



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

ปริญญา

วิศวกรรมเครื่องกล

วิศวกรรมเครื่องกล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม

A Study of Heat Transfer of Aluminium Filled Epoxy Resin Mould

นามผู้วิจัย นายภคินันท์ สุขสำราญ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชพล ช่าง, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์อภิชิต แจ้งบำรุง, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชวลิต กิตติชัยการ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม

A Study of Heat Transfer of Aluminium Filled Epoxy Resin Mould

โดย

นายภคินันท์ สุขสำราญ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)

พ.ศ. 2551

ภคินันท์ สุขสำราญ 2551: การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อีพอกซีเรซิน
เติมอะลูมิเนียม ปริณญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) สาขา
วิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชพล ช้างชู, Ph.D 152 หน้า

ปัจจุบันนี้การสร้างแม่พิมพ์ประเภทอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมกำลังเริ่มเป็นที่นิยมใน
ประเทศไทยทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการผลิตที่ทำได้รวดเร็วและมีต้นทุนที่ต่ำกว่าการทำแม่พิมพ์
ทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้ววัสดุประเภทอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมจะถูกนำมาใช้เป็น
อินเสิร์ท (insert) สำหรับแม่พิมพ์ ซึ่งผิวสัมผัสระหว่างอินเสิร์ทกับโครงสร้างแม่พิมพ์ (mould
base) นั้นจะเกิดสภาพผนวกรวมความร้อนเนื่องจากช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง ดังนั้นผู้วิจัยจึง
ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความหยาบของผิวสัมผัสทั้งสองผิวที่มีผลต่อความเป็นฉนวน
ความร้อนในแม่พิมพ์ ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความหยาบผิวของชิ้นงานพอกซีเร
ซินเติมอะลูมิเนียมไม่มีผลต่อความเป็นฉนวนความร้อน และการถ่ายเทความร้อนระหว่าง เหล็ก
กับ เหล็ก และ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย
ของหน้าสัมผัส ($\bar{h}_c$) เท่ากับ 263.74 และ 51.98 W/m²°C ตามลำดับ

Pakanant Sooksamran 2008: A Study of Heat Transfer of Aluminium Filled Epoxy Resin Mould. Master of Engineering (Mechanical Engineering), Major Field: Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Chatchapol Chungchoo, Ph.D. 152 pages.

Currently, the development of a aluminium filled epoxy resin mould becomes popular in Thailand. This is because the fast production process and the lower cost comparing with the conventional mould in method. Generally, the aluminium filled epoxy resin has been employed a insert of the mould. However, a gap between insert and mould base cause a thermal contact resistance. Therefore, a main objective for this research was to study the relationship between of the surface roughness and the thermal contact resistance in the mould. The experimental results showed that the variations of the surface roughness do not affect the thermal contact resistance and heat transfer between insert made by aluminium filled epoxy resin and mould base significantly. The results also indicated that the contact coefficient approximately 263.74 and 51.98 W/m²°C for a steel insert case and aluminium filled epoxy resin insert case respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ซัชพล ชังชู ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อ.ดร.อภิชาติ แจ่มบำรุง กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการเรียน การค้นคว้าวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ และกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.พิชัย กลุขไมตรี ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ และ รศ.ดร.เอกชัย จันทสาโร ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาตรวจทานแก้ไขเล่มวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ นายนายชุมพร ช่างกลึงเหมาะ ที่ได้ร่วมกันจัดทำวิทยานิพนธ์ที่มีส่วนสัมพันธ์กันและได้ให้ความช่วยเหลือต่างๆ มาโดยตลอด นายสุนิติ เกิดหนูวงศ์ และ นายพีระวัตร นันวงศ์ รุ่นพี่ปริญญาเอก ที่ให้คำแนะนำเป็นแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนมิตรสหายทุกท่าน เพื่อนๆ ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่คอยให้ความช่วยเหลือและให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์เป็นอย่างดี และที่สำคัญที่สุด คือให้ความเป็นเพื่อน เป็นพี่ เป็นน้องและเป็นกำลังใจให้ด้วยดีเสมอมาตลอดระยะเวลาที่ศึกษาร่วมกัน

ท้ายสุดนี้ คุณความดีและคุณประโยชน์ที่พึงบังเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแด่คุณพ่อ วินัย สุขสำราญ และ คุณแม่ ทศนา สุขสำราญ บุพการีผู้มอบทุกสิ่งทุกอย่างให้แก่ผู้วิจัย ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ภคินันท์ สุขสำราญ

กันยายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	68
อุปกรณ์	68
วิธีการ	69
ผลและวิจารณ์	77
ผล	77
วิจารณ์	106
สรุปและข้อเสนอแนะ	108
สรุป	108
ข้อเสนอแนะ	108
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	110
ภาคผนวก	114
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่างอากาศ	115
ภาคผนวก ข รายละเอียดข้อมูลด้านเทคนิคของวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ	148
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	152

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าที่แนะนำสำหรับขนาดของท่อหล่อเย็น	20
2	การวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม Statgraphics	51
3	ข้อมูลสำหรับการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ	57
4	ค่า SRC จากการวัดชั้นทดสอบโดยวิธีการต่างๆ	66
5	เงื่อนไขการกัดผิวชิ้นงาน	73
6	ค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของชิ้นทดสอบ	91
7	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ ($\Delta \bar{T}_{Gap}$)	92
8	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของหน้าสัมผัส ($\bar{h}_c$) ที่ได้จากการทดลอง	94
9	การวิเคราะห์ความถดถอยของแบบจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวของ เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ขนานกัน ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap})	98
10	การวิเคราะห์ความถดถอยของแบบจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวของ เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b'$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ตั้งฉากกัน ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap})	99
11	การวิเคราะห์ความถดถอยของแบบจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวของ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ขนานกัน ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap})	99
12	การวิเคราะห์ความถดถอยของแบบจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบผิวของ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R'$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ตั้งฉากกัน ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap})	100
13	Paired T-test กรณีที่ 1 กับ กรณีที่ 2 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05	103
14	Paired T-test กรณีที่ 3 กับ กรณีที่ 4 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
15	Paired T-test กรณีที่ 1 กับ กรณีที่ 3 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05	104
16	Paired T-test กรณีที่ 2 กับ กรณีที่ 4 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05	105
 ตารางผนวกที่		
ก1	ผลการทดสอบกรณีที่ 1 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b$) โดยวางให้แนวการเดินดอก กดให้ขนานกัน	116
ก2	ผลการทดสอบกรณีที่ 2 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b'$) โดยวางให้แนวการเดินดอก กดให้ตั้งฉากกัน	124
ก3	ผลการทดสอบกรณีที่ 3 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R$) โดย วางให้แนวการเดินดอกกดให้ขนานกัน	132
ก4	ผลการทดสอบกรณีที่ 4 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R'$) โดย วางให้แนวการเดินดอกกดให้ตั้งฉากกัน	140

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ลักษณะส่วนที่อยู่กับที่และส่วนเคลื่อนที่	6
2	ชิ้นส่วนพื้นฐานของแม่พิมพ์ฉีด ประกอบด้วยแผ่นเบ้าและคอร์	7
3	อินเลอร์ของเบ้าและคอร์แบบต่างๆ	8
4	แผ่นยึดอินเลอร์แบบแผ่นตัน	10
5	แผ่นยึดอินเลอร์แบบอื่นๆ	10
6	การออกแบบเพลานำและปลอกนำ	11
7	ระบบป้อนของแม่พิมพ์ฉีดพิเศษชนิดเดียว	12
8	ส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์	13
9	การเปลี่ยนอุณหภูมิของผิวควาดีที่ต่างๆ กัน	14
10	ภาพด้านซ้าย คือ ระบบหล่อเย็นเดิมและรูปด้านขวา คือ ระบบหล่อเย็นที่ปรับปรุงแล้ว	19
11	ระยะของการจัดวางระบบหล่อเย็น	20
12	การวางระบบหล่อเย็นแบบต่างๆ	21
13	อุปกรณ์สำหรับระบบหล่อเย็นในบริเวณที่เข้าถึงได้ยาก	22
14	ลักษณะของการไหลในระบบหล่อเย็น	23
15	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา	28
16	การเปรียบเทียบการนำความร้อนกับวงจรไฟฟ้า	29
17	การเปรียบเทียบการนำความร้อนของแผ่นระนาบกับวงจรไฟฟ้า	30
18	สมมูลระหว่างการนำความร้อนและการพาความร้อนผ่านผนังประกอบ	31
19	ผลของความต้านทานความร้อนที่หน้าสัมผัส	33
20	โมเดลความหยาบของจุดต่อ	34
21	เครื่องวัดความหยาบละเอียดผิวแบบสัมผัส	38
22	กราฟ 2 มิติ	38
23	ความเป็นคลื่นของผิวและความหยาบละเอียดผิว	39
24	รูปร่างความเป็นคลื่นและความหยาบละเอียด	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
25	แสดงการวัดค่าความหยาบผิว R_a	40
26	แสดงการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a	40
27	แสดงการวัดค่าความหยาบผิว R_z และ R_{max}	41
28	วิธีใช้ลำแสงส่องสะท้อนผิวที่ต้องการวัด	42
29	ผิวชิ้นงานในลักษณะ 3 มิติ	42
30	ความเร็วรอบ ความเร็วตัด และอัตราป้อน	44
31	การกัดตาม	45
32	การกัดทวน	45
33	ความลึกของรอยกัด	46
34	ความกว้างของรอยตัด	46
35	รูปทรงของเอ็นด์มิลล์และการขึ้นรูปชิ้นงานในลักษณะต่างๆ	47
36	ตัวอย่างของเฟซมิลล์ที่ใช้สำหรับงานปาดผิวชิ้นงาน	48
37	แม่พิมพ์อ็อกซี่เรซินเดิมอะลูมิเนียม	62
38	กระบวนการหล่อแม่พิมพ์อ็อกซี่เรซิน	64
39	ภาพถ่ายโครงสร้างของวัสดุประเภทอ็อกซี่เรซินเดิมอะลูมิเนียมที่อัตราส่วนเชิง มวล 45:55	65
40	วิธีการวัดความหยาบผิวและพื้นที่ผิวจำลองของวัตถุ	67
41	เครื่องหล่อสุญญากาศ	68
42	การจำลองการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์	70
43	ดอกกัด (Endmill)	74
44	การเลื่อนแนวเดินดอกกัดบนชิ้นงาน	74
45	การปิดฉนวนทางด้านหน้า	76
46	ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ	76
47	แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์	79
48	แม่แบบหล่อชิ้นงาน	82

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
49	การเตรียมส่วนผสมในการหล่อชิ้นงานอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม	83
50	ชิ้นงานอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อ	84
51	โพรงอากาศที่เกิดบริเวณขอบชิ้นงานที่หล่อ	84
52	เกิดฟองอากาศในกระบวนการกวนส่วนผสมให้เข้ากันและดึงอากาศออกจากส่วนผสม	85
53	การดึงอากาศออกจากส่วนผสม	85
54	การกัดผิวชิ้นงาน	86
55	ขั้นตอนทดสอบอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมที่ผ่านการกัด	87
56	ขั้นตอนทดสอบเหล็กที่ผ่านการกัด	87
57	เครื่องกัดซีเอ็นซีที่ใช้กัดผิวชิ้นงาน	88
58	แนวที่เลือกวัดความหยาบผิว	88
59	วิธีการวัดความหยาบผิว	89
60	การปรับกราฟ	89
61	ก่อนการปรับกราฟ	90
62	หลังการปรับกราฟ	90
63	พื้นผิวที่ได้จากการจำลอง	90
64	กราฟความสัมพันธ์ของความหยาบผิวของเหล็ก S_a และ เหล็ก S_b กับผลต่างของอุณหภูมิของผิวชิ้นงานทั้งสอง	95
65	กราฟความสัมพันธ์ของความหยาบผิวของเหล็ก S_b โดยหมุนชิ้นงาน 90 องศา (ตามเข็มนาฬิกา) และ เหล็ก S_a กับผลต่างของอุณหภูมิของผิวชิ้นงานทั้งสอง	96
66	กราฟความสัมพันธ์ของความหยาบผิวของอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม และ เหล็ก S_a กับผลต่างของอุณหภูมิของผิวชิ้นงานทั้งสอง	96
67	กราฟความสัมพันธ์ของความหยาบผิวของอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมโดยหมุนชิ้นงาน 90 องศา (ตามเข็มนาฬิกา) และ เหล็ก S_a กับผลต่างของอุณหภูมิของผิวชิ้นงานทั้งสอง	97

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
68	แผนภาพเพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของผลการทดลองกรณีที่ 1 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ขนานกัน	101
69	แผนภาพเพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของผลการทดลองกรณีที่ 2 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b'$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ตั้งฉากกัน	101
70	แผนภาพเพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของผลการทดลองกรณีที่ 3 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ขนานกัน	102
65	แผนภาพเพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของผลการทดลองกรณีที่ 4 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R'$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ตั้งฉากกัน	100
ภาพผนวกที่		
ข1	ดอกกัด (Endmill)	149
ข2	เหล็กกล้า S50C	150
ข3	ฮีทเตอร์คาร์ทริดจ์	151

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

R_{tot}	=	ค่าความต้านทานรวม
R_{conv}	=	ความต้านทานต่อการพาความร้อน
L_g	=	ความหนาของช่องว่าง
A	=	พื้นที่ภาคตัดขวางทั้งหมดของก้อน
A_c	=	พื้นที่ที่ผิววัตถุสัมผัสกัน
A_v	=	พื้นที่ช่องว่าง
k_f	=	ค่าการนำความร้อนของของไหลซึ่งอยู่ในช่องว่าง
k_A	=	ค่าการนำความร้อนของวัตถุ A
k_B	=	ค่าการนำความร้อนของวัตถุ B
k_r	=	ค่าสภาพการนำความร้อนของอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม
x_r	=	ความหนาของอินสูลิเท
ΔT	=	ผลต่างของอุณหภูมิ
h_c	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำสัมผัส
k_m	=	ค่าสภาพการนำความร้อนของอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม
x_m	=	ความหนาของแม่พิมพ์
d_c	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อหล่อเย็น
l	=	ความยาวของท่อหล่อเย็น
h_{cl}	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำหล่อเย็น
m	=	มวลของชิ้นงาน
Δh	=	ความแตกต่างของพลังงานจำเพาะ (Enthalpy)
t_z	=	ระยะเวลาที่แท้จริง
D	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อหล่อเย็น
V_c	=	ความเร็วของสารหล่อเย็น
c_p	=	ค่า specific heat ของสารหล่อเย็น
ρ_c	=	ค่าความหนาแน่นของสารหล่อเย็น
T_i	=	อุณหภูมิของสารหล่อเย็นขาเข้า
T_o	=	อุณหภูมิของสารหล่อเย็นขาออก
μ	=	ค่าความหนืดของสารหล่อเย็น

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

λ	=	ค่า Thermal conductivity ของสารหล่อเย็น
Re	=	Reynolds number
Pr	=	Prandtl number
Nu	=	Nusselt number
HSS	=	เหล็กกล้ารอบสูง (High speed steel)
SRC	=	สัมประสิทธิ์ความหยาบผิว
A_m	=	พื้นที่ผิวจริงที่ได้จากการวัด
A_n	=	พื้นที่ผิวระนาบ
Q_p	=	ความร้อนที่ได้รับจากการฉีดพลาสติก
Q_c	=	ความร้อนที่ถ่ายเทออกโดยสารหล่อเย็น
R	=	ชั้นทดสอบอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม
S_a	=	ชั้นทดสอบเหล็กชุด A
S_b	=	ชั้นทดสอบเหล็กชุด B
L	=	ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ
h_i	=	enthalpy ของพลาสติกเมื่อนิด
h_b	=	enthalpy ของพลาสติกเมื่อแข็งตัว
h_e	=	enthalpy ของพลาสติกเมื่อปลด
ΔT_{Gap}	=	อุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ
$^{\circ}C$	=	องศาเซลเซียส
μm	=	ไมโครเมตร

การศึกษาการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม

A Study of Heat Transfer of Aluminium Filled Epoxy Resin Mould

คำนำ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ใช้ในชีวิตประจำวันล้วนมีส่วนพลาสติกเป็นองค์ประกอบเกือบทั้งสิ้น จากการต้องการชิ้นส่วนพลาสติกดังกล่าว ทำให้เกิดการขยายตัวอย่างสูงของตลาดอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกในปัจจุบัน การผลิตชิ้นส่วนพลาสติก มีข้อจำกัดที่สำคัญประการหนึ่ง คือ รอบเวลาในการฉีดพลาสติกแต่ละครั้งจะถูกกำหนดโดยเวลาที่ต้องใช้ในการระบายความร้อนออกจากพลาสติกเหลว ผ่านไปยังอินเสิร์ตแม่พิมพ์ออกสู่อากาศเพื่อที่จะให้ชิ้นงานแข็งตัวที่จะปลดชิ้นงานออกได้ ซึ่งปัญหาที่พบคือจะมีการลดลงของอุณหภูมิที่สูงขณะถ่ายเทความร้อนระหว่างอินเสิร์ตกับแม่พิมพ์ การลดลงของอุณหภูมิมีผลมาจากการเกิดช่องว่างอากาศ (Air gap) ระหว่างอินเสิร์ตกับแม่พิมพ์ ซึ่งช่องว่างอากาศเกิดจากการที่ผิววัสดุที่ใช้ทำอินเสิร์ตและแม่พิมพ์มีความหยาบซึ่งยังมีความหยาบผิวมากก็จะมีช่องว่างของอากาศมากเช่นกันส่งผลให้มีการเกิดการต้านทานความร้อนขึ้น จากเหตุผลข้างต้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดในการทดลองศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความหยาบผิวของชิ้นงานที่มีผลต่อการเป็นฉนวนความร้อนของผิวสัมผัสเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาแบบจำลองสำหรับทำนายการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมต่อไป

วัตถุประสงค์

วิทยานิพนธ์ เรื่องการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อัดพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม มีวัตถุประสงค์หลักดังต่อไปนี้คือ

1. เพื่อศึกษาการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อัดพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม
2. เพื่อศึกษาผลของค่าความหนาผิวของชิ้นงานที่มีผลต่อการเป็นฉนวนความร้อนของผิวสัมผัส
3. เพื่อหาสมการอย่างง่ายสำหรับทำนายการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อัดพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม

การตรวจเอกสาร

เนื่องจากวิทยานิพนธ์เรื่องการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อพอกซีเรซินเดิม อะลูมิเนียมนี้เกี่ยวข้องกับองค์ความรู้หลายด้านด้วยกันจึงแบ่งเป็น 4 กลุ่มดังนี้

1. แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเป็นแม่พิมพ์ที่มีการนำมาใช้ในการผลิตชิ้นงานพลาสติกกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะกับพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermo plastics) และในปัจจุบันมีการพัฒนาปรับปรุงเครื่องฉีดพลาสติกและแม่พิมพ์ฉีด ทำให้มีความสามารถฉีดชิ้นงานพลาสติกที่ทำจากพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting plastics) ได้อีกด้วย ทำให้ขอบเขตการใช้งานของแม่พิมพ์ฉีดกว้างขวางมากยิ่งขึ้น การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดมักจะพิจารณาจากลักษณะรูปร่างของชิ้นงานเป็นหลัก ซึ่งลักษณะรูปร่างของชิ้นงานสามารถจัดเป็นกลุ่มได้ดังนี้

- ก. ชิ้นงานที่ปราศจากร่องหรือบ่า เช่น ถ้วยแก้ว ชาม หวี เป็นต้น
- ข. ชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าด้านนอก เช่น เกลียวตัวผู้ หลอดด้าย เป็นต้น
- ค. ชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าด้านใน เช่น ฝาเกลียวใน เป็นต้น
- ง. ชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าทั้งด้านนอกและด้านใน เช่น ชิ้นส่วนของปากกาหมึกซึม เป็นต้น

1.1 ชนิดของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

แม่พิมพ์ชนิดต่างๆ ที่มีใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกันมากมายหลายชนิด ซึ่งมักจะเรียกชื่อตามกรรมวิธีในการผลิต ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกออกได้ดังนี้

1.1.1 แม่พิมพ์แบบสองแผ่น (Two-plate injection mould)

เป็นแม่พิมพ์แบบง่ายๆ ที่ใช้ผลิตชิ้นงานที่ปราศจากร่องหรือป่า ลักษณะของแม่พิมพ์แบบนี้ จะมีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์เพียงเส้นเดียว หรือมีช่องเปิดสำหรับปลดชิ้นงานแกนรูว้าง และแกนรูแคบเพียงช่องเดียวเท่านั้น

1.1.2 แม่พิมพ์ฉีดแบบแยกด้านข้าง (Split mould)

เป็นแม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบสำหรับชิ้นงานที่มีร่องหรือป่าด้านนอก ส่วนของป้าจะแยกเป็นชิ้นส่วนหลายชิ้นที่สามารถเลื่อนใช้ และควบคุม ให้อยู่ในตำแหน่งด้วยกรอบบังคับ ชิ้นส่วนที่ประกอบกันเป็นป้าของแม่พิมพ์เคลื่อนที่ได้ โดยอาศัยอุปกรณ์หรือกลไกต่างๆ เช่น สลักเกลียว ขาตะสปริงลูกสูบ และกระบอกสูบ เป็นต้น

1.1.3 แม่พิมพ์ฉีดแบบคลายเกลียว (Unscrewing mould)

เป็นแม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบสำหรับผลิตชิ้นงานที่มีร่องหรือป่าด้านใน เช่น ชิ้นงานที่มีเกลียว ในการขึ้นรูปเกลียวจะอาศัยส่วนป้า (core) ที่เป็นเกลียว และออกแบบให้มีระบบปลดหรือคลายเกลียวโดยอัตโนมัติ การปลดชิ้นงานลักษณะนี้มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น ในกรณีเป็นการผลิตชิ้นงานจำนวนน้อยชิ้น ส่วนคอร์ที่เป็นเกลียวอาจนำไปใส่แม่พิมพ์ด้วยมือ เมื่อสิ้นสุดขบวนการฉีดแล้ว จึงนำชิ้นงานและส่วนคอร์ออกมาคลายเกลียวข้างนอกด้วยมือหรือมอเตอร์ขนาดเล็ก

1.1.4 แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น (Three-plate mould)

แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น เป็นแม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบให้มีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์ 2 เส้นหรือมีช่องเปิดของแม่พิมพ์ 2 ช่อง ส่วนใหญ่จะใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดที่ต้องการให้มีระบบปลดแกนรูว้างและรูเข้าออกจากชิ้นงานโดยอัตโนมัติ กล่าวคือเมื่อสิ้นสุดขบวนการฉีดแม่พิมพ์จะแยกเปิดออกตามแนวเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์เส้นที่ 1 ซึ่งในส่วนนี้จะประกอบด้วยแกนรูแคบและรูว้าง ในขณะเดียวกันก็จะแยกแกนรูเข้าออกจากชิ้นงานด้วย หลังจากนั้นเมื่อแม่พิมพ์เลื่อนเปิดต่อไป ก็จะแยกเปิดออกตามแนวเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์เส้นที่ 2 อีกชั้นหนึ่งเพื่อปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์

1.1.5 แม่พิมพ์ฉีดแบบรูวิ่งร้อน (Hot runner injection mould)

บางครั้งเรียกว่าแม่พิมพ์ฉีดแบบปราศากรูวิ่งหรือรูฉีด เป็นแม่พิมพ์ที่ออกแบบมาเพื่อลดปัญหาที่เกิดจากระบบป้อนของแม่พิมพ์ ทำให้แม่พิมพ์แบบอิมเพรสชันเดียวไม่มีแกนรูฉีดติดอยู่และแม่พิมพ์แบบหลายอิมเพรสชันจะไม่มีแกนรูฉีด แกนรูวิ่งและแกนรูเข้าจะติดอยู่ที่ชิ้นงานเมื่อสิ้นสุดขบวนการฉีด เป็นการช่วยประหยัดพลาสติกที่ต้องสูญเสียไปกับระบบป้อน อีกทั้งนอกจากนี้ ยังลดเวลาในการตกแต่งชิ้นงานและปลดแกนรูเข้าออกจากชิ้นงานในภายหลังได้อีกด้วย ระบบป้อนของแม่พิมพ์จะออกแบบเป็นพิเศษโดยให้มีตัวทำความร้อนติดอยู่ เพื่อให้ความร้อนแก่ระบบป้อน ทำให้พลาสติกที่อยู่ในระบบป้อนมีสภาพหลอมอยู่ตลอดเวลา พร้อมทั้งจะถูกฉีดเข้าสู่อิมเพรสชันของแม่พิมพ์สำหรับผลิตชิ้นงานต่อไปได้ ทำให้ระยะเวลาในการฉีดชิ้นงานพลาสติกแต่ละชิ้นสั้นลง เป็นการช่วยเพิ่มปริมาณการผลิต เนื่องจากจะต้องมีการออกแบบระบบป้อนเป็นพิเศษ ทำให้แม่พิมพ์ชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้น จึงเหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานจำนวนมากจึงจะคุ้มทุน

1.1.6 แม่พิมพ์ฉีดแบบชั้น (Stack mould)

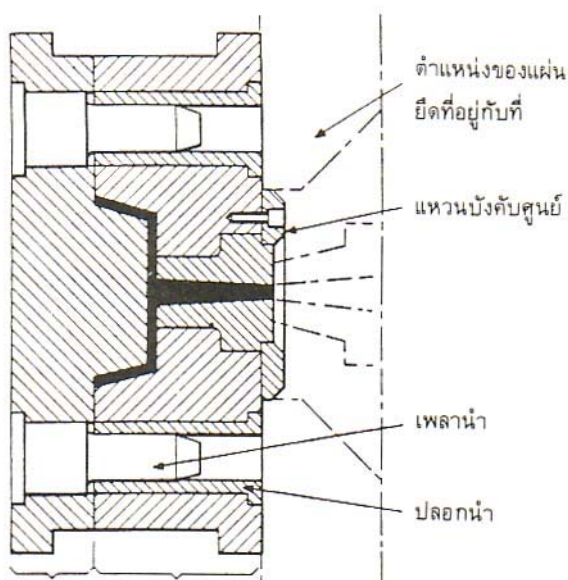
ในการผลิตชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กและยาว หรือมีขนาดบางแต่กว้าง เช่น ค้ำมกรรไกร ไม้แขวนเสื้อ เป็นต้น ในแม่พิมพ์อาจมีหลายอิมเพรสชันจนเต็มเนื้อที่ของแผ่นแม่พิมพ์แล้วก็ตาม แต่ยังคงมีเนื้อพลาสติกหลอมค้างอยู่ในกระบอกฉีดอีกมาก กล่าวคือ ปริมาณเนื้อพลาสติกหลอมที่เครื่องผลิตได้นี้ อาจทำได้โดยการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีแผ่นแม่พิมพ์ซ้อนๆ กัน หรือทำแผ่นแม่พิมพ์หลายๆ ชั้น

1.2 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

แม่พิมพ์ฉีดเป็นแม่พิมพ์ที่มีส่วนประกอบย่อยๆ มากมาย เพื่อให้แม่พิมพ์สามารถทำการผลิตชิ้นงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และแม่พิมพ์แต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบย่อยๆ ที่แตกต่างกันเพื่อช่วยให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามต้องการ สำหรับการแนะนำถึงวิธีการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดแบบต่างๆ ในการวิจัยนี้จึงขอกล่าวเพียงส่วนประกอบพื้นฐานของแม่พิมพ์แบบสองแผ่นเท่านั้นซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆ ดังนี้ (ชาลี, 2539ก.)

1.2.1 ส่วนอยู่กับที่และส่วนเคลื่อนที่

จากภาพที่ 1 จะเห็นว่าชิ้นส่วนต่างๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก นั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือส่วนที่ยึดอยู่กับส่วนที่ยึดกับแผ่นแผ่นยึดที่อยู่กับที่ของเครื่องฉีดพลาสติก เรียกว่า “ส่วนที่อยู่กับที่” (fixed half) อีกส่วนหนึ่งจะยึดอยู่กับแผ่นยึดที่เคลื่อนที่ของเครื่องฉีดพลาสติก เรียกว่า “ส่วนเคลื่อนที่” (moving half) ขั้นตอนนี้จะเป็นการตัดสินใจว่าจะยึดแผ่นเป้าหรือแผ่นคอร์ (core) เข้ากับส่วนใดของเครื่องฉีดพลาสติก โดยทุกๆ ไปแล้วแผ่นคอร์จะยึดอยู่กับส่วนเคลื่อนที่ ซึ่งมีเหตุผลคือชิ้นงานพลาสติกเมื่อเย็นตัวลงจะหดตัวและรัดติดกับคอร์ อย่างไรก็ตามการหดตัวติดกับคอร์ของเนื้อพลาสติกนี้อาจจำเป็นต้องใช้ระบบปลดชิ้นงานบางแบบมาช่วยดันปลดชิ้นงานออก การเคลื่อนที่ของระบบปลดชิ้นงานจะกระทำได้ง่ายถ้าแผ่นคอร์ยึดอยู่กับส่วนเคลื่อนที่ของระบบปลดชิ้นงานจะกระทำได้ง่ายถ้าแผ่นคอร์ยึดอยู่กับส่วนเคลื่อนที่ของแม่พิมพ์ นอกจากนี้ในกรณีที่เป็นแม่พิมพ์โพรงเดี่ยว (single-impulsion basis mould) ที่ซึ่งเนื้อพลาสติกถูกฉีดผ่านปลอกกรูฉีดเข้าทางด้านใต้ของชิ้นงาน โดยตรง จึงนิยมยึดแผ่นเป้าติดกับส่วนที่อยู่กับที่ และยึดแผ่นคอร์กับส่วนเคลื่อนที่



ภาพที่ 1 ลักษณะส่วนที่อยู่กับที่และส่วนเคลื่อนที่
ที่มา: ชาลี (2539ก)

1.2.2 อิมเพรสชั่น (Impression)

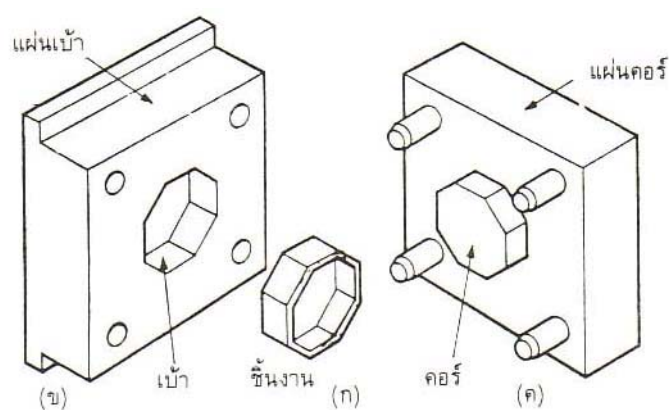
แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเป็นแม่พิมพ์ที่ประกอบขึ้นส่วนต่างๆ หลายชิ้นเกิดเป็นโพรงแบบภายในที่เรียกว่า “อิมเพรสชั่น” ซึ่งเมื่อพลาสติกจะถูกฉีดเข้าไปและเย็นตัวลงได้ชิ้นงานพลาสติกที่มีรูปร่างเหมือนกับโพรงแบบ โพรงแบบเกิดขึ้นจากการประกอบขึ้นส่วนของแม่พิมพ์ 2 ชิ้นคือ

ก. เป้า เป็นแม่พิมพ์ตัวเมียทำให้เกิดเป็นรูปร่างภายนอกของชิ้นงาน

ข. คอว์ เป็นส่วนของแม่พิมพ์ตัวผู้ทำให้เกิดเป็นรูปร่างภายในของชิ้นงาน

1.2.3 แผ่นเป้าและแผ่นคอว์ (Cavity and core plates)

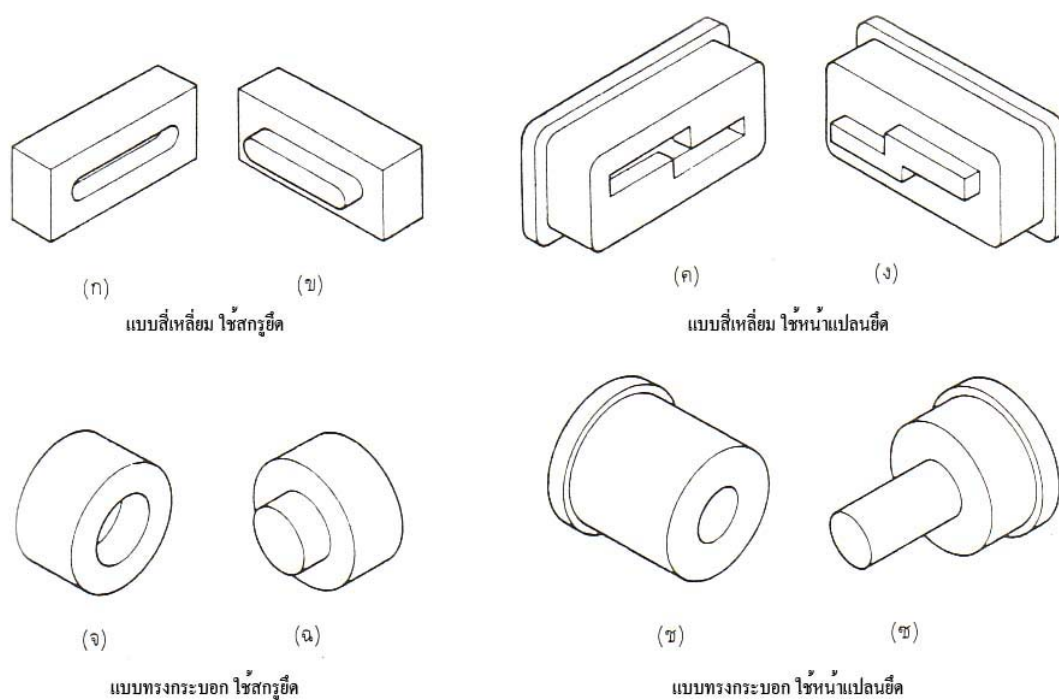
จากภาพที่ 2 แสดงให้เห็นถึงแม่พิมพ์แบบง่ายๆ ของภาชนะบรรจุสิ่งของทรงแปดเหลี่ยม (ภาพที่ 2ก) แม่พิมพ์แบบง่ายๆ ประกอบด้วยแผ่นแม่พิมพ์ 2 แผ่น แผ่นหนึ่งขุดลึกเป็นโพรงเข้าไปซึ่งเป็นรูปทรงภายนอกของชิ้นงานเรียกว่า “แผ่นเป้า” (ภาพที่ 2ข) และอีกแผ่นหนึ่งทำเป็นแกนยื่นออกมาเป็นส่วนรูปภายในของชิ้นงาน ส่วนนี้เรียกว่า “แผ่นคอว์” (ภาพที่ 2ค) เมื่อแม่พิมพ์ปิดแผ่นเป้าและแผ่นคอว์จะเลื่อนเข้าประกบกัน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างขึ้นระหว่างแผ่นเป้าและแผ่นคอว์ ซึ่งก็คือส่วนที่เรียกว่า “โพรงแบบ”



ภาพที่ 2 ชิ้นส่วนพื้นฐานของแม่พิมพ์ฉีด ประกอบด้วยแผ่นเป้าและคอว์
ที่มา: ชาลี (2539ก)

1.2.4 อินเสิร์ตของเบ้าและคอร์ (Inserts: cavity and core)

สำหรับแม่พิมพ์ที่มีโครงแบบค่อนข้างประณีต ซับซ้อน และเป็นแม่พิมพ์ที่มีหลายโพรง หากจะทำแผ่นเบ้าและแผ่นคอร์ขึ้นรูปจากแผ่นเหล็กขึ้นเดียวตลอดเหมือนแม่พิมพ์แบบขึ้นเดียว พบว่ามีความยากมากและราคาแพง วิธีทำแม่พิมพ์ที่ได้จากการประกอบของแผ่นยึดอินเสิร์ตจึงถูกนำมาประยุกต์ใช้แทนวิธีดังกล่าวจะขึ้นรูปโครงแบบจากแผ่นเหล็กเล็กๆ ซึ่งเมื่อผ่านการตัดเฉือนขึ้นรูปแล้วเรียกแผ่นเล็กๆ นี้ว่า “อินเสิร์ต” และส่วนที่ขึ้นรูปภายในชิ้นของชิ้นงานหรือตัวผู้เรียกว่าอินเสิร์ตของคอร์ในทางกลับกันส่วนที่ขึ้นรูปภายนอกของชิ้นงาน หรือตัวเมียเรียกว่า อินเสิร์ตของเบ้า จากนั้นจึงนำอินเสิร์ตเหล่านี้สวมและยึดเข้ากับรูในแผ่นเหล็กที่เรียกว่าแผ่นยึดอินเสิร์ต รูเหล่านี้อาจจะเป็นรูตันหรือเจาะทะลุตลอดแผ่นยึดแม่พิมพ์ สำหรับกรณีหลังจะมีแผ่นประกบยึดติดกับด้านหลังของแผ่นยึดอินเสิร์ต เพื่อยึดให้อินเสิร์ตอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ



ภาพที่ 3 อินเสิร์ตของเบ้าและคอร์แบบต่างๆ

ที่มา: ชาลี (2539ก)

1.2.5 แผ่นยึดอินเสิร์ท (Bolsters)

จากหัวข้อที่แล้วทำให้ทราบกันแล้วว่าหากตัดลินี้ออกแบบทำเบ้าและคอร์ของแม่พิมพ์ในลักษณะของอินเสิร์ท ซึ่งต้องประกอบเข้ากับชุดของแม่พิมพ์อย่างมั่นคง ลักษณะนี้ทำได้โดยยึดอินเสิร์ทเข้ากับแผ่นยึดอินเสิร์ท หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “แผ่นยึดแม่พิมพ์” หลังจากนั้นจึงจัดการบังคับด้วยตัวนำเลื่อนที่เหมาะสมเพื่อให้มั่นใจได้ว่าเบ้าและคอร์จะคงอยู่ในตำแหน่งได้ศูนย์กันตลอดไป นักออกแบบได้คิดประดิษฐ์แผ่นยึดอินเสิร์ทขึ้นมามากมายหลายแบบเพื่อพยายามทำให้การประกอบอินเสิร์ท หรือการตัดเนื้อขึ้นรูปอินเสิร์ททำได้ง่าย โดยมากใช้กันมีอยู่ด้วยกัน 5 แบบ ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้

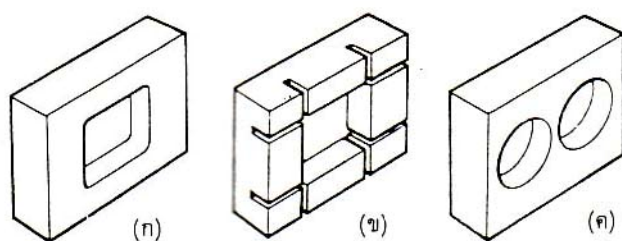
ก. แบบแผ่นตัน (Solid bloster) แบบนี้เหมาะที่จะใช้กับอินเสิร์ทแบบสี่เหลี่ยม และแบบทรงกระบอก (ภาพที่ 4)

ข. แบบเป็นแถบ (Strip-type bloster) ใช้เฉพาะกับอินเสิร์ทแบบสี่เหลี่ยม (ภาพที่ 5 ก)

ค. แบบเป็นกรอบ (Frame-type bloster) ถึงแม้ว่าแบบนี้จะสามารถใช้ได้กับอินเสิร์ททั้งแบบสี่เหลี่ยมและแบบทรงกระบอก แต่เหมาะที่จะใช้กับอินเสิร์ทแบบทรงกระบอกมากกว่า (ภาพที่ 5 ข และ ค)

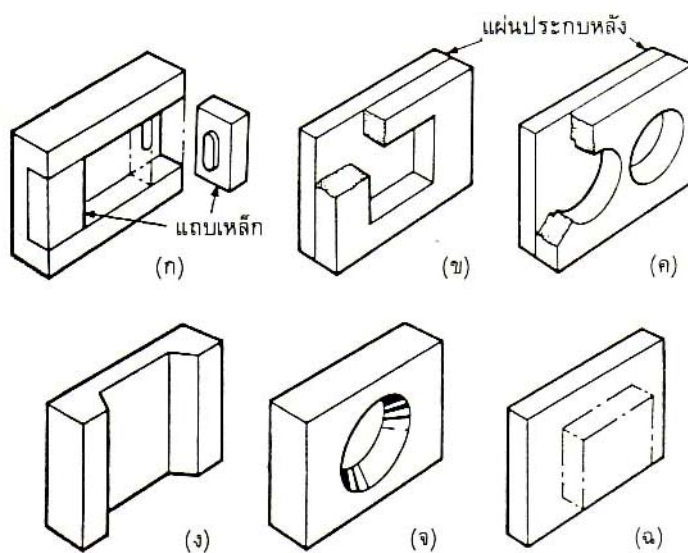
ง. แบบกรอบเกรียว (Chase bolster) แบบนี้ใช้ร่วมกับอินเสิร์ทแบบแยกส่วน (Split inserts) (ภาพที่ 5 ง และ จ)

จ. แบบแท่นยึด (Bolster plate) แบบนี้ใช้ในกรณีพิเศษสำหรับอินเสิร์ทแบบสี่เหลี่ยมและแบบวงกลมเฉพาะบางกรณีเท่านั้น (ภาพที่ 5 ฉ)



ภาพที่ 4 แผ่นยึดอินเลิร์ตแบบแผ่นตัน

ที่มา: ชาลี (2539ก)



ภาพที่ 5 แผ่นยึดอินเลิร์ตแบบอื่นๆ

ที่มา: ชาลี (2539ก)

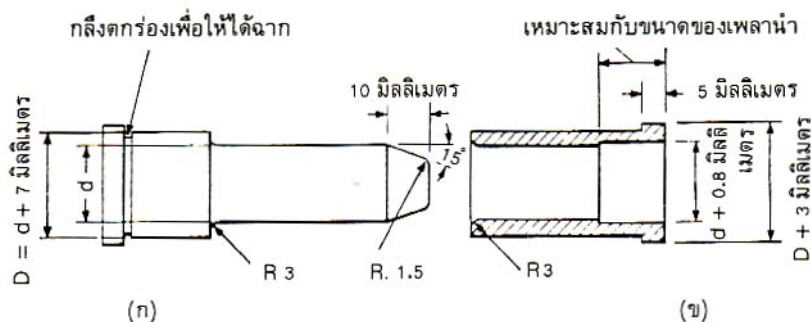
1.2.6 เพลาน้ำ (Guide pillars)

เพื่อช่วยให้งานฉีดพลาสติกได้ชิ้นงานที่มีความหนาของเปลือกชิ้นงานที่มีงานสม่ำเสมอ จำเป็นจะต้องทำให้เบ้าและคอร์ได้ศูนย์เดียวกัน ลักษณะนี้กระทำได้โดยใช้เพลาน้ำประกอบเข้ากับแม่พิมพ์ด้านหน้า ซึ่งหลังจากนั้นจะสวมประกอบกับปลอกนำที่อยู่บนพิมพ์อีกแผ่นหนึ่งเมื่อแม่พิมพ์ปิดลง ขนาดของเพลาน้ำจะต้องมีขนาดโตพอที่จะสามารถรักษาค่าแห่งศูนย์ของแม่พิมพ์ไว้ได้ ไม่ว่าจะใช้แรงฉีดมากน้อยเท่าใด นอกจากนี้เพลาน้ำยังมีหน้าที่ป้องกันคอร์ของ

แม่พิมพ์และทำหน้าที่เหมือนกับเป็นสลักบังคับตำแหน่ง (Location pins) เมื่อจะประกอบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน

1.2.7 ปลอกนำ (Guide bushes)

ปลอกนำจะประกอบอยู่ในแม่พิมพ์เพื่อช่วยไม่ให้พินนำเลื่อนของแม่พิมพ์สึกหรอ อันเกิดจากการเสียดสี และสามารถถอดเปลี่ยนได้ในกรณีเกิดการสึกหรอหรือเสียหายขึ้น รูของปลอกนำจะออกแบบให้สวมพอดีกับเพลานำ ขณะที่เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกจะสวมอัดติดอยู่กับแผ่นแม่พิมพ์ ปลายด้านหน้าของปลอกนำจะทำให้โค้งเป็นรัศมี เพื่อเป็นช่วงการนำเพลามาเข้า

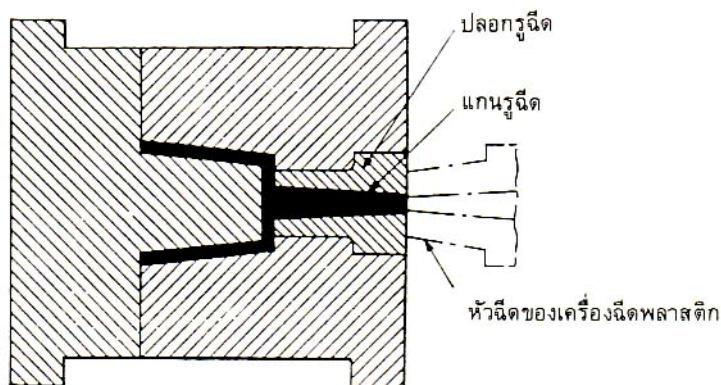


ภาพที่ 6 การออกแบบเพลานำและปลอกนำ

ที่มา: ชาลี (2539ก)

1.2.8 ปลอกรูฉีด (Sprue bush)

ในระหว่างกระบวนการฉีดพลาสติก เนื้อพลาสติกจะถูกส่งออกจากหัวฉีด (Nozzle) ของเครื่องฉีดพลาสติกในสถานะของเหลว และเข้าแม่พิมพ์ทางรูฉีดผ่านเข้าสู่โพรงแบบรูฉีดเข้าแบบง่ายๆ จะเป็นรูเรียวที่อยู่ภายในของรูฉีด เนื้อพลาสติกที่อยู่ในรูฉีดเข้าเรียกว่าแกนรูฉีด เมื่อสิ้นสุดการฉีดพลาสติกที่เข้าปลอกรูฉีดจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดรูฉีด (Sprue) ในทางปฏิบัติปลอกรูฉีดจะทำหน้าที่เป็นข้อต่อระหว่างหัวฉีดของเครื่องพลาสติกกับผิวด้านหน้าของแม่พิมพ์ และจัดเตรียมรูทะลุที่เหมาะสม ซึ่งเนื้อพลาสติกสามารถไหลไปตามรูนี้จนถึงโพรงแบบได้



ภาพที่ 7 ระบบป้อนของแม่พิมพ์ฉีดชั้นเดียว
ที่มา: ชาลี (2539ก)

1.2.9 แหวนบังคับศูนย์ (Register ring)

แหวนบังคับศูนย์หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแหวนกำหนดตำแหน่ง (Location ring) เป็นชิ้นส่วนกลมแบบใช้ประกอบเข้ากับผิวด้านหน้า (บางครั้งก็ประกอบเข้ากับผิวด้านหลัง) ของแม่พิมพ์จุดมุ่งหมายเพื่อใช้กำหนดตำแหน่งของแม่พิมพ์ให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องบนหน้าแปลนของเครื่องฉีดพลาสติก

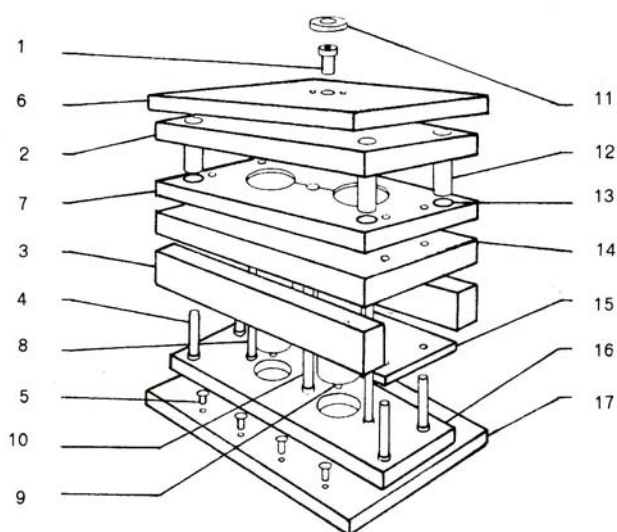
1.2.10 ชุดระบบปลดชิ้นงาน (Ejection)

วัสดุพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกทุกชนิดจะหดตัวลงเมื่อแข็งตัว ซึ่งหมายความว่าชิ้นงานจะหดตัวติดกับคอร์ที่ขึ้นรูปส่วนในของชิ้นงาน การหดตัวทำให้การปลดชิ้นงานกระทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้โดยปกติในทางปฏิบัติ จะจัดเตรียมชุดอุปกรณ์สำหรับปลดชิ้นงานออกจากส่วนคอร์ เพื่อความสะดวกในการทำงานบนเครื่องฉีดพลาสติกจะจัดเตรียมระบบกระทุ้งอัตโนมัติสำหรับดันให้ระบบปลดชิ้นงานทำงาน และระบบกระทุ้งอัตโนมัตินี้จะประกอบอยู่ด้านหลังของส่วนเคลื่อนที่ ด้วยเหตุนี้ระบบปลดชิ้นงานของแม่พิมพ์จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถ้าประกอบอยู่กับแม่พิมพ์ในส่วนที่เคลื่อนที่ คือส่วนที่ยึดอยู่กับส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องฉีด ซึ่งได้กล่าวแต่ต้นแล้วว่าต้องปลดชิ้นงานออกจากส่วนคอร์ของแม่พิมพ์ ดังนั้นส่วนคอร์จึงนิยมออกแบบให้ยึดติดอยู่กับส่วนเคลื่อนที่ของเครื่องฉีด ชุดระบบปลดชิ้นงานมีส่วนประกอบอยู่ 3 ส่วนคือ

ก. ห้องระบบปลดชิ้นงาน (Ejector grid)

ข. แผ่นประกอบตัวปลด (Ejector plate assembly)

ค. วิธีดันปลดชิ้นงาน (The method of ejection)



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบต่างๆ ของแม่พิมพ์
ที่มา: ชาติ (2539ก)

ส่วนประกอบต่างๆ มีดังต่อไปนี้

หมายเลข 1 ปล็อกรูฉีด

หมายเลข 2 แผ่นกาวีตี้

หมายเลข 3 แท่งรอง

หมายเลข 4 สลักดันกลับ

หมายเลข 5 สลักปะทะ

หมายเลข 6 แผ่นยึดด้านหน้า

หมายเลข 7 แผ่นคอร์

หมายเลข 8 สลักปลด

หมายเลข 9 ปล็อกรองรับ

หมายเลข 10 สลักดึงแกนรูฉีด

หมายเลข 11 แหวนบังคับศูนย์

หมายเลข 12 เพลาน้ำ

หมายเลข 13 ปล็อกนำ

หมายเลข 14 แผ่นรองหลัง

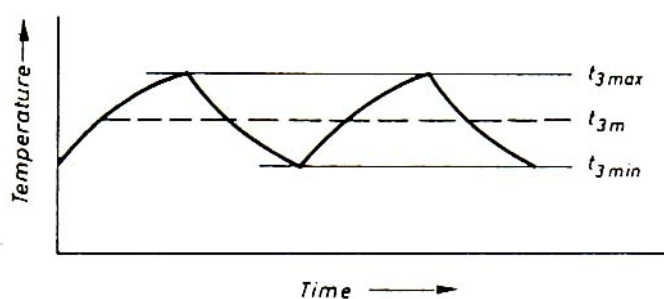
หมายเลข 15 แผ่นยึดตัวปลด

หมายเลข 16 แผ่นดันปลด

หมายเลข 17 แผ่นยึดด้านหลัง

1.3 การหล่อเย็นในแม่พิมพ์

อุณหภูมิของแม่พิมพ์มีผลอย่างมากต่อคุณภาพของชิ้นงาน โดยอุณหภูมิของแม่พิมพ์สามารถควบคุมได้จากระบบหล่อเย็น ซึ่งระบบหล่อเย็นที่ดีจะต้องสามารถควบคุมอุณหภูมิได้ตามที่ต้องการ การถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์นั้น ผิวโพรงแม่พิมพ์จะได้รับความร้อนจากเนื้อพลาสติกเหลวอย่างเป็นวัฏจักร ถ้าผลต่างของอุณหภูมิระหว่างน้ำหล่อเย็นและผิวโพรงเพิ่มขึ้นการถ่ายโอนความร้อนก็จะเพิ่มขึ้นด้วย โดยความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในวัฏจักรการฉีดมีดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การเปลี่ยนอุณหภูมิของผิวควาวิตที่แตกต่างกัน
ที่มา: ชาลี (2539ก)

ความต้องการให้เวลาในการหล่อเย็นสั้นที่สุดและทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพดีไปพร้อมๆ กันนั้นทำได้ยากเนื่องจากการหล่อเย็นที่เร็วทำให้เกิดความเค้นตกค้างและเกิดการบิดตัวขึ้นได้ แต่การทำให้เกิดถ่ายโอนความร้อนเป็นแบบเดียวกัน (Uniform) ก็สามารถลดปัญหาอันเกิดจากอุณหภูมิของผิวแม่พิมพ์ไม่เท่ากันได้ โดยหลักสำคัญในการออกแบบระบบหล่อเย็นมีดังนี้คือ

- แม่พิมพ์เป็นเสมือนตัวถ่ายเทความร้อนที่จะต้องมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้เพียงพอ
- ชิ้นงานต้องมีการเย็นตัวเป็นแบบเดียวกัน (Uniform) เพื่อให้ชิ้นงานมีคุณภาพดีและลดปัญหาการบิดตัว

1.3.1 ความสำคัญของการหล่อเย็น

ในงานฉีดพลาสติกมีหลักการต่างๆ ไป คือ ชิ้นงานพลาสติกจะได้มาจากเม็ดพลาสติกถูกหลอมเหลวแล้วฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์แล้วปล่อยให้แข็งตัวก่อนที่จะปลดออกจากแม่พิมพ์ พลาสติกเหลวที่ไหลในโพรงแม่พิมพ์จะมีผลอย่างมากต่อคุณภาพของชิ้นงาน และการกระจายของความดันในพลาสติกเหลวจนถึงช่วงการแข็งตัวในช่วงย้ารักษาความดันนั้นจะมีผลต่อขนาดและความคงตัวของชิ้นงาน ซึ่งอัตราและความสม่ำเสมอของการหล่อเย็นจะมีผลต่อส่วนสำคัญ 2 ส่วนสำคัญ คือ คุณภาพและต้นทุนการผลิต

ก. การพิจารณาด้านคุณภาพ จะประกอบด้วยการพิจารณาในด้านสภาพผิวของชิ้นงาน ความเครียดตกค้าง การตกผลึก และการบิดตัวเนื่องจากความร้อน

1) สภาพผิวชิ้นงาน วัสดุหลายประเภทจะต้องการอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่สูงเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี และส่วนที่ต้องการความเงาของพื้นผิว ถ้าในพื้นที่บางส่วนของผิวโพรงแม่พิมพ์มีอุณหภูมิที่แตกต่างจากผิวส่วนอื่น จะทำให้สภาพพื้นผิวในบริเวณนั้นเกิดความแตกต่างจากส่วนอื่นขึ้นได้

2) ความเค้นตกค้าง ความเค้นตกค้างในชิ้นงานเกิดมาจากผลของความเค้นเฉือนอันเนื่องมาจากช่วงการเติมและช่วงย้ารักษาความดัน และเกิดจากพื้นที่ที่ต่างกันของการหล่อเย็น และอัตราการหล่อเย็นที่ต่างกันซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิผิว เมื่อทำการปลดโดยการที่จะลดความเค้นจำเป็นจะต้องให้การหล่อเย็นเป็นไปแบบสม่ำเสมอ

3) การตกผลึก ระดับการตกผลึกในชิ้นงานฉีดที่เป็นวัสดุประเภท semi-crystalline จะส่งผลกระทบต่อระดับการหล่อเย็นของชิ้นงานและอัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน ความแตกต่างในการตกผลึกจะส่งผลต่อการหดตัวซึ่งจะทำให้การหล่อเย็นในชิ้นงานมีความยากในการรักษาความเผื่อข้อสัดส่วนให้ได้ตามต้องการ ซึ่งความแตกต่างของการหดตัวในส่วนใดส่วนหนึ่งของแม่พิมพ์ซึ่งแตกต่างจากส่วนอื่นมักจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการบิดตัวของชิ้นงาน

4) การงอตัวเนื่องจากความร้อน กรณีถ้ามีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวบนกับผิวล่างของชิ้นงานจะมีผลการเกิดการงอตัว คล้ายกับแผ่น bimetallic ซึ่งชิ้นงานจะ

เกิดผลอย่างเดียวกันถ้าเมื่อทำการปลดแล้วเกิดความแตกต่างในการถ่ายเทความร้อนของผิวบนและล่าง

ข. การพิจารณาในด้านต้นทุนการผลิต จะพิจารณาในส่วนของคุณหมูปลด ซึ่งคุณหมูที่ทำกรปลดชิ้นงานนั้น ชิ้นงานจะต้องแข็งเพียงพอที่จะทนต่อแวนโน้มที่จะโค้งงอเนื่องจากแรงดันอันเกิดจากระบบปลดชิ้นงาน ซึ่งแรงปลดชิ้นงานจะส่งผลต่อสัดส่วนและสภาพพื้นผิวของชิ้นงานและจำนวนโพรงของแม่พิมพ์ที่จะถูกย้าในช่วงของการฉีดเติมและฉีดย้า ซึ่งบ่อยครั้งที่เวลาตลอดวงจรการทำงานจะถูกคำนวณจากเวลาที่ใช้ในการลดอุณหภูมิของชิ้นงานจนถึงระดับที่ปลอดภัยต่อการปลด

ถ้าส่วนของการฉีดเติมและการฉีดย้าเป็นไปอย่างเหมาะสมแล้ว การพัฒนาประสิทธิภาพของการหล่อเย็นสามารถลดระยะเวลาในการหล่อเย็นได้อย่างมาก และอีกทั้งเวลาในการหล่อเย็นโดยส่วนมากจะกินเวลามากกว่า 80% ของเวลาตลอดวัฏจักร อันจะทำให้เป็นการลดเวลาของตลอดวัฏจักรและต้นทุนในการผลิตด้วยเช่นกัน

1.3.3 ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบหล่อเย็น

โดยความสำคัญและตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการถ่ายเทความร้อน แบ่งได้เป็นส่วนที่สำคัญหลักๆ คือ การถ่ายเทความร้อนจากพลาสติกไปยังผนังโพรงแม่พิมพ์ การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังแม่พิมพ์และการถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์ไปยังสารหล่อเย็น

ก. การถ่ายเทความร้อนจากพลาสติกไปยังผนังโพรงแม่พิมพ์โดยประสิทธิภาพของระบบหล่อเย็นจะส่งผลต่อการนำความร้อนออกจากชิ้นงานและถ่ายเทสู่ผิวของโพรงแม่พิมพ์ ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติของวัสดุ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิพลาสติกเหลวกับอุณหภูมิของแม่พิมพ์และคุณภาพของผิวสัมผัสระหว่างพลาสติกที่เย็นตัวกับแม่พิมพ์

ข. การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังแม่พิมพ์ ประสิทธิภาพของระบบหล่อเย็นจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ไปสู่ท่อหล่อเย็น สมบัติของวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ซึ่งรวมถึงค่าการนำความร้อนของวัสดุ ระยะระหว่างท่อหล่อเย็นกับชิ้นงานและความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพลาสติกเหลวกับสารหล่อเย็นในท่อหล่อเย็น จะส่งผลต่อ

ประสิทธิภาพของระบบ และหน่วยของค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) คือ W/mk ซึ่งถ้ามีค่ามากก็แสดงถึงวัสดุนั้นจะนำความร้อนได้ดี

ท่อหล่อเย็นถ้าใกล้กับผิวของโพรงแม่พิมพ์การถ่ายเทความร้อนออกจะมากขึ้นไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งของท่อหล่อเย็นถ้าใกล้กับผิวของโพรงแม่พิมพ์มากเกินไปจะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของผิวโพรงแม่พิมพ์ทำให้เกิดการแตกต่างของอุณหภูมิขึ้นได้ ดังนั้นจึงควรเพิ่มจำนวนท่อหล่อเย็นเพื่อที่จะลดระยะระหว่างท่อหล่อเย็นด้วยกันเพื่อลดความแตกต่างของอุณหภูมิ ซึ่งตำแหน่งของท่อหล่อเย็นที่เหมาะสมจึงควรขึ้นอยู่กับทั้งความสม่ำเสมอในการหล่อเย็นและควบคุมความเร็วในการหล่อเย็น

ค. การถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์ไปยังสารหล่อเย็น ประสิทธิภาพของระบบหล่อเย็นจะได้รับกระทบจากการถ่ายเทความร้อนจากชนิดวัสดุของแม่พิมพ์ ไปสู่สารหล่อเย็น และการถ่ายเทความร้อนก็จะได้รับผลกระทบจากสภาพการไหลของสารหล่อเย็นที่ไหลผ่านแม่พิมพ์ อุณหภูมิเข้าของสารหล่อเย็น ชนิดของสารหล่อเย็น และปริมาณการไหลของสารหล่อเย็น

การไหลแบบบอลลูนซึ่งจะบอกได้จากค่า Reynolds number ซึ่งจะต้องมากกว่า 3500 (ช่วง 2300 - 3500 เป็นช่วง transient) การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกท่อหล่อเย็นเข้าสู่สารหล่อเย็นจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าไหลแบบ laminar เป็นอย่างมากเนื่องจากผลกระทบของการผสมกันของสารหล่อเย็นที่ไหลแบบบอลลูน เมื่อพิจารณาในด้านชนิดของสารหล่อเย็นควรจะให้แน่ใจว่าค่าความจุของระบบมีเพียงพอที่จะช่วยให้สารหล่อเย็นมีปริมาณการไหลและความดันที่เพียงพอต่อการไหลให้มีอัตราไหลและความดันที่เพียงพอต่อการไหลให้มีอัตราไหลและอุณหภูมิ ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนออกได้ในปริมาณที่ต้องการ

ง. การถ่ายเทความร้อนแบบอื่นๆ ความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์จากพลาสติกเหลวส่วนมาก (ประมาณ 80 - 95%) จะถูกถ่ายเทโดยการนำความร้อนผ่านโลหะที่ใช้ทำแม่พิมพ์ไปสู่ผิวของระบบหล่อเย็นซึ่งจะกระจายความร้อนไปสู่สารหล่อเย็นอีกทีหนึ่ง

การพาความร้อนที่บริเวณผิวของแม่พิมพ์และการนำความร้อนไปสู่แท่นจับยึดมีเพียงส่วนน้อยคือประมาณ 5 - 15% ของปริมาณความร้อนที่ถ่ายเททั้งหมด

การแผ่รังสีนั้นจะมีผลเพียงพอต่อการพิจารณา เมื่ออุณหภูมิของแม่พิมพ์สูงกว่า 85 °C ซึ่งการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีนั้นโดยทั่วไปมักจะน้อยกว่า 5% ของปริมาณความร้อนที่ถ่ายเททั้งหมด

1.3.4 หลักการพิจารณาในการออกแบบระบบหล่อเย็น

วัตถุประสงค์ของผู้ออกแบบแม่พิมพ์ควรจะออกแบบระบบหล่อเย็นที่มีสมบัติต่างๆ ดังนี้ และจะต้องมีการหล่อเย็นอย่างสม่ำเสมอบนชิ้นงานควบคู่กันไปด้วย

ก. สามารถทำให้โพรงแม่พิมพ์มีอุณหภูมิตรงตามที่ต้องการ สำหรับเริ่มการฉีดชิ้นงานในรอบต่อไป

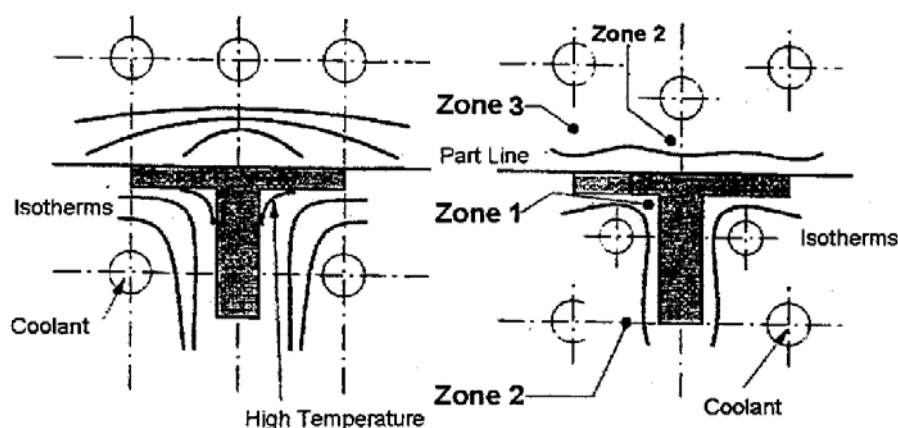
ข. ลดเวลาตลอดวัฏจักรการทำงานให้มีค่าต่ำที่สุด

โดยระบบหล่อเย็นควรออกแบบให้มีการถ่ายเทความร้อนให้เท่ากันทั้ง 2 ด้าน ซึ่งในส่วนของการพิจารณาตัวแปรที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบหล่อเย็นในขั้นที่จะทำการออกแบบจะแบ่งเป็น 2 ส่วนที่สำคัญคือ สัดส่วนทางกายภาพและรูปแบบของระบบหล่อเย็น วัสดุ และตัวแปรในส่วนของการหล่อเย็น

1.3.5 ลักษณะทางกายภาพและรูปแบบของระบบหล่อเย็น

การออกแบบทางกายภาพของระบบหล่อเย็นโดยทั่วไปแล้ว มักจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแม่พิมพ์ เช่น ตำแหน่งของรอยผ่า แกนที่เคลื่อนที่และส่วนปลดชิ้นงาน ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดได้อย่างตายตัวสำหรับหลักเกณฑ์การออกแบบตำแหน่งที่ดีที่สุด

ก. Hot spots อุณหภูมิของพื้นผิวแม่พิมพ์จะเป็นผลมาจากตำแหน่งของท่อหล่อเย็นซึ่งสัมพันธ์กับผิวของแม่พิมพ์ สำหรับในชิ้นงานรูปร่างง่ายๆ คือ มีความหนาคงที่ และมีระยะห่างระหว่างท่อหล่อเย็นที่เท่ากันก็จะทำให้เกิดความสม่ำเสมอของการหล่อเย็น แม้ว่าในชิ้นงานส่วนใหญ่จะมีความหนาไม่เท่ากันและมีสัดส่วนที่ต่างกันไป เช่น มีมุม คีรีบซึ่งจะทำให้เกิด hot spot ขึ้นได้ เพื่อที่จะป้องกันจะสามารถทำได้โดยย้ายท่อหล่อเย็นให้ใกล้ส่วนที่เกิด hot spot หรือเพิ่มท่อหล่อเย็นเข้าไปในบริเวณนั้น ดังภาพที่ 10



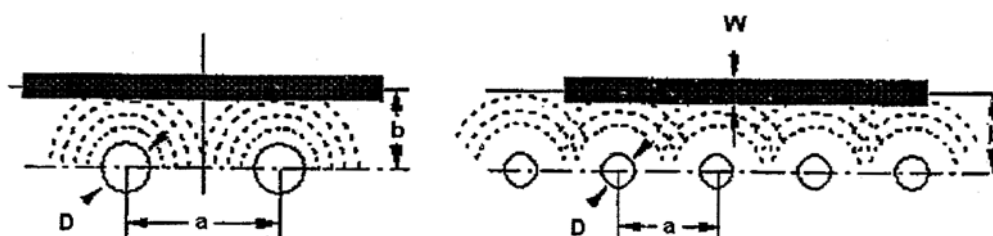
ภาพที่ 10 ภาพด้านซ้าย คือ ระบบหล่อเย็นเดิมและรูปด้านขวา คือ ระบบหล่อเย็นที่ปรับปรุงแล้ว
ที่มา: วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์ (2538)

- บริเวณที่ 1 - ท่อหล่อเย็นจะถูกเสริมเข้ามาให้ใกล้เคียงกับผิวโพรงแม่พิมพ์เท่าที่เป็นไปได้
บริเวณที่ 2 - ท่อหล่อเย็นแนวกลางถูกเลื่อนเข้าใกล้กับส่วนที่มีความร้อนถ่ายเทออกมาจากแนวครึ่ง
บริเวณที่ 3 - ย้ายท่อหล่อเย็นด้านซ้ายและขวาออกจากผิวโพรงแม่พิมพ์

ข. ระยะระหว่างท่อหล่อเย็นถึงโพรงแม่พิมพ์ ระยะห่างยิ่งมากจะทำให้ความสม่ำเสมอในการหล่อเย็นเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้อุณหภูมิของโพรงแม่พิมพ์เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากเมื่อทำการฉีด ซึ่งจะก่อให้เกิดผลต่อคุณสมบัติทางกลของชิ้นงานและการฉีดเดิม และทำให้เกิดการบิดตัวขึ้นได้ แต่เมื่อมีระยะยิ่งน้อยการถ่ายเทความร้อนออกก็จะเร็วและรวดเร็วและการใช้ระยะเวลาที่สั้นจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิบนชิ้นงานซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาในด้านคุณภาพได้ โดยทั่วไปแนวทางการออกแบบระยะระหว่างท่อหล่อเย็นถึงโพรงแม่พิมพ์ควรจะอยู่ที่ 2.5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อหล่อเย็น

ค. ระยะระหว่างท่อหล่อเย็นด้วยกัน ระยะห่างยิ่งน้อยจะทำให้ความสม่ำเสมอของการถ่ายเทความร้อนมีมาก แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปการออกแบบโดยรวมมักจะให้ระยะห่างระหว่างท่อหล่อเย็นค่อนข้างมาก ซึ่งจะทำให้ระยะห่างระหว่างท่อหล่อเย็นถึงโพรงแม่พิมพ์ต้องเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งระยะที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อหล่อเย็นและความหนาของชิ้นงาน โดยแนวทางการออกแบบมีดังภาพที่ 11 ภาพด้านซ้าย คือ ระยะของท่อหล่อเย็นที่ไม่เหมาะสม ไม่มีความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากมีระยะ a มาก ระยะ b น้อย

และ D ใหญ่ ภาพด้านขวา คือ ระยะของท่อหล่อเย็นที่เหมาะสม มีความสม่ำเสมอในการถ่ายเทความร้อน โดยขนาดของ D ขึ้นกับความหนา W



ภาพที่ 11 ระยะของการจัดวางระบบหล่อเย็น
ที่มา: วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์ (2538)

ตารางที่ 1 ค่าที่แนะนำสำหรับขนาดของท่อหล่อเย็น

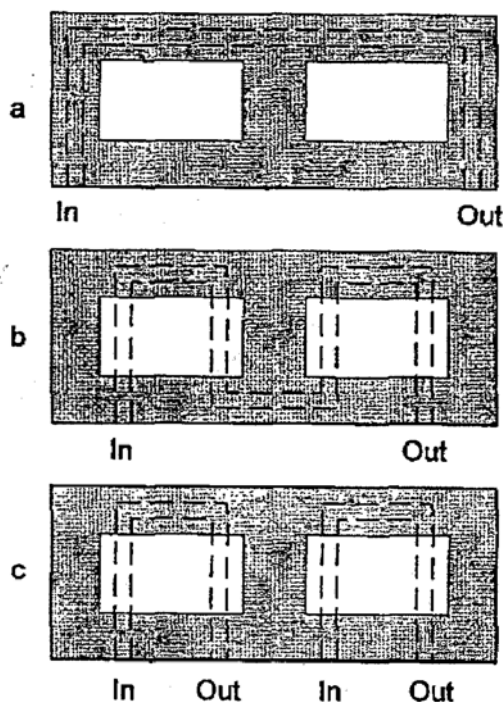
ความหนา W (มิลลิเมตร)	เส้นผ่าศูนย์กลาง D (มิลลิเมตร)
< 2	8 – 10
< 4	10 – 12
< 6	12 – 15

หมายเหตุ ระยะ b แนะนำอยู่ที่ 2 – 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D

ระยะ a แนะนำไม่ควรเกิน 3 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง D

ที่มา: วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์ (2538)

ง. ความยาวของท่อหล่อเย็น การเพิ่มความยาวของท่อหล่อเย็นจะเพิ่มพื้นที่ผิวที่จะทำการถ่ายเทความร้อน ซึ่งตามข้างต้นภาพที่ 12 (b) จะเป็นรูปแบบที่ดีกว่าภาพที่ 12 (a) แต่เนื่องจาก เมื่อความยาวของท่อหล่อเย็นมากขึ้น จะทำให้เกิดความดันตก และอุณหภูมิของสารหล่อเย็นจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงไม่ให้ความแตกต่างของอุณหภูมิสารหล่อเย็นในขาเข้ากับออกเกิน 3°C จึงควรแบ่งระบบที่มีความยาวมากเป็น 2 หรือหลายๆ ระบบ ดังภาพ 12 (c)



ภาพที่ 12 การวางระบบหล่อเย็นแบบต่างๆ

a) แบบเดิม b) เพิ่มความยาวของระบบ

c) แบ่งเป็น 2 ระบบ

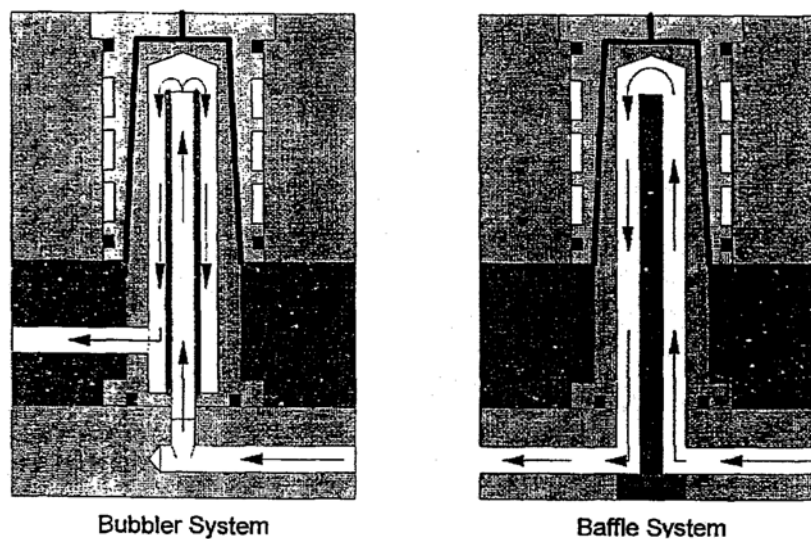
ที่มา: วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์ (2538)

จ. อุปกรณ์พิเศษต่างๆ ในระบบหล่อเย็น ในบางส่วนของแม่พิมพ์ที่สามารถหล่อเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยท่อหล่อเย็นแบบปกติ ซึ่งได้แก่แกนของแม่พิมพ์จำเป็นจะต้องใช้ Baffles และ Bubblers

1) Bubblers สร้างโดยการเชื่อมต่อด้วยที่เจาะรูไว้แล้วในส่วนตรงกลางทำให้เกิดช่องรูปทรงวงแหวนขึ้นมา โดยสารหล่อเย็นจะไหลขึ้นจากบริเวณท่อที่อยู่ตรงกลางแล้วไหลลงในบริเวณวงแหวนรอบๆ ดังภาพที่ 13 (ซ้าย)

2) Baffles สร้างโดยการใส่กั้นในส่วนที่เจาะรูซึ่งกั้นสารหล่อเย็นให้ไหลขึ้นในด้านหนึ่งแล้วไหลลงอีกด้านหนึ่งดังภาพที่ 13 (ขวา)

ในการเปลี่ยนทิศทางการไหลของสารหล่อเย็นจะเป็นการเพิ่มความอลวนของการไหลและเป็นการเพิ่มค่าความจุการถ่ายเทความร้อนของสารหล่อเย็น โดยทั้ง Baffles และ Bubblers จะส่งผลในการเพิ่มความอลวนของการไหลด้วยเช่นกัน เนื่องจากสิ่งที่ถูกเสริมเข้าไปในระบบจะทำให้การไหลเปลี่ยนทิศทางและยังสามารถหล่อเย็นในบริเวณที่เข้าถึงได้ยาก



ภาพที่ 13 อุปกรณ์สำหรับระบบหล่อเย็นในบริเวณที่เข้าถึงได้ยาก
ที่มา: วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์ (2538)

จ. รูปแบบของระบบ โดยทั่วไประบบหล่อเย็นจะมีรูปแบบแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ แบบขนานและขนานซึ่งมีรายละเอียดในการออกแบบ ดังนี้

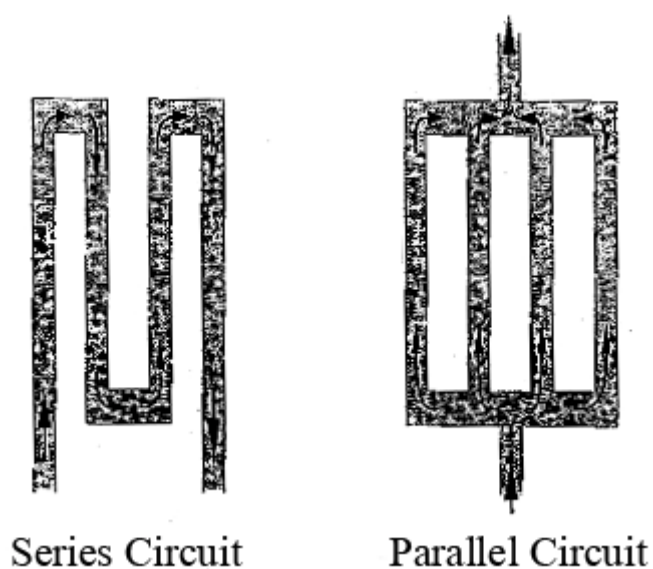
1) แบบขนาน (Parallel) ข้อดีของการออกแบบระบบแบบขนาน

- อัตราการไหลในแต่ละท่อจะถูกลดลง เมื่อมีสาขาของท่อหล่อเย็นเพิ่มขึ้นซึ่งจะลดประสิทธิภาพในการหล่อเย็น

- อัตราการไหลจะเปลี่ยนตามสัดส่วนของท่อในส่วนต่างๆ ซึ่งอาจเกิดการหล่อเย็นที่ไม่สม่ำเสมอขึ้นได้ แต่ข้อดีนี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับขนาดของท่อในแต่ละส่วนให้มีอัตราการไหลที่ใกล้เคียงกันให้มากที่สุด

- ถ้าในส่วนหนึ่งในระบบ เกิดตระกรันหรือเกิดการอุดตันขึ้น อัตราการไหลในส่วนนั้นจะลดลงอย่างมาก โดยในส่วนอื่นอัตราการไหลจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของการหล่อเย็นขึ้นได้

2) แบบอนุกรม (Series) ระบบแบบอนุกรมมักจะเป็นทางเลือกเพื่อแก้ปัญหาข้างต้น แม้ว่าในบางครั้งจะไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากความยาวของระบบจะส่งผลให้ความดันตกสูงเกินกว่าที่เครื่องจ่ายสารหล่อเย็นจะจ่ายได้ซึ่งถึงแม้จะออกแบบมาอย่างดีแตเมื่อนำมาใช้แล้วก็ไม่สามารถหล่อเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 14 ลักษณะของการไหลในระบบหล่อเย็น

ที่มา: วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538.

ข. ตำแหน่งของทางเข้าและทางออก ตำแหน่งของทางเข้าและทางออกของระบบหล่อเย็นควรอยู่ในตำแหน่งด้านล่างของแม่พิมพ์เพื่อลดความเสี่ยงที่สารหล่อเย็นจะรั่วเข้าไปในผิวโพรงแม่พิมพ์

ข. การหล่อเย็นของ insert ในแม่พิมพ์ insert นั้นถ้าไม่มีการหล่อเย็นจะเป็นฉนวนต่อการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากความร้อนที่แทรกอยู่ระหว่างแม่พิมพ์และ insert โดยผลกระทบนี้สามารถแก้ไขได้ โดยการระมัดระวังในการทำ insert หรือใช้วัสดุทำ insert ที่มีค่าการนำความร้อนสูง

ฉ. ตัวแปรในส่วนของสารหล่อเย็น

1) อัตราการไหล ก่อนหน้าที่ผู้ออกแบบจะทำการออกแบบอัตราการไหลของระบบ ผู้ออกแบบจำเป็นต้องทราบถึงปริมาณ อัตราการไหลของสารหล่อเย็นที่อยู่ในโรงงานโดยรวมก่อนเพื่อให้การออกแบบมีค่าไม่เกินกว่าความจุของระบบโดยรวม ในท่อหล่อเย็นนั้นสารหล่อเย็นจะรับความร้อนโดยการพาความร้อนโดยควรจะให้การไหลเป็นแบบอลวน ที่ Reynolds number ที่มากกว่า 10,000 ค่าความต้านทานในการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าต่ำมากถ้าระยะระหว่างท่อหล่อเย็นถึงผิวโพร่งแม่พิมพ์มีระยะ 2.5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อหล่อเย็น และกำลังที่จะต้องใช้ในการจ่ายสารหล่อเย็นไปทั้งระบบจะเป็นสัดส่วนกับอัตราการไหลซึ่งหมายความว่าถ้าเพิ่มอัตราการไหลขึ้น 2 เท่าจะทำให้ต้องการกำลังในการจ่ายสารหล่อเย็นเพิ่มขึ้นถึง 8 เท่า โดยการเพิ่มอัตราการไหลให้มีค่าสูงเกินไปจะทำให้สูญเสียค่าใช้จ่ายในส่วน of พลังงานเป็นอย่างมาก

2) อุณหภูมิเข้าของสารหล่อเย็น การเลือกอุณหภูมิเข้าของสารหล่อเย็นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ต้องการ ในพลาสติก Thermoplastic บางชนิดจะต้องการอุณหภูมิผิวที่สูงเพื่อให้ชิ้นงานมีสภาพผิวที่ดี ในบางกรณีน้ำมันจะถูกนำมาใช้สำหรับการหล่อเย็นแม่พิมพ์โดยทั่วไปอุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่ต่ำกว่าจะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าและสามารถลดเวลาตลอดวัฏจักรได้ อุณหภูมิเข้าของสารหล่อเย็นที่ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ต้องการประมาณ 10 – 20°C เป็นแนวทางทั่วไปในการออกแบบ และจะไม่มีประโยชน์ถ้าจะให้อุณหภูมิเข้าของสารหล่อเย็นอยู่ที่ 5 °C ถ้าไม่มี chiller ที่จะสามารถทำได้อยู่ และสำหรับ cooling tower จะสามารถกำหนดอุณหภูมิของน้ำได้ไม่ต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของบรรยากาศในบริเวณนั้น

3) ความดันตก ตัวแปรที่สำคัญที่ผู้ออกแบบควรคำนึงถึงในขั้นตอนการออกแบบ คือ ความดันของสารหล่อเย็นที่ต้องการในระบบ ถ้าความดันที่ระบบโดยรวมมีต่ำกว่าความดันที่ระบบหล่อเย็นในแม่พิมพ์ต้องการจะทำให้การหล่อเย็นไม่มีประสิทธิภาพและอาจทำให้อัตราการไหลเกิดความไม่อลวนขึ้นได้ ความดันตกมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความยาวของระบบหล่อเย็น เส้นผ่าศูนย์กลางท่อหล่อเย็นและความเร็วในการไหล ความดันของระบบจะต้องการเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มความยาวของระบบหล่อเย็น เพิ่มความเร็วในการไหล หรือลดขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อหล่อเย็น

4) คุณสมบัติของสารหล่อเย็น สารหล่อเย็นที่ใช้โดยทั่วไปมักจะใช้ดังนี้

- น้ำธรรมดาจากท่อหลักหรือ cooling tower ที่ $25 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$
- น้ำธรรมดาจากเครื่องทำความร้อน (Heater) หรือระบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิ $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป
- น้ำเย็นจากเครื่องทำความเย็น (Chiller) ปกติจะอุณหภูมิสูงกว่า $10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- น้ำผสมสารป้องกันการแข็งตัว (ปกติจะใช้ glycol) จาก chiller ปกติอุณหภูมิจะต่ำกว่า $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- น้ำมันจากเครื่องทำความร้อนหรือระบบหมุนเวียนอุณหภูมิ $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ขึ้นไป

ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสารที่เพิ่มเข้าไปในสารหล่อเย็น เช่น glycol จะเพิ่มความหนืดให้แก่สารหล่อเย็นซึ่งจะทำให้ต้องใช้ความดันในการจ่ายสารหล่อเย็นสูงขึ้นและจะทำให้อัตราการไหลลดลง ทำให้เป็นไปได้ที่การใช้ส่วนผสม glycol จาก chiller จะให้ประสิทธิภาพต่ำกว่าระบบที่ออกแบบมาอย่างดีโดยใช้น้ำธรรมดาหมุนเวียนในระบบที่อัตราการไหลเหมาะสมและสำหรับน้ำมันปกติจะใช้เฉพาะระบบที่ต้องการอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่สูงมากเท่านั้น

5) ความจุของเครื่องจ่ายสารหล่อเย็น ค่าความจุของเครื่องที่มีจะต้องมากกว่าที่ระบบหล่อเย็นต้องการในแม่พิมพ์ และปริมาณความร้อนที่ถูกถ่ายเทออกสามารถคำนวณได้จากน้ำหนักของชิ้นงานและค่า enthalpy

6) ตะกรันในท่อหล่อเย็น เมื่อใช้แม่พิมพ์ในการผลิตชิ้นงานโดยใช้สารหล่อเย็นที่เป็นน้ำกระด้างจะทำให้เกิดการสะสมของตะกรันขึ้นในผนังของท่อหล่อเย็น ซึ่งตะกรันจะลดประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์สู่สารหล่อเย็นอย่างมาก โดยถ้ามีตะกรันหนาเพียง 1 มิลลิเมตร จะมีค่าความต้านทานทางความร้อนเท่ากับโลหะหนาถึง 50 มิลลิเมตร

1.3.6 ข้อบกพร่องของชิ้นงานอันเนื่องมาจากอุณหภูมิแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม

เมื่อระบบหล่อเย็นไม่เหมาะสมก็จะทำให้อุณหภูมิในแม่พิมพ์ไม่เหมาะสมด้วยเช่นกัน ซึ่งในข้อบกพร่องรูปแบบหนึ่งๆ อาจมาจากหลายสาเหตุและหลายวิธีการแก้ไข ดังนั้น ข้อบกพร่องอันมีสาเหตุเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสม มีดังนี้ (วิโรจน์, 2540)

ก. รอยฟั่น (Jitting) เกิดเนื่องจากพลาสติกเหลวไหลเข้าแม่พิมพ์ไม่พร้อมกันตลอดแนวความกว้างของชิ้นงานและอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำเกินไป แก้ไขโดยการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์ ลดความเร็วในการฉีดลง หรือแก้ไขลักษณะทางเข้า

ข. ครีป (Flashing) เกิดจากมีช่องว่างเกิดขึ้นตามรอยประกบของแม่พิมพ์และพลาสติกมีความหนืดต่ำเกินไป แก้ไขโดยการแก้ไขแรงปิดล็อกแม่พิมพ์ ลดความดันฉีดลง หรือลดอุณหภูมิแม่พิมพ์

ค. รอยแห้ว (Short shot) เกิดจากการไหลตัวของพลาสติกเหลวไม่ดี ทำให้ไม่สามารถไหลเข้าในแม่พิมพ์ได้ทั่วถึง แก้ไขโดยการเพิ่มความเร็วฉีด เพิ่มความดันฉีดหรือเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์

ง. โก่งงอ (Warpage) เกิดจากการเย็นตัวของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอหรือเกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน แก้ไขโดยการลดความดันฉีด ย่ำ ลดเวลาในการฉีดย่ำหรือแก้ไขระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์

จ. รอยเชื่อมประสาน (Weldline) เกิดจากการรวมกันของพลาสติกเหลวไม่ดีเท่าที่ควรจากทิศทางการไหลที่ต่างกัน แก้ไขโดยการเพิ่มอุณหภูมิแม่พิมพ์หรือเพิ่มความเร็วในฉีด

2. การถ่ายโอนความร้อนในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

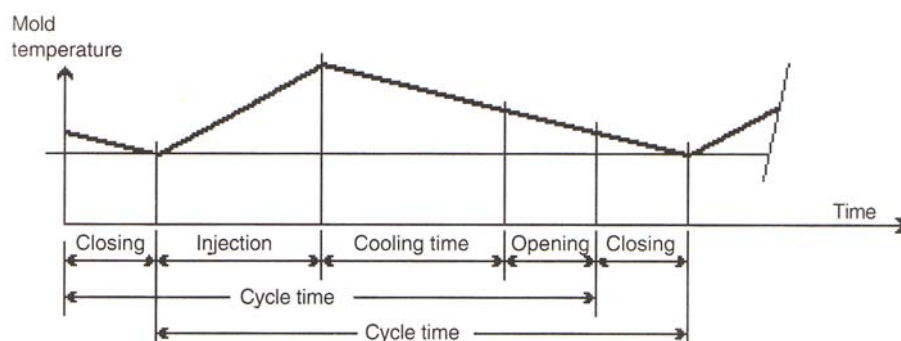
อุณหภูมิของแม่พิมพ์มีผลต่อชิ้นงานมีผลต่อชิ้นงานฉีดพลาสติกเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อคุณสมบัติ ทางด้านความเค้นภายใน การโค้งงอ ความเที่ยงตรงของขนาด และความเรียบผิว (วิวัฒน์ และ ชัยรัตน์, 2538) ความร้อนในการฉีดพลาสติกเกิดขึ้นตั้งแต่ช่วงที่หลอมเม็ดพลาสติก

ให้มีสถานะกึ่งของเหลวเพื่อให้สามารถฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ได้ความร้อนในแม่พิมพ์ที่เกิดขึ้น มาจากพลาสติกเหลว แรงอัดของสกรูฉีด และความร้อนจากแหล่งอื่น เช่น ฮีตเตอร์รอบๆ กระบอกฉีด ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นทั้งหมดนี้จะต้องนำออกจากชิ้นงานระหว่างการเกิด Plasticizing เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการแข็งตัว (Herbert, 1995)

ในรอบการทำงานของกระบวนการฉีดจะมีการถ่ายโอนความร้อนตลอดเวลาไม่จำเป็นเฉพาะในเวลาหล่อเย็นเท่านั้นกล่าวคือ ในตอนเริ่มต้นทำการฉีด สารหล่อเย็นจะถูกส่งเข้าไปหมุนเวียนในแม่พิมพ์อุณหภูมิของแม่พิมพ์จะมีค่าใกล้เคียงกับสารหล่อเย็น และจะคงอุณหภูมิจนกว่าจะมีการฉีดพลาสติกเข้าไปในแม่พิมพ์ เมื่อฉีดพลาสติกเข้าไปในแม่พิมพ์ อุณหภูมิแม่พิมพ์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจากการถ่ายเทความร้อนจากพลาสติกเหลวไปสู่แม่พิมพ์โดยมีสารหล่อเย็นที่หมุนเวียนอยู่ในแม่พิมพ์พาความร้อนออกจากแม่พิมพ์อย่างต่อเนื่อง เมื่อการฉีดพลาสติกเสร็จสิ้นจะไม่มีความร้อนเพิ่มเข้ามาในแม่พิมพ์อีก อุณหภูมิของแม่พิมพ์จะลดลงอย่างต่อเนื่องโดยสารหล่อเย็นจนกว่าจะมีการฉีดในรอบถัดไป ซึ่งอัตราการเย็นตัวของแม่พิมพ์จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารหล่อเย็น อุณหภูมิและอัตราการไหลของสารหล่อเย็น ตำแหน่งและขนาดของช่องหล่อเย็น

ในแต่ละรอบการทำงานปริมาณความร้อนที่เข้ามาในแม่พิมพ์ควรจะมีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับปริมาณความร้อนที่นำออกไปจากแม่พิมพ์เพื่อที่จะรักษาอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ในทุกๆ รอบการทำงาน นอกจากสารหล่อเย็นที่พาความร้อนออกจากแม่พิมพ์แล้ว ยังมีการนำความร้อนจากแม่พิมพ์ไปยังชิ้นส่วนอื่นๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการนำความร้อนของวัสดุที่นำมาทำแม่พิมพ์และการแผ่คลื่นรังสีความร้อนซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในขณะทำการฉีด

เวลารอบการทำงานของการฉีดมีผลต่ออุณหภูมิของแม่พิมพ์ เวลารอบการทำงานที่สั้นเกินไปจะทำให้มีเวลาในการหล่อเย็นน้อยทำให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิสูง แต่ถ้าเวลารอบการทำงานที่นานจะทำให้สูญเสียเวลางานโดยเปล่าประโยชน์ อีกทั้งอาจทำให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่ำเกินไปอาจทำให้ชิ้นงานเสีย การควบคุมเวลารอบการทำงานจึงมีความสำคัญ โดยเฉพาะในการฉีดแบบกึ่งอัตโนมัติ



ภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิแม่พิมพ์กับเวลา

ที่มา: Herbert (1995)

2.1 ลักษณะของการถ่ายโอนความร้อนในแม่พิมพ์

ลักษณะของการถ่ายโอนความร้อนในแม่พิมพ์จะประกอบด้วย การนำความร้อน การพาความร้อนแบบอิสระ การพาความร้อนแบบบังคับและการแผ่รังสี โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนมีดังนี้

ก. การนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนภายในตัวนำจากตัวหนึ่งไปยังอีกตัวหนึ่งโดยการสัมผัสทางกายภาพ ซึ่งในแม่พิมพ์ก็คือการถ่ายเทความร้อนจากพลาสติกที่มีอุณหภูมิสูงสัมผัสกับแม่พิมพ์ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นและแม่พิมพ์ก็ถ่ายเทความร้อนต่อไปทั่วจับยึดของเครื่องจักรที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าต่อไป

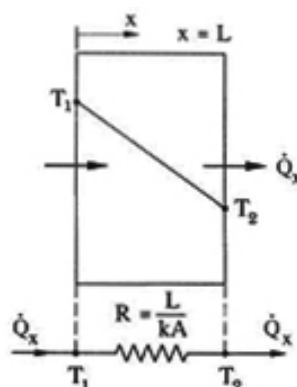
ข. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการเคลื่อนที่ของของไหลซึ่งเคลื่อนที่จากผลของความหนาแน่นที่แตกต่างกัน เนื่องจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันในส่วนต่างๆ ของของไหล ซึ่งในแม่พิมพ์ก็คือการถ่ายเทความร้อนไปสู่อากาศที่ไหลวนอยู่รอบแม่พิมพ์

ค. การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งโดยของไหลที่เคลื่อนที่โดยวิธีทางกล ในแม่พิมพ์นั่นก็คือการถ่ายเทความร้อนเพื่อให้พลาสติกเหลวแข็งตัวโดยอาศัยระบบของสารหล่อเย็นที่ใช้เครื่องสูบน้ำทำให้ของไหลเคลื่อนที่

ง. การแผ่รังสี (Radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนจากสิ่งหนึ่ง ไปยังอีกสิ่งหนึ่งโดยไม่อาศัยตัวกลาง แต่จะใช้คลื่นความร้อนส่งผ่านแทน ซึ่งในแม่พิมพ์นั้นจะคล้ายกับการพาความร้อนแบบอิสระ คือถ่ายเทจากผิวนอกของแม่พิมพ์ไปสู่อากาศที่ล้อมรอบ

2.2 การนำความร้อนผ่านผนังแผ่นระนาบ

การนำความร้อนผ่านแผ่นระนาบหนา L ภายใต้สภาวะคงตัวในพิกัดฉากบนแกน x และไม่มีแหล่งผลิตความร้อนภายในแผ่นระนาบนั้น จะได้การกระจายอุณหภูมิเป็นสมการเชิงเส้น ดังภาพที่ 16



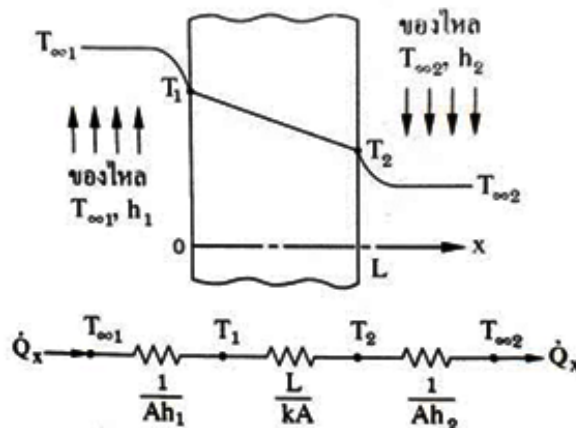
ภาพที่ 16 การเปรียบเทียบการนำความร้อนกับวงจรไฟฟ้า
ที่มา: มนตรี (2541)

เมื่อเปรียบเทียบกับทางไฟฟ้า อัตราความร้อนไหลผ่านตัวกลาง เปรียบเสมือน กระแสไฟฟ้า ผลต่างอุณหภูมิเปรียบเสมือนความต่างศักย์ ส่วนตัวแปร L/kA เปรียบเสมือนความต้านทาน สามารถหาค่าการนำความร้อนได้ดังสมการ

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{(L/kA)} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{\text{cond}}} \quad (1)$$

โดยที่ L/kA = ความต้านทานต่อการนำความร้อน
 R_{cond} = L/kA

2.3 การวิเคราะห์การนำความร้อนของแผ่นระนาบที่ผิวทั้งสองด้านสัมผัสกับของไหล



ภาพที่ 17 การเปรียบเทียบการนำความร้อนของแผ่นระนาบกับวงจรไฟฟ้า
ที่มา: มนตรี (2541)

โดยที่ $T_{\infty_1}, T_{\infty_2}$ = อุณหภูมิของของไหลบริเวณทางด้านผิว $x = 0$ และ $x = L$
 T_1, T_2 = อุณหภูมิที่ผิว $x = 0$ และ $x = L$
 h_1, h_2 = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลที่ผิว $x = 0$ และ $x = L$

$$\begin{aligned} \therefore Q &= hA(T_{\infty_1} - T_1) && \text{ที่ผิว } x = 0 \\ Q &= kA(T_1 - T_2)/L && \text{ในแผ่นระนาบ} \\ Q &= h_2A(T_2 - T_{\infty_2}) && \text{ที่ผิว } x = L \\ (T_{\infty_1} - T_1) &= (1/h_1A)Q_x \\ (T_1 - T_2) &= (L/kA)Q \\ (T_2 - T_{\infty_2}) &= (1/h_2A)Q \end{aligned}$$

จัดรูปแบบใหม่ได้ดังนี้

$$Q = \frac{(T_{\infty_1} - T_{\infty_2})}{\frac{1}{h_1A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2A}} = (T_{\infty_1} - T_{\infty_2}) / R_{tot} \quad (2)$$

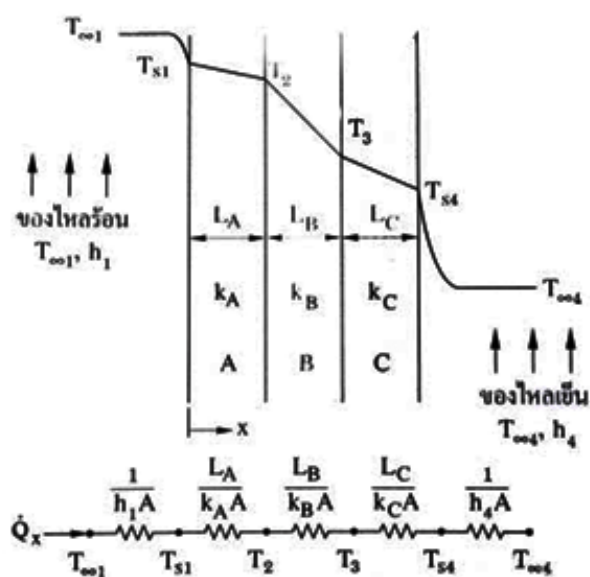
โดยที่ R_{tot} = ค่าความต้านทานรวม

$$\begin{aligned}
 R_{\text{tot}} &= R_{\text{conv1}} + R_{\text{cond}} + R_{\text{conv2}} \\
 &= \frac{1}{h_1 A} + \frac{1}{kA} + \frac{1}{h_2 A}
 \end{aligned} \tag{3}$$

และ $R_{\text{conv}} =$ ความต้านทานต่อการพาความร้อน

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{hA} \tag{4}$$

2.4 การวิเคราะห์การนำความร้อนผ่านตัวกลาง



ภาพที่ 18 สมมูลระหว่างการนำความร้อนและการพาความร้อนผ่านผนังประกอบ
ที่มา: มนตรี (2541)

เมื่อมีการนำความร้อนผ่านผนังหลายชั้นดังภาพที่ 18 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้
ดังนี้

$$Q = \frac{(T_{\infty 1} - T_{s1})}{(1/h_1 A)} = \frac{(T_{s1} - T_2)}{(L_A/k_A A)} = \frac{(T_2 - T_3)}{(L_B/k_B A)} = \frac{(T_3 - T_{s4})}{(L_C/k_C A)} = \frac{(T_{s4} - T_{\infty 4})}{(1/h_4 A)} \tag{5}$$

หากพิจารณาผลต่างของอุณหภูมิระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็น ($T_{\infty_1} - T_{\infty_2}$) จะคำนวณอัตราการนำความร้อนจากสมการ

$$Q_x = (T_{\infty_1} - T_{\infty_2})/R_{\text{tot}} \quad (6)$$

สามารถจัดให้อยู่ในรูป

$$Q_x = UA(T_{\infty_1} - T_{\infty_2}) \quad (7)$$

$$\therefore U = 1/R_{\text{tot}} \quad (8)$$

โดยที่ U คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งหากวัตถุนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากแสดงว่าสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดี

2.5 ความต้านทานความร้อนของหน้าสัมผัส

เนื่องจากระหว่างผิวตัวกลางที่นำมาต่อสัมผัสจะเกิดช่องอากาศหรือช่องของไหลอื่นๆ ตรงบริเวณผิวตัวกลางสัมผัสกันโดยตรงจะมีการนำความร้อนผ่านรอยต่อ ส่วนบริเวณที่เป็นช่องอากาศ การถ่ายเทความร้อนผ่านอาจเป็นไปได้ทั้งการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน (ภาพที่ 20) ความต้านทานที่ผิวรอยต่อสามารถทำให้ลดลงได้โดยลดความขรุขระของผิวรอยต่อและเพิ่มความดันในการอัดเพื่อให้ผิวรอยต่อแนบสนิทกัน

เมื่อนำแท่งเหล็ก 2 แท่งมาต่อเข้าด้วยกันดังแสดงในภาพที่ 19 (a) และรอบๆ แท่งทั้งสองหุ้มฉนวน เมื่อให้ความร้อนที่ด้านใดด้านหนึ่งความร้อนจะไหลในทิศทางแนวแกนเท่านั้น วัสดุทั้งสองนี้อาจมีค่าการนำความร้อนแตกต่างกัน แต่ถ้าด้านข้างหุ้มฉนวนไว้ ฟลักซ์ความร้อนต้องเหมือนกันและไหลผ่านวัสดุภายใต้เงื่อนไขขอบเขตสถานะคงตัว การทดลองแสดงว่าลักษณะอุณหภูมิที่เกิดไหลผ่านวัสดุทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงค่าโดยประมาณดังแสดงในภาพที่ 19 (b) อุณหภูมิจะลดลงที่ระนาบซึ่งสัมผัสกันระหว่างวัตถุทั้งสองชนิดนี้ กล่าวได้ว่าเป็นผลเฉลยของค่าความต้านทานหน้าสัมผัสทางความร้อน กลไกทางกายภาพของความต้านทานหน้าสัมผัสอาจจะทำให้เข้าใจดีขึ้น หากอธิบายจุดต่อที่แสดงรายละเอียดมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 20 ความหยาบผิวที่

เป็นจริงคือ ส่วนที่ทำให้ผิวสัมผัสแยกจากกัน ไม่มีผิวที่เป็นจริงใดที่มีความเรียบสมบูรณ์ และความหยาบผิวที่เป็นจริงมักเกิดขึ้นที่จุดกลางซึ่งต้องทำการหาค่าความต้านทานหน้าสัมผัสนี้ เมื่อดูพลังงานบนวัสดุทั้งสอง จะได้

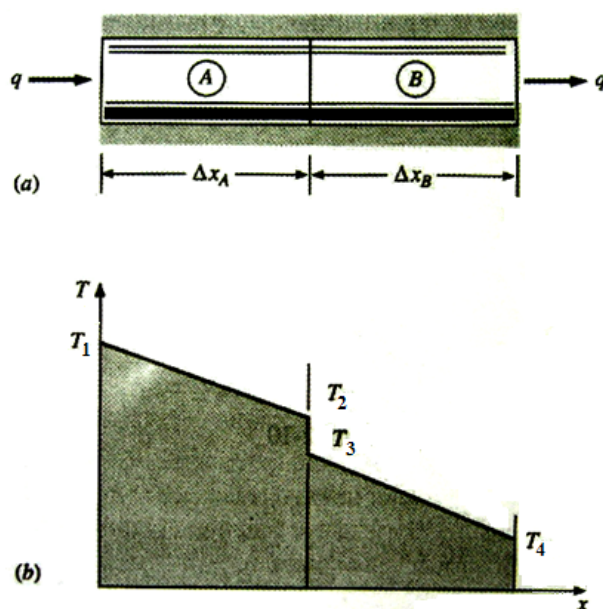
$$q = k_A A \frac{T_1 - T_2}{\Delta x_A} = \frac{T_2 - T_3}{1/h_c A} = k_B A \frac{T_3 - T_4}{\Delta x_B} \quad (9)$$

หรือ

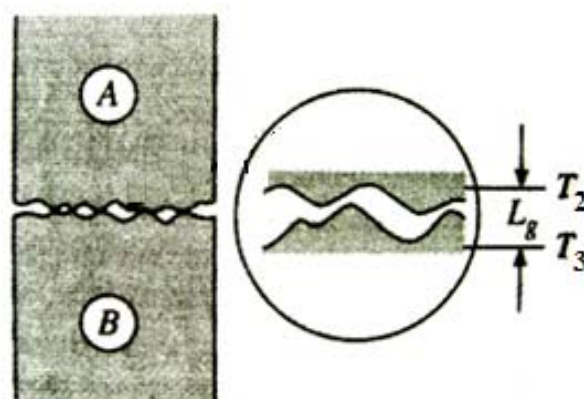
$$q = \frac{T_1 - T_4}{\Delta x_A / k_A A + 1/h_c A + \Delta x_B / k_B A} \quad (10)$$

ซึ่ง $1/h_c A$ เรียกว่าค่าความต้านทานหน้าสัมผัสทางความร้อนและ h_c เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของหน้าสัมผัส ตัวแปรนี้มีความสำคัญมากเพราะการใช้งานนั้นมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนมาก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของหน้าสัมผัสหาได้จาก

$$h_c = \frac{1}{L_g} \left(\frac{A_c}{A} \frac{2k_A k_B}{k_A + k_B} + \frac{A_v}{A} k_f \right) \quad (11)$$



ภาพที่ 19 ผลของความต้านทานความร้อนที่หน้าสัมผัส
ที่มา: Holman (2002)



ภาพที่ 20 โมเดลความหยาบของจุดต่อ
ที่มา: Holman (2002)

โดยที่ L_g คือ ความหนาของช่องว่าง A คือ พื้นที่ภาคตัดขวางทั้งหมดของก้อน A_c คือ พื้นที่ที่ผิววัตถุสัมผัสกัน A_v คือ พื้นที่ช่องว่าง k_f คือ ค่าการนำความร้อนของของไหลซึ่งอยู่ในช่องว่าง ส่วนมากอากาศคือของไหลที่แทรกอยู่ภายในช่องว่างและ k_f มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ k_A และ k_B ถ้าพื้นที่สัมผัสกันน้อยมาก ค่าความต้านทานทางความร้อนหลักจะเกิดจากช่องว่าง ปัญหาหลักนี้ประกอบด้วยทฤษฎีพื้นฐานที่ยู่ยากมากหากต้องการหาค่า A_c , A_v และ L_g

2.6 การคำนวณการถ่ายโอนความร้อนในแม่พิมพ์

2.6.1 การนำความร้อนผ่านชั้นอินสูลีแม่พิมพ์ที่อพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม

$$q = \frac{k_r A (\Delta T)}{x_r} \quad (12)$$

โดยที่	k_r	=	ค่าสภาพการนำความร้อนของอพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม (W/m ² °C)
	A	=	พื้นที่หน้าตัด (m ²)
	x_r	=	ความหนาของอินสูลี (m)
	ΔT	=	ผลต่างของอุณหภูมิ (°C)

2.6.2 การนำความร้อนผ่านช่องว่างอากาศระหว่างอินสูลิเทมเพิมพ์ฟ็อกซ์เรชั่นเดิม
อะลูมิเนียมกับแม่พิมพ์ (Mould base)

$$q = h_c A (\Delta T) \quad (13)$$

โดยที่ h_c = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำสัมผัส ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

2.6.3 การนำความร้อนจากผิวรอยต่อของแม่พิมพ์ไปยังผิวที่น้ำหล่อเย็น

$$q = \frac{k_m A (\Delta T)}{x_m} \quad (14)$$

โดยที่ k_m = ค่าสภาพการนำความร้อนของแม่พิมพ์ ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)
 x_m = ความหนาของแม่พิมพ์ (m)

2.6.4 ความร้อนที่น้ำหล่อเย็นนำออกจากแม่พิมพ์

$$q = \pi d_c l h_{cl} (\Delta T) \quad (15)$$

โดยที่ d_c = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อน้ำหล่อเย็น (m)
 l = ความยาวของท่อน้ำหล่อเย็น (m)
 h_{cl} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำหล่อเย็น

2.6.5 ปริมาณความร้อนที่ได้รับจากพลาสติกเหลว

$$Q_p = \frac{m(\Delta h)}{t_z} \quad (16)$$

โดยที่ m = มวลของชิ้นงาน (kg)
 Δh = ความแตกต่างของพลังงานจำเพาะ (Enthalpy) (kJ/kg)
 t_z = ระยะเวลาที่แข็งจ (s)

2.6.6 ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทให้สารหล่อเย็น

$$Q_c = \frac{\pi D^2}{4} V_c c_p \rho_c (T_i - T_o) \quad (17)$$

โดยที่	D	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อหล่อเย็น (m)
	V_c	=	ความเร็วของสารหล่อเย็น (m/s)
	c_p	=	ค่า specific heat ของสารหล่อเย็น (kJ/kg °C)
	ρ_c	=	ค่าความหนาแน่นของสารหล่อเย็น (kg/m ³)
	T_i	=	อุณหภูมิของสารหล่อเย็นขาเข้า (K)
	T_o	=	อุณหภูมิของสารหล่อเย็นขาออก (K)

2.6.7 สภาวะของสารหล่อเย็น

Reynolds number

$$Re = \frac{DV_c \rho_c}{\mu} \quad (18)$$

โดยที่	D	=	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อหล่อเย็น (m)
	V_c	=	ความเร็วของสารหล่อเย็น (m/s)
	ρ_c	=	ค่าความหนาแน่นของสารหล่อเย็น (kg/m ³)
	μ	=	ค่าความหนืดของสารหล่อเย็น (kg/ms)

ในการหล่อเย็นควรมี Re มากกว่า 3500 เพื่อให้การไหลของสารหล่อเย็นเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulence) ที่สมบูรณ์

Prandtl number

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad (19)$$

โดยที่	μ	=	ค่าความหนืดของสารหล่อเย็น (kg/ms)
	c_p	=	ค่า specific heat ของสารหล่อเย็น (kJ/kg °C)
	λ	=	ค่า Thermal conductivity ของสารหล่อเย็น (W/m °C)

Nusselt number

$$Nu = 0.037(Re^{0.75} - 180)Pr^{0.42} \quad (20)$$

$$\text{กรณี } 2300 < Re < 10^6, 0.6 < Pr < 500$$

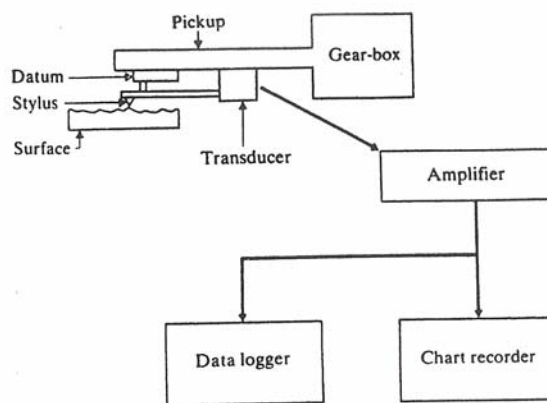
3. ความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงาน

วัสดุที่ได้ผ่านการขึ้นรูปโดยวิธีการกัดปาดผิวหน้าในแต่ละกระบวนการการผลิตและต่างเงื่อนไข จะให้ค่าความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานไม่เท่ากัน โดยความหยาบละเอียดผิวจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายๆ อย่างเช่น อัตราป้อนกัด, การป้อนกัดลึก, ความเร็วรอบของดอกกัด, การจับยึดชิ้นงาน และ การลั่นสะเทือนระหว่างกระบวนการกัด ปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของผิวชิ้นงานที่ได้ ซึ่งวิธีที่จะบ่งชี้ว่าผิวชิ้นงานที่กัดด้วยเงื่อนไขใดให้ความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานดีกว่าหรือด้อยกว่ากัน เราจำเป็นต้องทำการวัดค่าความหยาบละเอียดของผิว ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ การวัดโดยวิธีสัมผัสกับชิ้นงาน และ การวัดโดยไม่สัมผัสกับชิ้นงาน

3.1 การวัดโดยวิธีสัมผัสกับชิ้นงาน

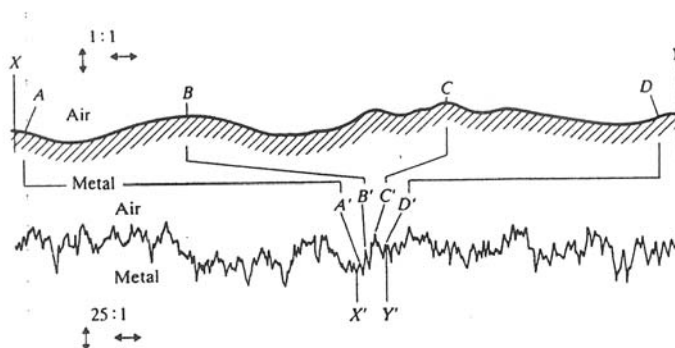
วิธีการวัดโดยสัมผัสกับชิ้นงานจะใช้หัวเข็มซึ่งจะสัมผัสไปกับผิวของชิ้นงาน จากนั้นหัวเข็มจะถูกลากไปบนผิวชิ้นงานตามแนวที่ต้องการวัดค่าความหยาบละเอียดของผิว และจะถูก

ขยายสัญญาณโดยผ่านตัวขยายสัญญาณแอมพลิฟายเออร์ (ภาพที่ 21) ทำให้ทำให้เราได้ค่าความหยาบละเอียดผิว และความเป็นคลื่นของผิวชิ้นงานได้ชัดเจนมากขึ้น ซึ่งจะได้เป็นกราฟ 2 มิติ ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 21 เครื่องวัดความหยาบละเอียดผิวแบบสัมผัส

ที่มา: David and John (1997)



ภาพที่ 22 กราฟ 2 มิติ

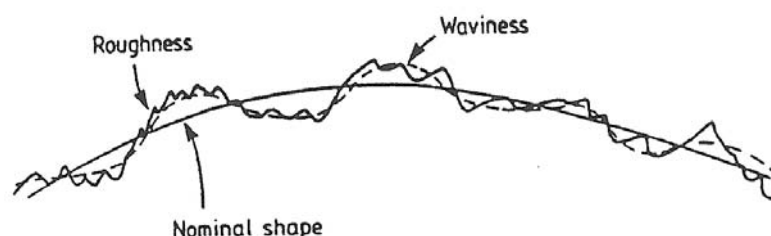
ที่มา: David and John (1997)

3.1.1 ลักษณะพื้นผิว

ลักษณะพื้นผิว คือรูปร่างของผิวที่ซึ่งเบี่ยงเบนออกไปจากพื้นผิวปกติ โดยความเบี่ยงเบนอาจจะเกิดขึ้นซ้ำๆ ลักษณะเดิมหรือแบบสุ่ม ซึ่งแบ่งจำแนกได้ออกเป็นหลายประเภทตามลักษณะพื้นผิวที่เกิดขึ้นดังต่อไปนี้

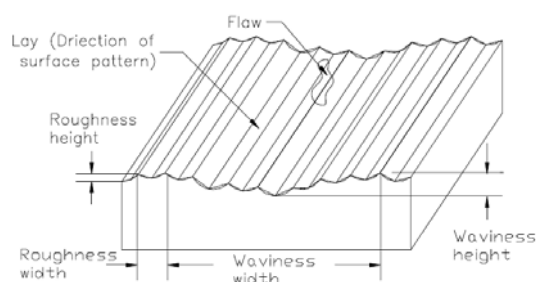
- ความหยาบผิว (Roughness) นั้นประกอบด้วย ความไม่สม่ำเสมอของผิวชิ้นงานซึ่งส่วนใหญ่ รูปแบบของรอยที่เกิดจากอัตราการป้อนของเครื่องมือตัด ความสูงหรือความลึกของร่องรอยความไม่สม่ำเสมอ เป็นค่าที่ได้จากการวัด

- ความเป็นคลื่น (Waviness) คือ บริเวณระหว่างความหยาบผิว โดยมองในพื้นที่ขนาดใหญ่ (ประมาณ 1 มิลลิเมตร) ซึ่งอาจเกิดจากการสั่นสะเทือนหรือสะท้อนเนื่องจากการสั่นของเครื่องมือตัด



ภาพที่ 23 ความเป็นคลื่นของผิวและความหยาบละเอียดผิว
ที่มา: David and John (1997)

- ทิศทางของรอยตัด (Lay) จะมองเห็นได้บนผิวชิ้นงาน โดยเกิดบริเวณของชิ้นงานทำให้เห็นทิศทางการเคลื่อนที่ของเครื่องมือตัด



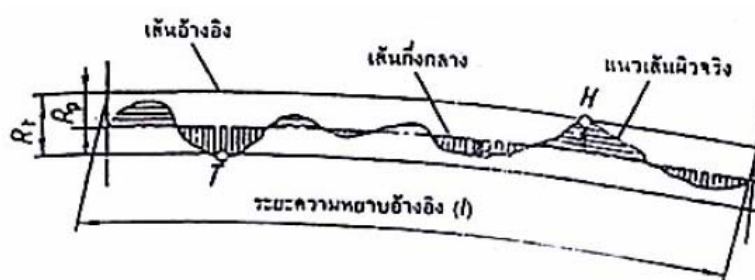
ภาพที่ 24 รูปร่างความเป็นคลื่นและความหยาบละเอียด
ที่มา: David and John (1997)

- ข้อบกพร่องบนผิวชิ้นงาน (Surface flaws) ความไม่สม่ำเสมอหรือความไม่เรียบของผิวชิ้นงานโดยมีลักษณะแบบสุ่ม ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่มีอยู่ภายในวัสดุหรือชิ้นงาน ก่อนที่

จะเกิดผิวสำเร็จ ซึ่งได้แก่ พวกรูพรุนมลทิน และเศษโลหะที่เชื่อมติดบริเวณคมตัด (Built up edge) หรือเครื่องมือตัดที่แตกออก และฝังลงบนผิวของชิ้นงาน

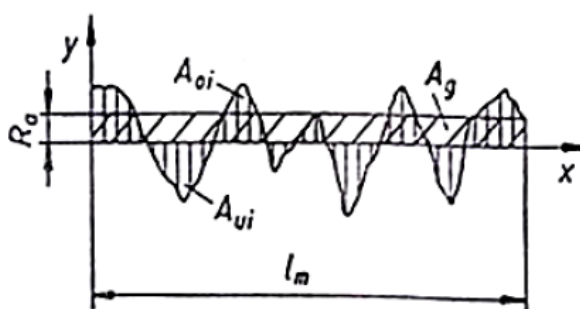
3.1.2 การวัดค่าความหยาบผิวสามารถแบ่งออกได้ดังนี้ (วชิระ, 2523)

ก. ค่าความหยาบผิว R_q ได้จากการวัดจากระยะห่าง ระหว่างจุดสูงสุดของผิวชิ้นงาน กับจุดต่ำสุดของผิวชิ้นงานมีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)



ภาพที่ 25 แสดงการวัดค่าความหยาบผิว R_q
ที่มา: วชิระ (2523)

ข. ค่าความหยาบผิว R_a หรือเรียกว่า ค่าความหยาบเฉลี่ย ได้จากการรวมพื้นที่ ยอดแหลมเหนือเส้นกึ่งกลาง กับพื้นที่หลุมใต้เส้นกึ่งกลางแล้วหารด้วยความยาว l_m มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)

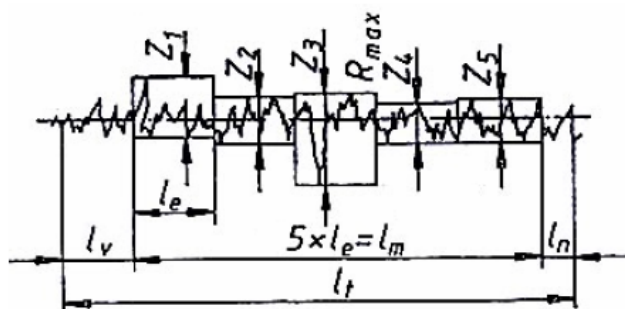


ภาพที่ 26 แสดงการวัดค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a
ที่มา: วชิระ (2523)

ค. ค่าความหยาบผิว R_z ได้จากการวัดทดสอบเป็นช่วงเท่าๆ กัน 5 ช่วง ซึ่งวัดบนผิวชิ้นงานจริงแล้วจึงนำค่าที่ได้มารวมกันแล้วหารด้วย 5 มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm) จากภาพที่ 20 ค่าความหยาบผิว R_z หาได้จาก

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (21)$$

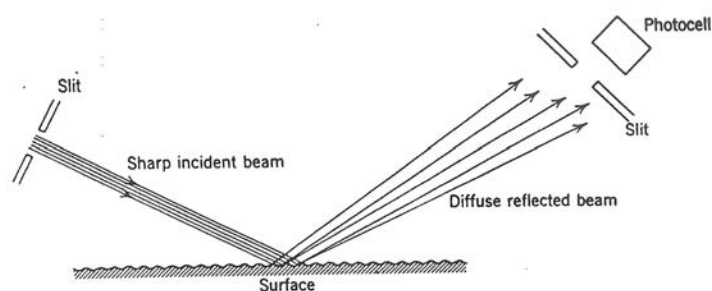
ง. ค่าความหยาบผิว R_{max} คือความลึกสูงสุดของร่องความหยาบที่มีอยู่ในระยะทดสอบ มีหน่วยเป็นไมโครเมตร (μm)



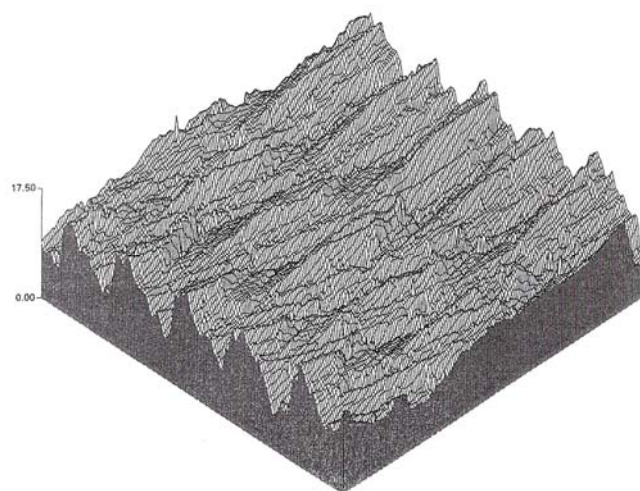
ภาพที่ 27 แสดงการวัดค่าความหยาบผิว R_z และ R_{max}
ที่มา: วชิระ (2523)

3.2 การวัดโดยไม่สัมผัสกับชิ้นงาน

การวัดโดยไม่สัมผัสชิ้นงาน เป็นวิธีการวัดผิวชิ้นงานเพื่อให้ได้ผิวชิ้นงานในลักษณะ 3 มิติ โดยใช้การปล่อยลำแสงลงไปยังพื้นผิวและสะท้อนกลับเข้าไปยังตัวรับสัญญาณ (ภาพที่ 28) จากนั้นจะได้รูปร่างของพื้นผิวในลักษณะ 3 มิติออกมา ตัวอย่างของผิวชิ้นงานที่ได้จากการกดแปดผิวหน้าชิ้นงานดังภาพที่ 29



ภาพที่ 28 วิธีใช้ลำแสงส่องสะท้อนผิวที่ต้องการวัด
ที่มา: David and John (1997)



ภาพที่ 29 ผิวขรุขระในลักษณะ 3 มิติ
ที่มา: David and John (1997)

แต่การวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานกรณีนี้จะเป็นเพียงการวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานตามแนวแกนใดแกนหนึ่งเท่านั้น จึงเหมาะสมสำหรับชิ้นงานกรณีที่แนวทุกๆ แนวของผิวชิ้นงานมีลักษณะเหมือนกันเท่านั้น สำหรับผิวชิ้นงานที่ในแต่ละแนวมีลักษณะไม่เหมือนกัน ซึ่งเช่นเดียวกันกับการวัดเพียงแนวเดียวจะไม่เพียงพอ เนื่องจากการกัดชิ้นงานจะต้องมีการเลื่อนแนวกัดของดอกกัด จึงทำให้ผิวชิ้นงานที่ได้จะมีทั้งบริเวณที่ถูกกัดและกัดเพียงรอบเดียว ดังนั้นในกรณีผิวชิ้นงานประเภทนี้จำเป็นต้องหาค่าความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานในลักษณะเป็นระนาบ

3.3 ความหยาบละเอียดผิวโดยพื้นผิวที่จริงต่อพื้นที่ระนาบ

ในการวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานในรูปแบบของ 3 มิติ หากเราต้องการความละเอียดและแม่นยำเราต้องใช้ลำแสงดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ แต่ในความเป็นจริงในงานทั่วไป พื้นผิวบางชนิดไม่จำเป็นต้องการความละเอียดและแม่นยำมากนัก จึงได้คิดค้นแปลงอุปกรณ์ที่สามารถหาได้ง่าย และมีทั่วไปในห้องทดลอง ซึ่งสะดวกและต้นทุนต่ำเมื่อเทียบกับการใช้ลำแสง โดยการประยุกต์เช่น Dial gauge, Profilometry และ Drag measurement system มาใช้ในการวัดรูปร่างของพื้นผิวจริง และจากนั้นนำค่าพื้นที่ผิวจริงที่วัดได้มาทำการเทียบกับพื้นที่ผิวระนาบ ซึ่งถ้าพื้นที่ผิวยังมีความหยาบสูง จะทำให้อัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวจริงต่อพื้นที่ระนาบมีค่าสูงมากยิ่งขึ้นเท่านั้นซึ่งมีสมการเป็น

$$SRC = \frac{A_m}{A_n} \quad (22)$$

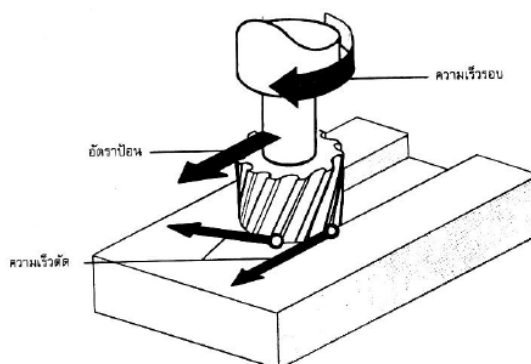
โดยที่	SRC	=	ค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิว
	A_m	=	พื้นที่ผิวจริงที่ได้จากการวัด
	A_n	=	พื้นที่ผิวระนาบ

3.4 การตัดเฉือนโลหะสำหรับงานกัด (ชาติ, 2542ก)

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแนะนำอธิบายถึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทำงานกัด ได้แก่ ความเร็วรอบของมิดกัต ความลึกหรือความกว้างของรอยกัด และหน้าสัมผัสของมิดกัต เป็นต้น

3.4.1 ความเร็วรอบ (Spindle speed)

เป็นค่าการหมุนของเพลงานหลัก (Spindle) มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที ค่าความเร็วรอบที่เลือกใช้จะเป็นตัวกำหนดค่าความเร็วตัด (Cutting speed) ในงานกัดด้วย ดังแสดงความสัมพันธ์ในภาพที่ 30 ความเร็วตัดจะมีค่าเท่ากับความเร็วที่ขอบของมิดกัต และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของมิดกัต กล่าวคือ ถ้าความเร็วรอบมีค่าสูง และมิดกัตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโต จะทำให้ความเร็วตัดมีค่าสูงด้วย โดยที่ความเร็วรอบหาได้จาก



ภาพที่ 30 ความเร็วรอบ ความเร็วตัด และอัตราป้อน
ที่มา: ชาลี (2542ก)

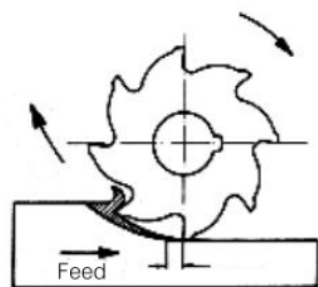
3.4.2 อัตราป้อน (Feed)

เป็นการเคลื่อนที่ของมีดกัดในทิศทางทำงานตัดเฉือน โดยทั่วไปอัตราป้อนจะกำหนดเป็นระยะทางการเคลื่อนที่ต่อนาที นอกจากนี้ยังอาจกำหนดอัตราป้อนเป็นระยะทางการเคลื่อนที่ต่อรอบการหมุนของมีดกัด หรือต่อฟันของมีดกัดก็ได้ ตัวอย่างเช่น

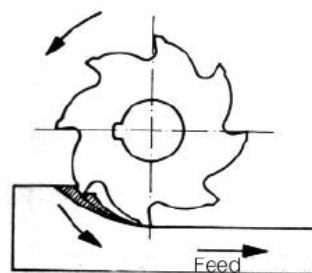
- 100 mm/min หมายถึง ระยะทางการเคลื่อนที่ของมีดกัด 100 มิลลิเมตร ในเวลา 1 นาที
- 0.1 mm/rev หมายถึง ระยะทางการเคลื่อนที่ของมีดกัด 0.1 มิลลิเมตร เมื่อมีดกัดหมุนครบ 1 รอบ
- 0.02 mm/teeth หมายถึง ระยะทางการเคลื่อนที่ของมีดกัด 0.02 มิลลิเมตร ต่อ 1 ฟันมีดกัด

เมื่อกำหนดให้ความเร็วรอบของมีดกัดมีค่าคงที่ การเลือกใช้อัตราป้อนจะมีผลต่อความหนาของเศษ และผิวสำเร็จของชิ้นงานการเลือกใช้ลักษณะการกัดระหว่างการกัดตามกับการกัดทวน จะมีผลกระทบต่อการเปลี่ยนรูปของเศษ (Chip formation) และความดันตัดเฉือน (Cutting pressure) ดังนี้

ก. การกัดตาม (Conventional milling หรือ Up milling) ในงานกัดตาม ความหนาของเศษและความดันในการตัดเฉือนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ที่ฟันมีดกัด และจะมีค่าสูงสุดก่อนที่ฟันมีดกัดจะเลื่อนพ้นวัสดุงานเพียงเล็กน้อย เมื่อฟันมีดกัดเลื่อนพ้นวัสดุงานแล้ว จะเกิดสถานะที่ติดตามมาคือ ความดันตัดเฉือนจะหมดไปทันที ทำให้มีดกัดเคลื่อนที่ไปข้างหน้าโดยเร็ว และฟันมีดกัดถัดไปจะเลื่อนเข้ากัดชิ้นงานในลักษณะการกระตุก (Jerking) เป็นผลให้เกิดเป็นรอยสัน (Chatter marks) ที่ผิวงาน ดังแสดงในภาพที่ 31



ภาพที่ 31 การกัดตาม
ที่มา: ชาลี (2542ก)

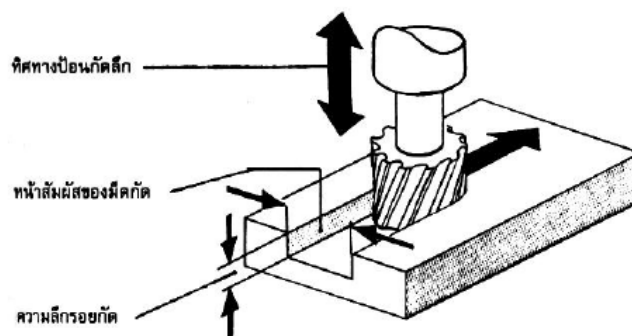


ภาพที่ 32 การกัดทวน
ที่มา: ชาลี (2542ก)

3.4.3 ความลึกหรือความกว้างของรอยตัด

ความลึกหรือความกว้างของรอยตัด คือ ระยะทางที่มีดกัดจมลึกเข้าไปในผิวงานในทิศทางป้อนกัด (Infeed direction)

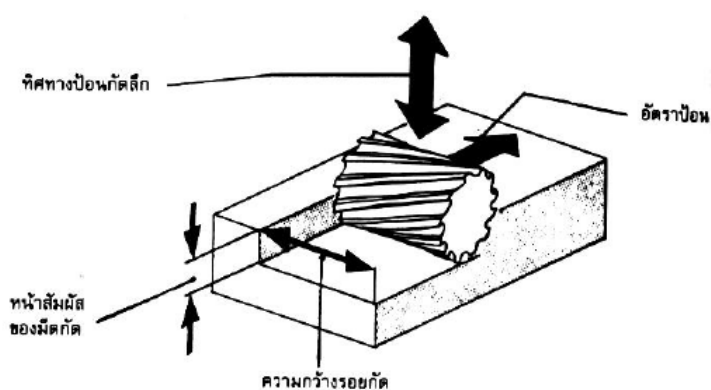
ก. ความลึกของรอยกัด (Depth of cut) จะใช้สำหรับงานกัดด้วยเครื่องกัดเพลาดังแสดงในภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ความลึกของรอยกัด

ที่มา: ชาลี (2542ก)

ข. ความกว้างของรอยกัด (Width of cut) ใช้กับงานกัดด้วยเครื่องกัดเพลาอน แสดงในภาพที่ 34 เช่นงานกัดราบ (Peripheral milling)



ภาพที่ 34 ความกว้างของรอยกัด

ที่มา: ชาลี (2542ก)

ค. หน้าสัมผัสของมีดกัด (Cutter engagement) คือ ความกว้างของมีดกัดที่สัมผัสอยู่กับชิ้นงาน โดยวัดในระนาบการทำงาน ในทิศทางที่ตั้งฉากกับอัตราป้อน ตามภาพที่ 33 และ 34 ความลึกหรือความกว้างของรอยกัด และหน้าสัมผัสของมีดกัด เป็นผลมาจาก

มีดกัดที่เลือกใช้จะต้องมีขนาดไม่ยาวเกินความจำเป็นในการทำงานกัดนั้นๆ มีดกัดที่ยาวเกินไป จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดชิ้นงานมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการโก่งงอ

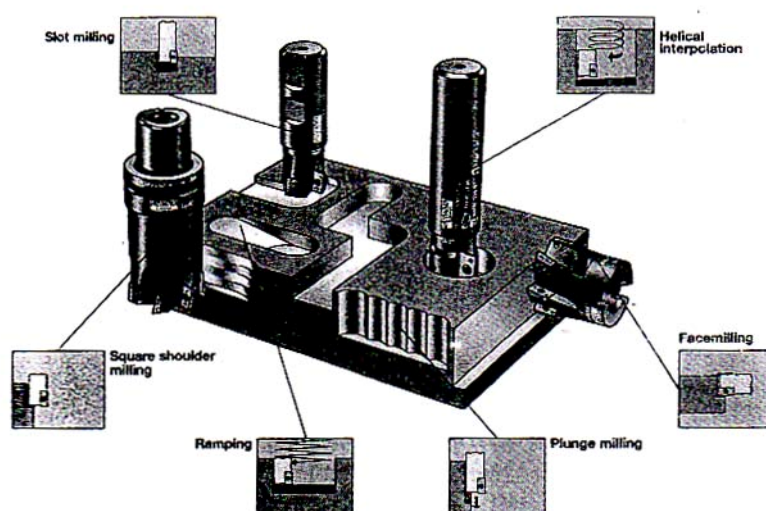
ของด้ามมีดกัด ในการเลือกใช้งานต้องพิจารณาถึงข้อมูลอื่นๆ ที่สัมพันธ์กัน ได้แก่ ความเร็วตัดเฉือนของมีดกัดที่ใช้ที่เป็นไปได้กับวัสดุชิ้นงานที่กัด และขนาดผิวสำเร็จที่ต้องการ

3.4.4 เครื่องมือตัดสำหรับงานกัด

เครื่องมือตัดสำหรับงานกัดด้วยเครื่องกัดซีเอ็นซีหรือเครื่องแมชชีนนิ่งเซนเตอร์มีดังนี้คือ (อำนาจ, 2544)

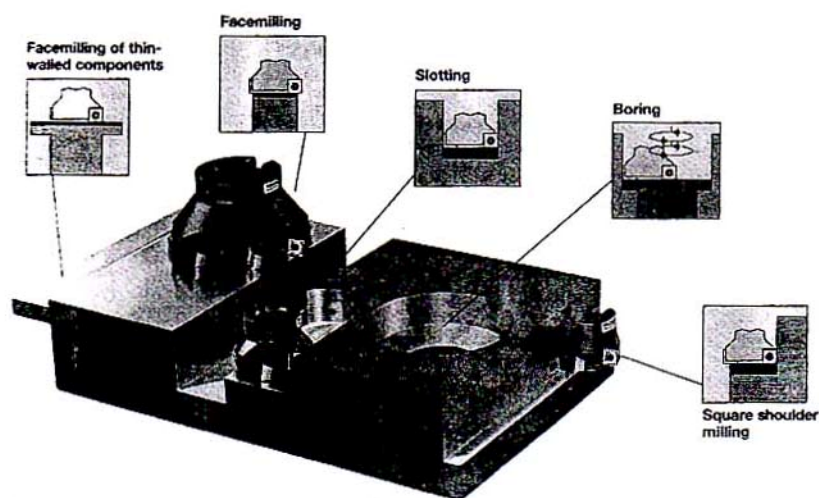
ก. เอนด์มิลล์ (End mills) เอนด์มิลล์เป็นเครื่องมือตัดที่ใช้สำหรับเครื่องกัดเพลาดิ่งหรือเครื่องแมชชีนนิ่งเซนเตอร์แบบเพลาดิ่ง ส่วนวัสดุที่ใช้ทำเอนด์มิลล์นั้นมีหลายประเภท เช่น เหล็กกล้ารอบสูง (HSS) และคาร์ไบด์ (Carbide)

ในกระบวนการตัดเฉือนผิวชิ้นงานด้วยเอนด์มิลล์นั้นอาศัยคมตัดตรงปลายและคมตัดด้านข้าง ตัวอย่างของเอนด์มิลล์ที่ใช้สำหรับเครื่องจักรซีเอ็นซีแสดงดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 รูปทรงของเอนด์มิลล์และการขึ้นรูปชิ้นงานในลักษณะต่างๆ
ที่มา: อำนาจ (2544)

ข. เฟซมิลล์ (Face mill) เป็นเครื่องมือตัดที่ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับเครื่องจักรซีเอ็นซีนั้นส่วนมากแล้วจะเป็นแบบอินเลิร์ต ซึ่งสามารถถอดเปลี่ยนอินเลิร์ตได้



ภาพที่ 36 ตัวอย่างของเฟซมิลล์ที่ใช้สำหรับงานปาดผิวชิ้นงาน
ที่มา: อำนาจ (2544)

3.4.5 วัสดุของเครื่องมือตัด (Tool Material) มีอยู่ 5 ประเภทหลักๆ ดังนี้

ก. Carbon steel and medium alloys Steels มีความแข็งแรงขณะร้อน และต้านทานการสึกหรอสูง อย่างไรก็ตามสามารถขึ้นรูปร่างง่ายๆ ได้ และ ใช้ความเร็วในการขึ้นรูปไม่สูงนัก สารหล่อเย็นที่จะใช้ควรเป็นของเหลวที่ผสมกับน้ำ เพื่อที่จะทำให้เครื่องมือตัดเย็นที่สุดเท่าที่จะทำได้

ข. High speed steel (H.S.S.) เป็นวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด โดยมีความแข็งแรงขณะร้อน และ ด้านการสึกหรอที่สูงประกอบกับมีความเหนียวควบคู่ไปด้วย สารหล่อเย็นที่จะใช้ควรเป็นน้ำมันที่ไม่ผสมน้ำ หรือ ของเหลวที่ผสมกับน้ำก็ได้

ค. Cast alloy tools ในที่อุณหภูมิสูงจะแข็งแรงกว่า H.S.S. แต่เหนียวน้อยกว่า มักใช้กับงานเจาะ เครื่องมือตัดที่มีคมเดียว (Single point tool) และ Part off tool สารหล่อเย็นที่จะใช้ควรเป็นน้ำมันที่ไม่ผสมน้ำ เพื่อป้องกันเครื่องมือตัดจากแรงหรือภาระกะทันหัน (Shock load) สูงๆ

ง. Carbide tool มีความแข็งแรงมากกว่า H.S.S. แต่เปราะกว่ามาก โดยที่มีส่วนผสมของ Carbon, Tungsten, Titanium, Tantalum หรือ Niobium เป็นเหตุให้มีความสามารถในการทน

ต่อการสึกหรอที่สูงมาก ดังนั้นจึงไม่จำเป็นที่จะต้องสนใจเรื่องการหล่อลื่นมากนัก แต่ยังคงต้องคำนึงถึงการหล่อเย็นอยู่จึงควรใช้สารหล่อเย็นประเภทของเหลวที่ผสมกับน้ำ

จ. Ceramic นั้นมีความแข็งแรงสูงกว่า Carbide tool และ เซรามิกกันก็จะมี ความเปราะมากกว่าเซรามิก และ จะใช้ในช่วงความเร็วที่สูงมาก จึงมักใช้กับของเหลวที่ผสมกับน้ำ เพื่อที่จะทำให้เศษโลหะเย็น และ ยังลดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานได้อีกด้วย

4. การทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐานทางสถิติ คือ ประโยคที่กล่าวเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น (ปารเมศ, 2545)

ในการทดสอบสมมติฐาน เราอาศัยวิธีการในการสุ่มตัวอย่าง การคำนวณค่าสถิติที่ใช้ในการทดสอบที่เหมาะสม และทำการสรุปเพื่อปฏิเสธหรือยอมรับ H_0 นอกจากนี้ยังต้องมีการกำหนดกลุ่มของค่าที่จะนำไปสู่การปฏิเสธ H_0 ซึ่งกลุ่มของค่านี้เรียกว่า “พื้นที่วิกฤต” หรือ “พื้นที่การปฏิเสธ” ของการทดสอบ

ความผิดพลาด 2 ประเภทสามารถเกิดขึ้นได้ขณะทดสอบสมมติฐาน ถ้าหากค่า H_0 ไม่ถูกปฏิเสธทั้งๆ ที่ H_0 นั้นไม่ถูกต้อง ความผิดพลาดประเภท 2 ก็จะเกิดขึ้น ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดทั้ง 2 ประเภทให้เกิดสัญลักษณ์พิเศษ

$$\alpha = P(\text{type I error}) = P(\text{reject } H_0 / H_0 \text{ is true})$$

$$\beta = P(\text{type II error}) = P(\text{fail to reject } H_0 / H_0 \text{ is false})$$

บางครั้งเป็นการสะดวกกว่าที่จะใช้ Power ของการทดสอบเป็นตัวบอก กล่าวคือ

$$\text{Power} = 1 - \beta = P(\text{reject } H_0 / H_0 \text{ is false})$$

ขั้นตอนทั่วไปในการทดสอบสมมติฐาน คือ การกำหนดค่าของความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภท 1 หรือ α ซึ่งเรียกว่า ระดับนัยสำคัญของการทดสอบ แล้วหลังจากนั้นก็ออกแบบวิธีการ

ทดสอบให้มีความน่าจะเป็นของความผิดพลาดประเภท 2 หรือ β ให้มีค่าน้อยตามที่เห็นว่าเหมาะสม

4.1 การใช้ P-Value ในการทดสอบสมมติฐาน

วิธีรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่ง คือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่มีค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด

วิธีการของ P-Value ได้ถูกนำมาใช้อย่างมากเพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากดังกล่าว P-Value คือ ความน่าจะเป็นที่ค่าทดสอบทางสถิติจะมีค่าเป็นอย่างน้อยที่ทำให้ค่านี้มีค่ามากเท่ากับค่าสังเกตในทางสถิติเมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่ใช้ในการปฏิเสธ H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้เรายังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ได้

ปกติแล้วเรานิยามที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธดังนั้นเราอาจจะพิจารณาค่า P-Value ว่าเป็น α ที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญเมื่อรู้ค่า P-value แล้ว ผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าคุณมือนัยสำคัญอย่างไร โดยไม่ต้องอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งมีการกำหนดระดับนัยสำคัญไว้ก่อน

การคำนวณหา P-value ที่แม่นยำไม่ใช่สิ่งที่ทำได้ง่ายนัก แต่โปรแกรมทางสถิติใหม่ๆ ก็จะมีค่านี้แสดงไว้ หรือแม้แต่ในเครื่องคำนวณแบบที่สามารถพกพาได้ ก็จะมีค่านี้แสดงไว้

4.2 ผลลัพธ์จากคอมพิวเตอร์

ผลลัพธ์จากคอมพิวเตอร์มีโปรแกรมมากมายที่สามารถช่วยคำนวณเกี่ยวกับการทดสอบสมมติฐานได้ ผลลัพธ์จากโปรแกรม Statgraphics ที่นำมาวิเคราะห์การทดลองดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2 ให้สังเกตว่าผลลัพธ์จะครอบคลุมไปถึงผลสรุปทางสถิติเกี่ยวกับค่าตัวอย่างทั้งสอง และให้ข้อมูลบางอย่างเกี่ยวกับช่วงความเชื่อมั่น นอกจากนี้โปรแกรมจะทำการทดสอบสมมติฐานที่สนใจ ซึ่งยอมให้ผู้วิเคราะห์ระบุความแตกต่างของมัธยฐานที่สนใจใน H_0 (ในกรณีนี้

เท่ากับ 0) ธรรมชาติของสมมติฐานรอง (“NE” บอกเป็นนัยว่า $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$) และการเลือกระดับค่า α (ในที่นี้คือ 0.05)

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูลจากโปรแกรม Statgraphics

		Sample 1	Sample 2	Pooled
Sample Statistics :	Number of Obs.	10	10	10
	Average	16.764	17.922	17.343
	Variance	0.100138	0.0614622	0.0808
	Std. Deviation	0.316446	0.247916	0.284253
	Median	16.72	17.93	17.355
Difference between Means = -1.158				
(Equal Vars.)	Sample 1- Sample 2	-1.42514	-0.890861	18 D.F.
Conf. Interval For	Diff. in Means :	95 Percent		
(Unequal Vars.)	Sample 1- Sample 2	-1.42644	-0.88976	17 D.F.
Ratio of Variance = 1.62926				
Conf. Interval For Ratio of Variance :		95 Percent		
	Sample 1- Sample 2	0.404684	6.55938	9 D.F.
Hypothesis Test for $H_0 : \text{Diff} = 0$		Computed t statistic = -9.10936		
	Vs Alt : NE	Sig. Level = 3.67808E-8		
	At Alpha = 0.05	So reject H_0		

ที่มา: ปารเมศ (2545)

ผลลัพธ์นี้ยังแสดงค่า t_0 ค่า P – Value (ระดับนัยสำคัญ) และการตัดสินใจที่ควรปฏิบัติเมื่อรู้ค่าของ α จำไว้ว่า $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ จะถูกปฏิเสธ และ $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ ถูกยอมรับ

4.3 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติเกี่ยวกับค่าเฉลี่ย

4.3.1 การทดสอบเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยประชากร 1 กลุ่ม (One Sample T-Test) เป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของประชากรกลุ่มเดียว ว่ามีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยที่ผู้วิจัยกำหนดไว้ในสมมติฐานหลัก H_0 หรือไม่ โดยมีระดับนัยสำคัญ (α) ตามที่ผู้วิจัยกำหนด ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ที่ตั้งไว้

สถิติที่ใช้ในการทดสอบ

กรณีทราบค่าความแปรปรวนของประชากร (σ^2)

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{(\sigma / \sqrt{n})} \quad (23)$$

กรณีไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร (σ^2) และขนาดตัวอย่างใหญ่

($n \geq 30$)

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{(s/n)} \quad (24)$$

กรณีไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร (σ^2) และขนาดตัวอย่างเล็ก

($n < 30$)

$$T = \frac{\bar{X} - \mu}{(s/n)} \quad \text{โดยที่การแจกแจง } t \text{ มี d.f.} = n - 1 \quad (25)$$

4.3.2 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยประชากร 2 กลุ่มที่เป็นอิสระต่อกัน (Independent Sample T-Test) หมายถึงตัวแปรที่ผู้วิจัยต้องการทราบถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ย โดยแบ่งตัวแปรนั้นออกเป็น 2 กลุ่มตามที่คุณผู้วิจัยกำหนดและทำการทดสอบถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยมีระดับนัยสำคัญ (α) ตามที่คุณผู้วิจัยกำหนด

สถิติที่ใช้ในการทดสอบ

กรณีทราบค่าความแปรปรวนของประชากร (σ^2)

$$Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}} \quad (26)$$

กรณีไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร (σ^2) และขนาดตัวอย่างใหญ่ ($n_1 \geq 30, n_2 \geq 30$)

$$Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (27)$$

กรณีไม่ทราบค่าความแปรปรวนของประชากร (σ^2) และขนาดตัวอย่างเล็ก ($n_1 \geq 30, n_2 \geq 30$)

$$\text{ถ้า } \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$T = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad \text{โดยที่การแจกแจง } t \text{ มี d.f.} = n_1 + n_2 - 2 \quad (28)$$

$$\text{เมื่อ } s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (29)$$

$$\text{ถ้า } \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

$$Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad \text{โดยที่การแจกแจง } t \text{ มี d.f.} = v \quad (30)$$

$$\text{เมื่อ } v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}} \quad \text{ค่า } v \text{ ที่ได้ปัดเป็นเลขจำนวนเต็ม} \quad (31)$$

4.3.3 การทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยประชากร 2 กลุ่มที่ไม่เป็นอิสระต่อกัน (Paired Samples T-Test) หมายถึงตัวแปรที่ผู้วิจัยต้องการทราบถึงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยที่เป็นตัวแปรตัวเดียวกัน หน่วยตัวอย่างเดียวกันแต่มีการเก็บรวบรวมข้อมูล 2 ครั้งและทดสอบหาความแตกต่างระหว่างครั้งแรกกับครั้งหลัง เช่น ราคาประเมินบ้านเดี่ยวในโครงการ A ณ ปัจจุบัน กับราคาประเมินบ้านเดี่ยวหลังเดิมในโครงการ A เช่นเดียวกันเมื่อ 3 ปีที่แล้ว หรืออีกลักษณะหนึ่งก็คือตัวแปรที่เป็นลักษณะจับคู่โดยมีข้อจำกัดว่าหน่วยตัวอย่างต้องเป็นหน่วยตัวอย่างเดียวกัน เช่น ต้องการทราบความแตกต่างระหว่างราคาประเมินกับราคาประกาศขายของบ้านเดี่ยวหลังเดียวกันในโครงการ A โดยเก็บรวบรวมข้อมูลราคาประเมินและราคาประกาศขายของบ้านเดี่ยวแต่ละหลังในโครงการ A มาทดสอบสมมติฐานว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ โดยมีระดับนัยสำคัญ (α) ตามที่ผู้วิจัยกำหนด

สถิติที่ใช้ในการทดสอบ

$$T = \frac{\bar{D} - \mu_D}{(S_D / \sqrt{n})} \quad \text{โดยที่การแจกแจง } t \text{ มี d.f.} = n - 1 \quad (32)$$

$$\text{เมื่อ } \bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} \quad S_D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D})^2}{n - 1}} \quad (33)$$

4.4 การสร้างแบบจำลองการถดถอย

ปัญหาจำนวนมากเกี่ยวข้องกับตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ซึ่งเราสนใจที่จะสร้างแบบจำลองและหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ ตัวอย่างเช่นในกระบวนการทางเคมีอย่างหนึ่งผลผลิตมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้งาน ในกรณีนี้วิศวกรเคมีอาจจะต้องการที่จะสร้างแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ของผลผลิตกับอุณหภูมิและใช้แบบจำลองนี้ในการพยากรณ์ค่าที่เหมาะสมที่สุดในการดำเนินกระบวนการ หรือควบคุมกระบวนการ

ปกติแล้วสมมติว่ามีตัวแปรตาม (Dependent Variable) อยู่เพียงตัวเดียว หรือผลตอบ (Response) y ที่เกิดขึ้นกับค่าอิสระ (Independent Variable) จำนวน k ตัว เช่น $x_1, x_2, \dots, x_k$ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ถูกกำหนดโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เรียกว่า แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) ซึ่งแบบจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นมาให้เหมาะสมกับข้อมูลตัวอย่างเซต

หนึ่ง ในบางครั้งผู้ทดลองทราบถึงรูปแบบที่แน่นอนของความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันระหว่าง y และ $x_1, x_2, \dots, x_k$ กล่าวคือ $y = \phi(x_1, x_2, \dots, x_k)$ อย่างไรก็ตาม ในกรณีส่วนมากแล้วรูปแบบที่แน่นอนของความสัมพันธ์เหล่านี้เป็นสิ่งที่เราไม่ทราบ และดังนั้นผู้ทดลองจะต้องเลือกฟังก์ชันที่เหมาะสมเพื่อที่จะใช้ในการประมาณ ϕ ซึ่งโดยมากแล้วเราจะใช้แบบจำลองพหุนามอันดับต่ำ (Low order) ในการประมาณฟังก์ชันนี้

แบบจำลองการถดถอยถูกนำมาใช้บ่อยครั้งในการวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองที่ไม่ได้มีการวางแผนล่วงหน้า ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในกรณีของการเก็บข้อมูลจากปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือจากสิ่งที่บันทึกไว้ในอดีต การวิเคราะห์การถดถอยยังมีประโยชน์อย่างมากต่อการทดลองที่ได้มีการออกแบบไว้ล่วงหน้าในกรณีที่มีบางอย่างเกิดผิดพลาดไปได้เช่นกัน

4.4.1 แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้น

สมมติว่าเราต้องการจะสร้างแบบจำลองที่ได้จากการทดลอง ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของสารโพลิเมอร์กับอุณหภูมิและอัตราป้อนของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบจำลองซึ่งอาจจะใช้แสดงความสัมพันธ์นี้คือ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \epsilon \quad (34)$$

โดยที่ y คือค่าความหนืด x_1 คืออุณหภูมิ และ x_2 คืออัตราการป้อนของตัวเร่งปฏิกิริยา แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุนามนี้ประกอบด้วยตัวอิสระ 2 เราเรียกตัวแปรอิสระว่า ตัวแปรทำนาย (Predictor variable) หรือ ตัวถดถอย (Regressor) คำว่าเชิงเส้นถูกนำมาใช้เนื่องจากว่าสมการที่ 33 เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า β_0, β_1 และ β_2 แบบจำลองแสดงให้เห็นถึงระนาบเกินสองมิติของ x_1 และ x_2 พารามิเตอร์ β_0 จะเป็นตัวกำหนดจุดตัดของระนาบ ในบางครั้งเราเรียก β_1 และ β_2 ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยแบบบางส่วน (Partial regression coefficient) เนื่องจากว่า β_1 จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับค่าของ y ต่อหนึ่งหน่วยการเปลี่ยนแปลงของ x_1 เมื่อ x_2 คงที่ และ β_2 จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับค่าของ y ต่อหนึ่งหน่วยการเปลี่ยนแปลงของ x_2 และ x_1 คงที่

ปกติแล้วตัวแปรผลตอบแทน y อาจจะเกี่ยวข้องกับตัวแปรถดถอย k ตัว ซึ่งจะมีแบบจำลองเป็น

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (35)$$

ซึ่งสมการรูปแบบนี้เรียกว่า แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณที่มีตัวแปรถดถอย k ตัว (Multiple linear regression model with k regressor variables) พารามิเตอร์ $\beta_j, j = 0, 1, \dots, k$ ถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย แบบจำลองนี้แสดงระนาบแบบระนาบเกิน (Hyperplane) ที่มีมิติ k ของตัวแปรถดถอย $\{x_j\}$ พารามิเตอร์ β_j แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงที่จะเกิดขึ้นกับผลตอบแทน y ต่อหนึ่งหน่วยของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับ x_j เมื่อตัวแปรอิสระที่เหลือทั้งหมด $x_i (i \neq j)$ มีค่าคงตัว

สำหรับจำลองที่มีความซับซ้อนมากกว่าที่ปรากฏในสมการที่ 35 ก็ยังอาจจะวิเคราะห์ได้โดยใช้เทคนิคของการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ ตัวอย่างเช่น พิจารณาแบบจำลองที่มีการเติมพจน์ของอันตรกิริยาลงไปในแบบจำลองอันดับที่หนึ่งซึ่งมี 2 ตัวแปร กล่าวคือ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (36)$$

ซึ่งก็คือแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นนั่นเอง ตามปกติแบบจำลองการถดถอยแบบใดก็ตามที่มีพารามิเตอร์ (ค่าของ β) เป็นแบบเชิงเส้นจะหมายถึงแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้น โดยไม่ต้องพิจารณาถึงรูปร่างของพื้นผิวผลตอบแทนที่ถูกสร้างขึ้นมา

4.4.2 การประมาณค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้น

วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square) เป็นวิธีการที่ใช้มากสัมประสิทธิ์การถดถอย สำหรับแบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ สมมติว่า $n > k$ เป็นข้อมูลของของตัวแปรผลตอบแทนที่เก็บมาได้ กล่าวคือ $y_1, y_2, \dots, y_n$ สำหรับค่า y_i ที่เก็บข้อมูลมาได้แต่ละตัวจะมีตัวแปรถดถอยที่เกี่ยวข้องกับมันอยู่ กำหนดให้ x_{ij} แทนระดับที่ i ของตัวแปร x_j ตารางข้อมูลเช่นนี้แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ข้อมูลสำหรับการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณ

y	x ₁	x ₂	...	x _k
y ₁	x ₁₁	x ₁₂	...	x _{1k}
y ₂	x ₂₁	x ₂₂	...	x _{2k}
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
y _n	x _{n1}	x _{n2}	...	x _{nk}

ที่มา: ปารเมศ (2545)

เราสมมติว่าพจน์ของความผิดพลาด (ε) ในแบบจำลองมี $E(\varepsilon) = 0$ และ $V(\varepsilon) = \sigma^2$ และ $\{\varepsilon_i\}$ เป็นตัวแปรสุ่มแบบไม่มีสหสัมพันธ์ (Uncorrected) เราสามารถเขียนสมการที่ 34 ในรูปของข้อมูลจากตารางที่ 3

$$\begin{aligned}
 y &= \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \dots + \beta_k x_{1k} + \varepsilon_i \\
 &= \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{37}$$

วิธีกำลังสองน้อยสุดจะเลือก β ในสมการที่ 34 เพื่อให้ผลรวมกำลังสองของความผิดพลาด ε_i มีค่าน้อยสุด ฟังก์ชันกำลังสองน้อยสุดคือ

$$\begin{aligned}
 L &= \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \\
 &= \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij})^2
 \end{aligned} \tag{38}$$

ฟังก์ชัน L จะถูกทำให้น้อยสุดกับค่าของ $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ ตัวประมาณกำลังสองน้อยสุดคือ $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k$ จะต้องเป็นไปตามสมการ

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta_0} \right|_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij}) = 0 \quad (39)$$

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta_j} \right|_{\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta}_0 - \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij}) x_{ij} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (40)$$

เมื่อทำให้สมการที่ 39 และ 40 อยู่ในรูปแบบที่ง่ายลง เราจะได้

$$\begin{aligned} n\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n x_{ik} &= \sum_{i=1}^n y_i \\ \vdots & \quad \quad \quad \vdots \\ \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^n x_{i1} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{ik} &= \sum_{i=1}^n x_{i1} y_i \\ \vdots & \quad \quad \quad \vdots \\ \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^n x_{ik} + \hat{\beta}_1 \sum_{i=1}^n x_{ik} x_{i1} + \hat{\beta}_2 \sum_{i=1}^n x_{ik} x_{i2} + \dots + \hat{\beta}_k \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 &= \sum_{i=1}^n x_{ik} y_i \end{aligned} \quad (41)$$

สมการเหล่านี้เรียกว่า สมการปกติกำลังสองน้อยสุด (Least squares normal equation) สังเกตว่าจะมีสมการปกติจำนวน $p = k + 1$ สมการ หนึ่งสมการสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ไม่ทราบค่าหนึ่งตัว และค่าคำตอบของสมการเหล่านี้จะเป็นตัวประมาณกำลังสองน้อยสุดของสัมประสิทธิ์การถดถอย $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_k$

จะเป็นการง่ายกว่าที่จะแก้สมการปกติเหล่านี้ ถ้าสมการเหล่านี้ถูกเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ซึ่งเราอาจจะเขียนสมการ 41 ได้ใหม่ในรูปของเมทริกซ์ คือ

โดยที่

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \text{ และ } \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

ตามปกติแล้ว y จะเป็นเป็นเวกเตอร์ของข้อมูลที่เก็บได้ซึ่งมีขนาด $(n \times 1)$, X เป็นเมทริกซ์ขนาด $(n \times p)$ ของระดับของตัวแปรอิสระ, β เป็นเวกเตอร์ขนาด $(p \times 1)$ ของสัมประสิทธิ์การถดถอย และ ε เป็นเวกเตอร์ขนาด $(n \times 1)$ ของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เราต้องการที่จะหาเวกเตอร์ของตัวประมาณกำลังสองน้อยสุด $\hat{\beta}$ ที่จะทำให้สมการต่อไปนี้มีค่าน้อยสุด

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \varepsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta) \quad (42)$$

สังเกตได้ว่า L อาจจะเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} L &= y'y + \beta'X'y - y'X'\beta + \beta'X'X\beta \\ &= y'y - 2\beta'X'y + \beta'X'X\beta \end{aligned} \quad (43)$$

เนื่องจาก $\beta'X'y$ เป็นเมทริกซ์ขนาด (1×1) หรือเป็นแบบสเกลาร์ และตัวสลับเปลี่ยน (Transpose) ของ $(\beta'X'y)' = y'X\beta$ จะเป็นสเกลาร์เช่นกัน ตัวประมาณกำลังสองน้อยสุดจะต้องเป็นไปตามสมการ $X'X$ ดังนั้น ตัวประมาณค่ากำลังสองน้อยสุดของ

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta} \right|_{\hat{\beta}} = -2X'y + 2X'X\hat{\beta} = 0 \quad (44)$$

ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบง่ายๆ คือ

$$X'X\hat{\beta} = X'y \quad (45)$$

สมการที่ 45 เป็นสมการในรูปเมทริกซ์ของสมการปกติกำลังสองน้อยสุด ซึ่งสมการเหล่านี้เหมือนกันกับสมการที่ 41 เพื่อที่จะแก้สมการปกติเหล่านี้ให้คุณทั้งสองข้างของสมการที่ 45 ด้วยอินเวอร์สของ β คือ

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} = X'yX'y \quad (46)$$

จะเห็นว่าเมทริกซ์ของสมการปกติจะมีรูปแบบเป็นสเกลาร์ เขียนสมการที่ 45 ในรายละเอียดได้เป็น

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik} \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{i1}x_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{ik}x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{i1}y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik}y_i \end{bmatrix} \quad (47)$$

ถ้าเรานำเอาเมทริกซ์เหล่านี้มาคูณกัน เราจะได้สมการปกติในรูปแบบสเกลาร์ (สมการที่ 41) ในรูปแบบนี้เราจะพบว่า $X'X$ เป็นเมทริกซ์สมมาตรที่มีขนาด $(p \times p)$ และ $X'y$ เป็นคอลัมน์เวกเตอร์ที่มีขนาด $(p \times 1)$ เมทริกซ์ $X'X$ มีโครงสร้างพิเศษบางประการ กล่าวคือ สมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมของ $X'X$ จะเป็นค่าผลรวมของผลคูณไขว้ของสมาชิกในคอลัมน์ของ X และสมาชิกที่ไม่อยู่บนเส้นทแยงมุมคือผลรวมของผลคูณไขว้ของสมาชิกในคอลัมน์ของ X ยิ่งกว่านั้นเราสังเกตได้อีกว่า สมาชิกของ $X'y$ เป็นผลรวมของผลคูณไขว้ของคอลัมน์ของ X และข้อมูลที่เก็บได้ $\{y\}$

4.4.3 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยแบบพหุคูณ

สำหรับปัญหาเรื่องการถดถอยแบบพหุคูณนั้นการทดสอบสมมติฐานบางอย่างเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบถึงการใช้งานได้เหมาะสมของแบบจำลอง เพื่อใช้งานวิธีในการทดสอบสมมติฐานเหล่านี้ เราต้องสมมติว่าค่าความผิดพลาดในแบบจำลอง ε_i มีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และมีความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ซึ่งเขียนอย่างย่อได้เป็น $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ผลที่ตามมาคือ ข้อมูลที่เก็บมาได้ y จะมีการกระจายแบบปกติและเป็นอิสระมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $\beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij}$ และความแปรปรวนเท่ากับ σ^2

4.4.4 การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย

การทดสอบนัยสำคัญของการถดถอย คือการทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรผลตอบ y และเซตของตัวแปรถดถอย $x_1, x_2, \dots, x_k$ หรือไม่ สมมติฐานที่เหมาะสมคือ

$$\begin{aligned} H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \\ H_0: \beta_j \neq 0 \text{ for at least one } j \end{aligned} \quad (48)$$

การปฏิเสธ H_0 ในสมการที่ 48 บอกให้ทราบว่า อย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอย $x_1, x_2, \dots, x_k$ หนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง

4.4.5 การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอยทีละตัวหรือเป็นกลุ่ม

การเติมตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองการถดถอยจะทำให้ผลรวมของกำลังสองสำหรับการถดถอยมีค่าเพิ่มขึ้น และค่าผิดพลาดของผลรวมของกำลังสองมีค่าลดลง เราต้องตัดสินใจว่าการเพิ่มขึ้นของผลรวมของกำลังสองของการถดถอยนั้น ประกันถึงการเพิ่มตัวแปรเข้าไปในแบบจำลองหรือไม่ยิ่งกว่านั้นการเพิ่มตัวแปรที่ไม่สำคัญเข้าไปในแบบจำลองทำให้ค่า Mean square error เพิ่มขึ้นและทำให้ประโยชน์ของแบบจำลองนั้นลดลง

สมมติฐานที่ใช้สำหรับทดสอบความมีนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การถดถอยแต่ละตัวคือ

$$\begin{aligned} H_0: \beta_j = 0 \\ H_0: \beta_j \neq 0 \end{aligned}$$

ถ้า $H_0: \beta_j = 0$ ไม่ถูกปฏิเสธแล้ว จะหมายความว่า x_j สามารถที่จะถูกตัดทิ้งออกจากแบบจำลองได้ ตัวทดสอบทางสถิติสำหรับสมมติฐานนี้คือ

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}}} \quad (49)$$

โดยที่ C_{jj} เป็นสมาชิกตามแนวเส้นทแยงมุมของ $(X'X)$ ที่เกี่ยวกับ $\hat{\beta}_j$ สมมติฐานศูนย์ $H_0: \beta_j = 0$ จะถูกปฏิเสธถ้า $|t_0| > t_{\alpha/2}$ สังเกตว่าการทดสอบนี้เป็นการทดสอบแบบบางส่วนเท่านั้น เพราะว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย $\hat{\beta}_j$ ขึ้นกับตัวแปรถดถอยอื่นๆ อีก x_i ($i \neq j$) ตัวหารของสมการที่ 46 จะถูกเรียกว่า ค่าผิดพลาดมาตรฐาน (Standard error) ของสัมประสิทธิ์การถดถอย $\hat{\beta}_j$ นั่นคือ

$$se(\hat{\beta}_j) = \sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}} \quad (50)$$

ดังนั้น วิธีการเขียนที่สมมูลกับสมการที่ 50 คือ

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}_j}{se(\hat{\beta}_j)} \quad (51)$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ซัชพล และ ภรภัทร (2549) ได้ทำการศึกษาการสร้างแม่พิมพ์ด้วยอ็อกซี่เรชั่นเดิม อะลูมิเนียมสำหรับการฉีดพลาสติก พบว่าการสร้างแม่พิมพ์ด้วยวัสดุอ็อกซี่เรชั่นเดิมอะลูมิเนียมสามารถลดเวลาในการสร้างแม่พิมพ์ลงเหลือไม่เกิน 15 วันและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าการสร้างแม่พิมพ์แบบเดิม

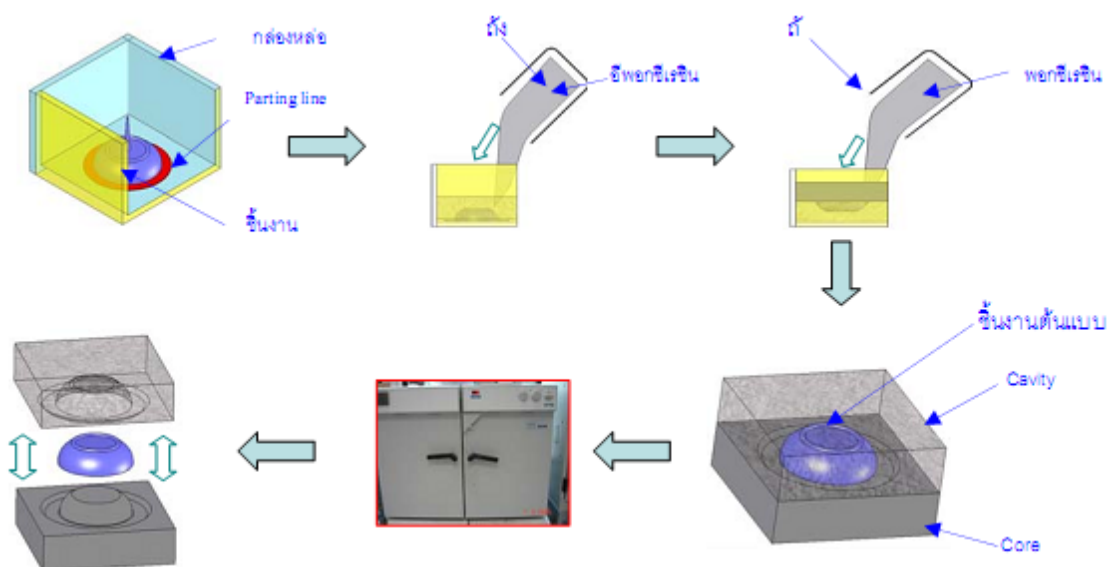


ภาพที่ 37 แม่พิมพ์อ็อกซี่เรชั่นเดิมอะลูมิเนียม
ที่มา: ซัชพล และ ภรภัทร (2549)

บรรยงค์ (2537) ได้ทำการศึกษาเรื่องอิทธิพลที่มีผลกระทบกับ ความหยาบผิวสูงสุด ($R_{\max}$) สำหรับกระบวนการกลึงด้วยเครื่องกลึงซีเอ็นซี พบว่าส่วนโค้งปลายมีด (r_n) และ อัตราการเดินมีด ต่อรอบ (f) โดยมีความสัมพันธ์กันตามสมการของความหยาบผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ผล โดยอาศัย หลักการของ Design and Analysis of Experiments ได้สมการดังนี้ $R_{\max} = -291r_n^2 + 139.875r_n^2 - 211.25r_nf - 12.15r_n^2 + 18.5f^2 + 18.51r_n + 65.853f - 5.762$ และ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสมการอื่นของผู้ผลิตมีดกลึงคาร์ไบด์ พบว่าค่าความแตกต่างของความหยาบผิวสูงสุด มีค่าเท่ากับ 0.314 ไมโครเมตร (μm) สำหรับในการศึกษาถึงส่วนโค้งปลายมีดไม่มีผลต่อ อัตราการหลุดของเศษโลหะ เนื่องจากความลึกในการกินชิ้นงานไม่มีผลต่อความหยาบผิว แต่สามารถควบคุมอัตราการหลุดของ เศษโลหะให้ได้ตามความหยาบที่ต้องการได้ โดยการเลือกใช้อัตราการเดินมีดตามรอบที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ความหยาบผิวที่ต้องการ

จิตติพร และ จันทราวรรณ (2549) ได้ทำการศึกษาเรื่องการเตรียมพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิต ที่นำไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นไบโพลาร์เพลตในเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟือเอี่ยม งานวิจัยนี้เป็นการเตรียมพอลิ คาร์บอเนตคอมโพสิตที่นำไฟฟ้าโดยใช้ พอลิคาร์บอเนตเป็นเมทริกซ์ มีแกรไฟต์และผงโลหะเป็น ฟิลเลอร์ตัวนำไฟฟ้า โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้งและขึ้นรูปโดยการอัดเบ้า พบว่าเมื่อใช้พอลิเมอร์และแกรไฟต์ในสัดส่วนต่างๆ พบว่าค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิต จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแกรไฟต์มากขึ้นและมากถึง 2.17 ซีเมนต่อเซนติเมตร เมื่ออัตราส่วนของพอลิ เมอร์ต่อแกรไฟต์เป็น 30 ต่อ 70

อนก และ คณะ (2550) ได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการสร้างชิ้นส่วน อินเสิร์ต สำหรับแม่พิมพ์ ด้วยการใช้วัสดุเชิงประกอบ (Composite Material) ผสมอีพอกซีเรซิน (อีพอกซีเร ซินและผงอะลูมิเนียม) และได้ศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุผสมอีพอกซีเรซินและเทคนิคการทำ แม่พิมพ์รวดเร็ว ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าชิ้นส่วน อินเสิร์ต สำหรับแม่พิมพ์จากอีพอกซีเรซินนั้น สามารถนำไปประกอบกับชุดชิ้นส่วนแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกมาตรฐาน และสามารถนำไปใช้ฉีด พลาสติกได้โดยไม่ต้องมีการดัดแปลงแก้ไขสิ่งใด ซึ่งจากการทดสอบการทำงานปรากฏว่าไม่ พบความเสียหายใดๆ ที่เกิดขึ้นกับแม่พิมพ์ แต่กระนั้นข้อจำกัดที่มีของวัสดุนี้คือ คุณสมบัติการนำ ความร้อนที่ต่ำ ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการฉีดพลาสติกต่อหนึ่งชิ้นนั้นใช้เวลามากกว่าแม่พิมพ์รวดเร็ว แบบอื่น เนื่องจากต้องใช้เวลาในการระบายความร้อน



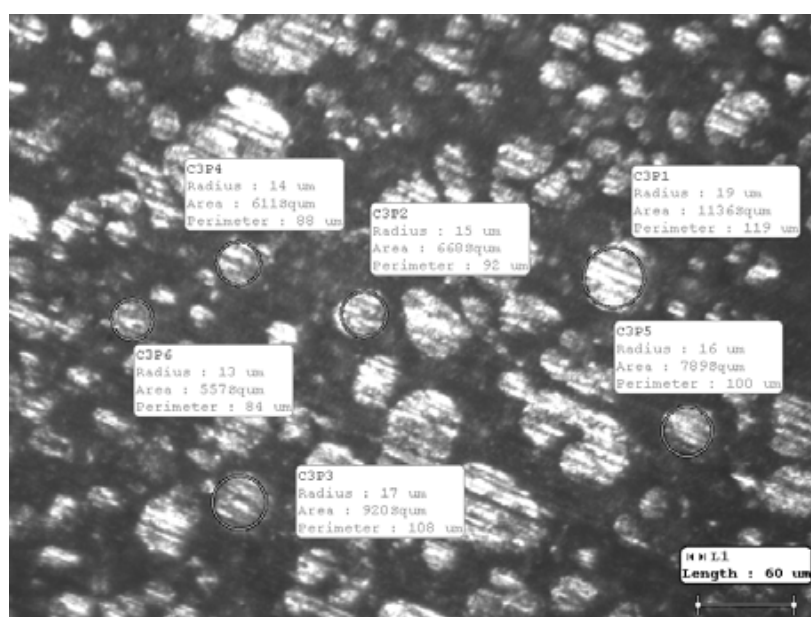
ภาพที่ 38 กระบวนการหล่อแม่พิมพ์อีพอกซีเรซิน
ที่มา: อนก และ คณะ (2550)

Nazareth *et al.* (2001) ทำการศึกษา การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่าง curing agent และ accelerator ที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของ epoxy vinyl ester พบว่า การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ curing agent และ accelerator จะส่งผลโดยตรงต่ออัตราในการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมโยง (cross link) และคุณสมบัติเชิงกลของ epoxy vinyl ester

สุนิติ และคณะ (2550) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุประเภทอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมภายใต้อัตราส่วนผสมเชิงมวลระหว่างมวลอีพอกซีเรซินกับอะลูมิเนียม ที่อัตราส่วนเชิงมวล 40:60, 45:55, 50:50 และ 55:45 ตามลำดับ ในการทดลองได้นำวัสดุประเภทอีพอกซีเรซินผสมอะลูมิเนียมที่อัตราส่วนข้างต้นมาทดสอบการดึงและอัดเพื่อพิจารณาพฤติกรรมของความเค้นและความเครียด (Stress-strain behavior) ที่เกิดขึ้น และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โมเดลแบบไมโครแมคคานิกส์ (Micromechanics Model) ซึ่งสมมติให้ผงอะลูมิเนียมมีรูปทรงเป็นแบบทรงกลม

จากผลการทดสอบพบว่า กรณีการทดสอบการดึงของวัสดุที่อัตราส่วนเชิงมวล 45:55 วัสดุสามารถทนต่อสภาพความเค้นดึงได้มากที่สุดประมาณ 50 MPa เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนเชิงมวลอื่นๆ สำหรับกรณีการทดสอบการอัดของวัสดุพบว่า ทุกๆ อัตราส่วนเชิงมวลสามารถทน

ต่อสภาพความเค้นอัดได้ใกล้เคียงกันโดยเฉลี่ยเท่ากับ 85.2 MPa สำหรับผลการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์ของแบบจำลองโครงสร้างวัสดุพบว่า กรณีภาระดึงที่อัตราส่วนเชิงมวล 45:55 ของแบบจำลองโครงสร้างวัสดุพบว่าเกิดความเค้นฟอนมิสเชส (Von Mises Stress) บนอีพ็อกซีเรซินมากที่สุดเท่ากับ 109 MPa สำหรับกรณีภาระอัดพบว่า ทุกๆ อัตราส่วนเชิงมวลมีค่าความเค้นฟอนมิสเชสบนอีพ็อกซีเรซินใกล้เคียงกันโดยเฉลี่ยเท่ากับ 184.4 MPa



ภาพที่ 39 ภาพถ่ายโครงสร้างของวัสดุประเภทอีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมที่อัตราส่วนเชิงมวล 45:55 ที่มา: สุนิติและคณะ (2550)

งานวิจัยนี้สรุปได้ว่าที่อัตราส่วนเชิงมวล 45:55 เป็นอัตราส่วนเชิงมวลที่มีความเหมาะสมโดยรวมมากที่สุดในด้านความแข็งแรงของวัสดุในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างผลการทดสอบกับผลการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์ เกิดจากรูปทรงและขนาดของอะลูมิเนียมที่ใช้มีรูปทรงที่ไม่แน่นอนและมีขนาดไม่คงที่

สุนิติ และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาและเลือกแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ที่มีพฤติกรรมและสมบัติเชิงกลที่สอดคล้องกับการทดสอบภาระดึงสำหรับวัสดุประเภทอีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม แบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์สำหรับงานวิจัยนี้ประกอบด้วยรูปแบบ FCC , BCC และรูปแบบผสมระหว่าง FCC และ BCC อนุภาคอะลูมิเนียมของแบบจำลองมีขนาดอยู่ระหว่าง 10 - 70 μm อัตราส่วนเชิงมวลสำหรับการทดสอบภาระดึงสำหรับงานวิจัยนี้กำหนดใช้ที่ 40:60, 45:55,

50:50 และ 55:45 (มวลผงอะลูมิเนียมต่อมวลอีพ็อกซีเรซิน) ผลการวิจัยนำผลของตัวประกอบความเค้นหนาแน่นจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ต่างๆ มาเปรียบเทียบกับผลของค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นจากการทดสอบภาระดึง พบว่าขอบเขตของค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง FCC ครอบคลุมผลของค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบภาระดึงทุกๆ อัตราส่วนเชิงมวล ขณะที่ขอบเขตของค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นที่คำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของแบบจำลอง BCC และแบบจำลองผสมระหว่าง FCC และ BCC ไม่ครอบคลุมค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นจากการทดสอบภาระดึง จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ FCC มีพฤติกรรมและสมบัติเชิงกลที่ใกล้เคียงและสอดคล้องกับผลการทดสอบภาระดึง จากการประมาณค่าของค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นพบว่า ขนาดอนุภาคบนแบบจำลอง FCC ที่ 33 μm ให้ผลของค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นใกล้เคียงกับค่าตัวประกอบความเค้นหนาแน่นจากการทดสอบมากที่สุดสำหรับวัสดุประเภทอีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม

Unal *et al.* (2004) ได้ศึกษาวิธีการวัดความหยาบผิวของผิวที่มีความไม่สม่ำเสมอและการประเมินผลของวิธีการโฟโตแกรมเมตริก โดยการวัดความหยาบผิวด้วยวิธีที่แตกต่างกันดังภาพที่ 34 การเปรียบเทียบโดยใช้ค่า ค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิว (SRC) ได้ผลดังตารางที่ 4

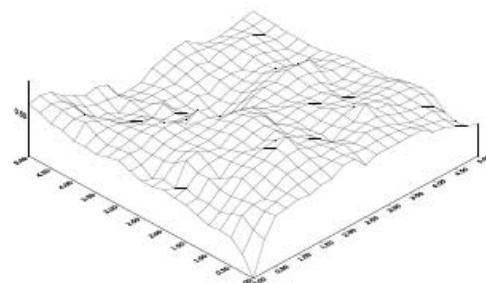
ตารางที่ 4 ค่า SRC จากการวัดขึ้นทดสอบโดยวิธีการต่างๆ

	Dial gauge measurement system	drag measurement system	Digital photogrammetry	Profilometry
SRC	1.0768	1.061956	1.057128	1.037668

ที่มา: Unal *et al.* (2004)



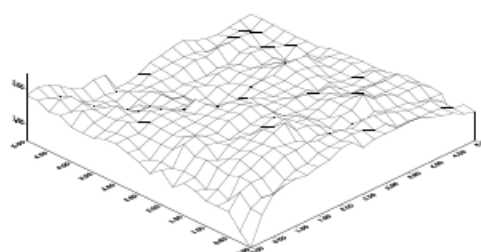
Taking stereo photo system for digital photogrammetry



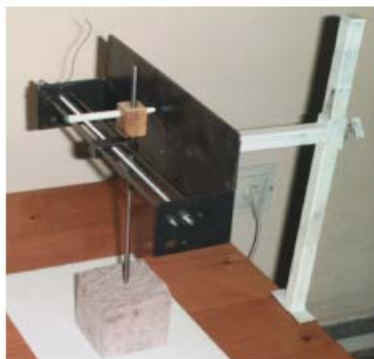
Surface topography measured with digital photogrammetry



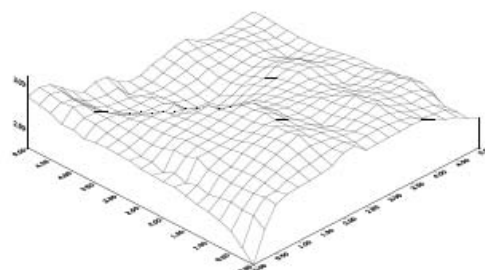
Measurement system by using dial gauge



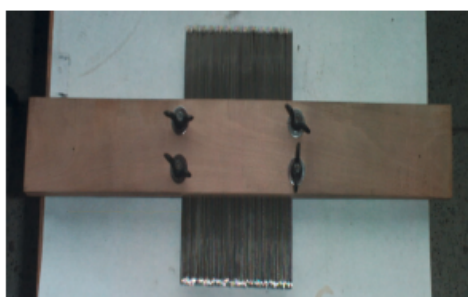
Surface topography measured with dial gauge system



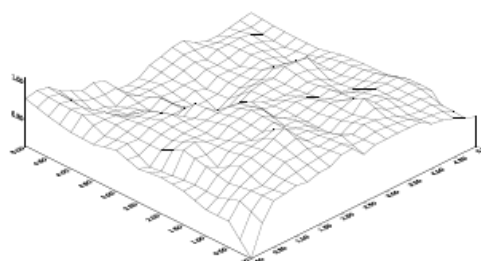
Profilometry



Surface topography measured with Profimetry



Drag measurement system



Surface topography measured with drag system

ภาพที่ 40 วิธีการวัดความหยาบผิวและพื้นที่ผิวจำลองของวัตถุ
ที่มา: Unal *et al.* (2004)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ในการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม มีวัสดุและอุปกรณ์หลักดังต่อไปนี้

1. วัสดุ

- 1.1 ผงอะลูมิเนียม ขนาด 10 - 60 μm
- 1.2 น้ำยาเรซิน Resin EP 310 A
- 1.3 สารทำให้แข็งตัว (Hardener) ชื่อยี่ห้อ Sika ชนิด Biresin L84T
- 1.4 เหล็กกล้า S50C (AISI 1050)

2. อุปกรณ์

- 2.1 เครื่องหล่อสุญญากาศ ชื่อยี่ห้อ MCP รุ่น 5/01



ภาพที่ 41 เครื่องหล่อสุญญากาศ

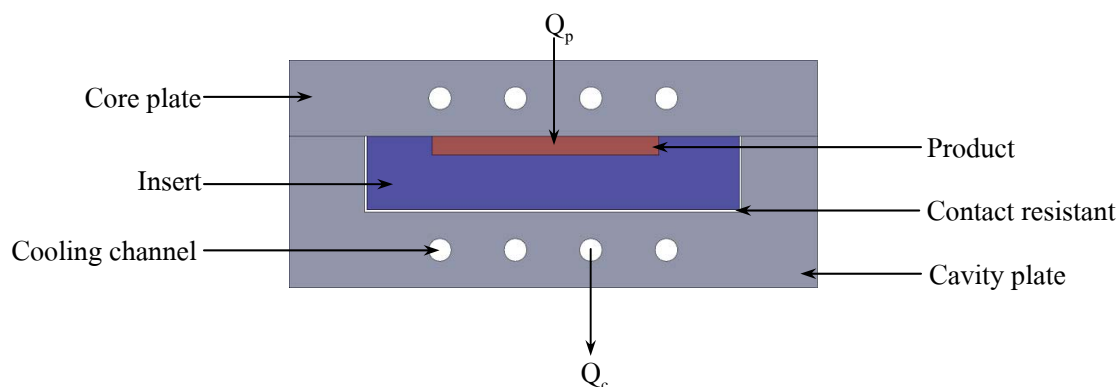
- 2.2 เครื่องกัดซีเอ็นซี (CNC) ซื้อมือถือ Bridgeport รุ่น VMC600X
- 2.3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด ซื้อมือถือ DOSTMANN electronic รุ่น ScanTemp 5020
- 2.4 ไดอัลเกจ (Dial gauge) ซื้อมือถือ Mitutoyo รุ่น 513-3049M
- 2.5 ขาแม่เหล็ก (Magnetic stand) ซื้อมือถือ Mitutoyo รุ่น 7010SN
- 2.6 แท่นวัดความตรง (Straightness)
- 2.7 ดอกกัด (Endmill) ขนาด 10 มิลลิเมตร ซื้อมือถือ SANDVIK รุ่น R216.34-10030-AS14N 1620
- 2.8 ฮีทเตอร์คาร์ทริดจ์ ขนาด 240 W ซื้อมือถือ HIGH TEMPERATURE รุ่น HT30426

วิธีการ

วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 กลุ่มการทดลองดังนี้

1. การสร้างแบบจำลองอย่างง่าย

ในการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์อ็อกไซด์เรซินเดิมอะลูมิเนียมนั้น จำเป็นจะต้องทำการวิเคราะห์สมการทางความร้อนที่เกี่ยวข้อง โดยการใช้หลักการสมดุลพลังงาน (Energy balance) โดยพิจารณาแม่พิมพ์เป็นระบบและสมมติว่าอุณหภูมิทุกตำแหน่งของแม่พิมพ์ ก่อนการถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากัน ทำการฉีดพลาสติกมายังแม่พิมพ์อ็อกไซด์เรซินเดิมอะลูมิเนียม และพิจารณาจากหลักการของการถ่ายเทความร้อนทั้งการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน แต่จากการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีนั้นมีผลน้อยมากจึงทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนและการพาความร้อนเท่านั้น โดยไม่คิดการสูญเสียพลังงานความร้อนออกนอกระบบ (Heat loss) แสดงในภาพที่ 42



ภาพที่ 42 การจำลองการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์

สมการสมดุลพลังงาน

พลังงานเข้า = พลังงานออก

$$Q_p = Q_c \quad (52)$$

โดยที่ Q_p = ความร้อนที่ได้รับจากการฉีดพลาสติก
 Q_c = ความร้อนที่ถ่ายเทออกโดยสารหล่อเย็น

2. การศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างช่องว่างอากาศ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของค่าความหนาผิวของชิ้นงานที่มีผลต่อการเป็นฉนวนความร้อนของผิวสัมผัส มีอยู่ 4 ขั้นตอนดังนี้

2.1 การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบ

เนื่องจากในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ชิ้นงานทดสอบ 2 ประเภท คือ อีพอกซีเรซินเต็ม อะลูมิเนียม และ เหล็ก ซึ่งชิ้นทดสอบแต่ละประเภทมีการจัดเตรียมชิ้นทดสอบที่แตกต่างกันดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก. อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม

- 1) เตรียมส่วนผสมโดยใช้ผงอะลูมิเนียม 45% น้ำยาเรซิน 44% และสารทำให้แข็งตัว 11% โดยมวล
- 2) ผสมน้ำยาเรซิน และ สารทำให้แข็งตัว ลงในถ้วยแล้วคนให้ผสมกันจนทั่ว ก่อนแล้วจึงใส่ผงอะลูมิเนียมลงไป คนให้ผสมกันจนทั่ว
- 3) นำส่วนผสมที่ได้ไปเข้าเครื่องหล่อสุญญากาศ เครื่องจะทำการกวนส่วนผสมให้เข้ากันและดึงอากาศออกจากส่วนผสม ขั้นตอนนี้ใช้เวลา 20 นาที
- 4) เทส่วนผสมลงในกล่องภาชนะ ดึงอากาศออกจากส่วนผสมอีก 20 นาที
- 5) นำชิ้นงานออกจากเครื่องหล่อสุญญากาศ ปล่อยให้ชิ้นงานแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง ใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง
- 6) แกะแม่แบบอลูมิเนียมออกจากชิ้นงาน
- 7) นำชิ้นงานที่ได้ไปกัดปาดผิวให้ได้ขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร จำนวน 15 ก้อน

ข. เหล็กกล้า S50C

เนื่องจากผู้วิจัยได้ทำการสั่งซื้อเหล็กจากผู้ประกอบการ (ผู้ขาย) มีขนาดหน้าตัด 5×5 เซนติเมตร เป็นท่อนยาว ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำมาตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้าเป็นก้อนขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร จำนวน 30 ก้อน โดยแบ่งเป็นเหล็กชุด A จำนวน 15 ก้อน และ เหล็กชุด B จำนวน 15 ก้อน จากนั้นจึงนำไปปาดผิวด้านที่ถูกเลื่อยให้ขนานกัน

2.2 การเตรียมผิวชิ้นงาน

เนื่องจากอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ยังไม่มีการวิจัยถึงเงื่อนไขการกัด (Cutting condition) ที่เหมาะสม ซึ่งต่างจากเหล็ก S50C ที่ทางบริษัทได้บอกเงื่อนไขการกัดไว้แล้ว (ภาคผนวก ข) ดังนั้นในการวิจัยนี้ทางผู้วิจัยจึงได้ตัดสินใจเลือกใช้เงื่อนไขการกัดเดียวกันกับเหล็ก

ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีในการสร้างความหยาบบนผิวชิ้นงานที่แตกต่างกันโดยการเปลี่ยนแปลงค่า ความเร็วรอบ (speed) และ อัตราป้อน (feed) เนื่องจากสภาวะ

การตัดกระทำการควบคุม ปรับเปลี่ยนได้ง่าย และยังมีผลกระทบโดยตรงกับเวลาในการผลิต ซึ่งค่าความเร็วรอบ (speed) และ อัตราป้อน (feed) สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 53 และ 54 และภาคผนวก ข ดังนี้

$$\text{ความเร็วรอบ (speed)} \quad n = \frac{V_c \times 1000}{\pi D_c} \quad (53)$$

โดยที่	n	=	ความเร็วรอบ (rpm)
	V_c	=	ความเร็วตัด มีค่าเท่ากับ 215 m/min
	D_c	=	เส้นผ่าศูนย์กลางดอกกัด มีค่าเท่ากับ 10 mm
	π	=	3.14

$$n = \frac{215 \times 1000}{3.14 \times 10}$$

$$= 6,847 \text{ rpm}$$

$$\text{อัตราป้อน (feed)} \quad V_f = n f_z z_n \quad (54)$$

โดยที่	V_f	=	อัตราการป้อน (mm/min)
	n	=	ความเร็วรอบ มีค่าเท่ากับ 6,847 rpm
	f_z	=	feed per tooth มีค่าเท่ากับ 0.095 mm/tooth
	z_n	=	จำนวนฟันตัด มีค่าเท่ากับ 4 tooth

$$V_f = 6,847 \times 0.095 \times 4$$

$$= 2,602 \text{ mm/min}$$

ดังนั้นใช้ความเร็วรอบ (speed) 6,847 รอบ/นาที อัตราป้อน (feed) 2,602 มิลลิเมตร/นาที เปลี่ยนความเร็วรอบ (speed) 5 ค่า โดยการ $\pm 20\%$ และ $\pm 40\%$ จากค่าที่เลือกไว้จะได้ 4,108

5,478 6,847 8,216 และ 9,585 รอบ/นาที ส่วนอัตราป้อน (feed) 3 ค่า โดยการ $\pm 20\%$ จากค่าที่เลือกไว้จะได้ 2,082 2,602 และ 3,122 มิลลิเมตร/นาที (ตารางที่ 5)

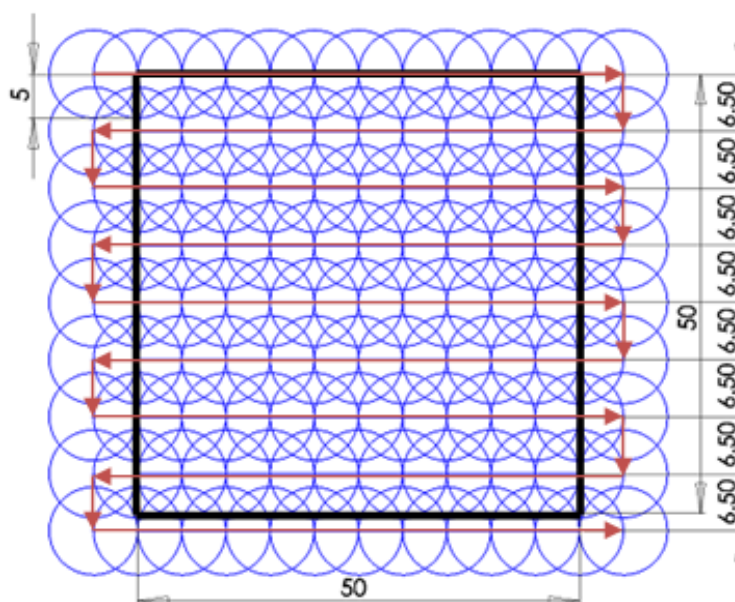
ตารางที่ 5 เงื่อนไขการกัดผิวชิ้นงาน

Sample	Speed (rpm)	Feed (mm/min)
1	4,108	2,082
2		2,602
3		3,122
4	5,478	2,082
5		2,602
6		3,122
7	6,847	2,082
8		2,602
9		3,122
10	8,216	2,082
11		2,602
12		3,122
13	9,585	2,082
14		2,602
15		3,122

ได้เงื่อนไขการกัดที่ต่างกัน 15 ตัวอย่าง ส่วนเงื่อนไขอื่นที่ใช้เหมือนกันคือ เลือกใช้ดอกกัด (Endmill) (ภาพที่ 43) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวนฟันตัด 4 ฟัน ใช้เงื่อนไขการกัดขั้นตอนสุดท้าย (Finishing) การกินลึก (Depth of cut) 0.1 มิลลิเมตร แนวการเดินทางของดอกกัดห่างกัน 6.5 มิลลิเมตร (ภาพที่ 44) การระบายความร้อนแบบแห้งโดยใช้อากาศ ทำการกัดชิ้นงานโดยใช้เครื่องกัดซีเอ็นซี โดยการกัดอิมพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียมจำนวน 15 ก้อน (R1 - R15) เหล็กชุด A จำนวน 15 ก้อน (S_a1 - S_a15) และ เหล็กชุด B จำนวน 15 ก้อน (S_b1 - S_b15)



ภาพที่ 43 ดอกกัด (Endmill)



ภาพที่ 44 การเลื่อนแนวเดินดอกกัดบนชิ้นงาน

2.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิว (Surface roughness coefficient; SRC)

การวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานของการวิจัยนี้เป็นการวัดในลักษณะการเปรียบเทียบ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้อาศัยการระบุค่าความหยาบละเอียดของระนาบด้วยค่า SRC ตามวิธีการคำนวณที่ได้เสนอในงานวิจัยเรื่อง การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานกับเงื่อนไขการกัดของวัสดุพอลิเมอร์ชนิดอะลูมิเนียม ของ ชุมพร ช่างกลึงเหมาะะ นิสิตปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวโดยการใช้ไดอัลเกจในการวัดความหยาบผิวบนชิ้นงาน วัดค่าความ

หยาบผิวเป็นเส้นแนวตรง 1 เซนติเมตร ($10,000 \mu\text{m}$) โดยการหมุนไมโครมิเตอร์ที่ติดกับฐานให้อุปกรณ์วัดเลื่อนออกทีละ $50 \mu\text{m}$ บันทึกค่าจากไดอัลเกจทั้งหมด 200 ค่าลงในโปรแกรม Microsoft Office Excel แล้วนำไปเขียนกราฟ ทำการปรับกราฟเพื่อแก้ไขค่าความชันที่เกิดขึ้นจากการวางขึ้นทดสอบ นำไปจำลองพื้นที่ผิวโดยใช้โปรแกรม Solidworks วัดขนาดพื้นที่ผิวทั้งหมด นำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิว (SRC)

2.4 การทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่างอากาศ

การทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่างอากาศได้แบ่งการทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b$) โดยวางให้แนวการเดินดอกลัดให้ขนานกัน

กรณีที่ 2 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b'$) โดยวางให้แนวการเดินดอกลัดให้ตั้งฉากกัน

กรณีที่ 3 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R$) โดยวางให้แนวการเดินดอกลัดให้ขนานกัน

กรณีที่ 4 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R'$) โดยวางให้แนวการเดินดอกลัดให้ตั้งฉากกัน

วิธีการทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่างอากาศตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 1) เปิดฮีตเตอร์ให้อุณหภูมิจุด T_H มีค่าเท่ากับ 220°C แล้วจึงปิดฮีตเตอร์
- 2) วางขึ้นทดสอบทั้งสองก้อนซ้อนกันโดยให้ด้านที่ผ่านการกัดสัมผัสกัน
- 3) ปิดฉนวนทางด้านหน้าและด้านบน (ภาพที่ 45) วางค้อนน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ทางด้านบน ทิ้งไว้ถ่ายเทความร้อนเป็นเวลา 5 นาที
- 4) เปิดฉนวนทางด้านหน้า วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_H, T_1, T_2, T_3 และ T_4 (ภาพที่ 46) บันทึกผล

โดยทำการทดสอบกรณีละ $15 \times 15 = 225$ ครั้ง 4 กรณี $4 \times 225 = 900$ ครั้ง ใช้เวลาครั้งละ 20 นาที ดังนั้นใช้เวลาทั้งหมดในการทดสอบ 300 ชั่วโมง ยกตัวอย่าง เช่นกรณีที่ 1 ทำการทดสอบระหว่าง $S_{a1} - S_{b1}, S_{a1} - S_{b2}, \dots, S_{a1} - S_{b15}$ จนถึง $S_{a15} - S_{b1}, S_{a15} - S_{b2}, \dots, S_{a15} - S_{b15}$

รวมทุกกรณีได้ทั้งหมด 900 ค่า โดยจะวางก้อนเหล็ก S_a ไว้ด้านล่าง ส่วนก้อนเหล็ก S_b และก้อนอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม R จะวางไว้บนก้อนเหล็ก S_a



ภาพที่ 45 การปิดผนวทางด้านหน้า



ภาพที่ 46 แสดงตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ

3. การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการทำนายเวลาในการหล่อเย็น

นำสมการการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมที่ได้จากวิธีการที่ 1 และ 2 มาวิเคราะห์หาเวลาในการหล่อเย็น

ผลและวิจารณ์

ผล

1. ผลการสร้างแบบจำลองอย่างง่าย

จากการสร้างแบบจำลองดังภาพที่ 42 ได้ให้ความร้อนโดยการฉีดพลาสติกเข้ามาในแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะนำความร้อนผ่านไปยังชั้นอินสูลิทแม่พิมพ์อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ผ่านความต้านทานความร้อนที่ผิวสัมผัส ผ่านโครงแม่พิมพ์ (Mold base) ผ่านท่อหล่อเย็น ซึ่งจะสามารถคำนวณการนำความร้อนจากพลาสติกเหลวไปยังชั้นอินสูลิทแม่พิมพ์อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมหาได้จาก

$$q = \frac{k_r A (T_1 - T_2)}{x_r} \quad (55)$$

โดยที่	k_r	=	ค่าสภาพการนำความร้อนของอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม
	A	=	พื้นที่หน้าตัด (m^2)
	x_r	=	ความหนาของอินสูลิท (m)
	T_1	=	อุณหภูมิของพลาสติกเหลว ($^{\circ}C$)

เนื่องจากระหว่างผิวตัวกลางที่นำมาต่อสัมผัสจะเกิดช่องอากาศหรือช่องของไหลอื่นๆ ตรงบริเวณผิวตัวกลางสัมผัสกันโดยตรงจะมีการนำความร้อนผ่านรอยต่อ ส่วนบริเวณที่เป็นช่องอากาศการถ่ายเทความร้อนผ่านอาจเป็นได้ทั้งการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จาก ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหน้าสัมผัส (h_c) สามารถหาได้จากการทดลองในวิธีการที่ 2

$$q = h_c A (T_2 - T_3) \quad (56)$$

โดยที่	h_c	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหน้าสัมผัส ($W/m^2^{\circ}C$)
--------	-------	---	---

อัตราการนำความร้อนจากผิวรอยต่อของแม่พิมพ์ไปยังผิวท่อน้ำหล่อเย็น

$$q = \frac{k_m A (T_3 - T_4)}{x_m} \quad (57)$$

โดยที่ k_m = ค่าสภาพการนำความร้อนของอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม
 x_m = ความหนาของแม่พิมพ์ (m)

สารทำความเย็นจะนำความร้อนออกเท่ากัน ทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT ซึ่งขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวของท่อหล่อเย็นกับพื้นที่ผิวชิ้นงาน นั่นคือ

$$q = \pi d_c l h_{cl} (T_4 - T_5) \quad (58)$$

โดยที่ d_c = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อน้ำหล่อเย็น (m)
 l = ความยาวของท่อน้ำหล่อเย็น (m)
 h_{cl} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำหล่อเย็นมีค่าเท่ากับ
 T_4 = อุณหภูมิผิวท่อหล่อเย็น ($^{\circ}\text{C}$)
 T_5 = อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ($^{\circ}\text{C}$)

ปริมาณความร้อนที่ได้รับมาจากพลาสติกเหลวหาได้จาก

$$Q_p = \frac{m(\Delta h)}{t_z} \quad (59)$$

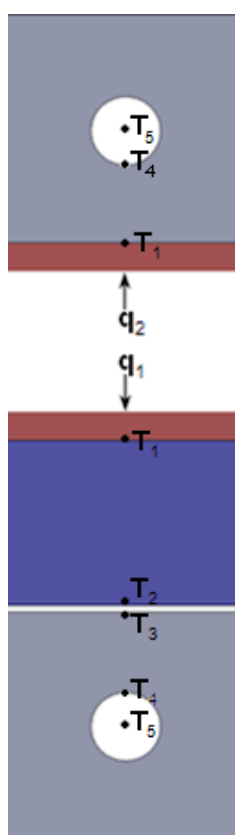
จากสมการที่ 57 เมื่อฉีดพลาสติกเข้าไปในแม่พิมพ์ พลาสติกจะมีสถานะของเหลวที่มีอุณหภูมิสูง ความร้อนที่ได้รับมาจะถูกนำออกจากเนื้อพลาสติกโดยสารหล่อเย็น โดยที่พลาสติกจะมีการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวไปเป็นของแข็ง

$$Q_p = \frac{m(h_i - h_b)}{t_{z_1}} + \frac{m(h_b - h_c)}{t_{z_2}} + mL \quad (60)$$

โดยที่	m	=	มวลของชิ้นงาน (kg)
	h_i	=	enthalpy ของพลาสติกเมื่อน็อค (kJ/kg)
	h_b	=	enthalpy ของพลาสติกเมื่อแข็งตัว (kJ/kg)
	h_c	=	enthalpy ของพลาสติกเมื่อปลด (kJ/kg)
	L	=	ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ (kJ/kg)
	t_z	=	เวลาในการหล่อเย็นทั้งวงจร (s)
	t_{z1}	=	ระยะเวลาที่ฉีดพลาสติกจนแข็งตัว (s)
	t_{z2}	=	ระยะเวลาที่พลาสติกจนแข็งตัวจนปลดชิ้นงานออก (s)

ปริมาณความร้อนที่ออกจากแม่พิมพ์โดยสารหล่อเย็น โดยที่การนำความร้อนออกจากแม่พิมพ์โดยช่องหล่อเย็น สามารถนำออกได้ 2 ฟาก (ภาพที่ 47)

$$Q_c = q_1 + q_2 \quad (61)$$



ภาพที่ 47 แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์

โดยที่ค่า q_1 หาได้จากสมการที่ 55 56 57 และ 58

$$q_1 = \frac{k_r A (T_1 - T_2)}{x_r} = h_c A (T_2 - T_3) = \frac{k_m A (T_3 - T_4)}{x_m} = \pi d_c l h_{cl} (T_4 - T_5) \quad (62)$$

ทำการย้ายข้างสมการที่ 60 จะได้

$$T_1 - T_2 = \frac{q_1 x_r}{k_r A} \quad (63)$$

$$T_2 - T_3 = \frac{q_1}{h_c A} \quad (64)$$

$$T_3 - T_4 = \frac{q_1 x_m}{k_m A} \quad (65)$$

$$T_4 - T_5 = \frac{q_1}{\pi d_c l h_{cl}} \quad (66)$$

รวมสมการ (63) + (64) + (65) + (66) จะได้

$$T_1 - T_5 = \frac{q_1 x_r}{k_r A} + \frac{q_1}{h_c A} + \frac{q_1 x_m}{k_m A} + \frac{q_1}{\pi d_c l h_{cl}} \quad (67)$$

$$T_1 - T_5 = q_1 \left(\frac{x_r}{k_r A} + \frac{1}{h_c A} + \frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}} \right) \quad (68)$$

$$q_1 = \frac{T_1 - T_5}{\frac{x_r}{k_r A} + \frac{1}{h_c A} + \frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}}} \quad (69)$$

โดยที่ค่า q_2 หาได้จากสมการที่ 55 และ 58

$$q_2 = k_m A (T_1 - T_4) = \pi d_c l h_{cl} (T_4 - T_5) \quad (70)$$

ทำการย้ายข้างสมการที่ 70 จะได้

$$T_1 - T_4 = \frac{q_2 x_m}{k_m A} \quad (71)$$

$$T_4 - T_5 = \frac{q_2}{\pi d_c l h_{cl}} \quad (72)$$

รวมสมการ (70) + (71) จะได้

$$T_1 - T_5 = \frac{q_2 x_m}{k_m A} + \frac{q_2}{\pi d_c l h_{cl}} \quad (73)$$

$$T_1 - T_5 = q_2 \left(\frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}} \right) \quad (74)$$

$$q_2 = \frac{T_1 - T_5}{\frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}}} \quad (75)$$

จากสมการที่ 61 หาค่าความร้อนที่ถ่ายเทออกโดยสารหล่อเย็น (Q_c) ได้จากการรวมค่า q_1 และ q_2

$$Q_c = \frac{T_1 - T_5}{\frac{x_r}{k_r A} + \frac{1}{h_c A} + \frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}}} + \frac{T_1 - T_5}{\frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}}} \quad (76)$$

จากสมการที่ 52 ความร้อนที่ได้รับจากการฉีดพลาสติก (Q_p) จะมีค่าเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทออกโดยสารหล่อเย็น (Q_c) ได้สมการต่อไปนี้

$$\frac{m(h_i - h_b)}{t_{z_1}} + \frac{m(h_b - h_e)}{t_{z_2}} + mL = \frac{T_1 - T_5}{\frac{x_r}{k_r A} + \frac{1}{h_c A} + \frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}}} + \frac{T_1 - T_5}{\frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}}} \quad (77)$$

เนื่องจากสมการที่ 77 ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของหน้าสัมผัส (h_c) ได้ จึงได้ออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของหน้าสัมผัส (h_c) ในการทดลองที่ 2

2. ผลการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนระหว่างช่องว่างอากาศ

2.1 ผลการเตรียมชิ้นงานสำหรับการใช้ในการทดสอบ

สร้างแม่แบบเพื่อหล่อชิ้นงานจากแผ่นออลิกให้มีความหนาแม่แบบที่ใหญ่กว่าชิ้นงานที่ต้องการเล็กน้อยสำหรับการเก็บรายละเอียดผิวชิ้นงานที่หลัง ส่วนที่เผื่อขนาดแม่แบบให้สูงขึ้นเพื่อป้องกันไม่ให้ฟองอากาศที่เกิดจากการไล่อากาศออกดันออกมาข้างนอกแม่แบบ ทำการเชื่อมแผ่นออลิกด้วยน้ำยาประสาน แล้วใช้เทปพันสายไฟซึ่งสามารถทนความร้อนได้ปิดทับบริเวณรอยต่ออีกชั้นหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้ส่วนผสมรั่วออกมา



ภาพที่ 48 แม่แบบหล่อชิ้นงาน

คำนวณปริมาณสารที่ใช้เป็นส่วนผสมในการหล่อชิ้นงานอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม โดยคำนวณจากปริมาตรที่ต้องการคูณด้วยความหนาแน่นของสารเพื่อให้ได้น้ำหนักที่ต้องการแล้ว นำไปคำนวณหาปริมาณสารที่ต้องใช้ตามปริมาณสัดส่วนที่คุณสมบัติ เกิดหนูนวส์ นิสิตปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ได้ทำการคำนวณและทดสอบสัดส่วนที่เหมาะสมไว้แล้วดังนี้ น้ำหนักสาร 100% ใช้ผงอะลูมิเนียมเท่ากับ 45% ของน้ำหนักทั้งหมด ใช้เรซินเหลวและฮาร์ดเดนเนอร์เท่ากับ 55% ของน้ำหนักทั้งหมด โดยแยกว่าใช้ฮาร์ดเดนเนอร์เท่ากับ 20% ของน้ำหนักเรซินเหลวและฮาร์ดเดนเนอร์ ซึ่งสามารถคำนวณได้ว่าใช้เรซินเหลว 44% ของน้ำหนักทั้งหมด และใช้ฮาร์ดเดนเนอร์ 11% ของน้ำหนักทั้งหมด สามารถคำนวณน้ำหนักส่วนผสมที่ใช้ได้ดังนี้



ภาพที่ 49 การเตรียมส่วนผสมในการหล่อชิ้นงานอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม

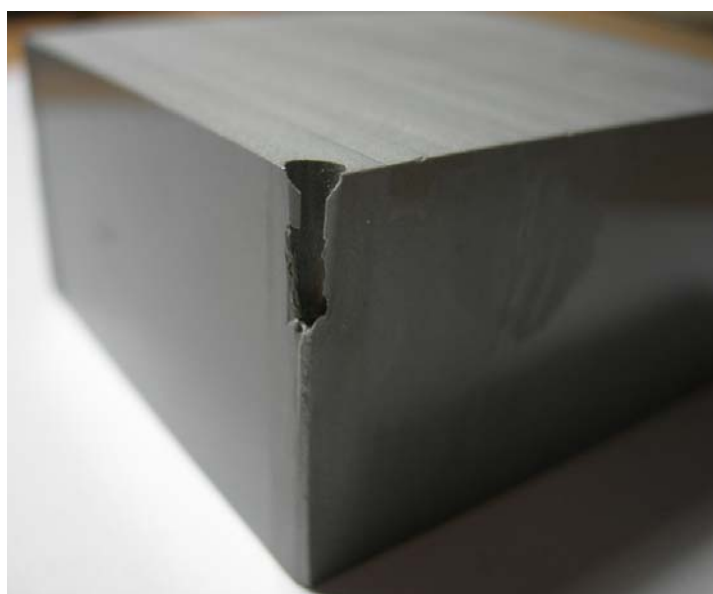
ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบที่ต้องการมีขนาด $5 \times 5 \times 5$ เซนติเมตร เนื่องจากในการหล่อแต่ละครั้งใช้เวลานานจึงออกแบบให้หล่อหนึ่งครั้งได้ชิ้นทดสอบ 2 ชิ้น และเพื่อด้านละ 0.5 เซนติเมตร ดังนั้นต้องหล่อชิ้นงานขนาด $6 \times 6 \times 12 = 432$ ลูกบาศก์เซนติเมตร คิดเป็นน้ำหนักต่อชิ้นเท่ากับ $432 \times 1.6 = 691.2$ กรัม

ดังนั้นใช้ ผงอะลูมิเนียมเท่ากับ	$691.2 \times 0.45 = 311.04$ กรัม
เรซินเหลวเท่ากับ	$691.2 \times 0.44 = 304.128$ กรัม
ฮาร์ดเดนเนอร์เท่ากับ	$691.2 \times 0.11 = 76.032$ กรัม



ภาพที่ 50 ชิ้นงานอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมที่ผ่านการหล่อ

ในระหว่างกระบวนการหล่อชิ้นงานโดยใช้เครื่องหล่อสุญญากาศ ผู้วิจัยพบว่าอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมบางก้อนจะมีการเกิดโพรงอากาศตรงบริเวณผิวด้านบนและที่มุมของชิ้นงานที่หล่อ (ภาพที่ 51) ซึ่งเกิดจากการไล่อากาศออกจากส่วนผสมไม่หมด ดังนั้นในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้แก้ปัญหาโดยการทำแม่แบบให้มีขนาดใหญ่กว่าชิ้นงานที่ต้องการด้านละ 0.5 เซนติเมตร แล้วจึงนำไปกัดขึ้นรูปให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ



ภาพที่ 51 โพรงอากาศที่เกิดบริเวณขอบชิ้นงานที่หล่อ



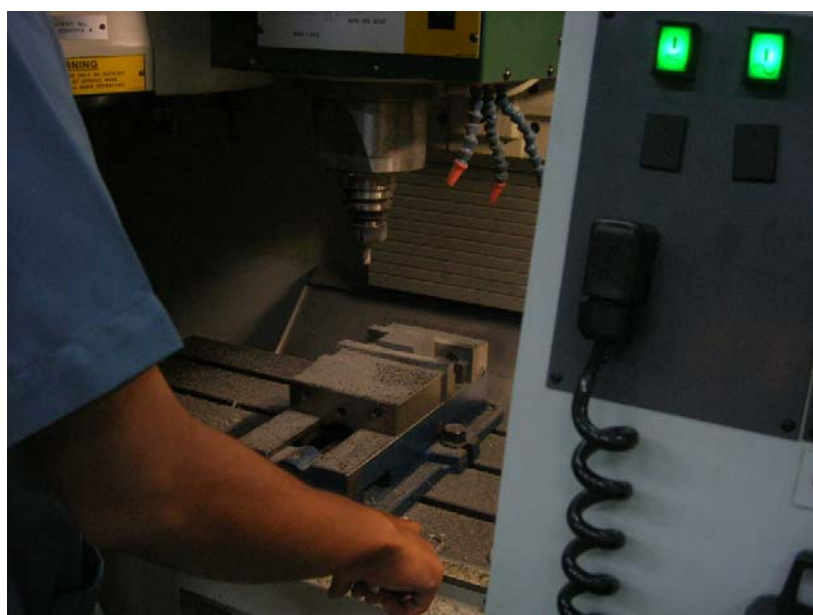
ภาพที่ 52 เกิดฟองอากาศในกระบวนการกวนส่วนผสมให้เข้ากัน
และดึงอากาศออกจากส่วนผสม



ภาพที่ 53 การดึงอากาศออกจากส่วนผสม

2.2 ผลการเตรียมผิวชิ้นงาน

ระหว่างการเตรียมผิวชิ้นงานโดยใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีเพื่อสร้างความหยาบบนผิวชิ้นงาน (ภาพที่ 54) นั้นได้สังเกตเห็นว่าลักษณะของเศษชิ้นงาน (Chip) ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการกัดคือฟอกซีเรชั่นเดิมอะลูมิเนียม จะมีลักษณะเป็นผง ส่วนเหล็กนั้นเศษชิ้นงานจะมีลักษณะเป็นเศษเหล็กที่มีขนาดใหญ่กว่า

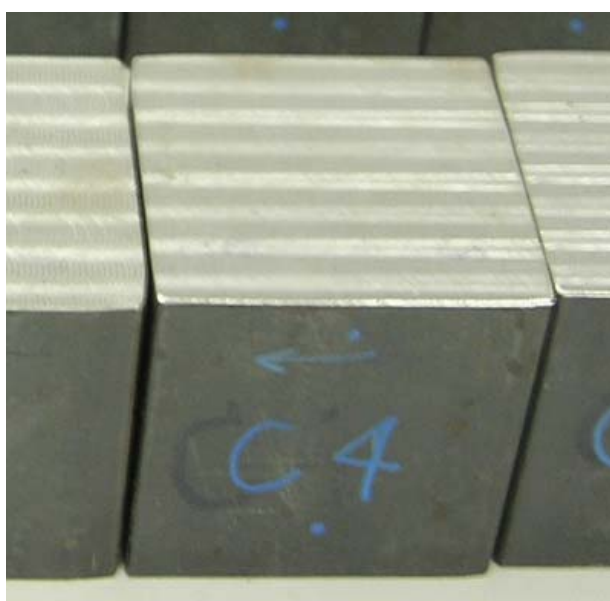


ภาพที่ 54 การกัดผิวชิ้นงาน

สำหรับผิวชิ้นงานไม่ว่าจะเป็นวัสดุฟอกซีเรชั่นเดิมอะลูมิเนียมหรือเหล็กจะสามารถสังเกตเห็นแถบสองลักษณะ (ภาพที่ 55 และ 56) คือแถบที่เกิดจากการเดินดอกกัดเพียงรอบเดียว และแถบที่เกิดจากการเดินดอกกัดซ้ำรอยเดิม ซึ่งบริเวณที่เดินกัดเพียงรอบเดียวจะเห็นเป็นเส้นวงของดอกกัด แต่บริเวณที่ถูกกัดซ้ำจะเป็นผิวที่ราบเรียบ ซึ่งเป็นผลมาจากการเลื่อนแนวเดินดอกกัดบนผิวชิ้นงาน



ภาพที่ 55 ชิ้นงานอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมที่ผ่านการกัด



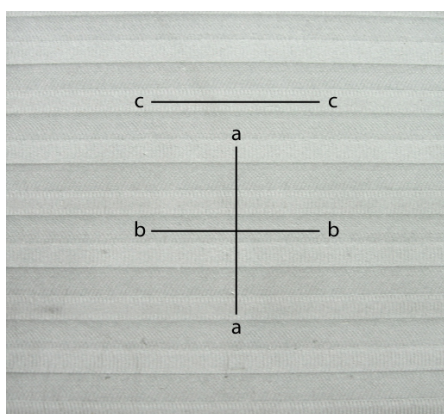
ภาพที่ 56 ชิ้นงานเหล็กที่ผ่านการกัด



ภาพที่ 57 เครื่องกัดซีเอ็นซีที่ใช้กัดผิวชิ้นงาน

2.3 ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิว (Surface roughness coefficient; SRC)

จากการกัดผิวชิ้นงานผู้วิจัยได้สังเกตเห็นว่าที่ผิวชิ้นงานมีรอยการกัดที่เป็นแถบที่แตกต่างกันสองลักษณะ จึงเลือกวัดความหยาบผิวทั้งหมด 3 แนว โดยที่ แนว a - a วัดตั้งฉากแนวการเดินของดอกกัด แนว b - b วัดตามแนวการเดินของดอกกัดบนแถบที่ไม่มีการเดินดอกชำร่วยเก่า และ แนว c - c วัดตามแนวการเดินของดอกกัดบนแถบที่มีการเดินดอกชำร่วยเก่า (ภาพที่ 58) โดยที่จุดตัดของแนว a - a, b - b และ c - c จะอยู่บนแนวการเดินของดอกกัดบนแถบที่ไม่มีการเดินดอกชำร่วยเก่าตรงกลางก้อนทดสอบ



ภาพที่ 58 แนวที่เลือกวัดความหยาบผิว



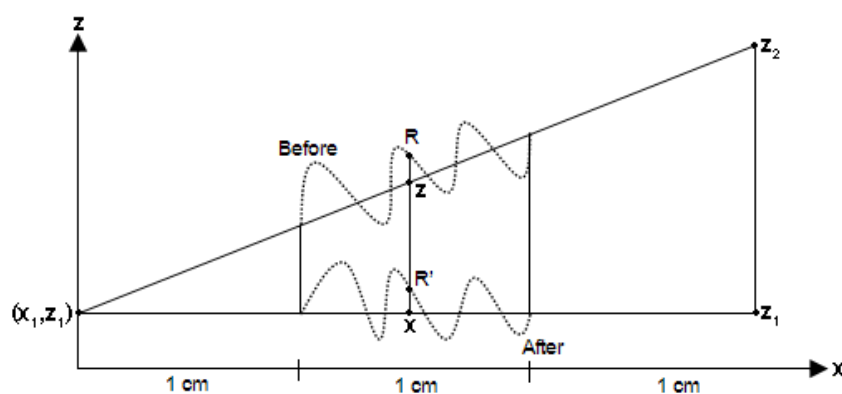
ภาพที่ 59 วิธีการวัดความหยาบผิว

ค่าความหยาบผิวที่ได้ในแต่ละแนวจะมีค่าความเอียงจากการวางชิ้นงานเพิ่มเข้ามาด้วย ทำให้ค่าความหยาบผิวที่ได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องทำการปรับกราฟให้โดยการวัดความชันของชิ้นงานก่อน โดยการวัดค่าระดับที่ตำแหน่งก่อนที่จะวัด 1 เซนติเมตร (z_1) และวัดค่าระดับที่ตำแหน่งหลังจากวัดแถบนั้นเสร็จ 1 เซนติเมตร (z_2) จากทฤษฎีสามเหลี่ยมคล้ายก็จะได้สมการดังต่อไปนี้

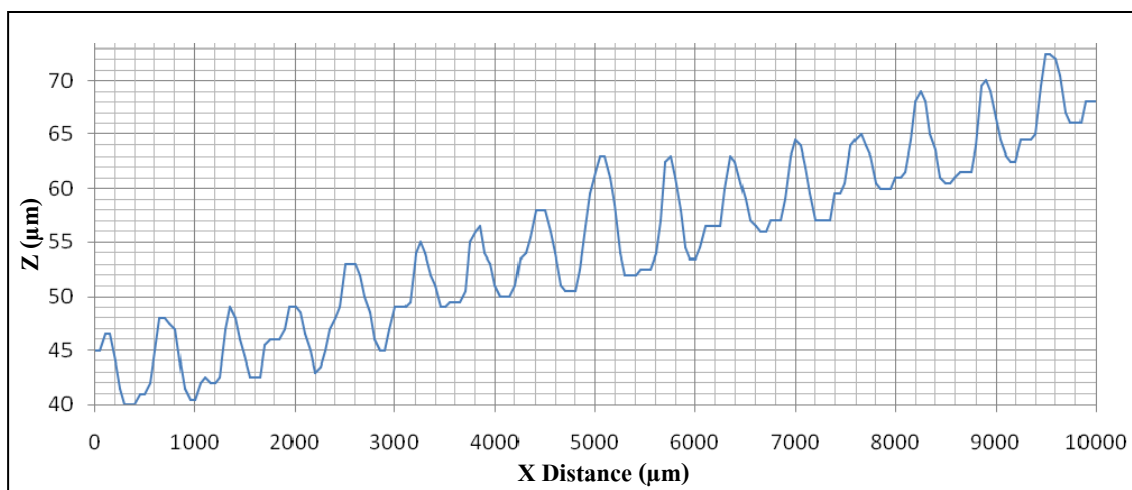
$$\frac{x}{z - z_1} = \frac{x_2}{z_2 - z_1} \quad (78)$$

จะได้

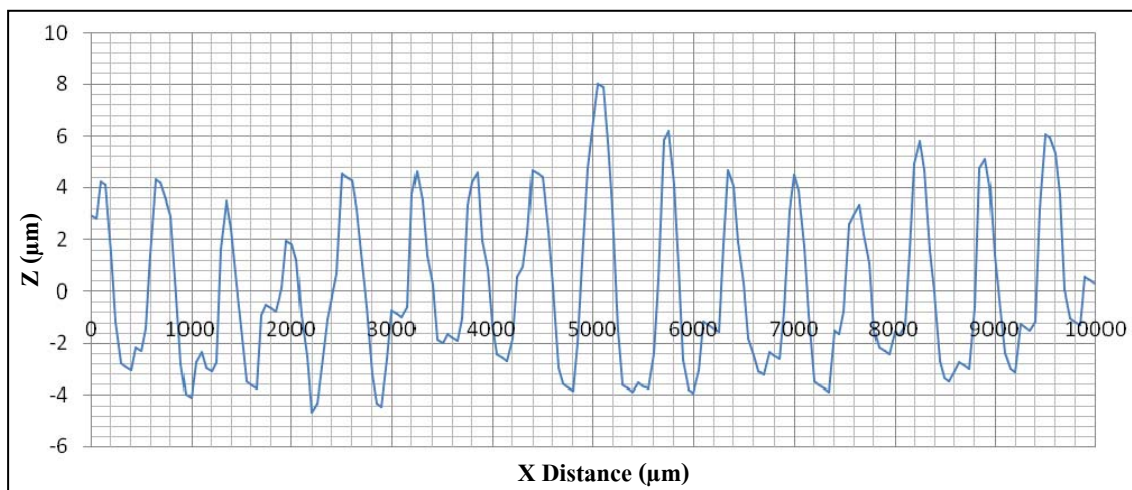
$$R' = R - (z - z_1) = R - \frac{x(z_2 - z_1)}{x_2} \quad (79)$$



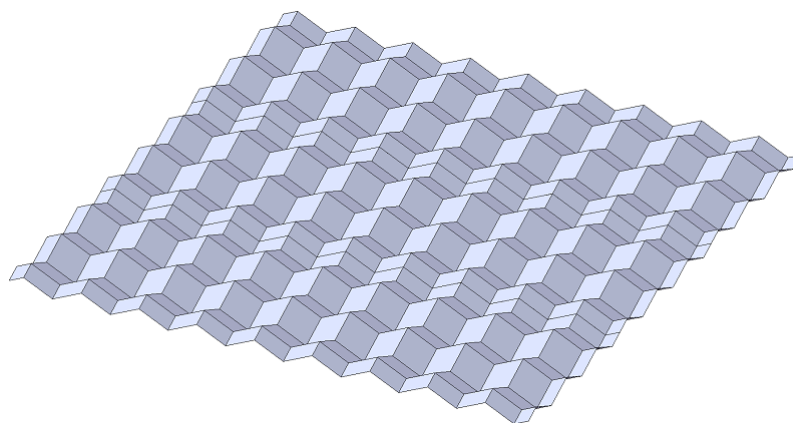
ภาพที่ 60 การปรับกราฟ



ภาพที่ 61 กราฟก่อนการปรับค่าความชัน



ภาพที่ 62 กราฟหลังการปรับค่าความชัน



ภาพที่ 63 พื้นผิวที่ได้จากการจำลอง

เมื่อได้เส้นกราฟในแต่ละแนวแล้ว นำไปจำลองพื้นผิวโดยใช้โปรแกรม Solidworks (ภาพที่ 63) วัดขนาดพื้นที่ผิวทั้งหมด แล้วนำมาเทียบผิวโดยใช้สมการที่ 22 เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิว (SRC) ได้ผลตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของชิ้นทดสอบ

Sample	Speed (rpm)	Feed (mm/min)	Surface roughness coefficient (SRC)		
			S _a	S _b	R
1	4,108	2,082	1.243	1.287	1.290
2	4,108	2,602	1.245	1.278	1.271
3	4,108	3,122	1.224	1.274	1.274
4	5,478	2,082	1.220	1.231	1.230
5	5,478	2,602	1.217	1.254	1.269
6	5,478	3,122	1.213	1.255	1.285
7	6,847	2,082	1.214	1.219	1.255
8	6,847	2,602	1.213	1.219	1.228
9	6,847	3,122	1.213	1.217	1.238
10	8,216	2,082	1.213	1.214	1.229
11	8,216	2,602	1.213	1.214	1.239
12	8,216	3,122	1.214	1.212	1.231
13	9,585	2,082	1.213	1.214	1.231
14	9,585	2,602	1.213	1.214	1.236
15	9,585	3,122	1.213	1.213	1.243
Average			1.219	1.234	1.250

จากตารางที่ 6 พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของดอกกัดให้มากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวจะมีค่าลดลง (เรียบมากขึ้น) เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของเหล็กชุด A, B และอิพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียมมาเปรียบเทียบกัน พบว่าอิพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียมมีค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวมากกว่าเหล็กชุด B กับ A ตามลำดับ เนื่องจากคุณสมบัติของเหล็กที่มีความมันวาว

ของผิวมากกว่าอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวเฉลี่ยระหว่างเหล็กชุด A กับ B พบว่าเหล็กชุด A มีค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวเฉลี่ยมากกว่าเหล็กชุด B

2.4 ผลการทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่างอากาศ

จากผลการทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่างอากาศทั้ง 4 กรณีได้ผลดังแสดงในตารางที่ 17 – 20 (ภาคผนวก ก) ซึ่งสามารถหาค่าเฉลี่ยของแต่ละกรณีได้ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ ($\Delta \bar{T}_{Gap}$)

Case	Code A	Code B	$\Delta \bar{T}_{Gap} (C^{\circ})$
1	S _a	S _b	21.4
2	S _a	S _b ’	22.2
3	S _a	R’	51.3
4	S _a	R	51.4

จากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่ผิวรอยต่อของหน้าสัมผัส ($\Delta \bar{T}_{Gap}$) ในตารางที่ 6 ผู้วิจัยแบ่งการวิเคราะห์ตามวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ การวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่ผิวรอยต่อของหน้าสัมผัสระหว่าง เหล็ก กับ เหล็ก และ เหล็ก กับ อิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ซึ่งวิเคราะห์ทั้งการวางให้แนวการเดินดอกกั๊ดให้ขนานและตั้งฉากกัน

พบว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่ผิวรอยต่อของหน้าสัมผัส ($\Delta \bar{T}_{Gap}$) ระหว่าง เหล็ก กับ เหล็ก โดยวางให้แนวการเดินดอกกั๊ดให้ขนานกัน (กรณีที่ 1) และการวางให้แนวการเดินดอกกั๊ดให้ตั้งฉากกัน (กรณีที่ 2) มีค่า $\Delta \bar{T}_{Gap}$ เท่ากับ 21.4 และ 22.2 C[°] ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า กรณี ที่ 1 จะมีค่า $\Delta \bar{T}_{Gap}$ น้อยกว่า กรณีที่ 2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการวางให้แนวดอกกั๊ดให้ขนานมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสมากกว่าการวางแบบตั้งฉากกันทำให้มีค่าอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสแตกต่างกันน้อยกว่า

และพบว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่ผิวรอยต่อของหน้าสัมผัส ($\Delta \bar{T}_{Gap}$) ระหว่าง เหล็ก กับ อิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม โดยวางให้แนวการเดินดอกกั๊ดให้ขนานกัน (กรณีที่ 3) และการวางให้แนวการเดินดอกกั๊ดให้ตั้งฉากกัน (กรณีที่ 4) มีค่า $\Delta \bar{T}_{Gap}$ เท่ากับ 51.3 และ 51.4 C[°]

ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า กรณีที่ 3 มีค่า $\Delta \bar{T}_{\text{Gap}}$ น้อยกว่า กรณีที่ 4 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการวางให้แนวดอกกัฒให้ขนานมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสมากกว่าการวางแบบตั้งฉากกันทำให้มีค่าอุณหภูมิที่ผิวสัมผัสแตกต่างกันน้อยกว่า

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่ผิวรอยต่อของหน้าสัมผัส ($\Delta \bar{T}_{\text{Gap}}$) ของการวางให้แนวการเดินดอกกัฒให้ขนานกัน ระหว่าง เหล็ก กับ เหล็ก (กรณีที่ 1) และ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม (กรณีที่ 3) พบว่ากรณีที่ 1 มีค่า $\Delta \bar{T}_{\text{Gap}}$ น้อยกว่า กรณีที่ 3 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอีพอกซีเรซินมีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่มากกว่าเหล็กทำให้มีค่า $\Delta \bar{T}_{\text{Gap}}$ มากกว่า

จากผลการทดลองในตารางที่ 16 - 19 (ภาคผนวก ก) สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของหน้าสัมผัส (h_c) ได้ดังตารางที่ 8

$$k_A A \frac{T_1 - T_{G2}}{\Delta x_A} = \frac{T_{G2} - T_{G3}}{1/h_c A} \quad (80)$$

$$h_c = \frac{k_A (T_1 - T_{G2})}{\Delta x_A (T_{G2} - T_{G3})} \quad (81)$$

โดยที่	h_c	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของหน้าสัมผัส ($\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$)
	k_A	=	ค่าสภาพการนำความร้อนของเหล็ก มีค่าเท่ากับ $49.8 \text{ W/m }^\circ\text{C}$)
	Δx_A	=	ความหนา มีค่าเท่ากับ 0.045 m
	T_1	=	อุณหภูมิที่จุด T_1 ($^\circ\text{C}$)
	T_{G2}	=	อุณหภูมิที่ผิวรอยต่อ T_{G2} ($^\circ\text{C}$)
	T_{G3}	=	อุณหภูมิที่ผิวรอยต่อ T_{G3} ($^\circ\text{C}$)

ตารางที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของน้ำสัมผัส ($\bar{h}_c$) ที่ได้จากการทดลอง

Case	Code A	Code B	Temperature (C°)				$\bar{h}_c$ (W/m ² °C)
			T ₁	T _{G2}	T _{G3}	T ₄	
1	S _a	S _b	76.3	71.2	49.8	47.8	263.74
2	S _a	S _b '	78.8	74.2	52	50.1	229.31
3	S _a	R'	90.3	87.7	36.3	31.7	55.98
4	S _a	R	89.9	87.4	36.1	31.8	53.93

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของน้ำสัมผัส ($\bar{h}_c$) ที่ได้จากการทดลองที่สภาวะมีแรงกด 40 kPa และตัวกลางระหว่างผิวสัมผัสเป็นอากาศ

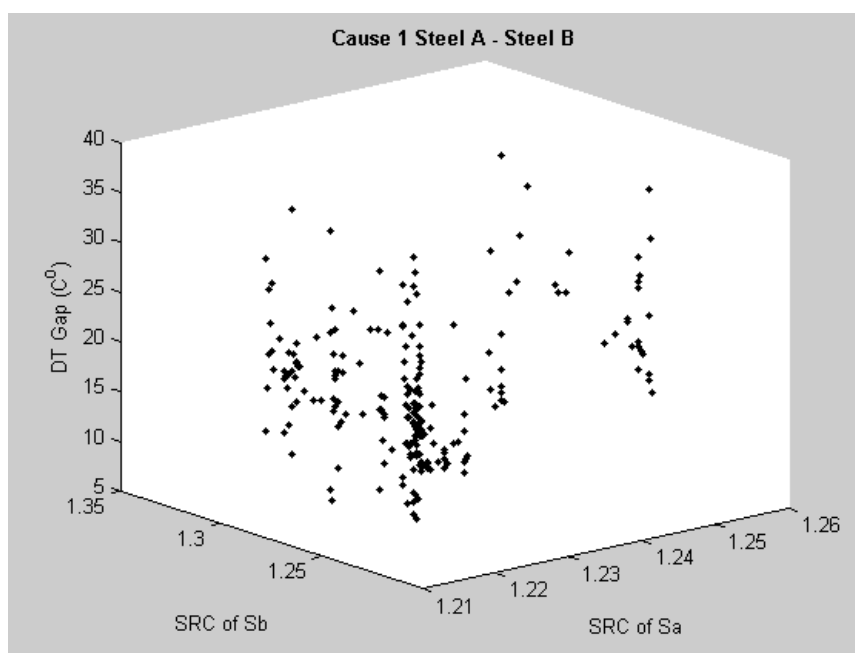
จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของน้ำสัมผัส ($\bar{h}_c$) ในตารางที่ 8 ผู้วิจัยแบ่งการวิเคราะห์ตามวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ คือ การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของน้ำสัมผัสระหว่าง เหล็ก กับ เหล็ก และ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม ซึ่งวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของน้ำสัมผัส ($\bar{h}_c$) ทั้งการวางให้แนวการเดินดอกกั๊ดให้ขนานและตั้งฉากกัน

พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของน้ำสัมผัส ($\bar{h}_c$) ระหว่างเหล็ก กับ เหล็ก ในการวางให้แนวการเดินดอกกั๊ดให้ขนานกัน (กรณีที่ 1) และการวางให้แนวการเดินดอกกั๊ดให้ตั้งฉากกัน (กรณีที่ 2) มีค่า $\bar{h}_c$ เท่ากับ 263.74 และ 229.31 W/m²°C ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากรณีที่ 1 มีค่า $\bar{h}_c$ มากกว่า กรณีที่ 2 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการวางให้แนวดอกกั๊ดให้ขนานกันสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการวางให้แนวดอกกั๊ดให้ตั้งฉากกัน

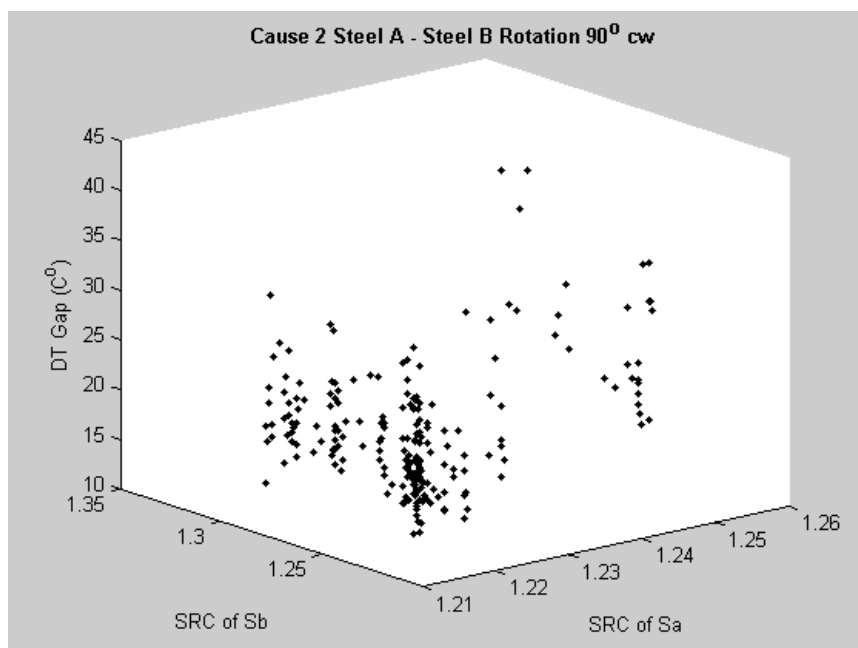
และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของน้ำสัมผัส ($\bar{h}_c$) ระหว่างเหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม ในการวางให้แนวการเดินดอกกั๊ดให้ขนานกัน (กรณีที่ 3) และการวางให้แนวการเดินดอกกั๊ดให้ตั้งฉากกัน (กรณีที่ 4) $\bar{h}_c$ เท่ากับ 55.98 และ 53.93 W/m²°C พบว่ากรณีที่ 3 จะมีค่า $\bar{h}_c$ มากกว่า กรณีที่ 4 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการวางให้แนวดอกกั๊ดให้ขนานกันสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าการวางให้แนวดอกกั๊ดให้ตั้งฉากกัน

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของหน้าสัมผัส ($\bar{h}_c$) ของการวางให้แนวการเดินดอกกัณฑ์ให้ขนานกัน ระหว่างเหล็ก กับ เหล็ก (กรณี ที่ 1) และ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม (กรณี ที่ 3) พบว่ากรณีที่ 1 มีค่า $\bar{h}_c$ น้อยกว่า กรณี ที่ 3 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอีพอกซีเรซินมีสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนที่มากกว่าเหล็กทำให้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อย มีผลมาจากการที่อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติการนำความร้อนที่น้อยกว่าเหล็ก

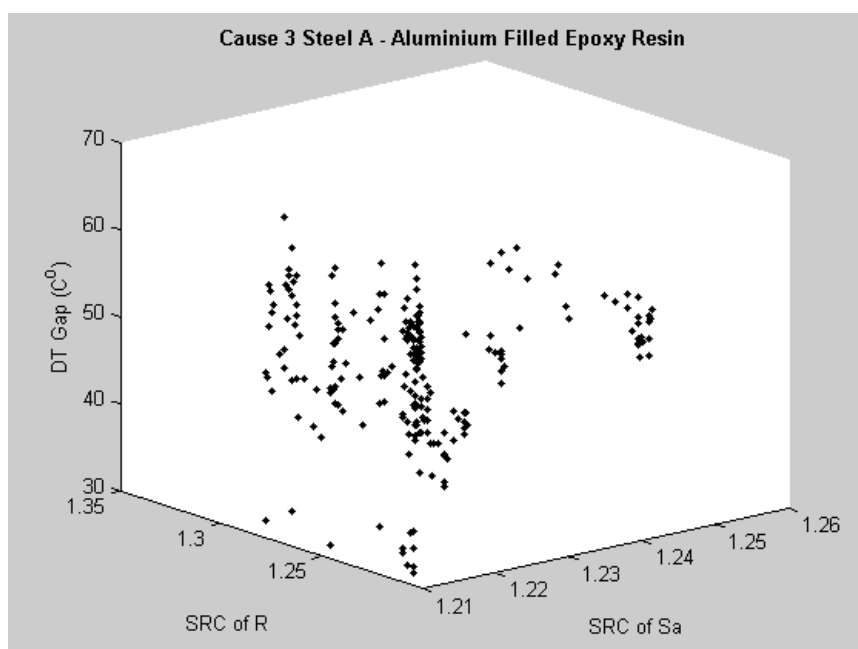
ผู้วิจัยได้นำผลการทดลองจากการทดลองที่ 4 ตารางที่ 17 - 20 (ภาคผนวก ก) มาเขียน กราฟสามมิติระหว่างอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) กับค่าสัมประสิทธิ์ความ หยาบผิวของทั้งสองหน้าสัมผัสที่สัมผัสกัน (SRC) (การทดลองที่ 3) พบว่ามีการกระจายตัวใกล้เคียง กันทุกกรณี



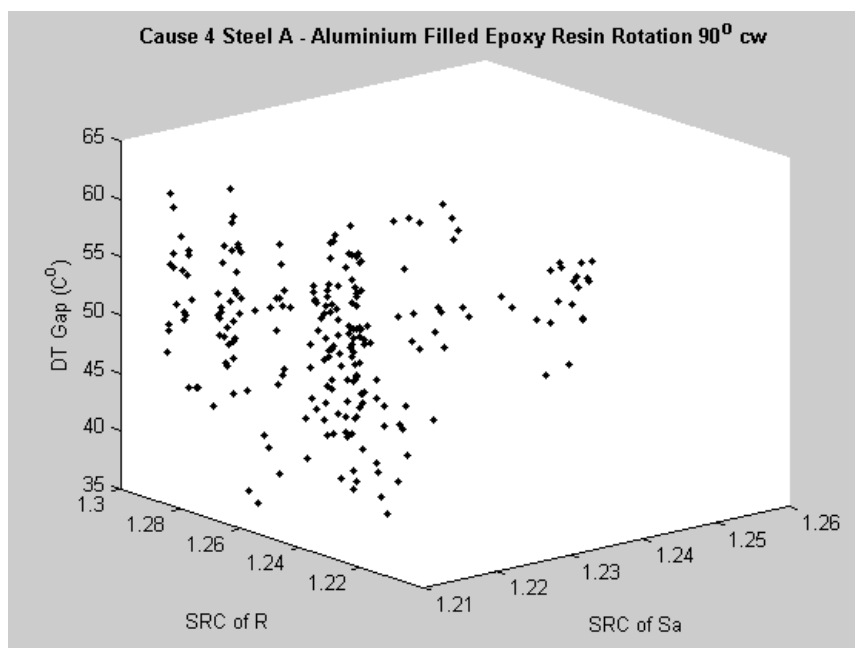
ภาพที่ 64 กราฟความสัมพันธ์ของความหยาบผิวของเหล็ก S_a และ เหล็ก S_b กับผลต่างของอุณหภูมิของผิวชิ้นงานทั้งสอง



ภาพที่ 65 กราฟความสัมพันธ์ของความหนาผิวของเหล็ก S_b โดยหมุนชิ้นงาน 90 องศา (ตามเข็มนาฬิกา) และ เหล็ก S_a กับผลต่างของอุณหภูมิของผิวชิ้นงานทั้งสอง



ภาพที่ 66 กราฟความสัมพันธ์ของความหนาผิวของอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม R และ เหล็ก S_a กับผลต่างของอุณหภูมิของผิวชิ้นงานทั้งสอง



ภาพที่ 67 กราฟความสัมพันธ์ของความหนาผิวของอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม R โดยหมุนชิ้นงาน 90 องศา (ตามเข็มนาฬิกา) และ เหล็ก S_a กับผลต่างของอุณหภูมิของผิวชิ้นงานทั้งสอง

ผู้วิจัยได้นำผลจากการทดลองมาวิเคราะห์ความถดถอยโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 15 เพื่อสร้างแบบจำลองการถดถอย (Regression model) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวของวัสดุทั้ง 2 ก่อน ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของทั้ง 4 กรณี ดังต่อไปนี้

- 1) กรณีที่ 1 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b$) โดยวางให้แนวการเดินดอกลัดให้ขนานกัน

เพื่อทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยแบบพหุคูณ พบว่าแบบจำลองการถดถอย มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้ทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ โดยแบบจำลองการถดถอย คือ $y = -239.62 + 180.06 S_a + 32.91 S_b$

จากแบบจำลองการถดถอยพบว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปร S_a มีค่ามากกว่า S_b มาก วิเคราะห์ได้ว่าความหนาแน่นของเหล็ก S_a จะมีอิทธิพลต่อค่า ΔT_{Gap} มากกว่า ความหนาแน่นของเหล็ก S_b

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ความถดถอยของแบบจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b$) โดยวางให้แนวการเดินคอกกักให้นานขึ้น ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap})

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F	P - value
Regression	2	957.24	478.62	18.11	0.000
Residual Error	222	5865.82	26.42		
Total	224	6823.06			
Predictor	Coefficient	Std. Error	t - value	P - value	
Constant	-238.62	43.28	-5.51	0.000	
S_a	180.06	32.99	5.46	0.000	
S_b	32.91	12.98	2.54	0.012	

2) กรณีที่ 2 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b$) โดยวางให้แนวการเดินคอกกักให้ตั้งฉากกัน

เพื่อทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยแบบพหุคูณ พบว่าแบบจำลองการถดถอยแบบจำลองการถดถอย มีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถใช้ทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้ โดยแบบจำลองการถดถอย คือ $y = -285.42 + 222.90 S_a + 29.11 S_b$

จากแบบจำลองการถดถอยพบว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปร S_a มีค่ามากกว่า S_b วิเคราะห์ได้ว่าความหนาแน่นของเหล็ก S_a จะมีอิทธิพลต่อค่า ΔT_{Gap} มากกว่าความหนาแน่นของเหล็ก S_b

ตารางที่ 10 การวิเคราะห์ความถดถอยของแบบจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b'$) โดยวางให้แนวการเดินทางดอกกั่วให้ตั้งฉากกัน ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap})

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F	P - value
Regression	2	1339.47	669.74	38.03	0.000
Residual Error	222	3909.77	17.61		
Total	224	5249.24			
Predictor	Coefficient	Std. Error	t - value	P - value	
Constant	-285.42	35.33	-8.08	0.000	
S_a	222.90	26.93	8.28	0.000	
S_b'	29.11	10.60	2.75	0.007	

3) กรณีที่ 3 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม ($S_a - R$) โดยวางให้แนวการเดินทางดอกกั่วให้ขนานกัน

เพื่อทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยแบบพหุคูณ พบว่าแบบจำลองการถดถอยมีค่า P-value มากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถใช้ทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์ความถดถอยของแบบจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม ($S_a - R$) โดยวางให้แนวการเดินทางดอกกั่วให้ขนานกัน ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap})

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F	P - value
Regression	2	27.71	13.85	0.28	0.755
Residual Error	222	10909.12	49.14		
Total	224	10936.83			
Predictor	Coefficient	Std. Error	t - value	P - value	
Constant	18.53	61.28	0.30	0.763	
S_a	32.14	44.98	0.71	0.476	
R	-5.07	21.91	-0.23	0.817	

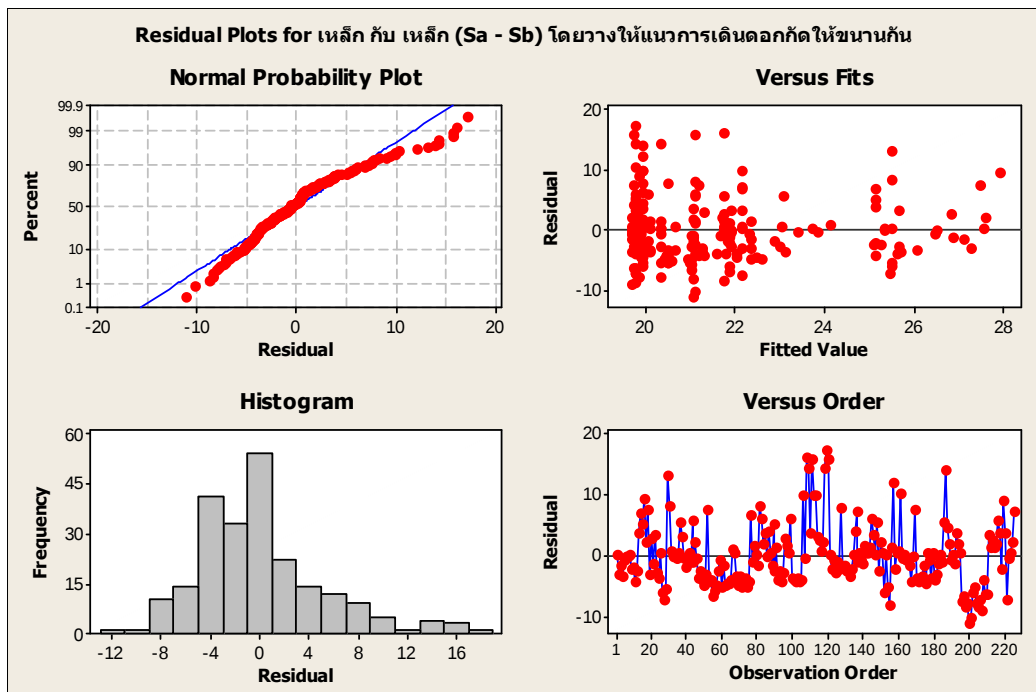
4) กรณีที่ 4 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R'$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกั้วให้ตั้งฉากกัน

เพื่อทดสอบความเหมาะสมของแบบจำลอง ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการถดถอยแบบพหุคูณ พบว่าแบบจำลองการถดถอยมีค่า P-value มากกว่า 0.05 แสดงว่าแบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถใช้ทำนายความสัมพันธ์ของตัวแปรได้

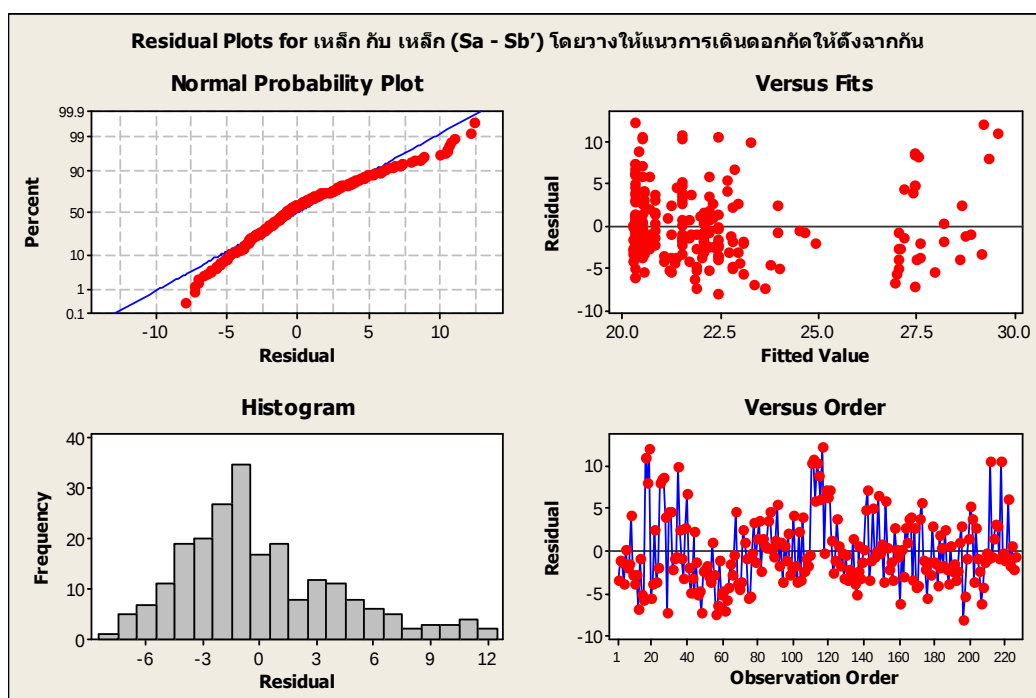
ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความถดถอยของแบบจำลอง เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาผิวของ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R'$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกั้วให้ตั้งฉากกัน ที่มีผลต่อค่าอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap})

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Squares	F	P - value
Regression	2	18.20	9.10	0.30	0.741
Residual Error	222	6737.90	30.35		
Total	224	6756.10			
Predictor	Coefficient	Std. Error	t - value	P - value	
Constant	82.72	48.16	1.84	0.067	
S_a	-24.76	35.35	-0.70	0.484	
R	-5.68	17.22	-0.33	0.742	

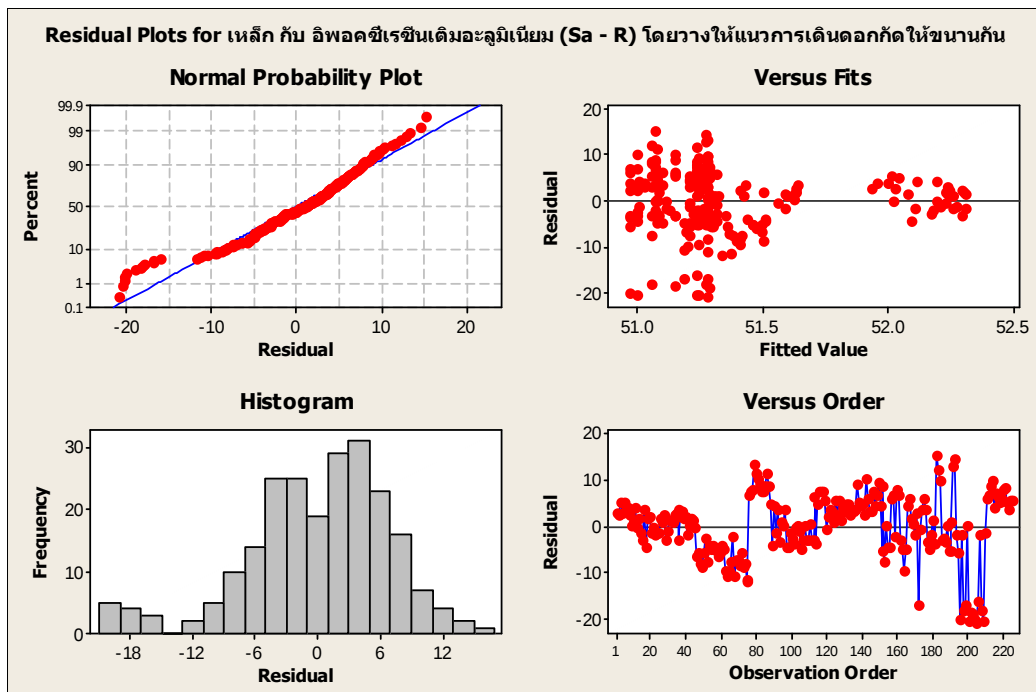
เพื่อทำการยืนยันความถูกต้องและเชื่อถือได้ของข้อมูลนั้นจะต้องนำข้อมูลที่ทดลองมาทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อสมมติ โดยการเขียนแผนภาพทดสอบการเป็นปกติของข้อมูล จากภาพที่ 68 - 71 พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองเป็นการกระจายแบบปกติ



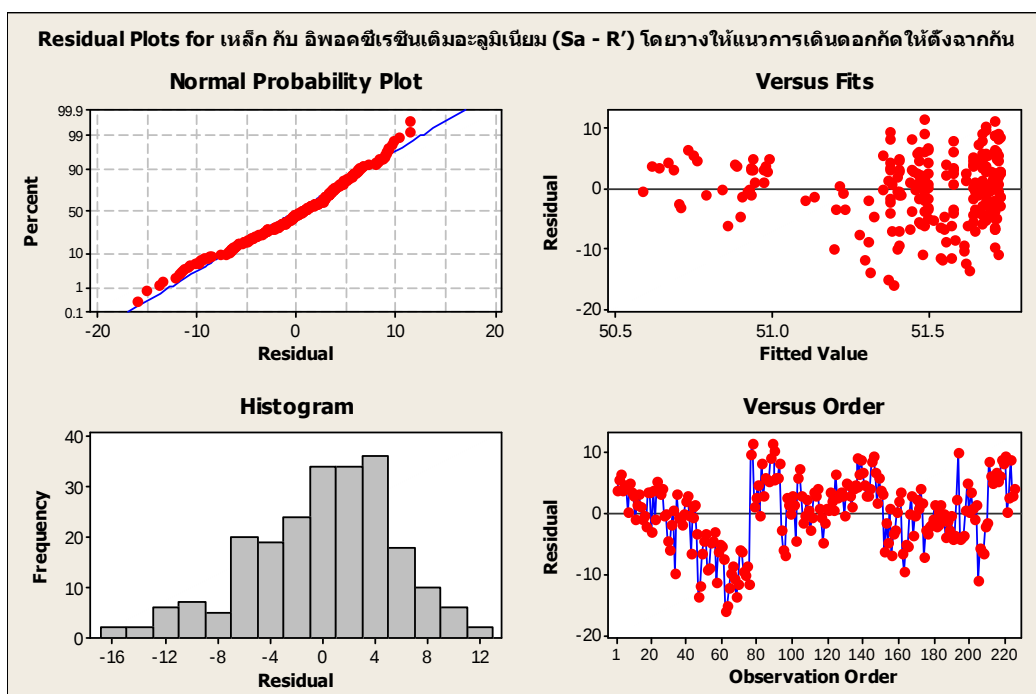
ภาพที่ 68 แผนภาพเพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของผลการทดลองครั้งที่ 1
เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b$) โดยวางให้แนวการเดินทางดอกกั่วให้ขนานกัน



ภาพที่ 69 แผนภาพเพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของผลการทดลองครั้งที่ 2
เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b'$) โดยวางให้แนวการเดินทางดอกกั่วให้ตั้งฉากกัน



ภาพที่ 70 แผนภาพเพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของผลการทดลองกรณีที่ 3 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเต็มอะลูมิเนียม ($S_a - R$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ขนานกัน



ภาพที่ 71 แผนภาพเพื่อทดสอบการแจกแจงแบบปกติของผลการทดลองกรณีที่ 4 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเต็มอะลูมิเนียม ($S_a - R'$) โดยวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ตั้งฉากกัน

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของการลดลงของอุณหภูมิที่รอยต่อช่องว่างอากาศระหว่างการวางให้แนวดอกกัศขานและตั้งฉากกันของเหล็ก กับ เหล็ก และ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม ซึ่งได้ทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเป็นคู่ๆ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ T-test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ได้แบ่งการวิเคราะห์ ดังนี้

1) การลดลงของอุณหภูมิที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัศขานกันของ เหล็ก กับ เหล็ก (กรณีที่ 1) กับ การลดลงของอุณหภูมิที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัศตั้งฉากกันของ เหล็ก กับ เหล็ก (กรณีที่ 2)

ตารางที่ 13 Paired T-test กรณีที่ 1 กับ กรณีที่ 2 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

	N	Mean	StDev	SE Mean
Case 1	225	21.45	5.52	0.37
Case 2	225	22.17	4.84	0.32
Difference	225	-0.716		

95% CI for mean difference: (-1.678, 0.245)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -1.46 P-Value = 0.144

จากตารางที่ 13 พบว่าค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัศขานกันของ เหล็ก กับ เหล็ก (กรณีที่ 1) ไม่มีความแตกต่างกับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัศตั้งฉากกันของ เหล็ก กับ เหล็ก (กรณีที่ 2)

2) การลดลงของอุณหภูมิที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัศขานกันของ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม (กรณีที่ 3) กับ การลดลงของอุณหภูมิที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัศตั้งฉากกันของ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม (กรณีที่ 4)

ตารางที่ 14 Paired T-test กรณีที่ 3 กับ กรณีที่ 4 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

	N	Mean	StDev	SE Mean
Case 3	225	51.36	6.99	0.47
Case 4	225	51.46	5.49	0.37
Difference	225	-0.106		

95% CI for mean difference: (-1.271, 1.058)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -0.18 P-Value = 0.858

จากตารางที่ 14 พบว่าค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัศขนานกันของเหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม (กรณีที่ 3) ไม่มีความแตกต่างกับค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัศตั้งฉากกันของ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม (กรณีที่ 4)

3) การลดลงของอุณหภูมิที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัศขนานกันของ เหล็ก กับ เหล็ก (กรณีที่ 1) กับ การลดลงของอุณหภูมิที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัศขนานกันของ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม (กรณีที่ 3)

ตารางที่ 15 Paired T-test กรณีที่ 1 กับ กรณีที่ 3 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

	N	Mean	StDev	SE Mean
Case 1	225	21.45	5.52	0.37
Case 3	225	51.36	6.99	0.47
Difference	225	-29.91		

95% CI for mean difference: (-31.074, -28.741)

T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -50.38 P-Value = 0.000

จากตารางที่ 15 พบว่าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัณฑ์กันของ เหล็ก กับ เหล็ก (กรณี ที่ 1) มีความแตกต่างกับ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัณฑ์กันของ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเต็มอะลูมิเนียม (กรณี ที่ 3)

4) การลดลงของอุณหภูมิที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัณฑ์กันของเหล็ก กับ เหล็ก (กรณี ที่ 2) กับ การลดลงของอุณหภูมิที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัณฑ์กันของเหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเต็มอะลูมิเนียม (กรณี ที่ 4)

ตารางที่ 16 Paired T-test กรณีที่ 2 กับ กรณีที่ 4 ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

	N	Mean	StDev	SE Mean
Case 2	225	22.17	4.84	0.32
Case 4	225	51.46	5.49	0.37
Difference	225	-29.29		
95% CI for mean difference: (-31.074, -28.741)				
T-Test of mean difference = 0 (vs not = 0): T-Value = -60.03 P-Value = 0.000				

จากตารางที่ 16 พบว่าค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัณฑ์กันของ เหล็ก กับ เหล็ก (กรณี ที่ 2) มีความแตกต่างกับ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการวางให้แนวดอกกัณฑ์กันของ เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเต็มอะลูมิเนียม (กรณี ที่ 4)

3. ผลการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการทำนายเวลาในการหล่อเย็น

จากการศึกษาแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อ็อกซีเรชั่นเดิมอะลูมิเนียม พบว่าเวลาในการหล่อเย็นสามารถหาได้โดยการกลับข้างสมการที่ 77 ได้ดังนี้

$$\frac{m(h_i - h_b)}{t_{z_1}} + \frac{m(h_b - h_c)}{t_{z_2}} + mL = \frac{T_1 - T_5}{\frac{x_r}{k_r A} + \frac{1}{h_c A} + \frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}}} + \frac{T_1 - T_5}{\frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}}} \quad (82)$$

โดยที่เวลาในการหล่อเย็นทั้งวงจร (t_z) หาได้จากการนำระยะเวลาดังแต่นีดพลาสติกเข้าไปในแม่พิมพ์จนพลาสติกแข็งตัวแข็งตัว (t_{z1}) รวมกับระยะเวลาดังแต่นีดพลาสติกแข็งตัวจนถึงเวลาที่ปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ (t_{z2})

$$t_z = t_{z1} + t_{z2} \quad (83)$$

วิจารณ์

ในกระบวนการหล่อขึ้นทศอบอ็อกซีเรชั่นเดิมอะลูมิเนียมโดยใช้เครื่องหล่อสูญญากาศ หลังจากทิ้งขึ้นทศอบให้แข็งตัวแล้วแกะแม่แบบอลูมิเนียมออกจะพบว่าขึ้นทศอบอ็อกซีเรชั่นเดิมอะลูมิเนียมบางก้อนจะมีโพรงอากาศเกิดขึ้นตรงบริเวณผิวด้านบนและที่มุมของชิ้นงาน ซึ่งเกิดมาจากการไล่อากาศออกจากส่วนผสมไม่หมด ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจจะเกิดมาจากระยะเวลาในการไล่อากาศออกที่ไม่เพียงพอซึ่งผู้วิจัยไม่ได้ศึกษาถึงประเด็นนี้ ดังนั้นจึงแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นโดยการทำแม่แบบหล่อขึ้นงานให้ใหญ่กว่าขนาดขึ้นทศอบที่ต้องการด้านละ 5 มิลลิเมตร แล้วจึงนำชิ้นงานไปกัดให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ทำให้ต้องใช้วัสดุในการหล่อขึ้นงานมากกว่าที่จำเป็นต้องใช้

ในกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานโดยใช้เครื่องกัดซีเอ็นซีในการสร้างความหยาบผิวบนชิ้นงาน เนื่องจากอ็อกซีเรชั่นเดิมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุเชิงประกอบซึ่งยังไม่มีมีการวิจัยถึงเงื่อนไขการกัดที่เหมาะสม ผู้วิจัยจึงเลือกใช้เงื่อนไขการกัดเดียวกันกับเหล็ก S50C ที่ทางบริษัทได้บอกเงื่อนไขการกัดไว้แล้ว และยังง่ายต่อการนำไปเปรียบเทียบกัน

ในกระบวนการหาค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิว จากผลการหาค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของเหล็กชุด A, B และอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวเฉลี่ยของเหล็กชุด A และ B มาเปรียบเทียบกัน จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของเหล็กชุด A จะ มีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของเหล็กชุด B ซึ่งเป็นผลมาจากที่ผู้วิจัยได้ทำการกัดชิ้นงานเหล็กชุด A ก่อนแล้วจึงกัดเหล็กชุด B จึงอาจทำให้ดอกกัดมีการสึกหรอจากการกัดเหล็กชุด A ทำให้ผิวของเหล็กชุด A มีความเรียบมากกว่าเหล็กชุด B

ในกระบวนการทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่างอากาศ ทำการทดลองโดยการวางชิ้นทดสอบให้สัมผัสกันแล้วให้ความร้อนผ่านวัตถุอุณหภูมิที่ลดลงที่ผิวรอยต่อ ผลการวิเคราะห์มีดังนี้การวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ขนานกันสัมผัสกันจะมีค่าอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศน้อยกว่าการวางให้แนวการเดินดอกกัดให้ตั้งฉากกัน สามารถวิเคราะห์ได้ว่าการวางให้แนวดอกกัดให้ขนานมีพื้นที่ผิวในการสัมผัสมากกว่าการวางแบบตั้งฉากกันจึงเป็นผลให้สามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ (ΔT_{Gap}) ของการถ่ายโอนความร้อนระหว่างวัสดุเหล็ก กับ เหล็ก และ เหล็ก กับ อิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม พบว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศของเหล็ก กับ เหล็กจะมีค่าน้อยกว่าเหล็ก กับ อิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม เนื่องจากวัสดุอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติในการนำความร้อนที่น้อยกว่าเหล็กจึงเป็นข้อด้อยอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม

ถึงแม้ว่าอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมมีข้อด้อยอยู่ที่คุณสมบัติการนำความร้อนที่น้อย แต่ก็มีข้อเด่นอยู่ที่กระบวนการขึ้นรูปที่ง่าย รวดเร็ว และไม่ใช้เครื่องมือที่ซับซ้อนมากนัก จึงนิยมนำมาผลิตเป็นอินเสิร์ต (insert) สำหรับแม่พิมพ์ทำให้เทคนิคนี้เหมาะสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่ไม่เน้นการผลิตในจำนวนมากนัก และพลาสติกที่ใช้ต้องมีอุณหภูมิการหลอมเหลวไม่สูงมาก

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากการศึกษาการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อ็อกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม พบว่า ผิวสัมผัสระหว่างอินเสิร์ตกับโครงสร้างแม่พิมพ์ (mould base) นั้นจะเกิดสภาพฉนวนความร้อน เนื่องจากช่องว่างระหว่างผิวสัมผัสทั้งสอง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาของผิวสัมผัสทั้งสองผิวที่มีผลต่อความเป็นฉนวนความร้อนในแม่พิมพ์

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของความหนาของผิวสัมผัสทั้งสองผิวที่มีผลต่อความเป็นฉนวนความร้อนในแม่พิมพ์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาผิวระหว่างผิวสัมผัสของขึ้นทดสอบอ็อกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม ไม่มีผลต่อการเป็นฉนวนความร้อนของแม่พิมพ์ จึงได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างหน้าสัมผัสของขึ้นทดสอบโดยวางให้แนวการเดินดอกกักขานกัน และตั้งฉากกันสัมผัสกัน พบว่าการวางทั้งสองแบบไม่มีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิที่ผิวรอยต่อ

จากการศึกษาแบบจำลองการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์อ็อกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียม พบว่าเวลาในการหล่อเย็น (t_2) สามารถหาได้จาก

$$\frac{m(h_i - h_b)}{t_{z_1}} + \frac{m(h_b - h_c)}{t_{z_2}} + mL = \frac{T_1 - T_5}{\frac{x_r}{k_r A} + \frac{1}{h_c A} + \frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}}} + \frac{T_1 - T_5}{\frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi d_c l h_{cl}}}$$

ข้อเสนอแนะ

1. เพื่อเป็นการแสดงความถูกต้องของสมการการหล่อเย็นที่ได้ ควรสร้างแม่พิมพ์อ็อกซีเรซินเดิมอะลูมิเนียมของขึ้นอินเสิร์ตแล้วนำไปฉีดพลาสติก
2. ควรทำการศึกษาและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองครั้งนี้โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้เกิดความถูกต้องเพิ่มขึ้น

3. ควรมีการศึกษาถึงเงื่อนไขการกีดกันของวัสดุอุปกรณ์ที่เรซินเติมอะลูมิเนียม เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดความหยาบผิวมีความถูกต้องมากขึ้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชาติ ทรากาลกุล. 2539ก. ออกแบบแม่พิมพ์ฉีด 1. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

ชาติ ทรากาลกุล. 2542ข. เทคโนโลยีซีเอ็นซี. ครั้งที่ 7. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

ซัชพล ชังชู และ ภรภัทร วรินทร์ไพ. 2549. การสร้างแม่พิมพ์ด้วยอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม สำหรับการฉีดพลาสติก, ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20. จังหวัดนครราชสีมา.

จิตติพร เพชรอุดม และ จันทราวรรณ พุ่มชูศักดิ์. 2549. การเตรียมพอลิคาร์บอเนตคอมโพสิตที่นำไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นไบโพลาร์เพลตในเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเอ็ล, ใน การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32. สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

บรรยงค์ จงไทยรุ่งเรือง. 2537. การศึกษาความสัมพันธ์ของส่วนโค้งปลายมีด ความลึกในการตัด และอัตราการเดินมีดที่มีผลต่อความเรียบผิว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์, กรุงเทพฯ.

พสุ โลหารชุน, เจริญ วัฒนหนู, ไพบุลย์ แจ่มเสนาะ, วิวัฒน์ ตันติขจรโกศล และ อมรวิวัฒน์ พรหมเคน. 2534. เทคโนโลยีแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและการออกแบบเชิงวิเคราะห์. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ, หจก.ภาพพิมพ์, กรุงเทพฯ.

ภรภัทร วรินทร์ไพ. 2549. มาสเตอร์โมเดลสำหรับแม่พิมพ์ประเภทอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

มนตรี พิรุณเกษตร. 2541. **การถ่ายเทความร้อน**. สำนักพิมพ์วิทย์พัฒน์, กรุงเทพฯ.

วิวัฒน์ ดันติขจรโกศล และ ชัยรัตน์ แก้วด้วง. 2538. **แม่พิมพ์ฉีดพลาสติก**. สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ, กรุงเทพฯ.

วิโรจน์ เตชะวิญญธรรม. 2540. **งานฉีดพลาสติก**. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

วชิระ มีทอง. 2523. **วิศวกรรมการวัดละเอียด**. ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

สุนิติ เกิดหนูนวงศ์, อัญชนา วงษ์โต และ ชัชพล ชังชู. 2550. ผลกระทบของรูปทรงและขนาดของผงอะลูมิเนียมต่อความแข็งแรงของวัสดุประเภทอีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม, ใน การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21. จังหวัดชลบุรี.

สุนิติ เกิดหนูนวงศ์, ชัชพล ชังชู และ ศุภฤกษ์ ศิริเวทิน. 2551. การพัฒนาแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์สำหรับวัสดุประเภทอีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมภายใต้การเค้น, ใน การประชุมทางวิชาการเทคโนโลยีการขึ้นรูปวัสดุ ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร.

อำนาจ ทองแสน. 2544. **ทฤษฎีและการเขียนโปรแกรม cnc สำหรับการควบคุมเครื่องจักรด้วยคอมพิวเตอร์**. ซีเอ็ดดูเคชั่น, กรุงเทพฯ.

เอนก ภู่อานงค์, บุญยวรรณ อาริยธรรม, กิตตินันท์ อ้นนันทน์, จิรเดช นาคเงินทอง และ เจนวิทย์ โสภารัตน์. 2550. กระบวนการทำแม่พิมพ์รวดเร็วด้วยอีพ็อกซีเรซินสำหรับงานฉีดพลาสติก, น. 420-429. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 45. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Nazareth da Silva, A.L., S.C.S. Teixeira, A.C.C. Widal and F.M.B. Coutinho. 2001. Mechanical properties of polymer composites based on commercial epoxy vinyl ester resin and glass fiber. **Polymer Testing** (20): 895-899(5).

Bendada, A. Derdouri, M. Lamontagne, Y. Simard. “Analysis of thermal contact resistance between polymer and mold in injection molding”, **Applied Thermal Engineering**, 2004, Vol.24, pp.2029–2040.

Bangkok Special Steel. 2007. **Carbon Steel**. Product. Available Source: http://www.bssteel.co.th/product_en.html, September 13, 2007.

David A. Stephenson and John S. Agapiou. 1997. **Metal cutting theory and practice**. 1 ed. MARCEL DEKKER INC, United States of America.

Engineers Handbook. 2006. **Composite Tooling (Epoxy Tooling)**. Rapid Tooling Techniques. Available Source: <http://www.engineershandbook.com/RapidPrototyping/compositetooling.htm>, September 6, 2007.

Holman JP. 2002. **Heat transfer**. 9 ed. McGraw-Hill, Singapore.

Unal, M. Yaka and F. Yıldız. 2004. DISCONTINUITY SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT TECHNIQUES AND THE EVALUATION OF DIGITAL PHOTOGRAMMETRIC METHOD, *In Geo-Imagery Bridging Continents* 20. ed. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing :ISPRS, Istanbul Turkey.

MCP Group. 2007. **MCP EP Tooling Resins**. Available Source: <http://www.mcp-group.de>, November 25, 2007.

Natti S. Rao and Gunter Schumacher. 2004. **Design formulas for plastics engineers**. 2 ed. Hanser Publishers, Munich.

Ress, Herbert. 1995. **Mold Engineering**. Hanser Publishers, Munich.

S.M.H. Mirbagheri, M. Shrinparvar, A. Chirazi. "Modeling of metal-static pressure on the metal–mould interface thermal resistance in the casting process", **Materials and Design**, 2006, Vol.28, pp.2106-2112.

Syed M.S. Wahid, C.V. Madhusudana. "Gap conductance in contact heat transfer", **Journal of Heat and Mass Transfer**, 2000, Vol.43, pp.4483-4487.

The Hong Kong Polytechnic University. 2000. **Metal filled Epoxy Tooling Technology**.
Available Source: http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk/content/epoxy_tool_introduction.htm,
September 3, 2007.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่างอากาศ

ตารางผนวกที่ ก1 ผลการทดสอบกรณีที่ 1 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b$) โดยวางให้แนวการเดินคอกกัก
ให้ขนานกัน

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
1	S _a 1	S _b 1	160.2	76.6	74.6	46.4	45.6	27.8	1.243	1.287
2	S _a 1	S _b 2	165	75.4	72.6	47.8	46.2	24.2	1.243	1.278
3	S _a 1	S _b 3	152.4	81.2	78.6	52.4	50.8	25.6	1.243	1.274
4	S _a 1	S _b 4	169	81.2	70.8	47	46.4	22.2	1.243	1.231
5	S _a 1	S _b 5	166	72.4	73.2	47.4	46.4	25.8	1.243	1.254
6	S _a 1	S _b 6	167.8	75.6	72.6	45.6	44.8	26.5	1.243	1.255
7	S _a 1	S _b 7	166.8	74.6	72.4	46.6	44.4	25.2	1.243	1.219
8	S _a 1	S _b 8	157.2	77.4	76.6	50.8	49.2	25.5	1.243	1.219
9	S _a 1	S _b 9	163.4	75.6	72.4	48.8	47	22.9	1.243	1.217
10	S _a 1	S _b 10	161.8	74.2	70.8	47	45.2	23.1	1.243	1.214
11	S _a 1	S _b 11	164.2	75.6	71.8	50	47	20.8	1.243	1.214
12	S _a 1	S _b 12	164.2	76.4	72.8	49.4	48.4	22.7	1.243	1.212
13	S _a 1	S _b 13	163	82.6	77.4	47.6	46.2	28.9	1.243	1.214
14	S _a 1	S _b 14	163.4	80.4	77.2	44.6	43.4	32	1.243	1.214
15	S _a 1	S _b 15	163.8	82.6	78.4	47.2	45.2	30.3	1.243	1.213
16	S _a 2	S _b 1	162	84.2	78.6	40.4	39.4	37.3	1.245	1.287
17	S _a 2	S _b 2	158.4	81.4	77.2	46.8	45.8	29.7	1.245	1.278
18	S _a 2	S _b 3	162.8	78	78.6	43.6	42.8	35	1.245	1.274
19	S _a 2	S _b 4	161.6	78.6	73.4	49.6	48.8	22.9	1.245	1.231
20	S _a 2	S _b 5	163	81.2	77.2	46.8	45.4	29.6	1.245	1.254
21	S _a 2	S _b 6	160.6	77.6	72.6	46.2	45.2	25.5	1.245	1.255
22	S _a 2	S _b 7	161.4	85.6	78.4	48.2	46.8	29	1.245	1.219
23	S _a 2	S _b 8	163.4	75.8	72.6	49	47.4	22.9	1.245	1.219
24	S _a 2	S _b 9	164.6	77.2	71.4	48.4	45.8	21.8	1.245	1.217
25	S _a 2	S _b 10	161.6	80.2	74.6	47.6	45.2	25.9	1.245	1.214
26	S _a 2	S _b 11	160.4	76.4	69.8	49	46.4	19.5	1.245	1.214
27	S _a 2	S _b 12	163.4	78.6	71.4	51.8	49.6	18.3	1.245	1.212
28	S _a 2	S _b 13	161.6	80.4	69.4	47.6	46.4	20.1	1.245	1.214
29	S _a 2	S _b 14	163.6	81.6	81.4	42.6	41.8	38.7	1.245	1.214

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
30	S _a 2	S _b 15	160.6	87.2	78.4	43.2	41.4	33.7	1.245	1.213
31	S _a 3	S _b 1	160.2	80.8	76.4	50.6	48.8	24.9	1.224	1.287
32	S _a 3	S _b 2	161.8	80.4	76.2	51.6	48.8	23.6	1.224	1.278
33	S _a 3	S _b 3	158.8	79.6	76.4	51.8	49.8	23.9	1.224	1.274
34	S _a 3	S _b 4	168	74.8	70.8	48.4	47.6	21.7	1.224	1.231
35	S _a 3	S _b 5	160.6	77.8	75.2	51.2	50.2	23.5	1.224	1.254
36	S _a 3	S _b 6	161	81.2	76.8	47.4	46.6	28.7	1.224	1.255
37	S _a 3	S _b 7	158.4	79.4	75.6	49.6	47.2	25.1	1.224	1.219
38	S _a 3	S _b 8	159.4	79.4	74.6	52.2	50.6	21.5	1.224	1.219
39	S _a 3	S _b 9	159.8	82.4	74.6	53.2	50.6	19.9	1.224	1.217
40	S _a 3	S _b 10	160.8	77.4	72.4	49.8	47.2	21.5	1.224	1.214
41	S _a 3	S _b 11	161.2	76.8	74.4	51.6	49.4	22.1	1.224	1.214
42	S _a 3	S _b 12	162.2	77.6	72.6	51	49.6	20.7	1.224	1.212
43	S _a 3	S _b 13	164.6	77.6	74.4	46.4	45.2	27.4	1.224	1.214
44	S _a 3	S _b 14	161.2	77.4	74.2	52.8	50.8	20.7	1.224	1.214
45	S _a 3	S _b 15	162.2	80.2	75.2	50.4	49	23.9	1.224	1.213
46	S _a 4	S _b 1	171.2	73.4	69.2	45.2	42.8	23.1	1.220	1.287
47	S _a 4	S _b 2	170.6	72.4	68.8	48.6	47.2	19.5	1.220	1.278
48	S _a 4	S _b 3	170.6	70.2	66.6	45.4	43.4	20.4	1.220	1.274
49	S _a 4	S _b 4	167.2	71.2	67.6	49.4	48.6	17.6	1.220	1.231
50	S _a 4	S _b 5	173	71.2	66.2	47.8	46.6	17.5	1.220	1.254
51	S _a 4	S _b 6	172.4	69.8	66.6	46.8	46.4	19.3	1.220	1.255
52	S _a 4	S _b 7	172.4	73.8	71.4	42.2	41	28.7	1.220	1.219
53	S _a 4	S _b 8	171.6	69.6	65.4	47.8	47	16.9	1.220	1.219
54	S _a 4	S _b 9	169.8	70.4	65.2	47.2	45.8	17.1	1.220	1.217
55	S _a 4	S _b 10	175	70.8	65.6	50.2	47.8	14.3	1.220	1.214
56	S _a 4	S _b 11	173.4	69.8	63.8	47.4	45.4	15.3	1.220	1.214
57	S _a 4	S _b 12	169.2	69.8	66	49.2	47.4	16	1.220	1.212
58	S _a 4	S _b 13	170.2	69.2	65.8	46.8	46	18.4	1.220	1.214
59	S _a 4	S _b 14	171.6	72.6	68.8	47.8	46.2	20.2	1.220	1.214

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
60	S _a 4	S _b 15	172.2	69.4	65.6	49	46.8	15.7	1.220	1.213
61	S _a 5	S _b 1	175.8	70.6	66	44	42.6	21.1	1.217	1.287
62	S _a 5	S _b 2	176.2	69.8	63.8	45.2	44.6	17.7	1.217	1.278
63	S _a 5	S _b 3	177.8	68.2	64.6	46	45.2	18	1.217	1.274
64	S _a 5	S _b 4	173.6	69.6	63.2	45.8	44.4	16.3	1.217	1.231
65	S _a 5	S _b 5	173	69.2	65.8	47.2	45.8	17.9	1.217	1.254
66	S _a 5	S _b 6	173.6	67.4	65.8	42.6	41.8	22.9	1.217	1.255
67	S _a 5	S _b 7	173.8	70.4	67.6	45.6	42.8	21.2	1.217	1.219
68	S _a 5	S _b 8	168	69.4	66.6	48.8	47.8	17.3	1.217	1.219
69	S _a 5	S _b 9	175.4	65.6	62.2	46	45.4	15.6	1.217	1.217
70	S _a 5	S _b 10	176.4	66.4	63.4	45.6	43.8	17.1	1.217	1.214
71	S _a 5	S _b 11	175.6	67.4	62.8	46.6	44.2	15.2	1.217	1.214
72	S _a 5	S _b 12	175	70.6	65.2	48.6	47.6	15.7	1.217	1.212
73	S _a 5	S _b 13	174.6	68	63.8	46.2	44.2	16.7	1.217	1.214
74	S _a 5	S _b 14	176.8	66.8	62.6	46.6	45.2	15.2	1.217	1.214
75	S _a 5	S _b 15	174.6	66.4	62.8	46	45.2	16.2	1.217	1.213
76	S _a 6	S _b 1	154.8	83.8	79.2	49.4	47.6	28.9	1.213	1.287
77	S _a 6	S _b 2	156.2	83.2	75.8	53.4	50.4	20.9	1.213	1.278
78	S _a 6	S _b 3	157.8	83.4	79.2	55	52.6	23.3	1.213	1.274
79	S _a 6	S _b 4	156	82.6	76.8	55.2	53.4	20.5	1.213	1.231
80	S _a 6	S _b 5	153.2	82.2	77.6	57.4	55.8	19.3	1.213	1.254
81	S _a 6	S _b 6	152.6	86.8	81.6	51.6	50.2	29.1	1.213	1.255
82	S _a 6	S _b 7	156.8	83.8	77.8	50.6	48.8	26.1	1.213	1.219
83	S _a 6	S _b 8	162.2	80.8	75.2	52.6	51.8	21.7	1.213	1.219
84	S _a 6	S _b 9	157.4	80.6	79.4	55.4	52.8	23.5	1.213	1.217
85	S _a 6	S _b 10	148.6	82.2	78.8	58.2	55	19.7	1.213	1.214
86	S _a 6	S _b 11	155.8	85.6	78.6	53.6	51.2	23.7	1.213	1.214
87	S _a 6	S _b 12	156.8	80.6	74.6	53.4	52	20.1	1.213	1.212
88	S _a 6	S _b 13	156.4	81	74.6	55.2	52.6	18.1	1.213	1.214
89	S _a 6	S _b 14	155	82.2	77.4	51.8	51.2	24.8	1.213	1.214

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
90	S _a 6	S _b 15	155.6	82.4	73.4	54.6	52	17.1	1.213	1.213
91	S _a 7	S _b 1	171	72.6	69.2	44.8	43.6	23.7	1.214	1.287
92	S _a 7	S _b 2	171	70.2	66.4	47.8	47.2	18	1.214	1.278
93	S _a 7	S _b 3	174.2	70.8	66.8	46.6	44.2	19.3	1.214	1.274
94	S _a 7	S _b 4	169.6	73.2	68.2	50.8	48.2	16.3	1.214	1.231
95	S _a 7	S _b 5	168.2	74.6	71.2	52.2	50.4	18.3	1.214	1.254
96	S _a 7	S _b 6	171.8	72.8	72.2	47.8	46.6	24.1	1.214	1.255
97	S _a 7	S _b 7	159.2	73.4	72.2	50	47.4	21.7	1.214	1.219
98	S _a 7	S _b 8	167.8	71	68.6	47.8	47.2	20.4	1.214	1.219
99	S _a 7	S _b 9	166.4	74.8	72.4	45.6	42.2	26	1.214	1.217
100	S _a 7	S _b 10	171.8	70.8	66.8	49.8	47.4	16.1	1.214	1.214
101	S _a 7	S _b 11	171.2	68.2	65.4	48.8	47.6	16	1.214	1.214
102	S _a 7	S _b 12	172.2	70.6	64.8	48.2	46	15.5	1.214	1.212
103	S _a 7	S _b 13	171.8	71.4	66.8	49.8	48.8	16.2	1.214	1.214
104	S _a 7	S _b 14	170.4	70.6	64.4	47.6	45.6	15.6	1.214	1.214
105	S _a 7	S _b 15	169.4	70.4	65.4	48.6	46.6	15.8	1.214	1.213
106	S _a 8	S _b 1	156.4	85	80	47	45.6	32.1	1.213	1.287
107	S _a 8	S _b 2	158.8	78.2	74.2	52	49.6	21.3	1.213	1.278
108	S _a 8	S _b 3	157.4	86.8	83.8	45.4	44.2	37.8	1.213	1.274
109	S _a 8	S _b 4	160.2	85.4	80.6	45.2	44.2	34.6	1.213	1.231
110	S _a 8	S _b 5	157.6	83.4	80.4	55	53.2	24.7	1.213	1.254
111	S _a 8	S _b 6	158	89.2	84	46.2	44.8	36.9	1.213	1.255
112	S _a 8	S _b 7	163.4	81.6	77.8	47.2	45.4	29.8	1.213	1.219
113	S _a 8	S _b 8	157	83.2	79.6	49.2	47.6	29.7	1.213	1.219
114	S _a 8	S _b 9	157	80.6	75.4	51.2	49	23.1	1.213	1.217
115	S _a 8	S _b 10	155.8	80.4	75.8	52.4	49.8	22.4	1.213	1.214
116	S _a 8	S _b 11	157.8	80.6	75.4	53.8	50.6	20.4	1.213	1.214
117	S _a 8	S _b 12	157.6	78.6	75.6	53.2	52	21.8	1.213	1.212
118	S _a 8	S _b 13	156.2	86.2	82.2	47.2	44.6	34.1	1.213	1.214
119	S _a 8	S _b 14	155.2	87.6	83.6	46	45.6	37	1.213	1.214

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
120	S _a 8	S _b 15	157.8	87.4	82.2	45.6	43	35.5	1.213	1.213
121	S _a 9	S _b 1	159.8	80.2	73.2	49.4	46.8	22.4	1.213	1.287
122	S _a 9	S _b 2	157.8	76.6	72.6	52.2	50.4	19.6	1.213	1.278
123	S _a 9	S _b 3	159	76.6	72	50.2	49.2	21	1.213	1.274
124	S _a 9	S _b 4	158.6	75.4	70.8	52.4	51	17.5	1.213	1.231
125	S _a 9	S _b 5	160.4	77.6	74.2	53.4	50.6	19.9	1.213	1.254
126	S _a 9	S _b 6	160.2	77.8	71.6	51.6	49.2	18.8	1.213	1.255
127	S _a 9	S _b 7	162.2	78.4	75.2	46.8	45.2	27.7	1.213	1.219
128	S _a 9	S _b 8	160.4	76.6	72.4	53.8	52.8	17.9	1.213	1.219
129	S _a 9	S _b 9	154.6	77.6	74.2	55.2	52.2	18.1	1.213	1.217
130	S _a 9	S _b 10	160	77.2	72.6	54.2	50.6	17.2	1.213	1.214
131	S _a 9	S _b 11	159	74.6	70.6	52.6	51.6	17.3	1.213	1.214
132	S _a 9	S _b 12	155.6	76.6	73.4	56.6	55.4	16.2	1.213	1.212
133	S _a 9	S _b 13	161	75.6	71.4	53.2	51.8	17.4	1.213	1.214
134	S _a 9	S _b 14	156.8	77.4	73.4	52.8	51.4	19.8	1.213	1.214
135	S _a 9	S _b 15	161.2	79.2	75.2	50.6	49.2	23.8	1.213	1.213
136	S _a 10	S _b 1	161.4	79.6	75.4	45.2	44	29.4	1.213	1.287
137	S _a 10	S _b 2	159.6	79.4	75	53.2	51.2	20.9	1.213	1.278
138	S _a 10	S _b 3	160.6	78.2	74.2	51	48.6	22.3	1.213	1.274
139	S _a 10	S _b 4	151	81.4	77.6	57	54.4	19.7	1.213	1.231
140	S _a 10	S _b 5	159.8	75.2	73	52.6	50.2	19.7	1.213	1.254
141	S _a 10	S _b 6	162.4	78.8	76.2	52.8	50.8	22.7	1.213	1.255
142	S _a 10	S _b 7	161.8	79.2	73.2	51.2	46.4	20.5	1.213	1.219
143	S _a 10	S _b 8	161.4	78	73.2	51.8	50.6	20.5	1.213	1.219
144	S _a 10	S _b 9	157.6	79.6	75.8	53.8	51.2	21.1	1.213	1.217
145	S _a 10	S _b 10	160.6	81.8	76.4	49.6	47.6	25.7	1.213	1.214
146	S _a 10	S _b 11	152.8	80.6	77.2	53.4	52.2	23.1	1.213	1.214
147	S _a 10	S _b 12	157.6	76.4	73.4	53.2	52.4	19.7	1.213	1.212
148	S _a 10	S _b 13	160.2	81.4	75.4	49.2	47.4	25.1	1.213	1.214
149	S _a 10	S _b 14	158.4	77.8	72.2	53.8	50.4	17.1	1.213	1.214

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
150	S _a 10	S _b 15	160	80.2	75.2	52.4	50.8	21.9	1.213	1.213
151	S _a 11	S _b 1	154.6	81.6	75.8	52	50.4	22.7	1.213	1.287
152	S _a 11	S _b 2	172.4	68.8	62.4	45.6	44.8	15.8	1.213	1.278
153	S _a 11	S _b 3	154.8	80.4	75.6	52.6	50.6	22	1.213	1.274
154	S _a 11	S _b 4	170.8	71.8	65.4	49.4	48.6	15	1.213	1.231
155	S _a 11	S _b 5	167.4	76.8	64.2	49.2	47.6	13	1.213	1.254
156	S _a 11	S _b 6	154.8	81.2	76	52.8	51.8	22.3	1.213	1.255
157	S _a 11	S _b 7	155.8	85.6	79.4	46.4	45.8	32	1.213	1.219
158	S _a 11	S _b 8	156.2	81.4	74.2	55.2	52.4	17.6	1.213	1.219
159	S _a 11	S _b 9	155.2	78.8	75.2	54	50.6	20.2	1.213	1.217
160	S _a 11	S _b 10	154.8	80.8	76.4	54.8	52.2	20.6	1.213	1.214
161	S _a 11	S _b 11	152.2	83.4	79.2	48.2	46.2	30.1	1.213	1.214
162	S _a 11	S _b 12	153.4	80.8	74.8	54.6	52.8	19.1	1.213	1.212
163	S _a 11	S _b 13	154.2	82.2	75.2	54.2	53	19.8	1.213	1.214
164	S _a 11	S _b 14	154.2	80.2	75.4	55.4	53.4	19	1.213	1.214
165	S _a 11	S _b 15	155	79.8	75.6	55.6	53.6	19.1	1.213	1.213
166	S _a 12	S _b 1	164.6	73	70.4	49	47.6	20.8	1.214	1.287
167	S _a 12	S _b 2	167.4	73	67	48.2	45.8	17.6	1.214	1.278
168	S _a 12	S _b 3	157	82	75.8	52.6	49.8	21.9	1.214	1.274
169	S _a 12	S _b 4	167.8	78.6	73.8	44.6	41.6	28.1	1.214	1.231
170	S _a 12	S _b 5	171.8	71.2	67.6	49.2	47.4	17.6	1.214	1.254
171	S _a 12	S _b 6	165.6	75	68	49.6	47.6	17.1	1.214	1.255
172	S _a 12	S _b 7	172.2	69.4	64.2	46.8	45.2	16.4	1.214	1.219
173	S _a 12	S _b 8	166.4	74.2	67.4	49.6	48.6	16.7	1.214	1.219
174	S _a 12	S _b 9	166.4	73.6	70.8	51.6	48.2	18.3	1.214	1.217
175	S _a 12	S _b 10	172	86.8	64.8	46.2	44.8	15.3	1.214	1.214
176	S _a 12	S _b 11	173.6	70.8	66.8	45.8	44.8	20.3	1.214	1.214
177	S _a 12	S _b 12	162.4	72.6	69.4	49.6	48.4	19.2	1.214	1.212
178	S _a 12	S _b 13	164.2	72.8	67.4	50.2	49.4	16.3	1.214	1.214
179	S _a 12	S _b 14	173.6	68.8	65.6	44.4	42.2	20.4	1.214	1.214

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
180	S _a 12	S _b 15	168.2	72.6	64.2	46.6	43.8	16	1.214	1.213
181	S _a 13	S _b 1	167.6	73.6	67.6	47.2	44.2	19.1	1.213	1.287
182	S _a 13	S _b 2	162.6	76.6	72.8	51.4	49.8	20.6	1.213	1.278
183	S _a 13	S _b 3	148.6	87.9	79.8	56.6	53.5	21.6	1.213	1.274
184	S _a 13	S _b 4	146.4	83.2	78.6	57.2	56.2	20.6	1.213	1.231
185	S _a 13	S _b 5	164.6	75	71	50.2	49	20.1	1.213	1.254
186	S _a 13	S _b 6	149	85.6	82.2	54.8	53.6	26.7	1.213	1.255
187	S _a 13	S _b 7	159.4	84.6	80.8	46.2	44.8	33.9	1.213	1.219
188	S _a 13	S _b 8	156	86.8	83.4	58.2	55.8	24.4	1.213	1.219
189	S _a 13	S _b 9	147.8	81.6	78.4	55.8	52.4	21.7	1.213	1.217
190	S _a 13	S _b 10	164.8	73.4	69.6	49.8	47.8	19	1.213	1.214
191	S _a 13	S _b 11	147.6	83.2	79.4	58.6	56.6	20	1.213	1.214
192	S _a 13	S _b 12	143.2	85.6	80.8	61.6	60.2	18.3	1.213	1.212
193	S _a 13	S _b 13	150.8	82.2	77.6	53.4	52.8	23.5	1.213	1.214
194	S _a 13	S _b 14	149.2	85.2	80.4	57.6	55.2	21.8	1.213	1.214
195	S _a 13	S _b 15	150.4	83.2	78.2	57	54.6	20.1	1.213	1.213
196	S _a 14	S _b 1	187.6	58.2	55.2	40	39.4	14.7	1.213	1.287
197	S _a 14	S _b 2	181.2	59.6	56.8	41.2	40.4	15.1	1.213	1.278
198	S _a 14	S _b 3	181.8	62.2	57.6	43.4	41.8	13.3	1.213	1.274
199	S _a 14	S _b 4	184.4	58.4	54.6	41.4	40.4	12.5	1.213	1.231
200	S _a 14	S _b 5	185.8	55.4	51.6	41	39.6	9.9	1.213	1.254
201	S _a 14	S _b 6	187.6	56.4	52.8	41.2	40.2	10.9	1.213	1.255
202	S _a 14	S _b 7	186.8	59	53.6	39	38.8	13.8	1.213	1.219
203	S _a 14	S _b 8	180.2	64.4	60.8	45.4	43.2	14.6	1.213	1.219
204	S _a 14	S _b 9	187.6	57	54.8	42.4	41.7	12	1.213	1.217
205	S _a 14	S _b 10	185.8	56.8	53.4	41.6	40.6	11.2	1.213	1.214
206	S _a 14	S _b 11	186	57.6	54.6	41.4	39.2	12.5	1.213	1.214
207	S _a 14	S _b 12	187.4	55.2	51.8	40.4	39.4	10.8	1.213	1.212
208	S _a 14	S _b 13	181.8	61.6	59	42.8	42	15.7	1.213	1.214
209	S _a 14	S _b 14	185.2	57.8	54.6	40.6	39.4	13.4	1.213	1.214

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)						SRC	
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
210	S _a 14	S _b 15	188.4	58.2	55.4	41.6	40.8	13.3	1.213	1.213
211	S _a 15	S _b 1	157.2	81.6	77.6	51.2	49	25.5	1.213	1.287
212	S _a 15	S _b 2	156.4	82.2	77.6	53.6	52.2	23.1	1.213	1.278
213	S _a 15	S _b 3	159.4	80.8	76.4	51.4	50.8	24.3	1.213	1.274
214	S _a 15	S _b 4	160	77.8	74.2	51.8	50.6	21.7	1.213	1.231
215	S _a 15	S _b 5	156.6	78.4	75	51.4	50.2	22.9	1.213	1.254
216	S _a 15	S _b 6	149.6	86.2	81	53.2	52.6	27	1.213	1.255
217	S _a 15	S _b 7	160.4	81.4	75.8	51	48.4	23.6	1.213	1.219
218	S _a 15	S _b 8	156	75.4	72.8	54.2	51.2	17.8	1.213	1.219
219	S _a 15	S _b 9	157	83.8	79.4	49.6	47.2	28.8	1.213	1.217
220	S _a 15	S _b 10	166.2	79.2	74.8	50.4	48.8	23.5	1.213	1.214
221	S _a 15	S _b 11	156.2	79.4	69.8	55.4	52.4	12.6	1.213	1.214
222	S _a 15	S _b 12	151.2	81.4	76.4	56.2	53.2	19.1	1.213	1.212
223	S _a 15	S _b 13	156.8	80	75.4	54.2	52.2	20.3	1.213	1.214
224	S _a 15	S _b 14	153.8	80.2	78.2	55.6	53.4	22	1.213	1.214
225	S _a 15	S _b 15	156.8	81.6	77.2	49.2	47.4	27.1	1.213	1.213

ตารางผนวกที่ ก2 ผลการทดสอบกรณีที่ 2 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b$) โดยวางให้แนวการเดินดอ
กั้ดให้ตั้งฉากกัน

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
1	S _a 1	S _b 1	170.4	77.6	74.0	47.6	46.4	25.7	1.243	1.287
2	S _a 1	S _b 2	163.0	81.4	78.2	49.8	49.0	27.8	1.243	1.278
3	S _a 1	S _b 3	165.6	80.2	77.6	49.6	48.4	27.5	1.243	1.274
4	S _a 1	S _b 4	163.2	81.0	76.6	52.2	50.8	23.6	1.243	1.231
5	S _a 1	S _b 5	165.4	81.0	77.4	48.4	47.8	28.4	1.243	1.254
6	S _a 1	S _b 6	159.6	83.6	78.8	51.6	49.8	26.3	1.243	1.255
7	S _a 1	S _b 7	166.0	77.0	76.2	50.2	49.2	25.7	1.243	1.219
8	S _a 1	S _b 8	163.4	86.6	82.2	49.8	48.2	31.5	1.243	1.219
9	S _a 1	S _b 9	161.6	78.6	74.2	49.0	47.6	24.4	1.243	1.217
10	S _a 1	S _b 10	163.6	77.8	75.2	51.6	50.6	23.1	1.243	1.214
11	S _a 1	S _b 11	165.0	81.6	76.6	51.6	50.8	24.2	1.243	1.214
12	S _a 1	S _b 12	157.4	81.8	78.2	57.2	55.2	20.2	1.243	1.212
13	S _a 1	S _b 13	167.4	80.4	75.2	48.2	47.6	26.2	1.243	1.214
14	S _a 1	S _b 14	166.2	79.4	73.6	50.6	49.2	22.0	1.243	1.214
15	S _a 1	S _b 15	167.2	78.6	73.2	50.8	48.0	21.2	1.243	1.213
16	S _a 2	S _b 1	164.8	85.2	83.2	42.2	41.2	40.6	1.245	1.287
17	S _a 2	S _b 2	160.0	87.4	84.4	46.6	45.8	37.3	1.245	1.278
18	S _a 2	S _b 3	165.4	85.4	83.8	42.0	40.4	41.3	1.245	1.274
19	S _a 2	S _b 4	161.4	79.4	75.6	52.6	52.2	22.4	1.245	1.231
20	S _a 2	S _b 5	165.4	81.8	75.6	49.8	48.4	24.7	1.245	1.254
21	S _a 2	S _b 6	165.8	83.6	79.8	48.0	47.0	31.1	1.245	1.255
22	S _a 2	S _b 7	161.6	81.6	77.6	52.8	50.6	23.9	1.245	1.219
23	S _a 2	S _b 8	163.4	80.6	76.2	49.8	48.6	25.6	1.245	1.219
24	S _a 2	S _b 9	162.4	84.0	83.4	47.4	46.2	35.7	1.245	1.217
25	S _a 2	S _b 10	162.4	84.2	80.2	43.4	41.8	36.0	1.245	1.214
26	S _a 2	S _b 11	163.4	88.4	82.4	45.2	43.8	36.1	1.245	1.214
27	S _a 2	S _b 12	166.2	84.0	78.4	46.0	44.8	31.4	1.245	1.212
28	S _a 2	S _b 13	154.8	84.6	79.6	58.4	56.8	20.3	1.245	1.214
29	S _a 2	S _b 14	163.6	84.8	78.8	45.6	44.4	32.2	1.245	1.214

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)						SRC	
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
30	S _a 2	S _b 15	166.6	86.4	79.0	45.6	44.8	32.2	1.245	1.213
31	S _a 3	S _b 1	165.8	77.6	74.4	51.0	49.8	22.8	1.224	1.287
32	S _a 3	S _b 2	163.6	84.2	77.2	52.2	50.6	23.8	1.224	1.278
33	S _a 3	S _b 3	164.8	81.4	76.2	51.4	50.4	23.9	1.224	1.274
34	S _a 3	S _b 4	165.2	84.8	80.4	46.4	45.4	33.2	1.224	1.231
35	S _a 3	S _b 5	165.2	81.4	76.2	48.8	47.2	26.4	1.224	1.254
36	S _a 3	S _b 6	164.2	79.4	75.2	51.2	50.0	23.2	1.224	1.255
37	S _a 3	S _b 7	164.6	88.6	75.8	54.0	52.2	19.7	1.224	1.219
38	S _a 3	S _b 8	161.8	83.6	77.6	50.8	48.4	25.6	1.224	1.219
39	S _a 3	S _b 9	165.2	81.4	78.8	48.6	47.2	29.6	1.224	1.217
40	S _a 3	S _b 10	166.4	80.2	75.4	53.6	52.2	20.9	1.224	1.214
41	S _a 3	S _b 11	154.6	78.8	74.6	55.6	52.4	17.9	1.224	1.214
42	S _a 3	S _b 12	165.2	79.2	73.6	53.0	51.8	19.6	1.224	1.212
43	S _a 3	S _b 13	166.4	81.4	76.8	51.0	50.0	25.0	1.224	1.214
44	S _a 3	S _b 14	165.6	79.4	72.8	53.8	51.8	17.8	1.224	1.214
45	S _a 3	S _b 15	166.2	77.4	74.2	52.0	50.4	21.5	1.224	1.213
46	S _a 4	S _b 1	174.6	73.0	68.6	48.8	46.8	18.9	1.220	1.287
47	S _a 4	S _b 2	173.2	71.4	67.6	47.8	46.2	19.0	1.220	1.278
48	S _a 4	S _b 3	178.2	72.0	65.4	48.0	46.6	16.3	1.220	1.274
49	S _a 4	S _b 4	172.6	73.6	69.2	48.4	47.0	20.0	1.220	1.231
50	S _a 4	S _b 5	176.0	70.8	67.8	46.2	44.0	20.9	1.220	1.254
51	S _a 4	S _b 6	180.2	72.2	67.0	44.8	43.6	21.3	1.220	1.255
52	S _a 4	S _b 7	177.6	69.8	67.8	48.4	47.4	19.0	1.220	1.219
53	S _a 4	S _b 8	173.0	71.0	68.6	49.8	48.8	18.3	1.220	1.219
54	S _a 4	S _b 9	168.0	76.2	73.6	49.8	47.6	23.1	1.220	1.217
55	S _a 4	S _b 10	176.2	69.6	65.4	46.0	48.8	19.2	1.220	1.214
56	S _a 4	S _b 11	178.2	69.4	64.0	48.6	47.4	14.5	1.220	1.214
57	S _a 4	S _b 12	169.8	69.8	65.4	49.2	48.2	15.4	1.220	1.212
58	S _a 4	S _b 13	172.4	73.4	69.6	48.2	47.6	20.8	1.220	1.214
59	S _a 4	S _b 14	172.4	71.2	69.0	51.8	50.8	16.7	1.220	1.214

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
60	S _a 4	S _b 15	173.4	77.4	68.8	50.2	48.0	17.1	1.220	1.213
61	S _a 5	S _b 1	168.4	71.4	68.6	52.6	57.4	16.3	1.217	1.287
62	S _a 5	S _b 2	181.8	71.6	64.8	46.2	44.0	17.3	1.217	1.278
63	S _a 5	S _b 3	180.0	68.8	65.8	46.6	45.6	18.6	1.217	1.274
64	S _a 5	S _b 4	177.2	69.6	66.6	45.8	44.8	20.2	1.217	1.231
65	S _a 5	S _b 5	178.8	71.2	66.4	46.0	45.0	19.6	1.217	1.254
66	S _a 5	S _b 6	179.8	69.8	66.8	44.2	42.8	22.0	1.217	1.255
67	S _a 5	S _b 7	180.6	72.6	69.8	43.2	42.0	26.0	1.217	1.219
68	S _a 5	S _b 8	181.0	69.4	66.6	48.4	46.2	17.5	1.217	1.219
69	S _a 5	S _b 9	171.0	68.2	65.6	48.2	46.6	16.8	1.217	1.217
70	S _a 5	S _b 10	176.2	70.2	67.2	49.2	48.4	17.5	1.217	1.214
71	S _a 5	S _b 11	180.6	68.2	67.8	43.8	42.4	23.7	1.217	1.214
72	S _a 5	S _b 12	177.8	71.6	68.8	46.0	44.4	22.2	1.217	1.212
73	S _a 5	S _b 13	181.2	68.4	64.0	42.8	40.6	20.3	1.217	1.214
74	S _a 5	S _b 14	178.4	68.6	65.2	48.8	47.4	15.7	1.217	1.214
75	S _a 5	S _b 15	173.6	72.6	66.8	49.8	47.8	15.9	1.217	1.213
76	S _a 6	S _b 1	148.2	87.2	83.4	60.2	58.0	22.3	1.213	1.287
77	S _a 6	S _b 2	157.6	83.6	81.2	55.0	53.2	25.6	1.213	1.278
78	S _a 6	S _b 3	157.2	85.6	78.4	56.2	53.2	20.7	1.213	1.274
79	S _a 6	S _b 4	157.2	84.2	80.8	57.6	55.2	22.4	1.213	1.231
80	S _a 6	S _b 5	151.4	84.2	81.2	55.6	54.4	25.0	1.213	1.254
81	S _a 6	S _b 6	155.4	83.2	78.4	58.2	56.0	19.2	1.213	1.255
82	S _a 6	S _b 7	159.0	81.2	77.8	55.2	53.6	21.9	1.213	1.219
83	S _a 6	S _b 8	158.2	84.2	78.4	56.2	53.8	21.0	1.213	1.219
84	S _a 6	S _b 9	159.2	82.6	77.4	55.6	54.6	20.9	1.213	1.217
85	S _a 6	S _b 10	154.0	85.2	80.8	56.0	54.6	24.0	1.213	1.214
86	S _a 6	S _b 11	159.6	83.6	80.4	54.8	52.8	24.9	1.213	1.214
87	S _a 6	S _b 12	150.4	86.4	81.4	60.0	58.2	20.4	1.213	1.212
88	S _a 6	S _b 13	156.2	81.6	77.4	56.8	54.8	19.7	1.213	1.214
89	S _a 6	S _b 14	151.6	85.2	79.6	57.2	53.8	21.1	1.213	1.214

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
90	S _a 6	S _b 15	154.4	86.0	80.4	57.8	56.4	21.6	1.213	1.213
91	S _a 7	S _b 1	152.8	86.8	84.4	55.6	53.4	28.1	1.214	1.287
92	S _a 7	S _b 2	165.2	77.6	74.0	52.6	51.2	20.7	1.214	1.278
93	S _a 7	S _b 3	166.4	78.2	75.2	51.2	49.2	23.3	1.214	1.274
94	S _a 7	S _b 4	158.4	81.2	75.6	57.0	55.2	17.5	1.214	1.231
95	S _a 7	S _b 5	166.2	82.8	74.8	50.8	47.8	22.4	1.214	1.254
96	S _a 7	S _b 6	166.2	78.2	74.2	52.8	51.6	20.7	1.214	1.255
97	S _a 7	S _b 7	167.6	78.0	73.8	50.2	48.8	22.8	1.214	1.219
98	S _a 7	S _b 8	174.0	75.8	70.6	51.6	48.8	17.9	1.214	1.219
99	S _a 7	S _b 9	168.2	75.4	71.4	51.8	50.4	18.8	1.214	1.217
100	S _a 7	S _b 10	170.2	77.4	75.4	50.2	49.2	24.8	1.214	1.214
101	S _a 7	S _b 11	163.6	75.0	72.4	53.0	51.8	18.9	1.214	1.214
102	S _a 7	S _b 12	169.6	75.2	70.4	52.6	51.2	16.9	1.214	1.212
103	S _a 7	S _b 13	168.4	78.4	75.0	51.2	48.6	22.9	1.214	1.214
104	S _a 7	S _b 14	167.0	75.4	70.8	52.8	51.6	17.2	1.214	1.214
105	S _a 7	S _b 15	152.4	81.6	79.0	53.8	51.6	24.5	1.214	1.213
106	S _a 8	S _b 1	155.4	80.4	78.6	57.2	49.4	20.0	1.213	1.287
107	S _a 8	S _b 2	169.6	75.2	72.2	50.2	49.0	21.4	1.213	1.278
108	S _a 8	S _b 3	162.8	77.8	74.0	53.0	51.8	20.3	1.213	1.274
109	S _a 8	S _b 4	171.0	76.8	71.8	50.4	47.8	20.3	1.213	1.231
110	S _a 8	S _b 5	169.4	80.0	77.0	44.6	43.2	31.8	1.213	1.254
111	S _a 8	S _b 6	165.2	83.0	79.2	46.0	43.4	32.3	1.213	1.255
112	S _a 8	S _b 7	168.2	81.2	76.8	49.4	47.0	26.4	1.213	1.219
113	S _a 8	S _b 8	170.2	79.8	77.2	45.6	43.6	30.9	1.213	1.219
114	S _a 8	S _b 9	173.2	77.4	73.6	43.4	41.2	29.3	1.213	1.217
115	S _a 8	S _b 10	170.4	76.6	75.2	48.4	48.0	26.5	1.213	1.214
116	S _a 8	S _b 11	170.6	79.6	77.8	44.6	42.8	32.7	1.213	1.214
117	S _a 8	S _b 12	169.6	73.8	70.2	49.4	48.2	20.1	1.213	1.212
118	S _a 8	S _b 13	170.6	78.8	74.6	46.2	44.8	27.6	1.213	1.214
119	S _a 8	S _b 14	164.2	83.4	77.4	49.6	47.8	26.7	1.213	1.214

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
120	S _a 8	S _b 15	169.6	79.0	74.2	45.6	43.4	27.6	1.213	1.213
121	S _a 9	S _b 1	157.8	79.4	75.6	51.0	49.2	23.8	1.213	1.287
122	S _a 9	S _b 2	157.2	77.6	73.6	53.0	50.8	19.7	1.213	1.278
123	S _a 9	S _b 3	157.6	80.6	76.8	55.2	54.6	21.0	1.213	1.274
124	S _a 9	S _b 4	158.6	82.8	79.2	53.8	51.6	24.6	1.213	1.231
125	S _a 9	S _b 5	158.8	80.8	76.2	53.2	52.4	22.2	1.213	1.254
126	S _a 9	S _b 6	171.4	71.2	67.4	46.6	43.4	19.8	1.213	1.255
127	S _a 9	S _b 7	160.8	83.2	76.8	55.4	53.2	20.2	1.213	1.219
128	S _a 9	S _b 8	158.8	80.4	75.2	56.8	54.6	17.3	1.213	1.219
129	S _a 9	S _b 9	159.6	77.4	75.4	55.0	53.2	19.9	1.213	1.217
130	S _a 9	S _b 10	160.6	76.6	72.4	54.4	51.8	17.0	1.213	1.214
131	S _a 9	S _b 11	160.8	78.6	75.2	56.4	55.6	18.2	1.213	1.214
132	S _a 9	S _b 12	161.6	76.4	73.6	55.4	53.6	17.5	1.213	1.212
133	S _a 9	S _b 13	158.6	79.2	76.2	53.8	51.6	21.7	1.213	1.214
134	S _a 9	S _b 14	166.6	75.2	71.8	54.6	53.0	16.5	1.213	1.214
135	S _a 9	S _b 15	157.2	78.8	73.8	57.6	55.4	15.2	1.213	1.213
136	S _a 10	S _b 1	156.8	84.4	76.6	55.2	53.6	20.1	1.213	1.287
137	S _a 10	S _b 2	155.4	81.2	77.4	53.8	52.4	22.9	1.213	1.278
138	S _a 10	S _b 3	146.8	80.2	79.0	59.6	57.4	18.9	1.213	1.274
139	S _a 10	S _b 4	160.4	79.6	76.4	56.2	54.8	19.5	1.213	1.231
140	S _a 10	S _b 5	157.4	82.0	77.4	54.8	52.6	21.6	1.213	1.254
141	S _a 10	S _b 6	162.4	86.2	83.6	56.6	54.8	26.4	1.213	1.255
142	S _a 10	S _b 7	158.4	86.6	82.0	53.4	51.4	27.7	1.213	1.219
143	S _a 10	S _b 8	156.8	82.8	76.0	57.8	56.2	17.0	1.213	1.219
144	S _a 10	S _b 9	154.6	83.0	79.2	58.8	55.8	19.4	1.213	1.217
145	S _a 10	S _b 10	162.8	81.4	77.8	51.8	51.2	25.4	1.213	1.214
146	S _a 10	S _b 11	159.8	79.6	74.6	53.8	51.4	19.7	1.213	1.214
147	S _a 10	S _b 12	157.4	81.2	78.4	57.4	55.4	20.3	1.213	1.212
148	S _a 10	S _b 13	152.8	86.6	82.2	54.4	53.0	27.0	1.213	1.214
149	S _a 10	S _b 14	156.4	80.6	77.4	56.4	53.6	20.1	1.213	1.214

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C°)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
150	S _a 10	S _b 15	158.6	84.0	79.4	57.2	55.0	21.2	1.213	1.213
151	S _a 11	S _b 1	157.8	84.6	77.6	57.4	55.6	18.9	1.213	1.287
152	S _a 11	S _b 2	160.6	86.8	78.4	48.8	47.0	28.1	1.213	1.278
153	S _a 11	S _b 3	161.4	75.8	74.8	52.2	51.6	22.4	1.213	1.274
154	S _a 11	S _b 4	155.2	80.2	75.0	55.4	53.4	18.6	1.213	1.231
155	S _a 11	S _b 5	170.4	73.8	68.2	47.2	46.6	20.1	1.213	1.254
156	S _a 11	S _b 6	155.2	82.0	76.8	57.6	55.2	18.1	1.213	1.255
157	S _a 11	S _b 7	160.8	84.4	79.8	55.6	53.4	23.2	1.213	1.219
158	S _a 11	S _b 8	156.2	81.8	79.8	58.4	55.6	20.7	1.213	1.219
159	S _a 11	S _b 9	156.2	82.4	78.2	57.6	56.2	19.8	1.213	1.217
160	S _a 11	S _b 10	149.6	79.4	73.8	58.6	56.8	14.1	1.213	1.214
161	S _a 11	S _b 11	158.0	80.0	76.8	55.6	54.8	20.6	1.213	1.214
162	S _a 11	S _b 12	174.6	67.6	65.4	47.6	46.2	17.3	1.213	1.212
163	S _a 11	S _b 13	176.2	73.2	70.0	46.2	44.4	23.1	1.213	1.214
164	S _a 11	S _b 14	158.0	80.5	78.4	56.4	54.6	21.4	1.213	1.214
165	S _a 11	S _b 15	154.6	84.2	78.8	53.6	51.8	24.2	1.213	1.213
166	S _a 12	S _b 1	165.8	79.6	75.2	47.6	46.6	26.8	1.214	1.287
167	S _a 12	S _b 2	163.2	82.0	76.6	56.6	54.2	18.9	1.214	1.278
168	S _a 12	S _b 3	169.2	79.6	74.6	48.8	48.2	25.0	1.214	1.274
169	S _a 12	S _b 4	164.8	75.8	69.4	51.4	49.2	16.8	1.214	1.231
170	S _a 12	S _b 5	174.4	67.6	65.4	47.4	46.6	17.6	1.214	1.254
171	S _a 12	S _b 6	160.6	81.4	77.8	51.4	48.8	25.5	1.214	1.255
172	S _a 12	S _b 7	164.2	83.4	77.2	49.6	48.2	26.5	1.214	1.219
173	S _a 12	S _b 8	167.8	79.0	75.4	54.8	52.4	19.7	1.214	1.219
174	S _a 12	S _b 9	172.8	72.6	69.4	50.0	47.8	18.6	1.214	1.217
175	S _a 12	S _b 10	164.6	79.4	72.2	55.8	53.4	15.0	1.214	1.214
176	S _a 12	S _b 11	157.6	78.0	75.2	55.4	54.0	19.2	1.214	1.214
177	S _a 12	S _b 12	173.0	72.2	68.6	50.2	49.4	17.8	1.214	1.212
178	S _a 12	S _b 13	159.2	83.2	77.4	52.6	49.8	23.6	1.214	1.214
179	S _a 12	S _b 14	159.8	81.0	75.0	54.8	53.8	19.2	1.214	1.214

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
180	S _a 12	S _b 15	172.8	73.8	68.2	48.2	46.8	19.0	1.214	1.213
181	S _a 13	S _b 1	171.2	74.6	68.0	48.4	47.0	18.5	1.213	1.287
182	S _a 13	S _b 2	152.6	85.2	81.4	56.8	56.4	24.0	1.213	1.278
183	S _a 13	S _b 3	172.0	75.8	72.6	51.8	50.8	20.2	1.213	1.274
184	S _a 13	S _b 4	170.0	75.4	71.6	49.6	48.0	21.2	1.213	1.231
185	S _a 13	S _b 5	170.8	71.6	66.8	46.2	45.0	19.7	1.213	1.254
186	S _a 13	S _b 6	170.6	76.4	72.8	47.4	42.2	24.1	1.213	1.255
187	S _a 13	S _b 7	169.6	76.4	71.4	52.2	51.6	18.4	1.213	1.219
188	S _a 13	S _b 8	169.2	74.6	71.6	54.2	52.0	16.7	1.213	1.219
189	S _a 13	S _b 9	157.6	81.6	78.4	56.6	54.2	21.0	1.213	1.217
190	S _a 13	S _b 10	167.2	75.2	71.2	52.6	51.6	17.9	1.213	1.214
191	S _a 13	S _b 11	165.8	77.2	75.4	55.8	52.8	18.9	1.213	1.214
192	S _a 13	S _b 12	160.2	75.2	74.2	56.6	53.0	16.9	1.213	1.212
193	S _a 13	S _b 13	167.4	75.4	71.4	52.8	51.8	17.9	1.213	1.214
194	S _a 13	S _b 14	153.4	82.0	78.6	56.6	55.6	21.4	1.213	1.214
195	S _a 13	S _b 15	152.8	86.6	81.8	57.6	55.8	23.3	1.213	1.213
196	S _a 14	S _b 1	191.2	56.6	56.0	41.4	40.6	14.4	1.213	1.287
197	S _a 14	S _b 2	189.0	62.4	59.2	41.8	41.2	16.9	1.213	1.278
198	S _a 14	S _b 3	188.8	61.6	59.6	38.0	37.2	21.2	1.213	1.274
199	S _a 14	S _b 4	165.4	80.2	76.2	53.2	51.6	22.2	1.213	1.231
200	S _a 14	S _b 5	165.2	80.2	76.8	49.4	47.8	26.7	1.213	1.254
201	S _a 14	S _b 6	162.8	79.2	74.4	48.2	47.2	25.4	1.213	1.255
202	S _a 14	S _b 7	159.0	76.4	72.2	54.6	53.4	16.8	1.213	1.219
203	S _a 14	S _b 8	163.4	78.6	73.6	49.4	47.4	23.2	1.213	1.219
204	S _a 14	S _b 9	164.4	79.6	77.6	57.4	54.2	19.5	1.213	1.217
205	S _a 14	S _b 10	163.4	77.6	73.6	54.8	53.2	18.0	1.213	1.214
206	S _a 14	S _b 11	182.6	64.2	61.4	46.8	45.8	14.1	1.213	1.214
207	S _a 14	S _b 12	167.4	74.4	69.8	52.8	50.4	16.0	1.213	1.212
208	S _a 14	S _b 13	160.4	78.6	76.0	56.4	55.0	19.0	1.213	1.214
209	S _a 14	S _b 14	165.2	75.8	72.0	51.2	49.4	20.0	1.213	1.214

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C°)						SRC	
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
210	S _a 14	S _b 15	188.2	66.4	60.8	39.8	34.4	19.4	1.213	1.213
211	S _a 15	S _b 1	158.4	82.2	81.2	47.8	46.8	33.1	1.213	1.287
212	S _a 15	S _b 2	156.6	81.4	77.2	54.8	53.2	21.6	1.213	1.278
213	S _a 15	S _b 3	152.0	87.4	82.8	58.4	57.4	23.6	1.213	1.274
214	S _a 15	S _b 4	152.6	84.4	82.4	58.0	56.6	23.9	1.213	1.231
215	S _a 15	S _b 5	157.2	83.8	80.8	55.6	53.6	24.5	1.213	1.254
216	S _a 15	S _b 6	157.0	83.4	78.4	56.8	54.8	20.6	1.213	1.255
217	S _a 15	S _b 7	150.2	85.6	84.2	52.6	50.0	31.0	1.213	1.219
218	S _a 15	S _b 8	154.4	79.8	78.4	57.6	55.8	20.3	1.213	1.219
219	S _a 15	S _b 9	150.4	85.2	81.4	61.2	58.8	19.3	1.213	1.217
220	S _a 15	S _b 10	158.0	84.4	79.6	59.2	58.4	19.6	1.213	1.214
221	S _a 15	S _b 11	150.4	86.8	83.6	56.4	54.4	26.5	1.213	1.214
222	S _a 15	S _b 12	157.6	83.2	77.6	57.8	55.2	18.6	1.213	1.212
223	S _a 15	S _b 13	155.8	83.6	77.0	54.8	52.4	20.9	1.213	1.214
224	S _a 15	S _b 14	155.2	81.4	76.6	57.4	55.2	18.2	1.213	1.214
225	S _a 15	S _b 15	159.2	79.2	75.2	54.6	52.0	19.7	1.213	1.213

ตารางผนวกที่ ก3 ผลการทดสอบกรณีที่ 3 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R$) โดยวาง
ให้แนวการเดินดอกรัดให้แน่นกัน

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
1	S _a 1	R1	164.8	90.2	88.8	33.2	28.8	54.8	1.243	1.290
2	S _a 1	R2	166.6	89.6	87.8	32.2	28.0	54.7	1.243	1.271
3	S _a 1	R3	161.4	93.2	91.6	33.6	31.2	57.4	1.243	1.274
4	S _a 1	R4	162.6	93.2	92.0	36.0	31.6	55.2	1.243	1.230
5	S _a 1	R5	162.8	92.6	91.0	33.4	31.2	57.1	1.243	1.269
6	S _a 1	R6	163.4	92.4	90.2	33.6	31.2	55.9	1.243	1.285
7	S _a 1	R7	159.4	91.2	89.8	33.0	30.6	56.3	1.243	1.255
8	S _a 1	R8	165.6	93.8	92.0	36.4	32.0	54.7	1.243	1.228
9	S _a 1	R9	167.2	93.0	90.4	37.2	32.8	52.2	1.243	1.238
10	S _a 1	R10	165.2	96.8	94.4	39.8	33.4	53.3	1.243	1.229
11	S _a 1	R11	166.4	95.8	94.2	37.2	33.8	56.3	1.243	1.239
12	S _a 1	R12	169.4	92.2	90.2	37.4	32.2	51.8	1.243	1.231
13	S _a 1	R13	166.4	93.8	91.8	37.0	33.8	54.1	1.243	1.231
14	S _a 1	R14	165.6	90.6	88.2	36.4	31.6	50.8	1.243	1.236
15	S _a 1	R15	162.6	91.4	89.6	39.2	34.0	49.4	1.243	1.243
16	S _a 2	R1	162.6	95.0	92.8	36.4	33.8	55.7	1.245	1.290
17	S _a 2	R2	165.0	90.2	83.4	34.0	28.8	47.7	1.245	1.271
18	S _a 2	R3	163.8	89.2	86.8	32.4	29.2	53.6	1.245	1.274
19	S _a 2	R4	163.4	91.4	90.4	35.4	31.0	54.2	1.245	1.230
20	S _a 2	R5	163.4	93.2	86.4	34.2	29.8	50.6	1.245	1.269
21	S _a 2	R6	165.8	94.4	86.0	32.4	29.2	51.9	1.245	1.285
22	S _a 2	R7	166.2	89.8	85.2	33.8	31.0	50.3	1.245	1.255
23	S _a 2	R8	168.6	89.6	87.4	35.6	30.6	50.8	1.245	1.228
24	S _a 2	R9	163.8	91.8	87.6	35.6	31.0	50.7	1.245	1.238
25	S _a 2	R10	165.2	95.8	91.8	36.8	33.2	53.9	1.245	1.229
26	S _a 2	R11	165.2	94.2	92.0	37.8	33.6	53.3	1.245	1.239
27	S _a 2	R12	165.4	95.4	92.4	36.8	33.6	54.7	1.245	1.231
28	S _a 2	R13	167.8	91.8	88.8	38.2	32.0	49.3	1.245	1.231
29	S _a 2	R14	164.2	93.8	91.6	39.4	34.4	51.2	1.245	1.236

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C°)						SRC	
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
30	S _a 2	R15	62.6	92.6	90.0	35.6	32.6	53.6	1.245	1.243
31	S _a 3	R1	166.0	92.8	90.2	36.6	32.2	52.6	1.224	1.290
32	S _a 3	R2	167.0	92.0	90.6	37.4	33.4	52.4	1.224	1.271
33	S _a 3	R3	163.4	94.2	90.6	35.4	29.6	53.9	1.224	1.274
34	S _a 3	R4	165.4	94.8	93.4	38.0	31.8	54.3	1.224	1.230
35	S _a 3	R5	167.4	88.6	86.8	31.2	28.8	55.0	1.224	1.269
36	S _a 3	R6	172.0	83.8	81.6	32.4	28.4	48.3	1.224	1.285
37	S _a 3	R7	168.4	91.2	88.4	34.0	29.8	53.4	1.224	1.255
38	S _a 3	R8	159.8	96.4	94.2	38.2	33.2	55.0	1.224	1.228
39	S _a 3	R9	165.4	92.4	91.2	36.8	30.6	53.3	1.224	1.238
40	S _a 3	R10	163.4	94.4	91.4	36.6	31.4	53.6	1.224	1.229
41	S _a 3	R11	169.0	93.2	89.6	38.4	33.2	49.9	1.224	1.239
42	S _a 3	R12	165.8	93.4	91.2	38.4	34.2	51.9	1.224	1.231
43	S _a 3	R13	172.2	92.2	89.6	35.6	33.6	53.3	1.224	1.231
44	S _a 3	R14	166.8	93.8	91.2	37.6	34.6	52.8	1.224	1.236
45	S _a 3	R15	169.0	92.8	89.6	37.2	32.8	51.3	1.224	1.243
46	S _a 4	R1	174.6	84.6	83.0	37.4	32.2	44.6	1.220	1.290
47	S _a 4	R2	178.2	83.2	80.8	34.4	31.6	45.7	1.220	1.271
48	S _a 4	R3	179.8	82.8	80.2	36.4	34.2	43.1	1.220	1.274
49	S _a 4	R4	177.4	83.6	82.2	38.6	34.0	42.7	1.220	1.230
50	S _a 4	R5	173.8	81.4	79.2	32.6	28.4	45.7	1.220	1.269
51	S _a 4	R6	167.8	80.4	79.8	30.8	28.0	48.5	1.220	1.285
52	S _a 4	R7	175.8	80.8	78.2	33.4	29.4	43.9	1.220	1.255
53	S _a 4	R8	175.2	82.2	79.8	31.8	29.6	47.3	1.220	1.228
54	S _a 4	R9	175.6	82.6	81.0	33.8	30.6	46.5	1.220	1.238
55	S _a 4	R10	174.8	84.4	82.6	34.4	31.2	47.5	1.220	1.229
56	S _a 4	R11	174.2	82.0	80.4	33.4	30.8	46.4	1.220	1.239
57	S _a 4	R12	175.2	84.4	83.2	36.4	33.2	46.2	1.220	1.231
58	S _a 4	R13	177.2	83.4	82.2	36.6	33.0	44.9	1.220	1.231
59	S _a 4	R14	176.8	86.2	83.6	37.0	33.6	45.7	1.220	1.236

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
60	S _a 4	R15	175.2	84.6	82.4	34.2	31.4	47.5	1.220	1.243
61	S _a 5	R1	181.2	80.4	78.0	31.6	33.4	46.3	1.217	1.290
62	S _a 5	R2	179.2	79.4	77.4	35.2	32.0	41.5	1.217	1.271
63	S _a 5	R3	180.8	78.2	76.0	34.6	31.4	40.6	1.217	1.274
64	S _a 5	R4	178.0	81.6	79.4	36.6	32.6	41.9	1.217	1.230
65	S _a 5	R5	176.4	79.2	77.4	33.0	29.4	43.6	1.217	1.269
66	S _a 5	R6	162.8	88.2	86.0	36.2	32.6	49.0	1.217	1.285
67	S _a 5	R7	177.8	76.6	74.4	33.0	28.2	40.4	1.217	1.255
68	S _a 5	R8	178.4	75.6	74.8	30.4	28.2	44.0	1.217	1.228
69	S _a 5	R9	179.4	78.4	76.6	31.8	29.6	44.2	1.217	1.238
70	S _a 5	R10	180.2	82.0	80.2	36.2	31.2	43.0	1.217	1.229
71	S _a 5	R11	177.4	80.4	78.6	32.4	30.4	45.7	1.217	1.239
72	S _a 5	R12	177.6	79.8	76.8	33.4	31.2	42.7	1.217	1.231
73	S _a 5	R13	179.4	80.8	79.6	35.8	32.6	43.2	1.217	1.231
74	S _a 5	R14	180.6	79.4	77.6	36.8	32.8	40.0	1.217	1.236
75	S _a 5	R15	174.4	76.0	74.6	34.5	31.4	39.5	1.217	1.243
76	S _a 6	R1	160.8	98.4	95.6	36.6	31.6	57.9	1.213	1.290
77	S _a 6	R2	158.2	100.4	97.4	37.6	32.2	58.6	1.213	1.271
78	S _a 6	R3	157.4	99.2	98.2	38.4	34.4	59.1	1.213	1.274
79	S _a 6	R4	152.4	104.4	101.4	35.8	31.4	64.5	1.213	1.230
80	S _a 6	R5	152.4	98.4	97.2	34.2	30.8	62.3	1.213	1.269
81	S _a 6	R6	153.2	99.2	97.0	34.8	30.4	61.3	1.213	1.285
82	S _a 6	R7	158.8	97.6	95.0	33.6	28.8	60.3	1.213	1.255
83	S _a 6	R8	156.4	96.4	93.6	33.8	28.8	58.7	1.213	1.228
84	S _a 6	R9	156.6	96.8	94.6	34.6	29.0	58.9	1.213	1.238
85	S _a 6	R10	160.2	98.6	96.4	35.6	31.8	59.9	1.213	1.229
86	S _a 6	R11	155.8	104.4	101.2	37.4	33.8	62.8	1.213	1.239
87	S _a 6	R12	159.2	99.8	97.6	36.6	32.8	60.1	1.213	1.231
88	S _a 6	R13	163.4	94.8	92.8	35.8	31.8	56.1	1.213	1.231
89	S _a 6	R14	160.4	100.4	97.0	47.4	34.2	47.2	1.213	1.236

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)						SRC	
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
90	S _a 6	R15	160.4	101.6	97.4	40.4	35.8	55.7	1.213	1.243
91	S _a 7	R1	170.0	91.2	88.8	38.2	33.6	49.6	1.214	1.290
92	S _a 7	R2	169.4	94.2	91.6	36.2	33.6	54.7	1.214	1.271
93	S _a 7	R3	173.4	86.8	84.0	35.2	31.2	47.8	1.214	1.274
94	S _a 7	R4	169.2	89.6	88.8	35.8	32.2	52.4	1.214	1.230
95	S _a 7	R5	168.4	88.8	87.6	35.8	32.2	51.1	1.214	1.269
96	S _a 7	R6	163.2	93.4	92.8	37.4	33.6	54.8	1.214	1.285
97	S _a 7	R7	172.2	81.2	79.6	32.4	29.0	46.5	1.214	1.255
98	S _a 7	R8	171.8	83.4	82.0	34.2	29.6	46.9	1.214	1.228
99	S _a 7	R9	171.6	82.8	81.2	30.8	27.8	49.7	1.214	1.238
100	S _a 7	R10	174.0	83.0	81.6	32.0	27.4	48.7	1.214	1.229
101	S _a 7	R11	171.0	84.4	81.6	33.2	29.8	47.5	1.214	1.239
102	S _a 7	R12	168.4	90.2	88.2	36.4	31.8	50.9	1.214	1.231
103	S _a 7	R13	168.4	88.8	87.8	35.6	30.8	51.4	1.214	1.231
104	S _a 7	R14	168.8	87.6	86.2	35.4	31.8	50.1	1.214	1.236
105	S _a 7	R15	174.8	86.6	84.8	37.8	34.0	46.2	1.214	1.243
106	S _a 8	R1	173.6	88.6	86.2	37.4	33.8	47.9	1.213	1.290
107	S _a 8	R2	168.6	92.4	89.4	37.2	33.4	51.2	1.213	1.271
108	S _a 8	R3	175.2	87.4	85.2	36.4	32.4	47.9	1.213	1.274
109	S _a 8	R4	174.8	88.2	85.8	36.2	31.2	48.5	1.213	1.230
110	S _a 8	R5	170.2	90.4	88.6	36.2	32.6	51.6	1.213	1.269
111	S _a 8	R6	170.6	87.6	84.4	35.4	31.2	47.9	1.213	1.285
112	S _a 8	R7	172.8	86.2	85.4	36.6	32.8	48.1	1.213	1.255
113	S _a 8	R8	159.2	97.2	94.8	35.8	29.8	57.8	1.213	1.228
114	S _a 8	R9	171.6	82.8	82.2	33.8	27.8	47.5	1.213	1.238
115	S _a 8	R10	161.8	92.4	90.2	33.2	29.4	56.1	1.213	1.229
116	S _a 8	R11	161.4	97.8	94.8	35.2	31.8	58.7	1.213	1.239
117	S _a 8	R12	159.6	95.0	93.2	33.8	30.2	58.6	1.213	1.231
118	S _a 8	R13	154.8	100.8	98.8	39.0	32.6	58.6	1.213	1.231
119	S _a 8	R14	171.4	87.2	85.8	35.2	81.1	57.0	1.213	1.236

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
120	S _a 8	R15	165.6	88.6	86.8	35.4	32.2	50.7	1.213	1.243
121	S _a 9	R1	162.2	92.6	90.8	36.8	32.6	53.1	1.213	1.290
122	S _a 9	R2	164.8	96.4	93.8	38.2	34.4	54.7	1.213	1.271
123	S _a 9	R3	162.8	95.6	94.4	39.2	34.2	54.3	1.213	1.274
124	S _a 9	R4	164.2	94.4	92.8	39.6	33.6	52.1	1.213	1.230
125	S _a 9	R5	159.8	97.6	96.4	38.8	33.2	56.6	1.213	1.269
126	S _a 9	R6	166.6	89.2	88.0	33.8	30.8	53.6	1.213	1.285
127	S _a 9	R7	162.0	93.4	92.2	34.8	30.8	56.7	1.213	1.255
128	S _a 9	R8	161.0	95.6	93.6	39.8	33.8	52.7	1.213	1.228
129	S _a 9	R9	161.4	90.4	89.0	33.2	30.0	55.1	1.213	1.238
130	S _a 9	R10	165.6	91.2	90.6	35.4	30.8	54.5	1.213	1.229
131	S _a 9	R11	160.8	91.6	89.8	32.8	28.4	56.1	1.213	1.239
132	S _a 9	R12	161.6	90.8	89.6	33.0	29.2	55.9	1.213	1.231
133	S _a 9	R13	162.0	91.6	90.4	35.4	29.2	53.9	1.213	1.231
134	S _a 9	R14	162.4	92.8	91.6	35.8	31.4	55.0	1.213	1.236
135	S _a 9	R15	162.2	92.6	92.4	37.4	32.4	54.3	1.213	1.243
136	S _a 10	R1	162.6	95.2	93.2	37.6	33.6	54.7	1.213	1.290
137	S _a 10	R2	157.2	99.8	98.8	37.8	33.2	60.2	1.213	1.271
138	S _a 10	R3	163.9	96.6	95.0	37.8	33.8	56.4	1.213	1.274
139	S _a 10	R4	166.8	97.8	93.2	36.2	32.6	55.8	1.213	1.230
140	S _a 10	R5	162.6	97.2	95.2	38.4	33.2	55.8	1.213	1.269
141	S _a 10	R6	162.2	95.8	93.6	39.2	34.2	53.4	1.213	1.285
142	S _a 10	R7	157.6	101.2	97.8	35.6	32.4	61.3	1.213	1.255
143	S _a 10	R8	161.2	94.8	93.0	34.8	30.0	57.3	1.213	1.228
144	S _a 10	R9	163.8	94.6	92.6	37.2	32.4	54.4	1.213	1.238
145	S _a 10	R10	159.6	92.4	90.0	34.6	29.8	54.4	1.213	1.229
146	S _a 10	R11	160.2	93.4	91.8	32.2	29.2	58.9	1.213	1.239
147	S _a 10	R12	162.2	93.6	91.2	34.4	29.4	55.7	1.213	1.231
148	S _a 10	R13	159.2	95.6	94.2	35.2	29.4	58.0	1.213	1.231
149	S _a 10	R14	156.4	97.6	96.4	34.8	30.4	60.8	1.213	1.236

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C°)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
150	S _a 10	R15	162.8	94.8	92.8	36.2	31.0	55.6	1.213	1.243
151	S _a 11	R1	174.8	81.8	78.8	32.8	32.0	45.5	1.213	1.290
152	S _a 11	R2	158.8	98.0	95.8	35.6	33.6	59.6	1.213	1.271
153	S _a 11	R3	173.2	83.2	80.4	36.0	32.8	43.5	1.213	1.274
154	S _a 11	R4	162.2	94.8	90.6	37.8	33.8	51.6	1.213	1.230
155	S _a 11	R5	174.6	84.2	83.6	36.6	33.4	46.5	1.213	1.269
156	S _a 11	R6	177.2	85.0	82.4	35.2	32.6	46.5	1.213	1.285
157	S _a 11	R7	163.4	95.2	93.6	36.0	33.4	57.0	1.213	1.255
158	S _a 11	R8	160.6	98.2	96.6	37.6	32.0	58.0	1.213	1.228
159	S _a 11	R9	172.6	88.6	85.8	35.8	32.8	49.2	1.213	1.238
160	S _a 11	R10	156.6	95.2	94.2	34.2	29.2	59.1	1.213	1.229
161	S _a 11	R11	157.8	95.6	92.4	33.6	29.8	57.8	1.213	1.239
162	S _a 11	R12	173.6	84.6	82.2	33.2	30.2	48.2	1.213	1.231
163	S _a 11	R13	172.6	82.4	79.8	32.4	27.6	46.3	1.213	1.231
164	S _a 11	R14	175.4	80.4	76.6	33.8	30.2	41.7	1.213	1.236
165	S _a 11	R15	169.2	84.2	81.4	34.2	30.6	46.3	1.213	1.243
166	S _a 12	R1	162.0	94.6	93.2	36.8	31.4	55.4	1.214	1.290
167	S _a 12	R2	164.4	96.0	93.8	35.4	29.2	57.2	1.214	1.271
168	S _a 12	R3	167.4	91.2	88.8	35.2	32.6	52.9	1.214	1.274
169	S _a 12	R4	164.4	89.8	89.2	36.8	33.4	51.8	1.214	1.230
170	S _a 12	R5	162.8	91.6	90.0	39.6	34.6	49.5	1.214	1.269
171	S _a 12	R6	164.4	97.4	94.4	39.2	34.0	54.0	1.214	1.285
172	S _a 12	R7	181.6	80.2	71.2	35.2	32.6	34.3	1.214	1.255
173	S _a 12	R8	169.4	90.0	87.6	36.2	32.8	50.6	1.214	1.228
174	S _a 12	R9	161.6	93.8	91.2	35.2	30.4	54.9	1.214	1.238
175	S _a 12	R10	161.2	96.4	94.8	36.8	33.4	57.3	1.214	1.229
176	S _a 12	R11	165.4	90.2	88.6	33.2	30.4	54.8	1.214	1.239
177	S _a 12	R12	172.8	84.4	81.8	33.2	30.0	47.8	1.214	1.231
178	S _a 12	R13	171.2	83.4	80.0	32.6	28.4	46.3	1.214	1.231
179	S _a 12	R14	168.6	86.4	84.2	34.0	29.8	49.3	1.214	1.236

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C°)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
180	S _a 12	R15	166.2	89.2	87.4	34.0	31.0	52.7	1.214	1.243
181	S _a 13	R1	173.0	84.2	83.8	35.8	31.4	47.3	1.213	1.290
182	S _a 13	R2	153.0	102.4	101.2	34.2	30.6	66.3	1.213	1.271
183	S _a 13	R3	151.6	101.6	99.8	35.6	30.4	63.2	1.213	1.274
184	S _a 13	R4	155.2	101.6	99.6	37.6	32.6	61.0	1.213	1.230
185	S _a 13	R5	169.8	86.8	86.2	37.2	32.8	48.3	1.213	1.269
186	S _a 13	R6	171.8	86.6	84.8	35.6	32.4	48.5	1.213	1.285
187	S _a 13	R7	172.8	87.2	86.0	37.4	32.8	47.8	1.213	1.255
188	S _a 13	R8	171.8	89.6	88.6	36.6	32.8	51.3	1.213	1.228
189	S _a 13	R9	175.4	85.6	82.8	35.8	32.4	46.1	1.213	1.238
190	S _a 13	R10	167.6	84.4	82.2	35.4	32.4	46.1	1.213	1.229
191	S _a 13	R11	169.2	89.6	88.2	35.4	32.6	52.2	1.213	1.239
192	S _a 13	R12	151.8	101.4	99.2	34.2	30.6	64.2	1.213	1.231
193	S _a 13	R13	152.2	102.4	101.4	34.8	30.0	65.8	1.213	1.231
194	S _a 13	R14	163.8	87.4	86.0	35.8	30.8	49.3	1.213	1.236
195	S _a 13	R15	176.2	84.8	82.8	36.4	32.8	45.6	1.213	1.243
196	S _a 14	R1	186.8	66.2	64.8	33.4	30.4	30.8	1.213	1.290
197	S _a 14	R2	168.8	88.2	85.6	35.4	30.2	49.1	1.213	1.271
198	S _a 14	R3	191.2	63.8	62.6	29.2	26.8	32.9	1.213	1.274
199	S _a 14	R4	187.4	66.8	65.4	30.6	28.8	34.3	1.213	1.230
200	S _a 14	R5	168.4	89.4	86.8	35.0	32.4	51.1	1.213	1.269
201	S _a 14	R6	190.8	66.8	64.8	33.8	31.8	30.4	1.213	1.285
202	S _a 14	R7	190.4	69.4	67.4	34.2	32.4	32.7	1.213	1.255
203	S _a 14	R8	191.8	68.2	67.8	35.2	33.2	32.3	1.213	1.228
204	S _a 14	R9	190.6	69.6	67.6	35.8	32.2	31.0	1.213	1.238
205	S _a 14	R10	191.8	68.2	67.0	36.0	32.2	30.3	1.213	1.229
206	S _a 14	R11	184.0	72.4	69.4	33.4	31.0	35.2	1.213	1.239
207	S _a 14	R12	167.2	90.6	87.6	37.0	32.4	49.5	1.213	1.231
208	S _a 14	R13	189.8	67.4	66.4	32.8	31.0	33.2	1.213	1.231
209	S _a 14	R14	189.4	65.6	63.4	31.6	28.4	31.0	1.213	1.236

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)						SRC	
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
210	S _a 14	R15	168.8	86.6	83.8	33.0	29.2	49.9	1.213	1.243
211	S _a 15	R1	159.2	96.6	93.4	35.2	31.0	57.1	1.213	1.290
212	S _a 15	R2	160.6	98.0	95.2	36.2	32.0	58.0	1.213	1.271
213	S _a 15	R3	160.8	97.8	97.2	36.6	31.6	59.8	1.213	1.274
214	S _a 15	R4	160.2	95.4	94.2	32.6	29.8	61.0	1.213	1.230
215	S _a 15	R5	159.4	97.6	93.8	37.2	30.4	55.1	1.213	1.269
216	S _a 15	R6	158.2	96.6	96.4	37.6	32.6	58.1	1.213	1.285
217	S _a 15	R7	159.6	98.8	96.6	38.2	33.2	57.4	1.213	1.255
218	S _a 15	R8	160.8	95.4	93.8	36.6	33.2	56.5	1.213	1.228
219	S _a 15	R9	161.2	98.8	94.8	36.6	33.0	57.1	1.213	1.238
220	S _a 15	R10	160.2	99.6	98.2	38.4	34.4	59.0	1.213	1.229
221	S _a 15	R11	156.4	102.4	101.0	40.0	32.6	59.7	1.213	1.239
222	S _a 15	R12	161.8	97.0	95.6	38.4	34.4	56.4	1.213	1.231
223	S _a 15	R13	161.4	93.8	92.2	36.4	31.8	54.9	1.213	1.231
224	S _a 15	R14	160.0	93.8	91.6	33.6	28.4	56.9	1.213	1.236
225	S _a 15	R15	159.4	93.2	91.4	33.8	29.8	56.8	1.213	1.243

ตารางผนวกที่ ก4 ผลการทดสอบกรณีที่ 4 เหล็ก กับ อิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R'$) โดยวาง
ให้แนวการเดินดอกรัดให้ตึงฉากกัน

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
1	S _a 1	R1	162.2	96.8	94.6	39.6	36.4	54.2	1.243	1.290
2	S _a 1	R2	161.6	93.4	92.2	35.2	30.6	56.2	1.243	1.271
3	S _a 1	R3	148.8	100.6	98.6	40.6	36.6	57.1	1.243	1.274
4	S _a 1	R4	164.2	93.6	91.6	36.2	32.8	54.6	1.243	1.230
5	S _a 1	R5	162.8	95.0	92.6	36.4	32.2	55.3	1.243	1.269
6	S _a 1	R6	155.8	92.2	92.0	36.4	32.6	55.0	1.243	1.285
7	S _a 1	R7	165.8	91.0	89.8	38.2	33.6	50.8	1.243	1.255
8	S _a 1	R8	161.8	96.0	94.8	38.2	34.6	55.9	1.243	1.228
9	S _a 1	R9	164.2	91.6	89.6	34.4	31.0	54.4	1.243	1.238
10	S _a 1	R10	165.2	91.8	88.8	34.2	31.4	53.8	1.243	1.229
11	S _a 1	R11	164.6	89.4	87.4	36.6	32.4	49.9	1.243	1.239
12	S _a 1	R12	168.0	91.4	89.2	36.4	34.0	52.1	1.243	1.231
13	S _a 1	R13	162.8	91.4	90.4	35.6	31.6	54.1	1.243	1.231
14	S _a 1	R14	161.6	91.4	90.8	37.8	31.4	52.0	1.243	1.236
15	S _a 1	R15	163.8	89.2	87.4	36.6	30.6	49.7	1.243	1.243
16	S _a 2	R1	164.0	90.8	85.0	33.8	31.2	50.0	1.245	1.290
17	S _a 2	R2	174.2	85.8	84.6	35.8	33.6	48.3	1.245	1.271
18	S _a 2	R3	166.8	86.6	85.8	31.6	30.6	53.9	1.245	1.274
19	S _a 2	R4	164.6	91.6	86.4	31.2	29.4	54.2	1.245	1.230
20	S _a 2	R5	166.4	89.6	85.4	36.6	32.2	47.6	1.245	1.269
21	S _a 2	R6	164.8	95.4	91.2	35.8	32.6	54.3	1.245	1.285
22	S _a 2	R7	164.4	91.2	86.4	35.6	32.4	49.7	1.245	1.255
23	S _a 2	R8	160.8	95.0	93.8	37.2	33.6	55.9	1.245	1.228
24	S _a 2	R9	169.4	91.4	88.2	33.0	31.0	54.5	1.245	1.238
25	S _a 2	R10	162.0	87.2	87.6	33.2	30.4	54.1	1.245	1.229
26	S _a 2	R11	165.0	91.6	89.0	33.6	31.8	54.8	1.245	1.239
27	S _a 2	R12	165.4	91.2	86.4	34.8	31.8	50.5	1.245	1.231
28	S _a 2	R13	169.6	88.6	86.4	35.0	32.2	50.7	1.245	1.231
29	S _a 2	R14	168.4	86.4	80.6	33.2	31.0	46.3	1.245	1.236

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C°)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
30	S _a 2	R15	171.8	82.6	79.6	34.0	31.2	44.8	1.245	1.243
31	S _a 3	R1	165.8	87.8	85.8	35.6	30.4	49.2	1.224	1.290
32	S _a 3	R2	165.0	88.4	86.2	33.6	29.6	51.7	1.224	1.271
33	S _a 3	R3	172.2	77.6	75.6	33.4	29.4	41.3	1.224	1.274
34	S _a 3	R4	165.6	91.6	88.8	33.4	30.6	54.6	1.224	1.230
35	S _a 3	R5	168.2	91.2	88.2	36.6	31.2	50.4	1.224	1.269
36	S _a 3	R6	166.8	92.6	87.6	36.4	32.4	49.9	1.224	1.285
37	S _a 3	R7	165.8	91.2	87.8	37.4	33.2	49.3	1.224	1.255
38	S _a 3	R8	164.6	90.2	88.2	36.2	32.8	51.2	1.224	1.228
39	S _a 3	R9	163.8	89.8	88.6	34.6	31.2	53.3	1.224	1.238
40	S _a 3	R10	163.8	90.6	88.2	33.4	32.4	54.3	1.224	1.229
41	S _a 3	R11	167.8	88.2	85.4	33.6	30.4	50.9	1.224	1.239
42	S _a 3	R12	166.0	90.0	81.8	35.2	30.8	44.8	1.224	1.231
43	S _a 3	R13	167.2	89.2	86.8	33.8	31.8	52.4	1.224	1.231
44	S _a 3	R14	166.0	91.2	87.6	36.2	33.4	50.5	1.224	1.236
45	S _a 3	R15	156.4	93.8	91.8	38.2	33.2	52.6	1.224	1.243
46	S _a 4	R1	172.0	84.2	82.0	33.6	31.2	47.7	1.220	1.290
47	S _a 4	R2	179.6	71.8	71.2	33.2	29.8	37.4	1.220	1.271
48	S _a 4	R3	178.6	73.6	72.8	32.8	29.6	39.4	1.220	1.274
49	S _a 4	R4	176.6	80.8	77.2	31.6	29.6	44.8	1.220	1.230
50	S _a 4	R5	174.2	83.4	81.8	34.2	29.6	46.7	1.220	1.269
51	S _a 4	R6	172.4	82.6	81.6	33.2	30.6	47.9	1.220	1.285
52	S _a 4	R7	176.6	79.8	78.2	35.4	32.2	42.1	1.220	1.255
53	S _a 4	R8	176.4	79.0	77.8	34.6	31.4	42.6	1.220	1.228
54	S _a 4	R9	168.6	83.6	82.0	34.6	31.2	46.7	1.220	1.238
55	S _a 4	R10	172.6	81.6	80.0	32.6	29.8	46.8	1.220	1.229
56	S _a 4	R11	172.4	83.6	81.2	32.4	30.4	48.2	1.220	1.239
57	S _a 4	R12	177.6	77.8	75.8	34.8	30.8	40.1	1.220	1.231
58	S _a 4	R13	172.2	83.0	81.4	35.4	30.8	45.1	1.220	1.231
59	S _a 4	R14	174.4	82.2	81.4	34.6	31.0	46.2	1.220	1.236

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
60	S _a 4	R15	167.4	85.2	83.4	36.8	33.6	45.9	1.220	1.243
61	S _a 5	R1	170.6	83.0	81.6	37.4	34.5	43.6	1.217	1.290
62	S _a 5	R2	181.6	70.6	69.4	33.6	31.2	35.3	1.217	1.271
63	S _a 5	R3	180.8	72.8	71.2	34.4	31.2	36.1	1.217	1.274
64	S _a 5	R4	179.4	73.8	72.4	32.6	30.2	39.3	1.217	1.230
65	S _a 5	R5	179.0	79.2	77.8	35.8	33.0	41.4	1.217	1.269
66	S _a 5	R6	180.6	77.8	75.6	32.4	30.0	42.5	1.217	1.285
67	S _a 5	R7	176.2	79.6	76.2	34.6	30.8	40.6	1.217	1.255
68	S _a 5	R8	188.2	76.8	74.6	35.6	30.8	38.0	1.217	1.228
69	S _a 5	R9	177.2	77.6	75.2	34.4	31.2	40.0	1.217	1.238
70	S _a 5	R10	169.6	82.4	81.4	35.2	31.6	45.5	1.217	1.229
71	S _a 5	R11	168.2	82.2	80.8	34.8	31.4	45.3	1.217	1.239
72	S _a 5	R12	178.8	78.6	77.2	34.4	30.6	42.1	1.217	1.231
73	S _a 5	R13	171.8	81.4	79.6	37.2	31.4	41.3	1.217	1.231
74	S _a 5	R14	178.2	77.6	75.2	31.8	31.0	42.9	1.217	1.236
75	S _a 5	R15	176.4	76.8	74.4	33.8	30.4	39.8	1.217	1.243
76	S _a 6	R1	153.4	100.4	97.2	35.2	30.8	60.9	1.213	1.290
77	S _a 6	R2	147.8	106.4	103.8	39.8	34.4	62.9	1.213	1.271
78	S _a 6	R3	159.6	93.4	91.2	37.6	32.2	52.5	1.213	1.274
79	S _a 6	R4	160.8	92.2	90.0	34.8	31.0	54.3	1.213	1.230
80	S _a 6	R5	155.4	93.6	92.4	35.6	30.2	55.9	1.213	1.269
81	S _a 6	R6	165.6	90.4	87.4	35.4	29.8	50.8	1.213	1.285
82	S _a 6	R7	158.6	99.4	96.4	35.8	31.0	59.5	1.213	1.255
83	S _a 6	R8	159.6	97.8	92.8	36.6	30.6	54.6	1.213	1.228
84	S _a 6	R9	158.4	98.6	95.6	37.2	33.0	57.4	1.213	1.238
85	S _a 6	R10	155.2	103.2	99.4	40.6	33.0	57.2	1.213	1.229
86	S _a 6	R11	158.0	96.2	94.8	37.0	31.8	56.9	1.213	1.239
87	S _a 6	R12	153.8	101.6	98.4	36.8	34.0	60.7	1.213	1.231
88	S _a 6	R13	153.4	102.7	99.2	35.2	32.2	63.1	1.213	1.231
89	S _a 6	R14	153.6	102.2	98.2	35.2	31.8	61.9	1.213	1.236

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
90	S _a 6	R15	158.0	97.2	93.6	35.6	31.8	56.9	1.213	1.243
91	S _a 7	R1	157.6	96.4	92.8	34.8	30.8	56.9	1.214	1.290
92	S _a 7	R2	155.6	97.8	95.6	37.2	31.6	57.3	1.214	1.271
93	S _a 7	R3	155.2	101.0	99.6	39.2	35.2	59.6	1.214	1.274
94	S _a 7	R4	170.0	84.6	83.4	34.2	31.6	48.7	1.214	1.230
95	S _a 7	R5	170.4	82.4	80.8	34.6	31.4	45.5	1.214	1.269
96	S _a 7	R6	171.4	83.8	81.4	36.0	31.4	44.4	1.214	1.285
97	S _a 7	R7	164.2	93.8	93.2	38.6	34.2	53.9	1.214	1.255
98	S _a 7	R8	167.4	88.6	87.6	33.8	29.6	53.1	1.214	1.228
99	S _a 7	R9	167.8	88.8	87.0	34.8	30.4	51.3	1.214	1.238
100	S _a 7	R10	164.6	93.8	91.4	36.0	32.4	54.5	1.214	1.229
101	S _a 7	R11	161.2	93.4	91.6	37.8	32.8	52.8	1.214	1.239
102	S _a 7	R12	169.0	87.2	85.6	37.4	32.2	47.2	1.214	1.231
103	S _a 7	R13	156.8	97.2	94.8	36.4	31.0	57.3	1.214	1.231
104	S _a 7	R14	155.6	98.6	96.4	36.4	31.0	58.9	1.214	1.236
105	S _a 7	R15	160.6	93.4	90.8	35.6	32.0	54.3	1.214	1.243
106	S _a 8	R1	163.2	90.2	88.4	37.6	31.2	49.6	1.213	1.290
107	S _a 8	R2	168.0	90.0	86.8	34.8	30.8	51.0	1.213	1.271
108	S _a 8	R3	166.6	89.0	86.4	32.2	31.2	53.7	1.213	1.274
109	S _a 8	R4	167.8	89.4	87.4	34.8	32.8	52.0	1.213	1.230
110	S _a 8	R5	168.4	86.2	84.4	35.2	32.0	48.5	1.213	1.269
111	S _a 8	R6	168.6	86.0	85.0	34.0	31.8	50.5	1.213	1.285
112	S _a 8	R7	160.4	91.6	91.0	35.6	32.8	54.9	1.213	1.255
113	S _a 8	R8	170.4	94.6	91.8	36.4	33.0	54.5	1.213	1.228
114	S _a 8	R9	167.4	90.4	89.6	33.4	29.8	55.6	1.213	1.238
115	S _a 8	R10	168.8	89.2	85.8	32.4	29.8	52.5	1.213	1.229
116	S _a 8	R11	169.2	87.6	86.4	34.8	31.2	50.9	1.213	1.239
117	S _a 8	R12	165.4	86.8	85.8	38.0	31.4	46.7	1.213	1.231
118	S _a 8	R13	167.2	88.6	87.0	36.2	31.8	49.9	1.213	1.231
119	S _a 8	R14	164.6	88.6	87.4	34.2	30.0	52.4	1.213	1.236

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
120	S _a 8	R15	166.4	88.4	86.2	33.6	30.8	51.9	1.213	1.243
121	S _a 9	R1	158.4	94.6	92.4	36.6	30.8	54.7	1.213	1.290
122	S _a 9	R2	158.6	93.4	91.2	36.8	30.6	53.2	1.213	1.271
123	S _a 9	R3	159.4	93.2	90.0	36.8	31.4	52.0	1.213	1.274
124	S _a 9	R4	157.4	93.8	92.2	33.6	30.6	57.9	1.213	1.230
125	S _a 9	R5	160.4	94.4	92.0	37.2	33.8	54.0	1.213	1.269
126	S _a 9	R6	157.6	94.2	92.8	37.6	32.8	54.3	1.213	1.285
127	S _a 9	R7	158.4	93.2	92.2	36.6	32.2	54.8	1.213	1.255
128	S _a 9	R8	161.6	92.4	91.2	36.2	33.2	54.4	1.213	1.228
129	S _a 9	R9	162.8	92.8	90.2	37.8	32.2	51.2	1.213	1.238
130	S _a 9	R10	161.6	92.6	91.4	34.4	31.2	56.4	1.213	1.229
131	S _a 9	R11	161.4	92.2	90.6	33.6	30.4	56.3	1.213	1.239
132	S _a 9	R12	158.8	94.4	92.2	36.8	31.8	54.4	1.213	1.231
133	S _a 9	R13	159.4	94.6	91.8	38.0	32.2	52.6	1.213	1.231
134	S _a 9	R14	155.2	97.6	96.2	39.6	33.2	55.5	1.213	1.236
135	S _a 9	R15	157.8	92.6	91.2	34.2	30.4	56.3	1.213	1.243
136	S _a 10	R1	157.4	95.6	93.4	36.6	30.6	55.6	1.213	1.290
137	S _a 10	R2	159.8	98.6	97.2	35.8	30.8	60.5	1.213	1.271
138	S _a 10	R3	159.0	98.2	95.0	36.2	32.0	57.7	1.213	1.274
139	S _a 10	R4	154.6	98.8	96.4	35.0	31.4	60.5	1.213	1.230
140	S _a 10	R5	157.6	96.4	94.2	35.2	31.6	58.2	1.213	1.269
141	S _a 10	R6	158.4	96.4	94.2	37.2	32.6	56.0	1.213	1.285
142	S _a 10	R7	160.6	92.4	90.2	35.2	31.6	54.2	1.213	1.255
143	S _a 10	R8	158.6	93.0	92.4	37.0	30.4	54.4	1.213	1.228
144	S _a 10	R9	161.4	93.2	92.0	35.6	32.0	55.7	1.213	1.238
145	S _a 10	R10	157.6	98.8	97.6	36.8	32.2	60.0	1.213	1.229
146	S _a 10	R11	159.0	97.2	95.6	34.0	30.6	60.9	1.213	1.239
147	S _a 10	R12	157.4	96.8	95.4	36.2	31.2	58.3	1.213	1.231
148	S _a 10	R13	160.2	97.0	93.4	38.6	31.6	53.3	1.213	1.231
149	S _a 10	R14	157.8	97.8	95.8	37.2	31.6	57.5	1.213	1.236

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C°)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
150	S _a 10	R15	160.8	98.4	96.2	39.6	33.2	55.4	1.213	1.243
151	S _a 11	R1	158.2	96.2	93.4	37.8	33.2	54.5	1.213	1.290
152	S _a 11	R2	168.2	84.8	81.4	35.0	30.2	45.2	1.213	1.271
153	S _a 11	R3	160.0	89.6	86.2	35.2	30.8	49.9	1.213	1.274
154	S _a 11	R4	177.8	85.0	81.2	33.6	31.0	46.7	1.213	1.230
155	S _a 11	R5	163.4	90.2	86.6	33.4	30.4	52.3	1.213	1.269
156	S _a 11	R6	172.6	83.4	80.8	35.6	33.6	44.5	1.213	1.285
157	S _a 11	R7	166.0	87.0	85.2	36.2	32.2	48.2	1.213	1.255
158	S _a 11	R8	164.8	87.4	85.0	35.2	30.4	48.8	1.213	1.228
159	S _a 11	R9	160.8	91.2	88.8	36.0	31.2	51.8	1.213	1.238
160	S _a 11	R10	161.4	93.0	90.8	36.2	31.8	53.7	1.213	1.229
161	S _a 11	R11	157.2	98.8	95.2	38.6	31.2	55.0	1.213	1.239
162	S _a 11	R12	173.2	84.6	80.4	34.2	30.4	45.1	1.213	1.231
163	S _a 11	R13	175.0	80.0	78.2	35.2	30.2	42.0	1.213	1.231
164	S _a 11	R14	169.4	86.8	84.2	36.6	31.8	46.5	1.213	1.236
165	S _a 11	R15	167.8	86.6	83.8	36.6	32.2	46.2	1.213	1.243
166	S _a 12	R1	162.4	95.2	91.2	38.4	31.4	51.2	1.214	1.290
167	S _a 12	R2	159.0	95.4	92.8	37.8	34.0	54.1	1.214	1.271
168	S _a 12	R3	170.8	84.2	82.6	34.2	30.4	47.6	1.214	1.274
169	S _a 12	R4	162.0	88.8	85.4	33.2	30.4	51.3	1.214	1.230
170	S _a 12	R5	161.0	93.4	91.8	37.4	33.4	53.6	1.214	1.269
171	S _a 12	R6	162.4	92.2	89.2	36.2	33.2	52.1	1.214	1.285
172	S _a 12	R7	158.8	94.2	92.8	36.4	31.4	55.5	1.214	1.255
173	S _a 12	R8	162.4	92.8	90.4	36.2	33.2	53.4	1.214	1.228
174	S _a 12	R9	170.6	82.8	79.8	34.4	31.4	44.5	1.214	1.238
175	S _a 12	R10	168.8	85.0	82.4	33.0	30.6	48.7	1.214	1.229
176	S _a 12	R11	165.2	88.8	85.2	35.8	31.6	48.3	1.214	1.239
177	S _a 12	R12	167.6	89.8	87.6	37.2	32.8	49.5	1.214	1.231
178	S _a 12	R13	171.8	86.4	84.4	34.0	30.8	49.7	1.214	1.231
179	S _a 12	R14	165.8	90.4	87.8	36.2	31.2	50.5	1.214	1.236

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C°)					SRC		
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
180	S _a 12	R15	158.8	95.8	92.2	38.0	32.6	52.9	1.214	1.243
181	S _a 13	R1	167.6	91.2	87.0	36.6	31.8	49.1	1.213	1.290
182	S _a 13	R2	166.2	89.8	86.2	35.6	31.4	49.5	1.213	1.271
183	S _a 13	R3	163.4	90.2	89.2	37.0	32.8	51.5	1.213	1.274
184	S _a 13	R4	165.8	88.4	87.0	33.4	30.8	53.0	1.213	1.230
185	S _a 13	R5	170.8	87.8	86.6	35.8	31.4	50.0	1.213	1.269
186	S _a 13	R6	169.8	89.6	87.6	35.8	32.8	51.1	1.213	1.285
187	S _a 13	R7	169.2	85.2	83.0	34.6	30.8	47.5	1.213	1.255
188	S _a 13	R8	167.4	88.4	87.4	36.2	31.6	50.4	1.213	1.228
189	S _a 13	R9	162.8	84.2	83.2	34.0	31.6	48.7	1.213	1.238
190	S _a 13	R10	163.8	87.4	86.4	34.4	30.4	51.3	1.213	1.229
191	S _a 13	R11	167.6	84.0	82.8	34.8	30.6	47.2	1.213	1.239
192	S _a 13	R12	168.2	86.8	84.4	35.4	30.6	48.0	1.213	1.231
193	S _a 13	R13	168.2	89.6	89.0	34.6	31.2	53.8	1.213	1.231
194	S _a 13	R14	158.6	98.4	96.6	34.4	30.8	61.4	1.213	1.236
195	S _a 13	R15	169.2	86.8	84.8	36.6	32.2	47.3	1.213	1.243
196	S _a 14	R1	168.4	87.8	86.0	37.6	31.2	47.2	1.213	1.290
197	S _a 14	R2	168.6	88.2	84.2	35.4	31.4	47.7	1.213	1.271
198	S _a 14	R3	161.4	92.8	89.8	36.8	31.8	51.9	1.213	1.274
199	S _a 14	R4	160.4	95.2	92.2	34.8	32.2	56.6	1.213	1.230
200	S _a 14	R5	167.4	89.6	86.4	33.8	30.4	51.7	1.213	1.269
201	S _a 14	R6	162.6	91.2	88.6	33.2	30.8	54.7	1.213	1.285
202	S _a 14	R7	163.2	94.2	90.8	37.4	32.6	52.2	1.213	1.255
203	S _a 14	R8	162.6	90.6	88.0	36.6	32.8	50.5	1.213	1.228
204	S _a 14	R9	163.6	90.8	89.2	35.8	33.6	52.9	1.213	1.238
205	S _a 14	R10	174.2	77.8	75.8	34.4	31.4	40.7	1.213	1.229
206	S _a 14	R11	164.2	82.9	81.2	34.6	30.6	45.8	1.213	1.239
207	S _a 14	R12	168.4	85.4	83.8	37.4	31.4	45.3	1.213	1.231
208	S _a 14	R13	172.2	82.6	80.2	34.4	31.2	45.0	1.213	1.231
209	S _a 14	R14	168.2	90.6	87.8	37.2	31.8	49.4	1.213	1.236

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

No	code A	code B	Temperature (C ^o)						SRC	
			Heater	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	ΔT_{Gap}	code A	code B
210	S _a 14	R15	172.6	90.6	88.8	37.8	32.2	49.9	1.213	1.243
211	S _a 15	R1	152.8	101.4	99.4	38.6	33.2	59.7	1.213	1.290
212	S _a 15	R2	159.6	97.8	96.2	37.6	32.2	57.6	1.213	1.271
213	S _a 15	R3	156.8	99.4	96.2	38.8	33.6	56.2	1.213	1.274
214	S _a 15	R4	158.4	97.4	94.2	35.8	31.2	57.3	1.213	1.230
215	S _a 15	R5	156.2	96.4	94.6	35.8	32.2	58.0	1.213	1.269
216	S _a 15	R6	157.0	97.2	95.2	37.8	32.6	56.4	1.213	1.285
217	S _a 15	R7	156.8	97.6	94.8	36.2	32.6	57.7	1.213	1.255
218	S _a 15	R8	157.2	99.6	97.4	36.2	32.2	60.3	1.213	1.228
219	S _a 15	R9	155.0	100.0	99.4	38.8	32.6	59.6	1.213	1.238
220	S _a 15	R10	150.6	101.4	100.2	38.4	33.4	60.9	1.213	1.229
221	S _a 15	R11	161.2	89.0	87.6	35.2	31.8	51.7	1.213	1.239
222	S _a 15	R12	158.0	93.2	91.4	36.2	31.6	54.3	1.213	1.231
223	S _a 15	R13	143.4	99.4	99.6	38.2	32.0	60.5	1.213	1.231
224	S _a 15	R14	157.6	93.2	92.6	37.2	31.4	54.5	1.213	1.236
225	S _a 15	R15	156.8	97.6	95.0	38.0	31.4	55.7	1.213	1.243

ภาคผนวก ข

รายละเอียดข้อมูลด้านเทคนิคของวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

BANGKOK SPECIAL STEEL CO., LTD.

S50C เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (Medium Carbon Steel)

คุณสมบัติ เหล็กคาร์บอนปานกลาง คุณสมบัติดีทั้ง ทนทานการเสียดสีได้ดี มีความแข็งแรงสูง เหมาะสำหรับทำชิ้นส่วนพื้นฐาน และอุปกรณ์ หรือโครงสร้างของเครื่องมือและงานทั่ว ๆ ไป

เทียบเกรด	JIS	DIN	AISI	ASSAB	HITACHI	NIPPON KOSHUHA	
Equivalent	S50C	CK50	C1050	760	S50C	S50C	
ส่วนผสม (%)	C		Si		Mn	P	S
Composition	0.47 - 0.53		0.15 - 0.35		0.60 - 0.90	0.030 max.	0.035 max.
การอบชุบ (°C)	Normalizing		อบอ่อน (Annealing)		ชุบแข็ง (Hardening)		อบคืนไฟ (Tempering)
Heat treatment	810 - 860 (Air cooling)		800 (Furnace cooling)		810 - 860 (Water quenching)		550 - 650 (Rapid quenching)
สมบัติเชิงกล	ความทนต่อการยืดตัว		ความทนต่อแรงดึงสูงสุด		การยืดตัวก่อนขาด	การลดขนาดก่อนขาด	ความทนแรงกระแทกสูงสุด
Mechanical prop.	(Yield Strength, kgf/mm ²)		(Tensile Strength, kgf/mm ²)		(Elongation, %)	(Reduction Of Area, %)	(Impact Energy, kgfm/cm ²)
สภาพปกติ	37 min.		62 min.		18 min.	-	-
หลังชุบ	55 min.		75 min.		15 min.	40 min.	7 min.
ความแข็ง	สภาพปกติ (Normalized)				หลังการอบชุบ (Tempered)		
Hardness	179 - 235 HB (8.0 - 21.7 HRC)				212 - 277 HB (16.0 - 28.8 HRC)		

Stock Size

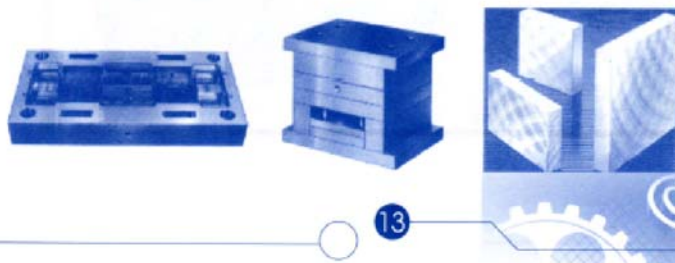
Square Bar  From JAPAN
เหล็กสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดตั้งแต่ 9 มม. ถึง 130 มม. (Size 9 - 130 mm.)

Octagon Bar  From JAPAN
เหล็กแปดเหลี่ยม ขนาดตั้งแต่ 16 มม. ถึง 32 มม. (Size 16 - 32 mm.)

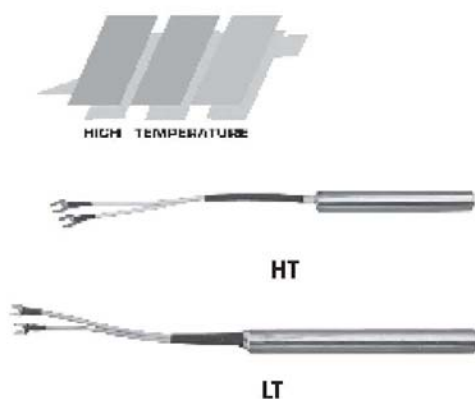
Flat Bar  From JAPAN, GERMANY
เหล็กแบน ความหนาตั้งแต่ 6 มม. ถึง 610 มม. (Thickness 6 - 610 mm.)
ความกว้างตั้งแต่ 25 มม. ถึง 1,840 มม. (Width 25 - 1,840 mm.)

Plate  From JAPAN, CHINA, KOREA
เหล็กแผ่น ความหนาตั้งแต่ 1.6 มม. ถึง 610 มม. (Thickness 1.6 - 610 mm.)

ตัวอย่างการนำไปใช้งาน (Application)



ภาพผนวกที่ ข2 เหล็กกล้า S50C



รุ่น HT (ความร้อนสูง)

เป็นคาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์ทนอุณหภูมิสูง มีค่า Specific load สูง ประกอบด้วยปลอกสแตนเลส (AISI321), แกนพันขดลวดทำจากแมกนีเซียมออกไซด์อัดขึ้นรูปเป็นแท่ง, ขดลวดความร้อน Ni-Cr ถูกพันด้วยฉนวนแมกนีเซียมออกไซด์ อัดแน่นอยู่รอบนอกอีกที, ฮีตเตอร์กับตัวปลอกวางห่างกันเล็กน้อย ช่วยให้การส่งผ่านความร้อนทำได้ดี และยังช่วยให้อายุการใช้งานของฮีตเตอร์ยาวนาน

รุ่น LT (ความร้อนปานกลาง)

เป็นคาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์ที่มีค่า Specific load ต่ำกว่ารุ่น HT ตัวฮีตเตอร์ประกอบด้วยปลอกสแตนเลส (AISI321), ขดลวดความร้อน Ni-Cr พันอยู่บนแกนเซรามิกทนความร้อนสูง และอัดแน่นด้วยผงแมกนีเซียมออกไซด์ เพื่อให้การถ่ายเทความร้อนเป็นไปด้วยดี

คุณสมบัติ

กำลังวัตต์ที่ผลิตได้	-10~+50% ของค่ากำลังวัตต์ตามอัตรา
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง	±0.1 มม. (ที่ผลิตได้)
ความยาวที่ผลิตได้	±2%
การทดสอบฉนวน	ทดสอบด้วยแรงดันไฟ 1440V เป็นเวลา 1 นาที
ความยาวสายไฟ	250 มม. (10 นิ้ว)

ขนาดและปรอท (หน่วย : มม.)



ประโยชน์การนำไปใช้งาน

- ใช้ในการอุ่น และให้ความร้อนกับแม่พิมพ์โลหะ, ชิ้นงานเหล็ก, เครื่องบ่มทอง, เครื่องรีดถุงพลาสติก, การพิมพ์หมึก
- ใช้ในการอุ่นหรือต้มน้ำ, ต้มสารเคมี, กาวในถาดหรือท่อได้

CATRIDGE HEATER

ฮีตเตอร์คาร์ทริดจ์

MODEL : HT, LT SERIES

คุณสมบัติ:

- ให้ความร้อนกับชิ้นงานโดยการนำความร้อน
- ให้ความร้อนคงที่และสม่ำเสมอ
- ราคาประหยัด อายุการใช้งานยาวนาน
- มีหลากหลายขนาดความยาว และวัตต์ให้เลือกใช้งาน
- เหมาะสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ

ตารางสเปก

รุ่น	ขนาดความยาว (มม.)		วัตต์ (W)	โวลต์ (VAC)
	Ø ปลอก	ความยาว L		
HT30585	6.5	35	130	220
HT30586		50	185	220
HT30587		65	220	220
HT30588		80	270	220
HT30589		95	320	220
HT30590	10	35	140	220
HT30591		50	210	220
HT30592		80	360	220
HT30593		95	430	220
HT30594		110	500	220
HT30595		125	580	220
HT30596		155	720	220
HT30426	12	40	240	220
HT30427		80	600	220
HT30428		120	960	220
HT30429		160	1320	220
HT30430		200	1650	220
HT30431		240	2000	220
HT30432	16	300	2500	220
HT30597		80	720	220
HT30598		100	920	220
HT30599		140	1320	220
LT30417	14	40	55	220
LT30418		60	80	220
LT30419		80	120	220
LT30420		100	155	220
LT30421		130	210	220
LT30422		150	240	220
LT30423		200	320	220
LT30424		250	400	220
LT30425		300	480	220
LT30600	20	200	750	220

หมายเหตุ : สามารถสั่งทำรุ่นและขนาดพิเศษนอกเหนือจากที่ระบุในตารางได้ตามต้องการ

ข้อควรระวัง : การติดตั้งฮีตเตอร์แบบคาร์ทริดจ์ในแม่พิมพ์ ขนาดของรูที่ใส่ควรมีขนาดใหญ่กว่าฮีตเตอร์ประมาณ 0.02-0.04 มม. เท่านั้น เพื่อให้การถ่ายเทความร้อนมีประสิทธิภาพ และช่วยยืดอายุการใช้งาน

ภาพผนวกที่ ข3 ฮีตเตอร์คาร์ทริดจ์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ – นามสกุล

นายภคนันท์ สุขสำราญ

วัน เดือน ปี ที่เกิด

วันที่ 25 พฤษภาคม 2527

สถานที่เกิด

เชียงใหม่

ประวัติการศึกษา

วศ.บ. (วิศวกรรมเกษตร) มหาวิทยาลัยแม่โจ้