



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางหุ้มมอเตอร์ใน
โทรศัพท์เคลื่อนที่

A Development of Design and Making of the Rubber Mould for Motor Boots Used in
Mobile Phones

นามผู้วิจัย นายรุ่งธรรม ปัญญวิภาต

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุภสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์คุณยุต เอี่ยมสอาด, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ชนะ รักเกียรติ, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงวี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่

A Development of Design and Making of the Rubber Mould
for Motor Boots Used in Mobile Phones

โดย

นายรุ่งธรรม ปัญญาวิภาต

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2553

รุ่งธรรม ปัญญาวิภาต 2553: การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อย่าง
หุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรม
เครื่องกล) สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุกสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D. 96 หน้า

ในปัจจุบันแนวโน้มอุตสาหกรรมแม่พิมพ์และการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กทั้ง
ต่างประเทศและในประเทศไทยกำลังเริ่มมีบทบาทมากขึ้นในอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างไรก็ตามการ
ออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูงของประเทศไทยนั้นยังต้องอาศัยองค์
ความรู้และเทคโนโลยีจากต่างประเทศ โดยการนำเข้าแม่พิมพ์จากต่างประเทศ หรือผลิตโดยบริษัท
จากต่างประเทศ นอกจากนั้นการผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูงต้องใช้เทคโนโลยีและ
เครื่องจักรที่ทันสมัย ตัวอย่างเช่น การใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การไหล
ของยางในแม่พิมพ์ ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ดำเนินการจำลองการไหลของยางในแม่พิมพ์ด้วยคอมพิวเตอร์เข้า
มาช่วยในการออกแบบรูปร่างและทางวิ่งที่เหมาะสมเพื่อนำไปผลิตแม่พิมพ์สำหรับชิ้นงานยางหุ้ม
มอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ รวมทั้งทดสอบขึ้นรูปจริง โดยผลจากการทดสอบจริงแสดงให้เห็น
การไหลของยางในทางวิ่งมีความสมดุลกันในแต่ละเบ้า และลักษณะการไหลของยางในการจำลอง
และทดสอบจริงมีความสอดคล้องกัน ผลการทดลองพบว่าการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย
ทำนายพฤติกรรมการไหลของยางสามารถช่วยลดเวลาการลองผิดลองถูกได้ และช่วยให้สามารถ
ออกแบบแม่พิมพ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นการวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางสำหรับการ
ออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อย่าง รวมทั้งแนวทางในการศึกษาตัวแปรอื่นที่สำคัญ
สำหรับกระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Rungtham Panyawipart 2010: A Development of Design and Making of the Rubber Mould for Motor Boots Used in Mobile Phones. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Supasit Rodkwan, Ph.D. 96 pages.

Presently, micro-mould and micro injection moulding is widely used in many industrials. However, in Thailand, the designing and manufacturing of micro-mould still depend on overseas technology such as imported mould and overseas mould manufacturer. Furthermore, these processes need to use high technology and modern machine, such as computer aided engineering in rubber injection moulding simulation. In this research, the rubber injection moulding simulation is used to optimize the design of runner and gate to make the motor boot injection mould. The experimental results show the balance of rubber flow in runner same as simulation results. The results shown that, using of computer aided engineering in rubber injection moulding simulation can reduce the try-out time and more performance design. According to overall point of views, this research is the guide line and basis of the design and manufacturing of rubber injection moulding.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือจนวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อาจารย์ ดร. ชนะ
รักษ์ศิริ และอาจารย์ ดร. คุณยุต เอี่ยมสอาด สำหรับคำแนะนำต่างๆในการวิจัยและการทำ
วิทยานิพนธ์เล่มนี้มาโดยตลอด ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันคั่นคว่ำและ
พัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สำหรับอุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัย ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และมูลนิธิ
ทุนการศึกษาเชล สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย ขอขอบคุณบริษัท เอส เค โพลีเมอร์ จำกัด สำหรับ
ตัวอย่างกรณีศึกษา วัสดุในการวิจัย ข้อมูลและคำแนะนำในการทำวิจัย ขอขอบคุณคุณวัชรพงศ์ ชู
แก้ว และทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวมาในที่นี้สำหรับความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และกำลังใจมาโดย
ตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาสำหรับกำลังใจ และสิ่งต่างๆให้กับผู้วิจัยเสมอ
มาจนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงด้วยดี

รุ่งธรรม ปัญญาวิภาต

พฤษภาคม 2553

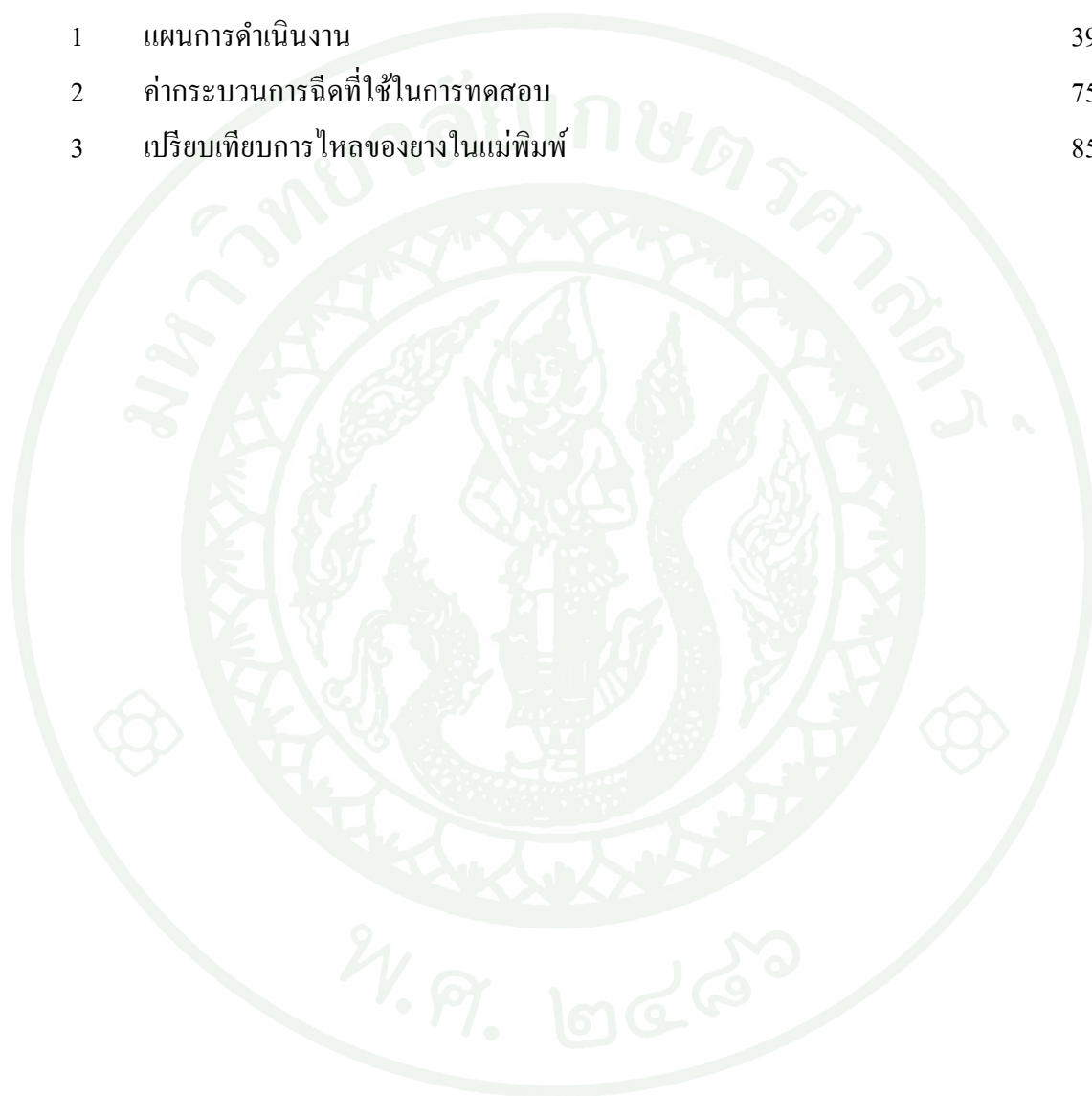
สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วิธีการ	38
ผลและวิจารณ์	51
สรุปและข้อเสนอแนะ	87
สรุปผล	87
ข้อเสนอแนะ	91
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	92
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	96

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แผนการดำเนินงาน	39
2	ค่ากระบวนการคิดที่ใช้ในการทดสอบ	75
3	เปรียบเทียบการไหลของยางในแม่พิมพ์	85



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างเคมีของยางซิลิโคน	6
2 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป	7
3 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป	7
4 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดส่ง	8
5 แสดงการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดส่ง	9
6 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง (ก) และแนวนอน (ข)	10
7 การขึ้นรูปยางด้วยวิธีการฉีด (ก) สกรุดันยางเข้าไปในเบ้าแม่พิมพ์ (ข) สกรุดันยางจนเต็มเบ้าแม่พิมพ์ (ค) ยางคงรูป สกรูหมุนกลับ แม่พิมพ์เปิดและชิ้นงานหลุดออกจากแม่พิมพ์	11
8 เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง	12
9 เครื่องฉีดยางแบบแนวนอน	12
10 ตัวอย่างชิ้นงานขนาดเล็ก	15
11 ดอกกีดชิ้นงานทั่วไปขนาด 6 มม. เทียบกับดอกกีดชิ้นงานขนาด 200 ไมโครเมตร	16
12 เครื่องฉีดขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก	16
13 เครื่องฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกขนาดเล็ก	17
14 ตัวอย่างชิ้นส่วนภายในของเครื่องฉีดขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก	17
15 ลักษณะการวางรูเข้าที่ตำแหน่งต่างๆ	18
16 ลักษณะรอยต่อที่เกิดจากรูเข้า 2 ตำแหน่ง	19
17 รูเข้าแบบขอบ	20
18 ส่วนประกอบของรูเข้าแบบขอบ	20
19 ลักษณะหน้าตัดของทางวิ่งแบบต่างๆ	21
20 ลักษณะทางวิ่ง ก) ทางวิ่งแบบ Y ข) ทางวิ่งแบบ X และ ค) ทางวิ่งแบบ H	22
21 การวางเบ้าแม่พิมพ์มากกว่าหนึ่งเบ้าขึ้นไป	22
22 ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม 3D-SIGMA	25
23 ยางรองเท้าจักรยานยนต์ที่ใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบเขียนขึ้น	26
24 หน้าต่างของขั้นตอน Preprocessor	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
25 การกำหนดค่าความหนาของชิ้นงานให้เหมาะสม	28
26 การเลือกของชนิดของยางที่จะทำการจำลองการไหล	29
27 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการฉีด	31
28 ค่าอัตราการบ่งที่อุณหภูมิ 150.00 องศาเซลเซียส	31
29 ค่าการนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	32
30 ค่าของความถ่วงจำเพาะ	32
31 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ	33
32 ค่าของความหนืดขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 90.00 องศาเซลเซียส	33
33 ค่าของความหนืดขึ้นกับอัตราเฉือนที่ 3 อุณหภูมิ	34
34 ค่าถ่วงน้ำหนัก	34
35 ค่าจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา	34
36 ค่าอัตราการสุกของยาง	35
37 กำหนดค่าของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์และต้องกำหนดค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุยางและของแม่พิมพ์	36
38 การกำหนดค่าของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์หรือแม่พิมพ์ตัวที่คงที่กับแม่พิมพ์ตัวที่เคลื่อนที่	36
39 การกำหนดรอบการทำงานที่ต้องการจำลองการไหล	37
40 ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่นำมาเป็นกรณีศึกษา	42
41 ปัญหาชิ้นงานที่มีครีป (flash)	43
42 แบบ 3 มิติ ของยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่	44
43 ค่าความถ่วงจำเพาะของยางซิลิโคน	45
44 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางซิลิโคน	46
45 ค่าการนำความร้อนของยางซิลิโคน	46
46 ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสของยางซิลิโคน	47
47 ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	47
48 ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
49 อัตราการบ่มของยางซิลิโคนที่ 3 อุณหภูมิ	48
50 ตัวแปรทั่วไปของยางซิลิโคน	49
51 แผนผังการวิเคราะห์การไหล	50
52 ลักษณะรูเข้าทั้ง 5 แบบที่จะนำมาวิเคราะห์การไหลด้วยคอมพิวเตอร์	51
53 ลักษณะการออกแบบของรูเข้าแบบแรก	52
54 ขนาดของรูเข้าแบบแรก	53
55 การไหลของอนุภาค (tracer) ยางที่ระยะเวลาต่างกัน	53
56 ลักษณะรูเข้าที่ได้รับการปรับปรุงเป็นแบบที่ 2	54
57 ขนาดของรูเข้าแบบที่ 2	54
58 ก) การไหลของอนุภาคยาง และ ข) ลักษณะการไหลของยางในรูเข้าแบบที่ 2	55
59 ลักษณะรูเข้าแบบที่ 3	55
60 ภาพมุมมองบนของรูเข้าแบบที่ 3	56
61 ก) การไหลของอนุภาคยาง และ ข) ลักษณะการไหลของยางในรูเข้าแบบที่ 3	56
62 เปรียบเทียบลักษณะการไหลของยางของรูเข้าแบบที่ 2 (ซ้าย) และ 3 (ขวา)	56
63 การไหลของอนุภาคยาง และลักษณะการไหลของยางในรูเข้าแบบที่ 4	57
64 เปรียบเทียบอายุของยางของรูเข้าแบบที่ 3 (ซ้าย) และ 4 (ขวา)	57
65 ลักษณะรูเข้าแบบที่ 5	58
66 ภาพมุมมองบนและหน้าของรูเข้าแบบที่ 5	58
67 การไหลของอนุภาคยาง และลักษณะการไหลของยางที่ระยะเวลาต่างกัน	59
68 กราฟเปรียบเทียบความดันอิสระระหว่างรูเข้าแบบที่ 4 (ซ้าย) และ 5 (ขวา)	59
69 เปรียบเทียบความเร็วฉีดของยางของรูเข้าแบบที่ 4 (ซ้าย) และ 5 (ขวา)	60
70 ลักษณะของทางวิ่ง 24 เบ้า	60
71 ลักษณะการไหลของยางในทางวิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ	61
72 ลักษณะการไหลของยางในทางวิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ	61
73 ลักษณะการไหลของยางในทางวิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ	62
74 ลักษณะการไหลของยางในทางวิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
75	ลักษณะการไหลของยางในทางวิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ
76	ลักษณะการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์
77	แบบประกอบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ 3 มิติ
78	แบบ 3 มิติของแม่พิมพ์ฝั่งตัวผู้
79	แบบแม่พิมพ์ฝั่งตัวผู้
80	แบบแม่พิมพ์ฝั่งตัวเมีย
81	แบบแม่พิมพ์ของสไลด์
82	ส่วนเบ้าแม่พิมพ์และสไลด์ขณะเปิดออก
83	ส่วนเบ้าแม่พิมพ์และสไลด์ขณะปิด
84	แม่พิมพ์ส่วนคอร์
85	เบ้าชิ้นงานส่วนกาวดี
86	แม่พิมพ์ส่วนกาวดี
87	แม่พิมพ์ที่เสร็จสมบูรณ์
88	เครื่องฉีดยางที่ใช้ในการทดสอบครั้งแรก
89	ยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบ
90	การติดตั้งแม่พิมพ์
91	แม่พิมพ์ที่ติดตั้งเสร็จแล้ว
92	การป้อนยางเข้าเครื่อง
93	ชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบฉีด
94	ชิ้นงานยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ได้จากแม่พิมพ์จากงานวิจัย
95	เครื่องฉีดยางขนาด 100 ตันของสถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม
96	ส่วนฐานรองแม่พิมพ์สำหรับยึดแม่พิมพ์และใส่แท่งให้ความร้อน
97	หน้าจอกำหนดค่าการเปิดและปิดแม่พิมพ์
98	หน้าจอกำหนดค่าอุณหภูมิกระบอกฉีด
99	หน้าจอกำหนดค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
100	หน้าจอกำหนดค่ากระบวนการฉีด	78
101	หน้าจอแสดงข้อมูลจริงขณะทำการฉีดขึ้นรูป	78
102	ขั้นตอนการติดตั้งแม่พิมพ์	79
103	ขั้นตอนการติดตั้งแม่พิมพ์	79
104	การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องฉีด	80
105	การยึดแม่พิมพ์บนเครื่องฉีด	80
106	เสร็จสิ้นขั้นตอนการติดตั้งแม่พิมพ์	81
107	การติดตั้งแท่งความร้อน	81
108	แท่งความร้อน	82
109	ชุดแม่พิมพ์ฝั่งคอร์	82
110	ชุดแม่พิมพ์ฝั่งควิตี้	83
111	การเปรียบเทียบลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์ของการทดสอบฉีดจริงและการจำลองด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA	84
112	ชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบฉีดครั้งที่สอง	84
113	แผนผังกระบวนการพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง	89
114	ปัจจัยสำคัญในการออกแบบรูเข้า	90
115	ปัจจัยสำคัญในการออกแบบทางวิ่ง	90
116	ปัจจัยสำคัญในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก	90

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$^{\circ}\text{C}$	=	degree Celsius
CAD	=	computer aided design
CAE	=	computer aided engineering
CAM	=	computer aided manufacturing
$((\text{CH}_3)_2\text{SiO})_n$	=	polydimethylsiloxanes
C_p	=	heat capacity
EDM	=	electric discharged machine
NR	=	natural rubber
pVT	=	pressure volume temperature
Rho	=	density
STL	=	stereolithography format
T_g	=	glass transition

การพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางหุ้มมอเตอร์ ในโทรศัพท์เคลื่อนที่

A Development of Design and Making of the Rubber Mould for Motor Boots Used in Mobile Phones

คำนำ

ในปัจจุบันแนวโน้มอุตสาหกรรมแม่พิมพ์และการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก (micro-moulding) ทั้งในต่างประเทศและในประเทศไทยกำลังเริ่มมีบทบาทในวงการอุตสาหกรรมต่างๆ มากขึ้น เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมเครื่องมือแพทย์ อุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูงของประเทศไทยนั้น ยังต้องอาศัยองค์ความรู้และเทคโนโลยีจากต่างประเทศอยู่ โดยการนำเข้าแม่พิมพ์จากต่างประเทศ หรือผลิตในประเทศโดยบริษัทจากต่างประเทศ นอกจากนั้นการผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูงต้องใช้เทคโนโลยีและเครื่องจักรที่ทันสมัย เช่น Micro-Milling, Micro-EDM และการตกแต่งผิวแม่พิมพ์แบบละเอียด เป็นต้น รวมทั้งใช้องค์ความรู้และความชำนาญในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์มาก โดยปัญหาทั่วไปที่พบได้จากแม่พิมพ์ขนาดเล็กนั้นคือ การขาดเครื่องมือและเครื่องจักรในการขึ้นรูปชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ปัญหาการขึ้นรูปชิ้นส่วนแม่พิมพ์ให้ได้ขนาดตามต้องการ ปัญหาการตกแต่งและขัดผิวแม่พิมพ์ ปัญหาการปรับแต่งและประกอบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ไม่ดีทำให้เกิดครีบ เป็นต้น

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิจัยและพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูง ร่วมกับ บริษัท เอสเค โพลีเมอร์ จำกัด โดยแม่พิมพ์ของชิ้นงานกรณีศึกษาที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นแม่พิมพ์แบบอัดซึ่งพบปัญหาการเกิดครีบที่ชิ้นงานซึ่งทำให้ทางบริษัทไม่สามารถผลิตชิ้นงานได้คุณภาพตามมาตรฐานที่ลูกค้ากำหนด เนื่องจากปัญหาดังกล่าวทำให้มีต้นทุนการผลิตสูง ดังนั้นโครงการนี้จึงเป็นโครงการนำร่องในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็กชิ้นใหม่เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว แม่พิมพ์ใหม่ที่ผลิตขึ้นจะมีทั้งแม่พิมพ์ฉีดและอัด โดยโครงการนี้จะเน้นที่แม่พิมพ์ฉีด และทำแม่พิมพ์อัดควบคู่ไปด้วยเพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้

จากหลักการและเหตุผลดังกล่าว ทางคณะผู้เสนอโครงการนี้เห็นว่าการสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็กนั้นจะเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมแม่พิมพ์ภายในประเทศ และหากมีการนำเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ (CAD/CAM) รวมทั้งการนำคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (CAE) เข้ามาทำนายพฤติกรรมการไหลของยาง และผลกระทบทางด้านอุณหภูมิของแม่พิมพ์ จะสามารถทำให้ได้แม่พิมพ์ที่ดีมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้เป็นการเพิ่มศักยภาพและโอกาสการแข่งขันของอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ภายในระดับนานาชาติอีกด้วย และยังเป็นการสนับสนุนให้มีการสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็กตามหลักวิชาการและสามารถสรุปเป็นคู่มือสำหรับการถ่ายทอดและเผยแพร่ความรู้ในเรื่องการพัฒนาแม่พิมพ์และวิธีออกแบบสำหรับผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กต่อไป

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษากระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูง โดยการนำคอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมมาวิเคราะห์การไหลของยางในแม่พิมพ์ขณะฉีดขึ้นรูป

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ชิ้นงานที่นำมาเป็นกรณีศึกษา คือ ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์มือถือ โดยใช้วัสดุเป็นยางซิลิโคน
2. การยืนยันผลการจำลองการไหลด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA จะใช้จากชิ้นงานกรณีศึกษาอื่นที่เคยทำมาแล้ว

การตรวจเอกสาร

1. บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lina และ Young ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการไหลของโพลิเมอร์ในโครงสร้างขนาดเล็ก (Micro-Structure) ในชิ้นงาน (Lina and Young, 2008) Shen และ Wu ได้ทำการศึกษาการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็กแบบสามมิติด้วยการจำลองเชิงตัวเลข (Shen and Wu, 2002) และยังประยุกต์ใช้วิธีการจำลองเชิงตัวเลขในโครงสร้างขนาดเล็กของเลนส์ขนาดเล็กด้วย (Shen *et.al.*, 2008) การศึกษาผลกระทบของผิวแม่พิมพ์ที่มีต่อคุณภาพการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็กได้ถูกศึกษาโดย Griffiths (Griffiths *et.al.*, 2007) Kemmann ได้ทำการศึกษาการจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก (Kemmann *et.al.*, 2002) Young ได้ศึกษาการไหลในช่องทางขนาดเล็กสำหรับการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก โดยศึกษาผลกระทบจากตัวแปรต่างๆ ในการฉีดขึ้นรูป (Young, 2007) นอกจากการศึกษาในส่วนของการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็กแล้วยังมีการศึกษาในส่วนของการตัดเฉือนและการขึ้นรูปแม่พิมพ์ขนาดเล็ก Masuzawa ได้ศึกษาแนวทางและการประยุกต์การตัดเฉือนชิ้นงานขนาดเล็กด้วยวิธีการต่างๆ และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น (Masuzawa, 2000) Perez ได้ทำการศึกษาการประมาณค่าแรงตัดเฉือนในการขึ้นรูป (Perez *et.al.*, 2007) กระบวนการขึ้นรูปด้วยวิธีการกัดเซาะโลหะด้วยไฟฟ้าขนาดเล็ก (micro-EDM) ก็มีการศึกษาอยู่มาก ตัวอย่างเช่น การศึกษาลักษณะการกัดเซาะชิ้นงาน (Wong *et.al.*, 2003) การหาค่าเหมาะสมในการขึ้นรูป (Bigot *et.al.*, 2006) การเจาะรูชิ้นงาน (Diver *et.al.*, 2004) และการประยุกต์ใช้ CAD/CAM ในการขึ้นรูปแบบสามมิติ (Rajurkar and Yu, 2000) เป็นต้น

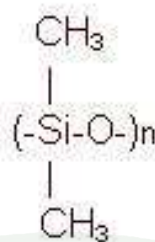
2. คุณสมบัติเบื้องต้นของยางและยางซิลิโคน

อีลาสโตเมอร์ (elastomers) เป็นโพลิเมอร์แบบอสัณฐาน (amorphous polymers) โดยอีลาสโตเมอร์สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ เทอร์โมเซต (thermosets) และเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) โดยเทอร์โมเซตจะมีโครงสร้างโมเลกุลแบบตาข่าย 3 มิติ (3D network) มีสายโมเลกุลยาวซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะทางเคมี และสามารถดูดซับสารละลายได้ดี แต่ไม่สามารถขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้ด้วยการให้ความร้อน ส่วนโมเลกุลของเทอร์โมพลาสติกนั้นจะแตกต่างกันออกไป เพราะแต่ละโมเลกุลจะเชื่อมกันทางกายภาพเท่านั้น และสามารถดูดซับสารละลายได้บางอย่างเท่านั้น นอกจากนั้นเทอร์โมพลาสติกสามารถทำการขึ้นรูปใหม่อีกครั้งได้ด้วยการให้ความร้อน ทั้ง

เทอร์โมเซตและเทอร์โมพลาสติกถูกนำไปใช้แตกต่างกันตามคุณสมบัติอื่นๆ อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้ว ความต้องการที่จะนำไปใช้เป็นยางรถยนต์ และยางรองแท่นเครื่องยนต์นั้น เทอร์โมเซตจะเหมาะสมกว่าเนื่องจากคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น (elasticity) และความทนทาน (durability) โดยหลังจากการเติมสารเคมีต่างๆ เข้าไปผสมกับอีลาสโตเมอร์ จะได้สิ่งที่เรียกว่า คอมพาวนด์ (compound) และเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนและกระบวนการวัลคาไนเซชัน (vulcanization) แล้วจะได้สิ่งที่เรียกว่า ยาง (rubber) (Gent, 2001) นอกจากนี้ยังสามารถนิยามความหมายของอีลาสโตเมอร์และยางตามมาตรฐานของสมาคมทดสอบวัสดุแห่งสหรัฐอเมริกา (American Society for Testing and Materials, ASTM) (ASTM, 1990) ได้ดังนี้

“อีลาสโตเมอร์สามารถนิยามได้ว่า วัสดุที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยที่อุณหภูมิห้องทั้งรูปร่างและขนาดสามารถคืนตัวได้หลังจากนำแรงที่มากระทำออก ส่วนยางก็สามารถนิยามได้ด้วยมาตรฐานเดียวกัน คือ วัสดุที่สามารถคืนตัวจากการเสียรูปได้อย่างรวดเร็วและแรง และสามารถปรับปรุงสภาพได้แม้ว่าโดยพื้นฐานแล้วจะไม่สามารถละลาย (แต่สามารถเกิดการบวมได้) ได้ในสารละลายที่เดือด เช่น เบนซีน (benzene) เมทิล เอทิลคีโตน (methyl ethylketone) หรือ เอทานอล-โทลูอิน อะเซโอโทรป (ethanol-toluene azeotrope) ยางในสถานะที่แปรสภาพแล้ว ซึ่งปราศจากการเจือจาง จะหดตัวเหลือเพียงไม่ถึง 1.5 เท่าของความยาวเริ่มต้นภายในเวลาหนึ่งนาทีก่อนที่จะได้รับการยืดออกเป็นสองเท่าที่อุณหภูมิห้อง และคงตัวเอาไว้หนึ่งนาทีก่อนที่จะปล่อย” (ASTM, 1990)

ยางซิลิโคน หรือยางซิลาสติก (silastic) เป็นยางสังเคราะห์ที่แตกต่างจากยางประเภทอื่น โดยสายโซ่โมเลกุลหลักของยางซิลิโคนจะเป็นอะตอมของซิลิกอน (Si) และออกซิเจน (O) ซึ่งยางทั่วไปจะมีสายโซ่โมเลกุลหลักเป็นอะตอมคาร์บอน (C) ยางซิลิโคนมีสูตรอย่างง่าย (empirical formula) คือ $((CH_3)_2SiO)_n$ และมีชื่อทางเคมีว่า โพลีไดเมทิลไซโลเซน (polydimethylsiloxanes) (Datta, 2004) โดยโครงสร้างเคมีดังแสดงในภาพที่ 1 ยางซิลิโคนมีอุณหภูมิสถานะคล้ายแก้ว (T_g) ต่ำมาก โดยทั่วไปมีค่าประมาณ $-127^\circ C$ มีคุณสมบัติการทนต่อความร้อนได้สูง และมีการยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำดี (Hamed, 2001)



ภาพที่ 1 โครงสร้างเคมีของยางซิลิโคน

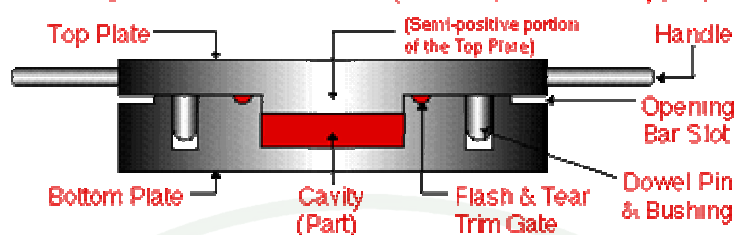
3. กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ (elastomer moulding)

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง (moulding) คือการขึ้นรูปยางให้เป็นชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างที่แน่นอนโดยใช้แม่พิมพ์ในการขึ้นรูป โดยเปลี่ยนยางเทอร์โมเซตจากสถานะที่เป็นของเหลวไปสู่สถานะของแข็งหลังจากเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (crosslinking) ซึ่งเรียกว่า กระบวนการวัลคาไนซ์ (vulcanizing) หรือ การอบบ่ม (curing) โดยการขึ้นรูปยางนั้นจะมีอยู่ 3 แบบ คือ การอัดขึ้นรูป (compression moulding) การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (transfer moulding) และการฉีดขึ้นรูป (injection moulding) (Sommer, 2003)

3.1 การอัดขึ้นรูป (compression moulding)

การขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดนั้น เป็นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนมาก และแม่พิมพ์มีราคาไม่สูง โดยขนาดของแม่พิมพ์จะขึ้นกับชิ้นงานซึ่งมีตั้งแต่ขนาดประมาณ 10 กรัม จนถึง 10 กิโลกรัม เครื่องจักรที่ใช้สำหรับอัดขึ้นรูปเป็นเครื่องอัดด้วยระบบไฮดรอลิกส์ทั่วไป ตัวอย่างแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3

Compression Mold (Semi-positive Type)



ภาพที่ 2 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป

ที่มา: Hawthorne Rubber Manufacturing Corp. (2004)



ภาพที่ 3 ตัวอย่างแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป

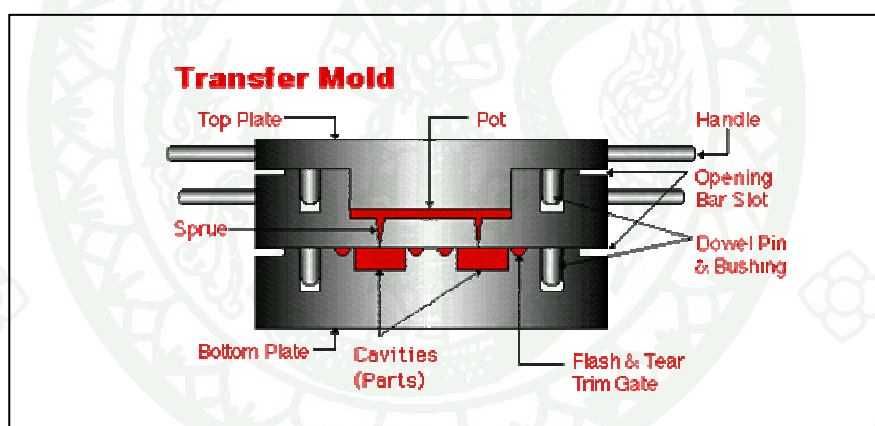
ที่มา: Straton Industries inc. (2005)

ขั้นตอนการขึ้นรูปนั้นเริ่มจากนำชิ้นยางที่ยังไม่สุกใส่ลงไปในเบ้า (cavity) ของแม่พิมพ์ จากนั้นทำการปิดแม่พิมพ์ที่ใส่เข้าไปในเครื่องอัด เครื่องอัดจะใช้แรงดันกดปิดแม่พิมพ์จนสนิท โดยก่อนจะกดปิดแม่พิมพ์จะมีการกด-คลาย (bumping) ก่อนเพื่อให้อากาศออกให้เนื้อยางไหลได้เต็มเบ้า หลังจากได้รับความร้อนจากเครื่องอัดและใช้เวลาระยะหนึ่งจนยางสุกแล้ว แม่พิมพ์จะถูก

เปิดออกและผู้ปฏิบัติงานสามารถหยิบชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และทำความสะอาดแม่พิมพ์ จากนั้นแม่พิมพ์ก็จะพร้อมสำหรับการอัดขึ้นรูปในรอบต่อไป (Wheelans, 1974)

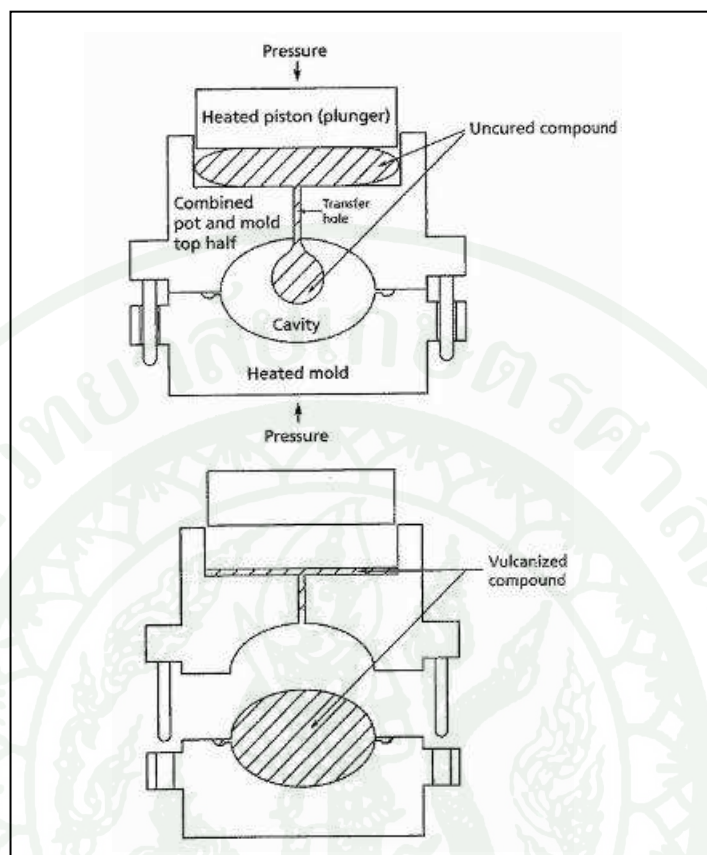
3.2 การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (transfer moulding)

การขึ้นรูปแบบอัดส่งนั้นชิ้นงานที่ได้จะมีความแม่นยำมากกว่าแบบอัด และสามารถควบคุมรอบเวลาการผลิตได้ดีกว่า หลักการที่สำคัญของการขึ้นรูปแบบอัดส่งนั้นคือจะมีช่องสำหรับหรับใส่ยาง 1 ช่อง (pot) โดยช่องดังกล่าวนี้จะเชื่อมต่อกับเบ้าด้วยทางวิ่งซึ่งมีทั้งเบ้าเดียวหรือหลายเบ้าก็ได้ เมื่อใส่ยางที่ยังไม่สุกลงไปในช่องใส่ยาง ส่วนอัด (plunger) ก็จะอัดเนื้อยางผ่านทางวิ่งเข้าไปสู่เบ้า หลังจากนั้นก็จะให้ความร้อนจนยางสุก นำชิ้นงานออกจากเบ้าโดยผู้ปฏิบัติงาน (Wheelans, 1974) ตัวอย่างแม่พิมพ์ขึ้นรูปแบบอัดส่ง และการขึ้นรูปแบบอัดส่งแสดงดังภาพที่ 4 และ 5



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดส่ง

ที่มา: Hawthorne Rubber Manufacturing Corp. (2004)



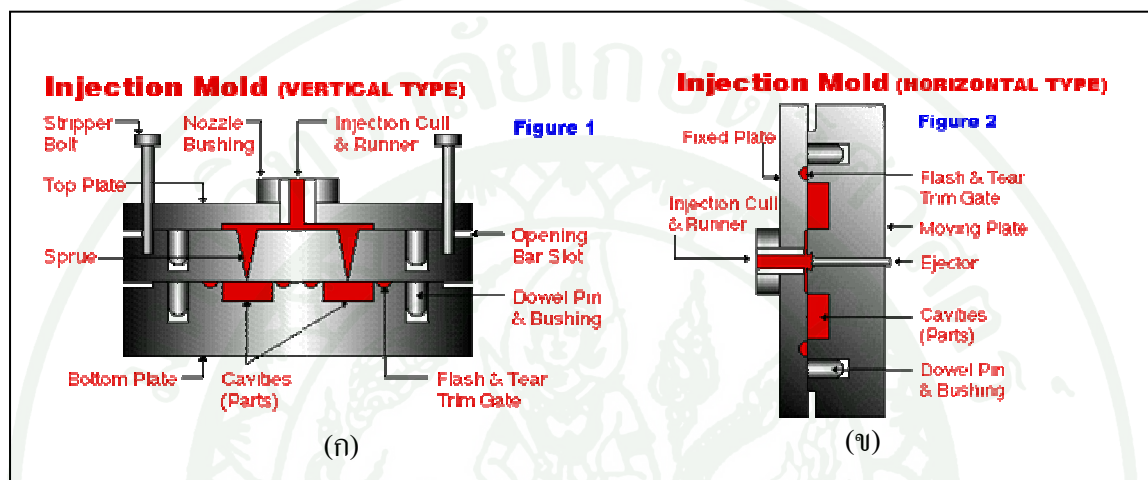
ภาพที่ 5 แสดงการขึ้นรูปยางด้วยวิธีการอัดส่ง

ที่มา: Ciesielski (1999)

3.3 การฉีดขึ้นรูป (injection moulding)

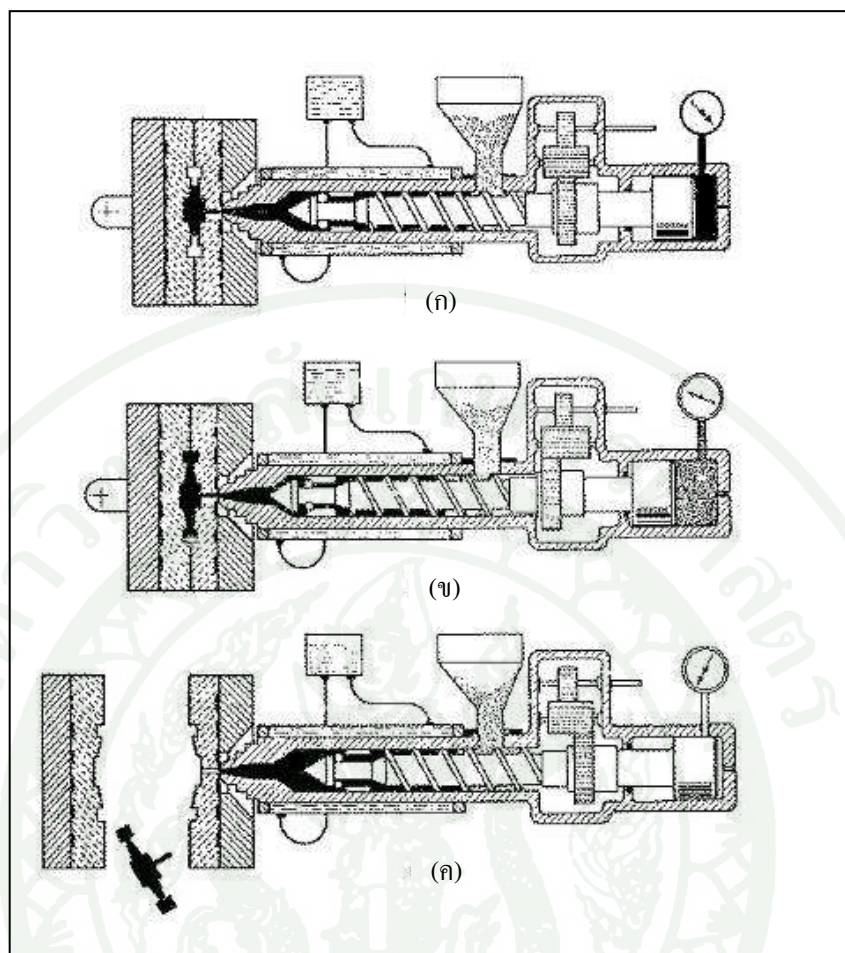
การฉีดขึ้นรูปนั้นเป็นการฉีดเนื้อยางจากกระบอกฉีด (injection barrel) ด้วยกระบอกสูบ (ram) หรือสกรู (screw) ที่อยู่ภายใน เนื้อยางจะถูกฉีดผ่านหัวฉีด (nozzle) ซึ่งเป็นส่วนปลายสุดเข้าสู่รูฉีดของแม่พิมพ์ โดยรูฉีดนี้จะเชื่อมต่อกับทางวิ่ง (runner) และรูเข้า (gate) ก่อนเข้าสู่เบ้า (cavity) ของแม่พิมพ์ต่อไป โดยที่แม่พิมพ์จะมีตัวทำความร้อนที่มีลักษณะเป็นแท่ง (heater rod) ติดอยู่เพื่อทำให้เกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ หลังจากยางสุกแล้วแม่พิมพ์จะเปิดออกเพื่อปลดชิ้นงาน โดยสามารถนำชิ้นงานออกมาด้วยผู้ปฏิบัติงาน หรือใช้แขนหุ่นยนต์หยิบออกแบบอัตโนมัติก็ได้ ตัวอย่างแม่พิมพ์และกระบวนการฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 6 และ 7

นอกจากนั้นการเติมเนื้ออย่างจะเป็นแบบอัตโนมัติซึ่งจะเป็นแบบสายยาวเข้าสู่กระบอกลีด หรือเป็นเม็ดเล็กผ่านกรวย (hopper) คล้ายการฉีดพลาสติก เครื่องฉีดยางแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง (vertical injection machine) และเครื่องฉีดยางแบบแนวนอน (horizontal injection machine) (Ciesielski, 1999) ดังแสดงในภาพที่ 8 และ 9



ภาพที่ 6 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง (ก) และแนวนอน (ข)

ที่มา: Hawthorne Rubber Manufacturing Corp. (2004)



ภาพที่ 7 การขึ้นรูปยางด้วยวิธีการฉีด (ก) สกรุดันยางเข้าไปในเบ้าแม่พิมพ์ (ข) สกรุดันยางจนเต็มเบ้าแม่พิมพ์ (ค) ยางคงรูป สกรูหมุนกลับ แม่พิมพ์เปิดและชิ้นงานหลุดออกจากแม่พิมพ์

ที่มา: Wheelans (1974)



ภาพที่ 8 เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง

ที่มา: Sanjo Seiki co. (1997)



ภาพที่ 9 เครื่องฉีดยางแบบแนวนอน

ที่มา: Nissei America inc. (2005)

3.3.1 ข้อดีของกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง (Ciesielski, 1999)

3.3.1.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเนื้อยางสูงกว่าที่ใช้ในวิธีการอัดและอัดส่ง ซึ่งส่งผลให้ยางสุกตัวเร็วกว่า

3.3.1.2 เนื่องจากอุณหภูมิของเนื้อยางที่ถูกฉีดเข้าเบ้าใกล้เคียงกับอุณหภูมิฉีด ทำให้การถ่ายเทอุณหภูมิระหว่างการบ่มมีน้อยมาก ดังนั้นจึงเกิดแรงดันภายในน้อยมาก ซึ่งเป็นผลให้การเกิดรอยฉีก หรือรอยกัด (backrind) บริเวณแนวส่วนแบ่งแม่พิมพ์ (parting line) ลดลงได้มาก

3.3.1.3 ไม่จำเป็นต้องตัดแบ่ง หรือทำรูปทรงก่อนฉีด เพราะสามารถป้อนเนื้อยางแบบสายยาว หรือเป็นเม็ดได้เลย

3.3.1.4 ลดปริมาณครีป (flash) ยาง

3.3.1.5 ลดการเกิดการอื่นของอากาศ (air traps)

3.3.1.6 สามารถใช้ระบบการผลิตแบบอัตโนมัติได้

3.3.1.7 รอบการฉีด (cycle time) ลดลง ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนมาก

3.3.2 ข้อเสียของกระบวนการฉีดขึ้นรูปยาง

3.3.2.1 แม่พิมพ์จำเป็นต้องทนต่อแรงดันสูง ทำให้ต้องใช้เหล็กที่มีความแข็งแรงมาก และใช้ความละเอียดสูง

3.3.2.2 เนื่องจากแม่พิมพ์ฉีดยางมีระบบทางวิ่งทำให้เสียเนื้อยางในส่วนดังกล่าว เป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตมากกว่าการอัดและการอัดส่ง

4. การขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก (micro-moulding)

การขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก หมายถึงการขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความละเอียดสูง ซึ่งมีค่าพิคัดความคลาดเคลื่อนประมาณ ± 10 ไมครอน หรือเล็กกว่านั้น โดยทั่วไปจะมีขนาดชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 1 ไมครอน และมีน้ำหนักน้อยกว่า 20 มิลลิกรัม (Rosata *et.al.*, 2000) นอกจากนั้น Kukla C. (Kukla *et.al.*, 1998) ยังให้ความหมายของการขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็กว่า 1) ชิ้นงานที่มีน้ำหนักอยู่ในระดับไมครอน 2) ชิ้นงานที่มีส่วนหรือโครงสร้างอยู่ในระดับไมครอน และ 3) ชิ้นงานที่มีความละเอียดระดับไมครอน ชิ้นงานที่มีน้ำหนักอยู่ในระดับไมครอนคือชิ้นงานที่มีน้ำหนักเพียงไม่กี่มิลลิกรัม อย่างไรก็ตามขนาดของชิ้นงานไม่จำเป็นจะต้องเป็นอยู่ในระดับไมโครเมตรเสมอไป ชิ้นงานที่มีส่วนหรือโครงสร้างอยู่ในระดับไมครอน คือ ชิ้นงานที่มีส่วนของชิ้นงานระดับไมโครเมตร เช่น รู หรือช่องที่มีขนาดระดับไมครอน เป็นต้น และชิ้นงานที่มีความละเอียดระดับไมครอนคือชิ้นงานจะมีขนาดเท่าไรก็ได้เพียงแต่ค่าพิคัดความเผื่ออยู่ในช่วงไมโครเมตร ตัวอย่างชิ้นงานขนาดเล็กแสดงในภาพที่ 10

นอกจากนั้นในการผลิตแม่พิมพ์รวมถึงการขึ้นรูปชิ้นงานยังต้องใช้เทคโนโลยีที่เป็นระบบไมโคร (micro system) โดยในการผลิตแม่พิมพ์ก็ต้องใช้เทคโนโลยีระดับไมโคร เช่น การกัดแบบไมโคร การอีตีเอ็มแบบไมโคร และไมโครเลเซอร์ (micro laser ablation) เป็นต้น (Fleischer and Kotchenreuther, 2006) ส่วนการขึ้นรูปชิ้นงานก็จะใช้เครื่องเฉพาะ โดยตัวอย่างการกัดแบบไมโครและเครื่องขึ้นรูปแสดงในภาพที่ 11 ถึง 14



ภาพที่ 10 ตัวอย่างชิ้นงานขนาดเล็ก

ที่มา: (ก) Wittmann Battenfeld GmbH (2007)

(ข) Miniature Tool & Die inc. (2006)

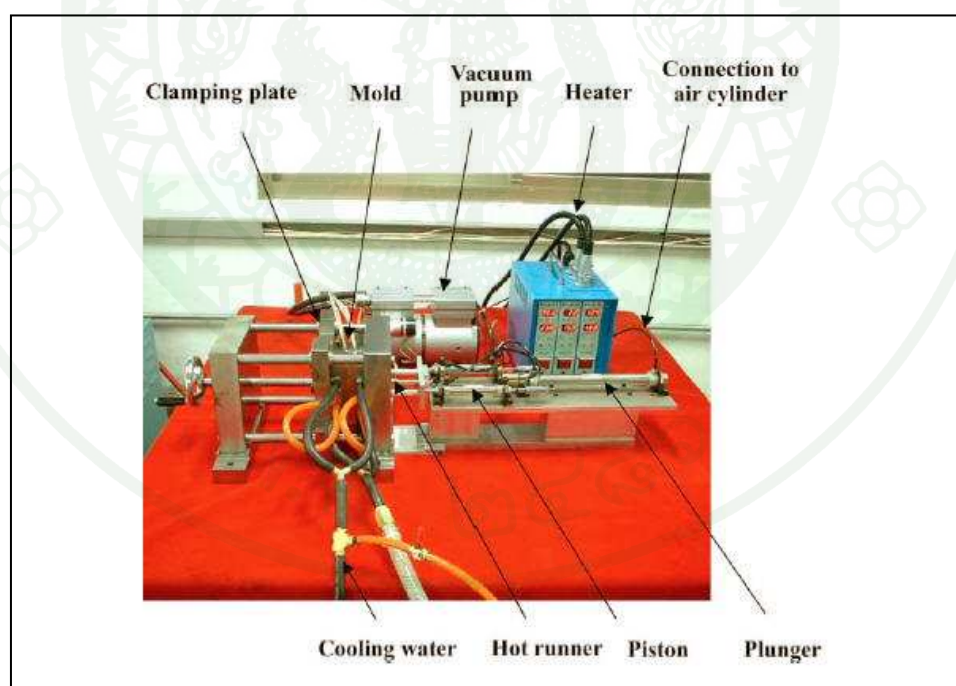
(ค) Mikrotech co. (2006)

(ง) Anonymous (n.d.)



ภาพที่ 11 ดอกกัดชิ้นงานทั่วไปขนาด 6 มม. เทียบกับดอกกัดชิ้นงานขนาด 200 ไมโครเมตร

ที่มา: Bissacco *et.al.* (2005)



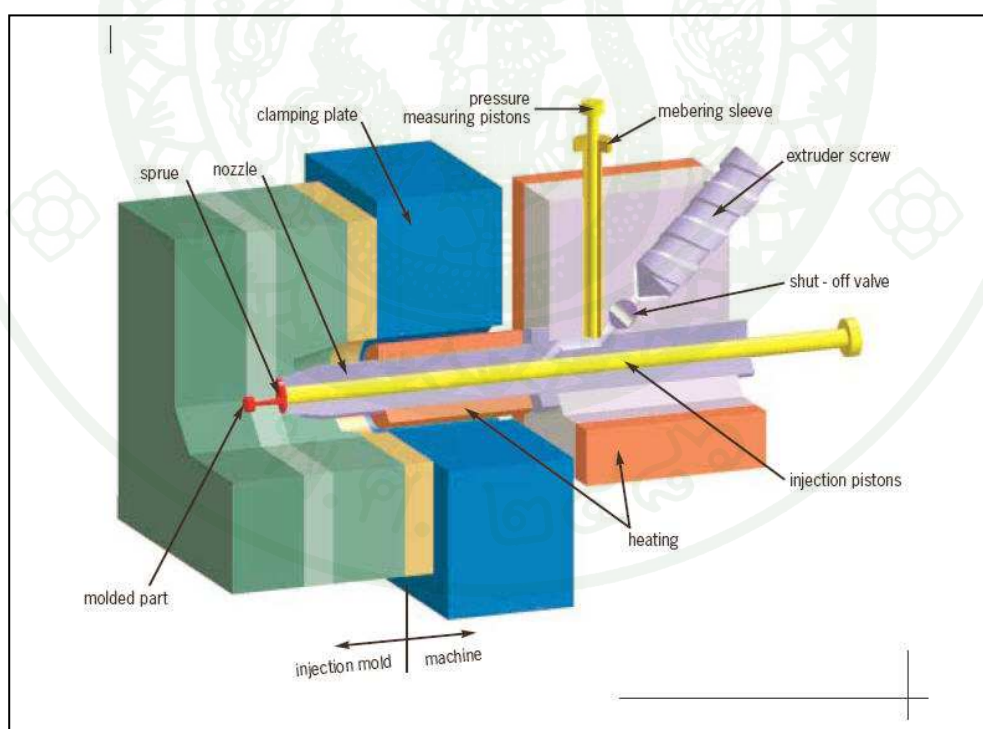
ภาพที่ 12 เครื่องฉีดขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก

ที่มา: Huang (2006)



ภาพที่ 13 เครื่องฉีดขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกขนาดเล็ก

ที่มา: Wittmann Battenfeld GmbH (2007)



ภาพที่ 14 ตัวอย่างชิ้นส่วนภายในของเครื่องฉีดขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก

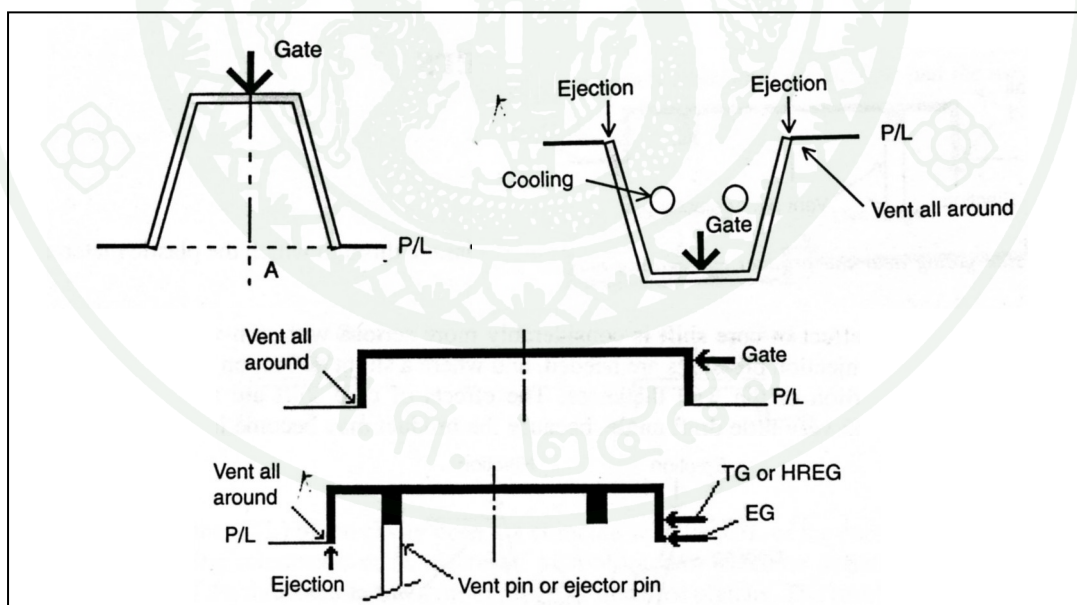
ที่มา: Battenfeld GmbH. (n.d.)

5. การออกแบบแม่พิมพ์

5.1 การออกแบบรูเข้า

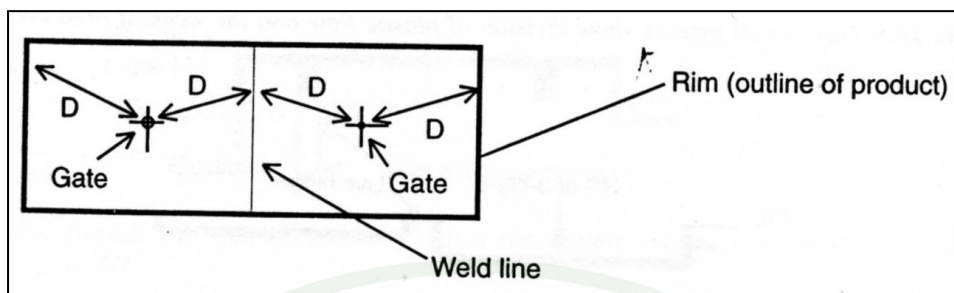
5.1.1 การวางตำแหน่งรูเข้าในเบ้าแม่พิมพ์

การวางตำแหน่งรูเข้าเดียวในแต่ละเบ้าจะพบบ่อยที่สุด ซึ่งสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดรอยต่อในชิ้นงานได้ การวางตำแหน่งสามารถได้หลายแบบ ควรวางไว้กึ่งกลางชิ้นงาน เพื่อให้ระยะทางไหลเท่ากัน สามารถวางไว้ด้านข้างกรณีที่ไม่สามารถวางรูเข้าไว้กึ่งกลาง หรือในกรณีที่ชิ้นงานมีลักษณะยาวไม่ควรวางรูเข้าไปตรงกลางชิ้นงานเนื่องจากจะทำให้เกิดจุดที่แข็งแรงน้อยได้ โดยควรวางรูเข้าให้ยางหรือพลาสติกไหลเข้าไปตามแนวยาว ภาพที่ 15 แสดงการวางรูเข้าที่ตำแหน่งต่างๆ ส่วนในการวางรูเข้ามากกว่าหนึ่งตำแหน่งจะกระทำเมื่อชิ้นงานมีขนาดใหญ่ หรือชิ้นงานบางลักษณะ เช่น ท่อ เป็นต้น โดยการวางรูเข้ามากกว่าหนึ่งจะทำให้เกิดรอยต่อบนชิ้นงานได้ (Rees, 2002) ภาพที่ 16 แสดงรอยต่อที่เกิดจากการวางรูเข้ามากกว่า 1 ตำแหน่ง



ภาพที่ 15 ลักษณะการวางรูเข้าที่ตำแหน่งต่างๆ

ที่มา: Rees (2002)

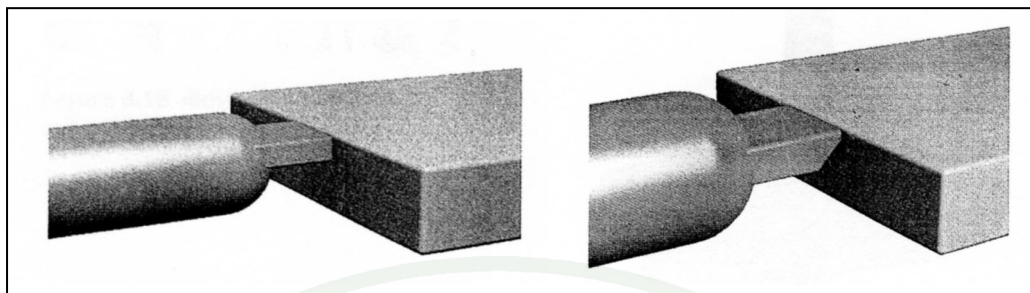


ภาพที่ 16 ลักษณะรอยต่อที่เกิดจากรูเข้า 2 ตำแหน่ง

ที่มา: Rees (2002)

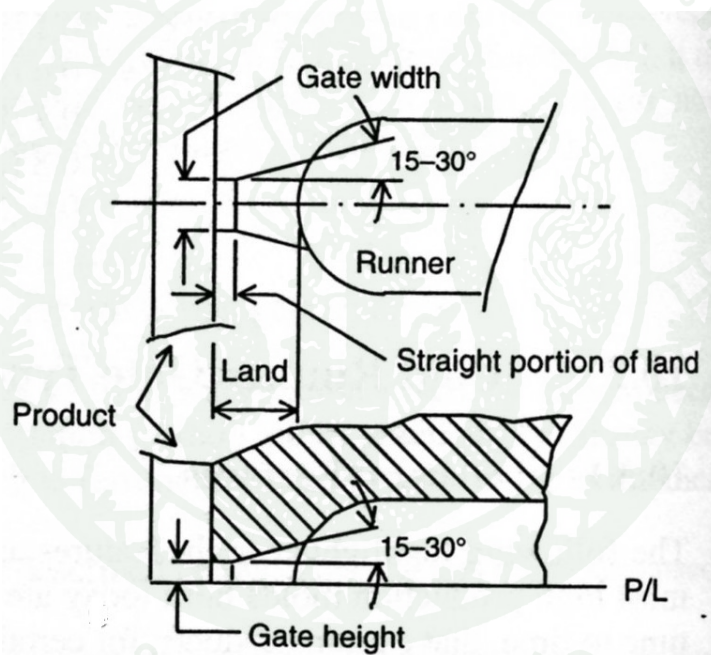
5.1.2 ลักษณะและขนาดของรูเข้า

ขนาดของรูเข้ามีผลมากต่อคุณภาพของชิ้นงาน ขนาดรูเข้าจะต้องไม่เล็กเกินไปจนทำให้เกิดการแข็งตัวที่รูเข้าก่อนชิ้นงานเต็ม ความยาวรูเข้า (gate land) จะต้องสั้นที่สุดเพื่อไม่ให้แรงดันฉีดสูงเกินไป แต่หากสั้นเกินไปก็จะทำให้จุดขาดของรูเข้าเกิดที่ชิ้นงานได้ สำหรับรูเข้าแบบขอบ (edge gate) จะมีความยาวรูเข้าประมาณ 0.5 ถึง 0.8 มิลลิเมตร (Rees, 2002) หรือมีขนาดประมาณ 30% ถึง 70% ของความหนาชิ้นงานที่ตำแหน่งรูเข้า (Beaumont *et.al.*, 2002) สำหรับชิ้นงานเล็ก 1 ถึง 2 มิลลิเมตร สำหรับชิ้นงานขนาดใหญ่ และควรให้รูเข้ามีลักษณะเอียงประมาณ 15-30 องศา หากเอียงน้อยกว่า 15 องศา จะส่งผลทำให้การไหลของยางหรือพลาสติกไม่ดี ความสูงของรูเข้า (gate height) จะมีขนาดตั้งแต่ 0.25 ถึง 1 มิลลิเมตร ส่วนความกว้างรูเข้า (gate width) ควรมีขนาดเป็น 3 เท่าของความสูง (Rees, 2002) ภาพที่ 17 และ 18 แสดงลักษณะรูเข้าแบบขอบ และส่วนต่างๆของรูเข้า



ภาพที่ 17 รูเข้าแบบขอบ

ที่มา: Beaumont (2004)



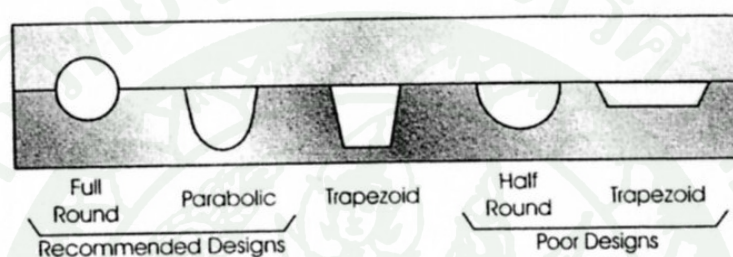
ภาพที่ 18 ส่วนประกอบของรูเข้าแบบขอบ

ที่มา: Rees (2002)

5.2 การออกแบบทางวิ่ง

ลักษณะหน้าตัดของทางวิ่งจะส่งผลต่อการไหลของยาง หน้าตัดแบบวงกลม (full round) มีขนาดพื้นที่หน้าตัดสำหรับการไหลมากที่สุด จึงมีการไหลที่ดีที่สุดมีแรงดันตกตงน้อยที่สุด

แบบพาราโบลา (parabolic) และแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoid) จะมีการไหลใกล้เคียงกับแบบวงกลมที่สุด ส่วนแบบที่ควรหลีกเลี่ยงคือ แบบครึ่งวงกลม (half round) และแบบสี่เหลี่ยมคางหมูที่มีความสูงน้อย (Beaumont, 2004) ถึงแม้ว่าแบบวงกลมจะมีการไหลดีที่สุด แต่ก็ผลิตได้ยากที่สุด เนื่องจากการขึ้นรูปจะต้องขึ้นรูปเป็นครึ่งวงกลมที่แม่พิมพ์คนละฝั่ง แล้วจึงนำมาประกบกันซึ่งต้องการความแม่นยำทั้งการผลิตและประกอบแม่พิมพ์ ภาพที่ 19 แสดงลักษณะหน้าตัดของทางวิ่งแบบต่างๆ

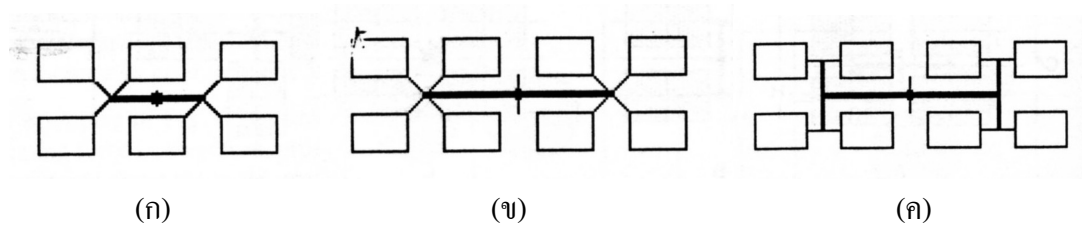


ภาพที่ 19 ลักษณะหน้าตัดของทางวิ่งแบบต่างๆ

ที่มา: Beaumont (2004)

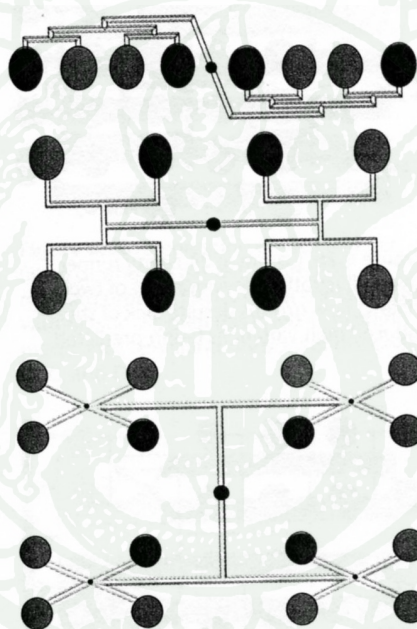
5.3 การสมดุลทางวิ่งและการวางเบ้าแม่พิมพ์

สิ่งสำคัญในกระบวนการขึ้นรูปคือจะต้องทำให้น้ำยางหรือพลาสติกเข้าสู่แต่ละเบ้าด้วยแรงดันและอุณหภูมิเดียวกัน ในเวลาเดียวกันซึ่งจะทำให้ชิ้นงานในแต่ละเบ้ามีคุณภาพเหมือนกัน ดังนั้นการทำให้ยางหรือพลาสติกไหลถึงรูเข้าในแต่ละเบ้าพร้อมกัน คือ การสมดุลทางวิ่ง นอกจากนี้ความยาวของทางวิ่งจะต้องสั้นที่สุดเพื่อไม่ให้เปื่อยวัตถุดิบ และไม่เกิดแรงดันตกได้ การวางเบ้าแม่พิมพ์มีหลายลักษณะขึ้นกับจำนวนเบ้า โดยทั่วไปมักจะวางในลักษณะที่เรียกว่าแบบ Y, H และ X ภาพที่ 20 และ 21 แสดงลักษณะทางวิ่งและการวางเบ้าแม่พิมพ์



ภาพที่ 20 ลักษณะทางวิง ก) ทางวิงแบบ Y ข) ทางวิงแบบ X และ ค) ทางวิงแบบ H

ที่มา: Rees (2002)



ภาพที่ 21 ตัวอย่างการวางเป้าแม่พิมพ์มากกว่าหนึ่งเป้าขึ้นไป

ที่มา: Beaumont (2004)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

วัสดุและอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการทำวิจัยได้แก่

1. โปรแกรม 3D-SIGMA
2. คอมพิวเตอร์
3. เครื่องจักรสำหรับขึ้นรูปแม่พิมพ์
4. เครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

1. โปรแกรม 3D-SIGMA สำหรับการวิเคราะห์การไหลของยางในแม่พิมพ์

3D-SIGMA เป็นโปรแกรมที่อยู่บนพื้นฐานเอลิเมนต์แบบปริมาตรสามมิติ (3D volume elements) ซึ่งใช้ในการวิเคราะห์หาผลและจุดการทำงานที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์โพลีเมอร์และยาง (polymer and rubber injection moulding) ซึ่งโปรแกรมจะทำการจำลองรูปแบบของการไหล การกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูป และผลกระทบอื่นๆที่เกิดจากการไหลและอุณหภูมิ ซึ่งแต่เดิมแล้วโปรแกรมนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาสำหรับระบบปฏิบัติการ UNIX อย่างไรก็ตามในปัจจุบันโปรแกรมสามารถรองรับการใช้งานบนระบบปฏิบัติการไมโครซอฟท์วินโดวส์ (Microsoft Windows) ได้แล้ว และในปัจจุบันโปรแกรมได้ถูกพัฒนาจนถึงรุ่น 4.6 แล้ว

1.1 การทำงานของโปรแกรม 3D-SIGMA Release 4.6

ขั้นตอนของการใช้โปรแกรมเริ่มจากการกำหนดรูปทรงต่าง ๆ ของชิ้นงานที่จะทำการขึ้นรูปโดยการฉีด ต่อจากนั้นจึงออกแบบชิ้นงานและแม่พิมพ์เพื่อที่จะทำการจำลองการทำงานของเครื่องฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ฉีดซึ่งโปรแกรม 3D-SIGMA มีพื้นฐานการทำงานอยู่สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes) ซึ่งสามารถที่จะจำลองลักษณะการไหลของโพลีเมอร์และยาง เพื่อช่วยในการกำหนดรูปร่างขนาดของแม่พิมพ์ที่ทำการออกแบบ

1.2 ข้อมูลทั่วไปของโปรแกรม 3D-SIGMA Release 4.6

โปรแกรม 3D-SIGMA สามารถทำการวิเคราะห์และจำลองการไหลของเทอร์โมพลาस्टิกและยางได้ดังนี้

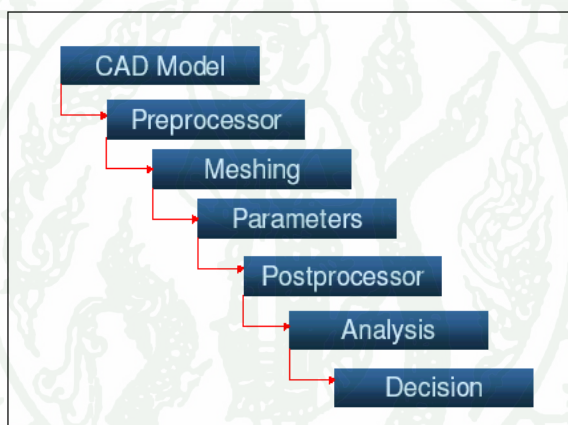
- 1.2.1 สามารถคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิของวัสดุในช่วงขณะทำการฉีด
- 1.2.2 ขณะทำการจำลองการฉีด สามารถแสดงรูปแบบของการไหลของวัสดุที่เข้าไปในแม่พิมพ์ได้ทุกขั้นตอนตามที่ต้องการ
- 1.2.3 ระยะเวลาของการฉีดวัสดุเข้าไปในแม่พิมพ์ขึ้นอยู่กับความดันที่ใช้ ซึ่งสามารถกำหนดได้ในโปรแกรมก่อนทำการจำลองการไหล
- 1.2.4 ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนนั้นสามารถให้มีทั้งแบบการนำ (conduction) การพา (convection) และการแผ่รังสี (radiation) ได้
- 1.2.5 สามารถใช้ศึกษาตัวแปรสำคัญต่าง ๆ ในการฉีดวัสดุได้ เช่น เวลาในการฉีด ลักษณะของการกระจายตัวของความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ ความเร็วที่ใช้ขณะทำการฉีด และความดันสูงสุดที่เกิดระหว่างการฉีด
- 1.2.6 สามารถคำนวณเวลาการไหลของวัสดุที่เข้าสู่แม่พิมพ์ และตำแหน่งของวัสดุที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ได้
- 1.2.7 สามารถแสดงผลกระทบของอุณหภูมิที่เกิดกับชิ้นงานและแม่พิมพ์ ซึ่งทำให้เกิดลักษณะของการงอตัวของวัสดุ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วลักษณะเฉพาะของการขึ้นรูปวัสดุโดยการฉีดนั้น จะต้องดูลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิทั้งตัวชิ้นงานและแม่พิมพ์ ซึ่งจะมีผลต่อการขึ้นรูป ดังนั้นโปรแกรม 3D-SIGMA สามารถกำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในการฉีดวัสดุและดูถึงลักษณะของการกระจายตัวของอุณหภูมิของยางที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ได้อย่างชัดเจน
- 1.2.8 สามารถคำนวณหาความเค้นที่ตกค้างที่กระจายอยู่ในชิ้นงานที่ฉีด

1.2.9 สามารถคำนวณระดับความเค้นในแต่ละจุดของรูปทรงของชิ้นงานได้

1.2.10 สามารถประมาณอายุการใช้งานของแม่พิมพ์ได้เนื่องจากสามารถคำนวณหาความเค้นที่เกิดขึ้นที่แม่พิมพ์ได้

1.3 หลักการโดยทั่วไปของโปรแกรม 3D-SIGMA

ขั้นตอนในการทำงานของโปรแกรม 3D-SIGMA ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 22 ขั้นตอนการทำงานโดยรวมของโปรแกรม 3D-SIGMA

1.4 รูปทรงของแบบจำลองในโปรแกรม 3D-SIGMA

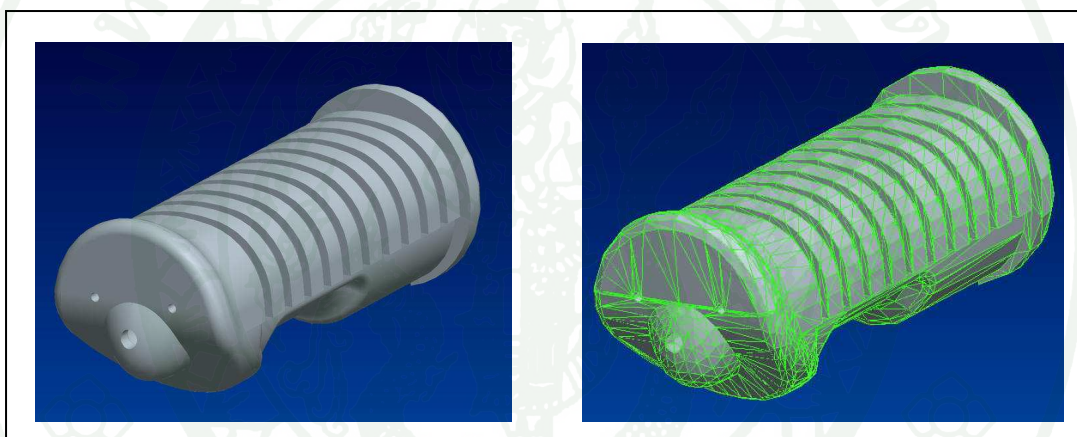
ในโปรแกรม 3D-SIGMA แบบจำลองจะถูกเขียนขึ้นจากโปรแกรม CAD ต่างๆ ซึ่งจะส่งผ่านข้อมูลให้กับโปรแกรม 3D-SIGMA ได้โดยมีลักษณะเป็น STL (stereolithography - format) หรือโปรแกรมอื่นๆที่สามารถที่จะแปลงรูปแบบของแบบจำลองเป็น STL files เช่น Solid Works, Unigraphics เป็นต้น

ในการสร้างรูปทรงของชิ้นงาน (CAD model) จะต้องกำหนดชิ้นส่วนต่างๆที่จะทำการวิเคราะห์ในโปรแกรมก่อน เช่น ชิ้นงาน (parts) ช่องทางวิ่ง (runner) รูฉีด (gate) แม่พิมพ์ (mould)

และช่องทางเข้า (inlet) และการกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ของชิ้นงานให้เหมาะสมก่อนที่จะทำการวิเคราะห์

1.5 รูปทรงชิ้นงานสามมิติ (CAD Model)

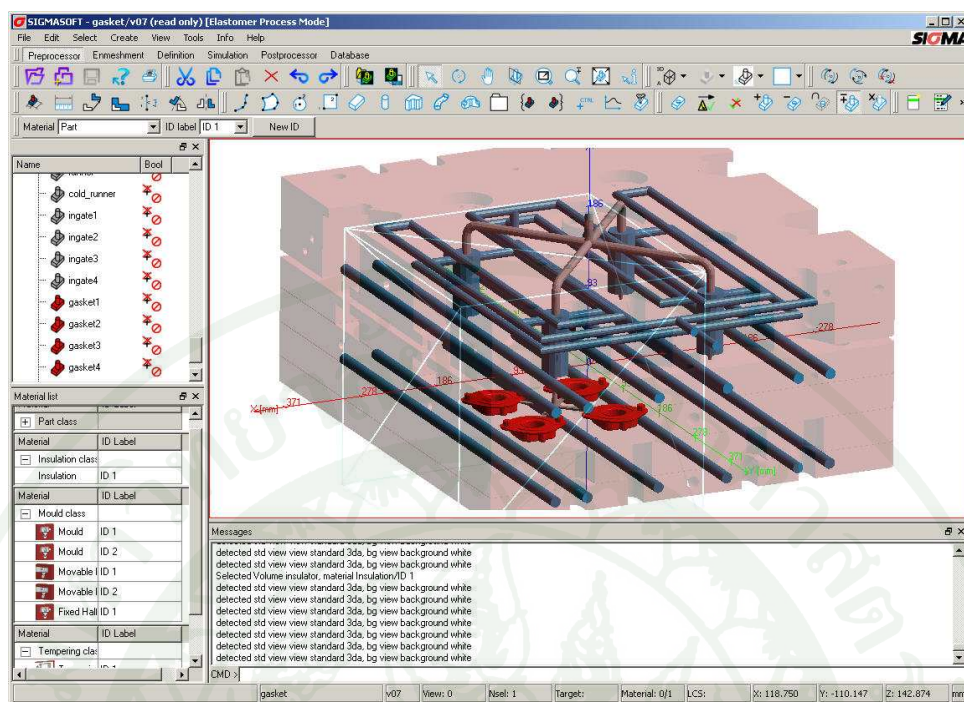
ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบได้แก่ ยางรองเท้าจักรยานยนต์ (rubber step) ดังภาพที่ 23 เมื่อได้รูปทรงของชิ้นงาน ทางวิ้ง รูปร่างแล้ว จากนั้นจึงทำการบันทึกข้อมูลในรูปแบบของ STL files (ต้องกำหนดพิกัดของชิ้นส่วนแต่ละอันให้อยู่ในรูปแบบจริงที่จะทำการฉีด) ควรกำหนดให้จุดเริ่มต้นของแกน (origin) อยู่บนปากทางเข้าของทางวิ้ง



ภาพที่ 23 ยางรองเท้าจักรยานยนต์ที่ใช้โปรแกรมช่วยในการออกแบบเขียนขึ้น

1.6 การสร้างแบบจำลองในโปรแกรม 3D-SIGMA

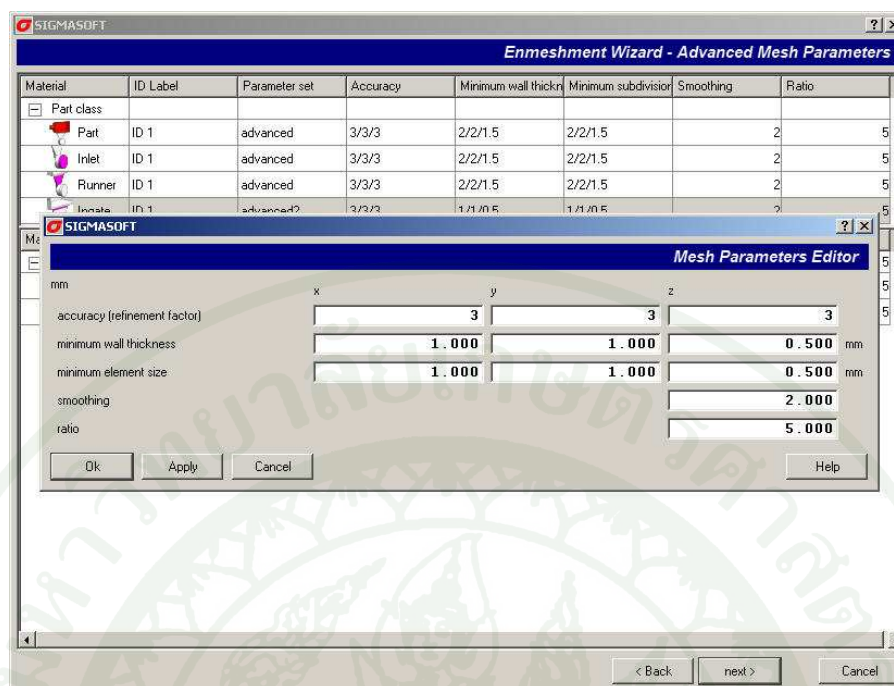
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเปิดข้อมูลของแบบจำลองที่ได้ทำการเขียนไว้ในรูปของ STL files โดยการใช้คำสั่ง Preprocessor ในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดชิ้นส่วนต่างๆที่ได้สร้างขึ้นภายในโปรแกรมได้แก่ ชิ้นงาน ช่องทางวิ้ง รูเข้า แม่พิมพ์ และช่องทางเข้า ดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 หน้าต่างของขั้นตอน Preprocessor

1.7 การกำหนดค่าของเอลิเมนต์ (meshing)

ในการกำหนดค่าของเอลิเมนต์ โปรแกรมสามารถที่จะกำหนดการแบ่งเอลิเมนต์ได้ 3 แบบ ได้แก่ แบ่งแบบอัตโนมัติ แบ่งแบบกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ และแบ่งแบบกำหนดขนาดเอลิเมนต์เอง ซึ่งการแบ่งเอลิเมนต์แบบกำหนดขนาดเอลิเมนต์เองจะมีประสิทธิภาพสูงเนื่องจากเราสามารถที่จะกำหนดแต่ละส่วนของชิ้นงานให้มีความละเอียดของเอลิเมนต์ต่างกันได้ การแบ่งจำนวนเอลิเมนต์ที่มากขึ้นจะทำให้การวิเคราะห์มีความละเอียดแม่นยำมากขึ้น อย่างไรก็ตามการมีจำนวนเอลิเมนต์มากขึ้น ก็จะส่งผลในการวิเคราะห์ของโปรแกรมใช้เวลานานขึ้น และในบางกรณีอาจจะไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ไม่เพียงพอ การกำหนดเอลิเมนต์จะกำหนดจากค่าของความหนา (wall thickness) และกำหนดค่าของขนาดเอลิเมนต์ (element size) ให้มีขนาดที่เหมาะสมดังแสดงในภาพที่ 25



ภาพที่ 25 การกำหนดค่าความหนาของชิ้นงานให้เหมาะสม (wall thickness)

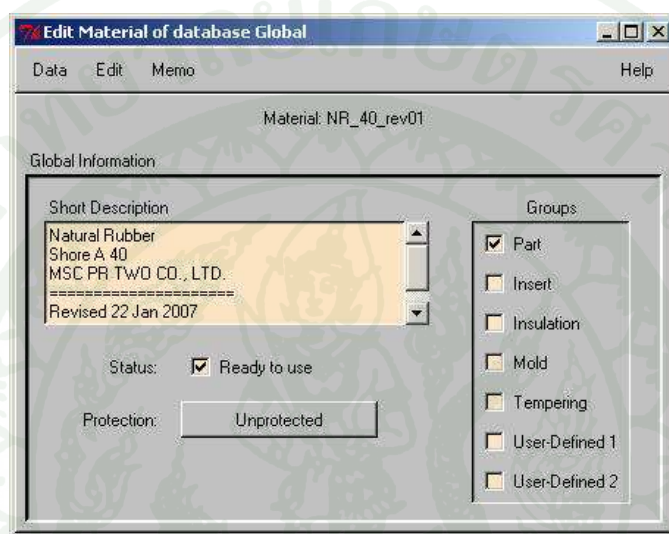
1.8 การกำหนดวัสดุ (materials database)

ก่อนเริ่มการจำลองการไหลนั้นจะต้องทำการกำหนดค่าตัวแปรและสภาวะการฉีดต่างๆก่อน เช่น การเลือกใช้วัสดุในการผลิตชิ้นงาน วัสดุของแม่พิมพ์ เป็นต้น ในตัวอย่างที่เห็นในภาพที่ 26 นั้นเลือกใช้อย่างธรรมชาติชนิด NR 40 ซึ่งข้อมูลของยางในแต่ละชนิดนั้นจะอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรม และสามารถสร้างฐานข้อมูลของยางที่ต้องการขึ้นมาใหม่ได้โดยการกำหนดค่าคุณสมบัติที่จำเป็นให้กับโปรแกรม สำหรับคุณสมบัติของวัสดุที่ต้องการได้แก่

- 1) ค่าการนำความร้อน (heat conductivity, λ)
- 2) ค่าความถ่วงจำเพาะ (density, ρ)
- 3) ค่าความจุความร้อน (heat capacity, C_p)
- 4) ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราการเฉือน (viscosity as function of shear rate)

5) อัตราการบ่มที่ขึ้นกับเวลา (curing rate as function of time)

สำหรับคุณสมบัติของวัสดุภายในข้อที่ 4) และ 5) ในการทดสอบนั้นควรกระทำที่อุณหภูมิอย่างน้อย 3 ค่าและในแต่ละช่วงของอุณหภูมิหนึ่งควรมีการเก็บข้อมูลไม่น้อยกว่า 15 ค่า



ภาพที่ 26 การเลือกของชนิดของยางที่จะทำการจำลองการไหล

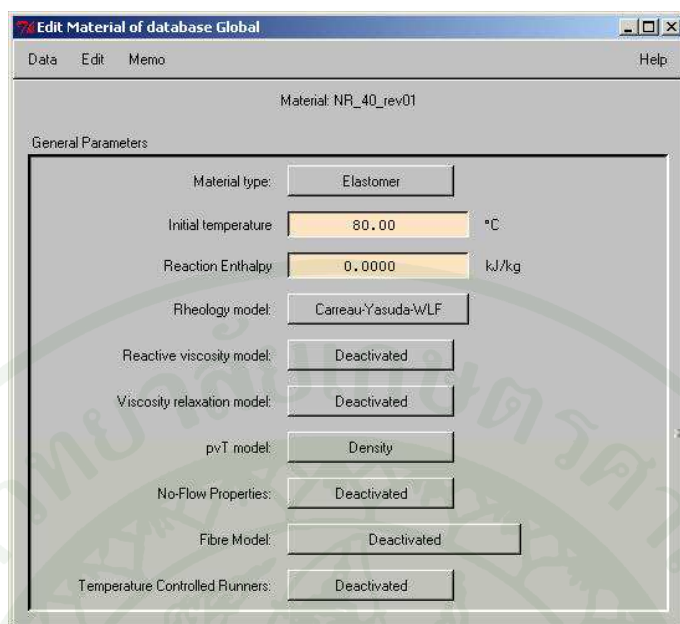
หลังจากได้ข้อมูลคุณสมบัติแล้วจึงทำการกำหนดค่าที่ต้องการพื้นฐานของโปรแกรม ดังนี้

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้นของยาง ดังแสดงในภาพที่ 27
- 2) กำหนดค่าของอัตราการบ่มที่ 3 อุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 28
- 3) กำหนดค่าการนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่างๆดังแสดงในภาพที่ 29
- 4) กำหนดค่าความถ่วงจำเพาะของยาง ดังแสดงในภาพที่ 30
- 5) กำหนดค่าความจุความร้อนจำเพาะ ดังแสดงในภาพที่ 31

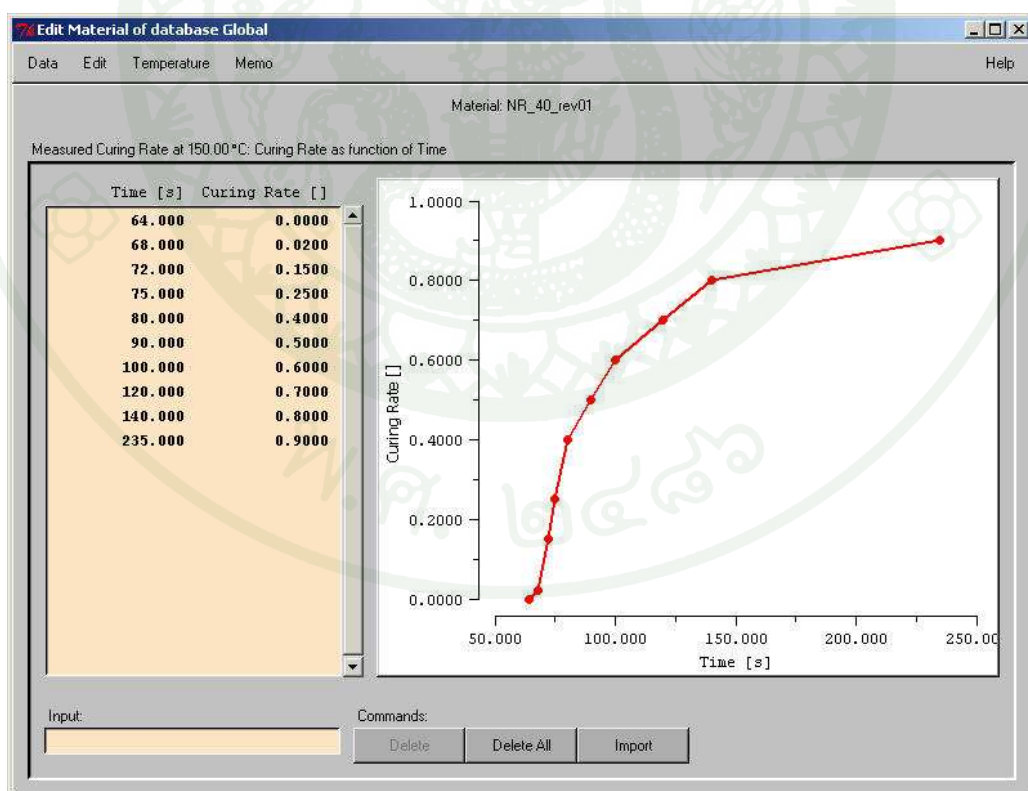
6) กำหนดค่าของความหนืดขึ้นกับอัตราเฉือนที่ 3 อุณหภูมิ ดังแสดงในภาพที่ 32

เมื่อกำหนดค่าลงไปแล้วโปรแกรมก็จะทำการคำนวณค่าที่จะใช้ในการจำลองการไหลต่างๆขึ้นมาเอง ดังนี้

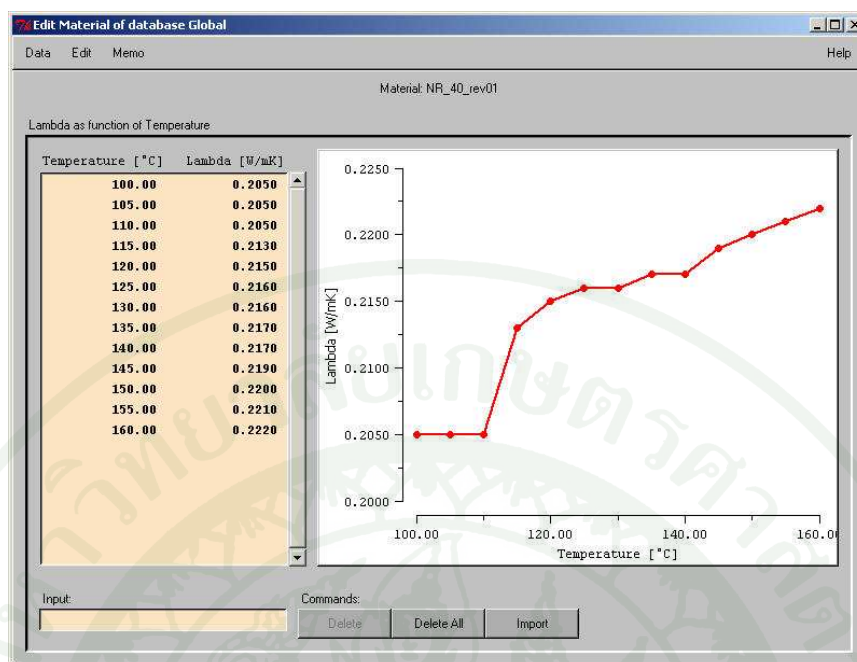
- 1) ค่าของ Rheology (carreau-WLF)
- 2) Zero Shear Rate (dyn.) Visc. P1 (Pa s)
- 3) Reciprocal Trans-Shear Rate, P2 (s)
- 4) Exponent, P3
- 5) Reference Temperature, T_0 ($^{\circ}\text{C}$)
- 6) Standard Temperature, T_s ($^{\circ}\text{C}$)
- 7) ค่าของ Dynamic Viscosity ดังแสดงในภาพที่ 33
- 8) ค่าของ Weighting Factor ดังแสดงในภาพที่ 34
- 9) ค่าของ Incubation Time (scorch-index) (min, K)
- 10) ค่าของ Reaction-Kinetics (Deng-Isayev) ($1/\text{min}^n$, J/mol) ดังแสดงในภาพที่ 35
- 11) ค่าของ Curing Rate: Curing Rate as Function of Time ดังแสดงในภาพที่ 36



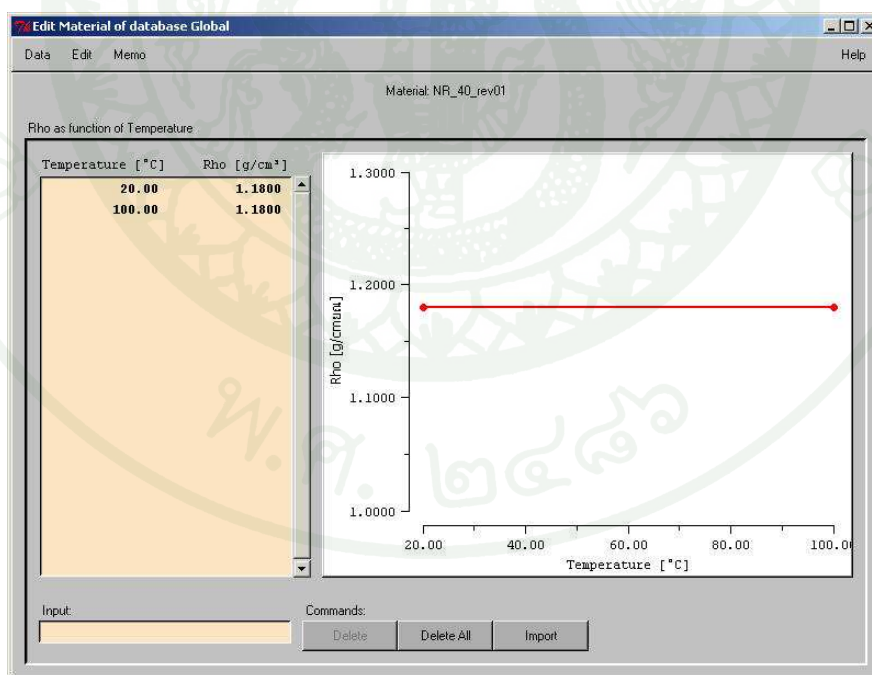
ภาพที่ 27 ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นในการฉีด (initial temperature)



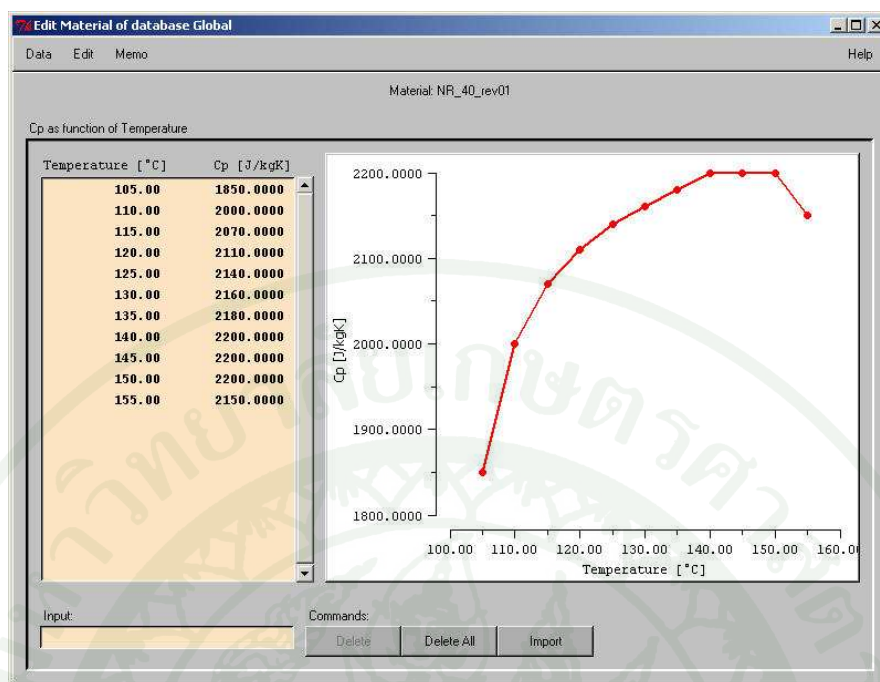
ภาพที่ 28 ค่าอัตราการบ่มที่อุณหภูมิ 150.00 องศาเซลเซียส



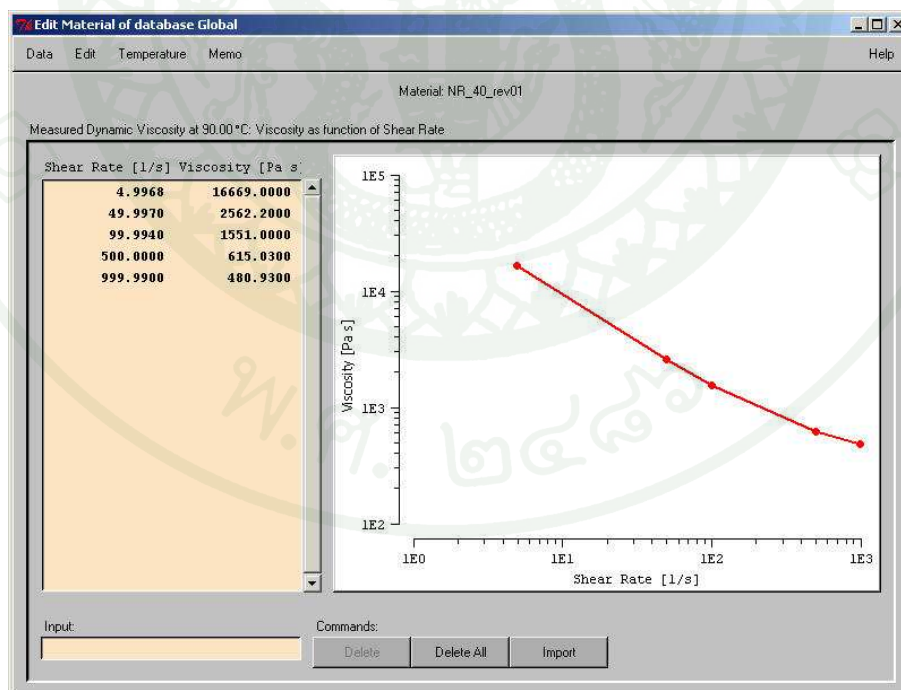
ภาพที่ 29 ค่าการนำความร้อนในช่วงอุณหภูมิต่างๆ (W/mK)



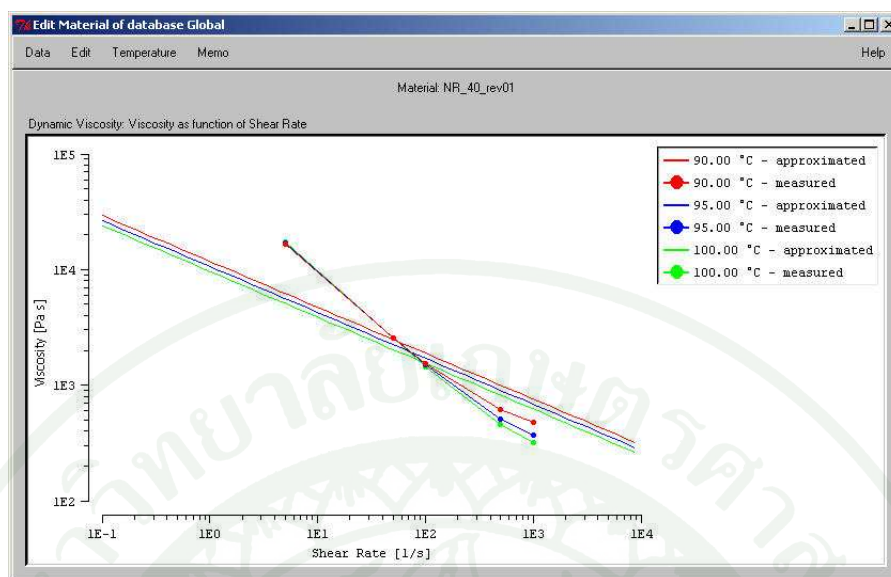
ภาพที่ 30 ค่าของความถ่วงจำเพาะ (g/cm^3 , °C)



ภาพที่ 31 ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (J/kg K, °C)



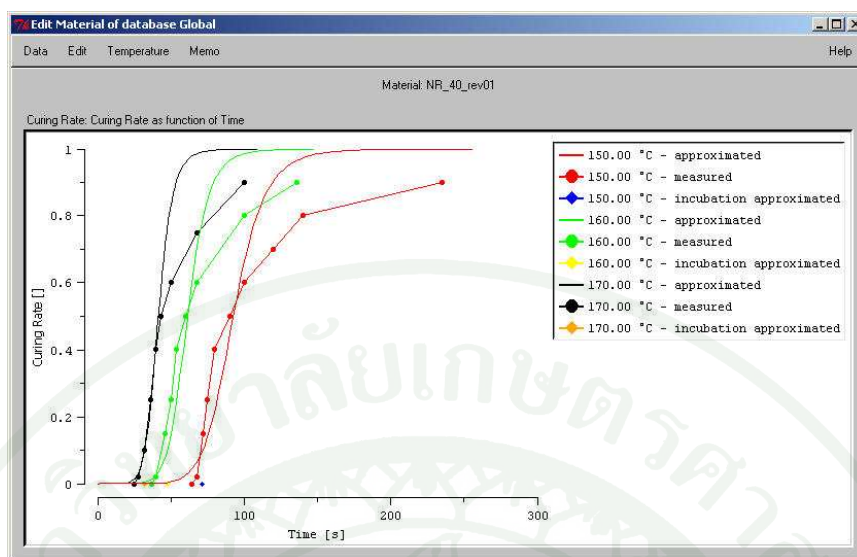
ภาพที่ 32 ค่าของความหนืดขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 90.00 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 33 ค่าของความหนืดขึ้นกับอัตราเฉือนที่ 3 อุณหภูมิ

ภาพที่ 34 ค่าถ่วงน้ำหนัก

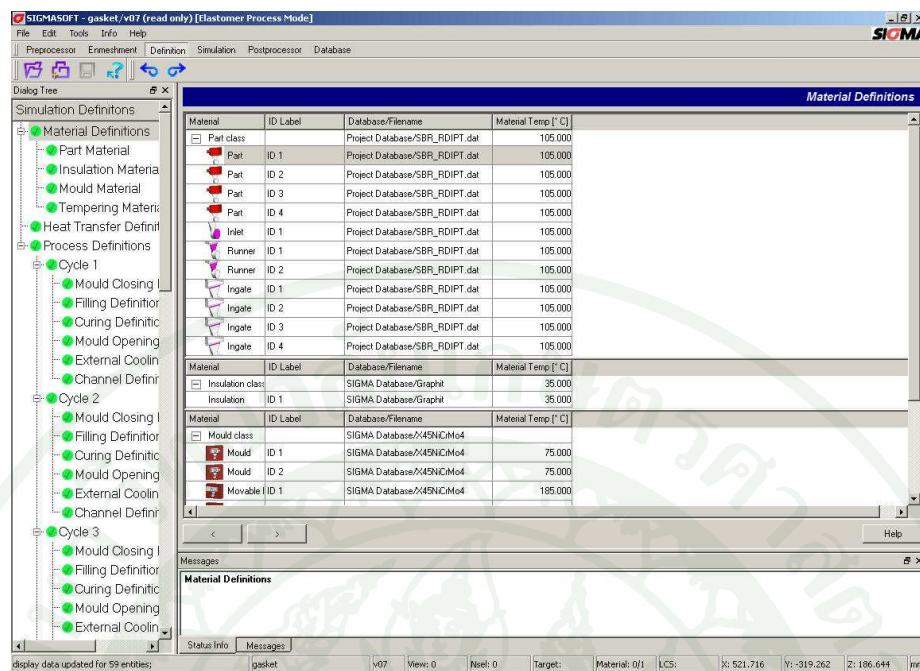
ภาพที่ 35 ค่าจลนศาสตร์ของปฏิกิริยา (Deng-Isayev) ($1/\text{min}^n$, J/mol)



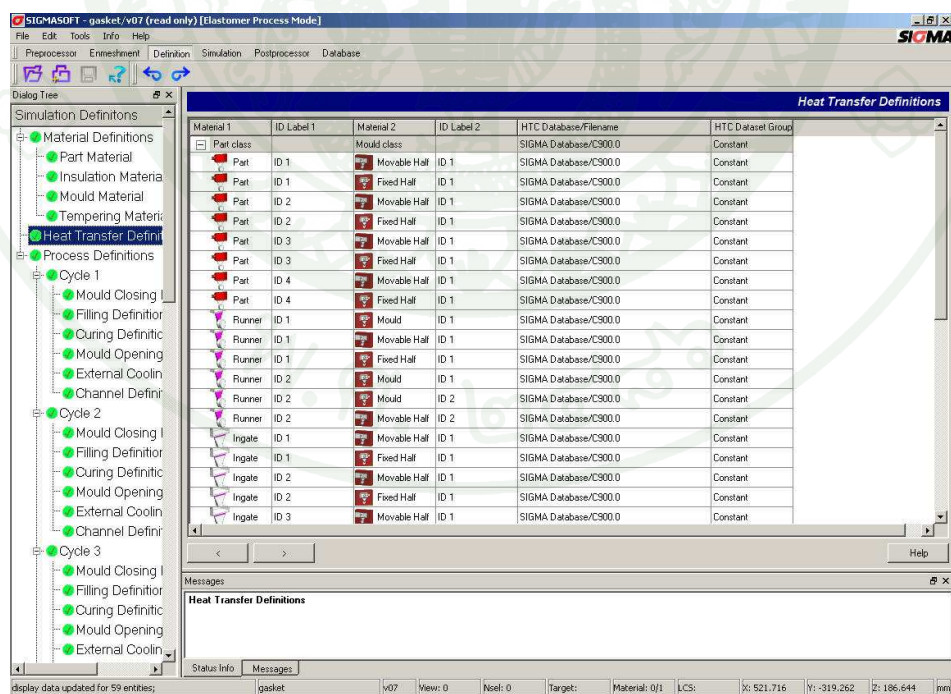
ภาพที่ 36 ค่าอัตราการสุกของยาง

1.9 การกำหนดค่าของตัวแปรในกระบวนการ (process parameters)

ในกระบวนการกำหนดค่าเริ่มต้นก่อนทำการจำลองการไหลของกระบวนการนั้น นอกจากการกำหนดค่าของวัสดุของยางแล้ว จะต้องกำหนดค่าสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปอื่นๆ ด้วย ได้แก่ การกำหนดวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์และค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุยางและแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 37 ต่อจากนั้นทำการกำหนดค่าของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างขึ้นงานกับแม่พิมพ์ หรือแม่พิมพ์ตัวที่ลงที่กับแม่พิมพ์ตัวที่เคลื่อนที่ ($\text{part/mould-700 W/m}^2\text{K}$, $\text{mould/mould-2,000 W/m}^2\text{K}$) ดังแสดงในภาพที่ 38



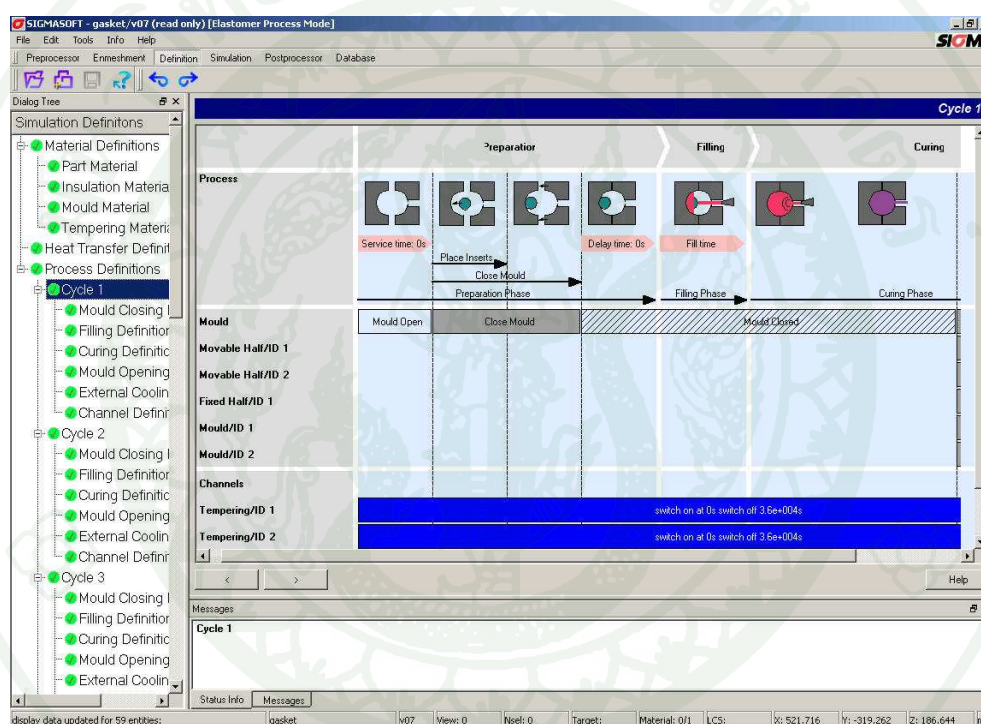
ภาพที่ 37 กำหนดค่าของวัสดุที่จะนำมาใช้ทำแม่พิมพ์และต้องกำหนดค่าของอุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุยางและของแม่พิมพ์



ภาพที่ 38 การกำหนดค่าของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์หรือแม่พิมพ์ตัวที่คงที่กับแม่พิมพ์ตัวที่เคลื่อนที่

การกำหนดช่วงเวลาที่ใช้ในกระบวนการคิดขึ้นรูป ซึ่งแบ่งออกเป็น 5 ช่วงเวลา ที่จะต้อง
กำหนดค่าลงไปโปรแกรม ซึ่งช่วงเวลาที่หมดนี้จะรวมกันอยู่ในหนึ่งรอบการทำงาน (cycle
time) ซึ่งสามารถกำหนดค่าต่างๆ ลงไปได้ดังแสดงในภาพที่ 39 ช่วงเวลาในหนึ่งรอบการทำงาน
ได้แก่

- 1) Close mould time
- 2) Filling time
- 3) Mould closed time (filling phase and curing phase)



ภาพที่ 39 การกำหนดรอบการทำงานที่ต้องการจำลองการไหล

2. คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การไหลของยาง และการออกแบบแม่พิมพ์

เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับการติดตั้งโปรแกรมที่ใช้สำหรับวิเคราะห์การไหลภายใน
แม่พิมพ์ โดยมีคุณสมบัติดังนี้

- 2.1 CPU Intel Core 2 Duo 3.0 GHz
- 2.2 หน่วยความจำขนาด 4 Gigabyte

2.3 ฮาร์ดดิสก์ ขนาด 500 Gigabyte

2.4 การ์ดแสดงผล หน่วยความจำ ขนาด 512 Megabyte

2.5 ระบบปฏิบัติการ Window XP Professional

3. เครื่องจักรสำหรับการขึ้นรูปแม่พิมพ์

เครื่องจักรต่างๆ ได้แก่ เครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC milling) เครื่องกลึงซีเอ็นซี (CNC turning) เครื่องอีดีเอ็ม (electro-discharged machine, EDM) และเครื่องเจาะ เป็นต้น

4. เครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

เครื่องฉีดยางยี่ห้อนิสเซ (Nissei) รุ่น THV ขนาด 112 ตัน ความจุกระบอกฉีด 254 ลบ.ซม.

สมมติฐาน

การนำเทคโนโลยีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมมาช่วยวิเคราะห์การไหลของยาง และอุณหภูมิแม่พิมพ์จะช่วยให้ได้แม่พิมพ์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยลดปัญหาเนื่องจากการออกแบบและลดระยะเวลาการทดลองแม่พิมพ์ลงได้

วิธีการ

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ได้ข้อสรุปในเรื่องของวิธีการและตัวแปรที่จำเป็นต้องศึกษาในกระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็ก
2. เก็บข้อมูลทางด้านผลิตภัณฑ์กรณีศึกษา เครื่องจักร วัสดุดิบ และตัวแปรต่างๆของกระบวนการที่จำเป็นต่อการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ รวมถึงการจำลองการไหลของยาง
3. ออกแบบระบบทางวังและรูเข้า โดยการใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการจำลองการไหลของยางชนิด

4. ออกแบบและผลิตแม่พิมพ์

5. ทดสอบแม่พิมพ์โดยการฉีดผลิตภัณฑ์จริง

6. ปรับปรุง และแก้ไขแม่พิมพ์จนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไปตามข้อกำหนดของแบบผลิตภัณฑ์

7. สรุปผลการวิจัยและจัดทำเอกสารและรวบรวมข้อมูลที่ได้ให้มีลักษณะที่สามารถนำไปใช้งานได้สะดวก

แผนดำเนินการวิจัย

แผนการดำเนินงาน ระยะเวลาที่ใช้ในการวิจัยทั้งสิ้น 12 เดือน โดยได้แสดงกิจกรรมต่างๆ ไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง												
2. เก็บข้อมูลต่างๆ ที่จำเป็นต่อการออกแบบแม่พิมพ์												
3. ออกแบบระบบทางวิ่งและรูเข้า โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การไหลของยาง												
4. ออกแบบและผลิตแม่พิมพ์												
5. ทดสอบการใช้งานแม่พิมพ์												
6. ปรับปรุง แก้ไขแม่พิมพ์												
7. สรุปผลการวิจัย และจัดทำเอกสาร												

สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

1. ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน

2. ระยะเวลาทำการวิจัย 12 เดือน

แหล่งทุนสนับสนุน

1. ทุนวิจัยมหับัณฑิต สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
2. มูลนิธิทุนการศึกษาเชล 100 ปี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้องค์ความรู้และแนวทางในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดเล็กและมีความละเอียดสูง
2. ลดต้นทุนการผลิตอันเนื่องจากของเสียในกระบวนการ (defect) รวมไปถึงการแก้ไขงาน (rework) ที่เกิดจากตำหนิที่เกิดขึ้นจากการแปรรูปผลิตภัณฑ์ยาง
3. ผลกระทบต่ออุตสาหกรรมแม่พิมพ์ของประเทศ
 - 3.1 ผลกระทบเชิงเศรษฐศาสตร์ และเชิงพาณิชย์

ประเทศไทยผลิตยางพารามากเป็นอันดับหนึ่งของโลก ในปี 2548 ผลิตยางได้ 2.8 ล้านตัน คิดเป็น 1 ใน 3 ของผลผลิตทั่วโลก ผลผลิตจำนวนมากนี้เป็นการจัดการขั้นปฐมภูมิเท่านั้น คือ เป็นเพียงผลผลิตวัตถุดิบ โดยประเทศไทยส่งออกยางดิบแปรรูปเบื้องต้นถึง 90% ของผลผลิตสร้างรายได้ให้แก่ประเทศ 120,877 ล้านบาท และใช้เพียง 10% เพื่อการแปรรูปผลิตภัณฑ์ใช้ใน ประเทศและส่งเป็นสินค้าออกของประเทศ ซึ่งสร้างรายได้ให้แก่ประเทศถึง 94,350 ล้านบาท จาก

ความแตกต่างของรายได้และปริมาณที่ผลิตได้ จะเห็นได้ว่าการแปรรูปของเป็นผลิตภัณฑ์อย่างสร้างมูลค่าเพิ่มได้ประมาณ 10 เท่า ดังนั้นการส่งออกเป็นยางดิบจำนวนมากและไม่ได้แปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในประเทศเป็นการสูญเสียโอกาสทางเศรษฐกิจอย่างมาก หากมีการเพิ่มการแปรรูปเป็น 20% จะทำให้ประเทศมีรายได้เพิ่มขึ้นอีกประมาณ 95,000 ล้านบาท (สถาบันวิจัยยาง, 2548) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแนวทางที่สำคัญในการเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราคือ การพัฒนาอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางในประเทศให้เข้มแข็งขึ้น

3.2 ผลกระทบด้านการพัฒนาเทคโนโลยี

โครงการวิจัยนี้จะก่อให้เกิดผลกระทบด้านการพัฒนาเทคโนโลยีในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้โดยตรง โดยในปัจจุบันผู้ประกอบการยังขาดองค์ความรู้ในเทคโนโลยีดังกล่าวรวมถึงไม่มีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและผลิตจึงทำให้แม่พิมพ์ที่ผลิตได้มีคุณภาพค่อนข้างต่ำและทำให้เกิดปัญหาต่างๆของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้ เช่น ปัญหาการไหลไม่เต็มของเนื้อยางในแม่พิมพ์หลังจากทำการขึ้นรูปแล้ว ปัญหาเรื่องผลกระทบของอุณหภูมิในแม่พิมพ์ฉีดแบบระบบทางวิ่งเย็น เป็นต้น ทำให้ผู้ประกอบการส่วนใหญ่จะนำเข้าแม่พิมพ์จากต่างประเทศทำให้ไม่สามารถที่จะสร้างองค์ความรู้เพื่อที่จะพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตของตนเองได้นอกจากนั้นโครงการวิจัยนี้ยังเป็นการส่งเสริมให้มีการนำเทคโนโลยีด้าน CAD/CAM/CAE มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ของประเทศอีกด้วย รวมถึงถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ได้สู่ภาคเอกชนเพื่อก่อให้เกิดความสามารถในการแข่งขันได้อย่างยั่งยืน

3.3 ผลกระทบด้านการพัฒนาบุคลากร

เนื่องจากในปัจจุบันยังมีความขาดแคลนบุคลากรในทุกระดับฝีมือในด้านแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง ดังนั้นโครงการนี้จึงมีความมุ่งหวังที่จะเป็นโครงการนำร่องที่จะสร้างนักวิจัยจากหน่วยงานของรัฐและบุคลากรจากภาคอุตสาหกรรมให้มีความสามารถในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง รวมถึงเป็นส่วนหนึ่งในการจัดทำหลักสูตรเพื่อพัฒนาบุคลากรในด้านแม่พิมพ์อย่างต่อเนื่องต่อไปในอนาคต

4. ความร่วมมือและโอกาสเชิงพาณิชย์

โครงการวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือสนับสนุนจาก บริษัท เอสเค โพลีเมอร์ จำกัด ซึ่งเป็นผู้ประกอบการคนไทยที่ดำเนินธุรกิจในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ขึ้นส่วนยางที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมไฟฟ้า และยานยนต์ โดยโครงการวิจัยนี้ได้ร่วมมือกับทางบริษัทเพื่อเป็นโครงการนำร่องในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูงขึ้นภายในบริษัท ผลิตภัณฑ์ที่นำมาเป็นกรณีศึกษาคือ ยางหุ้มมอเตอร์ (motor boot) ในโทรศัพท์มือถือ โดยวัตถุดิบเป็นยางซิลิโคน เนื่องจากแม่พิมพ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังพบปัญหาคุณภาพในผลิตภัณฑ์ คือ การเกิดครีบ

การดำเนินการวิจัย

1. การเลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา และการศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์

โครงการวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือความสนับสนุนจาก บริษัท เอส เค โพลีเมอร์ จำกัด ซึ่งเป็นผู้ประกอบการที่ดำเนินธุรกิจในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้แม่พิมพ์ในการอัดและฉีดขึ้นรูป ซึ่งโรงงานตั้งอยู่ที่เขตบางขุนเทียน จังหวัดกรุงเทพมหานคร ซึ่งจากการเยี่ยมชมโรงงาน และการประชุมร่วมกัน ได้ผลสรุปในการเลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา คือ ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ (motor boot) โดยใช้วัสดุเป็น ยางซิลิโคน ดังแสดงในภาพที่ 40

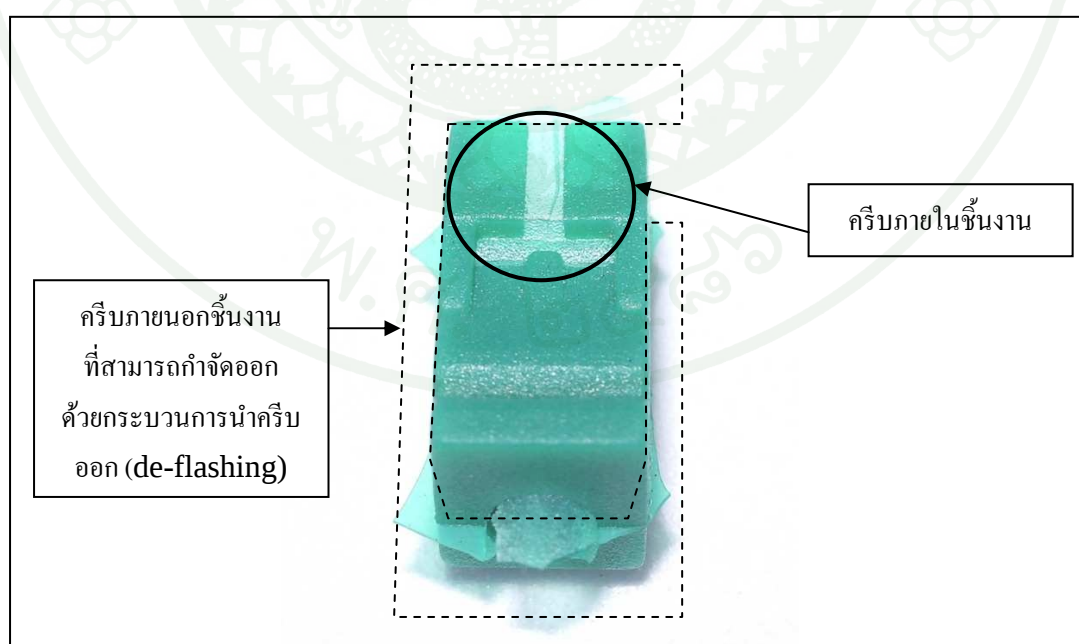


ภาพที่ 40 ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่นำมาเป็นกรณีศึกษา

จากการเก็บข้อมูลผลิตภัณฑ์ ณ บริษัทผู้ร่วมโครงการ แม่พิมพ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นแม่พิมพ์แบบอัดซึ่งทางบริษัทนำเข้าจากประเทศญี่ปุ่น บริษัทไม่ได้ทำการออกแบบและผลิตเอง โดยปัญหาที่พบคือการเกิดครีบบนบริเวณรอบชิ้นงานภายนอก และภายใน ดังภาพที่ 41 ซึ่งปัญหาครีบบนชิ้นงานภายนอกนั้นสามารถกำจัดออกได้ในกระบวนการนำครีบอก (de-flashing) โดยการทำชิ้นงานให้เย็นจนแข็งด้วยไนโตรเจนเหลว จากนั้นจะยังมีดพลาสติกขนาดเล็กเพื่อกำจัดส่วนที่เป็นครีบอก อย่างไรก็ตามวิธีดังกล่าวไม่สามารถกำจัดครีบบนที่กีดด้านในได้ ทางบริษัทจำเป็นต้องใช้พนักงานในการกำจัดส่วนดังกล่าวออกซึ่งใช้จำนวนแรงงานค่อนข้างมากคือประมาณ 5-6 คนทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มมากขึ้น โดยใน 1 รอบการผลิตจะมีพบชิ้นงานที่มีปัญหาประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นทางคณะผู้เสนอโครงการวิจัยได้ทำการสรุปปัญหาและสาเหตุดังนี้

- การกำหนดค่าพิกัดความเผื่อของแบบชิ้นส่วนแม่พิมพ์
- การผลิตชิ้นส่วนแม่พิมพ์ และการตรวจสอบ
- การปรับแต่งและประกอบแม่พิมพ์

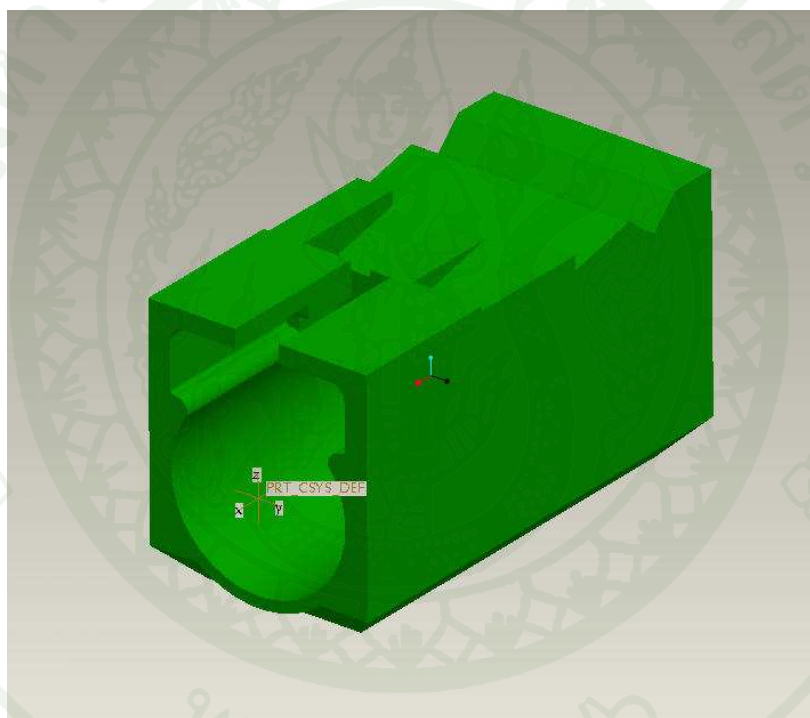
เนื่องจากทางคณะผู้เสนอโครงการวิจัยมีความเห็นว่าทางบริษัทมีความชำนาญในการปรับตั้งเครื่องอัดขึ้นรูปอยู่แล้ว จึงมุ่งประเด็นปัญหาไปที่กระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์



ภาพที่ 41 ปัญหาชิ้นงานที่มีครีบบ (flash)

2. การสร้างแบบ 3 มิติของผลิตภัณฑ์

เนื่องจากทางบริษัทเป็นผู้รับจ้างผลิตยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทำให้ทางบริษัทไม่มีแบบชิ้นงาน 3 มิติ โดยทางบริษัทมีเพียงแบบชิ้นงาน 2 มิติ ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยจำเป็นต้องทำการเขียนแบบชิ้นงาน 3 มิติขึ้นเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ รวมถึงการจำลองการไหลของยางในแม่พิมพ์ด้วย แบบ 3 มิติถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม Pro/Engineer โดยอ้างอิงขนาดต่างๆ จากแบบ 2 มิติ จากนั้นจึงนำแบบ 3 มิติ ที่ได้ส่งให้ทางบริษัทยืนยันความถูกต้อง ภาพที่ 42 แสดงแบบ 3 มิติ ของยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่



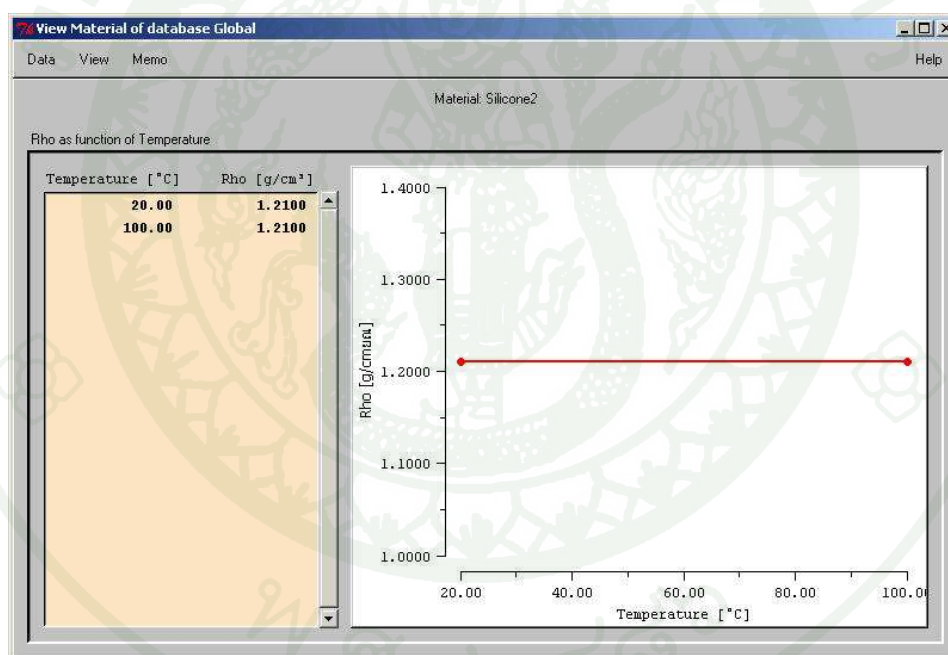
ภาพที่ 42 แบบ 3 มิติ ของยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่

3. การทดสอบคุณสมบัติของยางเพื่อใช้ในการจำลองการไหล

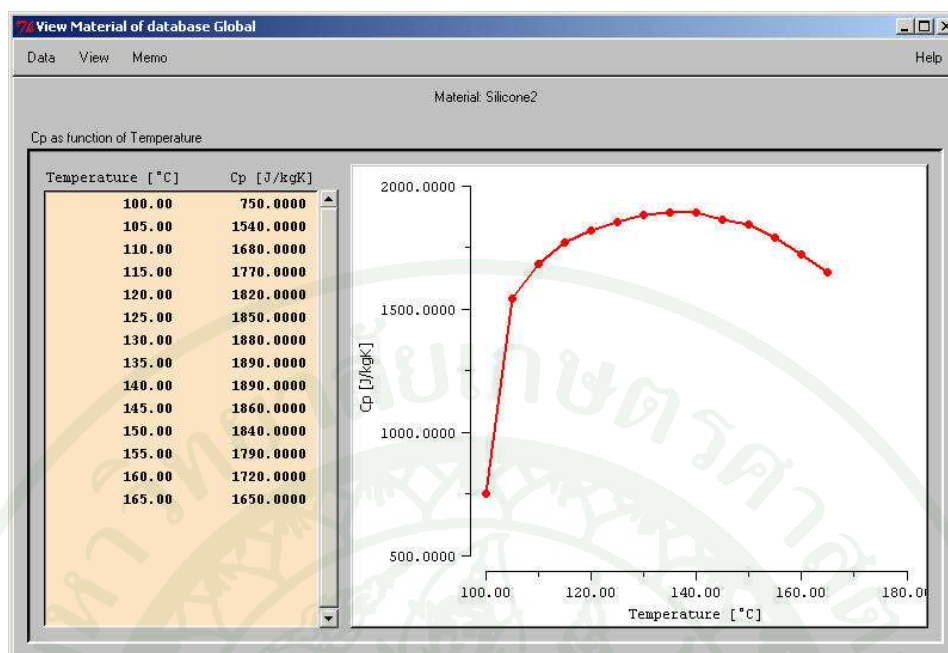
ในโครงการวิจัยนี้มีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมมาจำลองการไหลของยางในการฉีดขึ้นรูปด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA ดังนั้นจำเป็นต้องนำยางที่ใช้ในการผลิตจริงคือ ยางซิลิโคนไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่จำเป็นในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA โดยคุณสมบัติที่ใช้มีดังนี้

- 1) ค่าความถ่วงจำเพาะ (specific density, Rho)
- 2) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity, C_p)
- 3) ค่าการนำความร้อน (specific heat conductivity, λ)
- 4) ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือน (viscosity as function of shear rate) ที่ 3 อุณหภูมิ
- 5) อัตราการบ่ม (curing rate) ที่ 3 อุณหภูมิ

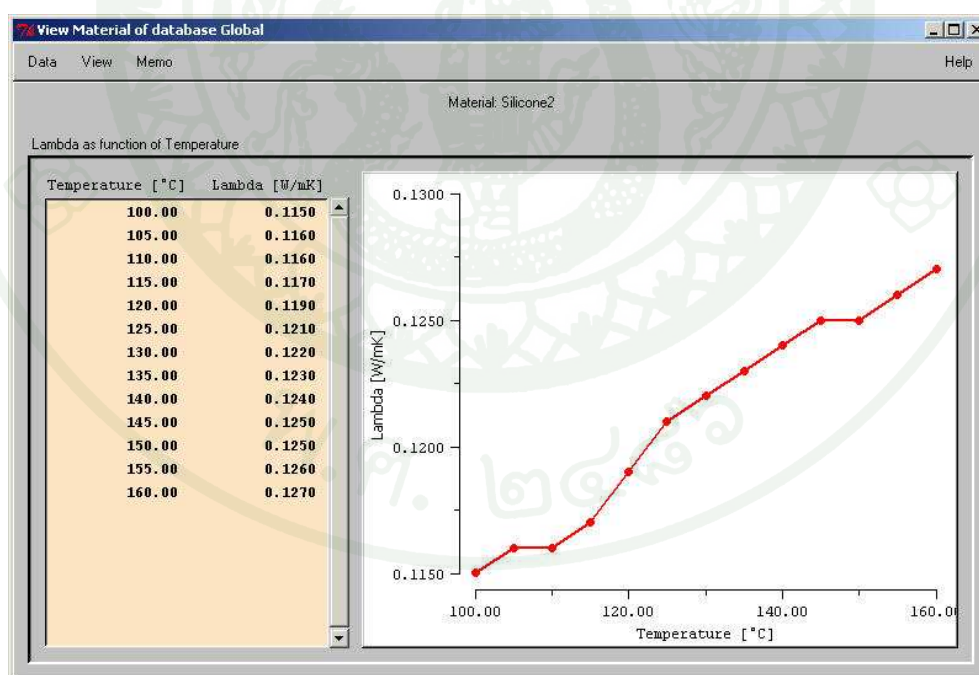
นอกจากนี้ยังใส่ค่าเริ่มต้นทั่วไปของอีก เช่น อุณหภูมิเริ่มต้น แบบจำลองการไหล และแบบจำลอง pVT เป็นต้น โดยแบบจำลองการไหลได้ใช้แบบจำลองการไหล Carreau-Yasuda-WLF และแบบจำลอง pVT แบบใช้ค่าความถ่วงจำเพาะ ภาพที่ 43 ถึง 50 แสดงค่าคุณสมบัติของยางซิลิโคนที่ใส่ในโปรแกรม



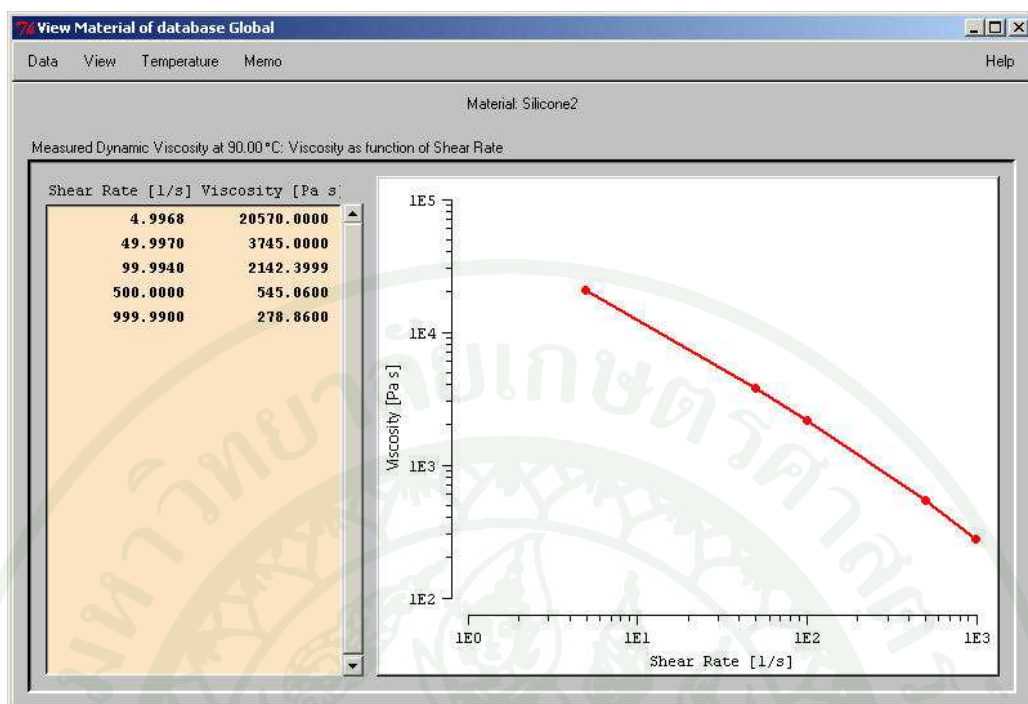
ภาพที่ 43 ค่าความถ่วงจำเพาะของยางซิลิโคน



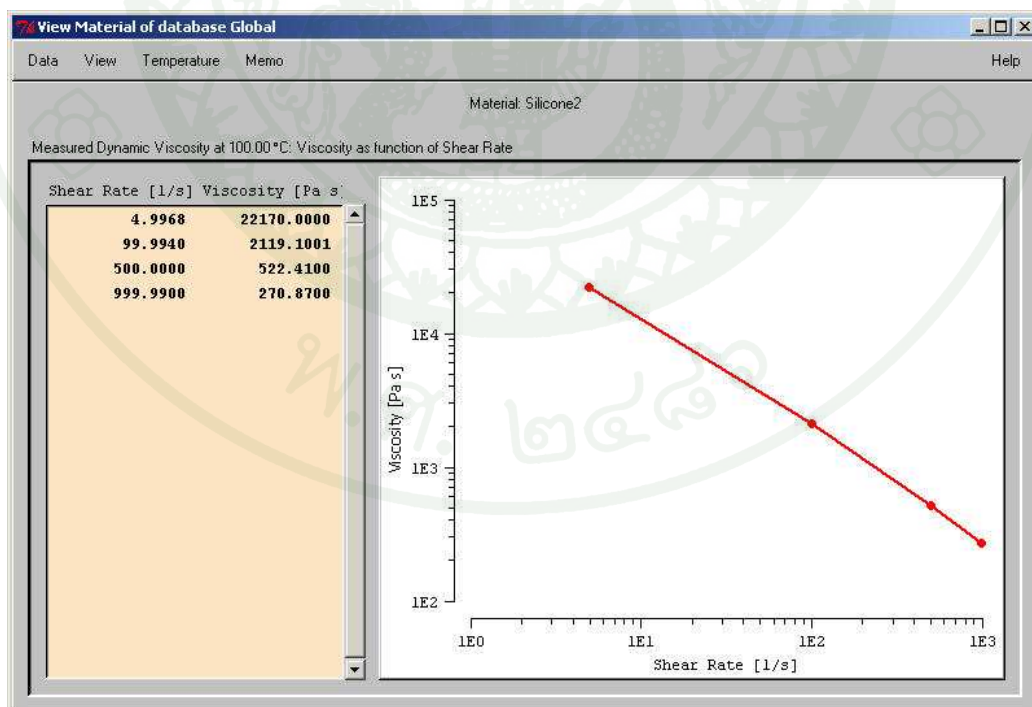
ภาพที่ 44 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของยางซิลิโคน



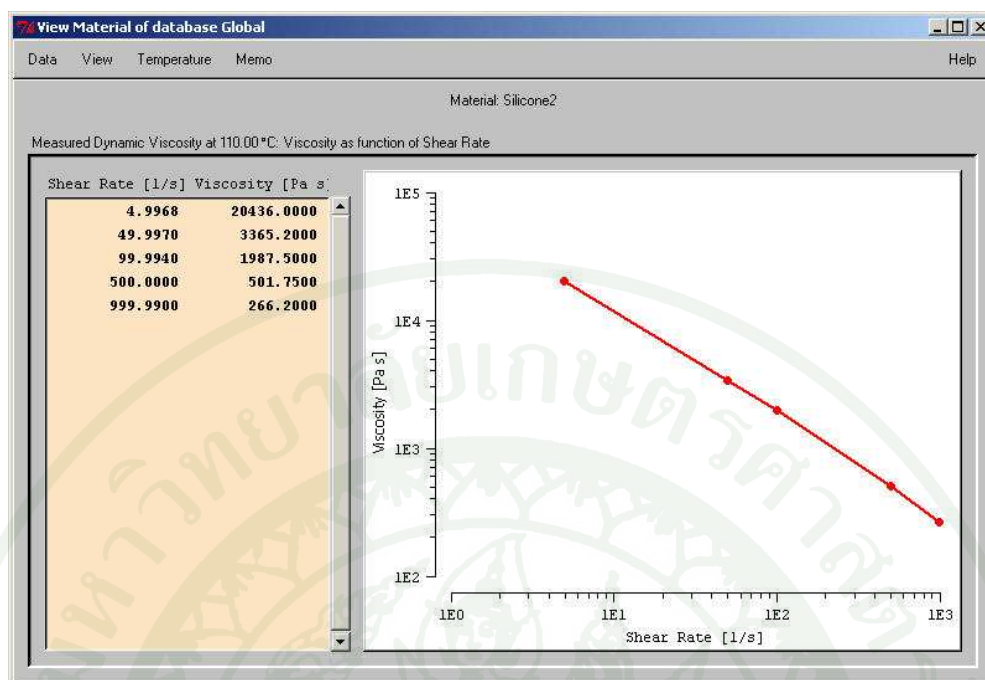
ภาพที่ 45 ค่าการนำความร้อนของยางซิลิโคน



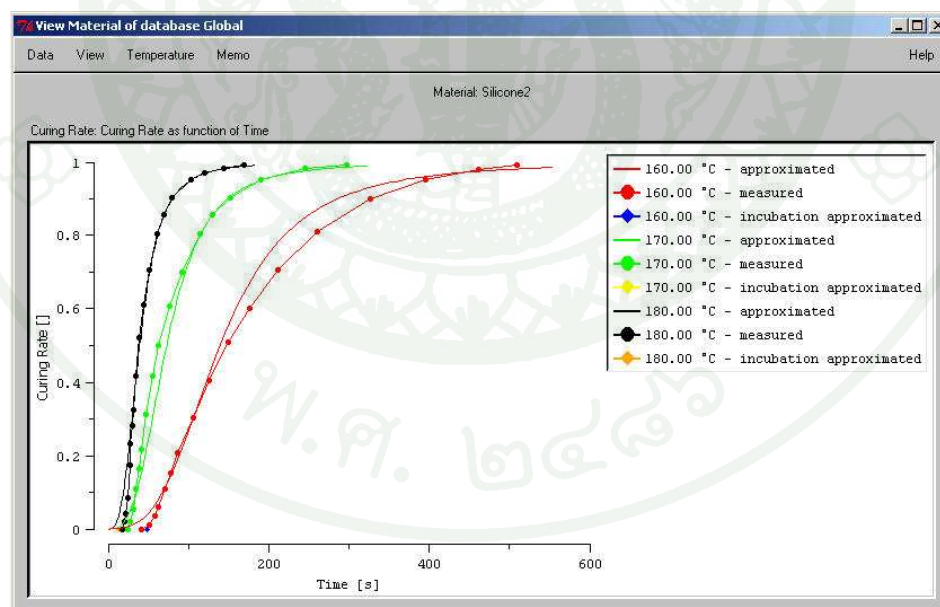
ภาพที่ 46 ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสของยางซิลิโคน



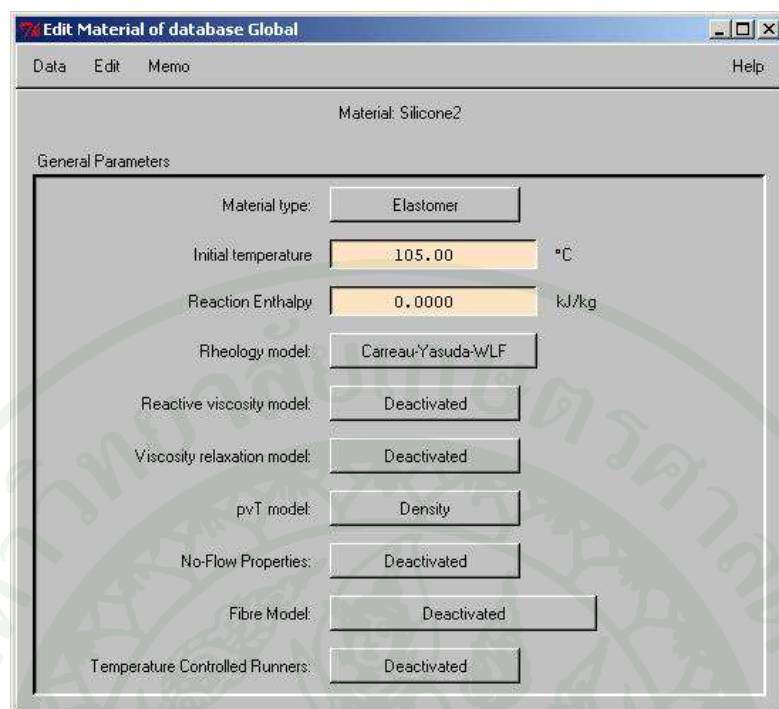
ภาพที่ 47 ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 48 ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือนของยางซิลิโคนที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส



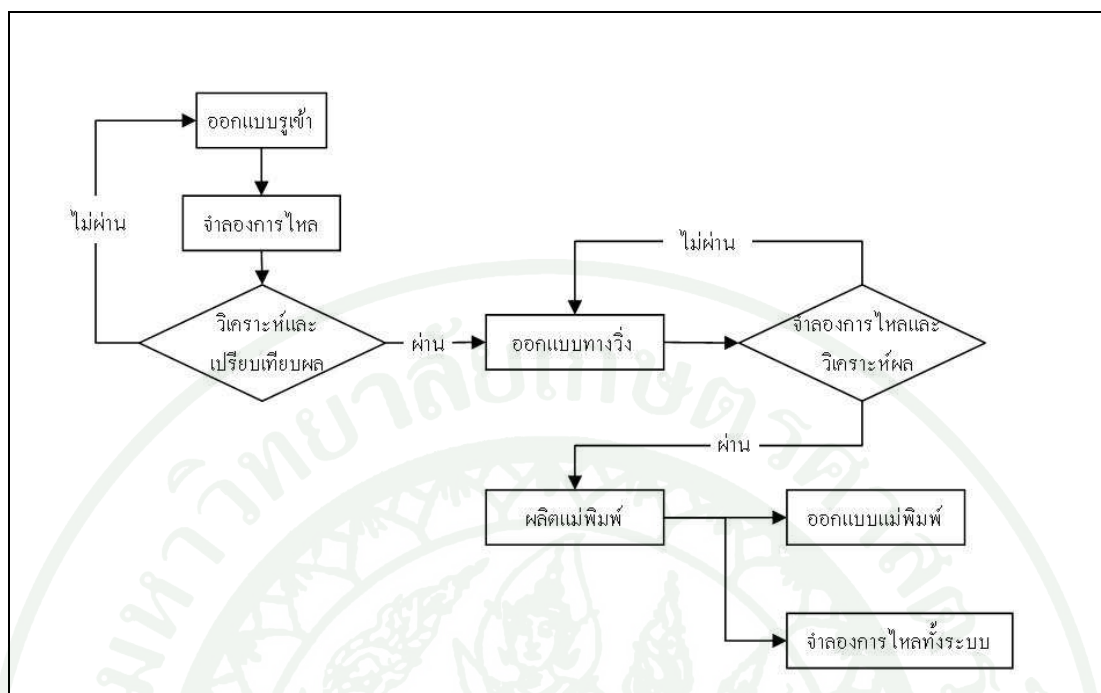
ภาพที่ 49 อัตราการบ่มของยางซิลิโคนที่ 3 อุณหภูมิ



ภาพที่ 50 ตัวแปรทั่วไปของยางซิลิโคน

4. การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA

ขั้นแรกทางคณะผู้วิจัยจะทำการออกแบบและวิเคราะห์การไหลในส่วนของรูเข้าก่อน จากนั้นจะเป็นทางวิ่ง และหลังจากได้ขนาดของรูเข้าและทางวิ่งแล้ว จึงทำการวิเคราะห์แม่พิมพ์ที่มีส่วนประกอบต่างๆครบสมบูรณ์ โดยแสดงแผนการวิเคราะห์ดังภาพที่ 51



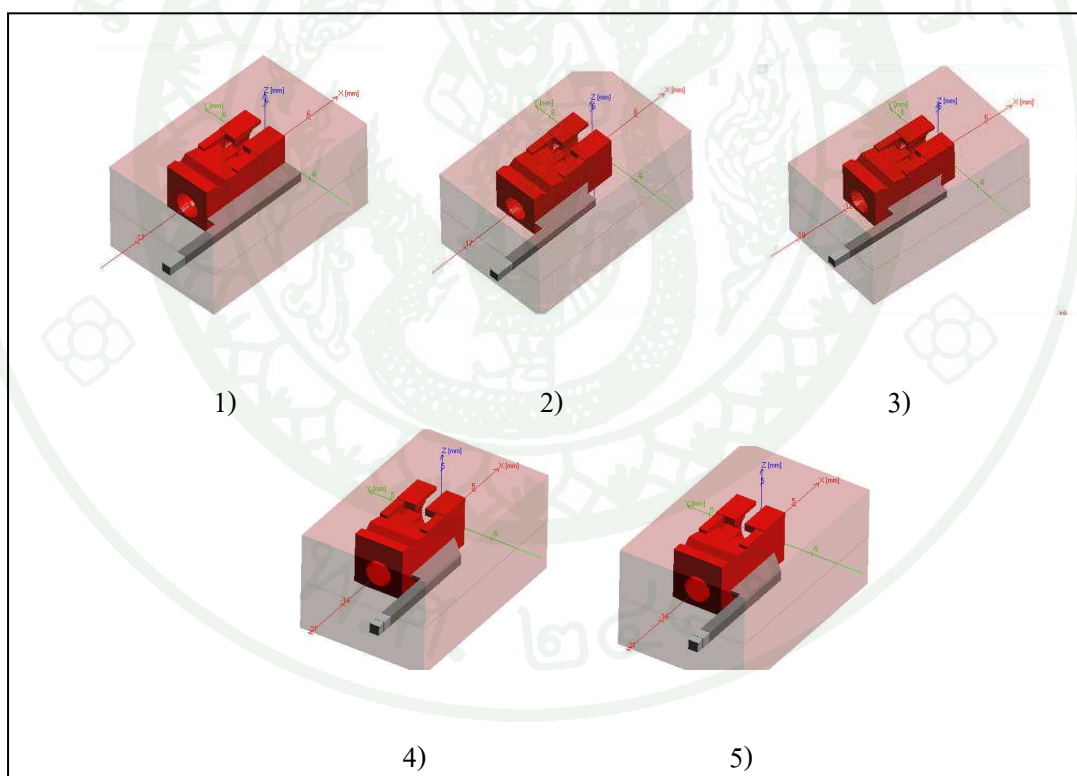
ภาพที่ 51 แผนผังการวิเคราะห์การไหล

ผลและวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์การไหลด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA

1. ผลการวิเคราะห์การไหลเพื่อหาลักษณะรูเข้าที่เหมาะสม

ทางคณะผู้วิจัยได้ทำการจำลองการไหลของยางในเบื้องต้นเพื่อสังเกตการไหลของยาง เพื่อช่วยในการออกแบบรูเข้าของแม่พิมพ์ โดยการสังเกตลักษณะการไหลของยางและผลลัพธ์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในการวิเคราะห์จะออกแบบรูเข้าไว้จำนวน 5 แบบ และนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลจนได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ ภาพที่ 52 แสดงลักษณะรูเข้าทั้ง 5 แบบที่จะนำมาวิเคราะห์การไหล

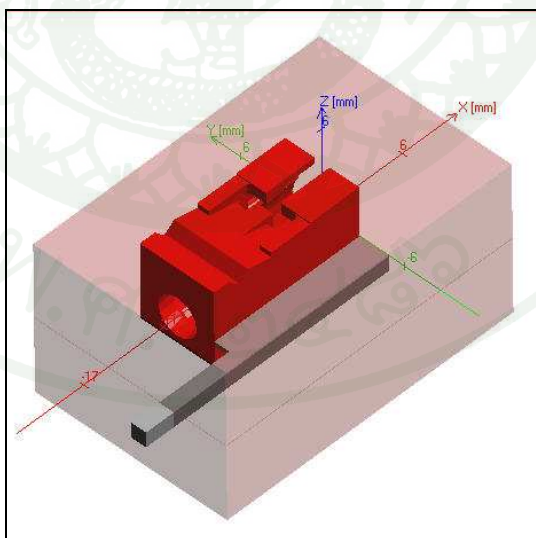


ภาพที่ 52 ลักษณะรูเข้าทั้ง 5 แบบที่จะนำมาวิเคราะห์การไหลด้วยคอมพิวเตอร์

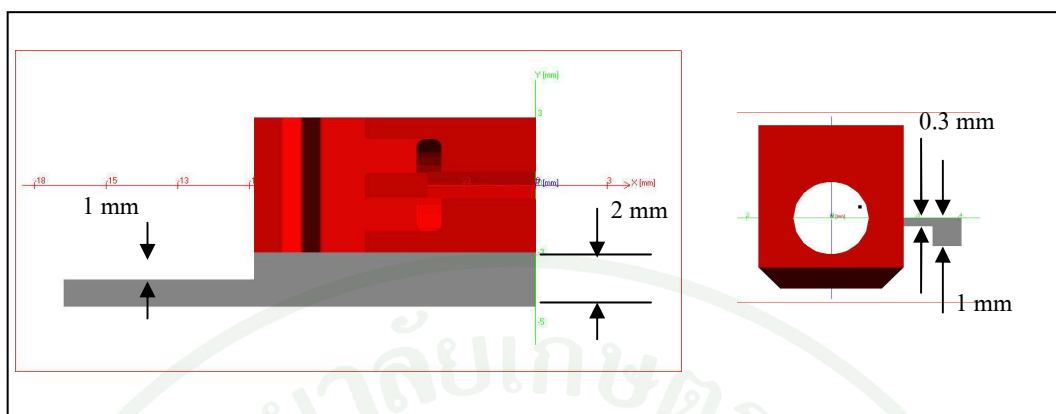
การจำลองการไหลจะพิจารณาปัจจัยที่สำคัญที่เกี่ยวข้องในการออกแบบรูเข้านี้ คือ

1. ลักษณะการไหลของยาง และการสมดุลการไหล
2. แรงดันฉีด และความเร็วฉีด
3. ตำแหน่งของรูเข้า
4. ลักษณะรูเข้า

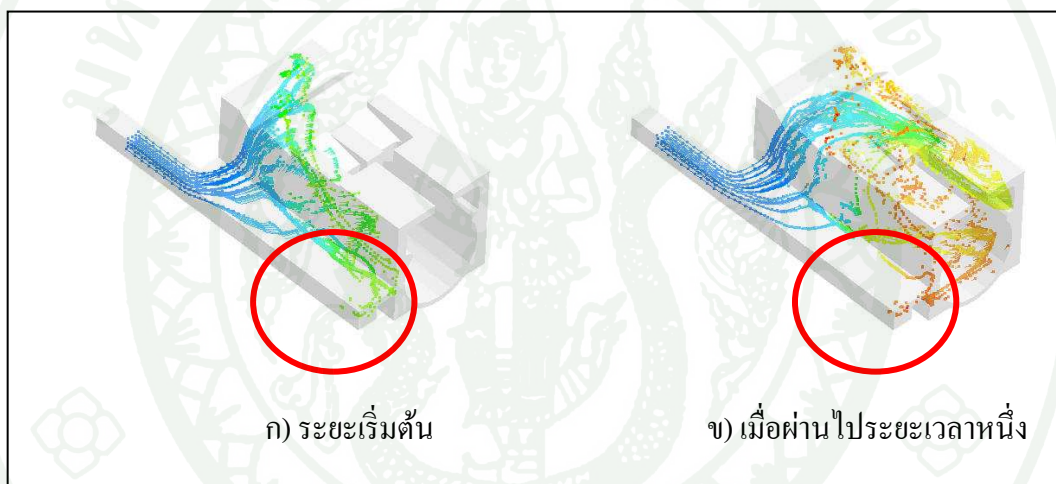
ลักษณะรูเข้าที่จะทำการจำลองเป็นแบบแรกจะเป็นลักษณะเข้าตลอดแนวของชิ้นงาน โดยมี ความยาวรูเข้า 10.15 มม. ความลึกรูเข้า 0.3 มม. ซึ่งความลึกของรูเข้ามาจากคำแนะนำของโรงงานที่เข้าร่วมโครงการ ดังภาพที่ 53 และ 54 ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ดูการไหลดังภาพที่ 55 จะเห็นว่าการไหลของยางเมื่อผ่านไประยะเวลาหนึ่ง ยางจะไหลเข้าเพียงส่วนต้นของรูเข้า และส่วนปลายของรูเข้าเนื้อยาง จะไม่มีการไหลเข้าไปภายในเบ้า ซึ่งเราสามารถตัดบริเวณปลายของรูเข้าได้ ทำให้สามารถลดเนื้อวัสดุได้



ภาพที่ 53 ลักษณะการออกแบบของรูเข้าแบบแรก

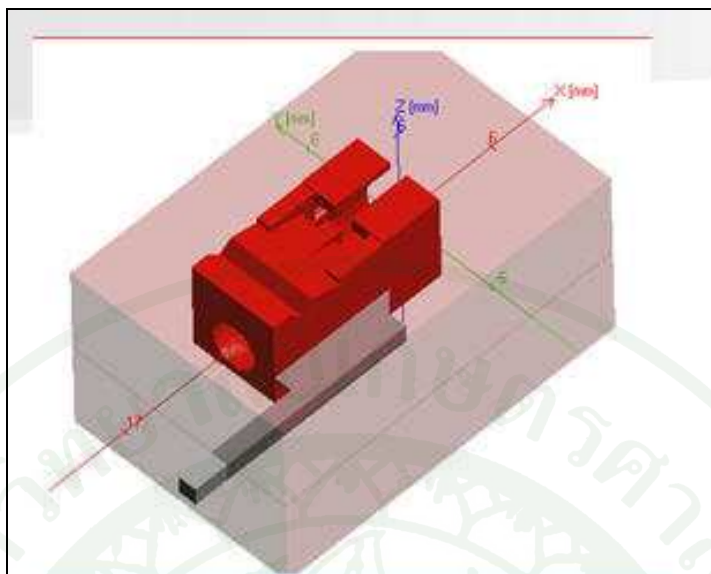


ภาพที่ 54 ขนาดของรูเข้าแบบแรก

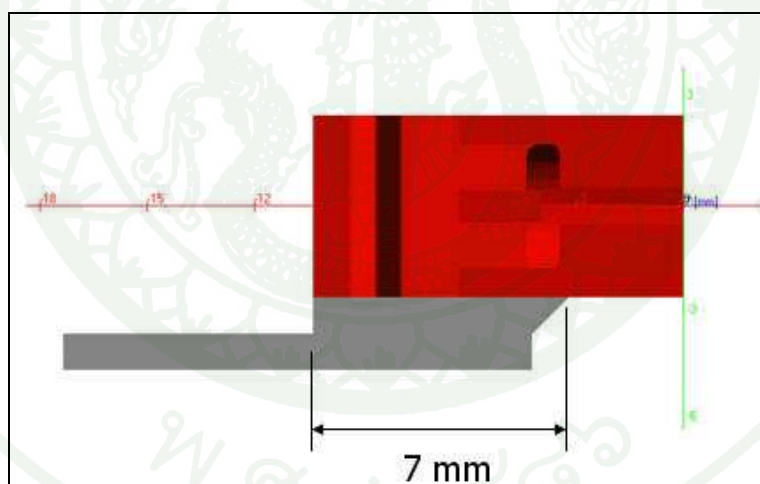


ภาพที่ 55 การไหลของอนุภาค (tracer) ข้างที่ระยะเวลาต่างกัน

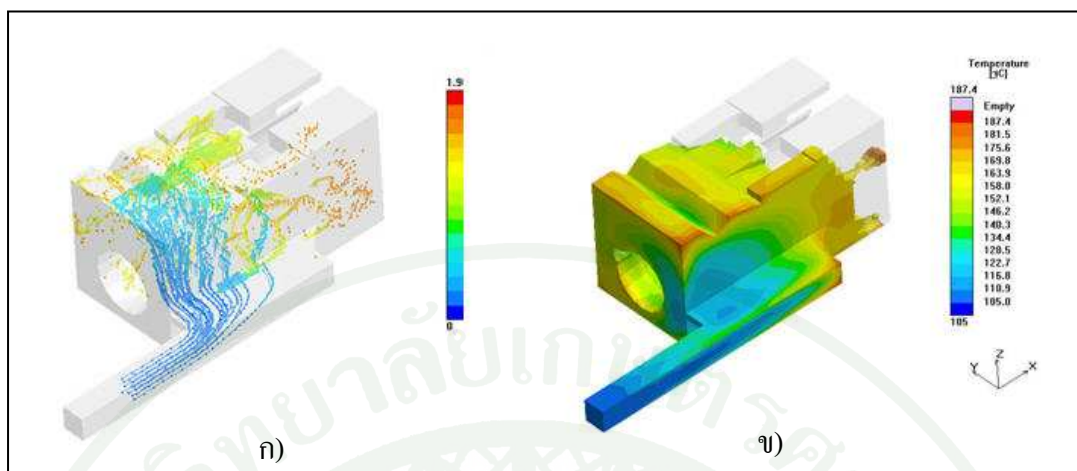
หลังจากการวิเคราะห์แบบรูเข้าแบบแรก จึงได้ทำการปรับปรุงออกแบบรูเข้าใหม่โดยตัดบริเวณปลายของรูเข้าออก เนื่องจากขางบริเวณดังกล่าวไม่มีการไหลเมื่อถูกเติมจนเต็มแล้ว โดยลดความยาวรูเข้าเหลือ 7 มม. แบบรูเข้ากรณีที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 56 และ 57 ลักษณะการไหลของขางจะไหลจากด้านทางเข้าไล่ไปยังส่วนท้ายของชิ้นงานดังภาพที่ 58



ภาพที่ 56 ลักษณะรูเข้าที่ได้รับการปรับปรุงเป็นแบบที่ 2

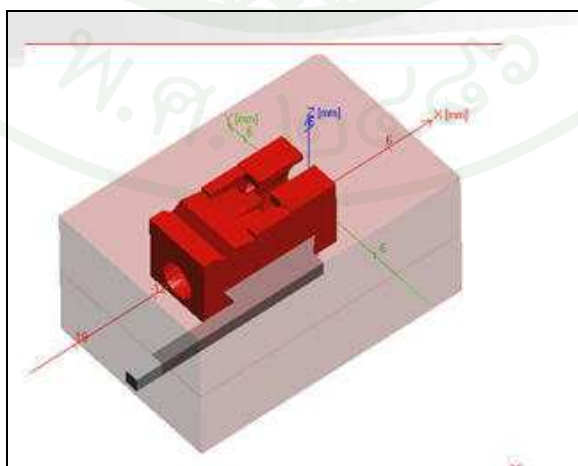


ภาพที่ 57 ขนาดของรูเข้าแบบที่ 2

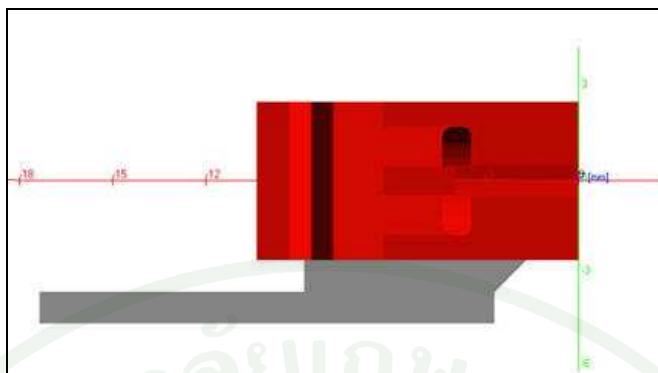


ภาพที่ 58 ก) การไหลของอนุภาคยาง และ ข) ลักษณะการไหลของยางในรูเข้าแบบที่ 2

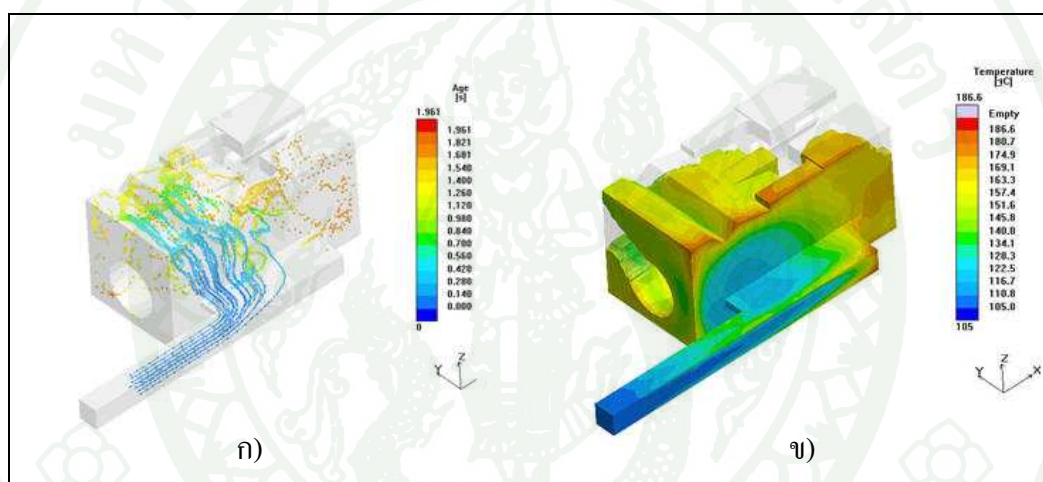
จากนั้นจึงได้ทำการออกแบบรูเข้าแบบที่ 3 ได้ทดลองทำการปรับปรุงตำแหน่งรูเข้า โดยมีขนาดและลักษณะเช่นเดียวกับแบบที่ 2 แต่ให้รูเข้าเข้าบริเวณกลางชิ้นงาน ดังภาพที่ 59 และ 60 เพื่อให้ยางไหลเข้าชิ้นงานสม่ำเสมอมากขึ้น ภาพที่ 61 แสดงลักษณะการไหลของยางในกรณีรูเข้าแบบที่ 3 และภาพที่ 62 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการไหลของรูเข้าแบบที่ 2 และ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการไหลของยางจะสม่ำเสมอมากขึ้นโดยจะเนื้อยางจะเต็มในฝั่งของรูเข้าก่อน ซึ่งการปรับปรุงในแบบที่ 3 จะช่วยให้ความยาวของการไหลในแต่ละจุดของชิ้นงานเท่ากันมากขึ้น ยางจะไหลเต็มแต่ละจุดของชิ้นงานใกล้เคียงกันมากขึ้น จะเป็นการช่วยลดความดันให้กับบริเวณที่ยางเต็มก่อน และส่งผลต่อการเกิดคืบในอนาคต



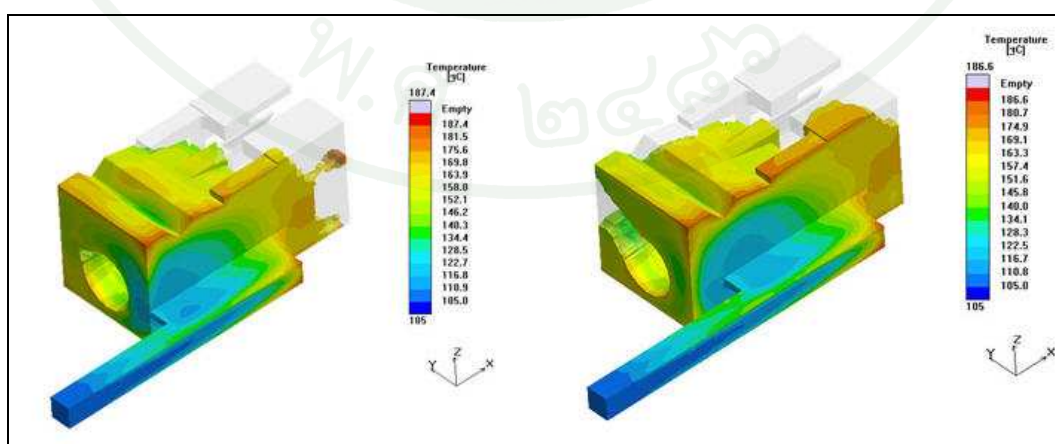
ภาพที่ 59 ลักษณะรูเข้าแบบที่ 3



ภาพที่ 60 ภาพมุมมองบนของรูเข้าแบบที่ 3

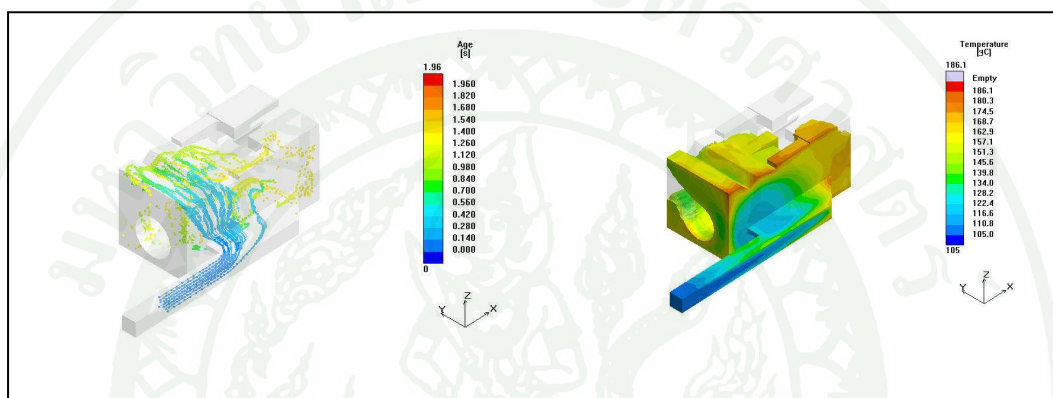


ภาพที่ 61 ก) การไหลของอนุภาคยาง และ ข) ลักษณะการไหลของยางในรูเข้าแบบที่ 3

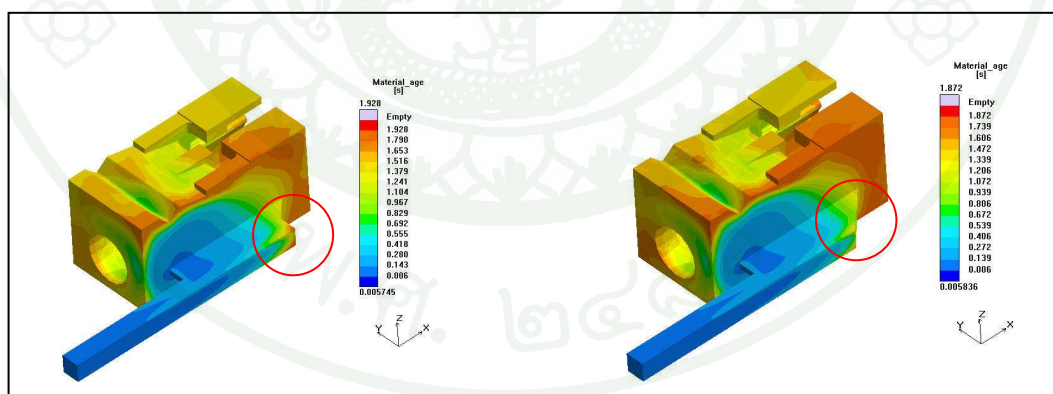


ภาพที่ 62 เปรียบเทียบลักษณะการไหลของยางของรูเข้าแบบที่ 2 (ซ้าย) และ 3 (ขวา)

หลังจากการวิเคราะห์ผลแบบรูเข้าที่ 3 แล้ว จึงได้ทำการปรับปรุงเพิ่มเติมโดยแบบรูเข้ากรณี ที่ 4 ได้ทำการปรับปรุงบริเวณปลายของทางวิ่งรอกก่อนเข้ารูเข้าให้มีลักษณะเป็นมุมเฉียงตามรูเข้า ดังภาพที่ 63 เพื่อให้การไหลของยางดีขึ้น เนื่องจากบริเวณดังกล่าวยางจะหยุดไหลเมื่อยางไหลเข้าไปเต็มแล้ว โดยดูจากผลอายุของยาง (material age) เปรียบเทียบระหว่างรูเข้าแบบกรณีที่ 3 และ 4 ดังในส่วนที่วงกลมไว้ในภาพที่ 64 รูเข้ากรณีที่ 4 จะไม่มียางค้างบริเวณทางวิ่งรอก ซึ่งสามารถลด ปริมาณยางที่ไม่จำเป็นลงได้



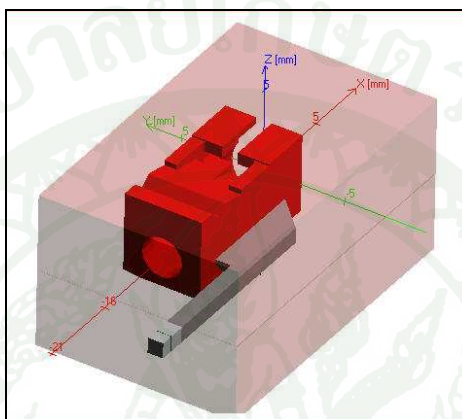
ภาพที่ 63 การไหลของอนุภาคยาง และลักษณะการไหลของยางในรูเข้าแบบที่ 4



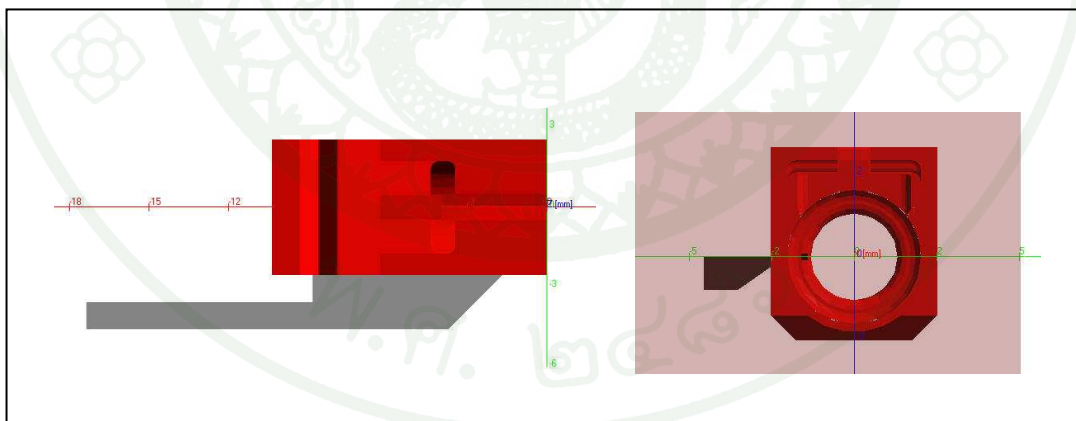
ภาพที่ 64 เปรียบเทียบอายุของยางของรูเข้าแบบที่ 3 (ซ้าย) และ 4 (ขวา)

รูเข้ากรณีที่ 5 ได้ทำการปรับปรุงลักษณะรูเข้าเพื่อให้การไหลของยางดีขึ้นจากเดิมที่มี ลักษณะแบนความหนาเท่ากันตลอด โดยเปลี่ยนให้รูเข้าเป็นลักษณะมุมเอียง (taper) ดังภาพที่ 65 และ 66 ซึ่งการลดมุมดังกล่าวจะช่วยให้ยางไหลดีขึ้น โดยเป็นการลดอัตราเฉือนของยางลง โดย

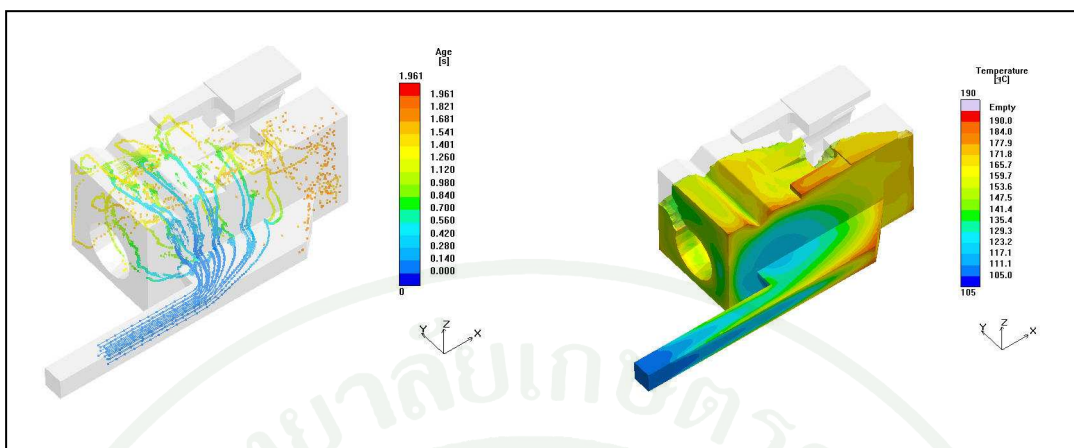
ส่งผลให้ความดันฉีด และความเร็วฉีดลดลง ทำให้ลดโอกาสเกิดครีบกหรือยางล้นลงได้ ดังภาพที่ 67 โดยภาพที่ 68 แสดงการเปรียบเทียบผลของความดันฉีดในรูเข้าแบบที่ 4 และ 5 จะเห็นได้ว่ารูเข้าแบบที่ 4 จะมีความดันฉีดอยู่ที่ประมาณ 200 บาร์ แต่แบบที่ 5 ความดันฉีดลดลงเหลือประมาณ 160 บาร์ และในภาพที่ 69 ก็จะเห็นได้ว่าความเร็วฉีดของรูเข้าแบบที่ 5 อยู่ที่ 12.21 ซม.ต่อวินาที ลดลงจากแบบที่ 4 คือ 15.79 ซม.ต่อวินาที



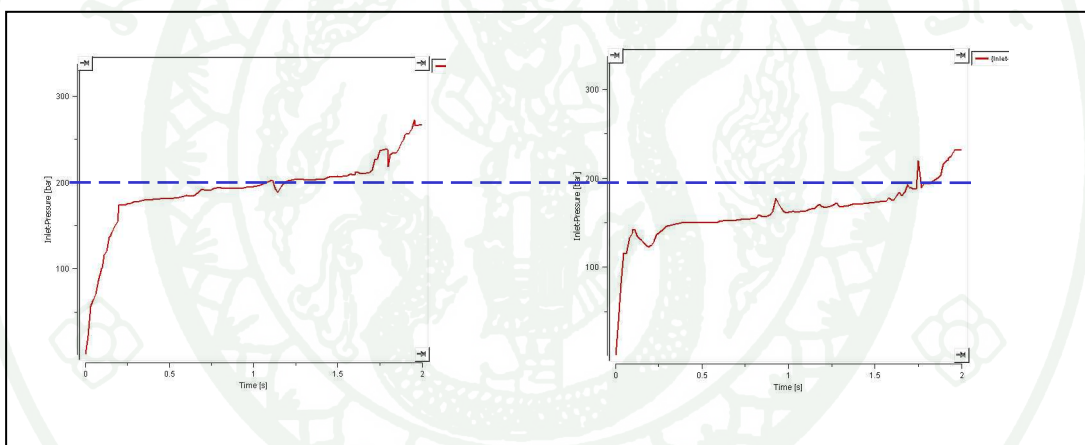
ภาพที่ 65 ลักษณะรูเข้าแบบที่ 5



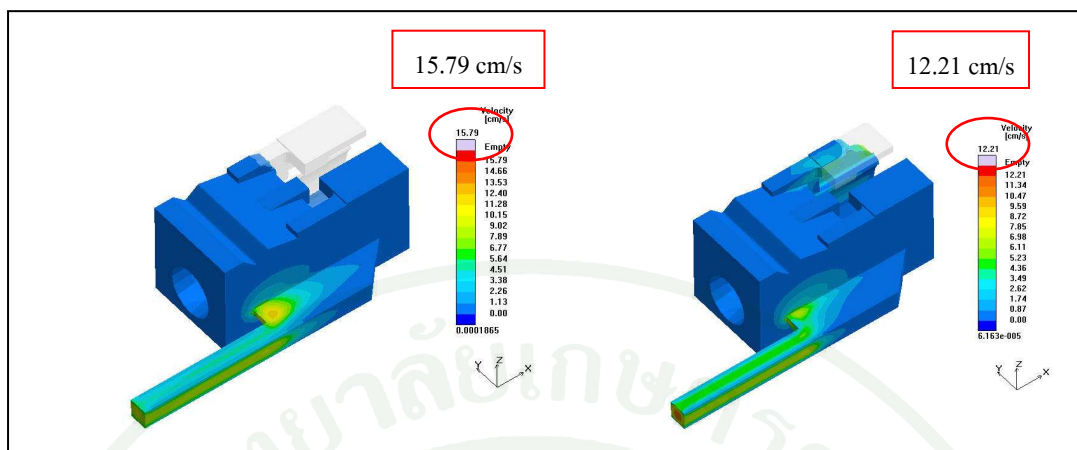
ภาพที่ 66 ภาพมุมมองบนและหน้าของรูเข้าแบบที่ 5



ภาพที่ 67 การไหลของอนุภาคยาง และลักษณะการไหลของยางที่ระยะเวลาต่างกัน



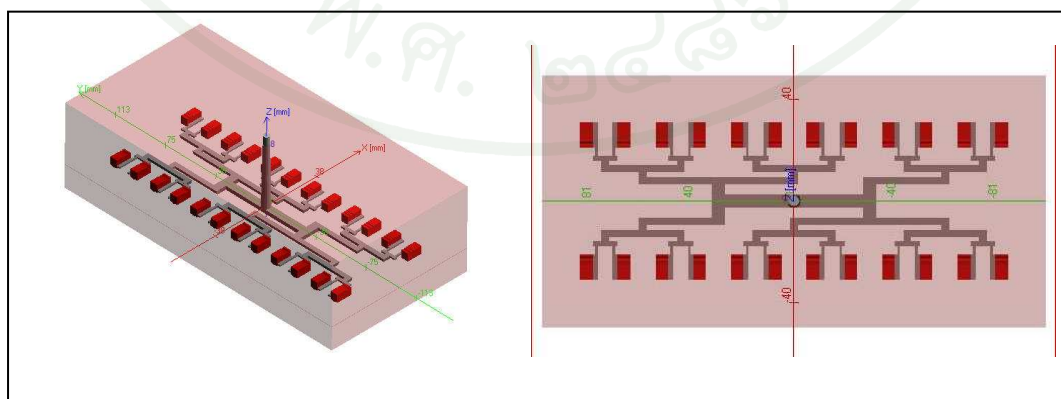
ภาพที่ 68 กราฟเปรียบเทียบความดันฉีระหว่างรูเข้าแบบที่ 4 (ซ้าย) และ 5 (ขวา)



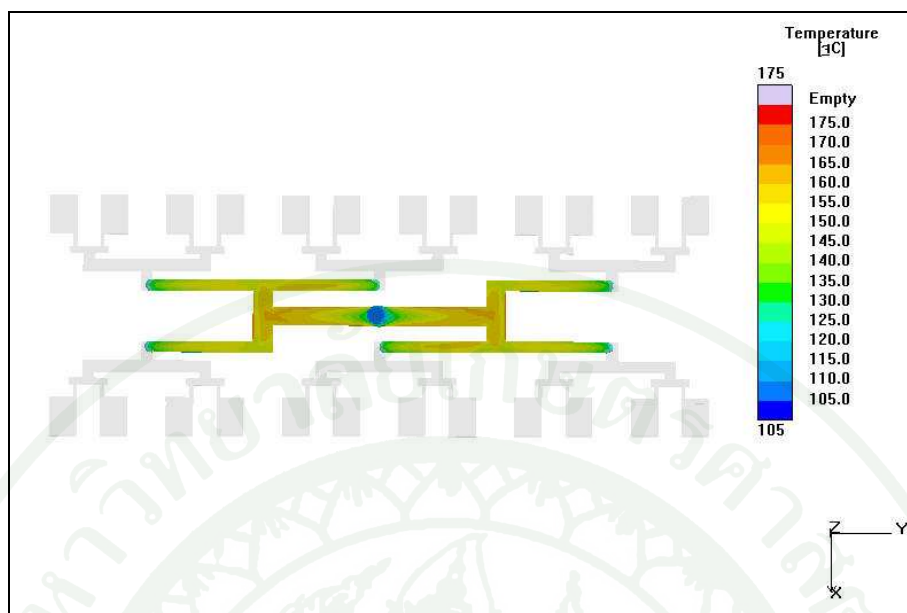
ภาพที่ 69 เปรียบเทียบความเร็วฉีดของยางของรูเข้าแบบที่ 4 (ซ้าย) และ 5 (ขวา)

2. การวิเคราะห์การไหลเพื่อหาลักษณะทางวิ่งที่เหมาะสม

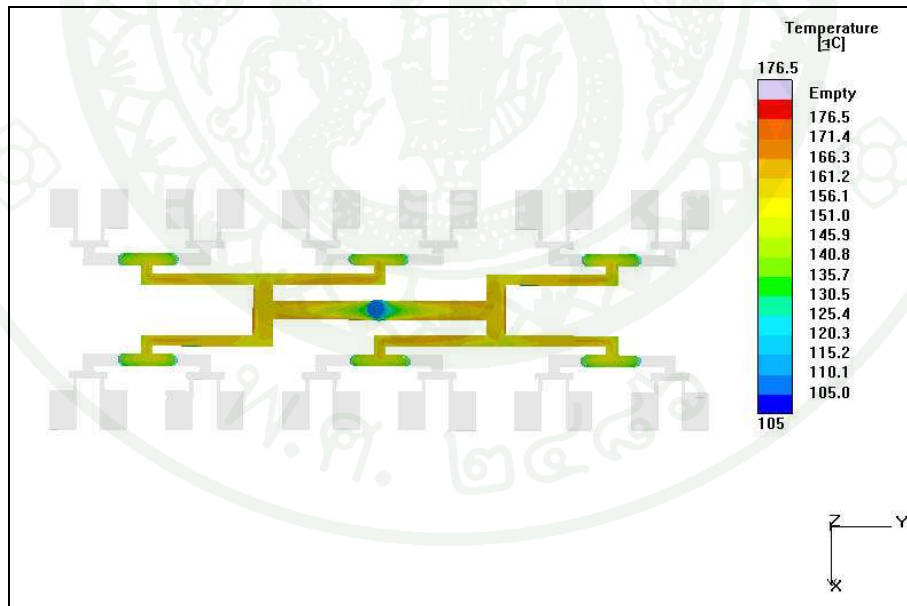
ในการออกแบบแม่พิมพ์ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่กำหนดจำนวนเบ้าไว้ที่ 24 เบ้า และในการออกแบบทางวิ่งได้ออกแบบให้ทางวิ่งมีลักษณะมีความสมดุลของการไหล โดยให้ระยะทางการไหล (flow length) จากจุดฉีดจนถึงแต่ละเบ้ามีความยาวเท่ากัน ดังภาพที่ 70 ซึ่งการที่แต่ละเบ้ามีระยะทางการไหลเท่ากันจะช่วยให้ความดันภายในเบ้าที่เกิดขึ้นมีความสมดุลกันในแต่ละเบ้า หลังจากนั้นจึงทำการจำลองการไหลเพื่อดูลักษณะการไหลของยางที่ไหลเข้าในแต่ละเบ้า ซึ่งจากผลการจำลองการไหลแสดงให้เห็นว่ายางมีการไหลเข้าแต่ละเบ้าที่สมดุลกัน ดังแสดงในภาพที่ 71 ถึง 75 ทั้งนี้หากยางไหลเข้าเต็มแต่ละเบ้าได้ไม่พร้อมกันจะส่งผลให้เบ้าที่เนื้อยางเต็มก่อนจะได้รับแรงดันสูงกว่า ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาการระเบิด (flash) หรือชิ้นงานไม่ได้ขนาดตามต้องการได้



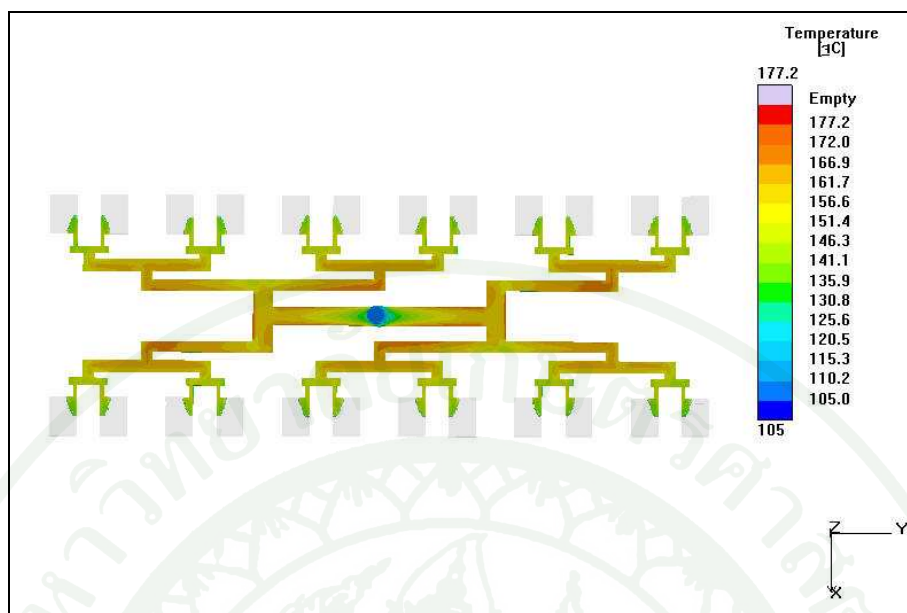
ภาพที่ 70 ลักษณะของทางวิ่ง 24 เบ้า



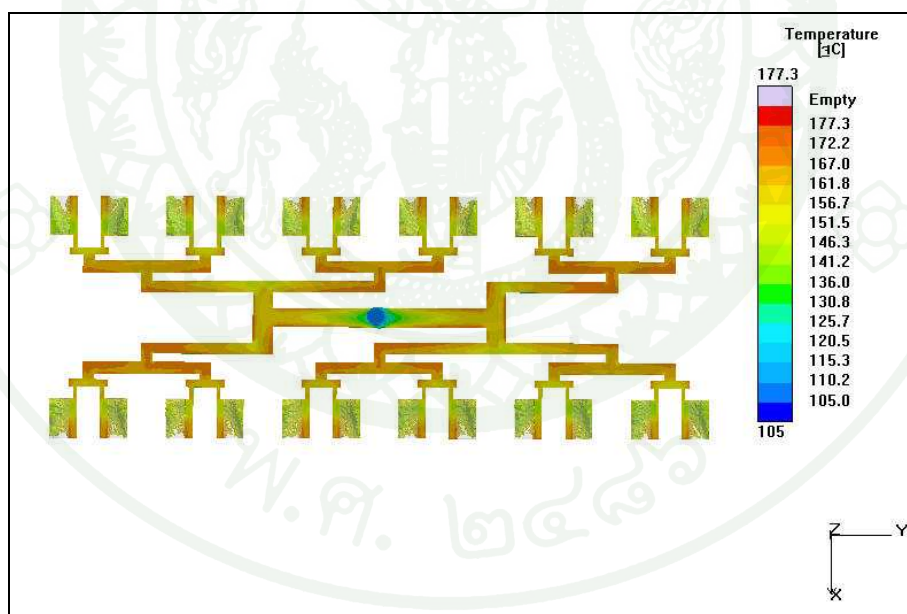
ภาพที่ 71 ลักษณะการไหลของยางในทางวิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ



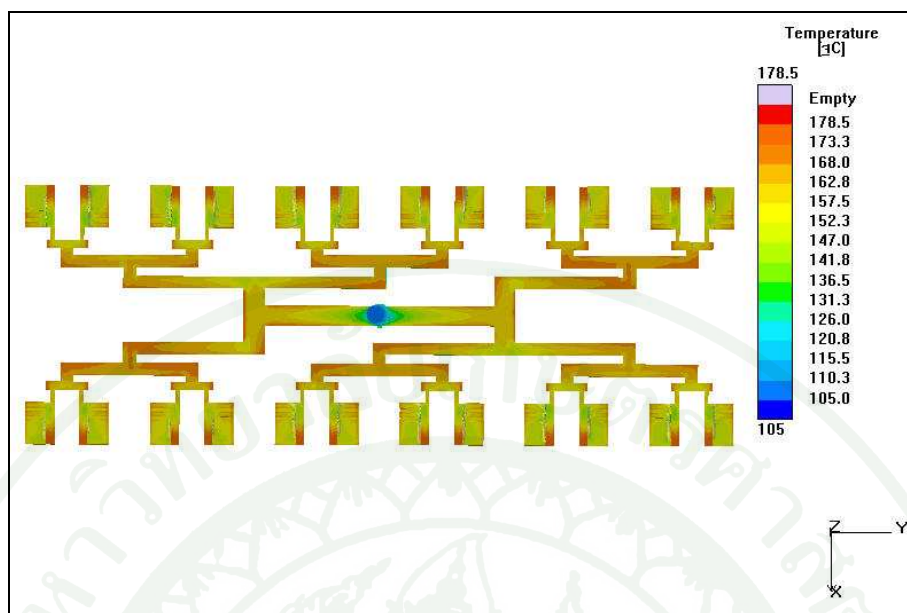
ภาพที่ 72 ลักษณะการไหลของยางในทางวิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ



ภาพที่ 73 ลักษณะการไหลของยางในทางวิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ



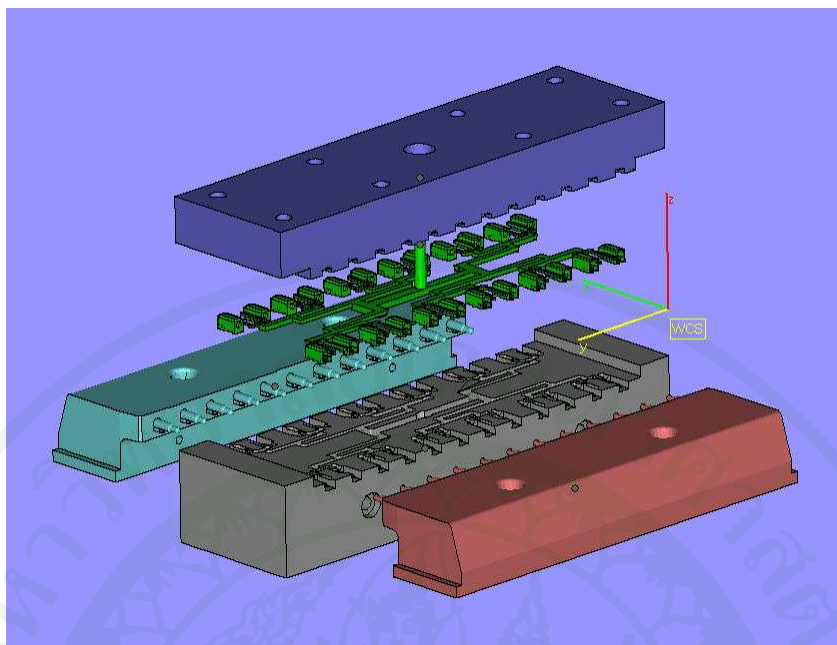
ภาพที่ 74 ลักษณะการไหลของยางในทางวิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ



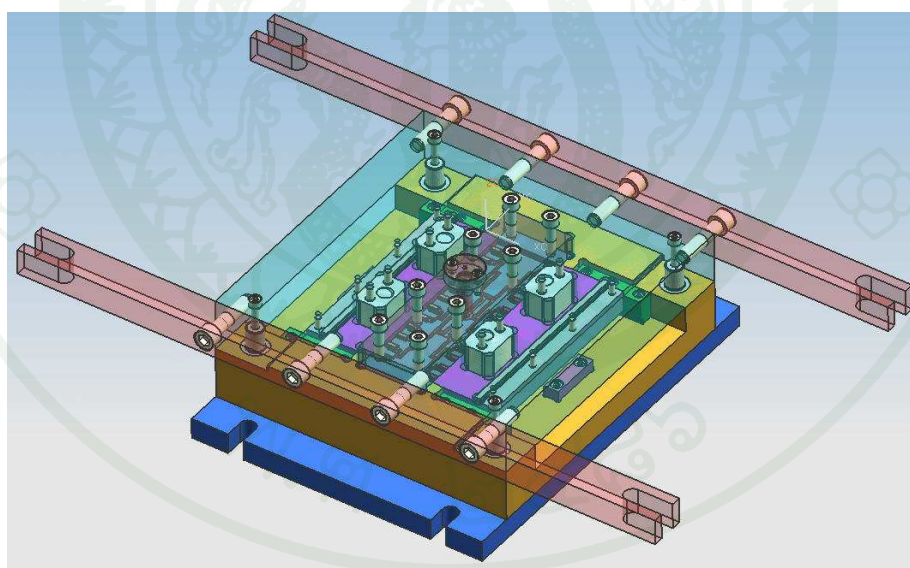
ภาพที่ 75 ลักษณะการไหลของยางในทางวิ่งที่ระยะเวลาต่างๆ

การออกแบบแม่พิมพ์

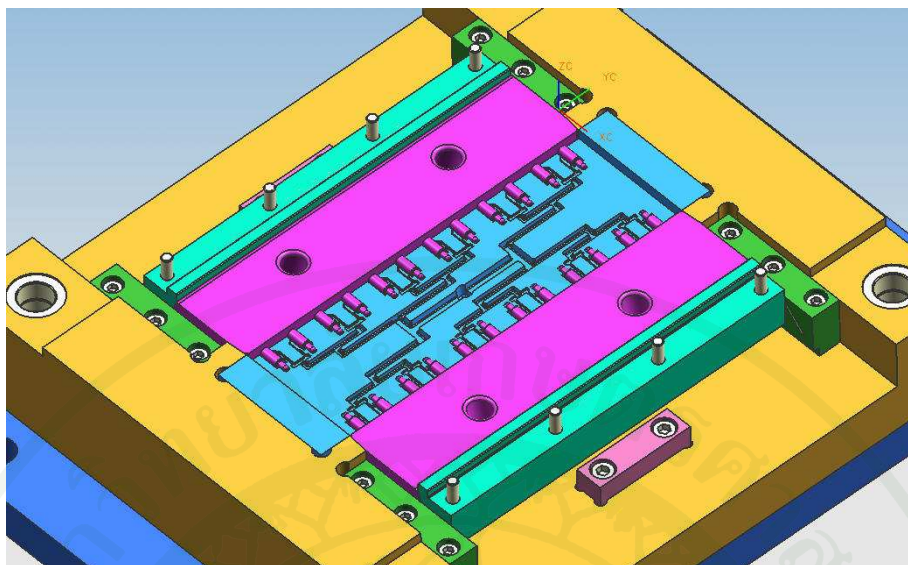
หลังจากได้แบบของทางวิ่งและรู้ค่าจากผลการวิเคราะห์การไหลของยางด้วยโปรแกรม จึงนำผลที่ได้มาออกแบบแม่พิมพ์ขึ้นรูปยางหุ้มมอเตอร์โทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งจะเป็นแบบที่จะใช้ในการผลิตแม่พิมพ์จริง โดยจำนวนของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ทั้งหมด 24 ใบ มีลักษณะทางวิ่งแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ขนาดความกว้าง 5 และ 3 มิลลิเมตร ลักษณะรูเข้าแบบเข้าที่ขอบ (edge gate) มีความยาว 7 มิลลิเมตร และความหนา 0.3 มิลลิเมตร ส่วนประกอบที่สำคัญคือ ส่วนสไลด์ที่ทำหน้าที่ขึ้นรูปอันเดอร์คัต (under cut) ตัวอย่างแบบแม่พิมพ์แสดงในภาพที่ 76 ถึง 81



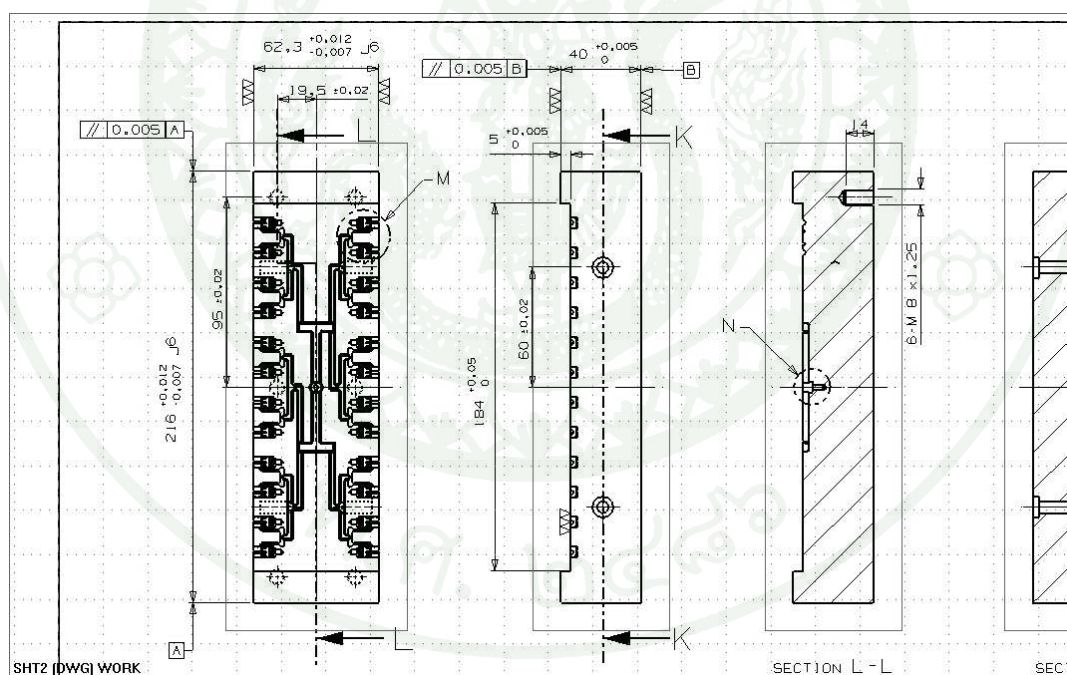
ภาพที่ 76 ลักษณะการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



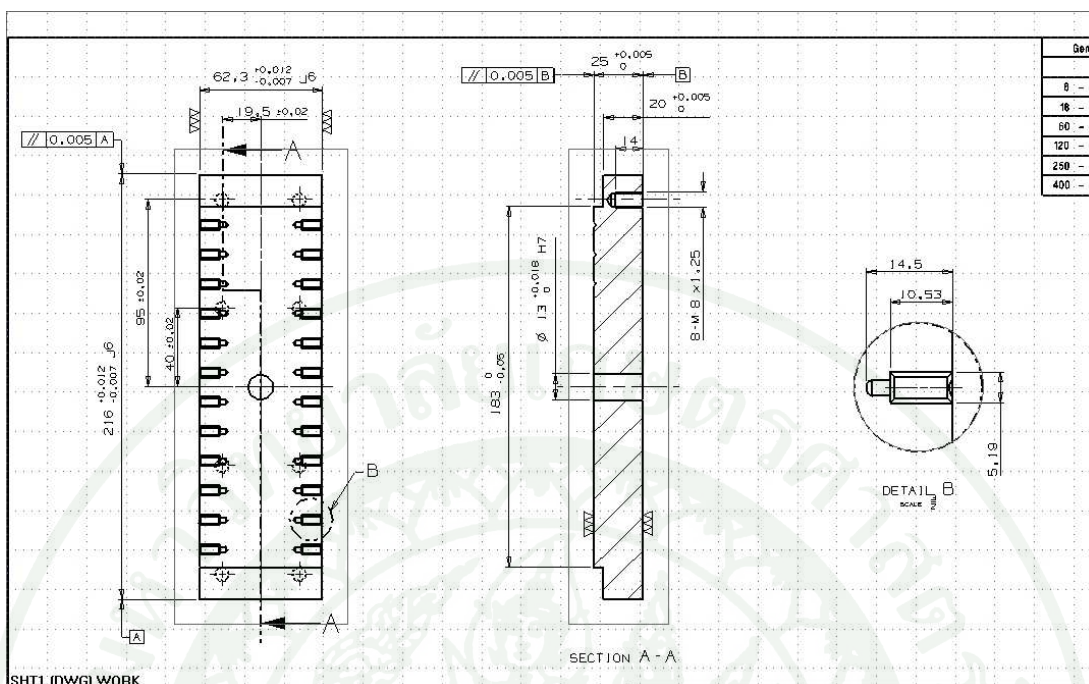
ภาพที่ 77 แบบประกอบชิ้นส่วนแม่พิมพ์ 3 มิติ



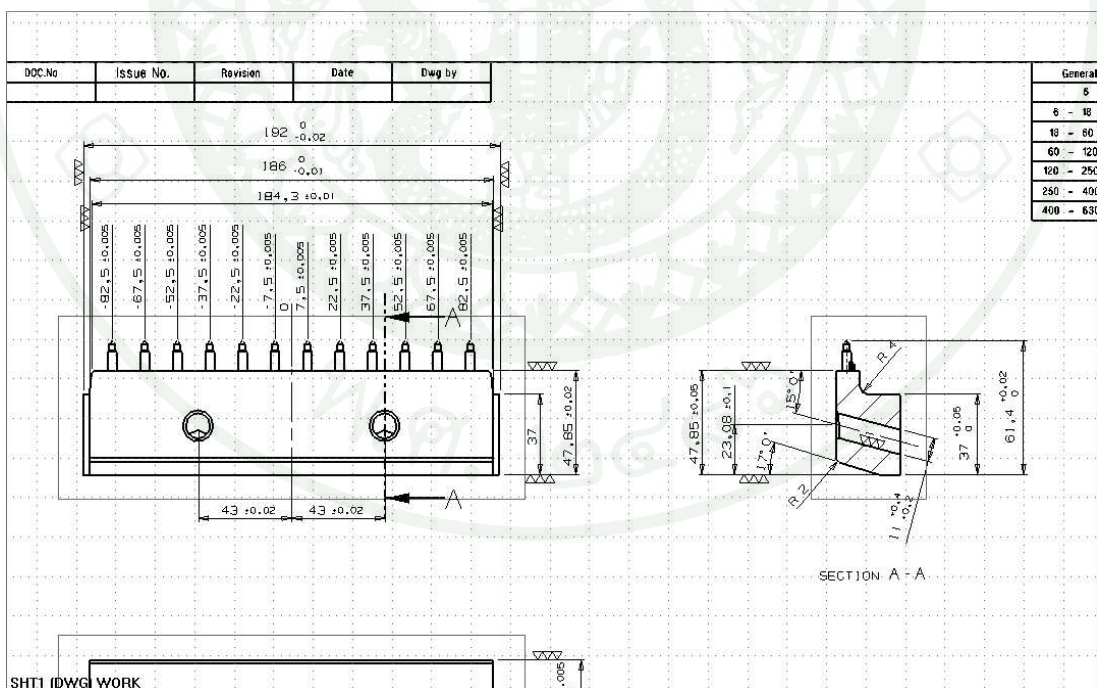
ภาพที่ 78 แบบ 3 มิติของแม่พิมพ์ฝังตัวผู้



ภาพที่ 79 แบบแม่พิมพ์ฝังตัวผู้



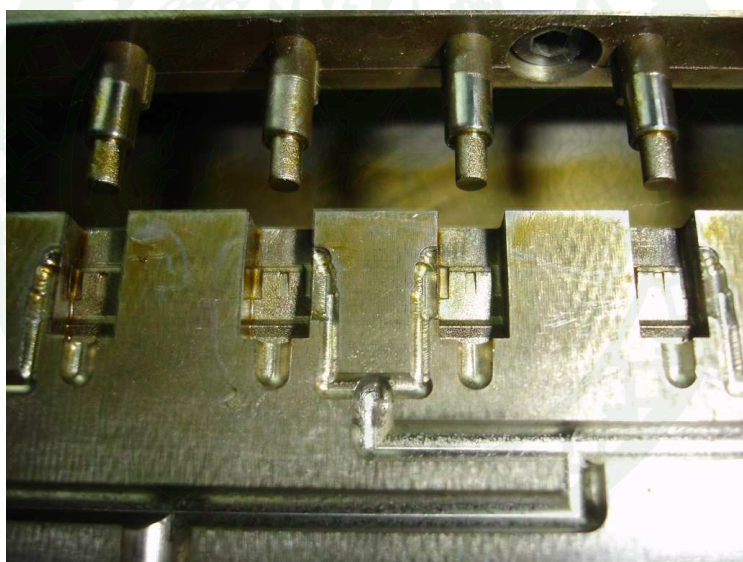
ภาพที่ 80 แบบแม่พิมพ์ฝังตัวเมีย



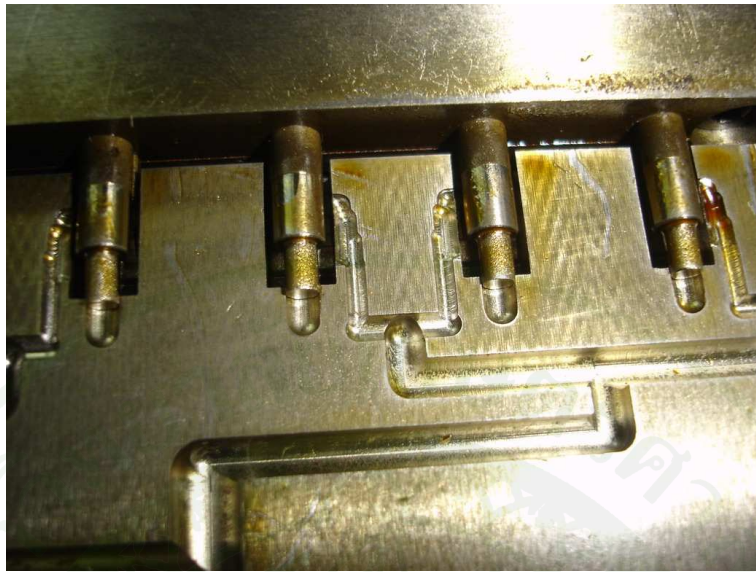
ภาพที่ 81 แบบแม่พิมพ์ของสไลด์

การผลิตแม่พิมพ์

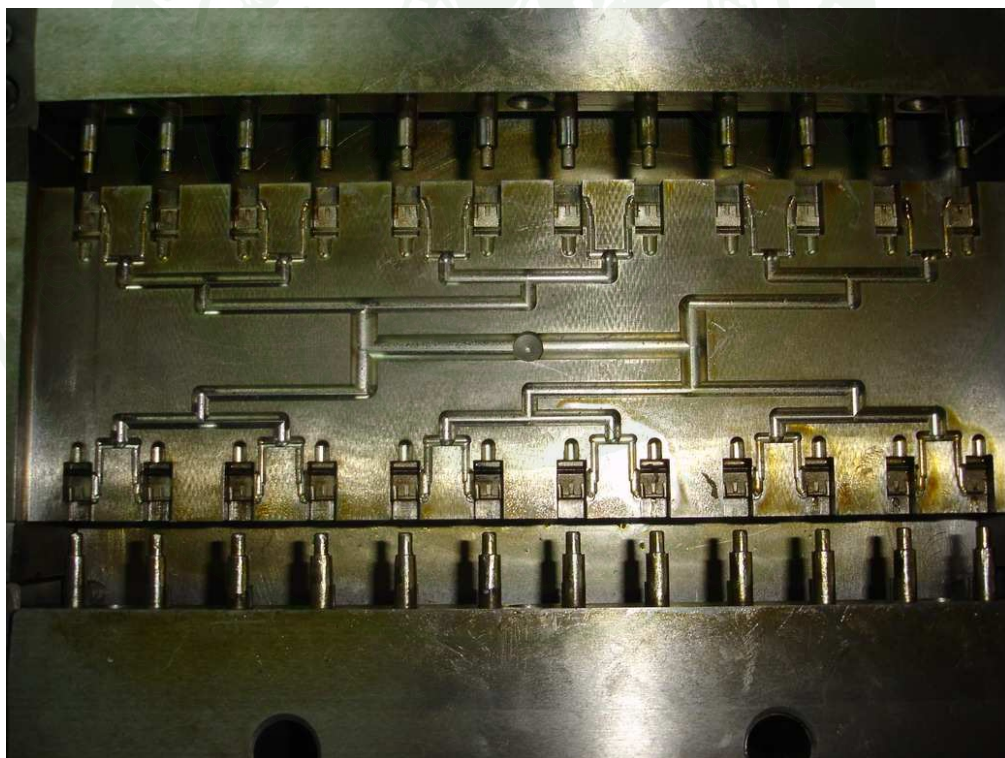
เนื่องจากแม่พิมพ์ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่มีขนาดเล็ก และมีความละเอียดสูง ดังนั้นการผลิตแม่พิมพ์ส่วนเข้าชิ้นงาน จึงต้องใช้การผลิตด้วยกระบวนการอีดีเอ็ม (electric discharge machine, EDM) ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวใช้เวลานาน และค่าใช้จ่ายสูง โดยเริ่มจากการทำตัวอิเล็กโทรดเป็นรูปชิ้นส่วนที่จะขึ้นรูปก่อน จากนั้นจึงนำอิเล็กโทรดไปเข้าสู่กระบวนการอีดีเอ็มเพื่อให้ได้ลักษณะงานตามที่ต้องการไว้ ส่วนประกอบอื่นๆของแม่พิมพ์ขึ้นรูปด้วยวิธีการกลึง การกัด การเจาะตามลักษณะงานนั้นๆ หลังจากขึ้นชิ้นส่วนต่างๆของแม่พิมพ์เสร็จแล้วจึงนำแต่ละส่วนมาปรับประกอบ (fitting) เพื่อให้แม่พิมพ์แต่ละส่วนประกอบกันอย่างพอดี ภาพที่ 82 ถึง 87 แสดงชิ้นส่วนแม่พิมพ์ที่ผลิตเสร็จแล้ว



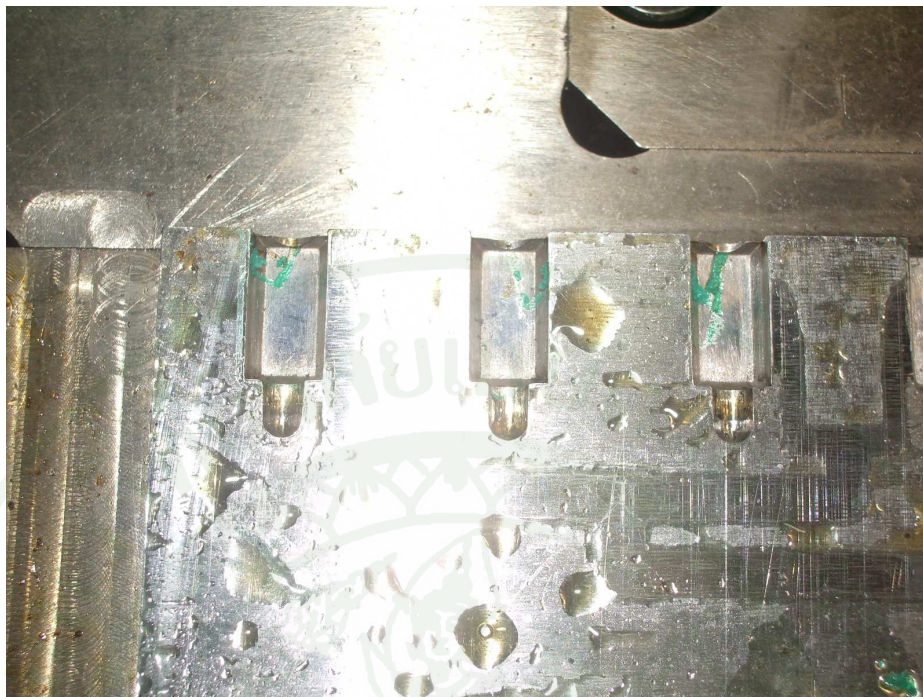
ภาพที่ 82 ส่วนเข้าแม่พิมพ์และสไลด์ขณะเปิดออก



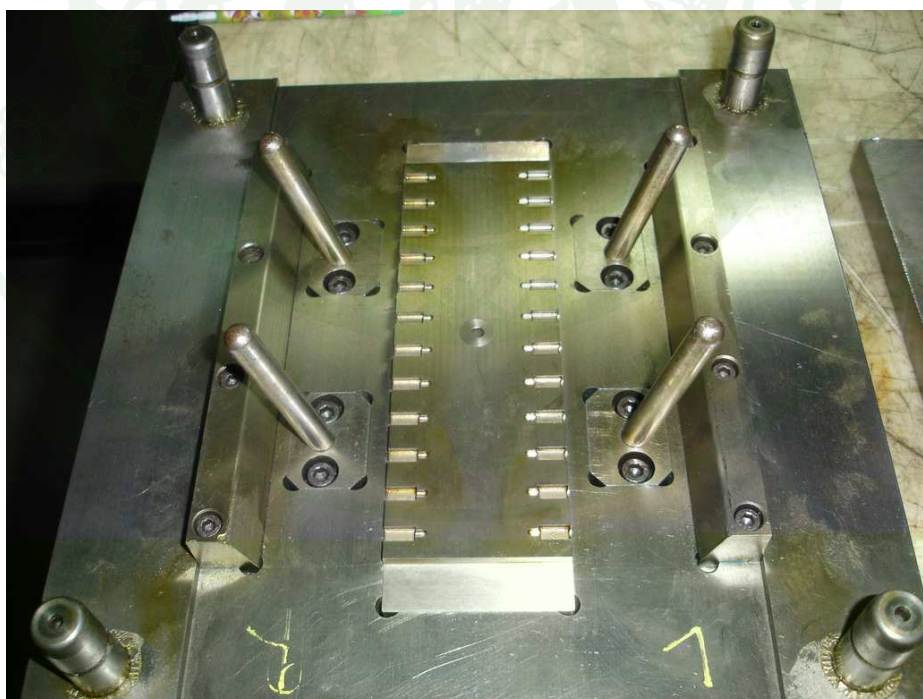
ภาพที่ 83 ส่วนเบ้าแม่พิมพ์และสไลด์ขณะปิด



ภาพที่ 84 แม่พิมพ์ส่วนคอร์



ภาพที่ 85 เบ้าขึ้นงานส่วนควิต



ภาพที่ 86 แม่พิมพ์ส่วนควิต



ภาพที่ 87 แม่พิมพ์ที่เสร็จสมบูรณ์

การทดสอบฉีดขึ้นงาน

โครงการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบแม่พิมพ์ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ครั้งแรก ณ บริษัท เอส เค โพลีเมอร์ จำกัด โดยเครื่องจักรที่ใช้เป็นเครื่องฉีดขนาด 100 ตัน ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่ใช้ฉีดเฉพาะยางสี และมีการควบคุมปริมาณฝุ่น เนื่องจากขึ้นงานมีความละเอียด ภาพที่ 88 แสดงเครื่องจักรที่ใช้ในการทดสอบ ในการทดสอบนี้ได้ทดสอบฉีดโดยใช้วัตถุดิบจริง คือ ยางซิลิโคน ดังภาพที่ 89 การทดสอบฉีดครั้งนี้เป็นการทดสอบแม่พิมพ์ครั้งแรกซึ่งระบบกลไกต่างๆ ของแม่พิมพ์สามารถทำงานได้ดี อย่างไรก็ตามในส่วนของการฉีดนั้นยังพบปัญหาในการปลดขึ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งจะนำไปแก้ไขต่อไป ภาพที่ 90 ถึง 93 แสดงการติดตั้งและทดสอบแม่พิมพ์ ภาพที่ 94 แสดงภาพขึ้นงานที่ได้จากการทดสอบฉีดด้วยแม่พิมพ์ที่ผลิตขึ้นจากงานวิจัย



ภาพที่ 88 เครื่องฉีดยางที่ใช้ในการทดสอบครั้งแรก



ภาพที่ 89 ยางซิลิโคนที่ใช้ในการทดสอบ



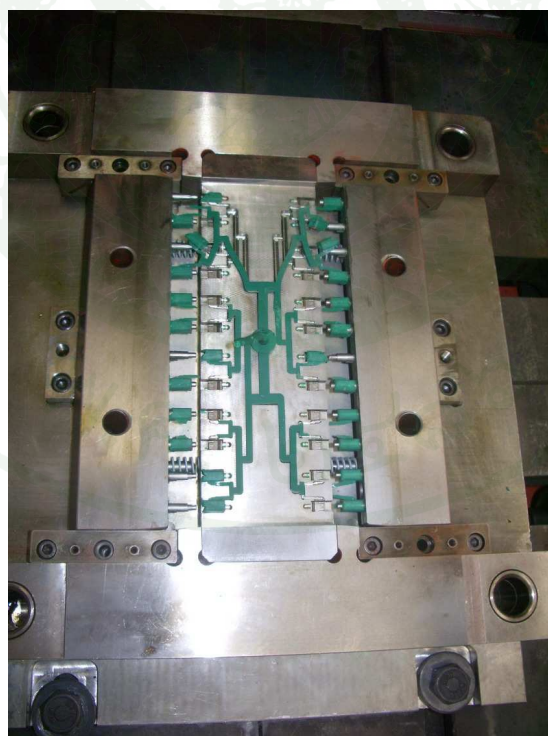
ภาพที่ 90 การติดตั้งแม่พิมพ์



ภาพที่ 91 แม่พิมพ์ที่ติดตั้งเสร็จแล้ว



ภาพที่ 92 การป้อนยางเข้าเครื่อง



ภาพที่ 93 ชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบฉีด



ภาพที่ 94 ชิ้นงานขงหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ได้จากแม่พิมพ์จากงานวิจัย

หลังจากทำการแก้ไขแม่พิมพ์แล้วในครั้งแรก จึงได้ทำการทดลองอีกครั้งโดยเปลี่ยนมาทำการทดสอบฉีดที่สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีผลผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เนื่องจากเครื่องจักรที่บริษัทร่วมโครงการวิจัยมีขนาดของกระบอกฉีดใหญ่ซึ่งไม่สามารถควบคุมการฉีดได้ละเอียดพอ ซึ่งเครื่องจักรที่สถาบันฯ มีขนาดกระบอกฉีดที่เล็กกว่า คือ 254 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 95 โดยได้ทำการปรับปรุงส่วนยึดแม่พิมพ์เพื่อให้สามารถติดตั้งได้กับเครื่องฉีดของทางสถาบันฯ ดังภาพที่ 96 วัตถุประสงค์ที่ใช้เป็นยางซิลิโคนที่ใช้ผลิตจริง ในการทดสอบฉีดยังพบปัญหาการปลดชิ้นงานออกจากส่วนสไลด์ยาก ซึ่งแก้ไขปัญหามาโดยการให้ลมช่วยในการเป่าชิ้นงาน และใช้น้ำยาสำหรับแม่พิมพ์ฉีดยาง ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาระดับหน้างานได้ นอกจากนี้ยังพบปัญหาการให้ความร้อนแม่พิมพ์ เนื่องจากแม่พิมพ์ถูกออกแบบมาสำหรับเครื่องฉีดที่มีแผ่นให้ความร้อนติดกับเครื่อง จึงไม่มีรูสำหรับใส่แท่งความร้อน ทำให้การฉีดชิ้นงานยังพบปัญหา ดังนั้นการผู้วิจัยจึงนำแม่พิมพ์ไปแก้ไขโดยการเจาะรูเพิ่มที่แม่พิมพ์ฝั่งขวาดี จากนั้นจึงกลับมาทดสอบอีกครั้ง ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นได้ อย่างไรก็ตามแม้เครื่องฉีดของทางสถาบันฯ จะมีขนาดเล็กกว่าเครื่องของทางบริษัทที่ร่วมโครงการก็ยังคงควบคุมการฉีดได้ยาก ซึ่งเป็นผลมาจาก 1) กระบอกฉีดมีขนาดใหญ่เกินไปทำให้ควบคุมระยะสกรูยาก และ 2) การฉีดควบคุมด้วยระบบไฮดรอลิกส์ ซึ่งความละเอียดต่ำกว่าแบบไฟฟ้า ซึ่งในการทดสอบฉีดได้ทำการตั้งค่าต่างๆ สำหรับการฉีดดังแสดงในตารางที่ 2 โดยภาพของหน้าจอสำหรับตั้งค่าแสดงในภาพที่ 97 ถึง 101 และภาพการทดสอบฉีดแสดงในภาพที่ 102 ถึง 110

ตารางที่ 2 ค่ากระบวนการนึ่งที่ใช้ในการทดสอบ

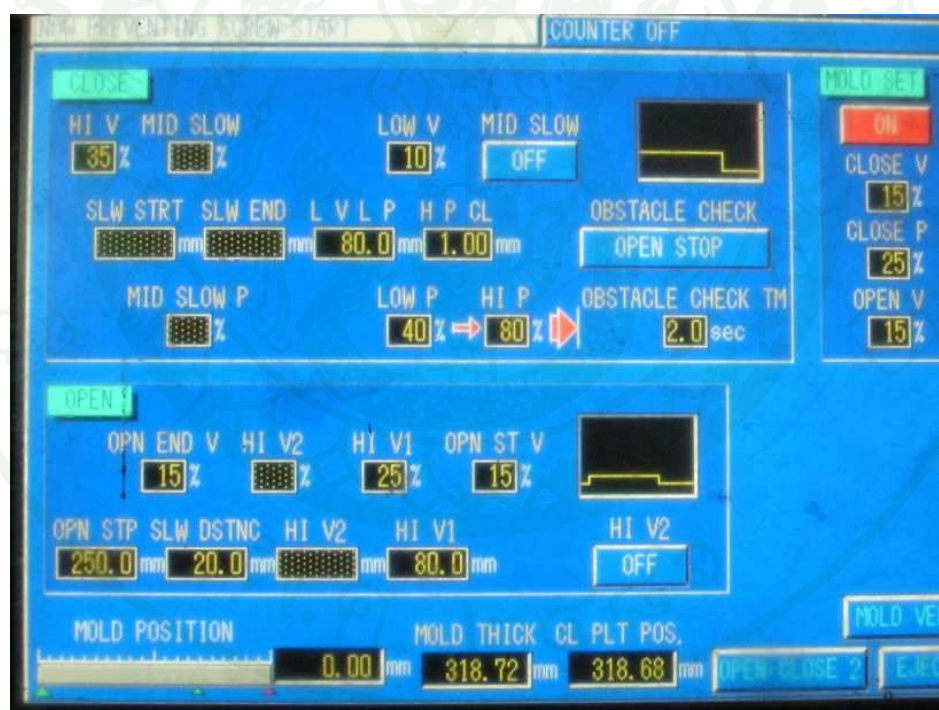
ลำดับที่	ค่ากระบวนการนึ่ง	ค่าที่ตั้ง	หน่วย
1.	ระยะเปิดแม่พิมพ์	250	มิลลิเมตร
2.	ระยะถอยสกรู	11	มิลลิเมตร
3.	ความเร็วนึ่ง	28.2	ลบ.ซม./วินาที
4.	ความดันนึ่ง	1,432	กก./ตาราง ซม.
5.	เวลานึ่ง	5	วินาที
6.	เวลาอบบ่ม	220	วินาที
7.	อุณหภูมิกระบอกนึ่ง (หลัง-กลาง-หน้า)	72 – 80 – 85	องศาเซลเซียส
8.	อุณหภูมิแม่พิมพ์ ฟังตัวผู้	170	องศาเซลเซียส
9.	อุณหภูมิแม่พิมพ์ ฟังตัวเมีย	160	องศาเซลเซียส



ภาพที่ 95 เครื่องนึ่งขนาด 100 ตันของสถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม



ภาพที่ 96 ส่วนฐานรองแม่พิมพ์สำหรับยึดแม่พิมพ์และใส่แท่งให้ความร้อน



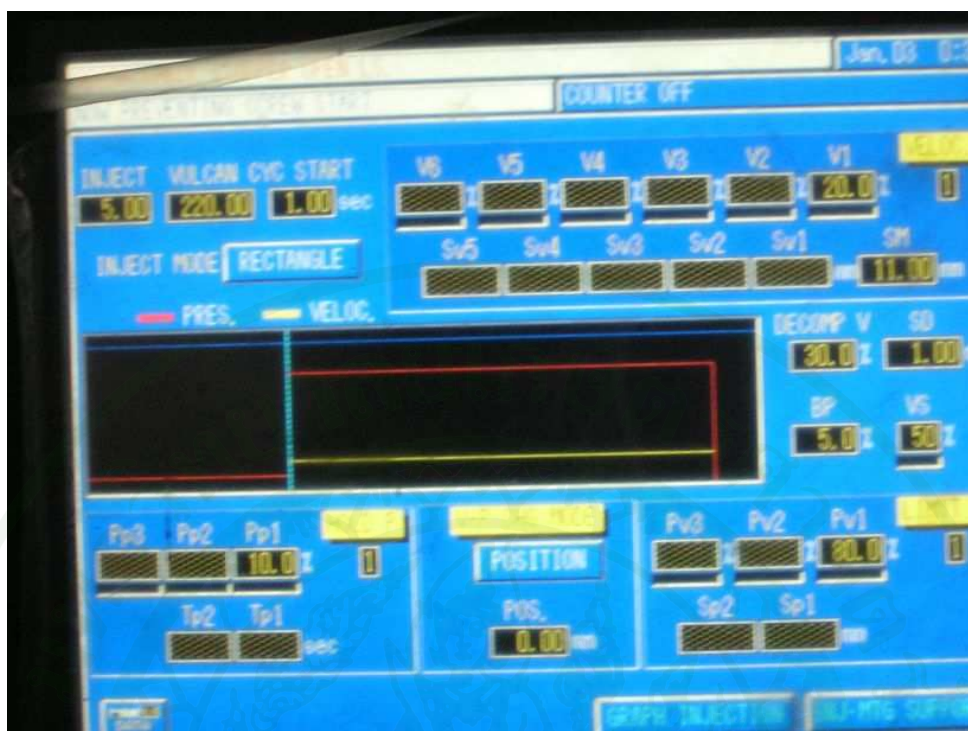
ภาพที่ 97 หน้าจอกำหนดค่าการเปิดและปิดแม่พิมพ์



ภาพที่ 98 หน้าจอกำหนดค่าอุณหภูมิกระบอกฉีด



ภาพที่ 99 หน้าจอกำหนดค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์



ภาพที่ 100 หน้าจอกำหนดค่ากระบวนการฉีด



ภาพที่ 101 หน้าจอแสดงข้อมูลจริงขณะทำการฉีดขึ้นรูป



ภาพที่ 102 ขั้นตอนการติดตั้งแม่พิมพ์



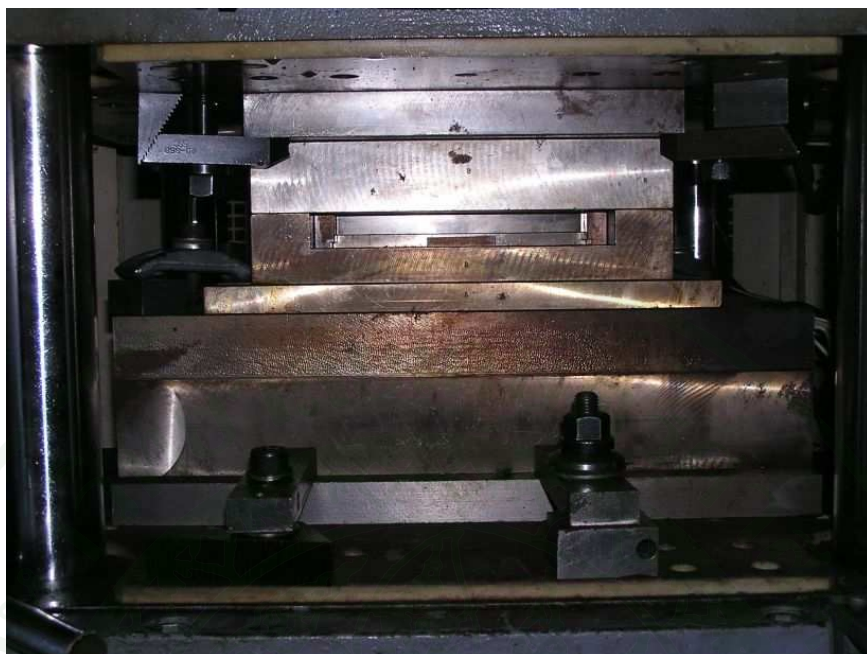
ภาพที่ 103 ขั้นตอนการติดตั้งแม่พิมพ์



ภาพที่ 104 การติดตั้งแม่พิมพ์บนเครื่องอัด



ภาพที่ 105 การยึดแม่พิมพ์บนเครื่องอัด



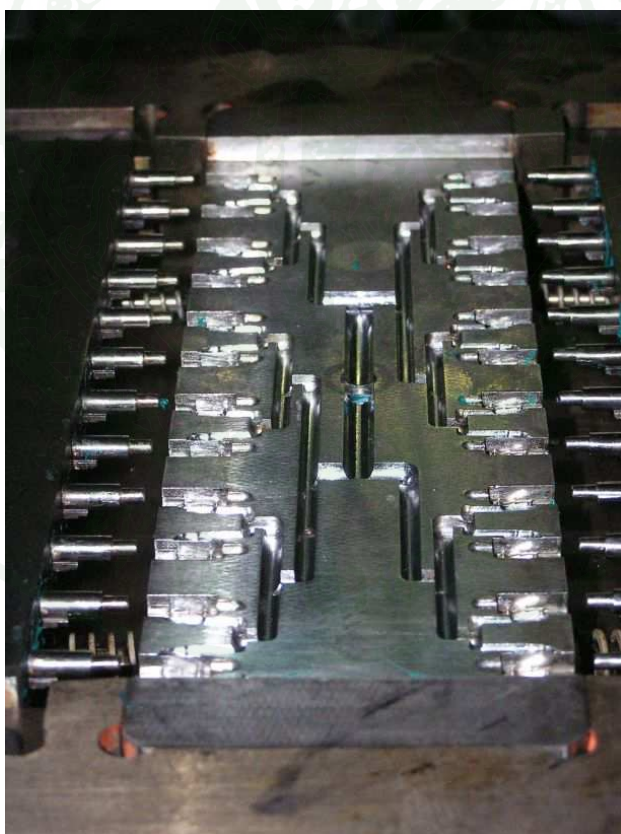
ภาพที่ 106 เสร็จสิ้นขั้นตอนการติดตั้งแม่พิมพ์



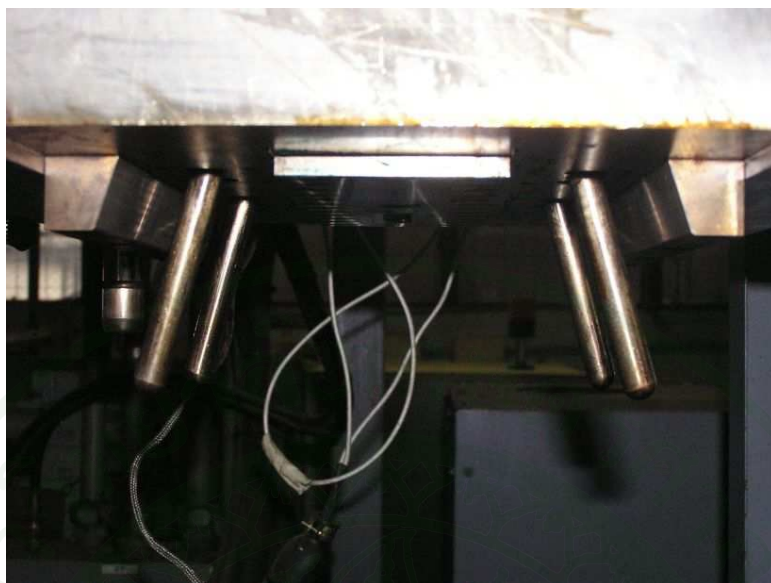
ภาพที่ 107 การติดตั้งแท่งความร้อน



ภาพที่ 108 แท่งความร้อน



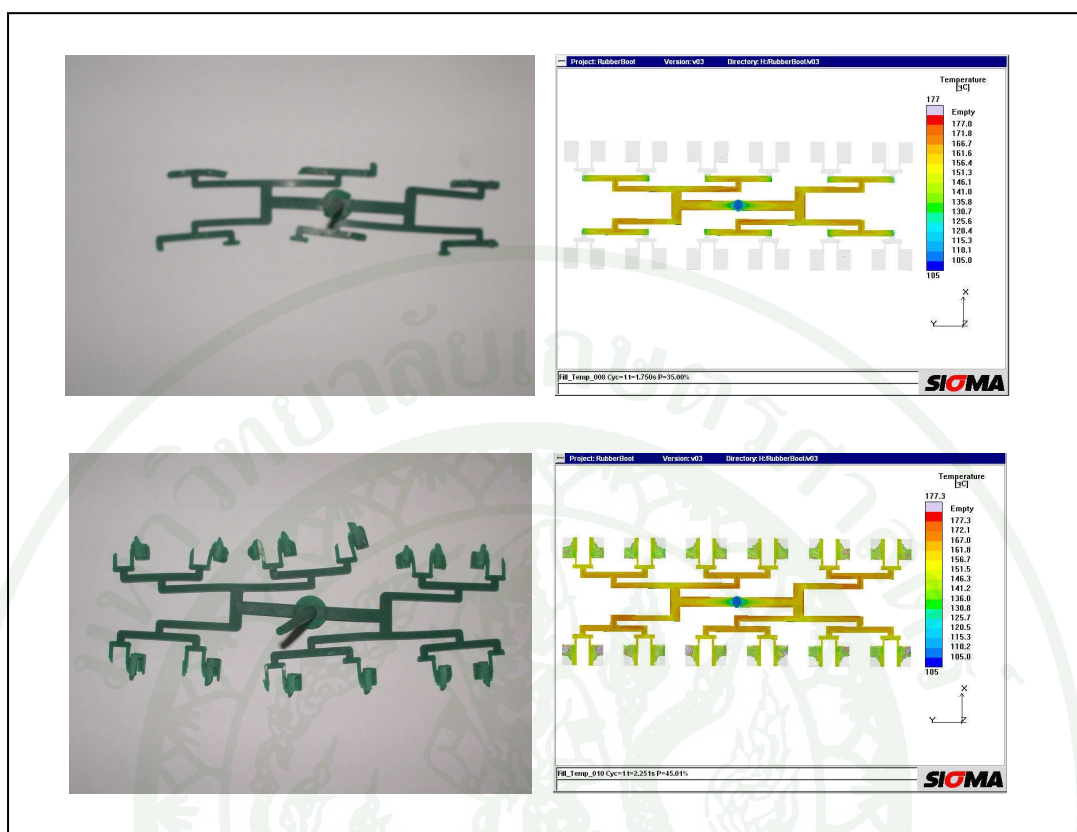
ภาพที่ 109 ชุดแม่พิมพ์ฝักรู



ภาพที่ 110 ชุดแม่พิมพ์ฝังควิตี้

ผลจากการทดสอบฉีดและผลจากการจำลองการไหล

หลังจากการทดสอบฉีดครั้งแรกผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบฉีดและผลการจำลองการไหล โดยทำการเปรียบเทียบในส่วนของการไหลในทางวิ่งเพื่อสังเกตความสมดุลของการไหลของยางในแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามเนื่องจากเครื่องฉีดที่ใช้มีขนาดใหญ่ และเครื่องจักรมีความละเอียดไม่เพียงพอจึงทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบลักษณะการไหลของยางในส่วนของการขึ้นงานได้ ซึ่งในส่วนของการไหลในทางวิ่ง ดังภาพที่ 111 แสดงให้เห็นว่าการไหลของยางจากการทดสอบฉีดและการจำลองการไหลเป็นไปในลักษณะเดียวกัน ยางมีการไหลอย่างสมดุลในแต่ละทางวิ่ง และเข้าไปยังเบ้าขึ้นงานพร้อมกัน ภาพที่ 112 แสดงขึ้นงานที่ได้จากการทดสอบฉีดครั้งที่ 2 และตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการไหลของยางในแม่พิมพ์แต่ละช่วงเวลา



ภาพที่ 111 การเปรียบเทียบลักษณะการไหลของยางในแม่พิมพ์ของการทดสอบฉีดจริงและการจำลองด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA

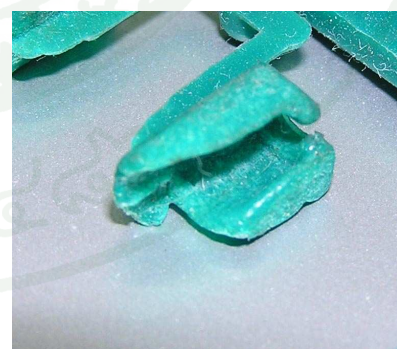
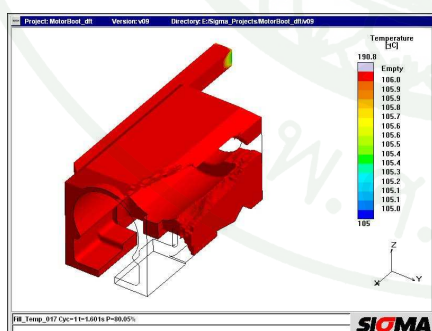
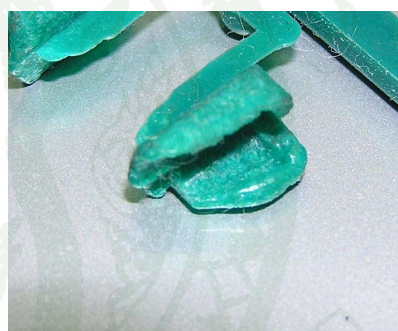
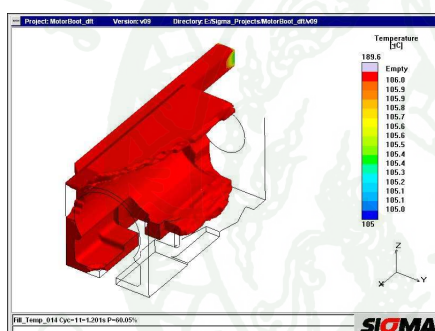
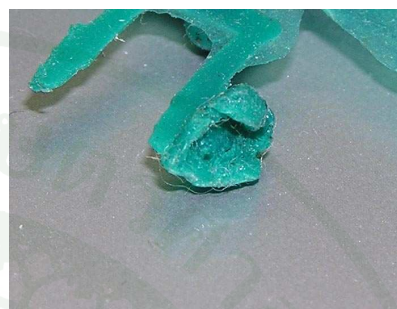
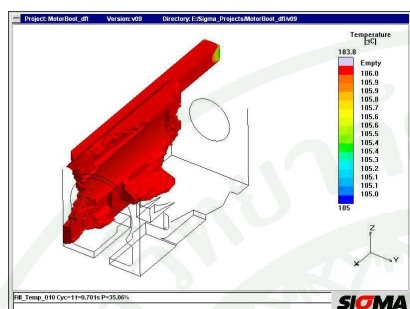


ภาพที่ 112 ชิ้นงานที่ได้จากการทดสอบฉีดครั้งที่สอง

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบการไหลของยางในแม่พิมพ์

ภาพการไหลของยางจากโปรแกรมจำลอง

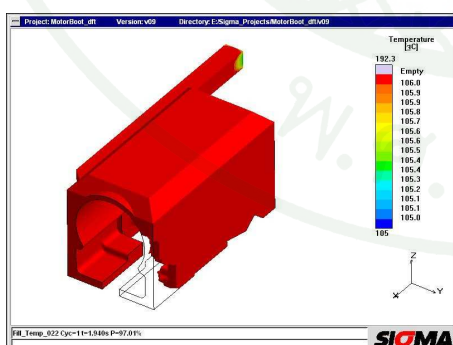
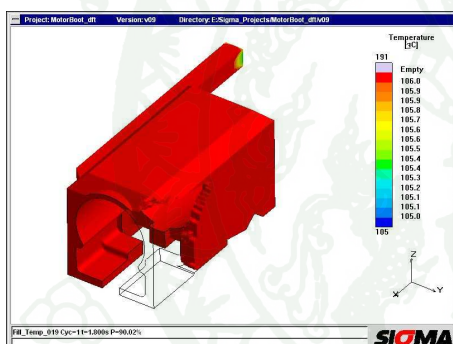
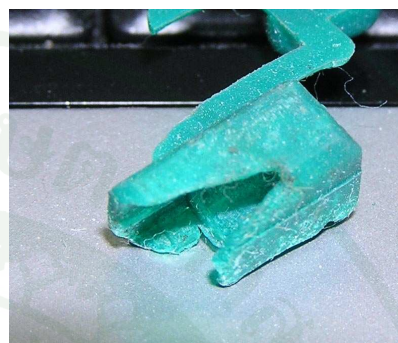
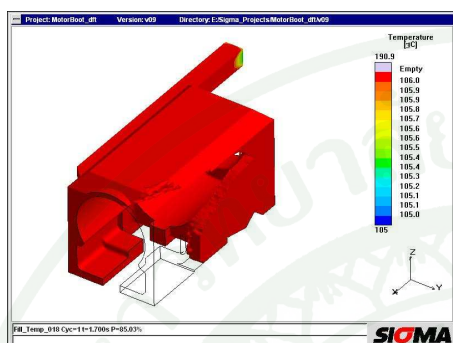
ภาพการไหลของยางจากการทดสอบ



ตารางที่ 3 (ต่อ)

ภาพการไหลของยางจากโปรแกรมจำลอง

ภาพการไหลของยางจากการทดสอบ



สรุปและข้อเสนอแนะ

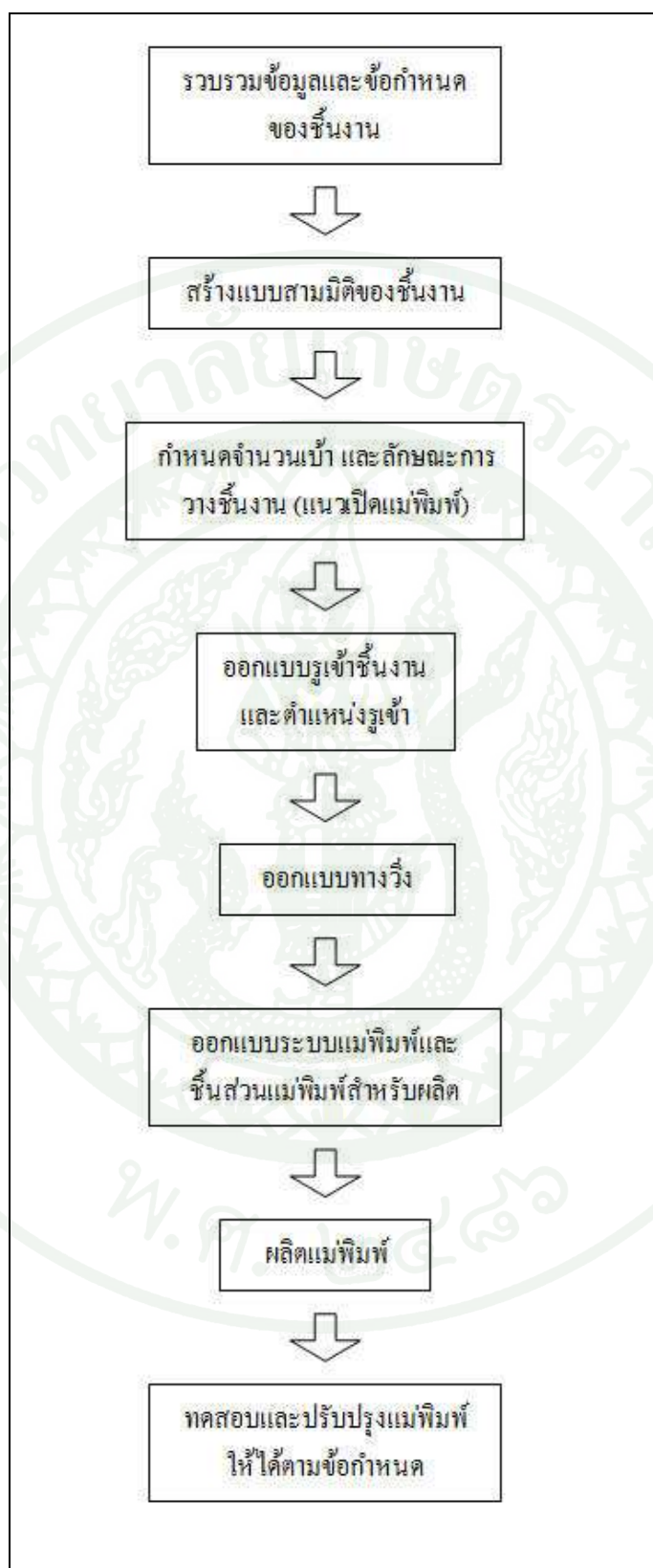
สรุป

การออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งมีขนาดเล็กและความละเอียดสูงโดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ช่วยงานวิศวกรรม (CAE) เข้ามาช่วยจำลองการไหลของยางในแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูป เพื่อออกแบบลักษณะรูเข้า และทางวิ่ง โดยในการจำลองการไหลได้ทดลองออกแบบรูเข้าในลักษณะต่างๆ และนำผลจากการจำลองมาปรับปรุงและเปรียบเทียบเพื่อให้รูเข้ามีลักษณะที่เหมาะสมมากขึ้น รูเข้าแบบแรกที่ออกแบบเป็นแบบเข้าขอบชิ้นงาน มีขนาดความยาวเท่ากับชิ้นงานคือ 10.15 มิลลิเมตร เมื่อผลการวิเคราะห์ด้านการไหลจะพบว่ายางไม่ได้ไหลเข้าชิ้นงานตลอดแนว จึงได้ทำการปรับปรุงให้ความยาวรูเข้าลดลงเหลือ 7 มิลลิเมตร ทำให้ลดวัสดุติดได้ จากนั้นก็ได้ปรับปรุงจากรูเข้าแบบที่ 2 เป็นแบบที่ 3 ให้รูเข้าวางในตำแหน่งตรงกลางของชิ้นงานเพื่อให้ยางไหลเข้าชิ้นงานสม่ำเสมอมากขึ้น โดยยางจะเต็มในฝั่งของเข้าก่อน รูเข้าแบบที่ 4 ได้ทำการปรับปรุงจากแบบที่ 3 โดยการปรับให้ทางวิ่งรองก่อนเข้ารูเข้ามีลักษณะเป็นมุมเอียงตามรูเข้าเพื่อให้การไหลของยางดีขึ้นและไม่มียางค้างอยู่บริเวณทางวิ่งรอง รูเข้าแบบที่ 5 ได้ทำการปรับปรุงลักษณะรูเข้า จากเดิมที่มีลักษณะความหนาเท่ากันตลอด ให้ความหนาของรูเข้าเป็นลักษณะมุมเอียง เพื่อให้การไหลของยางดีขึ้น โดยจะมีผลให้ความดันฉีด และความเร็วฉีดลดลง ทำให้ลดโอกาสการเกิดปัญหาครีบลงได้ หลังจากออกแบบรูเข้าได้แล้วจากนั้นจึงทำการออกแบบลักษณะของทางวิ่ง โดยได้ออกแบบให้มีความยาวของการไหล (flow length) ที่สมดุล เพื่อลดปัญหาการเกิดครีบ โดยกำหนดจำนวนเบ้าทั้งหมด 24 เบ้า และได้นำแบบทางวิ่งที่ออกแบบไว้ไปจำลองการไหล ซึ่งผลการจำลองการไหลแสดงให้เห็นว่า ยางมีการไหลเข้าแต่ละเบ้าที่สมดุลกัน

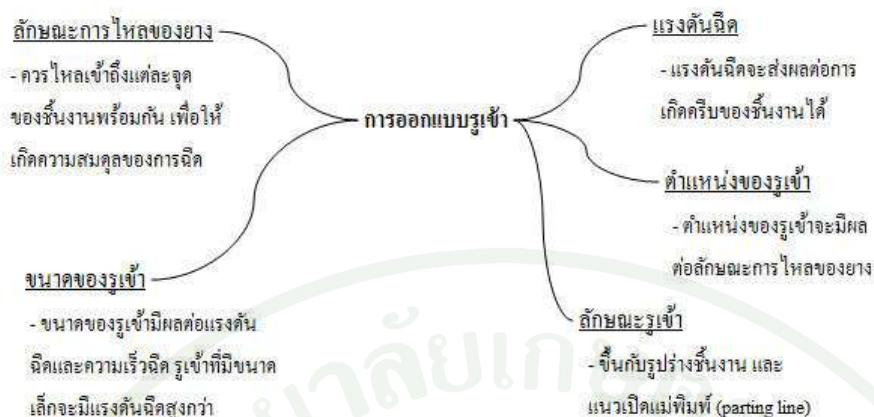
จากนั้นจึงนำผลจากการออกแบบรูเข้า และทางวิ่งไปออกแบบแม่พิมพ์ หลังจากออกแบบแม่พิมพ์เสร็จแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนการผลิตแม่พิมพ์ ซึ่งแม่พิมพ์ชิ้นงานยางหุ้มมอเตอร์โทรศัพท์เคลื่อนที่นั้นมีขนาดเล็ก และความละเอียดสูง ดังนั้นในการผลิตชิ้นส่วนเบ้าตัวผู้ เบ้าตัวเมีย และสไลด์จะต้องใช้การขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดฉีด ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงกว่า และใช้ระยะเวลาในการผลิตนานกว่า อย่างไรก็ตามการขึ้นรูปด้วยกระบวนการอัดฉีดมีข้อดีคือ สามารถขึ้นรูปชิ้นงานที่มีความละเอียดสูงได้ดี หลังจากแม่พิมพ์เสร็จก็ทำการทดสอบฉีดจริงครั้งแรก โดยผลที่ได้จากการทดสอบฉีดครั้งแรกเป็นที่น่าพอใจ ซึ่งระบบกลไกต่างๆ การเปิดและปิดแม่พิมพ์ไม่พบปัญหา การไหลของยางในระบบทางวิ่งมีความสมดุลดี ซึ่งเมื่อนำผลจากการฉีดจริงไปเปรียบเทียบกับผลจากการจำลอง

การไหลด้วยโปรแกรม 3D-SIGMA จะเห็นว่าผลที่ได้สอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากเครื่องฉีดที่ใช้ในการทดสอบไม่สามารถควบคุมความละเอียดในการฉีดได้เพียงพอทำให้ไม่สามารถเก็บผลเพื่อมาเปรียบเทียบได้ทุกช่วงเวลา ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พิจารณาเปลี่ยนเครื่องสำหรับการทดสอบฉีดให้มีขนาดกระบอกฉีดเล็กลงเหลือ 254 ลบ.ซม. และทำการทดสอบฉีดอีกครั้ง ซึ่งสามารถทำการทดสอบฉีดได้ชิ้นงานออกมาได้ อย่างไรก็ตามการควบคุมการฉีดยังเป็นไปได้ยากเนื่องจากเครื่องฉีดยังไม่ขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานค่อนข้างมาก โดยปริมาตรของชิ้นงานประมาณ 11.5 ลบ.ซม. คิดเป็น 4.53% ของความจุกระบอกฉีด และยังมีปัจจัยจากการผลิตแม่พิมพ์ที่ทำให้การควบคุมการฉีดชิ้นงานเป็นไปได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการฉีดชิ้นงานซึ่งอาจจะควบคุมคุณภาพได้ไม่ดีเท่าที่ควร หากเป็นการผลิตทีละมากๆ จำเป็นต้องใช้เครื่องฉีดเฉพาะที่มีระบบการควบคุมการฉีดที่ต่างออกไป ที่ทำให้สามารถควบคุมการฉีดได้อย่างแม่นยำ เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ

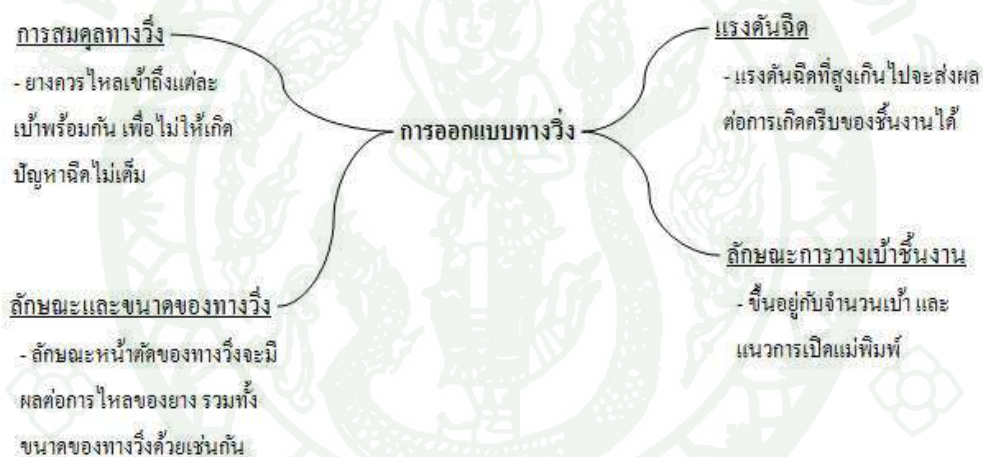
ทางผู้วิจัยได้ทำการสรุปแนวทางการพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ดังแสดงในภาพที่ 113 โดยแสดงแผนผังของตลอดกระบวนการตั้งแต่เริ่มพัฒนาจนกระทั่งแม่พิมพ์เสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ยังสรุปตัวแปรสำคัญในกระบวนการออกแบบรูเข้า และทางวิ่งของแม่พิมพ์ ดังแสดงในภาพที่ 114 และ 115 ส่วนปัจจัยสำคัญในกระบวนการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็กแสดงในภาพที่ 116



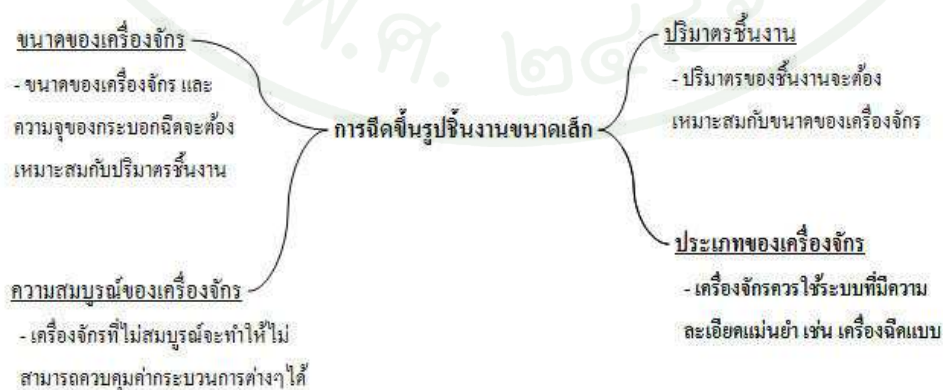
ภาพที่ 113 แผนผังกระบวนการพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ผลิตภัณฑ์ยาง



ภาพที่ 114 ปัจจัยสำคัญในการออกแบบรูเข้า



ภาพที่ 115 ปัจจัยสำคัญในการออกแบบทางวิ่ง



ภาพที่ 116 ปัจจัยสำคัญในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานขนาดเล็ก

จากการศึกษาและวิจัยพัฒนาการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็กที่มีความละเอียดสูง โดยมีผลิตภัณฑ์ยางหุ้มมอเตอร์ในโทรศัพท์เคลื่อนที่มาเป็นกรณีศึกษารวมกับการใช้เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการออกแบบ การผลิต และการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม สามารถช่วยให้แม่พิมพ์ที่ผลิตขึ้นมามีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดเวลาและค่าใช้จ่ายการทดลองและแก้ไขแม่พิมพ์ลง โดยผลจากการศึกษาและวิจัยพัฒนาดังกล่าวเป็นองค์ความรู้ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์ขนาดเล็กอื่นๆ ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง และสามารถนำองค์ความรู้ในการออกแบบและผลิตแม่พิมพ์ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่มีขนาดเล็กที่ได้จากโครงการวิจัยเผยแพร่สู่ผู้ประกอบการแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยาง และให้คำปรึกษาแก่ผู้ประกอบการทำให้เกิดความเข้มแข็งและความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ภายในระดับนานาชาติต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ทางผู้วิจัยได้ทำการสรุปข้อเสนอแนะที่น่าจะเป็นประโยชน์ต่อโครงการวิจัยในอนาคตดังนี้

1. ศึกษาการนำระบบทางวิ่งเย็นเข้ามาใช้กับแม่พิมพ์ที่มีชิ้นงานขนาดเล็ก เพื่อลดต้นทุนด้านวัตถุดิบจากยางที่เสียไปในส่วนของทางวิ่ง
2. ศึกษาการพัฒนาเครื่องฉีดยางที่มีความละเอียดสูง สำหรับผลิตภัณฑ์ขนาดเล็ก เพื่อเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และสามารถนำไปเปรียบเทียบกับ การจองการไหลด้วยโปรแกรมได้มากยิ่งขึ้น
3. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการไหลของยางในช่องเล็กๆ
4. ศึกษาตัวแปรกระบวนการผลิตแม่พิมพ์ขนาดเล็กที่มีผลต่อกระบวนการฉีด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2548. **สถิติยางประเทศไทย.**
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

American Society for Testing and Materials. 1990. **Standard Terminology Relating to Rubber.** ASTM 1566.

Anonymous. n.d. **Innovation Propels Micro Molding Process.** Today's Medical
Developments. Available Source: <http://www.onlinetmd.com/article.cfm?id=69>,
November 12, 2008.

Battenfeld GmbH. n.d. **Microsystem.** Battenfeld, Meinerzhagen, Germany. (Unpublished
manuscript)

Beaumont, J.P. 2004. **Runner and Gating Design Handbook.** 1st ed. Hanser Publishers,
Munich.

_____, R. Nagel and R. Sherman. 2002. **Successful Injection Moulding.** 1st ed. Hanser
Publishers, Munich.

Bigot, S., J. Valentincic, O. Blatnik and M. Junkar. 2006. Micro Edm Parameters Optimization,
Second International Conference on Multi-Material Micro Manufacture 195-198.

Bissacco, G., H.N. Hansen and L.D. Chiffre. 2005. Micromilling of Hardened Tool Steel for
Mould Making Applications. **Journal of Materials Processing Technology** 167: 201-
207.

Ciesielski, A. 1999. **An Introduction to Rubber Technology.** Rapra Technology Limited,
United Kingdom.

Datta, S. 2004. **Rubber Compounding: Chemistry and Applications**. Marcel Dekker, New York, USA.

Diver, C., J. Atkinson, H. J. Helml and L. Li. 2004. Micro-EDM Drilling of Tapered Holes for Industrial Applications, **Journal of Materials Processing Technology** 149: 269-303.

Fleischer, J. and J. Kotschenreuther. 2006. The Manufacturing of Micro Molds by Conventional and Energy-assisted Process. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 33: 75-85.

Gent, A.N. 2001. **Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components**. 2nd ed. Hanser Publishers, Munich.

Griffiths, C.A., S.S. Dimov, E.B. Brousseau and R.T. Hoyle. 2007. The Effects of Tool Surface Quality in Micro-Injection Moulding. **Journal of Materials Processing Technology** 189:418-427.

Hamed, G. R. 2001. **Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components**. 2nd ed. Hanser Publishers, Munich.

Hawthorne Rubber Mfg. Corp. 2004. **Information about Compression, Transfer, and Injection Moulding**. Hawthorne Rubber Manufacturing Corporation. Available Source: <http://www.hawthornrubber.com/index.html>, November 30, 2005.

Huang, C.K. 2006. Filling and Wear Behaviors of Micro-molded Parts Made with Nanomaterials. **European Polymer Journal** 42: 2174-2184.

Kemmann, O., L. Weber, C. Jeggy, O. Magotte and F. Dupret. 2002. Simulation of the Micro Injection Molding Process. **Specialized Molding Techniques** :163-169.

- Kukla, C., H. Loibl and H. Detter. 1998. Micro-injection moulding: the aims of a project partnership. **Kunststoffe Plast** 88: 6-7.
- Lina, H.Y. and W.B. Young. 2008. Analysis of The Filling Capability to The Microstructures in Micro-Injection Molding. **Applied Mathematical Modelling** 33: 3746-3755.
- Masuzawa, T. 2000. State of the Art of Micromachining. **Annals of the CIRP** 42.
- Miniature Tool and Die inc. n.d. **What Defines a Micro part**. Miniature Tool and Die. The Biggest Name in Micromolding. Available Source: <http://www.miniaturetool.com/technologies.htm>, November 12, 2008.
- Mikrotech Asyst Technologies llc. 2008. **Micro Manufacturing**. Available Source: <http://www.mikrotech.com>, November 12, 2008.
- Nissei America inc. 2005. **Rubber Injection Molding Machine**. Available Source: <http://www.nisseiamerica.com>, November 30, 2005.
- Perez, H., A. Vizan, J.C. Hernandez and M. Guzman. 2007. Estimation of Cutting Forces in Micromilling Through the Determination of Specific Cutting Pressures. **Journal of Materials Processing Technology** 190:18-22.
- Rajurkar, K.P. and Z.Y. Yu. 2000. 3D Micro-EDM Using CAD/CAM, **CIRP Annals - Manufacturing Technology** 49:127-130.
- Rees, H. 2002. **Mold Engineering**. 2nd ed. Hanser Publishers, Munich.
- Rosata, D.V., D.V. Rosata and M.G. Rosata. 2000. **Injection Molding Handbook**. Kluwer Academic Publishers, USA.

Sanjo Seiki co. 1997. **Injection Machine**. Available Source:

<http://www.sanjo.co.jp>, November 30, 2005.

Shen, Y.K. and W.Y. Wu. 2002. An Analysis of the Three-Dimensional Micro-Injection Molding. **International Communications in Heat Mass Transfer** 29:423-431.

_____, C.Y. Chang, Y.S. Shen, S.C. Hsu and M.W. Wu. 2008. Analysis for Microstructure of Microlens Arrays on Micro-Injection Molding by Numerical Simulation. **International Communications in Heat and Mass Transfer** 33:723-727.

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

Straton Industries co. n.d. **Rubber Mold Design & Construction and Composite Mould**.

Rubber Mould Design & Construction. Available Source:

<http://www.straton.com/rubber.htm>, November 30, 2005.

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

Wittmann Battenfeld GmbH. 2007. **Microsystem 50: production cell for micro parts**.

Battenfeld Innovative Injection Molding. Available Source:

<http://www.battenfeld-imt.com/en/maschinen/baureihen/micro.html>, September 19, 2008.

Wong, Y.S., M. Rahman, H.S. Lima, H. Han and N. Ravi. 2003. Investigation of Micro-EDM Material Removal Characteristics Using Single RC-Pulse Discharges, **Journal of Materials Processing Technology** 140:303-307.

Young, W.B. 2007. Analysis of Filling Distance in Cylindrical Microfeatures for Microinjection Molding. **Applied Mathematical Modelling**. 31: 1798-1806.

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ	นายรุ่งธรรม ปัญญาวิภาต
เกิดวันที่	2 กรกฎาคม 2524
สถานที่เกิด	เขตวังทองหลาง จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกร
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ยูเนี่ยนโซลูชัน จำกัด
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ทุนมูลนิธิการศึกษาเขต 100 ปี