่าง 22 ถึง 60 รอบต่อนาที โดยใช้เครื่อง Ankerwerk Machine ซึ่งจะเสนอการปรับปรุงในประสิทธิภาพของการหลอมตัวของเนื้อยางในสกรูที่มีขนาดของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางในรูปที่ 41 แสดงค่าความจุของเนื้อยางตามปกติโดยตั้งค่าความเร็วของสกรูและความดันกลับของสกรูโดยให้การจ่ายแบบเต็มทีในตัวสกรูจ่ายก่อนที่จะกระบวนการจะสมบูรณ์



**รูปที่ 41** ค่าความจุของเนื้อยางตามปกติโดยตั้งค่าความเร็วของสกรูและความดันกลับของสกรูโดยการใช้การจ่ายแบบเต็มที

ผลกระทบความเร็วของสกรูและอุณหภูมิในตัวเนื้อยางอัตราส่วนโดยการทดสอบโดยเครื่อง Daniels Edgwick 45 SR จะแสดงคู่กันในรูปแบบที่ 42 ผลของอุณหภูมินั้นจะมีผลกระทบน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของสกรู



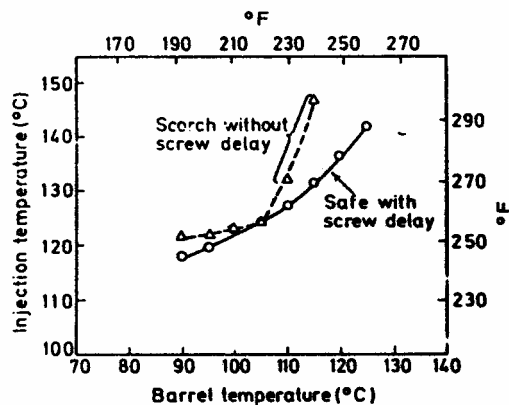
รูปที่ 42 ผลของอุณหภูมิกับความเร็วของสกรูที่มีผลกระทบต่อการฉีดเนื้อยาง

### 3.8.2 ผลกระทบของอุณหภูมิกะบอกฉีด (Effect of Barrel Temperature)

อุณหภูมิของกระบอกฉีดอาจเป็นผลกระทบสำคัญในการควบคุมปัจจัยของเครื่องฉีดยางอุณหภูมิของกระบอกฉีดนั้นควบคุมโดยวัสดุโดยมีค่าความจุความร้อนที่สูงกว่าน้ำหรือใช้น้ำที่มีการผสม Glycol หรือน้ำมัน โดยจะควบคุมโดยตัวโทโมสต์สในการควบคุมในการที่จะไหลเข้าไปในกระบอกฉีด ในบางเครื่องฉีดจะใช้สองหรือสาม (Desma 900 Series) แยกในการควบคุมบริเวณของพื้นที่ความร้อนตามบริเวณความยาวของกระบอกฉีด การให้ความร้อนโดยกระบวนการทางไฟฟ้าแบบบล็อกใช้ในบางเวลาแต่จะไม่ปลอดภัยแต่จะเป็นการง่ายในการปรับปรุงเมื่อต้องการให้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเร็วตามที่ต้องการ ในความจริงนั้นในการพัฒนาของการจ่ายความร้อนโดยน้ำในกระบอกฉีดสำหรับแม่พิมพ์ฉีดยางจะมีความเป็นไปได้โดยสามารถที่จะควบคุมการเกินของอุณหภูมิภายในของกระบอกฉีดได้ดี

ในปัจจัยของการไหลของของเหลวที่มีความร้อนและเนื้อยางที่ได้รับความร้อนในพื้นที่การไหลภายในกระบอกฉีดและรักษาซึ่งอุณหภูมิในการไหลที่สอดคล้องโดยอิสระจากการไหม้หลังจากที่มีการถ่ายเทความร้อนจากสกรู และตัวเนื้อยางในปลายสกรูพร้อมที่จะฉีดยางออกมา

ในการใช้อุณหภูมิที่สูงของกระบอกฉีดยางในสกรูที่หมุนและในพื้นที่ด้านหน้าของก้านกระทุ้งสามารถที่จะรักษาอุณหภูมิที่สูงไว้ได้ ในรูปที่ 43 แสดงถึงอุณหภูมิในการฉีดที่สูงขึ้นโดยการทำให้ความร้อนของกระบอกสูบสูงขึ้น

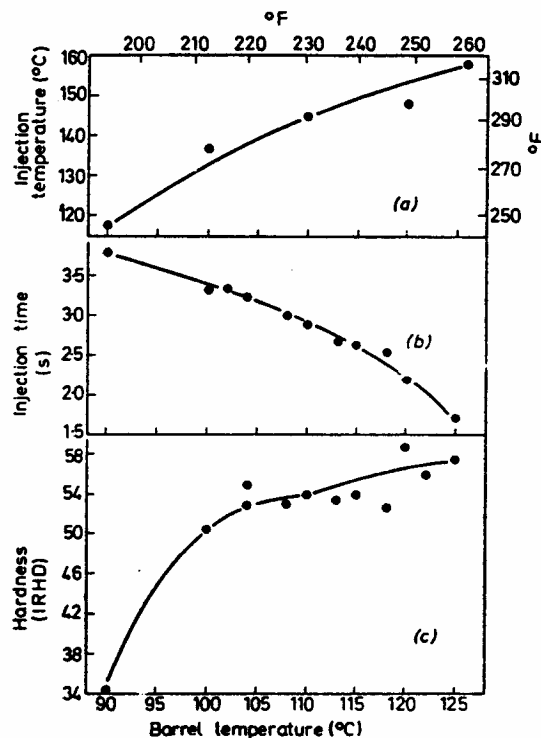


**รูปที่ 43** อุณหภูมิในการฉีดที่สูงขึ้น โดยการทำให้ความร้อนของกระบอกสูบสูงขึ้น

เมื่อไม่มีการถ่วงเวลาในการควบคุมสกรูอุณหภูมิที่อยู่ล่าง  $105^{\circ}\text{C}$  ( $221^{\circ}\text{F}$ ) เนื้อยางจะยังไม่เหลวตัวเต็มที่ (Premature Vulcanization) ในกระบอกฉีดอุณหภูมิที่สูงภายในกระบอกฉีด บางที่จะรักษาระดับของอุณหภูมิไว้ เมื่อมีการหน่วงเวลาของสกรูในขั้นตอนในการเตรียมที่จะฉีดในขั้นตอนต่อไป อุณหภูมิในการฉีดที่อยู่เหนือ  $140^{\circ}\text{C}$  ( $284^{\circ}\text{F}$ ) จะทำให้การไหม้หมดไป และการไหลเข้าแม่พิมพ์จะดีโดยค่าอุณหภูมิกระบอกฉีดที่อยู่ในช่วง  $90\text{--}125^{\circ}\text{C}$  ( $194\text{--}257^{\circ}\text{F}$ ) จะต้องพิจารณาแล้วแต่กรณี

การล่าช้าของสกรู อุณหภูมิของกระบอกฉีดอยู่ต่ำกว่า  $125^{\circ}\text{C}$  ( $157^{\circ}\text{F}$ ) จะก่อให้เกิดการที่เนื้อยางยังไม่เหลวตัวแบบสมบูรณ์ภายในกระบอกฉีด

เมื่อใช้เครื่อง Daniels 45 SR โดยใช้แม่พิมพ์ทดสอบเพื่อที่จะหาค่าการสูงขึ้นของอุณหภูมิของกระบอกฉีดโดยการเพิ่มข้อกำหนดเข้าไปสามข้อคือ เพิ่มอุณหภูมิในการฉีดและลดเวลาในการฉีดกับเวลาในการบ่ม รูปที่ 44 (a, b และ c) ผลกระทบของเวลาในการบ่มจะแสดงให้เห็นในตารางที่ 6 โดยการเพิ่มอุณหภูมิ  $35^{\circ}\text{C}$  ( $63^{\circ}\text{F}$ ) ในอุณหภูมิกระบอกสูบและลดเวลาในการบ่มของชิ้นงานตัวอย่างที่หนา 1 ซม. (0.394 นิ้ว) โดยปัจจัยต่างๆ ทั้งสี่



**รูปที่ 44** การสูงขึ้นของอุณหภูมิของกระบอกฉีดโดยการเพิ่มข้อกำหนดโดยเพิ่มอุณหภูมิในการฉีดและลดเวลาในการฉีดกับเวลาในการบ่ม

**ตารางที่ 6** ผลกระทบของอุณหภูมิของกระบอกฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มเนื้อยาง

Barrel temperature, °C (°F)	90(194)	100(212)	125(257)
Injection temperature, °C (°F)	118(244)	137(279)	158(317)
Injection time, s	3.8	3.3	1.7
Time to cure 1 cm thick section, s	180	90	45
Daniels-Edgwick 45 SR machine; RAPRA beaker mould; other details as Figure 2.11			

ในการกำหนดค่าอื่นของเครื่องจักรนั้นจะต้องใกล้เคียงหรือเป็นไปได้ในการเพิ่มอุณหภูมิของกระบอกฉีดซึ่งทำให้เวลาในการบ่มเร็วขึ้นเช่นกัน ซึ่งอาจจะทำให้เกิดการไหม้ที่บริเวณกระบอกหรือหัวฉีดในเครื่อง Daniels ที่อุณหภูมิกระบอกสูบ 128°C (263°F) จะทำให้ความปลอดภัยลดลงเพียงเล็กน้อย ถ้าเกิดการไหม้ภายในแม่พิมพ์จะต้องลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ลง เวลาในการฉีดสั้นจะทำให้เกิดรอบฟองอากาศซึ่งจะเห็นโดยชัดเจน ช่องของแม่พิมพ์หรือช่องสุญญากาศในแม่พิมพ์เป็นสิ่งจำเป็น ในการเลือกขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรู

ฉีดลดลงจะทำให้เพิ่มระยะเวลาในการไหลเข้าและจะไล่อากาศออกจากแม่พิมพ์ ในขั้นตอนต่อมาควรจะปรับอุณหภูมิของการฉีด

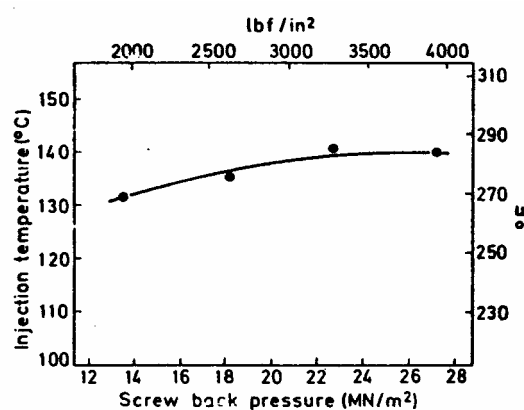
### 3.8.3 ผลกระทบของแรงดันด้านการถอยกลับของสกรู (Effect of Screw Back Pressure)

ความต้านทานของการเคลื่อนที่ของสกรูจะขึ้นอยู่กับความหนืดของยางที่ไหลผ่าน โดยจะมีมวลของเนื้อยางอยู่ด้านหน้า แรงดันของสกรูที่ดันหรือแรงดันของสกรูกลับจะเป็นแรงที่จะไล่ไปไล่อากาศให้ออกจากเนื้อยาง (เกิดจากการป้อนเนื้อยางเร็ว) และไล่ความร้อนที่ผ่านเข้ามาในทางวิ่ง

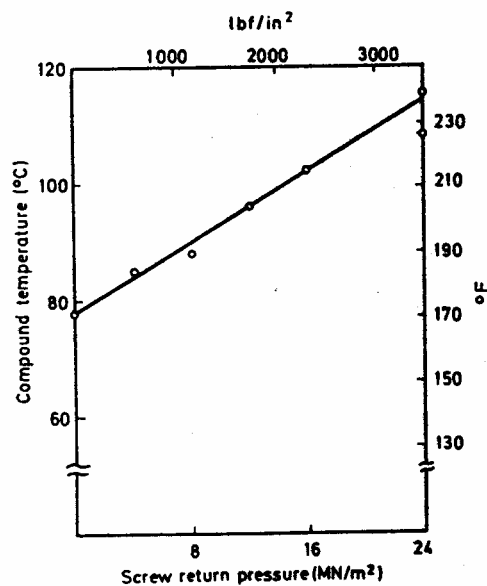
ในความดันที่สูงของเครื่องฉีดยางนั้นสามารถที่จะสร้างขึ้นและควบคุมจากภายนอกโดยการปรับชุดวาล์วไฮโดลิกสกรูความดัน สกรูแรงดันสามารถที่จะปรับโดยใช้แรงดันของไฮโดลิก ซึ่งจะกระทำกับเนื้อยางภายในกระบอกสูบระหว่างที่สกรูหมุนอยู่

แรงดันของสกรูจะทำให้แรงเสียดทานภายในเพิ่มขึ้น และต้องการแรงในการขับเคลื่อนสกรูในการป้อนยางมากขึ้นด้วย ในรูปที่ 45 แสดงถึงการควบคุมเครื่อง Peco โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการฉีดที่ความเร็วรอบ 80 รอบ/นาที จะได้แรงดันที่คืออยู่  $23 \text{ MN/m}^2$  ( $3,250 \text{ lbf/in}^2$ ) โดยที่ไม่คิดความล่าช้าของสกรูซึ่งจะทำให้แรงดันของสกรูเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

Kleine – Albers และ Frank แสดงแรงดันกลับของสกรูของเครื่อง Ankerwerk โดยอุณหภูมิของกระบอกสกรูอยู่ที่  $50^\circ\text{C}$  ( $121^\circ\text{F}$ ) และเพิ่มขึ้นเป็นเส้นตรง เป็น  $78$  และ  $115^\circ\text{C}$  ( $172$  และ  $240^\circ\text{F}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 46 โดยการควบคุมแรงดันกลับของสกรูจะรวมเอาแรงเสียดทานของสกรูและอุณหภูมิของเนื้อยางจะต้องรักษาไว้ที่  $30^\circ\text{C}$  ( $54^\circ\text{F}$ ) ซึ่งอยู่เหนืออุณหภูมิของกระบอกฉีดโดยวิธีการที่ทำให้กระบอกฉีดเย็นจะลดความเสี่ยงในการเกิดการทำปฏิกิริยาในเนื้อยางเมื่อโดนความร้อนที่บริเวณผนังกระบอกฉีด



**รูปที่ 45** แสดงถึงการควบคุมเครื่อง Peco โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการฉีด



**รูปที่ 46** แสดงแรงดันกลับของสกรูของเครื่อง Ankerwerk ที่มีผลกับอุณหภูมิของเนื้อยาง

### 3.8.4 ผลกระทบของแรงดันฉีด (Effect of Injection Pressure)

ความดันในการฉีดนี้มีความสำคัญต่อการควบคุมการไหลของเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์ ความดันของการฉีดนั้นมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องรู้ว่ามีค่าอยู่ที่เท่าไร และการเกิดความดันนี้จะเป็นตัวกำหนดความสูงที่เกิดขึ้นของความร้อน

การทำงานของลูกสูบที่ทำให้เกิดความดัน (P) และปริมาตร (V) ที่ผ่านไปด้วยเหตุนี้ งานที่กระทำต่อลูกบาศก์ปริมาตร (Unit Volume) ของเนื้อยางซึ่งเท่ากับ P สมมูลงานทั้งหมดที่ใช้ในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเนื้อยาง อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกำหนดให้เท่ากับสมการที่ 52

$$\frac{\Delta\theta}{\rho S} = P \quad (52)$$

โดยที่  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของยาง

S คือ ค่าความร้อนจำเพาะ

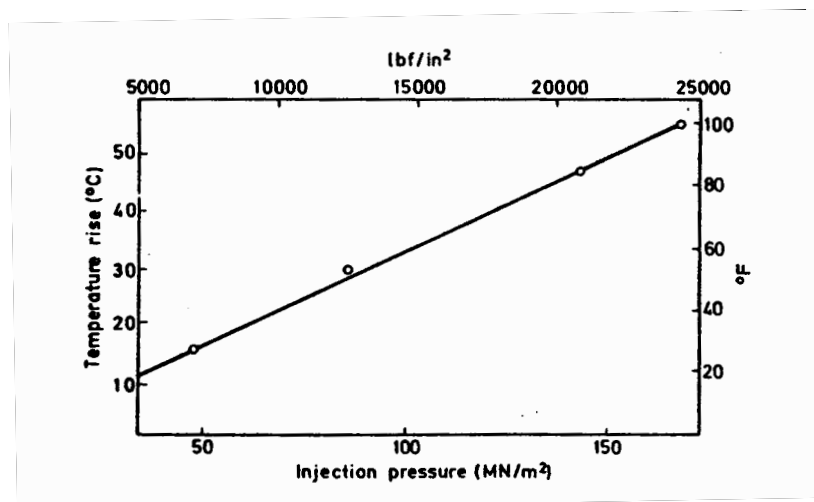
สมมูลค่าความหนาแน่นอยู่ที่  $1.15 \text{ Mg/m}^3$  ( $\text{g/cm}^3$ ) และค่าความร้อนจำเพาะ  $2.0934 \text{ J/g}^\circ\text{C}$  ( $0.5 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ ) เหมาะสมสำหรับยางที่มีเขม่าดำ 5 phr (Carbon Black) ในทางทฤษฎีอุณหภูมิจะได้โดยกำหนดให้ความดันที่  $6.895 \text{ MN/m}^2$  ( $70.3 \text{ kgf/cm}^2$  หรือ  $1000 \text{ lbf/in}^2$ ) ซึ่งจะได้อัตรา

$$\frac{6.895 \text{ MN/m}^2}{1.15 \times 2.0934 \text{ (mg/m}^2\text{) (J/g}^\circ\text{C)}}$$

(แรงดันในตอนเริ่มต้นวัดเป็น lbf/in<sup>2</sup> สามารถคำนวณได้เช่นกัน)

$$\frac{1000 \times 70.3 \times 981}{4.18 \times 1.15 \times 0.5 \times 10^7} = 2.87^\circ\text{C}$$

ในการทดสอบนั้นความร้อนที่สูญเสียและการสูญเสียที่เกิดจากการเคลื่อนที่ภายในป้อนนั้นจะไม่ไปกระทบต่อเวลาที่จะทำให้ความดันถึงจุดสูงสุดในการทำงาน แต่อย่างไรก็ตาม Izod และ Skam แสดงดังรูปที่ 47 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยใช้ Yates and Thom รับเบอร์ โอมิเตอร์ (Rubber Ometer) ในการวัดโดยใช้เครื่อง CTA – 2 – 805



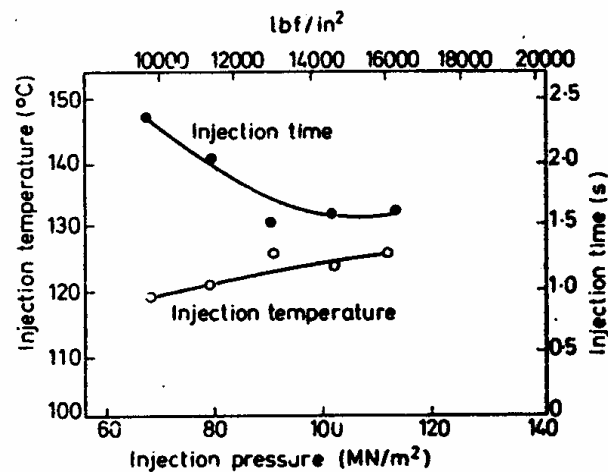
**รูปที่ 47** ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น

การอธิบายถึงผลกระทบของความดันในการฉีดที่ต้องการจะต้องพิจารณาขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดที่เนื้อยางไหลผ่านในการฉีด ความสัมพันธ์ของความกว้างของหัวฉีดโดยใช้เครื่อง Peco ในการศึกษาประสิทธิภาพของเวลาในการไหลของยางเข้าไปในแม่พิมพ์ โดยความสัมพันธ์ของความกว้างของหัวฉีดที่ช่องนำฉีด (3.2 มม.) โดยการเพิ่มความดันฉีดสามารถที่จะทำให้เกิดอุณหภูมิในการฉีดและทำให้เวลาในการฉีดลดลงดังแสดงในรูปที่ 48

ในการใช้เครื่อง Daniels 45 SR และแม่พิมพ์ในการทดลองของ RAPRA ระยะเวลาในการไหลเข้าในแม่พิมพ์จะมากจนเกินกว่าค่าที่กำหนดเพราะมีช่องที่ไหลยาวจนเกินไป การลดลงของแรงดันในการฉีดจะมี



ผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการฉีดและจะลดอุณหภูมิของการฉีดลงและจะทำให้เกิดผลกระทบต่อการไหม้ของยางเข้าไปในแม่พิมพ์มากขึ้นด้วย



**รูปที่ 48** ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการฉีด

ตารางที่ 7 แสดงถึงค่าสูงสุดของความดันซึ่งจะทำให้เวลาในการฉีดนั้นลดลง 33% หรือมากกว่า ครั้งหนึ่งของระยะเวลาในการหาความสัมพันธ์โดย Izod และ Morris ได้สรุปว่าการจะใช้ความดันที่น้อยกว่าความดันสูงสุด เนื้อยางที่มีความอ่อนมากกว่าจะมีแนวโน้มที่จะไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ก่อนที่จะถูกขยับไล่ ออกหมด ดังนั้นจึงสามารถที่จะลดแรงดันลงได้

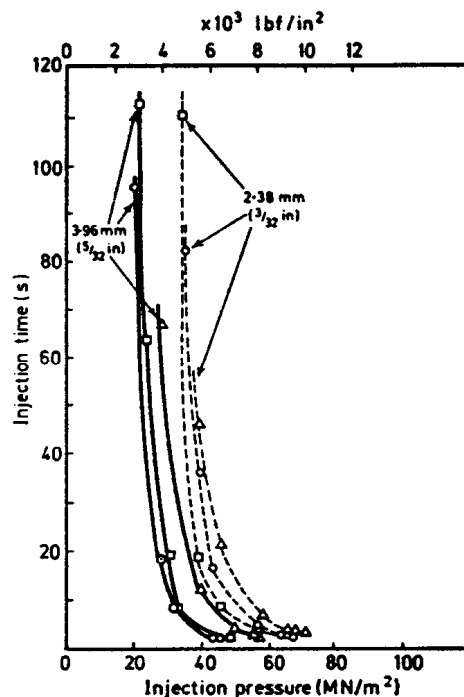
**ตารางที่ 7** ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีดกับอุณหภูมิ

Injection pressure, MN/m <sup>2</sup> (lbf / i n <sup>2</sup> )	103.5 (~15,000)	69 (~10,000)
Injection time, s	5.6	12.0
Injection temperature, °C (°F)	127 (260)	109 (228)

จากตารางที่ 7 ทดสอบโดยเครื่อง Daniels Edgwick 45 SR และแม่พิมพ์ทดลองของ RAPRA ขนาดฉีด เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.17 mm (1/8 in) อุณหภูมิกระบอกฉีด, 90°C (194°F); อุณหภูมิแม่พิมพ์ 180°C (357°F) ความหนืด Mooney, ML3, 120°C (248°F), 5, Mooney Scorch 120°C (248°F), 29 นาที

Izod และ Morris แสดงรูปที่ 49 โดยทำการทดสอบโดยเครื่อง Daniels และแม่พิมพ์ทดสอบแต่แตกต่างกันที่เปลี่ยนแปลงส่วนผสมของยาง (SBR) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขอบเขตของอุณหภูมิของกระบอกฉีด และเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดและความดันที่ใกล้เคียงกับความดันที่สามารถทำได้เพื่อที่จะให้เวลาในการฉีดเร็วขึ้น ความดันที่ต่ำกว่าความสูงที่สุดจะทำให้เวลาในการฉีดนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีโอกาสในการเกิดการไหม้ของเนื้อยางขณะที่

ฉีดน้ำยางเข้าไปในแม่พิมพ์ จุดที่อยู่ต่ำกว่าความดันสูงสุดจะมีความแตกต่างกันระหว่างเนื้อยางและเนื้อขึ้นโปะ จะไม่สำคัญ



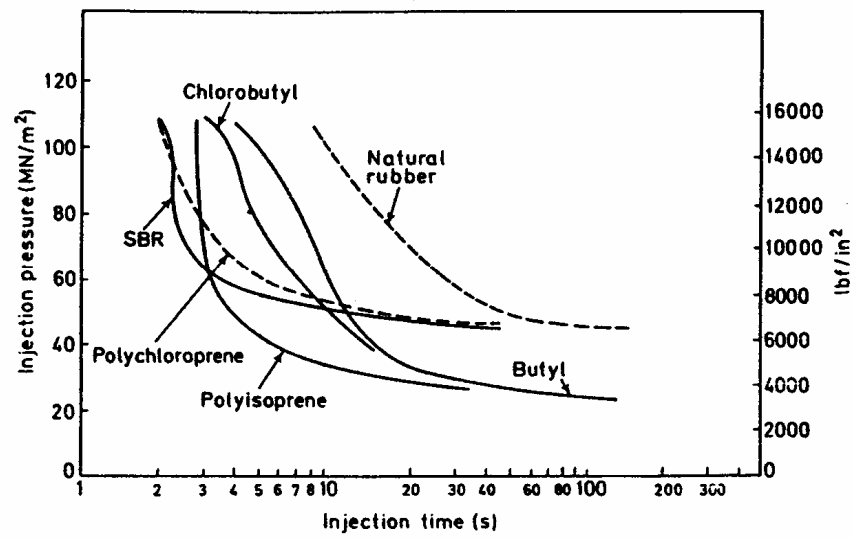
**รูปที่ 49** ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีผลต่อเวลาในการฉีดโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กระบอกฉีดและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด

การพิจารณาที่สำคัญในการที่จะซื้อเครื่องฉีดยางนั้นจะต้องดูว่าเครื่องนั้นสามารถที่จะสร้างความดันในการฉีดเนื้อยางในแต่ละชนิดได้ในความดันที่กำหนดหรือไม่

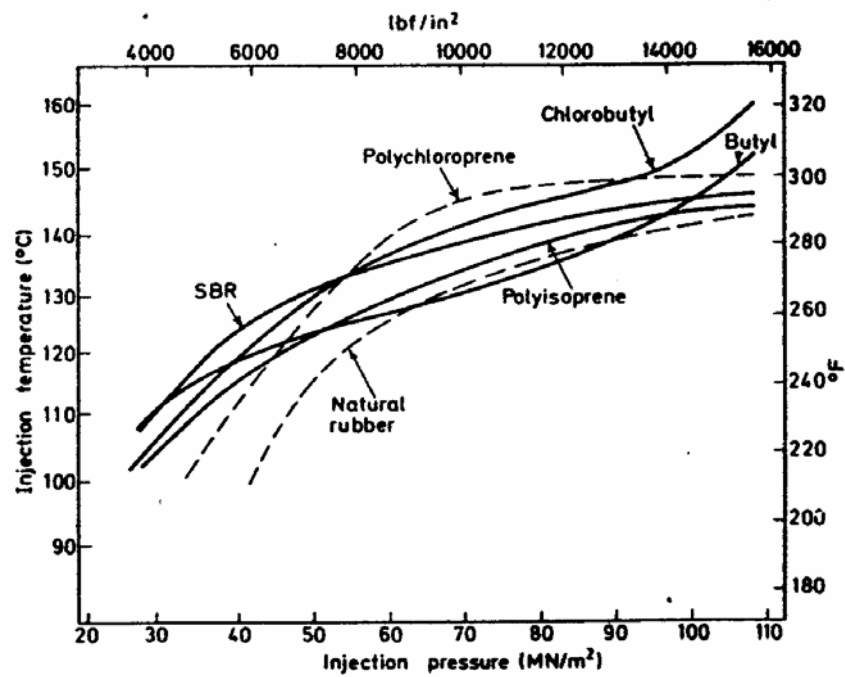
ในการทดสอบโดยใช้เวลานานในการฉีดนั้นจะไม่เหมาะสมกับการลงทุนในการใช้อุณหภูมิที่สูงสุดแต่อยู่ในช่องความปลอดภัยและให้ความดันสูงสุด แต่เวลาในการฉีดยังนานอยู่จำเป็นต้องปรับขนาดที่ฉีดให้กว้างขึ้น หรือทำให้ทางวิ่งกว้างขึ้นหรือรูเข้าที่ใหญ่ขึ้น แต่ต้องพิจารณาในตำแหน่งที่เข้าด้วย

โดยทั่วไปนั้นต้องไม่จำเป็นต้องใช้ความดันสูงสุดในการฉีด แต่จะใช้อยู่ที่ประมาณ 80-90% ของค่าความดันสูงสุดเพื่อที่จะป้องกันการสึกหรอหรือการฉีกขาดของเครื่องจักรในขั้นตอนการควบคุมความดันนั้นจะควบคุมโดยใช้วาล์วเพื่อที่จะสามารถปรับเปลี่ยนความดันให้ไปใช้กับเนื้อยางส่วนผสมอื่น ๆ ได้

Booth ได้แสดงถึงผลกระทบของแรงดันในการฉีดต่อเวลาในการฉีดและอุณหภูมิโดยใช้เครื่อง Daniels 45 SR แต่เปลี่ยนรูปร่างของแม่พิมพ์เป็นรูปทรงวงกลม (Flower Pot Mould) ดังแสดงในรูปที่ 50 และ 51 จะได้ผลดีของการยืนยันรายงานครั้งก่อน ๆ ที่ได้ทำการทดลองกันมาและแสดงผลกระทบที่เหมือนกันของความดันต่ออย่างธรรมชาติ, ยางสังเคราะห์โพลิไอโซพรีน (Synthetic Polyisoprene), SBR, Butyl, Chlorotutyl และ Polyobbboprene



รูปที่ 50 ผลกระทบของความดันในการฉีดต่อเวลาในการฉีดของเนื้อยางชนิดต่างๆ

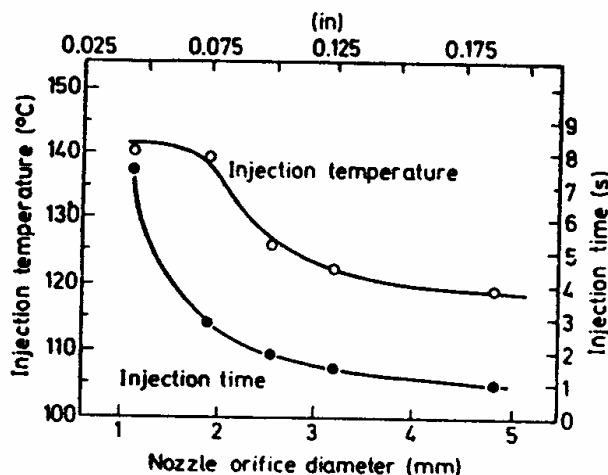


รูปที่ 51 ผลกระทบของความดันในการฉีดต่ออุณหภูมิในการฉีดของเนื้อยางชนิดต่างๆ

### 3.8.5 ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (Effect of Nozzle Orifice Diameter)

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดของเครื่อง Peco ที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 52 จะทำให้อุณหภูมิในการฉีดสูงขึ้นแต่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 2 mm. (0.08 in) เครื่องจะไม่สามารถฉีดได้ ด้านล่างของเส้นผ่านศูนย์กลางคู่กับเวลาในการฉีดอาจเกิดการไหม้ของยางระหว่างที่เนื้อยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งจะได้ผลประโยชน์ในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการฉีด สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กจะต้องใช้ความดันในการฉีดอย่างเต็มที่และจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิการฉีด ถึงแม้ว่าจะเป็นที่น่าพอใจที่หัวฉีดสามารถสร้างอุณหภูมิในการฉีดให้สูงขึ้นแต่ก็ต้องพิจารณาถึงการเกิดการไหม้ขึ้นและที่ยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ สำหรับแม่พิมพ์ฉีดที่รูปทรงกระบอกเป็นชิ้นงาน ควรที่จะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่สอดคล้องกับความปลอดภัย (1-2 S) ของเวลาในการฉีดซึ่งจะประมาณ 2 - 2.5 mm (0.08 - 0.1 นิ้ว) เมื่อไรก็ตามเวลาในการฉีดมีระยะเวลานาน ควรที่จะทำให้น้อยกว่าสองวินาทีโดยการใช้ความดันสูงสุดในการฉีด หรือขยายเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดให้สูงขึ้น

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดมีความสำคัญต่อการไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ของเนื้อยาง นั้นจะใช้ระยะเวลาเท่าไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งเนื้อยางที่ไหลเข้าไปทางไหลที่แคบและยาวภายในแม่พิมพ์ ในการเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดจะมีผลกระทบอย่างมากก่อนระยะเวลาในการฉีดของเวลาในการฉีด ตารางที่ 8 แสดงสภาวะภายใต้ข้อกำหนดในการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดขนาด 3.2 - 4 มิลลิเมตร (1/8 - 5/32 นิ้ว) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะทำให้การผลิตนั้นดีขึ้น การไหม้ของเนื้อยางที่บริเวณผิวของรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ จากตารางจะแสดงถึงช่วงเวลาในการไหม้ของยางโดยจะอยู่ระหว่าง 3.8 ถึง 8.8 วินาทีที่เนื้อยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์

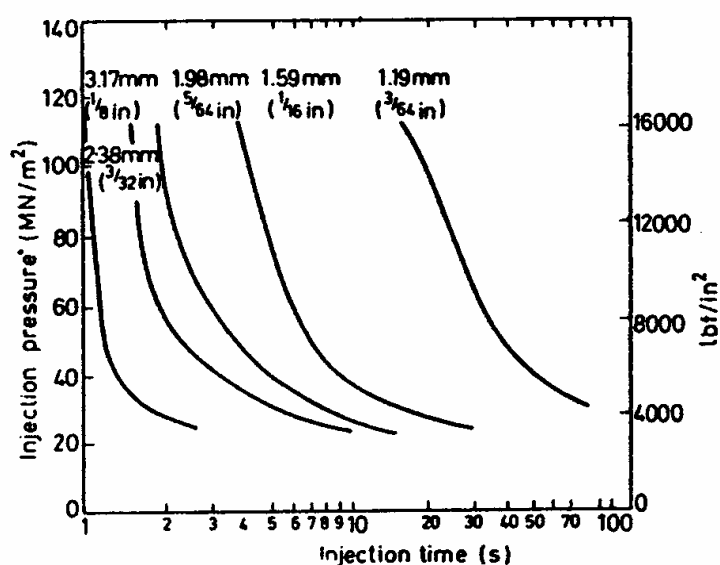


รูปที่ 52 ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่ออุณหภูมิและเวลาในการฉีด

**ตารางที่ 8** ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีด

Nozzle diameter, mm (in)	3.17 (1/8)	3.97 (5/32)
Injection time, s	8.8	3.8
Injection temperature, °C (°F)	120 (248)	118 (244)
Appearance of moulding	scorched	good

Izod และ Morris จะมีข้อมูลที่ครอบคลุมและช่วงการทดลองของ Booth ดังแสดงในรูปที่ 53 จะแนะนำถึงผลกระทบในการเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการฉีด  $V$  เส้นความดันในการฉีดก็เช่นกัน ตัวแปรอื่น ๆ ก็มีลักษณะที่เหมือนกัน ความต้องการเวลาในการฉีดที่จะควบคุมโดยหัวฉีดเพียงอย่างเดียวนั้นความดันจะต้องพอเพียงด้วย

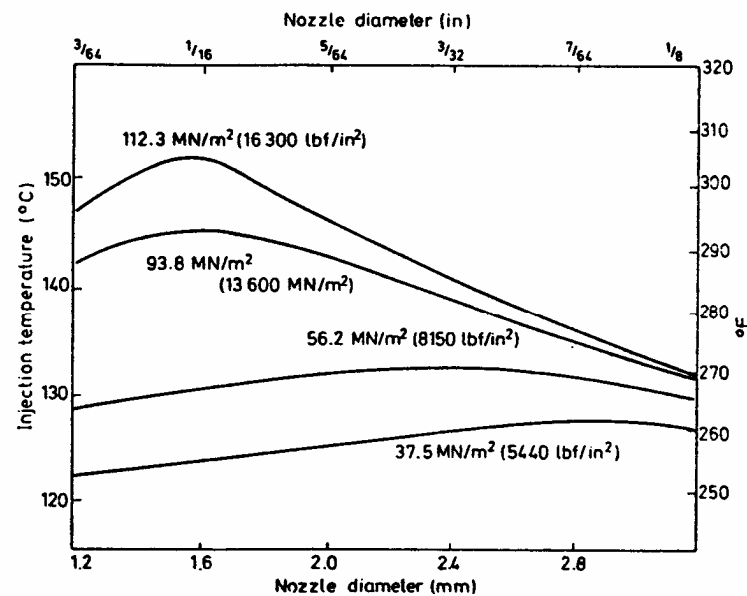


**รูปที่ 53** ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีด

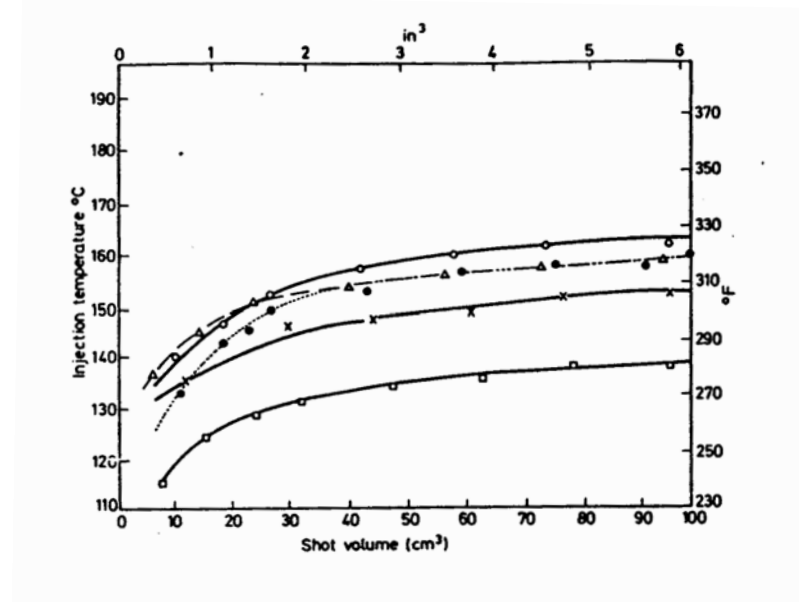
การพล็อตกราฟอุณหภูมิในการฉีดสำหรับยาง Butyl จะขัดแย้งกันกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (ที่ความดันคงที่) Booth ได้แสดงว่ามีการคงอยู่ของการเกิดความร้อนสูงสุดและตำแหน่งที่เกิดอุณหภูมิสูงสุดจะขึ้นอยู่กับความดันในการฉีด และเส้นผ่านศูนย์กลางที่หัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 54

Booth ได้ทำการแสดงรูปที่ 55 ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการฉีดจะทำให้ปริมาตรในการฉีดน้อยลงเพิ่มขึ้นเช่นกัน ซึ่งผลกระทบจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด แต่จะน้อยลงเพื่อเนื้อยางที่ฉีดเข้าไปมากกว่า 50% แล้ว โดยปกติจะทำการกำหนดเวลาที่แท้จริงในการฉีด ก่อนที่กำหนดอัตราส่วนความดันในการฉีดเต็มที่

ผลสรุปซึ่งหลีกเลี่ยงไม่ได้เมื่อมีการสร้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่ถูกต้องจะทำให้อุณหภูมิในการฉีดสูง และเวลาในการฉีดเร็วขึ้น



**รูปที่ 54** อุณหภูมิในการฉีดสำหรับยาง Butyl กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่ความดันคงที่

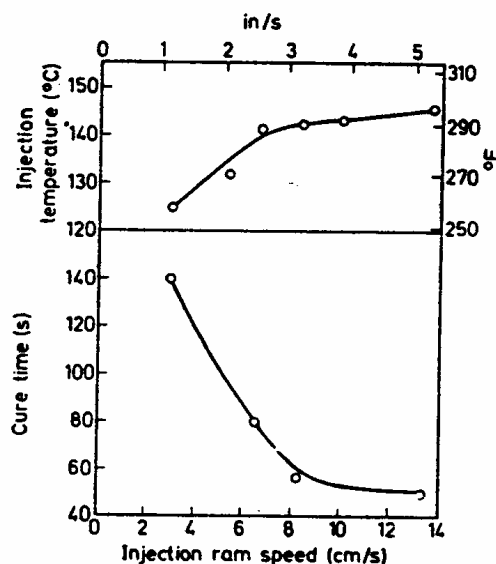


**รูปที่ 55** ปริมาตรในการฉีดเนื้อยางกับอุณหภูมิในการฉีดที่หัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ

### 3.8.6 ผลกระทบของความเร็วในการฉีดของหัวจ่าย (Effect of Injection Ram Speed)

การเคลื่อนที่ในแนวแกนของสกรู เนื้อยางสามารถฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ที่ความเร็ว 50 - 350 cm<sup>3</sup>/s (5 - 21 in<sup>3</sup>/s) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราการออกแบบเครื่องจักรเวลาต่ำสุดในการฉีดจะอยู่ที่หนึ่งวินาทีที่สามารถจะฉีดได้ การควบคุมโดยไฮโดลิกสามารถควบคุมระยะเวลาได้โดยไม่จำกัด สูงขึ้นเป็น 25 วินาที หรือมากกว่านั้น ในความเป็นจริงความเร็วในการฉีดขึ้นอยู่กับความดันในการฉีดและเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด การเพิ่มขึ้นของความเร็วสกรูดังแสดงในรูปที่ 56 โดยให้อุณหภูมิในการฉีดสูง และการบ่มตัวเร็วแต่มีความเร็วที่สูง (โดยการเสริมเครื่องอัดปริมาตร (Pump Capacity ในเครื่อง Peco) ซึ่งจะทำให้ไม่มีการผิดพลาดซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมาก

ในรูปที่ 56 แสดงถึงความหนาของแม่พิมพ์ที่ 2.1 cm (0.8 in) สามารถที่จะบ่มให้สุกได้ในเวลาที่ต่ำกว่า 60 วินาทีโดยมีเงื่อนไขว่าอุณหภูมิในการฉีดต้องสูงกว่า 140°C (284°F)



**รูปที่ 56** ผลกระทบของความเร็วในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มเนื้อยาง

### 3.8.7 อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mould Temperature)

ในความให้การปลอดภัยอย่างมากแก่อุณหภูมิของกระบอกฉีดคือไม่ควรให้อุณหภูมิสูงมากเกินไป และอุณหภูมิที่สูงของเนื้อยางที่เพิ่มขึ้นในขณะที่เนื้อยางไหลผ่านหัวฉีด จะเป็นประโยชน์ถ้าใช้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่สูงเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับการไหลของเนื้อยางที่ไหลเข้าที่อุณหภูมิกระบอกฉีดที่ 90°C (194°F)

อุณหภูมิในการฉีดของเครื่อง Daniels ไปถึง 120 - 125°C (248 - 257°F) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ 180 - 200°C (357-392°F) ซึ่งเป็นที่น่าพอใจ จากนั้นให้อุณหภูมิของกระบอกสูบสูงขึ้น 120 - 125°C (248 - 257°F) และอุณหภูมิของการฉีดสูงขึ้นประมาณ 150 - 160°C (302 - 320°F) อุณหภูมิแม่พิมพ์เหมาะสมประมาณ 180°C

(137°F) ซึ่งจะหลีกเลี่ยงการไหม้ที่ผิวของรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ เพื่อความปลอดภัยควรเลือกอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ปลอดภัยโดยการค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆ จนกระทั่งมีการเกิดการไหลขึ้นเป็นคลื่นเล็กๆ บนผิวของที่ติดกับแม่พิมพ์และลดอุณหภูมิลงมาจากเดิม 3 - 5°C (5 - 9°F)

ถึงแม้ว่าเวลาบ่มเนื้ออย่างค่อนข้างจะเร็วแต่ควรจะให้เหมาะสมโดยที่จะลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ลง และอุณหภูมิของการฉีด แต่จะไม่ได้สำหรับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งควรที่จะเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้สูงขึ้น

ในการทดลองที่ผ่านมามีอุณหภูมิในการฉีดที่สูงกว่า 165°C (329°F) จะทำให้ปราศจากความเสี่ยงในการเกิดการไหม้ในกระบอกฉีด อุณหภูมิฉีดที่สูงที่เป็นไปได้โดยใช้เครื่องจักรที่มีหัวฉีดแบบพิเศษ (Cut-off) กลไกโดยการสร้างความดันที่สูงภายในสกรูที่หมุนเพื่อที่จะดันเนื้ออย่าง

ในทางกลับกันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการทดลองที่แตกต่างกัน ระหว่างอุณหภูมิในการฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามสิ่งที่ควรที่จะให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์สูงกว่าอุณหภูมิในการฉีดเล็กน้อยเพราะการขยายตัวของยางในแม่พิมพ์มีส่วนทำให้เนื้อยางเขาไปเต็มในแม่พิมพ์

### 3.8.8 องค์ประกอบอื่นๆ ในการควบคุมเครื่องจักร (Other Machine Controls)

ในการควบคุมเครื่องฉีดยางนั้นจะมีความสำคัญมากซึ่งจะต้องมีการพิจารณา แต่ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่สามารถพิจารณาควบคุม หรือออกแบบเครื่องจักรให้มีความสมบูรณ์ที่สุดโดยจะทำการพิจารณาที่ชิ้นส่วนหลักๆ ทั้งส่วนที่อยู่ในแม่พิมพ์ และประสิทธิภาพของเครื่องจักร

### 3.8.9 การระบายความร้อนที่สกรู (Screw Cooling)

ในเครื่องจักรฉีดยางที่ใหญ่ขึ้นจะมีการระบายความร้อนของสกรู เช่นเครื่อง Desma 905 ซึ่งจะมีเครื่องมือในการระบายความร้อนให้สกรูโดยอากาศหรือของเหลว ของเหลวในกระบอกฉีดจะเป็นระบบไหลวนโดยจะแยกการควบคุมกับระบบให้ความร้อน ซึ่งจะไหลหมุนเวียนผ่านสกรู

### 3.8.10 การควบคุมความดันและช่วงเวลา (Pressure Control and Timing)

เครื่องจักรบางเครื่อง เช่น Peco 21 TS ความดันในการฉีดนั้นจะมีความสำคัญมากเพราะในระบบเวลาไม่ถึงวินาทีที่อาจจะทำให้เกิดอุบัติเหตุในการทำงานของการฉีดขึ้น เกือบจะทั้งหมดของเครื่องจักรจะทำการคงความดันของการฉีดไว้เมื่อเนื้อยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์จนเกือบที่จะเต็ม ช่วงเวลาในการคงความดันไว้จะอยู่ในช่วงเวลานึงหรือน้อยกว่าหนึ่งวินาที แต่สิ่งที่สำคัญคือ การเกิดฟิล์มบาง ๆ ที่ผิวของเนื้องานในการคงความดันไว้นั้นควรจะคงไว้จนเกิดเศษยาง (Flash) เป็นอย่างน้อย และช่วยในการทำให้เนื้อยางรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวในแม่พิมพ์ และในเรื่องของการขยายตัวของยางที่ไหลเข้ามาในทางวิ่งที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์และแรงดันจะช่วยในการขยายตัวของเนื้อยางที่เกิดขึ้นหลังจากการบ่มนั้นคงที่ ปริมาณของเนื้อยางที่พุ่งออกมาผ่านทางวิ่งที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์นั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิในการฉีดและอุณหภูมิของแม่พิมพ์



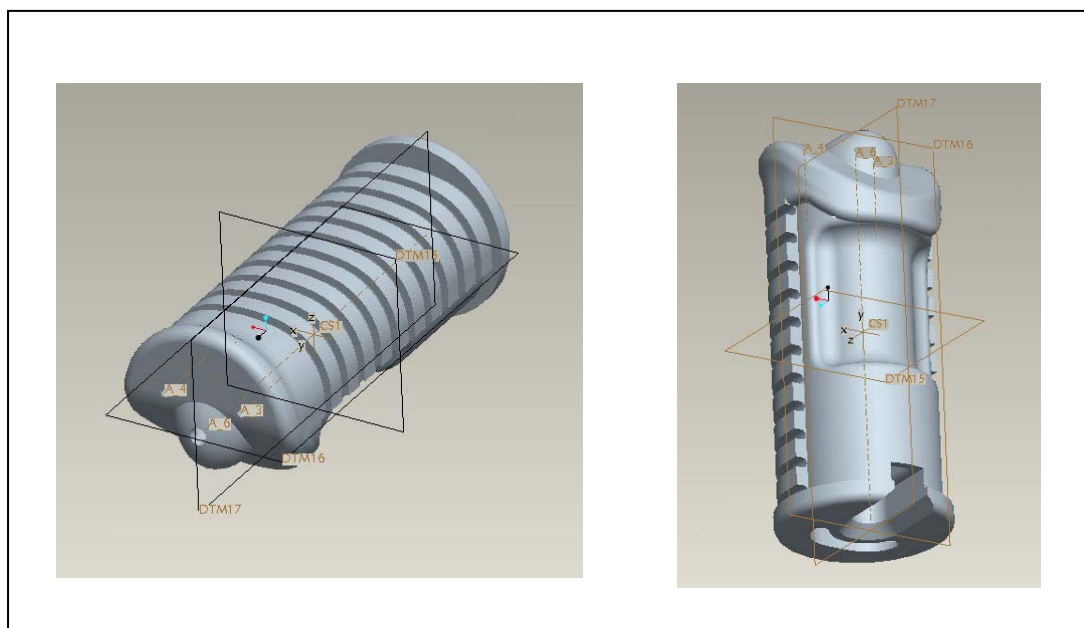
#### 4. วิธีดำเนินการวิจัยและเครื่องมือที่ใช้

##### 4.1 การออกแบบวิธีวิจัย (Research Design)

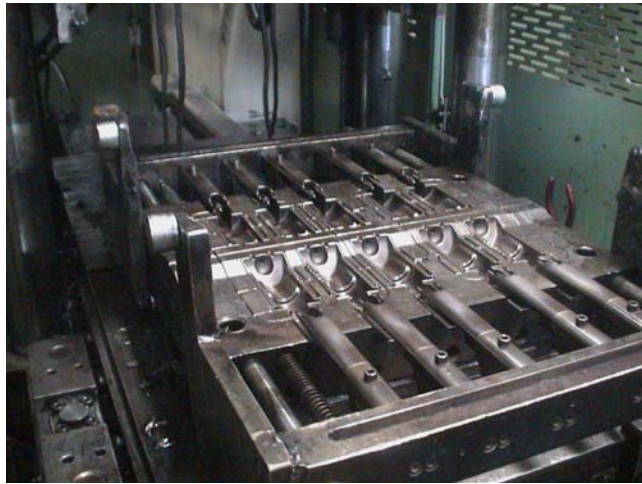
ขั้นตอนการวิจัยเริ่มด้วยการเลือกชิ้นงานที่นำมาเป็นกรณีศึกษาจากบริษัทร่วมวิจัย คือที่วางเท้ารถจักรยานยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 57 จากนั้นจึงนำมาสร้างเป็นแบบชิ้นงาน 3 มิติโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย (CAD) โดยอ้างอิงขนาดต่างๆ ตามแบบชิ้นงานที่เป็นแบบ 2 มิติ ดังรูปที่ 58 จากนั้นจึงเริ่มทำการออกแบบระบบทางวิ่ง (Runner) รูเข้า (Gate) และจำนวนเบ้า (Cavity) โดยได้ออกแบบให้จำนวนเบ้าชิ้นงานเป็น 4 เบ้า ส่วนลักษณะของทางวิ่ง และรูเข้าได้ออกแบบโดยอ้างอิงให้ใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ของทางบริษัทร่วมวิจัยดังรูป 59 เมื่อได้แบบชิ้นงานแล้วจึงทำการจัดเก็บไฟล์ในรูปแบบ STL File โดยแบ่งไฟล์ชิ้นงานออกเป็นส่วนต่างๆ เช่น ไฟล์ชิ้นงาน ไฟล์รูเข้า ไฟล์ทางวิ่ง เป็นต้น เพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA [32]



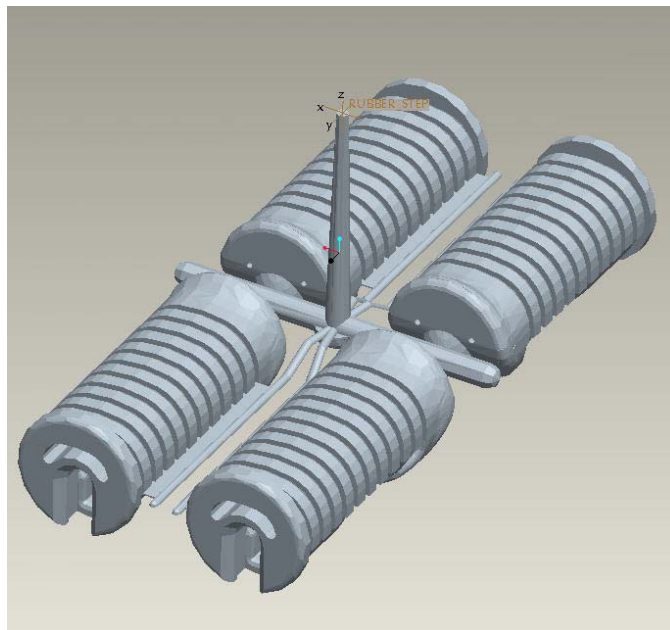
รูปที่ 57 ชิ้นงานที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



รูปที่ 58 แบบชิ้นงานที่สร้างด้วยโปรแกรม CAD

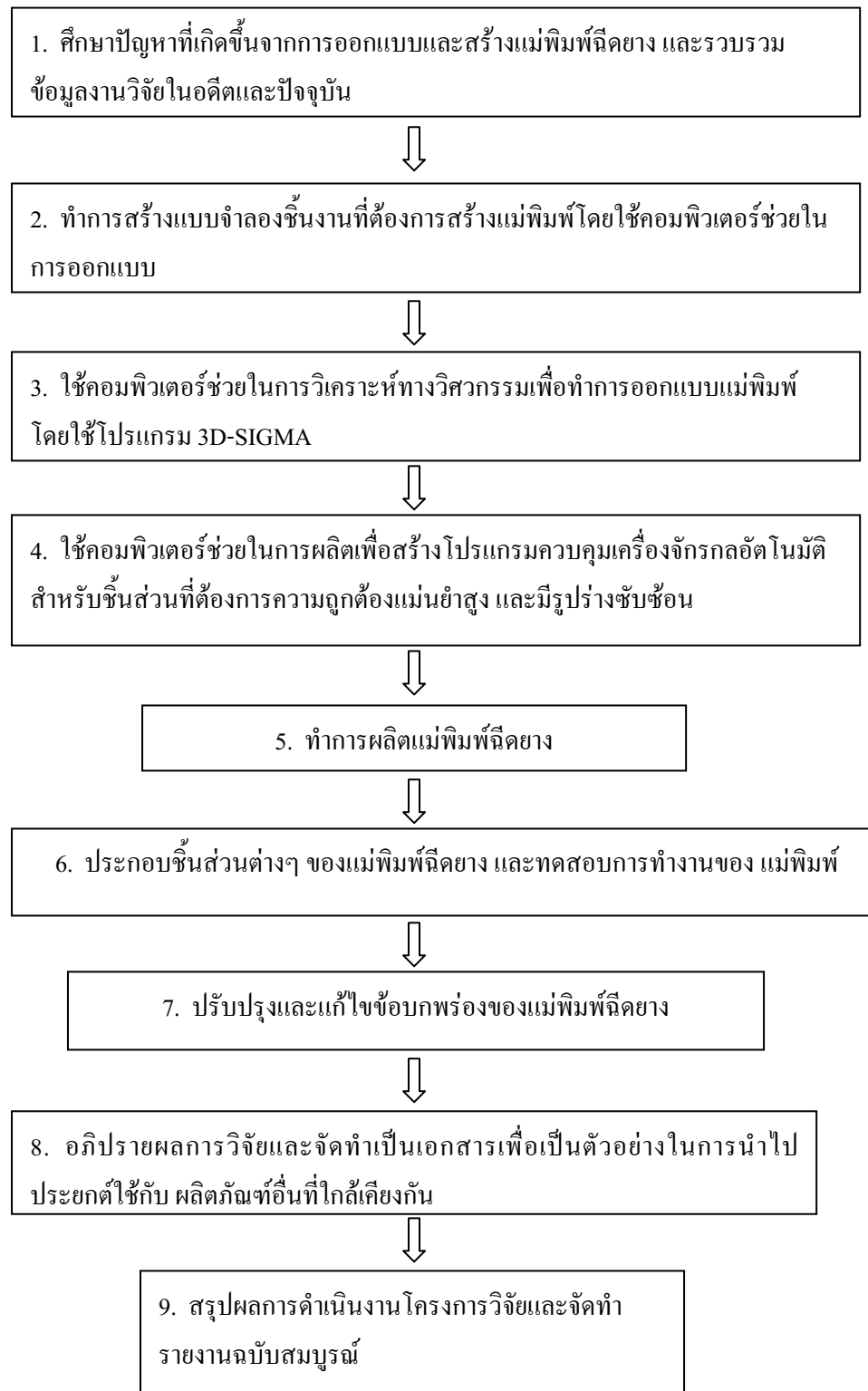


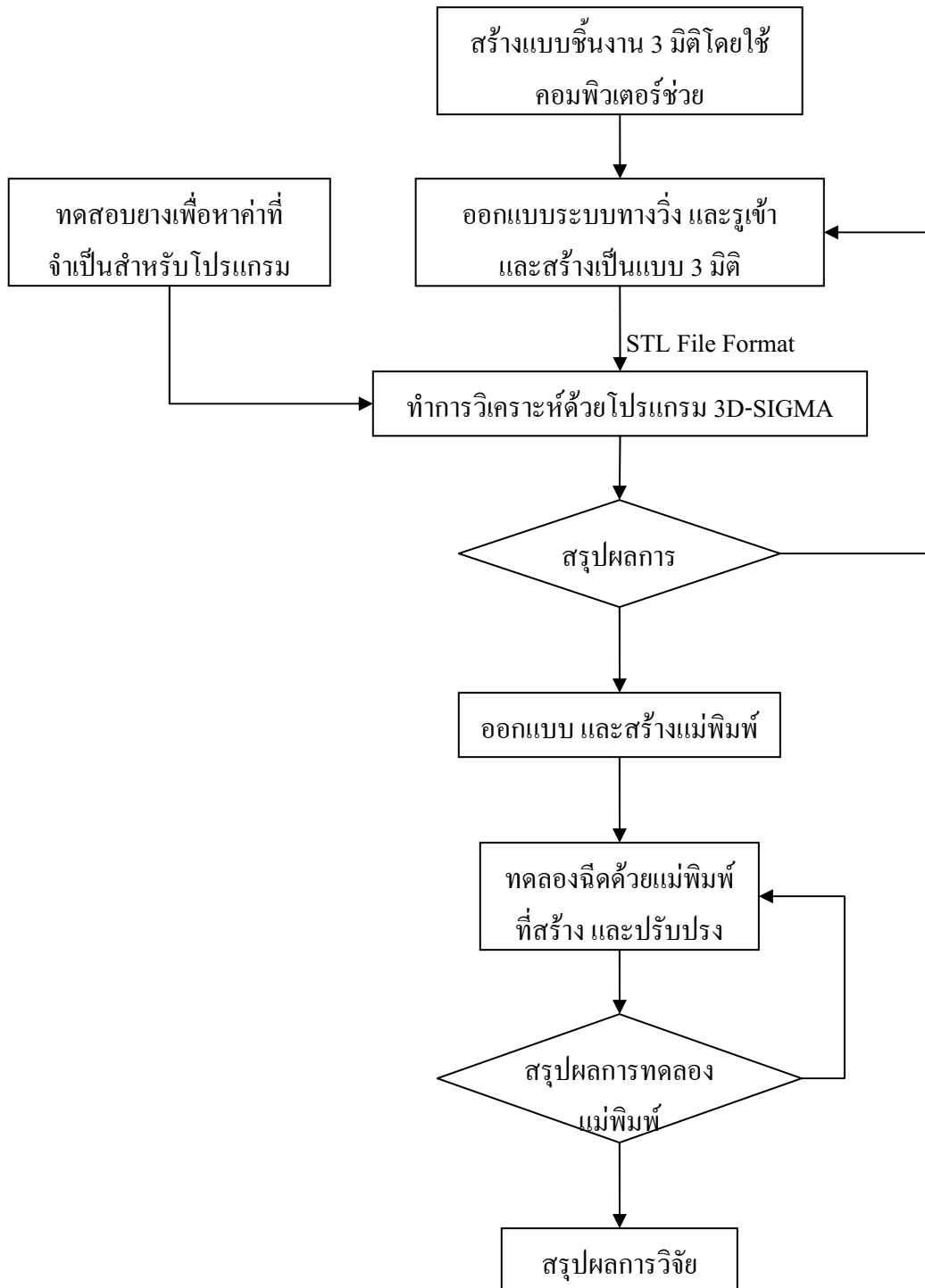
**รูปที่ 59** แม่พิมพ์ของทางบริษัทร่วมวิจัย



**รูปที่ 60** แบบชิ้นงาน ทางวิ่ง และรูเข้าที่สร้างด้วยโปรแกรม CAD

## แผนผังการดำเนินงานโครงการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 61





**รูปที่ 61** แสดงลำดับการดำเนินการวิจัย

## 4.2 รายละเอียดวิธีการวิจัย

รายละเอียดวิธีการวิจัยสามารถสรุปได้เป็นกิจกรรมต่างๆ ดังนี้ โดยแผนดำเนินงานโครงการวิจัยแสดงอยู่ในตารางที่ 9

**ตารางที่ 9** แผนงานดำเนินงานโครงการวิจัย (ปรับปรุง/เพิ่มเติมจากฉบับข้อเสนอโครงการวิจัย มี.ย. 2548)

กิจกรรม	2548							2549						
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1. วางแผนการดำเนินการวิจัย	↔													
2. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องของงานวิจัยร่วมกับบริษัทผู้ร่วมโครงการ		↔												
3. เลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา				↔										
4. ออกแบบและใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์					↔				↔					
5. ผลิตแม่พิมพ์										↔	↔			
6. ทดสอบการใช้งานแม่พิมพ์และปรับปรุงแก้ไข												↔	↔	
7. สรุปผลการวิจัย														↔
8. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์														↔

### กิจกรรมที่ 1 วางแผนการดำเนินการวิจัย

- ประชุมวางแผนความรับผิดชอบ และกำหนดการติดตามงาน

### กิจกรรมที่ 2 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องของงานวิจัยร่วมกับบริษัทผู้ร่วมโครงการ

- ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นจากการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ชนิดยาง
- รวบรวมข้อมูลงานวิจัยในอดีตและปัจจุบัน

### กิจกรรมที่ 3 เลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา

- ประสานงานกับบริษัทผู้ร่วมโครงการเพื่อเลือกชิ้นงานที่จะทำการศึกษา

### กิจกรรมที่ 4 ออกแบบและใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์

- ทำการสร้างแบบจำลองชิ้นงานที่ต้องการสร้างแม่พิมพ์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ
- ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเพื่อทำการออกแบบแม่พิมพ์ โดยใช้โปรแกรม 3D-SIGMA

#### กิจกรรมที่ 5 ผลิตแม่พิมพ์

- ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตเพื่อสร้างโปรแกรมควบคุมเครื่องจักรกลอัตโนมัติสำหรับชิ้นส่วนที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสูง และมีรูปร่างซับซ้อน
- ทำการผลิตแม่พิมพ์ฉีดยาง

#### กิจกรรมที่ 6 ทดสอบการใช้งานแม่พิมพ์และปรับปรุงแก้ไข

- ทดสอบการทำงานของแม่พิมพ์
- ปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องของแม่พิมพ์ฉีดยาง

#### กิจกรรมที่ 7 สรุปผลการวิจัย

- อภิปรายผลการวิจัยและจัดทำเป็นเอกสารเพื่อเป็นตัวอย่างในการนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นที่เกี่ยวข้องกัน
- สรุปผลการดำเนินงานโครงการวิจัย

#### กิจกรรมที่ 8 จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

### 4.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ ดังต่อไปนี้

1. คอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์
2. โปรแกรม 3D-SIGMA สำหรับวิเคราะห์การไหลของยางในแม่พิมพ์
3. เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง

รายละเอียดของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงการวิจัยสามารถจำแนกได้ดังนี้

#### 4.3.1 คอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบและวิเคราะห์

เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับการติดตั้งโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การไหลภายในแม่พิมพ์ โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- CPU Intel Xeon 2.4 GHz x2 CPU
- หน่วยความจำขนาด 4 GB
- ฮาร์ดดิสก์ ขนาด 240 GB
- การ์ดแสดงผล หน่วยความจำขนาด 256 MB
- ระบบปฏิบัติการ Window XP Professional

#### 4.3.2 โปรแกรม 3D-SIGMA

3D-SIGMA เป็นโปรแกรมที่อยู่บนพื้นฐาน 3D Volume Elements ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์หาจุดการทำงานที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โพลิเมอร์และยาง (Polymer and Rubber Injection Moulding) ซึ่งโปรแกรมจะทำการจำลองรูปแบบของการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูป ซึ่งแต่เดิมแล้วโปรแกรมนี้ออกมาบนพื้นฐานของ UNIX แต่ในปัจจุบันสามารถที่จะนำมาใช้หรือสามารถรองรับโปรแกรมที่ใช้บน Windows ได้โดยในปัจจุบันโปรแกรมได้ถูกพัฒนาจนถึง Release 4.3 แล้ว

##### 1) การทำงานของโปรแกรม 3D-SIGMA Release 4.3

ขั้นตอนของการใช้โปรแกรมเริ่มจากการกำหนดรูปทรงต่าง ๆ ของชิ้นงานที่จะทำการขึ้นรูปโดยการฉีด ต่อจากนั้นจึงออกแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์เพื่อที่จะทำการจำลองการทำงานของเครื่องฉีดวัสดุเข้าไปในแม่พิมพ์ฉีด ซึ่งโปรแกรม 3D-SIGMA มีพื้นฐานการทำงานอยู่สมการ Navier – Stokes ซึ่งสามารถที่จะจำลองลักษณะการไหลของโพลิเมอร์และยาง เพื่อช่วยในการกำหนดรูปร่างขนาดของแม่พิมพ์ที่ทำการออกแบบ

##### 2) ข้อมูลทั่วไปของโปรแกรม 3D-SIGMA Release 4.3

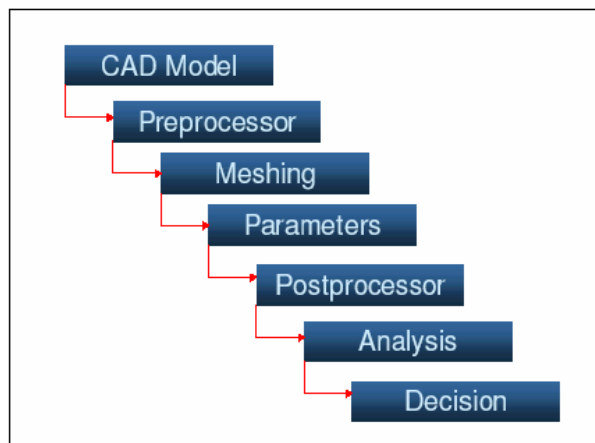
- สามารถคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุในช่วงขณะทำการฉีด
- ขณะทำการจำลองการฉีด สามารถแสดงรูปแบบของการไหลของวัสดุที่เข้าไปในแม่พิมพ์ได้ทุกขั้นตอนตามที่ต้องการ
- ระยะเวลาของการฉีดวัสดุเข้าไปในแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ ซึ่งสามารถกำหนดได้ในโปรแกรมก่อนทำการจำลองการไหล
- ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนนั้นสามารถให้ทั้งแบบการนำ (Conduction) การพา (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) ได้
- สามารถใช้ศึกษาตัวแปรสำคัญต่าง ๆ ในการฉีดวัสดุได้ เช่น เวลาในการฉีด ลักษณะของการกระจายตัวของความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ ความเร็วที่ใช้ขณะทำการฉีด และความดันสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการฉีด
- สามารถคำนวณเวลาการไหลของวัสดุที่เข้าสู่แม่พิมพ์ และตำแหน่งของวัสดุที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ได้
- สามารถแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานและแม่พิมพ์ ซึ่งทำให้เกิดลักษณะของการงอตัวของวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วลักษณะเฉพาะของการขึ้นรูปวัสดุโดยการฉีดนั้นจะต้องดูลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งตัวชิ้นงานและแม่พิมพ์ ซึ่งจะมีผลต่อการขึ้นรูป ดังนั้นโปรแกรม

3D-SIGMA สามารถกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในการฉีดวัสดุและดูถึงลักษณะของการกระจายตัวของอุณหภูมิของยางที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ได้อย่างชัดเจน

- สามารถคำนวณหาความเค้นที่ตกค้างที่กระจายอยู่ในชิ้นงานที่ฉีด
- สามารถคำนวณระดับความเค้นในแต่ละจุดของรูปทรงของชิ้นงานได้
- สามารถประมาณอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ได้เนื่องจากสามารถคำนวณหาความเค้นที่เกิดขึ้นที่แม่พิมพ์ได้

### 3) หลักการโดยทั่วไปของโปรแกรม 3D-SIGMA

ขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรม 3D-SIGMA ดังแสดงในรูปที่ 62



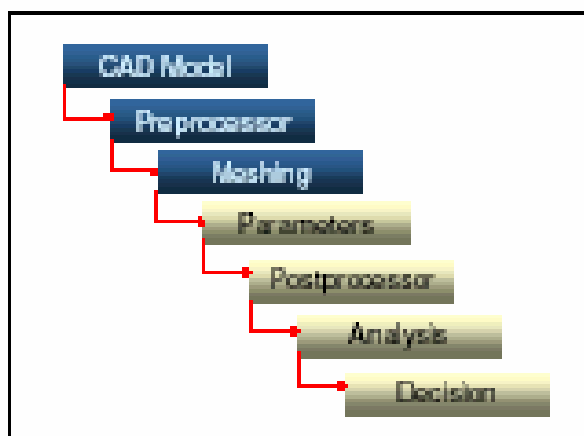
**รูปที่ 62** แสดงถึงขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม 3D-SIGMA



### รูปทรงของแบบจำลองในโปรแกรม 3D-SIGMA

ในโปรแกรม 3D-SIGMA แบบจำลองจะถูกเขียนขึ้นจากโปรแกรม CAD ต่างๆ ซึ่งจะส่งผ่านข้อมูลให้กับโปรแกรม 3D-SIGMA ได้โดยมีลักษณะเป็น STL (Stereolithography - Format) หรือโปรแกรมอื่นๆที่สามารถที่จะแปลงรูปแบบของแบบจำลองเป็น STL files เช่น Solid Works, Unigraphics เป็นต้น

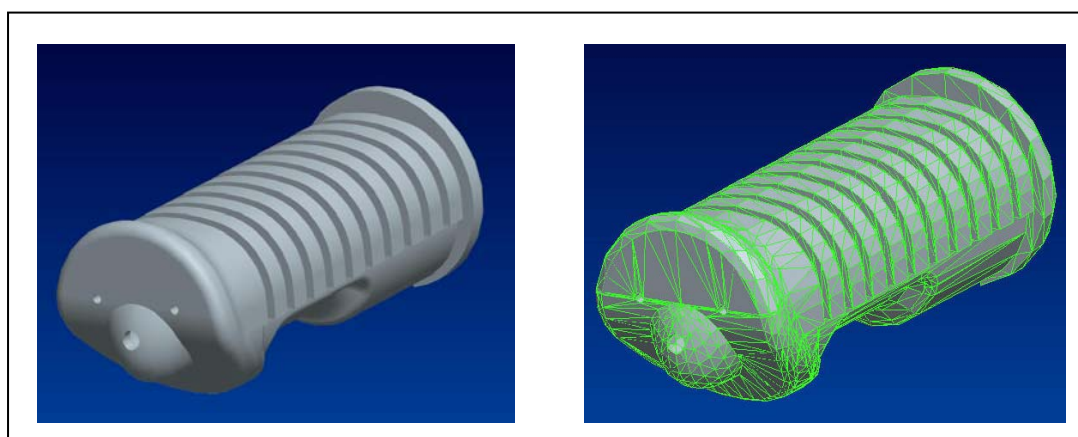
ในรูปที่ 63 นั้นจะแสดงถึงขั้นตอนในการสร้างรูปทรงของชิ้นงาน (CAD Model) และการกำหนดชิ้นส่วนต่างๆที่จะทำการวิเคราะห์ในโปรแกรม เช่น ชิ้นงาน (Parts), ช่องทางวิ่ง (Runner), รูฉีด (Gate), แม่พิมพ์ (Mould) และช่องทางเข้า (Inlet) และการกำหนดขนาดของอิลิเมนต์ของชิ้นงานให้เหมาะสมก่อนที่จะทำการวิเคราะห์



**รูปที่ 63** แสดงถึงขั้นตอนการทำงานโปรแกรม 3D-SIGMA ก่อนทำการจำลองการไหล

### รูปทรงชิ้นงาน (CAD Model)

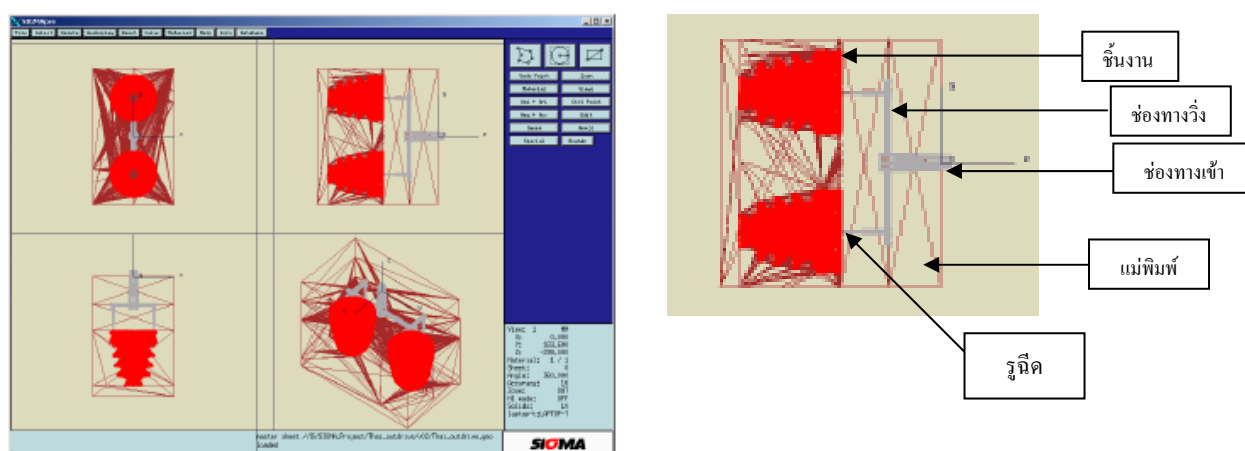
ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ยางรองเท้าจักรยานยนต์(Rubber step) (ภาคผนวก ก) ดังรูปที่ 64 เมื่อได้รูปทรงของชิ้นงาน ทางวิ่ง รูฉีดแล้วจากนั้นทำการบันทึกข้อมูลในรูปแบบของ STL files (ต้องกำหนดพิกัดของชิ้นส่วนแต่ละอันให้อยู่ในรูปแบบจริงที่จะทำการฉีด) ควรกำหนดให้จุดเริ่มต้นของแกน (Origin) อยู่บนปากทางเข้าของทางวิ่ง



**รูปที่ 64** ขากรองเท้าจักรยานยนต์ที่ใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบเขียนขึ้น

### การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม 3D-SIGMA

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเปิดข้อมูลของแบบจำลองที่ได้ทำการเขียนไว้ในรูปของ STL files โดยการใช้คำสั่ง Preprocessor ในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดชิ้นส่วนต่างๆที่ได้สร้างขึ้นภายในโปรแกรมได้แก่ ชิ้นงาน (Parts), ช่องทางวิ่ง (Runner), รูเข้า (Gate), แม่พิมพ์ (Mould) และช่องทางเข้า (Inlet) ดังแสดงในรูปที่ 65

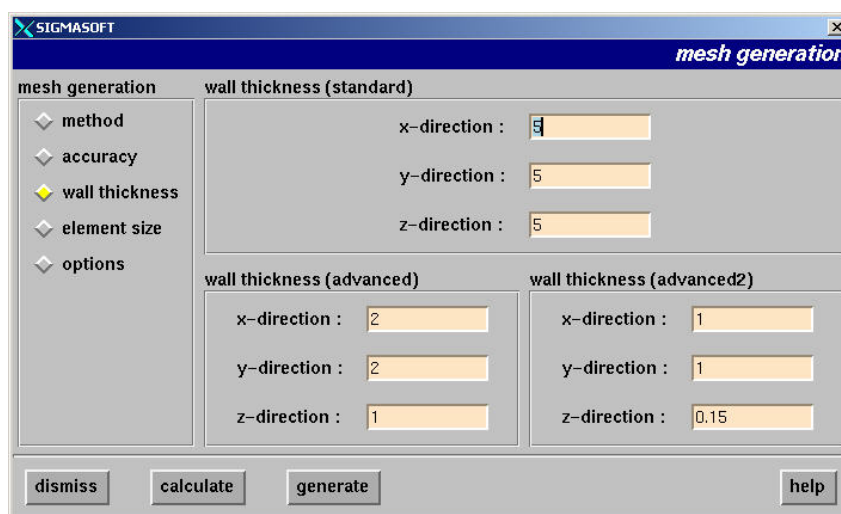


**รูปที่ 65** แสดงหน้าต่างของขั้นตอน Preprocessor

### การกำหนดค่าของเอลิเมนต์ (Meshing)

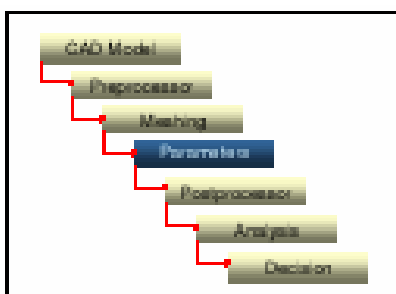
ในการกำหนดค่าของเอลิเมนต์ ขั้นแรกของโปรแกรม สามารถที่จะกำหนดได้โดยการแบ่งโดยอัตโนมัติหรือถ้าจำนวนของเอลิเมนต์ที่แบ่งนั้นมีมากเกินไปก็สามารถที่จะลดจำนวนของเอลิเมนต์ให้น้อยลงได้โดยการกำหนดจำนวนของเอลิเมนต์เองซึ่งถ้ากำหนดเอลิเมนต์เองต้องทำการตรวจสอบค่าของแบบจำลองโดยการดูค่าของปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น ความหนาของชิ้นงานเหมาะสมในการแบ่งเอลิเมนต์หรือไม่ถ้ามีปัญหาให้กลับมา

กำหนดค่าของความหนา (Wall Thickness) ให้เล็กลงหรือกำหนดค่าของขนาดเอลิเมนต์ (Element Size) ให้มีขนาดที่เหมาะสมดังแสดงในรูปที่ 66



รูปที่ 66 แสดงการกำหนดค่าความหนาของชิ้นงานให้เหมาะสม (Wall Thickness)

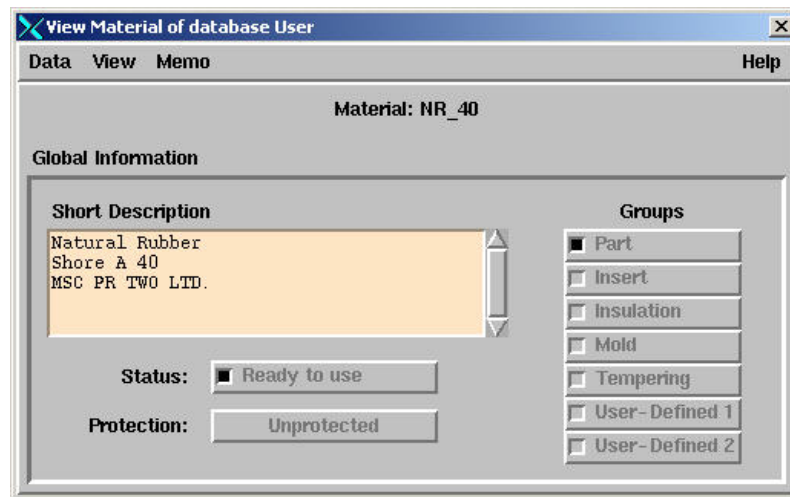
### การกำหนดค่าของตัวแปร (Parameter Setting)



ในการกำหนดค่าตัวแปรก่อนที่จะทำการจำลองการไหลนั้น จะต้องเลือกว่าจะใช้วัสดุใดในการผลิตชิ้นงานในตัวอย่างที่เห็นในรูปที่ 67 นั้นจะใช้ยาง NR 40 (ภาคผนวก ข) ซึ่งข้อมูลของยางในแต่ละชนิดนั้น จะอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรมหรือสามารถที่จะสร้างซึ่งของมูลที่ต้องการของการสร้างฐานข้อมูลภายในโปรแกรมได้แก่

- ค่าการนำความร้อน (Heat Conductivity, Lambda)
- ค่าความถ่วงจำเพาะ (Density, Rho)
- ค่าความจุความร้อน (Heat Capacity, Cp)
- ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราการเฉือน (Viscosity as Function of Shear Rate)\*
- อัตราการบ่มที่ขึ้นกับเวลา (Curing Rate as Funtion of Time)\*

\* ในการทดสอบนั้นควรกระทำที่อุณหภูมิอย่างน้อย 3 ค่าและในแต่ละช่วงของอุณหภูมิหนึ่งควรมีการเก็บข้อมูลไม่น้อยกว่า 15 ค่า



**รูปที่ 67** แสดงถึงการเลือกของชนิดของยางที่จะทำการจำลองการไหล

ทำการกำหนดค่าที่ต้องการพื้นฐานของโปรแกรมได้แก่ค่า

- ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการฉีด (Initial Temperature) ต้องกำหนดขึ้นตามสภาวะความเป็นจริงดังแสดงในรูปที่ 68
- ค่าของ Heat Conductivity (Lambda) ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ (W/mK) ดังแสดงในรูปที่ 69
- ค่าของ Density (Rho) as function of Temperature ( $\text{g/cm}^3, ^\circ\text{C}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 70
- ค่าของ Heat Capacity (Cp) as function of Temperature ( $\text{J/kg K}, ^\circ\text{C}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 71
- ผลคูณค่าของ Density (Rho) x Heat Capacity (Cp) as function of Temperature ดังแสดงในรูปที่ 72
- ค่าของ Dynamic Viscosity at  $100.00^\circ\text{C}$ : Viscosity as function of Shear Rate ดังแสดงในรูปที่ 73

เมื่อกำหนดค่าลงไปแล้วหรือเลือกเอาชนิดของยางที่มีในโปรแกรมแล้วโปรแกรมก็จะทำการคำนวณหาค่าที่จะใช้ในการจำลองการไหลขึ้นมาเองได้แก่ค่าต่างๆ ดังนี้

- ค่าของ Rheology (Carreau-WLF) ดังแสดงในรูปที่ 73
- Zero Shear Rate (dyn.) Visc. P1 (Pa s)
- Reciprocal Trans-Shear Rate P2 (s)
- Exponent P3
- Reference Temperature  $T_o$  ( $^\circ\text{C}$ )
- Standard Temperature  $T_s$  ( $^\circ\text{C}$ )
- ค่าของ Dynamic Viscosity: Viscosity as Function of Shear Rate ดังแสดงในรูปที่ 74
- ค่าของ Measured Curing Rate at  $150.00^\circ\text{C}$ : Curing Rate as Function of Time ดังแสดงในรูปที่ 75
- ค่าของ Weighting Factor ดังแสดงในรูปที่ 76
- ค่าของ Incubation Time (Scorch-Index) (min, K) ดังแสดงในรูปที่ 77

- ค่าของ Reaction-Kinetics (Deng-Isayev) ( $1/\text{min}^n$ , J/mol) ดังแสดงในรูปที่ 78
- ค่าของ Curing Rate: Curing Rate as Function of Time ดังแสดงในรูปที่ 79

Material: NR\_40

General Parameters

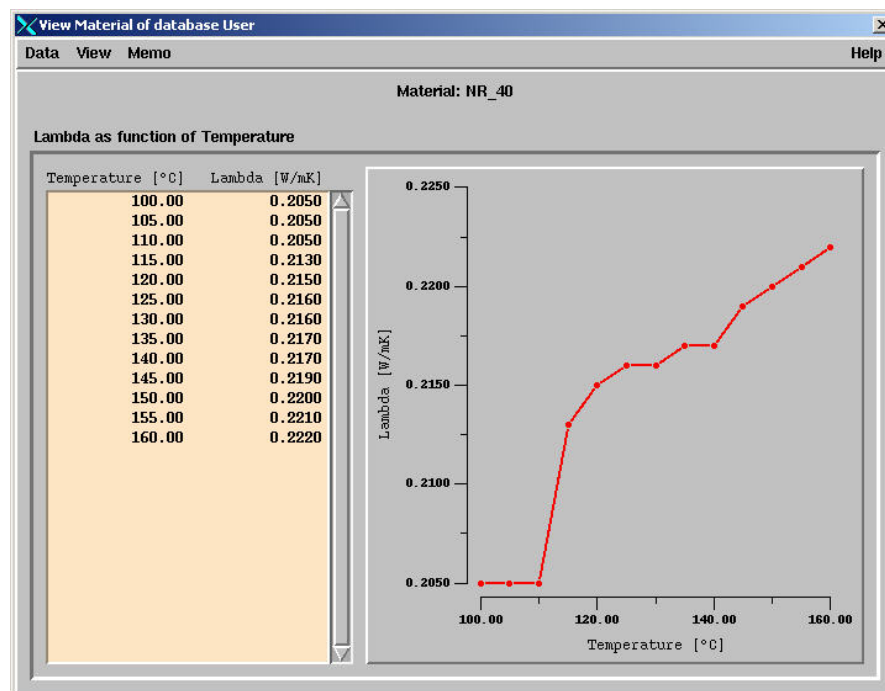
Material type: Elastomer

Initial temperature: 80.00 °C

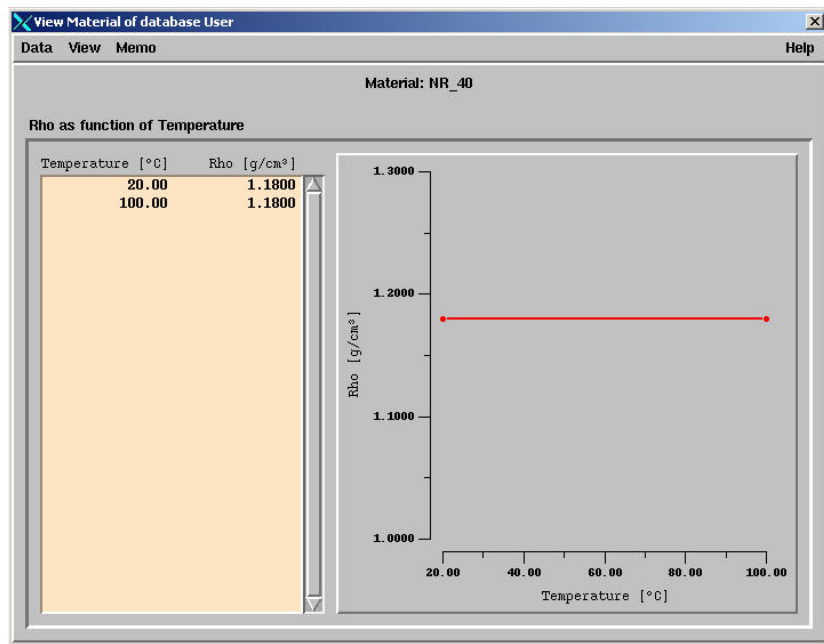
Rheology model: Ostwald-deWaele

pvT model: Density

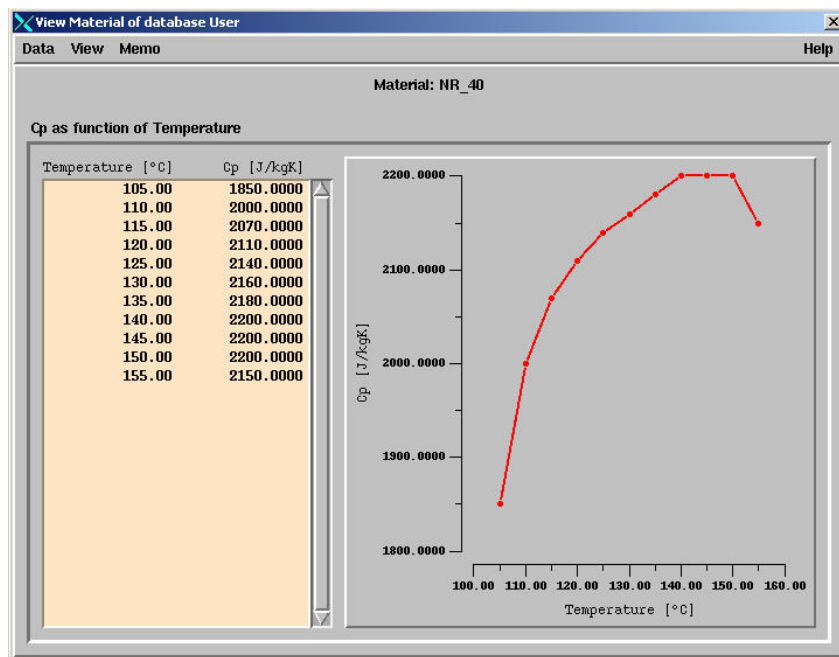
**รูปที่ 68** แสดงค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการฉีด (Initial Temperature)



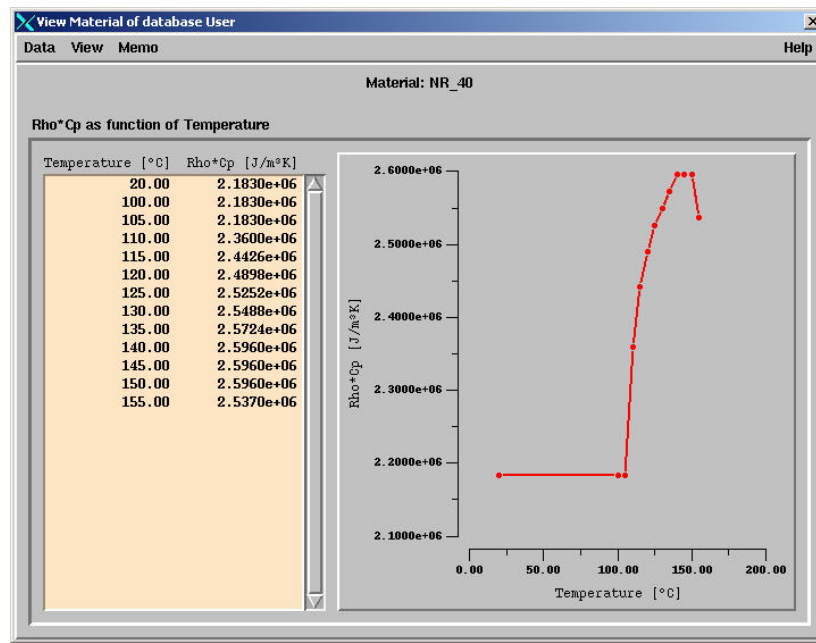
**รูปที่ 69** แสดงค่าของ Heat Conductivity (Lambda) ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ (W/mK)



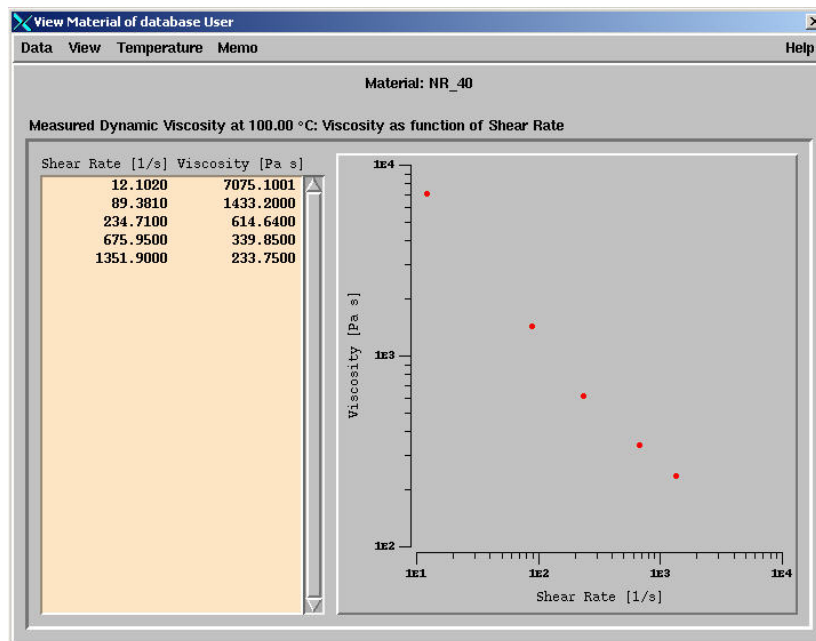
รูปที่ 70 แสดงค่าของ Density (Rho) as Function of Temperature ( $\text{g/cm}^3$ ,  $^{\circ}\text{C}$ )



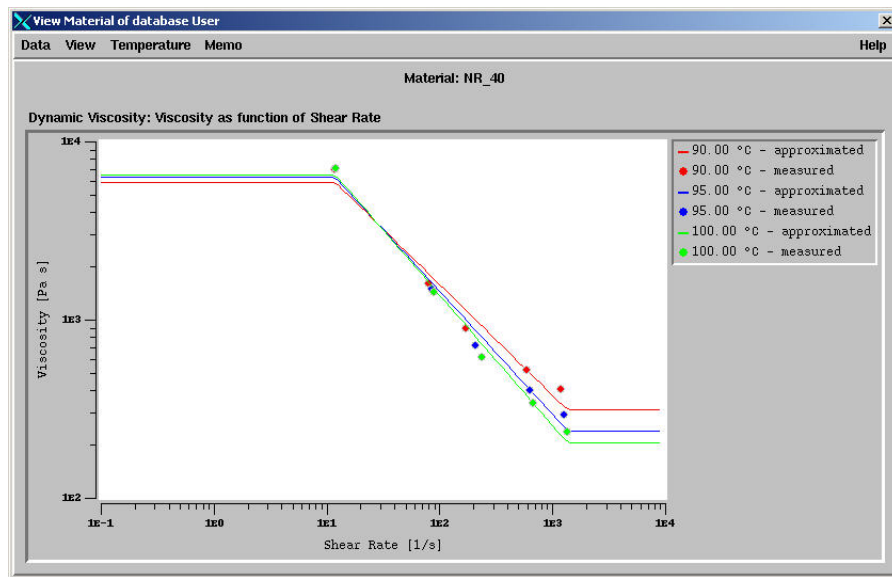
รูปที่ 71 แสดงค่าของ Heat Capacity (Cp) as Function of Temperature ( $\text{J/kg K}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ )



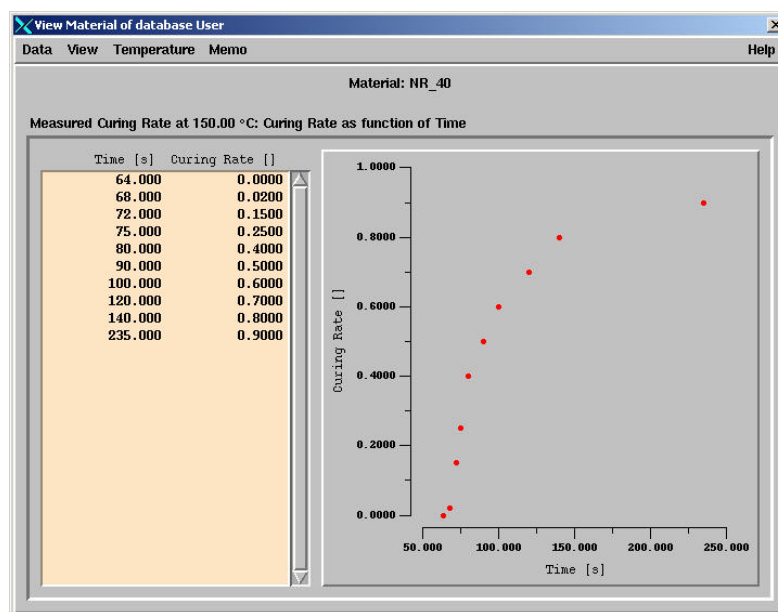
รูปที่ 72 แสดงค่าของ Density (Rho) x Heat Capacity (Cp) as Function of Temperature



รูปที่ 73 แสดงค่าของ Dynamic Viscosity at 100.00 °C: Viscosity as Function of Shear Rate



รูปที่ 74 แสดงค่าของ Dynamic Viscosity: Viscosity as Function of Shear Rate



รูปที่ 75 แสดงค่าของ Measured Curing Rate at 150.00 c°: Curing Rate as Function of Time



View Material of database User

Data View Memo Help

Material: NR\_40

Weighting factor: 1.0e-03

รูปที่ 76 แสดงค่าของ Weighting Factor

View Material of database User

Data View Memo Help

Material: NR\_40

Incubation Time (Scorch-Index)

log10(t0): -9.0370 min

T0: 8823.140 K

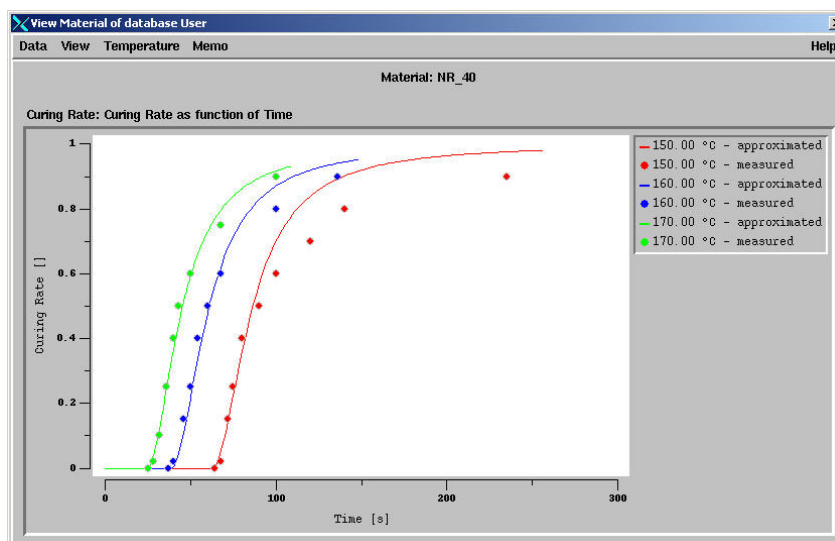
Reaction-Kinetics (Deng-Isayev)

log10(K0): 3.0710 1/min<sup>n</sup>

Ea: 18762.80 J/mol

n: 1.8736

รูปที่ 77 แสดงค่าของ Incubation Time (Scorch-Index) (min, K)  
และค่าของ Reaction-Kinetics (Deng-Isayev) (1/min<sup>n</sup>, J/mol)



รูปที่ 78 แสดงค่าของ Curing Rate: Curing Rate as Function of Time

## การกำหนดค่าของตัวแปรในกระบวนการ (Process Parameters)

ในกระบวนการกำหนดค่าเริ่มต้นก่อนทำการจำลองการไหลของกระบวนการนั้นจะต้องกำหนดค่าของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์และต้องกำหนดค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นของทั้งชิ้นงานและของแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 79 ต่อจากนั้นทำการกำหนดค่าของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ หรือแม่พิมพ์ตัวที่คงที่กับแม่พิมพ์ตัวที่เคลื่อนที่ (Part/Mould-700 W/m<sup>2</sup>K, Mould/mould-2,000 W/m<sup>2</sup>K) ดังแสดงในรูปที่ 80

material	ID label	database/filename	material temp [° C]
Part class		User Database/NR_40	100.000
Part	ID 1	User Database/NR_40	100.000
Inlet	ID 1	User Database/NR_40	100.000
Runner	ID 1	User Database/NR_40	100.000
Ingate	ID 1	User Database/NR_40	100.000
material	ID label	database/filename	material temp [° C]
Mould class		SIGMA Database/X45NiCrMo4	160.000
Slides	ID 1	SIGMA Database/X45NiCrMo4	160.000
Movable	ID 1	SIGMA Database/X45NiCrMo4	160.000
Movable	ID 2	SIGMA Database/X45NiCrMo4	160.000
Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/X45NiCrMo4	160.000
Fixed Half	ID 2	SIGMA Database/X45NiCrMo4	160.000
material	ID label	database/filename	material temp [° C]
Tempering class		SIGMA Database/HEATMED	160.000
Tempering	ID 1	SIGMA Database/HEATMED	160.000
Tempering	ID 2	SIGMA Database/HEATMED	160.000

**รูปที่ 79** แสดงกำหนดค่าของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์  
และต้องกำหนดค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นของทั้งชิ้นงานและของแม่พิมพ์

heat transfer definitions					
material 1	ID label 1	material 2	ID label 2	HTC database/filename	HTC dataset group
Part class		Mould class		SIGMA Database/C900.0	Constant
Part	ID 1	Slides	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Part	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Part	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Runner	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Runner	ID 1	Movable Half	ID 2	SIGMA Database/C900.0	Constant
Runner	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Runner	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Ingate	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Ingate	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Mould class		Mould class		SIGMA Database/C900.0	Constant
Slides	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Slides	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C900.0	Constant
Movable	ID 1	Movable Half	ID 2	SIGMA Database/C10000.0	Constant
Movable	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C10000.0	Constant
Movable	ID 2	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C10000.0	Constant
Fixed Half	ID 1	Fixed Half	ID 2	SIGMA Database/C10000.0	Constant
Mould class		Tempering class		SIGMA Database/C10000.0	Constant
Movable	ID 2	Tempering	ID 1	SIGMA Database/C10000.0	Constant
Fixed Half	ID 2	Tempering	ID 2	SIGMA Database/C10000.0	Constant

**รูปที่ 80** แสดงการกำหนดค่าของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์  
หรือแม่พิมพ์ตัวที่คงที่กับแม่พิมพ์ตัวที่เคลื่อนที่