



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม  
ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

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

โดย

ผศ. ดร. ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ และคณะ

พฤษภาคม 2549

តួល្មាល់លេខទំនួរ RDG4850056

## រាយការណ៍វិជ្ជាគារប័ណ្ណសម្បរណ៍

### ការបង្កើតគម្រោង នៃការបង្កើតគម្រោង នៃការបង្កើតគម្រោង

កណ្តាល់វិជ្ជាគារ

តាមការ

- |                              |                  |
|------------------------------|------------------|
| 1. លោក ស្រី ស៊ុភិតិ វិច្ឆិកា | អ.កែវត្រកាសទំនួរ |
| 2. លោក ស្រី ស៊ុភិតិ វិច្ឆិកា | អ.កែវត្រកាសទំនួរ |
| 3. លោក ស្រី ស៊ុភិតិ វិច្ឆិកា | អ.កែវត្រកាសទំនួរ |

ចុះតូល្មាល់នៅថ្ងៃទី ០១ ខែ មីនា ឆ្នាំ ២០២៣

សារព័ត៌មាននេះត្រូវបានបង្កើតឡើងដើម្បីបង្កើតគម្រោង  
(ការបង្កើតគម្រោងនេះត្រូវបានបង្កើតឡើងដើម្បីបង្កើតគម្រោង)

## สารบัญ

หน้า

สารบัญ	i
สารบัญตาราง	iv
สารบัญรูปภาพ	v
หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)	xii
<b>1. บทคัดย่อ</b>	<b>1</b>
<b>2. บทนำ</b>	<b>2</b>
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
<b>3. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและเอกสารที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>10</b>
3.1 ผลการวิจัยที่เกี่ยวข้อง	10
3.2 แนวคิดในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการพิมพ์ด้วยขึ้นรูป	14
3.3 วิธีการเชิงตัวเลขและการนำไปใช้ในปรากฏการณ์การพิมพ์	16
3.4 คุณสมบัติพื้นฐานของยาง	31
3.5 รีโอลายของยาง	34
3.6 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์	43
3.7 การออกแบบแม่พิมพ์	49
3.8 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ต่อกระบวนการพิมพ์ขึ้นรูปและการออกแบบแม่พิมพ์	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 การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปที่วางแผนเท้ารถจักรยานยนต์	121
5.3 การเปรียบเทียบผลจากการจำลองด้วยโปรแกรม และการทดลองฉีดจริง	123
5.4 ผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA	126
<b>6. สรุปผลการวิจัย</b>	<b>163</b>
6.1 อุณหภูมิของสไลด์และแม่พิมพ์ที่เวลาต่างๆ	164
6.2 การสูญเสียของชิ้นงาน	165
6.3 โลหะที่เลือกใช้ในการสร้างแม่พิมพ์	165
6.4 ตัวแปรที่ทำการควบคุมในการฉีด	165
6.5 การใช้งานโปรแกรม 3D-SIGMA	166
<b>7. ข้อเสนอแนะ</b>	<b>169</b>
7.1 ข้อเสนอแนะจากทางโรงพยาบาล	169
7.2 ข้อเสนอแนะจากทางคณะผู้วิจัย	169
<b>8. การเผยแพร่ผลงานโครงการวิจัย</b>	<b>169</b>

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก ตารางเปรียบเทียบวัดอุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ และกิจกรรมที่ดำเนินการมาและผลที่ได้รับตลอดโครงการ	171
ภาคผนวก ข แบบແນ່ພິມພົດບັນຫຼຸບທີ່ວາງເທົ່າຮອບຈັກຍາຍນຕໍ່	175
ภาคผนวก ค ປຶ້ມຫາແລະແນວທາງແກ້ໄຂຂອງຄວາມລ່າຍ້າໃນการດຳເນີນຈານ	198
ภาคผนวก ง ຂໍ້ມູນປຶ້ມຫາຂອງທີ່ວາງເທົ່າຮອບຈັກຍາຍນຕໍ່ທີ່ໄດ້ຮັບແຈ້ງຈາກທາງໂຮງຈານ	202
ภาคผนวก ຈ ພຸດທະນາຄານທີ່ວາງເທົ່າຮອບຈັກຍາຍນຕໍ່	205
ภาคผนวก ລ ນທຄວາມສໍາຫັນກາຣເພຍແພວງຈານວິຊຍ	208
เอกสารอ้างอิง	

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันในสมการการส่งถ่าย	26
2	ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์แบบอัด	45
3	ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด	46
4	แสดงถึงผลกระทบของความลึกของรูเข้าที่ความลึกต่างๆ	67
5	แสดงถึงผลกระทบของขนาดที่เปลี่ยนแปลงของขนาดหัวฉีด	67
6	ผลกระทบของอุณหภูมิของกระบวนการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มเนื้อยาง ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีดกับอุณหภูมิ	80
7	ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีด	84
8	แผนงานดำเนินงานโครงการวิจัย (ปรับปรุง/เพิ่มเติมจากฉบับข้อเสนอโครงการวิจัย มิ.ย. 2548)	88
9		96
10	แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลของยาง แรงดันฉีด และเวลาฉีด	123

## ตารางภาคผนวกที่

ก-1	ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์และผลที่ได้รับ	172
ก-2	ตารางเปรียบเทียบแผนงานและผลงานของโครงการวิจัย	173
ค-1	ปัญหาและแนวทางแก้ไขของความล่าช้าในการดำเนินงาน	199
ง-1	ปัญหาของเสียจากการฉีดชิ้นงานยางวางแผนที่กำลังจะยกยานยนต์	203
จ-1	ตารางเปรียบเทียบขนาดของชิ้นงานของโครงการวิจัยและชิ้นงานของโรงงาน	206

## สารบัญรูปภาพ

ข้อปฏิทิน	หน้า
1 แสดงถึงการ ไฟล์เข้าและออกของมวลที่กระทำกับเอกสารต์ของไฟล์	17
2 แสดงองค์ประกอบของความเด่นที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของอนุภาคของไฟล์	18
3 แสดงถึงองค์ประกอบของความเด่นในแนวแกน x	19
4 แสดงเวลาเตอร์การ ไฟล์ของความร้อน	23
5 a) การสร้างกริดแบบพิกัด (Cartesian Grid)	27
b) การสร้างกริดแบบเข้ารูป (Body-Fitted Grid)	27
6 แสดงการเก็บค่าของตัวแปร	28
7 แสดงรูปแบบเฉพาะของเอกสารต์ในวิธีปริมาตรจำกัด	28
8 แสดงถึงความแตกต่างกันของอุณหภูมิของแม่พิมพ์กับเนื้อยาง	31
9 การทดสอบหาค่าความหนืดในรูปแบบต่างๆ	35
10 แสดงส่วนประกอบต่างๆและการทำงานของเครื่องคานาโน่	35
11 แสดงการทดสอบค่าความหนืดของเนื้อยางที่มีความหนืดสูงที่อัตราเฉือนต่างๆในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ	36
12 แสดงการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนและอัตราเฉือนของ ไฟล์แบบนิวโทนียนและแบบนอนนิวโทนียน	36
13 แสดงถึงอัตราเฉือนโดยจะขึ้นอยู่กับความเร็วและความหนา	37
14 แรงดึงยางจากของยางชนิดต่างๆ ในสภาพอุณหภูมิต่างๆ	40
15 แสดงลักษณะที่เกิดขึ้นของเนื้อยางเมื่อผ่านการอบ (Vulcanization)	42
16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาในการฉีด	43
17 ส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป	44
18 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป	44
19 ส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์ยางแบบอัดส่ง	45
20 แสดงการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดส่ง (Transfer Moulding)	45
21 ส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง และแนวนอน	47
22 แสดงการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการฉีด (Injection Moulding)	47
23 เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง (Vertical Injection Machine) และแบบแนวนอน (Horizontal Injection Machine)	48
24 แสดงถึงเส้นความสัมพันธ์ของความเด่น - ความเครียด	53
25 แสดงการจัดวางเม้าชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์ฉีด	56

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
26 แสดงถึงระบบการ ไฟลของแม่พิมพ์แบบจีด	60
27 ภาพหน้าตัดของทางวิ่ง ‘a’ รูปครึ่งวงกลม, ‘b’, วงกลม ‘c’ ครึ่งวงกลมที่มีการขยาย แนวยาว และ ‘d’ รูปทรงสี่เหลี่ยม	61
28 แม่พิมพ์จีดเป็นแบบสองชั้น	63
29 แม่พิมพ์จีดเป็นแบบสามชั้น	63
30 การทำงานแม่พิมพ์จีดเมื่อมีการแยกส่วน	64
31 ชนิดของของทาง ไฟลและรูเข้าในรูปแบบต่างๆ	66
32 ทาง ไฟลเข้าแบบพัดที่มีความลึก 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 ขั้นตอนของการ ไฟลของเนื้อยางที่เข้าไปภายในแม่พิมพ์จีด	68
34 หน้าตัดของแม่พิมพ์จีดของยางเครื่องสูบลมซึ่งแสดงตำแหน่งช่องทางเข้า	68
35 แกนแบบแท่งในแม่พิมพ์ของยางเครื่องสูบลม	70
36 ทางเข้าของเนื้อยางในตำแหน่งค้านบนและค้านล่างของยางปิดผนึกค้านข้าง	71
37 ทางวิ่งและรูเข้าและตัวรูปทรงชิ้นงานภายใต้แม่พิมพ์	71
38 รูเข้าแบบอุ้ยทำมุมเข้าค้านล่าง (Submarine Gate)	72
39 แสดงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการฉีดยางในขั้นตอนต่างๆ	75
40 การเพิ่มขึ้นของความเร็วของตัวสกูร์ในเครื่อง Peco ที่มีผลต่ออุณหภูมิในการฉีดและ เวลาในการบ่มตัวของเนื้อยางในตำแหน่งต่างๆ	76
41 ค่าความจุของเนื้อยางตามปกติโดยตั้งค่าความเร็วของสกูร์และความดันกลับของสกูร์ โดยการใช้การจ่ายแบบเติมที่	77
42 ผลของอุณหภูมิกับความเร็วของสกูร์ที่มีผลกระทบต่อการฉีดเนื้อยาง	78
43 อุณหภูมิในการฉีดที่สูงขึ้นโดยการทำให้ความร้อนของระบบออกสูบสูงขึ้น	79
44 การสูงขึ้นของอุณหภูมิของระบบออกนีด โดยการเพิ่มข้อกำหนดโดยเพิ่มอุณหภูมิในการ ฉีดและลดเวลาในการฉีดกับเวลาในการบ่ม	80
45 แสดงถึงการควบคุมเครื่อง Peco โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการฉีด	81
46 แสดงแรงดันกลับของสกูร์ของเครื่อง Ankerwerk ที่มีผลกับอุณหภูมิของเนื้อยาง	82
47 ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น	83
48 ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการฉีด	84
49 ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีผลต่อเวลาในการฉีดโดยการเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิระบบออกนีดและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวนีด	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	ผลกระทบของความเร็วในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มเนื้อยางชิ้นงานที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	90
57	แบบชิ้นงานที่สร้างด้วยโปรแกรม CAD	92
58	แม่พิมพ์ของทางบริษัทร่วมวิจัย	92
59	แบบชิ้นงาน ทางวิ่ง และรูเข้าที่สร้างด้วยโปรแกรม CAD	93
60	แสดงลำดับการดำเนินการวิจัย	95
62	แสดงถึงขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม 3D-SIGMA	99
63	แสดงถึงขั้นตอนการทำงานโปรแกรม 3D-SIGMA ก่อนทำการจำลองการไฟลยางรองเท้าจักรยานยนต์ที่ใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบเจียนชิ้น	100
64	แสดงหน้าต่างของขั้นตอน Preprocessor	101
66	แสดงการกำหนดค่าความหนาของชิ้นงานให้เหมาะสม (Wall Thickness)	102
67	แสดงถึงการเลือกของชนิดของยางที่จะทำการจำลองการไฟล	103
68	แสดงค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการฉีด (Initial Temperature)	104
69	แสดงค่าของ Heat Conductivity (Lambda) ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ (W/mK)	104
70	แสดงค่าของ Density (Rho) as Function of Temperature (g/cm <sup>3</sup> , °C)	105
71	แสดงค่าของ Heat Capacity (Cp) as Function of Temperature (J/kg K, °C)	105
72	แสดงค่าของ Density (Rho) x Heat Capacity (Cp) as Function of Temperature	106
73	แสดงค่าของ Dynamic Viscosity at 100.00 °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 °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/minn, J/mol)	108

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
78	แสดงค่าของ Curing Rate: Curing Rate as Function of Time	108
79	แสดงกำหนดค่าของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์ และต้องกำหนดค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นของทั้งชิ้นงานและของแม่พิมพ์	109
80	แสดงการกำหนดค่าของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์หรือแม่พิมพ์ตัวที่คงที่กับแม่พิมพ์ตัวที่เคลื่อนที่	109
81	แสดงการกำหนดครอบการทำทำงานที่ต้องการจำลองการไฟล	110
82	เครื่องนีดยางแนวตั้ง ขนาด 100 ตัน	111
83	ชิ้นงานที่ได้จากการฉีด	111
84	แสดงตัวแปรที่ควบคุม	112
85	แสดงการตั้งค่าอุณหภูมิของส่วนต่างๆ	112
86	แสดงการกำหนดออลิเมนต์	113
87	แสดงลักษณะการแบ่งออลิเมนต์ของชิ้นงาน	114
88	แสดงการกำหนดค่าหัวไปของยาง	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	ลักษณะรูเจ้า	121
100	ส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	121
101	แผ่นแม่พิมพ์ส่วนตัวผู้ (Core Plate)	122
102	แผ่นแม่พิมพ์ส่วนตัวเมีย (Cavity Plate)	122
103	แสดงกราฟแรงดันฉีดที่ได้จากโปรแกรม 3D-SIGMA	125
104	หน้าต่างแสดงผลของโปรแกรม 3D-SIGMA	126
105	แสดงผลของระยะเวลาที่ยางสัมผัสกากาศ (Air Contact)	128

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
106 แสดงผลของระยะเวลาฉีดในแต่ละส่วนของชิ้นงาน	129
107 แสดงผลความยาวของเส้นทางการไหลของยาง	130
108 แสดงอายุของยางในแต่ละส่วนของชิ้นงาน	131
109 แสดงผลของเวลาที่ยางสัมผัสกับผนังแม่พิมพ์ (Wall Contact)	133
110 แสดงรอยต่อของเนื้อยางที่อาจเกิดขึ้น (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 แสดงผลของอัตราความคื้นเหลือนที่ 25% ของการฉีด	152
134 แสดงผลของอัตราความคื้นเหลือนที่ 50% ของการฉีด	153
135 แสดงผลของอัตราความคื้นเหลือนที่ 75% ของการฉีด	153

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
136 แสดงผลของอัตราความเกินเสื่อมที่ 100% ของการฉีด	154
137 แสดงผลของเนื้อ Yang ที่จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาหลังจากฉีดเต็ม	155
138 แสดงบริเวณที่เนื้อ Yang จะเริ่มปฏิกิริยา ก่อน	155
139 แสดงบริเวณที่เนื้อ Yang จะเริ่มปฏิกิริยา ก่อน โดยแสดงเป็นลักษณะแบบเอลิเมนต์	156
140 แสดงบริเวณที่เนื้อ Yang จะเริ่มปฏิกิริยา ก่อน เนื่องจากการแบ่งเอลิเมนต์	156
141 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญของเนื้อ Yang ภายในชิ้นงาน ที่เวลาเริ่มต้น	157
142 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญของเนื้อ Yang ภายในชิ้นงาน ที่เวลา 60 วินาที	158
143 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญของเนื้อ Yang ภายในชิ้นงาน ที่เวลา 120 วินาที	158
144 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญของเนื้อ Yang ภายในชิ้นงาน ที่เวลา 180 วินาที	159
145 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญของเนื้อ Yang ภายในชิ้นงาน ที่เวลา 240 วินาที	159
146 แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญของเนื้อ Yang ภายในชิ้นงาน ที่เวลา 300 วินาที	160
147 แสดงบริเวณที่ Yang สูกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 60 วินาที	161
148 แสดงบริเวณที่ Yang สูกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 120 วินาที	161
149 แสดงบริเวณที่ Yang สูกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 180 วินาที	162
150 แสดงบริเวณที่ Yang สูกต่ำกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลา 240 วินาที	162
151 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการออกแบบแม่พิมพ์ฉีด Yang	165
152 ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ Yang	165

## รูปภาพผนวกที่

ข-1 แสดงส่วนประกอบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	176
ข-2 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	177
ข-3 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	178
ข-4 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	179
ข-5 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	180
ข-6 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	181
ข-7 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	182
ข-8 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	183
ข-9 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	184
ข-10 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	185
ข-11 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	186

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปภาพนูกที่	หน้า
ข-12 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	187
ข-13 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	188
ข-14 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	189
ข-15 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	190
ข-16 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	191
ข-17 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	192
ข-18 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	193
ข-19 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	194
ข-20 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	195
ข-21 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	196
ข-22 แสดงแบบแม่พิมพ์ที่วางเท้ารถจักรยานยนต์	197
ค-1 แผนภูมิ Pareto Chart ของปัญหาในการนัดชิ้นงานยาง	200
ค-2 แผนภูมิ Pareto Chart ของปัญหาในการนัดชิ้นงานยาง (ต่อ)	201
ง-1 ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานโดยเกิดการขาดของชิ้นงานที่บวบเวบ	204
ง-2 ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานจากการนัดยางไม่เต็มแม่พิมพ์	204

## หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

### 1. ชื่อโครงการ

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

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

### 2. ชื่อหัวหน้าโครงการ หน่วยงานที่สังกัด ที่อยู่ หมายเลขอรหัสพทฯ โทรศัพท์ และอีเมล

ผศ.ดร. ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ

ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม  
และการวิศวกรรมเครื่องกล 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 นั้นประเทศไทยสามารถผลิตยางธรรมชาติ ได้ 2.36 ล้านตันหรือประมาณ 33% ของปริมาณการผลิตทั่วโลก อย่างไรก็ตาม ในปี พ.ศ. 2544 นั้นมีปริมาณการใช้ยางธรรมชาติเพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพียง 0.36 ล้านตัน หรือประมาณ 15% ของปริมาณยางธรรมชาติที่ผลิตได้ดังนั้นคณะกรรมการนโยบายยางธรรมชาติจึงได้กำหนดยุทธศาสตร์การพัฒนายางพาราครบวงจร เพื่อให้การพัฒนายางพาราของประเทศไทยมีทิศทางที่ชัดเจน โดยในส่วนของยุทธศาสตร์ด้านอุตสาหกรรมยางนั้น มีมาตรการดำเนินการทั้งในระยะสั้นและระยะกลางที่ต้องการพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปยางดิบของประเทศไทยเพื่อเพิ่มมูลค่าและนำยางดิบไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีสัดส่วนการใช้เพิ่มเป็น 20% ของปริมาณยางธรรมชาติที่ผลิตได้ของประเทศไทย

ในกระบวนการแปรรูปยางพาราด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป (Moulding) เพื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ แบบอัด (Compression Moulding) แบบถังอัด (Transfer Moulding) และแบบฉีด (Injection Moulding) โดยแม่พิมพ์แบบอัดเป็นแม่พิมพ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีราคาถูกกว่าแบบอื่น เนื่องจากใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่มีความซับซ้อนของรูปร่างมากนัก ในขณะที่แม่พิมพ์กึ่งฉีดนั้นจะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนปานกลาง และใช้เวลาที่สั้นกว่าแบบอัด ส่วนแบบฉีดนั้นเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนสูง โดยมีราคาของแม่พิมพ์ที่สูงด้วยเห็นกัน ด้วยความต้องการในด้านความซับซ้อนของรูปร่าง คุณภาพ และปริมาณของผลิตภัณฑ์ยางในปัจจุบัน มีส่วนทำให้ความต้องการแปรรูปแบบฉีดมีเพิ่มมากขึ้น แต่ความรู้ด้านการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ รวมทั้งการนำเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์ไปช่วยเพื่อทำให้แม่พิมพ์ที่ได้มีประสิทธิภาพ และใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการยังมีอยู่จำกัดทำให้เกิดปัญหาการออกแบบแม่พิมพ์ ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่ขาดประสิทธิภาพทำให้เกิดการแก้ไขแม่พิมพ์อย่างครั้งซึ่งเกิดจากการขาดความสามารถในการทำงานอย่างพฤติกรรมการไหลของยางภายในตัวแม่พิมพ์เมื่อทำการฉีดขึ้นรูปทำให้เกิดปัญหาการออกแบบแม่พิมพ์ นี้ในชั้นงานเกิดรอยไห้ม เป็นต้นจากปัญหาดังกล่าวทำให้ผู้ประกอบการต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจนบางครั้งไม่สามารถรับงานจากลูกค้าที่เป็นชั้นงานที่มีคุณภาพค่อนข้างสูงและกำหนดพิกัดความคลาดเคลื่อนที่แคนบามากๆ ได้รวมทั้งการแก้ไขปัญหาในปัจจุบันเป็นในลักษณะการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ซึ่งในบางครั้งคำตอบที่ได้จะไม่สม่ำเสมอและไม่สามารถใช้ได้ในบางโอกาส ทำให้ใช้เวลานานและสูญเสียโอกาสทางการผลิตไม่สามารถสนองความต้องการของตลาดได้อย่างทันท่วงที

จากหลักการและเหตุผลที่ได้กล่าวไว้เบื้องต้นแล้ว ทางคณะกรรมการนี้เห็นว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการพัฒนาและนำเอotechnique ในการผลิตที่ทันสมัย เช่น การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (Computer Aided Manufacturing, CAM)

การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) รวมทั้งการใช้เครื่องจักรกลที่ควบคุมอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Numerical Control, CNC) เข้าไปช่วยในกระบวนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์นิดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ย่าง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) โดยพิจารณาห้องขนาดและโครงสร้างของแม่พิมพ์โดยโครงการนี้จึงเป็นโครงการที่มุ่งเน้นการนำคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (CAE) ร่วมกับเทคโนโลยี CAD/CAM ในกระบวนการออกแบบแม่พิมพ์นิดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ย่าง เพื่อสนับสนุนให้มีการสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์นิดตามหลักวิชาการและสามารถสรุปเป็นคู่มือสำหรับการถ่ายทอดและเผยแพร่ความรู้ในเรื่องการพัฒนาแม่พิมพ์และวิธีออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์ย่างต่อไป

## 10. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของเทคโนโลยีในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ย่างจากงานวิจัย ข้อมูลจากเอกสารและจากอินเทอร์เน็ตทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องรวมถึงข้อมูลจากโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ย่าง
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาร่วมถึงทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์นิดผลิตภัณฑ์ย่าง โดยมุ่งเน้นไปที่ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์
3. เพื่อพัฒนาระบวนการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์นิดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ย่าง โดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การให้ผลของเนื้อยางในแม่พิมพ์ในสภาวะเงื่อนไขต่างๆ
4. เพื่อสร้างองค์ความรู้และเอกสารคู่มือที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์นิดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ย่างและทำการถ่ายทอดไปยังบุคลากรรวมถึงการให้คำปรึกษาแก่ผู้ประกอบการให้เกิดความเข้มแข็งและความสามารถในการแบ่งขันของอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ย่าง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) ในระดับนานาประเทศต่อไป

## 11. ระเบียบวิธีวิจัย

### กิจกรรมที่ 1 วางแผนการดำเนินการวิจัย

- ประชุมวางแผนความรับผิดชอบ และกำหนดการติดตามงาน

### กิจกรรมที่ 2 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องของงานวิจัยร่วมกับบริษัทผู้ร่วมโครงการ

- ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นจากการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์นิดย่าง
- รวบรวมข้อมูลงานวิจัยในอดีตและปัจจุบัน

### กิจกรรมที่ 3 เลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา

- ประสานงานกับบริษัทผู้ร่วมโครงการเพื่อเลือกชิ้นงานที่จะทำการศึกษา

### กิจกรรมที่ 4 ออกแบบและใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์

- ทำการสร้างแบบจำลองชิ้นงานที่ต้องการสร้างแม่พิมพ์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ

- ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเพื่อทำการออกแบบแม่พิมพ์ โดยใช้โปรแกรม 3D-SIGMA

กิจกรรมที่ 5 พลิตแม่พิมพ์

- ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตเพื่อสร้างโปรแกรมควบคุมเครื่องจักรกลอัตโนมัติสำหรับชิ้นส่วนที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสูง และมีรูปร่างซับซ้อน
- ทำการผลิตแม่พิมพ์ฉีดยาง

กิจกรรมที่ 6 ทดสอบการใช้งานแม่พิมพ์และปรับปรุงแก้ไข

- ทดสอบการทำงานของแม่พิมพ์
- ปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องของแม่พิมพ์ฉีดยาง

กิจกรรมที่ 7 สรุปผลการวิจัย

- อภิปรายผลการวิจัยและจัดทำเป็นเอกสารเพื่อเป็นตัวอย่างในการนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นที่ใกล้เคียงกัน
- สรุปผลการดำเนินงานโครงการวิจัย

กิจกรรมที่ 8 จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

12. จำนวนโครงการที่คณะกรรมการผู้วิจัยกำลังดำเนินการอยู่ โดยขอให้ระบุระยะเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดของแต่ละโครงการแหล่งทุนและงบประมาณสนับสนุนที่ได้รับ เวลาที่ใช้ทำโครงการวิจัยในแต่ละโครงการเป็นกี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ ทั้งในฐานะหัวหน้าโครงการ ผู้ร่วมโครงการของแต่ละโครงการที่กำลังดำเนินการอยู่

12.1 สำหรับหัวหน้าโครงการ โปรดระบุรายละเอียดแต่ละโครงการที่ดำเนินการอยู่ดังต่อไปนี้

1) ผศ.ดร. สุกสิทธิ์ รอดขวัญ

ชื่อโครงการ: การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางห้มโลหะ

ระยะเวลาโครงการ 11 เดือน ตั้งแต่ เมษายน 2549 ถึง กุมภาพันธ์ 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 832,700 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการ

ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อ โครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์สีดินเผา รูปผลิตภัณฑ์ยางแบบระบบทางวิ่งเย็น  
ระยะเวลาโครงการ 11 เดือน ตั้งแต่ เมษายน 2549 ถึง กุมภาพันธ์ 2550  
แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน  
งบประมาณที่ได้รับ 942,700 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการ

ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อ โครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์สีดินเผา รูปผลิตภัณฑ์ยางหุ้มน้ำเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่  
ระยะเวลาโครงการ 9 เดือน ตั้งแต่ มกราคม 2550 ถึง กันยายน 2550  
แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน  
งบประมาณที่ได้รับ 904,200 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการ

ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อ โครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์สีดินเผา รูปผลิตภัณฑ์ยางรองถังเครื่องซักผ้า (อยู่ระหว่างแก้ไข)  
(ข้อเสนอโครงการ)  
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 สำหรับผู้ร่วมโครงการแต่ละท่าน โปรดระบุรายละเอียดแต่ละโครงการที่ดำเนินการอยู่ดังต่อไปนี้

1) คร. ชนะ รักยศิริ

ชื่อ โครงการ: การประยุกต์ใช้วิศวกรรมชั้อนรอยสำหรับพัฒนาการออกแบบและการตรวจสอบแม่พิมพ์ยาง  
ระยะเวลาโครงการ 12 เดือน ตั้งแต่ มิถุนายน 2548 ถึง พฤษภาคม 2549

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 1,379,200 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการ

ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำงานในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อ โครงการ: การประยุกต์ใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีห้าแกนสำหรับการพัฒนาการผลิตแม่พิมพ์ยางรองเท้า  
ระยะเวลาโครงการ 9 เดือน ตั้งแต่ เมษายน 2549 ถึง ธันวาคม 2549

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 739,200 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการ

ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำงานในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อ โครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์นิคชั้นรุ่นปีนพื้นรองเท้าแบบใช้วัสดุ 2 ชนิด  
ระยะเวลาโครงการ 9 เดือน ตั้งแต่ มกราคม 2550 ถึง กันยายน 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 805,200 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการ

ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำงานในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อ โครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์อัดบีนรูปปัจจุบันของตลาดผงหมึกที่ใช้ในเครื่องพิมพ์กระดาษเลเซอร์ (อยู่ระหว่างแก้ไขข้อเสนอ โครงการ)

ระยะเวลาโครงการ 12 เดือน ตั้งแต่ มกราคม 2550 ถึง ธันวาคม 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

งบประมาณที่ได้รับ 837,600 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการ

ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

## 2) นาย รุ่งธรรน ปัญญวิภาค

ชื่อ โครงการ: การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการออกแบบแม่พิมพ์นีดบีนรูปผลิตภัณฑ์ยางห้มโลหะ

ระยะเวลาโครงการ 11 เดือน ตั้งแต่ เมษายน 2549 ถึง กุมภาพันธ์ 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 832,700 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการ

ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อ โครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์นีดบีนรูปผลิตภัณฑ์ยางแบบระบบทางวิ่งเย็น

ระยะเวลาโครงการ 11 เดือน ตั้งแต่ เมษายน 2549 ถึง กุมภาพันธ์ 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 942,700 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการ

ผู้ร่วมโครงการ

เวลาที่ใช้ทำวิจัยในโครงการนี้กี่ชั่วโมงต่อสัปดาห์ 16 ชั่วโมง/สัปดาห์

ชื่อ โครงการ: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางหุ้มน้ำเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่  
ระยะเวลาโครงการ ๒ เดือน ตั้งแต่ มกราคม 2550 ถึง กันยายน 2550

แหล่งทุนที่ให้การสนับสนุน สถาบันไทย-เยอรมัน

งบประมาณที่ได้รับ 904,200 บาท

สถานะของหัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการ

ผู้ร่วมโครงการ

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

## 1. บทคัดย่อ

โดยทั่วไปการสร้างแม่พิมพ์ที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง โดยกระบวนการฉีดขึ้นรูปของผู้ประกอบการ ในอุตสาหกรรมแปรรูปยางในประเทศไทยนั้นมักจะใช้ผู้รับจ้างจากภายนอกโรงงานซึ่งทำการออกแบบและพิมพ์ โดยอาศัยทักษะความชำนาญของพนักงานปฏิบัติงาน และการลองผิดลองถูก รวมถึงใช้เครื่องมือและเครื่องจักร ในการผลิตต่างๆ ที่ต้องความคุณค่าวิถีพนักงาน จึงทำให้เกิดปัญหาในด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางอันเนื่องมาจากการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ เช่น ชิ้นงานเกิดครีบที่มากเกินความจำเป็น ชิ้นงานมีฟองอากาศ เป็นต้น ส่งผลให้ต้องทำการแก้ไขแม่พิมพ์และสูญเสียต้นทุนด้านวัสดุยาง โดยไม่จำเป็น ดังนั้น โครงการวิจัยนี้เป็นการนำคอมพิวเตอร์ช่วงงานออกแบบและงานวิเคราะห์มาประยุกต์ใช้เพื่อหาสภาวะเหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยทำการจำลองการไหลของยางที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ ทำให้สามารถทราบถึงพฤติกรรมการไหลของยางในแม่พิมพ์ได้ก่อนทำการผลิตจริง ซึ่งสามารถช่วยให้แม่พิมพ์ที่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ยางที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้เป็นยางธรรมชาติ (NR40) โดยที่ค่าตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ในโปรแกรม เช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ความเร็วที่ใช้ในการฉีด เวลาที่ใช้ในการฉีด และค่าคุณสมบัติของยางที่ได้จากการทดสอบ เป็นต้น ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จากการจำลองการไหลของยางในแม่พิมพ์นี้ได้แก่ การกระจายตัวของความดันที่เกิดในชิ้นงาน ความเร็วที่คำแนะนำต่างๆ ทิศทางของการไหล เวลาที่ไปถึงของเนื้อยางภายในแม่พิมพ์ และการกระจายตัวของอุณหภูมิของชิ้นงานยางและแม่พิมพ์ เมื่อนำผลที่ได้จากการจำลองนี้มาเปรียบเทียบกับการฉีดจริงจากเครื่องฉีดและแม่พิมพ์จริงก็พบผลที่ได้มีความสอดคล้องกันในระดับหนึ่ง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้คอมพิวเตอร์ช่วงงานออกแบบและงานวิเคราะห์เป็นประโยชน์ต่อการหาสภาวะเหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้

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 ล้านตัน หรือประมาณ 33% ของปริมาณการผลิตทั่วโลก [1] ออย่างไรก็ตาม ในปี พ.ศ. 2544 นั้นมีปริมาณการใช้ยางธรรมชาติเพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพียง 0.36 ล้านตัน หรือประมาณ 15% ของปริมาณยางธรรมชาติที่ผลิต ได้ ดังนั้นคณะกรรมการนโยบายยางธรรมชาติจึงได้กำหนดยุทธศาสตร์การพัฒนายางพาราของประเทศไทย มีทิศทางที่ชัดเจน โดยในส่วนของยุทธศาสตร์ด้านอุตสาหกรรมยางนั้น มีมาตรการดำเนินการทั้งในระยะสั้นและระยะกลางที่ต้องการพัฒนาเทคโนโลยีการแปรรูปยางดิบของประเทศไทยเพื่อเพิ่มนูลค่าและนำยางดิบไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีสัดส่วนการใช้เพิ่มเป็น 20% ของปริมาณยางธรรมชาติที่ผลิต ได้ของประเทศไทย

ในกระบวนการแปรรูปยางพารา ด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป (Moulding) เพื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี [3] คือ แบบอัด (Compression Moulding) แบบถังอัด (Transfer Moulding) และแบบฉีด (Injection Moulding) โดยแม่พิมพ์แบบอัดเป็นแม่พิมพ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีราคาถูกกว่าแบบอื่น เหมาะสำหรับใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ไม่มีความซับซ้อนของรูปร่างมากนัก ในขณะที่แม่พิมพ์ถังฉีดนั้น จะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนปานกลาง และใช้วิธีที่สั้นกว่าแบบอัด ส่วนแบบฉีดนั้นเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนสูง โดยมีราคาของแม่พิมพ์ที่สูงด้วยเห็นกัน ด้วยความต้องการในด้านความซับซ้อนของรูปร่าง คุณภาพ และปริมาณของผลิตภัณฑ์ยางในปัจจุบัน มีส่วนทำให้ความต้องการแปรรูปแบบฉีดมีเพิ่มมากขึ้น แต่ ความรู้ด้านการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ รวมทั้งการนำเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์ไปช่วยเพื่อทำให้แม่พิมพ์ที่ได้มีประสิทธิภาพ และใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการยังมีอยู่จำกัดทำให้เกิดปัญหาการออกแบบแม่พิมพ์ ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่ขาดประสิทธิภาพทำให้เกิดการแก้ไขแม่พิมพ์อย่างครั้งซึ่งเกิดจากกระบวนการสามารถในการทำงานพุ่มกันการ ไหลดของยางภายใต้แรงดันของแม่พิมพ์เมื่อทำการฉีดขึ้นรูปทำให้เกิดปัญหาการอุดคาย ไม่เต็ม ชิ้นงานเกิดรอยไห้ม เป็นต้นจากปัญหาดังกล่าวทำให้ผู้ประกอบการต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการแก้ไข ปัญหาที่เกิดขึ้นจนบางครั้งไม่สามารถรับงานจากลูกค้าที่เป็นชิ้นงานที่มีคุณภาพค่อนข้างสูงและกำหนดพิจัด ความคาดเคลื่อนที่ควบมากๆ ได้รวมทั้งการแก้ไขปัญหาในปัจจุบันเป็นในลักษณะการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ซึ่งในบางครั้งคำตอบที่ได้จะไม่สม่ำเสมอและไม่สามารถใช้ได้ในบางโอกาส ทำให้ใช้เวลานานและ สูญเสียโอกาสทางการผลิต ไม่สามารถสนองความต้องการของตลาด ได้อย่างทันท่วงที

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

และสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) โดยพิจารณาห้องขนาดและโครงสร้างของแม่พิมพ์โดยโครงการนี้จึงเป็นโครงการที่มุ่งเน้นการนำคอมพิวเตอร์ช่วงงานวิศวกรรม (CAE) ร่วมกับเทคโนโลยี CAD/CAM ในออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อสนับสนุนให้มีการสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดตามหลักวิชาการและสามารถสรุปเป็นคู่มือสำหรับการถ่ายทอดและเผยแพร่องค์ความรู้ในเรื่องการพัฒนาแม่พิมพ์และวิธีออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์ยางต่อไป

## 2.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของเทคโนโลยีในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ที่ใช้ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางจากงานวิจัย ข้อมูลจากเอกสารและจากอินเทอร์เน็ตทั้งในและต่างประเทศที่เกี่ยวข้องรวมถึงข้อมูลจากโรงงานแปรรูปผลิตภัณฑ์ยาง
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาร่วมถึงทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ฉีดผลิตภัณฑ์ยางโดยมุ่งเน้นไปที่ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์
3. เพื่อพัฒนาระบบการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง โดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การไหลของเนื้อยางในแม่พิมพ์ในสภาวะเงื่อนไขต่างๆ
4. เพื่อสร้างองค์ความรู้และเอกสารคู่มือที่ใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางและทำการถ่ายทอดไปยังบุคลากรรวมถึงการให้คำปรึกษาแก่ผู้ประกอบการให้เกิดความเข้มแข็งและความสามารถในการแบ่งขันของอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) ในระดับนานาประเทศต่อไป

## 2.3 เป้าหมาย

ทำการศึกษาและวิจัยพัฒนาการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) โดยใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAE) มาช่วยเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ยางที่มีคุณภาพรวมถึงเผยแพร่องค์ความรู้ที่ได้สู่ผู้ประกอบการแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง

## 2.4 สมมติฐานและขอบเขตของการวิจัย

### 2.4.1 สมมติฐาน

การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการศึกษาและวิเคราะห์สามารถแก้ไขปัญหาของผลิตภัณฑ์ยางในการฉีดขึ้นรูปได้ และสามารถนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปใช้ในงานออกแบบแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง

## 2.4.2 ขอบเขตในการวิจัยนี้สามารถสรุปได้เป็นกรณีใหญ่ๆ ดังนี้

1) การศึกษาพัฒนาระบบและวิเคราะห์การไหลของยางในแม่พิมพ์โดยการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (3D-SIGMA)

- เพื่อรวบรวมข้อมูลของปัญหาที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์และแม่พิมพ์ในกระบวนการนีดบีนรูปผลิตภัณฑ์ยาง
- เพื่อศึกษาถึงสภาวะและพัฒนาระบบของการไหลของยางขณะทำการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์
- เพื่อศึกษาผลกระทบของตัวแปรที่มีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนีดบีนรูป ดังต่อไปนี้
  - ขนาดและตำแหน่งของรูเข้า (Gate)
  - ขนาดและตำแหน่งของทางวิ่ง (Runner)
  - เวลาฉีด (Fill Time)
  - ความเร็วฉีด (Injection Velocity)
  - ความดันฉีด (Injection Pressure)
  - อุณหภูมิฉีด (Injection Temperature)

2) การผลิตแม่พิมพ์นีดบีนรูปผลิตภัณฑ์ยาง

- ทำการประสานงานกับผู้ประกอบการเพื่อทำการเลือกชิ้นงานที่จะมาเป็นกรณีศึกษาในโครงการวิจัยนี้
- เพื่อทำการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์นีดผลิตภัณฑ์ยางที่ได้เลือกไว้โดยใช้องค์ความรู้ที่ได้จากข้อ 1) ในการหาตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดในการฉีด

3) กระบวนการนีดบีนรูปผลิตภัณฑ์ยางและตรวจสอบคุณภาพ

- ทำการนีดบีนรูปผลิตภัณฑ์โดยใช้ตัวแปรต่างๆ ที่ได้เลือกไว้แล้ว
- ทำการตรวจสอบตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ในขณะทำการฉีดจริง
- ตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานที่ได้มีการทำกับแบบจำลองจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA

4) การรวบรวมองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์นีดผลิตภัณฑ์ยาง รวมถึงการเผยแพร่

- จัดทำคู่มือในการออกแบบและผลิตแม่
- พิมพ์นีดผลิตภัณฑ์ยาง
- จัดทำเอกสารประกอบการอบรมเพื่อถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ผู้ประกอบการ

## 2.5 นิยามคำศัพท์

การกำหนดครูปทรง (*Geometry Definition*) ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเป็นการกำหนดรูปร่างของระบบในการนัดในปัจจุบันการใช้โปรแกรมในการจำลองการไหลน้ำจะนำรูปทรงมาจากข้อมูล CAD

การสร้างอลิเมนต์ของรูปทรงที่สร้างขึ้น (*Geometry Enmeshment*) การกำหนดรูปร่างของระบบในการนัดขึ้นแล้วรูปร่างนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นจำนวนของอลิเมนต์ปริมาตรสำหรับที่จะทำการคำนวณ

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

วัสดุและการกำหนดปัจจัยในขั้นตอนของกระบวนการ (*Material and Process Parameter Definition*) การกำหนดวัสดุและการกำหนดปัจจัยในขั้นตอนของกระบวนการซึ่งเป็นค่าที่ต้องการสำหรับการนำไปใช้ในการหาคำตอบของระบบสมการของการไหลเข้าภายในแม่พิมพ์และขั้นตอนของการบ่มเนื้อยาง

สมการพลังงาน (*Energy Equation*) การสมดุลของการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไหล กับผลกระทบของอัตราสูตรของงานที่กระทำกับอนุภาคของไหลและอัตราสูตรของความร้อนที่เพิ่มในของไหล และอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานโดยได้จากแหล่งจ่าย

สมการของความต่อเนื่อง (*Continuity Equation*) อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในอลิเมนต์ของไหลจะเท่ากับอัตราสูตรในการไหลของมวลที่เข้าไปในอลิเมนต์ของไหล

สมการโมเมนตัม (*Momentum Equation*) อัตราที่เพิ่มขึ้นของโมเมนตัมของอนุภาคของไหลจะเท่ากับ ผลกระทบของแรงที่กระทำกับอนุภาค

วิธีการปริมาตรควบคุม (*Control Volume Approach*) การแปลงสมการในรูปแบบต่อเนื่องให้อยู่ในรูปแบบไม่ต่อเนื่องในรูปของสมการเชิงพีชคณิตและจะแสดงวิธีในการทำการแบ่งไม่ต่อเนื่องของค่าตัวแปรในระบบสมการควบคุมการไหล โดยใช้หลักการของปัญหาเป็นปริมาตรเล็กๆ

ค่าความจุความร้อน (*Thermal Capacitance*) คุณสมบัติในการเก็บความร้อนไว้ภายในของเนื้อวัสดุ

ค่าความต้านทานความร้อน (*Thermal Resistance*) คุณสมบัติในการป้องกันไม่ให้ความร้อนไหลผ่านถ้าวัสดุเป็นตัวนำความร้อนจะมีค่าต่ำ

ค่าการนำความร้อน (*Thermal Conductivities*) คุณสมบัติในการส่งถ่ายความร้อนของวัสดุถ้าเป็นตัวนำความร้อนจะมีค่ามาก

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

ความหนาแน่น (*Density*) มวลของวัสดุต่อปริมาตรของวัสดุนั้น

ของ ไอลที่อัดตัวไม่ได้ (*Incompressible Fluid*) ของ ไอลที่เมื่ออุ่นภายนอกความดันที่สูงแล้วปริมาตรนั้นจะเท่าเดิมเมื่อเปรียบเทียบแต่กับก่อน

การสร้างกริดแบบพิกัด (*Cartesian Grid*) การสร้างอิเลเมนต์ปริมาตรที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมหรือออยู่ในพิกัดแกนตั้งฉาก

การสร้างกริดแบบเข้ารูป (*Body-Fitted Grid*) การสร้างอิเลเมนต์ปริมาตรที่มีลักษณะรูปร่างคล้ายชิ้นงานจริงมีส่วนโค้งเหว้าตามชิ้นงาน

อีลัสโตเมอร์ (*Elastomers*) โพลิเมอร์แบบอ่อนตัวโดยมีโครงสร้างโนมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติมีสายโนมเลกุลยาวซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะทางเคมี และสามารถดูดซับสารละลายได้ดี แต่ไม่สามารถขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้ด้วยการให้ความร้อน มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นดี ทนต่อแรงขัดสี

ยางธรรมชาติ (*Natural rubber, NR*) ยางดิบที่ได้มาจากการตีนยางตามธรรมชาติ

รีโอ โลลี (*Rheology*) เป็นการศึกษาลักษณะการไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุโดยจะหาความสัมพันธ์ระหว่างความดัน, ความเครียดและเวลาในการศึกษารีโอ โลลีของยางนั้นจะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และการเพิ่มองค์ประกอบต่างๆ

คาปิลารีวิสโคมิเตอร์ (*Capillary Viscometers*) เครื่องจะใช้ค่าความหนืดของยาง โดยหลักการของการใช้ความดันดันให้ของไอลไหลผ่านท่อคาปิลารี ของไอลที่มีความหนืดมากต้องใช้ความดันมากในการดันให้ของไอลไหลผ่านท่อคาปิลารี ความหนืดจะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกลับอัตราส่วนของความดันต่ออัตราการไหล

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (*Moulding*) การขึ้นรูปยางให้เป็นชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างที่แน่นอน โดยเปลี่ยนยางเทอร์โมเซ็ตจากสถานะที่เป็นของเหลวไปสู่สถานะของแข็ง

การอัดขึ้นรูป (*Compression Moulding*) การขึ้นรูปนี้เริ่มจากนำชิ้นยางที่ยังไม่สุกใส่ลงไประบเป้า (Cavity) เครื่องยัดจะใช้แรงดันกดปิดแม่พิมพ์จนสนิท หลังจากได้รับความร้อนจากเครื่องยัดและใช้เวลาระยะเวลาหนึ่งจนยางสุกตัว

การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (*Transfer Moulding*) การขึ้นรูปแบบอัดส่งจะมีช่องสำหรับหรับไส่ายาง 1 ช่อง (Pot) โดยช่องดังกล่าวนี้จะเชื่อมต่อ กับ เป้าด้วยทางวิ่งซึ่งมีหัวเดียวหรือหลายเป้าได้ เมื่อไส่ายางที่ยังไม่สุกลงไประบในช่องไส่ายางและทำการอัดเนื้อยางผ่านทางวิ่งเข้าไปสู่เป้า

การฉีดขึ้นรูป (*Injection Moulding*) การฉีดนี้เนื้อยางจากระบบอุปกรณ์ด้วยกระบวนการอกสูบหรือสกรูที่อยู่ภายในเนื้อยางจะถูกฉีดผ่านหัวฉีด ซึ่งเป็นส่วนปลายสุดเข้าสู่รูนี้ดของแม่พิมพ์ โดยรูนี้จะเชื่อมต่อกับทางวิ่งและรูเข้าก่อนเข้าสู่เป้าต่อไป

ช่องนำฉีด (*Sprue*) เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องฉีดกับแม่พิมพ์ฉีดยางซึ่งสามารถที่จะพิจารณาได้จากชิ้นงานและแม่พิมพ์ลักษณะทางเข้าจะมีลักษณะที่เข้าไปในช่องรูที่เล็กแล้วขยายออกไปจนใหญ่ มีลักษณะเป็นรูที่เรียกว่า

ระบบทางวิ่ง (*Runner System*) ช่องทางไอลของเนื้อยางภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะต้องออกแบบให้มีความสมดุลของการไอลของเนื้อยาง

ทางวิ่ง (*Runner*) มีลักษณะเป็นช่องภายในแม่พิมพ์โดยจะได้รับเนื้อยางจากช่องทางจ่ายที่จุดศูนย์กลางรูเข้า (*Gate*) ทางไอลเข้าที่รูปทรงของชิ้นงานในแม่พิมพ์ซึ่งจะเป็นช่องทางที่เนื้อยางจะไอลเข้าไปในรูปทรงของชิ้นงานในแม่พิมพ์

การไอลออกมาย่างรวดเร็ว (*Jetting Filling*) การไอลของเนื้อยางออกมากจากช่องทางจ่ายและช่องทางเข้าแม่พิมพ์เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงมากกระทบที่บริเวณพิวของแม่พิมพ์ชิ้นงาน

เป้าชิ้นงาน (*Cavities*) รูปร่างของตัวเนื้อยางที่อยู่ภายในแม่พิมพ์ตามที่ได้ออกแบบไว้

การเกิดเสียงยาง (Flash) เป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มบางๆ ของบริเวณภายนอกของเนื้อยางที่เกิดขึ้นบนพิวของตัวแม่พิมพ์ภายในรูปทรง

ความเร็วของสกรู (Screw Speed) ความเร็วของสกรูที่เคลื่อนที่นิดเดียวของอุปกรณ์สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้โดยการควบคุมที่เครื่องฉีดยาง

อุณหภูมิของระบบอกนิด (Barrel Temperature) อุณหภูมิภายในระบบอกนิดที่จะทำให้ยางที่อยู่ภายในได้รับความร้อนในช่วงแรกก่อนที่จะทำการฉีด

แรงดันด้านหลังการถอดกลับของสกรู (Screw Back Pressure) จะเป็นแรงที่จะไปไถล้ออากาศให้ออกจากเนื้อยาง (เกิดจากการป้อนเนื้อยางเร็ว) และໄล่ความร้อนที่ผ่านเข้ามาในทางวิ่ง

## 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. อื่นๆ คู่มือสำหรับการถ่ายทอดและเผยแพร่ ความรู้ในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง	เอกสารประกอบการอบรม 1 ชุด

## 2.7 ผลกระทบที่จะเกิดกับอุตสาหกรรมแม่พิมพ์

### 2.7.1 ผลกระทบเชิงเศรษฐศาสตร์ / เชิงพาณิชย์

จากความสำคัญของการพัฒนาระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่อระบบเศรษฐกิจโดยรวมของไทยนั้น เป็นการเพิ่มนูลค่าให้กับยางธรรมชาติที่ยังไม่ได้แปรรูปให้มูลค่าที่สูงขึ้น จากการส่งออกยางคิบที่ยังไม่ได้มีการแปรรูปนั้น ในปี 2544 ประเทศไทยส่งออกประมาณ 2,042,079 เมตริกตัน รวมเป็นมูลค่าประมาณ 46,692.9 ล้าน

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

### 2.7.2 ผลกระทบด้านการพัฒนาเทคโนโลยี

โครงการวิจัยนี้จะก่อให้เกิดผลกระทบด้านการพัฒนาเทคโนโลยีในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (โดยเน้นที่ยางธรรมชาติ) ได้โดยตรง โดยในปัจจุบันผู้ประกอบการยังขาดองค์ความรู้ในเทคโนโลยีดังกล่าวรวมถึงไม่มีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและผลิตจริงทำให้แม่พิมพ์ที่ผลิตได้มีคุณภาพค่อนข้างต่ำและทำให้เกิดปัญหาต่างๆของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ เช่น ปัญหาการไฟล์ไม่เต็มของเนื้อยางในแม่พิมพ์หลังจากทำการขึ้นรูปแล้ว เป็นต้น ทำให้ผู้ประกอบการส่วนใหญ่จะนำเข้าแม่พิมพ์จากต่างประเทศทำให้ไม่สามารถที่จะสร้างองค์ความรู้เพื่อที่จะพัฒนาเทคโนโลยีด้าน CAD/CAM/CAE มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ของประเทศไทยด้วย รวมถึงถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ได้สู่ภาคเอกชนเพื่อก่อให้เกิดความสามารถในการแข่งขันได้อย่างยั่งยืน

### 2.7.3 ผลกระทบด้านการพัฒนาบุคลากร

เนื่องจากในปัจจุบันยังมีความขาดแคลนบุคลากรในทุกระดับฝีมือในด้านแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง ดังนั้น โครงการนี้จึงมีความมุ่งหวังที่จะเป็นโครงการนำร่องที่จะสร้างนักวิจัยจากหน่วยงานของรัฐและบุคลากรจากภาคอุตสาหกรรมให้มีความสามารถในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง รวมถึงเป็นส่วนหนึ่งในการจัดทำหลักสูตรเพื่อพัฒนาบุคลากรในด้านแม่พิมพ์ยางต่อไปในอนาคต นอกจากนี้ยังเป็นการสร้างความร่วมมือระหว่างนักวิจัยจากสถานศึกษา หน่วยงานต่างๆ กับผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

### **3. ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Review) และเอกสารที่เกี่ยวข้อง**

ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบผลงานวิจัย และเอกสารต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออกแบบ และผลิตแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งทำให้ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการค้นหาพบว่าผลงานวิจัยและเอกสารที่เกี่ยวข้อง กับแม่พิมพ์ยาง โดยตรงนั้นยังไม่ออยู่มาก โดยได้สรุปอุปกรณ์เป็นหัวข้อต่างๆที่มีความสำคัญต่อกระบวนการ การออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ยาง ในหัวข้อแรกจะแสดงให้ทราบถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องว่าที่ผ่านมาได้มีการทำ วิจัยที่เกี่ยวข้องแม่พิมพ์ยางอย่างไรบ้าง จากนั้นจะกล่าวถึงแนวคิดในการสร้างแบบจำลองของกระบวนการฉีด ยางในการเขียนรูป (Modeling of Injection Rubber Processes) ต่อจากนั้นจะกล่าวถึงวิธีการเชิงตัวเลขและการ นำไปใช้ในประยุกต์การฉีดซึ่งจะแสดงถึงทฤษฎีและสมการต่างๆที่ใช้ในการจำลองกระบวนการฉีดเขียนรูป ผลิตภัณฑ์ยาง จากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงคุณสมบัติพื้นฐานและชนิดของยาง รวมถึงริโอโลยีของยางที่มี ความสำคัญต่อการศึกษาการฉีดเขียนรูปยาง เช่น ความหนืด ความเค้น อัตราเนื้อน และคุณสมบัติอื่นๆ เป็นต้น เมื่อ เรายางถึงพื้นฐานต่างๆของยางแล้ว จากนั้นจะกล่าวถึงกระบวนการเขียนรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ และการ ออกแบบแม่พิมพ์ยาง และท้ายสุดจะกล่าวถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อกระบวนการฉีดเขียนรูปและการ ออกแบบแม่พิมพ์

#### **3.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**

R. P. Brown [4] กล่าวถึงเหตุผลและสาเหตุการเสียหายของผลิตภัณฑ์ยาง แนวทางการป้องกันและ ตัวอย่างความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะกับผลิตภัณฑ์ยางที่เป็นล้อรถและชีล โดยความเสียหายดังกล่าวมีน้ำหนัก จากการออกแบบที่ผิดพลาด การเลือกวัสดุที่ไม่เหมาะสม ความบกพร่องในขั้นตอนการผลิต การติดตั้งที่ไม่ ถูกต้อง สภาพการใช้งานที่ไม่ได้คาดการณ์ไว้ การใช้งานที่ผิดวิธีหรือไม่ระมัดระวัง รวมไปถึงการออกแบบใน ลักษณะที่มีจุดบกพร่อง (Strategic Weakness)

J. A. Lindsay [5] ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อความสูญเสียในกระบวนการฉีดผลิตภัณฑ์ยาง ตั้งแต่ช่วง ของการออกแบบผลิตภัณฑ์ไปจนถึงการปรับตั้งเงื่อนไขการฉีดของเครื่องจักร อิทธิพลของส่วนผสมและ สารเติมเต็ม (Additives) บางตัว ที่มีผลต่อเศษตกค้างในเบ้าแม่พิมพ์ รวมทั้งเกิดตำหนิในชิ้นงานที่ฉีด นอกจากนี้ Lindsay ยังกล่าวถึงการนำระบบบริหารงานคุณภาพ ISO 9001 มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน และให้ ]-\$ รายงานถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงและพิกัดความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ รวมไปถึงความ ร่วมมือกันระหว่างตัวผู้ผลิตและลูกค้าในแต่ละขั้นตอนเพื่อให้ผู้ผลิตสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามความ ต้องการของลูกค้า ทั้งในด้านของคุณภาพ ราคา ระยะเวลาในการส่งมอบ และจำนวนที่ต้องการ

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

HDPE โดยกำหนดปัจจัยคงที่ในการฉีด คือ อุณหภูมิฉีด ความดันฉีด ความดันฉีดยึด (Holding Pressure) เวลาฉีดยึด เวลาหล่อเย็น และรอบการฉีด และปัจจัยแปรผันในการฉีด คือ อุณหภูมิแม่พิมพ์ และความเร็วฉีด นอกจากนี้

E. Bociaga [7] ยังได้ศึกษาถึงรูปแบบของการฉีดที่ได้จากการฉีดเข้าบ่าที่ต่างกัน เช่น ฉีดเข้าจุดเดียว ด้านข้าง ฉีดเข้าสองจุดด้านข้าง ซึ่งมีอิทธิพลต่อโครงสร้างและการเกิด Crystallinity ของโพลิเมอร์ ลักษณะของรอยเชื่อมประสาน (Weld Lines) ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน รวมทั้งระดับการเกิด Crystallinity ที่ต่างๆ 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 เพื่อช่วยในงานควบคุมคุณภาพของผลิตยาง รวมไปถึงค้นหาสาเหตุการเสียหายที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ยางและส่วนผสมของยาง V. Goodship [10] ศึกษาถึงการเลือกใช้วัสดุในกระบวนการฉีดที่ใช้วัสดุหลายชนิด เช่น เทคนิค Coinjection, Bi-injection และ Interval Injection โดยเฉพาะคุณสมบัติด้านการเชื่อมประสาน (Bonding Properties) ของวัสดุ นอกจากนี้ S. L. Kushnarenko [11] ได้ทดสอบเวลาในการบ่มยางให้สุกของรองเท้ายางที่มีส่วนผสมของโลหะ ซึ่งวางในตัวบ่า ขณะทำการฉีด โดยเกิดปัญหาทางความร้อนอันเนื่องจากวัสดุที่ไม่ใช่เนื้อเดียว (Inhomogeneous) ซึ่งสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์ ทำให้สามารถพยากรณ์เวลาที่เหมาะสมในการบ่มยางให้สุกของผลิตภัณฑ์ยาง

E. Haberstroh and I. Kleba [12] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และระบุวิธีไฟไนต์อเลิเมนต์ได้สำหรับในการนำมายังการบิดตัว (Warpage) ในโครงสร้าง Pur Sandwich ของชิ้นส่วนยานยนต์ การศึกษาหารลักษณะการบิดตัวของพลาสติกเสริมใยแก้ว [13] ของชิ้นส่วน Motor Vehicle Radiator Tank ซึ่งเกิดจากอิทธิพลการเรียงตัวของเส้นใยอันเกิดจากการวางแผนทางวิ่ง (Runner) ในตัวแม่พิมพ์ โดยนำระบบวิธีไฟไนต์อเลิเมนต์ในการสร้างแบบจำลองการเรียงตัวของเส้นใย เพื่อทำนายพฤติกรรมการหดตัว (Shrinkage) และการเสียรูป (Deformation) ชิ้นงานนี้ ซึ่งวัสดุที่ใช้ทดสอบคือวัสดุผสม Polypropylene เกรด Armlen PP SV 2T ที่ผลิตโดย Poliplastik และทำการทดสอบด้วยตำแหน่งทางวิ่ง 3 แบบ

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

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในอดีตการออกแบบชิ้นส่วนและแม่พิมพ์เป็นเรื่องที่ยากต่อการเข้าใจ และไม่ได้ใช้การออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม [15] โปรแกรม CADMOULD ได้ถูกนำมาช่วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์ยาง ให้กับวิศวกรผู้ออกแบบ โดยสามารถทำงานยลักษณะการไฟล อุณหภูมิที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ เวลาที่ใช้ในการบ่ม ปรากวัสดุการณ์รอยพ่น (Jetting) อาจเกิดขึ้น นอกจานนี้ยังช่วยคำนวณผลกระทบของการไฟลในลักษณะ 3 มิติ [16,17] ค่าการกระจายความร้อนและการส่งผ่านความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ ตำแหน่งของรูระบายน้ำอากาศที่เหมาะสมในตัวเบ้า ตำแหน่งรูเข้า การสร้างสมดุลของรูวิ่งและคำนวณค่ารอบการนีด การบ่ม (Curing) การหล่อเย็น จนถึงการเอาชิ้นงานออกจากตัวเบ้า ตัวอย่างเช่น ชิ้นงานตัวอย่างระบบยางกันซึมที่ประตู (Door Sealing System) โดยสามารถทำงานตำแหน่งที่เกิดความเสียหายขณะขึ้นรูปที่อาจเกิดขึ้น ค่าความดัน ค่าอุณหภูมิ ค่าของเวลาที่ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขการผลิต ผลกระทบของอัตราเฉือน (Local Shear Effect) และยังสามารถคำนวณค่าของ Cross-linking Reaction ที่เกิดขึ้นและปัญหาที่เกี่ยวข้อง ค่าความดันอากาศภายในตัวแม่พิมพ์ ค่าความร้อนและที่ทำให้เกิดเค้นภายในขณะที่ทำการหล่อเย็น ผลกระทบทางความร้อนของชิ้นโลหะที่เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ (Metal Insert) และประมาณเวลาของรอบการนีด นอกจานนี้ยังสามารถคำนวณและทำงานยลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยและวิเคราะห์ค่าความเค้นของชิ้นงานจากกระบวนการนีดขึ้นรูป ช่วยลดเวลาการออกแบบและทำให้ลดปัญหาการแก้ไขชิ้นงานหลังจากที่มีการผลิตออกไปแล้ว รวมถึงเป็นการลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาที่เกิดขึ้น การนำโปรแกรม CADMOULD มาใช้จำลองกระบวนการผลิต [18] สามารถทำงานลิ่งที่อาจเกิดขึ้นในการผลิตจริง ทำให้ช่องว่างระหว่างงานออกแบบและงานผลิตผลิตภัณฑ์ยางลดลง ผู้ออกแบบสามารถเห็นปัญหาที่อาจเกิดขึ้นหากนำชิ้นงานที่ออกแบบไปทำการผลิตจริง จึงสามารถทำการแก้ไขปรับปรุงการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ยางที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบ และลดค่าใช้จ่ายจากการผลิตแพลตฟอร์มไปสู่ชั้นตอนของการผลิต

นริศรา รอดเดชา (2546) [19] ศึกษาแรงกระทำระหว่างยางกับเข็มคำของคอมโพสิตยางธรรมชาติ (NR) และยางอะคริลิก(ACM)และคอมโพสิตยางผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิก (NR/ACM) โดยวิธีทดสอบค่านาฬีรับเบอร์และสมบัติเชิงไคนามิกส์รวมทั้งศึกษาการกระจายพันธะข้ามและปริมาณพันธะข้าม โดยวิธีทดสอบสมบัติเชิงไคนามิกส์ตลอดจนความเข้ากัน ได้ของยางผสมที่มีต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุภายในเชทยาง ผสมระหว่างยางธรรมชาติกับยางอะคริลิกพบว่า เมื่อปริมาณเข็มคำเพิ่มขึ้นค่านาฬีรับเบอร์ของคอมโพสิตยางธรรมชาติมีแนวโน้มคงที่ ส่วนคอมโพสิตยางอะคริลิกลดลงแสดงว่าแรงกระทำระหว่างยางกับเข็มคำของคอม

โพสติที่ยางธรรมชาติและยางอะคริลิกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเกิดการรวมตัวของเขม่าจากการศึกษาการกระจายพันธุ์ข้ามและปริมาณพันธุ์ข้ามของวัลค่าในเซทธางผสม NR/ACM โดยวิธีทดสอบบันไดเชิงไดนามิกส์พบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความสูงของพีค  $\tan\delta$  ของยางอะคริลิกเพิ่มขึ้น ส่วนเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความสูงของพีค  $\tan\delta$  ของยางธรรมชาติลดลง แสดงว่าเมื่อปริมาณยางอะคริลิกเพิ่มขึ้น มีการกระจายพันธุ์ข้ามและปริมาณพันธุ์ข้ามของวัลค่าในเซทธางอะคริลิกมากกว่ายางธรรมชาติ จากการศึกษาความเข้ากันได้ของวัลค่าในเซ埚างผสม NR/ACM พบว่าเขม่าดำเนินการทำให้ยางผสม NR/ACM เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีขึ้น เมื่อผสมยางอะคริลิกลงไปในผลิตภัณฑ์ยาง NR/ACM ร้อยละ 70 โดยน้ำหนักความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถต่อการยืดจันทร์ก่อนและหลังการเตือนสภาพทางความร้อนมีความแตกต่างกันน้อยที่สุด และเมื่อปริมาณเขม่าดำเนินเพิ่มขึ้นความต้านทานต่อแรงดึงและความสามารถต่อการยืดจันทร์ของผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติและยางอะคริลิกลดลงส่วนสมบัติเชิงกลของผลิตภัณฑ์ยางอะคริลิกมีความแตกต่างก่อนและหลังการเตือนสภาพทางความร้อนน้อยกว่าผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติ

รัชดา และ อุดมเกียรติ (2546) [20] ศึกษาการถ่ายโอนความร้อนจากเบ้าพิมพ์สู่ล้อยางตันบนอบคงรูป และตัวแทนสมบัติของยางพบว่ามีลักษณะดังนี้คือขบวนอบคงรูปล้อยางตัน ยางจะมีความสามารถในการนำความร้อนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงก่อนการเกิดเชื้อม โดยใช้โนเลกุล คือช่วงอุณหภูมิ  $60-110^{\circ}\text{C}$  หลังช่วงอุณหภูมิคงรูป ( $120-150^{\circ}\text{C}$ ) ทำการนำความร้อนค่อนข้างคงที่แต่จะเกิดการขยายพลั้งงาน ความร้อนของมาส่วนหนึ่งอันเนื่องมาจากการสลายและสร้างพันธะใหม่ระหว่างโซลิโนเลกุลของยางสำหรับในการคำนวณหาการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในล้อยางตันบนอบคงรูปเพื่อทำนายระดับการสูญเสียของยาง ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในล้อยาง เพื่อความง่ายและสะดวกต่อการคำนวณจะสามารถสมมุติให้ค่าการนำความร้อนของยางมีค่าคงที่เป็นค่าที่อุณหภูมิห้องและค่าความร้อนที่ผลิตขึ้นเป็นค่าคงที่เท่ากับ  $6000 \text{ W/m}^3$  จะทำให้ได้ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิซึ่งนำมาหาระดับการสูญเสียของยางโดยใช้ที่ชีชาร์ต ได้อย่างถูกต้อง

บรรณพล (2545) [21] ได้ศึกษาขั้นตอนการประยุกต์ใช้ CAD/CAE/CAM สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดฝ้าเกลี่ยวพลาสติกและการปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องฉีดฝ้าเกลี่ยวพลาสติกที่จะเป็นแนวทางการนำเสนอ กับภาคอุตสาหกรรมที่ผลิตชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกโดยควรรู้ขั้นตอนการออกแบบรวมไปถึงทำอย่างไรให้ได้ผลิตภัณฑ์นั้นตรงตามความต้องการ การใช้งานของลูกค้าและทำให้สามารถประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้นว่าจะอยู่ในระดับใดหรือไม่ รายงานสามารถผลิตได้หรือไม่ โดยจะต้องมีการคำนึงถึงองค์ประกอบต่อไปนี้

1. ชนิดพลาสติกและคุณสมบัติ
  2. การออกแบบผลิตภัณฑ์ของพลาสติกและการสร้างแม่พิมพ์
  3. เงื่อนไขการนឹดและการวิเคราะห์จำลองสภาวะการนឹด
  4. การวางแผนกระบวนการผลิตและกรรมวิธีการผลิต
  5. ประสิทธิภาพเครื่องนឹดและอุปกรณ์ที่เอื้ออำนวยในการผลิต

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

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

#### **3.2.1 การกำหนดรูปทรง (Geometry Definition)**

ในขั้นตอนแรกของการสร้างแบบจำลองของกระบวนการจะเป็นการกำหนดรูปทรงของระบบในการฉีดในปัจจุบันการใช้โปรแกรมในการจำลองการไหลนั้นจะนำรูปทรงมาจากข้อมูล CAD ซึ่งจะอยู่ในขั้นตอนก่อนที่จะดำเนินการ (Pre-processor) สำหรับการนำข้อมูลเข้ามาภายใต้โปรแกรมและนำรูปทรงของรูปเข้า (Gating System), ระบบทางวิ่ง (The Runner System) เป็นต้น ซึ่งจะเป็นส่วนประกอบต่างๆภายในระบบฉีดยางให้ไหลเข้าไปภายใต้แรงพิมพ์ ข้อสำคัญระหว่างการสร้างแบบรูปทรงของแบบจำลองโดยการรวมอลิเมนต์ทั้งหมดของระบบเข้าด้วยกันจะต้องให้ความสำคัญในการไหลของเนื้อยางภายใต้รูปทรงของชิ้นงานภายใต้แรงพิมพ์และการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานในการฉีด

#### **3.2.2 การสร้างอลิเมนต์ของรูปทรงที่สร้างขึ้น (Geometry Enmeshment)**

หลังจากการกำหนดรูปทรงของระบบในการฉีดขึ้นแล้วรูปทรงนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นจำนวนของอลิเมนต์ปริมาตรสำหรับที่จะทำการคำนวณ ข้อสำคัญนี้จะต้องพิจารณาถึงจุดที่ละเอียดและขยายในการสร้างกริดเพื่อที่จะทำการคำนวณ ความแม่นยำของคำตอบจะสูงถ้ามีการแบ่งปริมาตรที่มีความละเอียดในการสร้างความละเอียดถ้ามีความละเอียดสูงเวลาในการคำนวณก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยโดยทั่วไปแล้วจะต้องทำการสมดุลกันระหว่างความแม่นยำที่ต้องการกับเวลาในการคำนวณ สำหรับในการพิจารณาการจำลองการไหลหนึ่งๆ

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

ขั้นตอนต่อไปคือการกำหนดวัสดุและการกำหนดปัจจัยในขั้นตอนของกระบวนการซึ่งเป็นค่าที่ต้องการสำหรับการนำไปใช้ในการหาคำตอบของระบบสมการของการไหลเข้าภายใต้แรงพิมพ์และขั้นตอนของการบ่มเนื้อยาง ขั้นตอนแรกจะทำการกำหนดค่าคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุในระบบการฉีดทำการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับปริมาตรที่ไม่รู้ค่า เช่น อุณหภูมิเริ่มต้น และการกำหนดเงื่อนไขของเขตสำหรับตัวไม่รู้ค่า เช่น ความร้อนหรือความดันสำหรับเนื้อยางที่จุดเริ่มต้นของกระบวนการฉีดหรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่หน้าสัมผัสระหว่างวัสดุในกระบวนการฉีด กระบวนการที่สำคัญที่จะต้องใส่เข้าไปจะเป็นปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการไหลและการบ่มของระบบการฉีด ตัวอย่าง เวลาในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์, ผลกระทบทั้งหมดของการสมดุลทางความร้อนของแม่พิมพ์ ในการเข้าใจถึงผลของขั้นตอนในการจำลองการไหลของเนื้อยางเข้า

ไปภายในแม่พิมพ์จะต้องรู้และเข้าใจในวัสดุ และปัจจัยของขั้นตอนที่ใช้ในการจำลองการไหลสำหรับเหตุผลที่สำคัญจะต้องใช้ค่าคุณสมบัติทางความร้อนที่ถูกต้องและขั้นตอนในการฉีดนั้นจะต้องมีความเป็นไปได้ ถ้าทำได้ดังที่กล่าวมาจะทำให้ได้ผลของการวิเคราะห์การจำลองการไหลได้แม่นยำมากขึ้น

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

ในสมการที่ครอบคลุมทั้งหมดของขั้นตอนของการไหลและการบ่มตัวของเนื้อยางของกระบวนการฉีด จะทำการแบ่งกริดในการคำนวณ ซึ่งเมื่อมีการกำหนดวัสดุและปัจจัยในขั้นตอนต่างๆ จะได้มามาซึ่งผลคำตอบของตัวแปรที่ไม่รู้ค่าในลักษณะต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเวลาต่างๆ กันของการไหลเข้าและการประเมินผลในแต่ละช่วงเวลา ของการบ่มเนื้อยาง

### 3.2.5 การประเมินผลของคำตอบ (Evaluation of the Results)

ผลที่ได้จากการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์หรือการบ่มเนื้อยาง โดยการจำลองการไหล ค่าที่ใช้เริ่มต้น ได้แก่ อุณหภูมิ, ความดัน และความเร็ว มีค่าในการคำนวณ ในการประเมินผลนั้นมีเครื่องสنجค์การประมวลผลแล้ว จะแสดงให้เห็นโดยสายตาโดยค่าต่างๆ จะแสดงในแนวแกนสามมิติโดยจะแสดงค่าที่ได้แยกกันตามค่าที่ต้องการ ในการประเมินของการจำลองการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ส่วนที่จะต้องคำนึงถึงคือช่องทางการไหลในแต่ละ ระดับของเนื้อยางที่ไหลเข้าไปในเบื้องต้นแม่พิมพ์ ในการไหลเข้าของเนื้อยาง โดยความเร็วที่สูงจะทำให้เกิด การหมุนวนของเนื้อยางซึ่งจะทำให้เกิดปัญหาที่ตามมากับตัวชิ้นงานได้ เช่น โพรงของอากาศที่บริเวณผิวของ ชิ้นงาน และช่วงของอุณหภูมิที่กระจายภายในเนื้อยางระหว่างการไหลซึ่งจะเป็นตัวชี้บ่งบอกว่าควรที่จะระบาย ความร้อนที่ดำเนินการและต้องพิจารณาถึงอุณหภูมิหลังจากการไหลนั้นจะเป็นตัวกำหนดในการบ่มตัวที่จะทำ ให้เกิดค่าการหดตัว ในการประเมินผลของการจำลองการบ่มเนื้อยาง ในขั้นตอนของการบ่มเนื้อยางที่เกิดขึ้น การ ทำงานายการบ่มนั้นจะพิจารณาถึงขั้นตอนการสูญเสียและการเคลื่อนที่ในตัวชิ้นงานตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดและใน การประเมินผลในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกันและอัตราการให้ความร้อนซึ่งจะนำไปเป็นข้อมูลในการไหลเข้า ของเนื้อยาง

## 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)

กฎของการอนุรักษ์ทั่วไปของมวล โมเมนตัม และ พลังงาน (Mass, Momentum and Energy) จะถูก กำหนดโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์และการบ่มตัวของเนื้อยางหลังการฉีด

ในบริบทของการอนุรักษ์นั้นจะคงความสมดุลของการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยที่มีผลกระทบ ในกฎของการอนุรักษ์ที่สำคัญในการพิจารณาเมื่ออยู่สามภูมิคังที่กล่าวมา

กฎของการอนุรักษ์มวลจะนำมาใช้กับปัญหาของการไหลของของไหหลอดเพลท์ในสมการของความต่อเนื่อง (Continuity Equation) การอนุรักษ์ไมemenตัมแสดงโดยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน สามารถนำมาใช้กับปัญหาการไหลของของไหหลอดโดยสมการไมemenตัม (Momentum Equation) การนำกฎการอนุรักษ์พลังงานมาใช้จะแสดงโดยกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โน่ในนามิกส์จะก่อให้เกิดสมการพลังงาน วิธีการนำกฎของการอนุรักษ์ไปใช้ในปริมาตรที่เล็ก (ปริมาตรจำกัด) ซึ่งจะได้จากการอนุพันธ์ (Differential Equations)

สำหรับการอนุรักษ์มวลในสามมิตินั้นสมการในตอนเริ่มต้นจะทำการสมดุลกันของเอลิเมนต์ของไหได้ดังนี้

อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์ของไห = อัตราสูทธิในการไหลของมวลที่เข้าไปในเอลิเมนต์ของไห

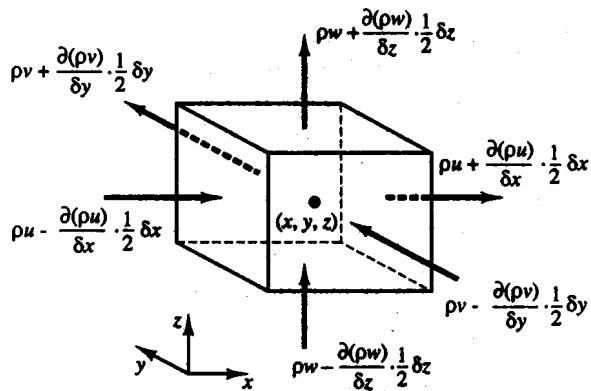
อัตราการเพิ่มขึ้นของมวลในเอลิเมนต์ของไหแสดงได้ดังสมการที่ 1

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

อัตราการไหลที่ผ่านผิวของเอลิเมนต์โดยได้จากรูปที่ 1 จะได้อัตราสูทธิในการไหลของมวลที่เข้าไปในเอลิเมนต์ผ่านขอบเขตได้ดังสมการที่ 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** แสดงถึงการ ไหลเข้าและออกของมวลที่กระทำกับเอกลิเมนต์ของไหล

จากสมการที่ 1 นี้จะเท่ากับสมการที่ 2 ในรูปของผลเฉลยของการสมดุลของมวลโดยข้อสมการมาอยู่ด้านซ้ายแล้วหารด้วยปริมาตรของเอกลิเมนต์  $\delta x \delta y \delta z$  จะได้สมการที่ 3

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

เขียนให้อยู่ในรูปของเวคเตอร์ได้ดังสมการที่ 4

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

ในสมการที่ 4 เรียกว่าการอนุรักษ์มวลในสามมิติ (Three-Dimensional Mass Conservation) หรือสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) ในท่อนซ้ายมีอสุจิจะเป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาของความหนาแน่น (Density) (มวลต่อหน่วยปริมาตร) และในท่อนที่สองจะแสดงถึงการ ไหลสุทธิของมวลที่ออกจากเอกลิเมนต์ที่ผ่านขอบเขตและเรียกว่าท่อนของการพา (Convection Term)

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

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

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

สมการโน้ม-men โดยการใช้กฎข้อที่สองของนิวตันในการเคลื่อนที่โดยการเปลี่ยนแปลงโน้ม-men ของอนุภาคของไหลจะเท่ากับผลรวมของแรงที่กระทำกับอนุภาค

อัตราที่เพิ่มขึ้นของโนเมนตัมของอนุภาคของไอล = ผลกระทบของแรงที่กระทำกับอนุภาค

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

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

ซึ่งจะจำแนกแรงที่กระทำกับอนุภาคของไอลออกเป็นสองชนิด ได้แก่

1) แรงที่กระทำกับผิว (Surface Force)

- แรงจากความดัน (Pressure Force)

- แรงเนื่องจากความหนืด (Viscous Force)

- แรงดึงระหว่างผิว (Surface Force)

2) แรงที่กระทำกับปริมาตร (Body Force)

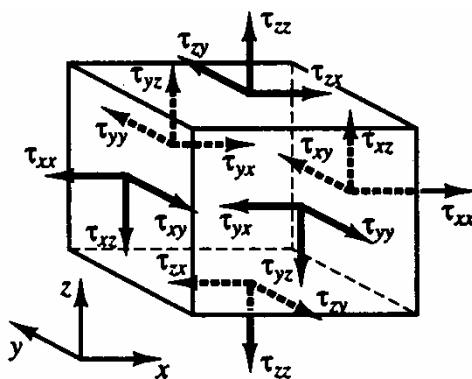
- แรงโน้มถ่วง (Gravity Force)

- แรงหนีจากศูนย์กลาง (Centrifugal Force)

- แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Force)

โดยปกติอนุภาคจะถูกกระทำจากแรงที่บริเวณผิว โดยจะแยกเทอมของสมการ โนเมนตัมและจะเพิ่มผลกระทนจากแรงที่กระทำกับปริมาตรอีกเทอมหนึ่ง

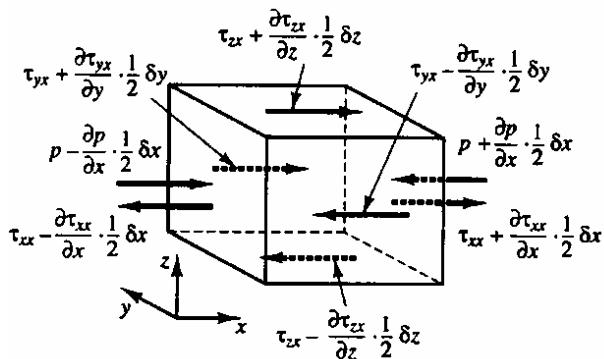
ในสภาวะของความเค้นที่กระทำกับอนุภาคของไอลจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของความดันและองค์ประกอบของความเค้นที่เกิดขึ้นจากความหนืดดังแสดงในรูปที่ 2 ความดันจะเป็นความเค้นในแนวแกนโดยแสดงเป็นตัว  $p$  ความเค้นเนื่องจากความหนืดให้เป็น  $\tau$  และจะกำหนดทิศทางของความเค้นเนื่องจากความหนืดเป็น  $\tau_{ij}$  โดยที่  $i$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



รูปที่ 2 แสดงองค์ประกอบของความเค้นที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของอนุภาคของไอล

พิจารณาในแนวแกน  $x$  โดยแรงที่เกิดจากความดันและความเค้นประกอบซึ่งได้แก่  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$  และ  $\tau_{zx}$  ดังแสดงในรูปที่ 3 ขนาดของผลจากแรงความเค้นที่ผิวโดยได้จากความเค้นและพื้นที่ที่กระทำ โดยให้แรงที่กระทำ

ในทิศทางแกนบวกจะให้เครื่องหมายเป็นบวกและทิศทางที่ส่วนทางให้เป็นลบ ผลสูตรซึ่งองแรงในทิศทาง x โดยการรวมองค์ประกอบของแรงที่กระทำในแต่ละทิศทางของอนุภาคของไอล



### รูปที่ 3 แสดงถึงองค์ประกอบของความเค้นในแนวแกน x

ในการจับคู่กันที่ผิวค้างนี้ข่ายกับข่าวจะได้สมการที่ 8

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

แรงที่กระทำในทิศทาง x ในแนวผิวค้างบนกับค้างล่างจะได้สมการที่ 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 ในแนวผิวค้างหน้าและค้างหลังจะได้สมการที่ 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

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

และเมื่อพิจารณาถึงผลกระทบของแรงที่กระทำกับปริมาตรผลกระทบทั้งหมดจะให้เป็น  $S_{Mx}$  ในทิศทางของแกน x โดยมีโมเมนตัมต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา

ในองค์ประกอบของแกน x ของสมการ โมเมนตัมโดยจะกำหนดให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมในแนวแกน x ของอนุภาคของไอลสมการที่ 7 จะเท่ากับผลรวมของแรงในทิศทางแกน x ที่กระทำกับเอลิเมนต์โดยตรงของความเค้นที่ผิวคือสมการที่ 10 บวกกับยัตราชในการเพิ่มขึ้นของโมเมนตัมในแกน x ของแรงที่กระทำกับปริมาตรจะได้สมการที่ 12

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

ในทำนองเดียวกันสามารถสร้างในทิศทางแนวแกน y โดยจะได้สมการ โมเมนตัมดังสมการที่ 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 สมการ โมเมนตัมจะได้ดังสมการ 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

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

และสามารถที่จะเขียนรวมกันได้ในทุกแนวแกน ได้ดังสมการ 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 ความเค้นสติก (p) องค์ประกอบของความเค้นเนื่องจากความหนืดในรูปของเทนเซอร์  $\tau_{ji}$ ,  $X_i$  เป็นผลรวมของแรงที่เพิ่มขึ้นมา เช่น แรงจากแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นต้นในแนวแกน i ซึ่งในความเค้นที่เกิดจากความหนืดจะเขียนในรูปของความเร็ว, โดยปกติจะสมมุติให้การจำลองการไอลเข้าไปภายใต้แรงโน้มถ่วงที่เป็นของไอลแบบนิวตันเนียน (Newtonian Fluid) ทำการเพิ่มความสัมพันธ์แบบนิวตันเนียนเข้าไปในสมการที่ 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 ด้านซ้ายจะอยู่ในเทอมแรกจะอยู่ในรูปของการเก็บสะสมของโมเมนตัมและในเทอมของการพารามิเตอร์ส่วนทางขวาเมื่อจะอยู่ในรูปของความดัน, แรงโน้มถ่วง, การแพร่ ( $S_i^\mu$ ) และในเทอมของการเคลื่อนที่โดยความเร็วซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบไม่อิสระ ( $S_i^d$ ) และแรงพิเศษ ( $X_i$ ) โดยที่เทอมในการแพร่หลักเขียนในรูปของวิธีการแบบลาป้าโดยความเร็วคงที่สามารถที่จะเขียนได้ในสมการที่ 17

$$S_i^\mu = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \mu \frac{\partial u_2}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \mu \frac{\partial u_3}{\partial x_i} \right) \quad (17)$$

สำหรับปัญหาในการฉีด ในเทอมของการแพร่ ( $S_i^\mu$ ) จะต้องนำเอาค่าความหนืดที่เขียนกับอุณหภูมิมาพิจารณาด้วย 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) ซึ่งจะมาจากข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไนโมิกส์โดยที่

อัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของไอลท่ากับอัตราสูตรของความร้อนรวมของอนุภาคของไอลบวกอัตราสูตรของงานที่เกิดจากอนุภาคของไอล

ในอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานของอนุภาคของไอลต่อหน่วยปริมาตรจะได้ดังสมการที่ 19

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

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

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

ในที่นี้  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zx}$  คือสัมประสิทธิ์ที่แสดง y และ z จะได้สมการที่ 21 และ 22

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

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

ผลรวมสุทธิของงานต่อปริมาตรที่เกิดจากอนุภาคของไหหลักแรงที่กระทำกับผิวโดยทำการรวมสมการที่ 20, 21 และ 22 และหารด้วยปริมาตร และในท่อนของความดันสามารถเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ 23

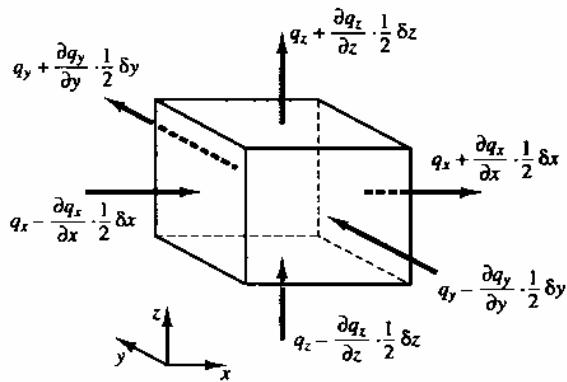
$$-\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} = -\operatorname{div}(pu) \quad (23)$$

ผลรวมของงานที่กระทำกับอนุภาคของไหโดยความเกินที่ผิวสามารถเขียนได้ในสมการที่ 24

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

### 3.3.2 การ ไหของพลังงานที่เกิดจากการนำความร้อน (Energy Flux Due to Heat Conduction)

การ ไหของความร้อนโดยเวกเตอร์  $q$  ในองค์ประกอบสามส่วน  $q_x$ ,  $q_y$  และ  $q_z$  ดังแสดงในรูปที่ 4



**รูปที่ 4** แสดงเวกเตอร์การ ไอลของความร้อน

อัตราการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคของไอลโดยการ ไอลของของไอลในแนวแกน x โดยความแตกต่างกันระหว่างอัตราของความร้อนที่ไอลผ่านเข้าทางด้านซ้ายและอัตราของความร้อนที่ผ่านออกทางด้านขวาสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 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

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

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

ผลรวมของอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นในอนุภาคของไอลต่อหน่วยปริมาตร โดยการ ไอลของความร้อนผ่านขอบเขตโดยรวมสมการที่ 25, 26 และ 27 จะได้สมการที่ 28

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

กฎของฟูเรียร์ของการนำความร้อนเกี่ยวกับการ ไอลของความร้อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันเขียนได้ดังสมการที่ 29

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

เขียนให้อยู่ในรูปเวคเตอร์จะได้สมการที่ 30

$$\mathbf{q} = -k \mathbf{grad} T \quad (30)$$

รวมสมการที่ 28 และสมการที่ 30 จะได้อัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อนของอนุภาคโดยการนำความร้อนผ่านขอบเขตจะได้สมการที่ 31

$$-\operatorname{div} \mathbf{q} = \operatorname{div}(k \mathbf{grad} T) \quad (31)$$

### 3.3.3 สมการพลังงาน (Energy Equation)

พลังงานของของไอลจะเป็นผลรวมของพลังงานภายใน (Internal Energy ( i )) พลังงานการเคลื่อนที่  $\frac{1}{2}(u^2+v^2+w^2)$  และพลังงานศักย์ แต่ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์นี้จะมีค่าน้อยและพลังงานที่จำเพาะกับอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรต่อหน่วยเวลา  $S_E$  การอนุรักษ์พลังงานของอนุภาคของไอลโดยการสมดุลของอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอนุภาคของไอลกับผลรวมของอัตราสูทธิของงานที่กระทำกับอนุภาคของไอลและอัตราสูทธิของความร้อนที่เพิ่มในของไอลและอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานโดยได้จากแหล่งจ่ายโดยจะเรียกสมการนี้ว่าสมการพลังงาน (Energy Equation) ดังแสดงในสมการที่ 32

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

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

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

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

และเขียนในรูปของสมการพลังงานภายในได้ดังสมการที่ 34

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

โดยที่  $S_i = S_E - u S_M$

ในการแก้ของไอลที่อัดตัวไม่ได้  $i = cT$  โดยที่  $c$  คือค่าความจุความร้อนและ  $\operatorname{div} u$  จะได้ค่าเท่ากับศูนย์สามารถที่จะเขียนสมการ 34 ได้ใหม่เป็นสมการในรูปของอุณหภูมิดังสมการที่ 35

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

เมื่อนำสมการของการอนุรักษ์พลังงานในรูปของอุณหภูมามาเขียนในรูปของการนឹดสามารถที่จะเขียนได้ดังสมการที่ 36

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

ค่า  $k$  คือค่าการนำความร้อนโดยที่เทอนที่สองของสมการความมื้อเป็นอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานภายในของความหนืดที่ค่อยๆลดลง เพราะพลังงานกล (ความเสียดทาน) จะตรงข้ามกับพลังงานภายใน โดยจะมีค่าเป็นบวกเสมอและไม่สามารถยกันได้ ความหนืดที่ลดลงจะอยู่ในรูปของ Viscosity Times ( $\Phi_T$ ) ได้ดังสมการที่ 37

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

โดยปกติทั่วไปในแบบจำลองสำหรับการเคลื่อนที่ของผิวอิสระที่เข้าไปภายในแม่พิมพ์จะใช้แบบจำลองของปริมาตรของไอล (Volume-of-Fluid (VOF) Model) โดยแบบจำลอง VOF จะใช้ตัวแปร “f” เป็นตัวกำหนดอัตราส่วนของปริมาตรของไอลภายในเอลิเมนต์ต่อหน่วยปริมาตรของรูปทรงเอลิเมนต์ VOF ในรูปของ  $f$  สามารถเขียนได้จากสมการพลังงานจนได้ดังสมการที่ 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 สำหรับเอกสารนี้ที่ว่าง และมีค่าเท่ากับ 1 สำหรับเอกสารนี้ที่เต็ม ซึ่งช่วงระหว่าง 0.0 และ 1.0 นั้นเอกสารนี้จะถูกจัดว่ายังคงมีสารตัวอย่างเช่นเมื่อที่  $f$  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  $\phi$  ในอนุภาคของไอล
- อัตราสูหัสหิการ ไอลของ  $\phi$  ที่ออกจากอนุภาคของไอล
- อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$  โดยการแพร่
- อัตราการเพิ่มขึ้นของ  $\phi$  โดยแหล่งจ่าย

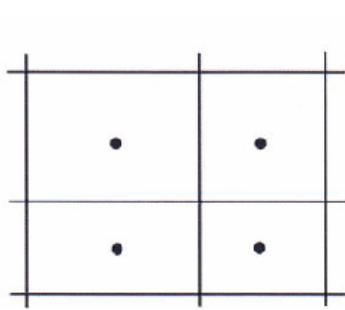
สมการอนุพันธ์ของสมการความต่อเนื่อง, สมการโมเมนตัม, สมการพลังงาน และสมการ VOF แตกต่างกันที่ตัวแปร  $\phi$  ในแต่ละสมการ, สัมประสิทธิ์ของการแพร่  $\Gamma^\phi$  และของแหล่งจ่าย  $S^\phi$  ในตารางที่ 1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันของสมการอนุพันธ์

ตารางที่ 1 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์ที่แตกต่างกันในสมการการส่งถ่าย

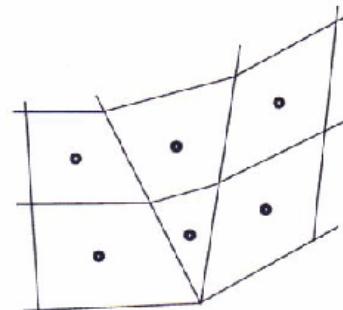
Equation name	$\phi$	$\Gamma^\phi$	$S^\phi$
Continuity	1	0	0
Momentum	$u_i$	$\mu$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + S_i^\mu + S_i^d + X_i$
Energy	$T$	$\frac{k}{c_p}$	$\frac{1}{c_p} \left( \mu \Phi_T + L \frac{\partial f_s}{\partial t} + S_T \right)$
Volume fraction (VOF)	$\frac{f}{\rho}$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

### 3.3.4 วิธีการปริมาตรควบคุม (Control Volume Approach)

จากสมการอนุพันธ์ย่อที่กล่าวมานี้จะเป็นสมการในรูปแบบที่ต้องเนื่องในการหาค่าตัวแปรต่างๆนั้นจะสามารถที่จะหาได้โดยวิธีการปริมาตรจำกัดซึ่งจะทำการแปลงสมการในรูปแบบต่อเนื่องให้อยู่ในรูปแบบไม่ต้องเนื่องในรูปของสมการเชิงพีชคณิต (Algebraic Equation) ซึ่งวิธีการปริมาตรจำกัดจะแสดงวิธีในการทำการแบบไม่ต้องเนื่องค่าตัวแปรในระบบสมการควบคุมการไฟลโดยใช้หลักการของปัญหาเป็นปริมาตรเล็กๆ โดยที่ตัวแปรที่จะทำการคำนวณจะถูกเก็บค่าอยู่ที่จุดศูนย์กลางของแต่ละปริมาตรจำกัดอย่างที่ได้ทำการแบ่งไว้โดยค่าของปัจจัยที่มีผลกระทบต่างๆจะถูกทำการเฉลี่ยค่าการคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆจะอาศัยหลักของความสมดุลย์ของปัจจัยที่มีผลกระทบที่ถ่ายเทเข้าและออกจากปริมาตรจำกัดหนึ่งๆทำให้การคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆเป็นไปตามหลักทางฟิสิกส์คือการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมภายในปริมาตรจำกัดหนึ่งๆ รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการสร้างกริดในรูปที่ 5a เป็นการสร้างกริดแบบพิกัด (Cartesian Grid) และ 5b เป็นการสร้างกริดแบบเข้ารูป (Body-Fitted Grid)



รูปที่ 5a การสร้างกริดแบบพิกัด  
(Cartesian Grid)

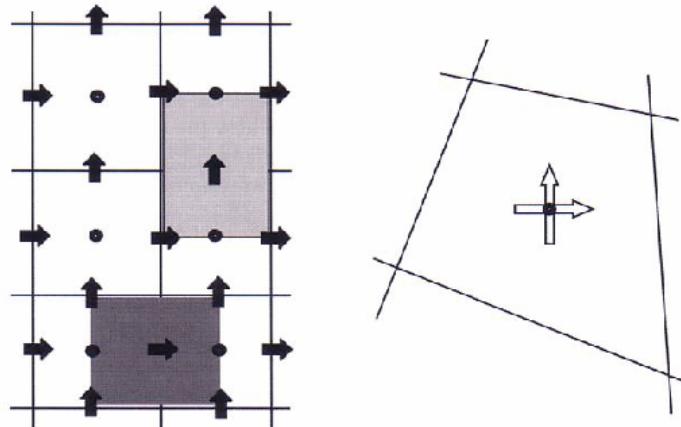


รูปที่ 5b การสร้างกริดแบบเข้ารูป  
(Body-Fitted Grid)

ในการสร้างกริดโดยทั่วไปนั้นที่นิยมใช้ในวิธีปริมาตรจำกัดนั้นมีอยู่ด้วยกันสองวิธีคือการสร้างกริดแบบพิกัดคงและ การสร้างแบบเข้ารูป ข้อดีของการสร้างกริดแบบพิกัดคงคือจะทำให้ง่ายต่อการคำนวณและไม่ซับซ้อน เช่นการสร้างกริดสำหรับการไฟลผ่านทางวิ่งที่เป็นลี่เหลี่ยมและข้อดีของการสร้างกริดแบบเข้ารูปจะช่วยในการลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการประมาณค่าในบริเวณขอบเขตต่างๆที่เป็นส่วนโถงของกระบวนการสร้างกริดแบบพิกัดคง

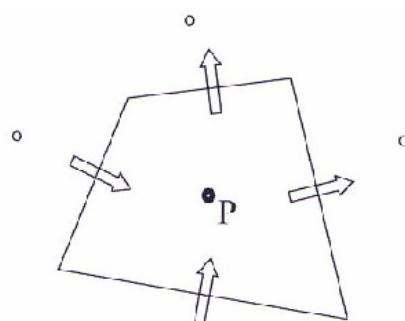
ส่วนในการเลือกลักษณะการไฟลของปัจจัยที่มีผลกระทบจะแบ่งออกได้เป็นสองวิธี แรกจะเป็นการการจัดเตรียมแนวของกริดในแนวแกนพิกัดคงซึ่งลักษณะของปัจจัยที่มากระทบจะกระทำที่บริเวณด้านข้างและแบบวิธีการเข้าใกล้จุดศูนย์กลางซึ่งจะใช้กับการสร้างกริดแบบเข้ารูป ซึ่งในรูปที่ 6 จะแสดงให้เห็นการเก็บค่าของปัจจัยที่มากระทบของทั้งสองวิธีสำหรับรูปที่ 6a เป็นการวางแผนกริดแบบพิกัดคงและปัจจัยที่มากระทบจะเป็นแบบสเกลาร์ ซึ่งได้แก่ ค่าความดันสถิติ, อุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งจะทำการเฉลี่ยค่าไว้ที่จุดกลางของอelistment ซึ่งส่วนประกอบของความเร็วจะถูกเก็บไว้ที่ผิวน้ำของอelistment และจะถูกส่งถ่ายไปดังแสดงให้เห็นดังรูปซึ่งจะเรียกว่า

ปริมาตรจำกัดสำหรับองค์ประกอบความเร็ว ในรูปที่ 6b จะแสดงให้เห็นตัวแปรที่เก็บไว้คู่ของความเร็วและความดันของของไอลซึ่งจะใช้อลิเมนต์ในปริมาตรการควบคุมสำหรับทุกค่าตัวแปร



รูปที่ 6 a, b แสดงการเก็บค่าของตัวแปร

ในรูปแบบเฉพาะของปริมาตรจำกัดดังแสดงในรูปที่ 7 จะแสดงค่าตัวแปรที่ไม่รู้โดยจะแสดงค่าอยู่ในตำแหน่งลูกน้ำที่จุดศูนย์กลาง และที่ปริมาตรจำกัดรอบข้างจะแสดงที่จุดวงกลมเช่นเดียวกัน ส่วนลูกศรจะแสดงถึงผลของจุดที่อยู่รอบข้างที่กระทำบนผิวของปริมาตรจำกัดซึ่งจะคำนวณโดยลักษณะของการไอลเข้าและออก



รูปที่ 7 แสดงรูปแบบเฉพาะของอลิเมนต์ในวิธีปริมาตรจำกัด

วิธีการปริมาตรจำกัดจะมีอยู่ด้วยกันสองขั้นตอนในขั้นตอนที่หนึ่งจะใช้สมการการส่งถ่ายเฉพาะในสมการที่ 39 โดยทำการอิทธิเกรตรอบปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 7 โดยทำการอิทธิเกรตสมการที่ 39 ค่า  $\phi$  จะเป็นตัวแปรของ การไอลจะได้สมการที่ 40

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

จากสมการที่ 40 ใช้วิธีของเกาส์ไดเวอร์เจนจากการอิทิเกรตเป็นการอิทิเกรตที่ผิวจะได้สมการที่ 41

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

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

ในขั้นตอนที่หนึ่งจะใช้วิธีการอิทิเกรตค่ากลาง (Generalized Mean Value of Integration Theorem (GMVIT)) โดยวิธีการนี้จะคำนวณจากสมการที่ 41 ในการนำสมการ GMUIT ไปใช้ในตอนแรกจะทำการเพิ่มตำแหน่งที่ไม่รู้ค่าในจุดที่จะทำการอิทิเกรต (ในตำแหน่งของลูกศรของรูป 7) ในขั้นตอนที่สองนั้นค่าที่ไม่รู้ที่จุดจะทำการอิทิเกรตที่ตำแหน่งตรงกลางของปริมาตรควบคุณ

ในปัญหาทางฟลิกส์ของการไหลดันนั้นจะใช้สมการเชิงอนุพันธ์หลายสมการ (กฎการอนุรักษ์) สมการที่จะใช้หาค่าตอบนั้นได้แก่ สมการ โมเมนตัม รวมทั้งหมวดสามสมการในแนวแกนสามแกน, สมการพลังงาน และสมการ VOF ซึ่งค่าตัวแปรที่ไม่รู้ค่าของสมการทั้งหมดนั้นจะแยกได้เป็นสมการ โมเมนตัมซึ่งจะไม่รู้ค่าของความเร็ว และ ความดันสถิต สมการพลังงานคือค่าของอุณหภูมิ และสมการ VOF คือองค์ประกอบของ f ที่ไม่รู้ค่าซึ่งเราจะมีสมการอยู่ห้าสมการแต่มีตัวแปรที่ไม่รู้ค่าอยู่หกแต่ยังมีสมการของความต่อเนื่อง (การอนุรักษ์มวล) แต่สมการความต่อเนื่องจะประกอบด้วยความเร็วเท่านั้นและต้องใช้สมการ โมเมนตัมในสมการสำหรับส่วนประกอบความเร็วสำหรับการไหลดที่อัดตัวไม่ได้ จะทำการจัดรูปสมการใหม่สำหรับสมการความต่อเนื่องสำหรับความดันสามารถทำได้ดังนี้คือทำการอิทิเกรตสมการต่อเนื่องตลอดสมการทั้งปริมาณสเกลาร์ของปริมาตรจำกัดจะได้สมการที่ 42

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

โดยที่ผลรวมของตลอดผิวน้ำ (ตำแหน่ง “e”) ของปริมาณสเกลาร์ของปริมาตรจำกัด อัตราการไหลดที่ผ่าน “e” ผิวน้ำของปริมาตรควบคุมจะมีความสัมพันธ์กับการอนุรักษ์มวลกับความเร็ว ดังสมการที่ 43

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

สามารถเขียนสมการ โมเมนตัมที่ตำแหน่ง “e” ของผิวปริมาตรจำกัดแบบสเกลาร์จะได้ดังสมการที่ 44

$$u_{i,e} = \frac{1}{a_e^{u_1}} \left[ \sum_{nb} a_{nb}^{u_1} u_{i,nb} + \left( \frac{\partial p}{\partial x_i} \right)_e + S_e^{u_1} \right] \quad (44)$$

ในสมการที่ 44 จะเป็นความแตกต่างกันของความดันบนผิวน้ำ “e” ของปริมาตรควบคุม ความแตกต่างกันของความดันระหว่างความดันสติตในผิวของอเลิเมนต์ของผิวน้ำ “e” นำไปแทนในสมการที่ 43 และในสมการ 44 และแทนที่องค์ประกอบความเร็วในรูปเวกเตอร์โดยที่สมการ โมเมนตัมที่ผิวน้ำในสมการที่ 44 ค่าที่ไม่รู้คือความดันทำการเคลื่อน ทำการเคลื่อนความแตกต่างของความดันไปทางซ้ายของสมการ จะได้ผลของสมการที่อยู่ในรูปของความดันสติตย์ (หรือความดันที่เปลี่ยนแปลง) เป็นตัวไม่รู้ค่าดังสมการ 45

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

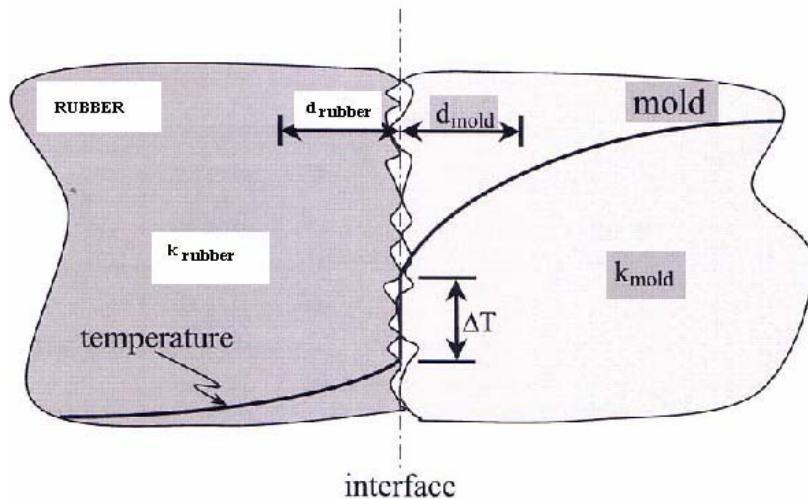
เมื่อร่วมสมการความดันเข้าไปก็จะมีจำนวนสมการเป็นหกสมการเท่ากับตัวแปรที่ไม่รู้ค่า

### 3.3.5 คุณสมบัติทางความร้อน (Thermophysical Properties)

ก่อนที่จะหาคำตอบของสมการที่ครอบคลุมการไหลและการเย็นตัวสิ่งที่สำคัญคือค่าของคุณสมบัติทางความร้อนของวัตถุที่มีอยู่ สำหรับการคำนวณของเขตของอุณหภูมิในระบบการณ์นี้นั้นข้อมูลที่ต้องการนั้นได้แก่ ความหนาแน่น (Densities) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacities) และค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivities) ทั้งหมดของวัตถุในระบบของการณ์นี้จะเนื้อยางและแม่พิมพ์ เป็นต้น ที่จะนำไปเพิ่มเข้าไปและค่าความร้อนแห้งในการหลอมเหลวของเนื้อยางในการคำนวณความเร็วและความดันระหว่างการไหลเข้าไปภายใต้แรงกดของเนื้อยาง ค่าความหนาแน่นของเนื้อยางซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าของอุณหภูมิและที่สำคัญคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากอุณหภูมิที่จะต้องพิจารณาชั้นงานขณะจำลองการไหล สำหรับวัตถุที่เป็นอนินวิตโนเนียร์ โอลอย ค่าของความหนาแน่นจะเป็นองค์ประกอบของอัตราการเรือน

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

ภายในแม่พิมพ์นี้หลังจากกระบวนการการณ์ได้เริ่มนี้จะมีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นของวัตถุอยู่ภายในระบบคือจะมีการถ่ายเทจากที่อุณหภูมิสูงไปสู่อุณหภูมิที่ต่ำ เช่น จากแม่พิมพ์ไปที่ตัวเนื้อยาง เป็นต้น การสัมผัสถันระหว่างวัตถุสองชนิดนี้จะมีช่วงการลดลงของอุณหภูมิที่ผ่านผิวน้ำสัมผัสกับวัตถุ ในการถ่ายเทความร้อนบริเวณน้ำสัมผัสของวัตถุเกิดอุ่นส่องแบบคือการพาความร้อนผ่านช่องอากาศเล็กๆ ไปยังเนื้อยางและการแผ่รังสีข้ามช่องอากาศเนื่องจากความแตกต่างกันของอุณหภูมิของวัตถุทั้งสองโดยปกติจะเรียกว่าความด้านทานของการถ่ายเทความร้อนผ่านช่องโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (HTC) ระหว่างวัตถุดังแสดงในรูปที่ 8



**รูปที่ 8** แสดงถึงความแตกต่างกันของอุณหภูมิของแม่พิมพ์กับเนื้อยาง

ตัวอย่างของการสัมผัสนั้นของสองวัสดุที่มีการถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของเนื้อยางกับแม่พิมพ์ ซึ่งรวมของความต้านทานของการถ่ายเทความร้อนระหว่างตำแหน่งจากแม่พิมพ์จากแม่พิมพ์ไปยังเนื้อยางแสดงได้ดังสมการที่ 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

อีลัสโตเมอร์ (Elastomers) เป็นโพลิเมอร์แบบอัมอร์ฟัส (Amorphous Polymers) โดยมีโครงสร้างไม่เป็นรูปแบบตาข่าย 3 มิติ (3D Network) มีสายโมเลกุลยาวซึ่งเชื่อมต่อ กันด้วยพันธะทางเคมี และสามารถดูดซับสารละลายได้ดี แต่ไม่สามารถขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้ด้วยการให้ความร้อน มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นดี ทนต่อแรงขัดสี หลังจากการเติมสารเคมีต่างๆ เช่นไบโพลิกกับอีลัสโตเมอร์ จะได้สิ่งที่เรียกว่า คอมพาวน์ (Compound) และเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนและกระบวนการวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) แล้วจะได้สิ่งที่เรียกว่า ยาง (Rubber) (Gent, 2001) นอกจากนี้ยังสามารถนิยามความหมายของอีลัสโตเมอร์และยางตามมาตรฐานของ ASTM (ASTM, 1999) ได้ดังนี้

“อีลัสโตเมอร์สามารถนิยามได้ว่า วัสดุที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยที่อุณหภูมิห้องทั่วไปร่วมและขนาดสามารถคืนตัวได้หลังจากนำแรงที่มากระทำออก ส่วนยางก็สามารถนิยามได้ด้วยมาตรฐานเดียวกัน คือ วัสดุที่สามารถคืนตัวจากการเสียรูปได้อย่างรวดเร็วและแรง และสามารถปรับปรุงสภาพได้แม้ว่าโดยพื้นฐานแล้วจะไม่

สามารถละลาย (แต่สามารถเกิดการบวมได้) ได้ในสารละลายที่เดือด เช่น เบนซีน (Benzene) เมทิว เอทิลก็โนน (Methyl Ethylketone) หรือ เอทานอล-โทลูอิน อโซโซโทโรป (Ethanol-toluene Azeotrope) บางในสถานะที่แปลงสภาพแล้ว ซึ่งปราศจากการเจือจาง จะหดตัวเหลือเพียงไม่ถึง 1.5 เท่าของความยาวเริ่มต้นภายในเวลาหนึ่งนาที หลังจากได้รับการยืดออกเป็นสองเท่าที่อุณหภูมิห้อง และคงตัวเอาไว้หนึ่งนาทีก่อนที่จะปล่อย” (ASTM, 1999)

### 3.4.1 ชนิดของยาง

องค์ความรู้เรื่องของยางนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนหลักๆ [22] ได้แก่ การผลิตยางดิบ (Raw Rubber) และการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง (Rubber Product) ในส่วนของยางดิบนั้นสามารถแบ่งยางดิบออกได้เป็นสองประเภทคือ ยางดิบที่ได้มาจากการพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เรียกว่ายางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber, SR) ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์อาจอยู่ในรูปของยางแห้ง (Dry Rubber) หรือน้ำยาง (Latex) ก็ได้ สำหรับในส่วนของการผลิตผลิตภัณฑ์จากยางนั้น โดยทั่วไปสามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ยางออกได้เป็นส่องกลุ่มตามลักษณะของวัตถุดิบที่ใช้ คือ กลุ่มผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบที่เป็นยางแห้งและกลุ่มผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบที่เป็นน้ำยาง

ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ต่างก็มีคุณสมบัติเด่นที่แตกต่างกัน เช่น ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติดีเยี่ยมในด้านความเหนียวติดกัน (Tack) ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางล้อรถ นอกจากนี้ ยางธรรมชาติยังมีคุณสมบัติความทนทานต่อแรงดึง (Tensile Strength) ที่สูงมาก โดยไม่ต้องเติมสารตัวเติมเสริมแรงอันเป็นคุณสมบัติที่จำเป็นในการผลิตผลิตภัณฑ์บางชนิด เช่น ถุงมือ เป็นต้น ส่วนยางสังเคราะห์นั้นมีมากหลายชนิด ซึ่งยางสังเคราะห์ในแต่ละชนิดนั้นจะมีความแตกต่างกันไป เช่น ยางบิวตาไอดีน (BR) ที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความต้านทานต่อการขัดถูหรือยางไนโตรล (NBR) ที่มีคุณสมบัติเด่นในด้านความต้านทานต่อน้ำมัน เป็นต้น

เนื่องจากยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์แต่ละชนิดต่างก็มีข้อดีข้อด้อยที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางบางประเภทจึงจำเป็นต้องนำยางมากกว่าหนึ่งชนิดมาผสมกันเพื่อให้ยางสมที่ได้มีคุณสมบัติที่ดีของยางแต่ละชนิดที่นำมาผสมกัน ในการเลือกชนิดของยางที่จะนำไปใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ใดๆ ได้อย่างเหมาะสมนั้น ผู้ผลิตจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจในคุณสมบัติของยางแต่ละชนิด โดยละเอียด นอกจากนี้ผู้ผลิตยังต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องร่วมด้วย เช่น ความยากง่ายในด้านกระบวนการผลิต (Processability) ของยางที่จะเลือกใช้ ราคาต้นทุนของการผลิต รวมถึงความยากง่ายในการจัดทำยางนั้นๆ

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ยางนั้นจะมีพื้นฐานของส่วนผสมของสูตรประกอบด้วยสารต่างๆ ดังนี้

ยาง	1. ยางธรรมชาติ 2. ยางสังเคราะห์ 3. ยางรีเคลม
สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanising Agent)	1. ซัลเฟอร์ 2. สารอื่นๆ (ขึ้นอยู่กับชนิดของยางที่ใช้)
สารเร่งให้ยางคงรูป (Accelerator)	1. พวกร่วมให้เกิดปฏิกิริยาช้า 2. พวกร่วมให้เกิดปฏิกิริยาปานกลาง 3. พวกร่วมให้เกิดปฏิกิริยาเร็ว
สารกระตุ้นสารเร่ง (Activator)	1. พวгонินทรีย์สาร 2. พวгонินทรีย์สาร
สารเพิ่ม (Filler)	1. เบnmàคà - ช่วยเพิ่มความแข็งแรง - ไม่เพิ่มความแข็งแรง 2. พวกลีมàคà - ช่วยเพิ่มความแข็งแรง - ไม่ช่วยเพิ่มความแข็งแรง 3. Extender
สารช่วยในกรรมวิธีการผลิต (Processing Aids)	1. พวกรช่วยฉีกขาดไมเลกุลยาง 2. พวกรช่วยหล่อลื่นในไมเลกุลยาง 3. พวกรช่วยให้คุณสมบัติเหนียวติดกันดีขึ้น
สารป้องกันยางเสื่อมสภาพ (Age - Resistors)	1. Staining 2. Non – Staining 3. ต้านทานการแตก
สารอื่นๆ	1. ช่วยฉีกขาดไมเลกุล 2. ช่วยให้ยางแข็ง 3. ไม่ติดเปлавไฟ 4. พวกลีมàคà 5. ช่วยให้เกิดความเหนียวติด 6. ช่วยให้เกิดฟอง 7. ช่วยการเชื่อมต่อ 8. ช่วยระงับกลิ่น

### 3.5 รีโอโลยีของยาง (Rubber Rheology)

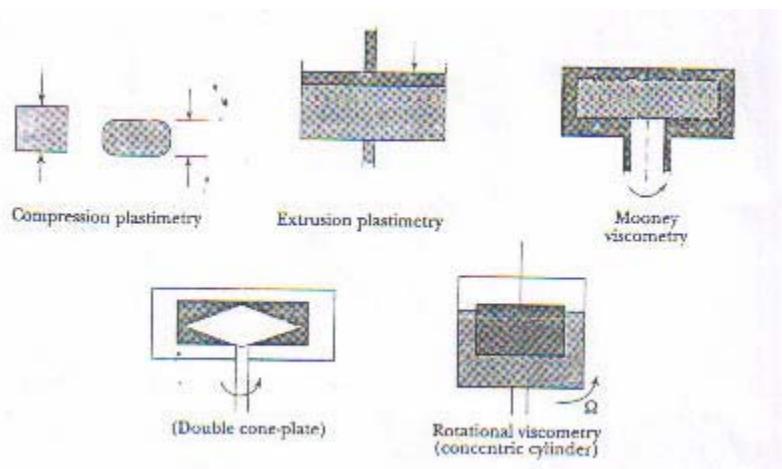
รีโอโลยีเป็นการศึกษาลักษณะการไหลและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุโดยจะหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียดและเวลาในการศึกษารีโอโลยีของยางนั้นจะศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิ และการเพิ่มองค์ประกอบต่างๆ เช่นไปแต่เนื่องจากยางนั้นจะมีคุณสมบัติที่เป็นทั้งของเหลวและเป็นของแข็งเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น (ดังนั้นต้องศึกษาพฤติกรรมรวมทั้งคุณภาพของความหนืดและความยืดหยุ่น) ใน การศึกษารีโอโลยีของยาง เช่น การศึกษาอัตราการไหลภายในไถข้อกำหนดต่าง 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)

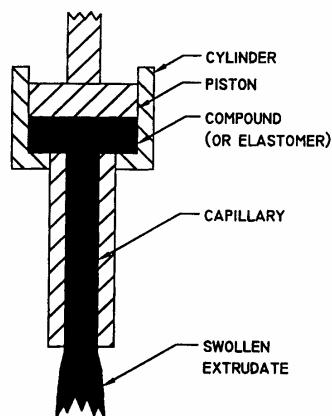
สมบัติความหนืดของยางเป็นสมบัติพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตมากการเลือกยางที่มีความหนืดอย่างถูกต้องจะทำให้การบดและการขึ้นรูปยางถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ความหนืดของยางมักวัดด้วยเครื่อง Viscometer อ่านค่าเป็น Mooney Viscosity ML (1+4)  $100^{\circ}\text{C}$  ( $M = \text{Mooney}$ ,  $L = \text{Large Rotor}$ ,  $1 = \text{Pre-Heat Time (min)}$ ,  $4 = \text{ระยะเวลาการหมุนโรเตอร์ min}$ , ที่อุณหภูมิ  $100^{\circ}\text{C}$ ) ยางสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะมีค่าความหนืดประมาณ 50 ถ้าต้องการสูตรยางที่บดสนิทง่าย เช่น สูตรยางที่ใช้สารตัวเติม (Filler) ปริมาณมาก หรือสูตรยางฟองน้ำที่ต้องการการพองตัวที่สม่ำเสมอ ควรใช้ยางที่มีความหนืดประมาณ 30 และในทางตรงกันข้าม ควรใช้ยางที่มีความหนืดมากประมาณ 100 สำหรับสูตรยางที่ผสมน้ำมันเพื่อการลดต้นทุน หรือสำหรับสูตรยางที่ต้องการความแข็งแรงของยางที่ยังไม่คงรูป (Green Strength of Unvulcanised Rubber)

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



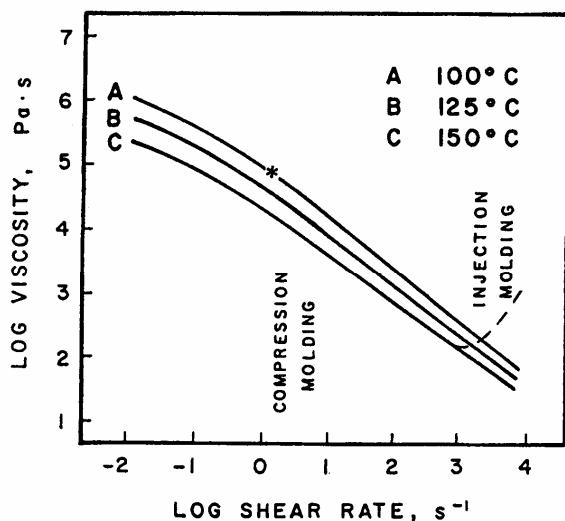
รูปที่ 9 การทดสอบหาค่าความหนืดในรูปแบบต่างๆ

จากรูปที่ 9 จะแสดงถึงการวัดค่าความหนืดในลักษณะต่างๆ กันแต่การทดสอบค่าความหนืดที่จะใช้สำหรับการให้ของเนื้อยางจะเป็นการทดสอบโดยใช้เครื่องคานิลารีวิสโคมิเตอร์ (Capillary Viscometers) ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 9 หลักการทำงานของเครื่องจะใช้ความดันดันให้ของไอลให้ผ่านท่อคานิลารี ของไอลที่มีความหนืดมากต้องใช้ความดันมากในการดันให้ของไอลให้ผ่านท่อคานิลารี ความหนืดจะเป็นพังก์ชันเชิงเส้นกลับอัตราส่วนของความดันต่ออัตราการไอล



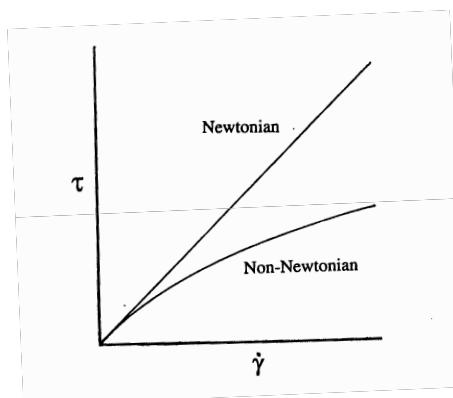
รูปที่ 10 แสดงส่วนประกอบต่างๆและการทำงานของเครื่องคานิลารีวิสโคอมิเตอร์

ในการใช้เครื่องคานิลารีวิสโคอมิเตอร์ในการทดสอบนั้นสามารถที่จะปรับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด และความยาว ในช่วงความดันที่แตกต่างกันและอุณหภูมิได้โดยในการทดสอบสามารถที่จะควบคุมปัจจัยต่างๆนี้ได้โดยทั้งไปจะทำการทดสอบค่าความหนืดให้เข็นอยู่กับอัตราเฉือนดังที่แสดงในรูปที่ 11 จะเป็นการทดสอบค่าความหนืดของเนื้อยางที่มีความหนืดสูงที่อัตราเฉือนต่างๆในแต่ละช่วงของอุณหภูมิ



**รูปที่ 11** แสดงการทดสอบค่าความหนืดของเนื้อยางที่มีความหนืดสูงที่อัตราเฉือนต่างๆ ในแต่ละช่วงของ อุณหภูมิ

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดเฉือนกับอัตราเฉือนได้ซึ่งจะบอกถักยละเอษของไอลว่า เป็นแบบนิวโทเนียนหรือแบบนอนนิวโทเนียนดังแสดงในรูปที่ 12



**รูปที่ 12** แสดงการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือนและอัตราเฉือนของไอลแบบนิวโทเนียนและแบบนอนนิวโทเนียน

### 3.5.2 ความเครียดเฉือน (Shear Strain)

กรณีที่วัสดุเคลื่อนที่แบบ laminar ซึ่งวัสดุมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กันในระหว่างชั้นบางที่บานกันในการกำหนดความเครียดเฉือน โดยพิจารณาเวลา  $t$  อนุภาคที่ตำแหน่ง  $x$  จะมีการเคลื่อนที่ออกจากเดิม (ตำแหน่งเมื่อเวลา  $t = 0$ ) ไปทางขวาเมื่อเป็นระยะทาง  $U(x,t)$  เมื่อ  $x$  เป็นระยะห่างจากตำแหน่งที่อยู่นิ่ง ( $x=0$ ) ในทิศดังภาพกับการเคลื่อนที่

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

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

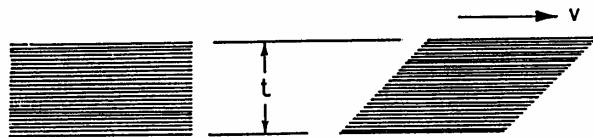
ค่าความเครียดเนื้อนนี้จะไม่ขึ้นกับกระบวนการเคลื่อนที่  $U(x,t)$  โดยตรงแต่ขึ้นกับอัตราของผลต่างการเคลื่อนที่ระหว่างชั้นที่ติดกันของการเคลื่อนที่แบบตามนิวร์กับระยะห่างระหว่างชั้น จึงเป็นที่แน่นอนว่าความเครียดเนื้อน  $\tau(x,t)$  โดยทั่วไปอาจจะขึ้นกับเวลาและระดับชั้นที่พิจารณาด้วย

### 3.5.3 อัตราเฉือน (Shear Rate)

อัตราเฉือนเป็นอัตราความเครียดเนื้อนในหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งความสัมพันธ์ได้เป็นดังสมการที่ 48

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

หรือสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 13



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

รูปที่ 13 แสดงถึงอัตราเฉือนโดยจะขึ้นอยู่กับความเร็วและความหนา

### 3.5.4 การคืนตัวของยางดิบ (Nerve)

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

สามารถทำให้การคืนตัวของยางดิบลดลงได้โดยวิธีต่างๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยางการลดความคืนตัวของยางดิบ เช่น การบดให้ยางนิ่ม การเพิ่มสารตัวเติม การเลือกชนิดสารตัวเติม (เช่น ใช้เข็ม่าดำที่มีโครงสร้างสูง แทนการใช้ชนิดที่มีโครงสร้างธรรมชาติ) ใช้สารพาก Mineral Rubber หรือ แฟคทีส (Factice) หรืออาจใช้ยางที่ได้มีการคงรูปบางเล็กๆ (Partially Crosslinked) ผสม

### 3.5.5 ความแข็งและโมดูลัส (Hardness and Modulus)

ในการทำผลิตภัณฑ์ยางความแข็งของยางมักจะเป็นสมบัติแรกที่ส่วนใหญ่ต้องการทราบการวัดความแข็งเป็นการวัดโมดูลัสที่เรցยีดเพียงเล็กน้อย (Low Strains) การวัดที่เป็นมาตรฐานคือ 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 ยางลูกกลิ้งพิมพ์คิด C – สำหรับยางที่แข็งมาก เช่น เปลือกลูกกลิ้ฟ สันรองเท้า D - สำหรับยางที่แข็งจนเประ และ O – สำหรับยางฟองน้ำ

ความแข็งของยางที่มีด้วยกันโดยทั่วไปจะประมาณ 35-75 IRHD ผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการนิ่ม เช่น ยางลูดินสอ ถุงมือ ลูกโป่ง ยางรัดของ และผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแข็ง เช่น ยางรถยก พื้นรองเท้า และยางลูบหมึก เป็นต้น

ผู้ออกแบบยางส่วนใหญ่จะต้องทดสอบในวัสดุโมดูลัสที่ Low Strain และยังสนใจที่จะวัดโมดูลัสที่ Higher Strain ซึ่งจะระบุไม่เป็น True Modulus แต่จะระบุเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ที่ใช้ด้วยอุปกรณ์ที่ทำให้ยางมีโมดูลัสเพิ่มด้วย 100, 300, 500% ของความยืดหยุ่นเดิม เป็นต้น สารต่างๆ ที่ทำให้ยางมีความแข็งเพิ่มก็จะทำให้ยางมีโมดูลัสเพิ่มด้วย ปกติความแข็งและโมดูลัสของยางขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ ชนิดของยาง และสามารถทำให้เพิ่ม โดยการใช้สารตัวเติมพลาสติกช่วยเสริมความแข็งแรงให้ยาง หรือใช้สารระบบการคงรูปเป็นพลาสติก Resin เช่น Phenolic Resin สารเรซิโนพลาสติกไม่ว่าจะเป็นไวนิล อะคริลิก หรือ High-Styrene Resin เมื่อใช้กับสูตรยางธรรมชาติ และสูตรยางเอสบีอาร์ จะทำให้ยางแข็งได้ PVC อาจผสมทำให้สูตรยางเย็นบีอาร์ มีความแข็ง

### 3.5.6 ความยืดหยุ่น (Elasticity)

ยางมีเอกลักษณ์คือสามารถเปลี่ยนรูปได้มาก (Large Deformation) โดยไม่เสียหรือนึกขาด มีสมบัติคือความหนืด (Viscosity) เมื่อนั่งเป็นของเหลวในขณะเดียวกันก็มีความสามารถในการคืนตัวสู่ขนาดหรือสภาพเดิม ได้ทันทีเมื่อแรงคืนหยุดกระทำ ทำให้ยางมีสมบัติของแข็งด้วย คือ มีความยืดและหยุ่นได้ (Elasticity) ดังนั้น เมื่อร่วมสมบัติทั้ง 2 ค้านี้เข้าด้วยกัน จึงมักเรียกว่า ยางมีสมบัติเป็น Viscoelastic Material

สูตรยางที่ให้การคงรูปยางลักษณะที่การเชื่อมโยงโมเลกุลอย่างหนาแน่น (Tightly Knit Crosslinking System) จะเพิ่มความยืดหยุ่นของยาง ซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของยางที่มีคุณสมบัติการกระเด้ง (Resilience) ดีถ้าลักษณะการเชื่อมโยงโมเลกุลมีความเสถียรต่อการเสื่อมสภาพได้มากยางนั้นก็จะมีสมบัติคือ Creep, Stress Relaxation และ Set ลดลงด้วยนอกจากนี้สารป้องกันยางเสื่อมจะช่วยปรับปรุงสมบัติดังกล่าวนี้อีกด้วย

Creep คือ สมบัติที่ยางจะเกิดการแบบต่อไปอีกอย่างช้าๆ ภายหลังจากที่ถูกกดและบุบหรือแบบลงตามแรงกดจนถึงจุดๆ หนึ่ง แล้วทิ้งให้แรงกดนั้นกดอยู่ต่อไป ความสำคัญของ Creep ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานยางโดยเฉพาะในกรณีต้องรับน้ำหนักตลอดเวลา เช่น ยางรองคอสะพาน ยางรองแท่นเครื่อง และรองเท้า เป็นต้น

ยางรองคอสะพาน ถ้ามี Creep มากจะทำให้รอยต่อของสะพานมีความสูงหรือต่ำไม่เท่ากัน กรณีรองเท้าก็จะแบบบานออกไป

Stress Relaxation เป็นสมบัติของยางที่เกิดเมื่อมีการกดยางลงลง ไปให้มีความสูงหรือหนาระดับหนึ่ง ซึ่งจะต้องใช้แรงกดระดับหนึ่ง และถ้าขังคงกดยางให้อยู่ในระดับความสูงคงที่ขนาดนั้น จะพบว่าแรงที่ต้องกดยางค่อนข้างลดลงตามลำดับ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Stress Relaxation ความสำคัญของ Stress Relaxation เน้นได้ชัดในกรณียางซีลหรือปะเก็นยาง คือ ในระยะแรกของการใช้ยางที่มีการกดให้ยางซีลยางแน่น การกดทำให้เกิดแรงดันขึ้นในยาง จึงเกิดการก้นของเหลวไหหล่อผ่านประเก็นยางได้ แต่เมื่อทิ้งไว้นานๆ แรงดันของยางจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งในที่สุดความดันของเหลวจะมากกว่าความดันที่มีอยู่ในยาง ทำให้ข่องเหลวไหหลอกได้

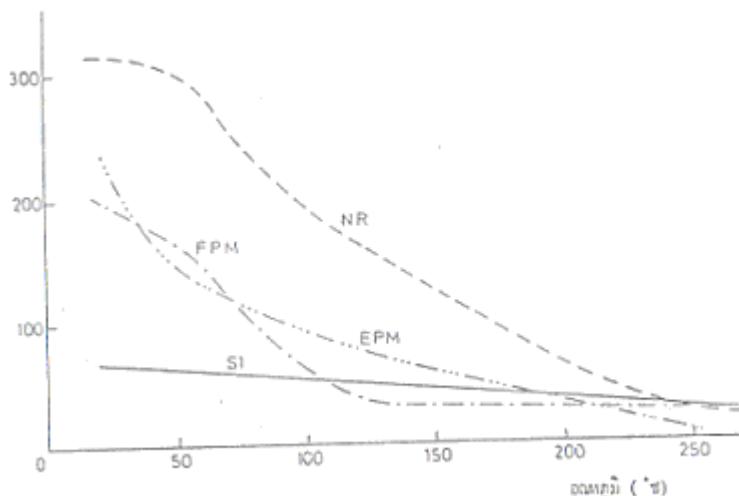
Set เป็นสมบัติด้านการคืนรูปร่าง หรือขนาดหลังจากถูกแรงกดกระทำระยะเวลาหนึ่ง สมบัติด้าน Set ของยางเกิดขึ้นเมื่อกดยางแล้วตั้งไว้ระยะหนึ่ง เช่น เป็นวัน เป็นสัปดาห์ เมื่อปล่อยแรงกดออกจะพบว่ายางไม่คืนรูปร่างเท่าเดิม ขนาดที่เปลี่ยนไปนี้เรียกว่า การคืนรูป หรือ Set ในโรงงานอุตสาหกรรมยางนิยมทดสอบ Set มากกว่า Creep หรือ Stress Relaxation เพราะใช้เครื่องมือที่ง่าย และให้ผลที่จะเป็นตัวบอกได้ว่ายางจะซีลได้ดีหรือไม่ในทันที เมื่อว่าจะไม่ได้วัดแรงที่ยางกระทำในขณะซีลก็ตาม

### 3.5.7 ความแข็งแรงต่อการยืดยาง (Tensile Properties)

การทำยางให้มีความแข็งตัว เช่น ต่ำกว่า 50 IRHD สำหรับยางที่มีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วน (Pure Gum Strength) สูง นั้น ทำได้ง่าย ในกรณีการใช้ยางที่มีโมเลกุลสามารถแตกพลิก หรือเรียงตัวเป็นรูเบี้ยบเมื่อยืดยาง (Crystalline on Stretching) ได้แก่ ยางธรรมชาติ ไอโซพรีน คลอโกรพรีน และบิวไท์ล์ ส่วนยางอื่น เช่น เอสบี อาร์ เอ็นบีอาร์ และบิว tha ไดอีน ซึ่งมีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วนต่ำ จะต้องใช้สารตัวเติมชนิดที่มีประสิทธิภาพเสริมแรงดี เพื่อปรับความแข็งแรงต่อการยืดยาง ซึ่งสารตัวเติมดังกล่าวก็จะเพิ่มสมบัติด้านโนดูลัส และความแข็งด้วย

การปรับความแข็งแรงให้ยางทึ้งสองกลุ่มดังกล่าวทำได้โดยการใช้สารตัวเติม เบนมาด้าที่มีอนุภาคละเอียด หรือใช้พวกซิลิกา ข้อสำคัญจะต้องบดผสมให้ตัวเติมกระจายในยางอย่างดี ปริมาณที่พอเหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของยางและชนิดของสารตัวเติม โดยปกติจะใช้สารตัวเติมในระดับ 30-60 phr สารเรซินบางตัว สามารถผสมทำให้ยางมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เช่น High-Styrene Resin ทำให้ยางเอส บี อาร์ มีความแข็งดีขึ้น และฟีโนลิกเรซินที่สามารถเชื่อมโมเลกุลได้ (Crosslinkable Phenolic Resin) เพิ่มความแข็งแรงในยางเอ็น บี อาร์ ได้

ข้อพึงระวังด้านความแข็งแรงของยางที่ได้จากการเพื่อให้มีความแข็งแรงมาก คือ การใช้งานที่สถานะอุณหภูมิสูง ดังแสดงในรูปที่ 14 แสดงความแข็งแรงของยางบางชนิดในสภาพการใช้งานที่อุณหภูมิสูงต่างๆ กัน



**รูปที่ 14** แรงดึงยางจากของยางชนิดต่างๆ ในสภาพอุณหภูมิต่างๆ

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

เมื่อผลิตภัณฑ์ยางถูกแรงกระทำระหว่างการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นแรงกระทำช้าๆ ในลักษณะทำให้ชิ้นยางหัก – งอ หรือกดชิ้นยางกีดาม มักจะเป็นผลให้ยางเกิดรอยแตก และอยู่ในสภาพใช้งานไม่ได้ในที่สุด นอกจากนี้ ในสภาพของการหัก – งอ ด้วยอัตราสูง เช่น การหมุนของยางล้อรถ หรือการวิ่งของสายพาน จะมีความร้อนสะสมเกิดขึ้นในยาง ดังนั้น การออกแบบยางจะต้องคำนึงเกี่ยวกับสมบัติเหล่านี้

นอกจากชนิดของยางที่ใช้ สารเคมีต่างๆ ก็มีผลต่อสมบัติการแตกของยาง ระบบของสารทำให้ยางคงรูป การเลือกชนิดของสารป้องกันยางเสื่อม การกระจายของสารเคมีต่างๆ ในเนื้อยาง ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อแรงเก็บดึง (Strains) ในยาง ซึ่งจะกระทบต่อสมบัติด้านการหักงอยาง สารเคมีที่ลดการกระเดิง ก็จะเพิ่มความร้อนสะสมเมื่อหักงอยาง และถ้าหากสภาพการหักงอยางแรงก็จะทำให้ยางเกิดรอยแตกอย่างรวดเร็ว

ในการออกแบบยาง จะต้องพิจารณาสภาพการใช้งานผลิตภัณฑ์ก่อนจึงจะสามารถเลือกชนิดยางได้ถูกต้อง ถ้าหากสภาพการใช้งานจะต้องเสื่อมต่อการเกิดรอยแตก การถูกสิ่งที่มีแรงดึง เช่น ยางธรรมชาติ และยางคลอ โพรพีน และเลือกสารตัวเติมที่ให้ความสมดุลย์ ด้านสมบัติโมดูลัสต่ำ些 ได้ดี และจะเดียวกันกับทนต่อการฉีกขาดดี

ได้มีการศึกษากันมาช้านาน พบว่าระบบการอบยางให้คงรูปโดยไม่ใช้ชัลเฟอร์ แต่ใช้สาร TMTD (Teramethyl Thiuram Disulphide) ตามลำพัง จะให้สมบัติด้านการล้าตัวเสื่อมสรุปที่จะใช้ยางได้ leuk กว่าการอบยางคงรูปโดยระบบใช้ชัลเฟอร์ตามปกติ (Conventional System) ซึ่งอาจชินหายได้ร้าว เนื่องจากสายเชื่อมโยงโมเลกุลที่เกิดโดยกระบวนการใช้ TMTD เป็น “Monosulphide” มีความเคลื่อนตัวได้จำกัดกว่าสายเชื่อมโยงโมเลกุลแบบ “Polysulphide” ที่เกิดจากการใช้ระบบชัลเฟอร์ตามปกติ

### 3.5.9 ความทันต่อการเสื่อมสภาพและสมบัติทางไฟฟ้าสถิตอื่น ๆ

ความทันต่อการเสื่อมสภาพของยาง เช่น ทนต่อความร้อน เปลาไฟ สารเคมี แสงโอโซน บรรยายกาศ ทั่วไปและสมบัติทางไฟฟ้าสถิตบางประการ เช่น การพองตัวในน้ำมัน ความหนาแน่น ตลอดจนสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น สมบัติเหล่านี้ของผลิตภัณฑ์ยางจะขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ระบบการใช้สารทำให้ยางคงรูป เช่น ระบบสารทำให้ยางคงรูปในยางธรรมชาติที่ให้พันธะเคมีเชื่อมโยงโมเลกุลยางเป็นแบบ Monosulphidi จะให้ความทันทานต่อความร้อนดีกว่าระบบที่ให้พันธะเคมีเป็นแบบ Polysulphidic การใช้ยางที่มีองค์ประกอบในโมเลกุลเป็นพวก Halogen เช่น ยางคลอโรฟลิน (CR) ที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่ไฟจะดับได้เมื่อไม่มีเพลา คือไม่ลุกไหม้เป็นเพลา การใช้สารตัวเติมพวกเบนซานิด Furnace และ Acetylene จะสนับสนุนสมบัติด้านไฟฟ้าสถิตย์ (Antistatic) และด้านด้านตัวนำไฟฟ้า ส่วนสารตัวเติมพวก Mineral เช่น Clays, Whiting, Coated Silicas ที่มีส่วนผสมของสารที่ละลายนำได้อยู่ในปริมาณน้อยจะสนับสนุนสมบัติด้าน Electrical Resistance และ Dielectric Characteristics ดีกว่าเขาม่าดำ Synthetic Aluminium Silicate บางชนิดสามารถใช้ผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องการมีสีสันอื่นๆ ที่ไม่ใช่สีดำ และต้องการสมบัติด้านต้านไฟฟ้าสถิต

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

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

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

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

และ

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

โดยที่

$\alpha$  = State of cure time

$k_r$  = Rate constant for the curing reaction

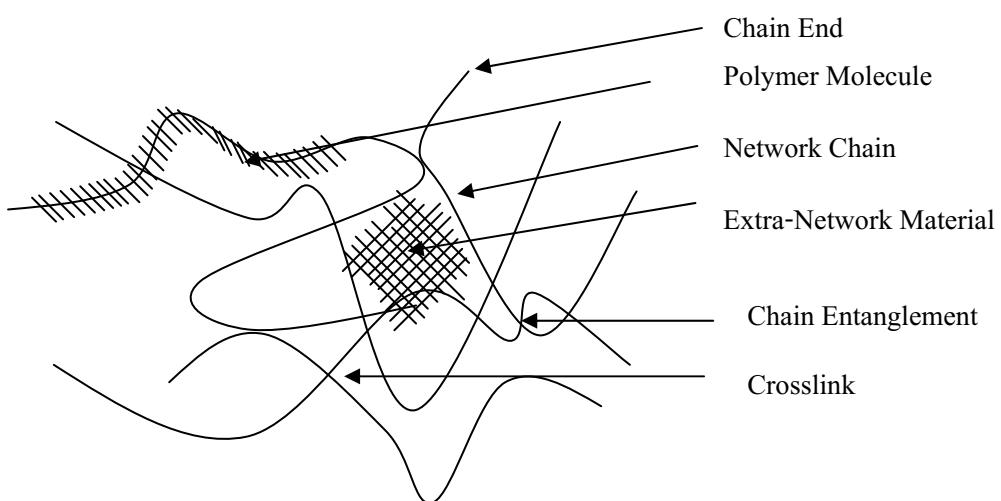
$t_r$  = Cure time

$t_k, t_{or}$  = Induction period

E = Activation energy

$T_r$  = Reference temperature

T = temperature



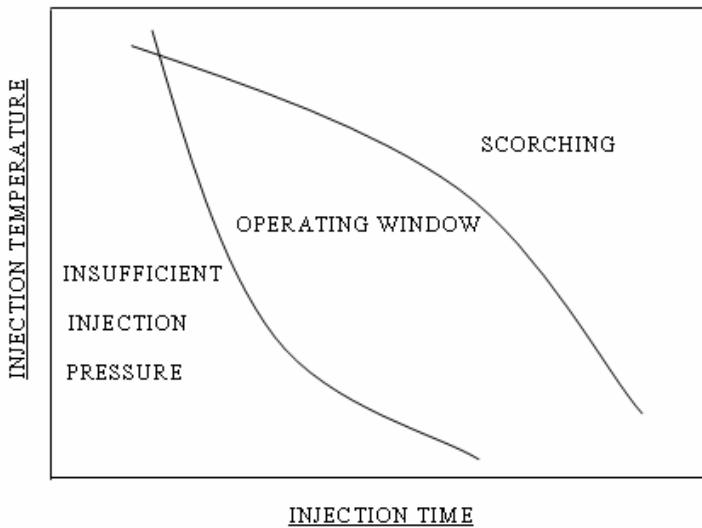
รูปที่ 15 แสดงลักษณะที่เกิดขึ้นของเนื้อยางเมื่อผ่านการอบ (Vulcanization)

### 3.5.11 การเกิดสภาพยางตาย (Scorch and Moldability)

การเกิดลักษณะของยางที่เรียกว่ายางตายนั้นเป็นสาเหตุจากการที่ยางได้รับความร้อนที่สูงหรือระยะเวลาในการฉีดยางเข้าไปในแม่พิมพ์นานเกินไปซึ่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 16

ในการเกิดการตายของยางในแม่พิมพ์ฉีดนั้นมีสาเหตุสำคัญมาจากการ

- ความเร็วในการฉีดสูง ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในเนื้อยางขณะที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์
- ความเร็วในการฉีดต่ำ ซึ่งจะทำให้การใช้เวลาในการฉีดยางเข้าไปในแม่พิมพ์ยาวนานขึ้น
- อุณหภูมิของเนื้อยางที่จะทำการฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์สูง
- อุณหภูมิของแม่พิมพ์สูง



**รูปที่ 16** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และเวลาในการฉีด

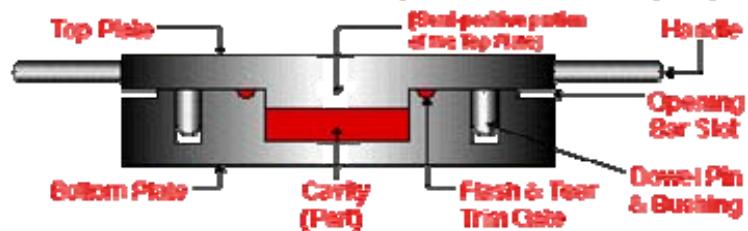
### 3.6 กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ (Elastomer Moulding)

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (Moulding) คือการขึ้นรูปยางให้เป็นชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างที่แน่นอน โดยเปลี่ยนยางเทอร์โมเซ็ตจากสถานะที่เป็นของเหลวไปสู่สถานะของแข็งหลังจากเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Crosslinking) ซึ่งเรียกว่า กระบวนการวัลคาไนซ์ (Valcanizing) หรือ การอบบ่ม (Curing) โดยการขึ้นรูปยางนั้น จะมีอยู่ 3 แบบ คือ การอัดขึ้นรูป (Compression Moulding) การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (Transfer Moulding) และการฉีดขึ้นรูป (Injection Moulding) [23]

#### 3.6.1 การอัดขึ้นรูป (Compression Moulding)

การขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดนั้น เป็นการขึ้นรูปที่ง่ายที่สุด และแม่พิมพ์ก็มีราคาไม่สูงมากนัก ส่วนรูปทรงของชิ้นงานจะมีความซับซ้อน ไม่มากนัก อย่างไรก็ตามก็มากพอสำหรับผลิตภัณฑ์หลายประเภทที่ถูกนำไปใช้ โดยขนาดของแม่พิมพ์จะขึ้นกับชิ้นงานซึ่งมีตั้งแต่ขนาดเพียงไม่กี่กรัมจนไปถึง 10 กิโลกรัม เครื่องสำหรับอัดขึ้นรูปก็เป็นเพียงเครื่องอัดด้วยไฮดรอลิกส์แบบง่ายๆ ไม่ซับซ้อน ตัวอย่างแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 17 และ 18

### **Compression Mold (Semi-positive Type)**



รูปที่ 17 ส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป [24]



รูปที่ 18 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป [25]

ขั้นตอนการขึ้นรูปนั้นเริ่มจากนำชิ้นยางที่ยังไม่สุกใส่ลงไประบในเบ้าแม่พิมพ์ (Cavity) โดยผู้ปฏิบัติงานจากนั้นปิดแม่พิมพ์ใส่เข้าไประบในเครื่องอัด เครื่องอัดจะใช้แรงดันกดปิดแม่พิมพ์จนสนิท โดยก่อนจะกดปิดแม่พิมพ์จะมีการกดและคลาย (Bumping) ก่อนเพื่อไล่อากาศออกให้น้ำยางไประบได้เต็มเบ้า หลังจากได้รับความร้อนจากเครื่องอัดและใช้เวลาระยะเวลาหนึ่งจนยางสุกแล้ว ก็เปิดแม่พิมพ์และหยิบชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์โดยผู้ปฏิบัติงาน ทำความสะอาดแม่พิมพ์ จากนั้นแม่พิมพ์ก็จะพร้อมสำหรับการอัดขึ้นรูปในรอบต่อไป [26]

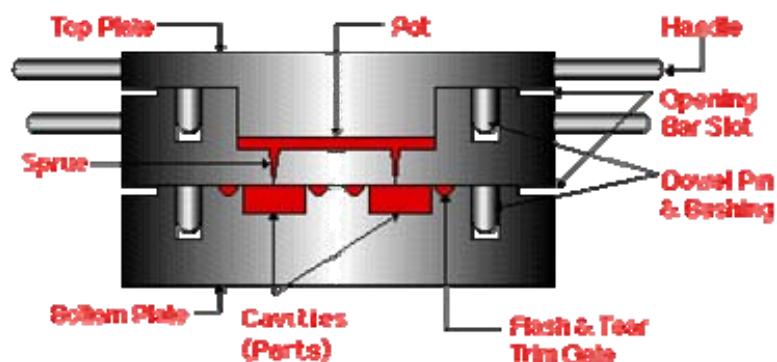
## ตารางที่ 2 ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์แบบอัด

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ราคาถูก</li> <li>2. ออกแบบง่ายสำหรับชิ้นงานที่ไม่ซับซ้อน</li> <li>3. มีช่องอัดยางมากเมื่อกว่าแม่พิมพ์แบบกึ่งอัด</li> <li>4. มียางเสียน้อยกว่า</li> <li>5. ว่างชิ้นส่วนโลหะที่จะประกอบได้ง่าย</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ใช้งานไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ</li> <li>2. แม่พิมพ์มีน้ำหนักมาก</li> <li>3. ใช้เวลาในการเปลี่ยนยางเข้า-ออกแต่ละครั้ง</li> <li>4. ไม่เหมาะสมกับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและบาง</li> </ol>

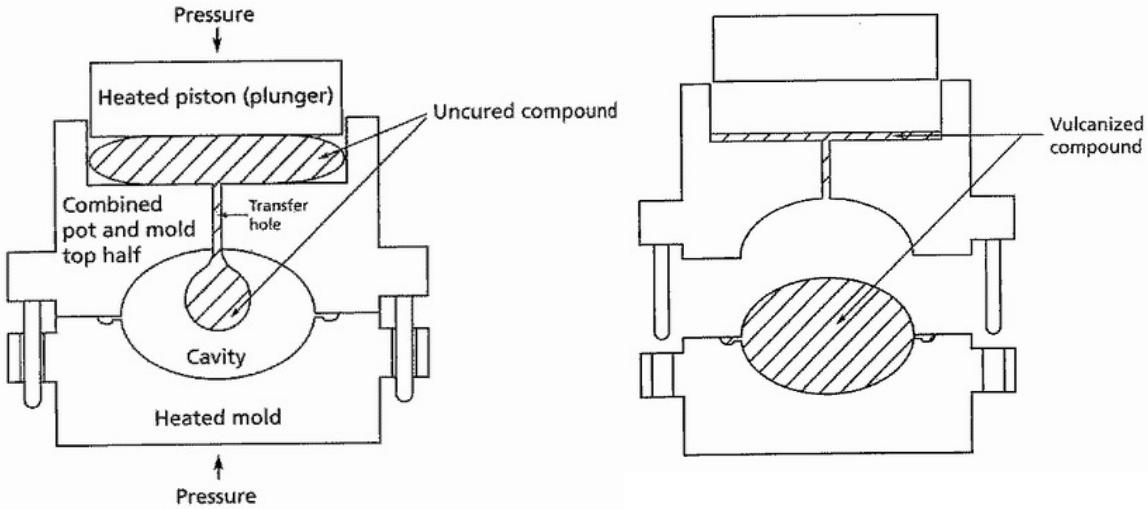
### 3.6.2 การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (Transfer Moulding)

การขึ้นรูปแบบอัดส่งนั้นชิ้นงานที่ได้จะมีความแม่นยำมากกว่าแบบอัด [26] และสามารถควบคุมรอบเวลาระบบผลิตได้ดีกว่า หลักการที่สำคัญของการขึ้นรูปแบบอัดส่งนั้นคือจะมีช่องสำหรับหัวส่าย 1 ช่อง (Pot) โดยช่องดังกล่าวจะเชื่อมต่อกับเบ้าด้วยทางวิ่งซึ่งมีพังเบ้าเดียวหรือหลายเบ้าก็ได้ เมื่อใส่ยางที่ยังไม่สุกลงไปในช่องใส่ยาง ส่วนอัด (Plunger) ก็จะอัดเนื้อยางผ่านทางวิ่งเข้าไปสู่เบ้า หลังจากนั้นก็จะให้ความร้อนจนยางสุก นำชิ้นงานออกจากเบ้าโดยผู้ปฏิบัติงาน ตัวอย่างแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัดส่ง และการขึ้นรูปแบบอัดส่งแสดงดังรูปที่ 19 และ 20 [26]

**Transfer Mold**



รูปที่ 19 ส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์ยางแบบอัดส่ง [24]



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

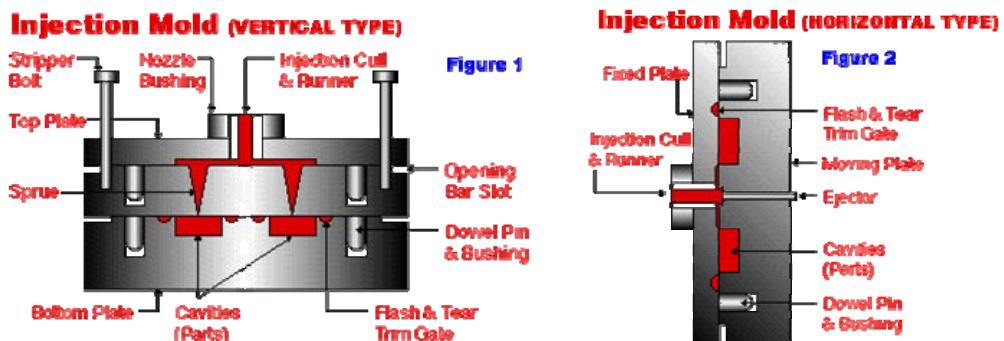
### ตารางที่ 3 ข้อดีและข้อเสียของแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด

ข้อดี	ข้อเสีย
<ol style="list-style-type: none"> <li>เตรียมชิ้นงานได้ง่าย เพราะเตรียมชิ้นใหญ่เพียงชิ้นเดียว</li> <li>ใช้ระยะเวลาสั้นในการอบยางให้คงรูป</li> <li>ยางเชื่อมกับโลหะได้ดีกว่า</li> <li>มียางเสียน้อยกว่า</li> <li>ว่างชิ้นส่วนคละที่จะประกอบได้ง่าย</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>ราคาแพง</li> <li>แม่พิมพ์มีน้ำหนักมาก</li> <li>ใช้เวลานานในการเปลี่ยนยางเข้า-ออกแต่ละครั้ง</li> <li>มักมีช่องอัดยางน้อยกว่าแม่พิมพ์แบบอัดธรรมดा</li> </ol>

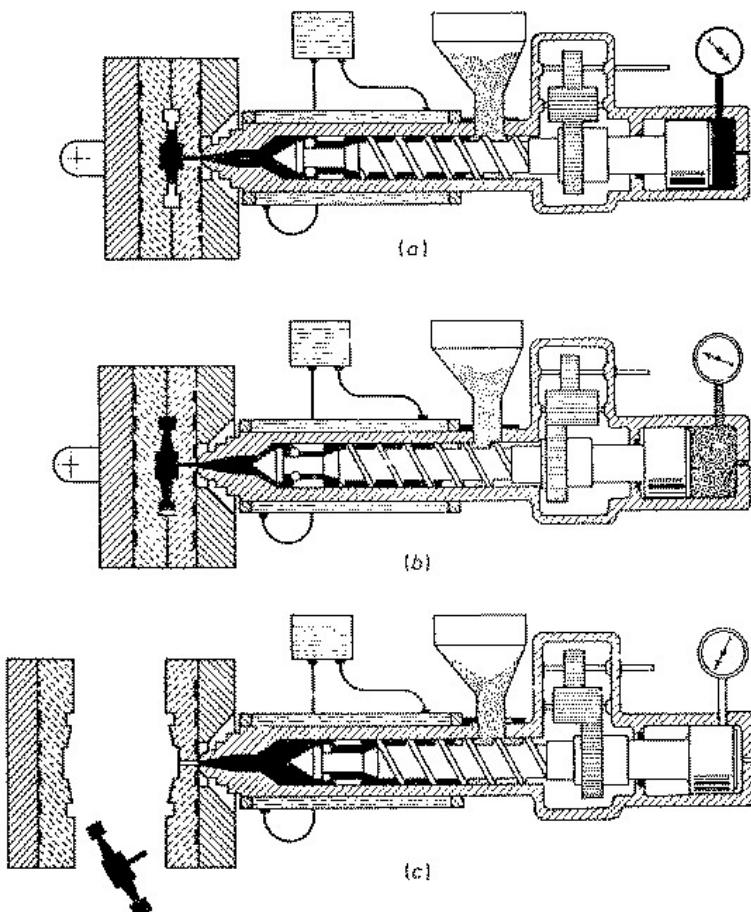
### 3.6.3 การฉีดขึ้นรูป (Injection Moulding)

การฉีดขึ้นรูปนั้นเป็นการฉีดเนื้อยางจากกระบวนการอัดฉีด [28] (Injection Barrel) ด้วยระบบอกรถูบ (Ram) หรือสกรู (Screw) ที่อยู่ภายใน เนื้อยางจะถูกหลีดผ่านหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งเป็นส่วนปลายสุดเข้าสู่รูปชิ้นงานของแม่พิมพ์ โดยรูปชิ้นนี้จะเชื่อมต่อกับทางวิง (Runners) และรูเข้า (Gates) ก่อนเข้าสู่เม้า (Cavity) ต่อไป โดยที่แม่พิมพ์จะมีตัวทำความร้อนที่มีลักษณะเป็นแท่ง (Heater Rods) ติดอยู่เพื่อทำให้ยางเกิดกระบวนการวัลภาไนซ์ หลังจากยางสุกแล้วแม่พิมพ์จะเปิดออกเพื่อปลดชิ้นงานโดยสามารถนำชิ้นงานออกมาด้วยผู้ปฏิบัติงาน หรือใช้แขนหุ้นยนต์ที่ยึดออกแบบอัตโนมัติได้ ตัวอย่างแม่พิมพ์และกระบวนการการฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในรูปที่ 21 และ 22

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



รูปที่ 21 ส่วนประกอบต่างๆของแม่พิมพ์ขึ้นรูปแนวตั้ง และแนวนอน [24]



รูปที่ 22 แสดงการขึ้นรูปข้างค่ายวิธีการฉีด (Injection Moulding) [26]



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

#### ข้อดีของกระบวนการฉีดพื้นฐาน

- อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเนื้อยางสูงกว่าที่ใช้ในวิธีการอัดและการอัดสั่ง
- เนื่องจากอุณหภูมิของเนื้อยางที่ถูกฉีดเข้ามาใกล้เคียงกับอุณหภูมิฉีด ทำให้การถ่ายเทอุณหภูมิระหว่างการบ่มมีน้อยมาก ดังนั้นจึงเกิดแรงดันภายในน้อยมาก ซึ่งเป็นผลให้การเกิดรอยฉีกหรือรอยกัด (Backrind) บริเวณแนวเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line) ลดลง ได้มาก
- ไม่จำเป็นต้องตัดแบ่ง หรือทำรูปทรงก่อนฉีด เพราะสามารถป้อนเนื้อยางแบบสายยาวหรือเป็นเม็ด ได้เลย

- ไม่มีเศษยาง (Flash) ยาง หรือลดน้อยลงมาก
- ลดการเกิดการอันของอากาศ (Air Traps)
- สามารถใช้ระบบการผลิตแบบอัตโนมัติได้
- รองการฉีด (Cycle Time) เร็ว สามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนมาก

#### ข้อเสียของกระบวนการฉีดพื้นฐาน

- แม่พิมพ์จำเป็นต้องทนต่อแรงดันสูง ทำให้ต้องใช้เหล็กที่มีความแข็งมาก และใช้ความละเอียดสูงในการผลิต
- เนื่องจากแม่พิมพ์ฉีดยางมีระบบทางวิ่งทำให้เสียเนื้อยางในส่วนดังกล่าว เป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตมากกว่าการอัดและการอัดสั่ง [27]

### 3.7 การออกแบบแม่พิมพ์ (Mould Design)

สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบแม่พิมพ์คือการออกแบบแม่พิมพ์นี้ดันจะต้องพิจารณาถึงการเชื่อมโยงกันของส่วนประกอบต่างๆทั้งหมดในการทำงานและความคุณแม่พิมพ์ โดยทั่วไปแล้วในการเปลี่ยนชิ้นงานไปจากเดิมนั้นจะต้องคำนึงถึงความเป็นไปได้ซึ่งจะต้องดูถึงจำนวนของผลกระทบของส่วนผสมของยางที่ไหลไปในช่องทางไหหลินช่องนำรีด (Sprue) [30] และตลอดทางเดินของยางภายในเครื่องฉีดยางตลอดจนที่เนื้อยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์จนเต็มแม่พิมพ์

ในการฉีดยางนั้นจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดทั้งหมด ซึ่งมีความสำคัญมาก เพราะในการออกแบบแม่พิมพ์จะต้องออกแบบระยะเวลาในการทำงานของขั้นตอนต่างๆของแม่พิมพ์นี้ดังนั้น เสริมสิ่นกระบวนการ การ ในการคำนวณรีจของการควบคุมแม่พิมพ์นี้ดันจะขึ้นอยู่กับการออกแบบแม่พิมพ์ที่ดี

Mulligan กล่าวว่าไม่มีหนังสืออธิบายในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์แม่พิมพ์ฉีดยาง การออกแบบแม่พิมพ์นี้จะต้องใช้ความสามารถและการทดลองเท่านั้น ซึ่งการออกแบบแม่พิมพ์นี้จะเป็นกุญแจสำคัญในการช่วยลดกำลังคนลงซึ่งจะขึ้นอยู่กับระบบในการออกแบบว่าดีมากน้อยแค่ไหน

ในเบื้องต้นนี้จะเริ่มต้นพิจารณาที่เครื่องฉีดก่อนว่าจะเป็นเครื่องที่ฉีดในแนวตั้งหรือแนวนอน เนื่องจากจะต้องพิจารณาในการเปิดแม่พิมพ์ออก เครื่องที่เปิดแม่พิมพ์ในแนวนอนจะได้เปรียบโดยที่เมื่อขยะที่แม่พิมพ์เปิดออก แม่พิมพ์จะแยกจากกันได้ง่ายโดยนำหักของตัวมันเองหรือจะใช้กลไกอัตโนมัติในการแยกออกจากกันโดยอุปกรณ์ในการเคลื่อนที่ขึ้นลง แม่พิมพ์ที่เปิดในแนวตั้งโดยปกติจะง่ายเนื้อยางไปในช่องทางที่เชื่อมต่อกันเข้าไปในผิวของรูปทรงชิ้นงาน โดยจะเข้าไปพนกันที่กึ่งกลางของแม่พิมพ์ แม่พิมพ์ที่เปิดในแนวนอนโดยปกติจะง่ายเนื้อยางผ่านเข้าไปในช่องทางจ่ายผ่านทางวิ่งซึ่งจะสร้างขึ้น จะตัดกันที่ครึ่งของแม่พิมพ์

ในการพิจารณาที่ความต้องการโดยให้ขนาดของเรื่องนี้ด้านในการใช้ขึ้นอยู่กับ

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

4) การฉีดหรือการส่งถ่ายความดันนี้จะสำคัญต่อเนื้อยางที่จะไหลเข้าไปภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแม่พิมพ์และตัวเนื้อยาง

ที่เห็นได้ชัดเจนแบบคร่าวๆ คือ ความจุของเนื้อยางภายในบ้าชิ้นงาน (Shot Capacity) แรงดันในการกดและแรงดันในการฉีดของเครื่องจักร กฎในการออกแบบแม่พิมพ์ ผลที่เกิดจากแรงดันในการฉีด และพื้นที่ผิวของแม่พิมพ์รวมกับทางวิ่งน้อยกว่าแรงปิดของแม่พิมพ์มาก

วัสดุที่จะนำมาสร้างแม่พิมพ์นั้นมีส่วนสำคัญมาก แม่พิมพ์ที่ดีนี้จะทำให้เกิดเศษยาง (Flash) หรือแฟลชแบบอิสระทั่วทั้งหมดของผิวแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องสร้างจากเหล็กที่แข็งแรงทนต่อแรงดันในการฉีด 137-206 MN/m<sup>2</sup> (20,000 – 30,000 lbf/in<sup>2</sup>) ที่กระทำ การปิดตัวจะทำให้เกิดแฟลช และความเค้นจะต้องไม่มีก่อนที่จะเสร็จและจะต้องหลีกเลี่ยงการปิดตัวเนื่องจากความร้อน และแรงที่กดและบริเวณผิวที่ประกอบกันนี้จะต้องเรียบสนิท

กัน แรงกดที่กระทำนั้นจะต้องทำในบริเวณผิวรอบๆ ผิวrukปรงชิ้นงาน ทางวิ่ง ช่องทางเข้า และช่องทางจ่าย และต้องทำให้พื้นที่ส่งจ่ายและรอยต่อนั้นแนบสนิทกันเวลาปิดแม่พิมพ์

การออกแบบแม่พิมพ์นิดสำคัญนั้นสำคัญที่จะต้องคำนวนถึง

- (1) การควบคุมอุณหภูมิสูงในการทำงานบอยครั้ง 200-230°C (392-446°F)
- (2) การเป็นของเหลวของเนื้อยาง
- (3) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเหลว (เนื้อยาง) โดยรولدเร็ว

เมื่อแม่พิมพ์มีความร้อนเกินกว่า 200°C (392°F) แม่พิมพ์จะเกิดจากการขยายตัวให้มีการเคลื่อนตัวที่สูงทำให้ตำแหน่งต่างๆ นี้ไม่ได้แนวตามเดิมซึ่งไม่เป็นที่ต้องการชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ ส่วนเบื้องกระทุ้ง (Ejectors) จะต้องทำให้มีค่าเพื่อที่เพียงพอ ถ้าหากไปขัดขวางการเคลื่อนของแม่พิมพ์จะปิดกีดกั้นที่จะแก้ไขให้ถูกต้อง

ในกรณีที่ไม่ได้ขนาดของแม่พิมพ์ตามที่กำหนด อาจจะทำให้เกิดแฟลชชิ้นอย่างมากได้ แต่เหล็กในการกำหนดระยะหรือหมุดนำศูนย์นั้นทำขึ้นเพื่อที่จะทำให้ตำแหน่งนั้นแม่นยำ และจะต้องพิจารณาถึงของการขยายตัวระหว่างวัตถุที่สอง ซึ่งจะต้องสร้างระยะเพื่อรักษาความแม่นยำ ซึ่งอาจจะสูญเสียแนวเส้นในการปิดตัวแห่งเหล็กกำหนดระยะตัวเมียนนั้นจะสามารถอยู่รับตัวผู้เนื้อยางจะไหลเข้าไปในช่อง วิธีการในการกำหนดตำแหน่งจะทำการกำหนดที่สีตำแหน่งที่มุ่งด้านขวาของแต่ละชิ้น และทำการจำกัดการขยายตัวให้มีขนาดไปในทิศทางการเคลื่อนที่ โดยแนะนำให้ใช้พินและหมุดในการให้ตำแหน่งที่ถูกต้องซึ่งจะมีลักษณะที่ดีในการสวมกันและที่สำคัญจะต้องมีความแข็งเพื่อที่จะรักษาขนาดเดิมไว้เมื่อมีการขยายตัวเนื่องจากความร้อน

ระดับของเหล็กที่ใช้จะต้องคึกว่าโดยปกติทั่วไปที่ใช้ทำแม่พิมพ์อัด เช่น ต้องการ Stainless เพื่อป้องกันสนิม มีความแข็ง มีการทำให้แข็งและเหล็กนั้นจะต้องเรียบ เหล็กที่มีความทนทานสูงนั้นจะช่วยให้ระยะเวลาในการใช้แม่พิมพ์นานขึ้น โดยเฉพาะในพื้นที่สัมผัสกับเนื้อยาง ในการเพิ่มขึ้นของอายุการใช้งานของพื้นที่สัมผัสกับยางนั้นควรที่จะทำการขัดให้มีความมั่นคงที่สูง และการทำในชุด Pins และตัวแแพนประกอบด้วยการขัดให้มั่นคงขึ้นจะทำให้คุณสมบัติในการโหลดคืนในทางวิ่ง

### 3.7.1 การหดตัวของยางที่ขึ้นรูปโดยแม่พิมพ์ (Mould Shrinkage)

ปัญหาเกี่ยวกับการหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางมีความสำคัญโดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์พวงชิ้นส่วนที่ใช้งานเครื่องกลและงานวิศวกรรม เช่น ยางอะไหล่ ยางซีล และยางปะเก็น ฯลฯ โดยปกติแล้วผลิตภัณฑ์ยางมักหดตัวภายหลังจากการอบคงรูปชิ้นงานแล้ว เพราะระหว่างการอบคงรูปยางใช้ความร้อน ซึ่งจะก่อให้เกิดการขยายตัวของห้องแม่พิมพ์ (กรณีการอัดคงรูปโดยแม่พิมพ์) และยาง แต่การขยายตัวของห้องทั้งสองสิ่งนี้มีความต่างกัน การหดตัวของผลิตภัณฑ์ยางแม่พิมพ์จะมากน้อยอย่างไร ขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Coefficient of Expansion) ของยางที่คงรูปแล้ว และสัมประสิทธิ์การขยายตัวของแม่พิมพ์ รวมทั้งอุณหภูมิของการอัดยางให้คงรูป ส่วนของยางที่อยู่ในแม่พิมพ์อย่างเต็มพิมพ์ ขณะการอบให้คงรูปจะหดตัวจะมากที่สุดตามอุณหภูมิห้อง การหดตัวของยางจะมากกว่าการหดตัวของแม่พิมพ์ เพราะยางมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวมากกว่าแม่พิมพ์ นั่นคือการหดตัวของยางจะยิ่งมากเมื่อยางและโลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวแตกต่างกันมาก และเมื่ออุณหภูมิของการ

อบให้ยางคงรูปต่างกับอุณหภูมิห้องมาก อย่างไรก็ตามการคำนวณหาองศาของหารดตัวของยางว่าจะมากหรือน้อยเพียงใดให้ได้ค่าที่แน่นอนนั่นค่อนข้างยาก เพราะสัมประสิทธิ์การขยายตัวของยางคงรูปจะเปลี่ยนแปลงไปตามส่วนประกอบของสูตร

โดยปกติแล้วสูตรยางที่มีเนื้อยางมาก จะให้ยางคงรูปที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงสารตัวเดิมมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวใกล้เคียงกับสัมประสิทธิ์การขยายตัวของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ สารอื่นๆ ซึ่งจะคล้ายได้ในอะซิโตัน ได้แก่ สารตัวเร่ง สารป้องกันยางเสื่อม สารช่วยทำให้ยางนิ่ม เรซิน จีฟิง ชัลเฟอร์ แฟคทีส และยางรีเคลม เหล่านี้มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวใกล้เคียงกับยาง ฉะนั้นในการคำนวณหาการลดตัวของยางจึงนับสารเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของยาง

### 3.7.2 วัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์

ในการเลือกใช้วัสดุที่จะมาทำแม่พิมพ์ฉีดนั้นจะต้องคำนึงถึงจุดวิกฤตที่มีมากกว่าแม่พิมพ์อัดและแม่พิมพ์ส่งถ่าย ซึ่งในแม่พิมพ์ฉีดนั้นจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขของการควบคุม ซึ่งจะมีความดันที่สูง อุณหภูมิที่สูงและความถี่ของใช้เคิลการทำงาน ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวจะทำให้เกิดอัตราการสึกหรอที่สูง โดยเฉพาะจุดวิกฤตของเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line) ดังนั้นในการเลือกเหล็กที่จะนำมาทำแม่พิมพ์นั้นจะต้องมีคุณรูปที่สูงซึ่งจะทำให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุน ในการสร้างแม่พิมพ์จากวัสดุที่มีคุณภาพในตอนต้นอาจจะเปลี่ยนบางแม่พิมพ์ที่มีจุดวิกฤตสูงๆ ก่อน และต่อจากนั้นทำการเปลี่ยนทั้งหมด ซึ่งจะทำให้คุณภาพของแม่พิมพ์สูงขึ้นและจะทำให้ผลิตชิ้นงานได้นานขึ้น [31]

ความเก็บตက้าง (Residual Stress) ในแม่พิมพ์จะเกิดจากการขึ้นรูปของแม่พิมพ์ หรือกระบวนการทางความร้อนที่เกิดขึ้นตอนสร้างแม่พิมพ์ หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของเหล็ก เช่น การรีดเย็น หรือการโก่งงอ, ในกรณีของการเกิดความเก็บตက้างก่อนขึ้นรูปแม่พิมพ์ คือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างสูงของชิ้นแม่พิมพ์ เช่น การเขื่อน การขึ้นรูป และการชุบแข็ง (Hardening) ในกรณีของความดันที่เกิดจากความร้อน (Thermal Stress) ซึ่งจะทำให้ความแข็งแรงเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ซึ่งจะทำให้ค่า Yield Strength เพิ่มขึ้น วิธีการ Subharmonic Stress จะเป็นวิธีการที่จะทำให้ความเก็บตค้างนี้ลดลง

เหล็กที่ใช้ทำแม่พิมพ์ฉีดยางนั้นต้องการเนื้อเหล็กที่สะอาดและปราศจากลักษณะปะปน รูพรุนเล็กๆ ที่เนื้อเหล็ก (Porosity) และความบกพร่องอื่นๆ ซึ่งจะมีผลต่อการสร้างแม่พิมพ์เป็นอย่างมาก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการเลือกเหล็กที่ใช้ผลิต เหล็กที่ผ่านกระบวนการการทำให้แข็งนั้นจะขึ้นรูปได้ยากกว่าเหล็กอ่อน ซึ่งจะต้องการเวลามากกว่าการขึ้นรูปเหล็กอ่อนประมาณ 28% เหล็กที่ผ่านกระบวนการการทำให้แข็งนั้นจะนิยมใช้สร้างแม่พิมพ์ฉีด เพราะจะให้ความทนทานที่สูง ในกระบวนการสร้างในปัจจุบันและการปรับปรุงคุณภาพของเหล็กนั้นต่างจากสมัยก่อน

ซึ่งจะมีความยากมากกว่าโดยมีความยากในการขึ้นรูปเหล็กที่นำมาใช้ทำแม่พิมพ์ ซึ่งต้องการลักษณะจำเพาะของเหล็กที่จะนำมาสร้างแม่พิมพ์โดยต้องการความมั่นคงและความง่ายในการเขื่อนประสานเหล็ก เหล็ก NAK 55, นั้นจะครอบคลุมคุณลักษณะที่ต้องการของเหล็กที่ใช้ทำแม่พิมพ์ ซึ่งจะใช้แทนเหล็ก 4140 และ P20

เหล็กบางชนิดสามารถนำผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (การปรับปรุงทางความร้อน) ซึ่งจะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของความแข็งนั้นจะเกิดขึ้นจากบริเวณผิวที่ลึกลงไปภายในผิวของแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องการความแข็งที่มีลักษณะคงที่เท่าๆ กันตลอดในทุกระดับของความลึก ความแข็งสูงของแม่พิมพ์นั้นจะช่วยให้บริเวณพื้นที่ภายในของแม่พิมพ์จะทนต่อแรงกดที่เกิดขึ้นซึ่งจะทำให้เกิดรอยราวยาวขึ้น ซึ่งจะเกิดจากการทำงานของวงจรการทำงานของแม่พิมพ์ รอยกดที่จะทำให้เกิดการสึกหรอที่มีรอยราวนี้ส่วนมากจะเกิดในจุดที่เป็นรอยกดของบริเวณพื้นที่ๆ เป็นจุดวิกฤตในแม่พิมพ์ที่ใช้เหล็กอ่อนในการทำ การที่จะลดรอยราวยาวที่เกิดจากการกดนั้นจะสำคัญมาก ซึ่งจะทำให้อาชญาการใช้งานของแม่พิมพ์นั้นสูงขึ้นส่วนใหญ่แล้วจะใช้ชนิดของเหล็กในการทำแม่พิมพ์คือตาม 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 ตัวอย่างในเหล็กการรับอนสามารถที่จะแบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

- กลุ่มที่มีคาร์บอนต่ำ (Low Carbon (มีคาร์บอนไม่เกิน 0.35%)) จะมีราคาถูกที่สุด และสามารถเพิ่มความแข็งได้โดยการเพิ่มคาร์บอน (Carburizing) เท่านั้น

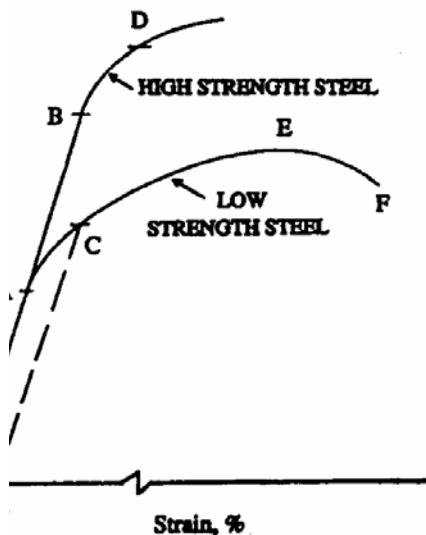
- กลุ่มที่มีคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon (0.35% ถึง 0.5%)) สามารถที่จะทำให้แข็งได้ประมาณ 54 Rc ซึ่งขึ้นอยู่กับการรับอนที่มีอยู่
  - กลุ่มที่มีคาร์บอนสูง (Carbon (0.5 ถึง 1%)) สามารถที่จะทำให้ความแข็งที่สูงได้

การรับอนที่มีอยู่ประมาณ 0.3% สามารถที่จะทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นได้ โดยปริมาณการรับอนที่มีอยู่สูงจะทำให้ผลกระทบในการปรับปรุงความแข็งนั้นน้อยลง ซึ่งระบบ ANSI จะอธิบายได้ดังนี้ ตัวอย่างเหล็ก 4140, 41 เป็นตัวเลขที่บอกรหัสของโลหะผสมที่มีอยู่ ซึ่งในที่นี้จะได้แก่ Chromium และ Molybdenum, และ 40 จะบอกถึงปรอร์เซ็นต์ของการรับอน คือ มีคาร์บอนอยู่ 0.4%

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

Yield Strength เป็นค่าที่สำคัญตัวหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบแม่พิมพ์ ซึ่งค่า Yield Strength ของเหล็กนั้นจะทำการวัดโดยการดึงหรือการอัด โดยการกำหนดในตัววัสดุถ้าจุดนั้นได้รับแรงและกลับมาที่จุดเดิมนั้น เราจะเรียกว่าอยู่ในช่วงของการยืดตัวในช่วงอิลาสติก (Elastic Deformation) หรือช่วงอิลาสติก และ

ในช่วงที่ค่าความเค้นของวัตถุนั้นอยู่เหนือจุด Yield Strength จะเกิดการขีดตัวอย่างการ โดยปกติค่าของ Yield Strength ในรูปของ Offset Yield Strength โดยจะอยู่ที่ 0.10% ถึง 0.2% ของความเครียด ดังรูปที่ 24 จะแสดงสืบไป ให้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น – ความเครียดของเหล็กซึ่งจะมีความสัมพันธ์กัน



รูปที่ 24 แสดงถึงสืบความสัมพันธ์ของความเค้น - ความเครียด

เหล็กที่มีความแข็งแรงสูงกับต่ำและแสดงสืบความสัมพันธ์ของความเค้น – ความเครียดที่ 0.2% ที่เหล็กความแข็งแรงต่ำที่จุด A นั้นจะแสดงถึงจุด Yield Strength ของเหล็กที่มีความแข็งต่ำ B Yield Strength สำหรับเหล็กที่มีความแข็งแรงสูง C เป็นจุดแสดงสืบที่ 0.2% ของ Yield Strength ของเหล็กความแข็งแรงต่ำ D และแสดงสืบที่ 0.2% ของจุด Yield Strength สำหรับเหล็กที่มีความแข็งสูง E เป็นจุดสูงสุดของความเค้นของเหล็กที่แข็งแรงต่ำ F ความเค้นที่จะทำให้เกิดการขาดสำหรับเหล็กความแรงต่ำ

โดยทั่วไปแล้วที่ความเค้นที่เกิดขึ้น 10,000 ปอนด์ต่อตารางนิวตัน (psi) จะนิยมใช้ความแข็งที่ 44 Rc และใช้เหล็กที่มีความแข็งสูง ซึ่งโดยทั่วไปในการควบคุมการทำงานที่อุณหภูมิต่ำนั้นจะสำคัญมากสำหรับวัสดุที่เป็นยาง (TSEs) ค่า Young's Modulus สำหรับเหล็กคาร์บอนจะลดลงประมาณ 10% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิปกติไปเป็น  $250^{\circ}\text{C}$  หรือ  $400^{\circ}\text{F}$  และสำหรับแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กสแตนเลส ค่าจะเพิ่มเป็น 10.9% ที่อุณหภูมิ  $68^{\circ}\text{F}$  ไปเป็น  $400^{\circ}\text{F}$  สิ่งสำคัญคืออุณหภูมิจะทำให้เหล็กเกิดการขยายตัวซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบทั้งแม่พิมพ์ตัวบนและตัวล่าง

ส่วนใหญ่แล้วแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กหล่อจะมีค่า Yield Strengths จะอยู่ประมาณ 50,000 ปอนด์ต่อตารางนิวตัน (psi) ซึ่งจะมีค่าความปลดดักภัยอยู่ที่ 7 โดยความเค้นที่ใช้ในการทำงานโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในประมาณ 700 ปอนด์ต่อตารางนิวตัน (psi) ควรที่จะทำหน้าสัมผัสของแม่พิมพ์ตัวบนให้มีหน้าสัมผัสที่น้อยในการที่จะสัมผัส

กับแม่พิมพ์ตัวล่างเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความเสียหายหน้าสัมผัสของแม่พิมพ์ตัวล่างพื้นส่วนใหญ่จะเกิดการสึกหรอเมื่อมีการใช้งานไปแล้วระยะหนึ่ง

ที่สำคัญต้องพิจารณาดูว่าการเลือกยางนั้นเลือกชนิดไหนและมีส่วนผสมอะไรบ้างแล้วจึงพิจารณาในการที่จะเลือกวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์และความสำคัญในการขึ้นรูปและความแตกต่างในระดับของการขัดเจา (Polishing) ในเหล็ก P20 และการดูแลรักษาแม่พิมพ์

### 3.7.3 แบบของแม่พิมพ์ (Mould Layout)

แบบของแม่พิมพ์นั้นจะต้องพิจารณาถึงการออกแบบสำหรับรูปทรงเบ้าชิ้นงานในแม่พิมพ์ (Cavities) ชุดให้ความร้อน (Heaters) เครื่องมือวัดอุณหภูมิ (Thermocouples) ตำแหน่งของ dowels จำนวน (insulation) ปลอกนำร่อง (Sprue) ทางวิ่ง (Runners) รูปิด (Gates) ชุดกระทุกออก (Ejectors) ช่องอากาศ (Vents) ช่องในการฉีกขาด (Fear Off Grooves) และระบบสูญญากาศ (Vacuum Attachments)

### 3.7.4 แบบของเบ้าชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ (Cavity Layout)

แบบของเบ้าชิ้นงานที่ดีนั้นจะต้องพิจารณาโดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนของเบ้าชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ เพราะจะคุ้มค่าในการลงทุนซึ่งจะต้องมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ภายใต้แม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องพิจารณาในการออกแบบของแม่พิมพ์ที่เหมาะสมและต้องมีประสิทธิภาพด้วย ในการให้ลองของยางเข้าไปในรูปทรงของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์นั้นต้องการการให้ลองเข้าไปในแต่ละเบ้าชิ้นงานนั้นเวลา ณ ตำแหน่งต่างๆ ต้องเท่ากัน อัตราการให้ลองเท่ากันโดยจะต้องทำการควบคุมสมดุลย์กันของการให้ลอง จุดศูนย์กลางในการจ่ายยาง

### 3.7.5 เบ้าชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ (Cavities)

เบ้าของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์จะแสดงให้เห็นรูปร่างของตัวเนื้อยางซึ่งจะสำคัญสำหรับความทนทานต่อการเกิดความดันที่สูงและความเก็บที่เกิดขึ้นหลังจากที่เนื้อยางให้ลองเข้าไป และอาจเกิดภาวะในแม่พิมพ์

เวลาที่ไม่สม่ำเสมอของการให้ลองของเนื้อยางที่เข้าไปในแม่พิมพ์สามารถทำให้ผนังของเบ้าชิ้นงานเกิดจุด Yield Point ซึ่งความหนานี้จะไม่พอเพียงในการเพิ่มเติม ตัวแม่พิมพ์นั้นจะห่อหุ้มเบ้าของชิ้นงานอยู่ค่าความหนาที่พอเพียงนั้นจะต้องทนต่อการเกิดการบิดงอซึ่งจะมีส่วนทำให้เกิดผิวที่มีลักษณะมันวาวเนื่องจากการกระแทกรอยบุดดี ความหนาต่ำสุดอยู่ที่ 0.875 นิวตันซึ่งจะแนะนำให้ใช้กับแม่พิมพ์ตัวบน ตัวแม่พิมพ์นั้นจะต้องมีความทนทาน และทนต่อจำนวนรอบในการทำงานที่สูงซึ่งจะต้องมีการบำรุงรักษาตามระยะเวลาที่กำหนด

องค์ประกอบความสำคัญอื่นๆ ได้แก่ รูปแบบในการวางของเบ้าภายในแม่พิมพ์ (Cavity Layout) และพื้นที่ภายในเบ้าของชิ้นงานในแม่พิมพ์ (Cavity Spacing) ในการวางรูปแบบของเบ้าชิ้นงานในแม่พิมพ์และช่องทางวิ่งต้องการผลที่ได้คือต้องการที่จะทำให้ความดันที่กระจายตัวนั้นค่อนข้างที่จะคงที่โดยการทำตามขวางกับพื้นผิวของแม่พิมพ์บริเวณเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line) การกระจายตัวที่ไม่ได้รูปมีแนวโน้มที่จะทำให้

แม่พิมพ์มีการเปิดตัวออกจากกันที่บริเวณเส้นแบ่งแม่พิมพ์ซึ่งจะทำให้เกิดการสึกหรอที่ผิวໄได้ เช่นเกิดการมั่นวนวัวขึ้น เป็นต้น

การเกิดเศษยาง (Flash) เป็นลักษณะของแผ่นฟิล์มน้ำๆ ของบริเวณภายนอกของเนื้อยางที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวแม่พิมพ์ภายในรูปทรง ในการกำหนดการเกิดฟิล์มน้ำๆ ในชิ้นงานบางชนิดนั้นจำเป็นที่จะต้องเกิดขึ้นตัวอย่างเช่น ในจำนวนกันกระแตไฟฟ้าในการออกแบบแม่พิมพ์พื้นฐานโดยปกติจะออกแบบให้ตัวยึด (Clamped) รวมกันในแนวแก่นอนของชิ้นงาน การเกิดฟิล์มน้ำๆ ที่รอยต่อของแม่พิมพ์ชิ้นงานจำนวนในแม่พิมพ์ตรงบริเวณนี้จะต้องขัดให้มีผิวเรียบเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการเกิดรอยต่อของชิ้นงานที่เป็นแนวยาวในแนวแก่นอนเมื่อเกิดรอยต่อชิ้นงานจะต้องทำการแก้ไข ในการปรับปรุงออกแบบแม่พิมพ์เปลี่ยนตำแหน่งของการประกอบกันของแม่พิมพ์จากแนวอนเป็นแนวเส้นรอบวงและลดแนวการประกอบของกันในแนวอนของแม่พิมพ์

แผ่นฟิล์มน้ำๆ เป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบแม่พิมพ์ปีด เช่น การออกแบบโอริง (O-ring) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับโอริงที่มีขนาดเล็ก (Small O-ring) แผ่นฟิล์มน้ำๆ ที่เกิดบนโอริงจะเกิดที่บริเวณด้านในสุดของเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กของโอริง (Inside Diameters, I.D.) เป็นอย่างมากและเป็นการยากที่จะทำให้ลดลง ในการออกแบบแม่พิมพ์ที่จะทำให้ลดปัญหานี้เมื่อใช้เท่งสอดแทรกตรงกลางของชิ้นงาน (Pin Pierces) และทำการลดฟิล์มน้ำๆ ลงโดยทำหลังการเกิดปฏิกิริยา (Cross Linking) แผ่นฟิล์มน้ำๆ ที่ผิวด้านนอก (O.D.) สามารถลดลงได้โดยวิธีการธรรมชาติ เช่น การ Cryogenic Tumbling

(ความสมมาตรที่เท่ากันนั้นจำเป็นในการออกแบบรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ เช่น แผงหน้าปัดด้านหน้าของรถ การขัดให้เข็มเจากายในรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ในการขัดนั้นเมื่อเสร็จแล้วความละเอียดจะอยู่ที่ 10 ถึง 20 ไมโครนิวตัน ที่จะเป็นที่ยอมรับได้ ข้อที่ควรจำในการขัดเงาที่จะได้ผลดีจะต้องทำโดยวิธีการที่ถูกต้องและใช้กระดาษทรายเบอร์ 320 ในขั้นตอนสุดท้าย)

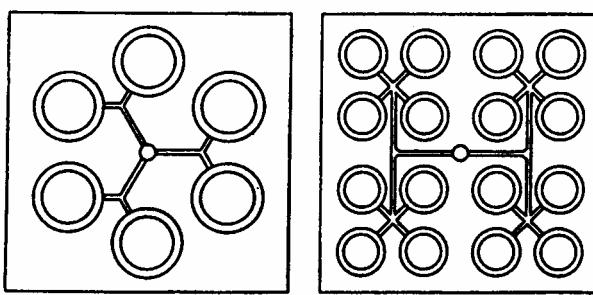
ในความเป็นไปได้ของการมีจำนวนเบ้าชิ้นงานภายในแม่พิมพ์มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้นั้นยังเป็นปัญหาอยู่ในหลายข้อ ลิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ แรงกระทำกับผิวที่รอบของรูปทรง เช่น งานที่บริเวณริมขอบของแม่พิมพ์ตอนแม่พิมพ์ปีด ซึ่งจะทำให้การควบคุมอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในรูปทรงชิ้นงานนั้นยากโดยจะเกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งของรูปทรงชิ้นงานและยังมีปัญหาต่อชิ้นงานอยู่ที่บริเวณมุมของแม่พิมพ์ สำหรับแม่พิมพ์พลาสติกระยะทางการอยู่ที่ 3 นิวตัน จากผิวของรูปทรงแม่พิมพ์กับผิวนอกสุดของแม่พิมพ์ แต่ควรจะเริ่มที่สี่นิวตันไป การทำให้แม่พิมพ์มีความเที่ยงตรงในการลงมาประกอบกัน ซึ่งจะทำให้พื้นที่ที่ออกแบบไว้ตรงกันสามารถกำหนดได้โดยวิธี เช่น ให้เข็มนำ (Leader Pins) ใช้ปลอกนำ (Bushing) และการใช้สลักร้อย การใช้สลักร้อยนั้นจะเป็นตัวกลางในการเลื่อนขึ้นลงระหว่างแม่พิมพ์ที่อยู่กับที่กับตัวที่เคลื่อนที่ และต้องพิจารณาตอนประกอบกันของช่องจะต้องตัดกันที่บริเวณขอบ การเขื่อนต่อสำหรับห่อสูญญากาศ และระบบทางวิ่ง การวางแผนตำแหน่งของทางวิ่ง เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาในการเขื่อนต่อ กันของช่องว่างซึ่งต้องพิจารณาดังตัวอย่างช่องทางวิ่งของของไอลที่ถ่ายเทความร้อนและชุดการให้ความร้อนนั้นจะออกแบบให้ผนังของรูปทรงชิ้นงานนั้นจะต้องมีความหนาแน่นพอเพื่อที่จะขัดขวางการเปลี่ยนแปลงรูปทรงไปของผนังในรูปทรงชิ้นงาน ในการออกแบบแม่พิมพ์นั้นจะต้องคำนึงถึงกฎเกณฑ์ข้อบังคับในการออกแบบและพิจารณาองค์ประกอบอื่นๆ ประกอบด้วยโดย

อาจจะเปรียบเทียบกับระบบของเทอร์โมพลาสติก ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการอุดแบบแม่พิมพ์ฉีดยางได้เป็นอย่างดี

กฎเกณฑ์ในการอุดแบบสำหรับระบบทางวิ่งพิจารณาในรายละเอียดดังนี้

- อุดแบบให้ระบบทางวิ่งให้มีปริมาณน้อยที่สุด
- อุดแบบสำหรับทางวิ่งให้ความตันสูญเสียค่อนข้างตื้น
- พิจารณาการเชื่อมต่อของตำแหน่งรูเข้า (Gate) ทุกๆตำแหน่ง

ความพร้อมกันของการ ไอลเข้าที่ภายในแม่พิมพ์ของเนื้อยางภายในแม่พิมพ์เป็นจุดมุ่งหมายหลักสำหรับการอุดแบบแม่พิมพ์ การทำให้ทางวิ่งมีการสอดคล้องกันของการ ไอลนั้นสำคัญ แต่ยังไม่พอเพียงที่จะทำให้บรรลุถึงจุดมุ่งหมายที่จะทำให้เนื้อยาง ไอลเข้าพร้อมๆ กัน เพราะยังมีปัจจัยอื่นๆ เช่น ขนาดของรูเข้าและอุณหภูมิเนื้อยางที่มีผลกระทบต่อการ ไอลเข้าไปในเบ้าชิ้นงาน รูปที่ 25 แสดงการจัดวางเบ้าชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์ฉีด



รูปที่ 25 แสดงการจัดวางเบ้าชิ้นงานสำหรับแม่พิมพ์ฉีด

แม่พิมพ์ฉีดที่แสดงในรูปที่ 25 จะแสดงให้เห็นการเชื่อมต่อในแต่ละเบ้าชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องพิจารณาถึงความสมดุลย์กับความถูกต้องกับความสมมาตรกันของจำนวนรูปทรงชิ้นงานหลังจากการทดสอบการ ไอลแล้วรูปทรง H จะขาดความสมดุลังแสดงในรูปที่ 25 ซึ่งผลสรุปคือการอุดแบบนี้ใช้กับการอุดแบบที่เป็นแม่พิมพ์ของเทอร์โมพลาสติกและที่สามารถที่จะเริ่มน้ำໄปใช้ในการอุดแบบแม่พิมพ์เป็นยางได้

ความคื้นเครื่องและความร้อนจะเปลี่ยนแปลงตลอดในตัวโพลิเมอร์ในการ ไอลไปในทางวิ่ง ทำให้เกิดการ ไอลที่ไม่สมดุลย์ภายในแม่พิมพ์ที่มีรูป่างแบบ H จะแก้ไขปัญหาที่เกิดกับการ ไอลไม่สมดุลย์ว่า “Melt Flipper” (การละลายของครีบ) การทำให้โพลิเมอร์เกิดการหมุนและวิธีการในการที่จะทำให้เกิดการ ไอลที่สมดุลย์กันนั้นมีอยู่หลายวิธี เช่น การที่มุนที่เป็นกึ่งเพิ่มเข้าไปในตัวทางวิ่งและอัตราส่วนของการฉีดที่จะต้องสัมพันธ์กัน มุนที่เป็นกึ่งนั้นจะเป็นมุนที่อยู่ระหว่างช่อง ไอลที่เชื่อมต่อกับตัวชิ้นงานและตัวกึ่งเอง การเพิ่มขึ้นของมุนที่กึ่งจะทำให้การควบคุมการเพิ่มขึ้นและการ ไอลไม่สมดุลย์ภายในรูปทรงแม่พิมพ์

มีหลายวิธีที่แตกต่างกันในการใช้สร้างเบ้าชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ โดยการขึ้นรูปโดยเครื่องจักรเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุด วิธีการขึ้นรูปสามารถทำรวมกันได้โดยการขึ้นรูปโดยเครื่องจักรแล้วตามด้วยวิธีการ Hobbing ทำโดยการลดความแข็งลง โดยการให้แรงกระทำให้เหล็กนั้นอ่อนลงบริเวณภายในรูปทรงของชิ้นงาน การทำ

Hobbing จะหมายความกับที่จะใช้กับแม่พิมพ์ที่มีจำนวนชิ้นงานมากและมีความซับซ้อนของความโค้งสูง แต่มีข้อกำหนดในรูปทรงที่มุ่งเหลมคม และมีส่วนตัดภายใน (Under Cuts) และแม่พิมพ์มีการขัดเจาที่สูงและมีการทำมุมทุกด้าน

การขึ้นรูปโดยการใช้กระแสไฟในการขับไล่โลหะออก (EDM) เป็นวิธีใหม่ที่เป็นที่นิยมในการขึ้นรูปร่างชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ EDM ต่างจากการทำ Hobbing ใน การที่จะสร้างรูปร่างของตัวชิ้นงานนั้นจะต้องนำข้าไฟฟ้าลงไปในแผ่นเหล็กที่ต้องการขึ้นรูปหรือใช้เส้นลวดลากผ่านแผ่นโลหะ ในการขึ้นรูปแบบ EDM นี้จะไปทำให้เกิดแรงที่กระทำสูงในขณะที่ทำการควบคุมการขึ้นรูปซึ่งปกติจะเกิดการขึ้นรูปโดยเครื่องจักรและแบบ Hobbing การ EDM สามารถใช้ในการขึ้นรูปรวมกับวิธีการขึ้นรูปอื่นๆ ในการสร้างร่องที่มีความลึกซึ่งถ้าต้องการความลึกในแม่พิมพ์ที่กำหนดไว้ครึ่งหนึ่งซึ่งสามารถใช้หัวกันได้ แต่ต้องสร้างร่องต่อโดยใช้ EDM ก็จะใช้เวลาการขึ้นรูปเท่าๆ กัน โดยปกตินั้นแนวทางการเลือกในการทำร่องจะต้องใช้หัวกับความเร็วสูง (High-Speed Milling) ในการกัดร่องให้ลึกลงไป 30 mm. ต่อจากนั้นใช้ EDM ตามจนได้ความลึกตามที่ต้องการ

แม่พิมพ์สำหรับผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่เป็นแนวหน้าปัดด้านหน้าของรถ (Fascia) ซึ่งจะต้องการความเที่ยงตรงเป็นอย่างสูงและต้องการแข็งแรง และความต้านทานต่อลมที่ประทับซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนรูปร่างระหว่างที่เคลื่อนที่ไปโดยความเร็วสูง ขนาดของอนุภาคที่กำหนดกันที่จะบรรจุนั้นจะอยู่ในระดับสูงภายในตัวเนื้อยาง (Compound) ซึ่งสามารถทำให้เกิดความแข็งแรงได้แต่ถ้าเกินไปจะทำให้ตัวเนื้อยางมีความหนักสูงภายในตัวแม่พิมพ์ดี ในการเลือกตัวพสมที่เป็นโพลิเมอร์ และส่วนพสมอื่นๆ ในเนื้อยางพสมแบบ EPDM เพื่อจะทำให้เกิดความสมดุลย์ในการให้ผลลัพธ์ที่ดี แนะนำให้ใช้โพลิเมอร์ที่มีความคงทนและมีความยืดหยุ่นสูง เช่น EPDM ในการติดต่อระหว่างตัวเนื้อยางและตัวแม่พิมพ์ สามารถใช้โพลีไพรีน (Polypropylene) ในการติดต่อระหว่างตัวเนื้อยางและตัวแม่พิมพ์

### 3.7.6 ช่องนำฉีดในแม่พิมพ์ (Sprue)

ตัวช่องนำฉีดนั้นจะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเครื่องฉีดกับแม่พิมพ์ฉีดยางซึ่งสามารถที่จะพิจารณาได้จากชิ้นงานและแม่พิมพ์ลักษณะทางเข้าจะมีลักษณะที่เข้าไปในช่องรูที่เล็กแล้วขยายออกไปจนใหญ่ มีลักษณะเป็นรูที่เรียว (Taper) ซึ่งจะมีลักษณะเป็นทางเข้าและออกหลังจากเสร็จ วงจรการทำงานซึ่งบางที่เราสามารถที่จะออกแบบช่องนำฉีดให้ตรงกับตัวเข้าของชิ้นงานได้โดยถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถนำฉีดได้โดยไม่ต้องแกะหัวแม่พิมพ์ จึงสามารถลดเวลาในการผลิตและลดต้นทุนของชิ้นงาน

### 3.7.7 การออกแบบช่องทางวิ่ง (Runner Design)

โดยทั่วไปแล้วการออกแบบช่องทางวิ่งนั้นจะออกแบบเป็นทรงกลมซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการให้ผลลัพธ์ที่ดี สามารถลดต้นทุนของการผลิตและลดเวลาในการผลิต แต่จะต้องคำนึงถึงความต้องการของชิ้นงาน เช่น ความต้องการที่ต้องมีช่องทางวิ่งที่ร้อนหรือช่องทางวิ่งที่เย็น (Hot or Cold Runner) ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดยาง เนื้อยาง

(Compound) ในช่องทางวิ่งที่ร้อนจะเกิดการยึดตัวกันภายในเนื้อยางเมื่อโดนความร้อน (Cross Links) และที่อยู่ในกระบวนการทำงาน แต่ในระบบทางวิ่งเย็นนั้นจะไม่เกิดขึ้น

ในการพิจารณาระยะทางระหว่างหัวฉีดจนถึงตัวชิ้นงานต้องมีการออกแบบที่เหมาะสม โดยปกติขั้นการไหลของเนื้อยางจะไหลออกจากหัวฉีดเข้าไปในช่องนำฉีดผ่านเข้าไปในช่องทางวิ่งไหลผ่านเข้าไปในรูเข้าและจะไหลผ่านเข้าไปในเบ้าชิ้นงานในแม่พิมพ์ ทางวิ่งมีลักษณะเป็นช่องภายในแม่พิมพ์โดยจะได้รับเนื้อยางจากช่องนำฉีดที่จุดศูนย์กลาง ทางวิ่งนั้นจะต้องพิจารณาถึงขนาดที่อยู่รอบๆ ทางวิ่งต้องการการออกแบบให้มีระยะทางสั้นที่สุดและตรงกับเบ้าชิ้นงานภายในแม่พิมพ์มากที่สุดเพื่อที่จะเป็นการลดของเสียจากเนื้อยางให้น้อยที่สุด ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการฉีดเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์นั้นสั้นลงด้วย ในการเลือกทางวิ่งที่ดีนั้นจะต้องเหมาะสมว่าจะเลือกใช้หน้าตัดของทางวิ่งแบบไหน ไหน ซึ่งจะแบ่งเป็นแบบหน้าตัดสี่เหลี่ยม เป็นทรงกลม และครึ่งวงกลม ใน การไหลนั้นจะต้องไหลผ่านโดยง่ายและที่มุนจะต้องทำเป็นแนวโถ้งเพื่อลดความดันที่สูญเสียไป

ในการออกแบบทางวิ่งนั้นสามารถที่จะใช้สมการในการช่วยได้โดยใช้คุณสมบัติของการไหล สมการ Poiseuille's สำหรับการไหลแบบร่วนเรียบ (Laminar (Non-Turbulent)) การไหลของของไหลแบบนิวโนเนียนในท่อ Capillary แสดงดังสมการที่ 51

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

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

การไหลของปริมาตรของของไหลแบบนิวโนเนียนจะเป็นอัตราส่วนของกำลังสี่ของรัศมีของท่อหรือพื้นที่หน้าตัดของท่อ โดยที่จะไม่มีการเพิ่มขึ้นของรัศมีของหัวฉีด ช่องทางวิ่ง และรูเข้า ซึ่งจะหาค่าของความแตกต่างในอัตราส่วนการไหลของยางผ่านเข้าไปในตัวชิ้นงาน

ความดันที่สูญเสียไปหรือความต้านทานของการไหลจะเกิดที่บริเวณรอบๆ ท่อซึ่งจะนานไปกับท่อซึ่งจะเป็นไปตามสัดส่วนของความยาวจะเป็นเหตุผลที่จะต้องออกแบบให้ทางวิ่งที่มีความยาวน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ความดันที่ใช้ในการฉีดจะสูญเสียไปโดยไม่มีประโยชน์สำหรับช่องทางที่ยาวและแคบ ความดันของเครื่องฉีดมีข้อกำหนดโดยความดันที่ลดลงขณะที่ไหลไปในทางวิ่ง แต่ถ้าใช้ความดันสูงสุดของเครื่องในการฉีดเนื้อยางเข้าไปในตัวแม่พิมพ์แล้วขังไม่สามารถที่จะชนะแรงดันที่สูญเสียไปนั้น ควรที่จะแก้ไขที่การเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางช่องนำฉีดและทางวิ่ง และจะต้องพิจารณาถึงขนาดที่ใหญ่ขึ้น

สมการที่กล่าวมานั้นในรายละเอียดของทางวิ่งนั้นไม่สามารถที่จะนำไปใช้ได้กับของไอลที่ไม่ใช้ของไอลแบบอนนิวตันเนียน (Non – Newtonian) ตัวอย่างของความหนืดของยางนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราเฉือนแต่ในการกำหนดความหนืดของยางให้ขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน (อัตราการไอล) นั้นไม่ง่ายในกระบวนการนี้ด้วยการใช้สมการนี้จะมีความยุ่งยากที่จะนำไปใช้ในช่วงที่มีอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง (และทำให้ความหนืดนั้นสูงขึ้นด้วย) และความตันที่ค่อยๆ ลดลงในทางวิ่ง และเป็นการยากที่สมการกับการไอลแบบบันป่วน

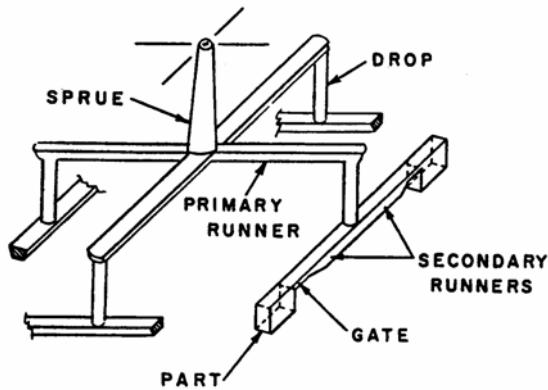
ตัวอย่างของพฤติกรรมการไอลของยางที่เป็นแบบอนนิวตันเนียน ซึ่งจะทำให้เข้าใจถึงสรุปที่เกิดขึ้นของไอลนิวตันเนียนนั้นจะไอลแบบรูบเรียงภายในท่อและใช้ความตันตามหลังเพิ่มขึ้น 25% จะทำให้อัตราส่วนในการไอลเพิ่มขึ้น 25% การเพิ่มขึ้น 25% ของการไอลแบบอนนิวตันเนียน (Non-Newtonian) นั้นจะทำให้อัตราการไอลเพิ่มเป็น 40-50%

### 3.7.8 ระบบทางวิ่งร้อน (Hot Runner)

การให้ความร้อนแก่นือยาง (Compound) ในช่องทางวิ่งร้อนโดยทั่วไปแล้วจะทิ้งยางส่วนนึงออกไปเมื่อเสร็จกระบวนการแต่บางเวลาจะทำให้เกิดการติดของเศษชิ้นยางที่ตายแล้วผสมกับเนื้อยางที่เข้ามาใหม่ในการผลิตรังค์ต่อไปเศษชิ้นยางที่ติดเข้าไปจากช่องทางวิ่งร้อนจะเป็นข้อเสียเบรียหลักๆ เพราะจะทำให้เกิดการเสียดันทุนในมูลค่าของเมือยางที่เสียไปแต่จะแก้ได้โดยการกำจัดเนื้อยางที่ติดอยู่ออกไปก่อนที่จะทำการผลิตรังค์ต่อไป

ระบบทางวิ่งสามารถเบรียห์ได้กับการกระจายแจกว่าในท่อประปาโดยการไอลของน้ำที่มาก ๆ จะไอลภายในท่อหลักซึ่งมีขนาดใหญ่ (เบรียห์ได้กับรูเข้า) และท่อหลักที่เล็กลงมาอีกที่จะจ่ายให้กับแต่ละบ้าน (ทางวิ่งหลัก (Primary Runner)) และแจกจ่ายไปตามท่อรอบๆ เพื่อที่จะจ่ายให้บ้านแต่ละหลัง (ทางวิ่งรอง (Secondary Runner)) และท่อทางวิ่งภายในบ้าน (ช่องทางเข้า (Gates)) เป็นลำดับต่อมา รูเข้าที่ปรับได้ (Adjustable Gates) ในแต่ละแม่พิมพ์ฉีดนั้นจะเป็นตัวควบคุมการไอลของยางที่จะเข้าไปในรูปทรงชิ้นงานเบรียห์เสมือนกันน้ำที่ควบคุมการไอลของน้ำดังแสดงด้วยรูปที่ 26

ผสมของยางนั้นจะมีความหนืดที่สูงซึ่งจะมีลักษณะเป็นของไอลแบบอนนิวตันเนียน (Non-Newtonian) ซึ่งหลักของการไอลจะมีความซับซ้อนมากกว่าน้ำซึ่งจะต้องทำการออกแบบช่องทางวิ่งที่ซับซ้อนกว่า ซึ่งโดยทั่วไปจะออกแบบช่องทางวิ่งเป็นลักษณะวงกลมหรือโถง ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนทิศทางของการวิ่งดีกว่าแบบอื่น แต่ก็จะทำให้มีราคาที่สูงขึ้นซึ่งในหน้าตัดนั้นไม่สามารถที่จะทำให้เลิกลงได้เพราะจะมีลักษณะการทำงานโดยการประกอบกันทั้งสองส่วน

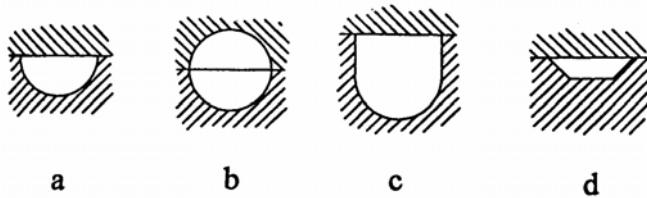


**รูปที่ 26** แสดงถึงระบบการไอลของแม่พิมพ์แบบฉีด

วัตถุประสงค์ของการออกแบบระบบช่องทางวิ่งเพื่อที่จะทำให้เนื้อยางไหลเข้าไปในรูปทรงชิ้นงานของแม่พิมพ์ฉีดในลักษณะที่พร้อมกันเพื่อที่จะทำให้เนื้อยางนั้นมีสภาพที่เหมือนกันทุกๆ ส่วน ในช่วงเวลาที่ให้ความร้อน ในออกแบบระบบทางไอลให้สมดุลย์กันของการไอลของเนื้อยางนั้นเป็นข้อกำหนดที่สำคัญและเป็นวัตถุประสงค์หลักของการออกแบบช่องทางเข้าและองค์ประกอบอื่นๆ เช่น อุณหภูมินี้จะมีผลกระทบต่อพฤติกรรมการไอลของเนื้อยาง

ในการออกแบบช่องทางวิ่งจะมีลักษณะที่คล้ายๆ กันของทั้ง TSEs และ TPEs ซึ่งในการออกแบบนั้น จะต้องเข้าใจในพฤติกรรมการไอลของระบบและตัวเนื้อยางและดูที่ความสมดุลย์ของการไอลที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์ของแต่ละชนิดของตัวเนื้อยาง

โดยปกติแล้วการออกแบบช่องทางวิ่งนั้นเราจะออกแบบตามหลักเกณฑ์การออกแบบที่กำหนดไว้และบ่อยครั้งที่จะออกแบบตามรูปทรงของแม่พิมพ์โดยการใช้ประสบการณ์为代表的ที่การออกแบบโดยการใช้หลักเกณฑ์นั้นอาจจะไม่พอเพียงในการออกแบบที่จะทำแม่พิมพ์ที่จะทำแม่พิมพ์ฉีดนั้นจะออกแบบให้ช่องทางวิ่งนั้นมีขนาดเล็กกว่าขนาดธรรมชาติเพื่อที่จะดูดลักษณะการไอลก่อนแต่ก็สามารถที่จะทำให้ช่องทางของทางไอล มีขนาดใหญ่ขึ้นตามที่ต้องการได้ เป็นการง่ายที่จะทำการขึ้นรูปทางวิ่งใหม่โดยทำการเชื่อมโลหะเข้าไปในทางวิ่ง และนำมาทำการขึ้นรูปช่องทางวิ่งใหม่ ดังรูปที่ 27 ซึ่งจะแสดงให้เห็นหน้าตัดของช่องทางวิ่งในรูปแบบต่าง ๆ ในการออกแบบ



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

รูปแบบความแตกต่างกันของพื้นที่หน้าตัดของช่องทางวิ่งจะมีทั้งข้อได้เปรียบและเสียเปรียบซึ่งช่องทางวิ่งแบบครึ่งวงกลมดังรูป “a” จะทำการขึ้นรูปที่แม่พิมพ์ที่แม่พิมพ์อันเดียว ตัวอย่างเช่น การใช้หัวกัดเป็นรูปทรงกลม (Ball-Shaped End Mill) ซึ่งการขึ้นรูปแบบนี้จะไม่ค่อยได้ความแม่นยำในการสร้างแนวเส้นตรงเท่าไร การให้ความร้อนกับทางวิ่งจะความสัมพันธ์กันของการเคลื่อนที่กับการเข้าและออกของเนื้อยางที่อยู่ภายในในแม่พิมพ์ซึ่งมีขนาดที่เล็กจะต้องออกแบบแม่พิมพ์ไม่ให้อัตราส่วนของปริมาตรของช่องทางวิ่งสูงเมื่อเทียบกับปริมาตรของแม่พิมพ์และในช่องทางวิ่งที่เล็กภายในแม่พิมพ์ที่มีส่วนผสมของยางที่ไอลามีความหนืดสูง (High Viscosity) อาจจะทำให้ยางไอลามักก่อตัวที่จุดที่ไม่ได้ถูกกดตัวลงในแม่พิมพ์ซึ่งจะต้องดูช่องทางวิ่งให้เหมาะสมกับเวลาในการสูกตัวของยางภายในแม่พิมพ์ช่องทางวิ่งแบบทรงครึ่งวงกลมจะทำให้การสูกตัวของยางนั้นเร็วกว่าแบบทรงกลมเมื่อมีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเดียวกันในการให้ความร้อนแก่ยางในเวลาที่เร็วของหน้าตัดแบบครึ่งวงกลมนั้นจะได้เปรียบกว่าแบบวงกลมถ้าไม่คำถึงความดันที่เพิ่มขึ้นอย่างสูงของช่องทางวิ่งแบบครึ่งวงกลม

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

ในช่องทางวิ่งแบบวงกลม “b” ดังแสดงในรูปที่ 27 นั้นจะต้องขึ้นรูปในแม่พิมพ์ทั้งสองด้านให้มีแนวเดียวกันซึ่งในปัจจุบันพื้นที่สามารถที่จะทำการขึ้นรูปช่องทางวิ่งให้ตรงกันได้ยากแม่นยำ ช่องทางวิ่งแบบ “b” สามารถที่จะให้การไอลามากกว่าแบบ “a” ซึ่งจะเหมือนกับแบบ “a” มาปะกันกันสองด้าน

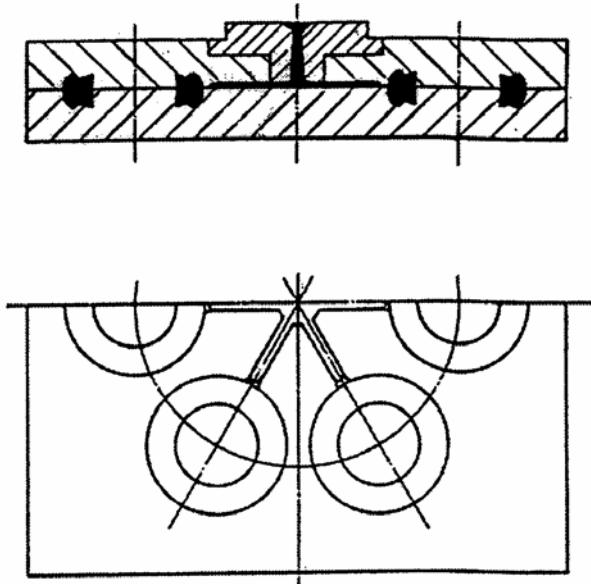
ในการปรับปรุงช่องทางวิ่งแบบครึ่งวงกลมแบบ “c” นั้นจะทำให้ลึกลงไปอีก โดยการสร้างนี้จะทำได้ยากกว่าช่องทางวิ่งแบบ “a” หรือ “b” เพราะความลึกของทางวิ่ง “c” นั้นจะลึกเกินกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางหรือเท่ากับพื้นที่จราจรของวงกลม ซึ่งจะมีปริมาตรของทางวิ่งมากกว่าแบบ “a” ซึ่งจะสามารถที่จะให้แรงคงของแคล้ม (Clamping Force) เดิมได้ เพราะในการเพิ่มปริมาตรนั้นจะไม่ต้องการแรงกดของแคล้มที่เพิ่มขึ้นในตอนปิดแม่พิมพ์และแรงที่ใช้ในตอนปิดแม่พิมพ์ออกนั้นจะใช้ความดันของยางซึ่งเป็นอิสระต่อช่องทางวิ่งที่ลึกลงไป

สำหรับแม่พิมพ์ที่มีความบางซึ่งไม่สามารถที่จะทำช่องทางวิ่งให้มีลักษณะเป็นทรงกลมได้ ซึ่งจะสามารถทำเป็นช่องสี่เหลี่ยมดังรูป “d” ได้ โดยสามารถสร้างช่องสี่เหลี่ยมโดยการใช้หัวกัดแบบอี้ยง (Tapered End Mill) โดยขึ้นรูปไปบนผิวน้ำหน้าของแม่พิมพ์ สำหรับช่องทางวิ่งแบบ “d” มีโอกาสทำให้เนื้อยางที่อ่อนนิ่งขาดได้ขณะที่ทำการไอลนีองจากมีมูนที่คุมที่ร่องทั้งสองด้านและจะมีโอกาสที่จะทำให้เกิดสิ่งสกปรกไปติดอยู่ในมูนของร่องทางวิ่ง ได้ การกำจัดมูนที่คุมออกโดยทำให้มีลักษณะโค้งจะทำให้ลดปัญหาที่เกิดทั้งสองได้

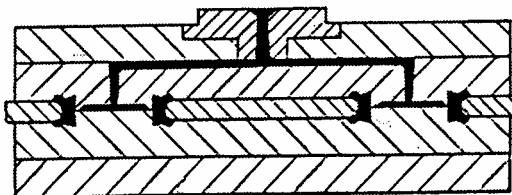
การออกแบบนี้จะต้องทำให้ช่องทางวิ่งมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้และยังสามารถที่จะควบคุมความสมดุลย์ของการไอลของระบบสำหรับแม่พิมพ์แบบนี้ดีที่สุดเข้าไปในเบ้าของชิ้นงาน โดยใช้วิธีการพื้นฐานที่ขึ้นอยู่กับความหนืดในการไอลโดยใช้กฎการยกกำลัง (Power-Law Viscosity Model) ภายใต้ข้อกำหนดที่อุณหภูมิต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งจะไปมีผลกระทบที่สำคัญต่อค่าความหนืดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางวิ่งในทิศตามน้ำจากการเชื่อมต่อกันสามารถคำนวณโดยการหารเส้นผ่านศูนย์กลางของทางวิ่งที่วนน้ำ และรากที่สามของจำนวนท่อทางวิ่งที่ตามน้ำที่เชื่อมต่อกัน ต่อมามาในภายหลังได้กำหนดกฎสำหรับการออกแบบช่องทางวิ่งให้มีปริมาณเล็กที่สุดโดยใช้หลักการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

ในความแตกต่างของยางโดยตัวอย่าง ในแม่พิมพ์แบบสี่เหลี่ยม (ชิ้นงาน) โดยใช้การทางวิ่งสั้นสองและแบบยาวสองในการกำหนดพฤติกรรมการไอลในช่องทางวิ่ง ตัวอย่างของความแตกต่างกันของยาง NR และยางซิลิโคลอน (Silicone Compound) แสดงให้เห็นความแตกต่างกันภายในแม่พิมพ์ อธิบายโดยการพิจารณาคุณสมบัติทางรีโซโลยีของยางเมื่อออกแบบแม่พิมพ์

ระบบช่องทางวิ่งแบบร้อนสามารถออกแบบเป็นระบบสองหรือสามชั้นของแม่พิมพ์แบบนี้ในรูปที่ 28 และการออกแบบเป็นแบบสองแผ่นโดยเนื้อยางจะไอลจากหัวฉีด (Injection Nozzle) เข้าไปในช่องทางวิ่งทุกทางและไอลผ่านรูเข้าเพื่อที่จะเข้าไปภายในเบ้าชิ้นงาน หลังจากที่เนื้อยางไอลเข้าไปภายในเบ้าแม่พิมพ์แล้วตอนแรกจะเกิดการทำปฏิกิริยาของเนื้อยาง (Crosslinks) ที่บริเวณรูเข้าก่อนเพราะว่าที่รูเข้านั้นมีความหนาที่น้อยกว่าช่องทางวิ่งและควรทำให้มีกระจาดความร้อนที่ต่ำเพราะเนื้อยางภายในรูเข้าจะมีความบางและจะทำให้เกิดปฏิกิริยาของเนื้อยาง ก่อนและเกิดการทำปฏิกิริยาภายในตัวชิ้นงานเนื่องจากพื้นที่ของรูเข้ามีขนาดเล็ก ชั้นของแม่พิมพ์จะแยกออกจากช่องทางวิ่งที่รูเข้า รูเข้าที่เล็กนี้เป็นตัวกันเศษสิ่งสกปรกที่จะไอลเข้าไปในตัวชิ้นงานที่กล่าวมาเป็นแบบง่ายโดยใช้ต้นทุนต่ำสำหรับแบบสองชั้น และแบบสามชั้นจะแสดงดังรูปที่ 29

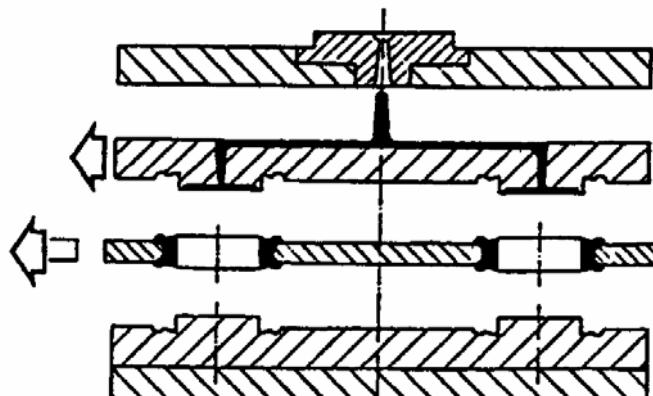


รูปที่ 28 แม่พิมพ์ฉีดเป็นแบบสองชั้น



รูปที่ 29 แม่พิมพ์ฉีดเป็นแบบสามชั้น

เนื้อยางจะไหลงเข้าที่ช่องนำฉีดและไหลงไปในช่องทางวิ่งเพื่อที่จะเข้าไปในตัวชิ้นงานแต่ละตัวภายในแม่พิมพ์ รูปที่ 27 จะแสดงระบบช่องทางวิ่งที่มีช่องทางวิ่งไหลงเพื่อที่จะจ่ายให้ช่องทางวิ่งที่สองก่อนที่เข้าไปภายในตัวเข้าชิ้นงานจะต้องผ่านรูเข้า ในความแตกต่างกันของการออกแบบของทางเข้าแสดงดังรูปที่ 28 จะมีลักษณะรูเข้าเป็นทรงวงแหวนเพื่อที่จะผ่านเนื้อยางที่เข้าไปในตัวชิ้นงานหลังจากนั้นจะทำการบ่มโดยการให้ความร้อนเพื่อที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาของเนื้อยางแม่พิมพ์ที่แยกส่วนเปิดออกมาแสดงในรูปที่ 30



**รูปที่ 30 การทำงานแม่พิมพ์ฉีดเมื่อมีการแยกส่วน**

ทิศทางของลูกครรภ์แสดงถึงทิศทางในการเคลื่อนที่ของแผ่นแม่พิมพ์สำหรับการเคลื่อนที่ซึ่ง อาจทำให้เกิดเศษสกปรกหรือการเสียดสีกันของแม่พิมพ์สิ่งที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์ร่วมกันของแม่พิมพ์ทั้ง 2 แผ่น ในการที่จะแก้ไขปรับปรุงลักษณะของการไหลเข้าให้มีลักษณะที่เข้าในแต่ละโนดูลเท่าๆ กันนั้นจะทำโดยการปรับปรุงรูเข้ารูปวงแหวน และการทำให้ลิ้งปลอกมีปั้นน้อยที่สุดที่เกิดขึ้นจากแม่พิมพ์โดยปกติจะเกิดขึ้นโดยการมีรูเข้าแบบพัดหรือแบบเข็ม (Fan Gate or Pin Gate) ในการใช้ระบบทางวิ่งแบบเย็น (Cold Runner) นั้นจะเป็นการลดปริมาณยางที่เสียภายในช่องทางวิ่งลงกว่าแบบระบบทางวิ่งแบบร้อน

### 3.7.9 ระบบทางวิ่งเย็น (Cold Runner System)

ของเสียที่เกิดจากเนื้อวัสดุในขั้นตอนในการฉีดจะเกิดขึ้นในทางวิ่งและช่องนำฉีด ซึ่งของเสียนั้นจะทำให้น้ำหนักของชิ้นงานเพิ่มขึ้นเมื่อเสร็จกระบวนการ ระบบทางวิ่งเย็นได้คิดขึ้นมาเพื่อที่จะลดของเสียที่เกิดจากการไหลของเนื้อยางภายในระบบทางวิ่ง โดยทั่วไปจะทำให้เย็นช่องภายในแม่พิมพ์โดยการขยายกระบอกฉีดของเครื่องจักร โดยจะทำการฉีดน้ำเย็นเข้าไปในรูปทรงชิ้นงานโดยตรงในแต่ละชิ้นจะมีปีกแม่พิมพ์ออกแม่พิมพ์จะแยกเนื้อยางที่ไหลไปในช่องและจะมีระยะทางที่สั้นในแต่ละชิ้น

#### แม่พิมพ์จะประกอบด้วย

- 1) พื้นที่ของรูปทรงภายในแม่พิมพ์ฉีด
- 2) มีบริเวณนวนกันความร้อน
- 3) มีบริเวณที่กักเก็บเนื้อยางที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดที่จะทำเนื้อยางเกิดปฏิกิริยา

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

การใช้ระบบทางวิ่งแบบเย็นนั้นจะทำให้ประดับเนื้อยางในการฉีดแต่จะต้อง Stripped ในแต่ละชิ้นของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ ซึ่งจะเป็นส่วนที่สำคัญที่จะต้องพิจารณาสำหรับการออกแบบที่ดี ในการออกแบบทางวิ่งของเนื้อยางที่ดินนั้นจะต้องคุณอกเห็นจากการคุ้มทุนด้วยซึ่งจะต้องพิจารณาถึงการช่วยในการควบคุมชิ้นงานที่จะออกมาจากแม่พิมพ์

### 3.7.10 การออกแบบรูเข้า (Gate Design)

ทางวิ่งจะไปสิ้นสุดที่รูเข้าที่เป็นชิ้นงานในแม่พิมพ์ซึ่งจะเป็นช่องทางที่เนื้อยางจะไหลเข้าไปในรูปทรงของชิ้นงานในแม่พิมพ์ รูเข้าจะมีหน้าที่คล้ายกับหัวฉีด และสามารถออกแบบขนาดและรูปร่าง และจะเป็นช่วงสุดท้ายของเนื้อยางที่จะได้รับความร้อนก่อนที่เนื้อยางจะเข้าไปในแม่พิมพ์ อย่างไรก็จะเป็นการยากที่จะรักษาอุณหภูมิที่สูงขึ้นที่ จุดนี้ เพราะไม่สามารถที่จะติดตัววัดอุณหภูมิในตำแหน่งนี้ได้ ดังนั้นจึงแก้ไขโดยการติดตัววัดไว้ที่แม่พิมพ์รอบๆ จุดรูเข้าแต่อย่างไรก็ตามในการเปิดแม่พิมพ์อย่างรวดเร็wtัววัดอุณหภูมิจะไม่สามารถอุณหภูมิตอนสุดท้ายได้อย่างแม่นยำ ดังนั้นอุณหภูมิสุดท้ายจึงกำหนดให้เป็นอุณหภูมิของเนื้อยางที่ไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ และกำหนดให้ค่าการนำความร้อนของยางนั้นต่ำดังนี้จะทำให้ความร้อนที่ผิวของแม่พิมพ์จะใช้เวลานานในการเข้าไปถึงตำแหน่งตรงกลางของแม่พิมพ์

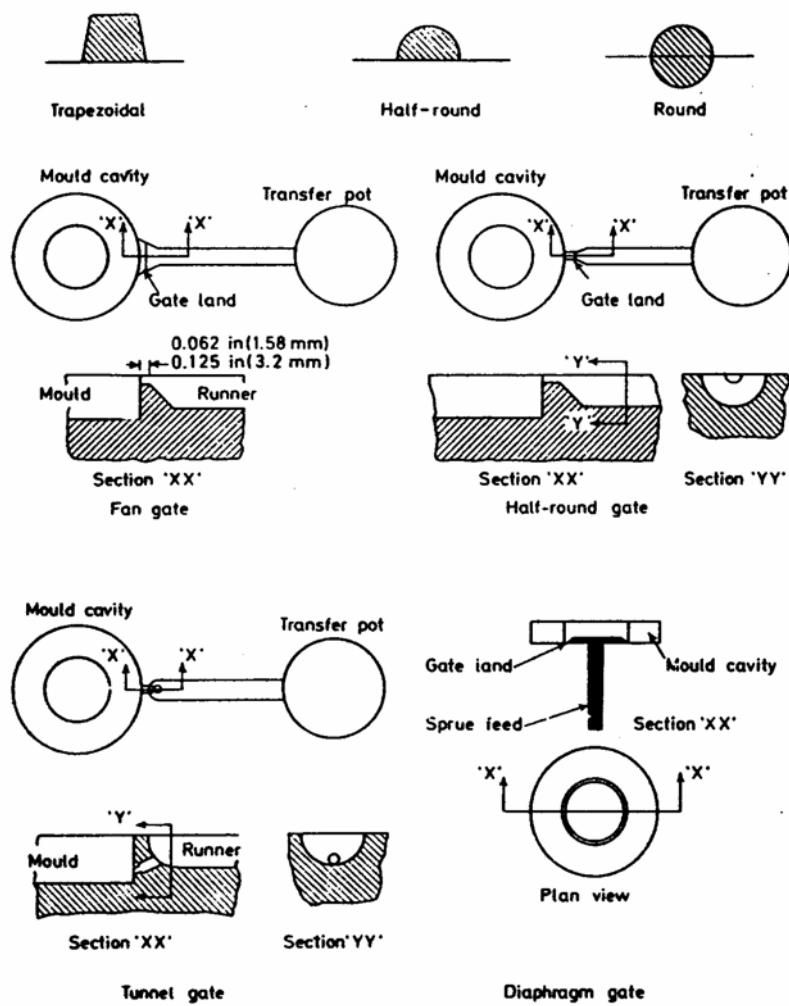
ปัจจัยอื่นๆ ของรูเข้าที่ควรพิจารณาถึงขนาดที่เล็กที่เพียงพอที่จะทำให้เนื้อยางไหลเข้าไปได้่ายและมีลักษณะที่เป็นระเบียบที่แน่นอนและไม่จำเป็นที่จะต้องตอบแทนชิ้นงานอีกหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการ ในการออกแบบรูเข้านั้นควรจะไม่ไปมิผลผลกระทบกับองค์ประกอบอื่นๆ ในการออกแบบถึงแม้ว่าการออกแบบรูเข้านั้นจะมีขนาดและรูปร่างไม่แน่นอนในการออกแบบแต่ก็ควรที่จะมีขนาดที่ใหญ่พอที่จะทำให้เนื้อยางไหลเข้าไปในปริมาตรที่ต้องการของรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์และต้องสอดคล้องกับระยะเวลาในการไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ รูเข้าควรมีความแข็งแรงที่พอเพียงที่จะรับแรงของเนื้อยางในการไหลซึ่งจะทำให้การไหลเข้าไปในแม่พิมพ์นั้นคงที่และรวดเร็วและจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ ที่ต่อเนื่องกัน แต่ถ้ามีความแข็งแรงไม่พอเพียงจะทำให้เนื้อยางที่เข้าไปมีลักษณะที่เป็นกิงหรือเป็นก้อน ซึ่งจะทำให้ได้ผลผลิตไม่ดีในการผลิต

หน้าตัดของรูเข้าโดยทั่วไปจะทำให้มีพื้นที่หน้าตัดเหมือนกับทางวิ่ง (Runner) แต่จะลดขนาดลงมาเหลือประมาณ  $0.25 - 0.38$  มม. ( $0.010 - 0.015$  นิ้ว) สำหรับความหนาที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง  $0.8$  มม. ( $1/32$  นิ้ว) ขนาดสุดท้ายของรูเข้านั้นต้องทดสอบเพื่อที่จะให้แน่ใจว่าจะไม่ทำให้เกิดความร้อนที่เกินความจำเป็นในการไหลของยางที่จะเข้าไปภายในแม่พิมพ์ สำหรับการออกแบบต้องแรกจะทำให้รูเข้ามีขนาดที่เล็กก่อนและทำการทดลองจริงแล้วค่อยขยายขนาดของรูเข้าให้ใหญ่ขึ้นตามความเหมาะสม รูเข้าของแม่พิมพ์แบบฉีดน้ำจะต้องมีการออกแบบที่ดีซึ่งการไหลของเนื้อยางที่จะเข้าไปภายในรูปทรงชิ้นงานนั้นจะเป็นการไหลโดยการฉีดเข้าแบบต่อเนื่องเข้าไปไม่ใช้การไหลแบบรวดเร็วทันทีทันใด ในการเลือกทางวิ่ง และระบบรูเข้า จะพิจารณาได้ในรูปที่ 31

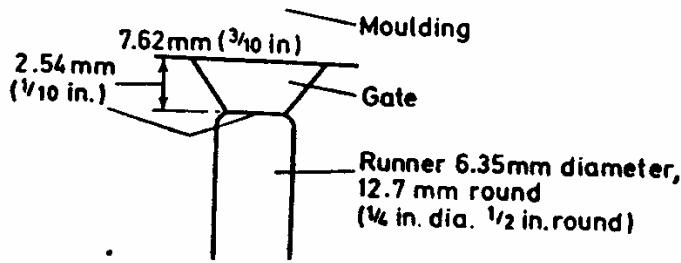
จากการทดสอบของรูเข้าแบบพัด (Fan gate) ดังแสดงในรูปที่ 32 ที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความลึกโดยใช้เนื้อยางในการทดสอบเป็น Butyl ความลึกของช่องทางจ่ายที่  $0.254$   $0.508$   $0.762$  และ  $1.016$  มม

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

ในความลึกของรูเข้าที่ 1.016 มม. (0.04 นิ้ว) ซึ่งจะทำให้ระยะเวลาในการฉีดมีความรวดเร็วและเวลาในการบ่มตัวของเนื้อยางจะเร็วขึ้นรูเข้าที่ใช้ในการเชื่อมต่อโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดดังแสดงในตารางที่ 5 ที่การฉีดแบบเร็วที่หัวฉีดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.18 มม. (1/8 นิ้ว) และอุณหภูมิในการฉีดต่ำและเวลาในการบ่มเนื้อยางนานขึ้นที่ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดเล็กจะให้อุณหภูมิในตอนฉีดที่สูงและเวลาในการบ่มที่สั้นลง



รูปที่ 31 ชนิดของห้องท่างไหลและรูเข้าในรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 32 ทางไอล์ฟเข้าแบบพัดที่มีความลึก 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 (mm)	(in)	Injection	Vulcanising
		time (s)	time (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

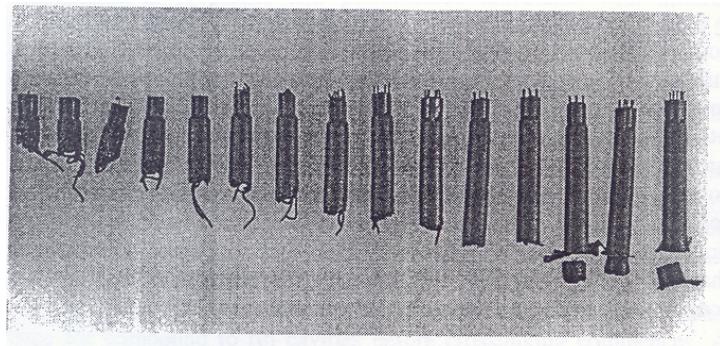
ในตารางที่ 4 นั้นจะเป็นการทดสอบทางวิ่งแบบครึ่งวงกลม (Half Round) 6.35 มม. (1/4 นิ้ว) เครื่องฉีด Daniels Edgwick 45 SR; อุณหภูมิของระบบอุกนีด  $113^{\circ}\text{C}$  ( $235^{\circ}\text{F}$ ); อุณหภูมิของแม่พิมพ์  $204^{\circ}\text{C}$  ( $400^{\circ}\text{F}$ ); ความเร็วของสกอร์ 100 รอบต่อนาที; ความดันในการฉีดของเนื้อยาง  $108 \text{ MN/m}^2$  ( $15,640 \text{ lbf/in}^2$ ); เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด 1.98 มม. ( $5/64$  นิ้ว); ปริมาตรในการฉีด 48 ลูกบาศก์เซนติเมตร ( $2.93 \text{ ลูกบาศก์นิ้ว}$ ); ยาง Butyl ที่ 40 ชอร์ส

ตารางที่ 5 แสดงถึงผลกระทบของขนาดที่เปลี่ยนแปลงของขนาดหัวฉีด

Nozzle diameter mm	in	Injection time (s)		Injection temperature °C      °F		Vulcanising time (s)
		into air	into mould			
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

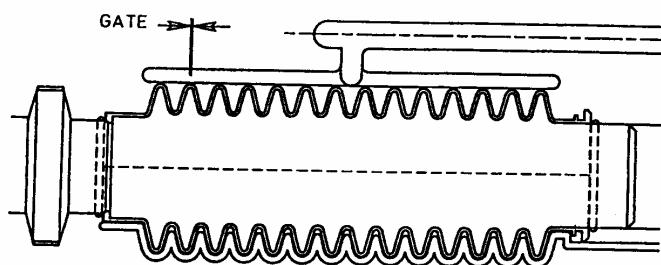
ในตารางที่ 5 จะใช้เครื่องนีด Daniels Edgwick 45 SR; อุณหภูมิของระบบอกนีด  $107^{\circ}\text{C}$  ( $225^{\circ}\text{F}$ ); อุณหภูมิของแม่พิมพ์  $204^{\circ}\text{C}$  ( $400^{\circ}\text{F}$ ); ความเร็วของสกรู 100 รอบต่อนาที; ความดันในการนีดของเนื้อยาง  $113 \text{ MN/m}^2$  ( $16,320 \text{ lbf/in}^2$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

ในตำแหน่งของช่องทางเข้านั้นจะมีผลต่อการไล่อากาศออกขณะที่เนื้อยางไหลเข้ามาในเป้าชิ้นงาน อากาศที่อยู่ภายในจะถูกไล่ออกไป การเพิ่มปริมาณของเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์นีดจะช่วยกำหนดตำแหน่งของช่องลมซึ่งจะเป็นวิธีการในการกำหนดสร้างขั้นตอนในการไหลดังแสดงให้เห็นในรูป 33



รูปที่ 33 ขั้นตอนของการไหลของเนื้อยางที่เข้าไปภายในแม่พิมพ์นีด

ในรูปที่ 34 เป็นตัวอย่างของหน้าตัดของแม่พิมพ์นีดของยางเครื่องสูบลมซึ่งในตำแหน่งช่องทางเข้าจะอยู่ในตำแหน่งที่สูงสุดที่ความยาวของค้านบนสุด



รูปที่ 34 หน้าตัดของแม่พิมพ์นีดของยางเครื่องสูบลมซึ่งแสดงตำแหน่งช่องทางเข้า

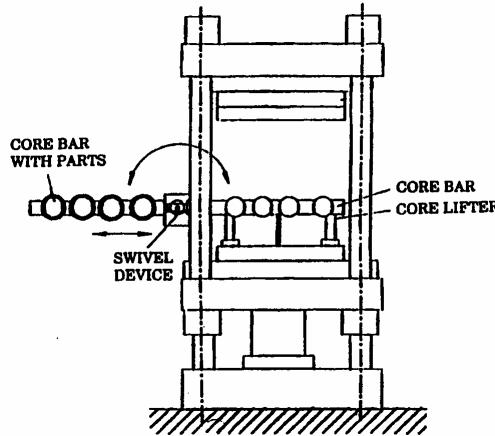
ในการออกแบบรูเข้า การไหลของเนื้อยางจะเข้าไปในแม่พิมพ์ที่ก่อกร่างในแนวแกนของยางเครื่องสูบลม ลักษณะการไหลจะไหลไปตามแนวแกน อากาศจะถูกไล่ออกไปยังที่รินสุดของแม่พิมพ์เพื่อที่จะออกไปจากแม่พิมพ์ และจะเกิดการไหลตัวของเนื้อยางไปในทิศทางรอบๆ เส้นรอบวงของค้านยีด ช่วงสุดท้ายของตำแหน่ง

การไหลจะสิ้นสุดที่ตำแหน่งด้านล่างสุดของชิ้นงานที่ตรงกันข้ามกับทางวิ่ง การไหลของเนื้อยางเข้าไปในแมพิมพ์จากการด้านบนและด้านล่างพร้อมๆ กันนั้นก็สามารถที่จะเพิ่มเป็นแบบสองรูเข้าซึ่งก็จะต้องการเนื้อยางในการ流มากขึ้นซึ่งจะทำให้การทำงานนั้นเร็วขึ้น

การรักษาความดันของอากาศจะนำไปใช้ในการเชื่อมต่อ กันระหว่างจุดที่สุดของชิ้นงาน (ยางเครื่องสูบลม) และด้านจับยีด, การกระทำของสารหล่อลื่นจะทำให้การเคลื่อนย้ายชิ้นงานออกมายิ่งง่าย, ตำแหน่งที่บ่อบริเวณผิวของชิ้นงานจะเกิดการฉีกขาดบริเวณทางเข้าหรือ出口ที่จะเกิดตำแหน่งจากการไหลของเนื้อยางออกมายังด้านจับยีด โดยอากาศที่ถูกบีบอัด ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ต้องการการออกแบบใหม่ของรูเข้าโดยการลดความดันที่ตกค้างบริเวณทางเข้า

รูปทรงของตัวชิ้นงานและตำแหน่งของรูเข้าจะส่งผลกระทบกับการไหลเข้าไปในแมพิมพ์ของตัวเนื้อยางระหว่างการไหลพุทธิกรรมของการไหลแบ่งออกได้หลายชนิด เช่น การไหลออกมาย่างรวดเร็ว (Jetting Filling) จะเกิดขึ้นเมื่อการไหลของเนื้อยางออกมาจากช่องทางจ่ายและช่องทางเข้าแมพิมพ์เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงมากระหว่างที่บ่อบริเวณผิวของแมพิมพ์ชิ้นงาน การไหลเข้าจะเพิ่มขึ้นโดยเนื้อยางที่พุ่งไปชนแมพิมพ์นั้นจะพับตัวขึ้นเป็นชั้นๆ การไหลออกมาย่างรวดเร็วจะเกิดในรูปทรงชิ้นงานที่มีพื้นที่หน้าตัดที่กว้างการไหลแบบเร็วนี้จะเป็นที่ต้องการระหว่างการไหลแบบเร็วเข้าไปในแมพิมพ์เนื้อยางจะมีลักษณะเปียกที่ผนังของแมพิมพ์หลังจากออกมายังช่องนำน้ำ (Sprue) หรือรูเข้า (Gate) จะทำให้เกิดการอัดแน่นตัวของเนื้อยางขณะที่ไหลเข้าไปในแมพิมพ์ หลังจากการอัดแน่นเนื้อยางจะไหลเข้ามาเลื่อนที่พิวน้ำทำให้ระดับพิวน้ำของเนื้อยางเคลื่อนที่และบังคับอากาศและช่วยเหลือการผลิตให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นสูง การไหลของเนื้อยางแบบพิวน้ำ (Frontal Filling) นิยมใช้กับชิ้นงานที่มีหน้าตัดเล็ก ๆ เช่น ยางปัดน้ำฝน เป็นต้น

ในการใช้แกนแบบหมุนหรือแกนแบบแท่งเป็นการเพิ่มผลิตชิ้นงานในแมพิมพ์ของยางเครื่องสูบลม การใช้แท่งแบบธรรมดายังเปรียบเทียบกับแบบแท่งกึง และแกนแบบหมุนที่มีแกนยื่นออกมานอกแกนแบบกึงไม่ชิ้นงานสามารถที่จะนำออกมายได้ในด้านหนึ่งของแกนหมุนและอีกด้านหนึ่งของแกนหมุนก็จะทำงานบวนการในการผลิตต่อไป ขั้นตอนของช่วงเวลาในขั้นตอนที่จะเอาชิ้นงานออกและทำความสะอาดนั้นจะสั้นกว่าเวลาในการบ่นยาง ดังในรูปที่ 35



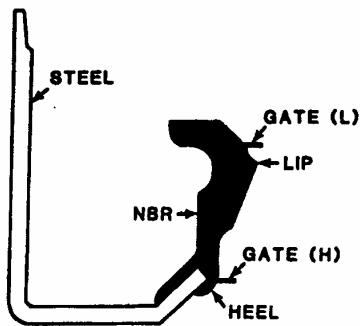
**รูปที่ 35** แกนแบบแท่งในแม่พิมพ์ของยางเครื่องสูบลม

หลังจากเสร็จกระบวนการจุนกรอบวงจร แกนแท่งของเหล็กจะเคลื่อนที่ไปทางซ้ายเพื่อให้นำชิ้นงานออก และทำความสะอาด ซึ่งเวลาจะน้ำอย่างว่าการหมุนในอีกรอบหนึ่ง

เมื่อพิจารณาที่รูเข้าเดียวันนี้เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการหล่อและจะเห็นชิ้นงานที่ทางเข้าจุดศูนย์ค่วยคล้ายเป็นบานๆ ตำแหน่งเดียวในการให้หล่อเข้าไปในแม่พิมพ์ของยางแบบช่องทางเดียว (Pin) นั้นจะสนใจบริเวณที่ยังไม่มีการเติมของเนื้อยาง รูปดังที่มีขนาดเล็กควรจะยึดติดอย่างมั่นคงที่บริเวณปลายหรือทำเป็นทรงเรียว (tapered) เพื่อที่จะลดการอตัวของเนื้อยาง ในการออกแบบควรได้รับการพิจารณาเป็นอย่างมากในตำแหน่งของทางเข้า

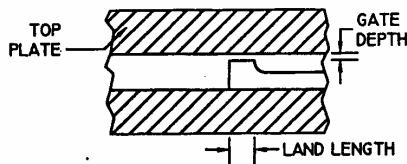
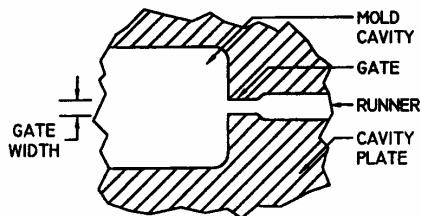
ตำแหน่งของอินเสิร์ท (Insert) ภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะรวมเข้าไปในตัวชิ้นงานภายในชั้นแม่พิมพ์จำเป็นจะต้องเป็นวัตถุที่แข็งแรงทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างซึ่งภายในแม่พิมพ์นั้นมีความดันที่สูง โดยเฉพาะการพิจารณาที่จะใช้พลาสติกแทนเหล็กเป็นอินเสิร์ทภายในชิ้นงาน ต้องย่างเช่นการใช้อินเสิร์ทในการปิดผนึกต่างๆ (Seal)

ในการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับยางปิดผนึกด้านข้าง (Lip Seal) ดังรูปที่ 36 แสดงตัวอย่าง และให้ความสำคัญของตำแหน่งทางเข้าของเนื้อยางในตำแหน่งที่จะเข้าสู่ชิ้นงานมีความสำคัญต่อผลกระทบซึ่งอาจเกิดการรั่วไหหลังของการทดสอบ ช่องทางเข้าในบริเวณลาดเอียง (Heel-Gated) ของตัวปิดผนึกจะรั่วหลังจากการทดสอบในช่วงเวลา 15 ถึง 18 นาที และช่องทางเข้าที่เข้าจากด้านข้างจะไม่รั่วหลังจากการทดสอบไปแล้วนานเกิน 300 ชม. สิ่งอื่นๆ จะต้องพิจารณาคือร้อยตำแหน่งที่เกิดขึ้นบริเวณรูเข้าและสิ่งมลทินที่เกิดจากแม่พิมพ์หลังจากการแยกแม่พิมพ์ออกจากกันในขั้นตอนการผลิต



รูปที่ 36 ทางเข้าของเนื้อยางในตำแหน่งด้านบนและด้านล่างของยางปิดผนึกด้านข้าง

เนื้อยาง (Compound) ที่แข็งจะสร้างผลกระแทบให้เกิดรอยที่บริเวณผิวด้านบนของรูเข้าของตัวแม่พิมพ์ ตำแหน่งที่เกิดจะเกิดจีนชักเจน คือ เกิดการยุบตัวลงไปที่บริเวณผิวหรือเกิดเป็นลักษณะเหมือนสภาพลายทำให้เกิดเงาที่บริเวณผิว เนื้อยางที่อ่อนกว่า 50 ชอร์ (Shore) จะทำให้เกิดลักษณะของการยุบตัวหรือสภาพขี้น (Depression or Projection) จากผิวอยู่ที่ประมาณ 0.015 นิว และถ้าแข็งกว่า 50 ชอร์ ค่าจะอยู่ที่ 0.007 นิว ในรูปที่ 37 แสดงทางวิ่ง และรูเข้าและเบ้าชิ้นงานภายใต้แม่พิมพ์



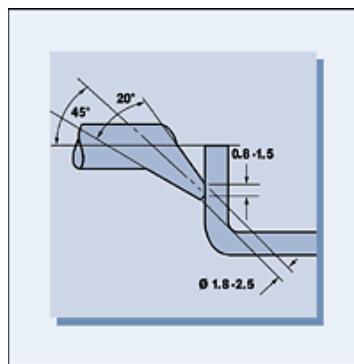
รูปที่ 37 ทางวิ่งและรูเข้าและตัวรูปทรงชิ้นงานภายใต้แม่พิมพ์

ในทางวิ่งแบบครึ่งวงกลม (Semi Circular) ดังรูปสามารถออกแบบให้การส่งผ่านเนื้อยางไปยังช่องทาง จำกัดโดยมีความแตกต่างที่บริเวณหน้าตัดช่องทางเข้าขนาดของรูเข้า ขนาดของรูเข้าควรจะสัมพันธ์กับเวลาและปริมาตรของรูปทรงชิ้นงาน บ่อยครั้งที่จะสร้างมีขนาดเล็กกว่าในขั้นต้นซึ่งสามารถที่จะทำให้ใหญ่ขึ้นได้ในภายหลัง สำหรับรูเข้าที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมที่หน้าตัด (Tap Gate) สำหรับความยาวของพื้นที่หน้าตัดที่ 0.125 นิว ซึ่งความลึกที่สองฝั่งของช่องทางเข้าจะเท่ากัน ซึ่งทางเข้าจะลึกอยู่ 0.01 ถึง 0.015 นิว ช่องทางเข้าที่ลึกจะทำให้เหมาะสมกับค่าปัจจัยในการสร้างแม่พิมพ์ เช่น ใช้สำหรับเนื้อยางที่มีความหนืดสูง ความลึกนั้นจะมีความสำคัญ

สำหรับรูเข้าที่มีขนาดเล็กซึ่งจะเป็นตัวกำหนดเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในเนื้อยาง (Crosslinking Time) สำหรับเนื้อยางในช่องไหหลัก ช่องทางที่ไหหลักที่ลึก 0.02 นิว และน้อยกว่า จะทำให้เวลาในการนีดสัมพันธ์กับเนื้อยางที่มีความอ่อน ดังนั้นความลึกของรูเข้าจะเป็นผลกระทบกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในเนื้อยางและเวลาในการเติมน้ำยาไปในรูปทรงแม่พิมพ์ ในทางวิ่งครึ่งวงกลมที่เป็นร่องทึบด้านบนและด้านล่างมาประกบกันจะเป็นรูปทรงวงกลมและรูเข้าแบบรูเข็ม (Pin gates) โดยที่รูเข้าแบบรูเข็มนี้ จะมีขนาดอยู่ที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.010 ถึง 0.150 นิว ควรที่จะใช้ในตำแหน่งที่มีผลกระทบน้อยที่สุดที่จะเกิดกับแม่พิมพ์ โดยปกติจะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.032 นิว ลักษณะของรูเข้าแบบครึ่งวงกลมสองด้านประกอบและแบบวงกลมนี้จะสร้างได้โดยการใช้หัวกดแบบวงกลม แต่จะมีราคาที่สูงกว่าการใช้หัวกดแบบราบเรียบที่ให้ขึ้นรูปช่องทางเข้าแบบสี่เหลี่ยม ข้ออื่น ๆ ที่ควรจะพิจารณา

- การใช้เครื่องมือที่เป็นขนาดมาตรฐานจะทำให้ลดค่าใช้จ่ายลง
- หัวกดแบบทรงกลมสามารถสร้างทางวิ่งที่มีขนาดเล็กลงทันทีทันใดได้สะดวก
- ช่องทางเข้าแบบวงกลมจำกัดการไหลงน้อยกว่าช่องทางเข้าแบบครึ่งวงกลมและแบบสี่เหลี่ยมที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

ร่องของรูเข้าที่อยู่เหนือเนื้อยางที่ไหเข้าไปในแม่พิมพ์ที่ตำแหน่งเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Mould Parting Line) หลังจากการสุกตัวของเนื้อยางเสร็จสิ้นลงแล้ว แม่พิมพ์จะเปิดออกและทางวิ่งจะแยกตัวออกจากชิ้นงาน โดยการเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ โดยการขยายตัวและการฉีกขาดของเนื้อยางที่สูญเสียในรูเข้า (Gates) การฉีกขาดของเนื้อยางจำเป็นที่จะเกิดขึ้นไม่ว่าจะด้านบนหรือด้านล่างของผิวยาง ส่วนที่ฉีกขาดออก เช่นร่องทางไหจะถูกนำแยกออกไปส่วนมากจะใช้ช่องทางเข้าแบบอุ่ยทำมุมเข้าด้านล่าง (Submarine Gate) ดังแสดงในรูปที่ 38 จะดีกว่าในการควบคุมด้านที่จะฉีกขาดออกไป



**รูปที่ 38** รูเข้าแบบอุ่ยทำมุมเข้าด้านล่าง (Submarine Gate)

รูเข้าแบบอุ่ยทำมุมเข้าด้านล่างจะจ่ายเนื้อยางเข้าไปในตัวแม่พิมพ์ในตำแหน่งที่ไกลจากเส้นแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line) และจะมีมุมประมาณ 45 องศา เพราะว่ารูเข้าแบบอุ่ยเข้า (Submarine Gate) นี้จะฉีกขาดด้วยแรงเลื่อนแทนแรงดึงการอุ่ยด้วยของรูเข้าจะทำให้เนื้อยางไหเข้าไปที่ผนังจะคงที่ทำให้ชิ้นงานดีขึ้น

ช่องทางแบบเดี่ยงเข้าสามารถที่ขยายตัวได้โดยการขึ้นรูป เพราะสามารถที่จะทำการอุ่นตัวแม่พิมพ์ระหว่างทำการขึ้นรูปได้ ควรจะหลีกเลี่ยงในการสร้างรูเข้าที่แม่พิมพ์มีขนาดเล็ก ควรที่จะสร้างตัวแผ่นเหล็กแทรกเข้าไปในช่องภายในแม่พิมพ์ รูเข้าแบบวงแหวนก็แสดงให้เห็นและขึ้นรูปทรงอื่น ๆ ของทางเข้าที่ใช้กับแม่พิมพ์นี้ด้วยหมุนตรงกลาง เช่น ทรงรอบแหวน (Washers) และยางสำหรับร้อยสายไฟฟ้าผ่าน แผ่นโลหะ (Gronnets)

### 3.7.11 ช่องระบายน้ำอากาศในแม่พิมพ์ (Mould Venting)

สำหรับการผลิตที่มีอัตราส่วนของชิ้นงานที่สูงและจะต้องใช้เวลาในการไอลอเข้าที่ควบคุมให้มีระยะเวลาที่สั้นที่สุดในการไอลอของเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์ในเวลาที่น้อยกว่าหนึ่งวินาทีและอากาศที่อยู่ภายในแม่พิมพ์จะต้องไอลอออกไปสู่ภายนอกในเวลาเดียวกันด้วยดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องสร้างช่องทางระบายน้ำอากาศของช่องลมไว้

ในเวลาที่มีการฉีดแบบเร็วนี้ในการฉีดน้ำบ่อครั้งจะมีความบุ่มมากของตำแหน่งของช่องลมภายในแม่พิมพ์ซึ่งจะต้องทำการออกแบบโดยวิธีการนำพาอากาศออกแบบ Diamond – Scratching ในการเปลี่ยนแปลงของอากาศเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดปฏิกิริยาของเนื้อยางกับออกซิเจนได้รุนแรง

ช่องระบายน้ำอากาศนี้จะมีลักษณะที่แคบเป็นท่อเล็กๆ ส่วนใหญ่จะทำการออกแบบให้อยู่ในแนวรอยต่อ กันของแม่พิมพ์ โดยปกติตำแหน่งของช่องลมนี้จะอยู่ตรงกันข้ามกับรูเข้าหรือจุดจ่ายและในระบบการจ่ายเนื้อยางแบบหลายทางนี้จะให้ช่องลมอยู่ระหว่างจุดจ่าย ขนาดของช่องลมจะขึ้นอยู่กับปริมาตรของอากาศที่เคลื่อนที่ออกแต่จะอยู่ประมาณ 0.05 มน. (0.002 นิ้ว) สำหรับความกว้าง และจะเลือก 3.2 มน. (1/8 นิ้ว) โดยทั่วไปในการผลิตนี้จะไม่ค่อยได้สังเกตตำแหน่งของช่องลม เพราะในแบบนี้ช่องลมจะมีลักษณะที่เล็กและการกำหนดลงไประบายน้ำแบบแม่พิมพ์ซึ่งจะทำให้เกิดการละลายขึ้นได้

การอันของอากาศ (Air trapping) ภายในตัวชิ้นงานที่อยู่ภายในแม่พิมพ์จะเกิดเป็นแนวยาวและลึกลงไประบายน้ำ ในชิ้นงาน ในการที่จะลดการเกิดน้ำจะต้องมีการเลือกรอบสุญญากาศที่ติดไว้ภายในช่องลมซึ่งปั้มน้ำสุญญากาศนี้จะต้องพิจารณาถึงอากาศที่ไอลอออกที่ต้องใช้เวลาห้องกว่าหนึ่งวินาทีภายหลังจากทำการปิดแม่พิมพ์และจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นอย่างสูงที่สุด

### 3.7.12 การให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ (Mould Heating)

ในการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์โดยทั่วไปแล้ว จะเลือกใช้แบบการใช้ไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดให้ความร้อนเป็นแผ่นหรือแบบปลอกในการให้ความร้อน ซึ่งจะเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน ปัญหาที่เกิดขึ้นบ่อย ๆ คือการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ที่มีพื้นที่กว้าง และการทำให้อุณหภูมิคงที่ในการจะส่งถ่ายความร้อนให้แก่แม่พิมพ์เครื่องจ่ายความร้อนที่บิดตัวตามรูปทรงภายในชิ้นงานสามารถที่จะทำให้เกิดจุดความร้อนที่บริเวณต่าง ๆ ได้ การระบายน้ำความร้อนสามารถที่จะลดอุณหภูมิที่จะผ่านไปยังผิวของแม่พิมพ์ที่จะไอลอผ่านเข้าไปในแม่พิมพ์

การให้ความร้อนโดยกระแสไฟฟ้าโดยความด้านท่านหรือการนำปกติจะใช้แหล่งจ่ายให้กับตัวรับประมาณ 1.22 วัตต์ต่อลูกบาศเซ็นติเมตร ( $w/cm^3$ ) หรือ 20 วัตต์ต่อลูกบาศนิว ( $w/in^3$ ) ชุดトイโนคับเป็นตัวที่ใช้ควบคุมอุณหภูมิในการเปิดและปิด ขดลวดให้ความร้อนที่อยู่รอบๆ แมพิมพ์จะทำให้ความร้อนที่จ่ายคงที่ และจะค่อยๆ จ่ายความร้อนน้อยลง และตัดการจ่ายไฟเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน ในการสูญเสียนี้ตำแหน่งที่เกิดจะเกิดกับแมพิมพ์ที่มีความยาว การจ่ายความร้อนโดยใช้ชี้วิธี โหมดจะใช้คลื่นความถี่ในแมพิมพ์ที่มีความบาง (หนาสูงสุดประมาณ 7.6 ซม. (3 นิ้ว) ต่อหนึ่งด้าน) ความร้อนภายในแมพิมพ์นี้ไม่จำเป็นโดยจะจ่ายความร้อนโดยใช้แผ่นประกบให้ความร้อนแทน

### 3.7.12 สารหล่อลื่นแมพิมพ์ (Mould Lubricant)

สารใช้เป็นตัวช่วยในการทำให้แมพิมพ์ลื่น เพื่อช่วยการแกะชิ้นงานยางที่อบ Kongruip เลี้วออก ได้ง่ายเป็นสารพาก Surface-Active เช่น พอกน้ำยาล้าง (Detergents) ตบู่ (Wetting Agent) ซิลิโคน ดิสเพสชั่นของพากเป็นทาล็อก ไมค่า และสารพากกรดไขมัน การใช้อาจมีด พ่นหรือชูปะรงทาง สารหล่อลื่นอีกพากหนึ่งจะเป็นพากที่มีลักษณะ “แห้ง” ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสาร PTFE (Polytetrafluoroethylene) หรือ Polyethylene ที่มักจะทำในรูปสารละลายและใช้จาก Arosol ปริมาณการใช้สารช่วยการหล่อลื่นแมพิมพ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่ รูปร่างของแมพิมพ์ ชนิดของสารหล่อลื่น ชนิดและเกรดของยาง

ข้อเตือนของการสำคัญของการใช้สารช่วยการหล่อลื่น คือ เกิดการฟอร์มสารบางอย่างที่ผิวแมพิมพ์ สารเหล่านี้มาจากสารหล่อลื่นที่ตกค้างสะสม และอาจเปลี่ยนแปลงสภาพซึ่งจำเป็นต้องอย่าออก มิฉะนั้นจะทำให้ผิวแมพิมพ์เป็นรอยได้ ดังนั้นการใช้สารหล่อลื่น ควรพยายามใช้น้อยที่สุด มิฉะนั้น จะเกิดปัญหา กับชิ้นงานยางที่อัดออกมากอาจเชื่อมกันไม่ดี นอกจากนี้ในการใช้ซิลิโคนหรือสารหล่อลื่นอื่นๆ สามารถที่จะทำให้เกิดข้อเสียที่ยางจะเชื่อมติดโลหะไม่ดี และอาจเกิดปัญหาการผุกร่อนเมื่อนำชิ้นงานยางติดโลหะนี้ไปใช้งานที่เกี่ยวข้องด้านไฟฟ้า

### 3.7.13 การทำความสะอาดแมพิมพ์

การใช้แมพิมพ์นานๆ ไป จะมีสารอินทรีย์จากส่วนผสมที่ใช้ในยางหรือสารสะสมจากตัวที่ใช้หล่อลื่น แมพิมพ์ติดอยู่ที่ผิวแมพิมพ์ แม้การใช้ซิลิโคนเป็นตัวช่วยหล่อลื่นก็สามารถเกิดสิ่งสกปรกสะสมบนผิวแมพิมพ์หลังจากใช้ไปนานๆ ได้ จึงจำเป็นต้องทำความสะอาดแมพิมพ์ให้อัดชิ้นงานยาง ได้ดี ความถี่ของการทำความสะอาดขึ้นอยู่กับการใช้งานแมพิมพ์

ในการทำความสะอาดแมพิมพ์ ให้ใส่แมพิมพ์ลงในอ่างล้าง ในสมัยก่อนมักใช้เชื้อในอ่างกรด Chromic อุ่น 60 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากกรดมักทำลายเนื้อแมพิมพ์ ปัจจุบันจึงใช้เชื้อในด่านแทน ซึ่งมักจะใช้ด่างพากโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide) โดยจะแช่แมพิมพ์ประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วล้างด้วยน้ำ

หลังการทำความสะอาดเบื้องต้นดังกล่าวแล้ว จะใช้น้ำมันล้างแมพิมพ์อีก อุปกรณ์นี้จะประกอบด้วย การใช้น้ำที่มีเม็ดแก้วละเอียดนิดเดียวแรงดันประมาณ 8 บาร์ หรือต่ำเพียง 3 บาร์ สำหรับแมพิมพ์ที่บาง จานนี้จึงทำให้

แม่พิมพ์แห้ง แล้วเคลือบพิวแม่ด้วยชิลิโคน เพื่อกันแม่พิมพ์เป็นสนิม จะใช้น้ำมันหรือน้ำยา กันสนิมทาพิวแม่พิมพ์ การใช้แม่ทันทีหลังการทำความสะอาดจะป้องกันแม่พิมพ์ขึ้นสนิม

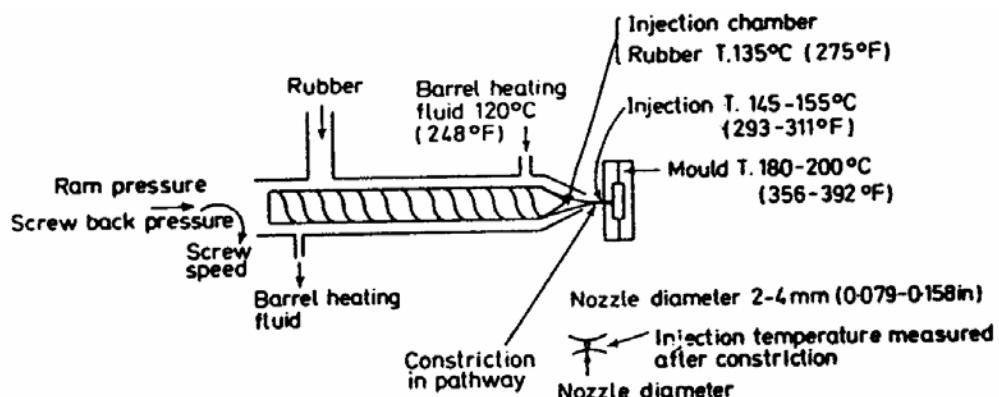
### **3.8 ผลกระทบของตัวแปรต่างๆต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูปและการออกแบบแม่พิมพ์**

เมื่อพิจารณาถึงกันระหว่างตัวแปรต่างๆ ของเครื่องจักรและตัวแปรของเนื้อยางซึ่งทั้งคู่จะมีผลกระทบกับอัตราส่วนของการบ่มตัวของยาง อัตราส่วนของการไม้ และประสิทธิภาพทั่วไปของแม่พิมพ์ฉีด ในตอนแรกของการทดสอบจะทำการควบคุมตัวแปรต่างๆของเนื้อยาง โดยให้เป็นเนื้อยางธรรมชาติ (Natural Rubber Compound) และดูผลกระทบหลักของการบวนการต่างๆของเครื่อง ซึ่งจะต้องกำหนดตัวแปรของเครื่องให้适合 ในการทดสอบต่อจากนั้นค่อยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในเนื้อยาง บางทีจะต้องใช้ตัวอย่างที่เป็นมาตรฐานในการทดสอบ

การเปลี่ยนแปลงตัวแปรของเครื่องฉีดยางนั้นจะต้องพิจารณาในขั้นตอนการทำงานที่จะเกิดในแต่ละกระบวนการซึ่งจะพิจารณาไว้ 2 กลุ่ม

- โดยการควบคุมการให้ความร้อนและช่วงหดломเหลวของยางขณะที่อยู่ในช่วงแรกของการฉีดขณะที่ปริมาตรที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์จะถูกบรรจุอยู่บริเวณผิวหน้าของก้านกระทุ้ง (Ram) ภายในกระบวนการฉีด (Injection Chamber) ตัวอย่างความเร็วของสกรู (Screw Speed) อุณหภูมิของกระบวนการฉีด (Barrel Temperature) และ แรงดันด้านการถอดกลับของสกรู (Screw Back Pressure)

- การกำหนดขั้นตอนต่างๆ ในการไอลเข้าแม่พิมพ์ (Mould Filling) ตัวอย่างเส้นผ่าศูนย์กลางของรูน้ำดือ (Nozzle Orifice Diameter) แรงดันตอนฉีดและความเร็วของด้ามกระทุ้งในการฉีด (Injection Pressure and Injection Ram Speed) ในการเปลี่ยนแปลงในกลุ่มที่ 2 จะพึงพาอาศัยซึ่งกันและกันการเปลี่ยนแปลงผลกระทบจะแสดงให้ในรูปที่ 39

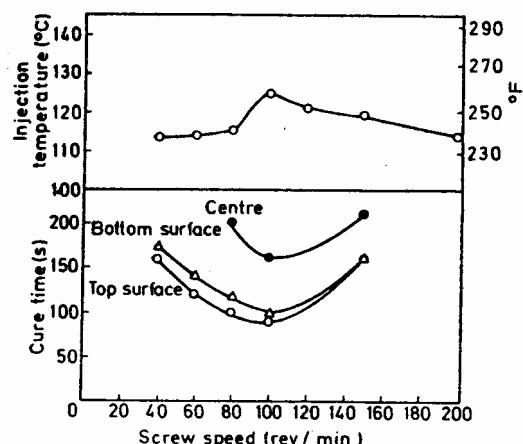


รูปที่ 39 แสดงตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการฉีดยางในขั้นตอนต่างๆ

ในช่วงแรกนั้นจะพิจารณาถึงอุณหภูมิกระบวนการก็จะเป็นตัวแปรสำคัญตัวเดียวที่มีผลผลกระทบกับอุณหภูมิในการฉีด ในอุณหภูมิที่ต่ำของกระบวนการฉีดนั้น จะมีผลต่อองค์ประกอบของยางภายในกระบวนการฉีด และในด้านหน้าของตัวสกรูที่ใช้ดันในการฉีด และจะตัดผลกระทบตัวอื่นๆ ของการเปลี่ยนแปลงของเครื่องฉีดออก โดยเฉพาะเมื่อสกรูหมุนหรือสกรูเลื่อนมาข้างหลัง (Screw Back) การควบคุมโดยการเลื่อนสกรูกลับมาหลังจากที่ฉีดไปแล้วจะมีการถ่ายเทความร้อนก่อนที่จะทำการฉีดในกระบวนการต่อไป

### 3.8.1 ผลกระทบของความเร็วของสกรู (Effect of Screw Speed)

การทำงานของสกรูจะทำการส่งถ่ายตัวเนื้อยางไปยังตำแหน่งที่พร้อมจะฉีดออกไป ที่สำคัญในการเครื่องฉีดยางนั้นสามารถที่จะควบคุมความเร็วของสกรูโดยผ่านชุดเครื่องควบคุมความเร็ว ในรูปที่ 40 แสดงการเพิ่มขึ้นของความเร็วของตัวสกรูในเครื่อง Peco ยางในกระบวนการฉีดนั้นมีความร้อน และจะทำให้อุณหภูมิในการฉีดสูง และเวลาในการฉีดเนื้อยางนั้นสั้นลง เวลาในการบ่มจะกำหนดโดยค่าความแข็งของตัวแทนงบุนกลาง และล่าง ของแม่พิมพ์ที่กำลังปิดอยู่และมีอุณหภูมิของการฉีดและสภาพที่อยู่ภายในได้ความดันทั่วไปของความดันกลับ และอุณหภูมิของกระบวนการสูง



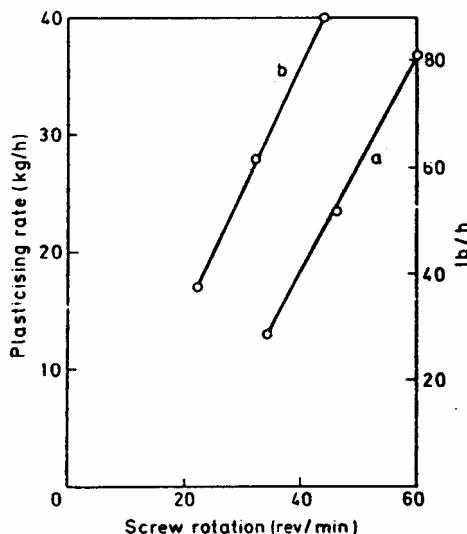
**รูปที่ 40** การเพิ่มขึ้นของความเร็วของตัวสกรูในเครื่อง Peco ที่มีผลต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มตัวของเนื้อยางในตำแหน่งต่างๆ

จากราฟจะได้จุดหมายสมของความเร็วของสกรูที่ 100 รอบต่อนาที (rev/min) ความเร็วที่สูงกว่า 100 รอบต่อนาที จะทำให้การส่งถ่ายเนื้อยางเร็ว ซึ่งอาจทำให้เกิดช่องทางของอากาศภายในชิ้นงาน (Some Air Trapping) ความสูงของแรงดันกลับจะช่วยทำให้อากาศที่เกิดขึ้นขณะทำการฉีดยางเข้าไปในแม่พิมพ์ลดลงและช่วยให้ความเร็วของสกรูเพิ่มขึ้นและอุณหภูมิที่เป็นไปได้

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

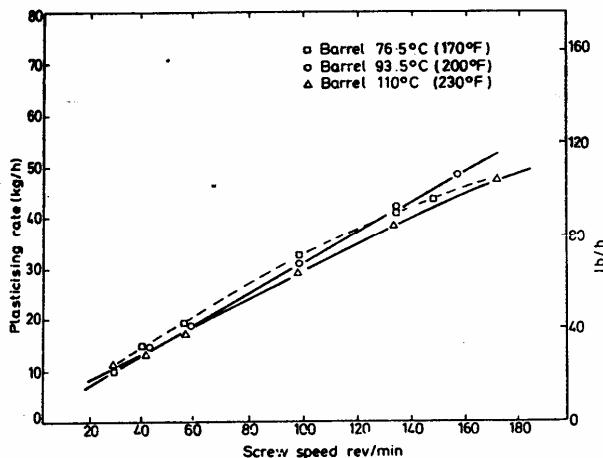
ในการเลือกความเร็วของสกรูจะขึ้นอยู่กับเครื่องนีด และส่วนผสมของเนื้อยางแต่การเลือกที่ดีที่สุดจะอยู่บนพื้นฐานของความเป็นจริงที่สามารถที่จะทำได้ โดยที่จุดที่เหมาะสมของความเร็วของสกรูในเครื่อง Desma 900 ให้ความเร็วระหว่าง 50 ถึง 125 รอบต่อนาที ที่ความเร็วต่ำแนะนำสำหรับส่วนผสมที่มีความหนืดสูง

Klein-Albers and Franck ได้ทำการใช้ความเร็วของสกรูระหว่าง 22 ถึง 60 รอบต่อนาที โดยใช้เครื่อง Ankerwerk Machine ซึ่งจะเสนอการปรับปรุงในประสิทธิภาพของการหลอมตัวของเนื้อยางในสกรูที่มีขนาดของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางในรูปที่ 41 แสดงค่าความจุของเนื้อยางตามปกติโดยตั้งค่าความเร็วของสกรูและความดันกลับของสกรูโดยใช้การจ่ายแบบเต้มที่ในตัวสกรูจ่ายก่อนที่กระบวนการจะสมบูรณ์



**รูปที่ 41** ค่าความจุของเนื้อยางตามปกติโดยตั้งค่าความเร็วของสกรูและความดันกลับของสกรูโดยการใช้การจ่ายแบบเต้มที่

ผลกระทบความเร็วของสกรูและอุณหภูมิในตัวเนื้อยางอัตราส่วนโดยการทดสอบโดยเครื่อง Daniels Edgwick 45 SR จะแสดงคู่กันในรูปที่ 42 ผลของอุณหภูมนี้จะมีผลกระทบน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วของสกรู



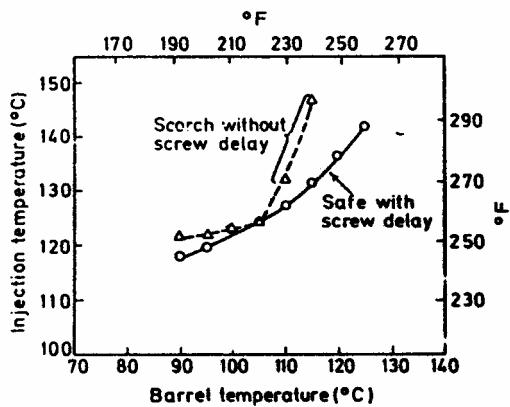
รูปที่ 42 ผลของอุณหภูมิกับความเร็วของสกรูที่มีผลกระทบต่อการฉีดเนื้อยาง

### 3.8.2 ผลกระทบของอุณหภูมิกระบวนการฉีด (Effect of Barrel Temperature)

อุณหภูมิของกระบวนการฉีดอาจเป็นผลกระทบสำคัญในการควบคุมปัจจัยของเครื่องฉีดยาง อุณหภูมิของกระบวนการฉีดนั้นควบคุมโดยวัสดุ โดยมีค่าความจุความร้อนที่สูงกว่าน้ำหรือใช้น้ำที่มีการผสม Glycol หรือน้ำมัน โดยจะควบคุมโดยตัวโทโนสตัตส์ในการควบคุมในการที่จะให้เหล้าไปในกระบวนการฉีด ในบางเครื่องฉีดจะใช้สองหรือสาม (Desma 900 Series) แยกในการควบคุมบริเวณของพื้นที่ความร้อนตามบริเวณความยาวของกระบวนการฉีด การให้ความร้อนโดยกระบวนการทางไฟฟ้าแบบปลอกใช้ในบางเวลาแต่จะไม่ปลอดลัดแต่จะเป็นการง่ายในการปรับปรุงเมื่อต้องการให้เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยเร็วตามที่ต้องการ ในความจริงนั้นในการพัฒนาของการจ่ายความร้อนโดยน้ำในกระบวนการฉีดสำหรับแม่พิมพ์ฉีดยางจะมีความเป็นไปได้โดยสามารถที่จะควบคุมการเกินของอุณหภูมิภายในของกระบวนการฉีดได้ดี

ในปัจจัยของการให้ของเหลวที่มีความร้อนและเนื้อยางที่ได้รับความร้อนในพื้นที่การไหลภายในกระบวนการฉีดและรักษาซึ่งอุณหภูมิในการให้เหลวที่สอดคล้องโดยอิสระจากการใหม่หลังจากที่มีการถ่ายเทความร้อนจากสกรู และตัวเนื้อยางในปลายสกรูพร้อมที่จะฉีดยางออกมา

ในการใช้อุณหภูมิที่สูงของกระบวนการฉีดยางในสกรูที่หมุนและในพื้นที่ด้านหน้าของก้านกระทุ้งสามารถที่จะรักษาอุณหภูมิที่สูงไว้ได้ ในรูปที่ 43 แสดงถึงอุณหภูมิในการฉีดที่สูงขึ้นโดยการทำให้ความร้อนของกระบวนการสูบสูงขึ้น

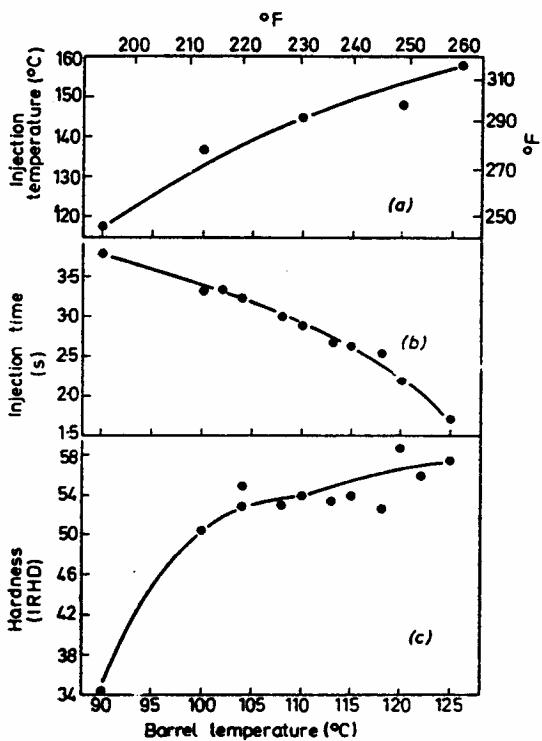


รูปที่ 43 อุณหภูมิในการฉีดที่สูงขึ้นโดยการทำให้ความร้อนของระบบออกสูบสูงขึ้น

เมื่อไม่มีการถ่วงเวลาในการควบคุมสกru อุณหภูมิที่อยู่ล่าง  $105^{\circ}\text{C}$  ( $221^{\circ}\text{F}$ ) เนื้อยางจะยังไม่เหลวตัวเดิมที่ (Premature Vulcanization) ในระบบออกนิด อุณหภูมิที่สูงภายในการฉีด บางทีจะรักษาระดับของอุณหภูมิไว้ เมื่อมีการหน่วงเวลาของสกru ในขั้นตอนในการเตรียมที่จะฉีดในขั้นตอนต่อไป อุณหภูมิในการฉีดที่อยู่เหนือ  $140^{\circ}\text{C}$  ( $284^{\circ}\text{F}$ ) จะทำให้การใหม้มัดไป และการไหลเข้าแมพิมพ์จะดีโดยค่าอุณหภูมิกระบวนการออกนิดที่อยู่ในช่วง  $90\text{-}125^{\circ}\text{C}$  ( $194\text{-}257^{\circ}\text{F}$ ) จะต้องพิจารณาแล้วแต่กรณี

การล่าช้าของสกru อุณหภูมิของระบบออกนิดอยู่ต่ำกว่า  $125^{\circ}\text{C}$  ( $157^{\circ}\text{F}$ ) จะก่อให้เกิดการที่เนื้อยางยังไม่เหลวตัวแบบสมบูรณ์ภายในกระบวนการออกนิด

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



**รูปที่ 44** การสูงขึ้นของอุณหภูมิของระบบออกนีด โดยการเพิ่มข้อกำหนดโดยเพิ่มอุณหภูมิในการฉีดและลดเวลาในการฉีดกับเวลาในการบ่ม

**ตารางที่ 6** ผลกระทบของอุณหภูมิของระบบออกนีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มเนื้อยาง

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			

ในการกำหนดค่าอื่นของเครื่องจักรนั้นจะต้องใกล้เคียงหรือเป็นไปได้ในการเพิ่มอุณหภูมิของระบบอ กนีดซึ่งทำให้เวลาในการบ่มเร็วขึ้น เช่น อาจทำให้เกิดการไหม้ที่บริเวณระบบอ กนีดในเครื่อง Daniels ที่อุณหภูมิระบบอ กสูง 128°C (263°F) จะทำให้ความปลดภัยลดลงเพียงเล็กน้อย ถ้าเกิดการไหม้ภายในแม่พิมพ์จะต้องลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ลง เวลาในการฉีดสั้นจะทำให้เกิดรอบฟองอากาศซึ่งจะเห็นโดยชัดเจน ซ่องของแม่พิมพ์หรือซ่องสูญญากาศในแม่พิมพ์เป็นสิ่งจำเป็น ในการเลือกขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางรู

นีดลดลงจะทำให้เพิ่มระยะเวลาในการไหหลึ่งและจะໄล่อากาศออกจากแม่พิมพ์ ในขั้นตอนต่อมาควรจะปรับอุณหภูมิของการฉีด

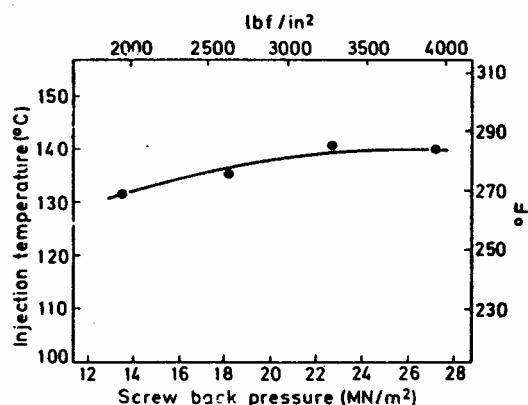
### 3.8.3 ผลกระทบของแรงดันด้านการถอยกลับของสกรู (Effect of Screw Back Pressure)

ความด้านท่านของการเคลื่อนที่ของสกรูจะขึ้นอยู่กับความหนืดของยางที่ไหหลัง โดยจะมีมวลของเนื้อยางอยู่ด้านหน้า แรงดันของสกรูที่ดันหรือแรงดันของสกรูกลับจะเป็นแรงที่จะไปໄล้ออากาศให้ออกจากเนื้อยาง (เกิดจากการป้อนเนื้อยางเร็ว) และໄล่ความร้อนที่ผ่านเข้ามาในทางวิ่ง

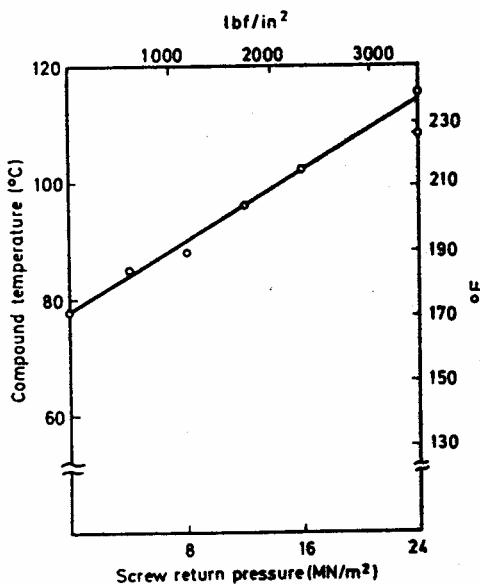
ในความดันที่สูงของเครื่องฉีดยางนั้นสามารถที่จะสร้างขึ้นและควบคุมจากภายนอกโดยการปรับชุดวาล์วไฮโดลิกสกรูความดัน สกรูแรงดันสามารถที่จะปรับโดยใช้แรงดันของไฮโดลิก ซึ่งจะกระทำกับเนื้อยางภายในระบบอุ่นระหว่างที่สกรูหมุนอยู่

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

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



รูปที่ 45 แสดงถึงการควบคุมเครื่อง Peco โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการฉีด



รูปที่ 46 แสดงแรงดันกลับของสกruของเครื่อง Ankerwerk ที่มีผลกับอุณหภูมิของเนื้อยาง

### 3.8.4 ผลกระทบของแรงดันฉีด (Effect of Injection Pressure)

ความดันในการฉีดน้ำมีความสำคัญต่อการควบคุมการไหลของเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์ ความดันของการฉีดน้ำมีความสำคัญอย่างมากที่จะต้องรู้ว่ามีค่าอยู่ที่เท่าไร และการเกิดความดันนี้จะเป็นตัวกำหนดความสูงที่เกิดขึ้นของความร้อน

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

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

โดยที่  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่นของยาง  
 $S$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะ

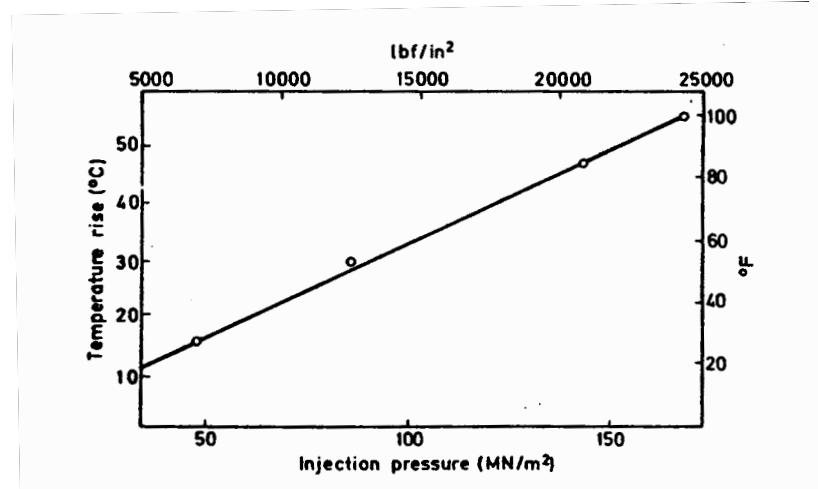
สมมุติค่าความหนาแน่นอยู่ที่  $1.15 \text{ Mg/m}^3 (\text{g/cm}^3)$  และค่าความร้อนจำเพาะ  $2.0934 \text{ J/g}^\circ\text{C}$  ( $0.5 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ ) เหมาะสมสำหรับยางที่มีเขม่าค่า 5 phr (Carbon Black) ในทางทฤษฎีอุณหภูมิจะได้โดยกำหนดให้ความดันที่  $6.895 \text{ MN/m}^2 (70.3 \text{ kgf/cm}^2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

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

(แรงดันในต่อนเริ่มต้นวัดเป็น  $\text{lbf/in}^2$  สามารถคำนวณได้เช่นกัน)

$$\frac{1000 \times 70.3 \times 981}{4.18 \times 1.15 \times 0.5 \times 107} = 2.87 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ในการทดสอบนั้นความร้อนที่สูญเสียและการสูญเสียที่เกิดจากการเคลื่อนที่ภายในปืนนั้นจะไม่ไปกระแทบท่อเวลาที่จะทำให้ความดันถึงจุดสูงสุดในการทำงาน แต่อย่างไรก็ตาม Izod และ Skam แสดงค่ารูปที่ 47 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นโดยใช้ Yates and Thom รับเบอร์ โอมิตเตอร์ (Rubber Ometer) ในการวัดโดยใช้เครื่อง CTA – 2 – 805

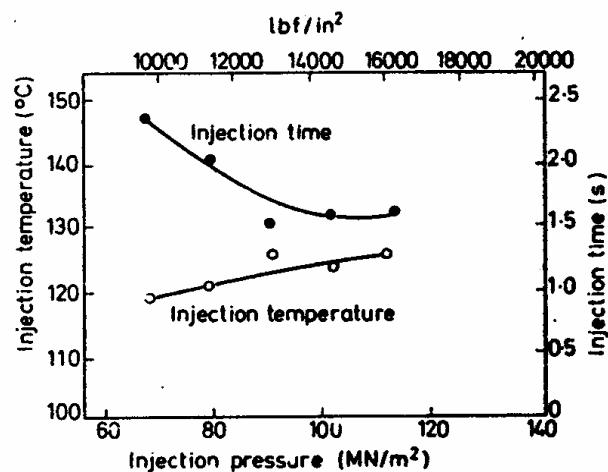


รูปที่ 47 ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้น

การอธิบายถึงผลกระทบของความดันในการฉีดที่ต้องการจะต้องพิจารณาขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดที่เนื้อยาง ไอลอต้านในการฉีด ความสัมพันธ์ของความกว้างของหัวฉีดโดยใช้เครื่อง Peco ในการศึกษาประสิทธิภาพของเวลาในการไอลของยางเข้าไปในแม่พิมพ์ โดยความสัมพันธ์ของความกว้างของหัวฉีดที่ช่องนำฉีด (3.2 มม.) โดยการเพิ่มความดันฉีดสามารถที่จะทำให้เกิดอุณหภูมิในการฉีดและทำให้เวลาในการฉีดลดลงดังแสดงในรูปที่ 48

ในการใช้เครื่อง Daniels 45 SR และแม่พิมพ์ในการทดลองของ RAPRA ระยะเวลาในการไอลเข้าในแม่พิมพ์จะมากจนเกินกว่าค่าที่กำหนด เพราะมีช่องที่ไอลยางจนเกินไป การลดลงของแรงดันในการฉีดจะมี

ผลกระทบต่อเวลาที่ใช้ในการฉีดและลดอุณหภูมิของการฉีดลงและจะทำให้เกิดผลกระทบต่อการใหม่ของยางเข้าไปในแม่พิมพ์มากขึ้นด้วย



**รูปที่ 48** ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการฉีด

ตารางที่ 7 แสดงถึงค่าสูงสุดของความดันซึ่งจะทำให้เวลาในการฉีดนั้นลดลง 33% หรือมากกว่าครึ่งหนึ่งของระยะเวลาในการทำความสัมพันธ์โดย Izod และ Morris ได้สรุปว่าการจะใช้ความดันที่น้อยกว่าความดันสูงสุด เนื่องจากมีความอ่อนมากกว่าจะมีแนวโน้มที่จะให้เข้าไปในแม่พิมพ์ก่อนที่อากาศจะถูกขับไล่ออกหมด ดังนั้นจึงสามารถที่จะลดแรงดันลงได้

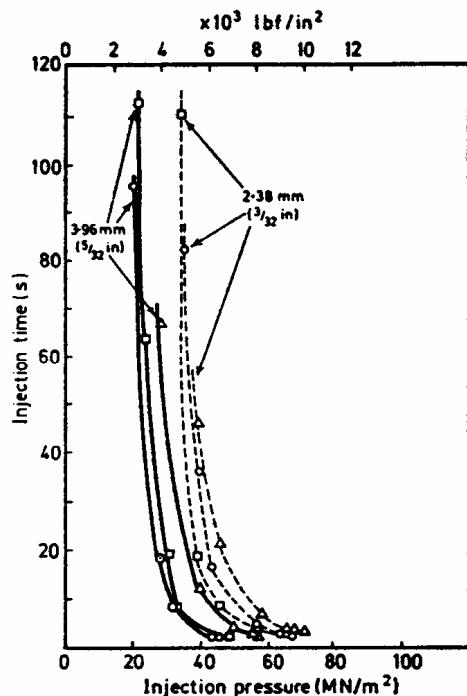
**ตารางที่ 7** ผลกระทบของความดันในการฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีดกับอุณหภูมิ

Injection pressure, MN/m <sup>2</sup> (1bf / in <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 และแม่พิมพ์ทดสอบของ RAPRA ขนาดฉีดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.17 mm (1/8 in) อุณหภูมิระบบอุกฉีด, 90°C (194°F); อุณหภูมิแม่พิมพ์ 180°C (357°F) ความหนืด Mooney, ML3, 120°C (248F), 5, Mooney Scorch 120°C (248°F), 29 นาที

Izod และ Morris แสดงรูปที่ 49 โดยทำการทดสอบโดยเครื่อง Daniels และแม่พิมพ์ทดสอบแต่แตกต่างกันที่เปลี่ยนแปลงส่วนผสมของยาง (SBR) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขอบเขตของอุณหภูมิของระบบอุกฉีด และเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดและความดันที่ใกล้เคียงกับความดันที่สามารถจะทำได้เพื่อที่จะให้เวลาในการฉีดเร็วขึ้น ความดันที่ต่ำกว่าความสูงสุดจะทำให้เวลาในการฉีดนั้นเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีโอกาสในการเกิดการใหม่องเนื้อยางขณะที่

นิดเนื้อยางเข้าไปในแม่พิมพ์ จุดที่อยู่ต่ำกว่าความดันสูงสุดจะมีความแตกต่างกันระหว่างเนื้อยางและเนื้อขี้นไป จะไม่สำคัญ



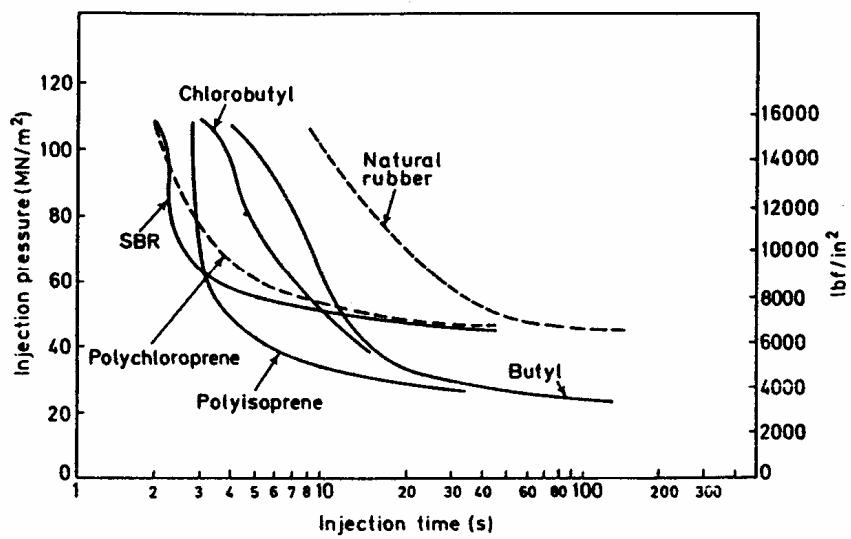
**รูปที่ 49** ผลกระทบของความดันในการนิดที่มีผลต่อเวลาในการนิดโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กระบวนการนิดและเส้นผ่านศูนย์กลางหัวนิด

การพิจารณาที่สำคัญในการที่จะซื้อเครื่องนิดยางนั้นจะต้องดูว่าเครื่องนั้นสามารถที่จะสร้างความดันในการนิดเนื้อยางในแต่ละชนิดได้ในความดันที่กำหนดหรือไม่

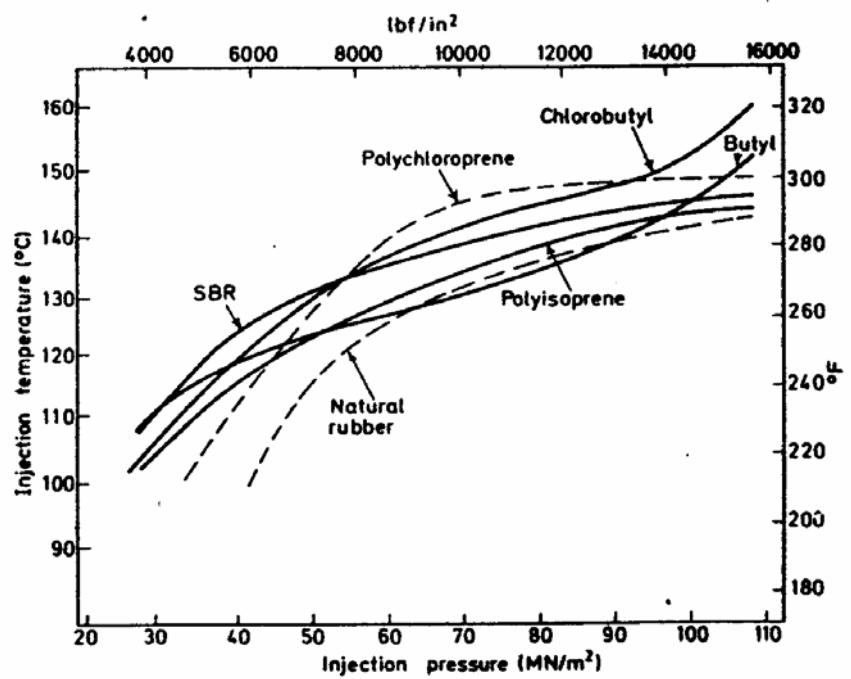
ในการทดสอบโดยใช้เวลาในการนิดนั้นจะไม่เหมาะสมกับการลงทุนในการใช้อุณหภูมิที่สูงสุดแต่ อยู่ในช่องความปลอดภัยและให้ความดันสูงสุด แต่เวลาในการนิดยังนานอยู่จำเป็นที่จะต้องปรับขนาดหัวนิดให้ กว้างขึ้น หรือทำให้ทางวิ่งกว้างขึ้นหรือรูเข้าที่ใหญ่ขึ้น แต่ต้องพิจารณาในตำแหน่งที่เข้าด้วย

โดยทั่วไปน้ำต้องไม่จำเป็นที่จะต้องใช้ความดันสูงสุดในการนิด แต่จะใช้อยู่ที่ประมาณ 80-90% ของค่า ความดันสูงสุดเพื่อที่จะป้องกันการลีกหรือการฉีกขาดของเครื่องจักรในขั้นตอนการควบคุมความดันนั้นจะ ควบคุมโดยใช้วาล์ฟเพื่อที่จะสามารถปรับเปลี่ยนความดันให้ไปใช้กับเนื้อยางส่วนผสมอื่น ๆ ได้

Booth ได้แสดงถึงผลกระทบของแรงดันในการนิดต่อเวลาในการนิดและอุณหภูมิโดยใช้เครื่อง Daniels 45 SR แต่เปลี่ยนรูปร่างของแม่พิมพ์เป็นรูปทรงวงกลม (Flower Pot Mould) ดังแสดงในรูปที่ 50 และ 51 จะ ได้ผลลัพธ์ของการยืนยันรายงานครั้งก่อน ๆ ที่ได้ทำการทดลองกันมาและแสดงผลกระทบที่เหมือนกันของความ ดันต่อยางธรรมชาติ, ยางสังเคราะห์โพลิไอโซพลีน (Synthetic Polyisoprene), SBR, Butyl, Chlorotutyl และ Polyobbboprene



รูปที่ 50 ผลกระทบของความดันในการฉีดต่อเวลาในการฉีดของเนื้อยางชนิดต่างๆ

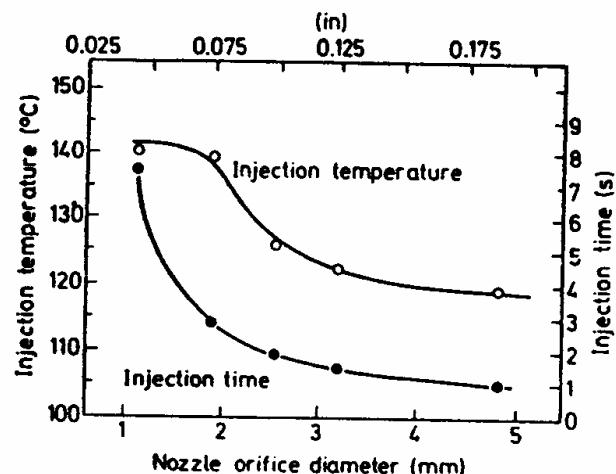


รูปที่ 51 ผลกระทบของความดันในการฉีดต่ออุณหภูมิในการฉีดของเนื้อยางชนิดต่างๆ

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

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดของเครื่อง Peco ที่ลดลงดังแสดงในรูปที่ 52 จะทำให้อุณหภูมิในการฉีดสูงขึ้นแต่ที่เส้นผ่านศูนย์กลางต่ำกว่า 2 mm. (0.08 in) เครื่องจะไม่สามารถฉีดได้ ด้านล่างของเส้นผ่านศูนย์กลางคู่กับเวลาในการฉีดอาจจะเกิดการไหม้ของยางระหว่างที่เนื้อยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งจะไม่ได้ผลประโยชน์ในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการฉีด สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กจะต้องใช้ความดันในการฉีดอย่างเต็มที่และจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิการฉีด ถึงเมื่อว่าจะเป็นที่น่าพอใจที่หัวฉีดสามารถสร้างอุณหภูมิในการฉีดให้สูงขึ้นแต่ก็จะต้องพิจารณาถึงการเกิดการไหม้ขึ้นและที่ยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ สำหรับแม่พิมพ์ฉีดที่รูปทรงระบกเป็นชิ้นงาน ควรที่จะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่สอดคล้องกับความปลอดภัย (1-2 S) ของเวลาในการฉีดซึ่งจะประมาณ 2 - 2.5 mm (0.08 - 0.1 นิ้ว) เมื่อไรก็ตามเวลาในการฉีดมีระยะเวลา ควรที่จะทำให้น้อยกว่าสองวินาทีโดยการใช้ความดันสูงสุดในการฉีด หรือขยายเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดให้สูงขึ้น

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดมีความสำคัญต่อการไหลเข้าไปในแม่พิมพ์ของเนื้อยาง นั้นจะใช้ระยะเวลาเท่าไร โดยเฉพาะอย่างยิ่งเนื้อยางที่ไหลเข้าไปทางไอลที่แคบและยาวภายในแม่พิมพ์ ใน การเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีดจะมีผลกระทบอย่างมากก่อนระยะเวลาในการฉีดของเวลาในการฉีด ตารางที่ 8 แสดง สถานะภายในหัวฉีดในการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดขนาด 3.2 - 4 มิลลิเมตร ( $1/8$  –  $5/32$  นิ้ว) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะทำให้การผลิตนั้นดีขึ้น การไหม้ของเนื้อยางที่บริเวณผิวของรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ จากตารางจะแสดงถึงช่วงเวลาในการไหม้ของยางโดยจะอยู่ระหว่าง 3.8 ถึง 8.8 วินาทีที่เนื้อยางไหลเข้าไปในแม่พิมพ์

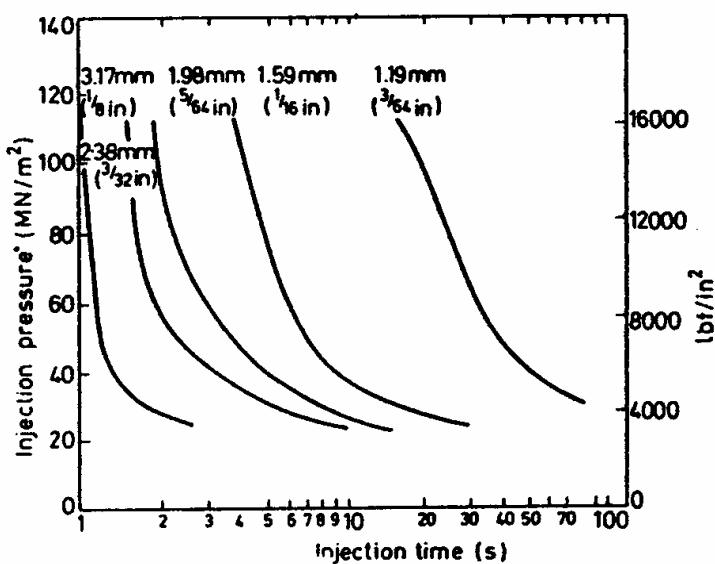


รูปที่ 52 ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดต่ออุณหภูมิและเวลาในการฉีด

### ตารางที่ 8 ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีด

Nozzle diameter, mm (in)	3.17 (1/8)	3.97 (5/32)
Injection time, s	8.8	3.8
Injection temperature, $^{\circ}\text{C}$ ( $^{\circ}\text{F}$ )	120 (248)	118 (244)
Appearance of moulding	scorched	good

Izod และ Morris จะมีข้อมูลที่ครอบคลุมและช่วงการทดลองของ Booth ดังแสดงในรูปที่ 53 จะแนะนำถึงผลกระทบในการเปลี่ยนเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของเวลาในการฉีด V เส้น ความดันในการฉีดที่เช่นกัน ตัวแปรอื่น ๆ ก็มีลักษณะที่เหมือนกัน ความต้องการเวลาในการฉีดที่จะควบคุมโดย หัวฉีดเพียงอย่างเดียว นั่นความดันจะต้องพอเพียงด้วย

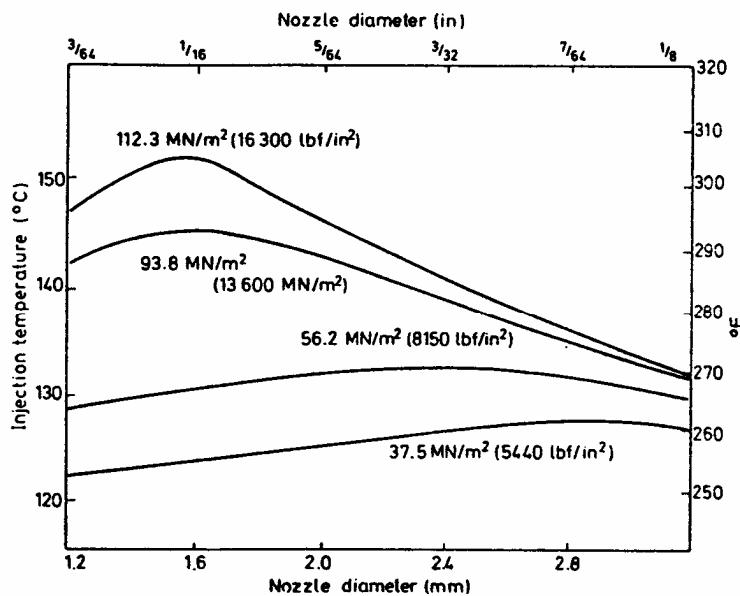


รูปที่ 53 ผลกระทบของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่มีต่อเวลาในการฉีด

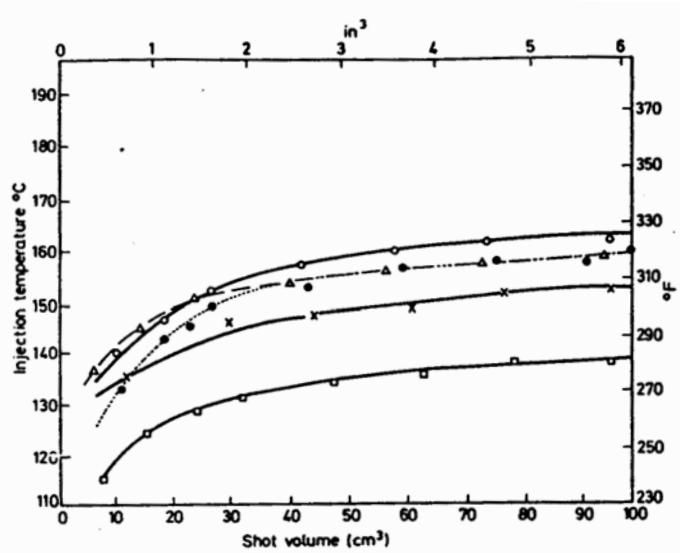
การพัฒนาฟองหภูมิในการฉีดสำหรับยาง Butyl จะขัดแย้งกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด (ที่ความดันคงที่) Booth ได้แสดงว่ามีการคงอยู่ของการเกิดความร้อนสูงสุดและตำแหน่งที่เกิดอุณหภูมิสูงสุดจะขึ้นอยู่กับความดันในการฉีด และเส้นผ่านศูนย์กลางที่หัวฉีดดังแสดงในรูปที่ 54

Booth ได้ทำการแสดงรูปที่ 55 ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในการฉีดจะทำให้ปริมาตรในการฉีดเนื้อยางเพิ่มขึ้น เช่นกัน ซึ่งผลกระทบจะขึ้นอยู่กับเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด แต่จะอย่างเพื่อเนื้อยางที่ฉีดเข้าไปมากกว่า 50% แล้ว โดยปกติจะทำการกำหนดเวลาที่แท้จริงในการฉีด ก่อนที่กำหนดอัตราส่วนความดันในการฉีดเต็มที่

ผลสรุปชี้ว่าหลักการที่ไม่ได้ เมื่อมีการสร้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่ถูกต้องจะทำให้อุณหภูมิในการฉีดสูง และเวลาในการฉีดเร็วขึ้น



รูปที่ 54 อุณหภูมิในการฉีดสำหรับยาง Butyl กับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีดที่ความดันคงที่

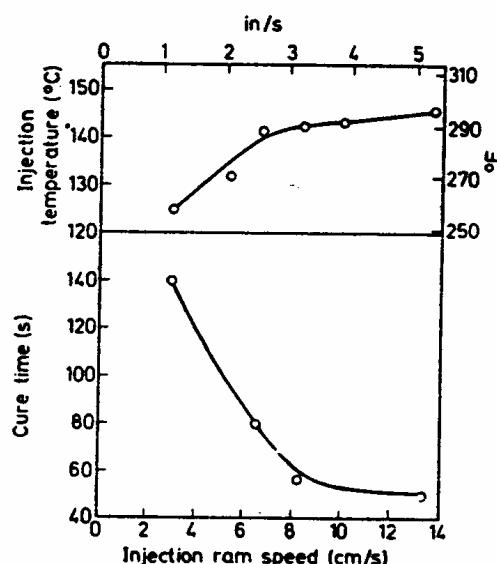


รูปที่ 55 ปริมาณในการฉีดเนื้อยางกับอุณหภูมิในการฉีดที่หัวฉีดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ

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

การเคลื่อนที่ในแนวแกนของสกรู เนื้อยางสามารถฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ที่ความเร็ว  $50 - 350 \text{ cm}^3/\text{s}$  ( $5 - 21 \text{ in}^3/\text{s}$ ) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการออกแบบเครื่องจักรเวลาต่อสุดในการฉีดจะอยู่ที่หนึ่งวินาทีที่สามารถฉีดได้ การควบคุมโดยไอกลิติกสามารถควบคุมระยะเวลาได้โดยไม่จำกัด สูงขึ้นเป็น 25 วินาที หรือมากกว่านั้น ในความเป็นจริงความเร็วในการฉีดขึ้นอยู่กับความตันในการฉีดและเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด การเพิ่มขึ้นของความเร็วสกรูดังแสดงในรูปที่ 56 โดยให้อุณหภูมิในการฉีดสูง และการบ่มตัวเร็วแต่มีความเร็วที่สูง (โดยการเสริมเครื่องอัดปริมาตร (Pump Capacity ในเครื่อง Peco) ซึ่งจะทำให้มีการผิดพลาดซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมาก

ในรูปที่ 56 แสดงถึงความหนาของแม่พิมพ์ที่  $2.1 \text{ cm}$  ( $0.8 \text{ in}$ ) สามารถที่จะบ่มให้สุกได้ในเวลาที่ต่ำกว่า 60 วินาทีโดยมีเงื่อนไขว่าอุณหภูมิในการฉีดต้องสูงกว่า  $140^\circ\text{C}$  ( $284^\circ\text{F}$ )



รูปที่ 56 ผลกระทบของความเร็วในการฉีดที่มีต่ออุณหภูมิในการฉีดและเวลาในการบ่มเนื้อยาง

### 3.8.7 อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mould Temperature)

ในความให้การปลดภัยอย่างมากแก่อุณหภูมิของกระบวนการฉีดคือไม่ควรให้อุณหภูมิสูงมากจนเกินไป และอุณหภูมิที่สูงของเนื้อยางที่เพิ่มขึ้นในขณะที่เนื้อยางไหลผ่านหัวฉีด จะเป็นประโยชน์ถ้าใช้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่สูงเท่าที่จะเป็นได้ ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับการใหมข่องเนื้อยางที่ไหลเข้าที่อุณหภูมิกระบวนการฉีดที่  $90^\circ\text{C}$  ( $194^\circ\text{F}$ )

อุณหภูมิในการฉีดของเครื่อง Daniels ไปถึง  $120 - 125^\circ\text{C}$  ( $248 - 257^\circ\text{F}$ ) และอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่  $180 - 200^\circ\text{C}$  ( $357 - 392^\circ\text{F}$ ) ซึ่งเป็นที่น่าพอใจ จากนั้นให้อุณหภูมิของกระบวนการสูบสูงขึ้น  $120 - 125^\circ\text{C}$  ( $248 - 257^\circ\text{F}$ ) และอุณหภูมิของการฉีดสูงขึ้นประมาณ  $150 - 160^\circ\text{C}$  ( $302 - 320^\circ\text{F}$ ) อุณหภูมิแม่พิมพ์เหมาะสมประมาณ  $180^\circ\text{C}$

(137°F) ซึ่งจะหลีกเลี่ยงการไหม้ที่ผิวของรูปทรงชิ้นงานในแม่พิมพ์ เพื่อความปลอดภัยควรเลือกอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ปลอดภัยโดยการค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆ จนกระทั่งมีการเกิดการไอลจีนเป็นคลื่นเล็กๆ บนผิวของที่ดีดกับแม่พิมพ์และลดอุณหภูมิลงมาจากเดิม 3 - 5°C (5 - 9°F)

ถึงแม้ว่าเวลาบ่มเนื้อยางค่อนข้างจะเร็วแต่ควรจะให้เหมาสมโดยที่จะลดอุณหภูมิของแม่พิมพ์ลง และอุณหภูมิของการฉีด แต่จะไม่ดีสำหรับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งควรจะเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้สูงขึ้น

ในการทดลองที่ผ่านมาอุณหภูมิในการฉีดที่สูงกว่า 165°C (329°F) จะทำให้ปราศจากความเสี่ยงในการเกิดการไหม้ในกระบวนการฉีด อุณหภูมิฉีดที่สูงที่เป็นไปได้โดยใช้เครื่องจักรที่มีหัวฉีดแบบพิเศษ (Cut-off) กลไกโดยการสร้างความดันที่สูงภายในสกรูที่หมุนเพื่อที่จะดันเนื้อยาง

ในทางกลับกันสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการลดลงที่แตกต่างกัน ระหว่างอุณหภูมิในการฉีดและอุณหภูมิแม่พิมพ์ อย่างไรก็ดีควรที่จะให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์สูงกว่าอุณหภูมิในการฉีดเล็กน้อยเพื่อการขยายตัวของยางในแม่พิมพ์มีส่วนทำให้เนื้อยางเข้าไปเต็มในแม่พิมพ์

### 3.8.8 องค์ประกอบอื่นๆ ในการควบคุมเครื่องจักร (Other Machine Controls)

ในการควบคุมเครื่องฉีดยางนี้จะมีความสำคัญมากซึ่งจะต้องมีการพิจารณา แต่ยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่สามารถพิจารณาควบคุม หรือออกแบบเครื่องจักรให้มีความสมบูรณ์ที่สุด โดยจะทำการพิจารณาที่ขึ้นส่วนหลัก ๆ ทั้งส่วนที่อยู่ในแม่พิมพ์ และประสิทธิภาพของเครื่องจักร

### 3.8.9 การระบายความร้อนที่สกรู (Screw Cooling)

ในเครื่องจักรฉีดยางที่ใหญ่นั้นจะมีการระบายความร้อนของสกรู เช่นเครื่อง Desma 905 ซึ่งจะมีเครื่องมือในการระบายความร้อนให้สกรูโดยอากาศหรือของเหลว ของเหลวในกระบวนการฉีดจะเป็นระบบไหลวนโดยจะแยกการควบคุมกับระบบให้ความร้อน ซึ่งจะไอลหมุนเวียนผ่านสกรู

### 3.8.10 การควบคุมความดันและช่วงเวลา (Pressure Control and Timing)

เครื่องจักรบางเครื่อง เช่น Peco 21 TS ความดันในการฉีดนี้จะมีความสำคัญมาก เพราะในระบบเวลาไม่ถึงวินาทีที่อาจทำให้เกิดจุดวิกฤตในการทำงานของการฉีดขึ้น เกือบจะทั้งหมดของเครื่องจักรจะทำการคงความดันของการฉีดไว้เมื่อเนื้อยางไอลเข้าไปในแม่พิมพ์จนเกือบที่จะเต็ม ช่วงเวลาในการคงความดันไว้จะอยู่ในช่วงเวลาหนึ่งหรือน้อยกว่าหนึ่งวินาที แต่สิ่งที่สำคัญคือ การเกิดฟลัมบง ๆ ที่ผิวของเนื้อยางในการคงความดันไว้นั้นจะคงไว้จนเกิดเศษยาง (Flash) เป็นอย่างน้อย และช่วยในการทำให้เนื้อยางรวมตัวกันเป็นเนื้อเดียวในแม่พิมพ์ และในเรื่องของการขยายตัวของยางที่ไอลเข้ามาในทางวิ่งที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์และแรงดันจะช่วยในการขยายตัวของเนื้อยางที่เกิดขึ้นหลังจากการบ่มน้ำคงที่ ปริมาณของเนื้อยางที่พุ่งออกมาน่าทางวิ่งที่จะเข้าในแม่พิมพ์นั้นนับอยู่กับความแตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิในการฉีดและอุณหภูมิของแม่พิมพ์

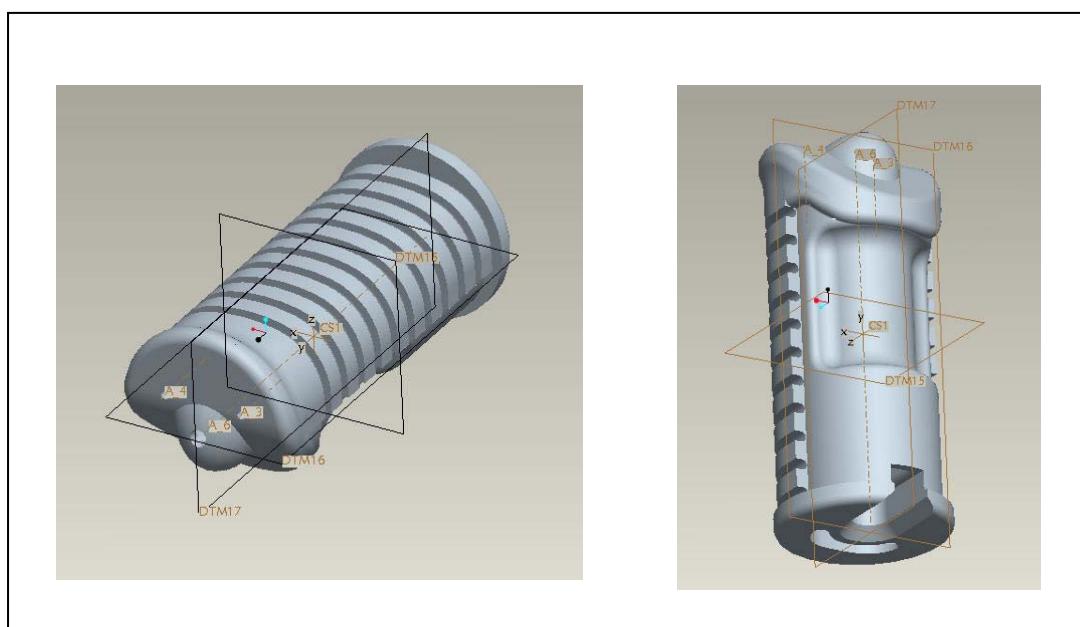
## 4. วิธีดำเนินการวิจัยและเครื่องมือที่ใช้

### 4.1 การออกแบบวิธีวิจัย (Research Design)

ขั้นตอนการวิจัยเริ่มด้วยการเลือกชิ้นงานที่นำมาเป็นกรณีศึกษาจากบริษัทร่วมวิจัย คือที่วางเท้ารถจักรยานยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 57 จากนั้นจึงนำมาร่างเป็นแบบชิ้นงาน 3 มิติโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วง (CAD) โดยอ้างอิงขนาดต่างๆ ตามแบบชิ้นงานที่เป็นแบบ 2 มิติ ดังรูปที่ 58 จากนั้นจึงเริ่มทำการออกแบบระบบทางวิ่ง (Runner) รูร่อง (Gate) และจำนวนเม็ด (Cavity) โดยได้ออกแบบให้จำนวนเม็ดชิ้นงานเป็น 4 เม็ด ส่วนลักษณะของทางวิ่ง และรูร่องได้ออกแบบโดยอ้างอิงให้ใกล้เคียงกับแม่พิมพ์ของทางบริษัทร่วมวิจัยดังรูป 59 เมื่อได้แบบชิ้นงานแล้วจึงทำการจัดเก็บไฟล์ในรูปแบบ STL File โดยแบ่งไฟล์ชิ้นงานออกเป็นส่วนต่างๆ เช่น ไฟล์ชิ้นงานไฟล์รูร่อง ไฟล์ทางวิ่ง เป็นต้น เพื่อสามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA [32]



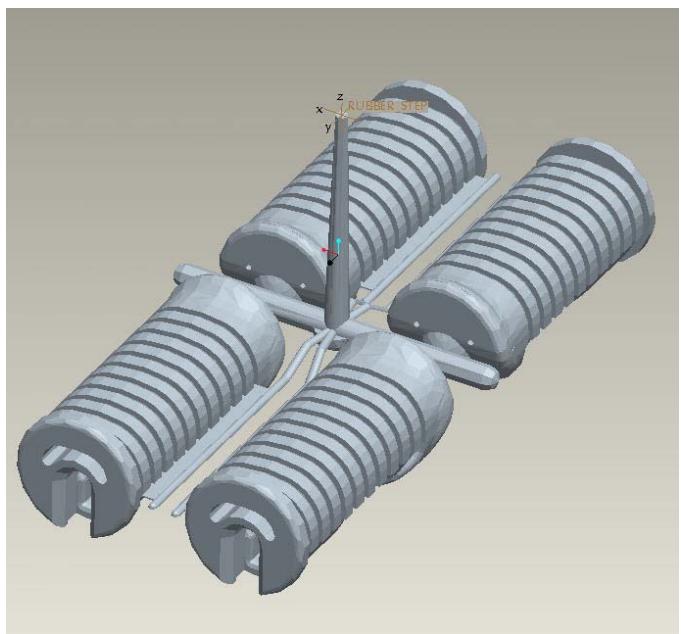
รูปที่ 57 ชิ้นงานที่วางเท้ารถจักรยานยนต์



รูปที่ 58 แบบชิ้นงานที่สร้างด้วยโปรแกรม CAD

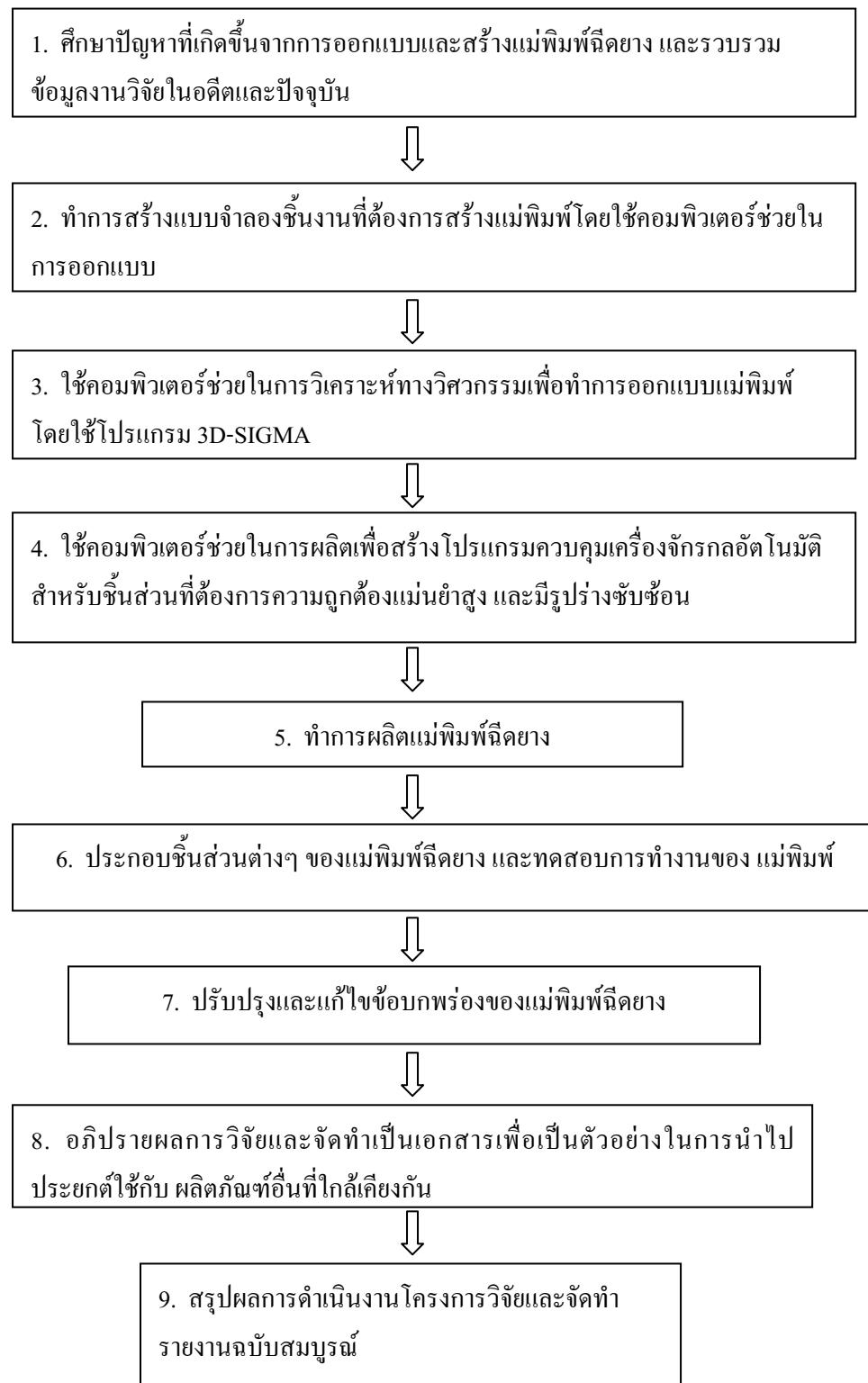


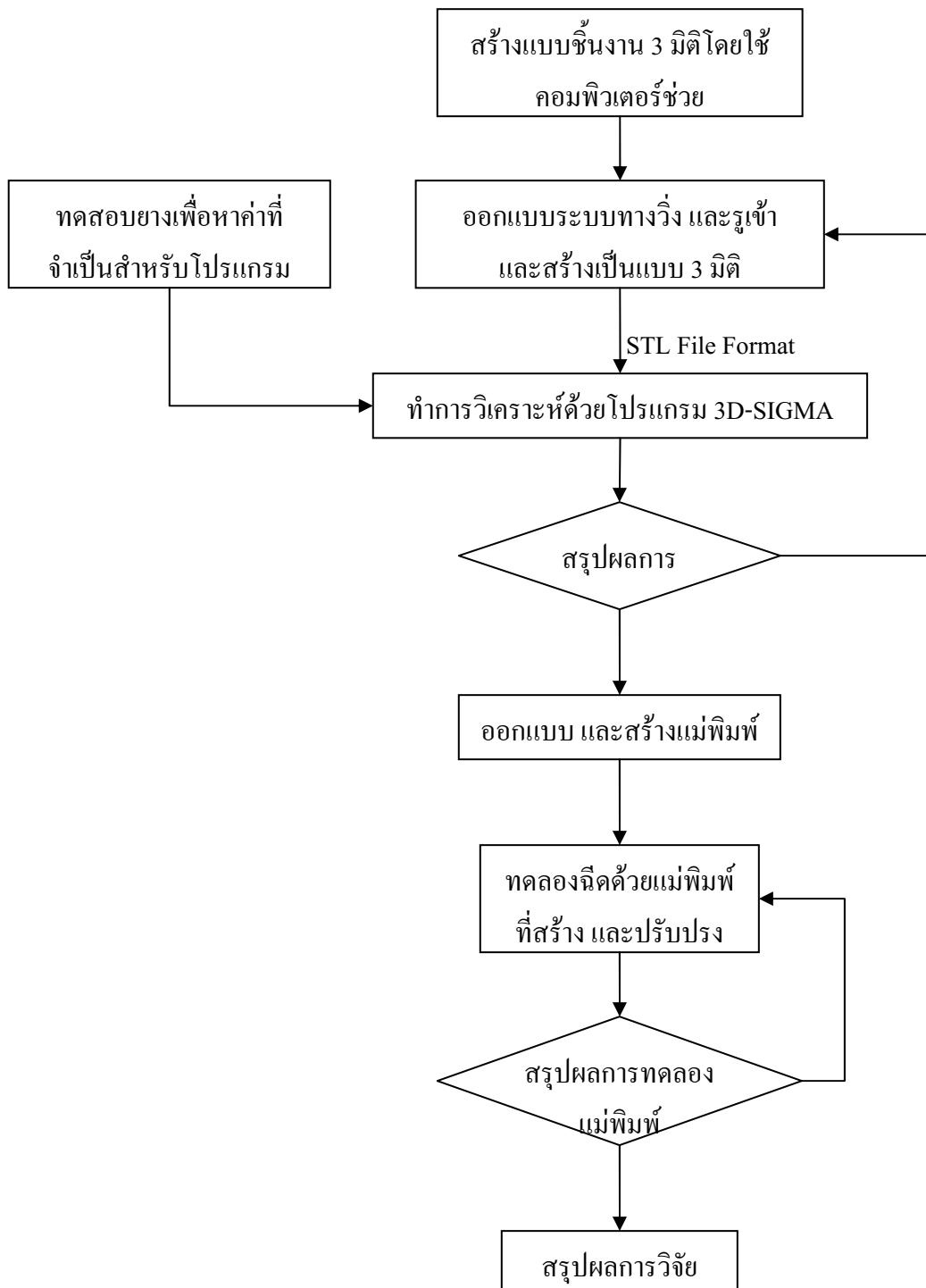
รูปที่ 59 แม่พิมพ์ของทางบริษัทร่วมวิจัย



รูปที่ 60 แบบชิ้นงาน ทางวิ่ง และรูเข้าที่สร้างด้วยโปรแกรม CAD

## แผนผังการดำเนินโครงการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 61





รูปที่ 61 แสดงลำดับการดำเนินการวิจัย

## 4.2 รายละเอียดวิธีการวิจัย

รายละเอียดวิธีการวิจัยสามารถสรุปได้เป็นกิจกรรมต่างๆ ดังนี้ โดยแผนดำเนินงานโครงการวิจัยแสดงอยู่ในตารางที่ 9

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

กิจกรรม	2548							2549						
	ม.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. ออกรูปแบบและใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์						↔								
5. ผลิตแม่พิมพ์										↔				
6. ทดสอบการใช้งานแม่พิมพ์และปรับปรุงแก้ไข											↔			
7. สรุปผลการวิจัย														↔
8. จัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์														↔

### กิจกรรมที่ 1 วางแผนการดำเนินการวิจัย

- ประชุมวางแผนความรับผิดชอบ และกำหนดการติดตามงาน

### กิจกรรมที่ 2 รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องของงานวิจัยร่วมกับบริษัทผู้ร่วมโครงการ

- ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นจากการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดยาง
- รวบรวมข้อมูลงานวิจัยในอดีตและปัจจุบัน

### กิจกรรมที่ 3 เลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา

- ประสานงานกับบริษัทผู้ร่วมโครงการเพื่อเลือกชิ้นงานที่จะทำการศึกษา

### กิจกรรมที่ 4 ออกรูปแบบและใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์

- ทำการสร้างแบบจำลองชิ้นงานที่ต้องการสร้างแม่พิมพ์โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ
- ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรมเพื่อทำการออกแบบแม่พิมพ์ โดยใช้โปรแกรม 3D-SIGMA

#### กิจกรรมที่ 5 ผลิตแม่พิมพ์

- ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิตเพื่อสร้างโปรแกรมควบคุมเครื่องจักรกลอัตโนมัติสำหรับชิ้นส่วนที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสูง และมีรูปร่างซับซ้อน
- ทำการผลิตแม่พิมพ์ฉีดยาง

#### กิจกรรมที่ 6 ทดสอบการใช้งานแม่พิมพ์และปรับปรุงแก้ไข

- ทดสอบการทำงานของแม่พิมพ์
- ปรับปรุงและแก้ไขข้อบกพร่องของแม่พิมพ์ฉีดยาง

#### กิจกรรมที่ 7 สรุปผลการวิจัย

- อภิปรายผลการวิจัยและจัดทำเป็นเอกสารเพื่อเป็นตัวอย่างในการนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อื่นที่ใกล้เคียงกัน
- 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 ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์หาจุดการทำงานที่เหมาะสมในการบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โพลิเมอร์และยาง (Polymer and Rubber Injection Moulding) ซึ่งโปรแกรมจะทำการจำลองรูปแบบของการไหลและการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูป ซึ่งแต่เดิมแล้วโปรแกรมนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาบนฐานของ UNIX แต่ในปัจจุบันสามารถที่จะนำมาใช้หรือสามารถรองรับโปรแกรมที่ใช้งาน Windows ได้โดยในปัจจุบันโปรแกรมได้ถูกพัฒนาจนถึง Release 4.3 แล้ว

#### 1) การทำงานของ โปรแกรม 3D-SIGMA Release 4.3

ขั้นตอนของการใช้โปรแกรมเริ่มจากการกำหนดครูปทรงต่าง ๆ ของชิ้นงานที่จะทำการขึ้นรูปโดยการนឹดต่อจากันนี้จึงออกแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์เพื่อที่จะทำการจำลองการทำงานของการนឹดวัสดุเข้าไปในแม่พิมพ์นឹดซึ่งโปรแกรม 3D-SIGMA มีพื้นฐานการทำงานอยู่สู่สมการ Navier – Stokes ซึ่งสามารถที่จะจำลองลักษณะการไหลของโพลิเมอร์และยาง เพื่อช่วยในการกำหนดครูปร่างขนาดของแม่พิมพ์ที่ทำการออกแบบ

#### 2) ข้อมูลทั่วไปของ โปรแกรม 3D-SIGMA Release 4.3

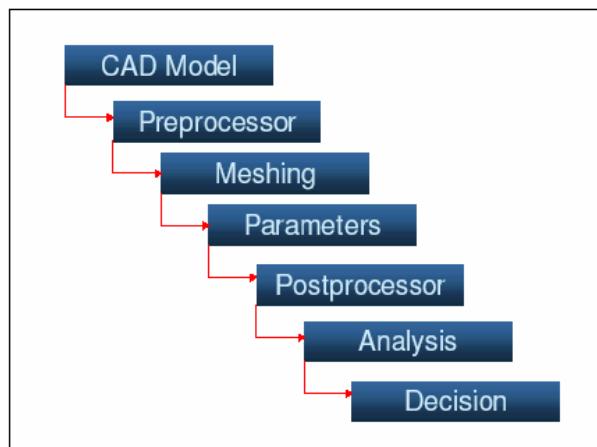
- สามารถคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุในช่วงขณะทำการนឹด
- ขณะทำการจำลองการนឹด สามารถแสดงรูปแบบของการไหลของวัสดุที่เข้าไปในแม่พิมพ์ได้ทุกขั้นตอนตามที่ต้องการ
- ระยะเวลาของการนឹดวัสดุเข้าไปในแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ ซึ่งสามารถกำหนดได้ในโปรแกรมก่อนทำการจำลองการไหล
- ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนนี้สามารถให้มีทั้งแบบการนำ (Conduction) การพา (Convection) และการแพรังสี (Radiation) ได้
- สามารถใช้ศึกษาตัวแปรสำคัญต่าง ๆ ในการนឹดวัสดุได้ เช่น เวลาในการนឹด ลักษณะของการกระจายตัวของความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ ความเร็วที่ใช้ขณะทำการนឹด และความดันสูงสุดที่เกิดระหว่างการนឹด
- สามารถคำนวณเวลาการไหลของวัสดุที่เข้าสู่แม่พิมพ์ และตำแหน่งของวัสดุที่นឹดเข้าไปในแม่พิมพ์ได้
- สามารถแสดงผลการ分布ของอุณหภูมิที่เกิดกับชิ้นงานและแม่พิมพ์ ซึ่งทำให้เกิดลักษณะของการอตัวของวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วลักษณะเฉพาะของการขึ้นรูปวัสดุโดยการนឹดนี้จะต้องดูลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งตัวชิ้นงานและแม่พิมพ์ ซึ่งจะมีผลต่อการขึ้นรูป ดังนั้นโปรแกรม

3D-SIGMA สามารถกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในการพิจารณาและคุณลักษณะของการกระจายตัวของอุณหภูมิของยางที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ได้อย่างชัดเจน

- สามารถคำนวณหาความเค้นที่ตอกด้านที่กระเจยอยู่ในชิ้นงานที่ฉีด
- สามารถคำนวณระดับความเค้นในแต่ละจุดของรูปทรงของชิ้นงานได้
- สามารถประมาณอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ได้เนื่องจากสามารถคำนวณหาความเค้นที่เกิดขึ้นที่แม่พิมพ์ได้

### 3) หลักการ โดยทั่วไปของโปรแกรม 3D-SIGMA

ขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรม 3D-SIGMA ดังแสดงในรูปที่ 62

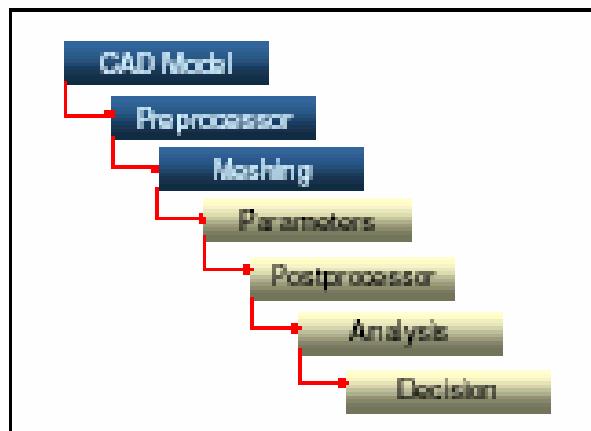


รูปที่ 62 แสดงถึงขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม 3D-SIGMA

## รูปทรงของแบบจำลองในโปรแกรม 3D-SIGMA

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

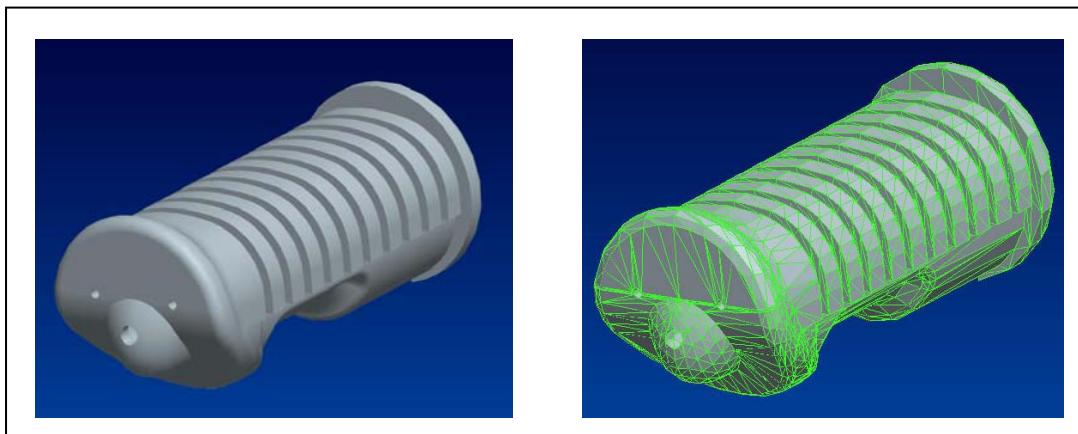
ในรูปที่ 63 นี้จะแสดงถึงขั้นตอนในการสร้างรูปทรงของชิ้นงาน (CAD Model) และการทำหนดชิ้นส่วนต่างที่จะทำการวิเคราะห์ในโปรแกรม เช่น ชิ้นงาน (Parts), ช่องทางวิ่ง (Runner), รูจีด (Gate), แม่พิมพ์ (Mould) และช่องทางเข้า (Inlet) และการกำหนดขนาดของอิเลเมนต์ของชิ้นงานให้เหมาะสมก่อนที่จะทำการวิเคราะห์



รูปที่ 63 แสดงถึงขั้นตอนการทำงานโปรแกรม 3D-SIGMA ก่อนทำการจำลองการไฟล

### รูปทรงชิ้นงาน (CAD Model)

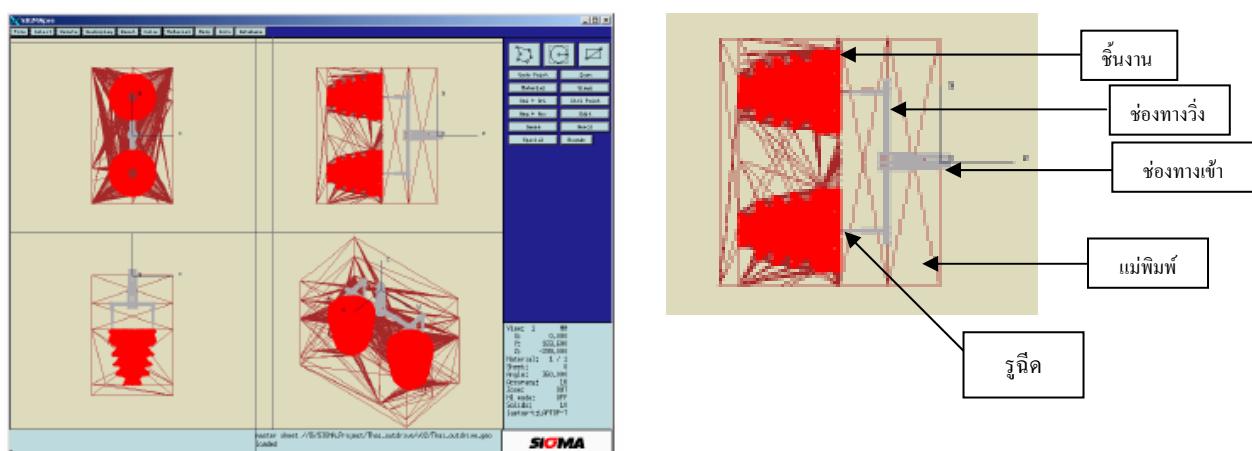
ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ยางรองเท้าจักรยานยนต์ (Rubber step) (ภาคผนวก ก) ดังรูปที่ 64 เมื่อได้รูปทรงของชิ้นงาน ทางวิ่ง รูจีดแล้วจากนั้นทำการบันทึกข้อมูลในรูปแบบของ STL files (ต้องกำหนดพิกัดของชิ้นส่วนแต่ละอันให้อยู่ในรูปแบบจริงที่จะทำการฉีด) ควรกำหนดให้จุดเริ่มต้นของแกน (Origin) อยู่บนปากทางเข้าของทางวิ่ง



**รูปที่ 64** ยางรองเท้าจักรยานยนต์ที่ใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบเยี่ยนขึ้น

### การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม 3D-SIGMA

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

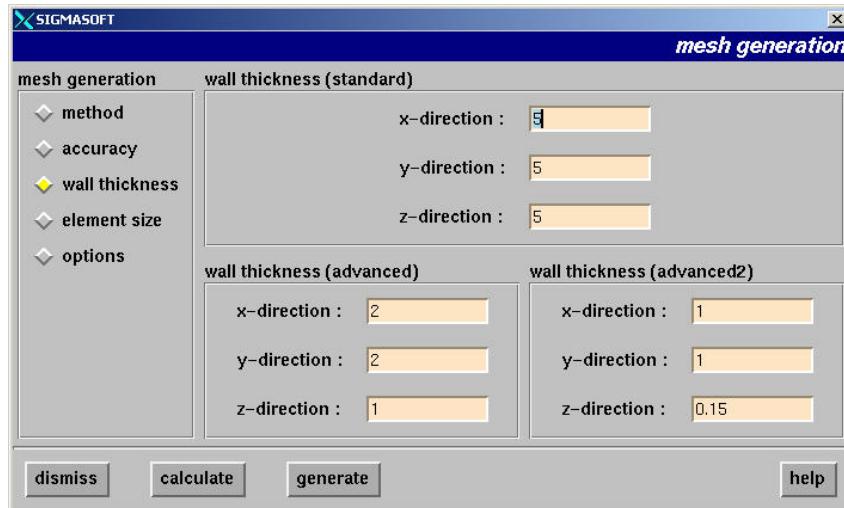


**รูปที่ 65** แสดงหน้าต่างของขั้นตอน Preprocessor

### การกำหนดค่าของอเลิมเม้นต์ (Meshing)

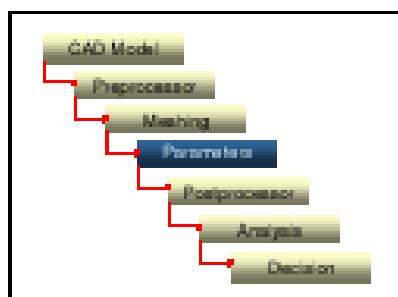
ในการกำหนดค่าของอเลิมเม้นต์ ขั้นแรกของโปรแกรม สามารถที่จะกำหนดได้โดยการแบ่งโดยอัตโนมัติหรือถ้าจำนวนของอเลิมเม้นต์ที่แบ่งนั้นมีมากจนเกินไปก็สามารถที่จะลดจำนวนของอเลิมเม้นต์ให้น้อยลงได้โดย การกำหนดจำนวนของอเลิมเม้นต์เองซึ่งถ้ากำหนดอเลิมเม้นต์เองต้องทำการตรวจสอบค่าของแบบจำลองโดยการดูค่าของปัญหาที่เกิดขึ้น เช่น ความหนาของชิ้นงานเหมาะสมในการแบ่งอเลิมเม้นต์หรือใหม่ถ้ามีปัญหาให้กลับมา

กำหนดค่าของความหนา (Wall Thickness) ให้เล็กลงหรือกำหนดค่าของขนาดэлемент (Element Size) ให้มีขนาดที่เหมาะสมสมดังแสดงในรูปที่ 66



รูปที่ 66 แสดงการกำหนดค่าความหนาของชิ้นงานให้เหมาะสม (Wall Thickness)

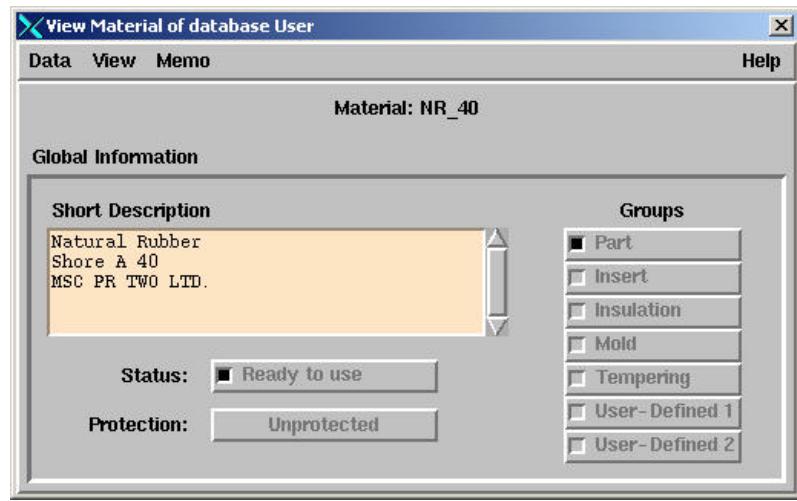
### การกำหนดค่าของตัวแปร (Parameter Setting)



ในการกำหนดค่าตัวแปรก่อนที่จะทำการจำลองการไอลันน์ จะต้องเลือกว่าจะใช้วัสดุใดในการผลิตชิ้นงานในตัวอย่างที่เห็นในรูปที่ 67 นั้นจะใช้ยาง NR 40 (ภาคผนวก ๑) ซึ่งข้อมูลของยางในแต่ละชนิดนั้น จะอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรมหรือสามารถที่จะสร้างซึ่งข้อมูลที่ต้องการของการสร้างฐานข้อมูลภายในโปรแกรมได้แก่

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

\* ในการทดสอบนี้ควรกระทำที่อุณหภูมิอย่างน้อย 3 ค่าและในแต่ละช่วงของอุณหภูมนี้ ควรมีการเก็บข้อมูลไม่น้อยกว่า 15 ค่า



รูปที่ 67 แสดงลักษณะการเลือกของชนิดของยางที่จะทำการจำลองการไหล

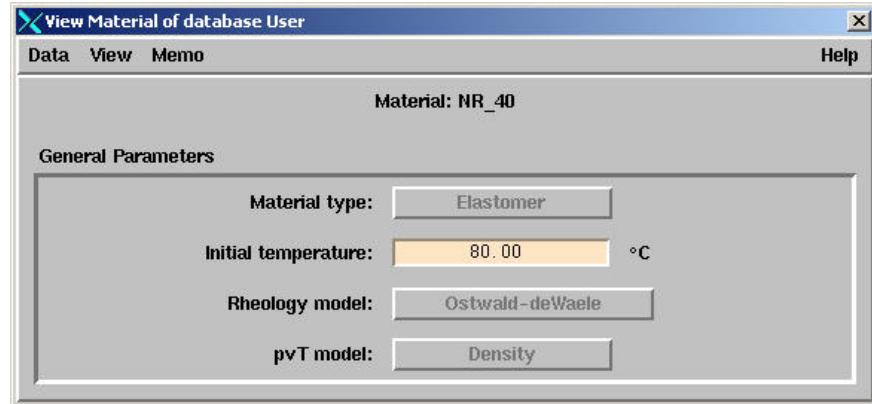
ทำการกำหนดค่าที่ต้องการพื้นฐานของโปรแกรมได้แก่ค่า

- ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการรีด(Initial Temperature) ต้องกำหนดขึ้นตามสภาพความเป็นจริงดังแสดงในรูปที่ 68
- ค่าของ Heat Conductivity (Lambda) ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ (W/mK) ดังแสดงในรูปที่ 69
- ค่าของ Density (Rho) as function of Temperature ( $\text{g}/\text{cm}^3, {}^\circ\text{C}$ ) ดังแสดงในรูปที่ 70
- ค่าของ Heat Capacity (Cp) as function of Temperature ( $\text{J}/\text{kg K}, {}^\circ\text{C}$ ) 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

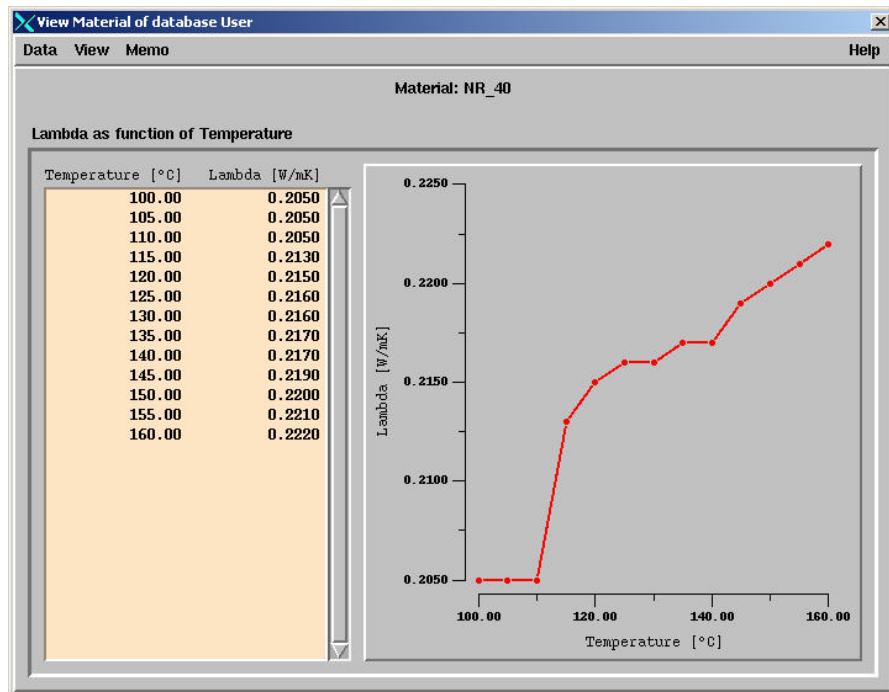
เมื่อกำหนดค่าลงไปแล้วหรือเลือกอาชนิดของยางที่มีในโปรแกรมแล้วโปรแกรมก็จะทำการคำนวณหาค่าที่จะใช้ในการจำลองการไหลขึ้นมาเองได้แก่ค่าต่างๆ ดังนี้

- 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

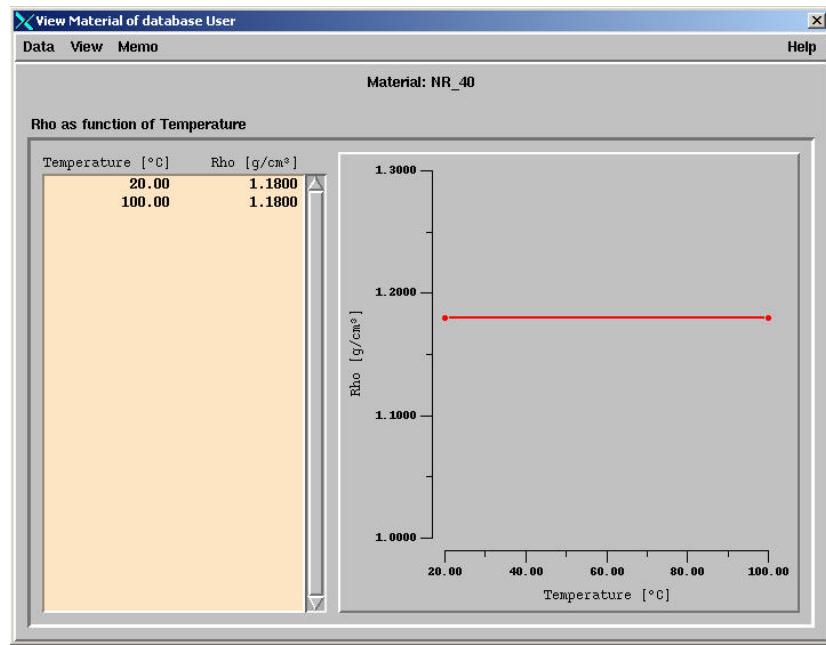
- ค่าของ Reaction-Kinetics (Deng-Isayev) ( $1/\min^n$ , J/mol) ดังแสดงในรูปที่ 78
- ค่าของ Curing Rate: Curing Rate as Function of Time ดังแสดงในรูปที่ 79



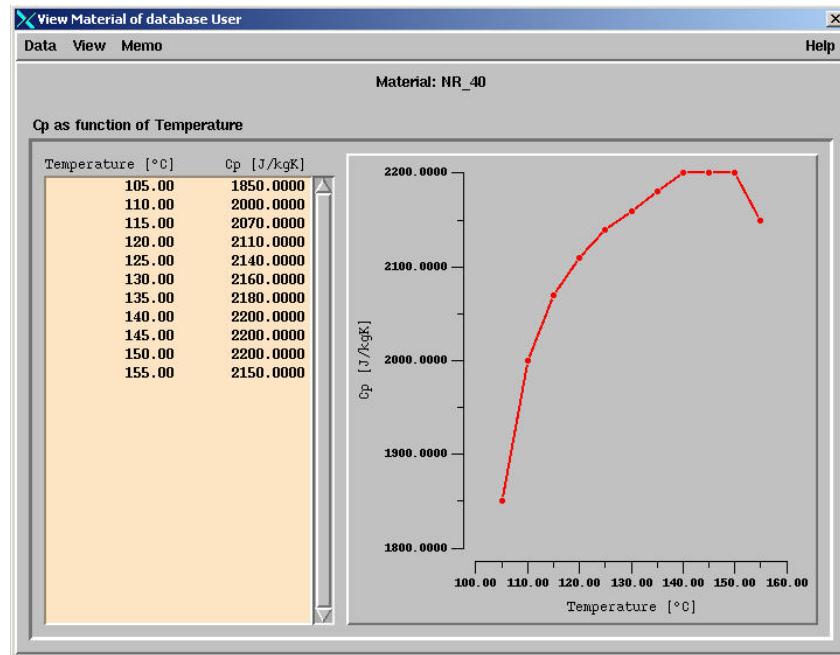
รูปที่ 68 แสดงค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการนีด (Initial Temperature)



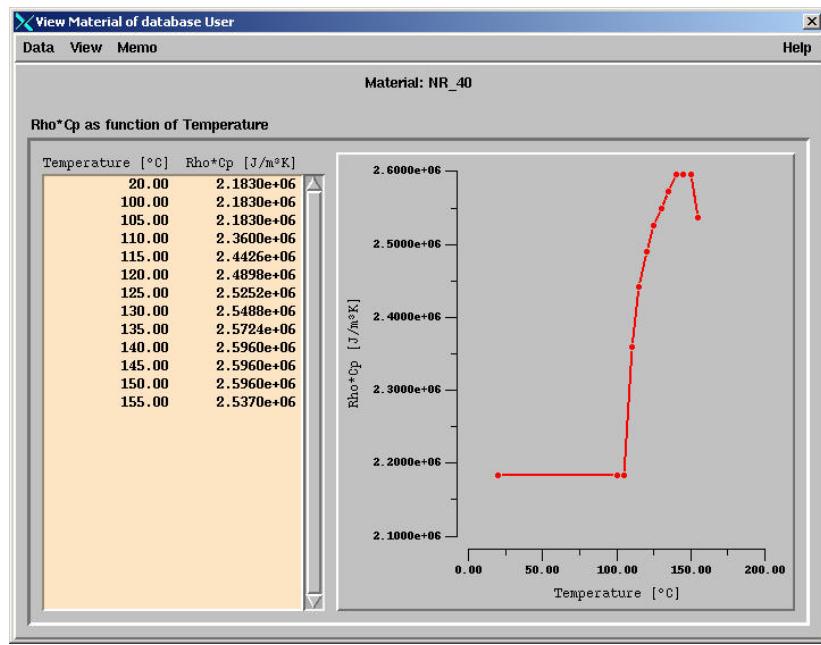
รูปที่ 69 แสดงค่าของ Heat Conductivity (Lambda) ในช่วงอุณหภูมิต่างๆ (W/mK)



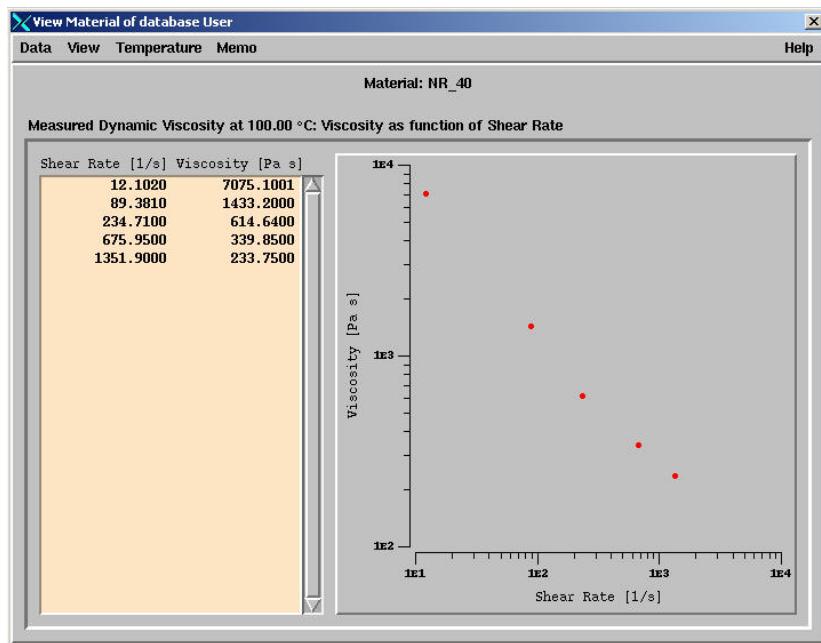
รูปที่ 70 แสดงค่าของ Density (Rho) as Function of Temperature ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $^\circ\text{C}$ )



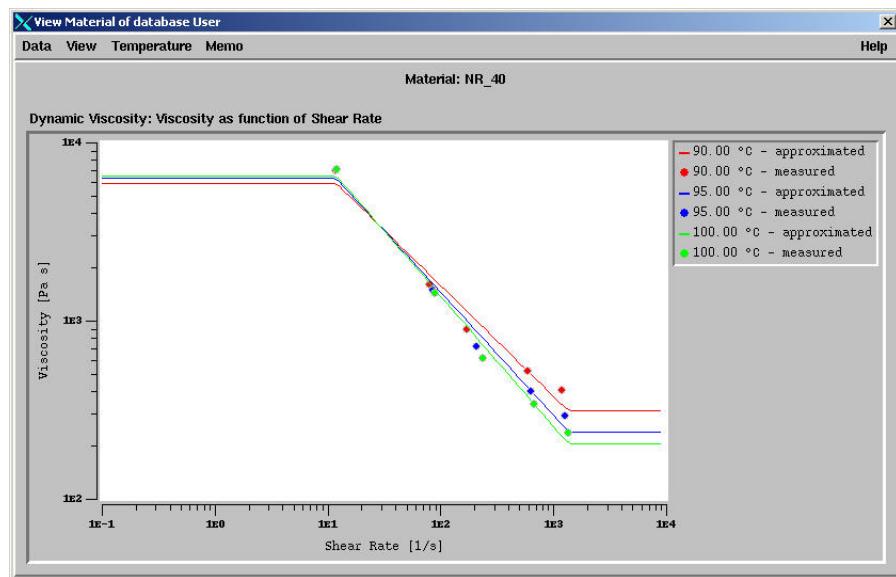
รูปที่ 71 แสดงค่าของ Heat Capacity (Cp) as Function of Temperature ( $\text{J}/\text{kg K}$ ,  $^\circ\text{C}$ )



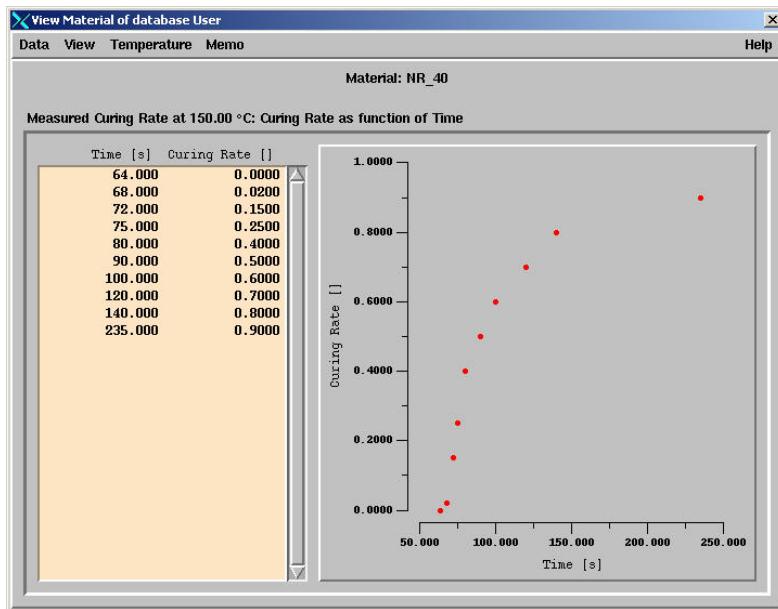
รูปที่ 72 แสดงค่าของ Density (Rho) x Heat Capacity (Cp) as Function of Temperature



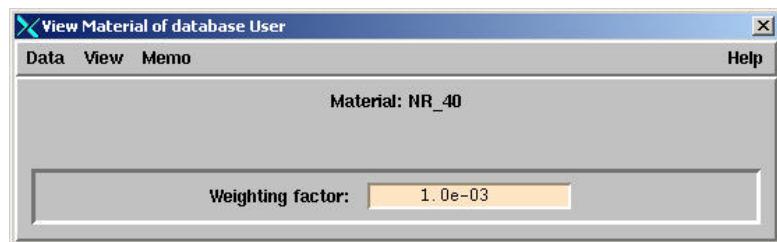
รูปที่ 73 แสดงค่าของ Dynamic Viscosity at 100.00 °C: Viscosity as Function of Shear Rate



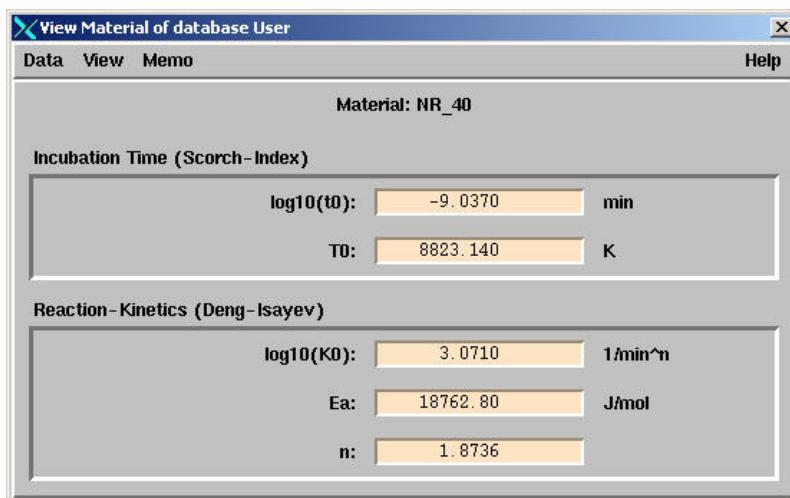
รูปที่ 74 แสดงค่าของ Dynamic Viscosity: Viscosity as Function of Shear Rate



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

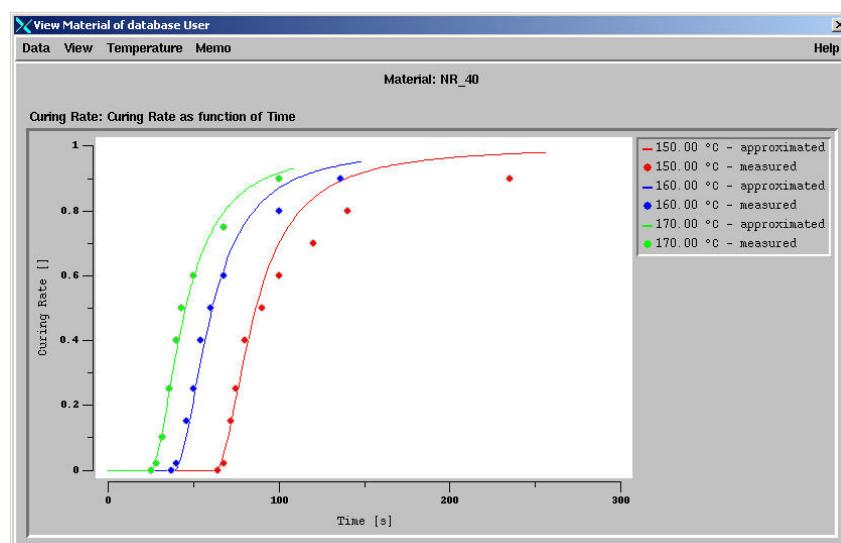


รูปที่ 76 แสดงค่าของ Weighting Factor



รูปที่ 77 แสดงค่าของ Incubation Time (Schorch-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)

ในกระบวนการกำหนดค่าเริ่มต้นก่อนทำการจำลองการไหลของกระบวนการนี้จะต้องกำหนดค่าของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์และต้องกำหนดค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นของทั้งชิ้นงานและของแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 79 ต่อจากนี้ทำการกำหนดค่าของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ 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

material 1	ID label 1	material 2	ID label 2	HTC database/filename	HTC dataset group
Part class		Mould class		SIGMA Database/C300.0	Constant
Part	ID 1	Slides	ID 1	SIGMA Database/C300.0	Constant
Part	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C300.0	Constant
Part	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C300.0	Constant
Runner	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C300.0	Constant
Runner	ID 1	Movable Half	ID 2	SIGMA Database/C300.0	Constant
Runner	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C300.0	Constant
Ingate	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C300.0	Constant
Ingate	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C300.0	Constant
Mould class		Mould class		Constant	
Slides	ID 1	Movable Half	ID 1	SIGMA Database/C300.0	Constant
Slides	ID 1	Fixed Half	ID 1	SIGMA Database/C300.0	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