

ผลของระบบหล่อเย็นต่อคุณภาพชิ้นงานจากแม่พิมพ์ชนิดหลายโพรงแบบ
สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูป

EFFECTS OF COOLING SYSTEM ON PART QUALITY FROM
MULTI-CAVITY MOLD FOR INJECTION MOLDING PROCESS



ชูเกียรติ กริธาดำรงเดช
CHUKIAT KRITHADAMRONGDEJ

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....44040
วัน, เดือน, ปี 25 ค.ศ. 2545

b.....
l.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพอลิเมอร์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

**EFFECTS OF COOLING SYSTEM ON PART QUALITY FROM
MULTI-CAVITY MOLD FOR INJECTION MOLDING PROCESS**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN POLYMER TECHNOLOGY
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-324-007-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของระบบหล่อเย็นต่อคุณภาพชิ้นงานจากแม่พิมพ์ชนิดหลายโพรงแบบสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูป
นักศึกษา	นายชูเกียรติ กริธาดำรงเดช
รหัสประจำตัว	42065110
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	เทคโนโลยีพอลิเมอร์
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของระบบหล่อเย็นต่อคุณภาพชิ้นงานจากแม่พิมพ์ชนิดหลายโพรงแบบสำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยทำการศึกษาระบบหล่อเย็นในแม่พิมพ์และวิเคราะห์ชิ้นงานด้วยโปรแกรม Moldflow® เพื่อหาสภาวะกระบวนการหล่อเย็นที่เหมาะสมในการฉีดจริง ก่อนทำการสร้างแม่พิมพ์ขึ้นมาและผลกระทบบนระบบหล่อเย็นที่มีต่อคุณภาพชิ้นงาน โดยทำการจำลองการฉีดขึ้นรูปโดยใช้อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เลขเรย์โนลด์ 1,000 5,000 10,000 และ 15,000 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าที่ 10 °C 25 °C และ 40 °C และอัตราการไหลของพอลิเมอร์ หลอมเหลว (MFR) ที่ 2.8 6.0 และ 13.0 กรัม/10 นาที ผลการศึกษาพบว่าระบบหล่อเย็นที่เหมาะสมควรมีการกระจายตัวของท่อหล่อเย็นอย่างสม่ำเสมอไปทั่วแม่พิมพ์ ระยะห่างของท่อหล่อเย็นกับผิวของโพรงแบบไม่ควรมากเกินไปเพราะจะทำให้ชิ้นงานมีปริมาตรการหดตัวที่มากขึ้น หรือโก่งเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดการบิดงอมากขึ้น ส่วนสภาวะการหล่อเย็นพบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นมีผลทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพดีขึ้น มีปริมาตรการหดตัวและการบิดงอของชิ้นงานลดลง แต่จะต้องใช้ความดันเพิ่มขึ้นในการฉีด เมื่อใช้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ลดลงจะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น แต่ความดันที่ใช้ในการฉีดสูงขึ้น อัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (MFR) มีผลต่อกระบวนการผลิต โดย MFR ที่เหมาะสมกับแม่พิมพ์นี้เท่ากับ 2.8 กรัม/10 นาที และจากการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในระบบหล่อเย็นที่ได้จากโปรแกรมกับสูตรการคำนวณ พบว่าเวลาที่ใช้ในระบบหล่อเย็นที่ได้จากโปรแกรมจะน้อยกว่าที่ได้จากสูตรการคำนวณอยู่ร้อยละ 14.15

Thesis Title	Effects of Cooling System on Part Quality From Multi-Cavity Mold for Injection Molding Process
Student	Mr. Chukiat Krithadamrongdej
Student ID.	42065110
Degree	Master of Science
Programme	Polymer Technology
Year	2002
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr.Somsak Woramongchonchai

ABSTRACT

This research aims to study the effects of cooling system and operating conditions on part qualities from multi-cavity mold for injection molding process. The suitability of the cooling system and the effects of operating conditions on part qualities were analyzed by Moldflow® program. Simulation of injection by Moldflow® program were done at these conditions: (i) volumetric flow rate of cooling water at Reynold number 1,000 5,000 10,000 and 15,000; (ii) temperature of cooling water at 10 °C 25 °C and 40 °C; (iii) polymer melt flow rate at 2.8 6.0 and 13.0 g/10 min. The study found that the appropriate cooling system should have uniformly dispersed cooling tube around the mold. The more distance between cooling tube and cavity surface, the greater the part shrinkage. The less the distance, the greater the part deflection. Regarding the operating conditions of cooling system, it was found that increasing of volumetric flow rate of cooling water enhanced the part qualities (less shrinkage and deflection), but the injection pressure was increased. When the temperature of cooling water was decreased, the part qualities were improved, but the injection pressure was increased. The change of melt flow rate of polymer (MFR) also effected to manufacturing process. The appropriate MFR was 2.8 g/10 min for this particular mold. The percentage difference between the cooling time from Moldflow® program and equation was 14.15%.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำ การช่วยแก้ไขปัญหาและความเอาใจใส่ดูแลการทำงานจาก ผศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.อิทธิพล แจ่มชัด ดร.ชลลดา ฤทธิวิรุฬห์ และ ดร.วรัญ ใต้ไพสิฐพงษ์ อาจารย์และคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณสิทธิพร จิตรดา คุณไพโรจน์ จิตรธรรม คุณสมบูรณ์ อัสวพิชญ์โชติ คุณเมธิกุลวิทย์ ดร.วุฒิพงษ์ รังสีสันติวานนท์ ดร.บรรพต ไม้งาม ภัละเจ้าหน้าที่ของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่คอยช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดการดำเนินงานวิจัย

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ น้อง และเพื่อนนักศึกษาทุกท่านที่เป็นกำลังใจและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด

นอกจากนี้ขอขอบคุณบุคคลอื่น ๆ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึงอีกมากมายเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ชูเกียรติ กริธาดำรงเดช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 เครื่องฉีดพลาสติก	5
2.2 แม่พิมพ์	8
2.3 ระบบการปลดชิ้นงาน	10
2.4 การวางแผนชิ้นงานในแม่พิมพ์	11
2.5 รูว้าง	13
2.6 รูเข้า	14
2.7 การหล่อเย็น	16
2.8 โปรแกรม CAD และ CAM	33
2.9 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับ Finite Element Analysis	36
2.10 ส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต	36
2.11 โปรแกรม Pro Engineer®	37
2.12 การออกแบบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldflow®	38
2.13 ตัวแปรของวัสดุที่ต้องการในโปรแกรม Moldflow®	42
2.14 ลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานฉีด	43

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	45
บทที่ 3 การวิจัยและการดำเนินงาน	53
3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	53
3.2 อุปกรณ์	53
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	53
3.4 การทดสอบและการเปรียบเทียบ	54
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	57
4.1 การออกแบบระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์	57
4.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์	68
4.3 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบหล่อเย็นเมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	81
4.4 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบหล่อเย็นเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็น	90
4.5 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบหล่อเย็นเมื่อเปลี่ยนแปลงพอลิเมอร์ที่มีอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt Flow Rate) ที่แตกต่างกัน	97
4.6 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นที่ได้จากโปรแกรมกับการคำนวณ	99
4.7 เปรียบเทียบสภาวะที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปจริง	100
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	101
5.1 สรุปผลการทดลอง	101
5.2 ข้อเสนอแนะ	102
เอกสารอ้างอิง	103
ภาคผนวก	105
ประวัติผู้เขียน	121

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าการนำความร้อนของวัสดุแม่พิมพ์	17
2.2 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของพอลิสไตรีนของ Dow Chemical เกรด Styron 492J ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลของวัสดุใน โปรแกรม Moldflow®	43
4.1 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองการฉีดขึ้นรูปในรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 1-3 ...	57
4.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองการฉีดขึ้นรูปในรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 3-5 ...	61
4.3 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้ากับไหลออกในรูปแบบระบบหล่อเย็นต่าง ๆ	72
4.4 ผลต่างของค่าที่ได้จากผลการทดลองของแม่พิมพ์ที่ไม่มีระบบหล่อเย็นกับ ที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ	81
4.5 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้ากับไหลออกที่เลขเรย์โนลด์ต่าง ๆ	84
4.6 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้ากับไหลออกที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ ..	93
4.7 เปรียบเทียบผลของอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีผลต่อเวลา ที่ใช้ในการเติมในกระบวนการฉีด	97
4.8 เปรียบเทียบผลของอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีผลต่อความดันภายใน โพรงแบบในกระบวนการฉีด	98
4.9 สภาวะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปจริงกับการคำนวณ	100
ก-1 สภาวะที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปในรูปแบบระบบหล่อเย็นต่าง ๆ	105
ก-2 สภาวะที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปในอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ โดยใช้รูปแบบระบบหล่อเย็นที่ 5	105
ก-3 สภาวะที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปในอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ โดยใช้รูปแบบระบบหล่อเย็นที่ 5	106
ก-4 สภาวะที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปในอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (MFR) ต่าง ๆ โดยใช้รูปแบบระบบหล่อเย็นที่ 5	106
ค-1 ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองการฉีดในรูปแบบระบบหล่อเย็นต่าง ๆ	118
ค-2 ร้อยละความแตกต่างของค่าต่าง ๆ ในการจำลองการฉีดในรูปแบบระบบหล่อเย็นต่าง ๆ	118
ค-3 ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองการฉีดในอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ โดยใช้ระบบหล่อเย็นแบบที่ 5	119
ค-4 ร้อยละความแตกต่างของค่าต่าง ๆ ในการจำลองการฉีดที่อัตราการไหล ของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ	119

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ค-5 ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองการฉีดที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ โดยใช้ระบบหล่อเย็นแบบที่ 5	120
ค-6 ร้อยละความแตกต่างของค่าต่าง ๆ ในการจำลองการฉีดที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ	120



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เครื่องฉีดพลาสติก	5
2.2 ขั้นตอนของกระบวนการฉีดขึ้นรูป	6
2.3 ชุดฉีด	6
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดปิดแบบที่พอดีกับพื้นที่ฉายกับความดันภายในแม่พิมพ์ ...	7
2.5 ชิ้นส่วนประกอบหลัก ๆ ของแม่แบบฉีดพลาสติกที่สามารถถอดเปลี่ยน 1) สปริงดันสลักปลดชิ้นงานกลับ 2) สลักดันปลดชิ้นงาน 3) และ 4) แผ่นประกอบ แท่ง ยันปลดชิ้นงาน 5) และ 7) แผ่นประกอบแม่พิมพ์ 6) แท่งยันปลดชิ้นงาน 8) แผ่นประกอบหัวฉีด 9) หัวนำฉีด 10) ปลอกนำเลื่อน 11) แผ่นฐานของแม่พิมพ์ 12) สลักนำเลื่อน 13) แผ่นประกอองศูนย์	8
2.6 แม่พิมพ์พร้อมทั้ง 1) สลักยันแผ่นประกอบแท่งยันปลดชิ้นงาน 2) แผ่นประกอบแท่งยันปลดชิ้นงาน 3) แท่งยันชิ้นงานออก	11
2.7 ตัวอย่างการจัดวางแบบชิ้นงานเพื่อลดขนาดของแม่พิมพ์ ก) ไม่เหมาะสม ข) เหมาะสม	11
2.8. ลักษณะความยาวของรูวิ่งที่เหมาะสม ก) ไม่เหมาะสม ข) เหมาะสม	12
2.9 การจัดแบบชิ้นงานให้เกิดการสมดุลของแรงภายในแบบ ก) ไม่สมดุล ข) สมดุล	12
2.10 รูวิ่งแบบต่าง ๆ ก) แบบวงกลม ข) แบบสี่เหลี่ยมคางหมู ค) แบบครึ่งวงรี ง) แบบหกเหลี่ยม	13
2.11 ประสิทธิภาพของรูวิ่งที่มีรูปทรงหน้าตัดต่าง ๆ กัน	14
2.12 ตัวอย่างรูวิ่ง 1) แบบรูนำฉีดเชิงศูนย์และมีการปรับช่องนำพลาสติกเข้าแบบ ได้เหมาะสม 2) แบบรูนำฉีดอยู่ตรงศูนย์กลาง 3) แบบรูวิ่งเข้าชิ้นงานคู่และ วางขนานกัน 4) การจัดระเบียบชิ้นงานให้สมดุลและรูนำฉีดอยู่ตรงกลาง 5) แบบรูนำฉีดอยู่ตรงกลางและรูวิ่งแยกเป็นรูปกากบาท 6) 7) และ 8) เป็นตัวอย่าง การจัดรูวิ่งพลาสติกที่ไม่เหมาะสม	15
2.13 การต่อท่อน้ำหล่อเย็นแบบอนุกรมและแบบขนาน	19
2.14 การจัดตำแหน่งของท่อน้ำหล่อเย็น	20
2.15 วงจรหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบขึ้นเคียวอย่างง่าย	22
2.16 วงจรหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบขึ้นเคียวแบบด้วย	22
2.17 การใช้แผ่นต่อปีกรองทางไหลให้เป็นวงจรรูปด้วยแบบที่ 1	23
2.18 การใช้แผ่นต่อปีกรองทางไหลให้เป็นวงจรรูปด้วยแบบที่ 2	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 การหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรรูปสี่เหลี่ยม	24
2.20 การหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรรูปตัวแซด	24
2.21 การหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรรูปตัวแซดแบบสมมูล	25
2.22 วิธีขีดแผ่นกั้น ก) ถูกวิธี ข) ไม่ถูกวิธี	26
2.23 วิธีหล่อเย็นแบบใช้แผ่นหล่อเย็น	26
2.24 ร่องทางไหลในแผ่นหล่อเย็น	27
2.25 การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรรอบรูปวงรี	28
2.26 การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรรอบรูปตรงแบบใช้แผ่นกั้น	29
2.27 การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรรอบรูปหล่อเย็นแบบเป็นชั้น	29
2.28 วงจรแบบซ้อน ก) ระบบรูปวงรี ข) ระบบใช้แผ่นกั้น ค) วงจรแบบเป็นชั้น	30
2.29 ลักษณะของข้อต่อมาตรฐาน	31
2.30 ข้อต่อแบบถอดประกอบเร็ว	32
2.31 การวิเคราะห์แบบ Finite Elements Analysis (FEA) ของรถยนต์	34
2.32 การแบ่ง Finite element ของชิ้นงาน	36
2.33 ทางเดินของเครื่องมือตัด (Tool) ในโปรแกรมสมาร์ทแคม (Smart CAM)	37
2.34 หลักการออกแบบการไหลเพื่อให้เกิดการไหลที่ง่ายที่สุด 1) สมดุลการไหล 2) อัตราส่วนรูปร่างต่อโพรงแบบ 3) ทิศทางการไหลไปในทิศทางเดียวกัน 4) การลดลงของความดัน 5) ความเค้นเฉือน 6) เส้นเชื่อม/เส้นต่อ 7) การไหลย้อนกลับ 8) ความไม่แน่นอน 9) ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน และ 10) การปิดตัวทางความร้อน	41
2.34 เปรียบเทียบรูปแบบระบบการหล่อเย็นก่อนและหลังการวิเคราะห์	45
2.35 การวางท่อหล่อเย็นแบบมีกิ่ง	46
2.37 แบบรูปซ้อนและรูปล้อมที่ได้ทำการออกแบบ	47
2.38 การเปรียบเทียบการเติมของโพรงแบบ	49
2.39 การเปรียบเทียบความดันของโพรงแบบ	50
2.40 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ที่จัดสร้างขึ้น	52
4.1 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 1	58
4.2 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 2	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 3	60
4.4 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 4	62
4.5 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5	63
4.6 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5	64
4.7 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 6	65
4.8 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 7	66
4.9 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 8	67
4.10 เปรียบเทียบรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ	68
4.11 ความแตกต่างเวลาที่ใช้ในการเติมในแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ	69
4.12 ความดันภายในโพรงแบบของระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ	71
4.13 ความแตกต่างความดันสูงสุดภายในโพรงแบบที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ.....	72
4.14 ความแตกต่างเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ	73
4.15 ความแตกต่างอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ	75
4.16 อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานในระบบระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ	76
4.17 ความแตกต่างอุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ	77
4.18 อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานในระบบระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ	78
4.19 ความแตกต่างปริมาตรที่เกิดการหดตัวของชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ	79
4.20 ความแตกต่างของการบิดงอของชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ	80
4.21 ความแตกต่างของความดันสูงสุดภายในโพรงแบบเมื่อมีอัตราการไหลของ น้ำหล่อเย็นต่าง ๆ	82
4.22 ความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของ น้ำหล่อเย็นต่าง ๆ	83
4.23 ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ	85
4.24 อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ	86
4.25 ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ	87
4.26 อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ	88
4.27 ปริมาตรการหดตัวของชิ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ	89
4.28 การบิดงอของชิ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 ความแตกต่างของความดันสูงสุดภายในโพรงแบบเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ	91
4.30 ความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ	92
4.31 ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ	93
4.32 ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ	94
4.33 ความแตกต่างของปริมาตรการหดตัวของชิ้นงานเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ	95
4.34 ความแตกต่างของการบิดงอของชิ้นงานเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ	96
4.35 ความดันภายในโพรงแบบที่มี MFR ที่แตกต่างกัน	98
ข-1 ผลการจำลองการฉีดขึ้นรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5	107
ข-2 ผลการจำลองการฉีดขึ้นรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 6	108
ข-3 ผลการจำลองการฉีดขึ้นรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 7	109
ข-4 ผลการจำลองการฉีดขึ้นรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 8	110
ข-5 ผลการจำลองการฉีดที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เลขเรย์โนลด์ 1,000	111
ข-6 ผลการจำลองการฉีดที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เลขเรย์โนลด์ 5,000	112
ข-7 ผลการจำลองการฉีดที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เลขเรย์โนลด์ 10,000	113
ข-8 ผลการจำลองการฉีดที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เลขเรย์โนลด์ 15,000	114
ข-9 ผลการจำลองการฉีดที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ 10 °C	115
ข-10 ผลการจำลองการฉีดที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ 25 °C	116
ข-11 ผลการจำลองการฉีดที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ 40 °C	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการขึ้นรูปพลาสติกด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีขั้นตอนที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน และสามารถผลิตชิ้นงานได้ในปริมาณที่มากเนื่องจากมีรอบการทำงาน (Cycle time) สั้น หลักการเบื้องต้นของการฉีดพลาสติกคือพลาสติกหลอมจะถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ และถูกทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิที่พลาสติกแข็งตัวเพียงพอที่จะคงรูปร่างของโพรงแบบไว้ได้ ต่อจากนั้นชิ้นงานนี้จะถูกดันปลดออกจากแม่พิมพ์ ดังนั้นอุณหภูมิของแม่พิมพ์จึงจัดเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่ง เนื่องจากมีส่วนในการควบคุมรอบการฉีดพลาสติก พลาสติกหลอมจะไหลได้สะดวกในแม่พิมพ์ที่ร้อน แต่จะต้องใช้เวลาในการเย็นตัวของพลาสติกหลอมนาน จนกว่าชิ้นงานจะแข็งตัวเพียงพอที่จะดัน และปลดออกจากแม่พิมพ์ได้ ในทางตรงกันข้ามพลาสติกหลอมจะเย็นตัวได้เร็วในแม่พิมพ์ที่เย็น แต่พลาสติกหลอมจะไหลไปไม่ทั่วส่วนต่าง ๆ ของโพรงแบบ ดังนั้นจะต้องหาสภาวะที่จะทำให้แม่พิมพ์สามารถทำงานได้ผลดีที่สุด

อุณหภูมิใช้งานของแม่พิมพ์ที่ใช้ผลิตชิ้นงานแต่ละอย่างจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ดังนี้คือ ชนิดและเกรดของพลาสติกที่ใช้ฉีด ระยะทางที่พลาสติกไหลในโพรงแบบ ความหนาของผนังชิ้นงาน ความยาวของระบบป้อน เป็นต้น บ่อยครั้งที่อุณหภูมิใช้งานสูงกว่าอุณหภูมิที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้พลาสติกหลอมไหลเต็มโพรงแบบได้เต็ม และอุณหภูมิส่วนที่เพิ่มขึ้นนี้ยังช่วยปรับปรุงผิวของชิ้นงานสำเร็จรูปให้มีคุณภาพดีขึ้นคือช่วยไม่ให้เกิดรอยเชื่อม รอยการไหลตัวของพลาสติก และรอยมลทินอื่น ๆ

เพื่อรักษาระดับความแตกต่างของอุณหภูมิแม่พิมพ์และพลาสติกหลอมให้ได้ตามที่ต้องการ น้ำหรือของเหลวอื่น ๆ จะถูกส่งเข้าไปไหลเวียนในรูหรือร่องที่ทำขึ้นในแม่พิมพ์ รูหรือร่องที่ทำขึ้นนี้เรียกว่าทางไหลของระบบหล่อเย็น หรือทางน้ำหล่อเย็น และระบบทั้งหมดที่สมบูรณ์นี้เรียกว่าวงจรระบบหล่อเย็น

ในระหว่างขั้นตอนการไหลเต็มโพรงแบบของพลาสติกหลอม พลาสติกหลอมที่ร้อนที่สุดจะอยู่ใกล้กับรูเข้าของโพรงแบบ และพลาสติกหลอมส่วนที่เย็นที่สุดจะอยู่ตรงตำแหน่งที่อยู่ห่างจากรูเข้ามากที่สุด อุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่ไหลผ่านแม่พิมพ์จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นเพื่อให้อัตราการหล่อเย็นตลอดผิวของชิ้นงานเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ จำเป็นที่ต้องวางตำแหน่งทางเข้าของสารหล่อเย็นให้ใกล้กับผิวชิ้นงานส่วนที่ร้อนและไหลออกไปทางผิวชิ้นงานส่วนที่เย็น แต่ในทางปฏิบัติจริงการวางตำแหน่งของสารหล่อเย็นดังกล่าวไม่สามารถกระทำได้เลย ดังนั้นผู้ออกแบบจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบแจ้งหนี้จะเรียกค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องใช้วิจารณ์กำหนดวงจรระบบหล่อเย็นให้เหมาะสมที่สุด และต้องพยายามหลีกเลี่ยงการใช้วงจรที่ทำให้แม่พิมพ์มีราคาแพงมากขึ้นโดยไม่จำเป็น

อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำและสารหล่อเย็นอื่น ๆ สามารถที่จะหาซื้อได้ทั้งหมด และต่อเข้ากับแม่พิมพ์โดยใช้ท่ออ่อนหรือท่อที่หุ้มตัวได้ การใช้อุปกรณ์ชุดนี้ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิใช้งานของแม่พิมพ์ให้อยู่ในช่วงที่แคบได้ แต่จะไม่สามารถควบคุมให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ต่างกันน้อย ๆ ได้

นอกจากอุณหภูมิของแม่พิมพ์แล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ อีกที่ควบคุมลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดขึ้นรูปคือ สภาพะในการฉีดขึ้นรูป (อุณหภูมิ ความดัน และเวลา) และการออกแบบแม่พิมพ์ โดยพบว่าปัญหาในการฉีดขึ้นรูปได้แก่ การหดตัวของชิ้นงาน (Shrinkage) การบิดงอของชิ้นงาน (Warpage) และการฉีดขึ้นรูปไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short shot) เป็นต้น โดยปัญหาบางอย่างอาจแก้ไขได้ แต่มีบางปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพในการฉีดขึ้นรูปได้ ทั้งนี้เนื่องจากความผิดพลาดเกิดจากการออกแบบแม่พิมพ์ โดยส่วนมากผู้ผลิตไม่ค่อยให้ความสนใจกับแม่พิมพ์มากนัก เมื่อทำการสร้างแม่พิมพ์ออกมาใช้ในการผลิตจึงมักเกิดปัญหาต่าง ๆ ในการฉีดตามมาแล้วจึงทำการแก้ไขโดยการปรับเปลี่ยนสภาพในการฉีดขึ้นรูป แม่พิมพ์ที่ทำการสร้างเองนั้นอาจมีการจัดวางตำแหน่งต่าง ๆ ในแม่พิมพ์รวมทั้งขนาดของส่วนต่าง ๆ ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ไม่สามารถนำแม่พิมพ์มาใช้งานได้อย่างเหมาะสมทำให้ต้องสร้างแม่พิมพ์ใหม่ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการนำโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ โดยแบ่งโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ที่มาช่วยในการออกแบบออกเป็น 3 ส่วนคือ 1) Computer Aided Design (CAD) 2) Computer Aided Manufacturing (CAM) และ 3) Computer Aided Engineering (CAE) โปรแกรมเหล่านี้สามารถช่วยออกแบบแม่พิมพ์ได้ดี เนื่องจากสามารถทำการออกแบบขนาดแม่พิมพ์ได้ถูกต้องรวมทั้งยังสามารถวิเคราะห์หาสถานะในการฉีดได้โดยการจำลอง (Simulation) สภาพะในการฉีดจริง การจัดวางตำแหน่งและขนาดของส่วนต่าง ๆ ในแม่พิมพ์ให้เหมาะสมและถูกต้องเพื่อใช้ในการฉีดจริง อีกทั้งยังสามารถปรับเปลี่ยนส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ให้ดีที่สุดก่อนการสร้างแม่พิมพ์จริงขึ้นมา

ตลอดเวลาที่ผ่านมาได้มีการศึกษาหาสถานะที่เหมาะสมในการฉีดขึ้นรูป แก้ปัญหาในผลิตภัณฑ์ และการออกแบบแม่พิมพ์ให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพสูง โดยเริ่มพัฒนาจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของกระบวนการและคุณภาพของชิ้นงาน อย่างไรก็ตามเนื่องจากความซับซ้อนของการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรในกระบวนการและคุณภาพของการฉีดพลาสติกทำให้กำหนดค่าสถานะได้ยาก ในช่วงปีค.ศ. 1960-1970 Robin, I.I. [1] ได้ศึกษาการฉีดพลาสติกโดยการศึกษาจากการทดสอบในขณะปฏิบัติการจริง พบว่ามีหลักการต่าง ๆ ในการฉีดพลาสติกเป็นจำนวนมากกว่า 100 หัวข้อ ซึ่งช่วยเพิ่มความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการฉีดและคุณภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพของชิ้นงานเข้าไว้ด้วยกัน แม้ว่าจะมีความพยายามในการกำหนดวิธีการเพื่อทำการปรับปรุงการออกแบบชิ้นงานพลาสติกให้ดีขึ้น แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับลักษณะทางธรรมชาติของพอลิเมอร์ที่ไม่เป็นแบบนิวโตเนียน และการถ่ายเทความร้อนของการฉีดพลาสติก

ในช่วงปีค.ศ. 1970 Barri, I.T. และคณะ [1] มีความสนใจในการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการขึ้นรูป โดยเน้นที่รูปร่างพื้นฐาน และเรื่องที่น่าสนใจเพื่อเสนอแนะให้คำปรึกษาแก่วิศวกรเพื่อปรับปรุงกระบวนการฉีดให้ดีขึ้นเนื่องจากมีความต้องการผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น

ในปีค.ศ. 1974 บริษัท Moldflow จำกัด [1] ได้เสนอโปรแกรมทางการคำนวณระบบคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาหาสภาวะในกระบวนการฉีดขึ้นรูป และทำการสมมูลการไหลในชิ้นงานระบบรูวง และระบบหล่อเย็น ถึงแม้ว่าจะเป็นที่ยอมรับแต่โปรแกรมดังกล่าวใช้งานได้ค่อนข้างยากเนื่องจากชิ้นงานต้องออกแบบให้มีรูปร่างที่แบนมาก ต่อมาได้มีการพิจารณาถึงความรู้เบื้องต้นของการใช้วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) โดย Shen และ Hieber [1] เนื่องจากมีข้อดีที่เหมาะสมกับเทคนิคการวิเคราะห์การเติมเต็มในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

ในปีค.ศ. 1983 บริษัท Moldflow จำกัด [1] ได้นำโปรแกรมการวิเคราะห์การไหลโดยใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบสามมิติมาใช้ซึ่งเป็นโปรแกรมที่วิเคราะห์ได้สมบูรณ์ จัดเป็นโปรแกรมแรกที่ได้รับการยอมรับและได้รับการพัฒนาจนถึงปัจจุบัน โดยผู้ออกแบบสามารถสร้างแบบจำลองของชิ้นงานที่ต้องการ และแสดงการจำลองผลของแบบจำลองที่ได้ โดยการประมาณขั้นตอนการเติมเต็มเพื่อหาค่าการหดตัวและการบิดงอ

จากเหตุผลและวิธีการดังที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า การใช้คอมพิวเตอร์ร่วมในการออกแบบและจัดสร้างแบบแม่พิมพ์เป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมต่อการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษารูปแบบของระบบการหล่อเย็นที่ถูกต้องตามทฤษฎีและหลักการ จากแม่พิมพ์ที่ได้รับการออกแบบและจัดสร้างขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของแม่พิมพ์ชนิดหลายโพรงแบบที่มีต่อสภาวะในการฉีดขึ้นรูป
- 2) เพื่อศึกษารูปแบบการหล่อเย็นที่มีผลต่อชิ้นงาน
- 3) เพื่อศึกษาสภาวะของการหล่อเย็นที่มีผลต่อชิ้นงาน
- 4) เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของค่าอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt flow rate, MFR)

ที่มีต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป

1.3. ขอบเขตของการศึกษา

- 1) ทำการวิเคราะห์สภาวะในการฉีดขึ้นรูปของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่มีการออกแบบไว้
- 2) ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการฉีดขึ้นรูป
- 3) ศึกษารูปแบบระบบหล่อเย็น โดยศึกษารูปแบบระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ
- 4) ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อระบบหล่อเย็นดังนี้

4.1 ศึกษาผลกระทบของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น โดยกำหนดให้น้ำหล่อเย็นไหลในช่วงเลขเรย์โนลด์ 1,000 - 15,000

4.2 ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น โดยกำหนดให้อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นอยู่ในช่วง $10 - 40^{\circ}\text{C}$

5) ศึกษาผลของค่าอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยทำการเปลี่ยนวัสดุที่มีค่า MFR 2.8 เป็น 6.0 และ 13.0 กรัม/10 นาที

6) ทำการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ที่มีการออกแบบไว้



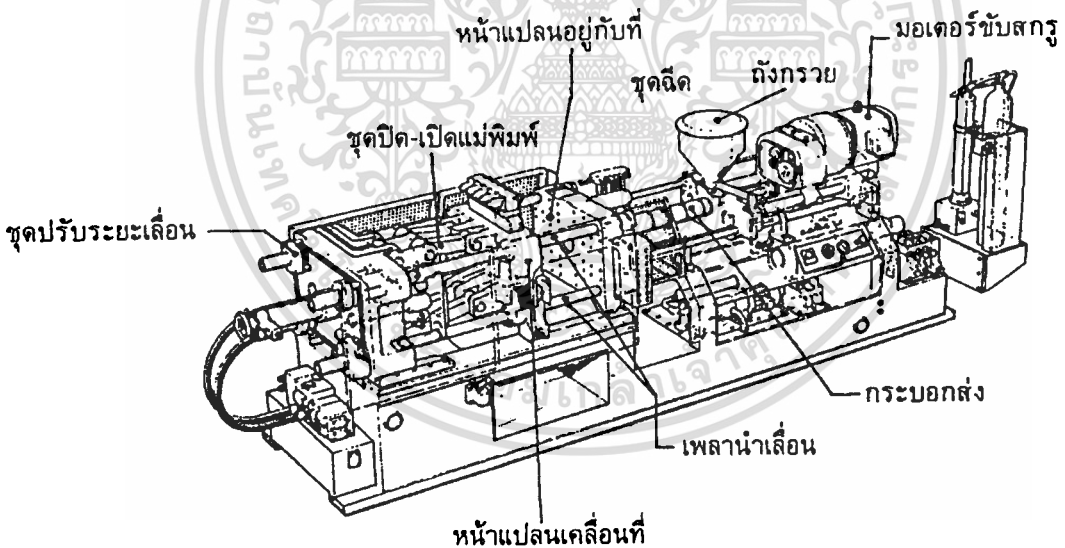
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

ในปัจจุบันผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ถูกนำมาใช้แทนผลิตภัณฑ์โลหะกันอย่างแพร่หลาย [2] การผลิตชิ้นงานที่ทำด้วยพลาสติกจำนวนมากขึ้นจะอาศัยเครื่องมือที่เรียกว่า แม่พิมพ์ (Mold) ประกอบกับเครื่องจักรช่วยในการผลิต แม่พิมพ์ที่มีใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งจะเรียกชื่อตามกรรมวิธีในการผลิต เช่น แม่พิมพ์ที่ใช้ผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีการฉีดจะเรียกว่าแม่พิมพ์ฉีด (Injection mold) และแม่พิมพ์ที่ใช้ผลิตชิ้นงานด้วยกรรมวิธีการอัดจะเรียกว่าแม่พิมพ์อัด (Compression mold) เป็นต้น ในที่นี้จะขอกล่าวเฉพาะแม่พิมพ์ฉีดเท่านั้น

2.1 เครื่องฉีดพลาสติก (Injection-molding machine)

เครื่องฉีดพลาสติกโดยทั่วไปจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน [2] คือ ชุดฉีดและชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 2.1

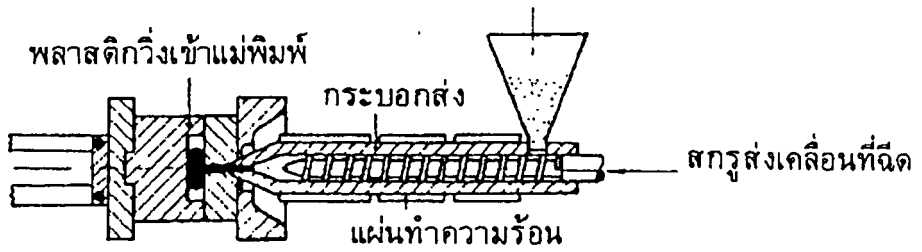


รูปที่ 2.1 เครื่องฉีดพลาสติก [2]

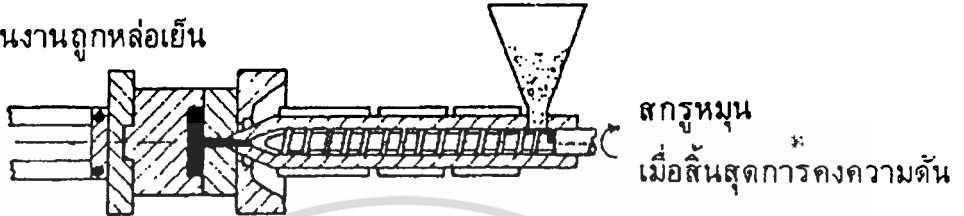
ในกระบวนการฉีดพลาสติกจะประกอบด้วยเครื่องมือและเครื่องจักรที่สำคัญคือ แม่พิมพ์ฉีดและเครื่องฉีดพลาสติก เริ่มต้นเม็ดพลาสติกจะถูกป้อนเข้าไปในถังกรวย จากนั้นสกรูส่งหรือก้านส่งจะพาให้เม็ดพลาสติกเคลื่อนที่ผ่านกระบอกส่งไปยังแม่พิมพ์โดยผ่านตัวทำความร้อน ทำให้พลาสติกหลอมผ่านหัวฉีดและฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ จากนั้นจะปล่อยให้เย็นและปลดออกจากแม่พิมพ์ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

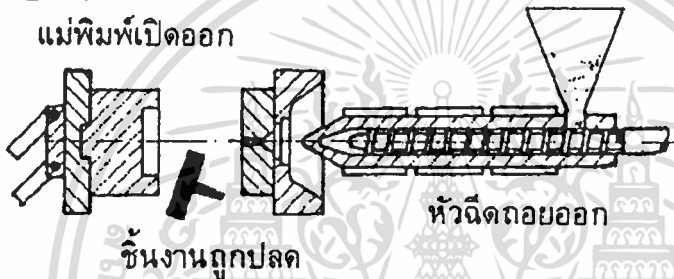
ขั้นที่ 1 พลาสติกหลอมถูกฉีดเข้าแม่พิมพ์ ถึงกรวย



ขั้นที่ 2 คงความดันและป้อนพลาสติกเข้ากระบอกส่งพลาสติกหลอมเข้าเต็มแม่พิมพ์ ชิ้นงานถูกหล่อเย็น



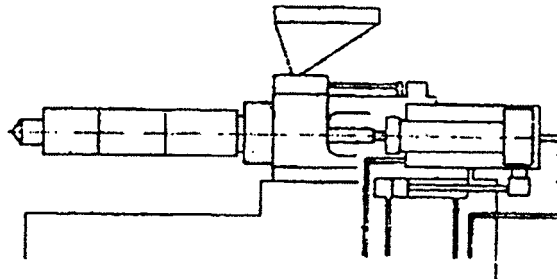
ขั้นที่ 3 ปลดชิ้นงาน แม่พิมพ์เปิดออก



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนของกระบวนการฉีดขึ้นรูป [2]

2.1.1 ชุดฉีด (Injection unit)

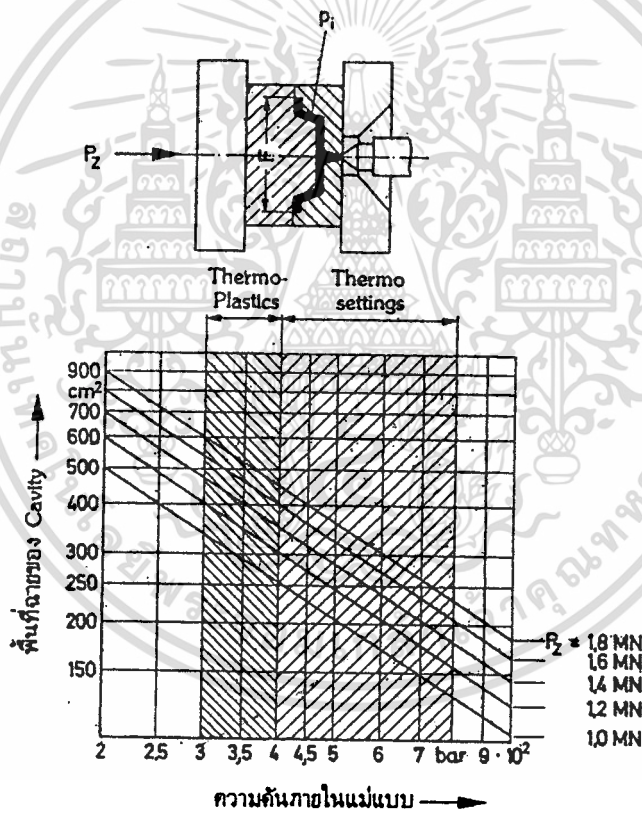
ชุดฉีดประกอบด้วยกระบอกสูบ ลูกสูบหรือเกลียวหนอน หัวฉีด ชุดป้อนพลาสติก ตัวทำความร้อน และระบบส่งกำลังขับเคลื่อนรูปที่ 2.3 [3] จังหวะการทำงานของชุดฉีดพลาสติกคือการพาพลาสติกจากกรวยเติมเข้าหลอมในกระบอกสูบ ทำการอัดพลาสติกเหลวเข้าแบบ หลังจากชิ้นงานเข้าแบบและเย็นจนปลดออกจากแบบได้แล้วจะนำพลาสติกใหม่เข้าหลอมในกระบอกสูบเพื่อรอจังหวะฉีดต่อไป



รูปที่ 2.3 ชุดฉีด [3]

2.1.2 ชุดเปิด-ปิดแม่พิมพ์ [3]

ทำหน้าที่เคลื่อนที่เปิดและปิดแม่พิมพ์ในจังหวะการทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก แม่พิมพ์โดยปกติจะมีสองแผ่นมาประกบกัน โดยด้านที่ฉีดพลาสติกเข้าจะเป็นด้านที่อยู่กับที่และอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่เคลื่อนไหวเปิดปิด แผ่นประกบทั้งสองจะประกบอยู่กับแผ่นดีดแม่พิมพ์ที่ติดมากับเครื่องฉีดพลาสติก โดยทั่ว ๆ ไปเนื่องจากความดันภายในแม่พิมพ์สูงมาก ซึ่งเป็นผลให้มีแรงกระทำด้านระบบเปิด-ปิดแบบมาก ซึ่งถ้าแรงอัดปิดแบบไม่พอจะทำให้แบบเหยียดได้ ในการใช้แรงอัดปิดแบบด้านทานแรงภายในแม่พิมพ์นั้นควรเลือกใช้ให้พอดี ถ้าใช้แรงมากเกินไปจะมีผลทำให้ชิ้นส่วนของเครื่องที่รับแรงล้าตัว ทำให้อายุการใช้งานของเครื่องสั้นลง รูปที่ 2.4 แสดงแรงอัดปิดแบบที่พอดีกับพื้นที่ฉาย (Projection area) ของโพรงแบบ (Gavity) ที่พลาสติกจะเข้าไปแทนที่สัมพันธ์กับความดันภายในแม่พิมพ์สำหรับงานฉีดพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซต

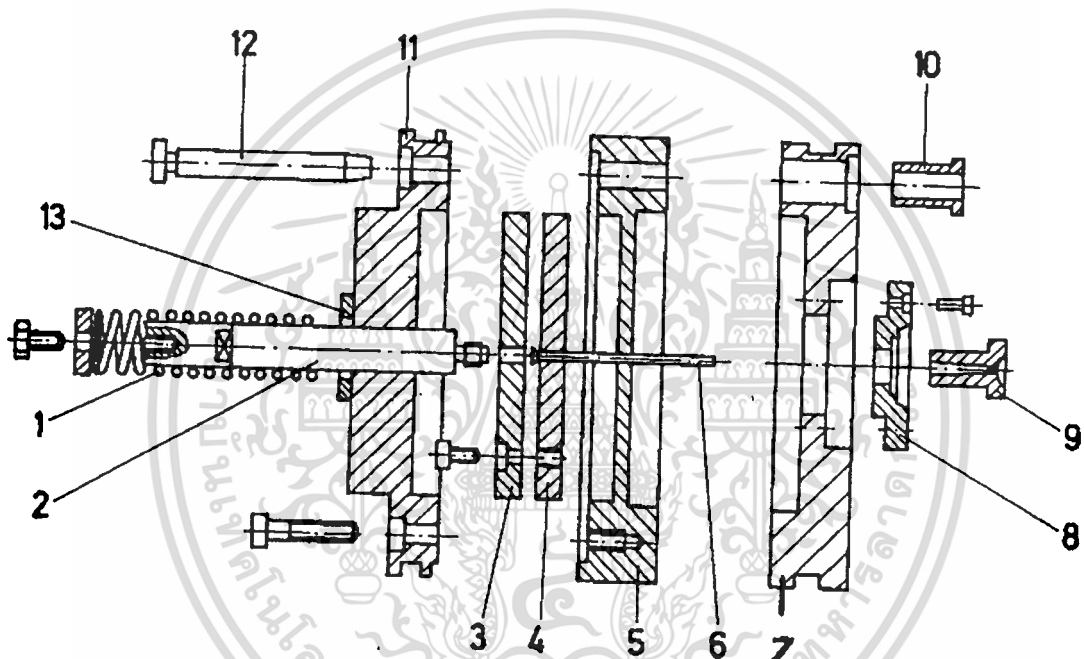


รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดปิดแบบที่พอดีกับพื้นที่ฉายกับความดันภายในแม่พิมพ์ [3]

2.2 แม่พิมพ์ (Mold)

สมบัติพิเศษของพลาสติกคือสามารถแปรรูปเป็นรูปร่างได้ตามต้องการ โดยในการแปรรูปนี้จะต้องมีแม่พิมพ์เป็นตัวทำให้เกิดรูปทรงของชิ้นงานขึ้น ในรูปที่ 2.5 แสดงส่วนประกอบหลัก ๆ ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก ซึ่งบางแบบอาจมีลักษณะแตกต่างในลักษณะของรูปทรงของชิ้นงาน การปลดชิ้นงานออกจากแบบและหัวนำฉีด (Sprue bush) ดังนั้นการแบ่งประเภทของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกอย่างหยาบจะแบ่งตามความแตกต่างของการปลดชิ้นงานและหัวนำฉีด [3]

หัวนำฉีดเป็นชิ้นส่วนที่ส่งผ่านพลาสติกเหลวจากหัวฉีดเข้าไปยังช่องว่างที่เป็นรูปร่างของชิ้นงานภายในแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องมีความแข็งแรงและทนต่อการกระแทกได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.5 ชิ้นส่วนประกอบหลัก ๆ ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่สามารถถอดเปลี่ยนได้

- 1) สปริงดันสลักปลดชิ้นงานกลับ 2) สลักดันปลดชิ้นงาน 3) และ 4) แผ่นประกอบแท่งยื่นปลดชิ้นงาน 5) และ 7) แผ่นประกอบแม่พิมพ์ 6) แท่งยื่นปลดชิ้นงาน 8) แผ่นประกอบหัวฉีด 9) หัวนำฉีด 10) ปลอกนำเลื่อน 11) แผ่นฐานของแม่พิมพ์ 12) สลักนำเลื่อน 13) แผ่นประตองศูนย์ [3]

จากรูปแสดงชิ้นส่วนประกอบหลัก ๆ ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่สามารถถอดเปลี่ยนได้ในปัจจุบันได้มีบริษัทผลิตชิ้นส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเหล่านี้ไว้เป็นมาตรฐานสามารถซื้อหามาเปลี่ยนได้เมื่อเกิดการชำรุดหรือเสื่อมสภาพ ถ้าคุณเริ่มต้นจากแม่พิมพ์ด้านเคลื่อนที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเริ่มด้วยสลักสำหรับต้นชุดปลดชิ้นงานหมายเลข 2 ซึ่งสอดผ่านแผ่นฐานของแม่พิมพ์ 11 ไปจนเกลียวติดกับแผ่นประกอบแท่งยันปลดชิ้นงาน 3 และ 4 แผ่นฐานหมายเลข 11 ใช้ติดกับแผ่นคิดแม่พิมพ์ด้านเคลื่อนที่ (Moving plate) ของเครื่องฉีดพลาสติกโดยมีแผ่นประคองศูนย์หมายเลข 13 เป็นตัวบังคับให้อยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางพอดี แผ่นหมายเลข 5 ใช้สำหรับประกอบแม่พิมพ์ที่เป็นช่องว่างรูปร่างของชิ้นงาน แท่งยันปลดชิ้นงาน 6 ใช้สำหรับยันปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แผ่นฐานหมายเลข 7 ใช้สำหรับประกอบแม่พิมพ์ที่เป็นช่องว่างที่ทำให้เกิดรูปร่างของชิ้นงานและใช้ประกอบแผ่นคิดแม่พิมพ์ด้านอยู่กับที่ (Stationary plate) ด้านฉีดเข้าของเครื่อง โดยจะมีหัวนำฉีดและแผ่นประกอบหัวนำฉีดติดอยู่ด้านหน้า ในแผ่นฐาน 7 และ 11 จะมีรูสำหรับสอดแท่นนำเลื่อน 12 เพื่อให้แม่พิมพ์ประกบกันพอดีโดยจะมีปลอกนำเลื่อน 10 ที่ติดอยู่กับแผ่นฐาน 7 ทำหน้าที่เลื่อน ถ้ามีชิ้นส่วนหลัก ๆ ลักษณะนี้จะทำให้การผลิตแม่พิมพ์ง่ายและรวดเร็วขึ้นมาก ก็คือเพียงแค่ทำส่วนแม่พิมพ์ที่เป็นช่องว่างรูปร่างของชิ้นงานมาประกอบเข้าก็จะเสร็จ ซึ่งเป็นการประหยัดงานและเวลาไปได้มาก

แม่พิมพ์นั้นจะมีทั้งแบบชิ้นงานเดี่ยวและชิ้นงานหลายชิ้น แม่พิมพ์ชิ้นงานเดี่ยวหมายความว่าฉีดหนึ่งครั้งจะได้ชิ้นงานหนึ่งชิ้น ส่วนแม่พิมพ์ชิ้นงานหลายชิ้นจะได้ชิ้นงานหลายชิ้นต่อการฉีดหนึ่งครั้ง โดยปกติแม่พิมพ์ชิ้นงานหลายชิ้นจะเป็นชิ้นงานแบบเดียวกันทั้งหมด ยกเว้นในการฉีดของเด็กเล่นที่มีชิ้นส่วนประกอบแตกต่างกันในแม่พิมพ์เดียวกัน

การออกแบบแม่พิมพ์ฉีดมักจะพิจารณาจากลักษณะรูปร่างของชิ้นงานเป็นหลัก ซึ่งลักษณะรูปร่างของชิ้นงานสามารถจัดเป็นกลุ่มได้ดังนี้ [3]

- ก. ชิ้นงานที่ปราศจากร่องหรือบ่า เช่น ถ้วยแก้ว ชาม หวี เป็นต้น
- ข. ชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าด้านนอก เช่น เกลียวตัวผู้ หลอดค้ำย เป็นต้น
- ค. ชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าด้านใน เช่น ฝาเกลียว เป็นต้น
- ง. ชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าทั้งด้านนอกและด้านใน เช่น ชิ้นส่วนของปากกาหมึกซึมที่มีทั้งเกลียวนอกและเกลียวใน เป็นต้น

จากลักษณะของชิ้นงานดังกล่าว ทำให้มีการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดชนิดต่าง ๆ กันเพื่อให้สามารถผลิตชิ้นงานที่มีรูปร่างตามต้องการได้ดังนี้ [3]

1) แม่พิมพ์ฉีดแบบสองแผ่น (Two-plate injection mold) เป็นแม่พิมพ์แบบง่าย ๆ ที่ใช้ผลิตชิ้นงานที่ปราศจากร่องหรือบ่า ลักษณะของแม่พิมพ์นี้จะมีเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์เพียงเส้นเดียวหรือมีช่องสำหรับปลดชิ้นงาน แกนรูวิ่งและแกนรูฉีดเพียงช่องเดียวเท่านั้น

2) แม่พิมพ์ฉีดแบบแยกด้านข้าง (Split mold) เป็นแม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบสำหรับชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าด้านนอก ส่วนของเบ้าจะแยกเป็นชิ้นส่วนหลายชิ้นที่สามารถเลื่อนได้และควบคุมให้อยู่ในตำแหน่งด้วยกรอบบังคับ (Chase bolster) ชิ้นส่วนที่ประกบกันเป็นเบ้าของแม่พิมพ์เคลื่อนที่ได้ โดยอาศัยอุปกรณ์หรือกลไกต่าง ๆ เช่น สลักเฉียง ขาตะ สะปริง ลูกสูบและกระบอกสูบ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) แม่พิมพ์ฉีดแบบคลายเกลียว (Unscrewing mold) เป็นแม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบสำหรับชิ้นงานที่มีร่องหรือบ่าด้านใน เช่น ชิ้นงานที่มีเกลียวใน การขึ้นรูปเกลียวจะอาศัยส่วนคอร์ที่เป็นเกลียวและออกแบบให้มีระบบปลดหรือคลายเกลียวโดยอัตโนมัติ

4) แม่พิมพ์ฉีดแบบสามแผ่น (Three-plate mold) เป็นแม่พิมพ์ฉีดที่ออกแบบให้มีเส้นแบ่งส่วนพิมพ์สองเส้นหรือมีช่องเปิดของแม่พิมพ์สองช่อง ส่วนใหญ่จะใช้ในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดที่ต้องการให้มีระบบปลดแกนรูปร่างและรูเข้าออกจากชิ้นงานโดยอัตโนมัติ กล่าวคือเมื่อสิ้นสุดกระบวนการฉีด แม่พิมพ์จะแยกเปิดออกตามแนวเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์เส้นที่ 1 ซึ่งในส่วนนี้จะประกอบด้วยแกนรูฉีดและรูปร่าง ในขณะที่เดียวกันก็จะแยกแกนรูเข้าออกจากชิ้นงานด้วย หลังจากนั้นเมื่อแม่พิมพ์เลื่อนเปิดต่อไปก็จะแยกเปิดออกตามแนวเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์เส้นที่ 2 อีกชั้นหนึ่งเพื่อปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ข้อควรระวังในการออกแบบคือการเปิดของแม่พิมพ์ตามเส้นแบ่งส่วนแม่พิมพ์เส้นที่ 1 จะต้องเปิดกว้างเพียงพอที่จะให้แกนรูฉีด แกนรูปร่าง และแกนรูเข้าหลุดจากแม่พิมพ์ได้สะดวก

5) แม่พิมพ์ฉีดแบบรูปร่างร้อน (Hot-runner injection mold) แม่พิมพ์ฉีดแบบรูปร่างร้อนหรือบางครั้งเรียกว่า แม่พิมพ์ฉีดแบบปราศจากรูปร่างหรือรูฉีด (Sprueless or runnerless mold) เป็นแม่พิมพ์ที่ระบบส่งพลาสติกเข้าแบบจะต้องร้อนอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้พลาสติกยังคงสภาพเหลวอยู่พร้อมที่จะฉีดเข้าแบบในจังหวะต่อไปได้ทันที ซึ่งมีข้อดีหลายประการคือ

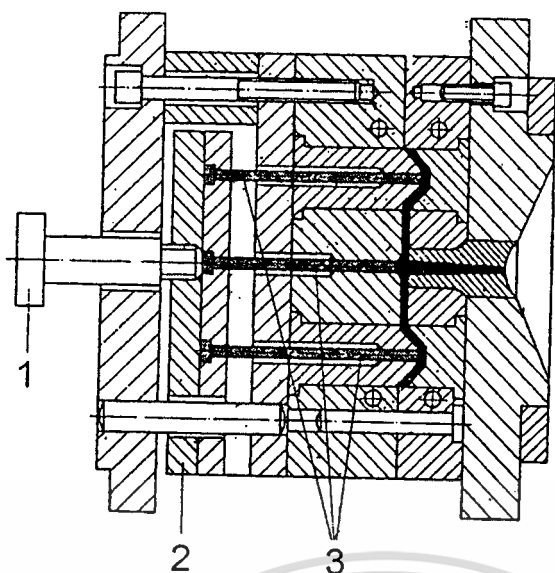
- 5.1 ทำให้รอบการทำงานของการฉีดเร็วขึ้น
- 5.2 ไม่ต้องทำการตัดขั้วของชิ้นงานออกหลังจากปลดออกจากแม่พิมพ์
- 5.3 ลดการสูญเสียพลาสติกเพราะไม่ต้องเอาพลาสติกออกจากร่องนำและหัวฉีดนำ

2.3 ระบบการปลดชิ้นงาน (Ejection system)

การปลดชิ้นงาน หมายถึง การนำเอาชิ้นงานพลาสติกที่เย็นออกจากแม่พิมพ์ขณะที่แม่พิมพ์เปิดออก ซึ่งมีหลักการการทำงานที่สำคัญอยู่ 4 ประการ [3] คือ

- 1) ในการปลดชิ้นงานจะต้องไม่ทำให้ชิ้นงานแปรรูปหรือเสียรูปไป
- 2) การปลดชิ้นงานจะต้องมั่นใจได้ว่า ชิ้นงานจะต้องหลุดออกทุกครั้งที่ทำกรปลด
- 3) ต้องใช้เวลาในการปลดชิ้นงานออกสั้นที่สุด
- 4) จากคำกล่าวในข้อ 3 จึงมีความต้องการในการปลดชิ้นงานออกโดยอัตโนมัติเกิดขึ้น

ลักษณะขั้นต้นที่ช่วยทำให้การปลดชิ้นงานออกได้ง่ายก็คือ ผิวของแม่พิมพ์จะต้องขัดเรียบและมีความเร็วในทิศทางปลดออกพอประมาณ การหดตัวของชิ้นงานขณะเย็นตัวลงในแม่พิมพ์มีส่วนเอื้ออำนวยให้ปลดชิ้นงานออกได้ง่ายส่วนหนึ่ง ถ้าชิ้นงานมีแกนสอดอยู่พลาสติกจะหดตัวรัดแกนนี้ทำให้มีแรงดึงชิ้นงานโดยใช้แท่งยื่นประกบกับแผ่นประกบแท่งยื่นดังรูปที่ 2.6



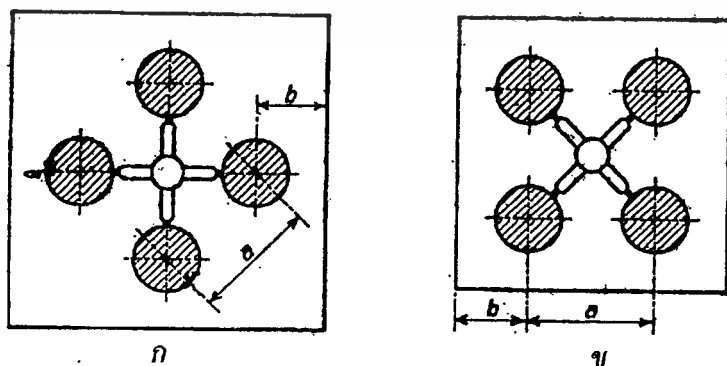
รูปที่ 2.6 แม่พิมพ์พร้อมทั้ง 1) สลักยันแผ่นประกอบแท่งยันปลดชิ้นงาน 2) แผ่นประกอบแท่งยันปลดชิ้นงาน 3) แท่งยื่นชิ้นงานออก [3]

2.4 การวางแบบชิ้นงานในแม่พิมพ์

การวางแบบชิ้นงานในแม่พิมพ์นั้นมีหลักการที่สำคัญอยู่ 3 ประการ [3] คือ

- 1) ต้องวางแม่พิมพ์ให้ใช้เนื้อที่น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ได้ขนาดทั้งหมดของแม่พิมพ์เล็กที่สุด
- 2) จัดรูวิ่ง (Runner) ให้สั้นที่สุดเท่าที่จะทำได้
- 3) จัดวางแบบให้ถูกต้อง เพื่อให้แรงปิดแม่พิมพ์สมดุล

เพื่อประกอบหลักการในข้อที่หนึ่งให้สังเกตรูป 2.7 ก และ 2.7 ข ว่าการวางแบบชิ้นงานเหมือนกัน มีระยะห่างจากขอบนอกของแม่พิมพ์เท่ากัน แต่มีขนาดของแม่พิมพ์ ก ใหญ่กว่าแม่พิมพ์ ข

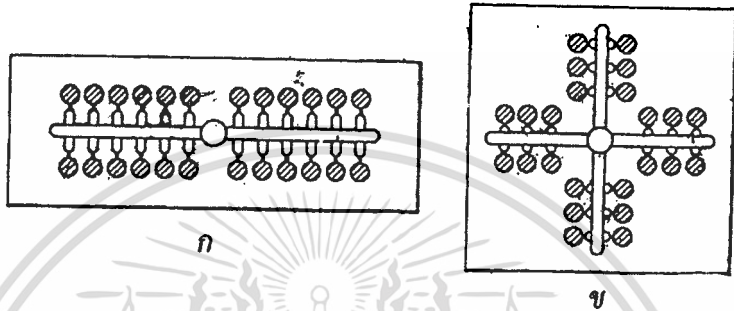


รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการจัดวางแบบชิ้นงานเพื่อลดขนาดของแม่พิมพ์ ก) ไม่เหมาะสม ข) เหมาะสม [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

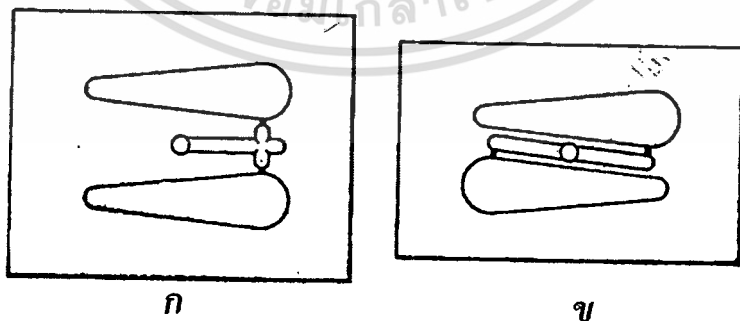
สำหรับประการที่สองที่ว่าด้วยการจัดรูปร่างให้สั้นที่สุดนั้นมีเหตุผลอยู่ดังนี้คือ

- 1) ถ้ารูปร่างยาวเกินไปจะทำให้เกิดความดันลัดในร่องนำมาก ทำให้พลาสติกเย็นเร็วเกินไป เป็นผลให้แบบชิ้นงานที่อยู่ห่างออกไปอาจได้รับพลาสติกไม่เต็มแบบ
- 2) ถ้ามีชิ้นงานจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 2.8 ก จะทำให้รูปทรงของแม่พิมพ์ไม่ได้สัดส่วนและรูปร่างยาวเกินไป นอกจากนี้ความยาวยังอาจทำให้แม่พิมพ์โก่งเนื่องจากแรงกระทำภายในแม่พิมพ์และพลาสติกอาจเล็ดลอดออกมาได้ ควรจัดใหม่ดังรูปที่ 2.8 ข



รูปที่ 2.8 ลักษณะความยาวของรูปร่างที่เหมาะสม ก) ไม่เหมาะสม ข) เหมาะสม [3]

ในหลักการที่สามนั้น ถ้าการวางแบบของชิ้นงาน ไม่สมดุลคือมีพื้นที่รับแรงดันจากการฉีดมากเกินไปทางใดทางหนึ่ง เมื่อถือแนวหัวฉีดทั้งแกนตั้งและแกนนอนเป็นหลักจะทำให้เกิดแรงดันบิดแบบไม่สมดุลซึ่งจะทำให้แม่พิมพ์แยก พลาสติกเล็ดลอดออกมาทำให้เป็นครีป (Flashing) และรูปทรงอาจเสียไปได้ รูปที่ 2.9 แสดงการแก้ไขวิธีการวางแบบชิ้นงานให้ถูกต้อง รูปที่ 2.9 ก เมื่อแบ่งครึ่งแม่พิมพ์ตามแนวตั้งพบว่าพื้นที่ของชิ้นงานทางขวามือจะมีมากกว่าด้านซ้ายมือ และเมื่อแก้ไขเป็นรูปที่ 2.9 ข จะได้พื้นที่ของชิ้นงานเท่ากัน

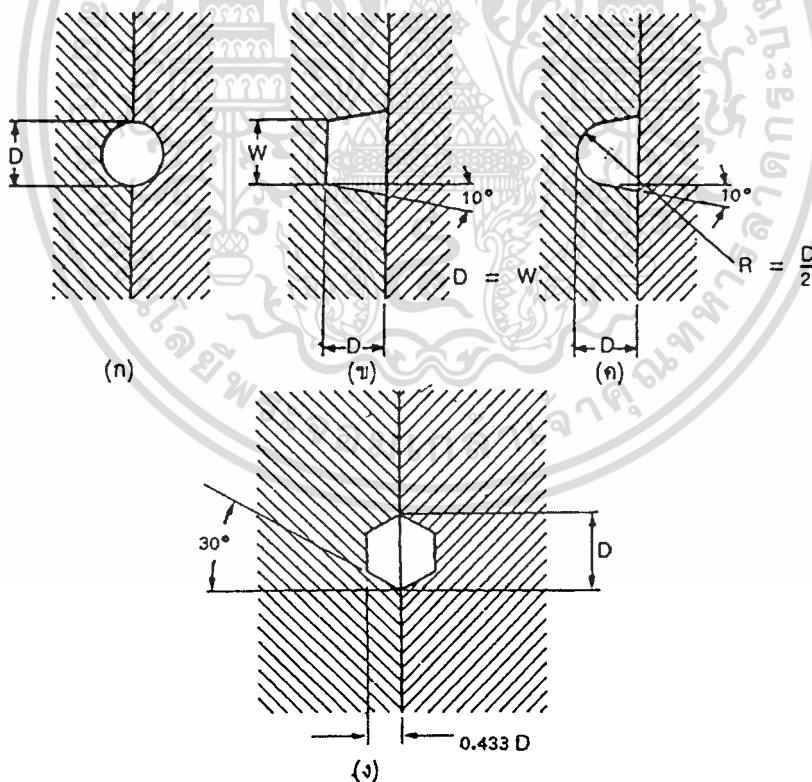


รูปที่ 2.9 การจัดแบบชิ้นงานให้เกิดการสมดุลของแรงภายในแบบ ก) ไม่สมดุล ข) สมดุล [3]

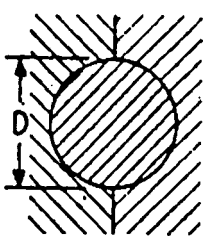
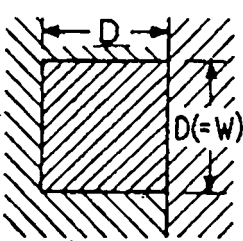
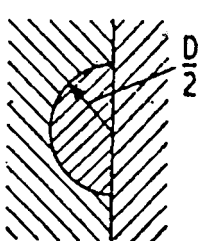
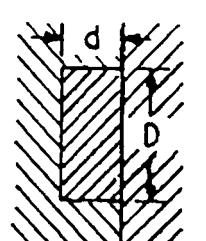
2.5 รูว้าง (Runner)

รูว้างคือ ร่องที่ตัดเฉือนในแม่พิมพ์เพื่อให้รูฉีดและรูเข้าโพรงแบบติดต่อกันได้ หน้าที่หลักของรูว้างคือ นำพลาสติกเหลวจากหัวนำฉีด (Sprue bush) ไปแจกจ่ายให้กับแบบชิ้นงานโดยมีความดันลดน้อยที่สุด และพร้อมกันนั้นจะต้องรักษาปริมาณพลาสติกที่ค้างในรูนำฉีด (Sprue) ให้น้อยด้วย

พื้นที่หน้าตัดของรูว้างมีหลายแบบดังแสดงในรูปที่ 2.10 การออกแบบรูว้างที่มีประสิทธิภาพมีเกณฑ์การพิจารณาหลายประการ [2] กล่าวคือรูว้างควรจะมีพื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่ที่สุดเมื่อพิจารณาจากการส่งถ่ายแรงดัน และเมื่อพิจารณาจากการส่งถ่ายความร้อนรูว้างควรมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเนื้อพลาสติกน้อยที่สุด อัตราส่วนของพื้นที่หน้าตัดต่อพื้นที่ผิวสัมผัสโดยรอบของรูว้างจะช่วยบอกถึงประสิทธิภาพของการออกแบบรูว้าง กล่าวคือหากอัตราส่วนมีค่ามากแสดงว่ามีประสิทธิภาพสูง อัตราส่วนของรูว้างที่มีรูปทรงหน้าตัดแบบต่าง ๆ กันแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่ารูว้างแบบกลมและแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสจะเป็นแบบที่มีค่าอัตราส่วนมากในขณะที่ค่าอัตราส่วนของแบบครึ่งวงกลมและแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้ามีค่าต่ำทำให้ไม่นิยมใช้กัน



รูปที่ 2.10 รูว้างแบบต่าง ๆ (ก) แบบวงกลม (ข) แบบสี่เหลี่ยมคางหมู (ค) แบบครึ่งวงรี (ง) แบบหกเหลี่ยม [2]

			
แบบกลม	แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส	แบบครึ่งวงกลม	แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า
0.25 D	0.25 D	0.153 D	$d = \begin{matrix} \frac{D}{2} & 0.166 D \\ \frac{D}{4} & 0.1 D \\ \frac{D}{6} & 0.071 D \end{matrix}$
$\text{อัตราส่วน} = \frac{\text{พื้นที่หน้าตัดของรูว้าง}}{\text{พื้นที่ผิวสัมผัส}}$			

รูปที่ 2.11 ประสิทธิภาพของรูว้างที่มีรูปทรงหน้าตัดต่าง ๆ กัน [2]

แต่รูว้างแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสมักไม่ค่อยนิยมใช้กัน ทั้งนี้เพราะการปลดแคนรูว้างกระทำได้อย่างดีด้วยเหตุผลนี้ในทางปฏิบัติจึงทำผนังของรูว้างให้เอียงเป็นมุม 10 องศา ซึ่งเป็นการปรับปรุงรูว้างแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสไปเป็นแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

2.6 รูเข้า (Gate)

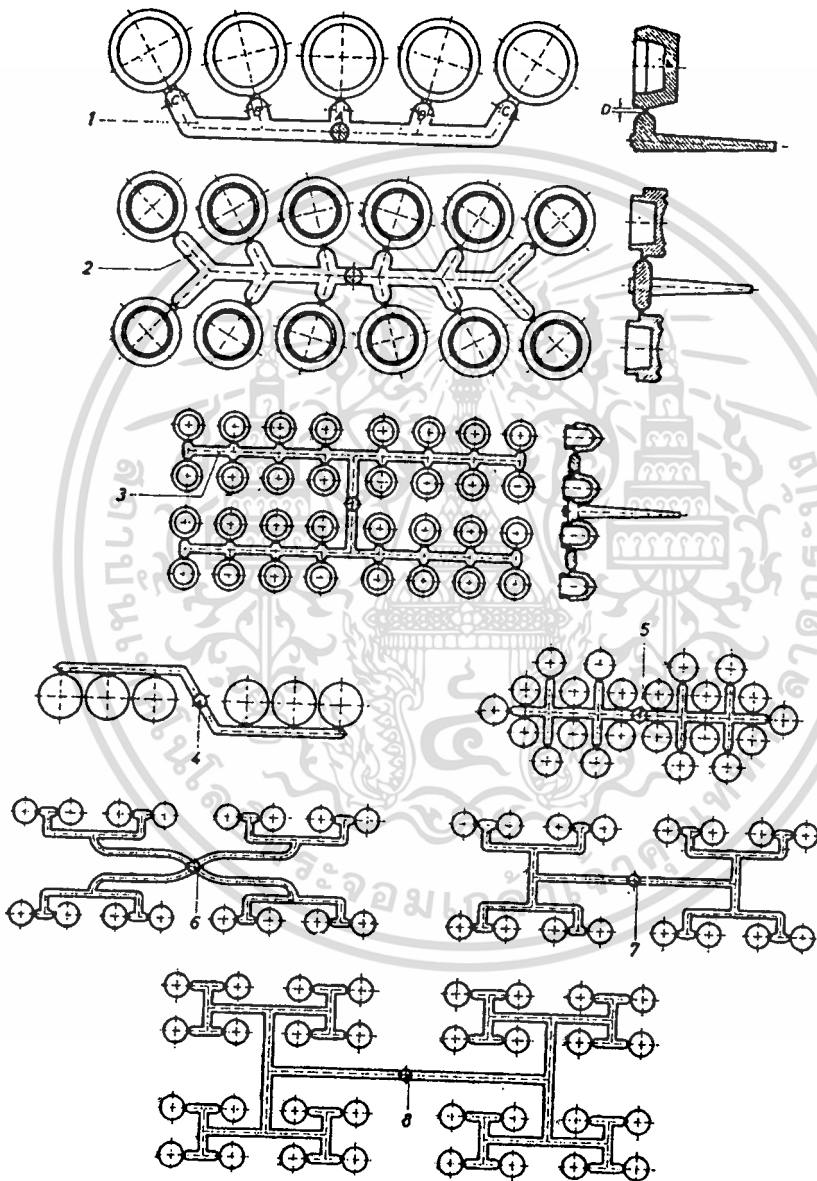
รูเข้า คือร่องหรือรูเล็กที่ต่อระหว่างรูว้างกับโพรงแบบ ขนาดพื้นที่หน้าตัดจะมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับระบบป้อนส่วนที่เหลือ [2] เหตุที่ทำให้มีขนาดเล็กเนื่องจาก

- 1) แคนรูเข้าจะแข็งตัวได้เร็วหลังจากที่โพรงแบบถูกเติมด้วยเนื้อพลาสติกจนเต็ม ทำให้สามารถถอดก้านฉีด (Injection plunger) ของเครื่องฉีดพลาสติกออกได้โดยไม่ทำให้เกิดเป็นช่องว่างหรือแอ่งบนชิ้นงานเนื่องจากการดูดกลับ (Suck-back) ของเนื้อพลาสติก
- 2) ทำให้สามารถปลดแคนรูเข้าได้ง่ายและในแม่พิมพ์บางแบบสามารถปลดแคนรูเข้าได้โดยอัตโนมัติ
- 3) หลังจากปลดแคนรูเข้าแล้ว จะเหลือรอยตำหนิบนชิ้นงานเพียงเล็กน้อยเท่านั้น
- 4) สามารถควบคุมการเติมเนื้อพลาสติกในแม่พิมพ์แบบหลายโพรงแบบได้ดี
- 5) ความจำเป็นที่จะต้องอัดเนื้อพลาสติกเข้าไปในโพรงแบบมากกว่าที่ต้องการ เพื่อแก้ไขขนาดเนื่องจากการหดตัวจะมีน้อยลง

การเติมพลาสติกเหลวให้ได้ประโยชน์อย่างเต็มที่ จะต้องเลือกใช้ชนิดของรูเข้าอย่างระมัดระวัง แต่ส่วนมากจะมีรูเข้าเพียงชนิดเดียวเท่านั้นที่เหมาะสมกับลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการ ไม่ว่าจะวิธีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิด ชนิดของรูเข้าที่ใช้กันทั่ว ๆ ไป ได้แก่ รูเข้าแบบรูฉีด (Sprue gate) รูเข้าแบบขอบ (Edge gate) รูเข้าแบบเหลื่อม (Overlap gate) รูเข้าแบบพัด (Fan gate) รูเข้าแบบม่าน (Diaphragm gate) รูเข้าแบบวงแหวน (Ring gate) รูเข้าแบบฟิล์ม (Film gate) รูเข้าแบบเข็ม (Pin gate) รูเข้าใต้ผิวแม่พิมพ์ (Subsurface gate) เป็นต้น [2]

รูปที่ 2.12 เป็นตัวอย่างการจัดรูวิ่งและรูเข้าของแม่พิมพ์ที่มีชิ้นงานหลายชิ้น และบางลักษณะที่ไม่ค่อยเหมาะสม



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างรูวิ่ง 1) แบบรูนำฉีดเฉียงศูนย์และมีการปรับช่องนำพลาสติกเข้าแบบได้เหมาะสม 2) แบบรูนำฉีดอยู่ตรงศูนย์กลาง 3) แบบรูวิ่งเข้าชิ้นงานคู่และวางขนานกัน 4) การจัดระเบียบชิ้นงานให้สมดุลและรูนำฉีดอยู่ตรงกลาง 5) แบบรูนำฉีดอยู่ตรงกลางและรูวิ่งแยกเป็นรูปกากบาท 6) 7) และ 8) เป็นตัวอย่างการจัดรูวิ่งพลาสติกที่ไม่เหมาะสม [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การหล่อเย็น (Cooling)

2.7.1 ความสำคัญของการหล่อเย็น

โดยทั่ว ๆ ไปช่างทำแม่พิมพ์มักจะไม่ได้ให้ความสำคัญกับระบบการหล่อเย็นมากนัก [2] และจัดวางระบบหล่อเย็นหลังจากออกแบบระบบอื่นเรียบร้อยแล้ว ซึ่งเป็นความคิดที่ไม่ถูกต้อง การจัดวางระบบหล่อเย็นควรจะทำไปพร้อม ๆ กับการออกแบบระบบอื่น เพราะระบบการหล่อเย็นที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ชิ้นงานเสียหายได้ เช่น การออกแบบระบบการหล่อเย็นที่ใหญ่เกินไปทำให้ชิ้นงานเกิดความเครียด บิดงอ หรือทำให้ชิ้นงานแตกร้าวได้ ถ้าออกแบบระบบการหล่อเย็นให้เล็กเกินไป อาจทำให้เวลาของรอบการผลิตมากขึ้น ในทางปฏิบัติเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องจัดวางให้เหมาะสม เพื่อการหล่อเย็นจะได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาว และระยะห่างจากผิวของโพรงแบบ (Cavity) จะต้องเหมาะสม ผิวของท่อน้ำเย็นควรจะทำให้เรียบเพื่อให้ถ่ายเทความร้อนเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อัตราเร็วและความสม่ำเสมอในส่วนของ การหล่อเย็นจะมีผลกระทบต่อชิ้นงาน ผลกระทบนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนสำคัญ [4] คือ คุณภาพ (Quality) และต้นทุนการผลิต (Production costs)

2.7.1.1 ข้อพิจารณาในเรื่องคุณภาพ

ปัจจัยที่ต้องใช้ในการพิจารณา

1) ผิวชิ้นงาน (Surface finish) วัสดุหลายชนิดต้องการอุณหภูมิเท่ากับผิวแม่พิมพ์ที่ร้อนเพื่อใช้ในการทำผิวชิ้นงานให้ดี ในส่วนของความมันเงา ถ้ามีพื้นที่บางส่วนของผิวในช่องว่างแม่พิมพ์มีความแตกต่างของอุณหภูมิกับพื้นที่อื่นมากจะทำให้ผิวของชิ้นงานมีความแตกต่างกันมาก

2) ความเค้นตกค้าง (Residual stresses) ความเค้นตกค้างในส่วนนี้เกิดได้จากผลของการสร้างความเค้นเฉือน (Shear stresses) ในระหว่างช่วงของการเติมเต็ม (Mold filling) หรือในระหว่างการจัดตัว (Packing) การไหลที่ประกอบด้วยความเค้น (Stresses) พบว่าความเค้นตกค้างเกิดเนื่องจากพื้นที่ผิวในส่วนการหล่อเย็นมีอุณหภูมิแตกต่างกัน เมื่อชิ้นงานถูกปลดสิ่งที่ต้องการให้มีน้อยที่สุดคือความเค้นและความเค้นที่ตกค้าง เนื่องจากไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หรือเป็นสาเหตุทำให้เกิดการบิดงอ (Warpage) และการบิดเบี้ยว (Distortion) ของชิ้นงานเป็นต้น

3) ความเป็นผลึก (Crystallinity) ปริมาณความเป็นผลึกของชิ้นงานของวัสดุกึ่งผลึก (Semi-crystalline) เป็นผลมาจากอัตราการหล่อเย็นของน้ำหล่อเย็น โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกส่งผลกระทบต่อ การหดตัว (Shrinkage) ซึ่งในส่วน of ระบบหล่อเย็นจะรักษาขนาดของชิ้นงานได้ยากเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงในการหดตัวจากส่วนหนึ่ง ไปยังอีกส่วนหนึ่งของชิ้นงานเป็นสาเหตุทำให้เกิดการโค้งงอ

4) การโค้งงอจากความร้อน (Thermal bending) ถ้าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างผนังด้านบนของแม่พิมพ์และผิวด้านล่าง จะทำให้ชิ้นงานตรงส่วนนี้มักเกิดการโค้งงอ

2.7.1.2 ข้อพิจารณาในเรื่องต้นทุนการผลิต

อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (Ejection temperature) เป็นอุณหภูมิที่สามารถปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ชิ้นงานต้องมีความแข็งเพียงพอต่อการต้านทานการโค้งงอ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการหดตัวและความดันที่ตกค้าง ความแข็งนี้ต้องเพียงพอเพื่อต้านทานแรงที่มากระทำอันเนื่องมาจากกระบวนการปลดชิ้นงาน โดยแรงที่ปลดชิ้นงานนี้มีผลกระทบต่อส่วนของโครงสร้างและผิวชิ้นงาน ถ้าทำการหล่อเย็นเร็วจะทำให้รอบการทำงานสั้นลงทำให้ลดต้นทุนการผลิตได้ แต่คุณภาพที่ได้จะน้อยลง ดังนั้นจึงควรพิจารณาถึงคุณภาพและราคาประกอบกัน

2.7.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบการหล่อเย็น

การเข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบการหล่อเย็นทำให้สามารถเลือกตำแหน่งที่ต้องการถ่ายเทความร้อนได้ดี การถ่ายเทความร้อนมี 3 แบบ [4] คือ

1) การถ่ายเทความร้อนจากพลาสติกไปยังผนังโพรงแบบ (Cavity wall)

การถ่ายเทความร้อนจากพลาสติกไปยังผนังโพรงแบบได้ดีขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของการหลอมเหลวกับอุณหภูมิของผิวแม่พิมพ์ ซึ่งระบบหล่อเย็นมีผลต่ออุณหภูมิแม่พิมพ์ทำให้ควบคุมการถ่ายเทความร้อนได้

2) การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังแม่พิมพ์

เมื่อผนังแม่พิมพ์ได้รับความร้อนจากพลาสติกจะส่งผ่านความร้อนไปยังท่อหล่อเย็นโดยผ่านผนังแม่พิมพ์ การถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุที่ทำแม่พิมพ์ไปยังช่องของสารหล่อเย็นขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุที่ทำแม่พิมพ์ประกอบด้วย ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ระยะห่างระหว่างช่องของระบบการหล่อเย็นกับผิวของพลาสติก และความแตกต่างของอุณหภูมิจากพลาสติกหลอมเหลวกับช่องของสารหล่อเย็น วัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงจะทำให้วัสดุนั้นมีการนำความร้อนได้ดี (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 ค่าการนำความร้อนของวัสดุแม่พิมพ์ [4]

Mold Material	AISI Specification	Thermal Conductivity (W/m/K)
Stainless mold steel	420	23.0
Medium alloy steel	P20	29.0
Carbon steel	1020	46.7
Be-Cu Alloy	C17000	130.0
Be-Cu Alloy	C17500	260.0

3) การถ่ายเทความร้อนจากผนังแม่พิมพ์ไปยังสารหล่อเย็น (Coolant)

ระบบหล่อเย็นมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนจากวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ไปยังสารหล่อเย็น สารหล่อเย็นที่ไหลผ่านวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์จะมีผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อน โดยขึ้นกับอุณหภูมิของสารหล่อเย็นที่ทางเข้า สมบัติของสารหล่อเย็น และอัตราการไหลของสารหล่อเย็น

2.7.3 ข้อพิจารณาในระบบการหล่อเย็น [2]

1) ระบบหล่อเย็นควรเป็นชนิดเดียวกันคือมีวงจรที่เหมือนกัน และแต่ละตำแหน่งของแม่พิมพ์ไม่ควรมีความแตกต่างของอุณหภูมิมากนัก

2) บางครั้งแม้ว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์สูง แต่เวลาในการหล่อเย็นไม่จำเป็นต้องนานด้วย เนื่องจากการระบายความร้อนเป็นไปอย่างเหมาะสม การนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ควรจะนำออกเมื่ออุณหภูมิน้อยกว่าอุณหภูมิที่ทำให้ชิ้นงานบิดตัว

3) อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้าและออกไม่ควรแตกต่างกันเกิน 2°C

4) เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำหล่อเย็นประมาณ 8-12 มิลลิเมตร

5) แม่พิมพ์ต้องมีอุณหภูมิที่ต้องการในการเริ่มการผลิตในรอบใหม่

6) มีรอบในการผลิตน้อยที่สุด

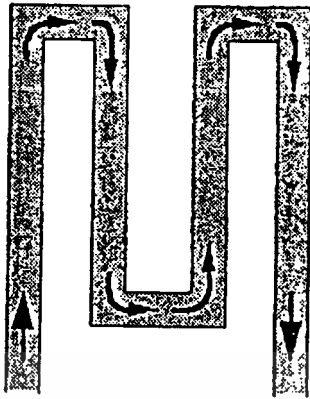
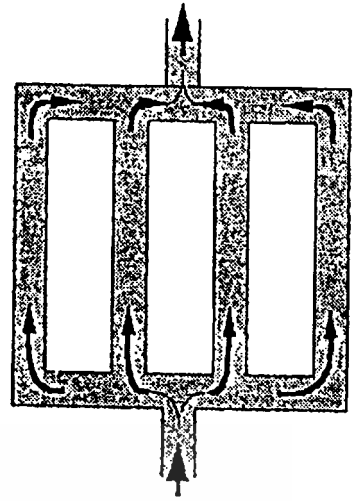
การตัดสินใจในการออกแบบระบบหล่อเย็นสามารถแบ่งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบหล่อเย็นได้เป็น 2 ส่วนใหญ่คือ [4]

1) แบบทางกายภาพของช่องทางวิ่ง

การออกแบบลักษณะทางกายภาพของระบบหล่อเย็นปกติจะทำการเลือกโดยอาศัยโครงสร้างของแม่พิมพ์ ตำแหน่งของรอยต่อ แกนที่เคลื่อนที่และเข็มกระทุ้ง

1.1 การต่อขนานและการต่ออนุกรมของช่องทางวิ่ง

ถ้ารูฉีดและสลักปลดชิ้นงานที่ต้องการการหล่อเย็นวางอยู่ตรงกันข้ามจำเป็นต้องมีการหล่อเย็นแบบสองวงจร กล่าวคือในการต่อแบบอนุกรมเมื่อน้ำหล่อเย็นไหลผ่านท่อเป็นระยะทางยาวมาก น้ำจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยเฉพาะในแม่พิมพ์ขนาดใหญ่จะทำให้อุณหภูมิไม่เท่ากัน ถ้าใช้ระบบการหล่อเย็นแบบอนุกรมกับแม่พิมพ์ที่มีหลายโพรงแบบแล้ว จะทำให้ขนาดของชิ้นงานแตกต่างกันได้ เพราะการหล่อเย็นในแต่ละโพรงแบบไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงควรนำการต่อแบบขนานมาใช้ เพราะการต่อแบบขนานจะทำให้การหล่อเย็นมีความสม่ำเสมอทั่วตลอดแม่พิมพ์ แต่การไหลในท่อจะต้องเท่า ๆ กันในแต่ละชุด เพราะถ้าอัตราการไหลไม่เท่ากันจะทำให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ไม่สม่ำเสมอตามไปด้วย รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างการต่อท่อหล่อเย็น

Series
CircuitParallel
Circuit

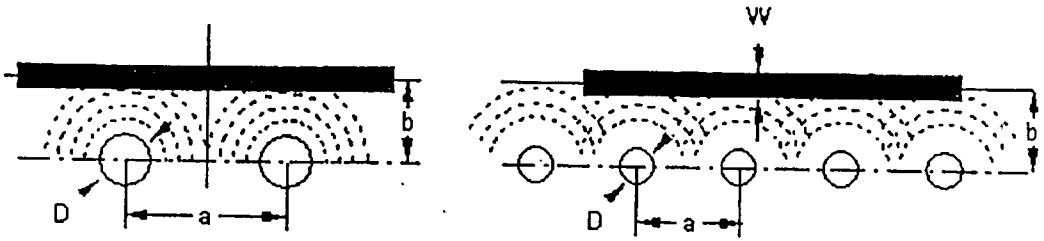
รูปที่ 2.13 การต่อท่อน้ำหล่อเย็นแบบอนุกรมและแบบขนาน [4]

1.2 ระยะระหว่างท่อหล่อเย็นและ โพรงแบบ

พบว่าระยะระหว่างท่อหล่อเย็นและ โพรงแบบยิ่งห่างจะทำให้การกระจายความร้อนเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และจะทำให้อุณหภูมิที่ผิวโพรงแบบในระหว่างการฉีดสูง ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานผิดรูปน้อยและสมบัติเชิงกลดีขึ้น ทำให้รอบเวลามากขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าท่อหล่อเย็นใกล้กับโพรงแบบจะทำให้ความร้อนถ่ายเทได้เร็ว แต่มีโอกาสทำให้ชิ้นงานผิดรูปไปและทำให้สมบัติเชิงกลลดลง

ถ้าระยะระหว่างท่อหล่อเย็นน้อย ๆ จะทำให้อุณหภูมิบนแม่พิมพ์สม่ำเสมอ แต่อย่างไรก็ดี ถ้าไม่สามารถทำให้ท่อหล่อเย็นอยู่ใกล้ ๆ กัน ควรจะขยายท่อหล่อเย็นให้ใหญ่ขึ้น และถ้าผนังของชิ้นงานหนาขึ้นควรใช้ท่อหล่อเย็นที่โตขึ้นเพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น

1.3 เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อหล่อเย็น จากรูปที่ 2.14 เป็นรูปแสดงตำแหน่งของท่อหล่อเย็น เส้นประ คือเส้นที่แสดงอุณหภูมิที่เท่ากัน เพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนสม่ำเสมอ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อหล่อเย็น (D) ควรเป็น $1/3$ ของระยะระหว่างท่อหล่อเย็น (a) [4] ในกรณีพิเศษซึ่งไม่สามารถทำตามหลักการนี้ได้ให้เปลี่ยนแปลงไปตามความเหมาะสมแต่ควรจะทำตามหลักการที่กล่าวมานี้มากที่สุด



รูปที่ 2.14 การจัดตำแหน่งของท่อน้ำหล่อเย็น [4]

เมื่อทำทางไหลของสารหล่อเย็นโดยวิธีเจาะรู ต้องไม่วางตำแหน่งของรูให้อยู่ใกล้กับโพรงแบบน้อยกว่า 16 มิลลิเมตร (5/8 นิ้ว) เนื่องจากจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิตรงผิวของโพรงแบบ ซึ่งจะปรากฏเป็นรอยตำหนิบนชิ้นงานได้

การวางแผนทางไหลของระบบหล่อเย็นเป็นเรื่องที่ค่อนข้างซับซ้อน เนื่องจากรูทางไหลต้องไม่เจาะใกล้กับรูอื่น ๆ บนแผ่นแม่พิมพ์แผ่นเดียวกันมากเกินไป แม่พิมพ์ประกอบด้วยรูและร่องต่าง ๆ มากมายเพื่อใช้ใส่ประกอบ สลักปลด เพลาน้ำ ปลอกน้ำ ปลอกกรณีฉีด อินเลิร์ตของเบ้าและคอร์ของแม่พิมพ์ เป็นต้น ระยะใกล้ที่สุดที่จะทำได้ขึ้นอยู่กับความลึกของรูทางไหลที่ต้องการเจาะ ในขณะเจาะรูทางไหลที่ลึกมาก ๆ ดอกสว่านมักจะเบนออกจากตำแหน่งศูนย์เดิม ซึ่งอาจเจาะพลาดไปทะลุรูอื่น ๆ ได้ ดังนั้นการเจาะรูทางไหลของระบบหล่อเย็นที่มีรูทางไหลลึกถึง 150 มิลลิเมตร (6 นิ้ว) รูเจาะต้องไม่ใกล้กับรูอื่น ๆ น้อยกว่า 3 มิลลิเมตร (1/8 นิ้ว) และสำหรับรูเจาะที่ลึกมากกว่านี้ ระยะห่างใกล้สุดจะเพิ่มเป็น 5 มิลลิเมตร (3/16 นิ้ว) [2]

2) ปัจจัยต่าง ๆ ของสารหล่อเย็น เช่น ชนิดของสารหล่อเย็น อุณหภูมิ อัตราการไหล เป็นต้น

การคำนวณปริมาณความร้อนที่ต้องระบายออกจากแม่พิมพ์ต่อชั่วโมง Q_c จะคำนวณได้จากสูตรดังนี้ [5]

$$Q_c = m[C_p(T_1 - T_2) + L] \text{ kJ/h} \quad (2.1)$$

โดย m = มวลพลาสติกที่ฉีดต่อชั่วโมง (kg/h)

C_p = ค่าความร้อนจำเพาะของพลาสติกที่ใช้ (kJ/kg.K)

T_1 = อุณหภูมิฉีดเข้าของพลาสติก (K)

T_2 = อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (K)

L = ค่าความร้อนแฝงของการหลอมละลายของพลาสติก (kJ/kg)

และมวลของน้ำหล่อเย็น m_2 ที่ใช้ต่อชั่วโมงจะคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$m_2 = \frac{m[C_p(T_1 - T_2) + L]}{K(T_3 - T_4)} \quad (2.2)$$

โดย m_2 = มวลของน้ำหล่อเย็น (kg/h)

T_1 = อุณหภูมิฉีดเข้าของพลาสติก (K)

T_2 = อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (K)

T_3 = อุณหภูมิของน้ำออกจากแม่พิมพ์ (K)

T_4 = อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเข้าแม่พิมพ์ (K)

K = ค่าคงที่ของประสิทธิภาพการส่งผ่านความร้อน (kJ/kg.K)

เพื่อให้การวางแผนทางไหลกระทำได้ง่ายและได้ตำแหน่งที่เหมาะสม ในการออกแบบจึงควรกำหนดวงจรระบบหล่อเย็นเป็นสิ่งแรก ขึ้นส่วนอื่น ๆ ของแม่พิมพ์ เช่น สลักปลด ปลอดภัย เป็นต้น สามารถที่จะกำหนดตามในภายหลังได้

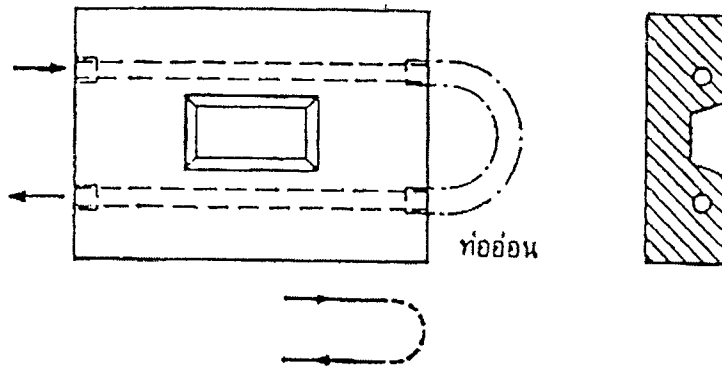
2.7.4 การหล่อเย็นแผ่นแม่พิมพ์แบบชั้นเดียว (Cooling integer-type mold plates) [2]

อุณหภูมิของแผ่นแม่พิมพ์แบบชั้นเดียวจะควบคุมโดยใช้น้ำไหลเวียนในรูที่เจาะไว้ในแผ่นแม่พิมพ์ โดยปกติรูจะเจาะทะลุถึงกันเพื่อต่อเป็นวงจรระบบหล่อเย็น วงจรนี้อาจเป็นแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้นก็ได้ จำนวนชั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นแม่พิมพ์

เนื่องจากวงจรระบบหล่อเย็นของแผ่นเบ้าแบบชั้นเดียวและแผ่นคอร์แบบชั้นเดียวจะแตกต่างกัน ดังนั้นจะแยกกล่าวในรายละเอียดดังนี้

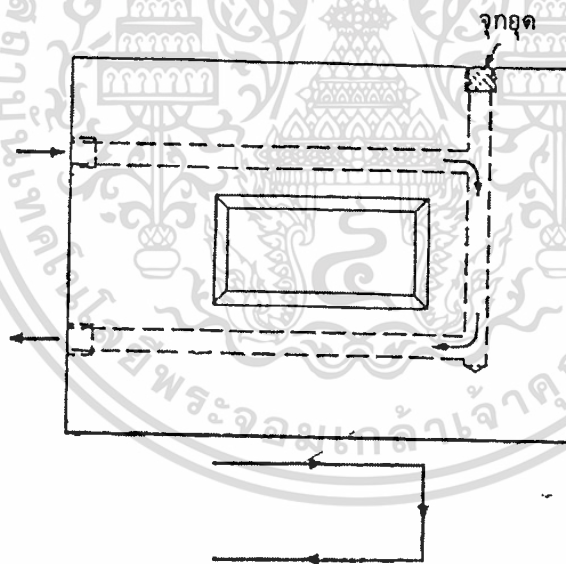
2.7.4.1 การหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบชั้นเดียว (Cooling integer-type cavity plate)

อันดับแรกจะขอเริ่มจากกรณีง่าย ๆ ก่อน นั่นคือแผ่นแม่พิมพ์ที่ประกอบด้วยเบ้าเล็ก ๆ และดื่น วิธีเจาะรูทางไหลของระบบหล่อเย็นที่ง่ายที่สุดคือ เจาะรูยาวทะลุตลอดสองข้างของเบ้า ตรงปลายจะต่อถึงกันด้วยท่ออ่อน ทางด้านท่อน้ำเข้าและออกจะใส่ข้อต่อติดไว้ ดังรูปที่ 2.15



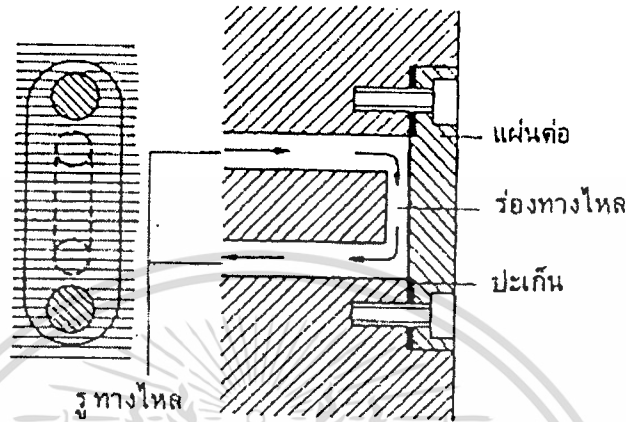
รูปที่ 2.15 วงจรหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบขึ้นเคียวอย่างง่าย [2]

เพื่อหลีกเลี่ยงการต่อวงจรข้างนอก รูทางไหลทั้งสองสามารถต่อถึงกันได้ภายในแผ่นแม่พิมพ์ โดยเจาะรูวางตรงปลายรูทางไหลทั้งสอง (รูปที่ 2.16) ทำให้เกิดเป็นวงจรรูปตัวยู (U-circuit) ซึ่งใช้ได้ผลดีกับเบ้าของแม่พิมพ์ที่แคบและยาว



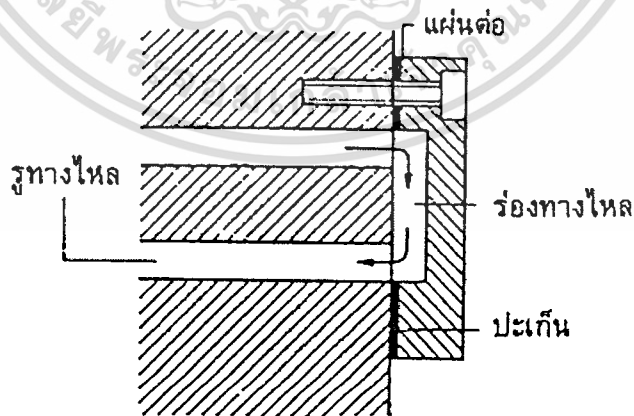
รูปที่ 2.16 วงจรหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบขึ้นเคียวแบบตัวยู [2]

แทนที่จะใช้วิธีเจาะรูแนวขวางเพื่อต่อวงจรระบบหล่อเย็น อาจใช้วิธีอื่น คือ กัดเป็นร่องตรงปลายของรูทางไหลทั้งสอง และใช้แผ่นต่อปิดในภายหลัง ซึ่งมีวิธีการออกแบบอยู่ 2 วิธี รูปที่ 2.17 แสดงรูทางไหล 2 รูเชื่อมต่อกันด้วยร่องที่กัดผิวด้านข้างของแม่พิมพ์ และกัดเป็นร่องบ่าสำหรับประกอบแผ่นต่อ และขันยึดด้วยสกรู ระหว่างแผ่นต่อกับบ่าจะใส่ปะเก็นไว้เพื่อป้องกันการรั่วของสารหล่อเย็น



รูปที่ 2.17 การใช้แผ่นต่อปิดร่องทางไหลให้เป็นวงจรรูปตัวยู แบบที่ 1 [2]

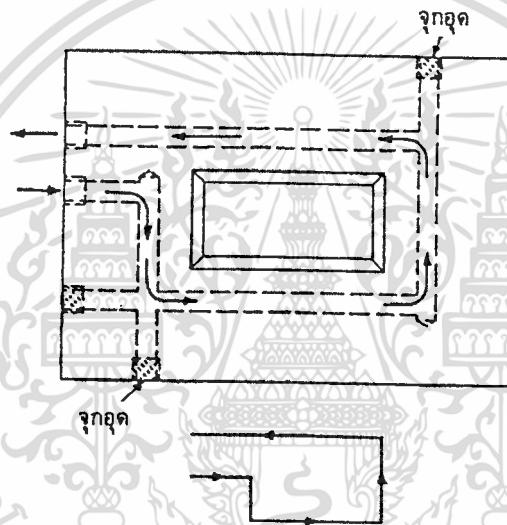
การออกแบบอีกวิธีหนึ่งจะแสดงไว้ในรูป 2.18 ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับวิธีแรก เว้นแต่ว่าร่องที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างทางไหลทั้งสองจะกัดเจาะไว้บนแผ่นต่อ และขันยึดเข้ากับผิวด้านข้างของแม่พิมพ์โดยตรงด้วยสกรู สำหรับวิธีหลังนี้จะมีราคาถูกกว่า แต่มีข้อเสียตรงที่ว่าจะทำให้การติดตั้งแม่พิมพ์กระทำไม่ได้ไม่สะดวกและอาจเกิดการรั่วของสารหล่อเย็นได้



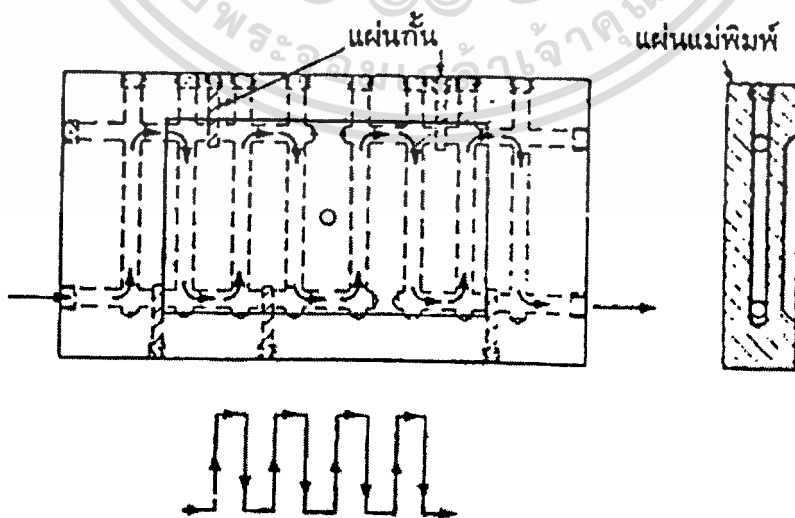
รูปที่ 2.18 การใช้แผ่นต่อปิดร่องทางไหลให้เป็นวงจรรูปตัวยู แบบที่ 2 [2]

วงจรระบบหล่อเย็นรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular circuit) ที่แสดงในรูปที่ 2.19 จะมีรูเจาะของทางไหลเพิ่มขึ้น และสามารถวางตำแหน่งทางไหลให้ใกล้กับด้านทั้งสี่ของเบ้าได้ ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ได้สม่ำเสมอเท่า ๆ กันยิ่งขึ้น

สำหรับเบ้าต้น ๆ ที่มีพื้นที่กว้างมาก ๆ วงจรดังกล่าวข้างต้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ วงจรระบบหล่อเย็นอาจอยู่ด้านใดของเบ้า รูเจาะในแผ่นแม่พิมพ์บางแห่งจะใส่จุกอุดและติดแผ่นกัน (รูปที่ 2.20) ซึ่งทำให้เกิดวงจรทางไหลเป็นรูปตัวแซด (Z-configuration) อุณหภูมิของสารหล่อเย็นจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อไหลผ่านเข้าไปยังส่วนต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ ดังนั้นรอยดำหนิที่เกิดจากการเย็นตัวจะปรากฏทางด้านรูน้ำเข้ามามากกว่าทางด้านรูน้ำออกของแม่พิมพ์ ซึ่งหมายความว่าความผันแปรของอุณหภูมิในแผ่นแม่พิมพ์จะเกิดจากการออกแบบทางไหลลักษณะนี้และอาจทำให้เกิดปัญหาในภายหลังได้



รูปที่ 2.19 การหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรรูปสี่เหลี่ยม [2]

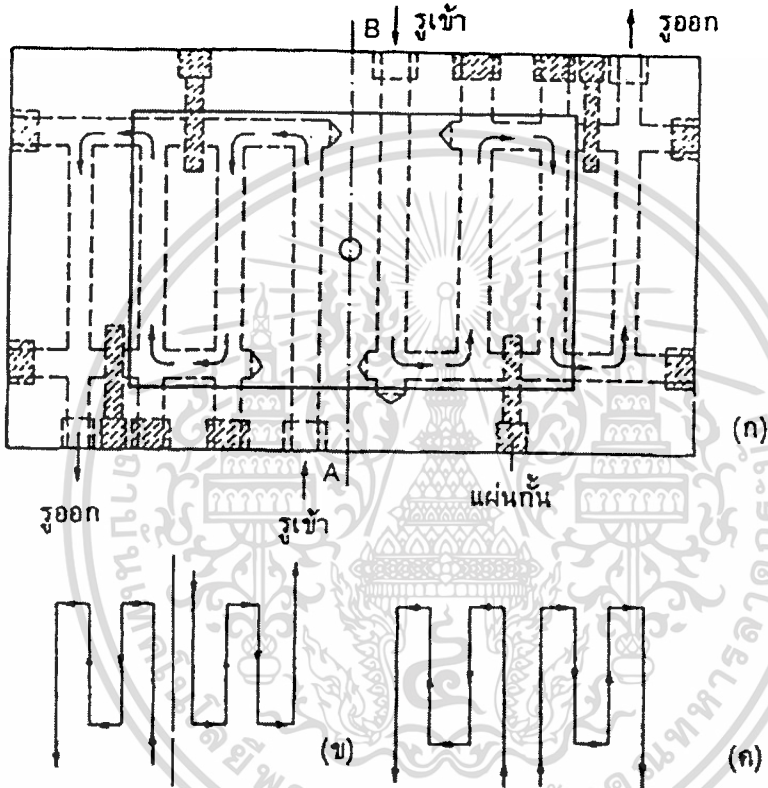


รูปที่ 2.20 การหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรรูปตัวแซด [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การออกแบบดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.21 ซึ่งเรียกว่าวงจรรูปตัวแซด (Z) แบบสมมูลเป็นที่นิยมใช้มากกว่า จากภาพจะสังเกตเห็นว่ารูเจาะทางด้านซ้ายกับทางด้านขวาของแม่พิมพ์จะเจาะรูขนาดเท่ากันและลักษณะเหมือนกันแต่อยู่ในทิศทางและแนวรูเจาะที่ตรงข้ามกัน รูเข้าของสารหล่อเย็นคือ A และ B ตามลำดับ และทั้งสองรูจะเจาะใกล้ ๆ กับแนวศูนย์กลางของแม่พิมพ์ซึ่งทำให้อยู่ใกล้กับรูทางเข้าที่มีอุณหภูมิสูงกว่าขอบด้านนอกของแม่พิมพ์

วงจรในลักษณะเดียวกันที่ได้รับการปรับปรุงเพื่อให้สะดวกในการติดตั้งแม่พิมพ์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.21 (ค) ซึ่งจัดให้รูเข้าและรูออกของสารหล่อเย็นอยู่ด้านเดียวกัน

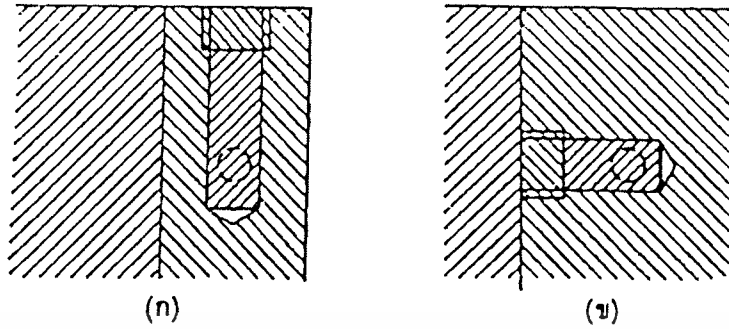


รูปที่ 2.21 การหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบขึ้นเดียวโดยใช้วงจรรูปตัวแซดแบบสมมูล (ก) วงจรรูปตัวแซดแบบสมมูล (ข) แผนภาพของวงจร (ค) การสมมูลวงจรรูปตัวแซดอีกวิธีหนึ่ง [2]

ในวงจรรูปตัวแซดแบบสมมูลจำเป็นต้องใช้แผ่นกั้น เพื่อกั้นทางไหลให้มีการไหลของสารหล่อเย็นอย่างต่อเนื่อง โดยไม่ให้สารหล่อเย็นรั่วไหลไปอย่างเปล่าประโยชน์ ตำแหน่งของแผ่นกั้นควรจะอยู่ในตำแหน่งที่สามารถตรวจสอบและสังเกตเห็นได้หากมีการรั่วไหลของสารหล่อเย็นเกิดขึ้น

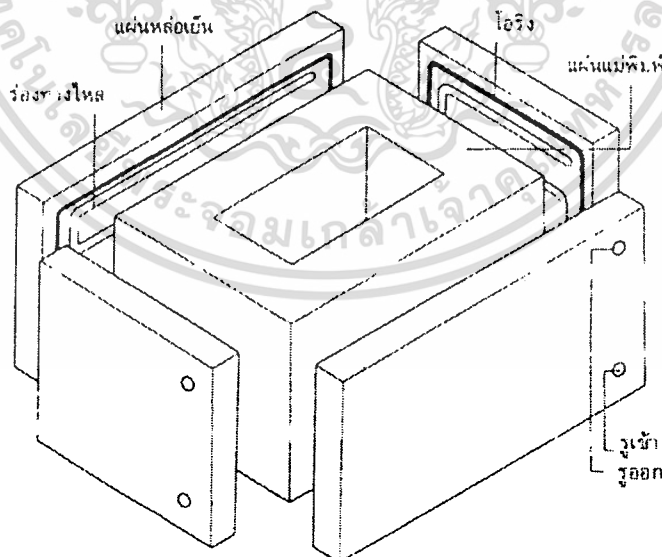
การยึดประกอบแผ่นกั้นที่ถูกรวบรวมและผิดวิธีได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.22 ข้อสังเกตคือหากมีการรั่วไหลของสารหล่อเย็นเกิดขึ้นกับแผ่นกั้นที่ยึดประกอบแบบ (ข) แผ่นแม่พิมพ์จะต้องถอดออกเพื่อให้สามารถซ่อมแซมได้ ซึ่งถ้าใช้แบบ (ค) ไม่จำเป็นต้องถอดแผ่นแม่พิมพ์ออก ในการออกแบบโดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั่วไปหากมีรูทางไหลและแผ่นกันประกอปร่วมอยู่ในวงจรงำนวนมาก: ควรจะเขียนวงจรของระบบหล่อเย็นเป็นแผนภาพเสียก่อน



รูปที่ 2.22 วิธียึดแผ่นกัน (ก) ถูกวิธี (ข) ไม่ถูกวิธี [2]

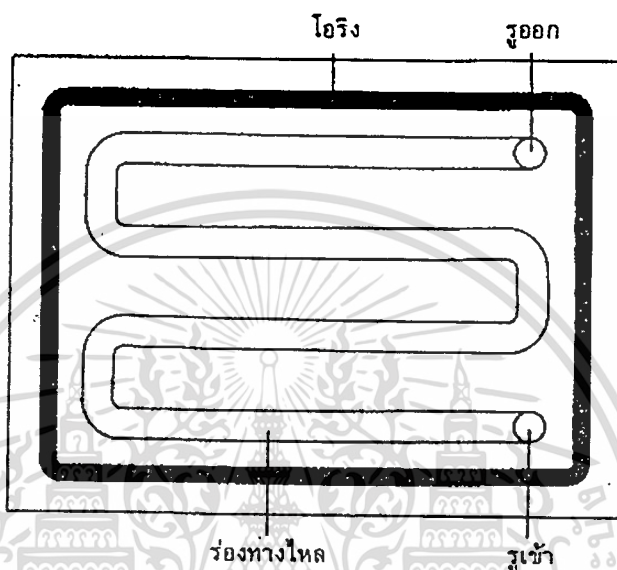
สำหรับชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อน โดยเฉพาะชิ้นงานที่ต้องใช้วงจรระบบหล่อเย็นที่มีรูปร่างแตกต่างกันในแต่ละชั้น การเจาะรูต่อวงจรระบบหล่อเย็นภายในแม่พิมพ์มักจะกระทำไม่ได้ ในกรณีเช่นนี้การต่อวงจรระบบหล่อเย็นสามารถต่อกันภายนอกแม่พิมพ์โดยใช้ท่ออ่อนก็ได้ แต่ถ้าต้องการควบคุมอุณหภูมิผนังของเบ้าแต่ละด้าน อาจใช้วิธีหล่อเย็นแบบใช้แผ่นหล่อเย็น (Coolant plate) แผ่นหล่อเย็นจะถูกออกแบบใช้ยึดเข้ากับผนังด้านข้างของแผ่นแม่พิมพ์ สารหล่อเย็นจะไหลไปตามร่องที่กัดไว้บนแผ่นหล่อเย็น และเจาะรูทะลุแผ่นหล่อเย็นจำนวน 2 รู สำหรับเป็นทางเข้าและทางออกของสารหล่อเย็นดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 วิธีหล่อเย็นแบบใช้แผ่นหล่อเย็น [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นหล่อเย็นที่ใช้ยึดเข้ากับผิวด้านข้างของแม่พิมพ์ทั้งสี่ด้านจะเป็นอิสระต่อกันและต่างก็มีทางเข้าและทางออกของสารหล่อเย็นเป็นชุดต่างหาก รูปร่างของร่องที่กัดไว้บนแผ่นหล่อเย็นสำหรับเป็นทางไหลของสารหล่อเย็นได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.24 ข้อสังเกตคือขนาดพื้นที่หน้าตัดของร่องจะทำให้มีขนาดค่อนข้างเล็กเพื่อให้เกิดการไหลวนของสารหล่อเย็น ซึ่งจะช่วยให้การถ่ายเทความร้อนจากแม่พิมพ์ไปยังสารหล่อเย็นมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ความยาวของร่องสามารถขยายหรือลดได้ตามต้องการซึ่งขึ้นอยู่กับงานแต่ละชนิด



รูปที่ 2.24 ร่องทางไหลในแผ่นหล่อเย็น [2]

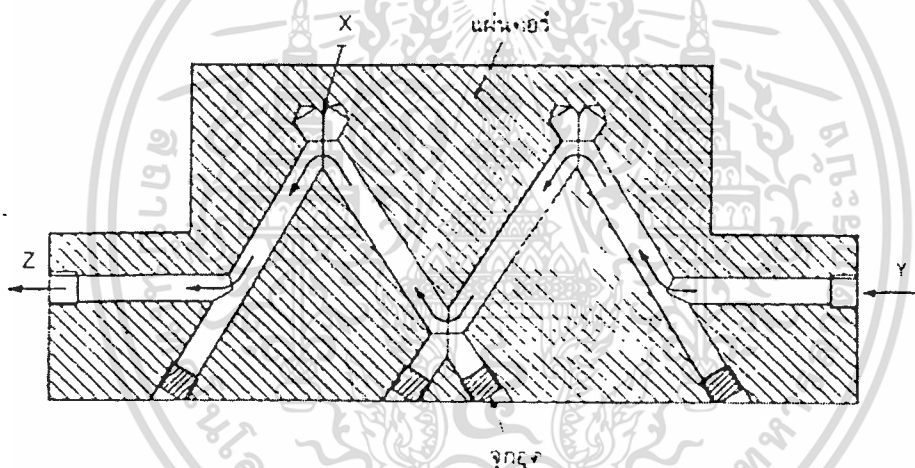
การออกแบบใช้แผ่นหล่อเย็นจะประสบปัญหาเช่นเดียวกันกับการเจาะรูหล่อเย็น กล่าวคือการก่อตัวของหินปูนและสนิม ดังนั้นประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของระบบหล่อเย็นทั้งสองแบบจะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อระยะเวลาการใช้งานเพิ่มขึ้น โดยปกติในทางปฏิบัติจะต้องทำความสะอาดร่องหรือรูของระบบหล่อเย็นเมื่อผ่านการใช้งานไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง เมื่อพิจารณาถึงจุดนี้ จะเห็นว่าการออกแบบใช้แผ่นหล่อเย็นจะประหยัดเวลาในการบำรุงรักษาได้มากกว่าเพราะแผ่นหล่อเย็นสามารถถอดออกได้ง่าย มีน้ำหนักเบา สามารถถอดออกมาทำความสะอาดได้เป็นชิ้นส่วนอิสระ โดยไม่ต้องถอดแม่พิมพ์ออกมาทั้งชุดและทำความสะอาดได้ง่าย

เพื่อลดเวลาที่ต้องสูญเสียไปในการบำรุงรักษาระบบหล่อเย็น ร่องหรือรูอาจจะเคลือบผิวเพื่อป้องกันการเกิดสนิมก็ได้ การรั่วไหลของสารหล่อเย็นสามารถป้องกันได้โดยใช้แผ่นปะเก็นหรือ โอรัง (O-ring) ดังแสดงในรูปที่ 2.24

2.7.4.2 การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบชั้นเดียว (Cooling integer-type core plate)

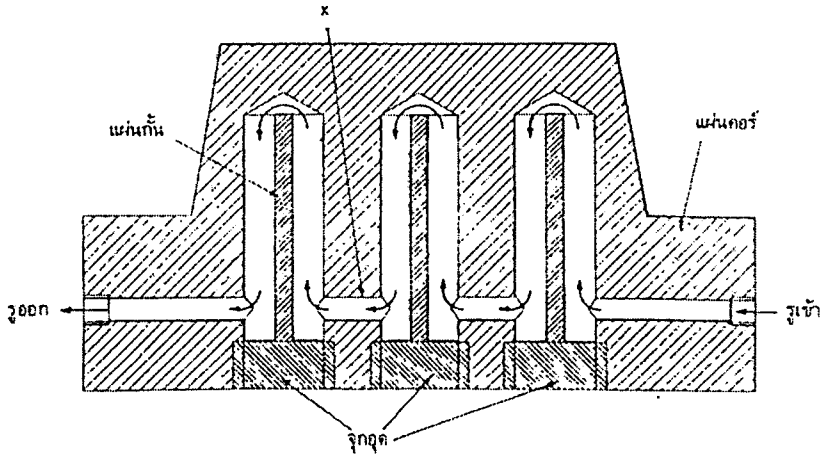
สำหรับแผ่นคอร์ที่มีความหนาไม่มาก คือน้อยกว่า 25 มิลลิเมตร (1 นิ้ว) สามารถใช้ระบบหล่อเย็นรูปตัวแซดแบบชั้นเดียวก็ได้ ทางไหลของสารหล่อเย็นจะอยู่ด้านใต้ของแผ่นคอร์ ในลักษณะที่คล้ายคลึงกันกับการหล่อเย็นแผ่นเบ้าแบบชั้นเดียวที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สำหรับแผ่นคอร์ที่มีความหนามาก ๆ วงจรระบบหล่อเย็นแบบชั้นเดียวจะไม่เพียงพอในการถ่ายเทความร้อนออกจากผิวของแผ่นคอร์ได้เร็วตามต้องการ ดังนั้นต้องจัดการให้สารหล่อเย็นเกิดการไหลเวียนภายในแผ่นคอร์ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี การเลือกใช้จะขึ้นอยู่กับรูปร่างของแผ่นคอร์เป็นส่วนใหญ่

ระบบรูเฉียง (Angle hole system) ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ทางไหลของสารหล่อเย็นจะเจาะเฉียงเป็นมุมจากทางด้านใต้ของแผ่นคอร์และมาบรรจบกันที่จุด x ซึ่งอยู่ใกล้ ๆ กับผิวด้านบนของแผ่นคอร์ รูเจาะแต่ละรูจะถูกอุด เพื่อให้เป็นวงจรทางไหลอย่างต่อเนื่อง รูทางเข้า (y) และรูทางออก (z) ของสารหล่อเย็นจะเจาะเข้าทางผนังด้านข้างของแผ่นคอร์จนทะลุถึงรูเฉียงดังรูป



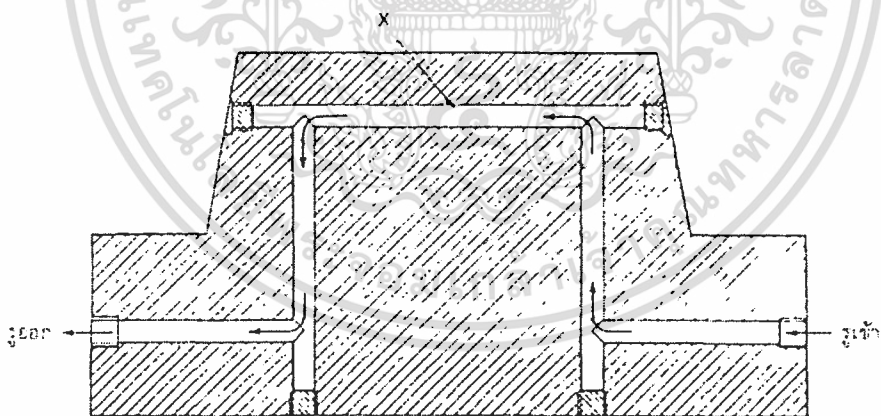
รูปที่ 2.25 การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบชั้นเดียวโดยใช้วงจรระบบรูเฉียง [2]

ระบบรูตรงแบบใช้แผ่นกั้น (Baffled-straight hole system) ในระบบนี้ (รูปที่ 2.26) รูจะเจาะคว้านตั้งฉากกับผิวด้านใต้ของแผ่นคอร์ ปลายด้านล่างของแต่ละรูจะถูกอุด รูเจาะคว้านแต่ละรูจะต่อถึงกันด้วยรูเจาะ x ซึ่งเจาะเข้าจากผิวด้านข้างของแผ่นคอร์ทะลุยาวตลอดปลายทั้งสองของรูเจาะ x จะเป็นรูทางเข้าและรูทางออกของสารหล่อเย็น และเพื่อให้สารหล่อเย็นเกิดการไหลเวียนในรูเจาะคว้าน แผ่นกั้นจะถูกประกอบเข้าในรูแต่ละรู



รูปที่ 2.26 การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบชั้นเดียวโดยใช้วงจรระบบรูตรงแบบใช้แผ่นกัน [2]

วงจรระบบหล่อเย็นแบบเป็นชั้น (Stepped circuit) ในกรณีที่ต้องการให้ทางไหลของสารหล่อเย็นอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับผิวด้านบนของแผ่นคอร์ อาจเลือกใช้วงจรหล่อเย็นแบบเป็นชั้น ในระบบนี้ (รูปที่ 2.27) รู x จะเจาะทะลุตลอดผนังด้านข้างของแผ่นคอร์ในแนวขนานกับผิวด้านบนของแผ่นคอร์แม่พิมพ์ รูเจาะนี้จะต้องอุดและปรับแต่งผิวอย่างระมัดระวังเพราะเป็นส่วนหนึ่งของโพรงแบบค้ำย หากอุดและปรับแต่งผิวไม่ดีเพียงพอจะทำให้เกิดปัญหาต่อผิวชิ้นงานได้ และด้วยเหตุผลอันนี้ นักออกแบบส่วนใหญ่จึงไม่นิยมใช้วงจรระบบหล่อเย็นแบบเป็นชั้น จำเป็นจะต้องจัดตำแหน่งของรูทางเข้าและรูทางออกของสารหล่อเย็นในตำแหน่งที่เหมาะสม

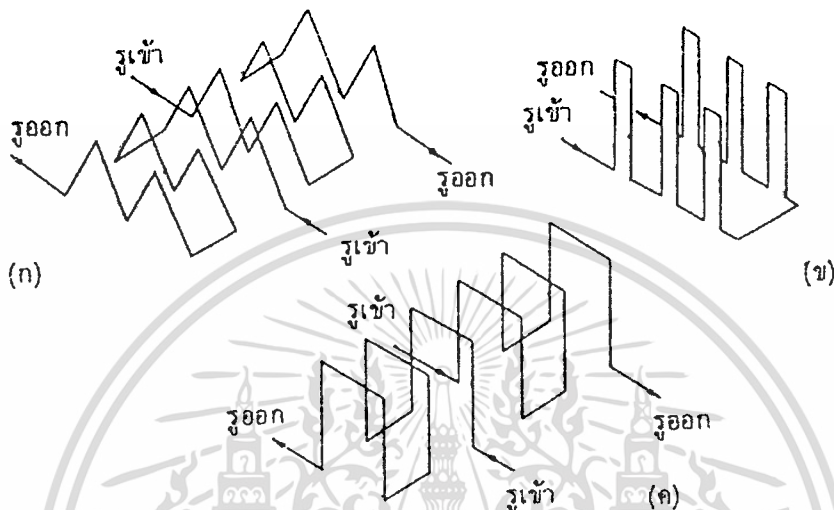


รูปที่ 2.27 การหล่อเย็นแผ่นคอร์แบบชั้นเดียวโดยใช้วงจรระบบหล่อเย็นแบบเป็นชั้น [2]

วงจรทั้งสามแบบดังกล่าวข้างต้นสามารถใช้ได้เพียงวงจรเดียวสำหรับแผ่นคอร์ที่แคบหรือมีความกว้างน้อย ส่วนแผ่นคอร์ที่กว้างมากก็สามารถใช้วงจรลักษณะเดียวกันจำนวนหลาย ๆ วงจรร่วมกันได้ การต่อวงจรแต่ละวงจรเข้าด้วยกันอาจต่อกันภายนอกหรือภายในแม่พิมพ์ก็ได้ สุดแต่ว่าวิธีใดจะสะดวกมากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรแบบซ้อน (Multiple circuit) ตัวอย่างวงจรแบบซ้อนได้แสดงเป็นไดอะแกรมไว้ในรูปแบบที่ 2.28 ในรูป (ก) เป็นวงจรระบบรูเฉียง ข้อสังเกตก็คือวงจรระบบรูเฉียงทั้ง 6 วงจรถูกต้องเข้ากันเป็น 2 ชุดแต่ละชุดมี 3 วงจร ลักษณะเช่นนี้ทำให้สามารถสมดุลอุณหภูมิตลอดผิวหน้าของแผ่นคอร์ได้ รูปที่ 2.28 (ข) เป็นระบบรูแบบใช้แผ่นกั้นตรงจำนวน 2 ชุดต่อเข้าด้วยกันและรูปที่ 2.28 (ค) เป็นวงจรระบบหล่อเย็นแบบเป็นชั้นหลายวงจรซ้อนกัน



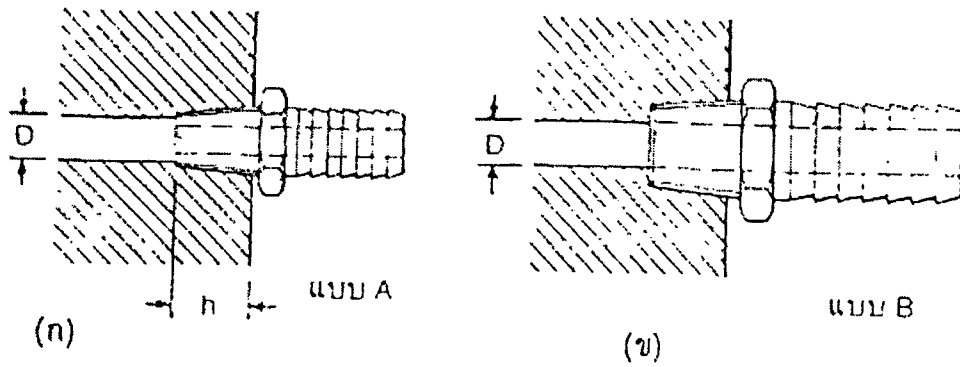
รูปที่ 2.28 วงจรแบบซ้อน (ก) ระบบรูเฉียง (ข) ระบบใช้แผ่นกั้น (ค) วงจรแบบเป็นชั้น [2]

2.7.5 ข้อต่อน้ำหล่อเย็น (Water connections)

2.7.5.1 ข้อต่อภายในแม่พิมพ์จะเจาะรูไว้เพื่อเป็นทางไหลของสารหล่อเย็น รูเจาะเหล่านี้จะต่อเข้ากับสารหล่อเย็นจากภายนอกโดยใช้ข้อต่อตรงรูทางเข้าและรูทางออก วิธีการประกอบข้อต่อมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือแบบ A และแบบ B (รูปที่ 2.29)

แบบ A ขนาดรูทำเกลียวสำหรับยึดข้อต่อจะเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูทางไหล แบบนี้เหมาะสำหรับรูทางเข้าและรูทางออกที่มีระยะห่างกันน้อย เพราะสามารถใช้ข้อต่อที่มีขนาดเล็กที่สุดที่สามารถใช้ได้ แต่มีข้อเสียคือการไหลของสารหล่อเย็นจะถูกต้านทานเนื่องจากรูของข้อต่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างเล็ก

แบบ B แบบนี้จะเลือกใช้รูของข้อต่อที่มีขนาดเท่ากับรูทางไหล (D) ใช้วิธีประกอบข้อต่อสำหรับแม่พิมพ์ขนาดใหญ่ ที่รูทางเข้าและรูทางออก อยู่ห่างกันพอเพียงมักนิยมเลือกใช้แบบ B



รูปที่ 2.29 ลักษณะของข้อต่อมาตรฐาน [2]

ลักษณะของข้อต่อที่ใช้อีกแบบหนึ่งคือ ใช้ท่อทองแดงขนาดพอเหมาะและทำเกลียวที่ปลายด้านหนึ่ง จากนั้นจึงขันยึดเข้ากับรูทางเข้าหรือรูทางออกของแม่พิมพ์ที่ทำเกลียวขนาดเดียวกันไว้ ด้วยประแจขันท่อ ระยะห่างของรูทางไหลจะต้องโตพอที่จะใช้ประแจขันท่อขันยึดข้อต่อได้

2.7.5.2 ข้อต่อแบบถอด-ประกอบเร็ว ข้อเสียของการใช้ข้อต่อแบบที่กล่าวมามีอยู่ด้วยกัน 2 ประการคือ

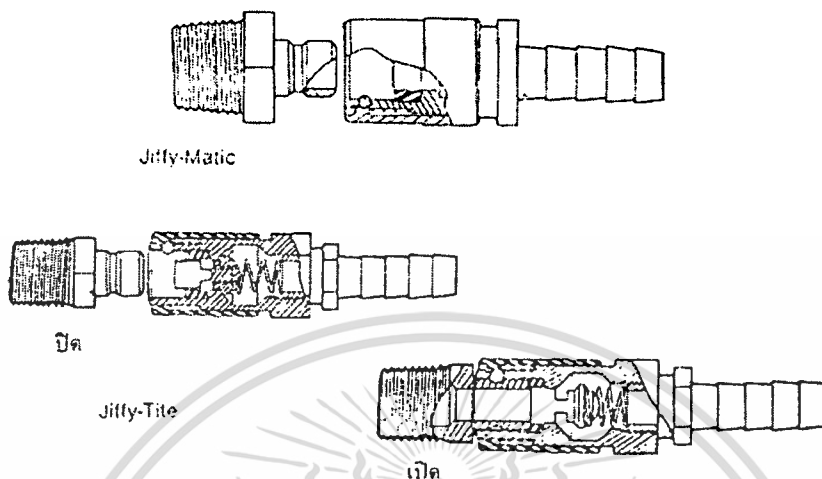
(1) ท่ออ่อนที่ใช้ต่อเข้ากับข้อต่อจะต้องขันยึด และถอดออกทุกครั้งที่ติดตั้งแม่พิมพ์เข้ากับเครื่องฉีดพลาสติก

(2) ข้อต่อจะยื่นออกมาจากผิวด้านข้างของแม่พิมพ์ค่อนข้างยาว

ประการแรกจะทำให้เวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์เพิ่มมากขึ้น ส่วนประการที่สองทำให้การติดตั้งแม่พิมพ์มีความลำบากขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากข้อต่อที่ยื่นออกมาจะเป็นอุปสรรคในการติดตั้งแม่พิมพ์

ดังนั้นเพื่อลดข้อเสียเหล่านี้ ข้อต่อแบบถอด-ประกอบเร็วได้ถูกออกแบบมาใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.30 เป็นแบบของ DME ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 แบบ คือ แบบจิฟฟี-ไทท์ (Jiffy-tite) และแบบจิฟฟี-เมติก (Jiffy-matic) ทั้งสองแบบจะประกอบด้วยชิ้นส่วน 2 ส่วนคือ ส่วนแรกแสดงไว้ทางด้านซ้ายของรูปเป็นปลั๊กข้อต่อ ใช้ขันยึดเข้ากับแม่พิมพ์เหมือนข้อต่อทั่วไป ส่วนที่สองเป็นปลอกข้อต่อใช้ต่อเข้ากับท่ออ่อน โดยการออกแรงกดเพียงเล็กน้อยข้อต่อทั้งสองส่วนสามารถที่จะถอดหรือประกอบเข้าด้วยกันได้อย่างรวดเร็ว แบบจิฟฟี-เมติกมีข้อดีตรงที่ว่าทันทีที่ถอดปลอกข้อต่อจากปลั๊กข้อต่อสารหล่อเย็นจะหยุดไหลทันที ส่วนแบบจิฟฟี-ไทท์จะต้องปิดท่อสารหล่อเย็นก่อนที่จะถอดออก

ปลั๊กข้อต่อของทั้งสองแบบสามารถที่จะยึดฝังให้อยู่ต่ำกว่าระดับผิวของแม่พิมพ์ได้ ดังนั้นปลายของปลั๊กข้อต่อจะไม่ยื่นออกมา ซึ่งจะไม่เป็นอุปสรรคในการติดตั้งแม่พิมพ์ และยังป้องกันไม่ให้ปลั๊กข้อต่อเสียหายได้ด้วย



รูปที่ 2.30 ข้อต่อแบบถอดประกอบเร็ว [2]

2.7.5.3 การจัดตำแหน่งของข้อต่อน้ำหล่อเย็น (Position of water connections) ตำแหน่งของรูทางเข้าและรูทางออกของสารหล่อเย็น ควรจะอยู่ทางด้านหลังหรือด้านล่างของแม่พิมพ์เมื่อประกอบเข้ากับเครื่องฉีดพลาสติก เพราะถ้าจัดตำแหน่งไว้ทางด้านหน้าของแม่พิมพ์จะเป็นอุปสรรคในการทำงานของช่างประจำเครื่อง และถ้าจัดตำแหน่งไว้ทางด้านบนของแม่พิมพ์หากเกิดการรั่วไหลของน้ำหล่อเย็น น้ำหล่อเย็นอาจไหลเข้าไปยังผิวชัดของโพรงแบบได้

นอกจากนี้ตำแหน่งข้อต่อของน้ำหล่อเย็นและท่ออ่อนจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่ไม่เป็นอุปสรรคในการขันยึดแม่พิมพ์เข้ากับหน้าแปลนของเครื่องฉีดพลาสติกด้วย

2.7.5.4 จุกอุด (Plug) รูเจาะต่าง ๆ ในแม่พิมพ์ที่ปลายข้างหนึ่งอาจต้องอุดตันเพื่อทำให้เป็นวงจรรูทางไหลอย่างต่อเนื่อง จุกอุดตามมาตรฐานของ BSP จะทำเป็นเรียวเหมือนเกลียวท่อขนาดของเกลียวและความยาวของเกลียว (h) จะเหมือนกับเกลียวของข้อต่อ (รูปที่ 2.29) จุกอุดอาจมีหัวเป็นสี่เหลี่ยมหรือหกเหลี่ยมยื่นออกมาหรือเป็นแบบหัวฝัง ทำให้สามารถใช้ประแจกันป้องกันการรั่วของสารหล่อเย็นได้แน่นอนยิ่งขึ้น

2.8 โปรแกรม CAD และ CAM

ในปัจจุบันได้นำคอมพิวเตอร์มาช่วยเพิ่มผลผลิต เช่นการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ (Computer aided design ; CAD) และการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการผลิต (Computer aided manufacturing ; CAM)

องค์ประกอบของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ (CAD) ประกอบด้วย [4]

- 1) ข้อมูลที่เกี่ยวกับการออกแบบ (Design tool)
- 2) การสร้างรูปทรงเรขาคณิต (Geometric modeling)
- 3) เครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ (Computer graphics)

องค์ประกอบของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการผลิต (CAM) ประกอบด้วย

- 1) คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD)
- 2) ข้อมูลเกี่ยวกับการผลิต (Manufacturing tools)
- 3) การเชื่อมต่อระบบเครือข่าย (Network)

การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ (CAD) นั้นได้เข้ามามีบทบาทแทนการเขียนแบบด้วยมือทั้งนี้เนื่องจากสามารถแก้ไขข้อบกพร่องอันเกิดจากการเขียนแบบด้วยมือได้หลายประการ เช่น ลดเวลาในการออกแบบ เขียนแบบ การแก้ไขหรือการตัดแปลงทำได้ง่าย สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลในการผลิต ตลอดจนช่วยในการคำนวณหรือการวิเคราะห์ต่าง ๆ ทำได้อย่างรวดเร็วและมีความแม่นยำสูง

2.8.1 จุดมุ่งหมายของการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบ

1) เพื่อเพิ่มผลผลิตโดยลดขั้นตอนการทำงานให้กับผู้ออกแบบซึ่งการออกแบบระบบเดิมนั้นจะเริ่มจากการคิดหรือจินตนาการต้นแบบการทดลอง และออกแบบการวิเคราะห์จนกระทั่งเขียนแบบตั้งงานซึ่งแต่ละขั้นตอนนั้นต้องใช้เวลามาก การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยจะลดเวลาในการทำงานแต่ละขั้นตอนลง

2) การเพิ่มคุณภาพของงาน การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบนั้นสามารถที่จะวิเคราะห์แบบหรือคำนวณ ทำให้การออกแบบมีความถูกต้องและแม่นยำ

3) ลดปัญหาและข้อผิดพลาดเนื่องจากการใช้คอมพิวเตอร์นั้นสามารถมองเห็นภาพที่ชัดเจน เช่น ขนาด และรูปลักษณะ เป็นต้น ขณะที่การออกแบบสามารถแก้ไขหรือจัดมุมมองภาพในลักษณะต่าง ๆ ได้

4) ใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับงานอุตสาหกรรม ข้อมูลหรือแบบงานที่ออกแบบด้วยระบบ CAD นั้นสามารถใช้เป็นฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการวางแผนการผลิตและใช้เป็นฐานข้อมูลในการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยผลิต (CAM) การส่งข้อมูลจากกระบวนการของ CAD ไป CAM สามารถทำได้ง่ายโดยไม่ต้องสร้างฐานข้อมูลใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 กระบวนการออกแบบด้วย CAD (CAD Process)

CAD นอกจากจะเป็นการใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบแล้ว CAD ยังรวมถึงการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคิดแปลง การวิเคราะห์เพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมที่สุด ซอฟต์แวร์ CAD เป็นโปรแกรมสำหรับการสร้างภาพรวมและช่วยสนับสนุนอื่น ๆ เช่น การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลง (Finite Element Analysis ; FEA) การสร้างภาพโดยระบบ CAD จะอาศัยการสร้างภาพจากรูปทรงเรขาคณิต เช่น เส้นตรง วงกลมและอื่น ๆ เป็นต้น

การนำระบบ CAD มาใช้สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

1) การออกแบบรูปทรงเรขาคณิต (Geometric modelling)

การออกแบบรูปทรงเรขาคณิตโดยทั่วไปเป็นการจัดการเกี่ยวกับสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้แทนรูปทรงนั้น ๆ โดยชุดคำสั่งของโปรแกรม CAD จะมีอยู่ 3 ลักษณะคือ

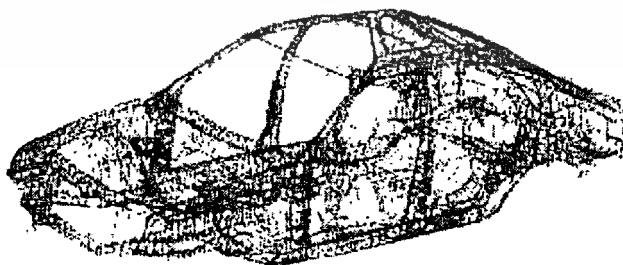
1.1 ชุดคำสั่งเกี่ยวกับการสร้างรูปทรงเรขาคณิต เช่น เส้นตรง วงกลมและอื่น ๆ เป็นต้น

1.2 ชุดคำสั่งเกี่ยวกับการจัดรูปทรง เช่น การหมุน การปรับขนาด และการเปลี่ยนตำแหน่ง เป็นต้น

1.3 ชุดคำสั่งการเชื่อมโยงส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

2) การวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (Engineering analysis)

ในการออกแบบทางวิศวกรรมต้องมีบางส่วนที่ต้องมีการวิเคราะห์อย่างละเอียด เช่น การคำนวณหาความเค้น ความเครียด และการคำนวณเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน ซึ่งงานเหล่านี้คอมพิวเตอร์สามารถช่วยได้ โดยการวิเคราะห์ส่วนมากทำได้ใน 2 ลักษณะคือ การวิเคราะห์ทั่วไปเกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุ เช่น พื้นที่ ปริมาตร น้ำหนักและการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุเมื่อมีแรงหรือความร้อนมากระทำเรียกเทคนิคนี้ว่า Finite Elements Analysis (FEA) ซึ่งทำได้โดยการแบ่งส่วนของวัสดุที่ต้องการที่จะศึกษาออกเป็นส่วนย่อย ๆ จากนั้นจึงวิเคราะห์จุดย่อย ๆ เหล่านี้โดยอาจพิจารณาแรงที่มากระทำแล้วดูผลที่เกิดขึ้น (Stress-Strain) ดังแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 การวิเคราะห์แบบ Finite Elements Analysis (FEA) ของรถยนต์ [9]

3) การตรวจและประเมินผล (Design review & evaluation)

เป็นขั้นตอนตรวจสอบความถูกต้องของแบบ เช่น ขนาด และหน่วยการวัด โดยในโปรแกรม CAD นั้นสามารถจำลองการทำงานหรือจำลองการประกอบกันของชิ้นส่วนเพื่อให้เห็นภาพพจน์ได้ดียิ่งขึ้น

4) การเขียนแบบโดยอัตโนมัติ (Automated drafting)

ในขั้นตอนการเขียนแบบสั่งงานนั้นประกอบด้วย

4.1 แบบแยกชิ้นและประกอบภาพ

4.2 รายละเอียดของแบบสั่งงาน เช่น ขนาด พิกัดความเผื่อหรือมาตรฐานต่าง ๆ

4.3 รายละเอียดเกี่ยวกับชื่อชิ้นส่วนของวัสดุ

2.8.3 ชนิดของโปรแกรม CAD-CAM

สามารถแบ่งชนิดของโปรแกรม CAD-CAM ออกเป็น 3 กลุ่มคือ

1) ฐานข้อมูล (Application data) ใช้เป็นที่เก็บข้อมูล เช่น ภาพของต้นแบบ

2) โปรแกรมด้านกราฟิก (Graphics system) ทำหน้าที่สร้างภาพต้นแบบและเชื่อมโยงระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรมประยุกต์ใช้งาน

3) โปรแกรมประยุกต์ใช้งาน (Application program) ทำหน้าที่เก็บหรือดึงข้อมูลออกมาใช้งาน

2.8.4 มาตรฐานการแลกเปลี่ยนข้อมูล (Data Exchange Standard)

การที่จะทำให้ระบบ CAD/CAM สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโปรแกรมแต่ละระบบ การแลกเปลี่ยนข้อมูลในระบบ CAD โดยใช้มาตรฐาน IGES (Initial Graphics Exchange Specification) นั้นจะแบ่งชั้นข้อมูลออกเป็น 3 ส่วนดังนี้ [4]

1) ข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิต เช่น จุด เส้นตรง เส้นโค้งและ FEA nodes เป็นต้น

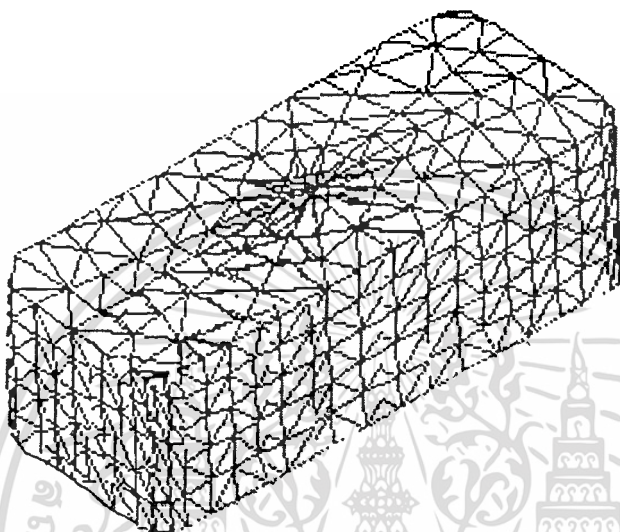
2) ข้อมูลเกี่ยวกับการอธิบายประกอบ (Annotation) เช่น ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางและหัวลูกศร เป็นต้น

3) ข้อมูลเกี่ยวกับโครงสร้าง (Structure) เช่น กลุ่มของรูปทรงเรขาคณิต เป็นต้น

สำหรับขั้นตอนการเปลี่ยนข้อมูลนั้นจะเริ่มจากการส่งข้อมูลจาก CAD ระบบที่ 1 มาที่ IGES เพื่อสร้างหรือเตรียมข้อมูลในรูปของข้อมูลกลาง (Neutral data) ซึ่งเรียกส่วนนี้ว่า Preprocessor หลังจากทีสร้างข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว (IGES-File) จะส่งข้อมูลไปยัง CAD อีกระบบหนึ่ง เพื่อทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลให้เป็นไปตามที่กำหนดของระบบ CAD นั้น ๆ โดยเรียกส่วนนี้ว่า Postprocessor

2.9 ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับ Finite Elements Analysis (FEA) [9]

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธี FEA จะใช้วิธีแบ่งชิ้นงานออกเป็นส่วนย่อย ๆ เรียกว่าโนด (Node) ซึ่งแต่ละโนดจะมีเส้นเชื่อมโยงซึ่งกันและกันเป็นเอลิเมนต์ (Element) แบบต่าง ๆ (Typical element) และในแต่ละเอลิเมนต์จะเชื่อมโยงกันและกันจนกระทั่งเป็นโครงสร้างของชิ้นงาน (Element mesh) ดังแสดงในรูปที่ 2.32



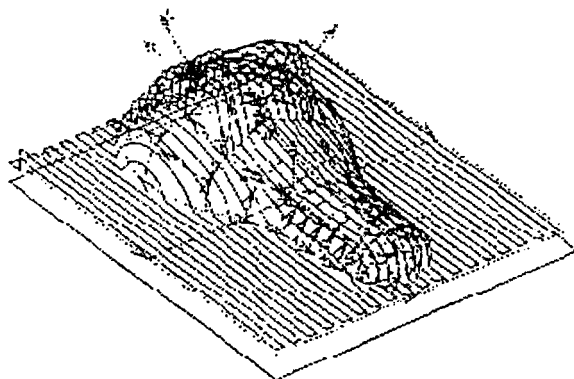
รูปที่ 2.32 การแบ่ง Finite element ของชิ้นงาน [4]

เทคนิคของ FEA เป็นที่ทราบกันมาอย่างช้านาน แต่ไม่ได้มีการนำมาใช้เนื่องจากมีความยุ่งยากในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ จนกระทั่งได้มีการพัฒนาขีดความสามารถของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์มาใช้สำหรับงาน CAD/CAM จึงได้มีการนำเทคนิค FEA มาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่นการวิเคราะห์ต้นแบบของรถยนต์ เป็นต้น

2.10 ส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM)

คอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) เป็นเครื่องมือทางวิศวกรรมที่ใช้สำหรับสร้างทางเดินของเครื่องมือตัดที่ควบคุมด้วยเครื่องจักรซีเอ็นซี (CNC, Computer Numerical Control) โดยการสร้างโปรแกรมเอ็นซี (NC, Numerical Control) และอาศัยรูปทรงเรขาคณิตจากโปรแกรมช่วยในการออกแบบ (CAD) ดังแสดงในรูปที่ 2.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 ทางเดินของเครื่องมือตัด (Tool) ในโปรแกรมสมาร์ทแคม (Smart CAM) [9]

ส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้

- 1) โปรแกรมเอ็นซี เป็นการสร้างตำแหน่งของเครื่องมือตัด (Tool path) ในการเดินตัดบนเครื่องจักรซีเอ็นซี โดยสามารถตรวจสอบทางเดินของเครื่องมือตัดว่าถูกต้องหรือไม่
- 2) Postprocessor ทำหน้าที่เปลี่ยนแฟ้มภาษา APT ไปเป็นภาษาเฉพาะเครื่องซีเอ็นซี
- 3) Reverse Engineering เป็นวิธีการใช้เครื่องมือวัดจุดโคออร์ดิเนตแล้วส่งข้อมูลไปยัง CAD เพื่อสร้างพื้นผิวของชิ้นงาน

2.11 โปรแกรม Pro Engineer®

เป็นโปรแกรมด้าน Computer Aided Design (CAD) ที่พัฒนาขึ้นมาจากการเขียนแบบด้วยโปรแกรม C++ แทนการใช้โปรแกรมฟอร์แทรน (Fortran) ทำให้ความเร็วและการพัฒนาโปรแกรมสามารถทำได้ง่ายและสะดวกขึ้น อีกทั้งการใช้งานสามารถทำได้ง่ายโดยโปรแกรม Pro Engineer® มีลักษณะเด่นที่สำคัญอยู่ 5 ประการ คือ

- 1) ทำงานบนพื้นฐานงานทางวิศวกรรม คือ งานเจาะ งานกลึง งานตะไบ งานขัด งานเจียรและงานไส โดยทำการพัฒนาจากโปรแกรม C++
- 2) ทำงานในลักษณะของการประกอบชิ้นงานขนาดใหญ่ คือเมื่อมีการนำชิ้นงานมารวมกัน จะมีขนาดของไฟล์ที่เล็กลงกว่าค่าของขนาดไฟล์ทั้งหมดที่นำมาประกอบ
- 3) ทำงานในลักษณะที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลเพียงค่าเดียว มีการเชื่อมโยงข้อมูลแบบรอบการทำงาน (Cycle) ไม่ใช่แบบขนาน และมีการใช้ข้อมูลร่วมกัน
- 4) ใช้เทคโนโลยีพารามเมตริก คือมีการนำค่าตัวแปร (Parameter) มาควบคุมขนาดของชิ้นงาน ทำให้สามารถเปลี่ยนขนาดชิ้นงานได้ตามต้องการ
- 5) มีการใช้งานที่ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การออกแบบและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldflow® [4]

การวิเคราะห์โพรงแบบ (Cavity) และองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดสร้างแม่พิมพ์ (Mold) การขึ้นรูปด้วยการฉีด (Injection molding) สามารถวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมด้าน CAE ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Moldflow® ซึ่งเป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ ใช้ในการทำนายการไหลของพอลิเมอร์ ชนิดเทอร์โมพลาสติกภายในแบบพิมพ์ โดยมีลักษณะดังนี้

1) การออกแบบ (Molding) การแปลข้อมูล (Translation) การแก้ไข (Editing) และการเมชซิง (Meshing) เป็นแบบสามมิติ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเติม (Filling analysis)

- 2) จัดเป็นสภาวะของการขึ้นรูปสำหรับวัตถุแต่ละชนิด
- 3) สามารถทำนายการวิเคราะห์การเติม
- 4) สามารถทำนายการวิเคราะห์การอัดตัว
- 5) สามารถทำรูปร่างให้สมดุลได้โดยอัตโนมัติ
- 6) สามารถทำนายการวิเคราะห์การเย็นตัว
- 7) สามารถทำนายการวิเคราะห์การหดตัว
- 8) สามารถทำนายการวิเคราะห์การบิดงอ

2.12.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบและการวิเคราะห์

1) การสร้างแบบ 3 มิติ เนื่องจากการวิเคราะห์การไหลเป็นการวิเคราะห์ชนิด Surface mesh แบบ 3 มิติสามารถถูกถ่ายโอนจากโปรแกรมด้าน CAD (Computer Aided Design) หรือจากการออกแบบโดยใช้ MFVIEW ที่อยู่ในโปรแกรม

2) การหาค่าสภาวะการขึ้นรูปสามารถทำนายการวิเคราะห์ในเบื้องต้น ของสภาวะการขึ้นรูป (อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของการหลอมเหลวและเวลาในการฉีดหรืออัตราการไหล) ซึ่งสามารถหาได้จากการวิเคราะห์รูปร่าง

3) การไหลที่สมดุลของโพรงแบบ โพรงแบบมีการไหลที่สมดุลเมื่อเส้นทางการไหลที่เวลาเดียวกันมีค่าความดันที่เท่ากัน (ความดันสูงสุดที่ใช้และการสมดุลของรูปร่างที่เป็นไปได้)

4) ระบบการไหลที่สมดุลของรูปร่าง การทำให้โพรงแบบเหมือนกันทั้งหมดด้วยการทำสมดุลความดันเฉพาะ (ความดันที่สมดุลโดยทั่วไปกำหนดให้มีค่าสูงกว่าความดันสูงสุดของโพรงแบบ ดังนั้นปริมาณของรูปร่างควรจะลดเพื่อให้เสียวัสดุน้อยที่สุด)

5) การพิจารณารูปร่างโดยรวมและการสมดุลรูปร่าง โดยอัตโนมัติพิจารณาได้จากความหนาของรูปร่างโดยนิยมเปลี่ยนแปลงเป็นค่าทศนิยม

6) ตรวจสอบสมดุลการไหลซ้ำหลังจากแก้ไขรูปร่างและทำการวิเคราะห์การเติมเพื่อตรวจสอบการวางรูปร่าง

7) การจำลองการไหล (Flow simulation) การวิเคราะห์การไหลต้องการผิวของแบบที่ถูกทำให้กลายเป็นเมช (Mesh) โดยที่เมชประกอบด้วยเอลิเมนต์ที่เป็น 3 เหลี่ยมมุม แต่ละเอลิเมนต์มี 3 โหนด ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการไหลอาศัยการคำนวณจากแต่ละโนด และการมีจำนวนเอลิเมนต์เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องสูงแต่ต้องใช้เวลาในการคิดคำนวณนาน

8) ปริมาตรควบคุม (Control Volume) คือผลรวมของปริมาตรที่จุดกึ่งกลางของ element ที่ติดกัน โดยผลรวมของปริมาตรควบคุมคือปริมาตรของแบบจำลอง (Model) และเวลาในการเติมปริมาตรควบคุมขึ้นอยู่กับค่าการต้านทานการไหล (ความหนาของ Element และอัตราการไหล)

2.12.2 หลักของการออกแบบการไหลเพื่อให้เกิดการไหลที่ง่ายที่สุดเท่าที่เป็นไปได้สามารถทำได้ดังต่อไปนี้

1) สมดุลการไหล (Flow balance) และทิศทางการไหลทั้งหมดควรอยู่ในสมดุลกล่าวคือเกิดการเติมที่เวลาเดียวกันและความดันที่เท่ากันโดยสามารถทำการแก้ไขด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้า (Gate) ความหนาของทิศทางการไหล และหรือทั้งสองอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (1)

2) อัตราส่วนรูปร่างต่อโพรงแบบ (Runner/Cavity ratio) การออกแบบเพื่อให้เกิดการลดความดันมาก ๆ ควรมีปริมาตรวัสดุของรูปร่างต่ำที่สุดซึ่งทำได้โดยให้มีปริมาตรและอัตราส่วนของปริมาตรรูปร่างต่อชิ้นงานต่ำลงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (2)

3) ทิศทางการไหลไปในทิศทางเดียวกัน (Uni-directional flow) พลาستيكที่หลอมเหลวควรไหลไปในทิศทางเดียวกันด้วยหน้าตัดการไหลที่ตรง สามารถปรับปรุงโดยการปรับตำแหน่งทางเข้า ซึ่งอาจจะมีผลต่อสมดุลและเส้นทางการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (3)

4) การลดลงของความดัน (Pressure gradient) รูปแบบการเติมส่วนมากเมื่อเกิดการกระจายตัว (ความดันลดต่อความยาว) คงที่ตลอดเส้นทางการไหล จึงควรให้มีปริมาตรที่ต่ำที่สุดที่ทำให้ความดันลดลง การลดลงของความดันที่คงที่จะเกิดเฉพาะในกรณีเส้นทางการไหลมีความยาวและความหนาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (4)

5) ความเค้นเฉือน (Shear stress) ความเค้นเฉือนระหว่างการเติมควรน้อยกว่าค่าวิกฤตเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดในบริเวณวิกฤตซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเค้นสูงสุดเมื่อนำไปใช้งาน ความเค้นอาจลดลงโดยใช้อุณหภูมิที่สูงหรือความดันต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (5)

6) เส้นเชื่อม/เส้นต่อ (weld/meld line) เกิดขึ้นเมื่อการไหล 2 ทิศทางมาชนกันเกิดในผลิตภัณฑ์ที่มีหลายทางเข้าซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ตำแหน่งของเส้นเชื่อมและเส้นการหลอมควรอยู่ในตำแหน่งที่ไม่มี ความเค้นหรือในตำแหน่งที่ยอมรับได้ ซึ่งสามารถย้ายตำแหน่งได้โดยเปลี่ยนตำแหน่งของทางเข้า หรือโดยสมดุลการไหล ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (6)

7) การไหลย้อนกลับ (Underflow) เกิดขึ้นก่อนจบการเติมเต็มเมื่อการไหลพบกันและเกิดการไหลย้อนกลับด้วยตัวของมันเอง ก่อนการไหลย้อนกลับการไหลจะหยุดและสูญเสียความร้อน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพไม่ดี โดยจะเกิดรอยที่ผิวและมีโครงสร้างไม่แข็งแรง การหลีกเลี่ยงการเกิดการไหลย้อนกลับ (Underflow) ทำได้โดยการเปลี่ยนตำแหน่งทางเข้าให้ภาคตัดการไหลพบกันที่เวลาเดียวกันที่จุดสิ้นสุดการเติม ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (7)

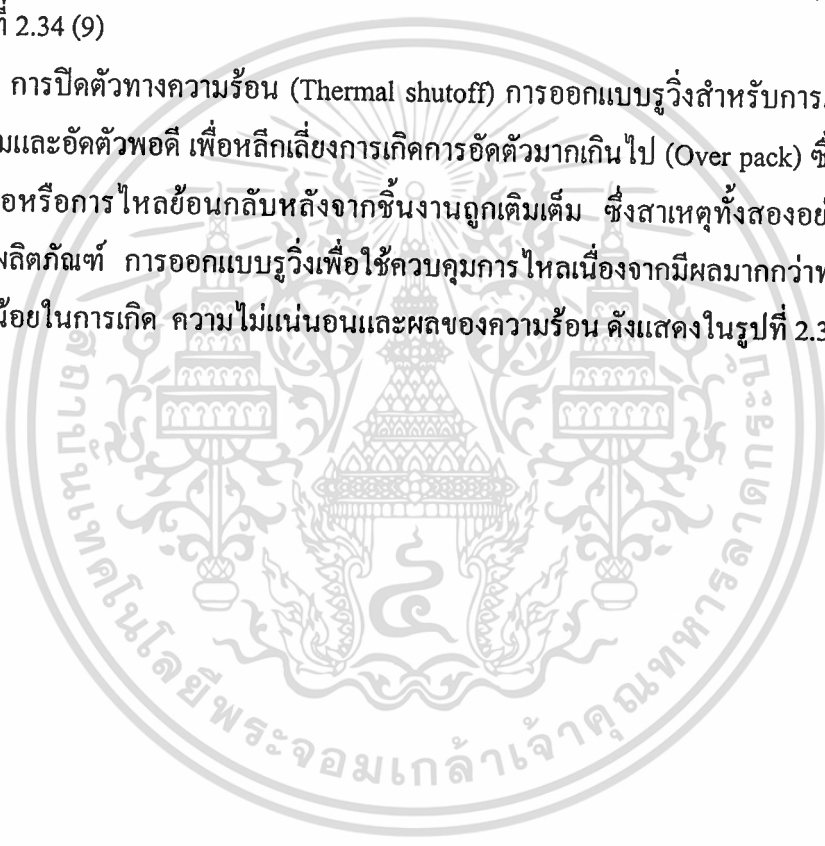
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

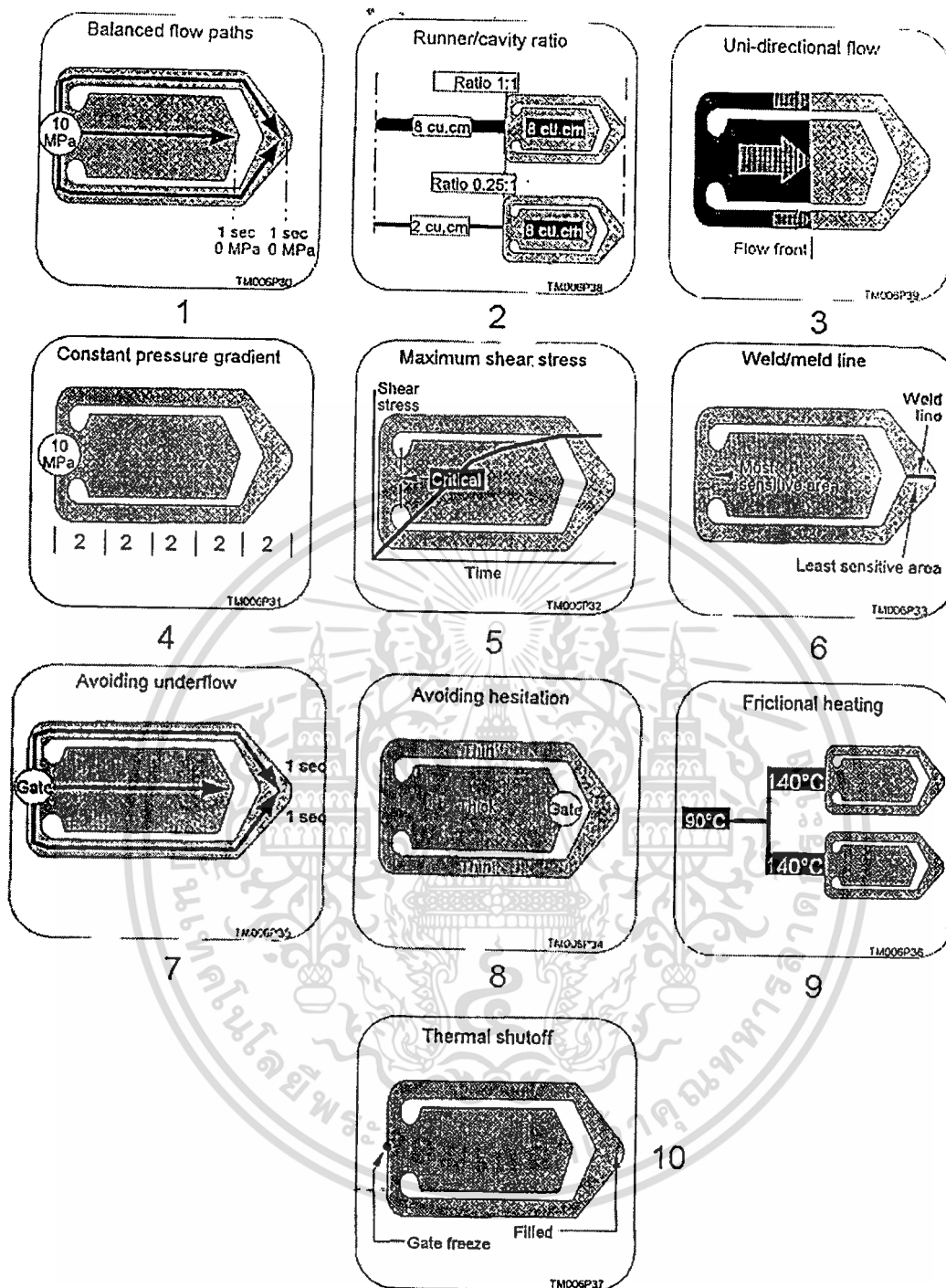
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) ความไม่แน่นอน (Hesitation) ของตำแหน่งของทางเข้าห่างจากจุดที่การไหลแยกเข้าสู่บริเวณการเคลื่อนที่หนาและบาง สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการไหลหยุดชั่วคราวในบริเวณที่บาง ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน ในขณะที่ส่วนที่หนากว่าต้องการเพียงความดันในการเติมเท่านั้น ความไม่แน่นอนของพลาสติก อาจจะแข็งตัวโดยยังไม่เกิดการเติมเต็มในบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (8)

9) ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน (Frictional heating) การออกแบบรูว้างเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่ทางเข้าโดยทำการควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน ส่งผลต่อการลดลงของความเค้นในผลิตภัณฑ์โดยปราศจากการเสียดทาน เนื่องจากเกิดการขยายตัวที่อุณหภูมิสูง ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นและปริมาตรลดลงเมื่ออยู่ในรูว้างที่บาง ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (9)

10) การปิดตัวทางความร้อน (Thermal shutoff) การออกแบบรูว้างสำหรับการแข็งตัว เมื่อชิ้นงานถูกเติมและอัดตัวพอดี เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการอัดตัวมากเกินไป (Over pack) ซึ่งเป็นสาเหตุของการบิดงอหรือการไหลย้อนกลับหลังจากชิ้นงานถูกเติมเต็ม ซึ่งสาเหตุทั้งสองอย่างทำให้เกิดความเค้นในผลิตภัณฑ์ การออกแบบรูว้างเพื่อใช้ควบคุมการไหลเนื่องจากมีผลมากกว่าทางเข้าและมีความว่องไวในการเกิด ความไม่แน่นอนและผลของความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.34 (10)





รูปที่ 2.34 หลักการออกแบบการไหลเพื่อให้เกิดการไหลที่ง่ายที่สุด 1) สมดุลการไหล 2) อัตราส่วนรูปร่างต่อโปรแกรม 3) ทิศทางการไหลไปในทิศทางเดียวกัน 4) การลดลงของความดัน 5) ความเค้นเฉือน 6) เส้นเชื่อม/เส้นต่อ 7) การไหลย้อนกลับ 8) ความไม่แน่นอน 9) ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทาน และ 10) การปิดตัวทางความร้อน [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 ตัวแปรของวัสดุที่ต้องการในโปรแกรม Moldflow®

ตัวแปรของวัสดุที่ต้องการในโปรแกรม Moldflow® (ตารางที่ 2.2) มีดังต่อไปนี้

- 1) ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity ; $W/m/^{\circ}C$) แสดงค่าการนำความร้อนของวัสดุ ซึ่งใช้ในการคำนวณการนำความร้อนของวัสดุในการไหล
- 2) ค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat ; $J/kg/^{\circ}C$) แสดงค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุ ซึ่งใช้ในการคำนวณการไหลของวัสดุ
- 3) ค่าความหนาแน่นของวัสดุหลอมเหลว (Melt density ; kg/m^3) แสดงความหนาแน่นของวัสดุหลอมเหลว ซึ่งใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ และมีความสัมพันธ์กับปริมาตรจำเพาะและความร้อนจำเพาะ
- 4) อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (Ejection temperature ; $^{\circ}C$) แสดงอุณหภูมิที่ปลดชิ้นงานออกจาก แม่พิมพ์ ซึ่งนำไปใช้ในการคำนวณหาเวลาการหล่อเย็นของชิ้นงาน
- 5) อุณหภูมิที่วัสดุไม่มีการไหล (No flow temperature ; $^{\circ}C$) แสดงอุณหภูมิที่วัสดุไม่มีการไหล ซึ่งนำไปใช้ในการคำนวณหาการแข็งตัวของชิ้นงาน
- 6) ความหนืด (Viscosity ; Pa.s) ค่าของอุณหภูมิและความเหนียวจะนำไปใช้ในการคำนวณค่าความหนืดของวัสดุ และนำค่าความหนืดไปใช้ในการหาความดันที่ต้องใช้ในกระบวนการฉีด
- 7) ปริมาตรจำเพาะ (PVT specific volume ; cm^3/g) ค่าของอุณหภูมิและความดันจะนำไปใช้ในการคำนวณหาปริมาตรจำเพาะของวัสดุ และนำค่าที่ได้ไปคำนวณอัตราการไหลของวัสดุหลอมเหลวและน้ำหนักของวัสดุที่ต้องการใช้ในการฉีด
- 8) อุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุ (Melt temperature ; $^{\circ}C$) แสดงถึงช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวของวัสดุที่ควรใช้ในกระบวนการฉีด
- 9) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold temperature ; $^{\circ}C$) แสดงถึงช่วงของอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ควรใช้ในกระบวนการฉีด
- 10) ค่าความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear stress ; MPa) แสดงค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของวัสดุ ซึ่งในระหว่างกระบวนการฉีดไม่ควรให้ค่าความเค้นเฉือนมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นเฉือนสูงสุด
- 11) ค่าอัตราความเค้นเฉือนสูงสุด (Maximum shear rate ; s^{-1}) แสดงค่าอัตราความเค้นเฉือนสูงสุดซึ่งในระหว่างกระบวนการฉีดไม่ควรให้ค่าอัตราความเค้นเฉือนมีค่าสูงกว่าค่าอัตราความเค้นเฉือนสูงสุด

ตารางที่ 2.2 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ของพอลิสไตรีนของ DOW Chemical เกรด Styron 492J ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลของวัสดุในโปรแกรม Moldflow ®

Conductivity	0.147 W/m/°C
Specific Heat	2034 J/kg/°C
Melt Density	953.81 kg/m ³
Ejection Temperature	99 °C
Processing Condition	
Melt Temperature Minimum	210 °C
Melt Temperature Maximum	250 °C
Melt Temperature Suggested	230 °C
Generic Mold Temperature Minimum	20 °C
Generic Mold Temperature Maximum	70 °C
Generic Mold Temperature Suggested	45 °C
Melt Temperature Absolute Maximum	270 °C
Generic Maximum Shear Stress	0.25 MPa
Generic Maximum Shear Rate	40,000 s ⁻¹

2.14 ลักษณะของปัญหาที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานฉีด [6]

1) รอยพ่น (Jetting) เกิดขึ้นเนื่องจากพลาสติกเหลวถูกฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์ตรงส่วนที่หนา โดยผ่านช่องทางเข้าที่มีขนาดเล็กด้วยความเร็วสูง ทำให้เกิดการไหลวน (Turbulent flow) ขึ้น และพลาสติกเหลวที่ถูกฉีดเข้าไปก่อนจะวิ่งไปได้ไกลเป็นแนวเส้นตรงแทนที่จะวิ่งออกไปพร้อมกันตลอดความกว้างของชิ้นงาน ทำให้พลาสติกเกิดการเย็นตัวไม่พร้อมกันจึงมองเห็นเป็นรอยบนผิวชิ้นงาน

2) ครีป (Flashing) ครีปที่ชิ้นงานจะเกิดขึ้นเนื่องจากการใช้ความเร็วในการฉีดสูงเพื่อป้องกันพลาสติกไม่เต็มแม่พิมพ์ (Short shot) และใช้ความดันขี้ (Holding pressure) สูงเพื่อป้องกันชิ้นงานยุบ (Sink) แรงดันของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์จะสูงมากจนเอาชนะแรงดันด้านแม่พิมพ์ ทำให้แม่พิมพ์เศษออก จนทำให้พลาสติกเหลวไหลออกมาตามรอยประกบแม่พิมพ์ได้ จึงเกิดเป็นครีปที่ขอบของชิ้นงานขึ้น

3) ประกายเงินที่ผิวชิ้นงาน (Silver streak) ในกรณีที่อุณหภูมิพลาสติกเหลวในกระบอกฉีดสูงมากและค้างอยู่ในกระบอกฉีดนาน เนื่องจากการใช้ความเร็วรอบของการหมุนเกลียวหนอนและความดันด้านการถอยหลังกลับของเกลียวหนอนสูง และทำการฉีดพลาสติกเหลวผ่านช่องทางเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่พิมพ์ด้วยความเร็วสูงมากเกินไป ทำให้พลาสติกเหลวเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเสียดทานจนความชื้นหรือก๊าซแยกตัวออกมาจากเนื้อพลาสติกและกระจายไปที่ผิวของชิ้นงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นประกายสีเงิน

4) รอยไหม้ (Burn) รอยไหม้ที่ผิวชิ้นงานจะเกิดขึ้นเนื่องจากอากาศร้อนในแม่พิมพ์ ทำให้การฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ระบายออกไม่ทัน จึงเกิดการอัดตัวทำให้มีอุณหภูมิสูงมากขึ้นจนเกิดรอยไหม้ขึ้นที่ผิวชิ้นงานได้ หรืออาจจะเกิดจากการเสียดสีกันระหว่างพลาสติกเหลวกับผิวของแม่พิมพ์จนทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจนเกิดรอยไหม้ได้ ซึ่งส่วนมากจะเกิดรอยไหม้ตรงตำแหน่งสุดท้ายของการไหลของพลาสติกเหลว

5) ชิ้นงานเกิดรอยแห้ว (Short shot) ชิ้นงานจะเกิดเป็นรอยแห้วตรงตำแหน่งสุดท้ายของการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ เนื่องจากการไหลของพลาสติกเหลวเข้าในแม่พิมพ์ช้าพลาสติกจึงเย็นตัวลง ความหนืดจึงเพิ่มมากขึ้นทำให้พลาสติกไหลเข้าไม่เต็มแม่พิมพ์จนเห็นเป็นรอยแห้ว

6) รอยยุบ (Sink mark) จะมีลักษณะเป็นรอยยุบบนผิวชิ้นงาน โดยเฉพาะตรงส่วนที่หนา มาก ๆ และตรงตำแหน่งสุดท้ายของการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นลักษณะของการหดตัวแบบหนึ่งของชิ้นงาน โดยเฉพาะชิ้นงานจากพลาสติกเหลวประเภทที่มีผลึกจะมีโอกาสเกิดการยุบตัวได้มาก

7) ร่องรอยการไหล (Flow mark) ข้อบกพร่องนี้มีสาเหตุเหมือนกับการเกิดรอยแห้ว ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นพร้อม ๆ กันได้กล่าวคือ ถ้าใช้ความเร็วในการฉีดต่ำเกินไป พลาสติกจะเย็นตัวและไหลไม่สะดวกทำให้เกิดเป็นคลื่นเหมือนรอยวงปีของต้นไม้

8) การบิดงอ (Warpage) การเย็นตัวของชิ้นงานไม่สม่ำเสมอ อันเนื่องมาจากชิ้นงานมีความหนาแตกต่างกันมากหรือระบบการหล่อเย็นในแม่พิมพ์ไม่ดี จะทำให้ชิ้นงานเกิดการโก่งงอขึ้นได้ หรือถ้าชิ้นงานที่มีความหนาเท่ากันตลอดแต่ใช้ความดันอัดมากเกินไป จะทำให้มีความเค้นตกค้าง (Residual stress) อยู่ในชิ้นงานมากจนทำให้เกิดการโก่งงอได้เช่นกัน โดยเฉพาะตรงปลายของชิ้นงานหลังจากปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้ว

9) ขนาดคลาดเคลื่อน (Dimensional defect) เมื่อใช้ความเร็วในการฉีดและความดันอัดต่ำตลอดจนเวลาย่ำสั้นเกินไปจะทำให้พลาสติกเหลวเย็นตัวลง ความหนืดสูงขึ้นจนทำให้ความดันไม่เพียงพอที่จะทำให้น้ำพลาสติกอัดกันแน่นเต็มในแม่พิมพ์ ทำให้ขนาดของชิ้นงานเล็กกว่าที่ต้องการ

10) รอยเชื่อม (Weld line) ตรงตำแหน่งที่มีพลาสติกเหลวไหลมาบรรจบกันนั้น ถ้าอุณหภูมิของพลาสติกเหลวต่ำเกินไปจะทำให้รอยเชื่อมประสานไม่ดีเท่าที่ควรจนสามารถมองเห็นเป็นรอยต่อของเนื้อพลาสติกได้ เนื่องมาจากการใช้ความเร็วในการฉีดต่ำเกินไปจนทำให้อุณหภูมิลดลง

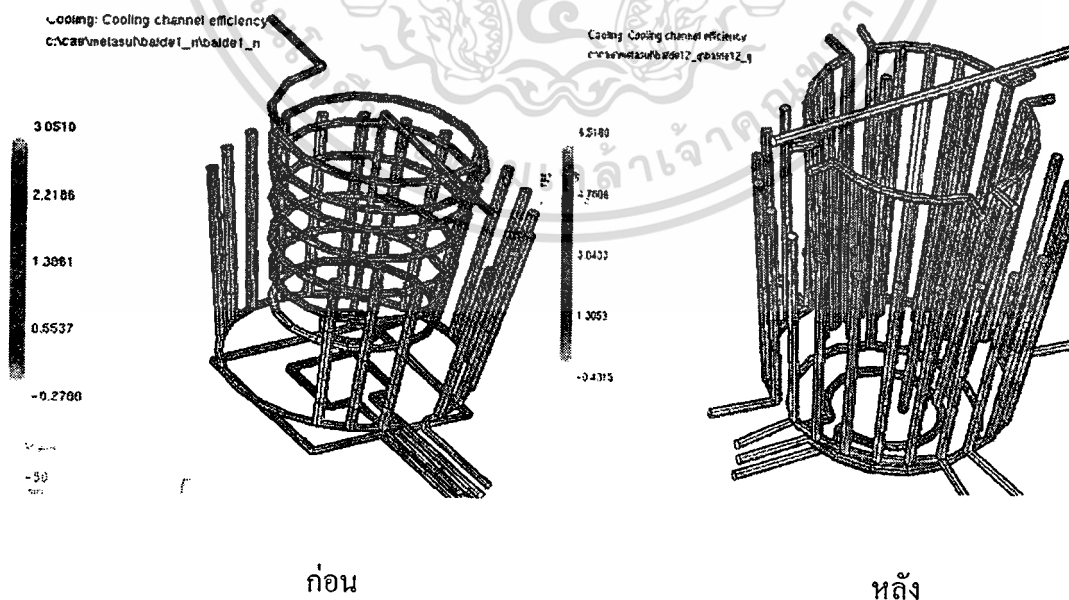
เหลวลดลง นอกจากนี้ยังมีสาเหตุมาจากการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ไม่ดี เนื่องจากอุณหภูมิของพลาสติกเหลวและแม่พิมพ์ต่ำไป

11) เกิดการแตกร้าวในแม่พิมพ์ (Cracking) รอยร้าวที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานส่วนมากจะเกิดขึ้นตรงบริเวณตำแหน่งทางเข้าของพลาสติกเหลวหรือตำแหน่งสุดท้ายของการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้มากกับพลาสติกที่ไม่มีผลึก และจะเห็นได้ชัดเจนกับงานที่ใส รอยร้าวนี้อาจปรากฏให้เห็นทันทีหลังจากการเย็นตัวลงและถูกปลดออกมาจากแม่พิมพ์หรือจะเกิดขึ้นหลังจากทิ้งไว้ 2-3 วัน

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ. 1999 Shijun N. [10] ได้ศึกษาการเกิดการบิดงอของชิ้นงานที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปโดยใช้โปรแกรม C-Mold ทำการจำลองการฉีดขึ้นรูปในขั้นตอนการเติม การอัดตัว การหล่อเย็น และทำการวิเคราะห์การหดตัวและการบิดงอของชิ้นงาน พบว่าค่าการบิดงอที่ได้จากโปรแกรมให้ค่าที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดชิ้นงานที่ฉีดจริง

ในปี ค.ศ. 1999 Flavio A. K. และ Gilberto P. Z. [11] ได้ศึกษาการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดขึ้นรูป โดยใช้โปรแกรม C-Mold มาช่วยในการวิเคราะห์แก้ไขปัญหา พบว่าในการนำโปรแกรม C-Mold มาช่วยในการวิเคราะห์สามารถช่วยกำหนดสถานะในการฉีด ขนาดของรูปร่างการจัดวางชิ้นงานในแม่พิมพ์ การออกแบบและปรับปรุงระบบหล่อเย็นให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 เปรียบเทียบรูปแบบระบบการหล่อเย็นก่อนและหลังการวิเคราะห์ [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี ค.ศ. 2000 Natti S. R. และคณะ [12] ได้ศึกษาถึงเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นของพอลิเมอร์หลอมเหลวในแม่พิมพ์ที่มีผลต่ออัตราการผลิตผลิตภัณฑ์ พบว่าระยะห่างระหว่างท่อของสารหล่อเย็น และระหว่างผิวชิ้นงานกับท่อของสารหล่อเย็น อุณหภูมิของสารหล่อเย็น ความเร็วของสารหล่อเย็น ความหนาของชิ้นงาน ค่าการนำความร้อนของแม่พิมพ์เป็นปัจจัยที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นพอลิเมอร์หลอมเหลว

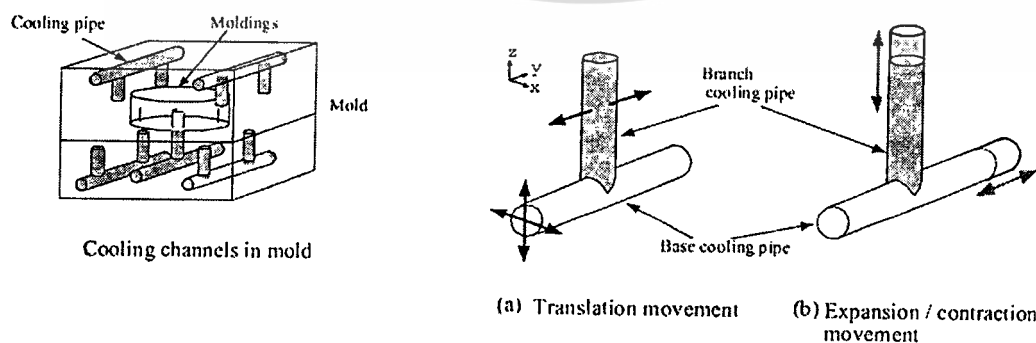
ในปี ค.ศ. 2000 Shijun N. [13] ได้ศึกษาถึงการป้องกันการเกิดรอยยุบของชิ้นงานโดยใช้โปรแกรม C-Mold ในการวิเคราะห์ พบว่าในการใช้โปรแกรม C-Mold ในการวิเคราะห์นั้น

1. สามารถทำนายตำแหน่งการเกิดรอยยุบได้
2. ใช้ในการแก้ไขการเกิดรอยยุบของชิ้นงานได้โดยการปรับเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำแม่พิมพ์ การออกแบบการวางชิ้นงาน และสถานะในการฉีดขึ้นรูป
3. สามารถหาความลึกของรอยยุบของชิ้นงานได้ ซึ่งค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่าความลึกที่ได้จากการวัดรอยยุบของชิ้นงานที่ได้จากการฉีดจริง

ในปี ค.ศ. 2000 Chang R. Y. และคณะ [14] ได้ศึกษาการวิเคราะห์ระบบการหล่อเย็นโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ พบว่าระบบการหล่อเย็นที่ไม่มีความสมดุลจะทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการบิดงอของชิ้นงาน

ในปี ค.ศ. 2000 Tao C. C. และ Ernest F. [15] ได้ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงาน พบว่ามีปัจจัยที่มีผลต่อการหดตัวของชิ้นงานขึ้นกับอุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิหลอมเหลว ความดันในการคงตัว เวลาในการคงตัว ความดันในการฉีด และเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็น

ในปี ค.ศ. 2000 Hiroshi K. และ Hiroshi S. [16] ได้ศึกษาถึงการออกแบบและจัดวางท่อของสารหล่อเย็นในแม่พิมพ์สำหรับการฉีดขึ้นรูป โดยทำการออกแบบให้มีการเพิ่มกึ่งให้กับท่อของสารหล่อเย็น ซึ่งทำให้แม่พิมพ์มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนดียิ่งขึ้นดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 การวางท่อหล่อเย็นแบบมีกึ่ง [16]

ในปี ค.ศ. 2000 Andrew S. L. และ Corey J. L. [17] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของกระบวนการหล่อเย็นในแม่พิมพ์ที่มีผลต่อกระบวนการฉีดขึ้นรูป พบว่าตัวแปรที่มีผลกระทบต่อเกิดการบิดงอคือ อุณหภูมิการหลอมเหลว อุณหภูมิแม่พิมพ์ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นและเวลาในการหล่อเย็น

ในปี ค.ศ. 2000 นายชัชวาล โลหิตวิเศษ และนายอนุรักษ์ บัวอุไร [18] ได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ที่มีหลายโพรงแบบสำหรับการอัดแบบชนิดฉีด ทำการวิเคราะห์และจัดสร้างด้วยโปรแกรม Pro Engineer® และทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Moldflow® โดยทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากโปรแกรมและการจัดสร้างแม่พิมพ์ ดังนี้

1) การออกแบบชิ้นงานด้วยโปรแกรม Pro Engineer®

สามารถทำการออกแบบลักษณะของชิ้นงานซ้อนและส้อมได้ดังนี้



ก. แบบรูปช้อน

ข. แบบรูปส้อม

รูปที่ 2.37 แบบรูปช้อนและรูปส้อมที่ได้ทำการออกแบบ

จากรูปการออกแบบชิ้นงานอาศัยหลักการเขียนด้วยพื้นผิว (Surface) ก่อนเนื่องจากรูปร่างชิ้นงานที่มีส่วนโค้งมาก จากนั้นทำการเปลี่ยนให้กลับมาอยู่ในลักษณะของทรงตันแข็ง (Solid) สำหรับส้อมอาศัยหลักการออกแบบเช่นเดียวกับช้อน แล้วทำการเจาะร่องบริเวณด้ามช้อนเพื่อเป็นการประหยัดวัสดุ

2) ผลการเปรียบเทียบการสมมูลการไหลด้วยการสมมูลระบบรูวึ่งของแม่พิมพ์

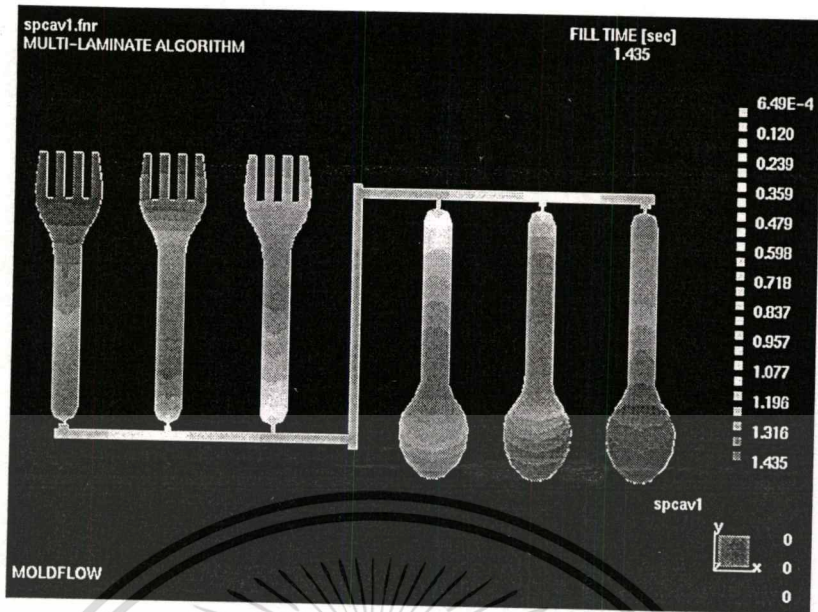
การสมมูลการไหลสามารถทำได้ด้วยการปรับขนาดและรูปร่างของรูวึ่ง ซึ่งสามารถทำการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นดังนี้

2.1 การศึกษาเวลาที่ใช้ในการเติมของโพรงแบบ (Fill time)

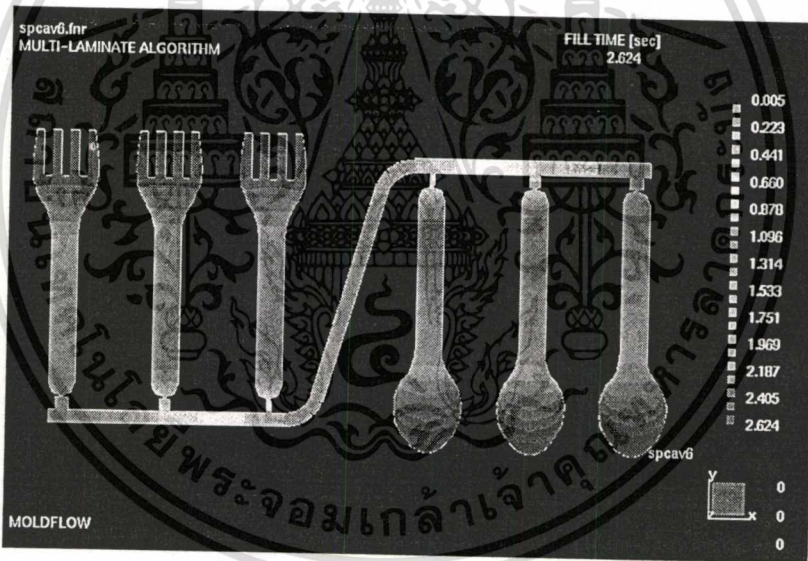
รูปแบบการเติมที่เหมาะสมควรมีการเติมที่จุดสุดท้ายของแต่ละโพรงแบบพร้อมกันเพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะที่เหมือนกัน โดยการวิเคราะห์พบว่าแม่พิมพ์ที่ยังไม่ได้ทำสมดุลรูปร่าง เวลาที่ใช้ในการเติมของแต่ละโพรงแบบมีค่าไม่เท่ากันและจุดสุดท้ายในการเติมของแต่ละโพรงแบบจะเติมเต็มใช้เวลาแตกต่างกัน ซึ่งโพรงแบบที่อยู่ใกล้รูฉีด (Sprue) จะเกิดการเติมเต็มก่อนโพรงแบบที่อยู่ห่างจากรูฉีดมากกว่าทั้งโพรงแบบรูปซ็อนและส้อม แต่เมื่อทำการสมดุลรูปร่างแล้วพบว่าเวลาที่ใช้ในการเติมจุดสุดท้ายในการเติมของแต่ละโพรงแบบมีค่าใกล้เคียงกันหรือมีค่าเท่ากัน ทำให้ชิ้นงานที่ได้ในแต่ละรูปร่างมีลักษณะและคุณสมบัติคล้ายคลึงกันมากยิ่งขึ้น จากการวิเคราะห์ที่ได้เมื่อทำการเปรียบเทียบได้ผลดังแสดงในรูปที่ 2.38

2.2 การศึกษาความดันภายในโพรงแบบ (Pressure profile in cavity)

ความดันที่เกิดขึ้นในแต่ละโพรงแบบควรมีค่าที่เท่ากันหรือมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกัน โดยจากการวิเคราะห์พบว่าโพรงแบบที่ยังไม่ได้ทำสมดุลรูปร่างในโพรงแบบรูปส้อมมีการใช้ความดันในการเติมแต่ละโพรงแบบไม่เท่ากัน โดยโพรงแบบที่อยู่ใกล้รูฉีด (Sprue) มีค่าความดันภายในโพรงแบบสูงกว่าโพรงแบบที่อยู่ห่างจากรูฉีดมากกว่า ทำให้เกิดการอัดตัวมากเกินไป (Overpack) ในโพรงแบบที่อยู่ใกล้รูฉีดและเกิดความแตกต่างของความดันภายในแต่ละโพรงแบบอย่างมาก ส่งผลให้ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะและสมบัติที่แตกต่างกันคือ ชิ้นงานที่อยู่ใกล้รูฉีดจะมีค่าความหนาแน่นมากกว่าชิ้นงานที่อยู่ไกลรูฉีด เมื่อทำการพิจารณาโพรงแบบรูปซ็อนพบว่าค่าความดันในการเติมของแต่ละโพรงแบบมีค่าเท่ากันแต่มีการใช้ความดันในการฉีดสูงถึง 66 เมกะปาสกาล ซึ่งต้องใช้พลังงานสูงในการอัดตัว เป็นการสูญเสียพลังงานมากเกินไป เมื่อทำสมดุลรูปร่างพบว่าในโพรงแบบรูปซ็อนมีการใช้ความดันในการฉีดลดต่ำลงเป็น 34 เมกะปาสกาล ซึ่งช่วยในการลดพลังงานที่ใช้ จึงเป็นการลดต้นทุนในการผลิตได้ ส่วนในโพรงแบบรูปส้อมจะมีค่าความแตกต่างของความดันที่ใช้ในการเติมแต่ละโพรงแบบลดลง ทำให้ลักษณะชิ้นงานที่ได้คล้ายคลึงกันมากยิ่งขึ้น จากการวิเคราะห์ที่ได้เมื่อทำการเปรียบเทียบได้ผลดังรูปที่ 2.39



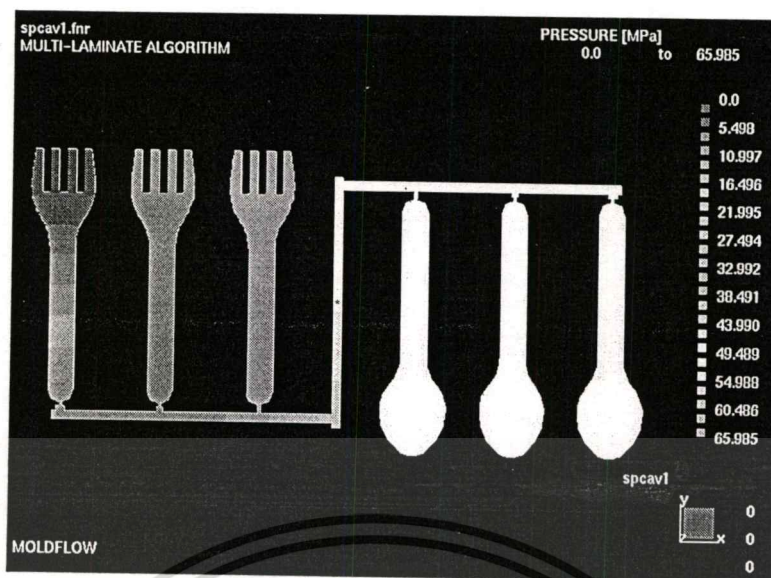
ก.ก่อนทำการสมดุลทางวิ่ง



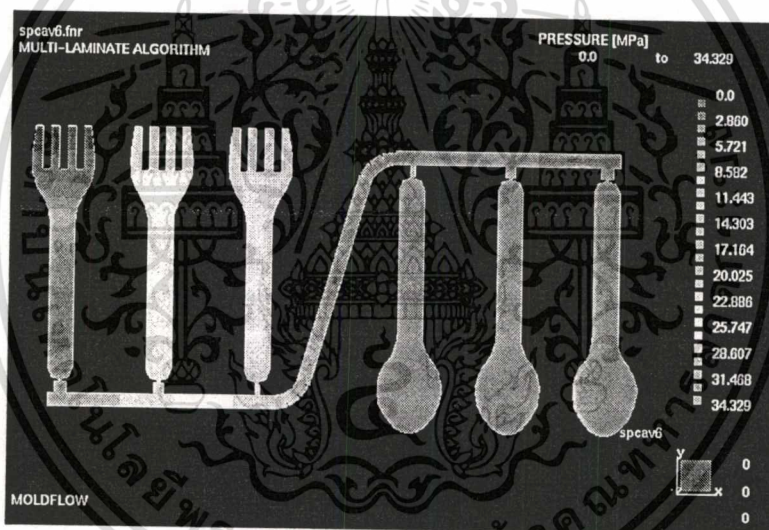
ข.หลังทำการสมดุลทางวิ่ง

รูปที่ 2.38 การเปรียบเทียบการเติมของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก. ก่อนทำการสมดุลรูปร่าง



ข. หลังทำการสมดุลทางรูปร่าง

รูปที่ 2.39 การเปรียบเทียบความดันของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ผลของการออกแบบและจัดสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก

3.1 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ออกแบบได้มีดังนี้

1) ทำการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีลักษณะแม่พิมพ์โลหะสองแผ่น (Two-plate mold) เนื่องจากลักษณะทางเข้าของพลาสติกเหลวจะเข้าด้านข้างของชิ้นงาน

2) ทำการออกแบบแม่พิมพ์ให้มีจำนวนโพรงแบบเท่ากับหก (Six-cavity mold)

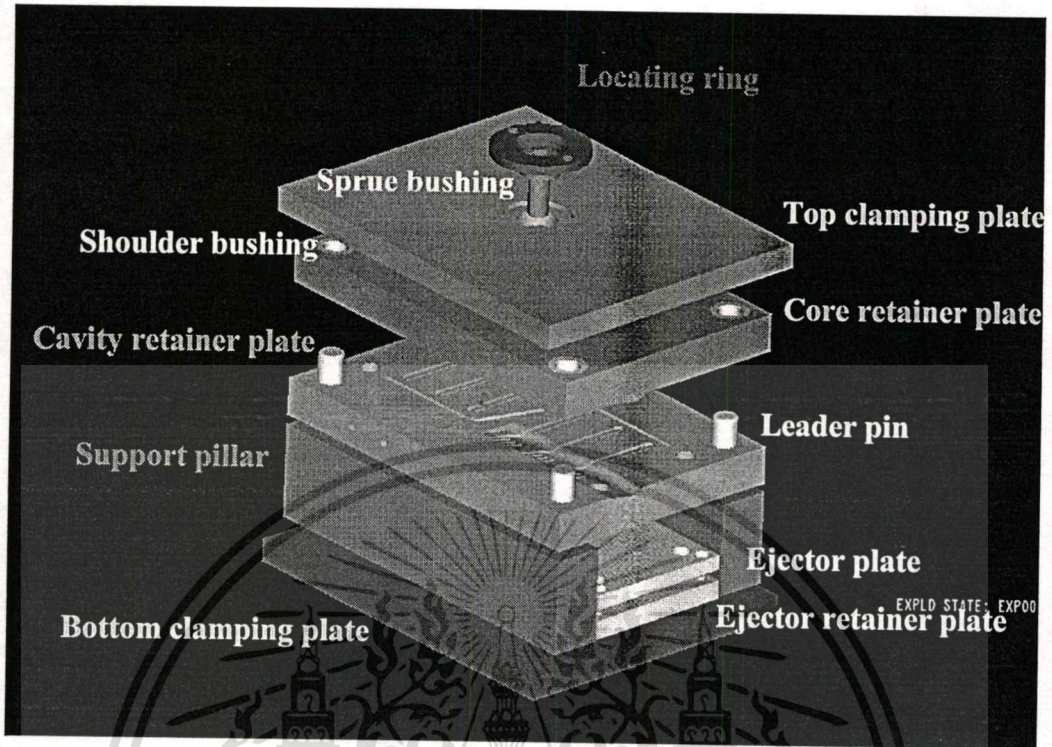
3) กำหนดแนวแบ่งชิ้นงาน (Parting line) ที่บริเวณกึ่งกลางของขอบชิ้นงาน

4) ระบบการปลดชิ้นงานใช้ระบบเข็มกระทุ้ง (Ejector pin)

3.2 ลักษณะของแม่พิมพ์ที่ได้ทำการจัดสร้าง

มีส่วนประกอบของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกดังนี้ (รูปที่ 2.40)

- 1) ปลอกรูฉีด (Sprue bushing)
- 2) แท่งรอง (Support plate or support pillar)
- 3) สลักคืนกลับ (Return pin)
- 4) แผ่นยึดด้านบน (Top retainer plate or top clamping plate)
- 5) สลักปลด (Ejector pin)
- 6)แหวนบังคับศูนย์ (Locating ring)
- 7) เพลาน้ำ (Guide pin or leader pin)
- 8) ปลอกน้ำ (Shoulder bushing)
- 9) แผ่นรองหลัง (Bottom retainer plate or bottom clamping plate)
- 10) แผ่นยึดตัวปลด (Ejector retainer plate)
- 11) แผ่นดันปลด (Ejector plate)
- 12) แผ่นกั้นโพรงแบบ (Bottom retainer plate)
- 13) แผ่นกั้นแกนกลาง (Cavity retainer plate)



รูปที่ 2.40 ส่วนประกอบของแม่พิมพ์ที่จัดสร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) แบบพื้นฐาน (Mold base) เกรด SC ขนาด 2735
- 2) เม็ดพลาสติกพอลิสไตรีน (Polystyrene) ของบริษัท Dow Chemical จำกัด เกรด Styron 492J ค่าอัตราการไหลหลอมเหลว (MFR) เท่ากับ 2.8 กรัม/10 นาที (สมบัติอื่น ๆ ดูตารางที่ 2.2)

3.2 อุปกรณ์

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ระบบ Unix ของบริษัท Silicon Graphic (ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)
- 2) โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้าน CAD CAM และ CAE (Pro Engineer® และ Moldflow®)
- 3) เครื่องกัดชิ้นงานโลหะ CNC : MAZAK รุ่น MAZAKTROL M32 บริษัท SEILO จำกัด
- 4) เครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding machine) : Battenfeld รุ่น BA 1000/500 CDC UNILOG 4000B SERVO CLOSED LOOP บริษัท SAGEN MULLER จำกัด

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1) ศึกษาการใช้โปรแกรม Pro Engineer® ออกแบบผลิตภัณฑ์และแบบแม่พิมพ์
- 2) ศึกษาการใช้โปรแกรม Moldflow® วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์และแบบแม่พิมพ์
- 3) ทำการออกแบบระบบหล่อเย็นโดยใช้โปรแกรม Moldflow®
- 4) ทำการวิเคราะห์สถานะในระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ออกแบบไว้
- 5) ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อระบบหล่อเย็น
- 6) ทำการแก้ไขปัญหาดัง ๆ ที่เกิดขึ้นในระบบหล่อเย็น
- 7) ทำการเจาะรูทางวิ่งของน้ำหล่อเย็นที่ออกแบบไว้
- 8) ทำการทดลองฉีดจริงโดยใช้แม่พิมพ์ที่ได้จัดวางรูปแบบระบบหล่อเย็น
- 9) สรุปผลการทดลอง

3.4 การทดสอบและการเปรียบเทียบ

3.4.1 ทำการออกแบบระบบหล่อเย็นด้วยโปรแกรม Moldflow®

- 1) ทำการออกแบบระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ โดยให้พื้นที่ผิวเท่ากัน
- 2) ทำการจัดวางตำแหน่งของท่อหล่อเย็น ฐานน้ำเข้าและน้ำออก

3.4.2 ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบรูปแบบระบบหล่อเย็นที่ทำการออกแบบไว้

3.4.2.1 ทำการจำลองการฉีดและวิเคราะห์ค่าดังนี้

- 1) เวลาที่ใช้ในการเติมเต็ม
- 2) ความดันภายในโพรงแบบ
- 3) อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้าและออก
- 4) เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว
- 5) อุณหภูมิพื้นผิวชิ้นงาน
- 6) ปริมาตรการหดตัวของชิ้นงาน
- 7) การบิดงอของชิ้นงาน

3.4.2.2 ทำการเปรียบเทียบค่าต่างๆที่ได้ระหว่างการจำลองการฉีดที่ไม่มีระบบหล่อเย็นกับที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ จากสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละความแตกต่าง} = \left(\frac{\text{มีระบบหล่อเย็น} - \text{ไม่มีระบบหล่อเย็น}}{\text{ไม่มีระบบหล่อเย็น}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

3.4.3 ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสถานะที่ใช้ในการหล่อเย็น

3.4.3.1 เลือกรูปแบบการหล่อเย็นที่ดีที่สุดที่ได้จากหัวข้อ 3.4.2 นำมาวิเคราะห์การจำลองการฉีดโดยปรับเปลี่ยนค่าดังนี้

- 1) อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เลขเรย์โนลด์ 1,000 5,000 10,000 และ 15,000
- 2) อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้าที่ 10°C 25°C และ 40°C

3.4.3.2 ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าดังนี้

- 1) ความดันภายในโพรงแบบ
- 2) อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้าและออก
- 3) เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว
- 4) อุณหภูมิพื้นผิวชิ้นงาน
- 5) ปริมาตรการหดตัวของชิ้นงาน
- 6) การบิดงอของชิ้นงาน

3.4.3.3 ทำการเปรียบเทียบค่าต่าง ๆ ที่ได้ระหว่างการจำลองการฉีดที่ไม่มีระบบหล่อเย็น กับที่มีระบบหล่อเย็นในสถานะต่าง ๆ จากสมการที่ 3.1

3.4.4 ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าสภาวะการฉีดของพอลิเทอร์ชนิดเดียวกันแต่มีค่า อัตราการไหลหลอมเหลวต่างกัน

3.4.4.1 ใช้พอลิสไตรีนที่มีค่าอัตราการไหลหลอมเหลวที่ 2.8 6.0 และ 13.0 กรัม/10 นาที

3.4.4.2 ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์

- 1) เวลาที่ใช้ในการเติมเต็ม
- 2) ความดันภายในโพรงแบบ

3.4.5 ทำการเปรียบเทียบเวลาในการหล่อเย็นที่ได้จากโปรแกรม Moldflow® กับค่าที่ได้จากการคำนวณดังสมการที่ 3.2 [6]

$$t_k = \frac{d^2}{\pi^2 a_{eff}} \cdot \ln \left(\frac{8}{\pi} \cdot \frac{T_m - T_M}{T_E - T_M} \right) \quad (3.2)$$

โดย t_k = เวลาในการหล่อเย็น (s)
 d = ความหนาชิ้นงาน (mm)
 a_{eff} = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของพลาสติก (mm^2/s)
 T_M = อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ($^{\circ}\text{C}$)
 T_m = อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก ($^{\circ}\text{C}$)
 T_E = อุณหภูมิที่ปลดชิ้นงาน ($^{\circ}\text{C}$)

3.4.6 ทำการเจาะรูท่อหล่อเย็น

3.4.7 การเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวิเคราะห์และค่าที่ได้จริงจากการทดลอง

3.4.7.1 ทำการปรับเปลี่ยนค่าดังนี้

- 1) ความดันในการฉีด (Injection pressure)
- 2) เวลาที่ใช้ในการฉีด (Injection time)
- 3) อุณหภูมิหลอมเหลว (Melt temperature)
- 4) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ (Mold temperature)
- 5) เวลาในการเย็นตัว (Cooling time)

3.4.7.2 ทำการบันทึกลักษณะของชิ้นงานจนได้ลักษณะชิ้นงานที่มีคุณภาพดีตามต้องการ

3.4.7.3 ทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองนี้จริงกับค่าที่ได้จากการคำนวณพร้อมทั้งหาร้อยละความแตกต่างดังสมการ 3.3

$$\text{ร้อยละความแตกต่าง} = \left(\frac{\text{ค่าที่ได้จากการคำนวณ} - \text{ค่าที่ได้จากการวัดจริง}}{\text{ค่าที่ได้จากการวัดจริง}} \right) \times 100 \quad (3.3)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

จากผลการวิจัยในขั้นต้นที่ได้ศึกษาโดยนายชัชวาล โลหิตวิเศษ และนายอนุรักษ บัวอุไร [18] โดยได้ทำการออกแบบแม่พิมพ์ที่มีหลายโพรงแบบสำหรับการฉีดขึ้นรูปดังรูปที่ 2.40 และเมื่อได้นำมาศึกษาต่อด้านกระบวนการระบบหล่อเย็นในงานวิจัยนี้ได้ผลดังนี้

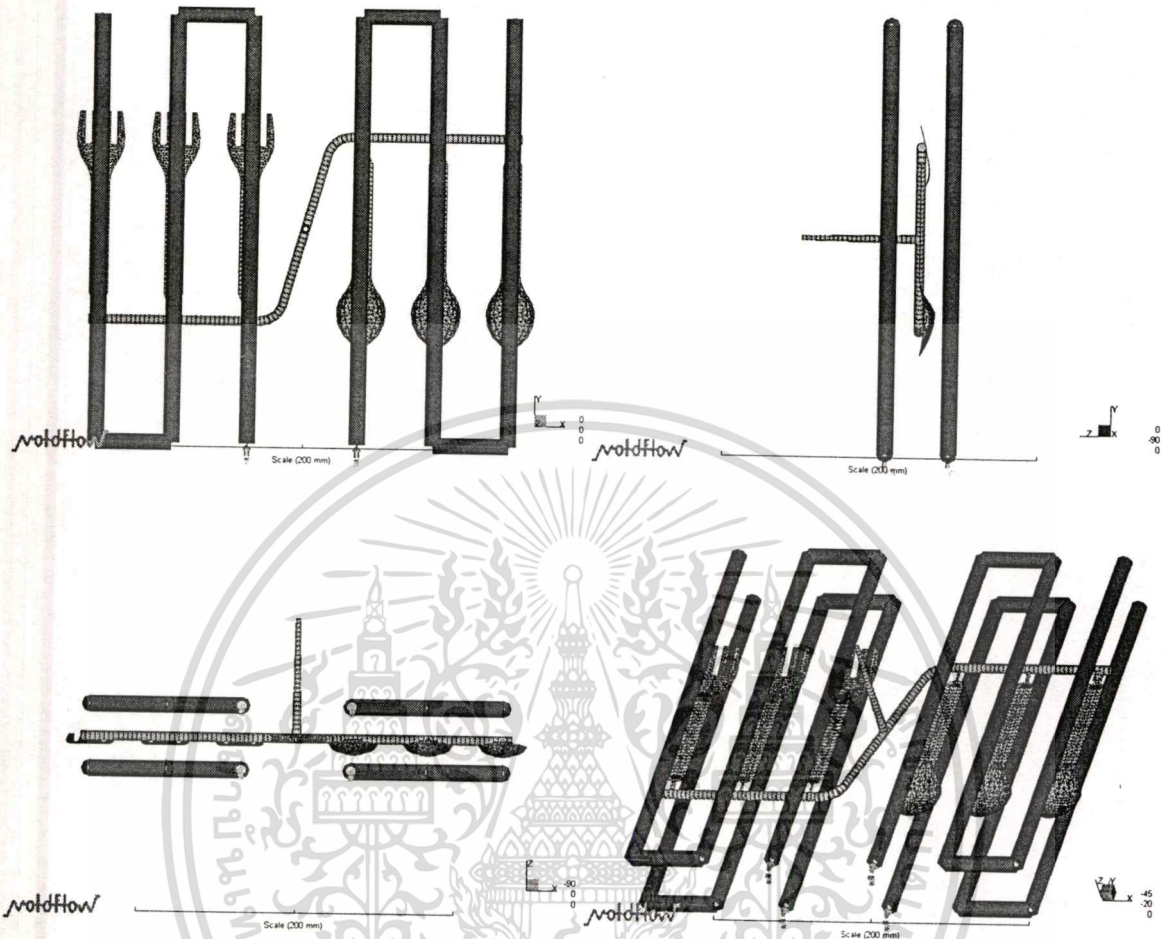
4.1 การออกแบบระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์

โดยในเริ่มต้นได้ทำการออกแบบระบบหล่อเย็นในแม่พิมพ์อย่างคร่าว ๆ และนำมาเปรียบเทียบกับรูปแบบระบบหล่อเย็นเพื่อหารูปแบบระบบหล่อเย็นที่เหมาะสมในแม่พิมพ์ ซึ่งได้ทำการออกแบบให้ท่อหล่อเย็นผ่านชิ้นงานมากที่สุด และมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนที่เท่ากัน โดยในแบบที่ 1 ให้ท่อหล่อเย็นผ่านกลางชิ้นงาน (รูปที่ 4.1) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10.67 มิลลิเมตร ห่างจากผิวของโพรงแบบ 20 มิลลิเมตร ที่ออกแบบนี้ต้องการให้ท่อหล่อเย็นที่ไหลผ่านชิ้นงานใกล้ที่สุดทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดี ในแบบที่ 2 ออกแบบให้ท่อหล่อเย็นมีการกระจายไปทั่วแม่พิมพ์ และผ่านชิ้นงานบางส่วน จึงวางท่อหล่อเย็นตามแนววางกับชิ้นงาน (รูปที่ 4.2) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ห่างจากผิวของโพรงแบบ 20 มิลลิเมตร ในแบบที่ 3 ออกแบบให้ท่อหล่อเย็นผ่านระหว่างชิ้นงาน (รูปที่ 4.3) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ห่างจากผิวของโพรงแบบ 20 มิลลิเมตร ที่ออกแบบนี้เนื่องจากให้ท่อหล่อเย็นมีการกระจายไปทั่วแม่พิมพ์ และเปรียบเทียบกับในแบบที่ 2 จากนั้นทำการวิเคราะห์การจำลองการฉีดขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Moldflow® โดยใช้สภาวะการฉีดตามตารางที่ ก-1 ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองการฉีดขึ้นรูปในรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 1-3

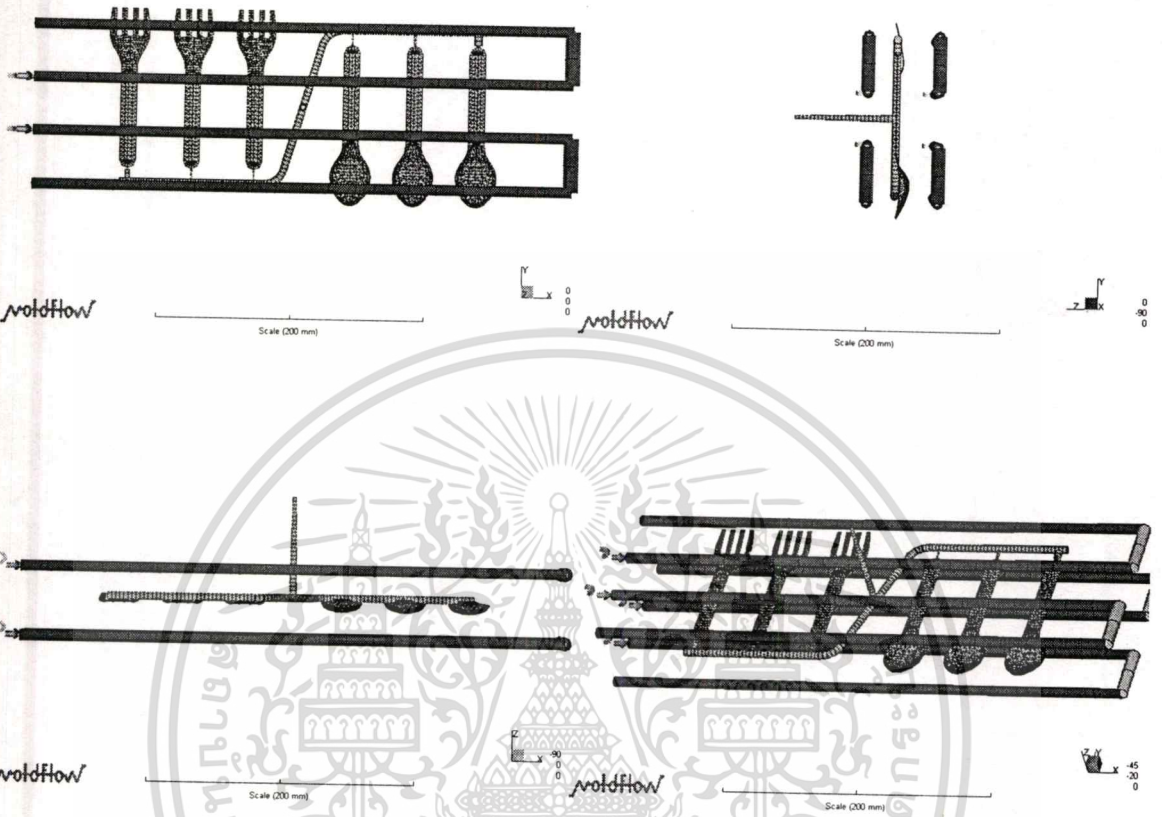
ผลการทดลอง	แบบที่ 1	แบบที่ 2	แบบที่ 3
ความดันภายในโพรงแบบ (MPa)	38.09	38.14	38.08
เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว (s)	9.98	9.95	9.94
อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน (°C)	31.29	30.86	30.99
อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน (°C)	31.35	30.90	31.02
ปริมาตรการหดตัว (%)	3.56	3.56	3.56
การบิดงอของชิ้นงาน (mm)	0.44	0.44	0.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



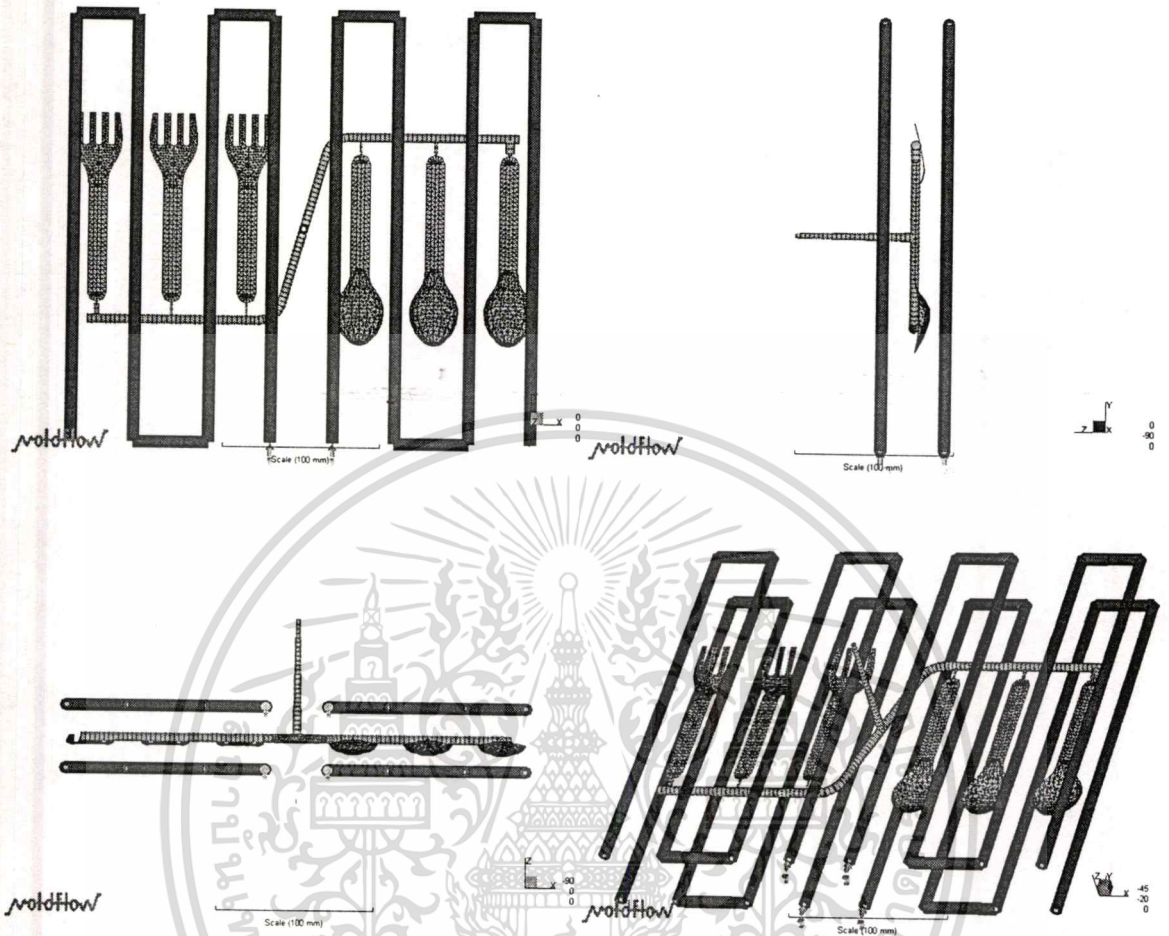
รูปที่ 4.1 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 3

จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าที่ได้ไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงว่าในรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 1-3 มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนเท่า ๆ กันแต่ในการจัดสร้างระบบหล่อเย็นในแม่พิมพ์แตกต่างกัน โดยระบบหล่อเย็นแบบที่ 1 ท่อหล่อเย็นได้วางผ่านกลางชิ้นงานซึ่งท่อหล่อเย็นจะตรงกับเข็มกระทุ้ง (Ejector pin) ที่ใช้ปลดชิ้นงาน ทำให้ไม่สามารถจัดสร้างขึ้นมาใช้งานได้จริง ในรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 2 ท่อหล่อเย็นได้วางตามแนวขวางกับชิ้นงานซึ่งมีปัญหาในการเจาะท่อหล่อเย็น เนื่องจากท่อหล่อเย็นมีความยาวถึง 400 มิลลิเมตร จึงอาจเกิดการบิดเบี้ยวของท่อหล่อเย็นในระหว่างการเจาะได้ และต้องใช้เครื่องเจาะที่มีขนาดใหญ่ด้วย ดังนั้นจึงใช้รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 3 ซึ่งสามารถผลิตได้จริง เพราะได้มีการเหล็กลีงท่อหล่อเย็นไม่ให้ตรงกับเข็มกระทุ้งและมีระยะการเจาะท่อหล่อเย็นเพียง 270 มิลลิเมตร ซึ่งไม่ยาวเกินไปเป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ต่อไป

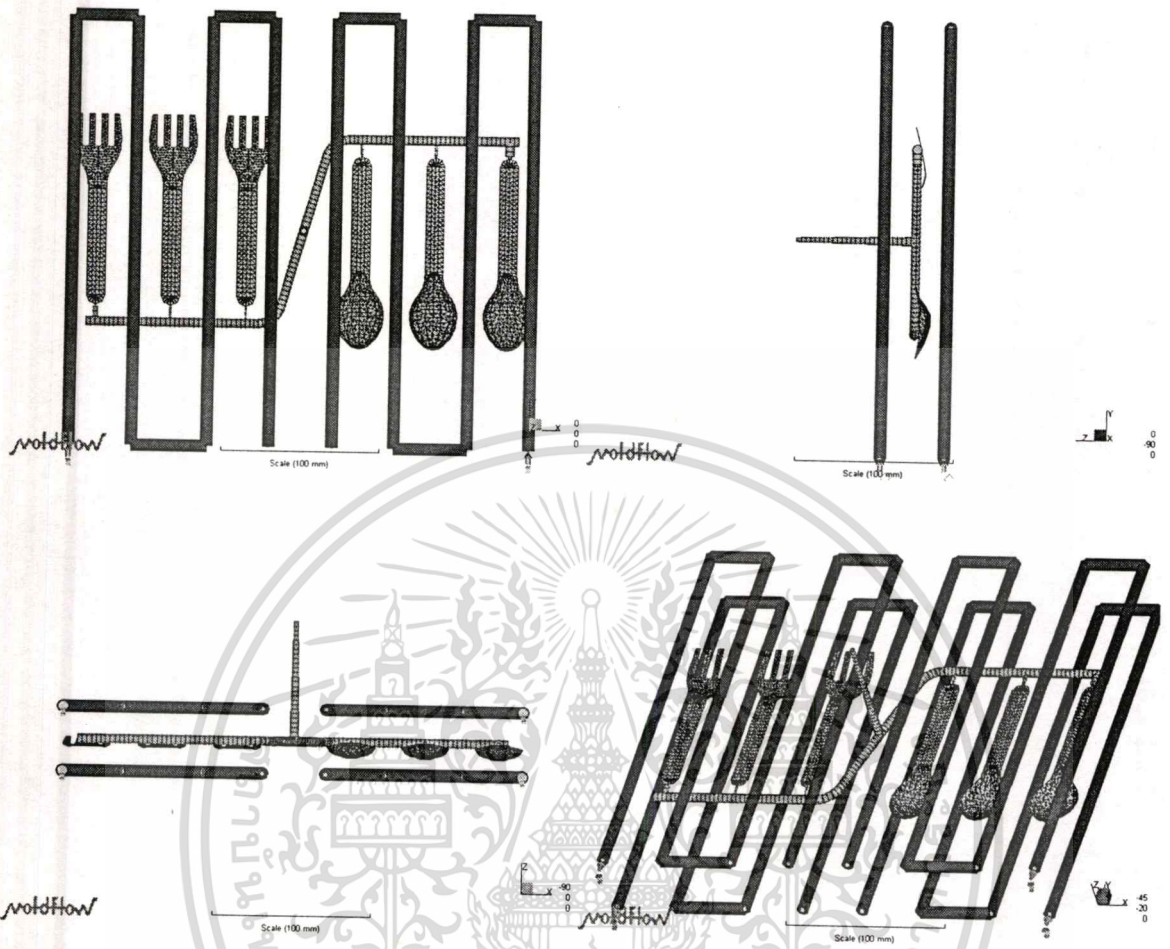
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 3 (รูปที่ 4.3) พบว่าวงจรระบบหล่อเย็นเป็นแบบขนาน โดยมีน้ำหล่อเย็นไหลเข้าบริเวณที่อยู่ใกล้รูฉีด ดังนั้นเราจึงทำการเปรียบเทียบทิศทางการไหลของน้ำหล่อเย็นโดยให้น้ำหล่อเย็นไหลเข้าบริเวณด้านนอกของแม่พิมพ์เป็นรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 4 (รูปที่ 4.4) และทำการออกแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 (รูปที่ 4.5) โดยนำรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 3 มาเชื่อมต่อกับท่อหล่อเย็นเป็นแบบอนุกรม เพื่อเปรียบเทียบวงจรรูปแบบหล่อเย็นแบบขนานและแบบอนุกรม จากนั้นทำการวิเคราะห์การจำลองการฉีดขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Moldflow® โดยใช้สภาวะการฉีดตามตารางที่ ก-1 ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการจำลองการฉีดขึ้นรูปในรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 3-5

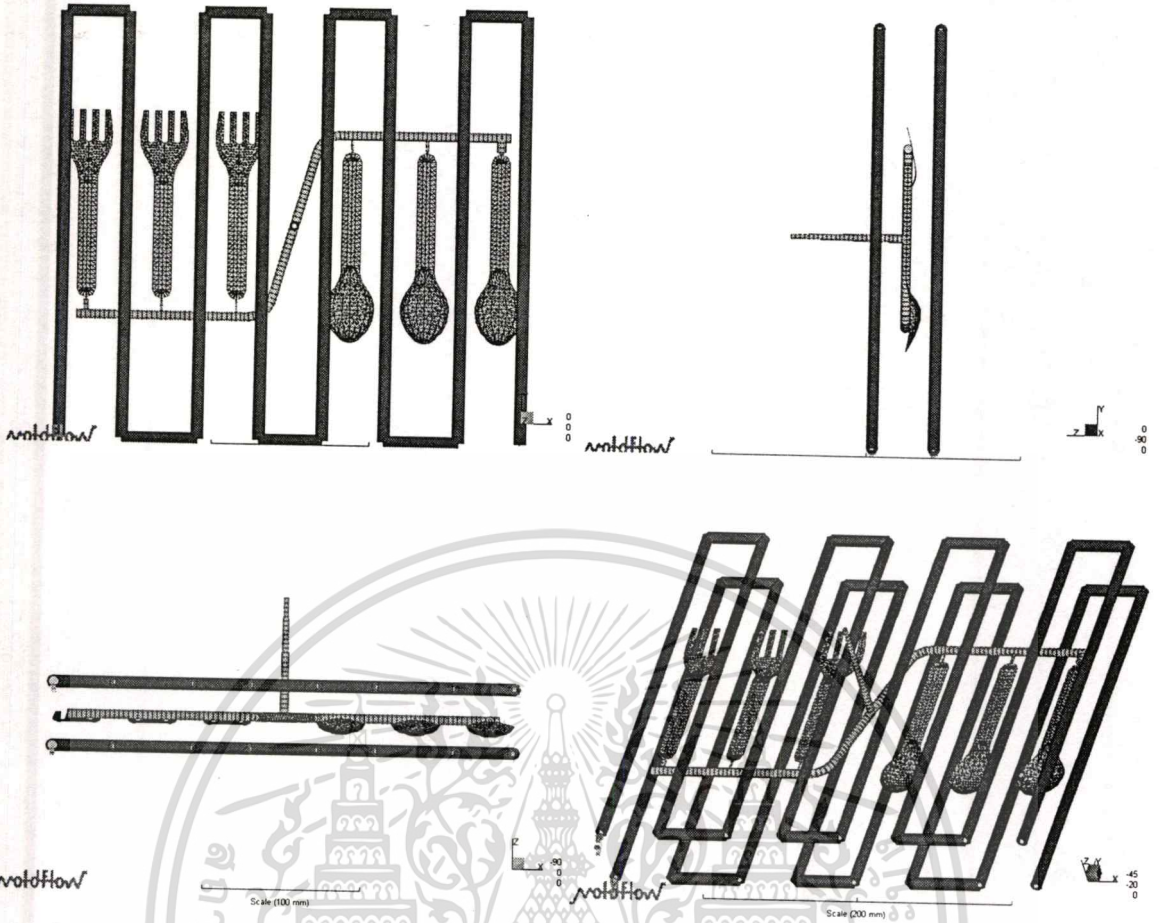
ผลการทดลอง	แบบที่ 3	แบบที่ 4	แบบที่ 5
ความดันภายในโพรงแบบ (MPa)	38.08	37.88	37.84
เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว (s)	9.94	9.93	9.95
อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน (°C)	30.99	31.08	31.73
อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน (°C)	31.02	31.11	31.76
ปริมาตรการหดตัว (%)	3.56	3.57	3.57
การบิดงอของชิ้นงาน (mm)	0.44	0.44	0.44

จากผลการทดลองพบว่าค่าที่ได้มีค่าไม่แตกต่างกัน แสดงว่าระบบหล่อเย็นที่ออกแบบสำหรับแม่พิมพ์นี้สามารถใช้ได้ทั้งรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 3 แบบที่ 4 หรือแบบที่ 5 ทั้งที่ตามทฤษฎีนั้นในรูปแบบระบบหล่อเย็นที่ 3 และแบบที่ 4 ที่มีวงจรรูปแบบหล่อเย็นที่เป็นแบบขนานจะมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าในแบบที่ 5 แต่กลับมีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งอาจเนื่องจากว่าชิ้นงานมีขนาดเล็กทำให้ระบบระบบหล่อเย็นที่ออกแบบไว้มีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะถ่ายเทความร้อนได้อย่างทั่วถึง ทำให้ไม่ต้องต่อแบบขนานก็สามารถถ่ายเทได้เพียงพอ ส่วนในรูปแบบที่ 3 กับแบบที่ 4 ที่มีทิศทางการไหลของน้ำหล่อเย็นที่แตกต่างกัน โดยในแบบที่ 3 น้ำหล่อเย็นไหลเข้าบริเวณใกล้รูฉีดซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกับในแบบที่ 4 ซึ่งน่าจะเนื่องจากเหตุผลเดียวกับข้างต้น ดังนั้นจึงเลือกรูปแบบระบบหล่อเย็นที่ 5 เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์ต่อไปเนื่องจากการต่อท่อของระบบหล่อเย็นที่จัดสร้างได้ง่ายกว่า



รูปที่ 4.4 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 4

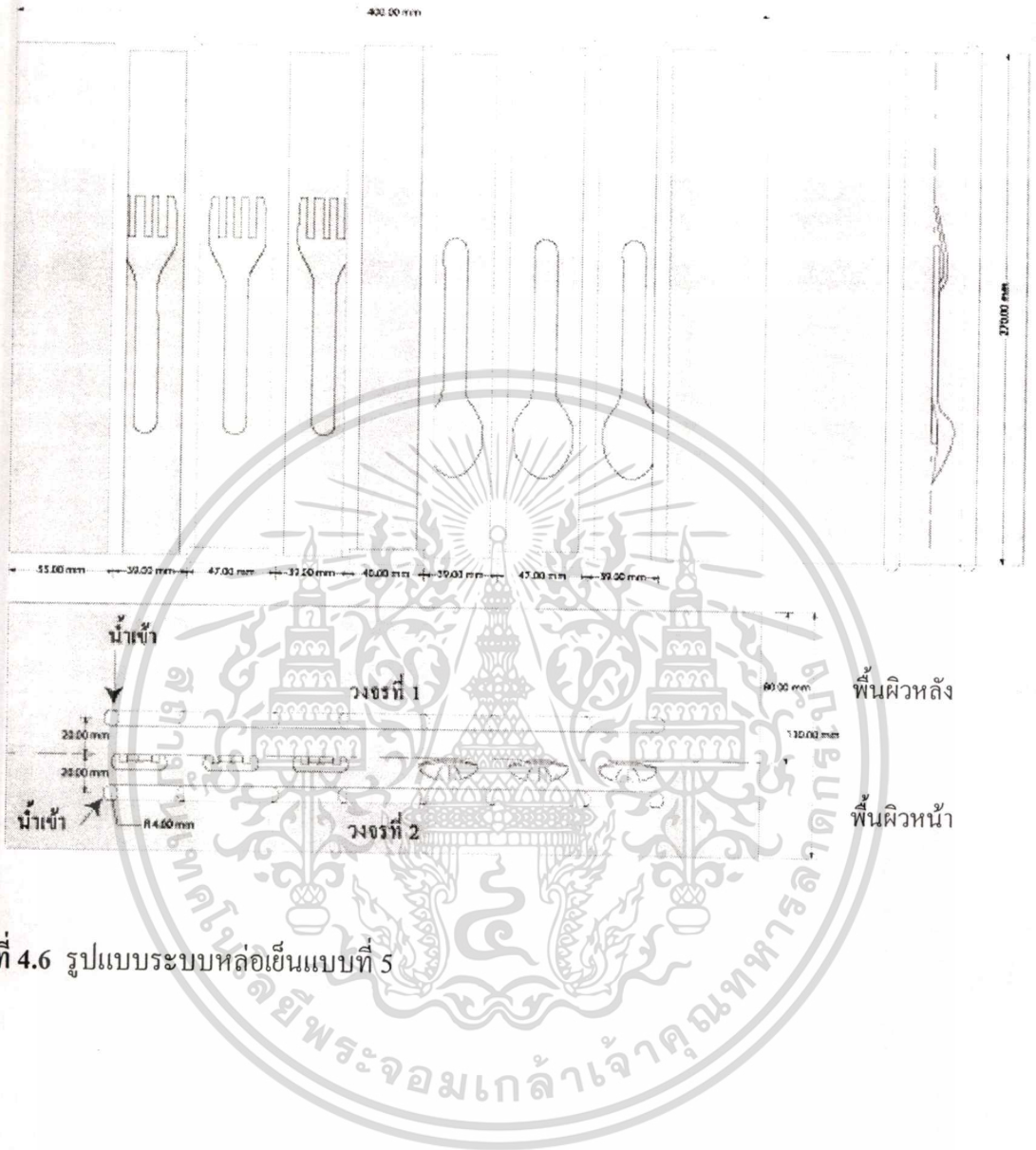
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5

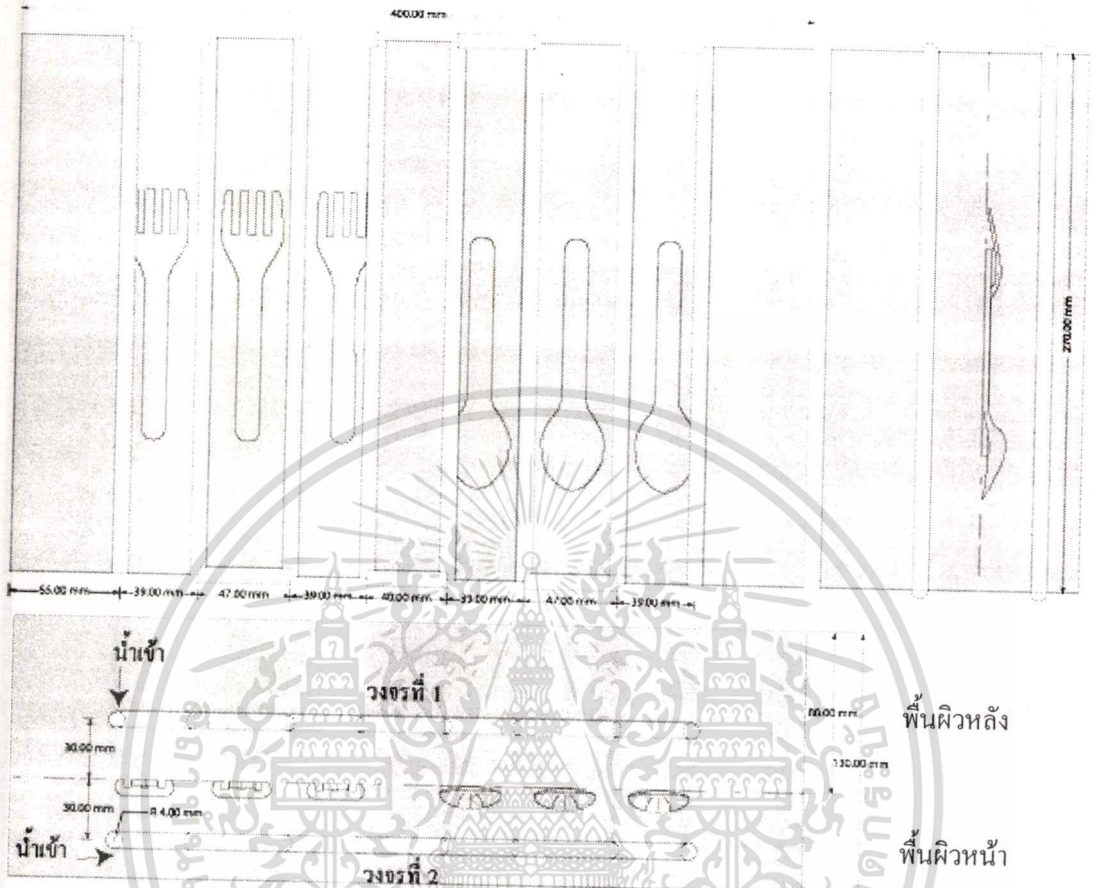
จากการทดลองการออกแบบระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการฉีดขึ้นงานจริง ในแบบที่ 5 ทำการออกแบบระบบหล่อเย็น โดยแบ่งออกเป็นสองวงจร ในแต่ละวงจรมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร และห่างจากผิวของโพรงแบบข้างละ 20 มิลลิเมตร มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งในการออกแบบระบบหล่อเย็นนี้มีข้อดีคือมีการกระจายท่อหล่อเย็นไปทั่วแม่พิมพ์ ในแบบที่ 6 เหมือนกับในแบบที่ 5 แตกต่างกันตรงระยะห่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางท่อหล่อเย็นกับผิวของโพรงแบบ โดยในแบบที่ 6 มีระยะห่าง 30 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างท่อหล่อเย็นกับผิวของโพรงแบบ มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.7 แบบที่ 7 ทำการออกแบบให้ท่อหล่อเย็นมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร และห่างจากผิวของโพรงแบบข้างละ 20 มิลลิเมตร มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.8 เมื่อขนาดท่อใหญ่ขึ้นจึงต้องลดระยะทางของท่อหล่อเย็นลงเพื่อให้พื้นที่การถ่ายเทความร้อนเท่ากัน และทำการวางท่อหล่อเย็นผ่านชิ้นงานมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อศึกษาถึงผลของการกระจายท่อหล่อเย็นในแม่พิมพ์ ส่วนแบบที่ 8 ทำการออกแบบวงจรรบบหล่อเย็นที่ต่างกัน โดยใช้วงจรระบบหล่อเย็นในแบบที่ 5 กับแบบที่ 7 ผสมกัน เพื่อศึกษาความแตกต่างของการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์ มีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



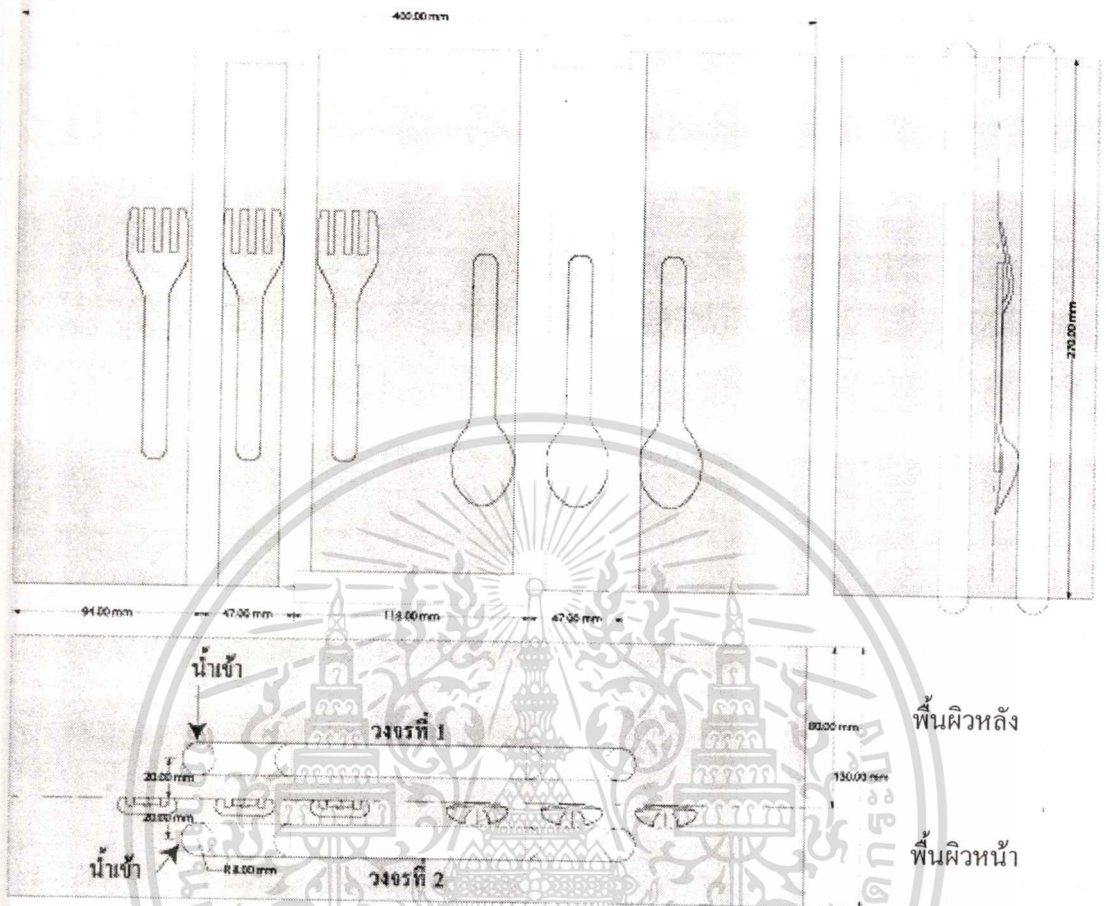
รูปที่ 4.6 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



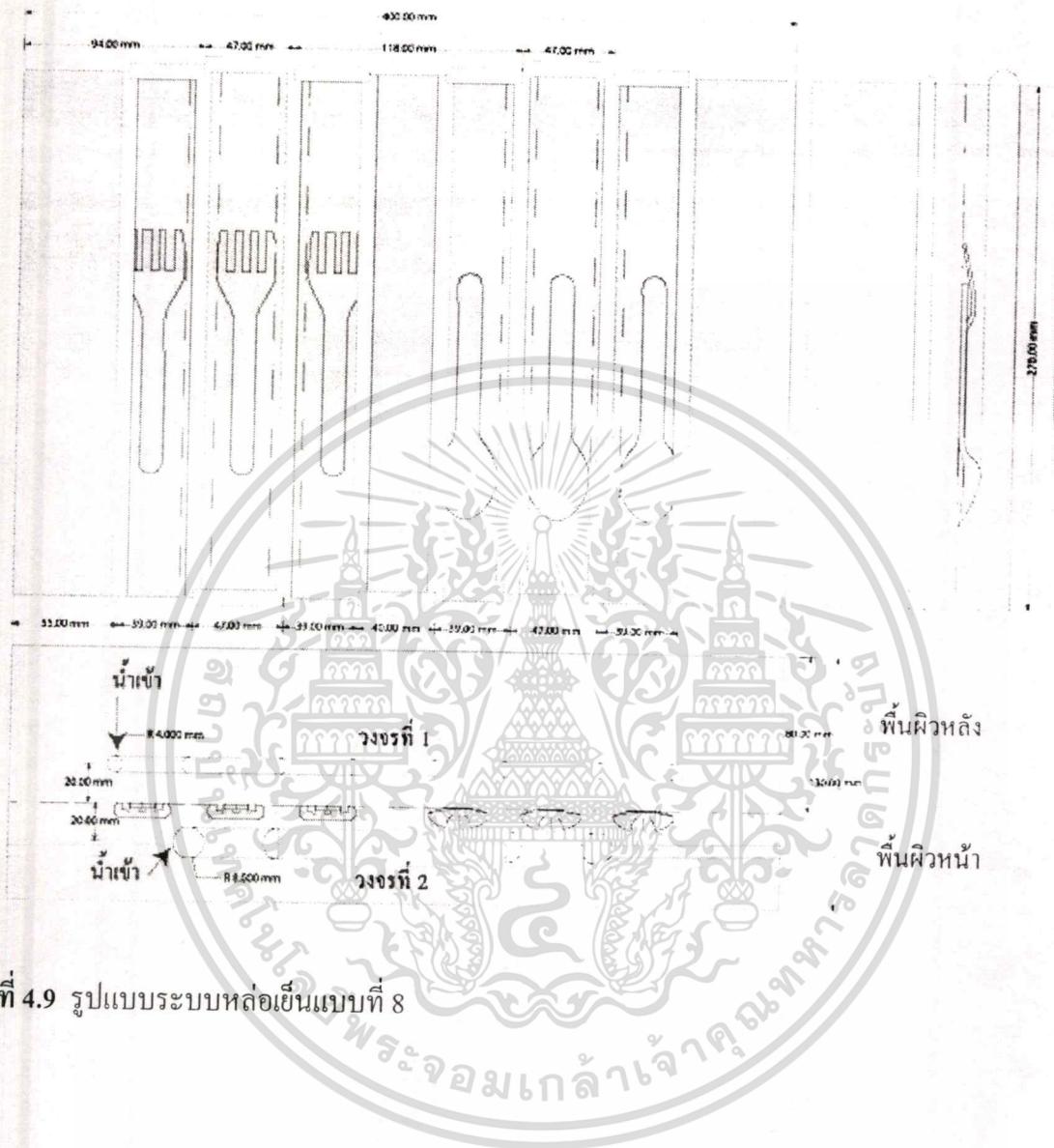
รูปที่ 4.7 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

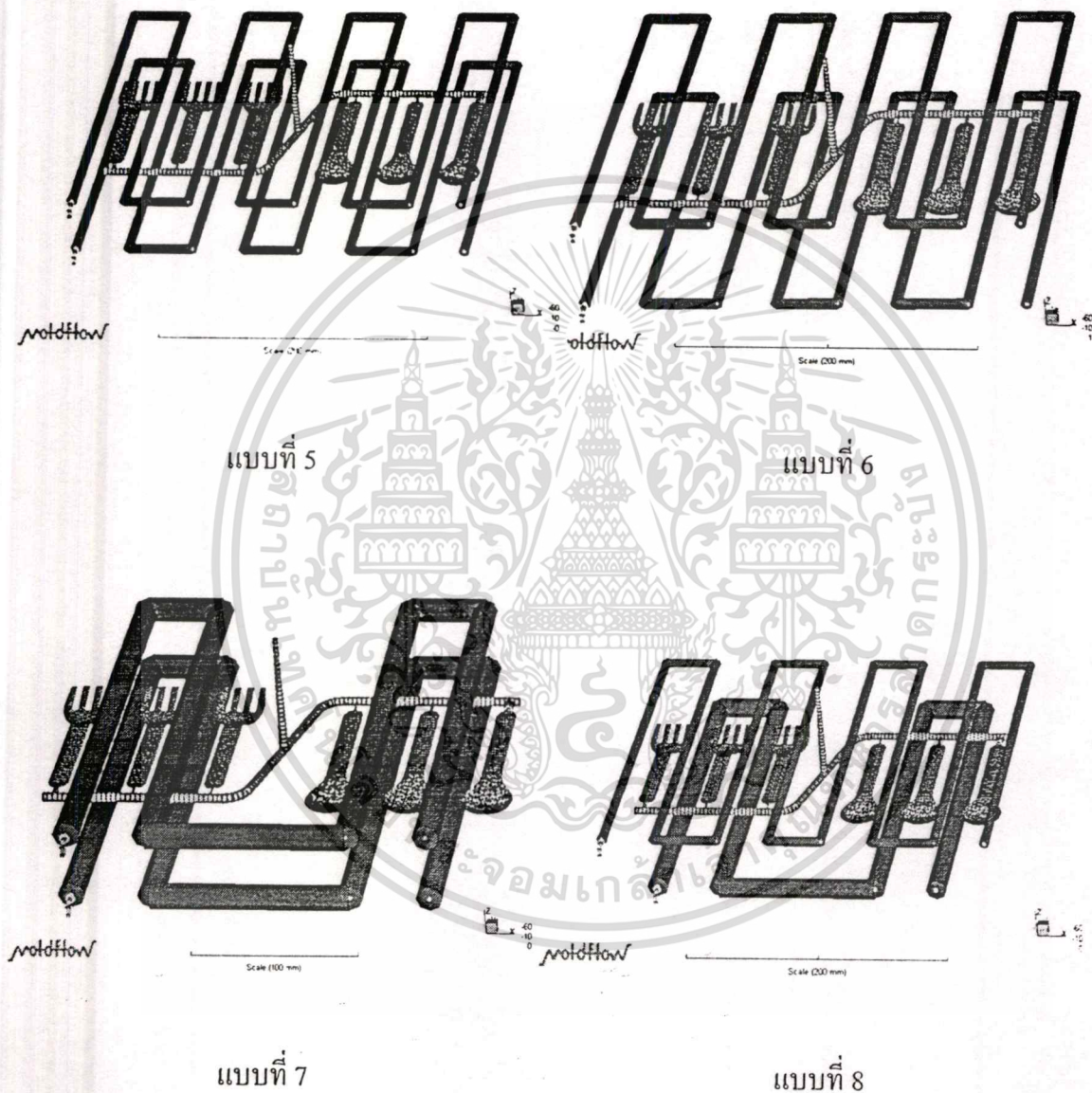


รูปที่ 4.9 รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์

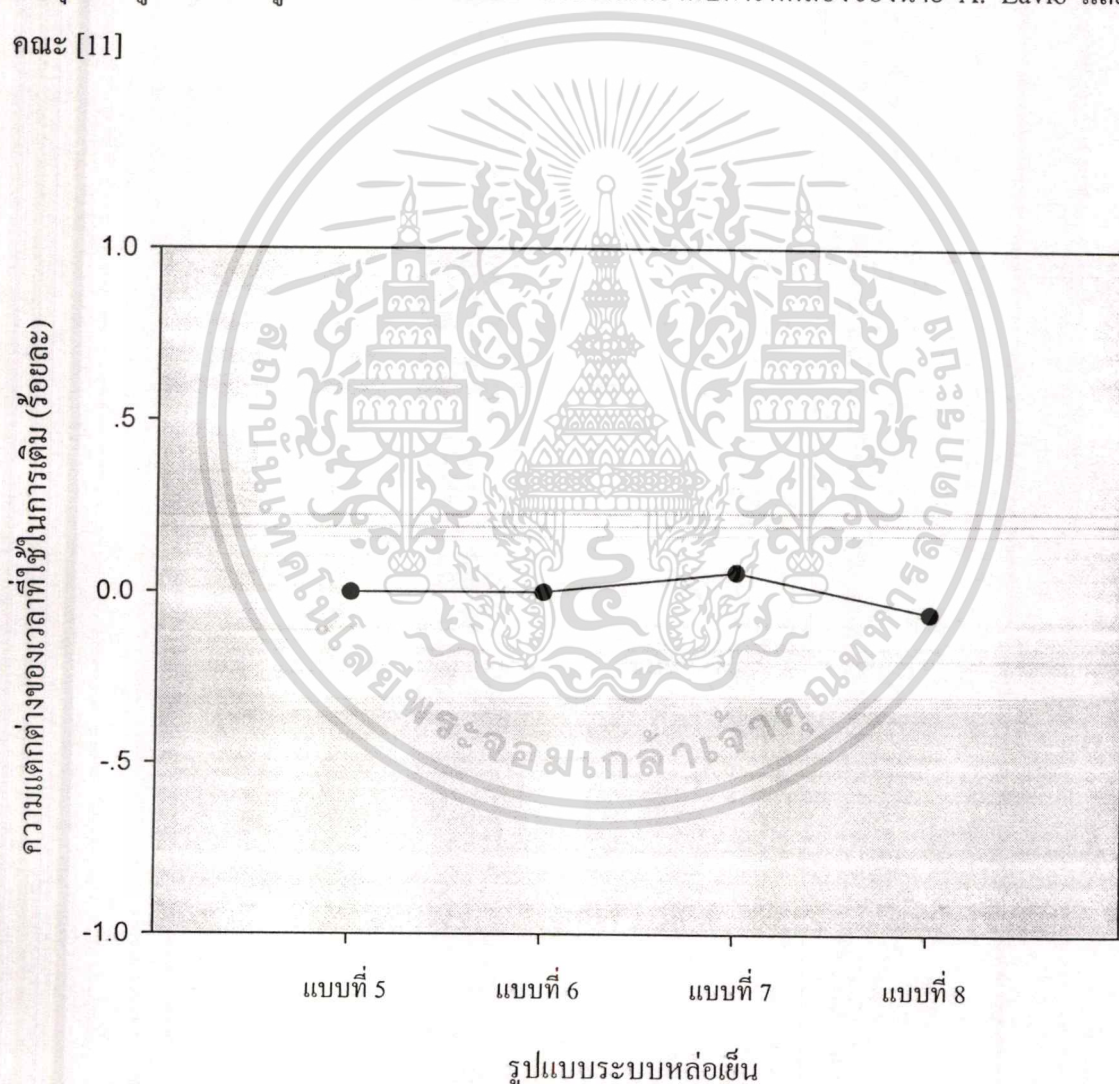
ทำการศึกษาและเปรียบเทียบรูปแบบของระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ ในแม่พิมพ์ (รูปที่ 4.10) ที่มีผลกระทบต่อชิ้นงาน และทำการวิเคราะห์โดยใช้สภาวะดังตารางที่ ก-1 (ภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ

4.2.1 ศึกษาและเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเติมของโพรงแบบ (Fill time)

รูปแบบการเติมที่เหมาะสมควรมีการเติมที่จุดสุดท้ายของแต่ละโพรงแบบพร้อมกันเพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะที่เหมือนกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเติมของโพรงแบบระหว่างระบบที่ไม่มีระบบหล่อเย็นกับที่มีระบบหล่อเย็นในแต่ละแบบ ได้ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.11 (รูปผลการทดลองการจำลองการฉีดที่ภาคผนวก ข รูป ข-1 ถึง ข-4 การคำนวณร้อยละความแตกต่างคูที่ภาคผนวก ค ตาราง ค-1 และ ค-2) พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก (อยู่ในช่วง -0.06% ถึง $+0.06\%$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ารูปแบบของการออกแบบระบบระบบหล่อเย็นของแม่พิมพ์ไม่มีผลต่อการเติมเต็มโพรงแบบ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเติมเต็มโพรงแบบมีผลที่เกี่ยวข้องกับการสมดุลของรูปร่างมากกว่ารูปแบบระบบหล่อเย็น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของนาย A. Lavio และคณะ [11]

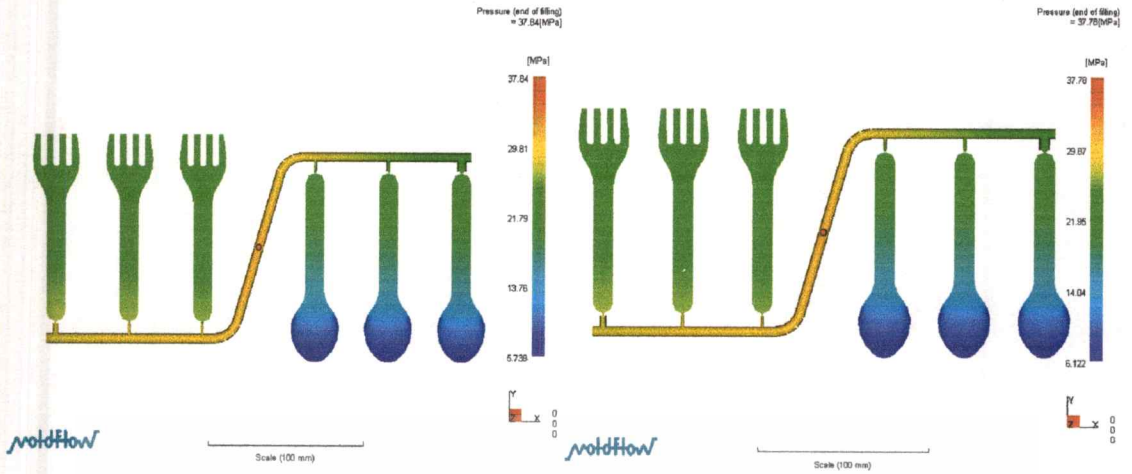


รูปที่ 4.11 ความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการเติมในแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

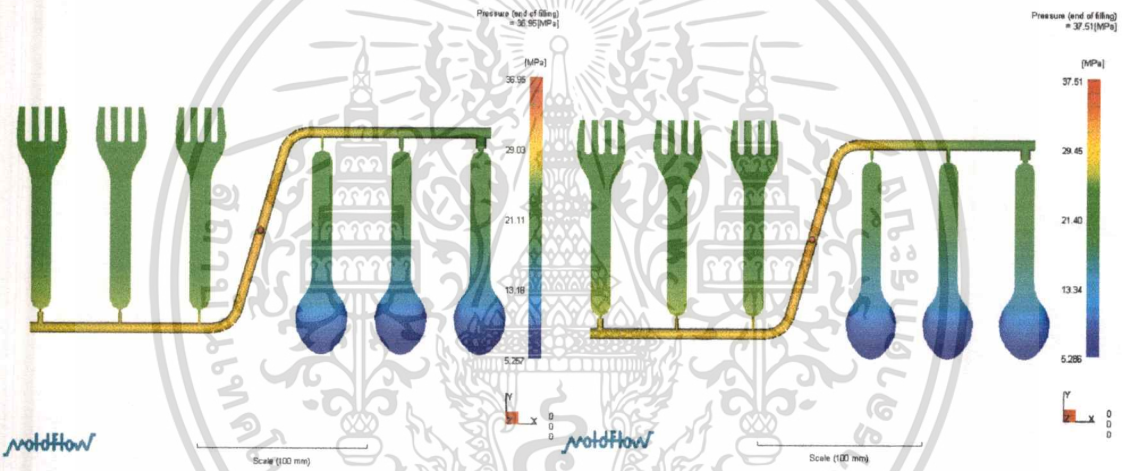
4.2.2 ศึกษาและเปรียบเทียบความดันภายในโพรงแบบ (Pressure profile in cavity)

ภายในโพรงแบบจะเกิดการลดลงของความดัน โดยจะเกิดการลดลงของความดันมากเมื่อไหลผ่านบริเวณที่บาง และเกิดการลดลงของความดันที่น้อยกว่าเมื่อไหลผ่านบริเวณที่มีความหนามากขึ้น สำหรับรูปแบบการลดลงที่ดีควรมีการลดลงของความดันอย่างสม่ำเสมอ และบริเวณสุดท้ายของการเติมควรมีค่าความดันเท่ากับศูนย์เมกะปาสกาล และควรให้ความดันที่เกิดขึ้นในแต่ละโพรงแบบมีค่าที่เท่ากันหรือมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เพื่อให้ชิ้นงานที่ได้มีลักษณะที่เหมือนกันหรือคล้ายคลึงกัน [4] จากการวิเคราะห์ผลของความดันทั้ง 4 แบบ ดังแสดงรูปที่ 4.12 พบว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกันคือในส่วนของชิ้นงานล้อมมีความดันคงที่ในแต่ละโพรงแบบที่สูงทำให้ต้องใช้ความดันที่สูงในการฉีด เนื่องจากในส่วนของล้อมมีการเติมเต็มก่อนส่วนของชิ้น ในส่วนของชิ้นพบว่าความดันจะค่อย ๆ ลดลงอย่างสม่ำเสมอเท่า ๆ กันในแต่ละโพรงแบบทำให้ได้ชิ้นงานที่มีสมบัติใกล้เคียงกัน และเมื่อเปรียบเทียบความดันภายในโพรงแบบในระบบที่ไม่มีระบบหล่อเย็นกับที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ พบว่าเมื่อมีระบบหล่อเย็นทำให้ความดันในโพรงแบบสูงขึ้น เนื่องจากระบบหล่อเย็นทำให้อุณหภูมิของผิวแม่พิมพ์ลดต่ำลง พอลิเมอร์จึงไหลได้ยากขึ้น จึงใช้ความดันในการฉีดสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระบบหล่อเย็นทั้ง 4 แบบ ดังแสดงรูปที่ 4.13 (ดูตารางคำนวณภาคผนวก ค ตาราง ค-1 และ ค-2) พบว่าระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 มีความแตกต่างมากที่สุดถึงร้อยละ 11.13 ซึ่งแสดงว่าระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 ทำให้ผิวของโพรงแบบมีอุณหภูมิต่ำที่สุด แสดงถึงมีการถ่ายเทความร้อนได้ดี เนื่องจากระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 มีการกระจายของท่อหล่อเย็นอย่างสม่ำเสมอ ดีกว่าในแบบที่ 7 กับ 8 และมีระยะห่างระหว่างท่อหล่อเย็นกับผิวของโพรงแบบน้อยกว่าในแบบที่ 6



แบบที่ 5

แบบที่ 6

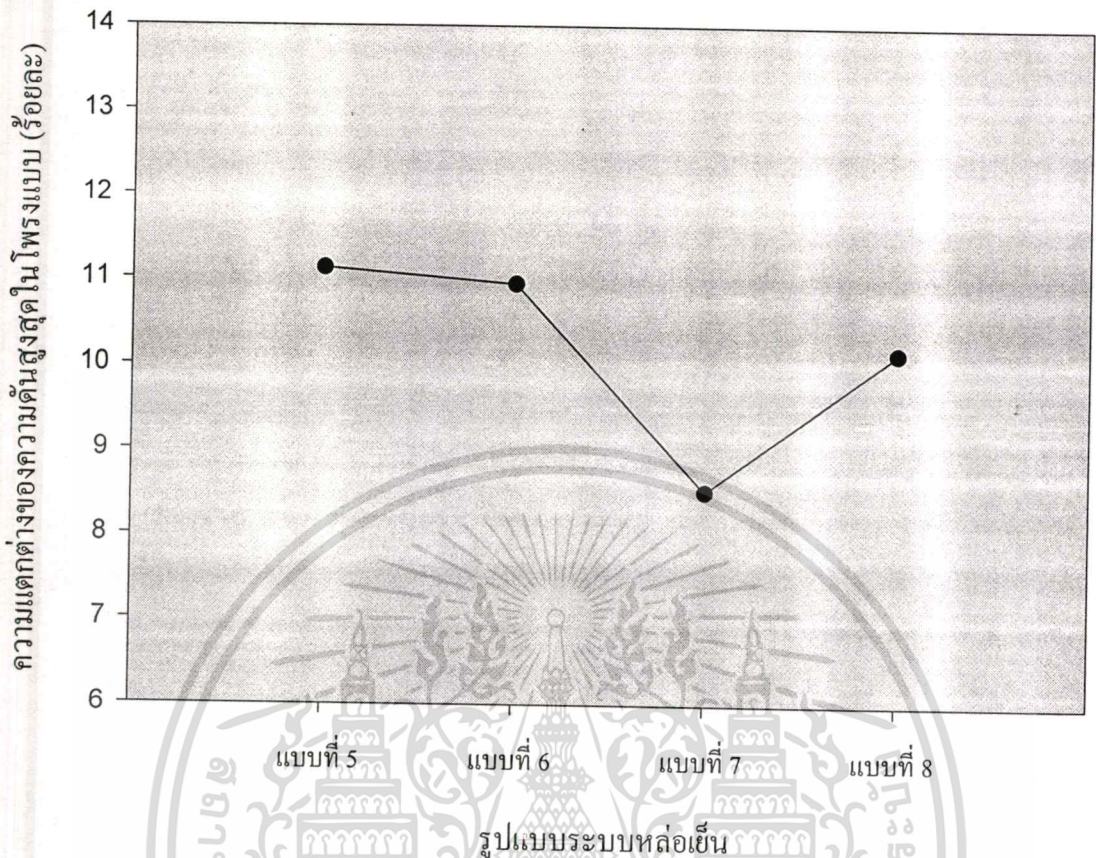


แบบที่ 7

แบบที่ 8

รูปที่ 4.12 ความดันภายในโพรงแบบที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ความแตกต่างของอุณหภูมิสูงสุดในโพรงแบบที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ

4.2.3 ศึกษาและเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้าและออก

จากการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำหล่อเย็นในระบบหล่อเย็นกับพอลิเมอร์หลอมเหลวในโพรงแบบ ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้ากับที่ไหลออกดังแสดงผลที่ได้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้ากับไหลออกในรูปแบบระบบหล่อเย็นต่าง ๆ

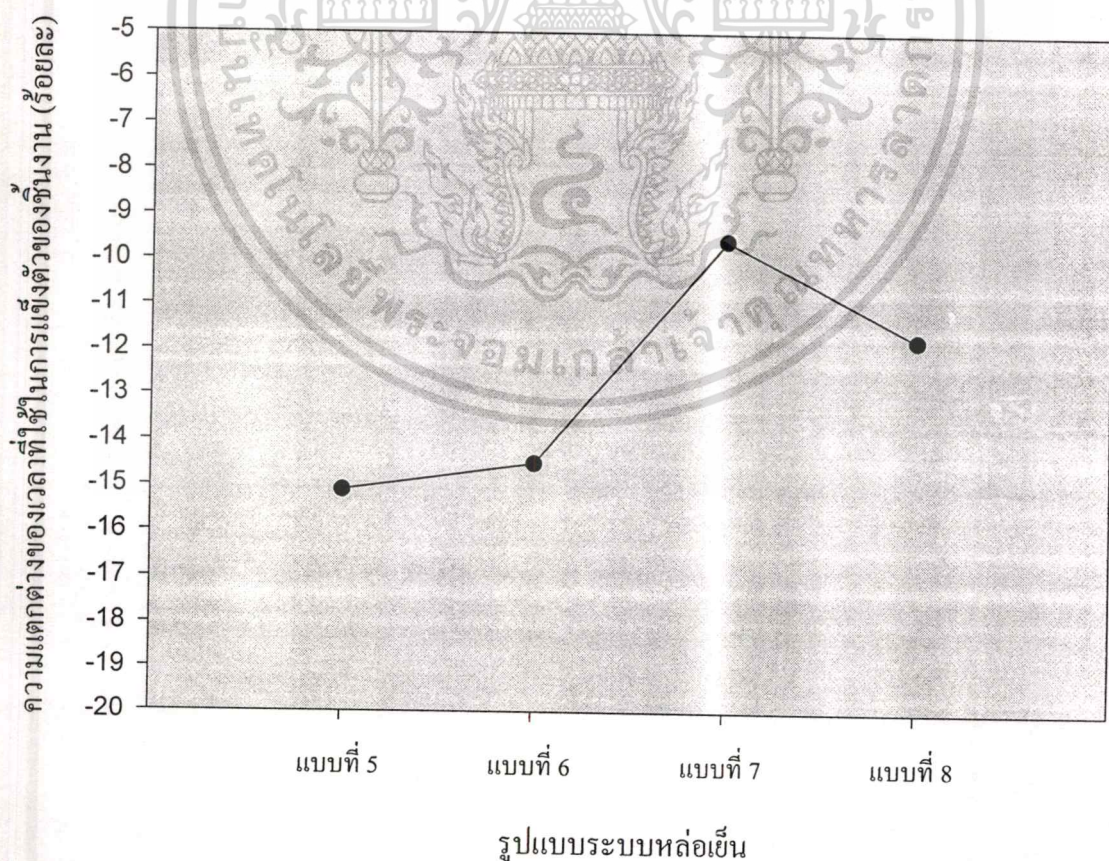
รูปแบบระบบหล่อเย็น	อุณหภูมิน้ำเข้า (°C)		อุณหภูมิน้ำออก (°C)	
	วงจรที่ 1	วงจรที่ 2	วงจรที่ 1	วงจรที่ 2
5	25.0	25.0	25.9	25.9
6	25.0	25.0	25.9	25.9
7	25.0	25.0	25.7	25.7
8	25.0	25.0	26.4	25.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการออกแบบระบบหล่อเย็นนั้น ไม่ควรให้อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของน้ำหล่อเย็นแตกต่างกันเกิน 2°C [2] จากผลที่ได้พบว่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ออกมาในแต่ละแบบมีค่าสูงขึ้นไม่เกิน 2°C ซึ่งแสดงว่าในการออกแบบในแต่ละแบบสามารถนำไปใช้งานได้

4.2.4 ศึกษาและเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงาน (Time to freeze)

เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานขึ้นอยู่กับอัตราการถ่ายเทความร้อน และความหนาของชิ้นงานเป็นหลัก โดยรูปแบบระบบหล่อเย็นที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่ดีจะช่วยทำให้เวลาในการแข็งตัวลดลง และในส่วนชิ้นงานที่มีความหนาน้อยก็ใช้เวลาน้อยกว่าในส่วนที่มีความหนามาก [4] จากรูปที่ 4.14 พบว่าแม่พิมพ์ที่มีระบบหล่อเย็นทำให้ชิ้นงานใช้เวลาในการแข็งตัวน้อยกว่าแม่พิมพ์ที่ไม่มีระบบหล่อเย็น โดยระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 มีความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานเมื่อเทียบกับแม่พิมพ์ที่ไม่มีระบบหล่อเย็นสูงสุดถึงร้อยละ -15.1 เมื่อเปรียบเทียบกับระบบหล่อเย็นแบบที่ 6 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างท่อหล่อเย็นกับผิวของโพรงแบบที่มากกว่า ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้น้อยกว่าจึงทำให้ใช้เวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น [12] เมื่อเปรียบเทียบกับระบบหล่อเย็นแบบที่ 7 การกระจายของท่อหล่อเย็นไปไม่ทั่วชิ้นงานเมื่อเทียบกับระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 จึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนน้อยลงเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวจึงมากขึ้น เมื่อพิจารณาแบบหล่อเย็นแบบที่ 8 ซึ่งมีวงจรถ่ายเทของน้ำที่ 5 ที่มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอจึงช่วยลดเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานได้มากกว่าระบบหล่อเย็นแบบที่ 7



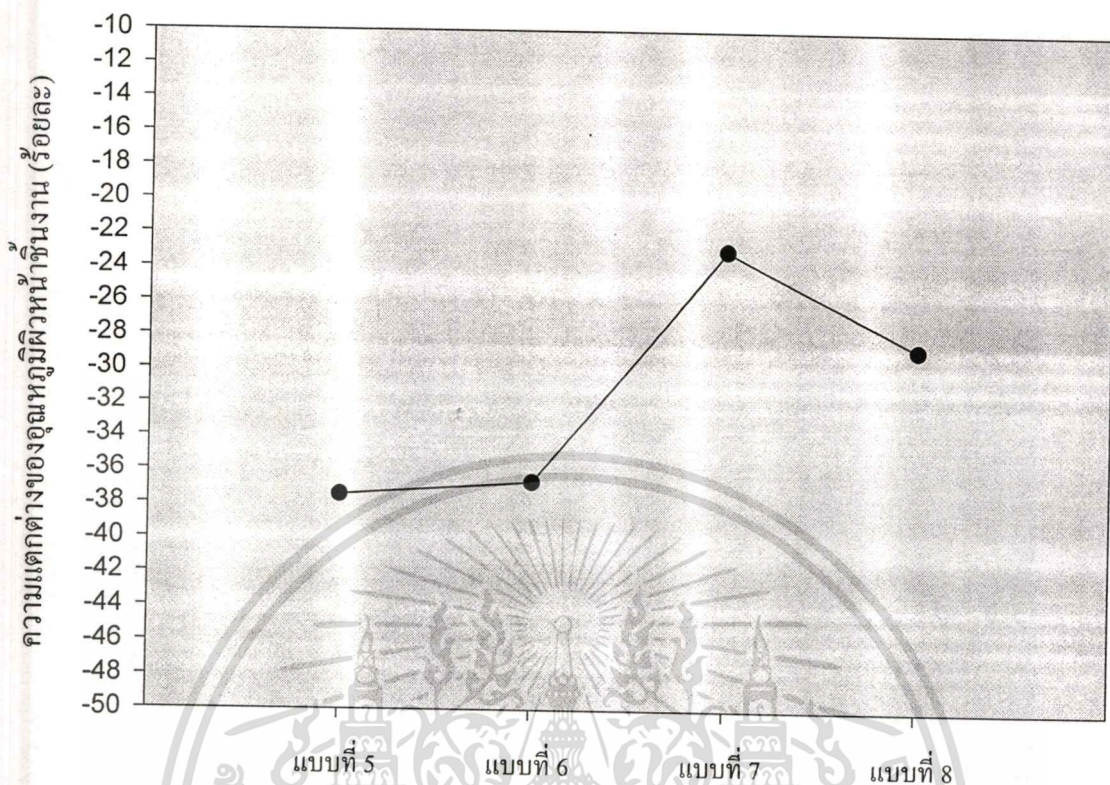
รูปที่ 4.14 ความแตกต่างเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

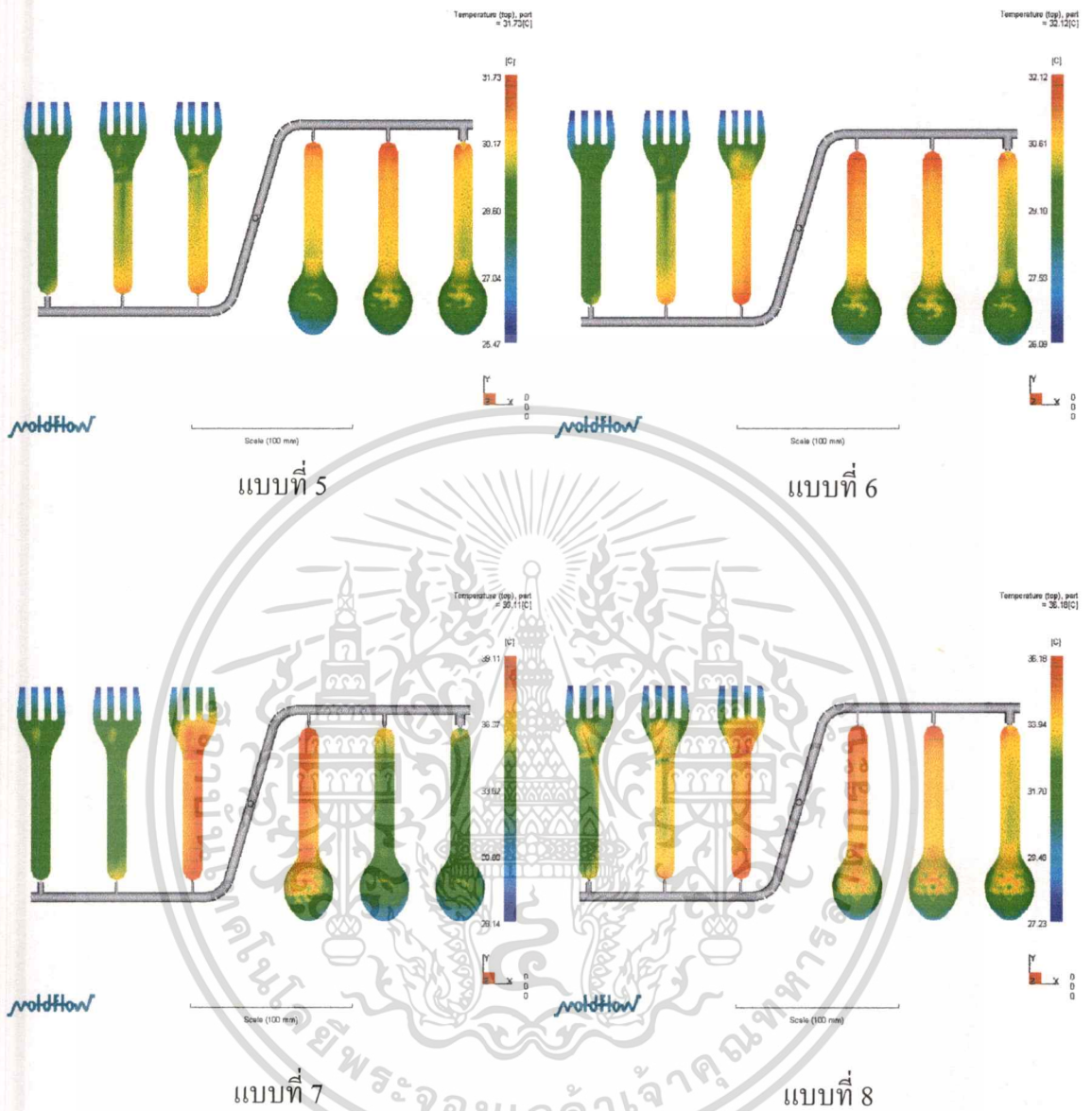
4.2.5 ศึกษาและเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.15 พบว่าระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 มีความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานเมื่อเทียบกับแม่พิมพ์ที่ไม่มีระบบหล่อเย็นสูงที่สุดถึงร้อยละ -37.48 เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 ซึ่งมีระยะห่างของท่อหล่อเย็นกับผิวของโพรงแบบนี้ต่ำกว่าระบบหล่อเย็นแบบที่ 6 ให้อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานน้อยกว่า เนื่องจากมีระยะห่างน้อยกว่าจึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบหล่อเย็นแบบที่ 7 ที่มีการกระจายตัวของท่อหล่อเย็นอย่างไม่ทั่วถึง พบว่าอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานมีอุณหภูมิสูงขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวของท่อหล่อเย็นไม่ทั่วถึงทำให้ถ่ายเทความร้อนไม่ดี และเมื่อพิจารณาในรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 8 ซึ่งมีรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 อยู่ด้วยทำให้อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานลดต่ำกว่าระบบหล่อเย็นแบบที่ 7 เนื่องจากในรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 8 มีส่วนของรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 อยู่ด้วยจึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น และเมื่อพิจารณารูปแบบของอุณหภูมิในชิ้นงาน (รูปที่ 4.16) พบว่าระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 และระบบหล่อเย็นแบบที่ 6 มีรูปแบบคล้ายกันทำให้ชิ้นงานที่ได้มีสมบัติใกล้เคียงกัน รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 7 พบว่ารูปแบบของอุณหภูมิในชิ้นงานใกล้เคียงกันตรงชิ้นงานที่อยู่ด้านนอก (ห่างจากรูฉีด) ส่วนชิ้นงานที่อยู่ด้านใน (ใกล้รูฉีด) จะมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านนอก เนื่องจากว่าชิ้นงานอยู่ใกล้รูฉีดและบริเวณของรูฉีดไม่มีท่อหล่อเย็นจึงทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้น้อยส่งผลให้อุณหภูมิสูง รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 8 เป็นวงจรถ่ายเทความร้อน 2 แบบ วงจรที่อยู่ผิวหน้าโพรงแบบมีวงจรถ่ายเทความร้อนเหมือนระบบหล่อเย็นแบบที่ 7 ทำให้รูปแบบของอุณหภูมิในชิ้นงานที่อยู่ใกล้รูฉีดใกล้เคียงกับระบบหล่อเย็นแบบที่ 7 ส่วนชิ้นงานที่อยู่ด้านนอกจะมีรูปแบบของอุณหภูมิลดต่ำกว่าระบบหล่อเย็นแบบที่ 5



รูปที่ 4.15 ความแตกต่างอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

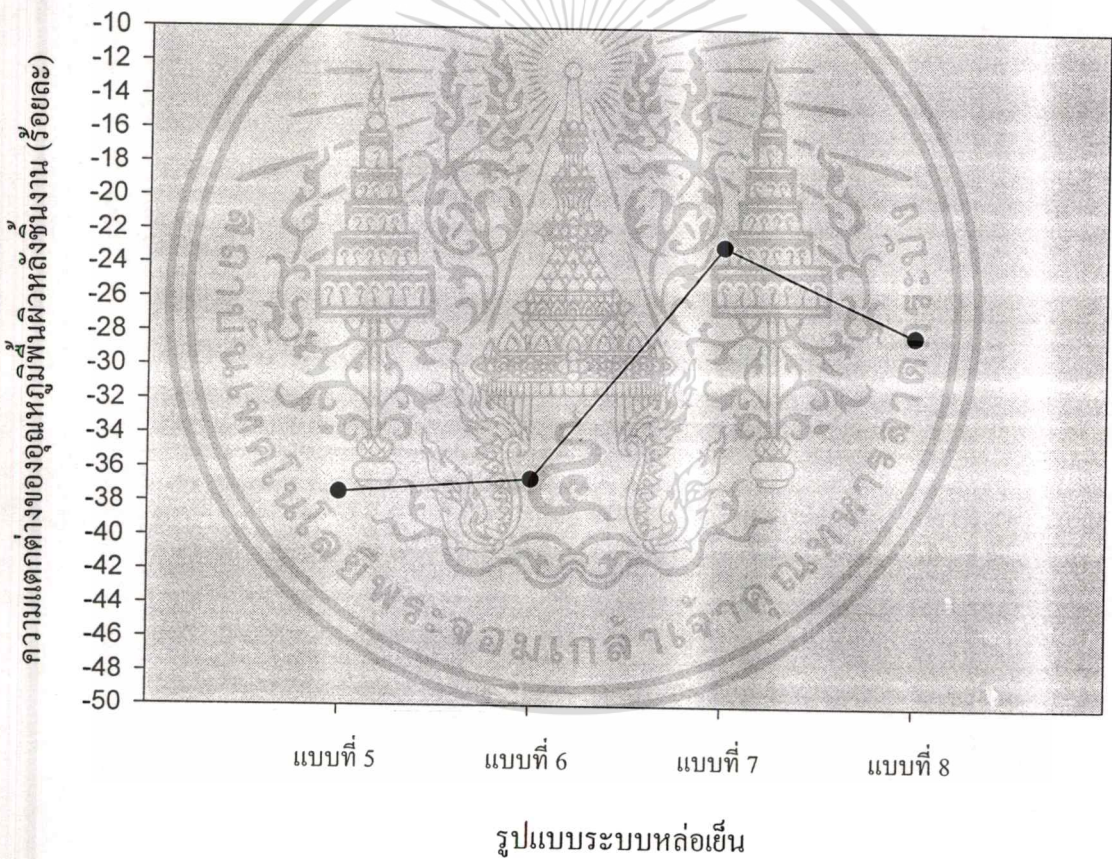


รูปที่ 4.16 อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานในระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ

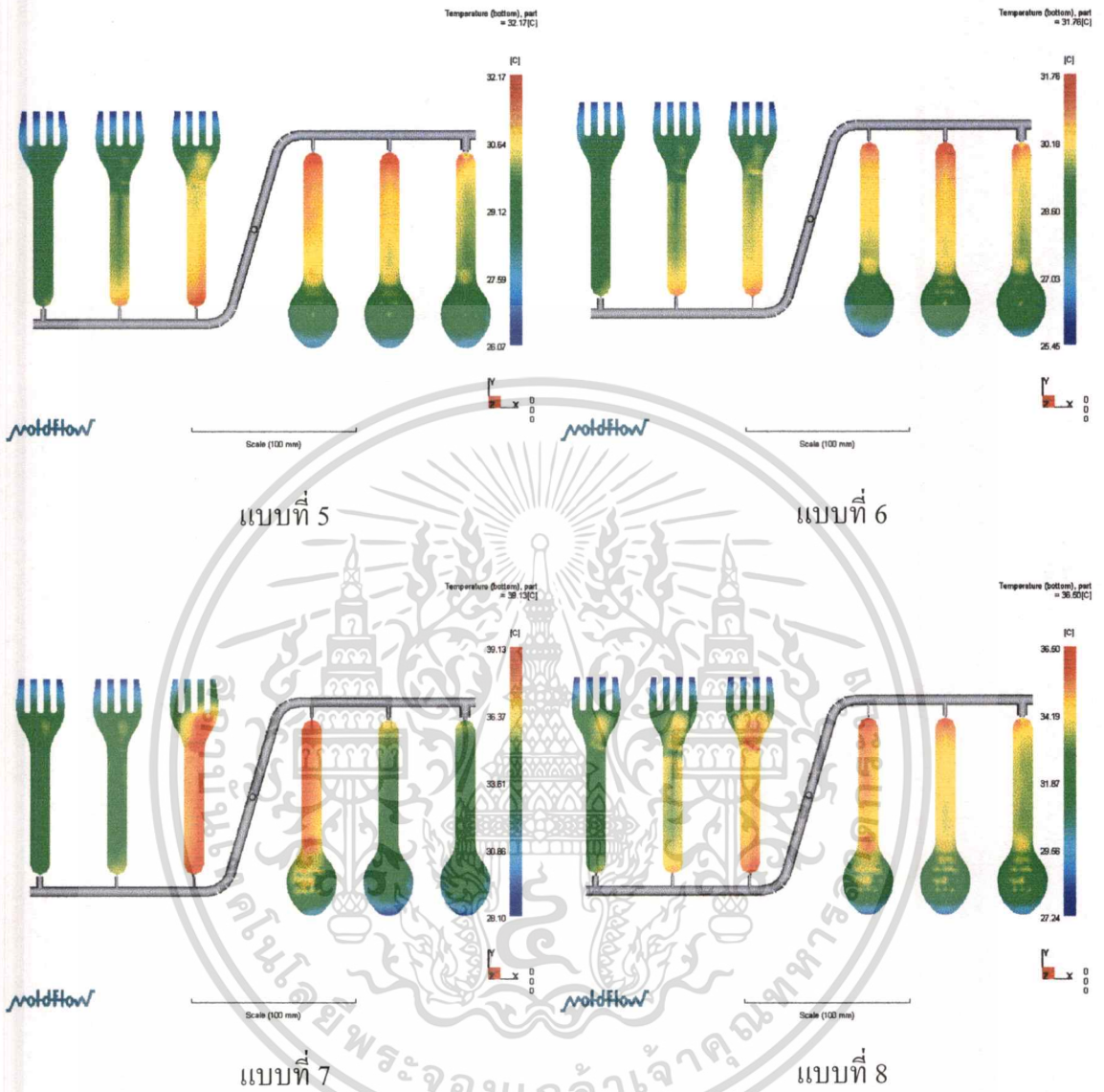
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 ศึกษาและเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน

จากรูปที่ 4.17 พบว่าระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 มีความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานเมื่อเทียบกับแม่พิมพ์ที่ไม่มีระบบหล่อเย็นสูงที่สุดถึงร้อยละ -37.43 และจากค่าที่ได้พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน (ดูตาราง ค-1) และรูปแบบของอุณหภูมิในชิ้นงานก็ให้ผลเหมือนกับอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานเช่นเดียวกับระบบหล่อเย็นแบบที่ 6 และระบบหล่อเย็นแบบที่ 7 เนื่องจากมีวงจรระบบหล่อเย็นที่คล้ายกันทำให้มีความสมดุลในระบบหล่อเย็นชิ้นงาน จึงทำให้มีรูปแบบของอุณหภูมิที่คล้ายกัน ส่วนระบบหล่อเย็นแบบที่ 8 จะเห็นว่ารูปแบบของอุณหภูมิของชิ้นงานมีความใกล้เคียงกันมากกว่าอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน เนื่องจากวงจรระบบหล่อเย็นที่พื้นผิวหลังชิ้นงานมีการกระจายไปทั่วโพรงแบบมากกว่าทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ทั่วถึงมากกว่าเล็กน้อย ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ความแตกต่างอุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ

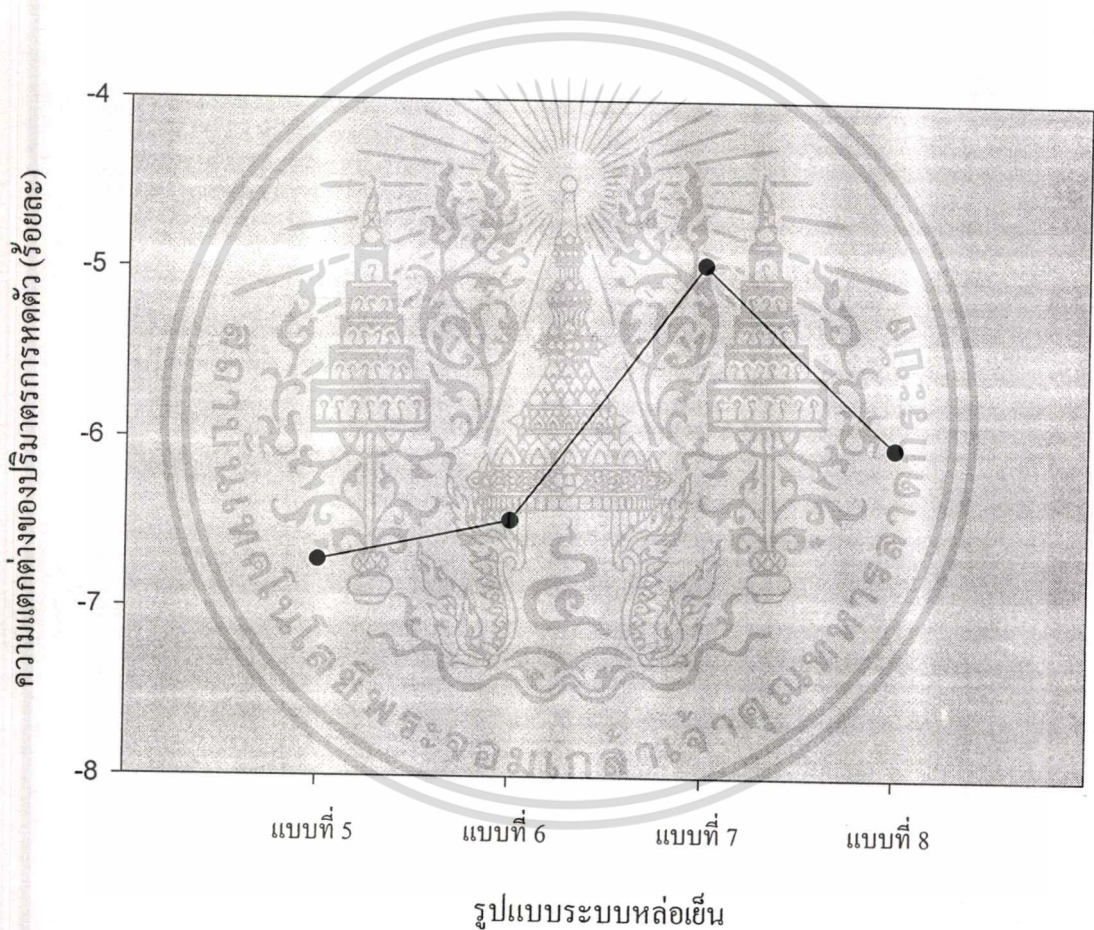


รูปที่ 4.18 อุณหภูมิพื้นผิวหลังใช้งานในระบบหล่อเย็นแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.7 ศึกษาและเปรียบเทียบปริมาตรที่เกิดการหดตัวของชิ้นงาน (Volumetric shrinkage)

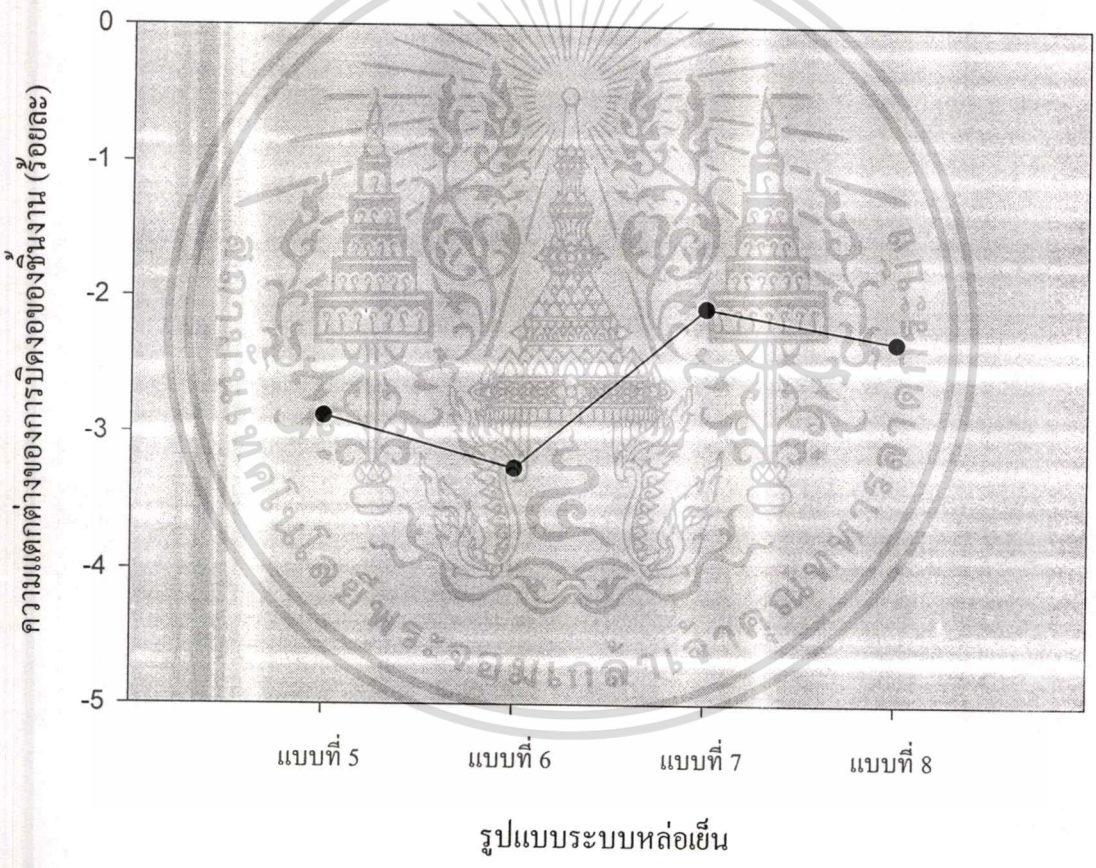
ปริมาตรที่เกิดการหดตัวมีผลทำให้รูปทรงและขนาดของชิ้นงานเปลี่ยนแปลง เนื่องจากพลาสติกเย็นตัวเปลี่ยนสถานะจากของหลอมเหลวไปเป็นของแข็ง ถ้าการหดตัวของชิ้นงานเป็นไปอย่างสม่ำเสมอชิ้นงานนั้นจะไม่เสียรูป [4] จากผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าการเพิ่มระบบหล่อเย็นให้กับแม่พิมพ์ทำให้ปริมาตรการหดตัวของชิ้นงานมีค่าลดลง โดยในระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 มีความแตกต่างของปริมาตรการหดตัวเมื่อเทียบกับแม่พิมพ์ที่ไม่มีระบบหล่อเย็นสูงสุดร้อยละ -6.72 แสดงว่ามีปริมาตรการหดตัวของชิ้นงานน้อยที่สุด เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนได้ดี จึงทำให้ชิ้นงานแข็งตัวได้เร็ว และสอดคล้องกับผลการศึกษาเวลาในการแข็งตัวของชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานแข็งตัวเร็วทำให้เวลาในการหดตัวน้อยลง ส่งผลให้การหดตัวของชิ้นงานน้อยลงด้วย



รูปที่ 4.19 ความแตกต่างปริมาตรที่เกิดการหดตัวของชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่างๆ

4.2.8 ศึกษาและเปรียบเทียบการบิดงของชิ้นงาน (Warpage)

จากผลการวิเคราะห์การบิดงของชิ้นงานดังรูปที่ 4.20 พบว่าการเพิ่มระบบหล่อเย็นให้กับแม่พิมพ์ทำให้การบิดตัวของชิ้นงานมีค่าลดลง ระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 และระบบหล่อเย็นแบบที่ 6 มีการบิดงของชิ้นงานน้อยกว่าในระบบหล่อเย็นแบบที่ 7 และระบบหล่อเย็นแบบที่ 8 เนื่องจากการกระจายตัวของท่อหล่อเย็นอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอทำให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีกว่า และระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 มีค่าการบิดงมากกว่าระบบหล่อเย็นแบบที่ 6 เนื่องจากระบบหล่อเย็นแบบที่ 6 มีระยะห่างระหว่างท่อหล่อเย็นกับโพรงแบบที่มากกว่า ทำให้มีการกระจายตัวของความร้อนได้อย่างสม่ำเสมอมากกว่าระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 ชิ้นงานจึงมีการบิดงที่น้อยกว่า [14] แต่เมื่อคำนึงถึงตัวเลขนัยสำคัญความแตกต่างระหว่างในแบบที่ 5 และแบบที่ 6 มีความแตกต่างน้อยมาก



รูปที่ 4.20 ความแตกต่างของการบิดงของชิ้นงานที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ

จากผลการทดลองที่ 4.2.1 - 4.2.8 พบว่าระบบระบบหล่อเย็นที่ 5 เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้จริงเนื่องจากให้ค่าต่าง ๆ ที่ดี คือช่วยลดเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานร้อยละ 15.10 อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานร้อยละ 37.48 อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานร้อยละ 37.43 ปริมาตรการหดตัวร้อยละ 6.72 และการบิดงอของชิ้นงานร้อยละ 2.88 ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลต่างของค่าที่ได้จากผลการทดลองของแม่พิมพ์ที่ไม่มีระบบหล่อเย็นกับที่มีระบบหล่อเย็นแบบต่าง ๆ

ผลการทดลอง	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8
เวลาที่ใช้ในการเติม (%)	0.00	0.00	0.06	-0.06
ความดันภายในโพรงแบบ (%)	11.13	10.95	8.52	10.16
เวลาที่ใช้ในการแข็งตัว (%)	-15.10	-14.51	-9.56	-11.77
อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน (%)	-37.48	-36.71	-22.94	-28.71
อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน (%)	-37.43	-36.62	-22.91	-28.09
ปริมาตรการหดตัว (%)	-6.72	-6.48	-4.97	-6.04
การบิดงอของชิ้นงาน (%)	-2.88	-3.26	-2.08	-2.33

4.3 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบหล่อเย็นเมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น

ทำการศึกษาและเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อชิ้นงานได้ โดยกำหนดการไหลของน้ำหล่อเย็นเป็นเลขเรย์โนลด์ [21] ทำการวิเคราะห์โดยใช้ระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 และสภาวะดังตารางที่ ก-2 (ภาคผนวก ก)

$$N_{Re} = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (4.1)$$

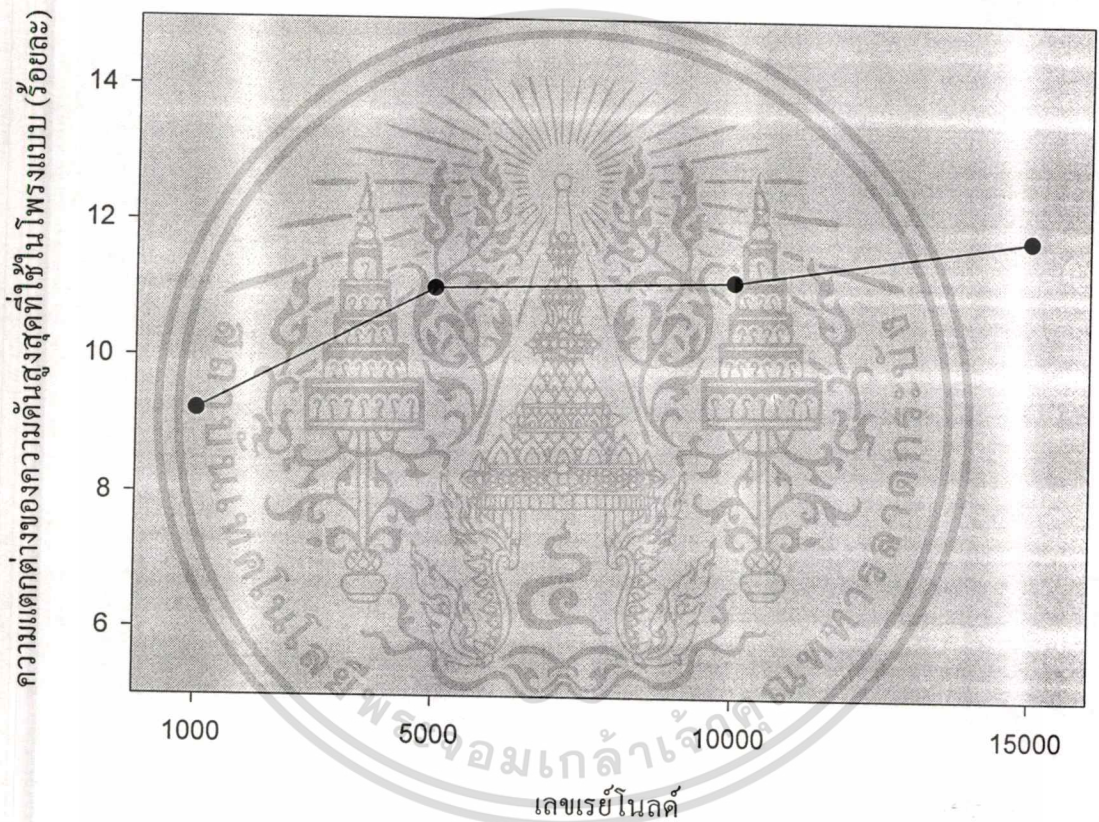
- เมื่อ N_{Re} = เลขเรย์โนลด์
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (cm)
 v = ความเร็วในการไหลของของเหลว (cm/s)
 ρ = ความหนาแน่นของของเหลว (g/cm^3)
 μ = ความหนืดของของเหลว ($g/cm.s$)

ได้ผลดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ศึกษาและเปรียบเทียบความดันภายในโพรงแบบ

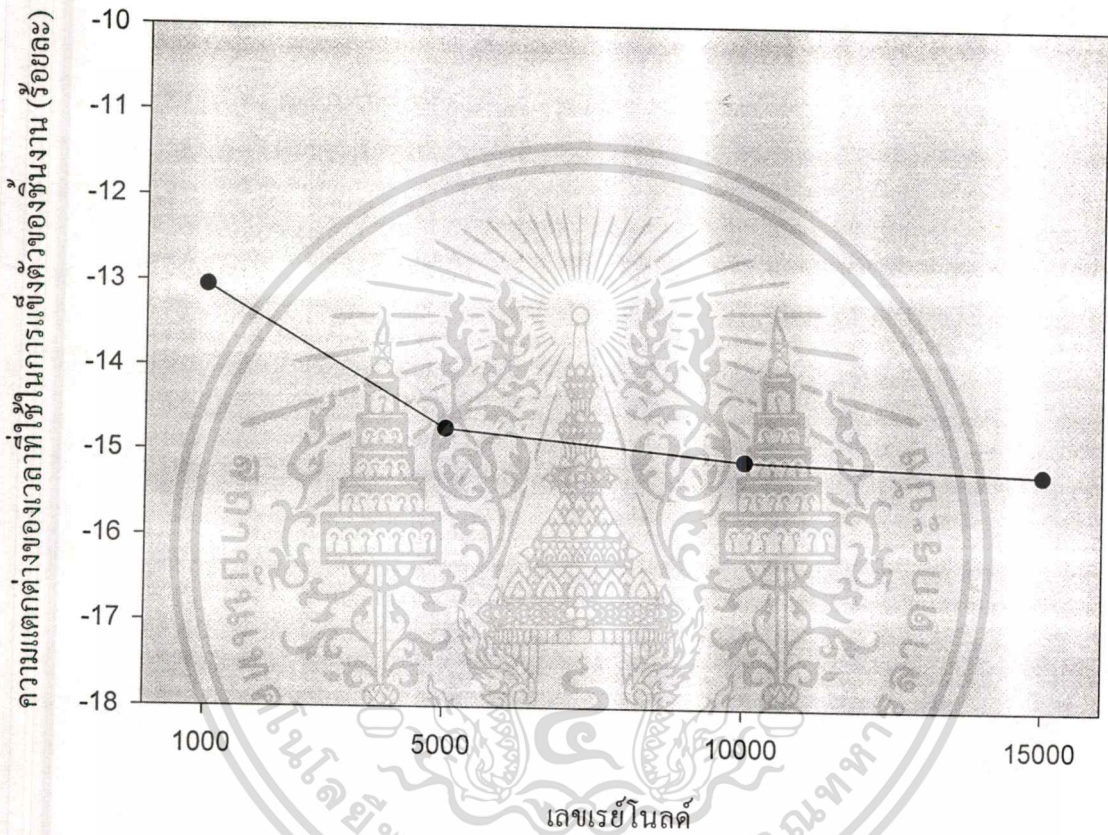
จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นค่าความดันในโพรงแบบที่ได้มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวโพรงแบบต่ำลง เกิด Frozen layer มากขึ้น จึงทำให้ต้องใช้ความดันในการฉีดสูงขึ้น [7] ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.21 (รูปผลการทดลองการจำลองการฉีดคู่ที่ภาคผนวก ข รูป ๗-5 ถึง ๗-8 การคำนวณร้อยละความแตกต่างที่ภาคผนวก ค ตาราง ก-3 และ ก-4)



รูปที่ 4.21 ความแตกต่างของความดันสูงสุดภายในโพรงแบบเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ

4.3.2 ศึกษาและเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการแข่งตัวของชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อเพิ่มเลขเรย์โนลด์ ทำให้เวลาที่ใช้ในการแข่งตัวของชิ้นงานลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานกับน้ำหล่อเย็นดีขึ้น จึงทำให้ใช้เวลาในการแข่งตัวของชิ้นงานชิ้นงานลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ S. R. Natti [12] ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการแข่งตัวของชิ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ

4.3.3 ศึกษาและเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้าและออก

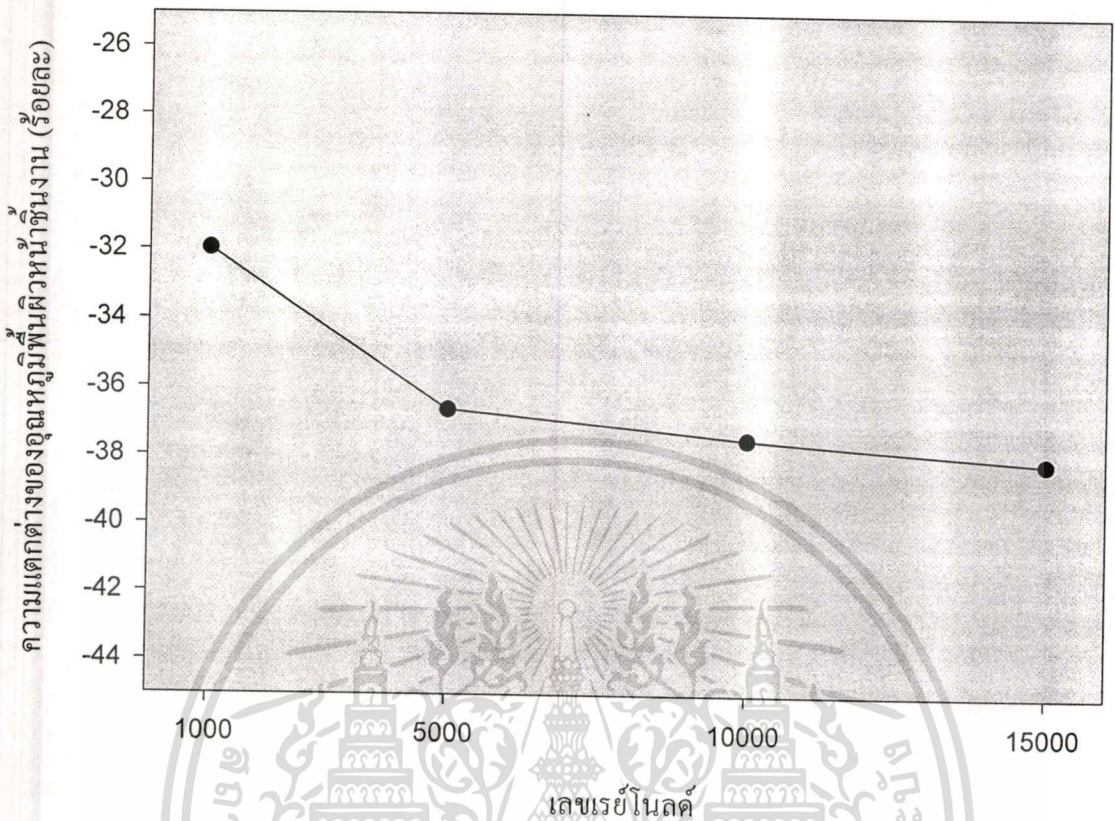
จากการวิเคราะห์อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้าและไหลออกได้ผลดังตารางที่ 4.5 ผลที่ได้พบว่าที่เลขเรย์โนลด์ 1,000 ให้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ออกมาสูงถึง 28.3°C ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเท่ากับ 3.3 เป็นผลมาจากการไหลแบบลามินาร์ (Laminar flow) ของสารหล่อเย็น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนไม่ดี และเมื่อเพิ่มเลขเรย์โนลด์ การไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) พบว่าผลต่างของอุณหภูมิไม่เกิน 2°C ซึ่งยอมรับได้ จากค่าที่ได้จะเห็นว่าเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น ส่งผลให้ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นมีค่าลดลง [7]

ตารางที่ 4.5 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้ากับไหลออกที่เลขเรย์โนลด์ต่าง ๆ

เลขเรย์โนลด์	อุณหภูมิน้ำเข้า ($^{\circ}\text{C}$)		อุณหภูมิน้ำออก ($^{\circ}\text{C}$)	
	วงจร 1	วงจร 2	วงจร 1	วงจร 2
1,000	25.0	25.0	28.3	28.2
5,000	25.0	25.0	26.3	26.2
10,000	25.0	25.0	25.9	25.9
15,000	25.0	25.0	25.6	25.5

4.3.4 ศึกษาและเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน

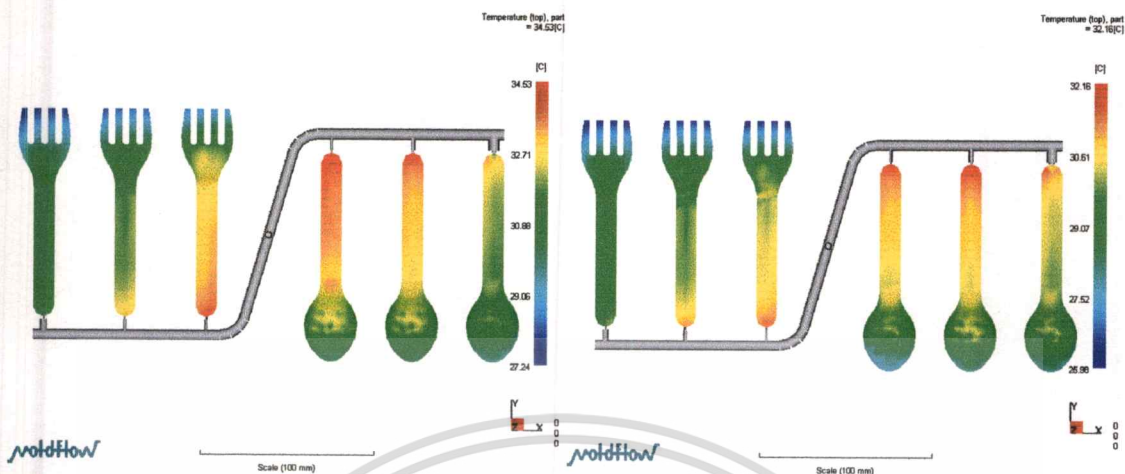
จากผลการวิเคราะห์อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานพบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานมีค่าลดลง เป็นผลเนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่ง ขึ้นจึงทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานลดต่ำลง [7] ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ในข้อ 4.3.3 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.23 และเมื่อพิจารณาถึงรูปแบบของอุณหภูมิในชิ้นงาน พบว่าที่เลขเรย์โนลด์ 1,000 จะมีรูปแบบของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอมากกว่าแบบอื่นเนื่องจากว่าที่เลขเรย์โนลด์ 1,000 การไหลของน้ำหล่อเย็นเป็นแบบลามินาร์ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนไม่ดี ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.23 ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่างๆ

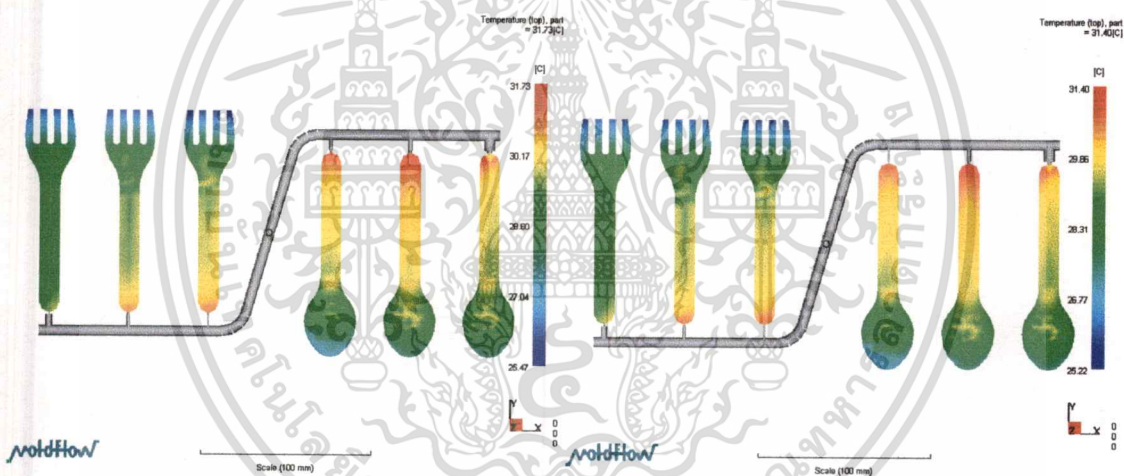
4.3.5 ศึกษาและเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน

จากผลการวิเคราะห์ห่ออุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานพบว่าผลที่ได้มีแนวโน้มเหมือนกับอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานคือ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นอุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานมีค่าลดลงเป็นผลเนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดียิ่งขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิของชิ้นงานลดต่ำลง [7] ซึ่งได้ผลสอดคล้องกับการวิเคราะห์ในข้อ 4.3.4 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.25 และ 4.26



เลขเรย์โนลด์ 1,000

เลขเรย์โนลด์ 5,000

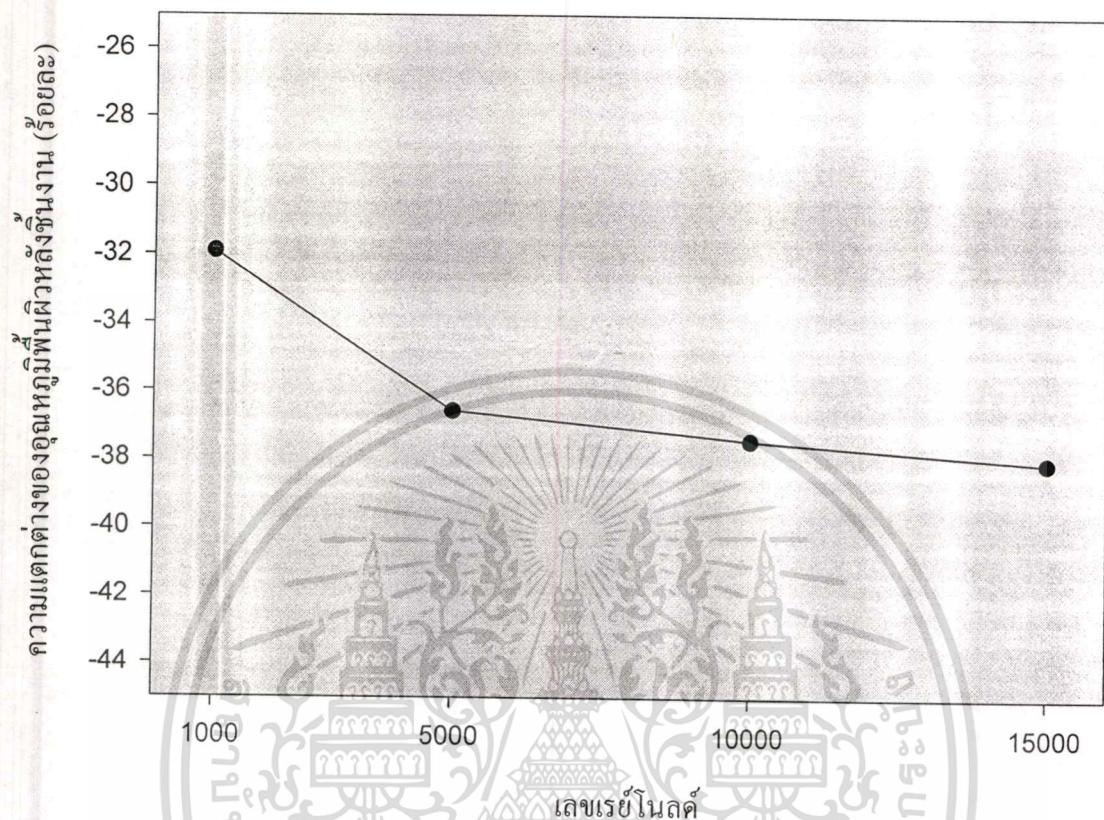


เลขเรย์โนลด์ 10,000

เลขเรย์โนลด์ 15,000

รูปที่ 4.24 อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่างๆ

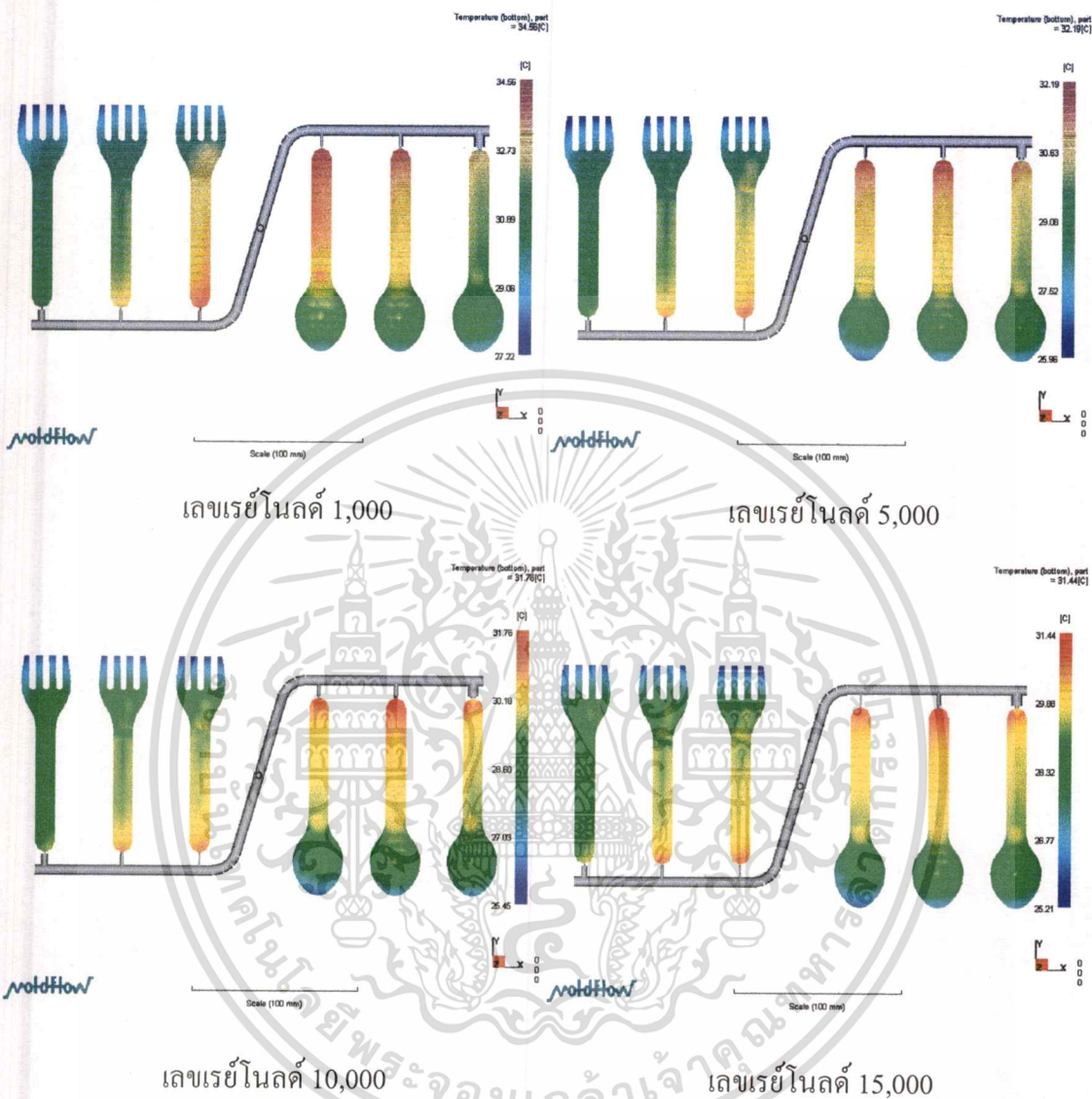
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่างๆ

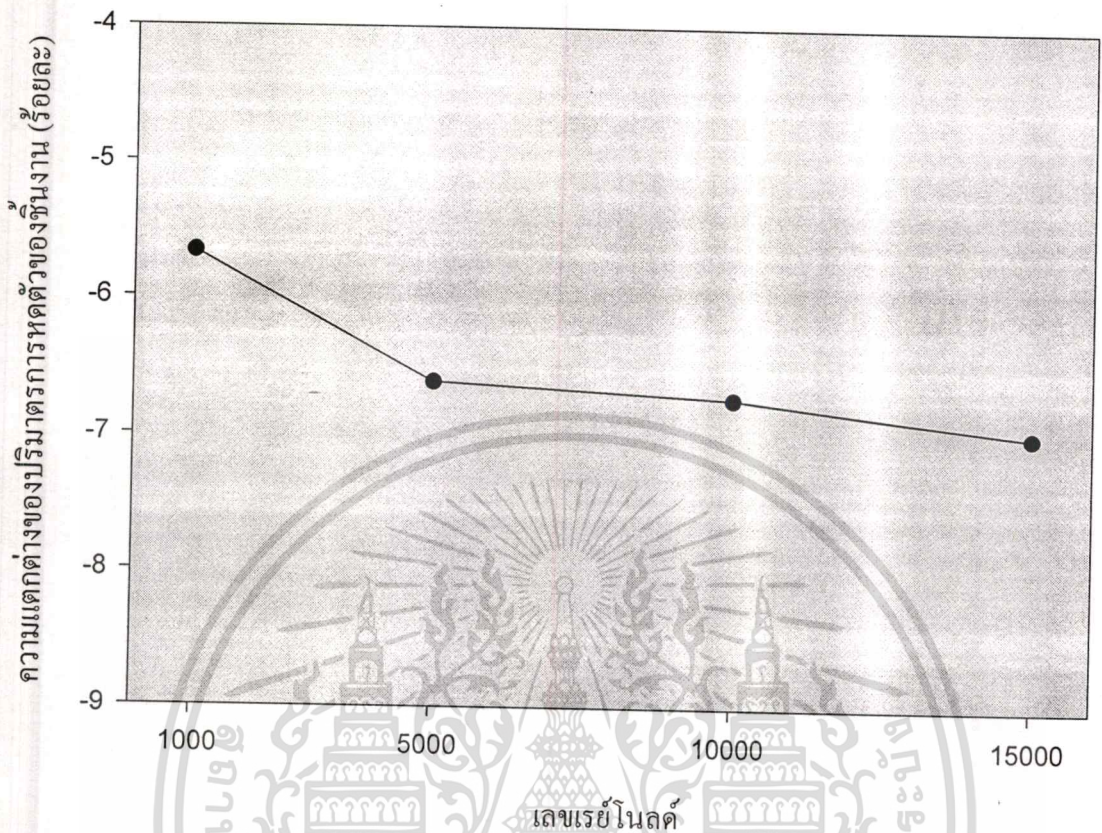
4.3.6 ศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณการหดตัวของชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์ปริมาณการหดตัวของชิ้นงานพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับข้อ 4.3.2-4.3.5 คือเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นทำให้ปริมาณการหดตัวของชิ้นงานลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานลดลง การหดตัวของชิ้นงานจึงลดลงตามด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ C. C. Tao และคณะ [15] แสดงดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 อุณหภูมิพื้นผิวหลังขึ้นงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ

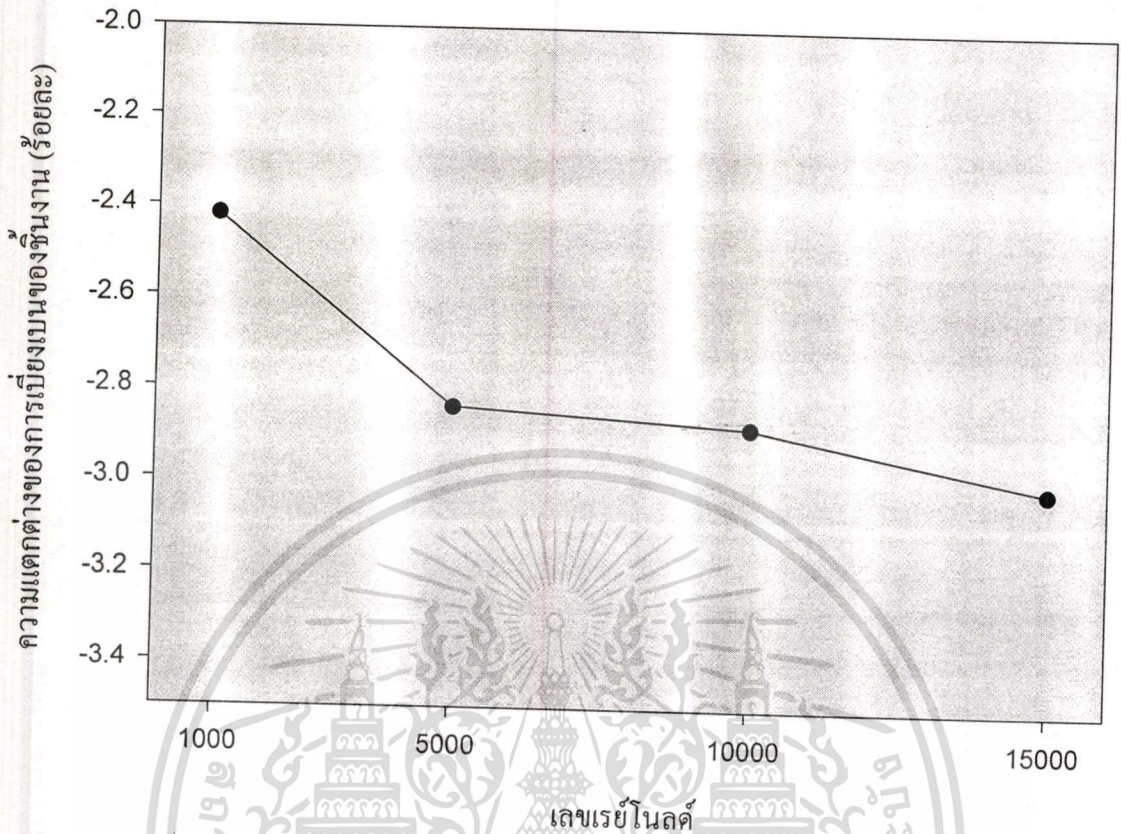
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 ปริมาณการหดตัวของเงินงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่างๆ

4.3.7 ศึกษาและเปรียบเทียบการบิดงอของชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์การบิดงอของชิ้นงานพบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นทำให้ค่าการบิดงอของชิ้นงานลดลง เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น จึงทำให้ชิ้นงานมีการบิดงอลดลง ผลที่ได้สอดคล้องกับการทดลองของ S. L. Andrew [17] ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 การบิดงอของพลังงานเมื่อมีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่างๆ

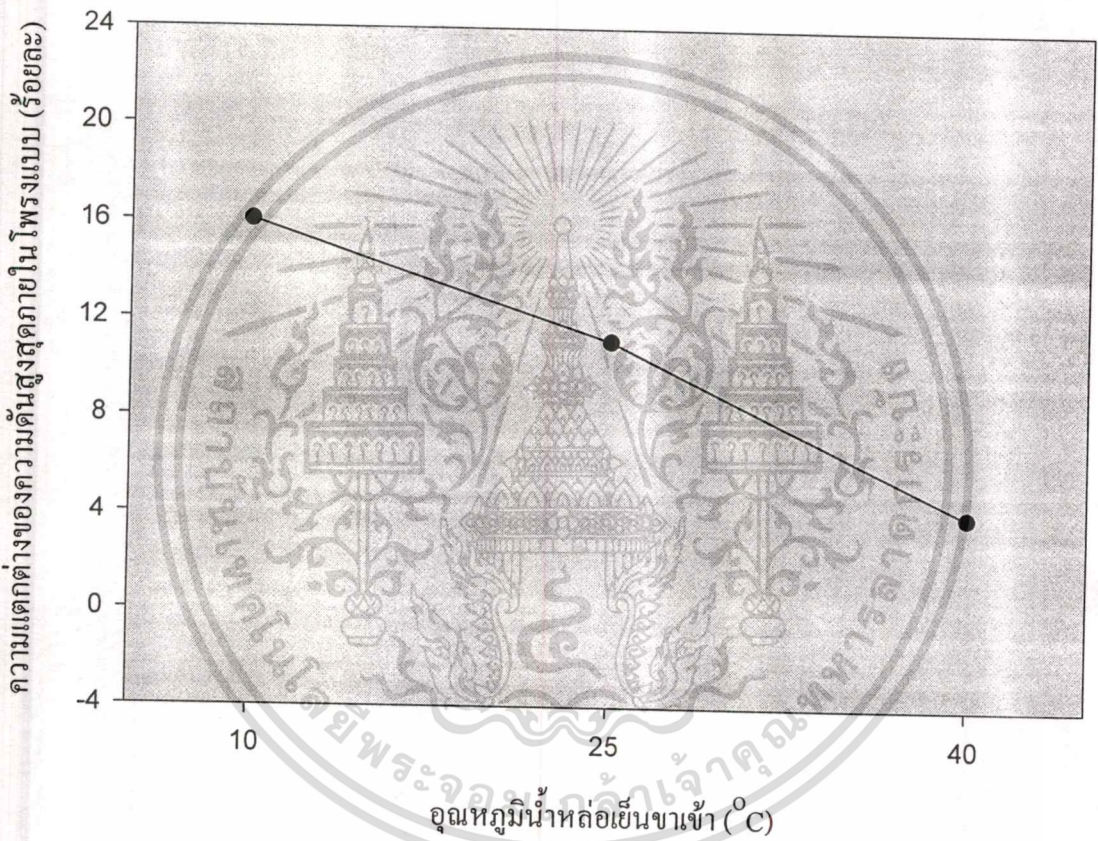
จากผลการทดลองที่ 4.3.1-4.3.7 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและพลังงาน โดยเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นส่งผลให้กระบวนการผลิตใช้ความดันในการฉีดมากขึ้น แต่ใช้เวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานลดลง ส่วนชิ้นงานจะมีปริมาตรการหดตัว และการบิดงอของชิ้นงานลดลง

4.4 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบหล่อเย็นเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็น

ทำการศึกษาและเปรียบเทียบอุณหภูมิขาเข้าของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อชิ้นงาน โดยทำการจำลองกระบวนการฉีดโดยใช้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ 10°C 25°C และ 40°C และใช้ระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 แล้วทำการเปรียบเทียบความดันภายในโพรงแบบ เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงาน อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่เปลี่ยนแปลง อุณหภูมิพื้นผิวชิ้นงาน ปริมาตรการหดตัวของชิ้นงาน และการบิดงอของชิ้นงาน โดยใช้สภาวะดังตารางที่ ก-3 (ภาคผนวก ก) ได้ผลดังนี้

4.4.1 ศึกษาและเปรียบเทียบความดันภายในโพรงแบบ

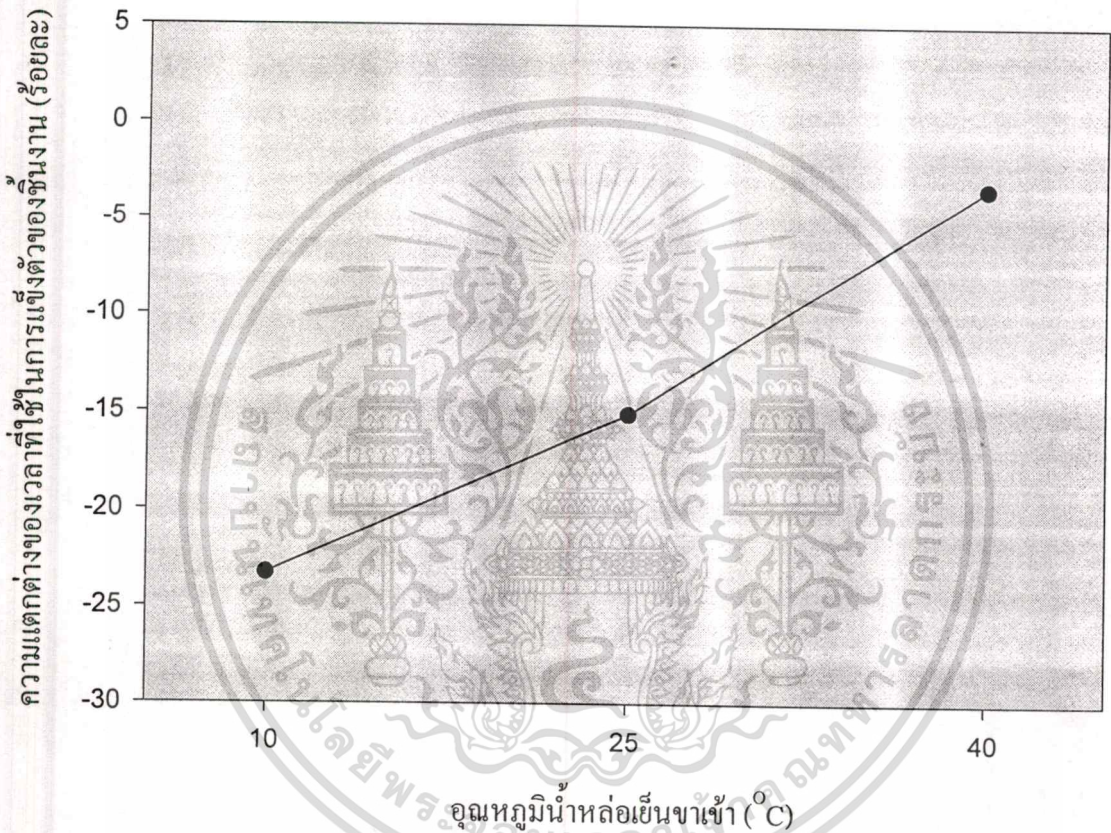
จากการวิเคราะห์ค่าความดันภายในโพรงแบบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้าพบว่าทำการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าทำให้ค่าความดันในโพรงแบบลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิผิวของโพรงแบบสูงขึ้นด้วย ทำให้ฉีดได้ง่ายขึ้น จึงใช้ความดันลดลง [4] ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (รูปผลการทดลองการจำลองการฉีดคู่ที่ภาคผนวก ข รูป ข-9 ถึง ข-11 การคำนวณร้อยละความแตกต่างคู่ที่ภาคผนวก ค ตาราง ค-5 และ ค-6)



รูปที่ 4.29 ความแตกต่างของความดันสูงสุดภายในโพรงแบบเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ

4.4.2 ศึกษาและเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นทำให้ใช้เวลาในการแข็งตัวของชิ้นงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนได้ช้าลง อุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้น จึงทำให้ใช้เวลาในการแข็งตัวสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ S. R. Natti [12] ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ

4.4.3 ศึกษาและเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้าและไหลออก

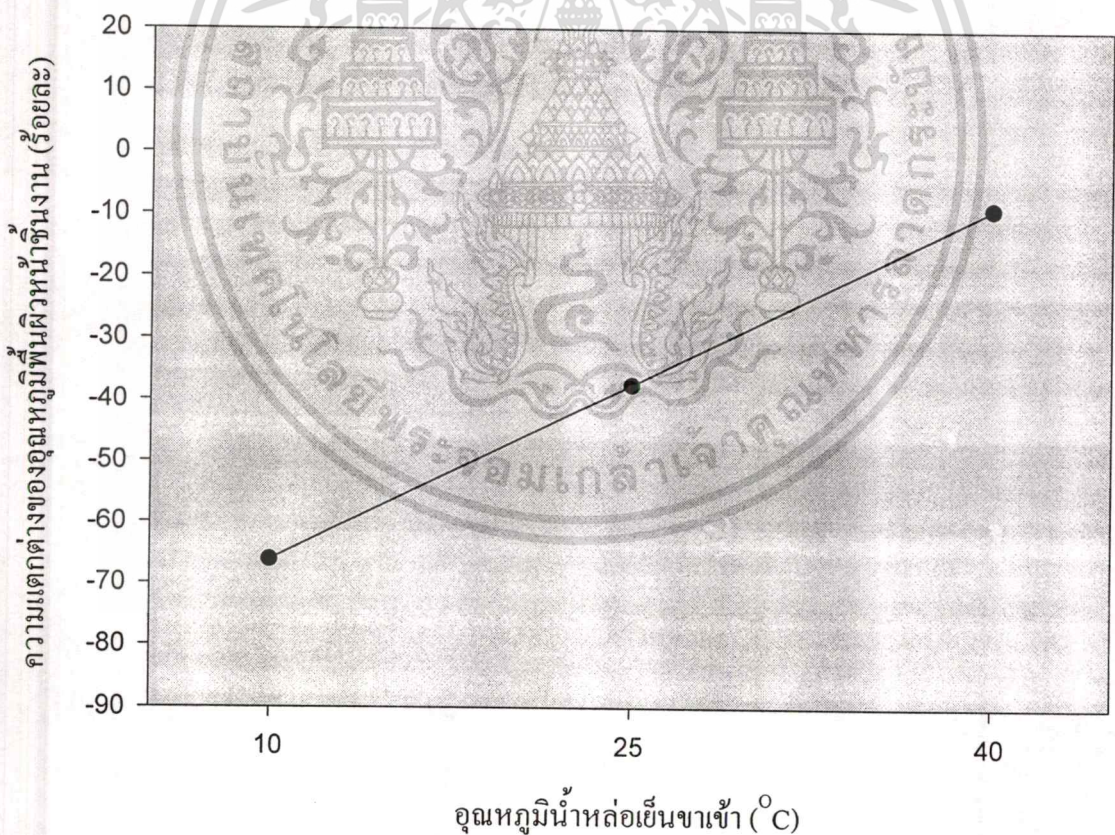
จากการวิเคราะห์อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้าและไหลออกเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้า ได้ผลดังตารางที่ 4.6 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นทำให้ผลต่างของอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นลดลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าให้สูงขึ้น ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนเกิดได้ยากขึ้น ส่งผลให้ผลต่างของอุณหภูมิมิมีค่าลดลง

ตารางที่ 4.6 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ไหลเข้ากับไหลออกที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ

อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิน้ำเข้า ($^{\circ}\text{C}$)		อุณหภูมิน้ำออก ($^{\circ}\text{C}$)	
	วงจร 1	วงจร 2	วงจร 1	วงจร 2
10	10.0	10.0	11.0	10.9
25	25.0	25.0	25.9	25.9
40	40.0	40.0	40.3	40.3

4.4.4 ศึกษาและเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้าพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นทำให้อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานสูงขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นสูงขึ้นการระบายความร้อนทำได้ยากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ยังคงสูงหรือลดต่ำลงไม่มาก ส่งผลให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้นด้วย ผลที่ได้แสดงดังรูป 4.31

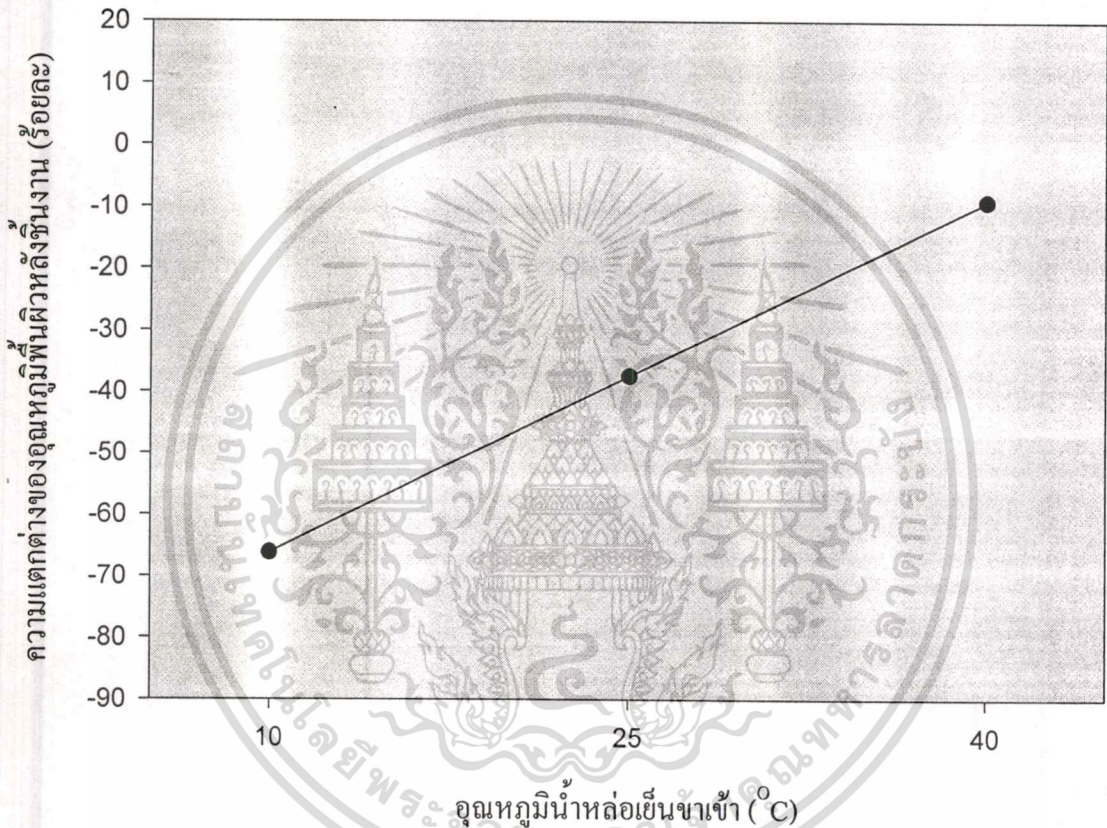


รูปที่ 4.31 ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงานเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ศึกษาและเปรียบเทียบอุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน

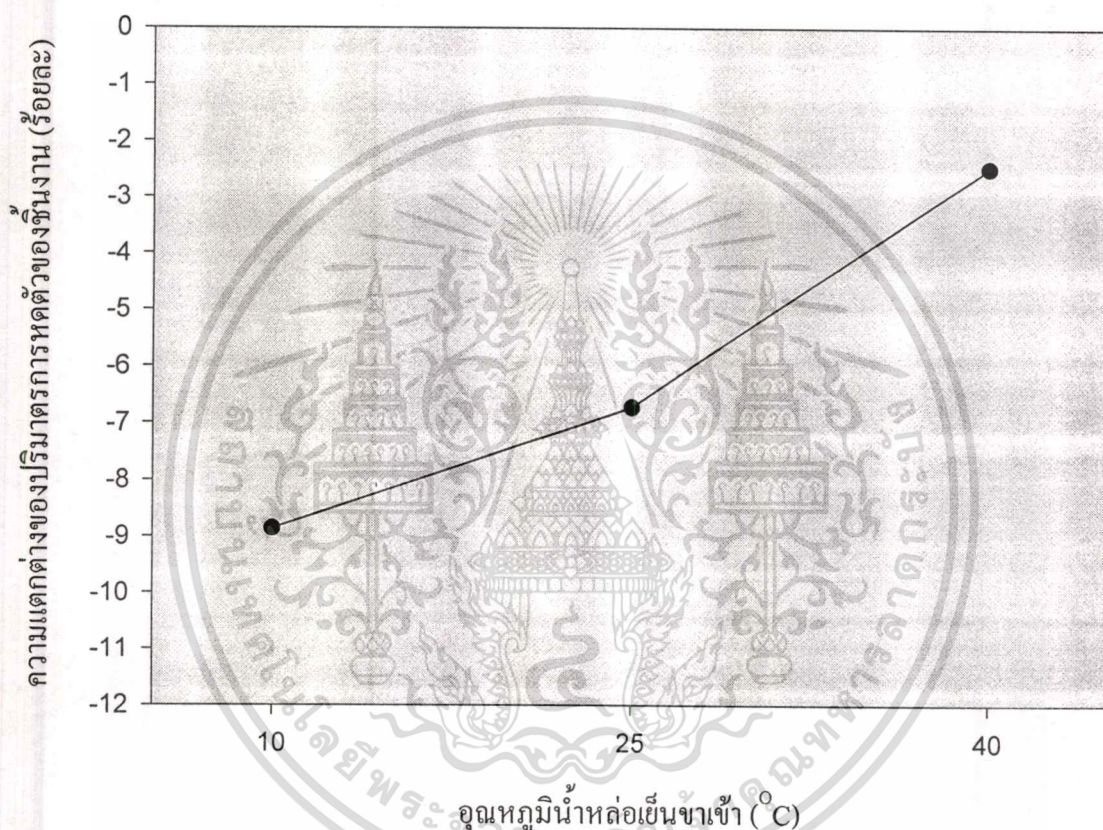
จากการวิเคราะห์อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขา เข้าพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นทำให้อุณหภูมิผิวหลังชิ้นงานสูงขึ้นด้วย เนื่องจากเมื่อ อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นสูงขึ้นการระบายความร้อนทำได้ยากขึ้น ทำให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ยังคง สูงหรือลดต่ำลงไม่มาก ส่งผลให้อุณหภูมิของชิ้นงานสูงขึ้นด้วย ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกับอุณหภูมิพื้น ผิวหน้าชิ้นงาน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงานเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ

4.4.6 ศึกษาและเปรียบเทียบปริมาณการหดตัวของชิ้นงาน

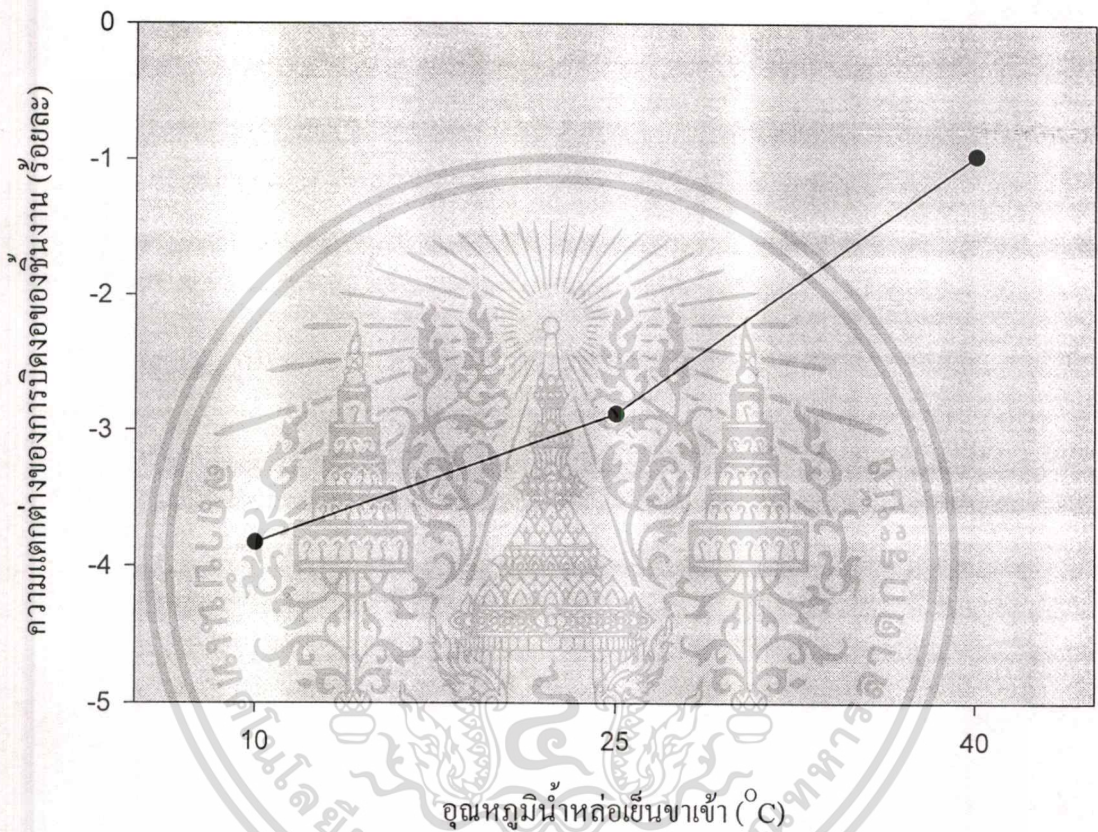
จากการวิเคราะห์ปริมาณการหดตัวของชิ้นงานพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นทำให้ปริมาณการหดตัวเพิ่มขึ้นตาม เนื่องจากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเข้า ทำให้การระบายความร้อนมากขึ้น ทำให้ใช้เวลาในการแข็งตัวนานขึ้น การหดตัวจึงเกิดมากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ C. C. Tao [15] ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 ความแตกต่างของปริมาณการหดตัวของชิ้นงานเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเข้าต่างๆ

4.4.7 ศึกษาและเปรียบเทียบการบิดงอของชิ้นงาน

จากการวิเคราะห์การบิดงอของชิ้นงานพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าทำให้การบิดงอของชิ้นงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นทำให้การถ่ายเทความร้อนไม่ดีพอ ทำให้ใช้เวลาในการแข็งตัวนานขึ้น ส่งผลให้ชิ้นงานมีการบิดงอมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ S. L. Andrew [17] ผลที่ได้แสดงดังรูป 4.34



รูปที่ 4.34 ความแตกต่างของการบิดงอของชิ้นงานเมื่อมีอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเข้าต่างๆ

จากผลการทดลองที่ 4.4.1-4.4.7 สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้ามีผลต่อกระบวนการผลิตและชิ้นงานที่ได้ พบว่าการลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าลงทำให้กระบวนการผลิตต้องใช้เวลาในการฉีดยามากขึ้น แต่รอบในการผลิตลดลง ส่วนชิ้นงานที่ได้จะมีปริมาตรการหดตัวและการบิดงอของชิ้นงานลดลง

4.5 ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบระบบหล่อเย็นเมื่อเปลี่ยนแปลงพอลิเมอร์ที่มีอัตรา การไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (Melt Flow Rate, MFR) ที่แตกต่างกัน

ทำการศึกษาและเปรียบเทียบชิ้นงานที่ได้จากวัสดุพอลิสไตรีนที่มีอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเท่ากับ 2.8 กรัม/10นาทีก 6.0 กรัม/10นาทีก และ 13.0 กรัม/10นาทีก แล้วทำการศึกษาเวลาที่ใช้ในการฉีดและความดันในโพรงแบบ โดยใช้สภาวะดังตารางที่ ก-4 (ภาคผนวก ก)

4.5.1 ศึกษาและเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเติมในโพรงแบบ

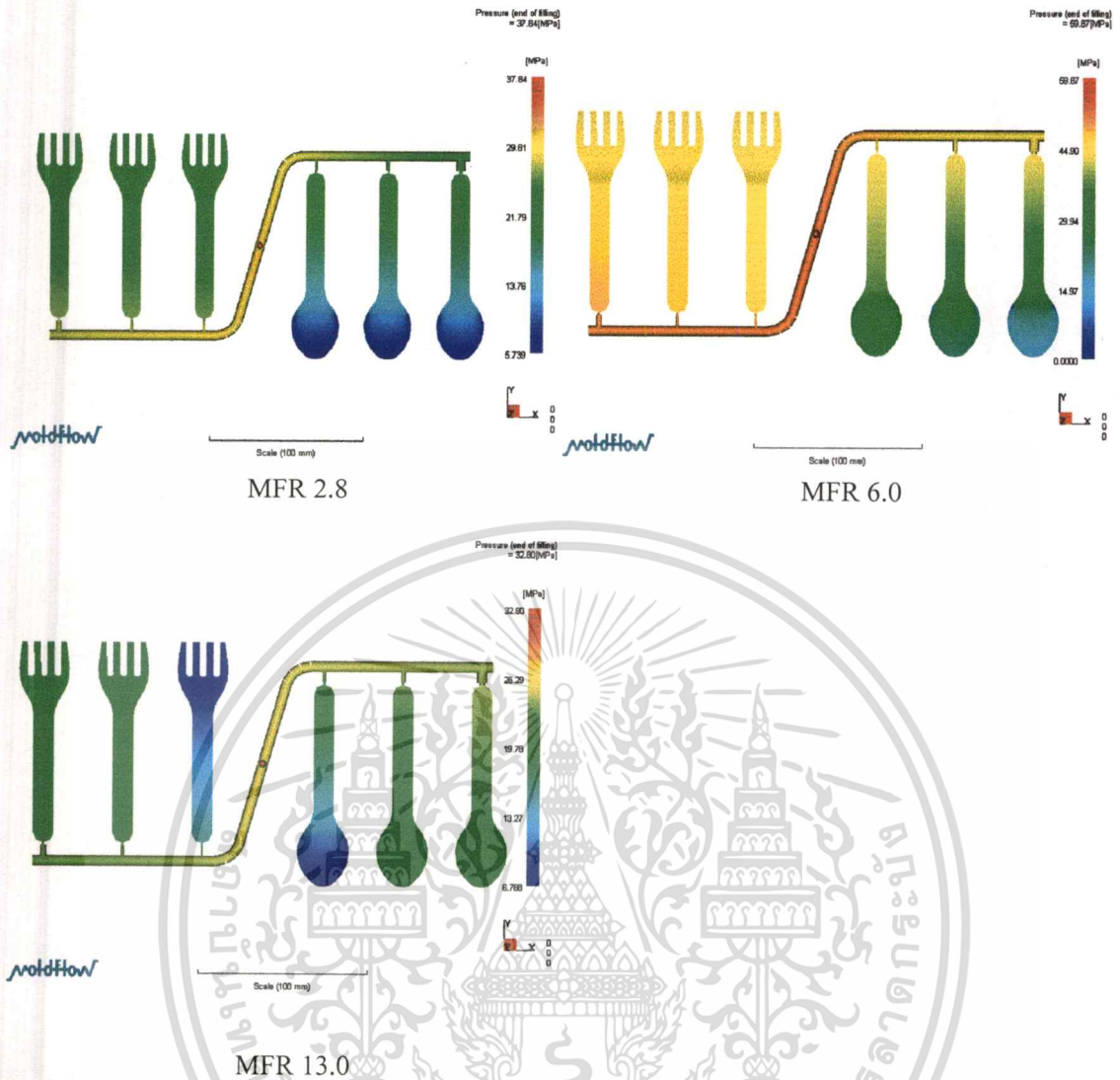
จากตารางที่ 4.7 พบว่าเมื่อ MFR สูงขึ้นทำให้ใช้เวลาในการฉีด (หรือเวลาในการเติม) ลดลงเนื่องจากพอลิเมอร์ไหลได้ง่ายกว่า ส่วนเวลาในการเติมเต็มในจุดสุดท้ายของแต่ละโพรงแบบมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากแม่พิมพ์ที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบให้เหมาะสมสำหรับพอลิสไตรีน MFR 2:8 การเปลี่ยน MFR ทำให้การไหลไปยังแต่ละโพรงแบบไม่เท่ากัน จำเป็นต้องมีการปรับปรุงสภาวะที่ใช้ในการฉีด เช่น ความดัน เวลา เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ชนิดนั้น ๆ

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบผลของอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการเติมในกระบวนการฉีด

ค่าอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (กรัม/10 นาที)	เวลาที่ใช้ในการเติม (s)
2.8	1.73
6.0	1.60
13.0	1.38

4.5.2 ศึกษาและเปรียบเทียบความดันภายในโพรงแบบ

จากการวิเคราะห์ความดันภายในโพรงแบบพบว่าที่ MFR 2.8 มีรูปแบบของความดันในชิ้นงานเหมือนกันทั้งซ็อนและส้อม แต่เมื่อเปลี่ยน MFR พบว่ามีรูปแบบของความดันในชิ้นไม่สมดุคกัน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการเติมเต็มในแต่ละจุดไม่เท่ากัน ดังหัวข้อ 4.5.1 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.35 จากตารางที่ 4.7 พบว่าที่พอลิสไตรีนที่มี MFR 6.0 มีค่าความดันภายในโพรงแบบสูงสุด ทั้งที่ตามความเป็นจริงแล้วเมื่อ MFR สูงขึ้นความดันที่ใช้ในการฉีดควรลดลง ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าแม่พิมพ์นี้ได้ถูกออกแบบให้เหมาะสมสำหรับพอลิสไตรีน MFR 2.8 ดังนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในการฉีดทำให้เวลาที่ใช้ในการเติมเต็มในจุดสุดท้ายในแต่ละโพรงแบบไม่เท่ากัน ในส่วนที่เกิดการเติมเต็มก่อนก็จะเกิดการอัดตัวจึงทำให้ความดันที่ใช้ฉีดสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนวัสดุที่ฉีดจึงต้องทำการปรับเปลี่ยนสภาวะที่ใช้ในการฉีดเพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ



รูปที่ 4.35 ความดันภายใน โพรงแบบที่มี MFR ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบผลของอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีผลต่อความดันภายใน โพรงแบบในกระบวนการฉีด

ค่าอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (กรัม/10 นาที)	ความดันภายในโพรงแบบ (MPa)
2.8	37.8
6.0	59.9
13.0	32.8

จากผลการทดลอง 4.5.1-4.5.2 พบว่าแม่พิมพ์ที่ออกแบบเพื่อทำการฉีดวัสดุหนึ่ง ๆ แล้ว เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงวัสดุที่ใช้ในการฉีดทำให้ได้สถานะในการฉีดไม่เหมาะสม จำเป็นต้องทำการปรับเปลี่ยนสถานะที่ใช้ในการฉีดใหม่ เช่น ความดันที่ใช้ในการฉีด เพื่อให้เหมาะสมต่อวัสดุนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 เปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นที่ได้จากโปรแกรมกับการคำนวณ
จากสมการที่ 4.2 หาค่าเวลาในการหล่อเย็น (t_k) ได้ดังนี้ [12]

$$t_k = \frac{d^2}{\pi^2 a_{eff}} \times \ln \left[\frac{8}{\pi} \times \frac{T_m - T_M}{T_E - T_M} \right] \quad (4.2)$$

- เมื่อ t_k = เวลาในการหล่อเย็น (s)
 d = ความหนาชิ้นงาน (mm)
 a_{eff} = สัมประสิทธิ์ในการนำความร้อนของพลาสติก (mm^2/s)

$$a_{eff} = \frac{k_m}{\rho_m C_{pm}} \quad (4.3)$$

- k_m = ค่าการนำความร้อนของของเหลว ($\text{J/s.m}^\circ\text{C}$)
 ρ_m = ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
 C_{pm} = ความร้อนจำเพาะของของเหลว ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)
 T_M = อุณหภูมิของแม่พิมพ์ ($^\circ\text{C}$)
 T_m = อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก ($^\circ\text{C}$)
 T_E = อุณหภูมิที่ปลดชิ้นงาน ($^\circ\text{C}$)

หาค่า a_{eff} โดยแทนค่าต่างๆ ที่ได้มาจากฐานข้อมูลของพอลิสไตรีน MFR 2.8 ในโปรแกรม Moldflow® ดังนี้

$$k_m = 1.47 \times 10^{-4} \text{ J/s.mm}^\circ\text{C} \quad \rho_m = 9.5381 \times 10^{-7} \text{ kg/mm}^3 \quad C_{pm} = 2034 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$\text{ได้ค่า } a_{eff} = 0.07577 \text{ mm}^2/\text{s}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆดังนี้ d = ความหนาของชิ้นงานเท่ากับ 2 mm

$$a_{eff} = 0.07577 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$T_M = \text{อุณหภูมิแม่พิมพ์เท่ากับ } 45^\circ\text{C}$$

$$T_m = \text{อุณหภูมิหลอมเหลวเท่ากับ } 230^\circ\text{C}$$

$$T_E = \text{อุณหภูมิที่ปลดชิ้นงานเท่ากับ } 99^\circ\text{C}$$

ได้เวลาในการหล่อเย็น (t_k) = 11.59 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นที่ดีที่สุดที่ได้จากโปรแกรมคือ 9.95 วินาที มีความแตกต่างกับที่คำนวณได้ร้อยละ -14.15 (จากสมการ (3.3)) ซึ่งหมายถึงว่าเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นที่ได้จากโปรแกรมใช้เวลาน้อยกว่าสูตรในการคำนวณร้อยละ 14.15 เนื่องจากในสูตรการคำนวณนั้นได้ทำการคำนวณค่าสูงสุดที่ไม่ควรเกินไว้ และไม่ได้คำนึงถึงในส่วนของระบบการหล่อเย็นและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ซึ่งจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ทำให้ได้เวลาในการหล่อเย็นมากกว่าที่ได้จากโปรแกรม เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่มีระบบหล่อเย็นเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นเท่ากับ 11.72 วินาที ซึ่งจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน

4.7 เปรียบเทียบสถานะที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปจริง

จากการทดสอบการฉีดขึ้นรูปด้วยพอลิสไตรีนที่มี MFR 2.8 กรัม/10 นาที โดยใช้ระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 สถานะการจำลองการฉีดตามตารางที่ ก-1 ได้ทำการเปรียบเทียบสถานะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปจริงกับที่ได้จากการคำนวณดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 สถานะที่ใช้ในการฉีดขึ้นรูปจริงกับการคำนวณ

ตัวแปร	ค่าที่ได้จากการฉีดขึ้นรูปจริง	ค่าที่ได้จากการจำลองการฉีด	ร้อยละความแตกต่าง
อุณหภูมิหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	230.00	230.00	0.00
อุณหภูมิแม่พิมพ์ ($^{\circ}\text{C}$)	45.00	45.00	0.00
เวลาที่ใช้ในการฉีด (s)	2.00	1.73	15.60
ความดันที่ใช้ในการฉีด (MPa)	40.00	37.84	5.71
แรงที่ใช้ปิดแม่พิมพ์ (Ton)	150.00	32.54	360.97
ปริมาตรชิ้นงานรวม (cm^3)	29.14	30.56	-4.65

จากผลที่ได้พบว่าแรงที่ใช้ปิดแม่พิมพ์มีค่าร้อยละความแตกต่างมาก เนื่องจากในการฉีดขึ้นรูปจริงต้องใช้แรงปิดแม่พิมพ์สูงเพื่อป้องกันการฝอยของแม่พิมพ์ รวมทั้งประสิทธิภาพของเครื่องฉีดแต่ละเครื่องไม่เหมือนกัน ทำให้ค่าที่ได้มีความแตกต่างเกิดขึ้น ส่วนค่าเวลาที่ใช้ในการฉีดและความดันที่ใช้ในการฉีดมีร้อยละความแตกต่างไม่มากนัก เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนสถานะในการฉีดได้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองการออกแบบแม่พิมพ์และระบบการหล่อเย็นของแม่พิมพ์สำหรับกระบวนการฉีดขึ้นรูปสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ระบบหล่อเย็น

รูปแบบระบบหล่อเย็นที่ดีควรมีการกระจายตัวของท่อหล่อเย็นอย่างสม่ำเสมอไปทั่วแม่พิมพ์ เพื่อให้มีการถ่ายเทความร้อนได้อย่างทั่วถึง และระยะห่างระหว่างท่อหล่อเย็นกับผิวของโปรรงแบบยิ่งน้อยทำให้มีการถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น

5.1.2 อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น

การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นมีผลกระทบต่อสถานะในการฉีดขึ้นรูปและชิ้นงาน โดยการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นมีผลทำให้ชิ้นงานมีคุณภาพดีขึ้น คือมีปริมาตรการหดตัวและการบิดงอของชิ้นงานลดลง เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานลดลง แต่จะต้องใช้ความดันเพิ่มขึ้น

5.1.3 อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น

อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นมีผลต่อสถานะในการฉีดขึ้นรูปและชิ้นงาน โดยเมื่อใช้อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ลดลงทำให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น คือมีปริมาตรการหดตัวและการบิดงอของชิ้นงานลดลง เวลาที่ใช้ในการแข็งตัวของชิ้นงานลดลง แต่ความดันที่ใช้ในการฉีดสูงขึ้น

5.1.4 อัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (MFR)

MFR มีผลต่อกระบวนการผลิต เมื่อทำการเปลี่ยน MFR จาก 2.8 เป็น 6.0 และ 13.0 ทำให้สถานะในการฉีดไม่เหมาะสม เนื่องจากแม่พิมพ์หนึ่ง ๆ ได้ถูกออกแบบให้เหมาะสมกับวัสดุชนิดหนึ่ง ๆ เท่านั้น ซึ่ง MFR ที่เหมาะสมสำหรับแม่พิมพ์นี้คือ MFR 2.8

5.1.5 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นที่ได้จากโปรแกรมกับสูตรการคำนวณ

เวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นที่ได้จากโปรแกรมจะน้อยกว่าที่ได้จากสูตรการคำนวณอยู่ร้อยละ 14.15 เนื่องจากในสูตรการคำนวณนั้นได้ทำการคำนวณค่าสูงสุดที่ไม่ควรเกินไว้ และไม่ได้คำนึงถึงในส่วนขอระบบการหล่อเย็นและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ซึ่งจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ทำให้ได้เวลาในการหล่อเย็นมากกว่าที่ได้จากโปรแกรม เพราะเมื่อเปรียบเทียบกันที่ไม่มีระบบหล่อเย็นเวลาที่ใช้ในการหล่อเย็นเท่ากับ 11.72 วินาที ซึ่งจะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาระบบหล่อเย็นของชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่มองเห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของค่าต่างๆ ได้ชัดเจนมากขึ้น

5.2.2 ศึกษาระบบหล่อเย็นของชิ้นงานที่มีรูปแบบซับซ้อนเพื่อที่ให้เห็นถึงผลของรูปแบบระบบหล่อเย็นอย่างชัดเจนมากขึ้น



เอกสารอ้างอิง

1. K. Peter. **Flow Analysis Reference Manual**. Moldflow Pty.Ltd. 1993.
2. ชาตรี ตระการกุล การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด 1 พิมพ์ครั้งที่ 5 กรุงเทพฯ : ประชาชนจำกัด 2538.
3. พสุ โลหารชุน และคณะ เทคโนโลยีพลาสติก กรุงเทพฯ : ภาพพิมพ์ 2534.
4. Moldflow **Moldflow Training Manual**. 1997.
5. บรรเลง ศรีนิล เทคโนโลยีพลาสติก พิมพ์ครั้งที่ 12 กรุงเทพฯ : ประชาชนจำกัด 2540.
6. วิโรจน์ เศษะวิญญูธรรม งานฉีดพลาสติก กรุงเทพฯ : เม็ดทราย พรินต์ติ้ง 2540.
7. พสุ โลหารชุน และคณะ เทคโนโลยีแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก และการออกแบบเชิงวิเคราะห์ กรุงเทพฯ : ภาพพิมพ์ 2534.
8. พสุ โลหารชุน และคณะ การออกแบบการสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติก สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม 2531.
9. ปราโมชย์ เศษะอำไพ ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2534.
10. N. Shijun. "An Accurate Warpage Prediction for Injection Molded Part by Using Simulation Program." **SPE ANTEC Tech**. 1999.
11. A. K. Lavio and P. Z. Gilberto. "Injection Mold's Problems Solved by CAE Analysis." **SPE ANTEC Tech**. 1999.
12. S. R. Natti, S. Guenter, R. S. Nick and T. O. Keith. "Optimization of Cooling Systems in Injection Molds by an Easily Applicable Analytical Model." **SPE ANTEC Tech**. 2000.
13. N. Shijun. "Preventing Sink Mark of Injection Molded Parts Using CAE Analysis." **SPE ANTEC Tech**. 2000.
14. R. Y. Chang and S. H. Huang. "A Novel Computer Simulation Technology for the Cooling Analysis of Complex Injection Molded Parts" **SPE ANTEC Tech**. 2000.
15. C. C. Tao and F. Ernest. "A Study of the Effects of Process Conditions on the Shrinkage of Plastic Parts in Injection Molding by the Taguchi Method" **SPE ANTEC Tech**. 2000.
16. K. Hiroshi and S. Hiroshi. "Autonomous Arrangement of Cooling Channels Layout in Injection Molding" **SPE ANTEC Tech**. 2000.
17. S. L. Andrew and J. L. Corey. "The Effects of Pulse Cooling on the Molding Cycle and Part Variation" **SPE ANTEC Tech**. 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18. ชัชวาล โลหิตวิเศษ และ อนุรัตน์ บัวอุไร “การออกแบบแม่พิมพ์ที่มีหลายโพรงแบบสำหรับการอัดแบบชนิดฉีด” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542.
19. อำนาจ แสงสมาน เทคโนโลยี CAD/CAM สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยีไทยญี่ปุ่น 2543.
20. กัญจนา บุญเกียรติ การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2536.
21. L. M. Warren, C. S. Julian and H. Peter. **Unit Operation of Chemical Engineering**. 6th ed. Singapore : McGraw-Hill, Inc. 2000.
22. M. H. David. **Basic Principles and Calculation in Chemical Engineering**. 6th ed. Prentice-Hall International, Inc. 1996.
23. M. L. Berins. **Plastics Engineering Handbook**. New York : Chapman & Hall. 1991.
24. D. V. Rosato. **Plastics Processing Data Handbook**. London : Chapman & Hall. 1990.
25. J. S. Walker and E. R. Martin. **Injection Moulding of Plastics**. London. 1966.
26. B. D. Joseph. **Injection Molds and Molding**. New York : Van Nostrand Reinhold Company. 1979.
27. J. H. Dubois and W. I. Pribble. **Plastics Mold Engineering Handbook**. 4th ed. New York : Pribble Plastics Productis, Inc. 1987.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. สภาวะที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูป

ตาราง ก-1 สภาวะที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปในรูปแบบระบบหล่อเย็นต่าง ๆ

สภาวะการทดลอง	ค่าที่ใช้
วัสดุ	พอลิสไตรีน MFR 2.8
เวลาที่ใช้ในการฉีด (s)	อัตโนมัติ
ความดันที่ใช้ในการฉีด (MPa)	อัตโนมัติ
อุณหภูมิแม่พิมพ์ ($^{\circ}\text{C}$)	45
อุณหภูมิการหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	230
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้า ($^{\circ}\text{C}$)	25
เลขเรย์โนลด์	10,000
เวลาที่ใช้ในระบบหล่อเย็น (s)	อัตโนมัติ
อุณหภูมิที่ปลดชิ้นงาน ($^{\circ}\text{C}$)	99
เวลาที่เปิดแม่พิมพ์ (s)	5

ตาราง ก-2 สภาวะที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปในอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ โดยใช้รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5

สภาวะการทดลอง	ค่าที่ใช้
วัสดุ	พอลิสไตรีน MFR 2.8
เวลาที่ใช้ในการฉีด (s)	1.73
ความดันที่ใช้ในการฉีด (MPa)	อัตโนมัติ
อุณหภูมิแม่พิมพ์ ($^{\circ}\text{C}$)	45
อุณหภูมิการหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	230
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ($^{\circ}\text{C}$)	25
เวลาที่ใช้ในระบบหล่อเย็น (s)	อัตโนมัติ
อุณหภูมิที่ปลดชิ้นงาน ($^{\circ}\text{C}$)	99
เวลาที่เปิดแม่พิมพ์ (s)	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ก-3 สภาวะที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปในอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ โดยใช้รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5

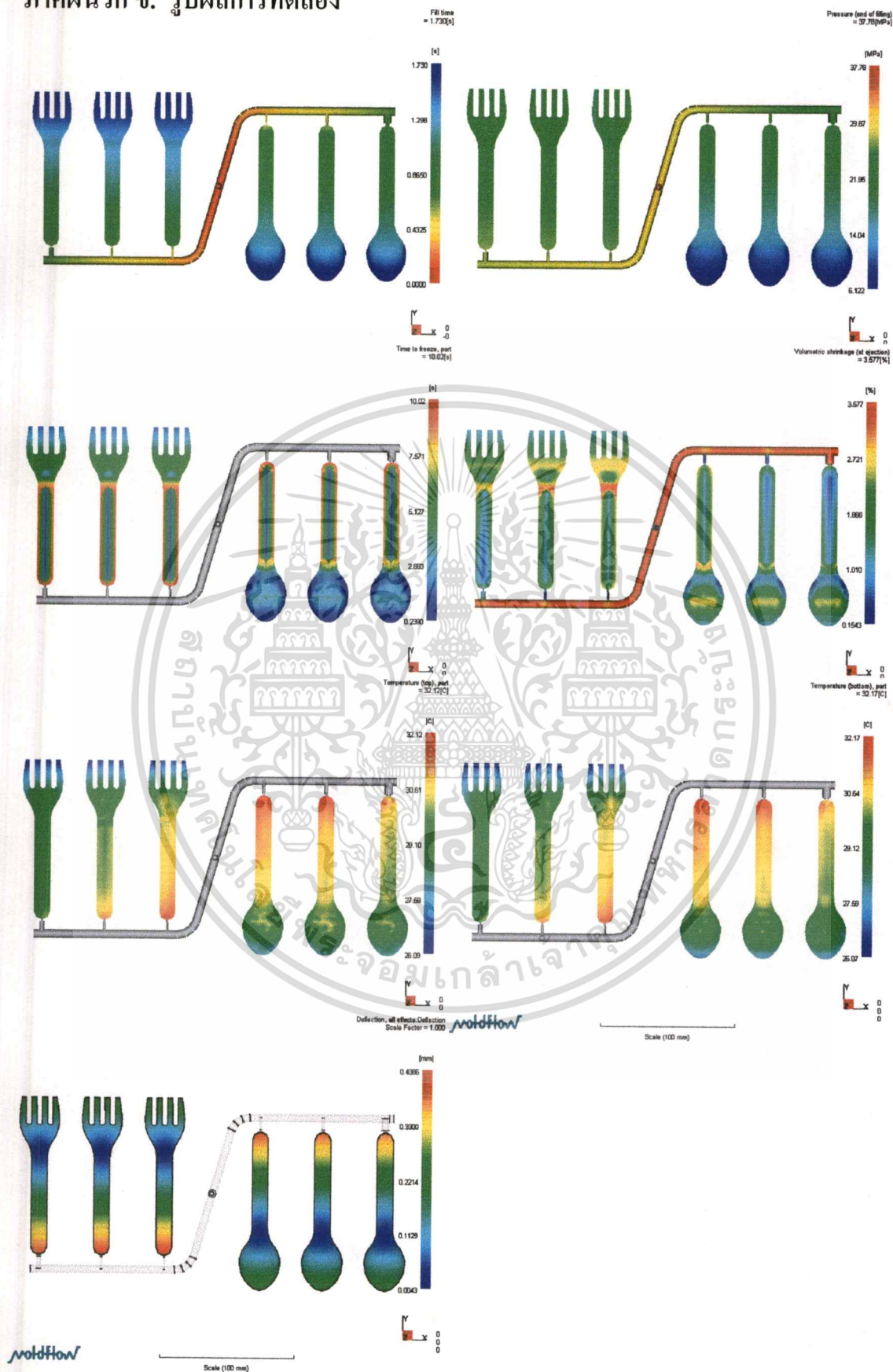
สภาวะการทดลอง	ค่าที่ใช้
วัสดุ	พอลิสไตรีน MFR 2.8
เวลาที่ใช้ในการฉีด (s)	1.73
ความดันที่ใช้ในการฉีด (MPa)	อัด โนมัต
อุณหภูมิแม่พิมพ์ ($^{\circ}\text{C}$)	45
อุณหภูมิการหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	230
เลขเรย์โนลด์	10,000
เวลาที่ใช้ในระบบหล่อเย็น (s)	อัด โนมัต
อุณหภูมิที่ปลดชิ้นงาน ($^{\circ}\text{C}$)	99
เวลาที่เปิดแม่พิมพ์ (s)	5

ตาราง ก-4 สภาวะที่ใช้ในการจำลองการฉีดขึ้นรูปในอัตราการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว (MFR) ต่าง ๆ โดยใช้รูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5

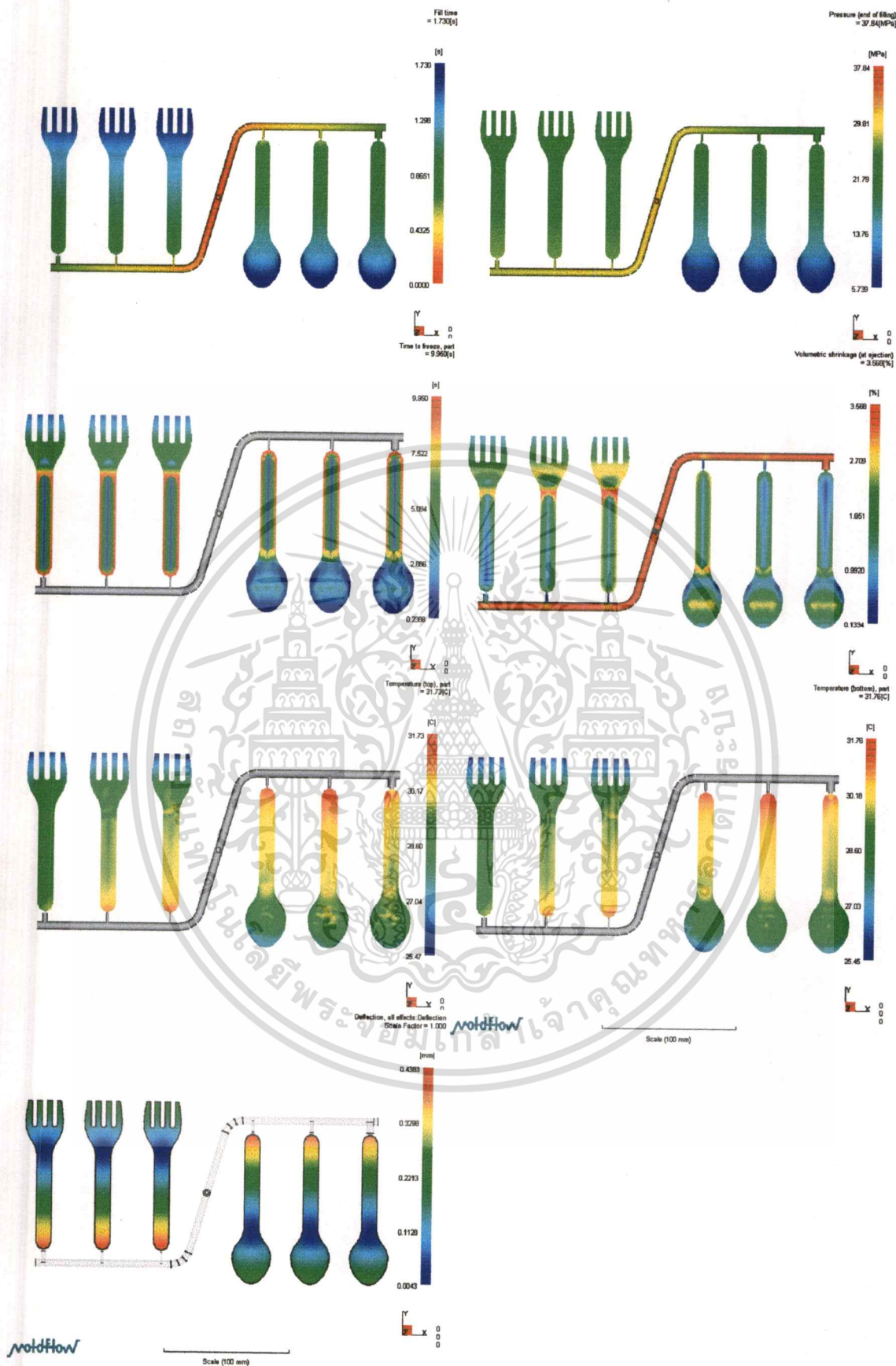
สภาวะการทดลอง	ค่าที่ใช้
เวลาที่ใช้ในการฉีด (s)	อัด โนมัต
ความดันที่ใช้ในการฉีด (MPa)	อัด โนมัต
อุณหภูมิแม่พิมพ์ ($^{\circ}\text{C}$)	45
อุณหภูมิการหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	230
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ($^{\circ}\text{C}$)	25
เลขเรย์โนลด์	10,000
เวลาที่ใช้ในระบบหล่อเย็น (s)	อัด โนมัต
อุณหภูมิที่ปลดชิ้นงาน ($^{\circ}\text{C}$)	99
เวลาที่เปิดแม่พิมพ์ (s)	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข. รูปผลการทดลอง

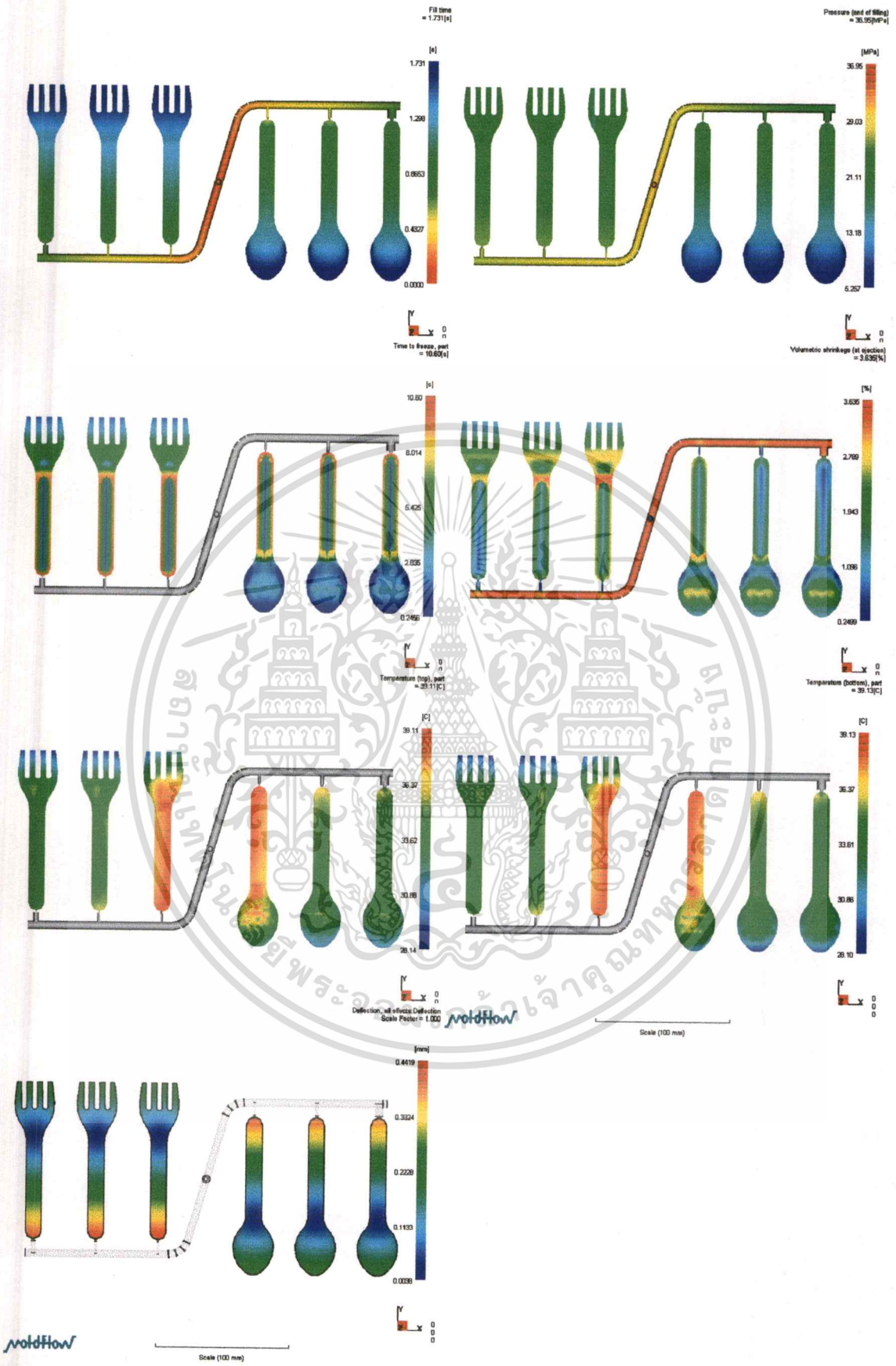


รูปที่ ข-1 ผลการจำลองการฉีดรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การแข่งขันเพื่อชิงการคัดเลือก ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



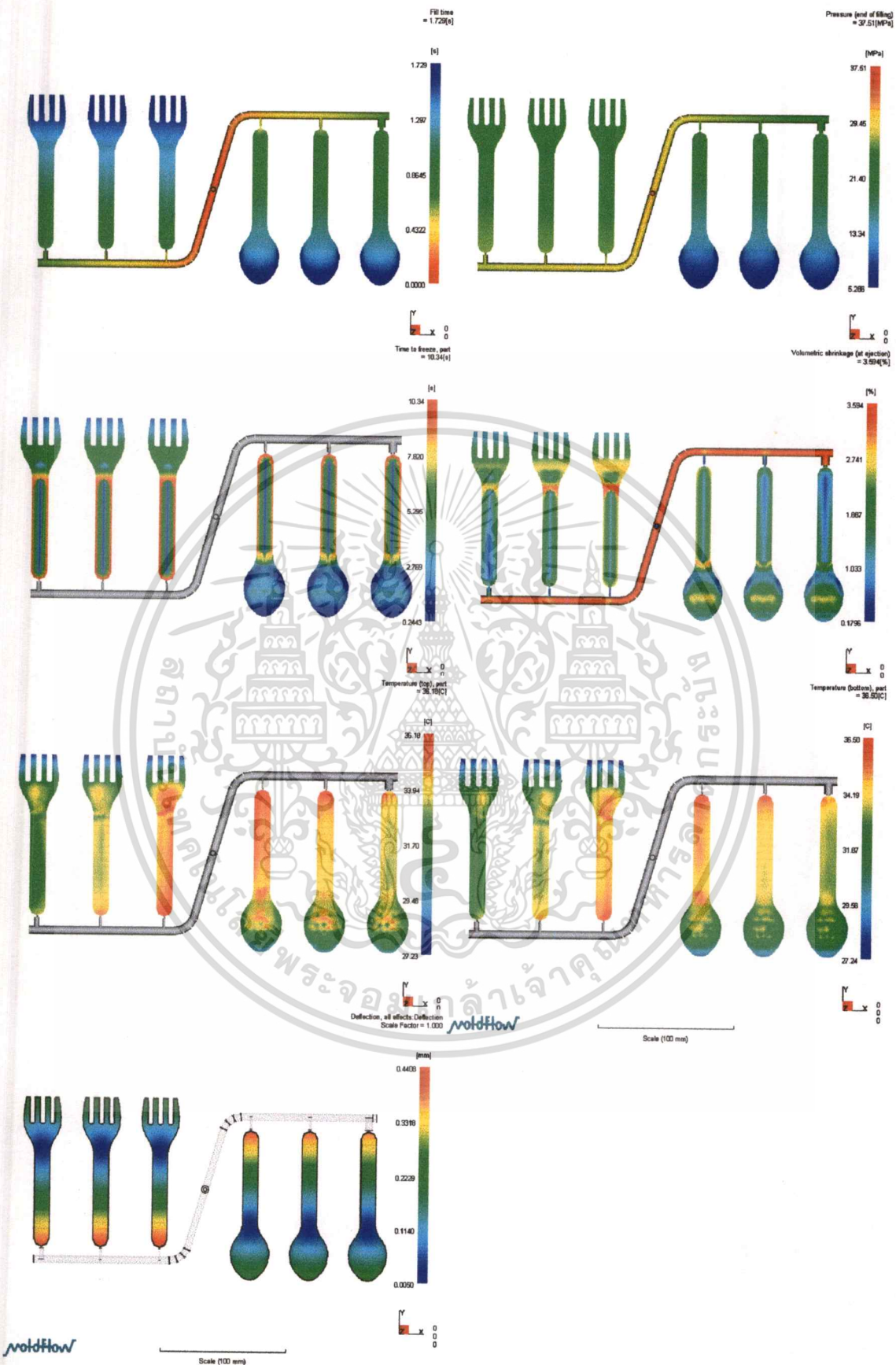
รูปที่ ข-2 ผลการจำลองการฉีดรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



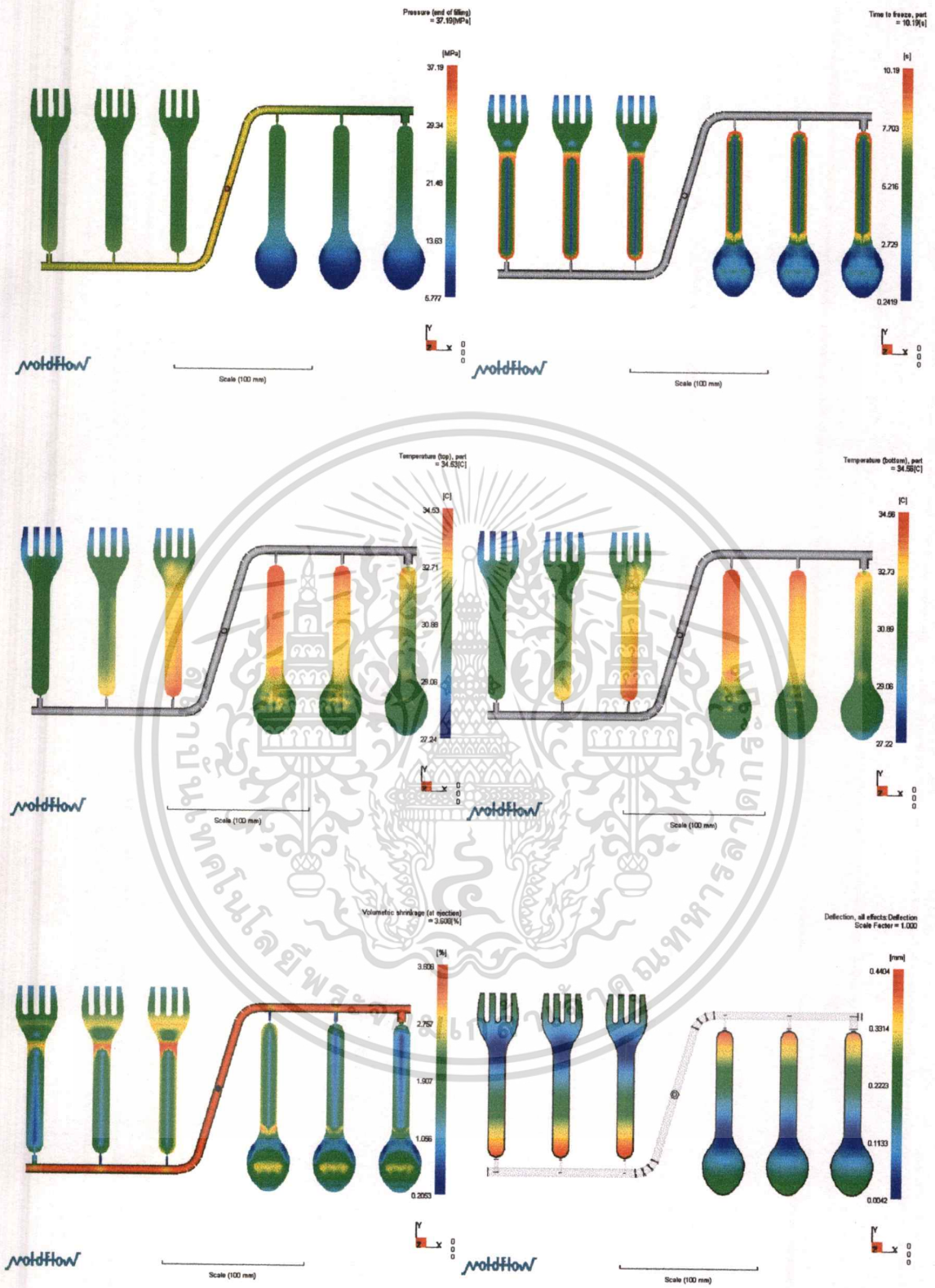
รูปที่ ข-3 ผลการจำลองการฉีดรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



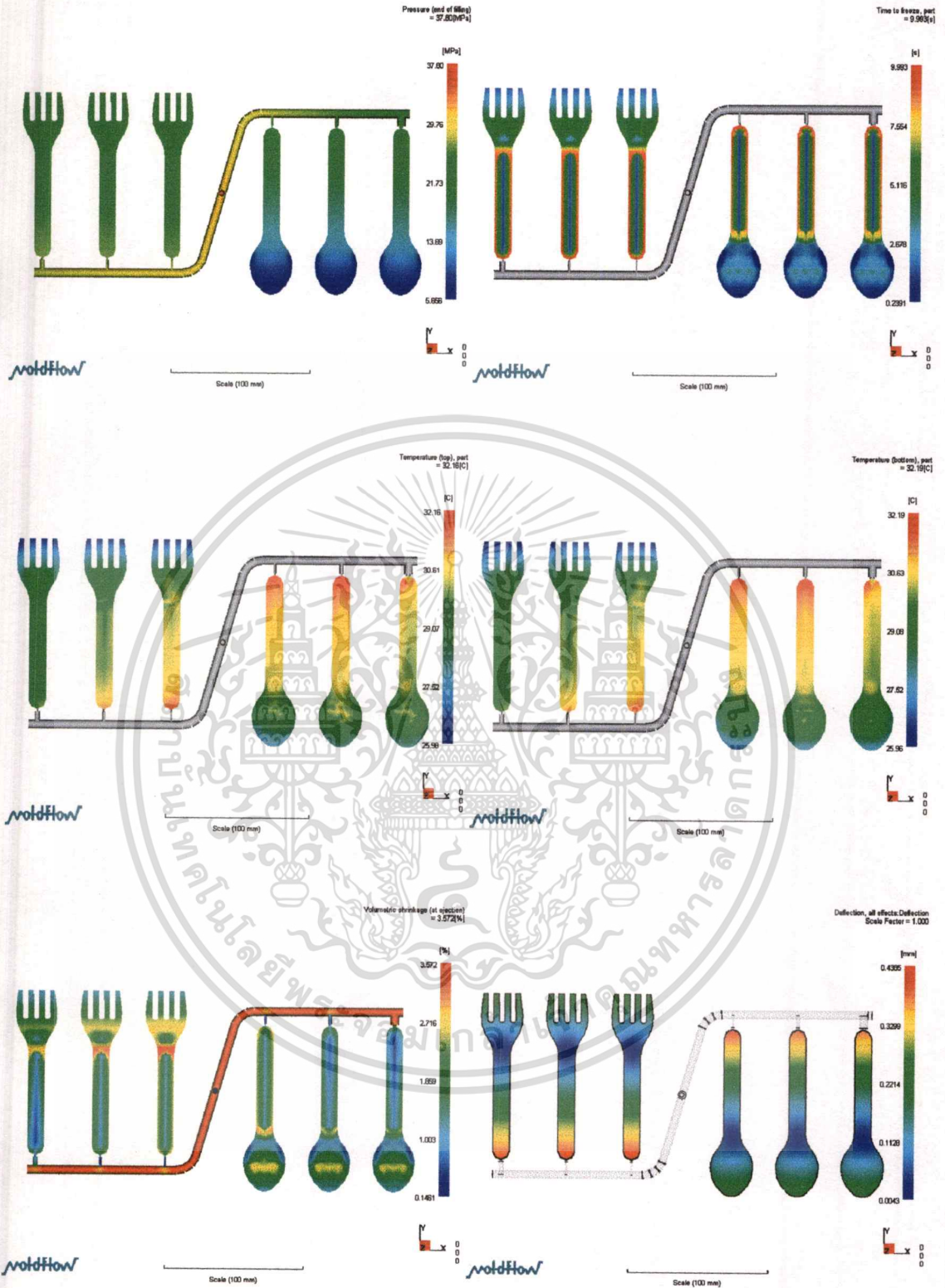
รูปที่ ข-4 ผลการจำลองการฉีดรูปแบบระบบหล่อเย็นแบบที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



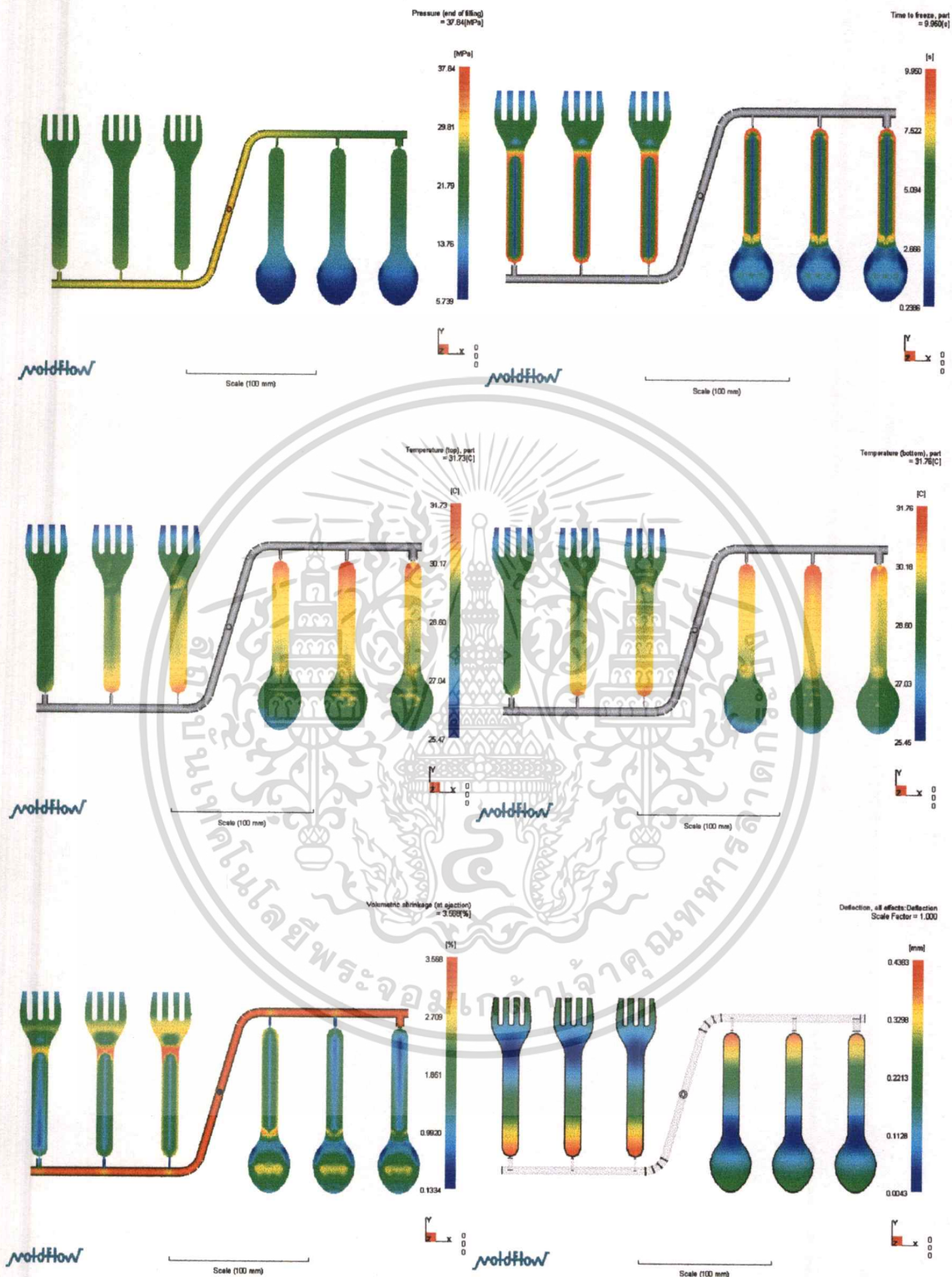
รูปที่ ข-5 ผลการจำลองการฉีดที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เลขเรย์โนลด์ 1,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



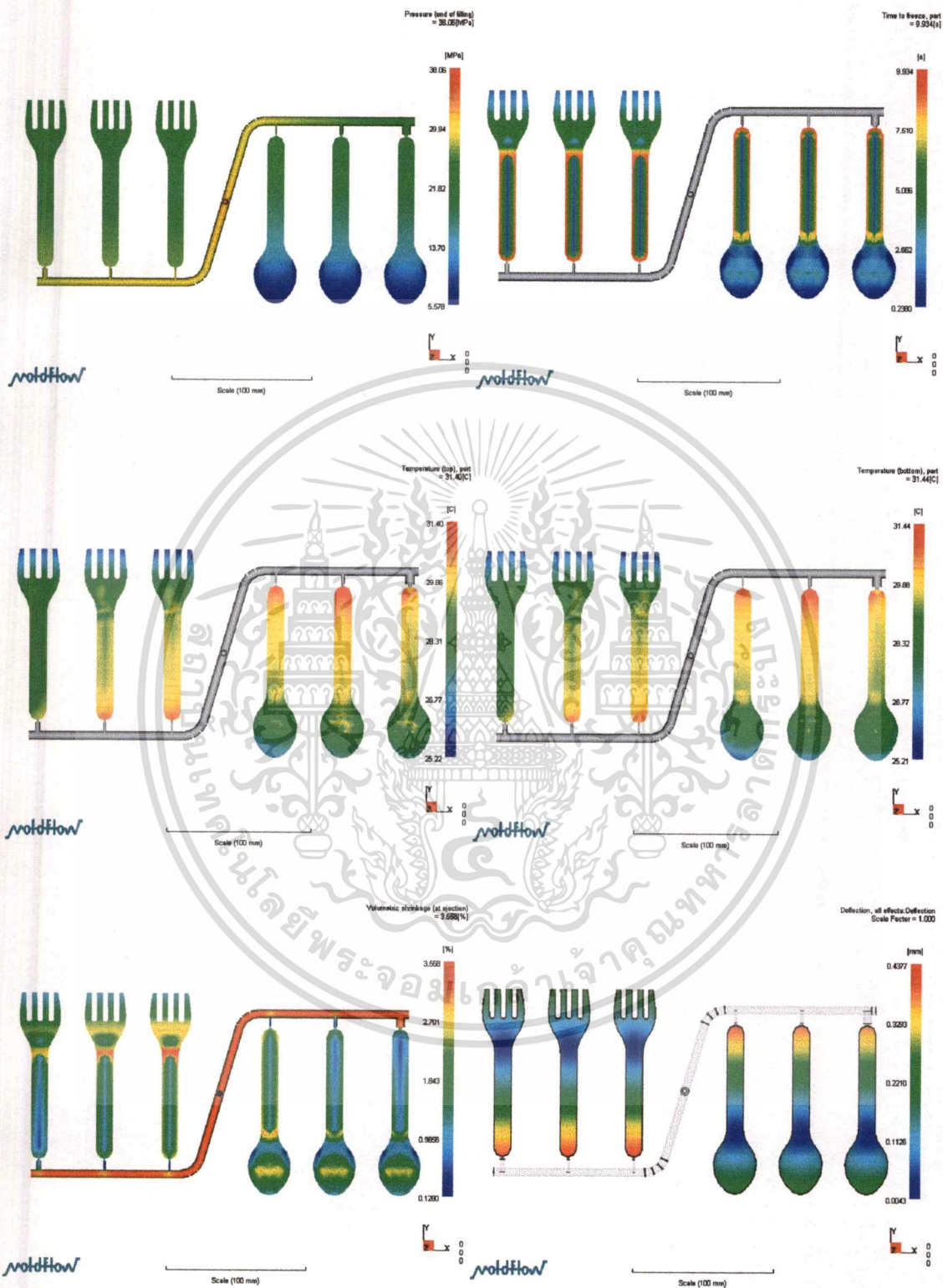
รูปที่ ข-6 ผลการจำลองการฉีดที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เลขเรย์โนลด์ 5,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



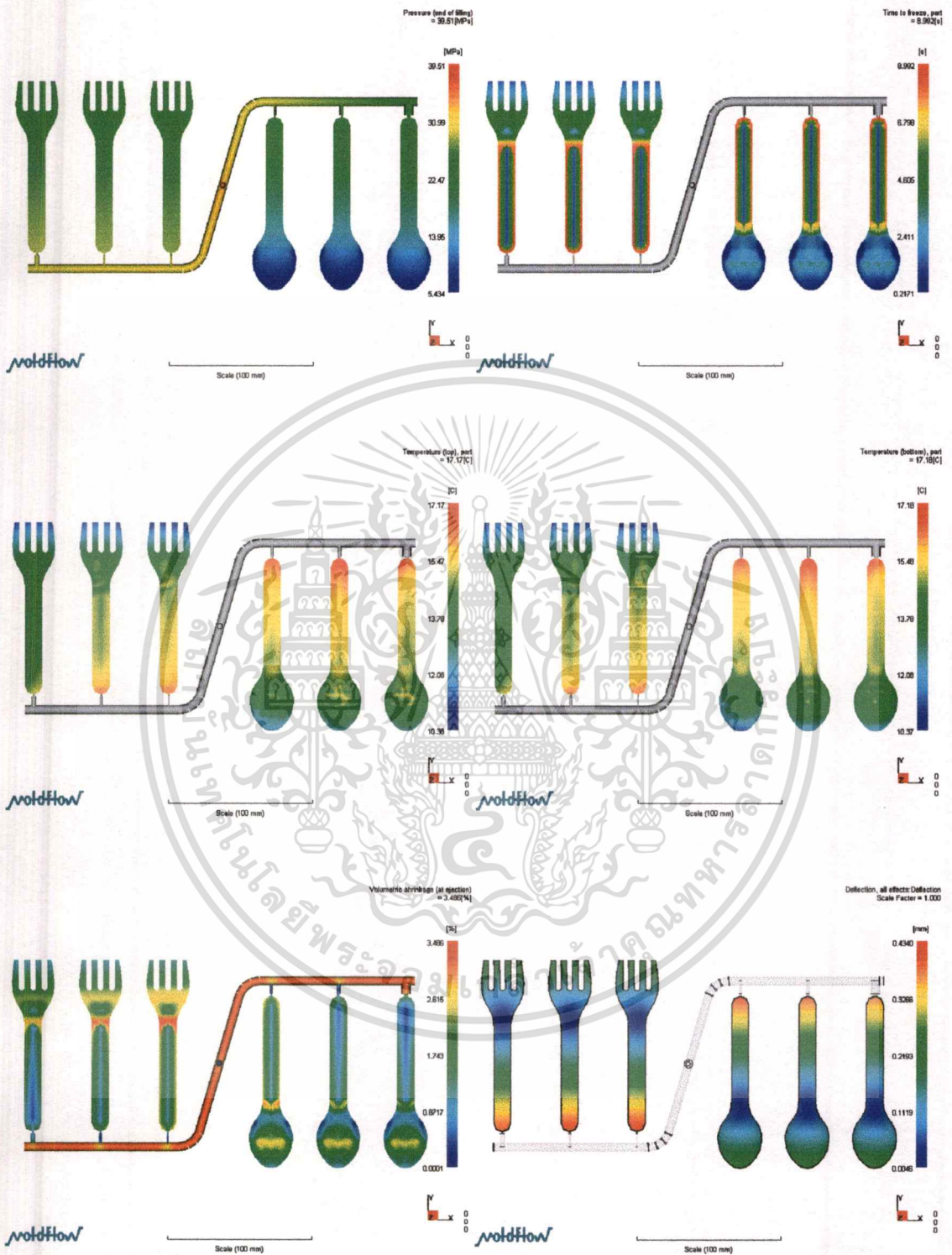
รูปที่ ข-7 ผลการจำลองการฉีดที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เลขเรย์โนลด์ 10,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



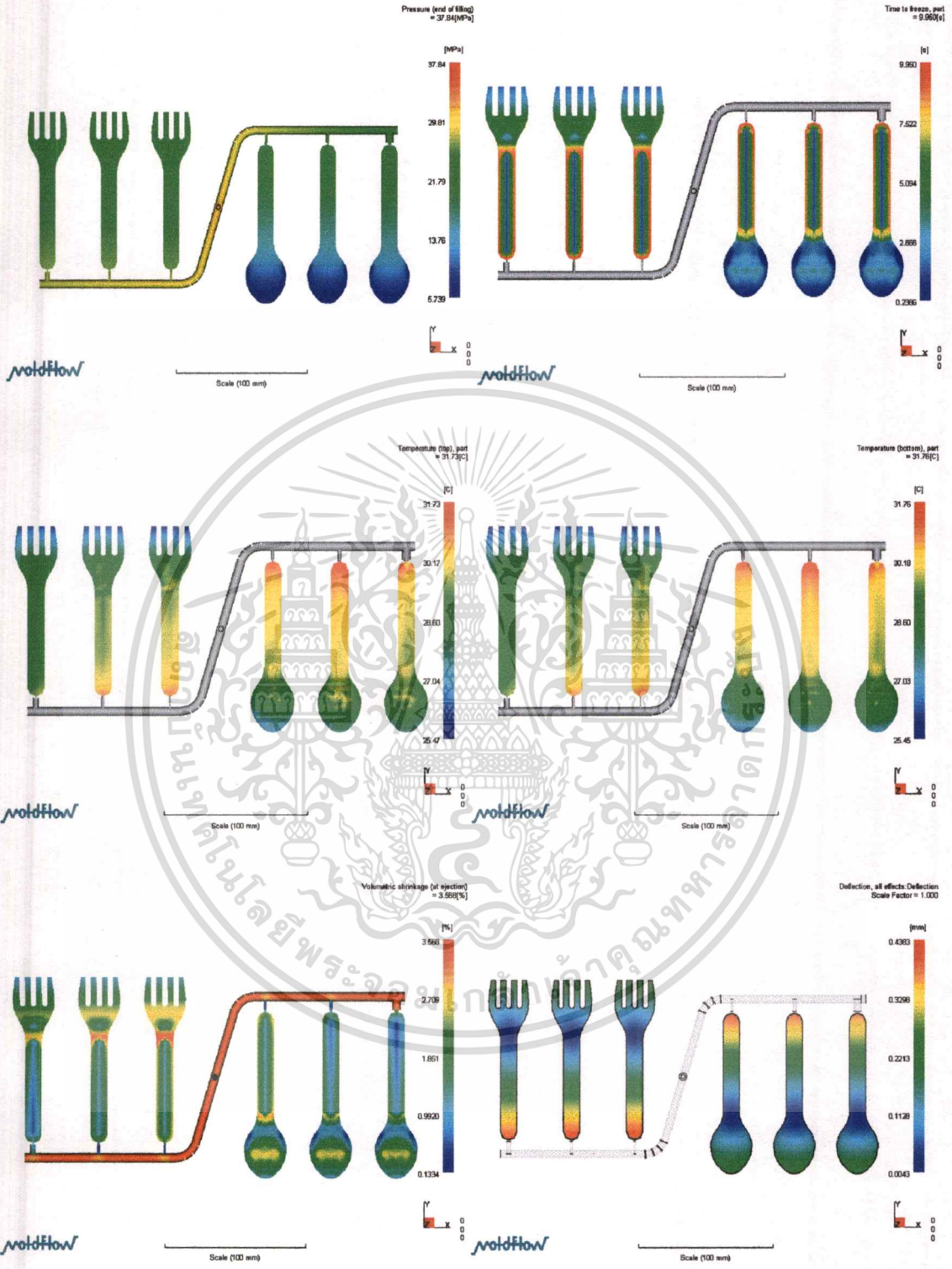
รูปที่ ข-8 ผลการจำลองการฉีดที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นที่เลขเรย์โนลด์ 15,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



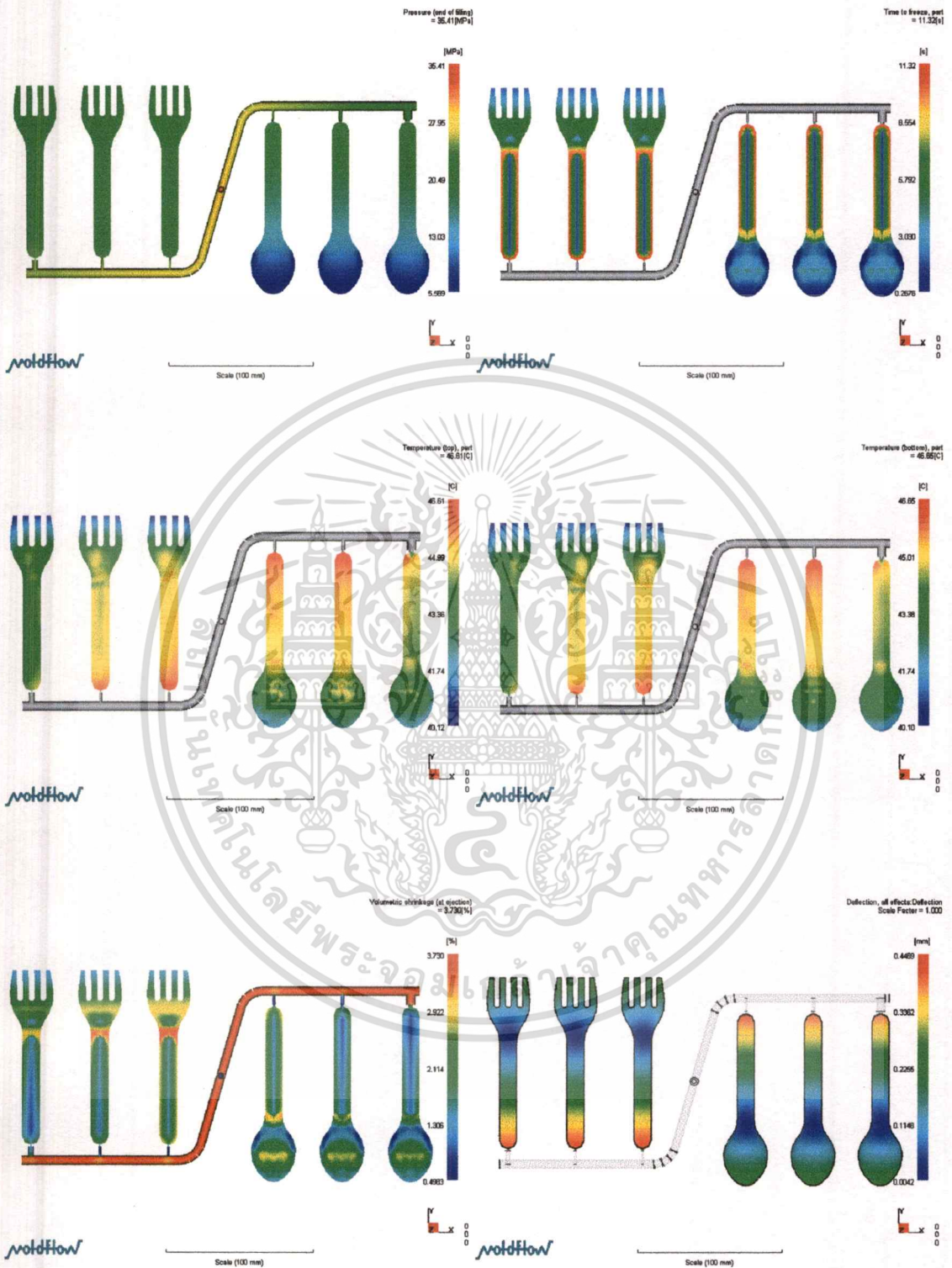
รูปที่ ข-9 ผลการจำลองการฉีดที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ 10 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-10 ผลการจำลองการฉีดที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ 25 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-11 ผลการจำลองการฉีดที่อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นที่ 40 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค. การคำนวณร้อยละความแตกต่างของค่าต่าง ๆ

คำนวณร้อยละความแตกต่างของค่าต่างๆจากสมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละความแตกต่าง} = \left(\frac{\text{มีระบบหล่อเย็น} - \text{ไม่มีระบบหล่อเย็น}}{\text{ไม่มีระบบหล่อเย็น}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

ตาราง ค-1 ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองการฉีดในรูปแบบระบบหล่อเย็นต่าง ๆ

ผลการทดลอง	รูปแบบระบบหล่อเย็น				
	ไม่มี	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8
เวลาในการเติมเต็ม (s)	1.7300	1.7300	1.7300	1.7310	1.7290
ความดันภายในโพรงแบบ (MPa)	34.0500	37.8400	37.7800	36.9500	37.5100
เวลาในการแข็งตัว (s)	11.7200	9.9500	10.0200	10.6000	10.3400
อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน (°C)	50.7500	31.7300	32.1200	39.1100	36.1800
อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน (°C)	50.7600	31.7600	32.1700	39.1300	36.5000
ปริมาตรการหดตัว (%)	3.8250	3.5680	3.5770	3.6350	3.5940
การบิดงอของชิ้นงาน (mm)	0.4513	0.4383	0.4366	0.4419	0.4408

ตาราง ค-2 ร้อยละความแตกต่างของค่าต่าง ๆ ในการจำลองการฉีดในรูปแบบระบบหล่อเย็นต่าง ๆ

ผลการทดลอง	รูปแบบระบบหล่อเย็น			
	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8
เวลาในการเติมเต็ม (%)	0.00	0.00	0.06	-0.06
ความดันภายในโพรงแบบ (%)	11.13	10.95	8.52	10.16
เวลาในการแข็งตัว (%)	-15.10	-14.51	-9.56	-11.77
อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน (%)	-37.48	-36.71	-22.94	-28.71
อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน (%)	-37.43	-36.62	-22.91	-28.09
ปริมาตรการหดตัว (%)	-6.72	-6.72	-4.97	-6.04
การบิดงอของชิ้นงาน (%)	-2.88	-3.26	-2.08	-2.33

ตาราง ก-3 ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองการฉีดในอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ โดยใช้ระบบหล่อเย็นแบบที่ 5

ผลการทดลอง	อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (เลขเรย์โนลด์)				
	ไม่มี	1,000	5,000	10,000	15,000
ความดันภายในโพรงแบบ (MPa)	34.0500	37.1900	37.8000	37.8400	38.0600
เวลาในการแข็งตัว (s)	11.7200	10.1900	9.9930	9.9500	9.9340
อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน (°C)	50.7500	34.5300	32.1600	31.7300	31.4000
อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน (°C)	50.7600	34.5600	32.1900	31.7600	31.4400
ปริมาตรการหดตัว (%)	3.8250	3.6080	3.5720	3.5680	3.5580
การบิดงอของชิ้นงาน (mm)	0.4513	0.4404	0.4385	0.4383	0.4377

ตาราง ก-4 ร้อยละความแตกต่างของค่าต่าง ๆ ในการจำลองการฉีดที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นต่าง ๆ

ผลการทดลอง	อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (เลขเรย์โนลด์)			
	1,000	5,000	10,000	15,000
ความดันภายในโพรงแบบ (%)	9.22	11.01	11.13	11.78
เวลาในการแข็งตัว (%)	-13.05	-14.74	-15.10	-15.24
อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน (%)	-31.96	-36.63	-37.48	-38.13
อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน (%)	-31.91	-36.58	-37.43	-38.06
ปริมาตรการหดตัว (%)	-5.67	-6.61	-6.72	-6.98
การบิดงอของชิ้นงาน (%)	-2.42	-2.84	-2.88	-3.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง ค-5 ค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองการฉีดที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ โดยใช้ระบบหล่อเย็นแบบที่ 5

ผลการทดลอง	อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นขาเข้า (°C)			
	ไม่มี	10	25	40
ความดันภายในโพรงแบบ (%)	34.0500	39.5100	37.8400	35.4100
เวลาในการแข็งตัว (%)	11.7200	8.9900	9.9500	11.3200
อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน (%)	50.7500	17.1700	31.7300	46.1600
อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน (%)	50.7600	17.1800	31.7600	46.1500
ปริมาตรการหดตัว (%)	3.8250	3.4860	3.5680	3.7300
การบิดงอของชิ้นงาน (%)	0.4513	0.4340	0.4383	0.4469

ตาราง ค-6 ร้อยละความแตกต่างของค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการจำลองการฉีดที่อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้าต่าง ๆ

ผลการทดลอง	อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้า (°C)		
	10	25	40
ความดันภายในโพรงแบบ (%)	16.04	11.13	3.99
เวลาในการแข็งตัว (%)	-23.29	-15.10	-3.41
อุณหภูมิพื้นผิวหน้าชิ้นงาน (%)	-66.17	-37.48	-9.04
อุณหภูมิพื้นผิวหลังชิ้นงาน (%)	-66.15	-37.43	-9.08
ปริมาตรการหดตัว (%)	-8.86	-6.72	-2.48
การบิดงอของชิ้นงาน (%)	-3.83	-2.88	-0.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นาย ชูเกียรติ กริชดำรงเดช เกิดเมื่อวันที่ 29 กรกฎาคม พ.ศ. 2520 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี (เคมีอุตสาหกรรม) จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2541 และได้เข้าศึกษาต่อปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2542



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้