



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)

ปริญญา

เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

An Optimization of Injection Moulding Process Conditions for Rubber Products

นามผู้วิจัย นายประพัทธ์ คุ่มปลิวังค์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ชนะ รักศิริ, D.Eng.)

ประธานสาขาวิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทพล ชังชู, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา นีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบศิริ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

An Optimization of Injection Moulding Process Conditions for Rubber Products

โดย

นายประพัทธ์ คุ้มปลีวงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)

พ.ศ. 2553

ประพัทธ์ คุ้มปลิวังศ์ 2553: การเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป
ผลิตภัณฑ์ยาง ปริญญวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม)
สาขาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D. 83 หน้า

กระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางเป็นกระบวนการหนึ่งที่สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ยางที่มี
ความซับซ้อนของรูปร่างได้ อย่างไรก็ตามสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูปขึ้นอยู่กับตัวแปรและ
ปัจจัยหลายประการ เช่น ชนิดของยาง อุณหภูมิขณะขึ้นรูป เวลาที่ใช้ในการบ่มยาง เป็นต้น โดยใน
ปัจจุบันการหาปัจจัย และระดับปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาและการปรับปรุงกระบวนการฉีดขึ้นรูป
ผลิตภัณฑ์ยางทำโดยอาศัยความรู้พื้นฐานและประสบการณ์ที่ได้จากการลองผิดลองถูก เป็นสาเหตุ
ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวทางในการ
ปรับปรุงกระบวนการฉีดขึ้นรูปขึ้นรูปขึ้นในเครื่องชักผ้า ซึ่งเป็นยางอีพีดีเอ็ม โดยประยุกต์ใช้
คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมในการจำลองการไหลของยางในแม่พิมพ์ ร่วมกับการออกแบบการ
ทดลองด้วยวิธีทากูชิ ในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม และระดับปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อ
กระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง จากผลการวิจัยพบว่า ปัจจัยที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพไม่ได้
ตามความต้องการได้แก่ จุดดักอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับตารางการออกแบบการทดลองทากูชิ สำหรับ
ออร์ทอกอนัลอะเรย์ชนิด $L_{9}3^4$ และปัจจัยที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูป ได้แก่ เวลาในการฉีด ความดันใน
การฉีด อุณหภูมิฉีด และอุณหภูมิของแม่พิมพ์ เมื่อนำระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากการจำลองการ
ไหลของยางในแม่พิมพ์มาเปรียบเทียบกับกรณีจริง ปรากฏว่าได้ผลที่สอดคล้องกัน ดังนั้น
งานวิจัยนี้จึงได้แสดงผลของการประยุกต์ใช้กระบวนการทางสถิติและการจำลองการไหลของยาง
ต่อการพัฒนากระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางได้อย่างเหมาะสม ซึ่งช่วยให้มีการพัฒนา
อุตสาหกรรมแปรรูปผลิตภัณฑ์ยางของประเทศให้สามารถแข่งขันได้ในอนาคต

Prapatt Khumpleewong 2010: An Optimization of Injection Moulding Process Conditions for Rubber Products. Master of Engineering (Industrial Production Technology), Major Field: Industrial Production Technology, Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor: Assistant Professor Supasit Rodkwan, Ph.D. 83 pages.

An injection moulding is one of the processing methods to obtain the rubber products, which have complicated shape. Nevertheless, the conditions in the injection depend on various parameters such as types of rubber compound, injection temperature, curing time. In general, the determination of factors and their levels relies on the practical skills and trial and error method resulting in unacceptable quality of products. Therefore, in this research, an optimization of process conditions in rubber injection moulding was performed using flow simulation in conjunction with Taguchi method (L_93^4). The optimized parameters were then tested with actual injection moulding. Good correlation in flow characteristic was found. This research shows a possibility to successfully seek the optimization using the numerical simulation and statistical method so the domestic rubber product industry can compete with global market in the near future.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภสิทธิ์ รอดขวัญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และอาจารย์ ดร.ชนะ รัชศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ แนวคิดในการวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับงานวิจัยนี้ มาโดยตลอด ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง (CERM) สถาบันคั่นคว่ำและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (RdIPT) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และบริษัท เอส. เค. โพลีเมอร์ จำกัด สำหรับความช่วยเหลือด้านข้อมูล การสนับสนุนสถานที่ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับทุน U-IRC (University-Industry Research Collaboration) ขอขอบคุณอาจารย์คันทรพจน์ ศรีสถิตย์ นายสุนทร รอดวิสัย นางสาวชุติมา ศักดิ์ชินบุตร และทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวมาในที่นี้สำหรับกำลังใจ และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ย่า และอาทั้งสองท่านผู้เสมือนบิดาและมารดา สำหรับกำลังใจ และสิ่งต่างๆ ที่ให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ประพัทธ์ คุ้มปลิวังค์
กันยายน 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	36
อุปกรณ์	36
วิธีการวิจัย	42
ผลและวิจารณ์	53
สรุปและข้อเสนอแนะ	69
สรุปผล	69
ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก การประกอบใช้งานผลิตภัณฑ์ยางกรณีศึกษา (ลื่นกันน้ำทิ้งในเครื่องซักผ้า)	74
ภาคผนวก ข ลักษณะทางกายภาพของแม่พิมพ์และเครื่องฉีด ขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางกรณีศึกษา	77
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	83

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการอัดขึ้นรูป	8
2	การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการอัดส่งขึ้นรูป	10
3	การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการฉีดขึ้นรูป	14
4	การเปรียบเทียบจำนวนแบบการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบกับของทากูชิ	30
5	ตารางแบบแผนการทดลองของทากูชิ ชนิด $L_4 2^3$	30
6	ตารางแบบแผนการทดลองของทากูชิ ชนิด $L_9 3^4$	31
7	ตารางมาตรฐานออกทอกอนอลอะเรย์ $L_9 3^4$ ที่ 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ	47
8	รายละเอียดต่างๆ ในการแบ่งเอลิเมนต์	50
9	ค่าเริ่มต้นต่างๆ ในการจำลองการฉีดขึ้นรูป	52
10	ความดันสูญเสียระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณและจำนวนเอลิเมนต์	53
11	ปัจจัยและระดับในการทดลอง	55
12	ผลการจำลองการฉีดขึ้นรูปตามตารางมาตรฐานออกทอกอนอลอะเรย์ $L_9 3^4$ ที่ 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ	56
13	ค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการจำลองการฉีด เมื่อไม่พิจารณาปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้	56
14	ผลการจำลองการฉีดขึ้นรูปตามตารางมาตรฐานออกทอกอนอลอะเรย์ $L_9 3^4$ ที่ 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และค่า S/N_s ในแต่ละการทดลอง	59
15	ค่า S/N - Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการจำลองการฉีด	59
16	ความดันและอัตราการไหลที่ตำแหน่งทางเข้าขึ้นงานทั้ง 12 เบ้า	64
17	เงื่อนไขและค่าเริ่มต้นที่สำคัญในการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง	67
18	ผลการทดสอบการฉีดขึ้นรูป	67

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
1	แผนผังกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง	4
2	สูตรโครงสร้างพื้นฐานของยางอีพีเอ็มและอีพีดีเอ็ม	5
3	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป	6
4	ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง	7
5	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดส่ง	8
6	กระบวนการอัดส่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง	9
7	ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง (ก) และแนวนอน (ข)	11
8	กระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง	12
9	เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง	13
10	เครื่องฉีดยางแบบแนวนอน	13
11	ผังแสดงเหตุและผล	23
12	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ	24
13	หลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง	25
14	หลักการทำงานของโปรแกรม CADMOULD 3D-F RUBBER	36
15	ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในการขึ้นรูปคือ EPDM ความแข็ง 50 Shore A	37
16	เครื่อง Electronic Densimeter (MD-200S)	38
17	เครื่อง Capillary Rheometer (RHEO – TESTER 2000)	39
18	เครื่อง Moving Die Rheometer (TECHPRO, Rheotech MD+)	39
19	เครื่อง Mettler Toledo DSC822	40
20	เครื่อง Thermoflizer	41
21	เครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแนวตั้งยี่ห้อ Lin Cheng รุ่น IRH-450 S	41
22	ลื่นกันน้ำในเครื่องซักผ้าที่นำมาเป็นกรณีศึกษา	43
23	การเกิดจุดดักอากาศในบริเวณส่วนบนของผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง	43
24	การเกิดจุดดักอากาศในบริเวณส่วนลำตัวของผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง	44
25	การเกิดโพรงอากาศในบริเวณส่วนขอบของผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
26	ผังแสดงเหตุและผล โดยปัจจัยที่อยู่ภายในสัญลักษณ์วงรีคือปัจจัยที่เลือกมา ออกแบบการทดลอง
27	แบบ 2 มิติของผลิตภัณฑ์อย่างตัวอย่าง
28	แบบ 3 มิติแบบทรงตัน ของผลิตภัณฑ์อย่างตัวอย่าง
29	แบบ 3 มิติแบบทรงตัน ชนิด STL ของผลิตภัณฑ์อย่างตัวอย่างที่แบ่งเอลิเมนต์แล้ว รวมทั้ง ทางเข้า และรูวิ่ง
30	กล่องขอบเขต (Bounding Box) ที่สัมผัสกับขอบชิ้นงาน
31	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด (Viscosity) ของยางกับอัตราเฉือน (Shear Rate) ที่ อุณหภูมิ 80, 90, และ 100 องศาเซลเซียส ทั้งค่าที่ได้จากการทดสอบ และค่าที่โปรแกรมคำนวณได้
32	ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับจำนวนเอลิเมนต์
33	ระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณกับจำนวนเอลิเมนต์
34	กราฟค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัยจากจำลองการฉีดขึ้นรูป
35	ตำแหน่งและจำนวนจุดตัดอากาศที่ได้จากการจำลองการไหลของยางคอมพาวด์
36	กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย S/N – Ratio ในแต่ละระดับ ของปัจจัยการทดลอง เมื่อพิจารณาผลตอบแทนคือ ความสมบูรณ์ของชิ้นงานใน ด้านของจุดตัดอากาศ
37	ระยะเวลาในการเติมเต็มของในเบ้าแม่พิมพ์
38	อุณหภูมิการไหลตัวของยางคอมพาวด์ภายในแม่พิมพ์
39	ความดันที่ปลายแกนรูฉีดจากการจำลองการฉีด
40	การกำหนดตำแหน่งทางเข้าของชิ้นงานทั้ง 12 เบ้า
41	ระยะทางจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแกนรูฉีดกับตำแหน่งทางเข้าที่ 4, 5 และ 6
42	ความสัมพันธ์ของความดันที่ตำแหน่งทางเข้ากับระยะทางตามแนวราบ
43	ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่ตำแหน่งทางเข้ากับระยะทางตามแนวราบ
44	แผนภูมิแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์ของเสียแยกตามอาการ

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก1 การประกอบชิ้นกันน้ำทิ้งในเครื่องซักผ้า	75
ข1 แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่างกรณีศึกษา	78
ข2 การวัดอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่างกรณีศึกษาขณะแม่พิมพ์ปิดเพื่อฉีดขึ้นงาน	78
ข3 แม่พิมพ์ฉีดเปิดออกเพื่อนำทางวิ่งและเศษยางออกจากแผ่นบนของแม่พิมพ์ (Upper Plate)	79
ข4 ชุดสไลด์ คอร์ (Slide Core) ของแม่พิมพ์แยกจากกันและเคลื่อนที่มาด้านหน้าเพื่อให้พนักงานปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์	79
ข5 การฉีดน้ำยาเคมีที่เข้าแม่พิมพ์ก่อนแม่พิมพ์ปิด เพื่อปลดชิ้นงานออกได้ง่ายและรักษาอุณหภูมิเมื่อแม่พิมพ์เปิด	80
ข6 การป้อนแถบยางเข้ากระบอกรีด	80
ข7 หน้าต่างการปรับอุณหภูมิเครื่องฉีด	81
ข8 หน้าต่างปรับตั้งปริมาตรยางเข้าเครื่องฉีด	81
ข9 หน้าต่างปรับตั้งการฉีดยางของเครื่องฉีด	82

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ABS	=	อะคริโลไนไตรล์ บิวทาไดเ็น สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene)
ANOM	=	การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (Analysis of Mean)
$2b$	=	ความหนาของเบ้า (Cavity Thickness)
CAD	=	คอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ (Computer Aided Design)
CAE	=	คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering)
C_p	=	ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity)
D	=	เส้นทะแยงมุม (Diagonal Line)
E	=	ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Kinetic Constants Independent of Temperature)
EPM	=	เอทิลีน โพรพิลีน รับเบอร์ (Ethylene-Propylene Rubber)
EPDM	=	เอทิลีน โพรพิลีน ไดเ็น รับเบอร์ (Ethylene-Propylene Diene Rubber)
FEA	=	การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)
FEM	=	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)
H	=	ความสูง (Height)
IGES	=	มาตรฐานการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิว (Initial Graphic Exchange Standard)
k_0	=	ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Kinetic Constants Independent of Temperature)
k_{th}	=	ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)
L	=	ความยาว (Length)
l	=	ความยาวของท่อ (Length of Tube)
$L_A B^C$	=	แบบแผนการทดลอง โดยที่ A จำนวนครั้งทั้งหมดที่ทำต่อแผน (ไม่รวมการทำซ้ำ) B คือจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา และ C คือ จำนวนปัจจัยสูงสุดที่มีได้ในการทดลอง

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$Max\{S / N\}$	=	อัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน มีค่าสูงสุด ณ วิธีปฏิบัติของกลุ่มปัจจัยนั้นๆ
n	=	จำนวนครั้งของการสังเกต
$\bar{n}$	=	ค่าคงที่จลนพลศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Kinetic Constants Independent of Temperature)
P	=	ความดัน (Pressure)
PC	=	พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate)
PE	=	พอลิเอทิลีน (Polyethylene)
PP	=	พอลิโพรพิลีน (Polypropylene)
PS	=	พอลิสไตรีน (Polystyrene)
$\dot{Q}$	=	อัตราการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาจากการคงรูปยาง (Rate of Heat generated by Reaction of Vulcanization)
R	=	รัศมีหน้าตัดของท่อ (Radius of the Tube Cross-Section)
STL	=	มาตรฐานการแลกเปลี่ยนข้อมูลที่เป็นรายละเอียดของแบบจำลอง (Stereolithography)
S / N_L	=	อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของกระบวนการที่ดีที่สุด ต้องมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ (Larger-the Better)
S / N_S	=	อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของกระบวนการที่เลวที่สุดมีค่าเป็นศูนย์ (Smaller-the Better)
S / N_T	=	อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของกระบวนการที่ดีที่สุด ต้องมีค่าเท่ากับที่ได้กำหนดไว้ (Target-the Better)
TPO	=	พอลีโอฟีฟิน (Polyolefin)
$t_i(T)$	=	ช่วงเวลาเริ่มต้น ขณะเกิดกระบวนการคงรูปยางที่อุณหภูมิสม่ำเสมอ (Induction Time on the Temperature during isothermal Vulcanization)
t_i	=	ช่วงเวลาเริ่มต้น (Induction Time)
t_0	=	ค่าคงที่ของวัสดุที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Material Constants Independent of Temperature)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T_0	=	ค่าคงที่ของวัสดุที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Material Constants Independent of Temperature)
$\bar{t}$	=	ช่วงเวลาในรูปแบบของอินทิกรัล (Induction Time in Integral Form)
u	=	ความเร็วในแนวแกน x (Velocity Component in the x)
u	=	ความเร็วในแนวแกนท่อ (Velocity in the Length Direction)
$\bar{u}$	=	ความเร็วเฉลี่ย (Average Velocity)
v	=	ความเร็วในแนวแกน y (Velocity Component in the y)
w	=	ความเร็วในแนวแกน z (Velocity Component in the z)
W	=	ความกว้าง (Width)
y_i	=	ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในแต่ละครั้ง
$\dot{\gamma}$	=	อัตราเฉือน (Shear Rate)
η	=	ความหนืด (Viscosity)
ρ	=	ความหนาแน่น (Density)
Φ	=	ความหนืดจากการให้ความร้อน (Viscous Heating)
λ	=	ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity)

การเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

An Optimization of Injection Moulding Process Conditions for Rubber Products

คำนำ

ในปัจจุบันสถานประกอบการที่ดำเนินธุรกิจในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้แม่พิมพ์ในการอัดและฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ทางด้านยานยนต์ ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ และการแพทย์ กำลังประสบปัญหาที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้จากการกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection Moulding Process) ไม่ได้คุณภาพของชิ้นงานในอุตสาหกรรม ซึ่งมีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากการเลือกสภาวะที่ไม่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ส่งผลให้เกิดการหดตัวของชิ้นงาน (Shrinkage) รอยเชื่อม (Weld Line) จุดดักอากาศ (Air Trap) โพรงในชิ้นงาน (Porosity) รอยไหม้ (Burn Mark) รอยแห้ว (Short Shot) ครีป (Flashing) น้ำหนักชิ้นงานไม่ได้ตามเกณฑ์มาตรฐาน เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันการปรับค่าต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง ทำโดยอาศัยความรู้พื้นฐานและประสบการณ์ที่ได้จากการลองผิดลองถูก (Trial and Error) ทำให้บางครั้งผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ เพราะเกิดปัญหาในกระบวนการผลิตส่งผลให้ไม่สามารถตอบสนองความต้องการของตลาดได้ทันทั่วทั้งที่ จากปัญหาดังกล่าวเพื่อเป็นการลดเวลาและต้นทุนในการผลิต รวมถึงการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering) การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) ร่วมกันในการวิเคราะห์หาปัจจัย (Factors) และระดับปัจจัยต่างๆ (Levels of Factors) ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ที่ใช้ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่างกรณีศึกษาจำนวน 1 ผลิตภัณฑ์ และสามารถนำองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไป ประยุกต์ใช้กับกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาลักษณะการไหลของยางและใช้ในการเลือกสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการ
ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

ขอบเขตของงานวิจัย

1. เน้นการศึกษาระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง
2. ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีทางสถิติเป็นเครื่องมือในการออกแบบการศึกษา
ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง 1 ผลิตภัณฑ์
3. ใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์การไหลของยางขณะฉีดขึ้นรูป
ผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง 1 ผลิตภัณฑ์
4. ทำการทดลองการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง 1 ผลิตภัณฑ์ ด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป
ผลิตภัณฑ์ยาง เพื่อเก็บข้อมูลใช้ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางคอมพิวเตอร์

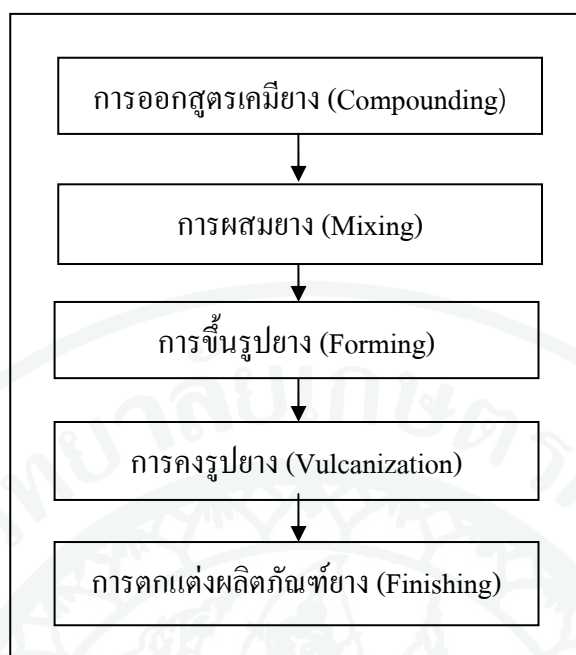
การตรวจเอกสาร

การดำเนินงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง การเลือกสถานะที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการผลิตขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง ได้อาศัยข้อมูลและทฤษฎีต่อไปนี้เป็นพื้นฐานในการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

1 สมบัติเบื้องต้นของยางและยางอีพียีเอ็ม

1.1 ยาง (Rubber)

ยางหรือยางคงรูป (Vulcanized Rubber) เป็นสารพอลิเมอร์ (Polymer) ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยมอนอเมอร์ (Monomer) หลายพันหน่วยเข้าด้วยกัน แต่ยางคงรูปแตกต่างไปจากพอลิเมอร์อื่นตรงที่ว่า เมื่อมีแรงมากระทำ จะสามารถเปลี่ยนรูปร่างและกลับสู่รูปร่างเดิมได้ (ยืดหดได้) (พรพรรณ, 2540) ส่วนยางธรรมชาติ (Natural Rubber) หรือยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubber) ที่ยังเป็นยางดิบ (Raw Rubber) หรือยางที่ยังไม่ได้ผ่านการคงรูปจะมีความยืดหยุ่นต่ำ ไหลได้ง่าย อีกทั้งยังไม่มีเสถียรภาพทางรูปร่าง ดังนั้น ยางดิบจึงไม่อยู่ในรูปที่สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องแปรรูปยางดิบให้เป็นยางสุกหรือยางคงรูปโดยอาศัยปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาคงรูปในแซแซชั่นหรือปฏิกิริยาคงรูป (Vulcanization Reaction) ปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้ยางเปลี่ยนสภาพจากที่เคยเป็นยางดิบ ซึ่งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) คืออยู่ในสภาพที่สามารถไหลได้ง่ายไปเป็นยางคงรูป ไม่สามารถไหลได้อีก ซึ่งมีสมบัติเป็นเทอร์โมเซต (Thermosets) เพราะปฏิกิริยาคงรูปจะทำให้โมเลกุลของยางเกิดการเชื่อมโยงกันเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติ ยางคงรูปที่ได้จึงมีความยืดหยุ่นและมีเสถียรภาพทางรูปร่างสูงขึ้น นอกจากนี้ การคงรูปยางดังกล่าวยังทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลต่างๆ สูงขึ้น ยางจะมีความสามารถในการรักษาสมบัติและรูปร่างที่อุณหภูมิสูงหรือต่ำๆ ได้ดีขึ้น จึงทำให้สามารถนำยางที่คงรูปแล้วไปใช้งานในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากขึ้น อีกทั้งยางคงรูปที่ได้จะมีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากสารเคมีโดยเฉพาะตัวทำละลายสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้ ผลิตภัณฑ์ยางที่เรานำไปใช้งานในชีวิตประจำวันเกือบทั้งหมด เช่น ยางรัดของ ยางล้อรถ ท่อยาง ลูกโป่ง ถุงมือยาง จุกหัวนมยาง ถุงยางอนามัย ก็ล้วนแล้วแต่เป็นยางที่ผ่านกระบวนการแปรรูปเพื่อทำให้ยางเกิดการคงรูปแล้วทั้งสิ้น ในภาพรวมแล้ว การแปรรูปจากยางดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์ยางนั้นมีขั้นตอนหลักๆ อยู่ 5 ประการ (พงษ์ธร และ ชาศริต, 2550) แสดงดังภาพที่ 1



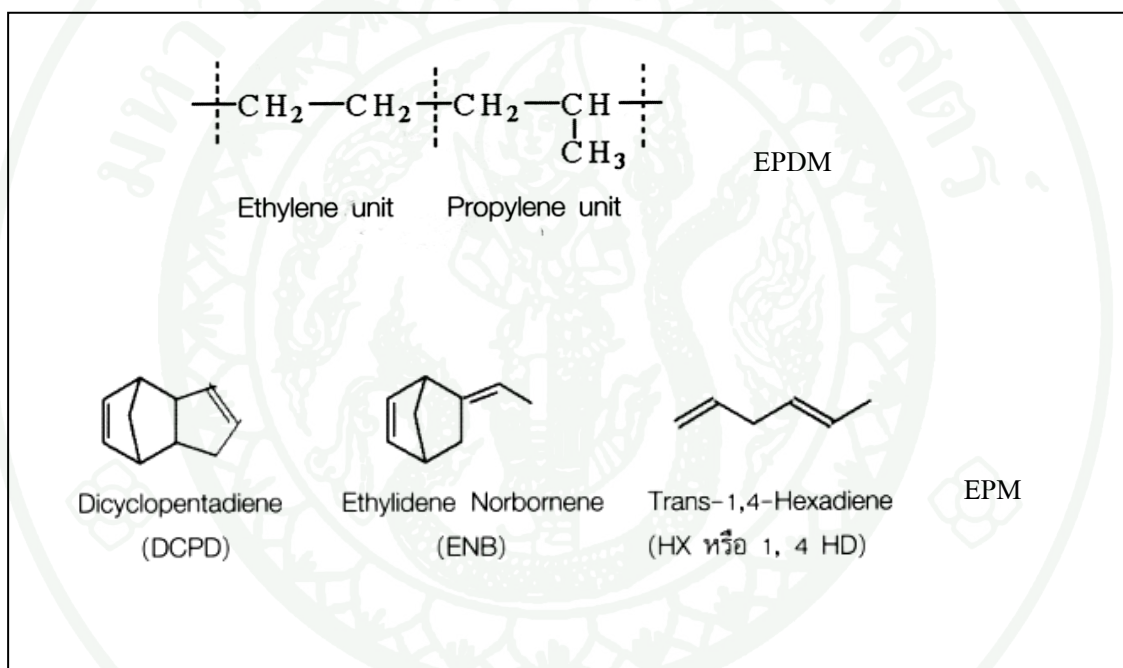
ภาพที่ 1 แผนผังกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง

ที่มา: พงษ์ธร และ ชาคิริต (2550)

1.2 ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (Ethylene-Propylene Diene Rubber, EPDM)

เนื่องจากพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) และพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) ต่างก็มีสมบัติเป็นพลาสติกที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด สามารถตกผลึกได้ง่าย หากทำการป้องกันการตกผลึกของพอลิเอทิลีน โดยการเติมมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่งลงไป ในระหว่างกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน ก็จะได้พอลิเมอร์ชนิดใหม่ ที่มีโครงสร้างของโมเลกุลแบบอสัณฐานและมีสมบัติเป็นยางที่มีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากการทำปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างมอนอเมอร์ของเอทิลีน (Ethylene) กับโพรพิลีน (Propylene) จะได้พอลิเมอร์ที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐานและมีสมบัติเป็นยางเรียกว่าอีพีเอ็ม (Ethylene-Propylene Rubber, EPM) เนื่องจากในโมเลกุลของยางชนิดนี้ไม่มีส่วนที่อึดตัว (ไม่มีพันธะคู่) ดังนั้นยางชนิดนี้จึงมีสมบัติเด่นในด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากแสงแดด ออกซิเจน ความร้อน โอโซน และสารเคมี อย่างไรก็ตาม ข้อเสียหลักของยางชนิดนี้ ก็คือไม่สามารถใช้กำมะถันในการคงรูปได้ (เพราะไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล) การทำให้ยางคงรูปจึงต้องใช้เพอร์ออกไซด์เท่านั้น ต่อมาจึงได้มีการพัฒนายางชนิดใหม่โดยการเติมมอนอเมอร์

ตัวที่สามคือ ไดอีนลงไปเล็กน้อยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ยางที่ได้มีส่วนที่ไม่อิ่มตัวอยู่ในสายโซ่โมเลกุลยางจึงสามารถคงรูปได้ด้วยกำมะถันและเรียกยางชนิดนี้ว่า อีพีดีเอ็ม ซึ่งไดอีนที่เติมลงไปไม่ได้ไปแทรกอยู่ที่สายโซ่หลักของโมเลกุล แต่จะเกาะอยู่กับสายโซ่หลักเป็นลักษณะกิ่งก้านสาขา ด้วยเหตุนี้ แม้ว่าตำแหน่งพันธะจะเกิดการแตกตัวอันเนื่องมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น แสงแดด ออกซิเจน โอโซน เป็นต้น แต่สายโซ่หลักก็ยังคงเหมือนเดิมหรือได้รับผลกระทบ น้อยมาก ด้วยเหตุนี้ ยางอีพีดีเอ็ม จึงมีสมบัติเด่นในด้านการทนทานต่อความร้อน แสงแดด ออกซิเจน และโอโซนได้เป็นอย่างดี สูตรโครงสร้างพื้นฐานของยางอีพีเอ็มและอีพีดีเอ็ม (พงษ์ธร, 2548) แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 สูตรโครงสร้างพื้นฐานของยางอีพีเอ็มและอีพีดีเอ็ม

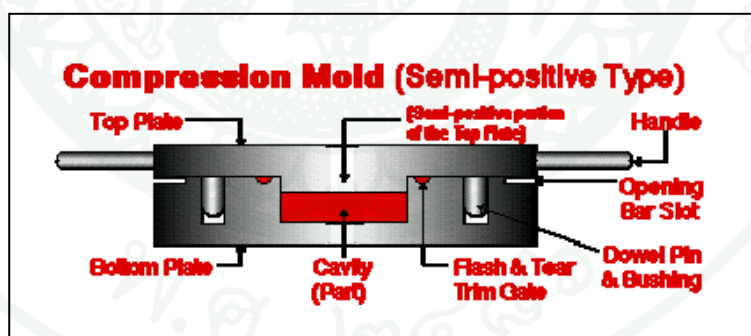
ที่มา: พงษ์ธร (2548)

2. กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ (Moulding)

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ เป็นกระบวนการที่มีผลทั้งการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์และทำให้ยางคงรูป (Shaping or Forming and Vulcanizing) โดยอาศัยความร้อนและแรงอัดในสถานะที่อ่อนตัวและไหลได้ (Plastic State) ในเบ้าของแม่พิมพ์ (Mould Cavity) ได้รูปร่างตามที่ต้องการ (วรารักษ์, 2552) ซึ่งจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปสู่สถานะของแข็งหลังจากเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Crosslinking) การขึ้นรูปยางด้วยวิธีนี้มี 3 แบบ คือ การอัดขึ้นรูป (Compression Moulding) การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (Transfer Moulding) และการฉีดขึ้นรูป (Injection Moulding) (Sommer, 2003)

2.1 การอัดขึ้นรูป

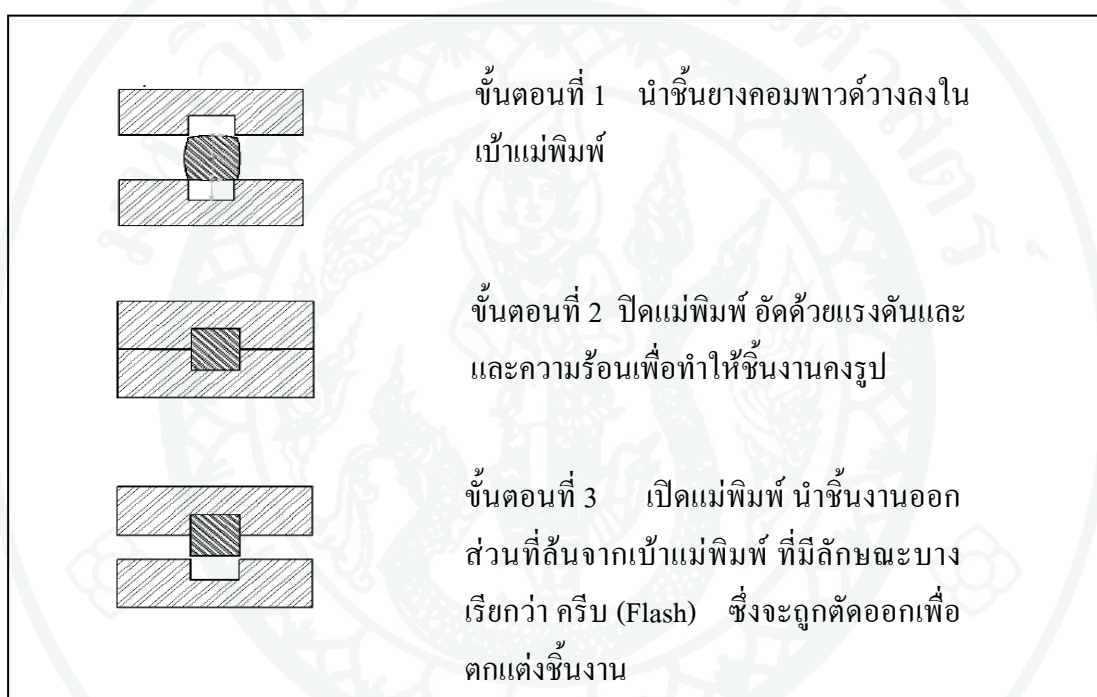
การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยวิธีการอัดขึ้นรูป เป็นกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างไม่ซับซ้อนมาก และแม่พิมพ์มีราคาไม่สูง โดยขนาดของแม่พิมพ์จะขึ้นกับชิ้นงานที่มีตั้งแต่ขนาดประมาณ 10 กรัม จนถึง 10 กิโลกรัม เครื่องจักรที่ใช้สำหรับอัดขึ้นรูปเป็นเครื่องอัดด้วยระบบไฮดรอลิก (Hydraulic) ซึ่งส่วนประกอบของแม่พิมพ์ แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดขึ้นรูป

ที่มา: Hawthorne Rubber Manufacturing Corp. (2010)

กระบวนการอัดขึ้นรูปนั้นเริ่มจากนำชิ้นยางที่ยังไม่สุกหรือยางคอมพาวด์ใส่ลงไปในเบ้าของแม่พิมพ์ จากนั้นทำการปิดแม่พิมพ์ที่ใส่เข้าไปในเครื่องอัด เครื่องอัดจะใช้แรงดันกดปิดแม่พิมพ์จนสนิท โดยก่อนจะกดปิดแม่พิมพ์จะมีการกด-คลาย (Bumping) ก่อนเพื่อให้อากาศออกให้เนื้อยางไหลได้เต็มเบ้า หลังจากได้รับความร้อนจากเครื่องอัดและใช้เวลาระยะหนึ่งจนยางสุกแล้วแม่พิมพ์จะถูกเปิดออกและผู้ปฏิบัติงานสามารถหยิบชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ และทำความสะอาดแม่พิมพ์ จากนั้นแม่พิมพ์ก็จะพร้อมสำหรับการอัดขึ้นรูปในรอบต่อไป (Wheelans, 1974) แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ขั้นตอนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

ที่มา: Robinson Rubber Products Company, inc (2010)

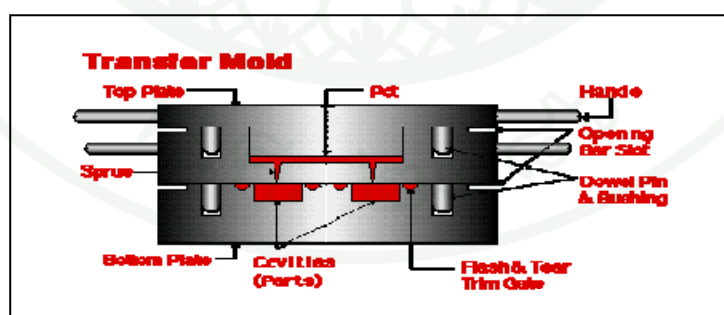
เมื่อพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการอัดขึ้นรูป สามารถสรุปเปรียบเทียบได้ (Sommer, 2003) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการอัดขึ้นรูป

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ราคาถูก	1. ชิ้นงานไม่ได้ขนาดตามที่ต้องการ
2. ออกแบบง่ายสำหรับชิ้นงานที่ไม่ซับซ้อน	2. ใช้เวลานานในการนำยางเข้าหรือออกจากแม่พิมพ์เพื่อการอัดขึ้นรูป
3. มีช่องอัดมากกว่าแม่พิมพ์แบบกึ่งอัด	3. ไม่เหมาะกับชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและบาง
4. มียางเสียน้อยกว่า	
5. วางชิ้นส่วนโลหะที่จะประกอบได้ง่าย	

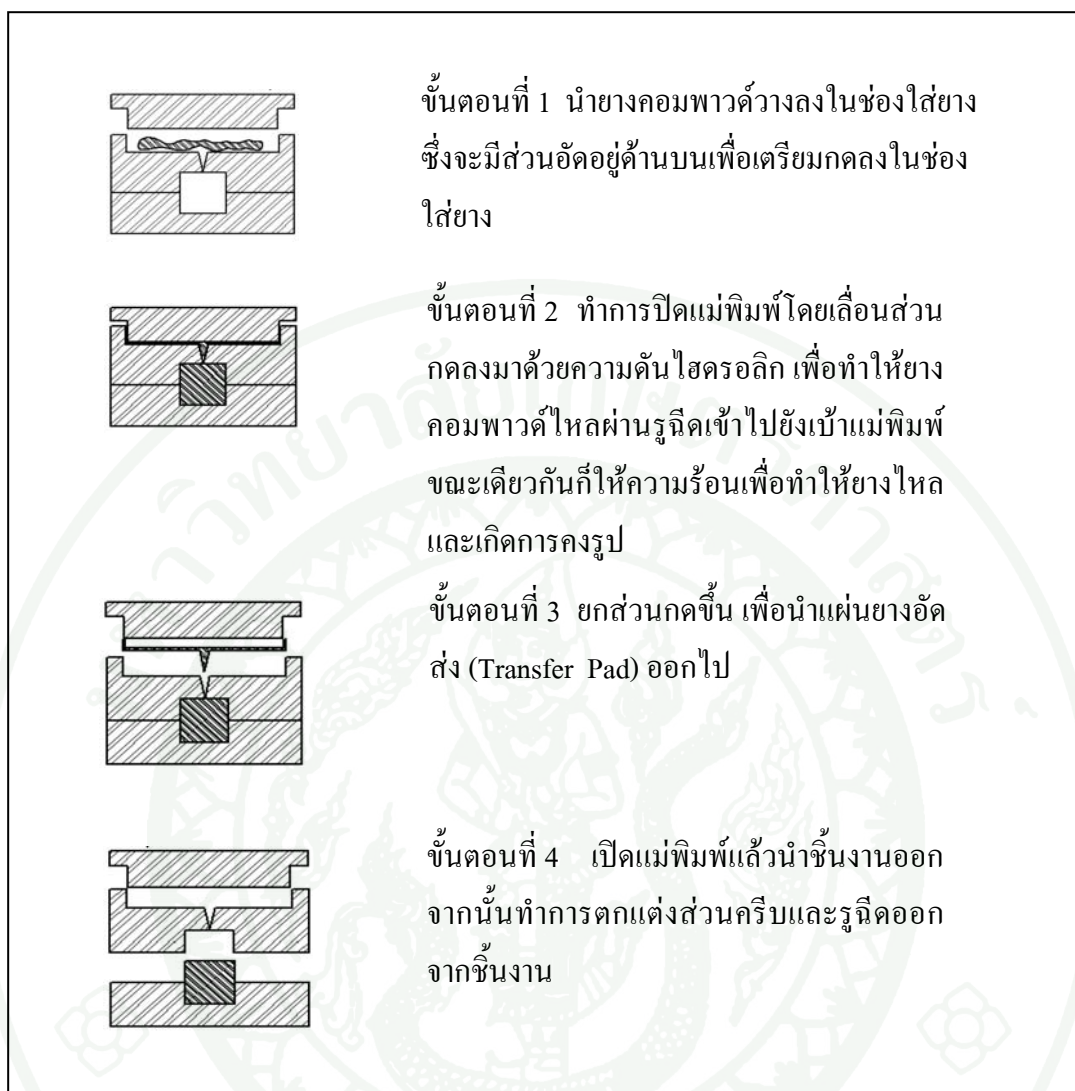
2.2 การขึ้นรูปแบบอัดส่ง (Transfer Moulding)

การขึ้นรูปแบบอัดส่งนั้นชิ้นงานที่ได้จะมีความแม่นยำมากกว่าแบบอัด และสามารถควบคุมรอบเวลาการผลิตได้ดีกว่า หลักการที่สำคัญของการขึ้นรูปแบบอัดส่งนั้นคือจะมีช่องสำหรับใส่ยาง 1 ช่อง (Pot) โดยช่องดังกล่าวนี้จะเชื่อมต่อกับเบ้าด้วยทางวิ่งซึ่งมีทั้งเบ้าเดียวหรือหลายเบ้าก็ได้ เมื่อใส่ยางที่ยังไม่สุกลงไปในช่องใส่ยาง ส่วนอัด (Plunger) ก็จะอัดเนื้อยางผ่านทางวิ่งเข้าไปสู่เบ้า หลังจากนั้นก็จะให้ความร้อนจนยางสุก นำชิ้นงานออกจากเบ้าโดยผู้ปฏิบัติงาน (Wheelans, 1974) ซึ่งส่วนประกอบของแม่พิมพ์และกระบวนการอัดส่งขึ้นรูป แสดงดังภาพที่ 5 และ 6 ตามลำดับ



ภาพที่ 5 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบอัดส่ง

ที่มา: Hawthorne Rubber Manufacturing Corp. (2010)



ภาพที่ 6 กระบวนการอัดส่งขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

ที่มา: Robinson Rubber Products Company, inc (2010)

เมื่อพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการอัดส่งขึ้นรูป สามารถเปรียบเทียบได้
(Sommer, 2003) แสดงดังตารางที่ 2

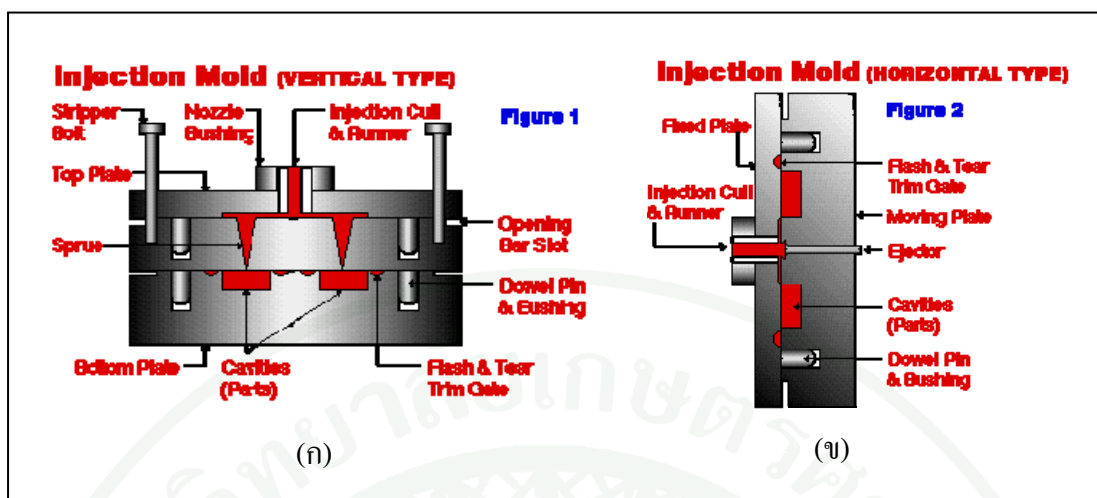
ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการอัดสังขึ้นรูป

ข้อดี	ข้อเสีย
1. เตรียมขึ้นยางคอมพาวด์ได้ง่ายกว่าแม่พิมพ์อัด เพราะเตรียมขึ้นใหญ่เพียงขึ้นเดียวในช่องใส่ยาง	1. ราคาแพงกว่าแม่พิมพ์อัด 2. แม่พิมพ์มีน้ำหนักรมากกว่าแม่พิมพ์อัด
2. ใช้เวลาในการอบบ่งให้คงรูปน้อยกว่าการอัดขึ้นรูป	3. ใช้เวลานานในการนำยางเข้าหรือออกจากแม่พิมพ์เพื่อการอัดสังขึ้นรูป
3. ยางเชื่อมติดกับโลหะได้ดีกว่าการอัดขึ้นรูป	4. มักมีช่องอัดยางน้อยกว่าแม่พิมพ์แบบอัด
4. มียางเสียน้อยกว่าการอัดขึ้นรูป	
5. วางชิ้นส่วนโลหะประกอบได้ง่าย	

2.3 การฉีดขึ้นรูป (Injection Moulding)

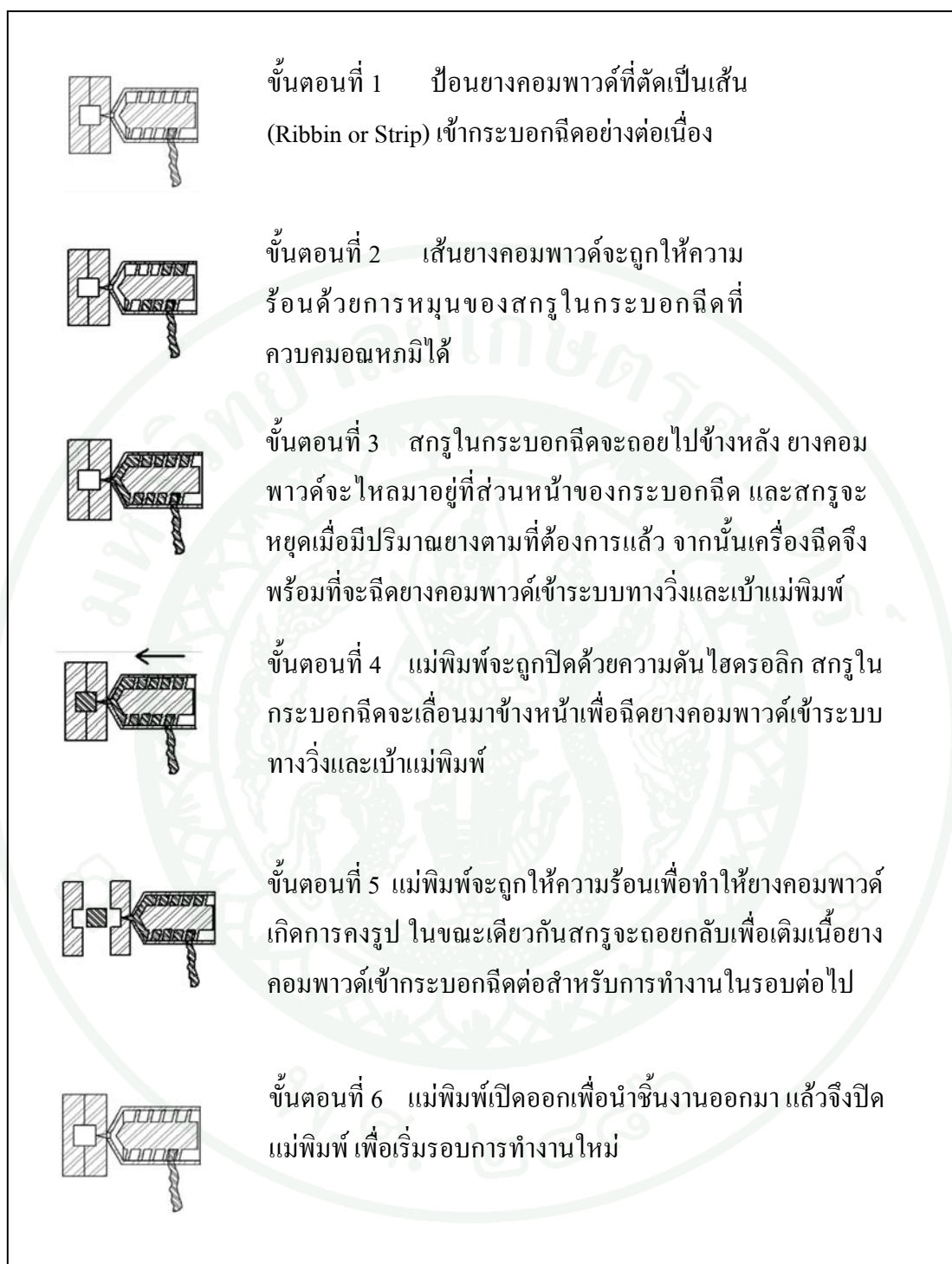
การฉีดขึ้นรูปนั้นเป็นการฉีดเนื้อยางจากกระบอกฉีด (Injection Barrel) ด้วยกระบอกสูบ (Ram) หรือสกรู (Screw) ที่อยู่ภายใน เนื้อยางจะถูกฉีดผ่านหัวฉีด (Nozzle) ซึ่งเป็นส่วนปลายสุดเข้าสู่รูฉีดของแม่พิมพ์ โดยรูฉีดนี้จะเชื่อมต่อกับทางวิ่ง (Runner) และรูเข้า (Gate) ก่อนเข้าสู่เบ้า (cavity) ของแม่พิมพ์ต่อไป โดยที่แม่พิมพ์จะมีตัวทำความร้อนที่มีลักษณะเป็นแท่ง (Heater Rod) ติดอยู่เพื่อทำให้ยางเกิดกระบวนการวัลคาไนซ์ หลังจากยางสุกแล้วแม่พิมพ์จะเปิดออกเพื่อปลดชิ้นงานโดยสามารถนำชิ้นงานออกมาด้วยอุปกรณ์ดึงงาน หรือใช้แขนหุ่นยนต์หยิบออกแบบอัตโนมัติก็ได้ ส่วนประกอบของแม่พิมพ์และกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Wheelans, 1974) แสดงดังภาพที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

นอกจากนั้นการเติมเนื้อยางจะเป็นแบบอัด โนมัติซึ่งจะเป็นแบบสายแถบยาว (Strip) เข้าสู่กระบอกฉีด หรือเป็นเม็ดเล็กผ่านกรวย (Hopper) คล้ายการฉีดพลาสติก เครื่องฉีดยางแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง (Vertical Injection Machine) และเครื่องฉีดยางแบบแนวนอน (Horizontal Injection Machine) (Ciesielski, 1999) แสดงดังภาพที่ 9 และ 10 ตามลำดับ



ภาพที่ 7 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ยางแบบฉีดขึ้นรูปแนวตั้ง (ก) และแนวนอน (ข)

ที่มา: Hawthorne Rubber Manufacturing Corp. (2010)



ภาพที่ 8 กระบวนการลีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

ที่มา: Robinson Rubber Products Company, inc (2010)



ภาพที่ 9 เครื่องฉีดยางแบบแนวตั้ง

ที่มา: Lin Cheng Technologies co.(1997)



ภาพที่ 10 เครื่องฉีดยางแบบแนวนอน

ที่มา: DESMA Elastomertechnik GmbH. (2010)

เมื่อพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของกระบวนการฉีดขึ้นรูป สามารถเปรียบเทียบได้ (Ciesielski, 1999) แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการฉีดขึ้นรูป

ข้อดี	ข้อเสีย
1. อุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มเนื้อเยื่อสูงกว่าที่ใช้ในวิธีการอัดและอัดส่ง ซึ่งส่งผลให้ยางสุกตัวเร็วกว่า	1. แม่พิมพ์จำเป็นต้องทนต่อแรงดันสูง ทำให้ต้องใช้เหล็กที่มีความแข็งแรงมาก และใช้ความละเอียดสูง
2. เนื่องจากอุณหภูมิของเนื้อเยื่อที่ถูกฉีดเข้าเบ้าใกล้เคียงกับอุณหภูมิฉีด ทำให้การถ่ายเทอุณหภูมิระหว่างการบ่มมีน้อยมาก ดังนั้นจึงเกิดแรงดันภายในน้อยมาก ซึ่งเป็นผลให้การเกิดรอยฉีก หรือรอยกัด (Backrind) บริเวณแนวส่วนแบ่งแม่พิมพ์ (Parting Line) ลดลงได้มาก	2. เนื่องจากแม่พิมพ์ฉีดยางมีระบบทางวิ่งทำให้เสียเนื้อเยื่อในส่วนดังกล่าว ทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มมากกว่าการอัดและการส่ง
3. ไม่จำเป็นต้องตัดแบ่ง หรือทำรูปทรงก่อนฉีด เพราะสามารถป้อนเนื้อเยื่อแบบสายยาว หรือเป็นเม็ดได้เลย	
4. ลดปริมาณครีป (Flash) ยาง	
5. ลดการเกิดการอุดตันของอากาศ (Air Traps)	
6. สามารถใช้ระบบการผลิตแบบอัตโนมัติได้	
7. รอบการฉีด (Cycle Time) ลดลง ทำให้สามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนมาก	

3. การจำลองการฉีดขึ้นรูปของยางคอมพาวด์ (Simulation of Injection Moulding of Rubber Compound) (Isayav, 1991)

ในปัจจุบันกระบวนการฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์กำลังเป็นที่นิยมในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ทั่วๆ ไป แต่การขึ้นรูปยางคอมพาวด์ด้วยแม่พิมพ์ในแวดวงการศึกษากลับได้รับความสนใจน้อยกว่าเทอร์โมพลาสติก ทั้งนี้เนื่องจากวิทยาการการไหลและคุณลักษณะเชิงความร้อนของยางคอมพาวด์มีความยุ่งยากซับซ้อนในหลายๆ ประเด็น เนื่องจาก สารตัวเติม และสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีผลกระทบต่อลักษณะการไหลของยาง แบบจำลองของการเกิดปฏิกิริยาเพื่อสร้างพันธะทางเคมี

เกิดเป็นโครงตาข่ายเชื่อมโยงที่ซับซ้อน ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อการไหลและการถ่ายโอนความร้อน และพฤติกรรมความหนืดยืดหยุ่น (Viscoelastic) ของยางคอมพาวด์ระหว่างการไหลในสถานะที่ยังไม่คงรูป (Uncured State) โดยปกติแบบจำลองของกระบวนการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ฉีดของยางคอมพาวด์ จะเกี่ยวข้องกับทั้งสถานะที่ไม่คงตัว (Unsteady State) การไหลที่มีอุณหภูมิกระจายไม่สม่ำเสมอ (Non-Isothermal) ของของไหลที่ไม่ใช่นิวโทเนียน (Non-Newtonian Fluid) ที่มีความหนืดแปรตามการสะสมความร้อน การจำลองที่กล่าวถึงนี้จะเกิดขึ้นในหลายส่วน เช่น การไหลในสกรูลำเลียง หัวฉีด รูฉีด ทางวิ่ง ทางเข้า และเบ้าของแม่พิมพ์ จนกระทั่งมีการเติมเนื้อในเบ้า นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาการเกิดขึ้นของความร้อนอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาการคงรูปยาง และต้องมีการคำนวณหาสถานะการคงรูปยางอีกด้วย

3.1 สมการควบคุม (Governing Equation)

สมการควบคุมที่ใช้สำหรับกรณีการเติมเนื้อภายในเบ้าแม่พิมพ์ ซึ่งโดยทั่วไปจะพิจารณาให้เป็นของไหลไม่ยืดหยุ่นแบบนิวโทเนียนภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิกระจายไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจลศาสตร์ (Kinematics) ของการไหลของส่วนหลอมเหลวด้านหน้า (Frontal Flow) จะพิจารณาตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำลองการฉีดขึ้นรูปของเทอร์โมพลาสติก ทั้งนี้จากความจริงที่ว่าส่วนหลอมด้านหน้าจะมีอุณหภูมิต่างจากที่ผนัง กล่าวคือ ผนังที่เย็นกว่าจะทำให้ของไหลเย็นตัวลง เกิดเป็นชั้นที่เรียกว่า ชั้นแข็งตัว (Frozen-Surface Layer) ซึ่งแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับกรณีของการฉีดขึ้นรูปของยางคอมพาวด์ โดยของไหลส่วนที่หลอมจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าที่ผนัง และกระบวนการคงรูปยาง จะเริ่มเกิดขึ้น เมื่อใช้เวลาผ่านไประยะหนึ่ง จนเกิดอุณหภูมิที่กระจายไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นองค์ความรู้เกี่ยวกับการกระจายตัวของอุณหภูมิของความเร็วในส่วนหลอมด้านหน้า ยังคงเป็นข้อมูลที่จำเป็นเพื่อใช้ในการทำนายช่วงเวลาที่เกิดสถานะอุณหภูมิที่กระจายไม่สม่ำเสมอให้แม่นยำขึ้น จึงใช้การจำลองการไหลเชิงตัวเลขของริกอร์ส (Rigorous Numerical Simulation of The Flow) สำหรับกรณีการไหลผ่านช่องหรือท่อยาว โดยการกำหนดให้จุดต่อ (Node) ของส่วนหลอมด้านหน้ามีลักษณะเป็นส่วนโค้งระหว่างช่องว่าง (Gapwise-Curved) และจุดต่อเหล่านี้จะเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จากนั้นใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใน 3 มิติ ในการหาตำแหน่งของส่วนโค้งดังกล่าว และเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขที่สมบูรณ์นั้นค่อนข้างสูง จึงจำเป็นต้องใช้การประมาณค่าของจลศาสตร์ของการไหลของส่วนหลอมด้านหน้า ซึ่งการประมาณค่าดังกล่าวยังคงให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับผลเฉลยเชิงตัวเลขตามแบบจำลองของริกอร์ส และเพื่อเป็นการลดทอนความยุ่งยากจากการคำนวณเชิงตัวเลข จะใช้วิธีการประมาณค่า

โดยทั่วไปแล้ว สมการควบคุมของปัญหากลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) จะนิยมใช้หลักการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน (The Conservation of Mass, Momentum and Energy) โดยใช้สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) สำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) คือ

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

เมื่อ u, v, w เป็นความเร็วในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ การอินทิเกรต (Integration) สมการที่ (1) เทียบกับขนาดช่องว่างตามแนวแกน z และใช้เงื่อนไขที่ขอบ (Boundary Condition) เป็น u, v, w ที่เส้นศูนย์กลาง และที่ผนัง จะสามารถเขียนสมการความต่อเนื่องในเทอมขององค์ประกอบความเร็วในขนาดช่องว่างเฉลี่ยเป็น

$$\frac{\partial(\bar{bu})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{bv})}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

เมื่อ $2b$ เป็นความหนาของเบ้า (Cavity Thickness) ส่วน $\bar{u}$ และ $\bar{v}$ จะนิยามเป็น

$$\bar{u} = \frac{1}{b} \int_0^b u dz \quad (3)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{b} \int_0^b v dz \quad (4)$$

วิธีการประมาณการจำลองที่มีชื่อเสียงและเป็นที่ยอมรับจะใช้การประมาณตามแบบของเฮล-ชอว์ (Hele-Shaw) โดยจะใช้กับกรณีการเติมเนื้อภายในช่องแคบ สำหรับสมการโมเมนตัมจะสร้างขึ้นเพื่อสมดุลความเค้นเฉือน (Shear Stress) โดยการเปลี่ยนแปลงความดัน (Pressure) ในระนาบ $x-y$ โดยที่การเปลี่ยนแปลงความดันต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง จะสมมติให้เป็นศูนย์ในทิศทางของขนาดช่องว่าง สำหรับโมเมนตัมในทิศทาง x และ y จะพิจารณาตามเกณฑ์ของของไหลไม่ยืดหยุ่นแบบไม่ใช่นิวโทเนียน โดยพิจารณาน้ำหนักและแรงเฉือน ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์เป็น

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

เมื่อ P เป็นความดันและ η เป็นความหนืด

สำหรับปัญหาอุณหภูมิกระจายไม่สม่ำเสมอ สนามโมเมนตัม และสมการความต่อเนื่อง จะมีความเกี่ยวเนื่องกับสมการพลังงาน ถ้ามีทิศทางในช่องแคบมีค่าน้อยกว่ามิติในแกน x หรือ y ค่าการนำความร้อนในแกน x หรือ y จะสามารถตัดทิ้งได้ เมื่อเทียบกับทิศทางของ ช่องว่าง สำหรับการเติมเนื้อภายในช่องแคบ สมการพลังงานสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k_{th} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \Phi + \dot{Q} \quad (7)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น C_p คือ ความร้อนจำเพาะ k_{th} คือค่าการนำความร้อน Φ ความหนืดจากการให้ความร้อน $\dot{Q}$ คืออัตราการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาจากการคงรูปยาง ตามลำดับ เพื่อให้สะดวกขึ้นจะตัดเทอมของการพาความร้อน ในสมการพลังงาน แม้ว่าจะไม่ สอดคล้องกับการพิจารณาตามเกณฑ์ระดับของขนาด (Order of Magnitude Basis) ที่นิยมทำกันในการจำลองในแบบอื่นๆ ด้วย โดยไม่มีผลกระทบต่อผลการจำลองอย่างมีนัยสำคัญ การตัดเทอมข้างต้น จะใช้กับการพิจารณาส่วนหลอมเหลวด้านหน้าด้วย

จากหลักการที่กล่าวมาทั้งหมด สมการควบคุมสำหรับการไหลใน 1 มิติ (One-Dimensional Flow) ผ่านหน้าตัดกลม คือ

$$\frac{\partial (R^2 \bar{u})}{\partial l} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\partial P}{\partial l} = 0 \quad (9)$$

เมื่อ สมการ (8) และ (9) เป็นสมการความต่อเนื่อง และสมการโมเมนตัม ตามลำดับ โดยที่ R เป็นรัศมีหน้าตัดของท่อ u เป็นความเร็วในแนวแกนท่อ l เป็นความยาวของท่อ $\bar{u}$ เป็นความเร็วเฉลี่ย ซึ่งมีนิยามได้ดังนี้

$$\bar{u} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u r dr \quad (10)$$

และสมการพลังงานคือ

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial l} \right) = \frac{k_{th}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \Phi + \dot{Q} \quad (11)$$

สมการ (7) หรือ (11) จะใช้พิจารณาสถานะที่ผ่านการเติมเนื้อแล้ว เทอม $\dot{Q}$ จะเป็นอัตราการเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาการคงรูปยาง ที่สถานะชั่วครู่ (Transient State)

3.2 ความหนืดจากการให้ความร้อน (Viscous Heating)

เทอมความหนืดจากการให้ความร้อน ในสมการพลังงานจะนิยามเป็น

$$\Phi = \eta \dot{\gamma}^2 \quad (12)$$

เมื่อ $\dot{\gamma}$ คือ อัตราเฉือน (Shear Rate) และ η คือความหนืด (Viscosity) ที่เป็นฟังก์ชันของแบบจำลองของการไหล สำหรับอัตราเฉือนของการไหลในแบบ 2 มิติ คือ

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2} \quad (13)$$

แต่สำหรับปัญหา 1 มิติ สมการที่ (13) จะถูกลดรูปเป็น

$$\dot{\gamma} = \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right| \quad (14)$$

สำหรับพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยทั่วไป แบบจำลองตามกฎการยกกำลัง (Power-Law Model) จำเป็นที่จะต้องนำมาประยุกต์ใช้ด้วย แต่กฎการยกกำลังนี้จะใช้ได้ดีเมื่อของไหลมีอัตราเฉือนสูงๆ เท่านั้น สำหรับของไหลที่มีอัตราเฉือนต่ำๆ จะให้ผลการทำนายที่เกินจริง จึงจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนสมการของกฎการยกกำลังใหม่ เพื่อให้ใช้งานได้กว้างขวางขึ้นสำหรับการจำลองการไหลดังนี้

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau} \right)^{1-n}} \quad (15)$$

เมื่อ

$$\eta_0(T) = A \exp\{T_b / T\} \quad (16)$$

เป็นอัตราเฉือนที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ช่วยให้สมการ (15) สามารถใช้งานได้ อย่างกว้างขวางขึ้นนั่นเอง สมการ (15) นี้เรียกว่า แบบจำลองของครอสที่ปรับปรุงแล้ว (Modified-Cross Model) โดยมีพารามิเตอร์ที่แปรตามอุณหภูมิ 4 ตัวด้วยกัน ได้แก่ τ, η, A และ T_b สมการนี้ สามารถใช้งานได้กับการจำลองการฉีดขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกด้วย

3.3 แบบจำลองจลพลศาสตร์ ของการคงรูป (Curing Kinetic Model)

เทอมของแหล่งกำเนิดความร้อน $\dot{Q}$ ที่ปรากฏในสมการพลังงาน คือ พลังงานความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาการคงรูปของยาง ซึ่งมีการพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาใช้งานแล้วก่อนหน้านี้

กำหนดให้ $\alpha = Q/Q_\infty$ เป็นลำดับขั้นของการคงรูป โดยที่ Q คือ ปริมาณความร้อนที่ปลดปล่อยออกมา ที่ขึ้นกับเวลา t และ Q_∞ เป็นปริมาณความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้เป็นกรณีของการบ่มยางที่มีการกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอ (Isothermal) ซึ่งมีความสัมพันธ์คือ

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{\bar{n}}{k} t^{-(1+\bar{n})} \alpha^2 \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{kt^{\bar{n}}}{1 + kt^{\bar{n}}} \quad (18)$$

หาอนุพันธ์ของ α เทียบกับเวลา t จะสมมติให้เป็นปริมาณที่ขึ้นกับเวลาโดยมีพื้นฐานจากอาร์เรเนียสไทป์ (Arrhenius-Type) ตามสมการ

$$k = k_0 \exp\{-E/RT\} \quad (19)$$

เมื่อ k_0 , E และ $\bar{n}$ เป็นค่าคงที่จลนพลศาสตร์ที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Kinetic Constants Independent of Temperature) แล้วแทนค่าในสมการ (17) ถ้าปฏิกิริยาการคงรูปเกิดขึ้นในระหว่างสภาวะการฉีดเติมเนื้อเข้าเบ้า (Cavity-Filling Stage)

เป็นที่ทราบกันดีว่า ขงคอมพาวด์ส่วนมากจะมีกระบวนการคงรูปเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเริ่มต้น (Induction Period) ขั้นตอนการเกิดพันธะเชื่อมขวาง (Curing Stage) และขั้นตอนการผ่านจุดที่ยางคงรูปเต็มที่ (Overcure Stage) ในขั้นตอนการเริ่มต้น จะยังไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น $\dot{Q} = 0$ เมื่อ $t \leq t_i$ ถ้า t_i คือช่วงเวลาเริ่มต้น ดังนั้นจึงเกิดคำถามว่า จะทำนายช่วงเวลาเริ่มต้นได้อย่างไร โดยเฉพาะกรณีของกระบวนการที่อุณหภูมิกระจายไม่สม่ำเสมอในแม่พิมพ์ จากการศึกษาถึงกลไกภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิกระจายที่สม่ำเสมอ ช่วงเวลาเริ่มต้นจะสามารถหาได้โดยง่ายจากการทดลอง เมื่อสมบัติของวัสดุแปรผันตามอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา ในที่นี้จะพิจารณาตามเงื่อนไขของ อาร์เรเนียส คือ

$$t_i = t_0 \exp\{T_0/T\} \quad (20)$$

เมื่อ t_0 และ T_0 เป็นค่าคงที่ของวัสดุที่ไม่แปรผันตามอุณหภูมิ (Material Constants Independent of Temperature)

ภายใต้เงื่อนไขการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอ สภาวะของการบ่มยาง จะเป็นฟังก์ชันของเวลาการเกิดปฏิกิริยาสำหรับการสุ่มตัวอย่างใดๆ ใดๆก็ตาม ก็จะเป็นฟังก์ชันของทั้งอุณหภูมิและเวลาที่เกิดกระบวนการที่มีอุณหภูมิกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ [2,6-11] นั่นคือ $\alpha = \alpha(T, t)$ จึงได้ว่า

$$d\alpha = \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T}\right)_t dT + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_T dt \quad (21)$$

เมื่ออินทิเกรตสมการ (21) จะได้สภาวะของการบ่มที่เป็นสมการเชิงตัวเลข (Numerical Expression) ดังนี้

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + \int_{T_{i-1}}^{T_i} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T}\right)_t dT + \int_{t_{i-1}}^{t_i} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_T dt \quad (22)$$

สำหรับเงื่อนไขที่อุณหภูมิมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการคงรูปจะมีพื้นฐานมาจากการเพิ่มขึ้นของสภาวะการบ่ม คือ

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{non-isothermal} = \frac{(\alpha_i - \alpha_{i-1})}{(t_i - t_{i-1})_{cumulative}} \quad (23)$$

ถ้ากำหนดให้ทราบค่าช่วงเวลาเริ่มต้น สำหรับกรณีที่อุณหภูมิกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ระหว่างกระบวนการที่มีอุณหภูมิกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ได้มีผู้ศึกษาไว้ว่า ให้เขียนช่วงเวลานี้ในรูปแบบของอินทิกรัล เพื่อสร้างตัวแปรไร้มิติของเวลา ขึ้นตามสมการ

$$\bar{t} = \int_0^t \frac{dt}{t_i(T)} \quad (24)$$

เมื่อ $t_i(T)$ คือ ช่วงเวลาเริ่มต้น ขณะเกิดกระบวนการคงรูปยางที่อุณหภูมิสม่ำเสมอตามสมการ (20) เมื่อค่าของเวลา ซึ่งเป็นขอบเขตของการอินทิเกรตในสมการ (24) จะนำมาใช้ในกระบวนการอุณหภูมิกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้จะมีการสมมติว่ากระบวนการอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอนี้จะเกิดขึ้นจากกระบวนการอุณหภูมิกระจายตัวที่สม่ำเสมอของส่วนประกอบเล็กจำนวนมากในสูตรยาง ดังนั้นในกระบวนการของการเติมเนื้อและกระบวนการหลังจากนั้น จะใช้เทคนิคเดียวกันนี้ด้วย ซึ่งมีหลักฐานยืนยันว่าช่วงเวลาเริ่มต้นจะเปลี่ยนแปลงไปหากสัดส่วนต่างๆ ในสูตรยางต่างกันไป แม้ว่าเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขที่ขอบเหมือนกันก็ตาม อาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า กระบวนการบ่มยางจะแตกต่างกันจากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่งในเนื้อยางนั่นเอง จุดนี้เองจะเป็นจุดที่ต้องพิจารณาเป็นอย่างมากเนื่องจากเกี่ยวข้องกับความแม่นยำของการทำนาย การกระจายตัวของอุณหภูมิและสภาวะการคงรูปยางภายในแม่พิมพ์ลีด

กระบวนการหาค่าที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ยังคงขาดข้อมูลสนับสนุนที่เพียงพออยู่บ้างในปัจจุบัน สำหรับอนุภาคของของไหลที่ไหลอย่างต่อเนื่องระหว่างกระบวนการการเติมเนื้อ ดังนั้นวิธีการของลากรองจ์หรือออยเลอร์ (Lagrangian or Eulerian Method) จะถูกนำมาใช้กับเทอมที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้ เพื่อความถูกต้องเหมาะสม ที่กล่าวมาจึงเป็นจุดประสงค์ที่จะทำให้สมการ (24) สามารถใช้งานได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น

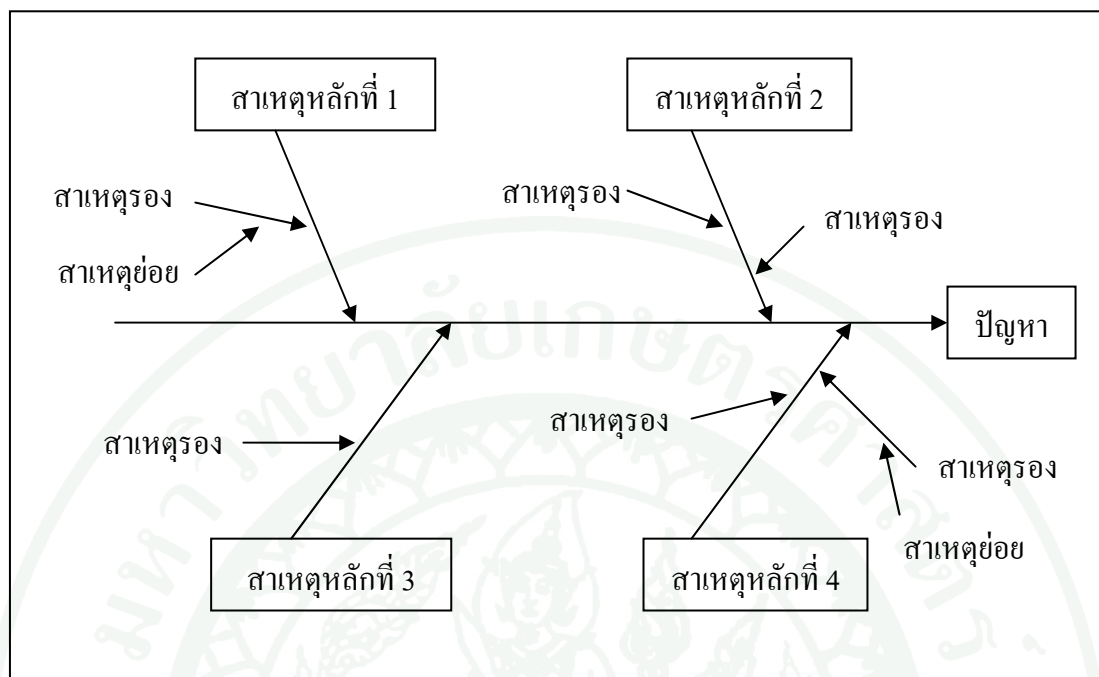
4. ฟังแสดงเหตุและผล

4.1 แนวความคิดของฟังแสดงเหตุและผล

ความหมายของฟังแสดงเหตุและผล ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น คือฟังแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพกับปัจจัยต่างๆ ที่มีความเกี่ยวข้อง จากแนวความคิดเกี่ยวกับกระบวนการของ ชิวฮาร์ต (Shewhart) ที่ว่า กระบวนการ สามารถแยกเป็นสาเหตุหลักๆ ได้ 4 ประการ กล่าวคือ คน (Man), เครื่องจักร (Machine), วิธีการ (Method), และวัตถุดิบ (Material) นั้น ศาสตราจารย์คาโอริ อิชิกาวา (Kaoru Ishikawa) ได้นำแนวความคิดของชิวฮาร์ตมาพัฒนาโดยการสร้างเป็นฟังแสดงสาเหตุของปัญหา ซึ่งมีลักษณะคล้ายกังปลาหรือที่เรียกว่า ฟังกังปลา โดยฟังนี้มีส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนโครงกระดูกของปลาที่ รวบรวมปัจจัยที่เป็นสาเหตุของปัญหา และส่วนหัวปลาที่เป็นข้อสรุปสาเหตุที่กลายเป็นปัญหา

4.2 วิธีการสร้างฟังแสดงเหตุและผล

1. ทำการเลือกปัญหาที่เราให้ความสนใจ และต้องการทราบที่มาของปัญหานั้น โดยทำการระบุในส่วนของหัวปลา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ระบุปัญหา
2. ระบุสาเหตุหลักของปัญหา
3. ระบุสาเหตุรอง ซึ่งเป็นดังรายละเอียดปลีกย่อยของสาเหตุหลัก
4. ระบุสาเหตุย่อย



ภาพที่ 11 ฟังแสดงเหตุและผล

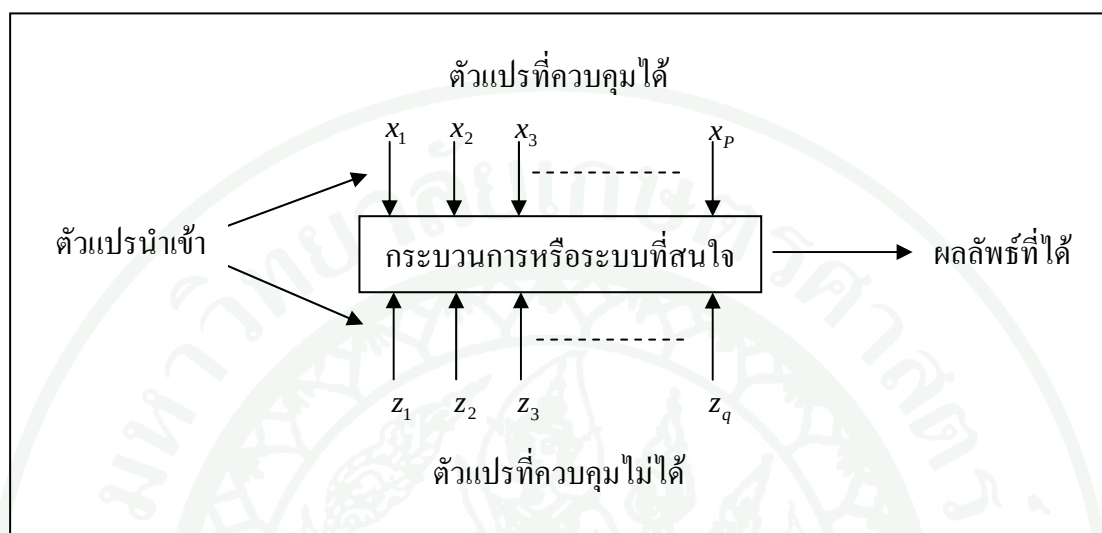
ที่มา: วันรัตน์ (2547)

5. การออกแบบการทดลองและวิธีการของทากูชิ (ประไพศรี และ พงศ์นัน, 2551)

5.1 การออกแบบการทดลอง (Experimental Design or Design of Experiments)

การออกแบบการทดลอง คือ การทดสอบเพียงครั้งเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในระบบหรือกระบวนการที่สนใจศึกษา เพื่อที่จะทำให้เกิดการสังเกตและชี้ถึงสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น โดยตัวแปรนำเข้าจะถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่ควบคุมได้ (Controllable Variables or Factors) หรือตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่สามารถออกแบบได้ (Design Variable or Factors) และกลุ่มที่ไม่สามารถควบคุมได้ เรียกว่า ตัวแปร (หรือปัจจัย) ที่รบกวนระบบ (Uncontrollable or Noise Variables)

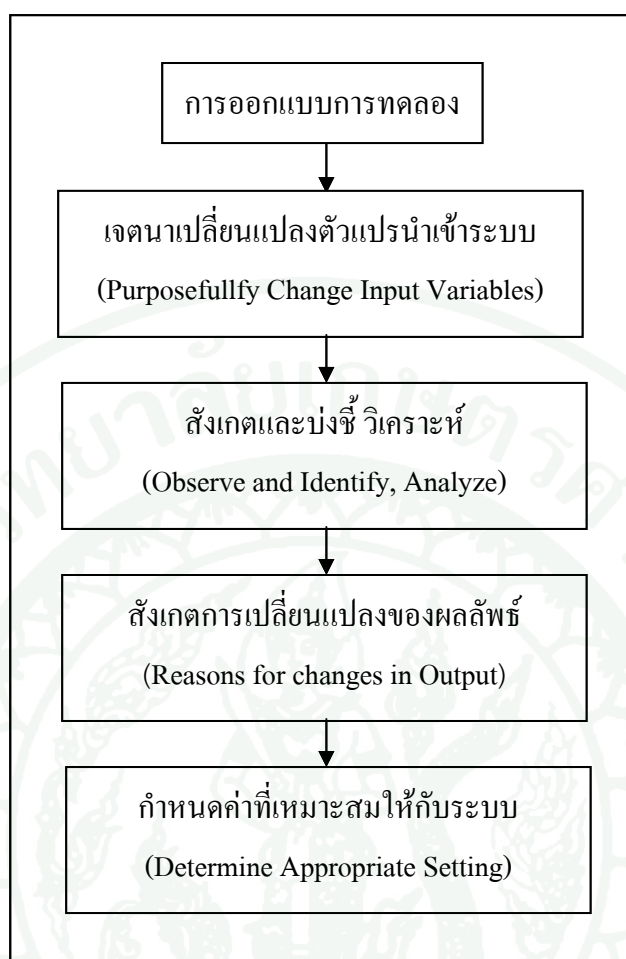
(Factors) แสดงดังภาพที่ 12 ซึ่งการทดลองสามารถทำได้ด้วยวิธีการทดลองปฏิบัติงานจริง (Physical Experiment) หรือการทดลองด้วยการจำลองผล (Simulation)



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ

ที่มา: ประไพศรี และพงศ์ชนัน (2551)

การกำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้และตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ขึ้นอยู่กับระบบแต่ละระบบ ซึ่งโดยหลักการแล้ว ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้หรือตัวแปรรบกวน (Noise Variables) มักจะเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ฝุ่นละออง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เนื่องจากการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งถึงต้นทุนค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้ เช่น ที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต พนักงานที่ควบคุม (ซึ่งในบางระบบอาจพิจารณาให้เป็นตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้) อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต เป็นต้น ในทุกกระบวนการสามารถที่จะระบุและบันทึกไว้เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์ต่อไปได้ ซึ่งหลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 หลักการสำคัญในการออกแบบการทดลอง

ที่มา: ประไพศรี และ พงษ์นัน (2551)

ดังนั้นในภาพรวมของการออกแบบการทดลองจึงมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง โดยเฉพาะใน ส่วนของการออกแบบกระบวนการ ในด้านการกำหนดค่าพารามิเตอร์ หรือค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ ใช้ในระบบหรือกระบวนการ เช่น ในการผลิตน้ำอัดลม การกำหนดส่วนผสมเพื่อให้ได้รสชาติที่ เหมาะสม การกำหนดความเร็วของสายพานเพื่อประโยชน์ในการบรรจุจะทำให้สูญเสีย น้ำอัดลม น้อยที่สุด เป็นต้น

5.2 การออกแบบกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ (Process or Product Design)

การออกแบบกระบวนการหรือผลิตภัณฑ์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. การออกแบบระบบ (System Design) คือ การนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์มาประยุกต์ใช้ในกระบวนการ เพื่อออกแบบต้นแบบ (Basic Prototype) โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของลักษณะทางกายภาพที่ต้องการของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการ
2. การออกแบบค่าพารามิเตอร์ (Parameter Design) คือ การศึกษาเพื่อกำหนดและระบุค่าที่ดีที่สุดและเหมาะสมภายใต้สภาวะเงื่อนไขที่ต้องการให้กับกระบวนการ เช่น การตั้งค่าพารามิเตอร์ในการขับเคลื่อนเพื่อให้เครื่องยนต์กินน้ำมันน้อยที่สุด หรือระยะทาง (กิโลเมตร) ต่อลิตรมากที่สุด การบรรจุไอศกรีมต้องการปริมาณสูญเสียของไอศกรีมน้อยที่สุด การตัดบานกระจกต้องการให้มีขนาดพอดีกับที่ต้องการ เป็นต้น
3. การออกแบบค่าพิถีพิถัน (Tolerance Design) คือ วิธีการกำหนดช่วงหรือพิถีพิถันที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต ที่จะทำให้คุณภาพทางการผลิตสูง และค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานต่ำที่สุด

5.3 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

ก่อนที่จะกล่าวถึงขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง จำเป็นที่จะต้องเข้าใจคำนิยามพื้นฐานที่สำคัญดังนี้

1. ตัวแปรตอบสนอง (Response) คือ ตัวแปรผลลัพธ์ (Output) หรือลักษณะทางคุณภาพ (Quality Characteristic) ที่ต้องการควบคุมให้เป็นตามมาตรฐานที่ต้องการ
2. ปัจจัย (Factors) คือตัวแปรนำเข้า (Inputs) ที่ใช้ในกระบวนการ แบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

3. ระดับปัจจัย (Level of Factors) คือ จำนวนค่าของปัจจัยที่เปลี่ยนไปในการทดลองหนึ่ง เช่น อุณหภูมิที่ใช้ทดลอง เป็น 100 500 และ 900 องศาเซลเซียส แสดงว่า ปัจจัยอุณหภูมิ ทำการศึกษาที่ 3 ระดับ

4. วิธีปฏิบัติ (Treatment) คือ ข้อกำหนดสำหรับทุกปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองนั้นๆ เช่น ถ้าในการทดลองทำการศึกษา ปัจจัย A และปัจจัย B ที่ 2 และ 3 ระดับจะมีวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้แตกต่างกันเท่ากับ $2 \times 3 = 6$ วิธี ซึ่งจะเห็นได้ว่า จำนวนวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้ จะเท่ากับ ผลคูณของระดับของทุกปัจจัยในการทดลอง

5. จำนวนครั้งในการทดลอง (Runs or Experimental Runs) คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อหนึ่งแผนการทดลอง มีค่าเท่ากับผลคูณของ จำนวนวิธีปฏิบัติกับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองซ้ำ (Replicates)

สำหรับขั้นตอนในการออกแบบการทดลองแบ่งได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดปัญหาที่ต้องการจะแก้ไข ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการระบุวัตถุประสงค์ของการทดลอง
2. เลือกปัจจัยที่จะทำการแปรค่าในการทดลอง และจำนวนระดับที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งการเลือกปัจจัยและระดับปัจจัยเป็นส่วนที่แสดงถึงความละเอียดในการทดลองว่าผู้ศึกษา ทำการศึกษามากน้อยเพียงใด
3. กำหนดตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรผลลัพธ์ ซึ่งควรระบุให้ตรงกับปัญหาหรือวัตถุประสงค์ในข้อ 1
4. การเลือกแบบแผนการทดลอง จะขึ้นอยู่กับรายละเอียดของจำนวนปัจจัยที่ใช้ โดยต้องให้ความสนใจถึงความมีประสิทธิภาพทางสถิติและความมี ประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์
5. การทดลองและการเก็บข้อมูล ในการทำการทดลองจะต้องคำนึงถึงหลักการ 3R's ได้แก่ ทดลองอย่างสุ่ม (Randomization) การทำซ้ำ (Replication) และการลดความผิดพลาดในการทดลอง (Reduction of Error) หลักการ RVPP ได้แก่ การทดลองต้องไม่มีอคติ วิเคราะห์ตรงประเด็น (Relevant) การเลือกตัวแปรที่เหมาะสมและสมเหตุสมผล (Validity) การวัดผลที่แม่นยำ (Precise) และการทำได้จริงในทางปฏิบัติ (Practicable) ไม่ว่าจะเป็นด้านค่าใช้จ่าย เวลา และทดลองได้จริง

6. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งผู้ทดลองจะต้องมีความเข้าใจทางทฤษฎีเพียงพอจึงจะมีความสามารถในการตีความผลลัพธ์ทางสถิติได้ระดับหนึ่ง

7. การสรุปผลการทดลองเพื่อยืนยันผลและข้อเสนอแนะ

5.4 วิธีการของทาคุชิ

ดร. ทาคุชิ (Genichi Taguchi) เป็นผู้นำเอาหลักการการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ โดยพยายามปรับให้ง่ายขึ้นในขั้นตอนการวิเคราะห์ผลโดยไม่ใช้การแจกแจงทางสถิติ และตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อสะดวกสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานจริง แต่จะใช้ค่าวัดที่ได้พัฒนาขึ้นเอง ได้แก่ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal – to - Noise Ratios) ซึ่งจำแนกตามลักษณะทางคุณภาพ แบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ

1. กรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger – the Better) เช่น ระยะทางที่รถวิ่งได้ต่อลิตร (กิโลเมตร) ผลผลิตที่ผลิตได้ (Yield (%)) แสดงดังสมการที่ (25)

$$S / N_L = -10 \log \left\{ \sum_{i=1}^n [1 / y^2] / n \right\} \quad (25)$$

เมื่อ S / N_L คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกระบวนการที่ดีที่สุดต้องมีค่ามากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หรือใช้สัญลักษณ์ โดยมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

n คือ จำนวนครั้งของการสังเกต

y_i คือ ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในแต่ละครั้ง

2. กรณีค่าน้อยยิ่งดี (Smaller – the Better) เช่น ความเข้มข้นก๊าซพิษในอากาศ (%) ของเสียในกระบวนการ (%) แสดงดังสมการที่ (26)

$$S / N_s = -10 \log \left(\sum \frac{y_i^2}{n} \right) \quad (26)$$

เมื่อ S / N_s คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของกระบวนการที่ดีที่สุดมีค่าเป็นศูนย์ โดยมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

n คือ จำนวนครั้งของการสังเกต

y_i คือ ข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในแต่ละครั้ง

3. กรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Target – the Better หรือ Norminal the Best) เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของงานเจาะ ปริมาตรบรรจุแป้งเด็ก ค่าความต้านทานแรงดึงของใยผ้า แสดงดังสมการที่ (27)

$$S / N_r = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (27)$$

เมื่อ S / N_r คือ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนกระบวนการที่ดีที่สุดต้องมีค่าเท่ากับที่ได้กำหนดไว้หรือจำกัดไว้ หรือใช้สัญลักษณ์ โดยมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB)

S คือ ค่าความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 ถึง n

$\bar{y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ n

5.5 แบบการทดลองทาคุชิ (Taguchi Design)

แบบการทดลองของทาคุชิ คือการทดลองที่มีลักษณะเป็นแบบการทดลองออร์โทโกนัล อะเรย์ (Orthogonal Array) ซึ่งมีจำนวนครั้งในการทดลองที่น้อยครั้งกว่าเมื่อเทียบกับการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment) แสดงดังตารางที่ 4 และมีความเหมาะสมกับการทดลองนั้นๆ โดยทั่วไปจะเหมาะในการศึกษาผลกระทบปัจจัยหลัก (Main Effects) และ

มีตารางสำเร็จรูปให้เลือกใช้ สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกแบบแผนการทดลอง คือ $L_A B^C$ เช่น โดยที่ A คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อแผน (ไม่รวมการทำซ้ำ) B คือ จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษาและ C คือ จำนวนปัจจัยสูงสุดที่มีได้ในการทดลอง ตัวอย่างตารางแบบแผนการทดลองของ ทากูชิ แสดงดังตารางที่ 5 ถึง 9

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบจำนวนแบบแผนการทดลองระหว่างการออกแบบการทดลองแบบ แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบกับของทากูชิ

ออร์ทอกอนัล อะเรย์	ปัจจัย	ระดับ	แฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ
L_4	3	2	8
L_8	7	2	128
L_9	4	3	81
L_{12}	11	2	2,048
L_{17}	13	3	1,594,323
L_{64}	21	4	4.4×10^{12}
L_{81}	40	4	1.2×10^{19}

ที่มา: อัยฉาสุท (2550)

ตารางที่ 5 ตารางแบบแผนการทดลองของทากูชิ ชนิด $L_4 2^3$

การทดลองที่	ปัจจัย		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

ที่มา: อัยฉาสุท (2550)

ตารางที่ 6 ตารางแบบแผนการทดลองของทาคุชิ ชนิด $L_9 3^4$

การทดลองที่	ปัจจัย			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

ที่มา: อัญญาฤทธิ์ (2550)

5.6 ขั้นตอนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีของทาคุชิ (Step in Taguchi Methodology)

การวิเคราะห์ของทาคุชิ มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากระดับที่ทำให้ค่าของตัววัดทาคุชิ คือ ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน มีค่าสูงสุด (จุดที่ดีที่สุดคือ จุดที่ทำให้ค่า $Max\{S/N\}$ ณ วิธีปฏิบัติของกลุ่มปัจจัยนั้นๆ) แบ่งได้เป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. กำหนดค่าตอบสนอง (y) ที่ใช้วัดผลและวิเคราะห์ปัจจัยเบื้องต้น
2. ระบุปัจจัยแยกเป็น 2 กลุ่ม คือปัจจัยที่ควบคุมได้ และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้
3. ระบุแผนการทดลองที่ใช้
4. ทำการทดลองเก็บรวบรวมข้อมูลและคำนวณค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวนระบบ ตามวัตถุประสงค์ของคุณภาพของระบบที่ศึกษา

5. ในการศึกษาลักษณะทางคุณภาพแบบกรณีค่ายิ่งมากยิ่งดีและค่ายิ่งน้อยยิ่งดี หลังจากคำนวณ S/N_L หรือ S/N_S แล้ว (เข้าไปขั้นตอนที่ 7) กำหนดการจัดหมู่ (Combinations) ของปัจจัยที่ทำให้ค่า S/N สูงสุด ส่วนกรณีที่มีค่าเป้าหมายดีที่สุด ให้ทำการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย (ANOM; Analysis of Mean) เพื่อระบุปัจจัยที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยเพียงอย่างเดียวเพื่อใช้เป็น เพื่อใช้เป็นตัวแปรปรับค่า (Adjustment Variable) เพื่อปรับให้ค่าตอบสนอง มีค่าตรงกับเป้าหมาย หรือใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายมากที่สุด

6. กำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุด ณ จุดที่ทำให้ค่า $Max\{S/N_r\}$ ยกเว้นตัวแปรที่ใช้ในการปรับค่า ให้กำหนดระดับ ณ จุดที่ทำให้ค่าตอบสนองเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมายมากที่สุด โดยสร้างสมการพยากรณ์ความสัมพันธ์ตามหลักการออกแบบการทดลอง

7. ในระดับปฏิบัติการจริง ทำการทดลองเพื่อยืนยันผล ว่าค่าที่กำหนดเป็นค่าที่ดีที่สุดจริง (Confirmation Runs)

6. บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hoang (2007) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรมร่วมกับวิธีของทากูชิในการหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกของจอยสติ๊ก (Joystick) ในการศึกษาจะใช้โปรแกรม Moldflow จำลองกระบวนการขึ้นรูปในเงื่อนไขที่เหมาะสม เช่น เวลาในการฉีด ความเร็วในการฉีด อุณหภูมิในการหลอมเหลว ความดันในการอัด และเวลาการทำงานทั้งวงจร (Cycle Time) เนื่องจากบริเวณของชิ้นงานที่ปริมาตรมีการหดตัวสูงจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาชิ้นงานโก่งงอ (Warpage) การวิจัยนี้จึงศึกษาเปรียบเทียบวัสดุพลาสติก 2 ชนิดคือ พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) กับอะคริโลไนไตรล์ บิวทาไดน สไตรีน (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS) จากการวิจัยพบว่าผลลัพธ์ที่ขึ้นอยู่กับกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดจะมีต่อการผลิต ปัจจัยบางส่วนจะถูกพิจารณาาร่วมกัน เช่น อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold Temperature) อุณหภูมิในการหลอมเหลว (Melt Temperature) ความดันในการอัด (Packing Pressure) เวลาในการอัด (Packing Time) เวลาในการหล่อเย็น (Cooling Time) เวลาในการฉีด (Injection Time) ความดันในการฉีด (Injection Pressure) และเวลาของการเปิดแม่พิมพ์ (Open Time) เนื่องจากผลกระทบหลักของการโก่งงอของชิ้นงานเป็นผลมาจากอุณหภูมิในการหลอมเหลวและความดันในการอัด อันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างอุณหภูมิของแม่พิมพ์และ

อุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิในการหลอมเหลวและความดันในการอัด และอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบของเวลาการทำงานทั้งวงจร ผลการตรวจสอบพฤติกรรมระหว่างกลุ่มปัจจัยดังกล่าวที่มีผลกระทบต่อการโค้งงอของชิ้นงาน PS ที่ออกทอคอนด อะเรียซ์ของ $L_{27} 3^{12}$ จะถูกเลือกในการผลิตจอยสติ๊ก ส่วน ABS ที่ออกทอคอนด อะเรียซ์ของ $L_{18} 3^8$ ปัจจัยมีผลกระทบมากต่อการโค้งตัวของชิ้นงาน

Villarreal *et al.* (2008) ได้นำเสนอวิธีการจำลองที่เหมาะสมที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยใช้กับการฉีดขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ ซึ่งอาศัยการออกแบบการทดลองและเทคนิคการปรับแบบเมตาโมเดล (Adaptive Metamodeling Techniques) โดยสามารถใช้กับการหาค่าทั่วไปที่เหมาะสมของฟังก์ชันทดสอบ (Test Function) โดยทั่วไปรวมทั้งฟังก์ชันพหุนามแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวิธีนี้สามารถใช้เลือกเงื่อนไขของกระบวนการฉีดขึ้นรูปโพลิสไตรีนที่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมธรรมดา และชิ้นงานยานยนต์จริงที่เกณฑ์ประสิทธิภาพต่างๆ กันได้ เช่นกันชนรถยนต์ที่ทำจากพอลิโอฟิฟิน (Polyopefin, TPO)

Chen *et al.* (2009) ได้ทำการประยุกต์คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ร่วมกับเทคนิคทางสถิติ (Statistical Technique) เพื่อลดรูปแบบการโค้งงอของชิ้นงานที่ขึ้นกับพารามิเตอร์ (Parameter) ของกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกของเปลือกบาง (Thin-Shell) โดยใช้โปรแกรม Moldflow การร่วมกันของพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ 3 ระดับของ L_{18} ออกทอคอนด อะเรียซ์ โดยทำการออกแบบการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ในการวิจัยนี้จะเห็นได้ว่ารูปแบบที่ถดถอย (Regression Model) นั้นเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ที่ถูกควบคุม ซึ่งเป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ ส่วนรูปแบบที่ยังไม่ได้กำหนดสามารถใช้คาดการณ์การโค้งงอของชิ้นงานที่เงื่อนไขการฉีดขึ้นรูปในแบบต่างๆ อุณหภูมิในการหลอมเหลวและความดันในการอัดเป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญมากที่สุดทั้งในส่วนของการจำลองการฉีดและการฉีดจริงสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกของเปลือกบาง

Tsai *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ของกระบวนการที่มีต่อคุณภาพทางแสงของเลนส์ (Lenses) ระหว่างการฉีดขึ้นรูป ลักษณะของคุณภาพที่เลือกคือการส่องผ่านของแสง ความเป็นคลื่นของผิวและผิวสำเร็จ วิธีของทากูชิถูกใช้ในการคัดปัจจัยออก (Screening Exoeriment) ที่ระบุถึงความสำคัญของนัยสำคัญต่อพารามิเตอร์ของกระบวนการที่มีผลกระทบต่อนคุณภาพของเลนส์ ผ่านประสบการณ์และการวิเคราะห์ทางทฤษฎี พารามิเตอร์ของกระบวนการที่มี

นัยสำคัญมากที่สุดมีผลกระทบต่อความเป็นคลื่นของผิวคืออุณหภูมิในการหลอมเหลว อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ความดันในการฉีด และความดันในการย่ำ ส่วนอื่นๆ ของพารามิเตอร์ของกระบวนการฉีดขึ้นรูปมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อการส่องผ่านของแสงและผิวสำเร็จ การถดถอยถูกสร้างจากข้อมูลความเป็นคลื่นของผิวจากการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiment) เพื่อกำหนดรูปแบบการถดถอยสำหรับคาดการณ์ลักษณะคุณภาพของเลนส์ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงการคาดการณ์ที่ถูกต้องอย่างสูงของความเป็นคลื่นของผิวจากรูปแบบการถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Regression Model) ซึ่งมีความผิดพลาดเพียง 4.24 เปอร์เซ็นต์

Ozcelik and Sonat (2009) ได้ทำการศึกษาฝาครอบโทรศัพท์แบบเชลล์เปลือกบาง (Thin Shell Phone Cover) ที่ผลิตด้วยพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และ ABS เพื่อที่ตัดสินใจว่าจะเลือกเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) แบบใด ประการแรกผลกระทบของพารามิเตอร์ของการฉีดต่อการโค้งงอที่ความหนาที่มีค่าแตกต่างกันที่ตรวจสอบโดยวิธีของทาเกชิ ค่าความโค้งงอจะถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldflow (MPI) 4.0 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อการโค้งงอของวัสดุ PC/ABS คือความดันในการย่ำ ประการที่สองกำหนดแรงที่เป็นสาเหตุทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกเกิดการเสียหายตามจุดที่กำหนดบนผิวของฝาครอบโทรศัพท์แบบเชลล์เปลือกบางโดยใช้โปรแกรม CATIA V5R12 ในการวิเคราะห์โครงสร้างของ ABS, PC เป็นการเสริมสร้างความแข็งแรงให้กับ ABS, PC/ABS วัสดุเทอร์โมพลาสติกที่เพิ่มเข้าไปใน PC/ABS ถูกใช้ในการผลิตโทรศัพท์จะเป็นบอกระดับที่กำหนดความมีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาว่าการวิเคราะห์โครงสร้างจะเห็นได้ว่า วัสดุที่แข็งแรงที่สุดคือเสริม 15% ของใยคาร์บอน เสริมเข้าไปใน PC/ABS 15 เปอร์เซ็นต์ของใยคาร์บอน เสริมเข้าไปใน ABS, PC, PC/ABS และ ABS ตามลำดับ และสามารถวิเคราะห์จุดที่มีความวิกฤตมากที่สุดบนผิวของฝาครอบโทรศัพท์แบบเชลล์เปลือกบางได้

Lindsay (1999) ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสูญเสียในการการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง ตั้งแต่การออกแบบผลิตภัณฑ์ไปจนถึงการปรับตั้งเงื่อนไขในการฉีดขึ้นรูป อิทธิพลของส่วนผสมและสารเติมเต็ม (Additives) บางอย่างที่มีผลต่อเสียดค้ำในเบ้าแม่พิมพ์ (Cavity) รวมทั้งคำหน้าที่ชิ้นงานที่ได้จากการฉีด นอกจากนี้ยังกล่าวถึงการนำระบบบริหารงานคุณภาพ ISO 9001 มาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และให้ตระหนักถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นจากชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสูงและมีพิสัยความคลาดเคลื่อนที่ต่ำ รวมถึงความร่วมมือกันระหว่างผู้ผลิตและผู้ลูกค้าในแต่ละขั้นตอนเพื่อให้ผู้ผลิตสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้ตรงตามความต้องการของลูกค้า ทั้งคุณภาพ ราคา และระยะเวลาในการส่งมอบและจำนวนที่ต้องการ

อรรถพล (2545) ได้ทำการศึกษาขั้นตอนการประยุกต์ใช้ CAD/CAE/CAM สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก และการปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติกที่จะเป็น แนวทางการนำเสนอเกี่ยวกับภาคอุตสาหกรรมที่ผลิตชิ้นส่วนที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกโดยควรรู้ขั้นตอน การออกแบบรวมไปถึงทำอะไรให้ได้ผลิตภัณฑ์นั้นตรงตามความต้องการการใช้งานของลูกค้า และทำให้สามารถประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้

เสกสรรค์ (2549) ได้ทำการศึกษาขั้นตอนการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรมในการหาสถานะเหมาะสมในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง NR40 โดยที่ค่าตัวแปรที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคือ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ความเร็วในการฉีด เวลาในการฉีด และคุณสมบัติของยางที่ได้จากการทดสอบ เป็นต้น จากนั้นเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการฉีดและการฉีดจริงจากแม่พิมพ์ที่ทำการออกแบบ ทำให้ได้ผลที่สอดคล้องในระดับหนึ่ง

อุปกรณ์และวิธีการ

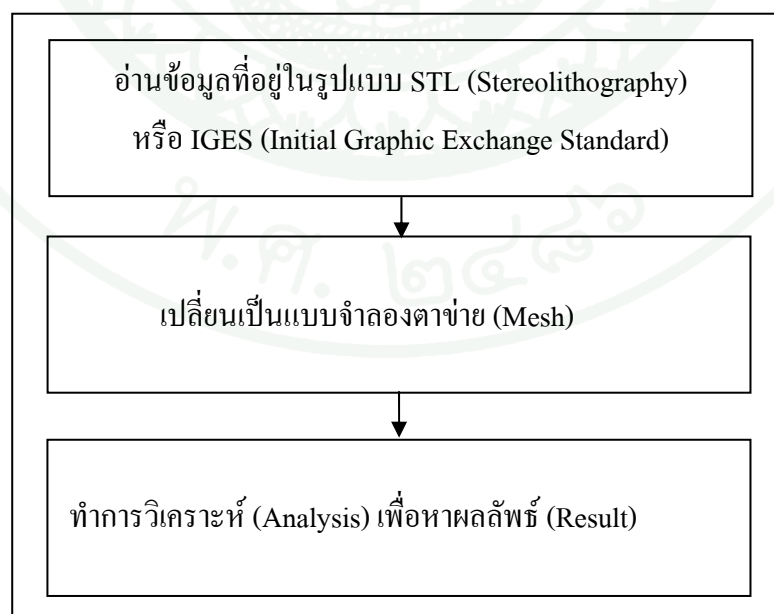
อุปกรณ์

อุปกรณ์และวัสดุที่สำคัญสำหรับการทำวิจัย ได้แก่

1. โปรแกรม CADMOULD 3D-F RUBBER
2. เครื่องคอมพิวเตอร์
3. ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป
4. เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยางคอมพาวด์
5. เครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

1. โปรแกรม CADMOULD 3D-F RUBBER

CADMOULD 3D-F RUBBER เป็นโปรแกรมจำลองการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่ใช้หลักการของไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) หรือเรียกอีกอย่างว่า Finite Element Analysis, FEA) โดยมีหลักการทำงานของโปรแกรม แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 หลักการทำงานของโปรแกรม CADMOULD 3D-F RUBBER

2. คอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การไหลของยาง และการออกแบบแม่พิมพ์

เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับการติดตั้งโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง มีสมบัติดังนี้

1. CPU Intel (R) Xeon (R) W3503 ที่ความถี่ 2.4 GHz
2. ฮาร์ดดิสก์ Hitachi HDT721050SLA360 ที่ความจุ 500.1 GB
3. RAM ที่ความจุ 12 GB
4. การ์ดแสดงผล NVIDIA Quadro FX 580 ที่ความจุ 512 MB
5. ระบบปฏิบัติการ Window XP Professional

3. ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูป

ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในการขึ้นรูปคือ EPDM ความแข็ง 50 Shore A โดยสมบัติต่างๆ ทางฟิสิกส์ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบทางเคมีของสูตรยาง และลักษณะของยางคอมพาวด์ดังกล่าว แสดงดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 ยางคอมพาวด์ที่ใช้ในการขึ้นรูปคือ EPDM ความแข็ง 50 Shore A

4. เครื่องมือทดสอบคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของยางคอมพาวด์

4.1 เครื่อง Electronic Densimeter (MD-200S)

เครื่อง Electronic Densimeter (MD-200S) วัดค่าความหนาแน่นของยางคอมพาวด์ (Hydrostatic Method) โดยใช้ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 2781/ASTM D 297 แสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 เครื่อง Electronic Densimeter (MD-200S)

4.2 เครื่อง Capillary Rheometer (RHEO – TESTER 2000)

เครื่อง Capillary Rheometer (RHEO – TESTER 2000) วิเคราะห์คุณสมบัติการไหลของยางคอมพาวด์ แสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 เครื่อง Capillary Rheometer (RHEO – TESTER 2000)

4.3 เครื่อง Moving Die Rheometer (TECHPRO, Rheotech MD+)

เครื่อง Moving Die Rheometer (TECHPRO, Rheotech MD+) วัดลักษณะการคงรูปของยางคอมพาวด์ แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 เครื่อง Moving Die Rheometer (TECHPRO, Rheotech MD+)

4.4 เครื่อง Mettler Toledo DSC822

เครื่อง Mettler Toledo DSC822 วัดค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, C_p) แสดงดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 เครื่อง Mettler Toledo DSC822

4.5 เครื่อง Thermoflizer (SWO Polymertechnik GmbH)

เครื่อง Thermoflizer วัดค่าการนำความร้อน (Specific heat conductivity, Λ) ตามมาตรฐานการทดสอบ ANTEC '88/609-611 แสดงดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 เครื่อง Thermoflizer

5. เครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง

เครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแนวตั้งยี่ห้อ Lin Cheng รุ่น IRH-450 S3 แรงบีดแม่พิมพ์ (Clamping Force) 300 ตัน ความดันไฮดรอลิก (Hydraulic Pressure) 200 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ความจุกระบอกลัด 3000 ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งลักษณะของเครื่อง แสดงดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 เครื่องฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางแนวตั้งยี่ห้อ Lin Cheng รุ่น IRH-450 S

วิธีการวิจัย

1. สํารวจงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษากระบวนการคิดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อย่างตัวอย่าง และวิเคราะห์ข้อมูลผลิตภัณฑ์yangที่
เสียบ่อนหลังจากสถานประกอบการ เพื่อหาสาเหตุและวิธีแก้ไข
3. วิเคราะห์และพิจารณาเลือกปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการคิดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์yang
ตัวอย่าง
4. วางแผนออกแบบการทดลองที่เหมาะสมด้วยวิธีการสถิติ
5. จำลองการคิดและวิเคราะห์การไหลของยางด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการ
วิเคราะห์ทางวิศวกรรม และเก็บข้อมูล
6. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้โดยใช้หลักการทางสถิติ
7. ทดลองคิดจริงตามที่วิเคราะห์มา
8. ทำการสรุปผลการวิจัยและจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์

การดำเนินการวิจัย

1. การเลือกผลิตภัณฑ์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา และการกำหนดปัญหาที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์

งานวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือและสนับสนุนจาก บริษัท เอส เค โพลีเมอร์ จำกัด ซึ่งดำเนิน
ธุรกิจในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยใช้แม่พิมพ์ในการอัดและฉีดขึ้นรูป จากการประชุมร่วมกัน
ระหว่างผู้ทำการวิจัย ผู้ร่วมทำการวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนของสถานประกอบการและอาจารย์ที่
ปรึกษา ได้ผลสรุปในการเลือกผลิตภัณฑ์เพื่อเป็นกรณีศึกษา คือ ลื่นกันน้ำในเครื่องซักผ้า (P.V.
Bellow) โดยใช้วัสดุเป็น ยางอีพดีเอ็ม (Ethylene – Propylene – Terpolymer, EPDM) แสดงดังภาพ
ที่ 22



ภาพที่ 22 ล้นกันน้ำในเครื่องซักผ้าที่นำมาเป็นกรณีศึกษา

จากการเก็บข้อมูลผลิตภัณฑ์ ณ สถานประกอบการ เพื่อพิจารณาถึงลักษณะของผลิตภัณฑ์ ข้างตัวอย่างที่ดีและเสีย ในส่วนของจุดที่ต้องการควบคุมคุณภาพ (Quality Point) พบปัญหาสำคัญ คือ การเกิดจุดดักอากาศในบริเวณต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ข้างตัวอย่าง ประมาณ 3 เปอร์เซ็นต์ของ ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด แสดงดังภาพที่ 23 ถึง 25 ตามลำดับ



ภาพที่ 23 การเกิดจุดดักอากาศในบริเวณส่วนบนของผลิตภัณฑ์ข้างตัวอย่าง



ภาพที่ 24 การเกิดจุดดักอากาศในบริเวณส่วนลำตัวของผลิตภัณฑ์อย่าง

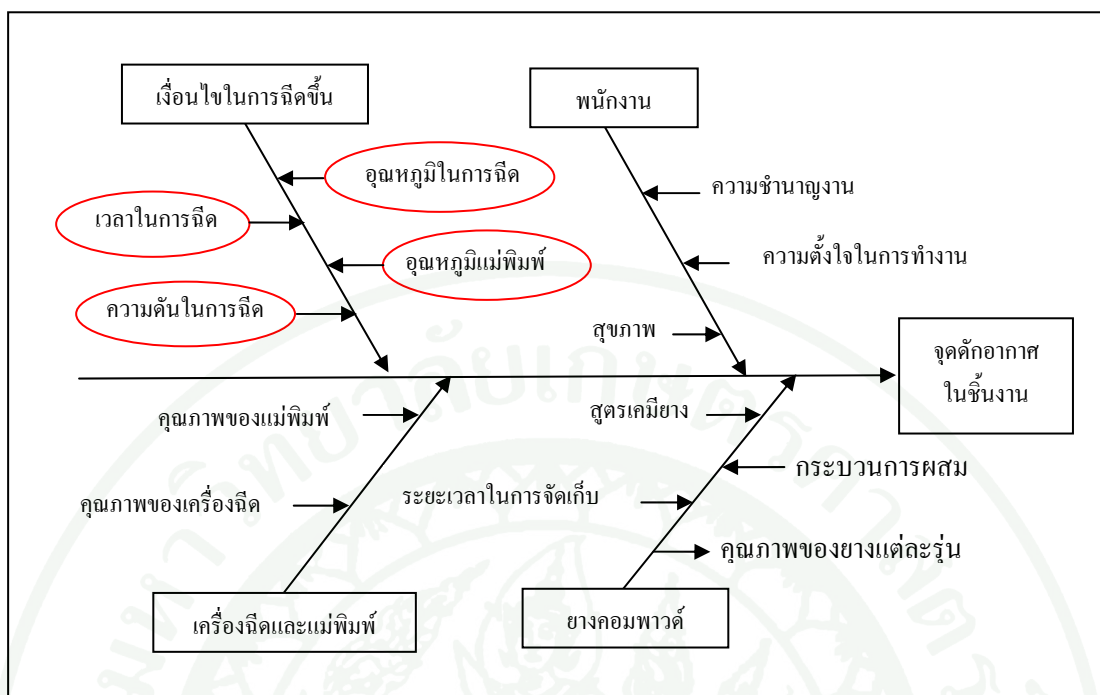


ภาพที่ 25 การเกิดโพรงอากาศในบริเวณส่วนขอบของผลิตภัณฑ์อย่าง

2. การวางแผนการทดลอง

2.1 การกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่จะนำมาพิจารณา

ทำการระดมความคิดกับผู้ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยทั้งหมด เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุและผล จากนั้นกำหนดปัจจัยที่ต้องการควบคุม 4 ปัจจัย แสดงดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 แสดงเหตุและผล โดยปัจจัยที่อยู่ภายในสัญลักษณ์วงรีคือปัจจัยที่เลือกมาออกแบบการทดลอง

โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และเหตุผลในการเลือกปัจจัย ดังนี้

ก. เวลาในการฉีด (Injection Time) คือ 7, 12, 17 วินาที ตามลำดับ และมีเหตุผลในการเลือก คือ เวลาในการฉีดขึ้นรูปจะต้องน้อยที่สุดและเสร็จสิ้นภายในช่วงเวลาสกอรัซ (Scorch Time) เนื่องจากยางยังสามารถไหลได้ ถ้าเวลาในการฉีดมากเกินไปอากาศจะระบายออกจากแม่พิมพ์ไม่ทัน ทำให้อากาศเกิดการไหลย้อนกลับเข้าไปอยู่ในเนื้อยางตรงบริเวณแนวประกบของแม่พิมพ์ (Parting Line)

ข. ความดันในการฉีด (Injection Pressure) คือ 60, 70, 80 บาร์ เซ็นต์ของความดันฉีดสูงสุด ตามลำดับ และมีเหตุผลในการเลือกคือ ความดันในการฉีดของยางเหลวในหัวฉีดจะต้องมีค่าเท่ากับผลรวมของความดันที่ใช้ในการขับยางเหลวในทางวิ่งรวมกับความดันฉีดที่ตำแหน่งทางเข้าเพื่อใช้ในการป้อนเนื้อยางเข้าแม่พิมพ์ แทนที่อากาศที่อยู่ภายใน

ก. อุณหภูมิในการฉีด (Injection Temperature) คือ 80, 90, 100 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีเหตุผลในการเลือกคือ อุณหภูมิในการฉีดมีผลต่อค่าความหนืดในการไหลของยาง ถ้าอุณหภูมิยิ่งสูงยางจะฉีดได้ง่าย แต่ต้องมีค่าอยู่ในช่วง ซึ่งขึ้นอยู่กับสูตรเคมีของยางประกอบการ

ง. อุณหภูมิแม่พิมพ์ (Mould Temperature) คือ 160, 170, 180 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และมีเหตุผลในการเลือกคือ อุณหภูมิแม่พิมพ์จะต้องอยู่ไม่เกินเวลาคงรูป ของสูตรเคมี ยางนั้นๆ เพื่อให้ยางสุกมากเกินไป อาจทำให้ยางไหม้และกรอบได้

ส่วนปัจจัยอื่น ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้จะไม่นำมาพิจารณา

2.2 การกำหนดผลตอบแทนที่ต้องการศึกษา โดยได้ผลจากการจำลองการฉีดด้วยโปรแกรม

ในการวิจัยนี้จะศึกษาผลตอบแทนที่สำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง ซึ่งเป็นความสมบูรณ์ของชิ้นงานในด้านของจุดค้ำอากาศ

2.3 การเลือกตารางการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองที่มีผลการทดลองที่เที่ยงตรงที่สุด คือ การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full Factorial Design) ซึ่งการทดลองดังกล่าวเหมาะสมกับการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยในการทดลองไม่มากนัก แต่ถ้ามี 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ จะมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 3^4 หรือเท่ากับ 81 การทดลอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าต้องเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลองค่อนข้างสูง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงเลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองด้วยวิธีทางสถิติ แบบไม่ทดลองซ้ำเนื่องจากผลการทดลองได้จากผลการทดลองได้จากการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method, FEM) โดยใช้ตารางออกทอกอนอล อะเรย์ แสดงดังตารางที่ 7

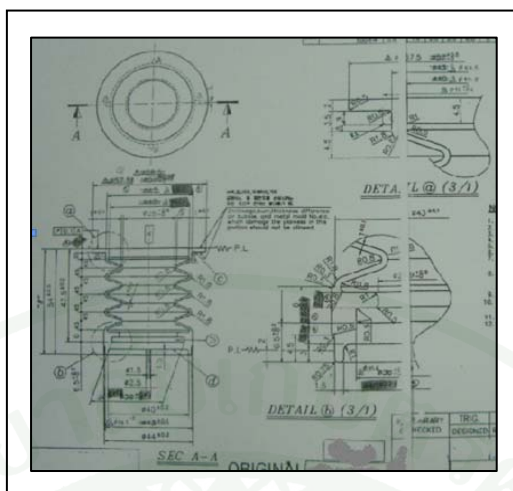
ตารางที่ 7 ตารางมาตรฐานออกทอกอนอล อะเรย์ $L_9 3^4$ ที่ 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ

การทดลอง	ปัจจัย			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

3. การจำลองการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE)

3.1 การสร้างแบบ 3 มิติแบบทรงตัน (Solid Model) ของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างกรณีศึกษา

เนื่องจากผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่างที่นำมาเป็นกรณีศึกษาไม่มีแบบ 3 มิติแบบทรงตัน (Solid Model) โดยทางสถานประกอบการมีเพียงแบบ 2 มิติ แสดงดังภาพที่ 27 ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการเขียนแบบทรงตัน 3 มิติของผลิตภัณฑ์ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer Aided Design, CAD) แสดงดังภาพที่ 28 เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนของกระบวนการจำลองการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ ต่อไป



ภาพที่ 27 แบบ 2 มิติของผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง

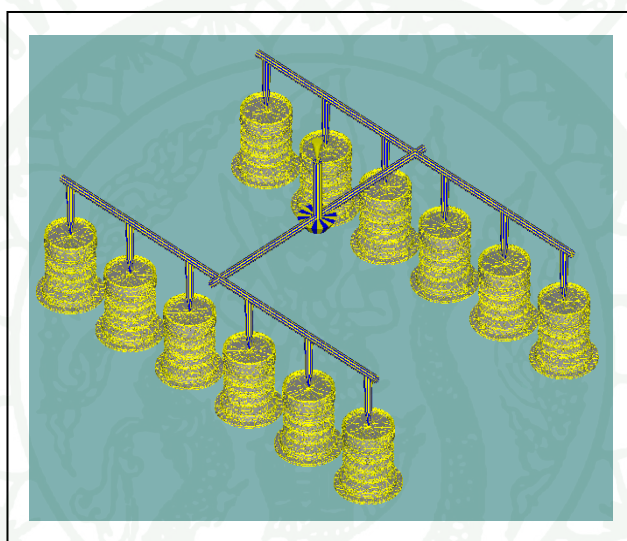


ภาพที่ 28 แบบ 3 มิติแบบทรงตัน ของผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง

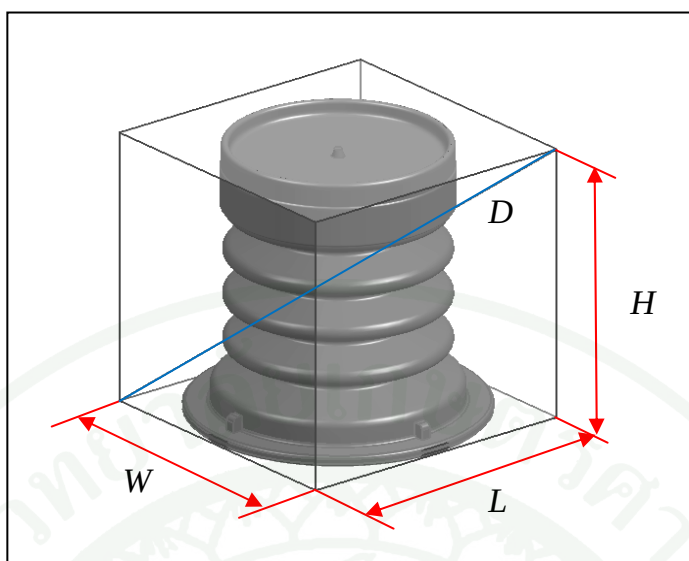
3.2 การสร้างแบบ 3 มิติทรงตัน ชนิด Stereolithography (STL) ของผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง การแบ่งขนาดเอลิเมนต์ (Enmeshment) รวมทั้ง การสร้างทางเข้า (Gate) และรูวิ่ง (Runner)

สร้างแบบ 3 มิติแบบทรงตัน STL ของผลิตภัณฑ์ยางตัวอย่าง (จากนั้นสร้างทางเข้า และรูวิ่ง ให้ตรงตามแบบของชิ้นงานและแม่พิมพ์ที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยาง ตัวอย่าง แสดงดังรูปที่ 29 ทำการแบ่งขนาดเอลิเมนต์สามเหลี่ยม (Triangular Elements) เป็น 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 และ 5 เฟอร์เซ็นต์ ตามลำดับของความยาวเส้นทะแยงมุม (Diagonal Line, D) ของกล่อง

ขอบเขต (Bounding Box) ที่สัมพันธ์กับขอบชิ้นงาน แสดงดังภาพที่ 30 โดยที่ ความกว้าง (Width, W) ความยาว (Length, L) และความสูง (Height, H) ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ในการแบ่งเอลิเมนต์ แสดงดังตารางที่ 8 เพื่อใช้ในการกำหนดจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากความดันสูญเสีย (Pressure Loss) ในการจำลองการฉีดขึ้นรูป ระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณ (Central Processing Unit Time, CPU Time) กับจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมดของผลิตภัณฑ์ ทางเข้าและรูปร่าง เมื่อกำหนดให้ เวลาในการฉีด 17 วินาที ความดันในการฉีด 80 บาร์ เซ็นต์ของความดันสูงสุด อุณหภูมิในการฉีด 100 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 180 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 29 แบบ 3 มิติแบบทรงตัน ชนิด STL ของผลิตภัณฑ์อย่างตัวอย่างที่แบ่งเอลิเมนต์แล้ว รวมทั้งทางเข้า และรูปร่าง



ภาพที่ 30 กล่องขอบเขต (Bounding Box) ที่สัมผัสกับขอบชิ้นงาน

ตารางที่ 8 รายละเอียดต่างๆ ในการแบ่งเอลิเมนต์

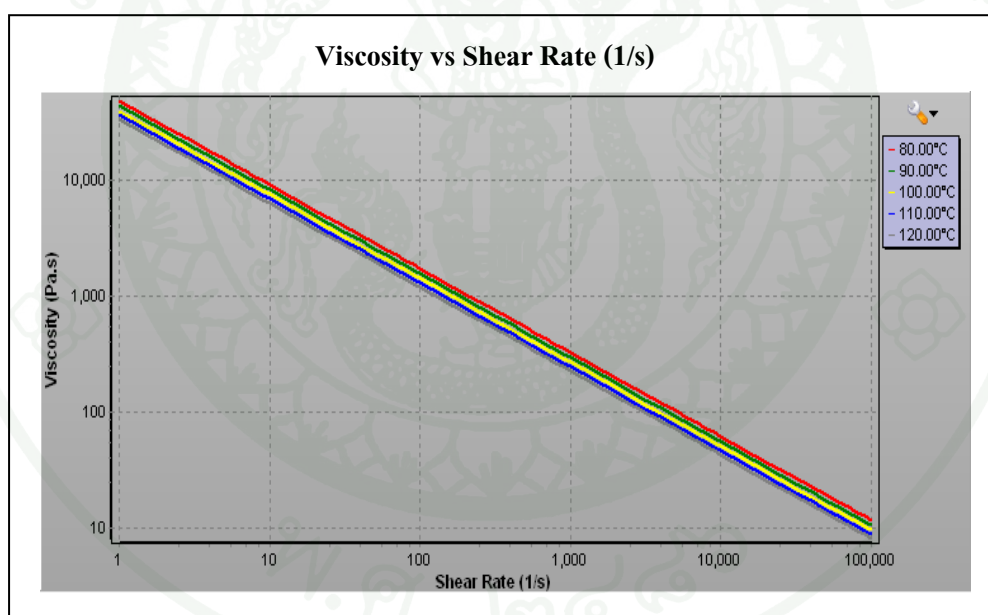
ขนาด เอลิเมนต์ (%)	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)	ความสูง (mm)	ความยาว เส้นทะแยงมุม (mm)	ระยะทาง ระหว่างจุด ของเอลิเมนต์ (mm)	ความหนา ชิ้นงาน (mm)	จำนวน เอลิเมนต์
2.5	57.5	57.5	54	97.614	2.440	0.8-4.92	305,765
3	57.5	57.5	54	97.614	2.928	0.8-4.92	263,549
3.5	57.5	57.5	54	97.614	3.146	0.8-4.92	212,177
4	57.5	57.5	54	97.614	3.904	0.8-4.92	197,477
4.5	57.5	57.5	54	97.614	4.393	0.8-4.92	173,945
5	57.5	57.5	54	97.614	4.881	0.8-4.92	143,873

3.3 การกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ได้จากการทดสอบจริงและค่าเริ่มต้นต่างๆ (Initial Conditions)

ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ จำเป็นต้องนำบางที่จะใช้ในการฉีดขึ้นรูปไปทดสอบหาค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่สำคัญ ดังนี้

- 1) ค่าความหนาแน่น (Density, ρ)
- 2) ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity, C_p)
- 3) ค่าการนำความร้อน (Specific Heat Conductivity, λ)
- 4) ค่าความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือน (Viscosity as Function of Shear Rate)
- 5) อัตราการบ่ม (Curing Rate)

แล้วจึงกำหนดคุณสมบัติของวัสดุยางที่ได้จากการทดสอบจริงและค่าเริ่มต้นต่างๆ ที่จำเป็นในการจำลองการฉีดขึ้นรูป แสดงดัง ภาพที่ 31 และตารางที่ 9



ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด (Viscosity) ของยางกับอัตราเฉือน (Shear Rate) ที่อุณหภูมิ 80, 90, 100, 110 และ 120 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 9 ค่าเริ่มต้นต่างๆ ในการจำลองการฉีดขึ้นรูป

ค่าเริ่มต้น	ค่าที่กำหนด
ความดันในการฉีดสูงสุดของเครื่องฉีด (bar)	2,500
เวลาในการคงรูป (s)	200
แรงปิดแม่พิมพ์ (kN)	3,000
อัตราการคงรูปที่น้อยที่สุด (%)	75
อัตราการคงรูปเฉลี่ย (%)	95
อัตราการคงรูปมากที่สุด (%)	100
ความหนาแน่น (g/cm^3)	1.11
ค่าการนำความร้อน ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	0.26

3.4 การจำลองและวิเคราะห์ผลการไหลของยางในแม่พิมพ์ เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดสอบการฉีดขึ้นรูป

จำลองและวิเคราะห์ผลการไหลของยางในแม่พิมพ์ เพื่อหาความสัมพันธ์ในรูปของความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหล และจำนวนฟองอากาศที่เกิดขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับการทดสอบการฉีดขึ้นรูป ในการหาสภาวะการฉีดขึ้นรูปที่เหมาะสมที่สุด

ผลและวิจารณ์

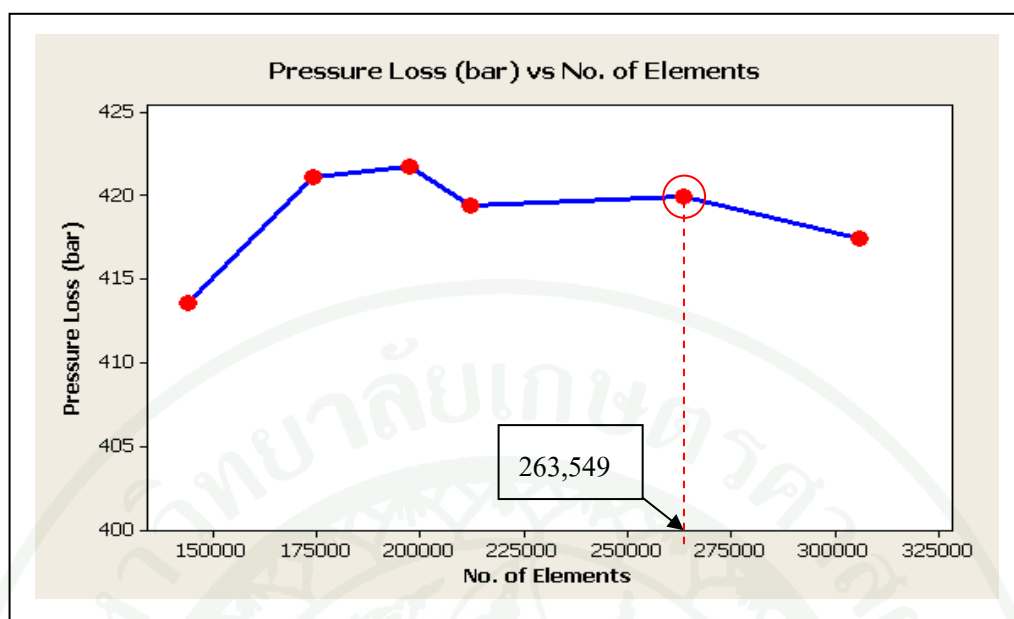
1. การวิเคราะห์หาจำนวนอิเล็กเมนต์ที่เหมาะสม

ผลการจำลองการฉีดขึ้นรูปเพื่อหาจำนวนอิเล็กเมนต์ที่เหมาะสม แสดงดังตารางที่ 10 ได้ดังนี้

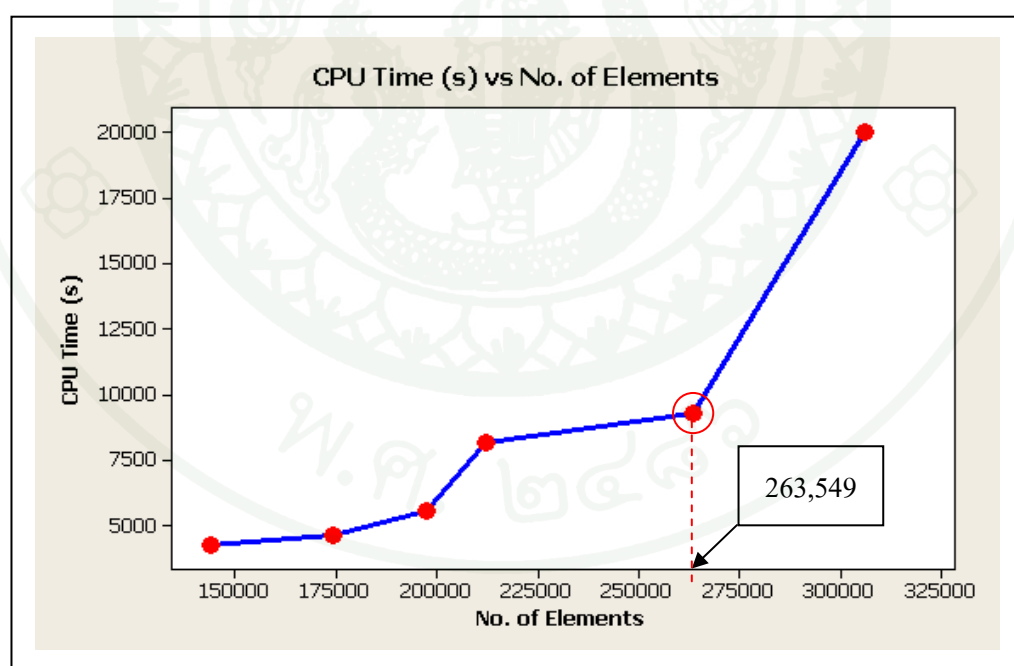
ตารางที่ 10 ความดันสูญเสีย ระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณและจำนวนอิเล็กเมนต์

ความดันสูญเสีย (bar)	ระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลาง ใช้ในการคำนวณ (s)	จำนวนอิเล็กเมนต์
413.6	4,266	143,873
421.1	4,626	173,945
421.8	5,526	197,477
419.4	8,168	212,177
420	9,260	263,549
417.5	20,002	305,765

จากตารางที่ 10 ข้อมูลที่ได้จากการจำลองการฉีดขึ้นรูป เมื่อนำมาพิจารณาหาความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสีย ระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณ และจำนวนอิเล็กเมนต์ แสดงดังภาพที่ 32 และ 33 ตามลำดับ พบว่า ความดันสูญเสียมีค่าลู่เข้า เมื่อจำนวนอิเล็กเมนต์มีค่า 212,177-305,765 โดยที่จำนวนอิเล็กเมนต์ 263,549 ให้ค่าความดันสูญเสีย 420 บาร์ ในขณะที่จำนวนอิเล็กเมนต์ 305,765 ให้ค่าความดันสูญเสีย 417.5 บาร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าจำนวนอิเล็กเมนต์ยิ่งมาก ค่าความดันสูญเสียที่ได้จากการวิเคราะห์ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปไม่ได้เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่ระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณคือ 9,260 วินาที กับ 20,002 วินาที นั้นแตกต่างกันถึง 2.16 เท่า ดังนั้นจึงเลือกใช้จำนวนอิเล็กเมนต์ที่เหมาะสมคือ 263,549



ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันสูญเสียกับจำนวนเอลิเมนต์



ภาพที่ 33 ระยะเวลาที่หน่วยประมวลผลกลางใช้ในการคำนวณกับจำนวนเอลิเมนต์

2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่ดีที่สุดในการจำลองการฉีดขึ้นรูป

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่ดีที่สุดในการฉีดขึ้นรูปเมื่อ ผลตอบสนองคือ ความสมบูรณ์ของชิ้นงานในด้านจุดดักอากาศ ผลการจำลองการฉีดขึ้นรูปแสดงดังตารางที่ 11 และ 12 ตามลำดับ โดยที่ y_i คือข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในแต่ละครั้ง (จำนวนจุดดักอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนบนและขอบของชิ้นงานทั้งหมดรวมกัน) ซึ่งค่าความต้องการของค่าตอบสนองของกระบวนการที่ดีที่สุดในการนี้เข้าข่ายการวิเคราะห์แบบยิ่งน้อยยิ่งดี และไม่พิจารณาปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ สามารถใช้หลักการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยโดยทั่วไปสำหรับการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 11 ปัจจัยและระดับในการทดลอง

	ปัจจัย	ระดับ		
		1	2	3
A	เวลาในการฉีด (s)	7	12	17
B	ความดันในการฉีด (%)	60	70	80
C	อุณหภูมิในการฉีด (°C)	80	90	100
D	อุณหภูมิแม่พิมพ์ (°C)	160	170	180

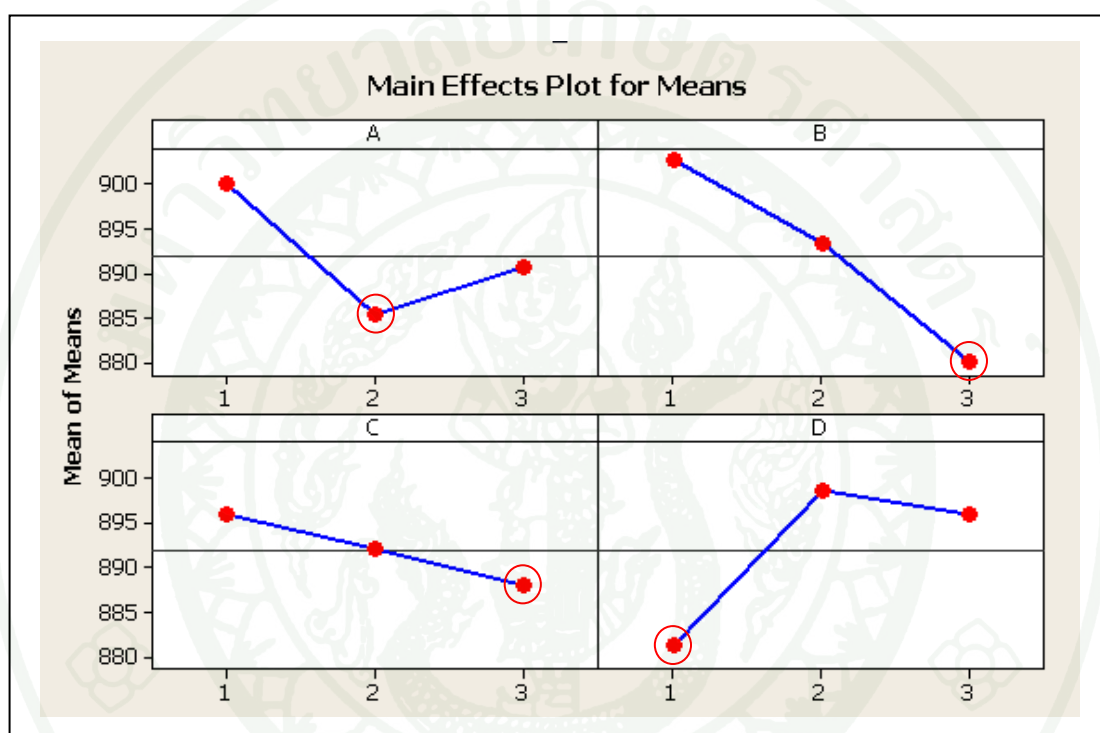
ตารางที่ 12 ผลการจำลองการฉีดขึ้นรูปตามตารางมาตรฐานออกทอกอนอลอะเรย์ L_93^4 ที่ 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ

การทดลองที่	A	B	C	D	y_i
1	7	60	80	160	904
2	7	70	90	170	908
3	7	80	100	180	888
4	12	60	90	180	900
5	12	70	100	160	872
6	12	80	80	170	884
7	17	60	100	170	904
8	17	70	80	180	900
9	17	80	90	160	868

ตารางที่ 13 ค่าเฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการจำลองการฉีด เมื่อไม่พิจารณาปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

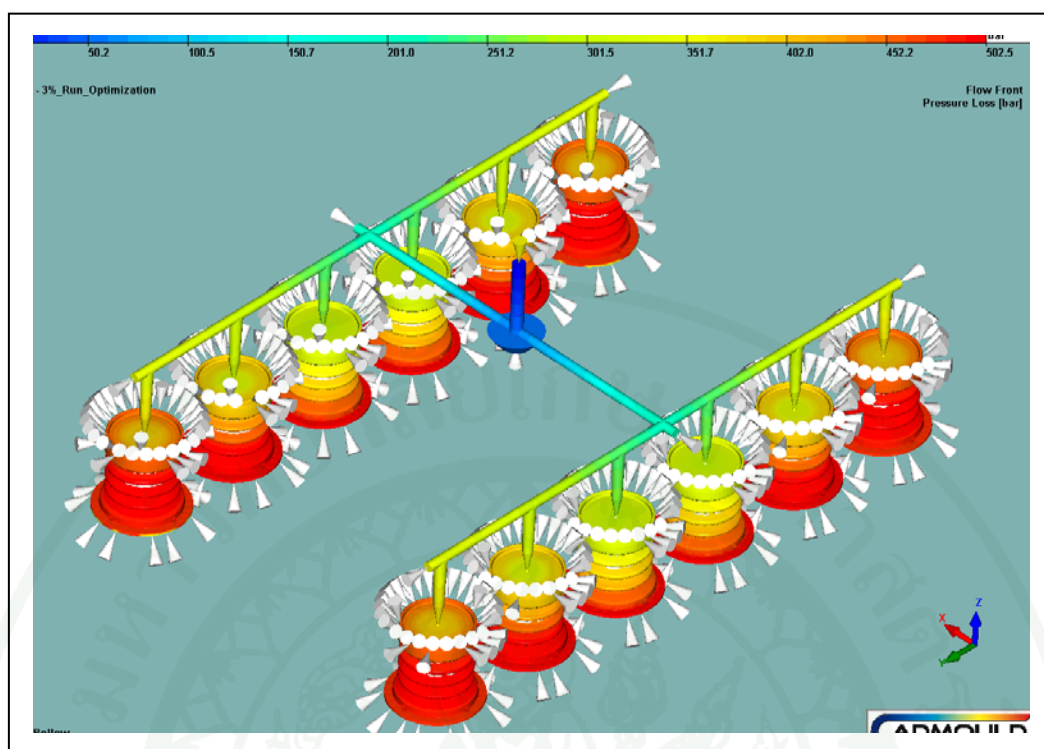
ระดับ	A	B	C	D
1	900.0	902.7	896.0	881.3
2	885.3	893.3	892.0	898.7
3	890.7	880.0	888.0	896.0
ผลต่าง	14.7	22.7	8.0	17.3

จากตารางจะพบว่าปัจจัยที่มีผลกระทบต่อผลตอบแทน คือความสมบูรณ์ของชิ้นงานในด้านจุดดักอากาศ เรียงตามลำดับค่าผลต่างหรือผลกระทบจากมากไปน้อย คือ ความดันในการฉีด อุณหภูมิแม่พิมพ์ เวลาในการฉีด และอุณหภูมิในการฉีด ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงค่าปัจจัยหลักจากค่าเฉลี่ยหรือกราฟค่าเฉลี่ย (Mean Plot) ในแต่ละระดับของปัจจัยจากการจำลองการฉีดขึ้นรูป แสดงดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 กราฟค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัยจากการจำลองการฉีดขึ้นรูป

ผลจากการวิเคราะห์กราฟค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัย กรณีค่าอย่างน้อยยิ่งดีโดยพิจารณาผลตอบแทนคือความสมบูรณ์ของชิ้นงานในด้านจุดดักอากาศ ดังรูปที่ 35 ซึ่งพบว่าระดับของปัจจัยจากการจำลองการฉีดขึ้นรูปที่ดีที่สุดคือ เวลาในการฉีด 12 วินาที ความดันในการฉีด 80 บาร์เซ็นต์ของความดันสูงสุด อุณหภูมิในการฉีด 100 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 160 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 35 ตำแหน่งและจำนวนจุดคัดอากาศที่ได้จากการจำลองการไหลของยางคอมพาวด์

นอกจากนั้น ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างระดับของแต่ละปัจจัยที่ดีที่สุดของการฉีดขึ้นรูป เมื่อพิจารณาผลตอบแทนคือ ความสมบูรณ์ของชิ้นงานในด้านของจุดคัดอากาศยังสามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน ดังสมการที่ 28

$$S / N_s = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (28)$$

โดยที่ S / N_s คืออัตราส่วนของสัญญาณต่อสิ่งรบกวนของกระบวนการกรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี มีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) n คือจำนวนครั้งของการสังเกต และ y_i คือข้อมูลที่ได้จากการสังเกตในแต่ละครั้ง (จำนวนจุดคัดอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณส่วนบนและขอบของชิ้นงานทั้งหมดรวมกัน) แสดงดังตารางที่ 14 และสามารถคำนวณหาค่า S/N - Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการจำลองการฉีด แสดงดังตารางที่ 15

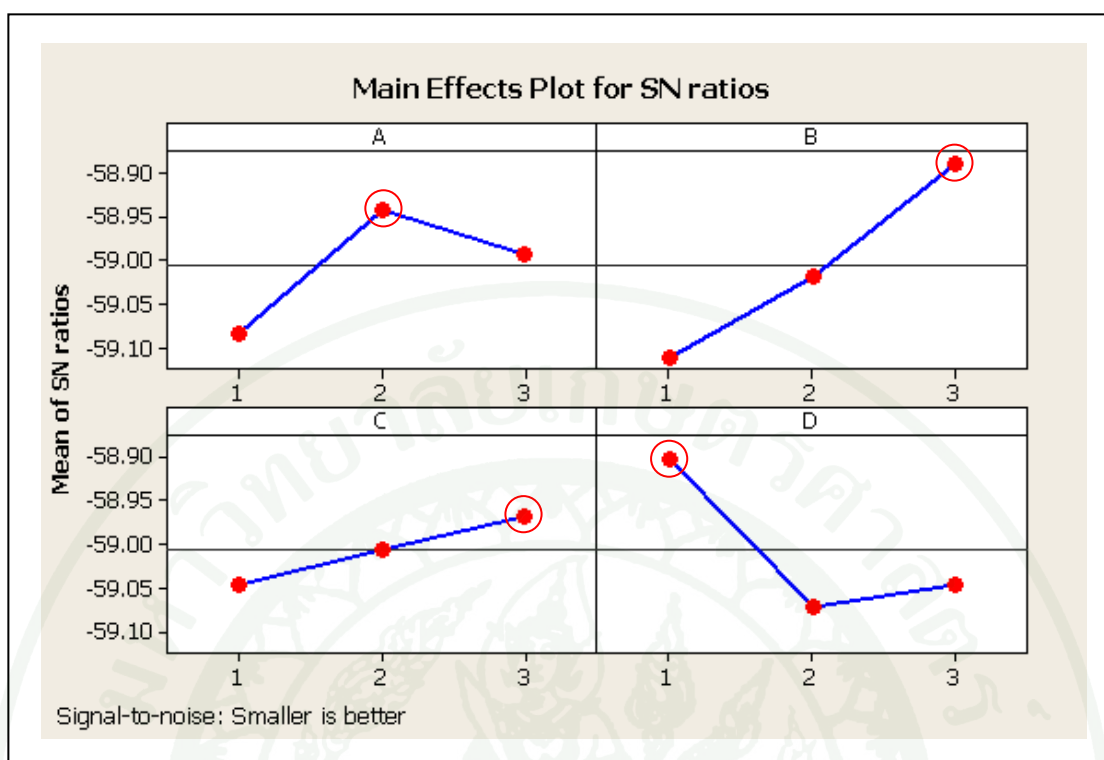
ตารางที่ 14 ผลการจำลองการบิดขึ้นรูปตามตารางมาตรฐานออกทอกอนอล อะเรย์ $L_9 3^4$ ที่ 4 ปัจจัย โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ และค่า S/N_s ในแต่ละการทดลอง

การทดลองที่	A	B	C	D	Y_i	S/N_s
1	7	60	80	160	904	-59.123
2	7	70	90	170	908	-59.162
3	7	80	100	180	888	-58.968
4	12	60	90	180	900	-59.083
5	12	70	100	160	872	-58.810
6	12	80	80	170	884	-58.929
7	17	60	100	170	904	-59.123
8	17	70	80	180	900	-59.085
9	17	80	90	160	868	-58.770

ตารางที่ 15 ค่า S/N - Ratio เฉลี่ยของแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการจำลองการบิด

ระดับ	A	B	C	D
1	-59.08	-59.11	-59.05	-58.90
2	-58.94	-59.02	-59.01	-59.07
3	-58.99	-58.89	-58.97	-59.05

จากตารางที่ 15 จะพบว่าสามารถแสดงกราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย S/N - Ratio ในแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยการทดลอง แสดงดังภาพที่ 36



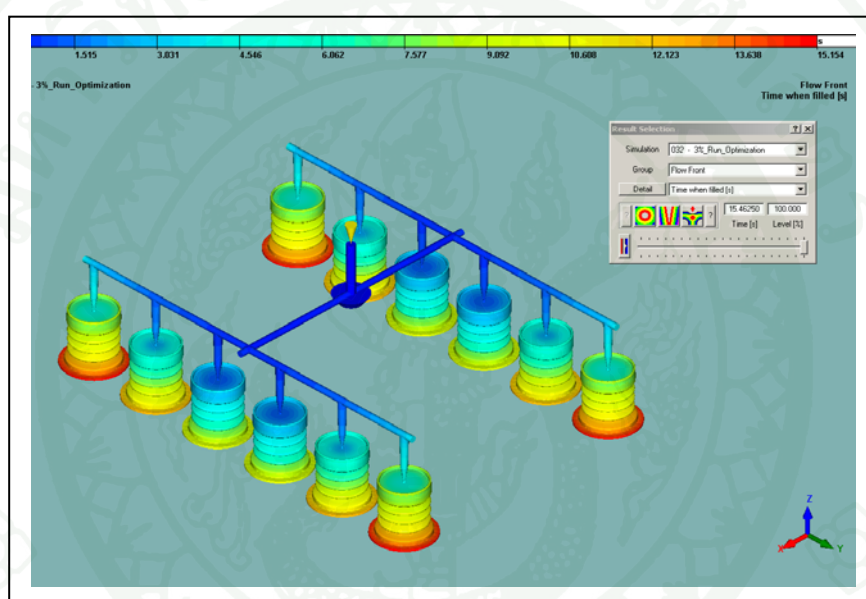
ภาพที่ 36 กราฟการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ย S/N – Ratio ในแต่ละระดับของปัจจัยการทดลอง เมื่อพิจารณาผลตอบแทนคือ ความสมบูรณ์ของชิ้นงานในด้านของจุดดักอากาศ

ผลจากการวิเคราะห์กราฟแสดงค่าเฉลี่ย S/N – Ratio กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดีในแต่ละระดับของปัจจัยโดยพิจารณาผลตอบแทนคือความสมบูรณ์ของชิ้นงานในด้านของจุดดักอากาศ ดังภาพที่ 36 พบว่าระดับของปัจจัยการจำลองการฉีดขึ้นรูปที่ดีที่สุดคือ เวลาในการฉีด 12 วินาที ความดันในการฉีด 80 บาร์ เซ็นต์ของความดันสูงสุด อุณหภูมิในการฉีด 100 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 160 องศาเซลเซียส ตรงกับผลจากการวิเคราะห์กราฟค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัยตามหลักการออกแบบการทดลองโดยทั่วไป จากนั้นนำค่าดังกล่าวไปจำลองการการฉีดขึ้นรูป ผลปรากฏว่าได้จำนวนจุดดักอากาศ 864 จุด ซึ่งน้อยกว่าการทดลองที่ 9 ซึ่งเป็นกรณีที่น้อยที่สุด

จากนั้นนำเงื่อนไขดังกล่าวมาวิเคราะห์การจำลองการไหลของยางคอมพาวด์ในแม่พิมพ์ได้แก่

1. เวลาในการเติมเต็ม (Time When Filled)

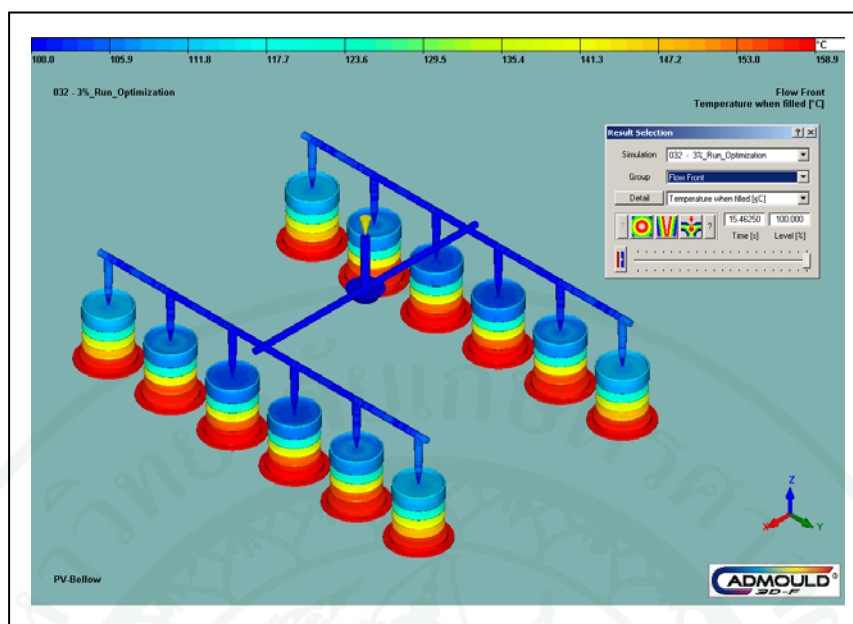
จากการจำลองการไหลตัวของยางคอมพาวด์ในแม่พิมพ์ โดยตั้งค่าเวลาเดิมเต็ม 12 วินาที ผลจากการจำลองด้วยโปรแกรมจะใช้เวลา 15.46 วินาที ซึ่งจะเห็นได้ว่ามากกว่าค่าที่ตั้งไว้ เนื่องจากความดันในการฉีดปรับตั้งด้วยความดันไฮดรอลิก ซึ่งเครื่องที่ใช้ฉีดจริงทำงานเต็มประสิทธิภาพที่ 80 เปอร์เซ็นต์ของความดันสูงสุดจึงใช้ค่านี้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูป และในขณะที่ยางไหลตัวเข้าไปในเบ้าแม่พิมพ์ จะเกิดความดันภายในด้านทานการไหลตัวของยางขณะเดิมเต็ม ซึ่งการเดิมเต็มท้ายสุดจะอยู่ที่บริเวณขอบล่างของชิ้นงาน ทั้ง 4 เบ้า ที่อยู่ด้านนอกสุด (บริเวณที่เป็นสีแดง) แสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 ระยะเวลาในการเดิมเต็มของในเบ้าแม่พิมพ์

2. อุณหภูมิการไหลตัว (Temperature When Filled)

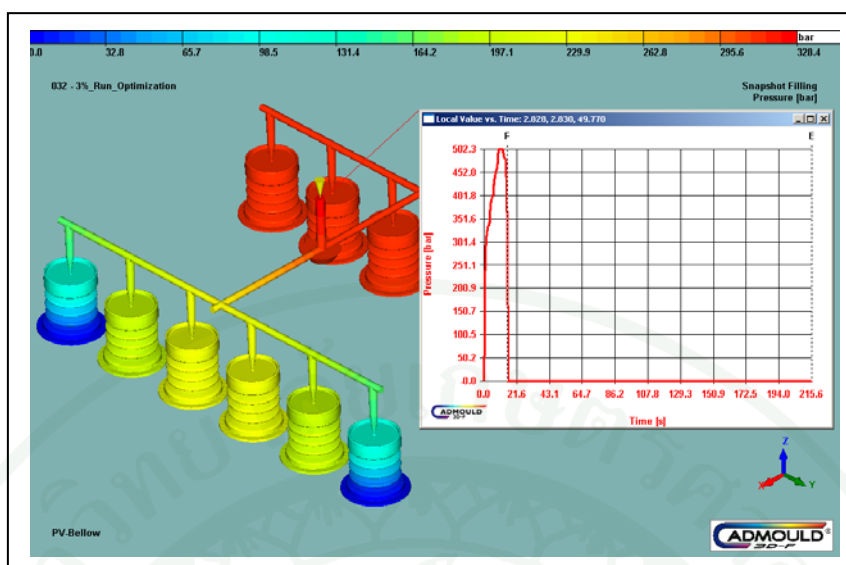
จากการจำลองการไหลตัวของยางคอมพาวด์ภายในแม่พิมพ์ เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิแม่พิมพ์ 160 องศาเซลเซียส เมื่อเวลาผ่านไป จนถึงช่วงเวลาสุดท้ายของการเดิมเต็มเนื้อยาง อุณหภูมิที่บริเวณส่วนล่างของชิ้นงานทุกๆ เบ้า มีอุณหภูมิสูงประมาณ 160 องศาเซลเซียส ซึ่งจะคงรูปได้ก่อนส่วนบน ส่วนอุณหภูมิต่ำสุดประมาณ 100 องศาเซลเซียส จะอยู่บริเวณทางวิ่งหลัก (Main Runner) และทางวิ่งรอง (Sub Runner) ซึ่งไม่จำเป็นต้องคงรูปสมบูรณ์ เนื่องจากไม่ใช่ตัวชิ้นงาน แสดงดังภาพที่ 38



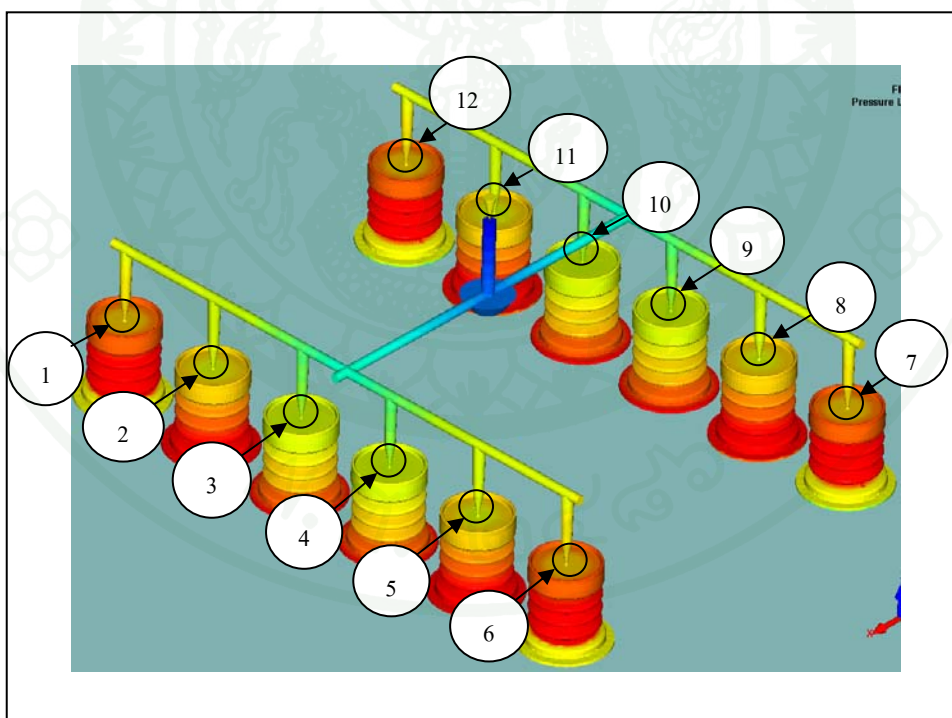
ภาพที่ 38 อุณหภูมิการไหลตัวของของยางคอมพาวด์ภายในแม่พิมพ์

3. ความดันที่สูญเสียในชิ้นงาน และอัตราการไหล (Flow Rate) ที่ทางเข้าของชิ้นงานชิ้นงาน

ในการวิเคราะห์การจำลองการไหลตัวของยางคอมพาวด์ในแม่พิมพ์ ซึ่งกำหนดค่าความดันฉีดสูงสุด 2,500 บาร์ ขนาดแรงปิดแม่พิมพ์สูงสุด 3,000 กิโลนิวตัน ผลจากการจำลองความดันที่บริเวณปลายแกนรูฉีดเท่ากับ 502.3 บาร์ ซึ่งก็คือความดันที่สูญเสียให้กับชิ้นงาน ทางเข้าและรูวิ่งแสดงดังภาพที่ 39 ซึ่งสามารถใช้กับการทดสอบจริงได้โดยในทางปฏิบัติจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าที่ได้จากการจำลองการฉีดขึ้นรูปประมาณ 150-200 บาร์ ส่วนความดันและอัตราการไหลที่ทางเข้าของชิ้นงานทั้ง 12 เบ้า แสดงดังภาพที่ 40 และตารางที่ 16 ตามลำดับ



ภาพที่ 39 ความดันที่ปลายแกนรูฉีดจากการจำลองการฉีด

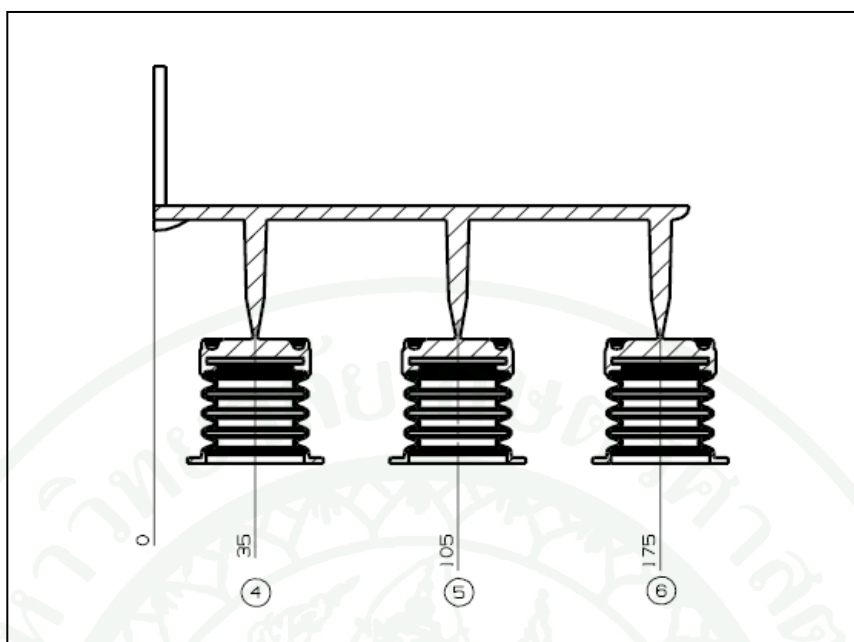


ภาพที่ 40 การกำหนดตำแหน่งทางเข้าของชิ้นงานทั้ง 12 เป้า

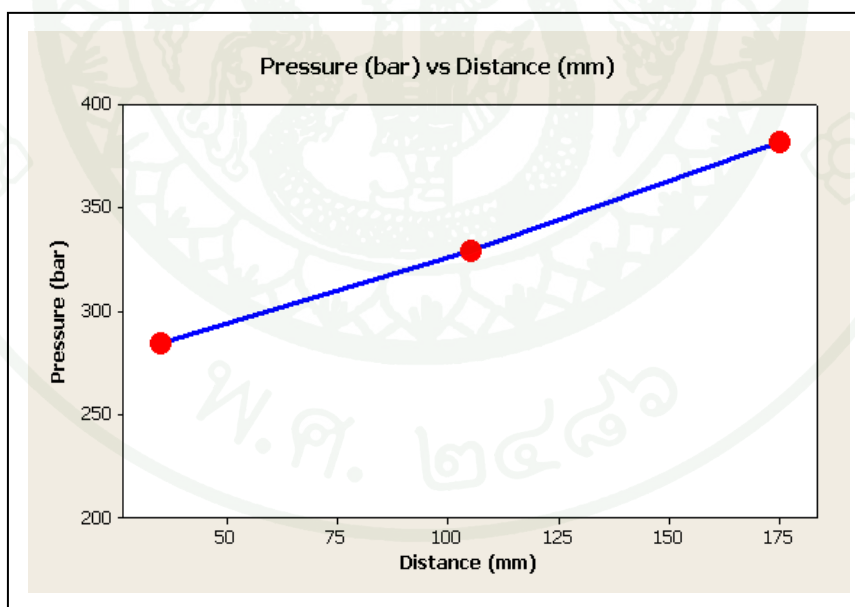
ตารางที่ 16 ความดันและอัตราการไหลที่ตำแหน่งทางเข้าชิ้นงานทั้ง 12 เบ้า

ตำแหน่ง	ความดัน (bar)	อัตราการไหล (g/s)
1.	381.9	3.93
2.	328.9	4.33
3.	284.5	4.78
4.	284.5	4.78
5.	328.9	4.33
6.	381.9	3.93
7.	382.7	3.98
8.	329.3	4.39
9.	284.5	4.84
10.	284.2	4.84
11.	329.3	4.39
12.	382.7	3.98

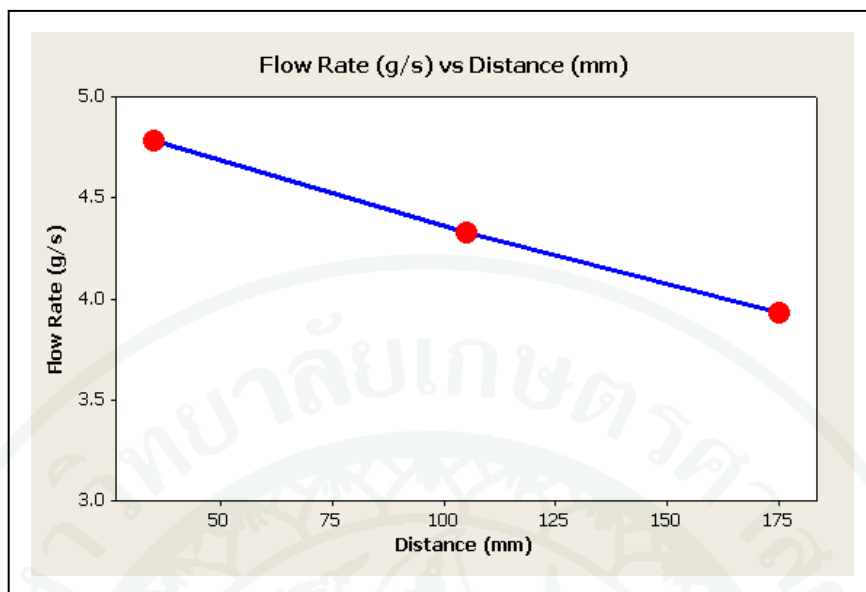
ผลจากพิจารณาค่าความดันและอัตราการไหลที่ตำแหน่งทางเข้า จากตารางที่ 15 จะเห็นได้ว่า ตำแหน่งที่ 3, 4, 9 และ 10 ตำแหน่งที่ 2, 5, 8 และ 11 ตำแหน่งที่ 1, 6, 7 และ 12 นั้น สมดุลความดันและอัตราการไหลต่อกัน เป็นกลุ่มๆ เนื่องจากขนาดของทางเข้า รูปร่าง และระยะห่างจากตำแหน่งทางเข้ากับศูนย์กลางของแกนรูธิดีมีค่าเท่ากันในแต่ละกลุ่ม จึงทำให้ระบบทางวิ่งโดยไม่สมดุลกัน ทำให้คุณภาพของชิ้นงานที่ได้ในแต่ละเบ้าไม่เท่ากัน โดยชิ้นงานที่อยู่ใกล้กับทางวิ่งแกนรูธิดีหลักจะมีโอกาสเกิดครีบมากกว่า แต่ชิ้นงานที่อยู่ไกลกับทางวิ่งแกนรูธิดีหลักชิ้นงานอาจไม่เต็มได้ซึ่งแม่พิมพ์ที่ใช้เป็นกรณีศึกษานั้น ไม่สมดุลต่อทางวิ่ง และสามารถหาความสัมพันธ์ของความดันและอัตราการไหลที่ตำแหน่งทางเข้ากับระยะตามแนวราบ แสดงดังภาพที่ 41, 42 และ 43 ตามลำดับ



ภาพที่ 41 ระยะทางจากตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแกนรูติดกับตำแหน่งทางเข้าที่ 4, 5 และ 6



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ของความดันที่ตำแหน่งทางเข้ากับระยะทางตามแนวราบ



ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลที่ตำแหน่งทางเข้ากับระยะทางตามแนวราบ

ผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของความดันกับระยะทางตามแนวราบ จะเห็นได้ว่าความดันที่ตำแหน่งทางเข้าในการฉีดยางคอมพาวด์จะแปรผันโดยตรงกับระยะทางตามแนวราบ ซึ่งตำแหน่งที่อยู่ไกลสุดจะมีความดันมากที่สุดเนื่องจากเกิดความดันย้อนกลับของการไหลของยางคอมพาวด์ที่ปลายสุดของทางวิ่ง และผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของยางคอมพาวด์กับระยะทางตามแนวราบ อัตราการไหลที่ตำแหน่งทางเข้าของยางคอมพาวด์จะแปรผกผันกับระยะทางตามแนวราบ ยิ่งระยะทางไกลมากเท่าใดอัตราการไหลตัวของยางก็จะลดลง ด้วยเหตุผลจากการวิเคราะห์ดังกล่าวมาแล้วในข้างต้น พบว่าแม่พิมพ์ที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ตัวอย่างนั้นทางเข้าและรูวิ่งไม่สมดุล ส่งผลให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางโดยรวม ไม่เฉพาะจุดดักอากาศเท่านั้น

จากนั้นนำระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการจำลองการฉีดขึ้นรูป โดยพิจารณาผลตอบแทนคือความสมบูรณ์ของชิ้นงานในด้านจุดดักอากาศไปทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง ซึ่งมีเงื่อนไขและค่าเริ่มต้น ดังตารางที่ 17

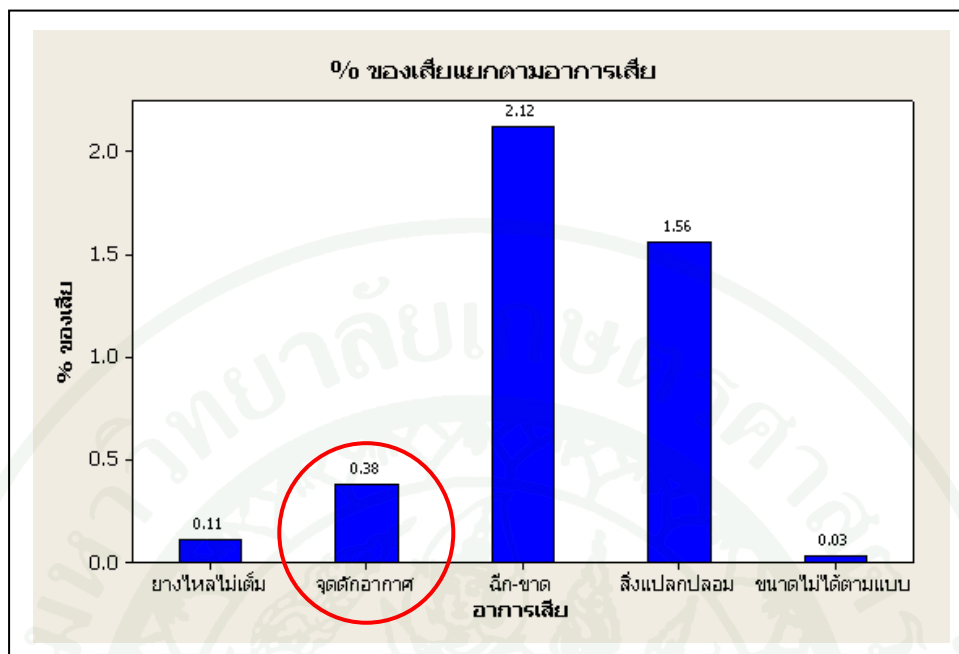
ตารางที่ 17 เงื่อนไขและค่าเริ่มต้นที่สำคัญในการทดสอบฉีดขึ้นรูปจริง

เงื่อนไขและค่าเริ่มต้น	ค่าที่กำหนด
ความดันในการฉีดสูงสุด (bar)	2,500
ความดันในการฉีด (% ของความดันในการฉีดสูงสุด)	80
แรงปิดแม่พิมพ์ (ton)	300
ความเร็วในการฉีด (% ของค่าความเร็วสูงสุด)	25
เวลาในการฉีด (s)	12
เวลาในการคงรูป (s)	200
อุณหภูมิกระบอกฉีด (°C)	100
อุณหภูมิแม่พิมพ์ ฝั่งตัวผู้ (°C)	160
อุณหภูมิแม่พิมพ์ ฝั่งตัวเมีย (°C)	160

ผลการทดสอบการฉีดขึ้นรูป ที่ได้จากการบันทึกผลในสถานประกอบการ (บริษัท เอส. เค. โพลีเมอร์ จำกัด) ตั้งแต่วันที่ 15 – 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2553 แสดงดังตารางที่ 18 และภาพที่ 44

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบการฉีดขึ้นรูป

จำนวนที่ผลิตได้ (ชิ้น)		จำนวนของเสียแยกตามอาการ (ชิ้น)										ของเสียทั้งหมด (ชิ้น)
ทั้งหมด	ของดี	ตำหนิจากแม่พิมพ์	ยางไหลไม่เต็ม	แฟล	จุดดักอากาศ	ฉีด-ขาด	สิ่งแปลกปลอม	สกปรก	แตงกิ้นเนื้อ	ขนาดไม่ตามแบบ	ชิ้นงานย่น	
3,729	3,574	-	4	-	14	79	58	-	-	1	-	156
% รวมของเสีย		-	0.11	-	0.38	2.12	1.56	-	-	0.03	-	4.2



ภาพที่ 44 แผนภูมิแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์ของเสียแยกตามอาการ

จากแผนภูมิแท่งแสดงเปอร์เซ็นต์ของเสียแยกตามอาการพบว่า เปอร์เซ็นต์ของเสียในด้านจุดตักอากาศเท่ากับ 0.38 เปอร์เซ็นต์ จากผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ผลิตในช่วงเวลาดังกล่าว ซึ่งลดลงจากเดิม

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางโดยประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยทางวิศวกรรมร่วมกับการออกแบบการทดลองในการหาปัจจัยและระดับปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป จากผลการวิจัยพบว่าปัจจัยที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพไม่ได้ตามต้องการคือ จุดดักอากาศ ซึ่งสอดคล้องกับตารางการออกแบบการทดลองแบบทากูชิสำหรับออร์ทอกอนัลอะเรย์ ชนิด L_{93^4} โดยที่ปัจจัยและระดับปัจจัยที่ดีที่สุด ซึ่งมีผลต่อการฉีดขึ้นรูปดังนี้ คือ เวลาในการฉีด 12 วินาที ความดันในการฉีด 80 บาร์ เซ็นต์ของความดันในการฉีดสูงสุด อุณหภูมิในการฉีด 100 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิแม่พิมพ์ 160 องศาเซลเซียส และเมื่อนำระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากการจำลองการไหลของยางคอมพาวด์ในแม่พิมพ์มาเปรียบเทียบกับกรณีการฉีดขึ้นรูปจริงปรากฏว่าได้ผลที่สอดคล้องกันคือสามารถลดจำนวนจุดดักอากาศได้ และสามารถนำหลักการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับการเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางอื่นๆ ได้อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

จากผลงานวิจัยดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการสรุปประเด็นข้อเสนอแนะที่น่าจะเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยในอนาคต ดังนี้

1. ศึกษาถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยหลายปัจจัยพร้อมกัน ของปัจจัยที่ได้ศึกษามาแล้ว ดังกล่าวข้างต้น ในกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางคอมพาวด์ และศึกษาถึงปัจจัยอื่นๆ เพิ่มเติมว่ามีผลกระทบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางในด้านจุดดักอากาศ หรือไม่ เช่น ทางเข้า รูว้างและช่องระบายอากาศ (Airvent)
2. การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สำหรับผลกระทบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ยางในด้านจุดดักอากาศ ควรมีการศึกษาเปรียบเทียบกับโปรแกรมอื่นๆ ด้วย เช่น 3D- SIGMA

3. การศึกษาการแบ่งเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับการจำลองการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของชิ้นงาน

4. การทดสอบคุณสมบัติของยางคอมพาวด์เพื่อใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปนั้น จะต้องเลือกช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบค่าต่างๆ เช่น ความหนืดที่ขึ้นกับอัตราเฉือน อัตราบ่ม ให้เหมาะสมด้วย เพื่อการทำนายผลที่แม่นยำมากขึ้น

5. ควรศึกษาเปรียบเทียบกระบวนการฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางด้วยแม่พิมพ์ระบบทางร้อนกับทางวิ่งเย็นว่ามีผลต่อการเกิดจุดอากาศในชิ้นงานอย่างไร

6. ควรศึกษาเปรียบเทียบระบบทางวิ่งที่สอดคล้องกับไม่สอดคล้องว่ามีผลกระทบต่อการเกิดจุดดักอากาศในชิ้นงาน รวมถึงปัญหาของชิ้นงานในด้านอื่นๆ เช่น การหดตัวของชิ้นงาน โพรงในชิ้นงาน ครีบ และรอยแห้ว เป็นต้น ว่ามีผลเป็นอย่างไร

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

พงษ์ธร แซ่อูย. 2548. **ยาง สมบัติ และการใช้งาน**. พิมพ์ครั้งที่ 2. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), ปทุมธานี.

พงษ์ธร แซ่อูย และ ชาคิต สิริสิงห. 2550. **ยาง: กระบวนการผลิตและการทดสอบ**. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค), ปทุมธานี.

พรพรรณ นิธิอุทัย. 2540. **ยาง: เทคนิคการออกสูตรยาง**. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, ปัตตานี.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงษ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. **การออกแบบและวิเคราะห์ การทดลอง**. สำนักพิมพ์ท็อป, กรุงเทพฯ.

วันรัตน์ จัทกิจ. 2547. **17 เครื่องมือเทคนิค Problem Solving Devices**. สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

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

อรรถพล สุจิวิฐ. 2545. **การประยุกต์ใช้ CAD/CAE/CAM สำหรับการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก และการปรับตั้งพารามิเตอร์เครื่องฉีดพลาสติก**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อัมฤช หนูเกื้อ. 2550. **การปรับปรุงคุณภาพงานฉีดพลาสติกโดยวิธีทาคุชิ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

Hoang, A.T. 2007. **Optimization of the injection molding process of Joystick product by using Taguchi method**. M.S. Thesis, Southern Taiwan University of Technology.

Isayav, A.I. 2000. **Modeling of Polymer Processing**. Hanser Publishers, Munich.

Klockner DESMA Elastomertechnik. n.d. **Machines**. Available Source: <http://www.desma-usa.com/machines/>, November 30, 2009.

Lin Cheng Technologies Co., Ltd. n.d. **Injection Molding Machine**. Available Source: <http://www.lincheng.com.tw/html/e-products.htm>, November 30, 2009.

Ozcelik, B. and I. Sonat. 2009. Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding. **International Journal for Materials in Engineering Applications** 30: 367-375.

Robinson Rubber Products Company, Inc. America, Inc. 2005. **Designing with Rubber**. Available Source: <http://www.robinsonrubber.com>, November 28, 2009.

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

Straton Industries. 2005. **Rubber Mold Design & Construction**. Available Source: <http://www.straton.com/rubber.htm>, November 30, 2009.

Tsai, K.M., C.Y. Hesieh and W.H. Lo. 2009. A study of the effects of process parameters for injection molding on surface quality of optical lenses. **Journal of Materials Processing Technology** 209: 3469-3477.

Villarreal, M.G., R. Mulyana, J.M. Castro, M. Cabrera-Rios. 2008. Simulation optimization applied to injection molding, pp. 1995-2003. In **Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation**. Winter Simulation Conference, Miami, Florida.

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





ภาคผนวก ก

การประกอบใช้งานผลิตภัณฑ์ยางกรณีสึกษา (ลื่นกันน้ำทั้งในเครื่องซักผ้า)



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ก1 การประกอบชิ้นกันน้ำทั้งในเครื่องซักผ้า



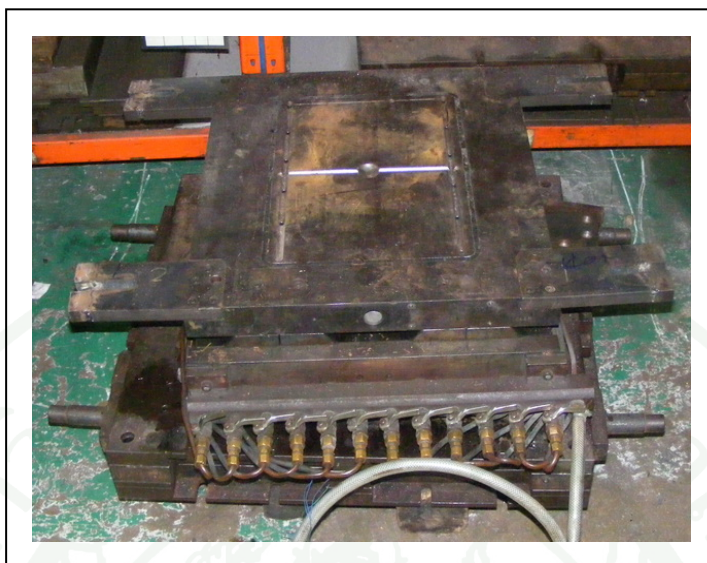
(ค)



(ง)

ภาพผนวกที่ ก1 (ต่อ)





ภาพผนวกที่ ข1 แม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อย่างตัวอย่างกรณีศึกษา



ภาพผนวกที่ ข2 การวัดอุณหภูมิแม่พิมพ์ฉีดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อย่างตัวอย่างกรณีศึกษาขณะแม่พิมพ์ปิด เพื่อฉีดขึ้นงาน



ภาพผนวกที่ ข3 แม่พิมพ์ฉีดเปิดออกเพื่อนำทางวิ่งและเศษยางออกจากแผ่นบนของแม่พิมพ์
(Upper Plate)



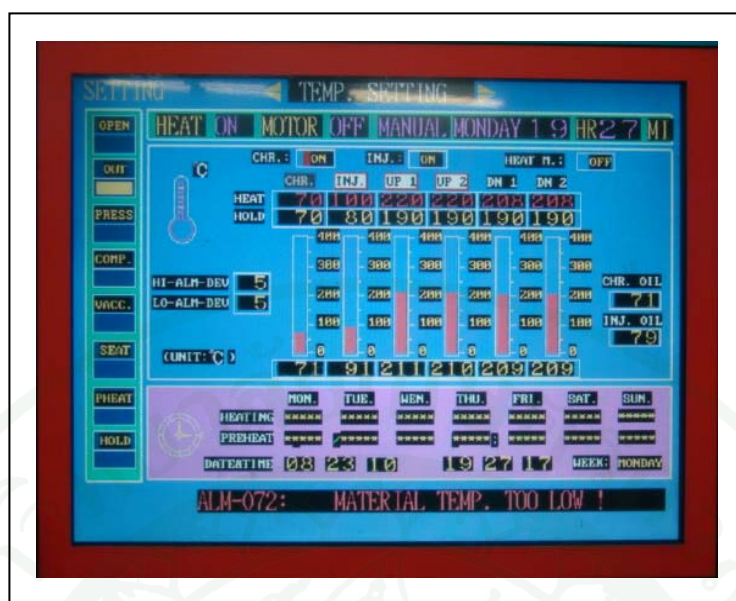
ภาพผนวกที่ ข4 ชุดสไลด์ คอร์ (Slide Core) ของแม่พิมพ์แยกจากกันและเคลื่อนที่มาหน้าเพื่อให้
พนักงานปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์



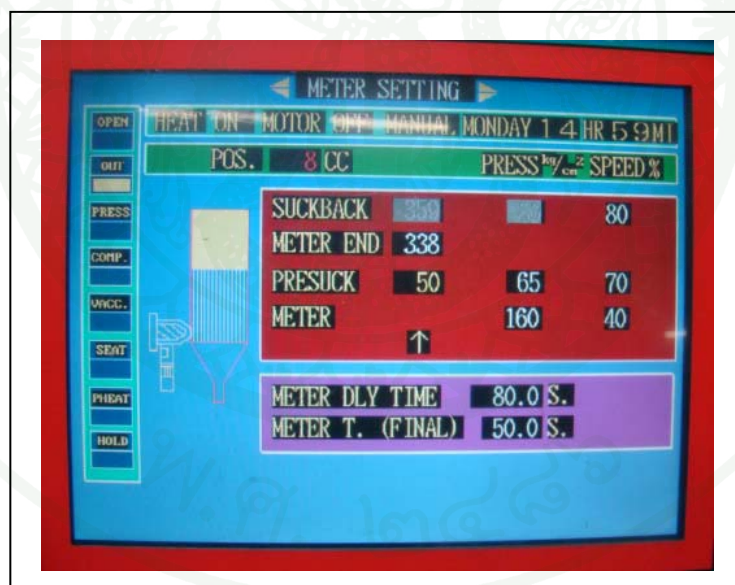
ภาพผนวกที่ ข5 การฉีดน้ำยาเคมีที่เบ้าแม่พิมพ์ก่อนแม่พิมพ์ปิด เพื่อปลดชิ้นงานออกได้ง่ายและรักษาอุณหภูมิเมื่อแม่พิมพ์เปิด



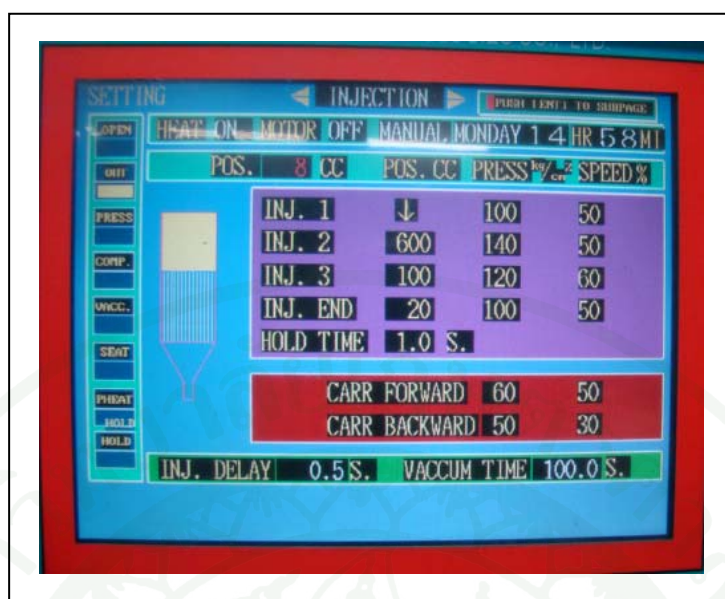
ภาพผนวกที่ ข6 การป้อนแถบยางเข้ากระบอกรีด



ภาพผนวกที่ ข7 หน้าต่างการปรับอุณหภูมิเครื่องฉีด



ภาพผนวกที่ ข8 หน้าต่างปรับตั้งปริมาตรยางเข้าเครื่อง



ภาพผนวกที่ ข๑ หน้าต่างปรับตั้งปริมาตรยางเข้าเครื่อง

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อสกุล	นายประพัทธ์ คุ่มปลิวังศ์
เกิดวันที่	13 พฤษภาคม 2513
สถานที่เกิด	เขตดุสิต จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (ระบบควบคุม) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, คอ.บ (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรวิจัยและพัฒนา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางแม่พิมพ์ยาง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุน U-IRC (University-Industry Research Collaboration) ประจำปี 2551 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี