



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและการหดตัวของชิ้นงาน  
ฉีดพลาสติกโดยการใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์

โดย นายอุเทน ณะวาปี

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

16 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.สุรังสี เดชเจริญ)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สถาพร ชาดาคม)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ บุตรดี)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อริสรา ชัยกิตติรัตนานา)

การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก  
โดยการใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์

นายอุเทน ณะวาปี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต  
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
ปีการศึกษา 2549  
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายอุเทน คณะวาปี  
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและการหดตัวของชิ้นงานฉีดพลาสติก โดยการใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์  
สาขาวิชา : วิศวกรรมการผลิต  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ  
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร.สุรังสี เดชเจริญ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สถาพร ชาดาคม  
ปีการศึกษา : 2549

### บทคัดย่อ

โดยปกติในแม่พิมพ์ฉีดจะมีระบบหล่อเย็นเพื่อช่วยในการระบายความร้อน และเพื่อระบายความร้อนออกจากชิ้นงาน แต่ในความเป็นจริงกว่า 50 % ของเวลาต่อรอบการฉีด (Cycle Time) หมดไปกับเวลาหล่อเย็น ดังนั้นถ้าเราสามารถลดเวลาหล่อเย็นให้สั้นลงได้ ก็สามารทที่จะเพิ่มผลผลิตให้สูงขึ้นได้ ในแม่พิมพ์ฉีดจะประกอบไปด้วยระบบปลด (Ejector) และระบบจับยึดต่าง ๆ ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการออกแบบระบบหล่อเย็น ทำให้แม่พิมพ์ขาดประสิทธิภาพในการหล่อเย็น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อเย็น โดยการใช้ทองแดงเข้าไปฝังในแม่พิมพ์ ซึ่งทองแดงเป็นธาตุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อนสูง ในการศึกษาใช้โปรแกรมวิเคราะห์การไหลตัวของพลาสติก (CAE) เข้ามาช่วยเพื่อช่วยลดเวลาและต้นทุน ซึ่งผลวิเคราะห์ที่นำมาพิจารณาคือ ค่าเวลาเย็นตัว (Time to Freeze), ค่าความลึกของรอยยุบตัว (Sink Mark Depth), ค่าการบิดตัว (Warpage) และค่าเวลาต่อรอบการฉีด (Cycle Time) ในการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบจะใช้พลาสติก 2 ชนิดคือ PP (Polypropylene) ซึ่งเป็นพลาสติกในกลุ่ม Semi Crystalline Thermoplastic และ PS (Polystyrene) ซึ่งเป็นพลาสติกกลุ่ม Amorphous Thermoplastic จากการศึกษาเราพบว่า การใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์ จะช่วยลดเวลาต่อรอบการฉีดลงได้สูงสุดถึงประมาณ 40% ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาและรูปร่างชิ้นงาน และมีแนวโน้มที่จะช่วยลดการเกิดรอยยุบตัวได้โดยเฉพาะในพลาสติก PP จะสามารถลดลงได้อย่างชัดเจน แต่การบิดตัวและโค้งตัวของชิ้นงานมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงานและปริมาณของทองแดงที่ใช้ฝังในแม่พิมพ์

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 119 หน้า)

คำสำคัญ : แม่พิมพ์ฉีด, การหล่อเย็นในแม่พิมพ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr.Uten Khanawapee  
Thesis Title : The Study of Factors Influencing Heat Transfer Rate and Shrinkages  
by Use Copper Insert in Plastic Injection Molding  
Major Field : Production Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok  
Thesis Advisors : Dr.Surangsee Dechjarern  
Assistant Professor Sathaporn Chatakorn  
Academic Year : 2006

### **Abstract**

More than 50 % of the cycle time is used up with the cooling process. If we can reduce the cooling time, the productivity will increase. Normally, the cooling system is equipped in the injection mold in order to release heat. A good cooling system should disperse the coolant to the whole part to prevent accumulating heat in the mold and to remove heat form the part. But in reality, an injection mold is composes of ejector and holding systems which may obstruct the design of the cooling system. This leads to the inefficiency of the cooling system in the mold. In this research, the efficiency of the cooling system in the mold is increased by inserting copper which has high thermal conductivity in the mold. We use CAE program to help reduce cost and time. The results in which we are interested are Time to Freeze, Sink Mark Depth, Warpage and Cycle Time. We use PP (Polypropylene) and PS (Polystyrene) which are classified as Semi Crystalline Thermoplastic and Amorphous Thermoplastic, respectively in analyzing to compare the behaviors of these two plastics. From this study, we found that inserting copper in the mold helps reducing cycle time by maximum of about 40% which depend on the thickness and shape of the part. It also tends to help reduce the occurrence of sink marks, especially plastics under Semi Crystalline Thermoplastic group can obviously reduce sink marks. However, warpage and buckling levels tend to increase which depends on the shape of the part and quantity of copper inserted in the mold

(Total 119 pages)

Keywords : Injection Molding, Cooling system

---

Advisor

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารสำเร็จลุล่วงได้ ถ้าขาดด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร.สุรังศ์ เดชเจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สถาพร ชาดาคม ซึ่งเสียสละเวลาอันมีค่า มาเป็นที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ โดยได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ มาตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทั้ง 2 ท่านเป็นอย่างสูง อีกทั้งยังต้องขอขอบพระคุณท่าน อาจารย์ไพบุลย์ สิ้นพระยากุล รวมถึงอาจารย์และเจ้าหน้าที่ท่านอื่น ๆ ในสาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องมือ ที่อนุเคราะห์สถานที่และเครื่องจักรในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

อุเทน ณะวาปี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	๗
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 บททความวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎี	3
2.1 บททความวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.2 ระบบการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์	3
2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิในแม่พิมพ์	11
2.4 ขบวนการฉีดพลาสติก	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	19
3.1 การออกแบบวิธีดำเนินการวิจัย	19
3.2 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ชุดทดลอง	20
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	45
4.1 ผลกระทบของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อการหดตัว	47
4.2 ผลกระทบของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อการเย็นตัว	67
4.3 ผลกระทบต่อรอบเวลาการฉีด	85
4.4 การศึกษาหารูปร่างของทองแดงที่เหมาะสม	88
4.5 เทคนิคอื่น ๆ ในการออกแบบแม่พิมพ์และก้อนทองแดง	104
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	109
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	109
5.2 ข้อเสนอแนะ	110
เอกสารอ้างอิง	111
ภาคผนวก ก	113
ตารางคุณสมบัติต่างๆของวัสดุ	

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข	115
ค่าที่วัดได้จากห้ววัดอุณหภูมิ	
ภาคผนวก ค	117
ตารางค่าที่ได้จากผลวิเคราะห์	
ประวัติผู้วิจัย	119

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2-1	ค่าคุณสมบัติต่างๆของพลาสติกที่ใช้ในการคำนวณ	10
2-2	แสดงระดับชั้นของอาร์ทีดีและค่าความแม่นยำในการอ่าน	12
3-1	ค่าคุณสมบัติและความสามารถของหัววัด	21
3-2	คุณสมบัติของทองแดงและเหล็กที่ใช้ในการทดลอง	23
3-3	ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์	30
3-4	ค่าคุณสมบัติของเครื่องฉีด	31
3-5	การกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์	34
3-6	คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์	34
3-7	ส่วนผสมทางเคมีของทองแดงที่ได้จากเครื่องสเปคโตรมิเตอร์	34
3-8	คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์	42
4-1	คุณสมบัติด้านการผลิตของพลาสติก PP และ PS	45
4-2	คุณสมบัติทางความร้อนของพลาสติก PP และ PS	45
4-3	คุณสมบัติทางทางกลของพลาสติก PP และ PS	46
4-4	เงื่อนไขการฉีดที่ใช้ในการวิเคราะห์	47
4-5	ค่าที่ได้จากการวัดขนาดของชิ้นงานหลังการหดตัวของพลาสติก PS	55
4-6	ค่าระยะหดตัวและเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานหลังการฉีดของพลาสติก PS	55
4-7	ค่าการบิดตัวและหดตัวตามแนวแกนต่าง ๆ	57
4-8	ค่าที่ได้จากการวัดขนาดของชิ้นงานหลังการหดตัวของพลาสติก PP	60
4-9	ค่าระยะหดตัวและเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานหลังการฉีดของพลาสติก PP	60
4-10	แสดงค่าการบิดตัวและหดตัวตามแนวแกนต่าง ๆ	61
4-11	ค่าความเค้นตกค้างสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน	66
4-12	เงื่อนไขการฉีดที่ใช้ในการวิเคราะห์	69
4-13	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 3 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	79
4-14	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 2.5 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	80
4-15	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 2 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	80

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4-16	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 1.5 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	80
4-17	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 1 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	81
4-18	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 0.5 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	81
4-19	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 3 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	82
4-20	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 3 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	83
4-21	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 3 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	83
4-22	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 3 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	83
4-23	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 3 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	84
4-24	เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 3 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง	84
4-25	เงื่อนไขการปลดชิ้นงานของพลาสติกทั้ง 2 ชนิด	85
4-26	รอบเวลาในการฉีดของชิ้นงาน Model A เมื่อใช้พลาสติก PP	86
4-27	รอบเวลาในการฉีดของชิ้นงาน Model A เมื่อใช้พลาสติก PS	86
4-28	รอบเวลาในการฉีดของชิ้นงาน Model B เมื่อใช้พลาสติก PP	86
4-29	รอบเวลาในการฉีดของชิ้นงาน Model B เมื่อใช้พลาสติก PS	87
4-30	รูปร่างของทองแดงที่เหมาะสมกับรูปแบบการวางเบ้าพิมพ์ต่าง ๆ	97
4-31	ค่าความแตกต่างของเวลาหล่อเย็นสำหรับกรณีศึกษาที่ 9	100
4-23	ค่าความแตกต่างของเวลาหล่อเย็นสำหรับกรณีศึกษาที่ 10	103
ก-1	แสดงค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของพลาสติก	114
ข-1	ค่าที่วัดได้จากหัววัดอุณหภูมิ	116
ค-1	ค่าการยุบตัวของพลาสติก PS หลังการฉีด	118
ค-2	ค่าการยุบตัวของพลาสติก PP หลังการฉีด	118

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2-1	ระบบการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์	4
2-2	สัดส่วนโดยประมาณของเวลาต่าง ๆ ในวัฏจักรการฉีด	5
2-3	อัตราการหล่อเย็นเทียบกับเวลาหล่อเย็น	7
2-4	การกระจายของอุณหภูมิในชิ้นงาน	8
2-5	กราฟ Nomogramsหาเวลาหล่อเย็นของพลาสติก Polystyrene	9
2-6	กราฟ Nomograms หาเวลาหล่อเย็นของพลาสติก Polyesterene	9
2-7	การใช้ Nomogram ในการคำนวณหาเวลาหล่อเย็น	10
2-8	การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากต่ำไปหาสูง	12
2-9	การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากสูงไปหาต่ำ	13
2-10	การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดของเกลียวหนอนแบบมีช่วงไล่ก้ำซ	14
3-1	วิธีดำเนินงานวิจัย	19
3-2	รูปร่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองและออกแบบแม่พิมพ์	21
3-3	การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิที่แม่พิมพ์แบบไม่ฝังทองแดง	22
3-4	การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิที่แม่พิมพ์แบบฝังทองแดง	23
3-5	แผ่นแม่พิมพ์ที่ออกแบบในโปรแกรมCAD	24
3-6	แผ่นทองแดงที่ออกแบบในโปรแกรมCAD	24
3-7	การสร้างแผ่นแม่พิมพ์ด้วยเครื่อง CNC	25
3-8	เครื่อง CNC ที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์	25
3-9	แผ่นแม่พิมพ์และเบ้าพิมพ์ที่ได้จากการขึ้นรูป	26
3-10	แผ่นแม่พิมพ์และเบ้าสำหรับฝังทองแดง	26
3-11	แผ่นทองแดงสำหรับฝังในแม่พิมพ์	27
3-12	แผ่นแม่พิมพ์ที่ทำการฝังทองแดงแล้ว	27
3-13	การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิในแม่พิมพ์ที่ฝังทองแดง	28
3-14	การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิในแม่พิมพ์ที่ไม่ฝังทองแดง	28
3-15	ตัววัดอุณหภูมิและอุปกรณ์อ่านค่า	29
3-16	แม่พิมพ์ที่ประกอบเสร็จพร้อมขึ้นทดลองฉีด	29
3-17	อุณหภูมิของพลาสติกที่ได้จากการวิเคราะห์ห้วงเวลาไหลเข้าสู่เบ้าพิมพ์	33
3-18	การกำหนดระยะความลึกของทองแดงที่ใช้ในการคำนวณ	33
3-19	ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบส่วนผสมทางเคมี	35
3-20	ผิวสัมผัสผศคู่ต่าง ๆ หลังจากกำหนดค่าเงื่อนไขแล้ว	36

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-21	พื้นผิวที่กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นงาน	36
3-22	การกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ที่ใช้เหล็กอย่างเดียว	37
3-23	การกระจายตัวของความร้อนในแม่พิมพ์ที่ใช้ทองแดงฝั่ขนาดต่าง ๆ	37
3-24	อุณหภูมิของชิ้นงาน ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็ก อย่างเดียวที่ได้จากการวิเคราะห์	39
3-25	อุณหภูมิของชิ้นงาน ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ที่ฝั่ทองแดง 62.5%ที่ได้จากการวิเคราะห์	39
3-26	เครื่องฉีดที่ใช้ในการทดลอง	40
3-27	ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองฉีด	40
3-28	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างค่าที่วัดได้กับที่ได้จาก CAE ใน แม่พิมพ์เหล็ก	41
3-29	กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างค่าที่วัดได้กับที่ได้จาก CAE ใน แม่พิมพ์ฝั่ทองแดง	41
3-30	แรงดันฉีดในเบ้าพิมพ์ของชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์	43
3-31	ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ที่ scale 200 เท่า	44
3-32	ค่าความระยะแอนตัวที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ที่ scale 200 เท่า	44
4-1	กราฟ PVT ของพลาสติก	46
4-2	กราฟ Viscosity ของพลาสติก	47
4-3	รูปร่างชิ้นงานและความหนาที่ใช้	48
4-4	ชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์พร้อมทั้งทางวิ่ง	48
4-5	การกำหนดค่าเงื่อนไขต่าง ๆ ลงในโปรแกรม	49
4-6	การกำหนดค่าเงื่อนไขต่าง ๆ ลงในโปรแกรม (ต่อ)	50
4-7	ผลวิเคราะห์ความลึกของรอยยุบตัวในชิ้นงาน	50
4-8	ค่าการยุบตัวของพลาสติก PS ณ จุดต่าง ๆ	51
4-9	ค่าการยุบตัวของพลาสติก PP ณ จุดต่าง ๆ	52
4-10	ขนาดและลักษณะการยุบตัวของพลาสติก PP	53
4-11	ขนาดและลักษณะการยุบตัวของพลาสติก PS	53
4-12	กราฟเปรียบเทียบขนาดการยุบตัวของพลาสติก PS และ PP	54
4-13	ตัวอย่างผลวิเคราะห์ Deflection & Warpage และตำแหน่งที่จะทำ การวัด	54

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-14 แนวแกนที่ใช้อ้างอิงในการวัดระยะการบิดตัว	56
4-15 ระยะการบิดตัวและหดตัวในช่วงค่า Min ของ PP	57
4-16 ระยะการบิดตัวและหดตัวในช่วงค่า Max. ของ PP	58
4-17 ระยะการบิดตัวและหดตัวแกน X และ Y (Max. – Min.) ของ PP	58
4-18 ระยะการบิดตัวและหดตัวโดยรวม (All deflection) (Max. – Min.) ของ PP	59
4-19 ระยะการบิดตัวและหดตัวแกน Z (Max. – Min.)ของ PP	59
4-20 ระยะการบิดตัวและหดตัวในช่วงค่า Min ของ PS	62
4-21 ระยะการบิดตัวและหดตัวในช่วงค่า Max. ของ PS	62
4-22 ระยะการบิดตัวและหดตัวแกน X และ Y (Max. – Min.) ของ PS	63
4-23 ระยะการบิดตัวและหดตัวโดยรวม (All deflection) (Max. – Min.) ของ PS	63
4-24 ระยะการบิดตัวและหดตัวแกน Z (Max. – Min.)ของ PS	64
4-25 ขนาดเปรียบเทียบของการบิดตัวและหดตัวระหว่าง PP กับ PS	64
4-26 ขนาดเปรียบเทียบของการบิดตัวและหดตัวระหว่าง PP กับ PS ใน แนวแกน Z	65
4-27 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ความเค้นตกค้างในชิ้นงานพลาสติก PS	66
4-28 ค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน เมื่อใช้ทองแดงแบบต่าง ๆ	67
4-29 รูปร่างชิ้นงานและความหนาที่ใช้การวิเคราะห์	68
4-30 ทางวิ่งพร้อมกับทางเข้าแบบใบพัดที่ใช้	68
4-31 ตัวอย่างของผลวิเคราะห์ Bulk Temperature (Mid Plane)	69
4-32 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของชิ้นงานช่วงความหนา 3 mm ของ PS	70
4-33 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 3 mm ในช่วงที่มีความ แตกต่างกัน ของ PS	71
4-34 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 2.5 mm ของ PS	72
4-35 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 2 mm ของ PS	72
4-36 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 1.5 mm ของ PS	73
4-37 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 1 mm ของ PS	73
4-38 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 0.5 mm ของ PS	74

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-39 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชั้นงานหนา 3 mm ของ PP	75
4-40 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชั้นงานหนา 3 mm ในช่วงที่มีความแตกต่างกัน ของ PP	76
4-41 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชั้นงานหนา 2.5 mm ของ PP	76
4-42 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชั้นงานหนา 2 mm ของ PP	77
4-43 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชั้นงานหนา 1.5 mm ของ PP	77
4-44 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชั้นงานหนา 1 mm ของ PP	78
4-45 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชั้นงานหนา 0.5 mm ของ PP	78
4-46 ผลวิเคราะห์ Time to Freeze (Mid Plane)	79
4-47 ร้อยละของเวลาที่ลดลงในชั้นงาน PP แต่ละช่วงความหนา	82
4-48 แสดงร้อยละของเวลาที่ลดลงในชั้นงาน PS แต่ละช่วงความหนา	85
4-49 ร้อยละของเวลาที่ลดลงเมื่อใช้ทองแดงเข้าช่วยในการถ่ายเทความร้อน	87
4-50 รูปชั้นงานรถของเล่นที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 1	88
4-51 แนวการกระจายความร้อนในเบ้าพิมพ์ของแม่พิมพ์ชั้นงานรถของเล่น	88
4-52 รูปชั้นงานพร้อมระบบป้อนแนวการกระจายความร้อนในเบ้าพิมพ์	89
4-53 รูปชั้นงานใบพัดลมในคอมพิวเตอร์พร้อมระบบป้อน	90
4-54 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ใบพัดลมในคอมพิวเตอร์	90
4-55 รูปชั้นงานชิ้นส่วนปริ้นเตอร์	91
4-56 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ชิ้นส่วนปริ้นเตอร์	91
4-57 รูปชั้นงานด้ามไขควง	92
4-58 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ด้ามไขควง	92
4-59 รูปชั้นงานที่ใช้ในกรณีศึกษา 2 เบ้าพิมพ์	93
4-60 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ 2 เบ้าพิมพ์	93
4-61 รูปชั้นงานที่ใช้ในกรณีศึกษา 3 เบ้าพิมพ์	94
4-62 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ 3 เบ้าพิมพ์	94
4-63 รูปชั้นงานที่ใช้ในกรณีศึกษา 4 เบ้าพิมพ์	95
4-64 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ 4 เบ้าพิมพ์	95

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4-65	รูปแบบของเบ้าพิมพ์และรูปร่างทองแดงที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 9	89
4-66	อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานเมื่อฝังทองแดงแบบต่างๆ	100
4-67	รูปแบบของเบ้าพิมพ์และรูปร่างทองแดงที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 10	101
4-68	อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานเมื่อฝังทองแดงแบบต่างๆในกรณีศึกษาที่ 10	103
4-69	การจับยึดทองแดงโดยใช้แผ่นรองหลัง	104
4-70	การเข้ามุมแผ่นทองแดงแบบต่าง ๆ	105
4-71	การฝังทองแดงแบบมีบ้ายึดสกรู	105
4-72	เงื่อนไขการเจาะรูน้ำหล่อเย็น	106
4-73	แสดงการหล่อเย็นแบบกักเป็นร่องทางไหล	106
4-74	การทำมุมเอียงรอบ ๆ ชิ้นงาน	107

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการเพิ่มความสามารถในการผลิต (Productivity) ของชิ้นงาน ที่ได้จากขบวนการฉีดพลาสติก เป็นที่ต้องการ ของโรงงานอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนพลาสติกเป็นอย่างมาก และการลดเวลาของวัฏจักรการฉีด (Cycle time) เป็นอีกวิธีในการเพิ่มความสามารถในการผลิตแต่ยังคงต้องคำนึงถึงคุณภาพชิ้นงานเป็นหลักด้วย โดยปกติใน 1 รอบเวลาของการฉีด จะประกอบไปด้วยเวลา ปิด – เปิด แม่พิมพ์, เวลาฉีด, เวลาฉีดย้ายและเวลาที่ใช้งานการหล่อเย็นชิ้นงาน ซึ่งเวลาในการหล่อเย็นชิ้นงานจะอยู่ราว ๆ 60 - 70 % ของเวลาทั้งหมด (1) ดังนั้นการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการหล่อเย็นในแม่พิมพ์ฉีด จะสามารถช่วยลดเวลาต่อวัฏจักรการฉีดลงได้ ซึ่งจะส่งผลให้เราสามารถลดต้นทุนการผลิตในส่วนของการฉีดลงได้

การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการหล่อเย็นนั้น สามารถทำได้โดยออกแบบระบบหล่อเย็นให้สามารถนำพาความร้อนออกจากแม่พิมพ์ ให้ได้มากและทั่วถึงที่สุด (2) ดังนั้นจึงต้องทำการเจาะระบบหล่อเย็นให้ผ่านบริเวณที่ความร้อนกระจายออกจากตัวชิ้นงาน ขณะทำการฉีดให้ได้มากที่สุดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพ ในการหล่อเย็นสูงสุด แต่ในความเป็นจริงการเจาะรู ระบบหล่อเย็นโดยเฉพาะในชิ้นงานที่มีความซับซ้อน จะไม่สามารถทำได้โดยง่ายเนื่องจากต้องออกแบบระบบหล่อเย็นไม่ให้มีผลกับระบบปลดชิ้นงานและระบบงานสวมต่าง ๆ ซึ่งจะพบได้บ่อยในแม่พิมพ์ที่มีความซับซ้อนมาก ๆ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนานำวัสดุที่มีค่าความนำความร้อนสูง(High thermal conductivity) มาใช้สร้างชิ้นส่วนแม่พิมพ์เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว(3) ซึ่งวัสดุดังกล่าวส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มโลหะผสม (Non-ferrous Alloy) เช่น กลุ่มอลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloy) และกลุ่มทองแดงผสม (Copper Alloy) ซึ่งวัสดุดังกล่าวได้จากการนำอลูมิเนียมและทองแดงไปผสมกับธาตุอื่น ๆ เพื่อเพิ่มความแข็ง ความเหนียว ความแข็งแรง และคุณสมบัติอื่น ๆ ที่จำเป็นต่อการนำไปผลิตเป็นชิ้นส่วนแม่พิมพ์ แต่การเติมธาตุต่าง ๆ เข้าไปในโลหะหลักนั้นทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง ส่งผลให้ราคาโลหะผสมมีราคาค่อนข้างสูงตามไปด้วย และการเติมโลหะธาตุอื่นเข้าไปในทองแดงยังส่งผลให้ค่าความนำความร้อนของทองแดงลดลงอีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบให้ใช้ทองแดง ที่มีขายในท้องตลาดซึ่งจะมีราคาถูกและหาซื้อได้ง่าย โดยออกแบบให้ฝังอยู่ในเบ้าพิมพ์ เพื่อช่วยในการดึงความร้อนออกจากชิ้นงาน และเพื่อลดความยุ่งยากในการออกแบบระบบหล่อเย็น โดยจะศึกษาถึงการกระจายความร้อนจาก

ชิ้นงานผ่านผนังเบ้าพิมพ์มายังทองแดงและ จากทองแดงมายังระบบหล่อเย็นว่าจะช่วยเร่งอัตราการหล่อเย็นในแม่พิมพ์ได้มากเท่าใด โดยจะใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางไฟไนต์อีลิเมนต์ (Finite Element Analysis : FEA) มาเป็นตัวช่วยในการแก้ปัญหาและนอกจากนี้เรายังจะใช้โปรแกรมจำลองการไหลของพลาสติกมาใช้ในการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานเช่นการหดตัว การบิดตัว เป็นต้นและใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในงานฉีด

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานผ่านผนังเบ้าพิมพ์มายังทองแดง
- 1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการออกแม่พิมพ์โดยใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาคุณภาพของชิ้นงานที่ได้จากกระบวนการฉีดโดยใช้แม่พิมพ์แบบฝังทองแดง
- 1.2.4 เพื่อศึกษารูปแบบการบิดตัวของชิ้นงานเมื่อใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์
- 1.2.5 เพื่อศึกษารูปแบบการหดตัวของชิ้นงานเมื่อใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์
- 1.2.6 เพื่อศึกษาผลกระทบต่อเวลาหล่อเย็นของชิ้นงานเมื่อใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1. ศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์ด้วยโปรแกรม ABAQUS
- 1.3.2. ศึกษาการเกิดความร้อนในเบ้าพิมพ์ด้วยโปรแกรม Cadmould
- 1.3.3. ศึกษารูปแบบการบิดตัวของชิ้นงานเมื่อใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์
- 1.3.4. ศึกษารูปแบบการหดตัวของชิ้นงานเมื่อใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์
- 1.3.5. ศึกษาผลกระทบต่อเวลาหล่อเย็นของชิ้นงานเมื่อใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์
- 1.3.6. สร้างแม่พิมพ์และติดตั้งอุปกรณ์วัดต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบการวิจัย
- 1.3.7. สร้าง Design Guide สำหรับออกแบบแม่พิมพ์แบบใช้ทองแดงฝัง

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1. ได้เทคนิคในการออกแบบแม่พิมพ์โดยการใช้โลหะนำความร้อนสูงเป็นตัวช่วย
- 1.4.2. ได้เทคนิคการออกแบบแม่พิมพ์โดยใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์
- 1.4.3. สามารถลดความยุ่งยากในการออกแบบระบบหล่อเย็นในแม่พิมพ์
- 1.4.4. สามารถลดเวลาต่อวัฏจักรการฉีดลงได้
- 1.4.5. เพิ่มประสิทธิภาพในการฉีดพลาสติกโดยยังรักษาคุณภาพของชิ้นงานไว้ได้

## บทที่ 2

### บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎี

#### 2.1 บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Natraj Iyer [1] ศึกษาเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างอลูมิเนียมผสมกับเหล็กโดยการจำลองการไหลตัวในโปรแกรม C-Mold™ เพื่อใช้ในการหาทำนายการเกิดการยุบตัวและหาเงื่อนไขการฉีดที่เหมาะสม นอกจากนั้นเขายังใช้โปรแกรม ANSYS™ เป็นตัวช่วยในการหาความแข็งแรงของแม่พิมพ์ที่ทำจากอลูมิเนียม ในการทดลองของ Iyer เขาใช้ทั้งการจำลองในคอมพิวเตอร์และการทำแม่พิมพ์จริงเพื่อเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ และเขาพบว่าในแม่พิมพ์ที่ใช้อลูมิเนียมทำเบ้าพิมพ์ จะใช้เวลาหล่อเย็นน้อยกว่าแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กแต่ความแข็งแรงของแม่พิมพ์จะน้อยกว่า ซึ่งในการฉีดจะใช้แรงดันฉีดสูงมากไม่ได้ Mellinger [2] ศึกษาเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อน ระหว่างอลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloy) กับเหล็ก โดยการจำลองในโปรแกรม C-Mold™ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการไหลตัวของพลาสติก และเขาพบว่าการใช้อลูมิเนียมทำเบ้าพิมพ์ สามารถลดเวลาหล่อเย็นในแม่พิมพ์ (Cooling time) ลงได้ Isaias [3] ศึกษาเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อน ระหว่างทองแดงผสม (Copper Alloy) กับเหล็ก โดยการนำทองแดงมาทำเป็นเบ้าพิมพ์โดยตรง และทำการทดลองโดยการทำแม่พิมพ์และทดลองฉีดเพื่อเปรียบเทียบ ซึ่งพบว่าสามารถลดเวลาต่อวัฏจักร (Cycle time) ลงได้ประมาณ 25 % และพบว่าความลึกของรอยยุบตัวในชิ้นงาน (Sink Mark) จะเพิ่มมากขึ้นในแม่พิมพ์ที่ใช้ทองแดงแต่การบิดตัวและโก่งตัว (Warpage) จะลดลง

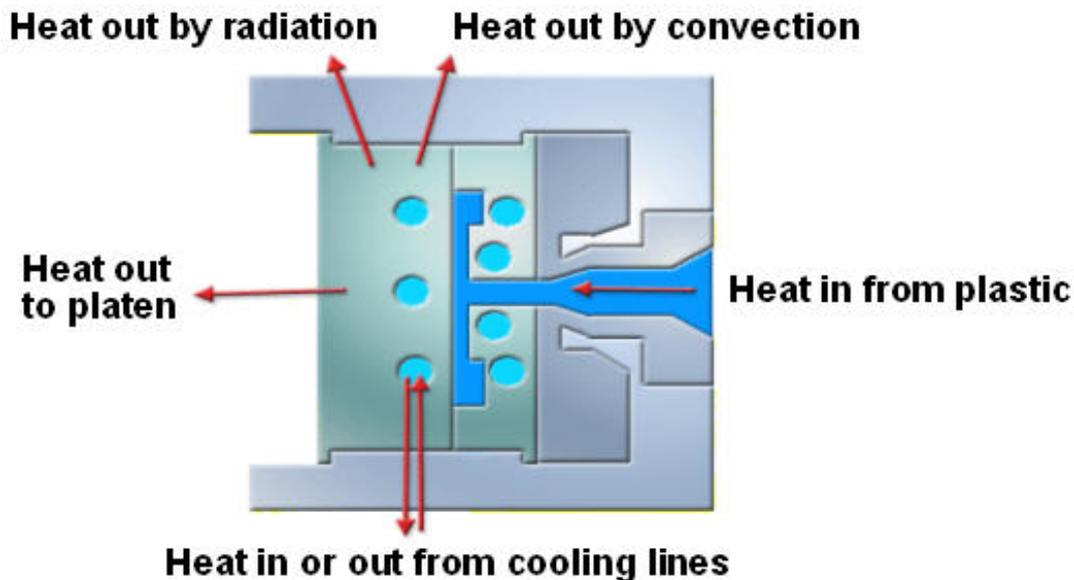
#### 2.2 ระบบการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์

โดยปกติแล้วในการออกแบบแม่พิมพ์ฉีดจะต้องมีการออกแบบระบบหล่อเย็น เพื่อช่วยในการระบายความร้อนออกจากเนื้อพลาสติกที่เข้าสู่เบ้าพิมพ์ในสภาพหลอมเหลว ซึ่งในสภาวะดังกล่าวพลาสติกจะมีอุณหภูมิสูงมาก และต้องใช้เวลามากกว่าจะกลับสู่สภาวะของแข็งอีกครั้งหนึ่ง เราจึงต้องมีการออกแบบระบบหล่อเย็นเพื่อช่วยให้การระบายความร้อนเร็วขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้วจะใช้วิธีการ สร้างรูหรือร่องที่แม่พิมพ์แล้วให้น้ำไหลผ่าน เพื่อให้ความร้อนถ่ายเทจากแม่พิมพ์สู่น้ำที่ใช้หล่อเย็นแต่ในบางครั้งการสร้างระบบหล่อเย็นมักจะประสบกับปัญหา เนื่องจากในแม่พิมพ์ จะประกอบไปด้วยระบบปลดและระบบจับยึดชิ้นส่วนต่าง ๆ มากมาย ทำให้ไม่

สามารถสร้างระบบหล่อเย็นให้เข้าถึงในบางจุดได้ ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสะสมในแม่พิมพ์และเกิดปัญหากับคุณภาพของชิ้นงานตามมา

### 2.2.1 ความร้อนที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์

ความร้อนหลักที่เข้าสู่แม่พิมพ์ จะเกิดจากความร้อนในน้ำพลาสติกเหลว ซึ่งไหลเข้าสู่แม่พิมพ์จากเครื่องฉีดผ่านหัวฉีดเข้ามา

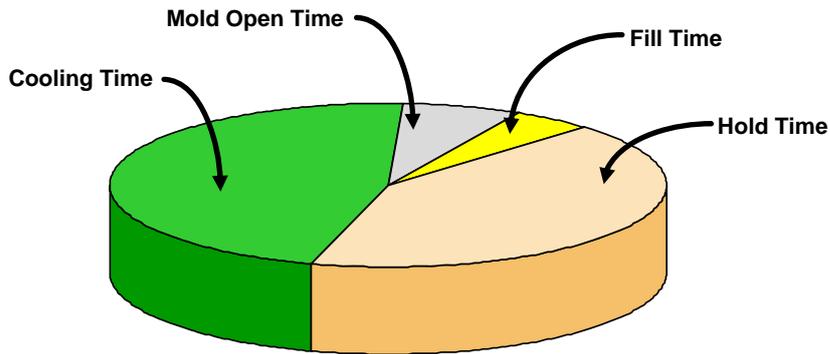


ภาพที่ 2-1 ระบบการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์

และในระหว่างที่น้ำพลาสติกไหลเข้าสู่แม่พิมพ์นั้น ความร้อนจะถูกถ่ายเทออกจากน้ำพลาสติกเข้าสู่แม่พิมพ์ จากนั้นความร้อนในแม่พิมพ์ก็จะถ่ายเทออกโดยผ่านระบบหล่อเย็นเป็นหลักแต่จะมีบางส่วนถูกระบายออกไปยังแผ่นยึดแม่พิมพ์ของเครื่องฉีด และบางส่วนก็จะแพร่ออกไปสู่บรรยากาศแวดล้อม

### 2.2.2 เวลาหล่อเย็น [3,4]

ขบวนการหล่อเย็นในแม่พิมพ์ จะเกิดขึ้นทันทีที่น้ำพลาสติกถูกเติมเข้าสู่แม่พิมพ์เวลาในการหล่อเย็นชิ้นงานโดยปกติจะอยู่ราว ๆ 60 - 70 % ของเวลาต่อวัฏจักร (Cycle time) [3] และเวลาหล่อเย็น ( $t_c$ ) จะเป็นช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มขบวนการดังกล่าวจนกระทั่งทำการเปิดแม่พิมพ์และปลดชิ้นงาน ซึ่งจะต้องรอก่อนว่าอุณหภูมิชิ้นงานลดลงจนถึงอุณหภูมิลดชิ้นงาน ( $t_E$ )



ภาพที่ 2-2 สัดส่วนโดยประมาณของเวลาต่าง ๆ ในวัฏจักรการฉีด

การถ่ายเทความร้อน ระหว่างชิ้นงานพลาสติกและสารหล่อเย็น ผ่านการนำความร้อนในแม่พิมพ์ การนำความร้อนในแม่พิมพ์สามารถอธิบายได้โดยสมการ Fourier differential equation เนื่องจากว่าชิ้นงานพลาสติกโดยทั่วๆ ไป จะมีแค่ 2 มิติหลัก ๆ ( ในกรณีสัดส่วนของความยาวของชิ้นงาน ( $L$ ) ต่อความหนา ( $s$ ) มากกว่า 10 ( $\frac{L}{s} > 10$ ) ) ดังนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทออกจากชิ้นงานเพียงทิศทางเดียว คือทิศทางตามความหนาของชิ้นงาน

ในกรณีที่มีการไหลของความร้อนในทิศทางเดียว สามารถลดรูป Fourier differential equation ได้เป็น [4]

$$\frac{\delta T}{\delta t} = a \frac{\delta^2 T}{\delta x^2} \quad (2-1)$$

$$\text{เมื่อ } a = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (2-2)$$

ซึ่งจะเท่ากับ

$$\frac{T_E - T_W}{T_M - T_W} = \frac{4}{\pi} \cdot e^{-\frac{a \cdot \pi^2}{s^2} t} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{s} \quad (2-3)$$

และในกรณีที่เรากำหนดให้อุณหภูมิของน้ำพลาสติกในเบ้าพิมพ์มีอุณหภูมิคงที่เท่ากับทั้งชิ้นงานจะได้

$$T_E - T_W = \frac{4}{\pi} (T_M - T_W) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \cdot e^{-\frac{a(2n+1)^2 \pi^2 t}{s^2}} \cdot \sin \frac{(2n+1) \pi \cdot x}{s} \quad (2-4)$$

ซึ่งจะเท่ากับ

$$\frac{\bar{T}_E - T_W}{T_M - T_W} = \frac{8}{\pi^2} \cdot e^{-\frac{a \cdot \pi^2}{s^2} \cdot t} \quad (2-5)$$

นำมาคำนวณรวมกับเวลาหล่อเย็นจะได้เป็น

$$\frac{s^2}{\pi^2 \cdot a} \cdot \ln \left( \frac{8}{\pi^2} \frac{T_M - T_W}{\bar{T}_E - T_W} \right) = t_C \quad (2-6)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

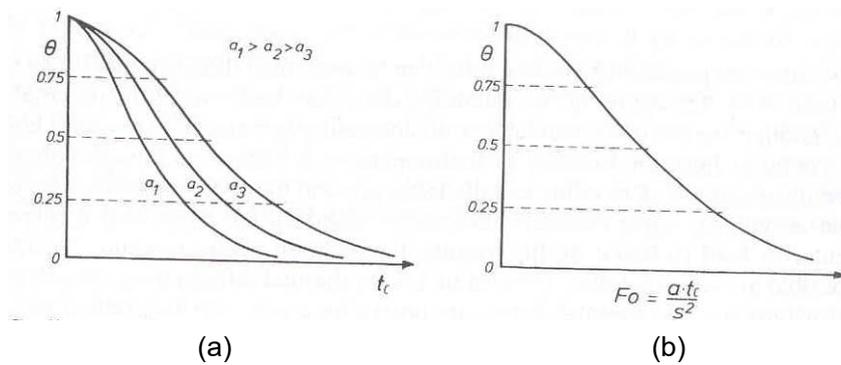
$$\frac{t_C \cdot a}{s^2} = \frac{1}{\pi^2} \cdot \ln \left( \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_M - T_W}{\bar{T}_E - T_W} \right) \quad (2-7)$$

- โดย
- $a$  = ความสามารถในการกระจายความร้อน
  - $t$  = เวลา
  - $t_C$  = เวลาหล่อเย็น
  - $s$  = ความหนาของชิ้นงาน
  - $x$  = ระยะห่างระหว่างชิ้นงานถึงรูหล่อเย็น
  - $\rho$  = ความหนาแน่นของพลาสติกชิ้นงาน
  - $k$  = ค่าการนำความร้อน
  - $c_P$  = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ
  - $T_E$  = อุณหภูมิปลดชิ้นงาน
  - $\bar{T}_E$  = ค่ากลางของอุณหภูมิปลดชิ้นงาน
  - $\hat{T}_E$  = ค่าสูงสุดของอุณหภูมิปลดชิ้นงาน
  - $T_M$  = อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก
  - $T_W$  = อุณหภูมิแม่พิมพ์
  - $\bar{T}_W$  = ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิแม่พิมพ์
  - $\theta$  = อัตราการหล่อเย็น
  - $Fo$  = Fourier Number

สำหรับชิ้นงานที่มีมิติน้อย การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะเกิดภายใต้ขบวนการ

$$\frac{\bar{T}_E - T_W}{T_M - T_W} = \theta \quad (2-8)$$

สมการดังกล่าวเรียกว่าอัตราส่วนเกินของอุณหภูมิซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นค่าอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานได้ดังภาพที่ 2-3



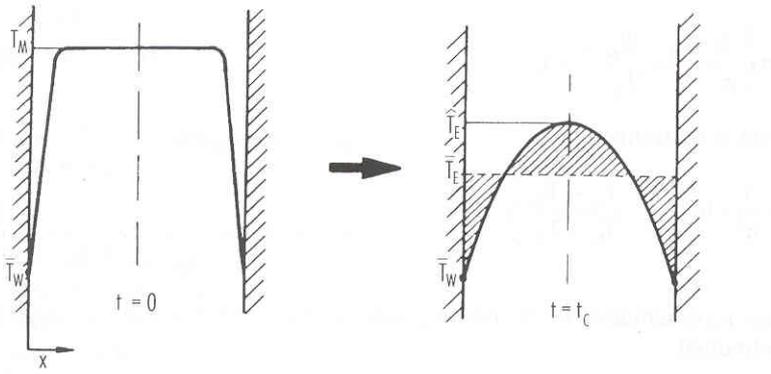
ภาพที่ 2-3 (a) อัตราการหล่อเย็นเทียบกับเวลาหล่อเย็น (b) Fourier Number

Fourier number ของชิ้นงานที่มีมิติน้อยสามารถหาได้จาก

$$\frac{t_c \cdot a}{S^2} = Fo \quad (2-9)$$

ในการกำหนดอุณหภูมิเฉลี่ยของชิ้นงาน สามารถนำอุณหภูมิสูงสุดที่แกนกลางของชิ้นงานตามภาพที่ 2-3 มาใช้ในการคำนวณ ดังนั้นอัตราการหล่อเย็นของชิ้นงานที่มีมิติน้อยจะหาได้จาก

$$\frac{\hat{T}_E - T_W}{T_M - T_W} = \hat{\theta} \quad (2-10)$$



ภาพที่ 2-4 การกระจายของอุณหภูมิในชิ้นงาน

### 2.2.3 การคำนวณเวลาหล่อเย็นของพลาสติกกลุ่มเทอร์โมพลาสติก [4,9]

#### 2.2.3.1 การคำนวณโดยประมาณ

เราสามารถคำนวณหาเวลาหล่อเย็นโดยประมาณได้จากสมการ

$$t_c = c_c \cdot s^2 \quad (2-11)$$

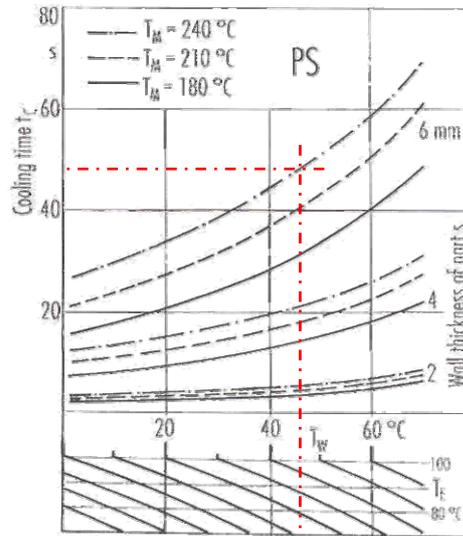
โดย  $c_c = 2 - 3 \text{ (s/mm}^2\text{)}$

$t_c$  = เวลาหล่อเย็น

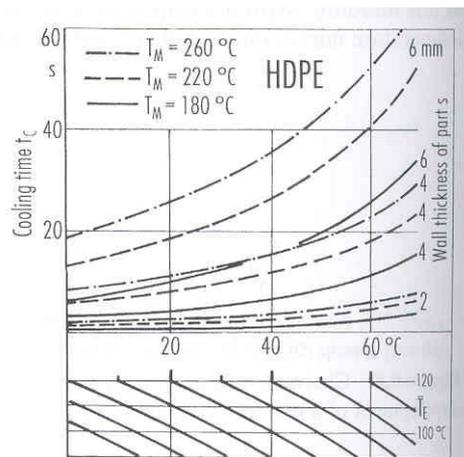
$s$  = ความหนาของผนังชิ้นงาน

#### 2.2.3.2 การคำนวณเวลาหล่อเย็นโดยใช้ Nomograms

Nomograms สำหรับหาเวลาหล่อเย็นสามารถสร้างได้จากคุณสมบัติ ความสามารถในการกระจายความร้อน ของวัสดุชิ้นงานและสามารถสร้างกราฟ หาเวลาหล่อเย็น  $t_c$  โดยใช้ความสัมพันธ์ของ ความหนาชิ้นงาน  $s$  กับอุณหภูมิแม่พิมพ์  $T_w$  และอุณหภูมิปลดชิ้นงาน  $T_E$  ซึ่งจะได้กราฟ ดังตัวอย่างในภาพที่ 2-5 ซึ่งแสดงกราฟ ที่ใช้หาเวลาหล่อเย็น ของพลาสติก Polystyrene (PS) และ ภาพที่ 2-6 แสดงกราฟที่ใช้หาเวลาหล่อเย็นของพลาสติก Polyesterene (HDPE) สำหรับวิธีการใช้งาน เราจะต้องทราบค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ที่จะทำการตั้งที่เครื่องฉีดและความหนาของชิ้นงาน เช่น กำหนดให้ใช้อุณหภูมิแม่พิมพ์  $T_w$  เท่ากับ  $20^\circ\text{C}$  อุณหภูมิปลดชิ้นงาน  $T_E$  เท่ากับ  $80^\circ\text{C}$  อุณหภูมิหลอมเหลวของพลาสติก  $T_M$  เท่ากับ  $240^\circ\text{C}$  ที่ความหนาชิ้นงาน 6 มิลลิเมตรจากนั้นทำการลากเส้นให้ตัดกับค่าต่าง ๆ ตามที่เรากำหนดดังตัวอย่างในภาพที่ 2-4 เส้นสีแดงซึ่งเราจะได้เวลาหล่อเย็นประมาณ 48 วินาที



ภาพที่ 2-5 กราฟ Nomograms หาเวลาหล่อเย็นของพลาสติก Polystyrene (PS)



ภาพที่ 2-6 กราฟ Nomograms หาเวลาหล่อเย็นของพลาสติก Polyesterene (HDPE)

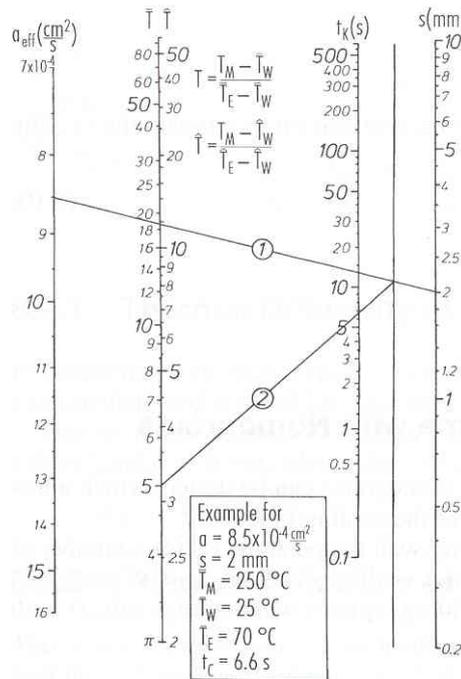
ซึ่งในการสร้างกราฟความสัมพันธ์เราจะใช้กราฟ Nomograms ตามภาพที่ 2-7 คำนวณร่วมกับสมการที่ 2-12 เพื่อสร้างกราฟดังกล่าว

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 \cdot a_{eff}} \cdot \ln \left( \frac{8 T_M - T_W}{\pi^2 T_E - T_W} \right) \quad (2-12)$$

และสำหรับชิ้นงานที่มีรูปทรงเป็นทรงกระบอกจะใช้

$$t_c = \frac{R^2}{\pi^2 \cdot 5 \cdot 8} \cdot \ln \left( 0.7 \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right) \quad (2-13)$$

โดย  $a_{eff}$  = ประสิทธิภาพในการกระจายความร้อน  
 $R$  = รัศมีของชิ้นงาน



ภาพที่ 2-7 แสดงการใช้ Nomogram ในการคำนวณหาเวลาหล่อเย็น

สำหรับค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของพลาสติกสามารถหาได้จากตารางที่ 2-1 [8]

ตารางที่ 2-1 แสดงค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของพลาสติกที่ใช้ในการคำนวณ

ชนิดของพลาสติก	อุณหภูมิหลอมละลาย $t_M$ °C	อุณหภูมิแม่พิมพ์ $t_W$ °C	อุณหภูมิปลดชิ้นงาน $t_E$ °C	ค่าความหนาแน่น $\rho$ g/cm <sup>3</sup>
ABS	200 – 270	50 – 80	60 – 100	1.03
HDPE	200 – 300	40 – 60	60 – 110	0.82
LDPE	170 – 245	20 – 60	50 – 90	0.79
PA 6	235 – 275	60 – 95	70 – 110	1.05
PA 66	260 – 300	60 – 90	80 – 140	1.05

ตารางที่ 2-1 (ต่อ)

ชนิดของพลาสติก	อุณหภูมิหลอมละลาย $t_M$ °C	อุณหภูมิแม่พิมพ์ $t_W$ °C	อุณหภูมิปลดชิ้นงาน $t_E$ °C	ค่าความหนาแน่น $\rho$ $g/cm^3$
POM	190 – 230	40 – 120	90 – 150	1.3
PP	200 – 300	20 – 100	60 – 100	0.83
PS	160 – 280	10 – 80	60 – 100	1.01
PVC แข็ง	150 – 210	20 – 70	60 – 100	1.35
PVC อ่อน	120 – 190	20 – 55	60 – 100	1.23
SAN	200 – 270	40 – 80	60 – 110	1.05
PBTP	230 – 270	30 – 90	80 – 140	1.05
PC	270 – 320	85 – 120	90 – 140	1.14
PMMA	180 – 260	10 – 80	70 – 110	1.14

## 2.3 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิในแม่พิมพ์ [10]

### 2.3.1 ชนิดของหัววัดอุณหภูมิ

หัววัดอุณหภูมิแบ่งออกเป็นหลายประเภท หลายขนาด แต่ละประเภทจะเหมาะกับการวัดที่แตกต่างกัน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานนำไปติดตั้งและใช้งานอย่างไร ในหัวข้อนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะหัววัดที่สามารถนำมาเลือกใช้กับการทดลองได้ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ดังนี้

2.3.1.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) คือ หัววัดที่ทำจากโลหะ 2 ชนิด ที่แตกต่างกัน โดยเชื่อมปลายด้านใดด้านหนึ่งซึ่งจะเป็นด้านที่หัววัดอุณหภูมิเข้าไว้ด้วยกัน ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับเครื่องมืออ่านค่า หรือเครื่องบันทึกอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิลถูกแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ตามการจับคู่ของโลหะแตกต่างกันทำให้มีคุณสมบัติการใช้งานที่หลากหลายตามความเหมาะสมของงานแต่ละประเภท

2.3.1.2 อาร์ทีดี (RTD) คือหัววัดอุณหภูมิที่ใช้หลักการของค่าความต้านทานที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ อาร์ทีดีที่ทำจากแพลตินัม (Platinum) ที่มีค่า  $100\ \Omega$  ที่  $0\ ^\circ C$  หรือนิยมเรียกว่า Pt 100 อาร์ทีดีเป็นหัววัดที่มีความแม่นยำสูง ให้ผลการวัดได้ละเอียดถึง  $0.1\ ^\circ C$  โดยมีค่าความแม่นยำในการอ่านค่าตามมาตรฐาน IEC 75 ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 แสดงระดับชั้นของอาร์ทีดีและค่าความแม่นยำในการอ่าน

ระดับชั้น	ค่าความแม่นยำ	ลักษณะการใช้งาน
Class A	$\pm(0.3 + 0.005t)^\circ C$	งานทั่วไปความแม่นยำสูง
Class B	$\pm(0.15 + 0.002t)^\circ C$	งานที่ต้องการความแม่นยำเป็นพิเศษ
1/10 DIN	$\pm 0.03^\circ C$ ที่ $0^\circ C$	ใช้เป็น standard Probe สำหรับงานสอบเทียบ

## 2.4 ขบวนการฉีดพลาสติก [9]

ก่อนที่จะทำการฉีดพลาสติกเราต้องมาทำความเข้าใจกับพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการฉีดพลาสติก เพื่อที่จะได้แก้ปัญหาค่ที่ซับซ้อนที่อาจเกิดขึ้นกับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ไม่ถูกต้องหรือไม่เหมาะสมกับลักษณะงาน ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานฉีดพลาสติก และมีอิทธิพลต่อเวลาการทำการฉีดนั้นมี 4 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

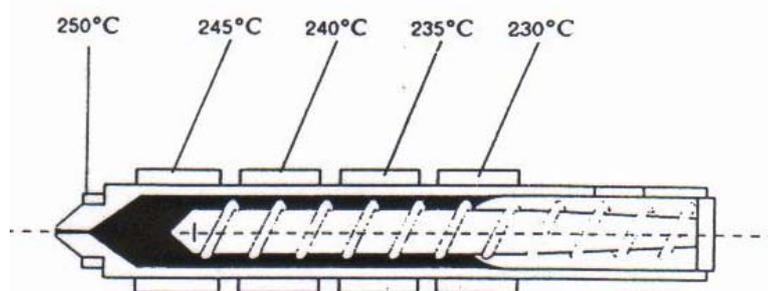
1. อุณหภูมิ (พลาสติกเหลวในแม่พิมพ์)
2. เวลา (ฉีด ย้ำ หล่อเย็น และวงจรการทำงาน)
3. ความดัน (ฉีด ย้ำ ตำแหน่งการถอยของเกลียวหนอน และแม่พิมพ์)
4. ความเร็ว (ฉีด ปิด-เปิดแม่พิมพ์ ชุดเคลื่อนที่เข้า-ออก และรอบเกลียวหนอน)

### 2.4.1 อุณหภูมิพลาสติกเหลว

อุณหภูมิพลาสติกเหลวเป็นอุณหภูมิของพลาสติกที่ออกมาจากหัวฉีดในขณะที่ทำการฉีดไม่ใช้อุณหภูมิที่แผ่นความร้อน แต่ในกรณีที่เราไม่มีเครื่องวัดอุณหภูมิ เราอาจใช้อุณหภูมิของแผ่นความร้อนที่หัวฉีดแทนก็ได้ อุณหภูมิที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกที่ใช้ โดยทั่วไปเราสามารถสอบถามกับบริษัทผู้ผลิตส่วนมากจะบอกเป็นช่วงกว้างๆ เช่น  $230-280^\circ C$

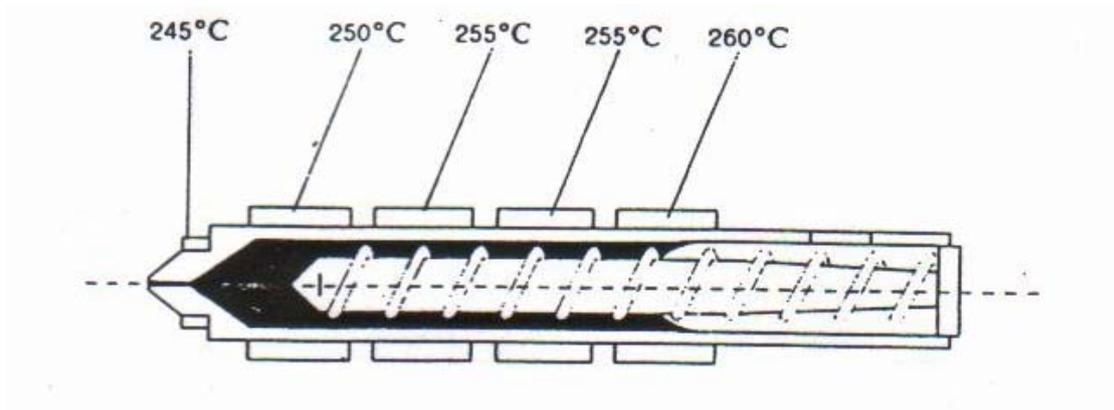
การตั้งอุณหภูมิที่แผ่นความร้อนสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

2.4.1.1 เริ่มจากอุณหภูมิต่ำ และค่อยๆ สูงขึ้น (จากกรวยเติมพลาสติกไปยังหัวฉีด) อุณหภูมิพลาสติกเหลวที่ต้องการ  $250^\circ C$  ดังภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-8 การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากต่ำไปหาสูง

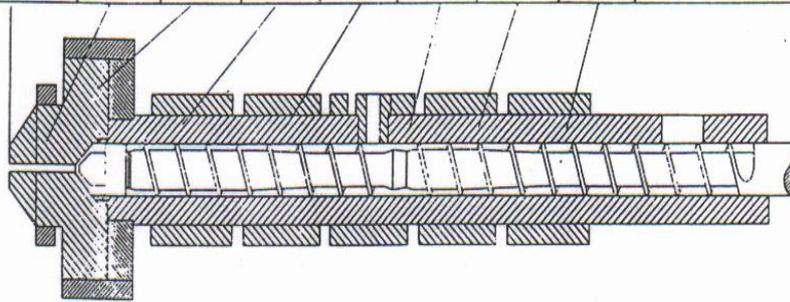
2.4.1.2 เริ่มจากอุณหภูมิสูงแล้วค่อยต่ำลง (จากกรวยเติมพลาสติกไปยังหัวฉีด)  
อุณหภูมิพลาสติกที่ต้องการ  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  วิธีนี้จะช่วยป้องกันพลาสติกตรงตำแหน่งใต้กรวยเติม  
พลาสติกอาจหลอมเหลวจนอุดตันได้ และระวังอย่าให้อุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป โดยเฉพาะที่  
หัวฉีด ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้พลาสติกเหลวอาจจะไหลออกมาที่หัวฉีดได้แต่อุณหภูมิต่ำ  
เกินไปอาจทำให้พลาสติกไม่ไหลออกจากหัวฉีดดังภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-9 การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดจากสูงไปหาต่ำ

การเลือกใช้อุณหภูมิที่แผ่นความร้อนแล้วค่อย ๆ สูงขึ้นนั้น ก็เพื่อป้องกันไม่ให้อุณหภูมิ  
ของพลาสติกเหลวสูงเกินกว่าที่ควรจะเป็น ซึ่งจะทำให้ตัวพลาสติกเสื่อมสภาพได้ เช่น ถ้าเรา  
ต้องการ อุณหภูมิของพลาสติกเหลว  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  เพราะฉะนั้นอุณหภูมิของแผ่นความร้อนที่ช่วงอื่น  
 ๆ ก็ไม่ควรเกิน  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  ส่วนเกลียวหนอนแบบมีช่องใส่ก๊าซ เราสามารถตั้งได้ดังภาพที่ 2-9

อุณหภูมิพลาสติก เหลว (°C)	อุณหภูมิที่กระบอกฉีด (°C)							เทอร์โมพลาสติก
	330	320	310	295	290	300	310	
320-360	330	320	310	295	290	300	310	Apec
260-270	265	265	260	250	230	235	250	Bayblend
260-280	260	250	250	230	240	240	250	Durethan A
240-260	220	230	230	210	220	220	230	Durethan B
260-280	265	265	260	260	255	265	270	Makroblend PR
300-340	300	300	290	280	275	280	300	Makroblend EC
300-315	300	300	290	280	275	280	300	Makrolon
230-245	230	230	230	230	220	225	240	Novodur
230-260	245	245	240	240	230	235	250	Pocan
300-340	330	330	330	300	300	320	300	Tedur



ภาพที่ 2-10 การตั้งอุณหภูมิของกระบอกฉีดของเกลียวหนอนแบบมีช่วงไล่ก้ำซ

#### 2.4.2 อุณหภูมิของแม่พิมพ์

เราสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของน้ำหรือน้ำมันที่ไหลเข้าหมุนเวียนอยู่ในแม่พิมพ์ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ทำการปรับตั้งนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกคือถ้าเป็นพวกอะมอร์ฟัสเทอร์โมพลาสติก (amorphous thermoplastics) เราจะใช้อุณหภูมิต่ำ ส่วนพาร์เชียลคริสตัลไลน์เทอร์โมพลาสติก (partialcrystalline thermoplastics) จะใช้อุณหภูมิสูงกว่า ในกรณีไม่มีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเราก็ต้องอาศัยวิธีการปรับปริมาณและความเร็วของน้ำเข้าหรือออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งต้องใช้ประสบการณ์มาก และต้องใช้เวลามากพอสมควรกว่าจะได้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่คงที่ กล่าวคือถ้าต้องการอุณหภูมิแม่พิมพ์ต่ำเราสามารถเปิดน้ำเข้าแม่พิมพ์ไปพร้อม ๆ กับการฉีดได้เลย แล้วค่อย ๆ ปรับปริมาณและความเร็วของน้ำให้ได้มากขึ้น เพื่อชดเชยอุณหภูมิที่สูงขึ้นเนื่องจากพลาสติกเหลว จนได้อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่ แต่ต้องการอุณหภูมิแม่พิมพ์สูงขึ้นตามที่ต้องการแล้วจึงค่อยเปิดให้น้ำไหลผ่านแม่พิมพ์ แล้วทำการปรับปริมาณและความเร็วของน้ำจนได้อุณหภูมิแม่พิมพ์คงที่

### 2.4.3 เวลาในการฉีด

เวลาในการฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์นั้นเราสามารถจะปรับตั้งค่าได้ตรงที่ตัวเครื่องฉีด เพราะจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของตัวเกลียวหนอน (ความเร็วฉีด) และระยะทางของพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน

### 2.4.4 เวลาในการย้ายการรักษาความดัน

เวลาในช่วงนี้มีบทบาทมากต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดที่ได้ เพราะถ้าใช้เวลาในการย้ายเพื่อรักษาความดันนี้น้อยมากเกินไป ชิ้นงานก็จะเกิดรอยยุบที่ผิวได้ แต่ถ้าใช้นานเกินไปก็อาจเกิดความเค้นภายในชิ้นงานได้

### 2.4.5 เวลาในการหล่อเย็น

เวลาในการหล่อเย็นที่เกิดขึ้นในการฉีดพลาสติกนี้จะมีอยู่ 2 ช่วงคือ ช่วงแรกเป็นเวลาในการหล่อเย็นที่สามารถปรับตั้งให้กับเครื่องได้ ซึ่งเป็นเวลาส่วนใหญ่ที่ใช้ในการฉีดแต่ละครั้งเวลาในการหล่อเย็นเราทำการปรับตั้งจะนานแค่ไหนก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของชิ้นงานที่อยู่ในแม่พิมพ์ที่เราต้องการว่าจะให้มีอุณหภูมิเท่าไร หรือลดลงพอที่จะเปิดแม่พิมพ์เพื่อปลดชิ้นงานออกโดยไม่เสียรูปทรงได้ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวแม่พิมพ์เองและความหนาของชิ้นงานส่วนเวลาในการหล่อเย็นช่วงที่สองเป็นเวลาในการหล่อเย็นทั้งวงจรคือ เป็นเวลาในการลดอุณหภูมิทั้งหมดของชิ้นงานตั้งแต่เริ่มฉีดพลาสติกเหลวเข้าแม่พิมพ์ ทำการย้ายรักษาความดันและรวมกันเวลาในการหล่อเย็นที่ปรับตั้งจนกระทั่งแม่พิมพ์เริ่มเปิด

### 2.4.6 เวลาการทำงานทั้งวงจร

เวลาการทำงานทั้งวงจรเป็นเวลารวมที่ใช้ทั้งหมด ตั้งแต่แม่พิมพ์เริ่มเคลื่อนที่เข้าและปิดจนกระทั่งเสร็จสิ้นการปลดชิ้นงาน ออกจากแม่พิมพ์เวลาส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับเวลาในการย้ายรักษาความดันและเวลาในการหล่อเย็นที่ปรับตั้ง การคิดคำนวณราคางานฉีดก็จะใช้เวลาในการทำงานทั้งวงจรนี้เป็นแฟกเตอร์ตัวหนึ่งเหมือนกัน

### 2.4.7 ความดันฉีด

ความดันฉีดเป็นความดันที่เกิดขึ้นกับพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน โดยการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเกลียวหนอน เนื่องจากความดันของน้ำมันไฮดรอลิกที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบไฮดรอลิก ความดันนี้เองที่เป็นตัวทำให้พลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนเคลื่อนที่เข้าแม่พิมพ์ และจะไหลเข้าเต็มแม่พิมพ์หรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับความดันฉีดนี้เหมือนกัน ความดันนี้สามารถปรับได้โดยตรงที่ความดันของน้ำมันไฮดรอลิก

### 2.4.8 ความดันย้าย

ความดันย้ายเป็นความดันที่เกิดขึ้นกับพลาสติกเหลว ที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอน เหมือนกับความดันฉีดทุกประการ แต่แตกต่างกันที่ขนาดของความดันย้ายนี้จะน้อยกว่าโดยทั่ว ๆ ไปเราจะใช้ประมาณ 30-70 %ของความดันฉีด (ความดันของพลาสติกเหลวหน้าปลายเกลียว

หนอนที่ปรับตั้ง) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกด้วย เช่น การหดตัว ความเค้นภายใน น้ำหนักของชิ้นงาน

#### 2.4.9 ความดันด้านการถอยหลังกลับของเกลียวหนอน

ความดันด้านการถอยหลังกลับของเกลียวหนอนเป็นความดัน ที่เกิดขึ้นตรงตำแหน่งด้านท้ายเกลียวหนอน เนื่องจากความดันของน้ำมันไฮดรอลิกเหมือนกับความดันฉีดและย้ำ เพื่อด้านการถอยหลังกลับของเกลียวหนอน เนื่องจากความดันที่เกิดขึ้นของพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนถอยหลังกลับอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งจะเป็นผลดีต่อการหลอมเหลวและการผสมกันของวัสดุพลาสติก โดยเฉพาะพลาสติกที่ต้องมีการผสมสารสี (pigment) ลงไปด้วยแล้วก็เป็นจำเป็นอย่างยิ่ง ที่ต้องมีความดันนี้ช่วยเพื่อให้การกระจายตัวของสีอย่างสม่ำเสมอ แต่ถ้าเป็นการฉีดชิ้นงานที่ไม่ต้องการคุณภาพมากนัก หรือเป็นการฉีดโดยใช้เกลียวหนอนแบบมีช่วงไล่ก๊าซอาจไม่จำเป็นต้องใช้ความดันนี้หรือใช้ค่าต่ำๆก็ได้ เพื่อให้การทำงานเร็วขึ้นหรือเพื่อไม่ให้พลาสติกเหลวไหลออกมาจากกระบอกฉีดตรงตำแหน่งไล่ก๊าซ ความดันนี้โดยปกติใช้ประมาณ 50-150 บาร์(ความดันท้ายของเกลียวหนอน) หรือ 5-15 บาร์ (ความดันไฮดรอลิก)

#### 2.4.10 ความดันในแม่พิมพ์

ความดันในแม่พิมพ์เป็นความดันที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ เนื่องจากการไหลของพลาสติกเหลวเข้าสู่แม่พิมพ์เนื่องจากความดันฉีด ความดันนี้จะมีค่าสูงสุดเมื่อพลาสติกเริ่มเต็มแบบและเป็นตัวก่อให้เกิดแรงกระทำภายในแม่พิมพ์ทำให้แม่พิมพ์เผยออก

#### 2.4.11 ความดันในการค้ำหัวฉีดไว้ที่แม่พิมพ์

ความดันในการค้ำหัวฉีดไว้ที่แม่พิมพ์นี้ก็คอยต้านแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการฉีด ถ้าแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากความดันนี้น้อยกว่าแรงที่เกิดขึ้นจากความดันฉีด พลาสติกเหลวก็มีโอกาสทะลักออกมาที่หัวฉีดได้แทนที่จะเข้าไปในแม่พิมพ์

#### 2.4.12 ความเร็วในการฉีด

ความเร็วในการฉีดเป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ตามแนวแกนของเกลียวหนอน เพื่อดันพลาสติกเหลวที่อยู่หน้าปลายเกลียวหนอนให้ไหลเข้าแม่พิมพ์ ต้นกำลังขับเคลื่อนก็ได้มาจากไฮดรอลิก ความเร็วในการฉีดจะเกิดควบคู่ไปกับความดันฉีดเพราะต้นกำลังขับเคลื่อนมาจากร่วมกัน ความเร็วในการฉีดจะเป็นตัวควบคุมความดันฉีด คือถ้าเราใช้ความเร็วฉีดสูงขึ้นความดันฉีดก็จะมากขึ้นตามแต่จะไม่เกินค่าสูงสุดที่เราให้ไว้กับเครื่อง เครื่องฉีดเก่าจะมีความดันเดียวแต่ถ้าเป็นแบบใหม่จะปรับได้มากกว่า 10 ชั้นความเร็ว

#### 2.4.13 ความเร็วในการเปิด-ปิดแม่พิมพ์

เวลาในการทำงานทั้งวงจรจะมากหรือน้อย ก็ขึ้นอยู่กับความเร็วในการเปิด-ปิดแม่พิมพ์ เหมือนกับความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์จะไม่ค่อยมีผลมากนักต่อแม่พิมพ์ (ยกเว้นแม่พิมพ์จะต้องค่อยๆ เปิดมิฉะนั้นผิวชิ้นงานจะถูกครูดเป็นรอย ส่วนความเร็วในการปิดแม่พิมพ์ต้องคอยระวังอย่าให้สูงเกินไปเมื่อแม่พิมพ์เริ่มจะปิด เพราะจะเกิดการกระแทกกันได้ระหว่างแม่พิมพ์ ทำให้

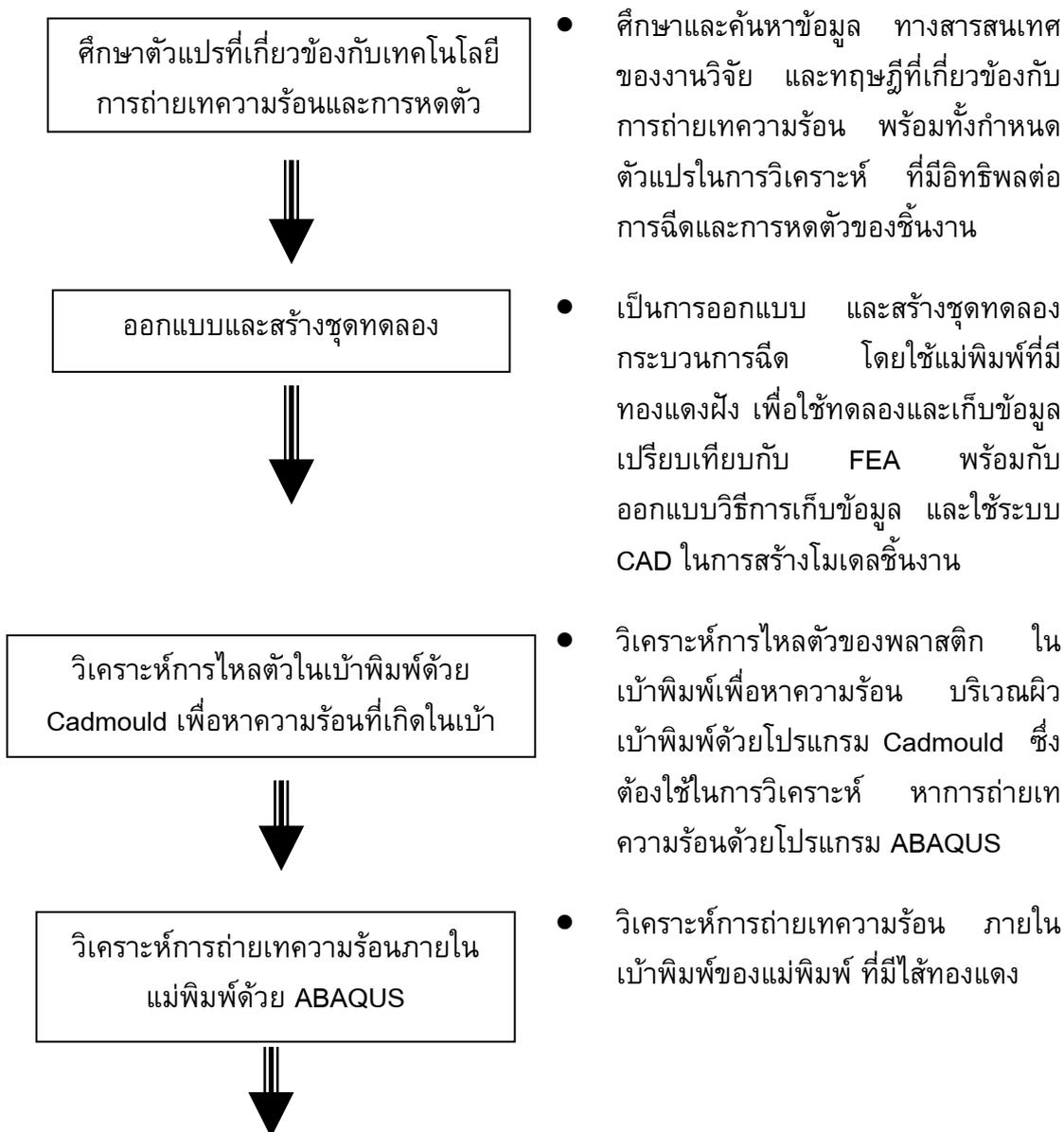
แม่พิมพ์เสื่อมสภาพเร็วเกิดการเสียหายได้ ความเร็วในการเปิด-ปิดแม่พิมพ์โดยทั่วไปจะมีอยู่ 3 ชั้นความเร็วสำหรับเครื่องฉีดแบบใหม่ และจะมีช่วงป้องกันแม่พิมพ์เข้าปิดได้ ในกรณีที่ชิ้นงานเกิดค้างติดอยู่ในแม่พิมพ์ โดยเฉพาะชิ้นงานพลาสติกที่แข็งซึ่งถ้าเราใช้ความดันในการเลื่อนแม่พิมพ์เข้า-ปิด สูงโดยมีชิ้นงานที่ค้างอยู่ อาจเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงต้องใช้ความเร็วและช้าในขณะที่แม่พิมพ์เริ่มปิดและเริ่มเปิด

#### 2.4.14 ความเร็วในการเลื่อนเข้า-ออกของชุดฉีด

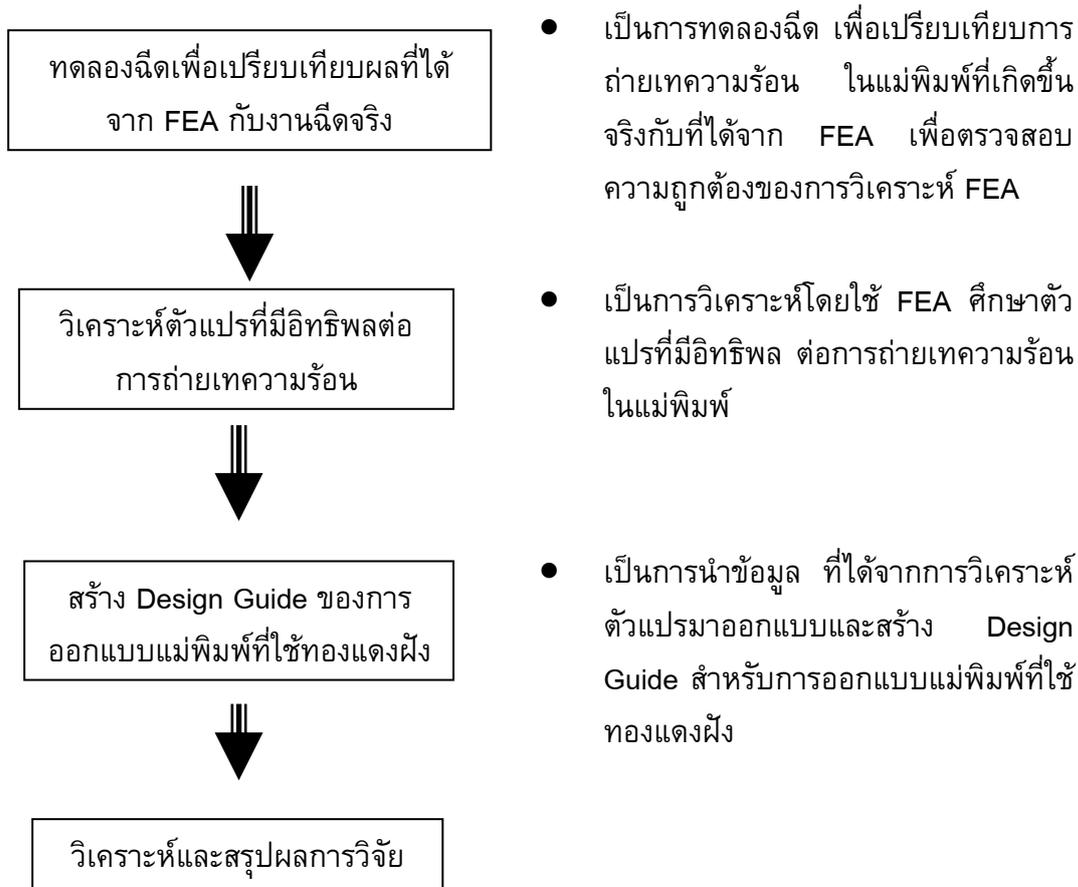
ความเร็วนี้ควรจะเหมาะสมอย่าให้เร็วเกินไป โดยเฉพาะความเร็วในการเลื่อนเข้าเพราะจะเกิดการกระแทกของหัวฉีดกับแม่พิมพ์ ทำให้เกิดความเสียหายได้ ทั้งที่ตัวแม่พิมพ์หรือหัวฉีดความเร็วนี้จะขึ้นอยู่กับระยะทางด้วย ถ้าระยะทางที่เครื่องฉีดต้องถอยหลังกลับมากก็ต้องใช้ความเร็วสูงเพื่อให้ระยะเวลาในการทำงานสั้นลง เพราะฉะนั้นระยะทางที่ใช้ในการเลื่อนชุดฉีดเข้า-ออก นั้นจึงควรใช้ประมาณ 5-10 mm. ก็พอ

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การออกแบบวิธีดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 3-1 วิธีดำเนินงานวิจัย



ภาพที่ 3-1 (ต่อ)

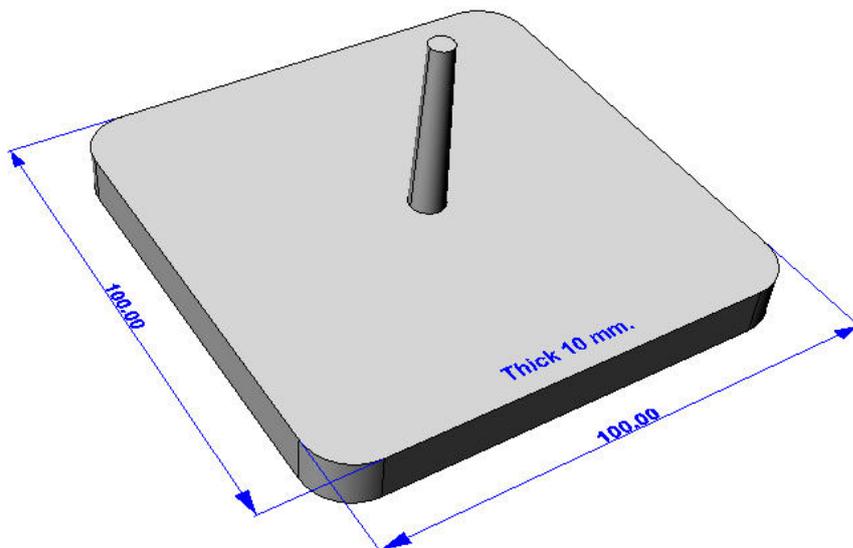
### 3.2 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ชุดทดลอง

เนื่องจากว่าในงานวิจัยนี้ ได้ใช้วิธีวิเคราะห์หาค่าการถ่ายเทความร้อน โดยใช้โปรแกรมทาง ไฟไนต์อีลิเมนต์เป็นตัวช่วยในการจำลอง การเกิดการถ่ายเทความร้อน ซึ่งจะช่วยให้สามารถทำงานวิจัยได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว ดังนั้นเราจึงต้องมีการทดลองเปรียบเทียบผลวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรมจำลองกับผลที่เกิดขึ้นจริงในแม่พิมพ์ เพื่อทดสอบค่าตัวแปรต่าง ๆ และเงื่อนไข ที่ใช้ในการวิเคราะห์ว่าถูกต้องกับงานจริงหรือไม่

#### 3.2.1 การออกแบบชิ้นงานสำหรับการทดลอง

ในการทดลองเพื่อทดสอบค่าตัวแปรเราใช้วิธีติดตั้งตัววัดอุณหภูมิเข้าไปในแม่พิมพ์ โดยเลือกตัววัดเป็นชนิด อาร์ทีดี พีที 100 ซึ่งมีความสามารถในการอ่านค่าได้แม่นยำสูง แต่ถึงอย่างไรในการรับค่าความร้อนจากชิ้นงานหรือจากแม่พิมพ์ จำเป็นต้องใช้เวลาในการรับสัญญาณนานพอสมควร จึงจะวัดค่าความร้อนที่เกิดขึ้นได้อย่างแม่นยำ เนื่องจากความไวของตัววัดอุณหภูมิมีขีดจำกัด เราจึงต้องออกแบบชิ้นงานทดลอง ให้มีขนาดใหญ่และหนาพอสมควร

เพราะชิ้นงานที่หนาและมีขนาดใหญ่ จะใช้เวลาการกระจายอุณหภูมินาน กว่าชิ้นงานขนาดเล็ก ทำให้ตัววัดอุณหภูมิ มีเวลาในการรับความร้อนจากชิ้นงานและแม่พิมพ์นานพอที่จะอ่านค่าได้ ดังนั้นเราจึงสร้างชิ้นงานด้วยโปรแกรม CAD เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100x100 หนา 10 ม.ม. ดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 รูปร่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองและออกแบบแม่พิมพ์

### 3.2.2 การสอบเทียบและตรวจสอบความไวของหัววัดอุณหภูมิ

หัววัดอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ได้ผ่านการตรวจสอบคุณภาพและสอบเทียบผลการวัดอุณหภูมิจากโรงงานผู้ผลิตมาเรียบร้อยแล้ว และจากการการตรวจสอบเราพบว่า หัววัดอุณหภูมิมีคุณสมบัติและความสามารถดังนี้

ตารางที่ 3-1 ค่าคุณสมบัติและความสามารถของหัววัด

คุณสมบัติ	ค่าความสามารถ
ค่าความแม่นยำ	$\pm 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
ค่าความละเอียดในการอ่าน	$0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Sensitive)	ช่วงเพิ่มอุณหภูมิ $\sim 0.8 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ ช่วงลดอุณหภูมิ $\sim 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{sec}$

จากค่าคุณสมบัติในตารางที่ 3-1 จะพบว่าหัววัดอุณหภูมิก่อนข้างมีขีดจำกัดในเรื่องความไวในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ แต่เนื่องจากหัววัดตัวนี้เป็นหัววัดอุณหภูมิที่มีความไวที่สุดที่สามารถติดตั้งในแม่พิมพ์ และสามารถหาซื้อได้ในราคาที่ไม่สูงมากนัก ดังนั้นเราจึงต้องทำการทดลองกับหัววัดตัวนี้ โดยต้องทำการฉีดชิ้นงาน และวัดค่าความร้อนซ้ำหลาย ๆ รอบเพื่อให้

อุณหภูมิในแม่พิมพ์มีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด จากนั้นเราจะต้องทำการชดเชยค่าอุณหภูมิที่เกิดจากความชื้นของหัววัดอุณหภูมิ โดยเราใช้ขั้นตอนและวิธีการคิดค่าชดเชยดังนี้

1. หาช่วงแตกต่างของอุณหภูมิ ที่จะทำการวัด โดยนำค่าอุณหภูมิผิด ลบกับอุณหภูมิแม่พิมพ์ จะได้เท่ากับ  $240 - 30 = 210^{\circ}\text{C}$  นั้นหมายความว่าหัววัดอุณหภูมิจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่า จาก  $30^{\circ}\text{C} - 240^{\circ}\text{C}$

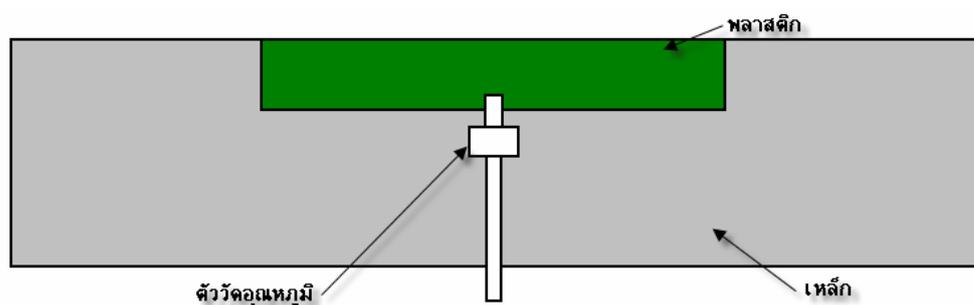
2. หาเวลาที่หัววัดจะต้องใช้ในการเปลี่ยนแปลงค่าจาก  $30^{\circ}\text{C} - 240^{\circ}\text{C}$  โดยนำค่าช่วงความแตกต่างหารด้วยความไวของหัววัด ซึ่งเราจะใช้เฉพาะช่วงเพิ่มอุณหภูมิ จะได้เท่ากับ  $210 \div 0.8 = 262.5$  วินาที นั้นหมายความว่า หัววัดต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงค่าจาก  $30^{\circ}\text{C} - 240^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 262.5 วินาที

3. หาช่วงเวลาที่เกิดความแตกต่าง โดยนำค่าเวลาที่ได้ในข้อ 2. มาลบกับช่วงเวลาที่ทำการวัดนั้นก็คือ 180 วินาที สำหรับแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กอย่างเดียวและ 160 วินาทีสำหรับแม่พิมพ์ที่มีทองแดงฝังเนื่องจากแม่พิมพ์ที่ฝังทองแดงจะมีการลดของอุณหภูมิเร็วกว่า ซึ่งเราจะได้อีกเท่ากับ  $262.5 - 180 = 82.5$  วินาที และ  $262.5 - 160 = 102.5$  วินาที

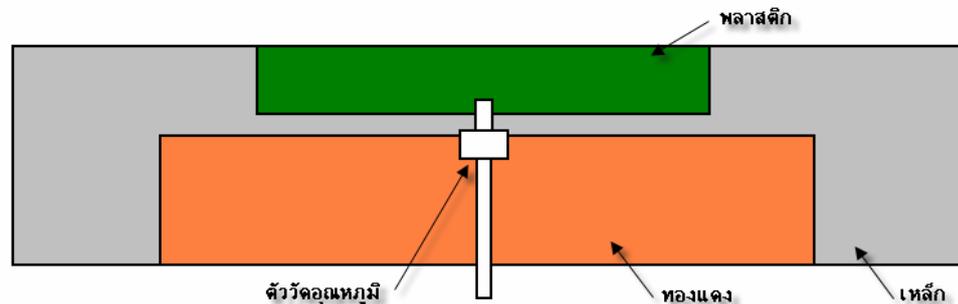
4. หาค่าที่ต้องทำการชดเชย โดยนำค่าเวลาที่แตกต่างในข้อ 3. มาคูณกับค่าความไวจะได้เท่ากับ  $82.5 \times 0.8 = 66^{\circ}\text{C}$  และ  $102.5 \times 0.8 = 82^{\circ}\text{C}$  นั้นหมายความว่าเราจะต้องทำการชดเชยค่าประมาณ  $66^{\circ}\text{C}$  สำหรับแม่พิมพ์ที่ใช้เหล็กอย่างเดียวและ  $82^{\circ}\text{C}$  สำหรับแม่พิมพ์ที่ใช้ทองแดงฝัง

### 3.2.3 การออกแบบและสร้างแม่พิมพ์

ในการทดลองเราจะสร้างแม่พิมพ์ ขึ้นมา 2 แบบ คือแบบที่ฝังทองแดงในแม่พิมพ์และไม่ฝังทองแดง และจะทำการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิตามภาพที่ 3-3 และ ภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-3 การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิที่แม่พิมพ์แบบไม่ฝังทองแดง



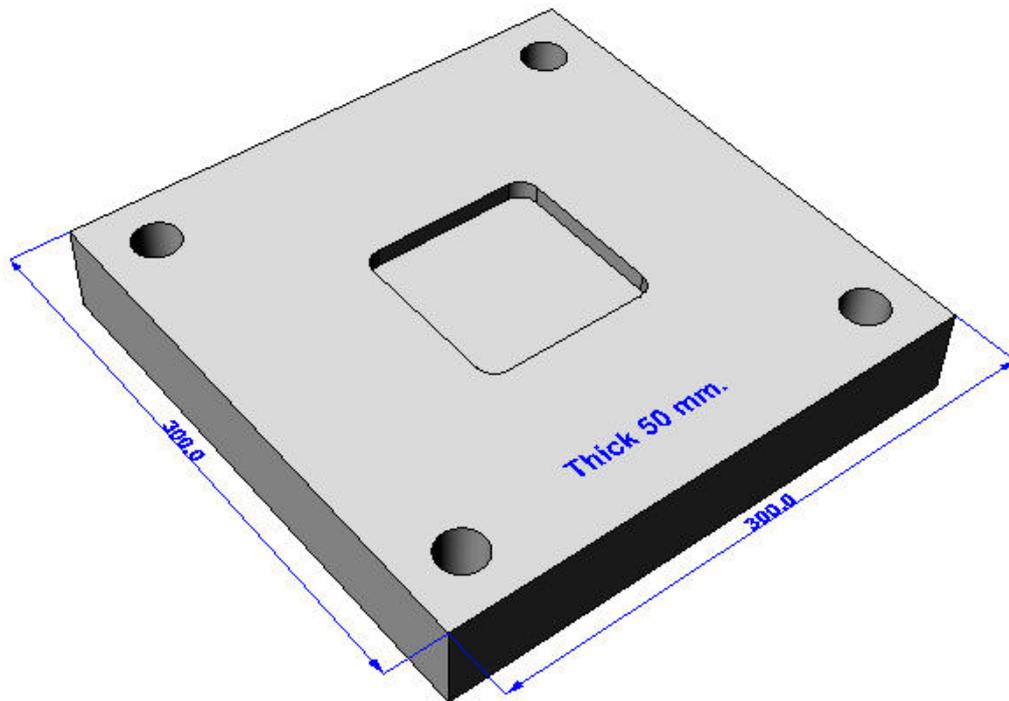
ภาพที่ 3-4 การติดตั้งตัวอุดหนุมิที่แม่พิมพ์แบบฝังทองแดง

โดยเหล็กที่ใช้ทำแม่พิมพ์จะเป็นเกรด P20 และทองแดงที่ใช้จะเป็น Pure copper ซึ่งมีคุณสมบัติดังในตารางที่ 3-2

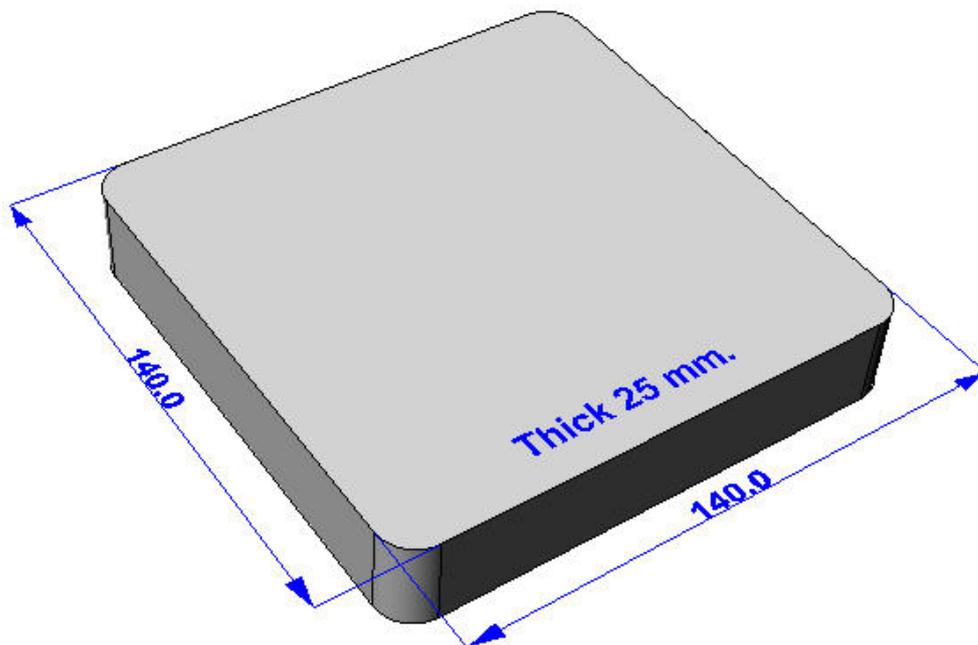
ตารางที่ 3-2 คุณสมบัติของทองแดงและเหล็กที่ใช้ในการทดลอง

Material	Thermal Expansion 1/°C	Specific Heat J/Kg-°C	Thermal Conductivity W/m-°C	Density g/cm <sup>3</sup>
Tool Steel P-20	1.2e-005	460	29	7.8
Copper (PURE)	1.7e-005	383	385.8	8.96

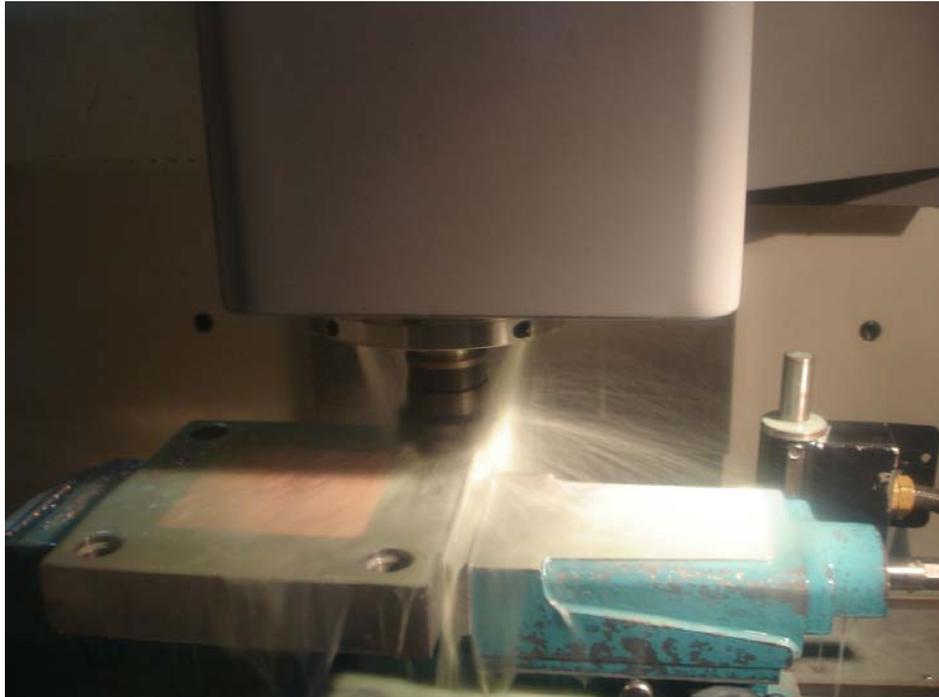
หลังจากออกแบบการติดตั้งตัวอุดหนุมิ เราจะทำการออกแบบแม่พิมพ์ในโปรแกรม CAD แล้วจึงดำเนินการสร้างแม่พิมพ์และติดตั้งตัวอุดหนุมิตามที่ได้ออกแบบไว้



ภาพที่ 3-5 แผ่นแม่พิมพ์ที่ออกแบบในโปรแกรมCAD



ภาพที่ 3-6 แผ่นทองแดงที่ออกแบบในโปรแกรมCAD



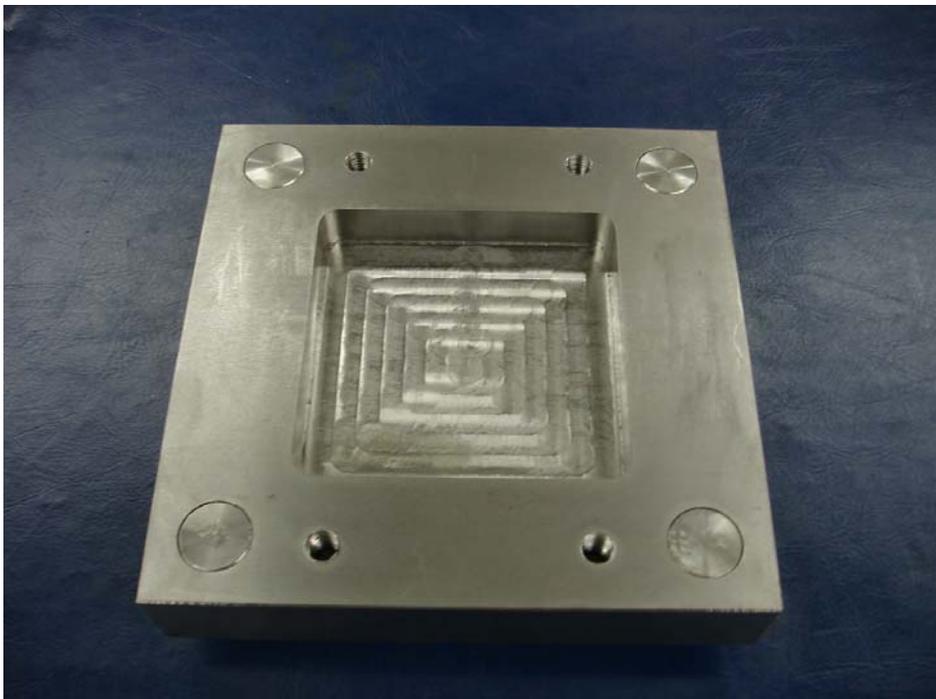
ภาพที่ 3-7 การสร้างแผ่นแม่พิมพ์ด้วยเครื่อง CNC



ภาพที่ 3-8 เครื่อง CNC ที่ใช้ในการสร้างแม่พิมพ์



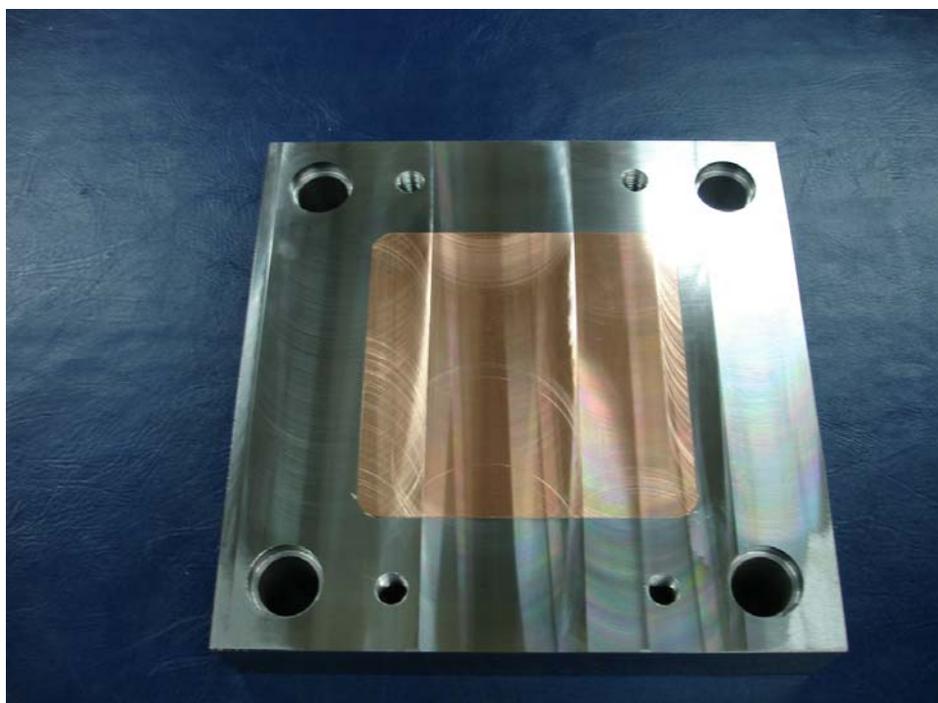
ภาพที่ 3-9 แผ่นแม่พิมพ์และเบ้าพิมพ์ที่ได้จากการขึ้นรูป



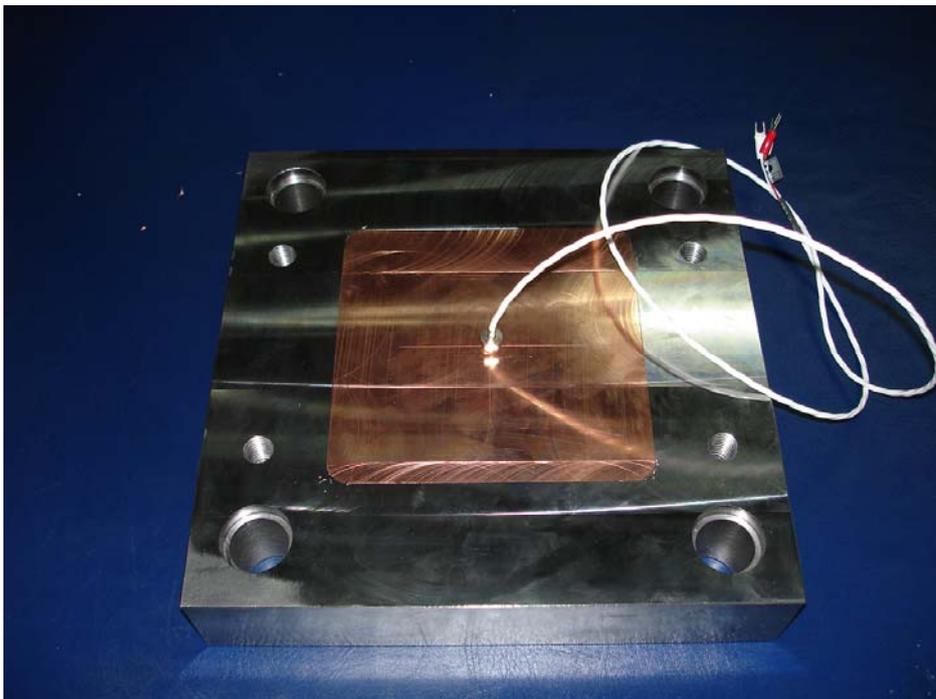
ภาพที่ 3-10 แผ่นแม่พิมพ์และเบ้าสำหรับฝังทองแดง



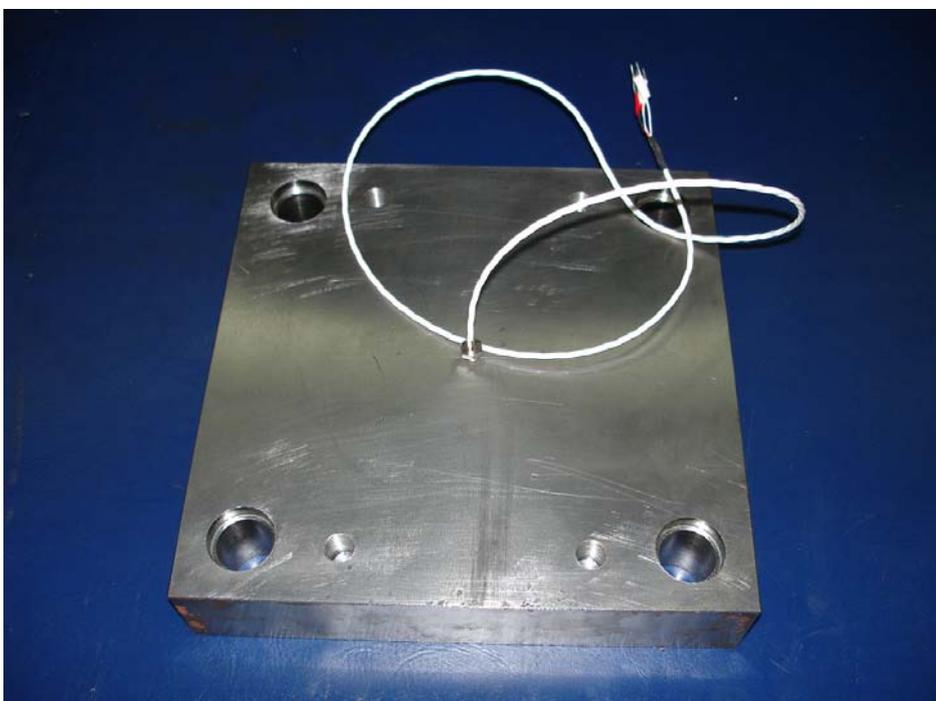
ภาพที่ 3-11 แผ่นทองแดงสำหรับฝังในแม่พิมพ์



ภาพที่ 3-12 แผ่นแม่พิมพ์ที่ทำการฝังทองแดงแล้ว



ภาพที่ 3-13 การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิในแม่พิมพ์ที่ฝังทองแดง



ภาพที่ 3-14 การติดตั้งตัววัดอุณหภูมิในแม่พิมพ์ที่ไม่ฝังทองแดง



ภาพที่ 3-15 ตัววัดอุณหภูมิและอุปกรณ์อ่านค่า



ภาพที่ 3-16 แม่พิมพ์ที่ประกอบเสร็จพร้อมขึ้นทดลองฉีด

### 3.2.4 การวิเคราะห์หาพฤติกรรมกรรมการถ่ายเทความร้อนในแม่พิมพ์ฉีด

#### 3.2.4.1 การวิเคราะห์หาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นงานขณะทำการฉีด

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ หาค่าความร้อน ที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ โดยใช้โปรแกรม Cadmould ซึ่งเป็นโปรแกรมทางไฟไนต์อีลิเมนต์ สำหรับวิเคราะห์จำลองการฉีดพลาสติก โดยเราต้องกำหนดเงื่อนไขสภาวะการฉีดให้ตรงกับที่เราจะใช้ในการฉีดจริง ซึ่งมีขั้นตอนในการทำงานดังนี้

#### การกำหนดสภาวะเงื่อนไขการฉีด

ในการวิเคราะห์หาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นในชั้นงานเราต้องกำหนดค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ ดังนี้

#### ชนิดของพลาสติกที่ใช้

ในการทดลองเพื่อทดสอบค่าตัวแปร ผู้วิจัยได้เลือกใช้พลาสติก Polypropylene (PP) ในการวิเคราะห์เนื่องจากมีราคาถูกและหาได้ง่าย ซึ่งทำให้ง่ายต่อการทดลองฉีดจริง และพลาสติกดังกล่าวมีค่าแนะนำในการฉีดตั้งตารางที่ 3-3 และเนื่องจากชั้นงานมีความหนาพอสมควรเราจะทำการเลือกใช้อุณหภูมิหลอมละลายและอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่ไม่สูงมากนัก แต่ถ้าหากใช้ต่ำมากก็อาจจะทำให้การวัดค่าด้วยหัววัดทำได้ยาก ขึ้นเนื่องจากหัววัดมีความเร็วในการตอบสนองต่ออุณหภูมิค่อนข้างจำกัด

#### ตารางที่ 3-3 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์

ค่าตัวแปร	ค่าแนะนำ	ค่าที่เลือกใช้
อุณหภูมิหลอมละลาย	200 – 300 °C	240 °C
อุณหภูมิแม่พิมพ์	20 – 100 °C	30 °C
อุณหภูมิปลดชั้นงาน	60 – 100 °C	70 °C
อุณหภูมิไม่ไหลตัว	150 °C	

#### ค่าตัวแปรเงื่อนไขการฉีด

ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Cadmould ต้องใช้ตัวแปรที่เกี่ยวกับงานฉีด เช่นเวลาฉีด เวลาฉีดย้าและแรงดันฉีดเป็นต้น ซึ่งเราสามารถกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ได้โดยอาศัยข้อมูลเครื่องฉีดและปริมาตรของชั้นงานเป็นตัวช่วยคำนวณ ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้เครื่องฉีดยี่ห้อ ENGEL ขนาด 50 ตัน ซึ่งมีข้อมูลโดยสังเขปดังนี้

ตารางที่ 3-4 ค่าคุณสมบัติของเครื่องฉีด

รายละเอียด	ขนาด	หน่วย
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกระบอกฉีด	30	mm
ความยาวกระบอกฉีด	140	mm
ปริมาตรการฉีดสูงสุด	98	cm <sup>3</sup>
ความเร็วฉีดสูงสุด	133	cm <sup>3</sup> /s
แรงดันฉีดสูงสุด	2200	bar
แรงปิดแม่พิมพ์สูงสุด	500	kN

ข้อมูลที่จำเป็นต่อการคำนวณอีกอย่างคือข้อมูลเกี่ยวกับชิ้นงานที่ทำการฉีดซึ่งมีค่าต่างๆ ที่ต้องใช้ดังนี้

ปริมาตรการฉีด

โดยปกติปริมาตรการฉีดในแต่ละครั้งจะเท่ากับ ปริมาตรของชิ้นงาน + ปริมาตรระบบป้อน ซึ่งเราสามารถหาปริมาตรของชิ้นงานและระบบป้อนได้จากการตรวจสอบในโปรแกรม CAD ซึ่งได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้

$$\text{ปริมาตรของชิ้นงาน} = 99.14 \text{ cm}^3$$

$$\text{ปริมาตรระบบป้อน} = 0.38 \text{ cm}^3$$

$$\text{ดังนั้นเราจะได้ปริมาตรการฉีดเท่ากับ } 99.14 + 0.38 = 99.52 \text{ cm}^3$$

ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวจะนำมาคำนวณหาและกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

เวลาฉีด

เราหาเวลาฉีดได้จากสูตร 
$$Ti = \frac{V}{\dot{V}} \quad (3-1)$$

เมื่อ

$$Ti = \text{เวลาฉีด sec}$$

$$V = \text{ปริมาตรฉีด Cm}^3$$

$$\dot{V} = \text{ความเร็วฉีด Cm}^3/\text{sec}$$

จากตารางที่ 3-3 จะให้ค่า ความเร็วฉีดสูงสุดมาเท่ากับ 133 Cm<sup>3</sup>/sec แต่เนื่องจากว่าชิ้นงานของเรามีความหนามากเราจึงจะใช้ความเร็วฉีดที่ประมาณ 80% ของความเร็วฉีดสูงสุด ดังนั้น

$$\dot{V} = 133 \times 0.8 = 106.4 \text{ Cm}^3/\text{sec}$$

และเมื่อนำมาแทนค่าในสมการ 3-1 จะได้

$$Ti = \frac{99.52}{106.4} = 0.93 \text{ (sec)}$$

เวลาฉีดย้า

โดยปกติเวลาฉีดย้าจะเท่ากับเวลาที่ทางเข้าของระบบป้อน (Gate) เย็นตัวจนพลาสติกไม่สามารถเติมเข้าสู่เบ้าพิมพ์ได้ ซึ่งก็คือเมื่ออุณหภูมิของชิ้นงานลดลงจนถึงอุณหภูมิไม่ไหลตัว (No flow Temp.) สำหรับพลาสติก PP อุณหภูมิไม่ไหลตัวจะเท่ากับ  $150^{\circ}\text{C}$  ดังในตาราง 3-2 ดังนั้นเราสามารถนำสมการที่ 2-13 ซึ่งเป็นสมการคำนวณหาเวลาหล่อเย็น สำหรับงานทรงกระบอก มาคำนวณหาเวลาฉีดย้าได้ โดยเปลี่ยนจากอุณหภูมิปลดชิ้นงานเป็นอุณหภูมิไม่ไหลตัวแทน ดังต่อไปนี้

$$\text{จากสูตร } t_c = \frac{R^2}{\pi^2 \cdot 5 \cdot 8} \cdot \ln \left( 0.7 \frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right)$$

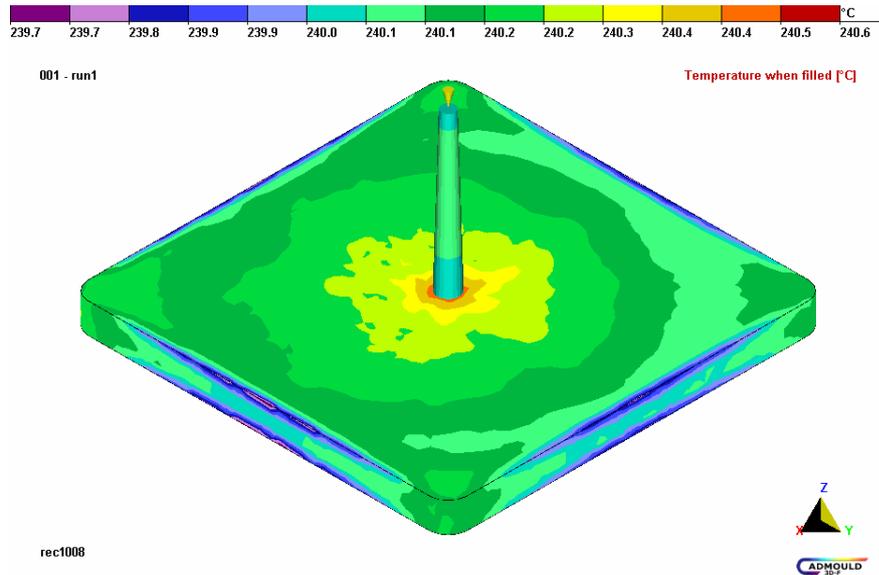
เมื่อ	R	=	ขนาดรัศมีเล็กสุดของทางเข้า = 1.5 mm
	$T_M$	=	$240^{\circ}\text{C}$
	$T_W$	=	$30^{\circ}\text{C}$
	$T_E$	=	อุณหภูมิไม่ไหลตัว = $150^{\circ}\text{C}$

แทนค่าในสมการ

$$\text{เวลาฉีดย้า } t_c = \frac{1.5^2}{\pi^2 \cdot 5 \cdot 8} \cdot \ln \left( 0.7 \frac{240 - 30}{150 - 30} \right) = 11.3 \text{ sec}$$

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์

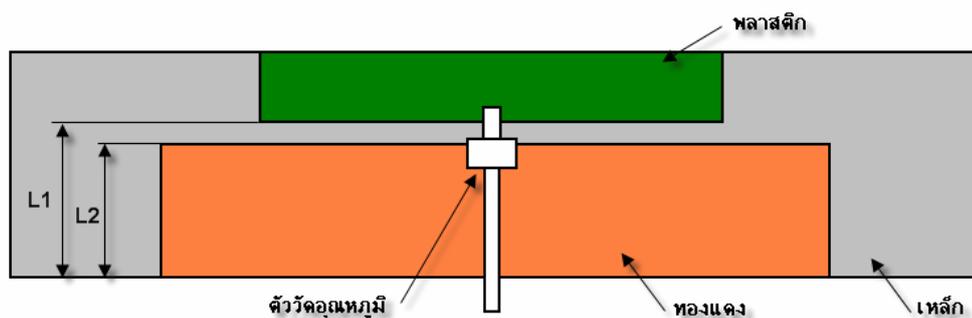
จากผลวิเคราะห์หาอุณหภูมิขณะไหลตัวของพลาสติกในภาพที่ 3-17 จะเห็นว่าอุณหภูมิของชิ้นงานขณะทำการฉีดจะอยู่ระหว่าง  $239.7 - 240.6^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะเห็นว่ามีค่าแตกต่างกันเพียง  $0.9^{\circ}\text{C}$  คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ค่าคลาดเคลื่อนได้ประมาณ 0.37 % ดังนั้นเราจึงประมาณให้ใช้อุณหภูมิเฉลี่ย  $240^{\circ}\text{C}$  ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนต่อไป



ภาพที่ 3-17 อุณหภูมิของพลาสติกที่ได้จากการวิเคราะห์ขณะไหลเข้าสู่เบ้าพิมพ์

#### 3.2.4.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน

ในการวิเคราะห์เราจะทำการสร้างโมเดลชิ้นงานในโปรแกรม CAD แล้วส่งเข้าสู่โปรแกรม ABAQUS เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการถ่ายเทความร้อน โดยเราจะกำหนดการวิเคราะห์ตามความลึกของทองแดง ที่ฝังในแม่พิมพ์โดยจะแสดงเป็นร้อยละของความลึกทองแดง (L2) ต่อระยะความหนาของแผ่นแม่พิมพ์ลบด้วยความลึกเบ้าพิมพ์ (L1) ดังในภาพที่ 3-18 ซึ่งความหนาของแผ่นแม่พิมพ์เท่ากับ 50 mm



ภาพที่ 3-18 การกำหนดระยะความลึกของทองแดงที่ใช้ในการคำนวณ

ระยะความลึกของทองแดงที่เราใช้ในการคำนวณทั้งหมด จะแสดงในตารางที่ 3-5 ซึ่งจะเห็นว่า มีทั้งหมดอยู่ 6 แบบด้วยกัน แต่จะมีอยู่ 2 แบบที่เราจะใช้ในการทำแม่พิมพ์และทดลองฉีด คือแบบที่ฝังทองแดงลึก 25 mm (62.5 %) กับแบบที่ไม่ได้ฝังทองแดง เหตุผลที่เลือกขนาด 25 mm

เนื่องจากว่าถ้าหากใช้ทองแดงที่บางกว่านี้ จะทำการเจาะรูหล่อเย็นไม่ได้ ถ้าหากใช้หนาเกินไป ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ อาจจะไม่เพียงพอซึ่งอาจจะทำให้แม่พิมพ์แ่นได้ และจะไม่มีระยะที่เป็นเนื้อเหล็กสำหรับนำเลือนสลักปลด

ตารางที่ 3-5 การกำหนดรูปแบบการวิเคราะห์

ความลึกของทองแดง	คิดเป็นร้อยละ
ไม่ฝังทองแดง	0 (ใช้เหล็กอย่างเดียว)
10	25
15	37.5
20	50
25	62.5
30	75
ใช้ทองแดง 100%	ใช้ทองแดงทำเข้าพิมพ์

เงื่อนไขคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS

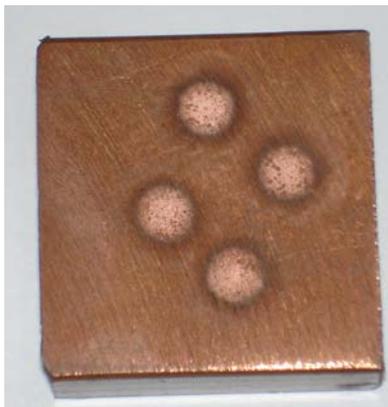
ตารางที่ 3-6 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

Material	Thermal Expansion 1/°C	Specific Heat J/Kg-°C	Thermal Conductivity W/m-°C	Density g/cm <sup>3</sup>
Tool Steel P-20	1.2e-005	460	29	7.8
Copper (PURE)	1.7e-005	383	385.8	8.96
Plastic (PP)	1e-006	2731	0.1	0.907

สำหรับทองแดงที่เราได้มาจากการหาซื้อ ตามท้องตลาดทั่วไป เพื่อเป็นการตรวจสอบคุณภาพ เราได้นำทองแดงดังกล่าวไปตรวจสอบหาคุณสมบัติ โดยการเช็คส่วนผสมทางเคมีด้วยเครื่องสเปคโตรมิเตอร์ ซึ่งจากการตรวจสอบเราได้ส่วนผสมทางเคมีของทองแดงดังนี้

ตารางที่ 3-7 ส่วนผสมทางเคมีของทองแดงที่ได้จากเครื่องสเปคโตรมิเตอร์

ธาตุ	ปริมาณส่วนผสม (%)
Cu	99.930
Fe	0.012
Al	0.017
อื่น ๆ (Mn Ni Be Pb P)	~0.041



ภาพที่ 3-19 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบส่วนผสมทางเคมี

การกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ในโปรแกรม ABAQUS

การกำหนดเงื่อนไขของคู่สัมผัส (Contact)

ในการวิเคราะห์จะมีคู่สัมผัสทั้งหมด 3 คู่ ดังนี้

1. คู่สัมผัสระหว่าง เหล็กกับเหล็ก จะใช้สำหรับผิวหน้าของแม่พิมพ์แผ่นอยู่กับที่สัมผัสกับแผ่นเคลื่อนที่ ซึ่งเราจะทำการกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

1.1 กำหนด เลือก Contact Property โดยเลือกเป็น Thermal Conductance

1.2 เลือก Definition เป็นแบบ Tabular และเลือกเงื่อนไขเป็น Use only clearance – dependency data เนื่องจากเรากำหนดให้หน้าสัมผัสติดกันทั้งหมดและอัตราการถ่ายเทความร้อนเท่ากันทั้งหมดตลอดหน้าสัมผัส

1.3 กำหนดค่า Conductivity โดยให้สัมพันธ์กับระยะห่าง ดังนี้

Clearance 0 Conductivity 29

Clearance 1 Conductivity 0

2. คู่สัมผัสระหว่าง เหล็กกับพลาสติก ใช้สำหรับผิวหน้าของเบ้าพิมพ์ กับพลาสติก ซึ่งเราจะทำการกำหนดค่าต่าง ๆ เหมือนกับคู่สัมผัสที่ 1 แต่จะแตกต่างกันที่การกำหนดค่า Conductivity ดังนี้

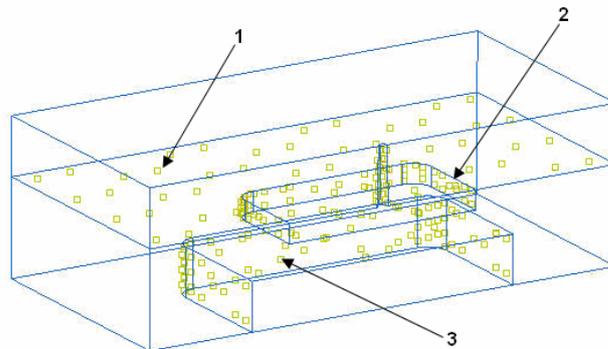
Clearance 0 Conductivity 0.1

Clearance 1 Conductivity 0

3. คู่สัมผัสระหว่าง เหล็กกับทองแดงใช้สำหรับผิวหน้าของก้อนทองแดง กับเบ้าเหล็ก เราจะทำการกำหนดค่าต่าง ๆ เหมือนกับคู่สัมผัสที่ 1 เช่นกันแต่จะแตกต่างกันที่การกำหนดค่า Conductivity ดังนี้

Clearance 0 Conductivity 0.1

Clearance 1 Conductivity 0



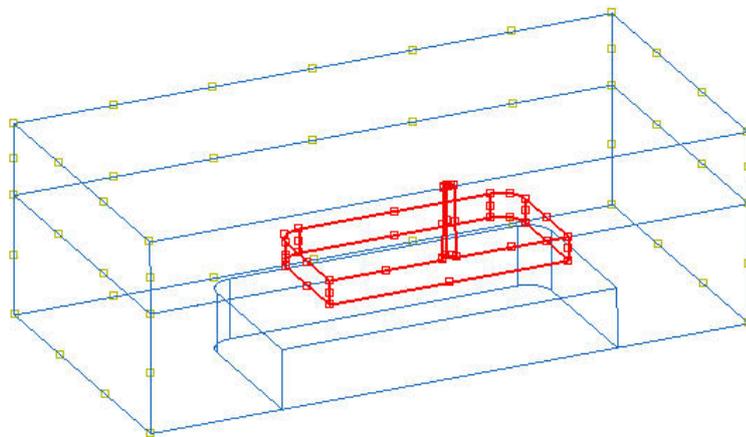
ภาพที่ 3-20 ผิวกู่สัมผัสคู่ต่าง ๆ หลังจากกำหนดค่าเงื่อนไขแล้ว

การกำหนดค่าเงื่อนไขภาระ (Load)

ในส่วนนี้ จะเป็นการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้น ของชิ้นงานและอุณหภูมิแวดล้อมของแม่พิมพ์ ในการวิเคราะห์ โดยเราจะทำการกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

การกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นงาน เราจะนำอุณหภูมิการไหลตัวของพลาสติกขณะทำการฉีดมาเป็นค่าภาระเริ่มต้นโดยจะทำการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

1. เลือก Edit load และเลือก Type เป็น Body heat flux
2. กำหนด Distribution เป็นแบบ Uniform
3. กำหนดค่า Magnitude เท่ากับอุณหภูมิฉีดคือ 240
4. กำหนดค่า Amplitude เป็นแบบ Ramp

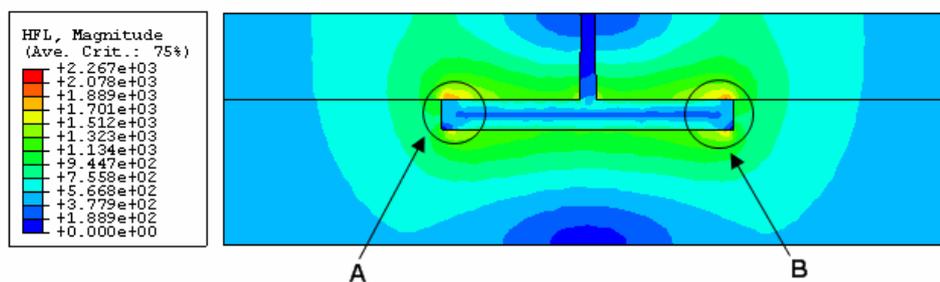


ภาพที่ 3-21 พื้นผิวที่กำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นของชิ้นงาน

การกำหนดค่าอุณหภูมิแวดล้อม เราจะกำหนดให้อุณหภูมิแวดล้อมเป็นอุณหภูมิห้องซึ่งเท่ากับ  $25^{\circ}\text{C}$  จากนั้นนำไปกำหนดในค่า Boundary condition

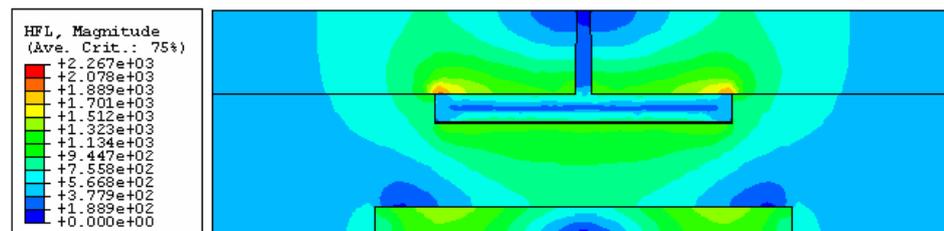
1. เลือก Edit Boundary condition และเลือก Type เป็น Temperature
2. กำหนด Distribution เป็นแบบ Uniform
3. กำหนดค่า Magnitude เท่ากับอุณหภูมิห้องคือ  $25^{\circ}\text{C}$
4. กำหนดค่า Amplitude เป็นแบบ Ramp

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS เราจะได้ผลวิเคราะห์ดังนี้

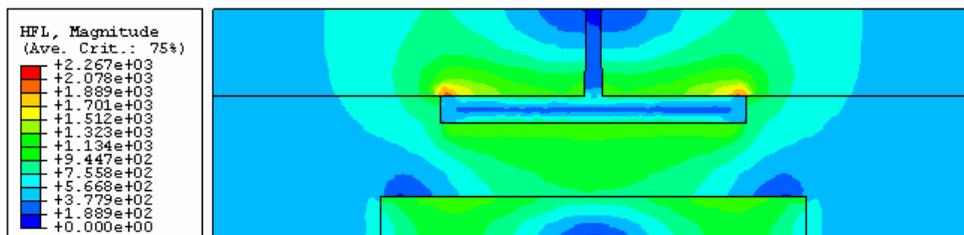


ภาพที่ 3-22 การกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ที่ใช้เหล็กอย่างเดียว

จากภาพที่ 3-22 เราจะเห็นว่าเมื่อเราทำการฉีดชิ้นงานจะเกิดความร้อนสะสมขึ้นในเบ้าพิมพ์ โดยเฉพาะในบริเวณที่เป็นมุมแหลม (จุด A และ จุด B) ของชิ้นงาน ซึ่งโดยปกติบริเวณดังกล่าว จะทำการหล่อเย็นให้เข้าถึงได้ยาก

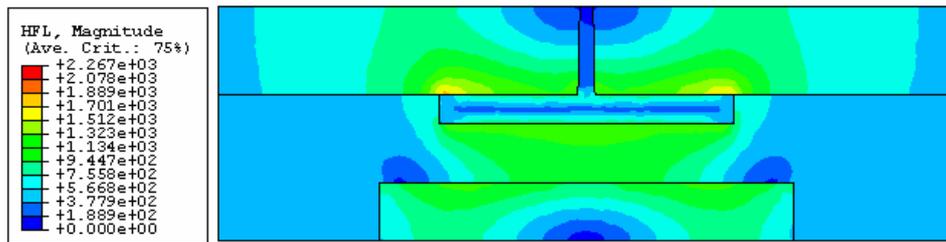


(a) ฝังทองแดงหนา 10 mm

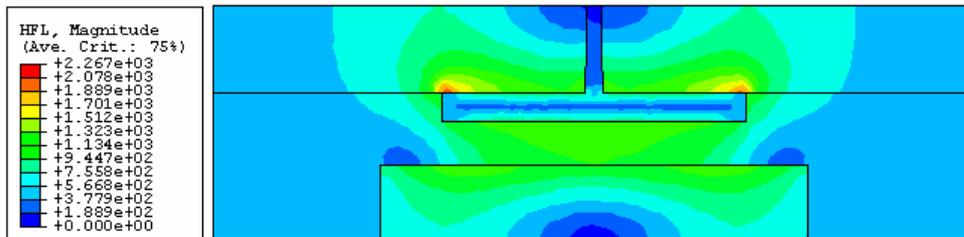


(b) ฝังทองแดงหนา 15 mm

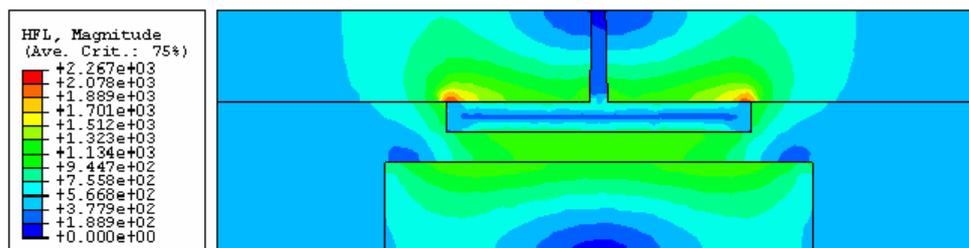
ภาพที่ 3-23 การกระจายตัวของความร้อนในแม่พิมพ์ที่ใช้ทองแดงฝังขนาดต่างๆ



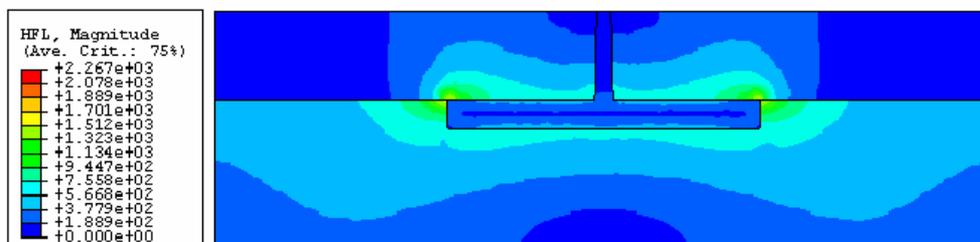
(c) ฟังทองแดงหนา 20 mm



(d) ฟังทองแดงหนา 25 mm



(e) ฟังทองแดงหนา 30 mm



(f) ใช้ทองแดงทำเบ้าพิมพ์

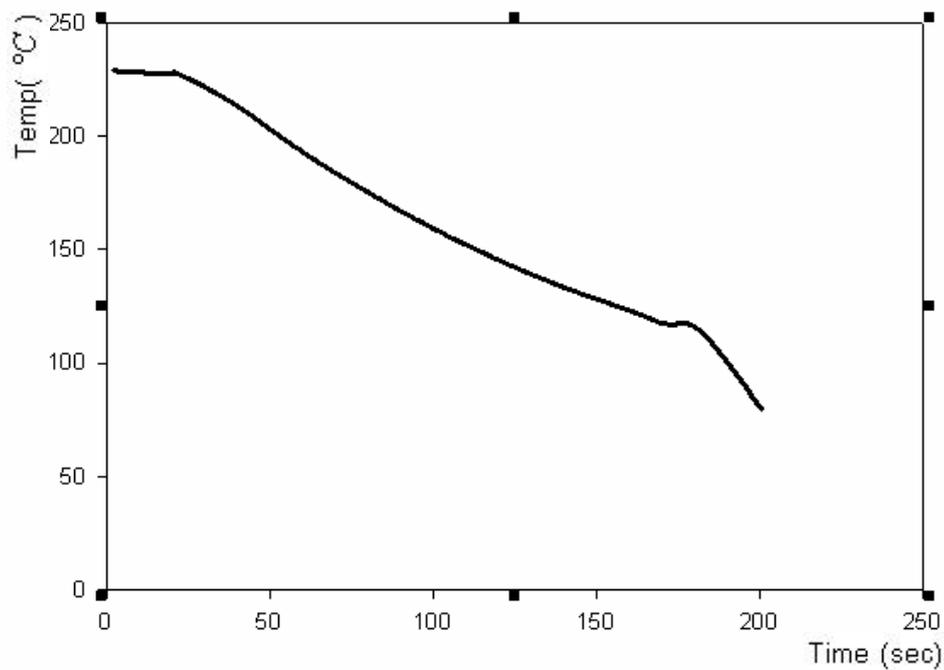
### ภาพที่ 3-23(ต่อ)

จากภาพที่ 3-23 เราจะเห็นว่ายิ่งเราฝังทองแดงใกล้เบ้าพิมพ์มากเท่าใดทองแดงก็จะช่วยกระจายความร้อนออกจากชิ้นงานได้มากตามไปด้วย และถ้าดูจากภาพที่ 3-31 จะเห็นว่าถ้าเราใช้ทองแดงทำเบ้าพิมพ์การสะสมความร้อนบริเวณเบ้าพิมพ์จะลดลงอย่างมาก

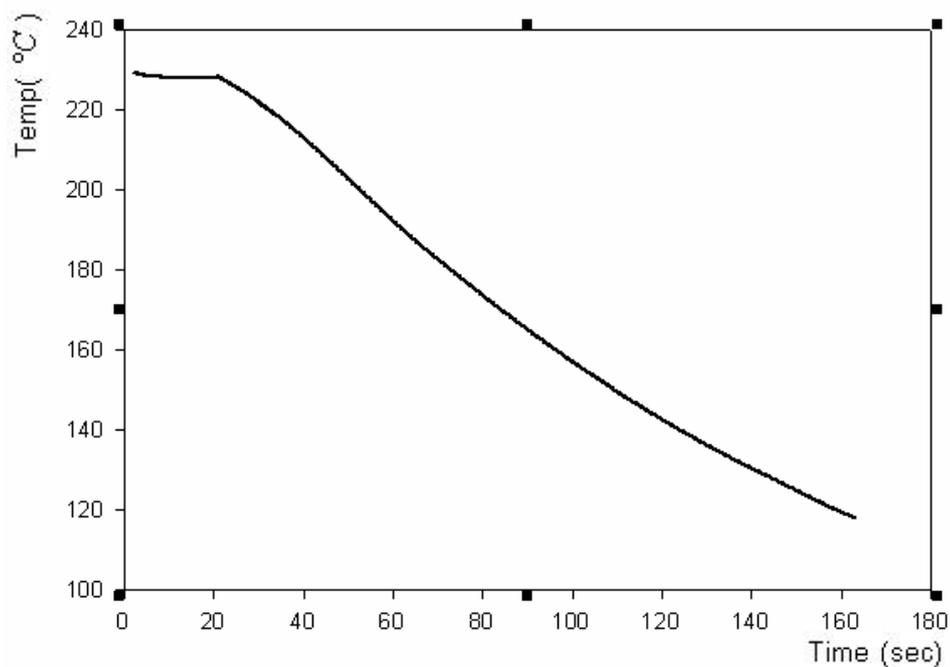
#### 3.2.4.3 การวิเคราะห์หาเวลาเย็นตัวในชิ้นงานทดลองฉีด

เนื่องจากเราจะทำการทดลองฉีดเพียง 2 แบบเท่านั้น เราจึงทำการวิเคราะห์หาเวลาเย็นตัวของชิ้นงานเพียง 2 แบบ คือแบบที่ฝังทองแดงลึก 25 mm (62.5 %) กับแบบที่ไม่ได้ฝัง

ทองแดง เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าได้จากการวัดด้วยตัววัดอุณหภูมิ ซึ่งจากการวิเคราะห์เราจะ  
ได้ค่าต่าง ๆ ดังนี้



ภาพที่ 3-24 อุณหภูมิของชิ้นงาน ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กอย่างเดียวที่ได้  
จากการวิเคราะห์



ภาพที่ 3-25 อุณหภูมิของชิ้นงาน ณ ช่วงเวลาต่าง ๆ ของแม่พิมพ์ที่ฝังทองแดง 62.5% ที่ได้จาก  
การวิเคราะห์

#### 3.2.3.4 การทดลองฉีด

หลังจากที่เราวิเคราะห์พฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนใน โปรแกรม CAE แล้ว เราจะทำการทดลองฉีดโดยทำแค่สองกรณีคือแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กอย่างเดียวกับแม่พิมพ์ที่ฝังทองแดงหนา 25 ม.ม. (62.5%) สาเหตุที่เลือกทดลองฉีดที่ทองแดงหนา 25 ม.ม. เนื่องจากที่ความหนาของทองแดงน้อยกว่านี้ จะทำการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ได้ค่อนข้างลำบากเพราะขีดความสามารถในการตอบสนอง ของหัววัดค่อนข้างจำกัด

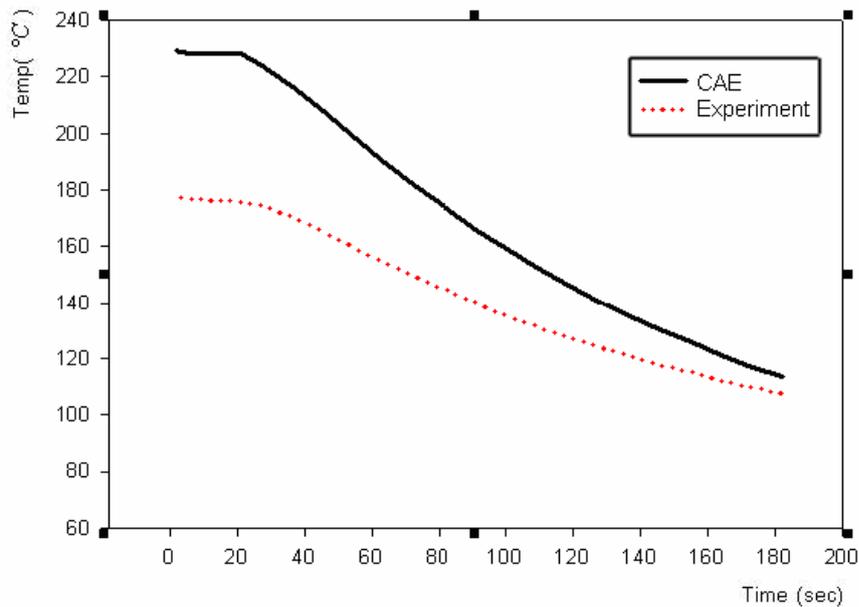


ภาพที่ 3-26 เครื่องฉีดที่ใช้ในการทดลอง

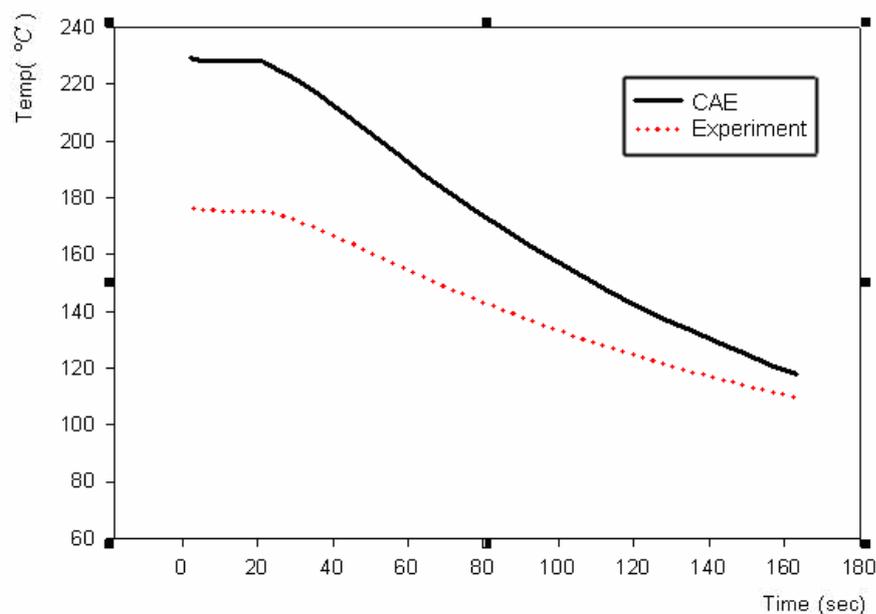


ภาพที่ 3-27 ชิ้นงานที่ได้จากการทดลองฉีด

ในการวัดค่าเราจะทำการจดค่าอุณหภูมิทุก ๆ 5 วินาที เนื่องจากตัววัดอุณหภูมิต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนแปลงค่าจนพอสมควรซึ่งจากการทดลองชนิดเราจะได้อ่านค่าต่าง ๆ ดังในตารางที่ ข-1 ในภาคผนวกจากค่าที่ได้ เราจะต้องทำการชดเชยค่าความไวของหัววัดโดยใช้คุณสมบัติของหัววัดตามตารางที่ 3-1 และใช้วิธีการคำนวณตามหน้าที่ 22 และจากนั้นนำมาสร้างกราฟ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม CAE ซึ่งจะได้กราฟดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 3-28 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างค่าที่วัดได้กับที่ได้จาก CAE ในแม่พิมพ์เหล็ก



ภาพที่ 3-29 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างค่าที่วัดได้กับที่ได้จาก CAE ในแม่พิมพ์ฝั่งทองแดง

จากกราฟที่ได้เราจะเห็นว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม CAE และจากการทดลองฉีดมีความแตกต่างกันพอสมควร เนื่องจากว่าตัววัตถุอุณหภูมิที่เราติดตั้งในแม่พิมพ์ไม่สามารถปรับค่าเพื่อแสดงผลอุณหภูมิที่แท้จริงได้ทันที จึงแสดงค่าออกมาต่ำกว่ามากพอสมควรเนื่องจากการชดเชยค่าเป็นแบบ เชิงเส้น (linear) ไม่สามารถคำนวณรวมการเกิดความร้อนสะสมซึ่งการลดลงของอุณหภูมิไม่ได้เป็นแบบเส้นตรงดังนั้นทำให้อุณหภูมิจะมีความแตกต่างกันอยู่บ้าง แต่ถ้าเราพิจารณาจากรูปแบบและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของกราฟแล้วเราจะเห็นว่ากราฟทั้ง 2 เส้นมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นเราจึงตัดสินใจวิเคราะห์ต่อโดยใช้โปรแกรม CAE เหมือนเดิม เนื่องจากจะใช้เวลาและค่าใช้จ่ายน้อยกว่า การทดลองโดยใช้การทำแม่พิมพ์แล้วทดลองฉีดจริง ซึ่งในการวิเคราะห์ต่อไปเราจะทำการออกแบบรูปร่างชิ้นงานใหม่ให้สอดคล้องกับชิ้นงานฉีดที่ใช้กันโดยทั่ว ๆ ไป และนำเงื่อนไขการวิเคราะห์ในตอนแรกมาปรับใช้กับชิ้นงานที่จะวิเคราะห์ต่อไป

### 3.2.4 การวิเคราะห์ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ที่ฝังทองแดง

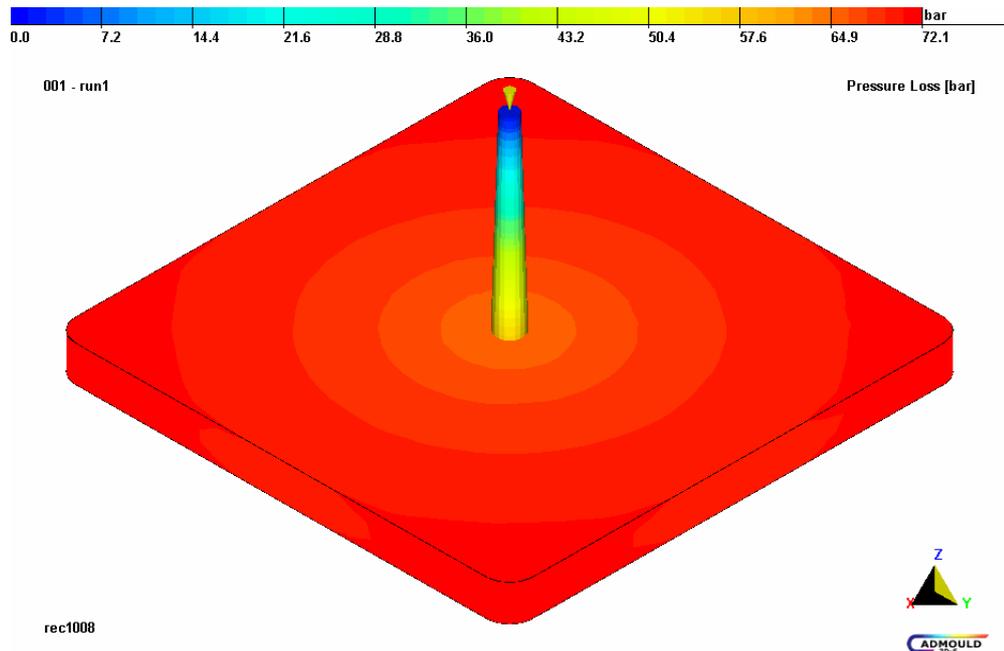
เนื่องจากการฝังทองแดงในแม่พิมพ์ ส่งผลโดยตรงต่อ ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ เนื่องจากต้องขุดเอาเนื้อเหล็กเดิมออก และใส่ทองแดงเข้าไปแทน ซึ่งทองแดงมีความแข็งแรง (Strength) น้อยกว่าเหล็กแม่พิมพ์มาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์ดูว่า เมื่อใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์แล้วจะทำให้ความแข็งแรงของแม่พิมพ์ลดลงมากหรือน้อยเพียงใด โดยในการวิเคราะห์ เราจะใช้ชิ้นงานและขนาดแม่พิมพ์เดิมตามหัวข้อ 3.2.1 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่เราใช้ในการทดลองที่ผ่านมา และเราจะเลือกใช้ขนาดทองแดงหนา 25 mm ในการวิเคราะห์เพราะเป็นขนาดที่สามารถฝังเข้าใกล้ชิ้นงานมากที่สุด ในแม่พิมพ์ขนาดดังกล่าว ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงจะใช้วิธีการคำนวณในโปรแกรม ABAQUS โดยมีค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุที่ต้องใช้ดังนี้

**ตารางที่ 3-8** คุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

Material	Elastic Modulus Gpa	Poisson ratio	Density g/cm <sup>3</sup>
Tool Steel P-20	205	0.3	7.8
Copper (PURE)	110	0.345	8.96

#### 3.2.4.1 แรงดันฉีดในเบ้าพิมพ์

ในขณะที่ฉีดเนื้อพลาสติกเข้าสู่เบ้าพิมพ์ จะต้องใช้แรงดันในการดันเนื้อพลาสติกไหลส่งเข้าสู่เบ้าพิมพ์ ซึ่งโดยปกติแรงดันฉีดจะอยู่ที่ประมาณ 50-250 MPa (500 – 2500 บาร์) ขนาดของแรงดันฉีดจะขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก ขนาดเครื่องฉีดและขนาดรูปร่างของชิ้นงาน จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CADMOLD เราจะเห็นการกระจายตัวของแรงดันดังในภาพที่ 3-38 ซึ่งมีค่าแรงดันสูงสุดอยู่ที่ 72 บาร์



ภาพที่ 3-30 แรงดันฉีดในเบ้าพิมพ์ของชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในการวิเคราะห์ความแข็งแรงโดยใช้โปรแกรม ABAQUS จะกำหนดให้ใช้แรงดันเท่ากับแรงดันฉีดสูงสุดของการฉีด คือ 250 MPa ซึ่งอาจจะเกิดขึ้น ในการฉีดชิ้นงานอื่นๆ เพื่อหาแนวทางในการป้องกันแม่พิมพ์ต่อไป

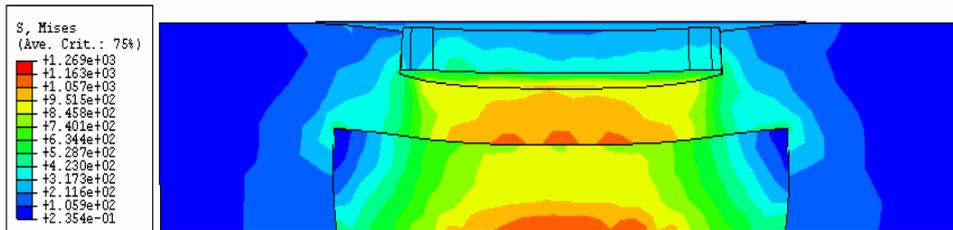
#### 3.2.4.2 การวิเคราะห์ความแข็งแรงใน ABAQUS

ในการวิเคราะห์ใน ABAQUS จะทำการกำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์ดังนี้

1. การกำหนดเงื่อนไขของคู่สัมผัส (Contact)
  - 1.1 กำหนดเลือก Contact Property โดยเลือกเป็น Normal Behavior
  - 1.2 กำหนดเลือก Pressure Overclosure เป็นแบบ Hard Contact
2. การกำหนดค่าเงื่อนไขภาระ (Load)
  - 2.1 กำหนดเลือก Load เป็นแบบ Pressure
  - 2.2 Distribution เป็นแบบ Uniform
  - 2.3 ค่า Magnitude เท่ากับ 2500 บาร์
  - 2.4 กำหนดค่า Amplitude เป็นแบบ Ramp

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ABAQUS เราจะได้ผลวิเคราะห์ดังนี้

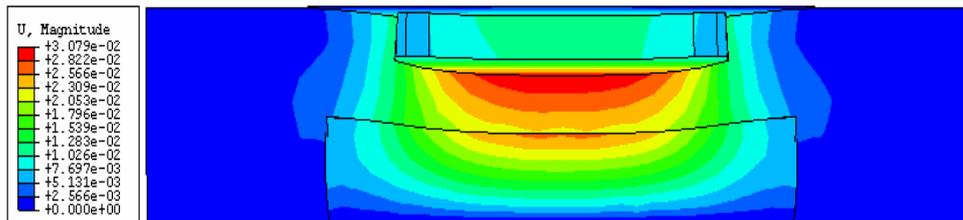
### ค่าความเค้น (Stress) ในแม่พิมพ์



ภาพที่ 3-31 ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ที่ scale 200 เท่า

จากผลวิเคราะห์พบว่า ในแม่พิมพ์ โดยเฉพาะบริเวณตรงกลางของแม่พิมพ์ ซึ่งมีความอ่อนแอที่สุดมีค่าความเค้นเกิดขึ้นสูงสุดเพียง 126 MPa ซึ่งยังไม่เกินค่าความแข็งแรงของวัสดุแม่พิมพ์ซึ่งมีค่าประมาณ 200 GPa

### ค่าระยะแอ่นตัว (Displacement)



ภาพที่ 3-32 ค่าความระยะแอ่นตัวที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ที่ scale 200 เท่า

จากผลวิเคราะห์พบว่า ในแม่พิมพ์ที่ใช้ทองแดงฝึงจะมีระยะแอ่นตัวค่อนข้างสูง ซึ่งจากผลวิเคราะห์จะมีค่าสูงถึง 0.003 mm. แต่โดยปกติในการออกแบบแม่พิมพ์ จะยอมให้มีค่าแอนตัวได้สูงสุดประมาณ 0.003 mm [11] ดังนั้นในการใช้ทองแดงฝึงจึงไม่ส่งผลต่อระยะแอ่นตัวมากนัก

ในการออกแบบแม่พิมพ์แบบอื่นๆ ซึ่งอาจจะใช้แผ่นทองแดงหนากว่านี้ หรือใช้แผ่นแม่พิมพ์ (Cavity Plate) บางมากๆ อาจจะประสบปัญหา เรื่องความแข็งแรงของแม่พิมพ์ไม่เพียงพอหรือแม่พิมพ์อาจจะแอ่นตัว เราสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้โดยการเพิ่มแผ่นรองหลัง (Backing Plate) ซึ่งจะสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงของแม่พิมพ์ได้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

ในการวิเคราะห์เราได้ทำการออกแบบชิ้นงานวิเคราะห์ใหม่ 2 ชิ้น ชิ้นแรกออกแบบให้มีความหลากหลาย ด้านรูปร่างซึ่งเป็นลักษณะของรูปร่างชิ้นงานที่ใช้ทั่วๆ ไปในงานฉีดพลาสติก และมักจะ เกิดปัญหาการหดตัวและการบิดตัวขึ้นในชิ้นงาน ส่วนชิ้นที่ 2 ออกแบบให้มีขนาดความหนาที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นขนาดความหนาที่นิยมใช้ทั่วๆ ไปในงานฉีดพลาสติก เพื่อใช้ศึกษาถึงผลกระทบ ของอัตราการถ่ายเทความร้อน ต่อความหนาชิ้นงานและเวลาหล่อเย็น (Cooling Time) และในการวิเคราะห์เราจะใช้พลาสติก 2 ชนิด คือ PP (Polypropylene) ซึ่งเป็นพลาสติกในกลุ่ม Amorphous Thermoplastic และ PS (Polystyrene) ซึ่งเป็นพลาสติกในกลุ่ม Semi Crystalline Thermoplastic ซึ่งทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

#### 1. คุณสมบัติด้านการผลิต (Processing Property)

จะเป็นข้อมูลเบื้องต้นของพลาสติกที่ใช้ในขบวนการผลิต เช่น การฉีด การเป่า ซึ่งจะมีค่าต่างๆที่จำเป็นดังนี้

#### ตารางที่ 4-1 คุณสมบัติด้านการผลิตของพลาสติก PP และ PS

Material	Melt Temp. °C	Mold Temp. °C	Ejection Temp. °C
PP	220-260	20-60	100
PS	180-260	20-70	75

#### 2. คุณสมบัติทางความร้อน (Thermal Property)

จะเป็นความสามารถทางความร้อน ของพลาสติกซึ่งจะส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนและการเย็นตัวของชิ้นงาน ซึ่งจะมีคุณสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

#### ตารางที่ 4-2 คุณสมบัติทางความร้อนของพลาสติก PP และ PS

Material	Specific Heat J/Kg-°C	Thermal Conductivity W/m-°C
PP	2740	0.164
PS	2144	0.22

### 3. คุณสมบัติทางกล (Mechanical Property)

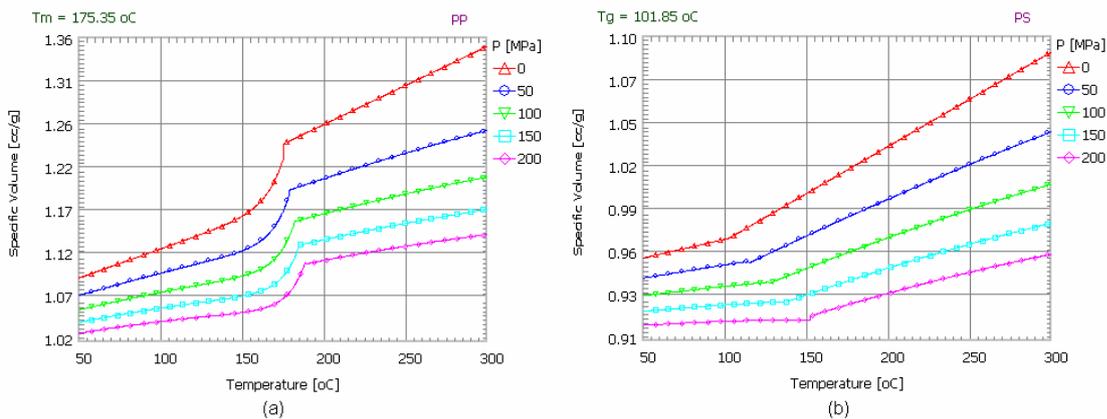
จะเป็นความสามารถทางกลของพลาสติก ในการรับภาระหรือการนำไปประยุกต์ใช้งานซึ่งจะมีคุณสมบัติต่างๆ ดังนี้

#### ตารางที่ 4-3 คุณสมบัติทางกลของพลาสติก PP และ PS

Material	Elastic Modulus MPa	Poisson Ratio	Shear Modulus MPa
PP	1340	0.39	481
PS	3200	0.353	1180

### 4. คุณสมบัติความสัมพันธ์ด้าน แรงดัน-ปริมาตร-อุณหภูมิ (PVT Diagram)

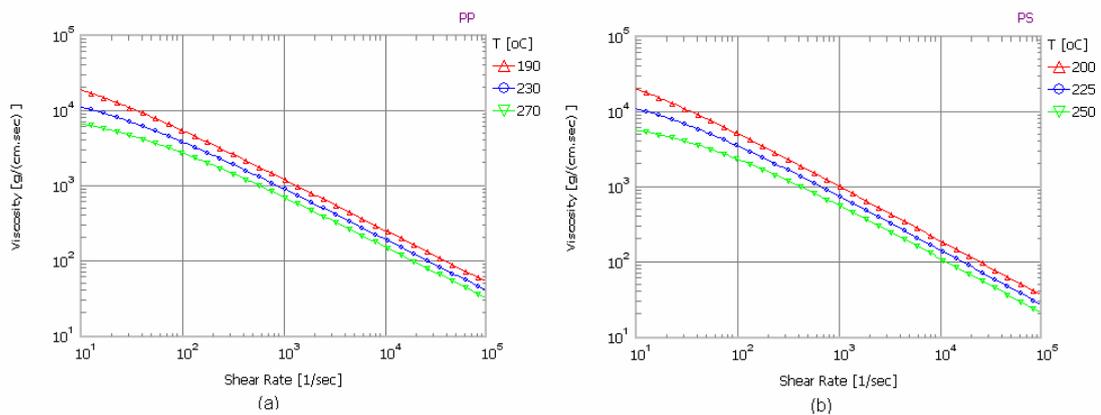
จะเป็นคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของพลาสติก ในช่วงอุณหภูมิและแรงดันต่างๆ ซึ่งจะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4-1 (a)กราฟ PVT ของพลาสติก PP (b)กราฟ PVT ของพลาสติก PS

### 5. คุณสมบัติด้านความหนืด (Viscosity Property)

จะเป็นคุณสมบัติความสามารถในการไหลตัวของพลาสติกในช่วงอุณหภูมิต่างๆ โดยจะมีความสัมพันธ์โดยตรงต่ออัตราการเฉือน ซึ่งจะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 4-2 (a)กราฟ Viscosity ของพลาสติก PP (b)กราฟ Viscosity ของพลาสติก PS

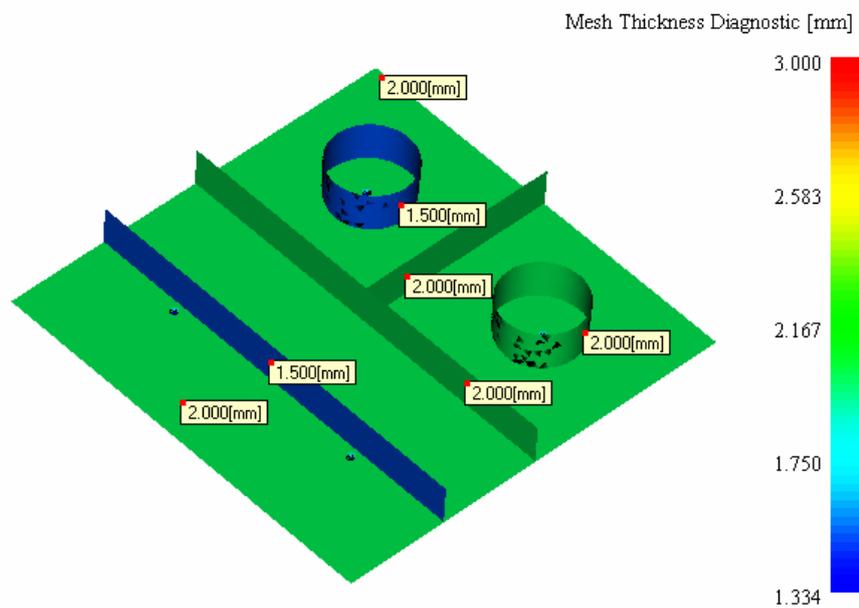
#### 4.1 ผลกระทบของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อการหดตัว (Shrinkage)

ในการทดลองหาผลกระทบของอัตราการถ่ายเทความร้อน ต่อการหดตัวเราจะใช้การจำลองการฉีดในโปรแกรม CAE เพื่อตรวจสอบหาอัตราการหดตัวจากการฝั่งทองแดงในระยะห่างต่าง ๆ กันซึ่งมีเงื่อนไขในการวิเคราะห์ดังนี้

ตารางที่ 4-4 เงื่อนไขการฉีดที่ใช้ในการวิเคราะห์

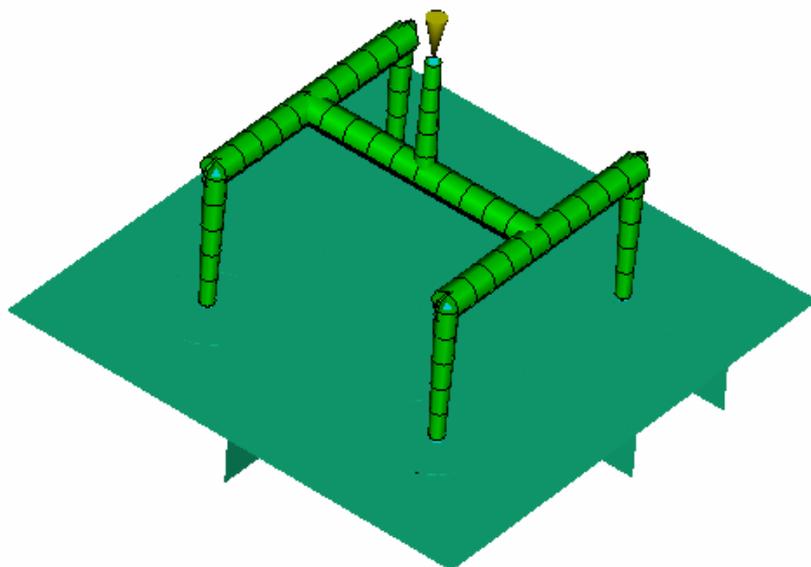
ตัวแปร	ค่าที่กำหนด	หน่วย
เวลาฉีด (Injection Time)	0.8	s
อัตราการฉีด (Flow rate)	40	cm <sup>3</sup> /min
แรงดันฉีด (Injection Pressure)	20	Mpa
เวลาฉีดย้ำ (Holding Time)	5	s
แรงดันฉีดย้ำ (Holding Pressure)	15	Mpa
เวลาหล่อเย็น (Cooling Time)	30	s
อุณหภูมิฉีด (Melt Temperature)	230	°C

โดยชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์ จะประกอบด้วย ลักษณะของชิ้นงานหลายๆแบบ และมีความหนาที่แตกต่างกันเพื่อดูผลกระทบ ต่อรูปร่างชิ้นงานแบบต่างๆ ดังในภาพที่ 4-3



ภาพที่ 4-3 รูปร่างชิ้นงานและความหนาที่ใช้

และเราได้ทำการออกแบบใช้ระบบทางเข้าแบบ 4 จุดให้พลาสติกกระจายเข้าสู่ชิ้นงานได้อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งชิ้นงานดังในภาพที่ 4-4

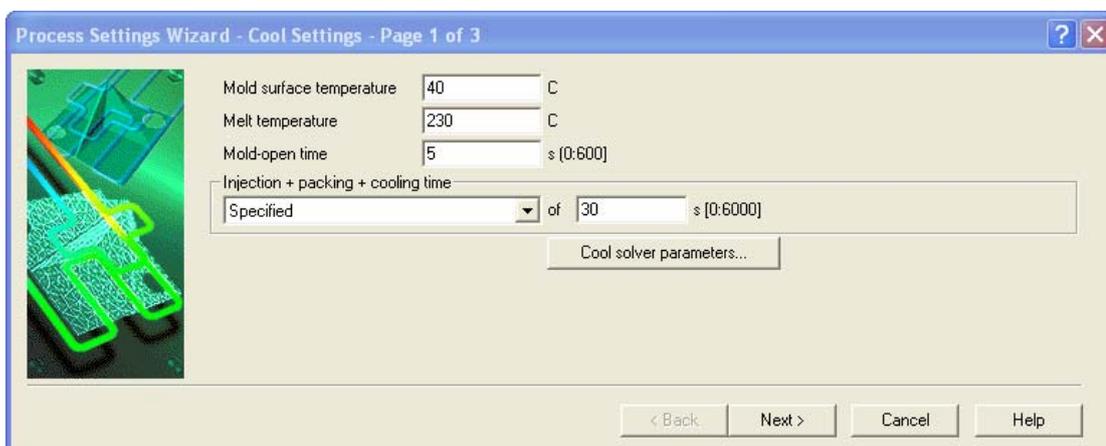


ภาพที่ 4-4 ชิ้นงานที่ใช้ในการวิเคราะห์พร้อมทั้งทางวิ่ง

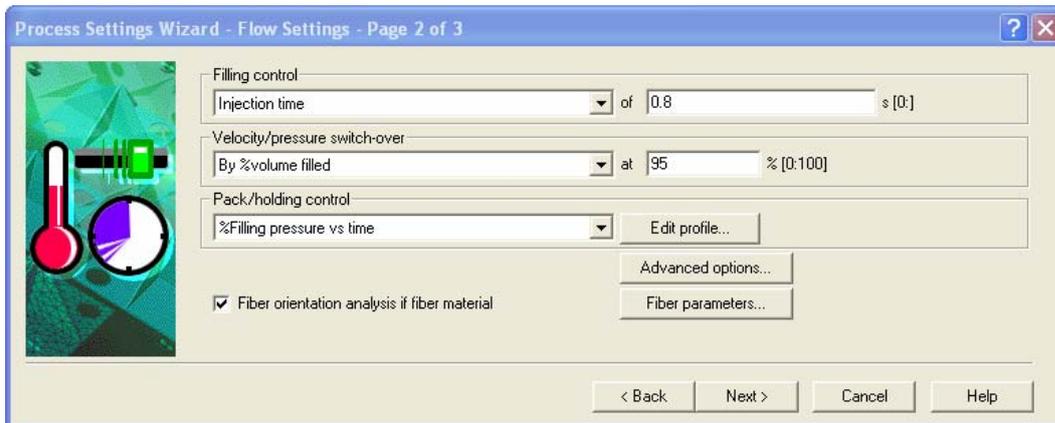
จากนั้นเราจะทำการวิเคราะห์ ตามเงื่อนไขที่กำหนด แต่จะเปลี่ยนวัสดุแม่พิมพ์ที่แตกต่างกัน โดยเราจะกำหนดให้ใช้แผ่นเบ้าพิมพ์ที่มีความกว้าง 300 mm ยาว 300 mm และหนา 50 mm โดยจะวิเคราะห์เริ่มจาก

1. แม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กอย่างเดียว (เลือกใช้เหล็ก P20)
2. แม่พิมพ์ที่มีทองแดงฝัง ขนาดความหนาเท่ากับ 15% ของความหนาแผ่นแม่พิมพ์ถึงผนังเบ้าพิมพ์
3. แม่พิมพ์ที่มีทองแดงฝัง ขนาดความหนาเท่ากับ 30% ของความหนาแผ่นแม่พิมพ์ถึงผนังเบ้าพิมพ์
4. แม่พิมพ์ที่มีทองแดงฝัง ขนาดความหนาเท่ากับ 45% ของความหนาแผ่นแม่พิมพ์ถึงผนังเบ้าพิมพ์
5. แม่พิมพ์ที่มีทองแดงฝัง ขนาดความหนาเท่ากับ 60% ของความหนาแผ่นแม่พิมพ์ถึงผนังเบ้าพิมพ์
6. แม่พิมพ์ที่มีทองแดงฝัง ขนาดความหนาเท่ากับ 75% ของความหนาแผ่นแม่พิมพ์ถึงผนังเบ้าพิมพ์
7. แม่พิมพ์ที่ทำจากทองแดงอย่างเดียว

โดยทำการกำหนดค่าต่าง ๆ ในตารางที่ 4-1 ลงใน Process setting เพื่อเป็นการกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของการวิเคราะห์ ดังในภาพที่ 4-5 และ 4-6



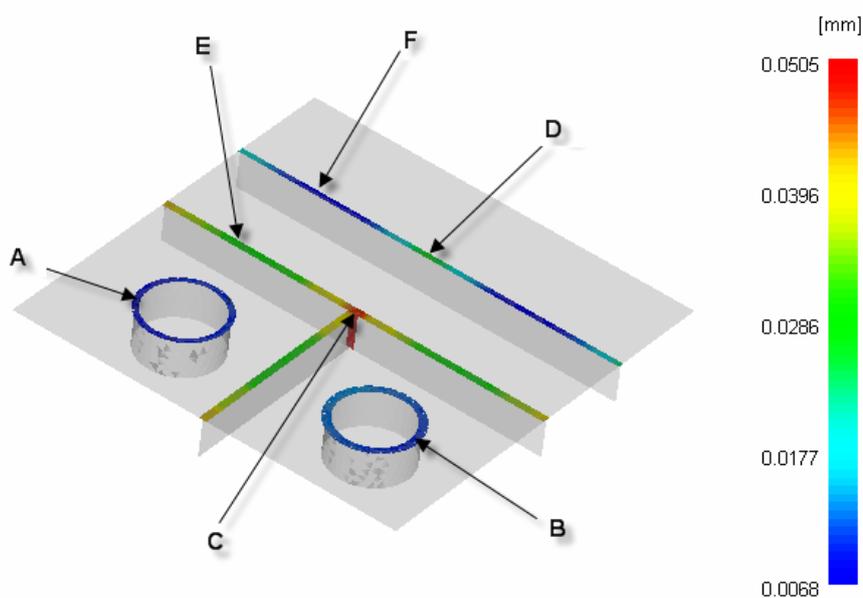
ภาพที่ 4-5 การกำหนดค่าเงื่อนไขต่าง ๆ ลงในโปรแกรม



ภาพที่ 4-6 การกำหนดค่าเงื่อนไขต่าง ๆ ลงในโปรแกรม (ต่อ)

จากการวิเคราะห์ที่ได้เรานำผลวิเคราะห์ รอยการยุบตัว (Sink Mark Depth) และขนาดการหดตัวและบิดตัว (Deflection & Warpage) มาเป็นตัวชี้วัดถึงผลกระทบต่อ การหดตัวซึ่งผลวิเคราะห์ที่ได้จะเหมือนกับในภาพที่ 4-5 และเราจะทำการวัดในจุดที่น่าสนใจต่าง ๆ กันดังนี้

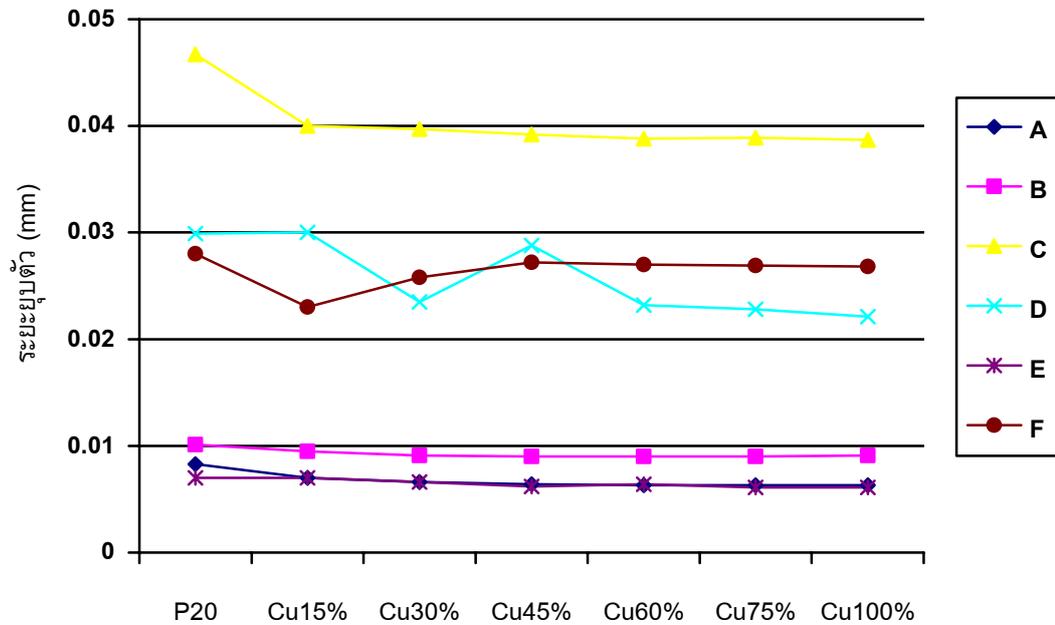
1. จุด A จะเป็นท่ วงกลมขนาดความหนา 1.5 mm
2. จุด B จะเป็นท่ วงกลมขนาดความหนา 2.0 mm
3. จุด C จะเป็นจุดเชื่อมต่อของเส้นเสริมแรงรูปตัว T
4. จุด D จะเป็นตำแหน่งกลางของเส้นเสริมแรง หนา 1.5 mm
5. จุด E จะเป็นตำแหน่ง ¼ ของเส้นเสริมแรงหนา 2 mm
6. จุด F จะเป็นตำแหน่ง ¼ ของเส้นเสริมแรงหนา 1.5 mm



ภาพที่ 4-7 ผลวิเคราะห์ความลึกของรอยยุบตัวในชิ้นงาน

#### 4.1.1 ผลกระทบต่อการเกิดรอยยุบตัวในพลาสติก Polystyrene (PS)

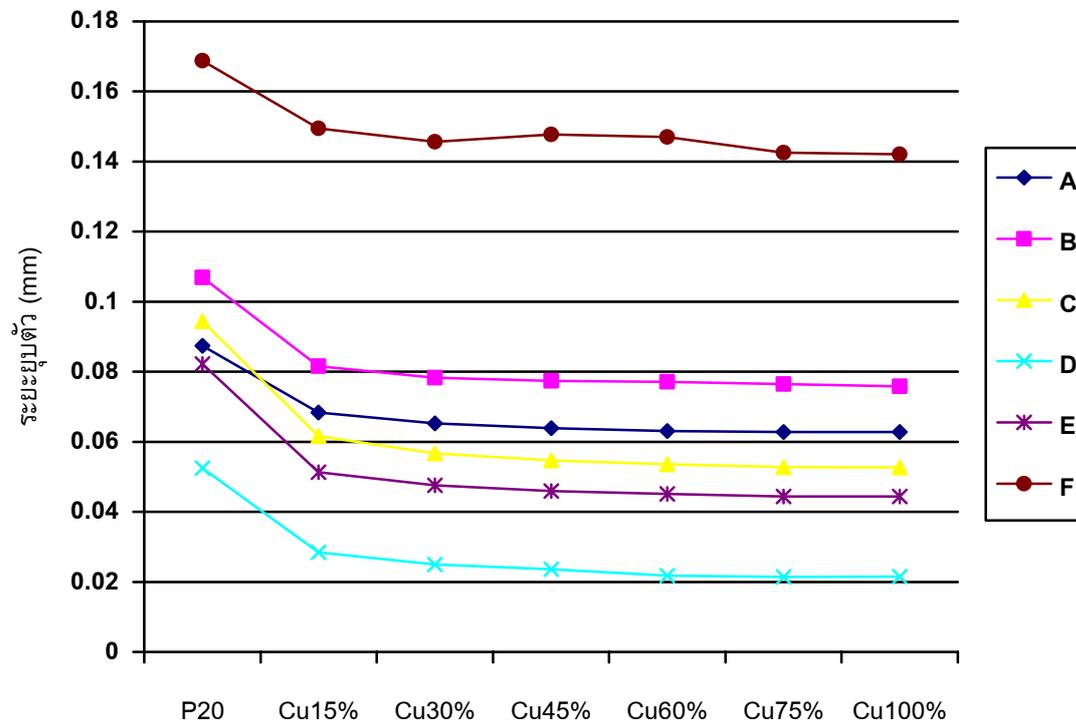
เราจะเริ่มด้วยวิเคราะห์การไหลตัวของพลาสติก PS และนำผลวิเคราะห์ความลึกของรอยยุบมาศึกษาเปรียบเทียบ ซึ่งจากการเปรียบเทียบจะได้ค่าดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4-8 ค่าการยุบตัวของพลาสติก PS ณ จุดต่าง ๆ

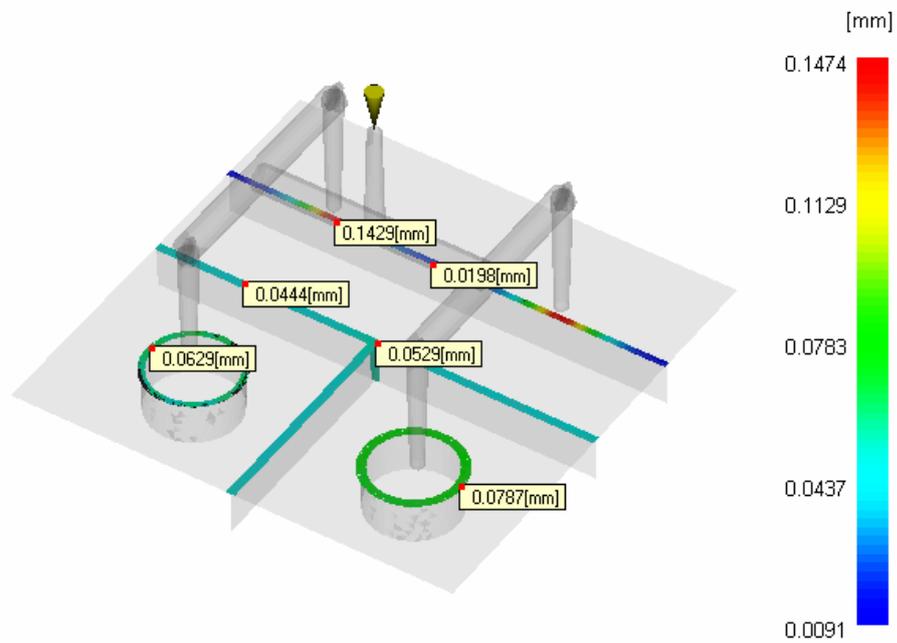
#### 4.1.2 ผลกระทบต่อการเกิดรอยยุบตัวในพลาสติก Polypropylene (PP)

ในการวิเคราะห์เราจะใช้เงื่อนไขเหมือนกับการวิเคราะห์พลาสติก PP ทุกอย่าง ยกเว้นเปลี่ยนพลาสติกจาก PP เป็น PS และจากการวิเคราะห์เราได้ผลดังนี้

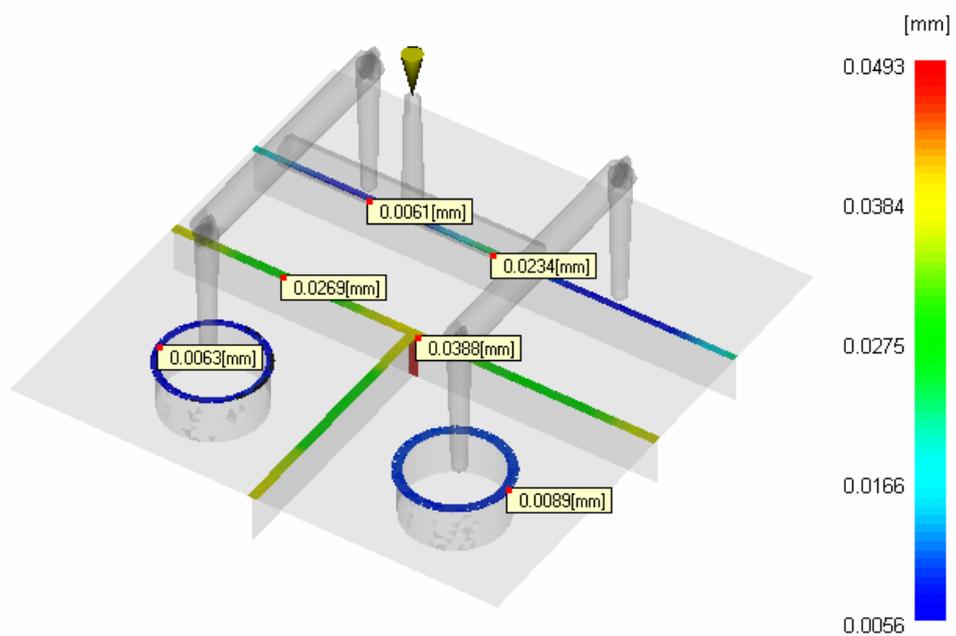


ภาพที่ 4-9 ค่าการยุบตัวของพลาสติก PP ณ จุดต่าง ๆ

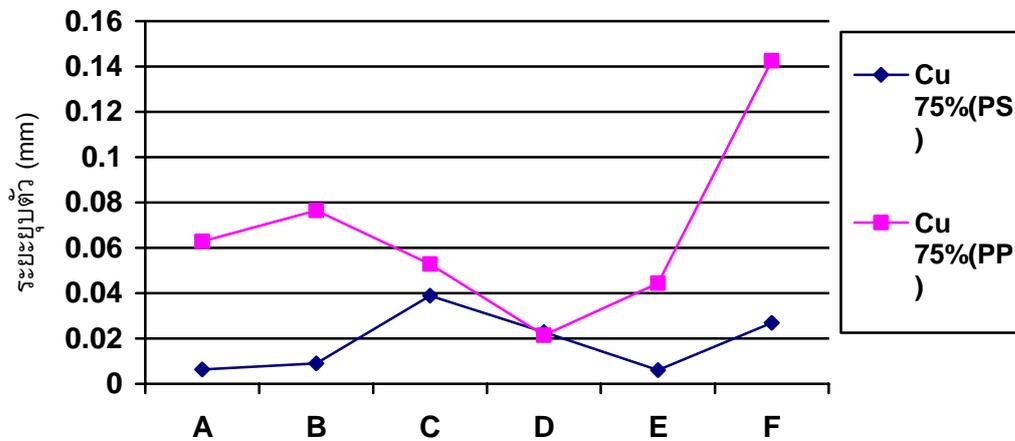
จากผลการวิเคราะห์เราจะพบว่า การฝังทองแดงในแม่พิมพ์จะช่วยลดการเกิดรอยยุบตัว (Sink Mark) ในพลาสติก PP ได้อย่างชัดเจน แต่ในพลาสติก PS จะไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อใช้ทองแดงฝัง เพื่อช่วยการระบายความร้อนเนื่องจากพลาสติก PS มีการยุบตัวน้อยอยู่แล้วดังที่แสดงในรูปเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ 4-10 และภาพที่ 4-11



ภาพที่ 4-10 ขนาดและลักษณะการยุบตัวของพลาสติก PP (Semi Crystalline Thermoplastic)



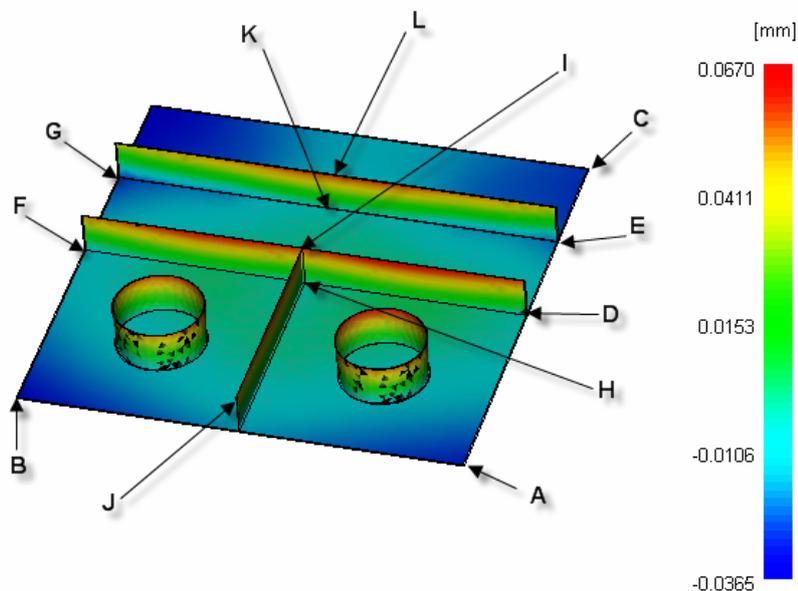
ภาพที่ 4-11 ขนาดและลักษณะการยุบตัวของพลาสติก PS (Amorphous Thermoplastic)



ภาพที่ 4-12 กราฟเปรียบเทียบขนาดการยุบตัวของพลาสติก PS และ PP

#### 4.1.3 ผลกระทบต่อขนาดการหดตัวและบิดตัว (Deflection & Warpage) ในพลาสติก Polystyrene (PS)

ในการวิเคราะห์เราจะใช้ผลวิเคราะห์ของ Deflection & Warpage ดังในภาพที่ 4-13 เป็นตัวชี้วัดซึ่งผลวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถวัดขนาดการหดตัวและบิดตัวตามทิศทางต่างๆ ที่เราสนใจได้ ในการศึกษาเราจะทำการวัดเปรียบเทียบทั้งหมด 7 จุดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4-13 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ Deflection & Warpage และตำแหน่งที่จะทำการวัด

1. วัดขนาดจากจุด A ไปยังจุด B
2. วัดขนาดจากจุด A ไปยังจุด C
3. วัดขนาดจากจุด D ไปยังจุด F
4. วัดขนาดจากจุด E ไปยังจุด G
5. วัดขนาดจากจุด H ไปยังจุด I
6. วัดขนาดจากจุด I ไปยังจุด J

ซึ่งจากการวัดค่าในผลวิเคราะห์ที่ใช้พลาสติก PS (Amorphous Thermoplastic) ในการฉีดจะได้ค่าจากการวัด ณ จุดต่าง ๆ ดังตารางที่ 4-5

**ตารางที่ 4-5** ค่าที่ได้จากการวัดขนาดของชิ้นงานหลังการหดตัวของพลาสติก PS

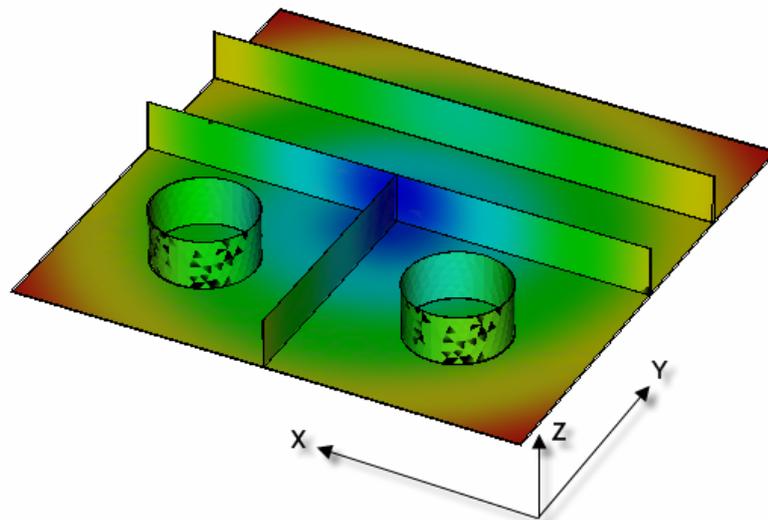
ตำแหน่งที่วัด	ขนาดที่วัดได้ (mm)							
	ขนาดตามแบบ	P20	Cu 15%	Cu 30%	Cu 45%	Cu 60%	Cu 75%	Cu 100%
A – B	100	99.35	99.35	99.35	99.35	99.35	99.35	99.35
A – C	100	99.35	99.35	99.35	99.34	99.34	99.35	99.34
D – F	100	99.35	99.35	99.34	99.34	99.34	99.34	99.34
E – G	100	99.34	99.34	99.34	99.34	99.34	99.34	99.34
H – I	10	9.94	9.94	9.93	9.93	9.93	9.93	9.93
I – J	50	49.68	49.68	49.68	49.68	49.68	49.68	49.68
K – L	10	9.94	9.94	9.93	9.93	9.94	9.94	9.94

**ตารางที่ 4-6** ค่าระยะหดตัวและเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานหลังการฉีดของพลาสติก PS

ตำแหน่งที่วัด	ระยะหดตัว (mm) / คิดเป็นเปอร์เซ็นต์						
	P20	Cu 15%	Cu 30%	Cu 45%	Cu 60%	Cu 75%	Cu 100%
A – B	0.65 0.65 %	0.65 0.65 %	0.65 0.65 %	0.65 0.65 %	0.65 0.65 %	0.65 0.65 %	0.65 0.65 %
A – C	0.65 0.65 %	0.65 0.65 %	0.65 0.65 %	0.66 0.66 %	0.66 0.66 %	0.65 0.65 %	0.66 0.66 %
D – F	0.65 0.65 %	0.65 0.65 %	0.66 0.66 %				
E – G	0.66 0.66 %	0.66 0.66 %	0.66 0.66 %	0.66 0.66 %	0.66 0.66 %	0.66 0.66 %	0.66 0.66 %
H – I	0.06 0.60 %	0.06 0.60 %	0.07 0.70 %				
I – J	0.32 0.64 %	0.32 0.64 %	0.32 0.64 %	0.32 0.64 %	0.32 0.64 %	0.32 0.64 %	0.32 0.64 %
K – L	0.06 0.60 %	0.06 0.60 %	0.07 0.70 %	0.07 0.70 %	0.06 0.60 %	0.06 0.60 %	0.06 0.60 %

จากผลการวิเคราะห์ ตามตารางที่ 4-5 และ ตารางที่ 4-6 เราจะเห็นว่า การฝังทองแดงในแม่พิมพ์ไม่ส่งผลต่อการหดตัวเชิงระยะทางมากนัก ซึ่งทำให้เราสามารถใช้ในการคำนวณเพื่อชดเชยขนาดเผื่อหดได้ตามปกติเหมือนกับการใช้แม่พิมพ์จากเหล็กทั่ว ๆ ไป ทำให้ง่ายต่อการออกแบบ ซึ่งจากผลวิเคราะห์จะเห็นว่า ชิ้นงานวิเคราะห์ของเรา จะมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.65 %

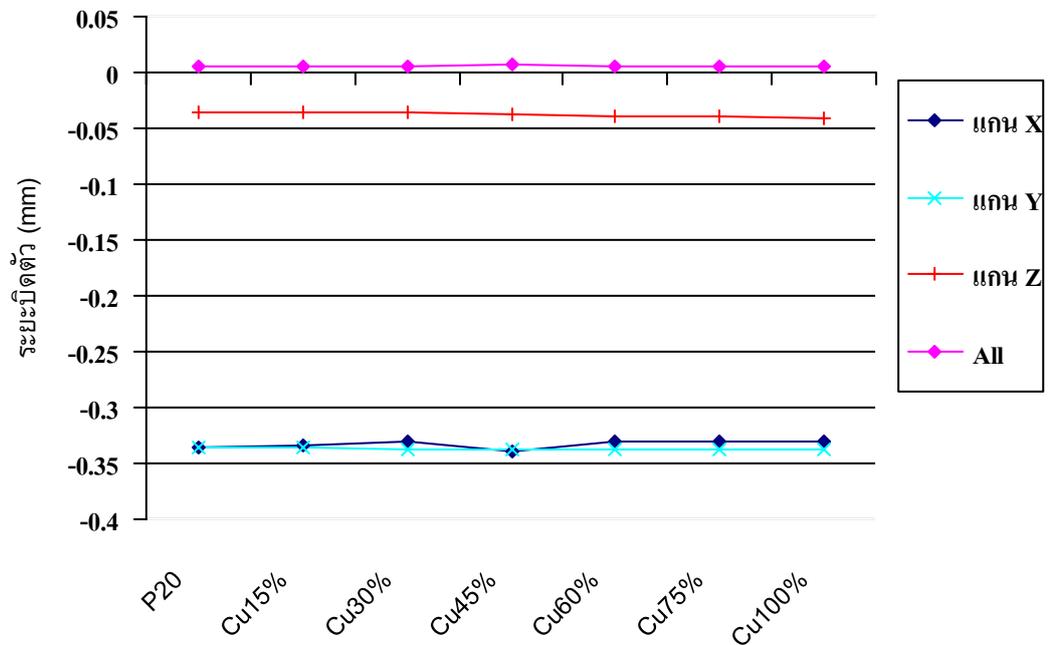
ต่อไปเราจะทำการเปรียบเทียบหาผลกระทบ ต่อการบิดตัวของชิ้นงาน โดยเราจะทำการวัดค่าความแตกต่างจากตำแหน่งต่ำสุดของชิ้นงาน ไปจนถึงตำแหน่งสูงสุดของชิ้นงาน โดยเราจะทำการวัดแยกเป็นแนวแกน X, Y, Z และดูการบิดตัวในภาพรวม (All Deflection) ดังในภาพที่ 4-14 ซึ่งได้ผลวิเคราะห์ออกมาดังตารางที่ 4-6



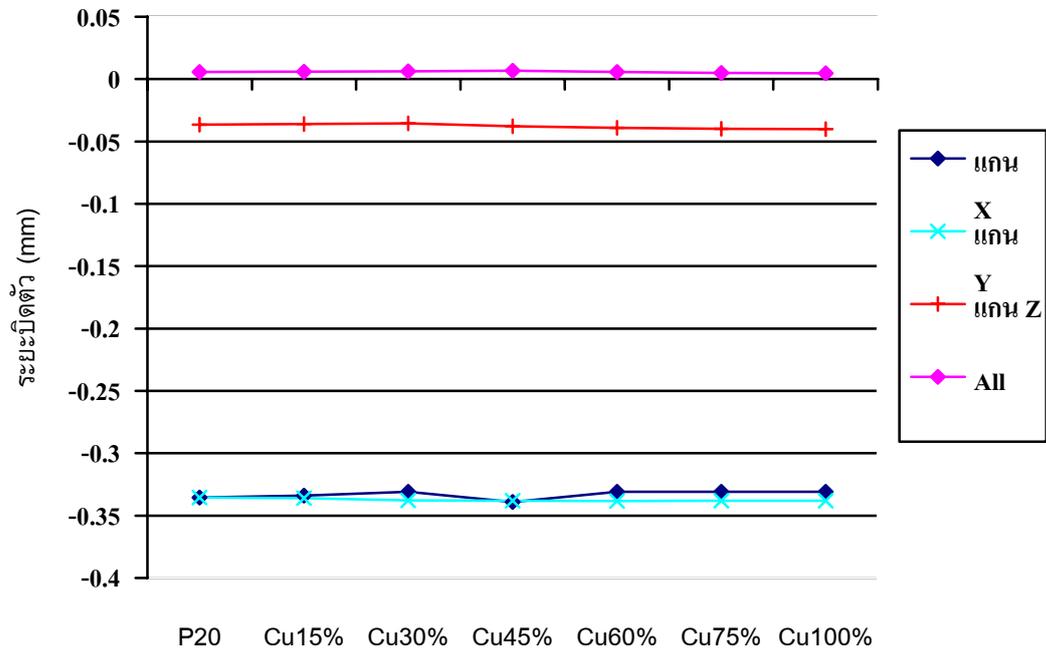
ภาพที่ 4-14 แนวแกนที่ใช้อ้างอิงในการวัดระยะการบิดตัว

ตารางที่ 4-7 ค่าการบิดตัวและหดตัวตามแนวแกนต่าง ๆ

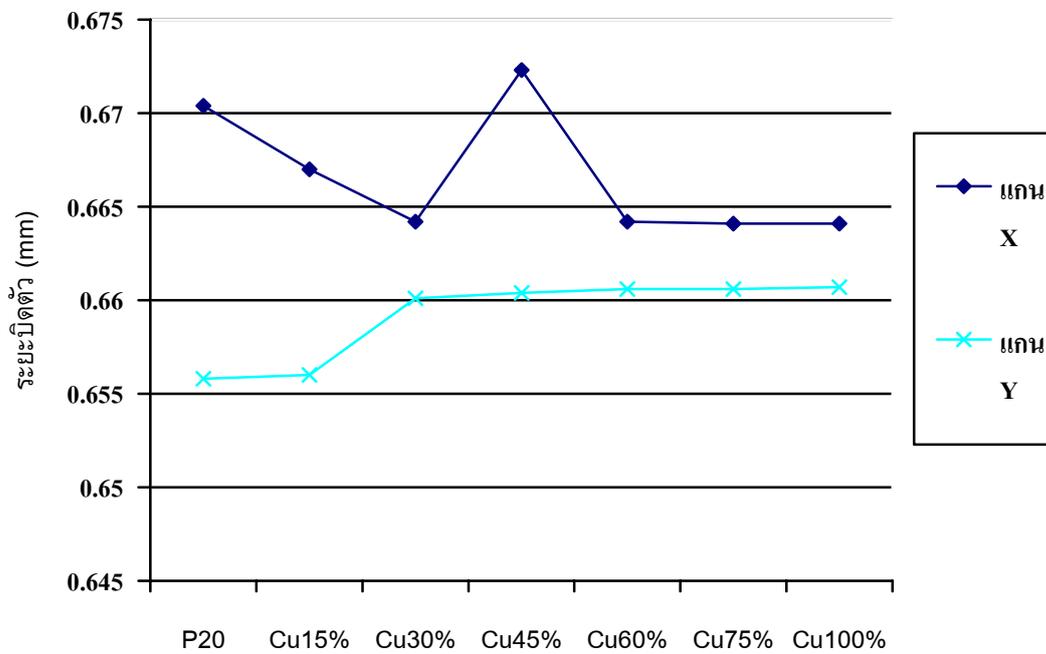
ทิศทาง	ระยะการบิดตัวและหดตัว (Min. / Max. / ระยะหดตัว(X,Y),ระยะโก่งตัว(Z))						
	P20	Cu 15%	Cu 30%	Cu 45%	Cu 60%	Cu 75%	Cu 100%
แกน X	-0.3356	-0.3340	-0.3308	-0.3390	-0.3308	-0.3308	-0.3308
	0.3348	0.3330	0.3334	0.3333	0.3334	0.3333	0.3333
	0.6704	0.6670	0.6642	0.6723	0.6642	0.6641	0.6641
แกน Y	-0.3356	-0.3360	-0.3379	-0.3381	-0.3382	-0.3381	-0.3381
	0.3202	0.3200	0.3222	0.3223	0.3224	0.3225	0.3226
	0.6558	0.6560	0.6601	0.6604	0.6606	0.6606	0.6607
แกน Z	-0.0365	-0.0360	-0.0354	-0.0377	-0.0390	-0.0398	-0.0402
	0.0670	0.0679	0.0689	0.0720	0.0711	0.0719	0.0729
	0.1035	0.1039	0.1043	0.1097	0.1101	0.1117	0.1131
All Deflection	0.0058	0.0060	0.0062	0.0068	0.0056	0.0050	0.0047
	0.4666	0.4689	0.4709	0.4715	0.4717	0.4719	0.4720
	0.4608	0.4629	0.4647	0.4647	0.4661	0.4669	0.4673



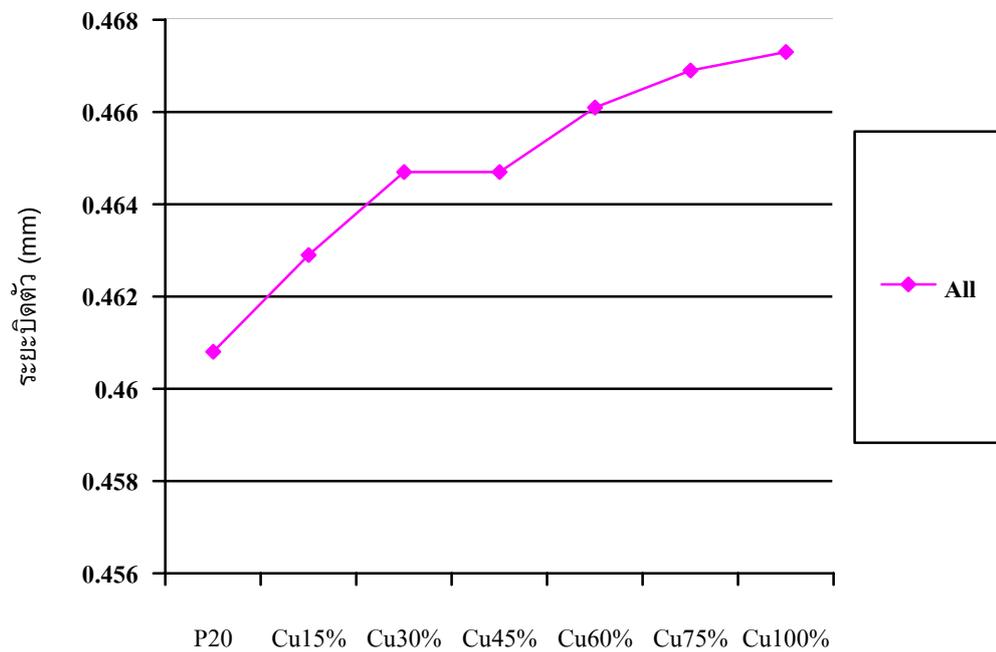
ภาพที่ 4-15 ระยะการบิดตัวและหดตัวในช่วงค่า Min.



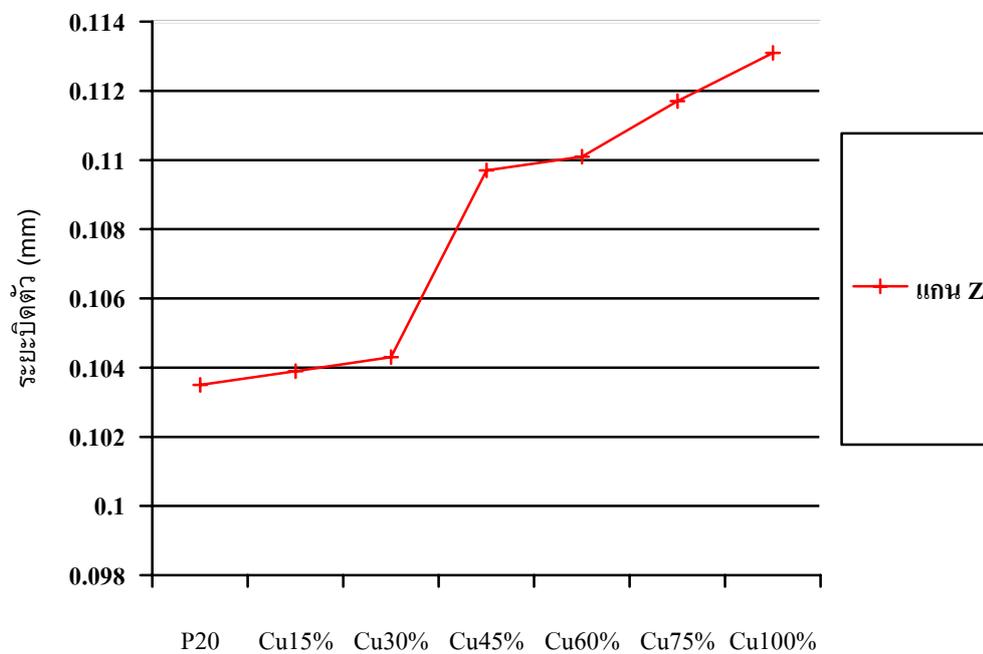
ภาพที่ 4-16 ระยะการบิดตัวและหดตัวในช่วงค่า Max.



ภาพที่ 4-17 ระยะการบิดตัวและหดตัวแกน X และ Y (Max. - Min.)



ภาพที่ 4-18 ระยะการบิดตัวและหดตัวโดยรวม (All deflection) (Max. – Min.)



ภาพที่ 4-19 ระยะการบิดตัวและหดตัวแกน Z (Max. – Min.)

จากผลการวิเคราะห์ จะเห็นว่าการฝังทองแดงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้น ของการบิดตัว (Warpage) ในชิ้นงานฉีดที่เป็นพลาสติกกลุ่ม PS แต่ปริมาณที่เพิ่มขึ้นน้อยมาก จนไม่น่าจะส่งผลต่อคุณภาพงานฉีด เมื่อเทียบกับการใช้แม่พิมพ์จากเหล็กทั่วไป โดยเฉพาะถ้าเรามีเส้นแนวเสริมแรงซึ่งจะดูได้จากการบิดตัวในแกน X จะเห็นว่าการบิดตัวแทบไม่แตกต่างจากแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กเลย

#### 4.1.4 ผลกระทบต่อขนาดการหดตัวและบิดตัว (Deflection & Warpage) ในพลาสติก Polypropylene (PP)

ในการวิเคราะห์เราจะใช้เงื่อนไขการวิเคราะห์เดียวกับพลาสติก PS และทำการวัดค่าในจุดต่าง ๆ เช่นเดียวกันกับในภาพที่ 4-13 เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบค่าการบิดตัวระหว่างพลาสติกทั้ง 2 กลุ่มได้ ซึ่งจากผลวิเคราะห์เราวัดค่า ณ จุดต่าง ๆ ได้ดังนี้

**ตารางที่ 4-8** ค่าที่ได้จากการวัดขนาดของชิ้นงานหลังการหดตัวของพลาสติก PP

ตำแหน่งที่วัด	ขนาดที่วัดได้ (mm)							
	ขนาดตามแบบ	P20	Cu 15%	Cu 30%	Cu 45%	Cu 60%	Cu 75%	Cu 100%
A – B	100	99.00	99.04	99.05	99.05	99.05	99.05	99.05
A – C	100	99.00	99.04	99.05	99.05	99.05	99.05	99.05
D – F	100	99.00	99.04	99.05	99.05	99.05	99.05	99.05
E – G	100	99.00	99.05	99.05	99.05	99.05	99.05	99.05
H – I	10	9.90	9.90	9.90	9.90	9.90	9.90	9.90
I – J	50	49.51	49.53	49.53	49.53	49.53	49.53	49.53
K – L	10	9.90	9.91	9.91	9.91	9.91	9.91	9.91

**ตารางที่ 4-9** ค่าระยะหดตัวและเปอร์เซ็นต์การหดตัวของชิ้นงานหลังการฉีดของพลาสติก PP

ตำแหน่งที่วัด	ระยะหดตัว (mm) / คิดเป็นเปอร์เซ็นต์						
	P20	Cu 15%	Cu 30%	Cu 45%	Cu 60%	Cu 75%	Cu 100%
A – B	1.00 1.00 %	0.96 0.96 %	0.95 0.95 %				
A – C	1.00 1.00 %	0.96 0.96 %	0.95 0.95 %				
D – F	1.00 1.00 %	0.96 0.96 %	0.95 0.95 %				

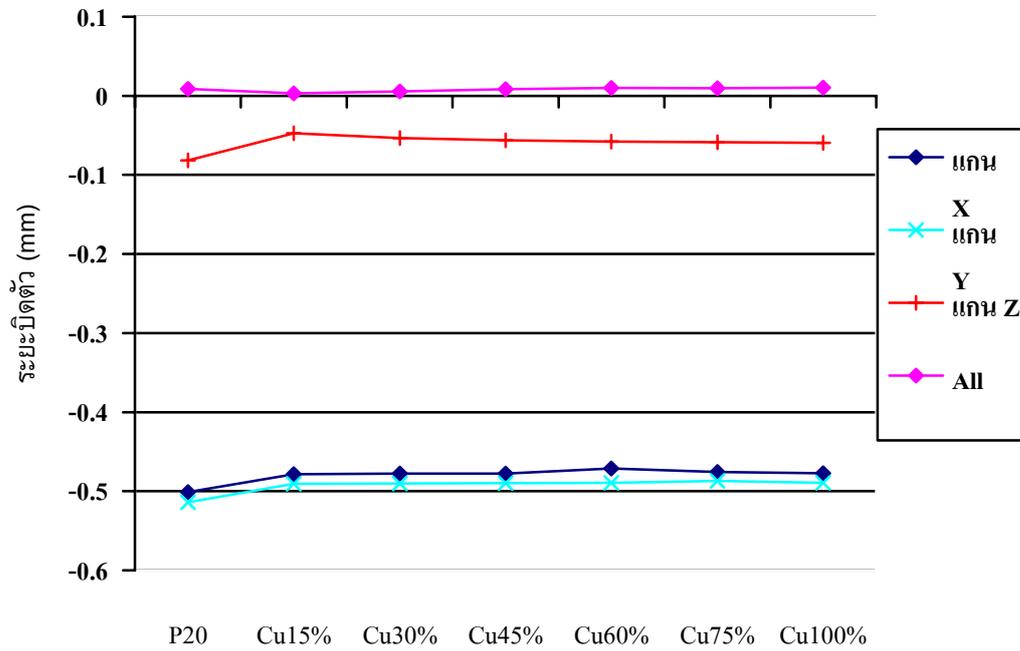
ตารางที่ 4-9 (ต่อ)

ตำแหน่ง ที่วัด	ระยะหดตัว (mm) / คัดเป็นเปอร์เซ็นต์						
	P20	Cu 15%	Cu 30%	Cu 45%	Cu 60%	Cu 75%	Cu 100%
H - I	0.10 1.00 %	0.10 1.00 %	0.10 1.00 %	0.10 1.00 %	0.10 1.00 %	0.10 1.00 %	0.10 1.00 %
I - J	0.49 0.98 %	0.47 0.94 %	0.47 0.94 %	0.47 0.94 %	0.47 0.94 %	0.47 0.94 %	0.47 0.94 %
K - L	0.10 1.00%	0.09 0.90 %					

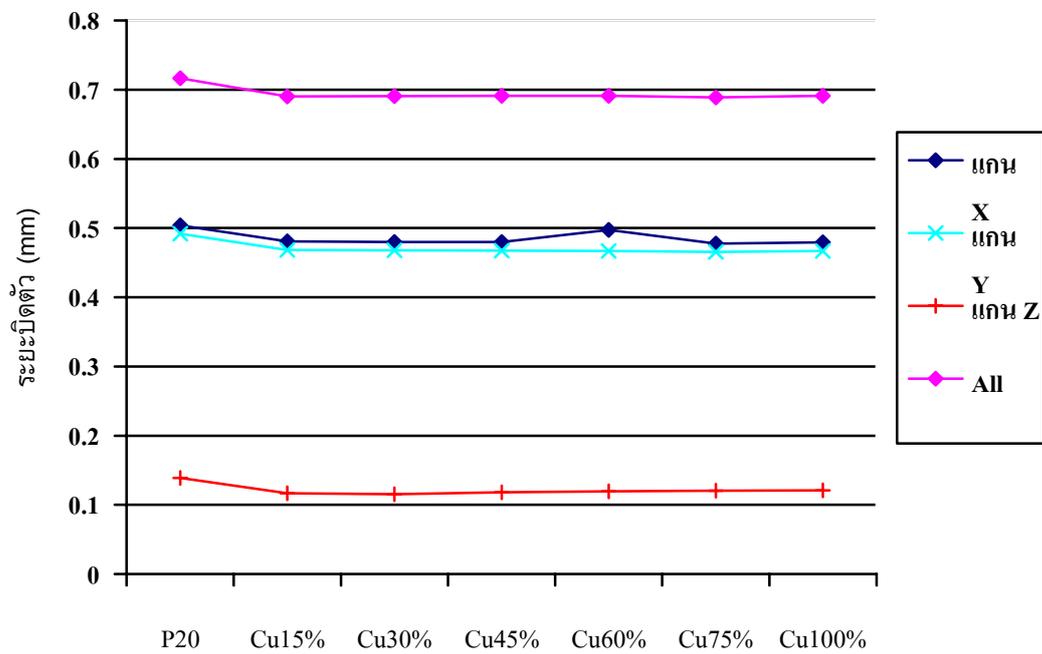
จากผลการวิเคราะห์ ตามตารางที่ 4-8 และ ตารางที่ 4-9 เราจะเห็นว่า การฝังทองแดงในแม่พิมพ์ไม่ส่งผลต่อการหดตัวเชิงระยะทางเช่นเดียวกับพลาสติก PS ซึ่งทำให้เราสามารถใช้งานคำนวณเพื่อชดเชยขนาดเผื่อหดได้ตามปกติเหมือนกับการใช้แม่พิมพ์จากเหล็กทั่ว ๆ ไป ทำให้ง่ายต่อการออกแบบ ซึ่งจากผลวิเคราะห์จะเห็นว่า ชีงงานวิเคราะห์ของเราจะมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.9 - 1 % ต่อไปเราจะทำการเปรียบเทียบหาผลกระทบต่อ การบิดตัวของ ชีงงาน โดยเราจะทำการวัดหาค่าความแตกต่างจากตำแหน่งต่ำสุดของชีงงานไปจนถึงตำแหน่งสูงสุด เช่นเดียวกับพลาสติก PS โดยเราจะทำการวัดแยกเป็นแนวแกน X, Y, Z และดูการบิดตัวในภาพรวม (All Deflection) ดังในภาพที่ 4-14

ตารางที่ 4-10 แสดงค่าการบิดตัวและหดตัวตามแนวแกนต่าง ๆ

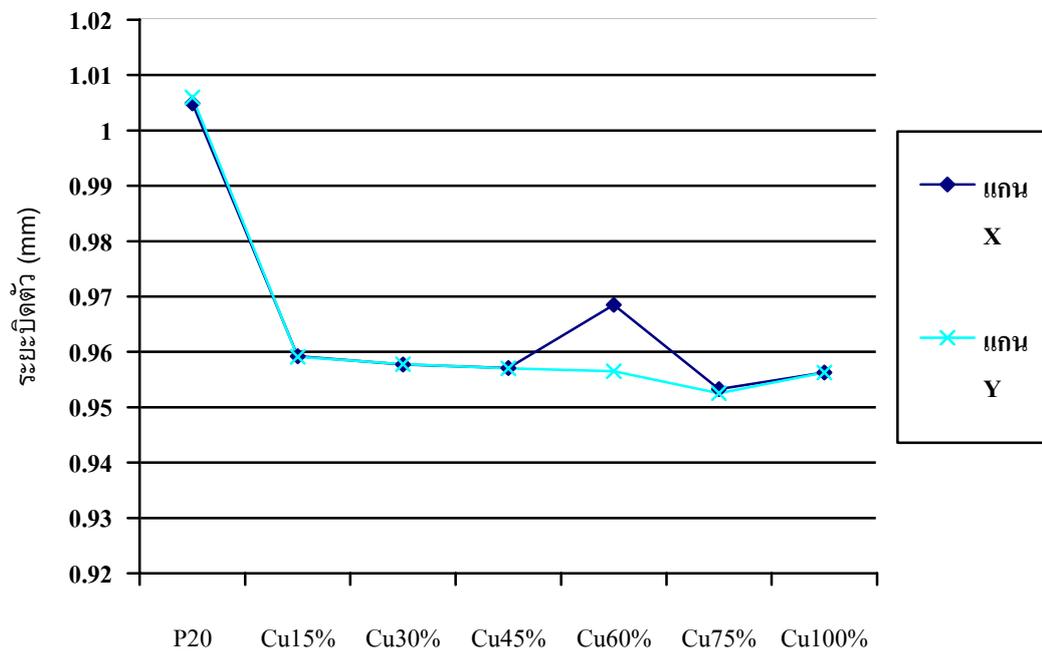
ทิศทาง	ระยะการบิดตัวและหดตัว (Min. / Max. / ระยะหดตัว(X,Y),ระยะโก่งตัว(Z))						
	P20	Cu 15%	Cu 30%	Cu 45%	Cu 60%	Cu 75%	Cu 100%
แกน X	-0.5012	-0.4785	-0.4778	-0.4775	-0.4712	-0.4756	-0.4771
	0.5037	0.4807	0.4799	0.4796	0.4973	0.4777	0.4792
	1.0049	0.9592	0.9577	0.9571	0.9685	0.9533	0.9563
แกน Y	-0.5141	-0.4908	-0.4900	-0.4897	-0.4894	-0.4870	-0.4893
	0.4919	0.4683	0.4678	0.4673	0.4671	0.4655	0.4670
	1.0060	0.9591	0.9578	0.9570	0.9565	0.9525	0.9563
แกน Z	-0.0817	-0.0475	-0.0535	-0.0563	-0.0579	-0.0588	-0.0594
	0.1388	0.1168	0.1154	0.1179	0.1193	0.1205	0.1207
	0.2205	0.1643	0.1689	0.1742	0.1772	0.1793	0.1801



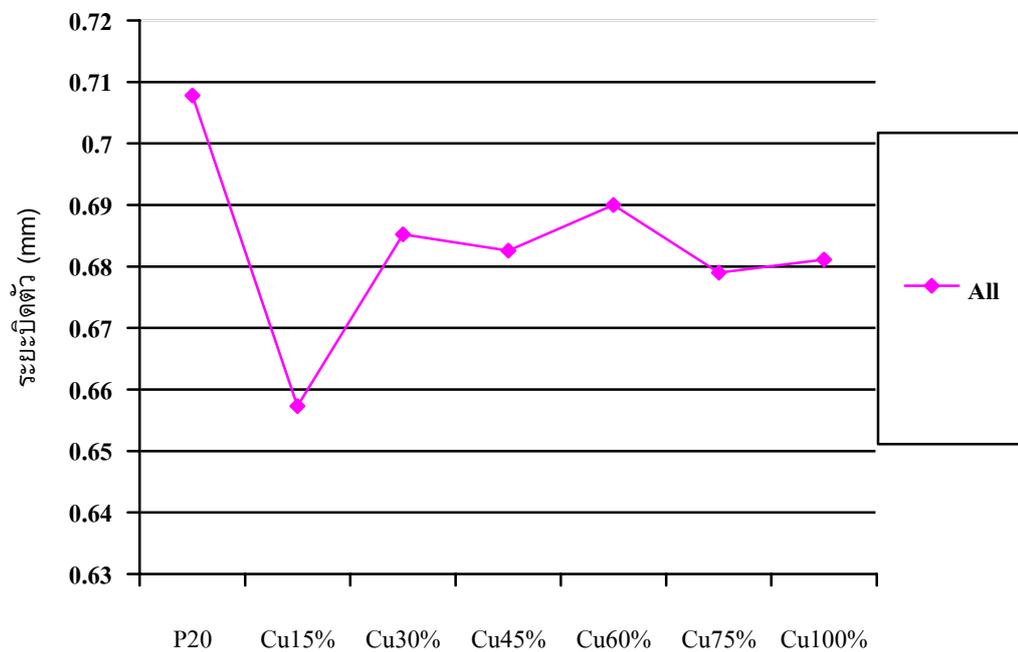
ภาพที่ 4-20 ระยะการบิดตัวและหดตัวในช่วงค่า Min.



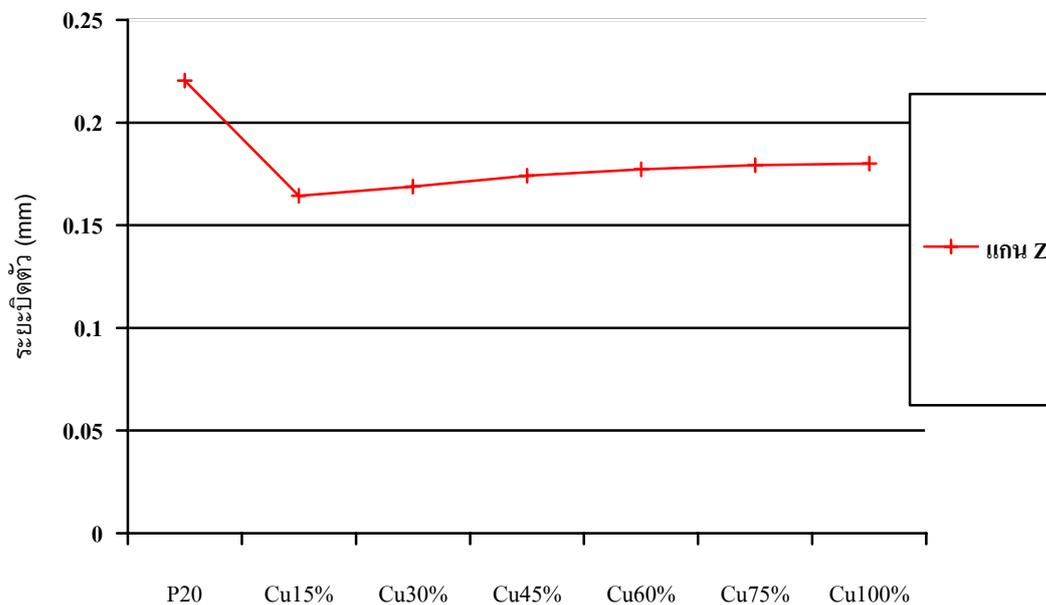
ภาพที่ 4-21 ระยะการบิดตัวและหดตัวในช่วงค่า Max.



ภาพที่ 4-22 ระยะเวลาบิดตัวและหดตัวแกน X และ Y (Max. – Min.)

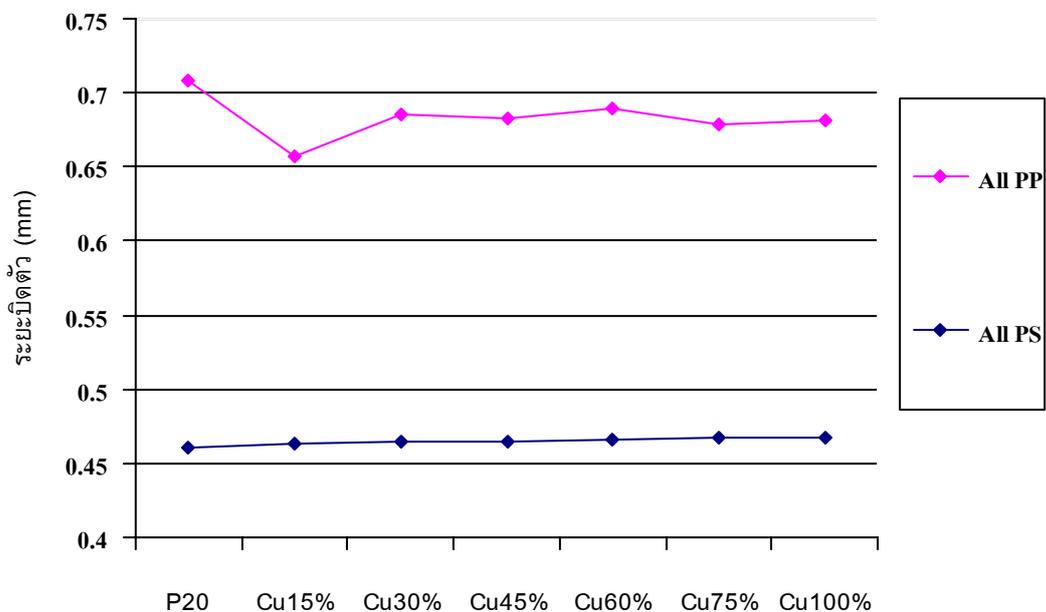


ภาพที่ 4-23 ระยะเวลาบิดตัวและหดตัวโดยรวม (All deflection) (Max. – Min.)

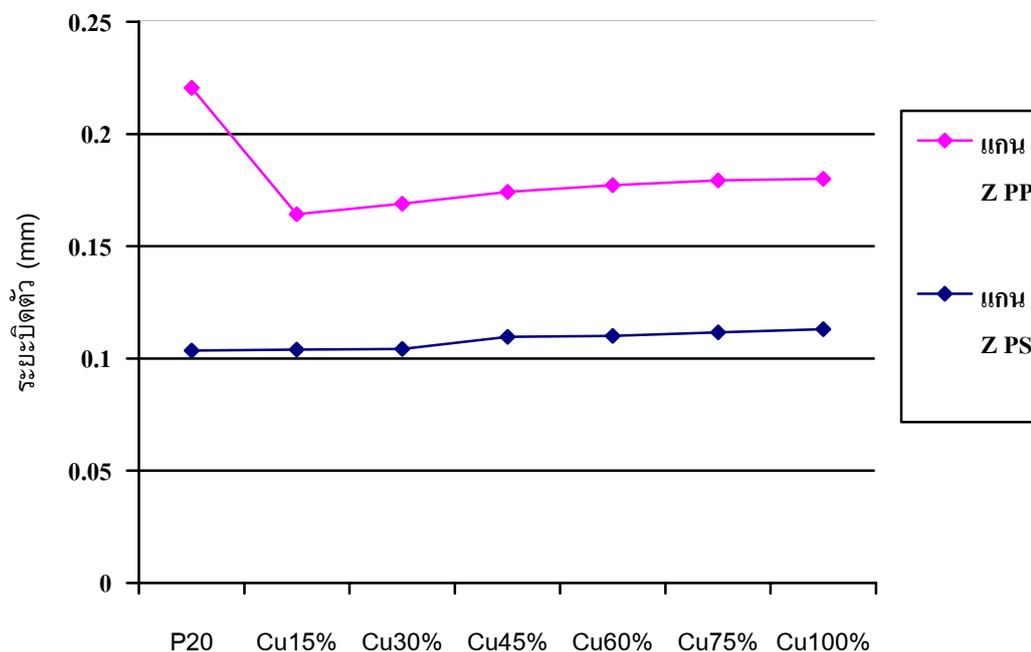


ภาพที่ 4-24 ระยะการบิดตัวและหดตัวแกน Z (Max. – Min.)

จากผลการวิเคราะห์โดยดูจากภาพที่ 4-25 และ 4-26 จะพบว่าการฝังทองแดงในแม่พิมพ์ที่ใช้พลาสติกกลุ่ม PP ในการฉีด จะช่วยลดการบิดตัวของชิ้นงานลงได้แต่ไม่มากนัก โดยถ้าเราฝังขนาดของทองแดงในปริมาณที่ไม่มากนักจะช่วยลดการบิดตัวได้มากกว่า



ภาพที่ 4-25 ขนาดเปรียบเทียบของการบิดตัวและหดตัวระหว่าง PP กับ PS

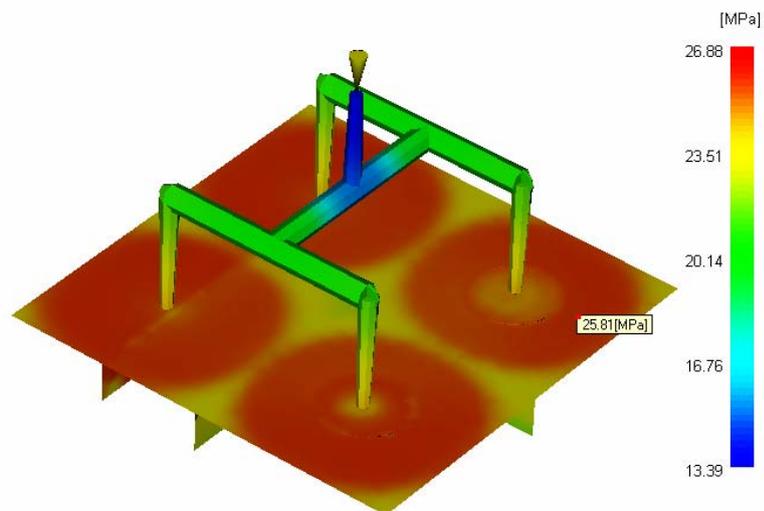


ภาพที่ 4-26 ขนาดเปรียบเทียบของการบิดตัวและหดตัวระหว่าง PP กับ PS ในแนวแกน Z

และเมื่อเรานำผลวิเคราะห์การบิดตัวของพลาสติกทั้ง 2 กลุ่มมาเทียบกันจะได้กราฟตามภาพที่ 4-25 และ 4-26 ซึ่งจะเห็นว่า พลาสติกในกลุ่ม Semi Crystalline Thermoplastic มีการหดตัวและบิดตัวมากกว่า พลาสติกกลุ่ม Amorphous Thermoplastic

#### 4.1.5 ผลกระทบต่อการเกิดความเค้นตกค้าง (Residual stress) ในชิ้นงาน

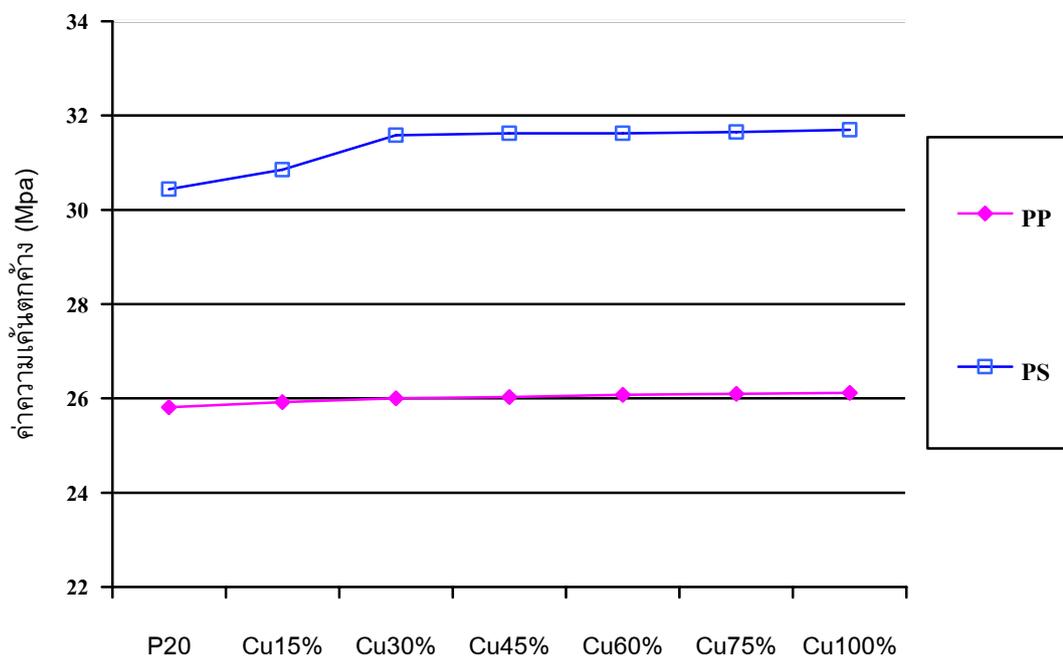
เนื่องจากการฝังทองแดงในแม่พิมพ์ส่งผลกระทบโดยตรง ต่อการเย็นตัวของชิ้นงานทำให้อาจส่งผลต่อการเกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงานในการนำไปใช้งานต่อไป ดังนั้นเราจึงต้องพิจารณาแนวโน้มของการเกิดความเค้นตกค้างในชิ้นงาน โดยจะทำการวัดค่าความเค้นตกค้างสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงานหลังจากทำการฝังทองแดงแบบต่าง ๆ ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่



ภาพที่ 4-27 ตัวอย่างผลวิเคราะห์ความเค้นตกค้างในชิ้นงานพลาสติก PS

ตารางที่ 4-11 ค่าความเค้นตกค้างสูงสุดที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน

ชนิดของวัสดุแม่พิมพ์	ค่าความเค้นตกค้าง (MPa)	
	PS	PP
P20	25.81	30.44
Cu15%	25.92	30.85
Cu30%	26.00	31.58
Cu45%	26.03	31.62
Cu60%	26.08	31.62
Cu75%	26.10	31.65
Cu100%	26.12	31.70

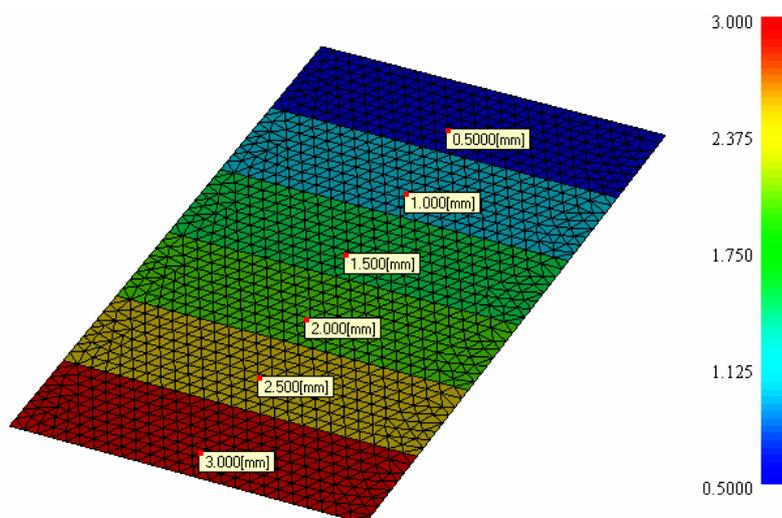


ภาพที่ 4-28 ค่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน เมื่อใช้ทองแดงแบบต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าเมื่อใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์ ความเค้นตกค้างในแม่พิมพ์มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ทั้งในพลาสติก PP และ PS แต่ปริมาณที่เพิ่มขึ้นไม่สูงมากนักโดยเมื่อใช้ทองแดงฝัง 75% ในพลาสติก PP ค่าความเค้นตกค้างจะเพิ่มขึ้น 1.11% และในพลาสติก PS ค่าความเค้นตกค้างจะเพิ่มขึ้น 3.91% ซึ่งทำให้คุณภาพของชิ้นงานไม่แตกต่างกันมากนักแม้เราจะใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์หรือไม่ก็ตาม

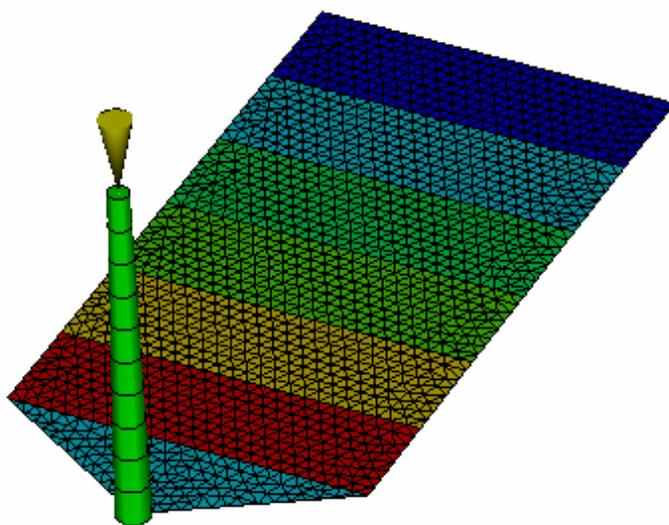
#### 4.2 ผลกระทบของอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อการเย็นตัว

ในการทดลองหาผลกระทบของอัตราการถ่ายเทความร้อน ต่อการเย็นตัวเราจะใช้การวิเคราะห์ผลในโปรแกรม CAE เช่นกัน แต่เราจะทำการออกแบบชิ้นงานใหม่ตามภาพที่ 4-29 โดยกำหนดให้มีความหนาแตกต่างกันเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อความหนาชิ้นงานที่แตกต่างกันด้วย



ภาพที่ 4-29 รูปร่างชิ้นงานและความหนาที่ใช้การวิเคราะห์

จากนั้นทำการออกแบบทางวิ่งและทางเข้าโดยใช้ทางเข้าแบบพัด (Fan Gate) และให้พลาสติกไหลเข้าชิ้นงานทางด้าน ความหนา 3 mm ก่อน ดังในภาพที่ 4-30



ภาพที่ 4-30 ทางวิ่งพร้อมกับทางเข้าแบบใบพัดที่ใช้

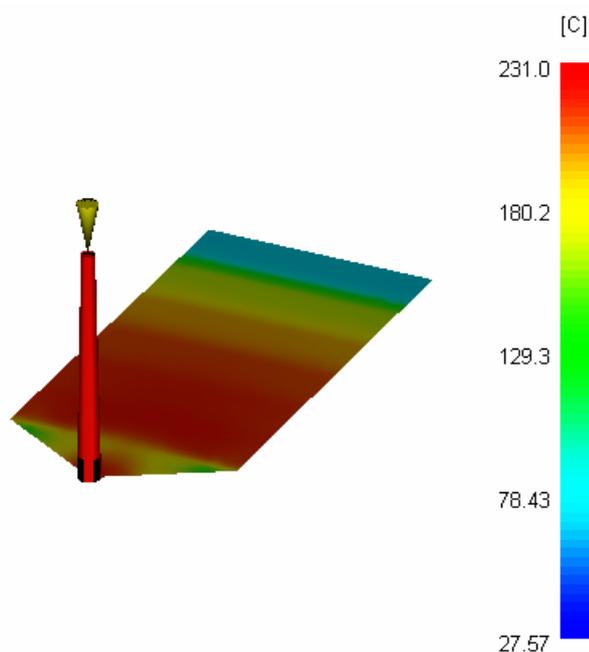
โดยมีเงื่อนไขในการวิเคราะห์ดังนี้  
 ตารางที่ 4-12 เงื่อนไขการฉีดที่ใช้ในการวิเคราะห์

ตัวแปร	ค่าที่กำหนด	หน่วย
เวลาฉีด (Injection Time)	0.8	Sec
อัตราการฉีด (Flow rate)	12	Cm <sup>3</sup> /min
แรงดันฉีด (Injection Pressure)	35	Mpa
เวลาฉีดย่ำ (Holding Time)	8	Sec
แรงดันฉีดย่ำ (Holding Pressure)	20	Mpa
อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (Ejection Temperature) PS	75	°C
อุณหภูมิปลดชิ้นงาน (Ejection Temperature) PP	70	°C
อุณหภูมิฉีด (Melt Temperature)	220	°C

เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ผลกระทบต่อการหดตัวเราจะใช้พลาสติก 2 กลุ่มในการวิเคราะห์ คือ พลาสติก Polystyrene (PS) และ Polypropylene (PP) ตามลำดับ

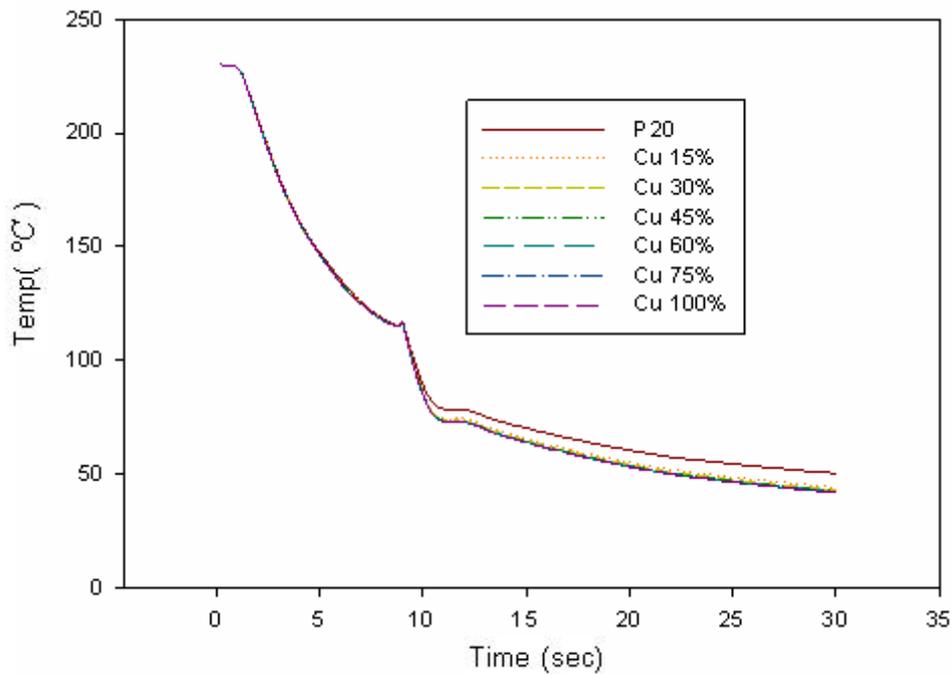
#### 4.2.1 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในพลาสติกกลุ่ม Polypropylene (PP)

ในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเราจะใช้ผลวิเคราะห์ Bulk Temperature ดังในภาพที่ 4-31 เป็นตัววัดผลซึ่งผลวิเคราะห์ดังกล่าวจะเป็นผลวิเคราะห์ของ อุณหภูมิ ณ จุดต่าง ๆ ในแต่ละช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มฉีดไปจนกระทั่งปลดชิ้นงาน

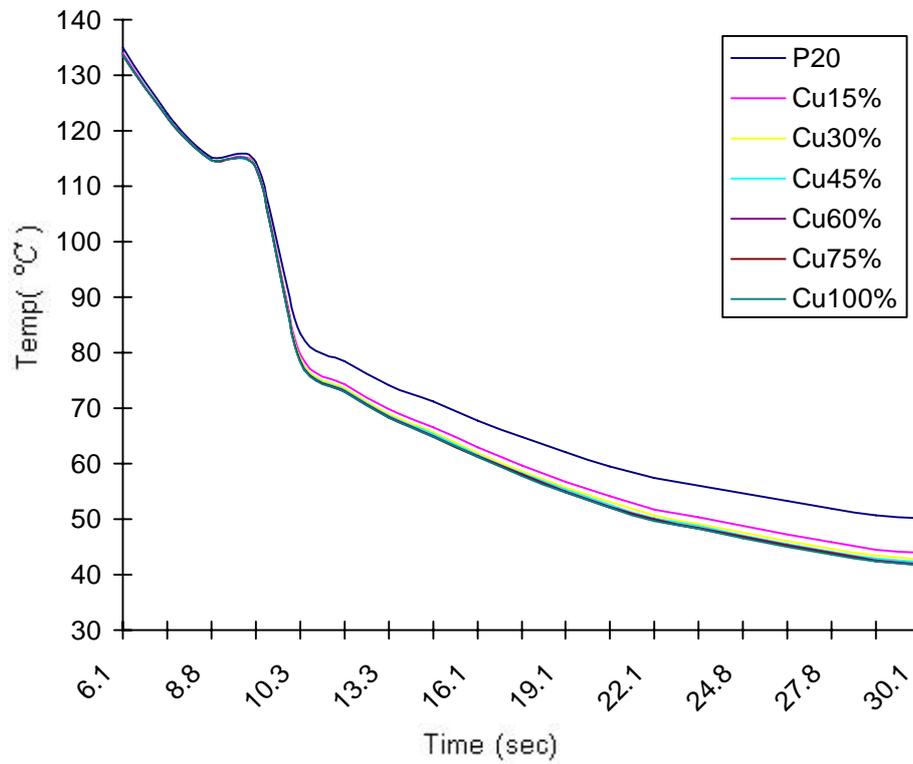


ภาพที่ 4-31 ตัวอย่างของผลวิเคราะห์ Bulk Temperature (Mid Plane)

โดยในการเปรียบเทียบ เราจะดูถึงผลกระทบในแต่ละช่วงความหนาด้วยและเนื่องจากเป็นผลวิเคราะห์ที่แสดงผลในทุก ๆ ช่วงเวลาเราจึงแสดงผลการเปรียบเทียบด้วย กราฟดังต่อไปนี้



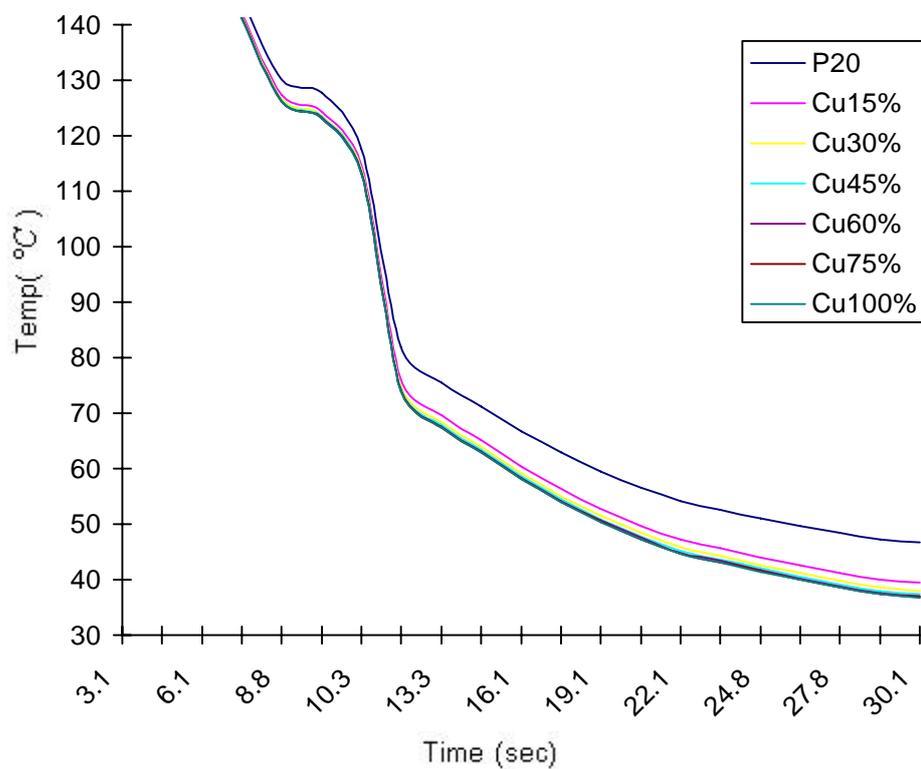
**ภาพที่ 4-32** การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของชิ้นงานช่วงความหนา 3 mm จากภาพที่ 4-32 เราจะเห็นว่าช่วงที่มีความแตกต่างของอุณหภูมিরะหว่างวัสดุแม่พิมพ์แต่ละชนิด จะเริ่มที่เวลาประมาณที่ เวลาฉีดถึง 7 วินาที ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการอ่านผลวิเคราะห์เราจะทำการสร้างกราฟเฉพาะช่วงที่เริ่มมีความแตกต่างเท่านั้นซึ่งจะได้กราฟดังรูปต่อไปนี้



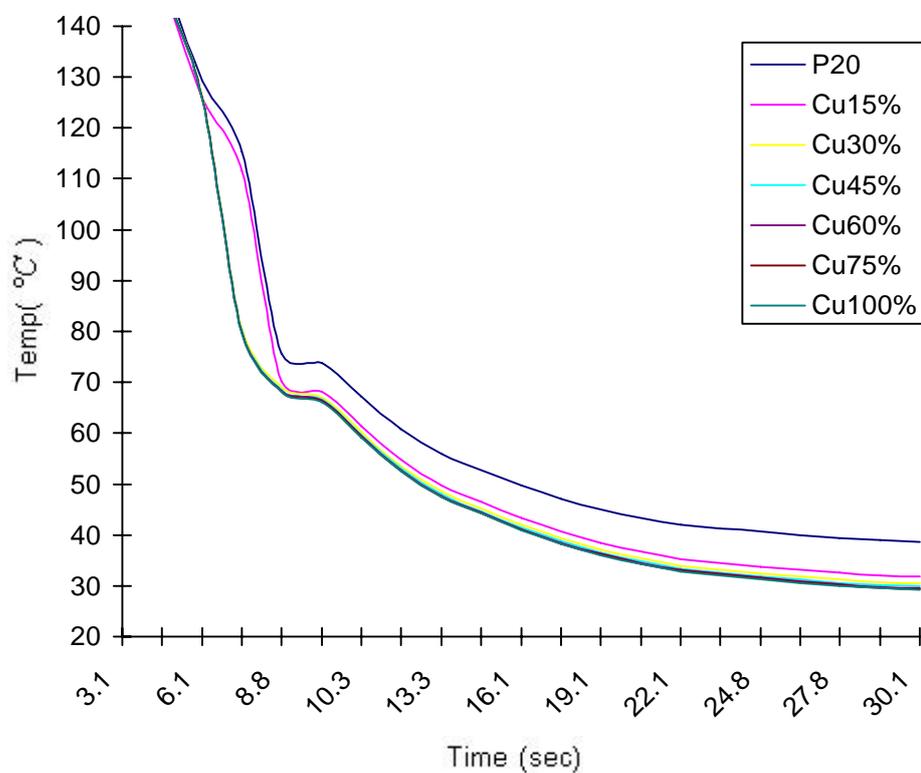
ภาพที่ 4-33 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 3 mm ในช่วงที่มีความแตกต่างกัน

จากภาพที่ 4-33 จะเห็นว่าในชิ้นงานจากพลาสติก PP ที่ความหนา 3 mm เมื่อเราใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์จะช่วยลดเวลาเย็นตัวลงได้ 10 – 25 % ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณทองแดงที่ใช้ฝัง

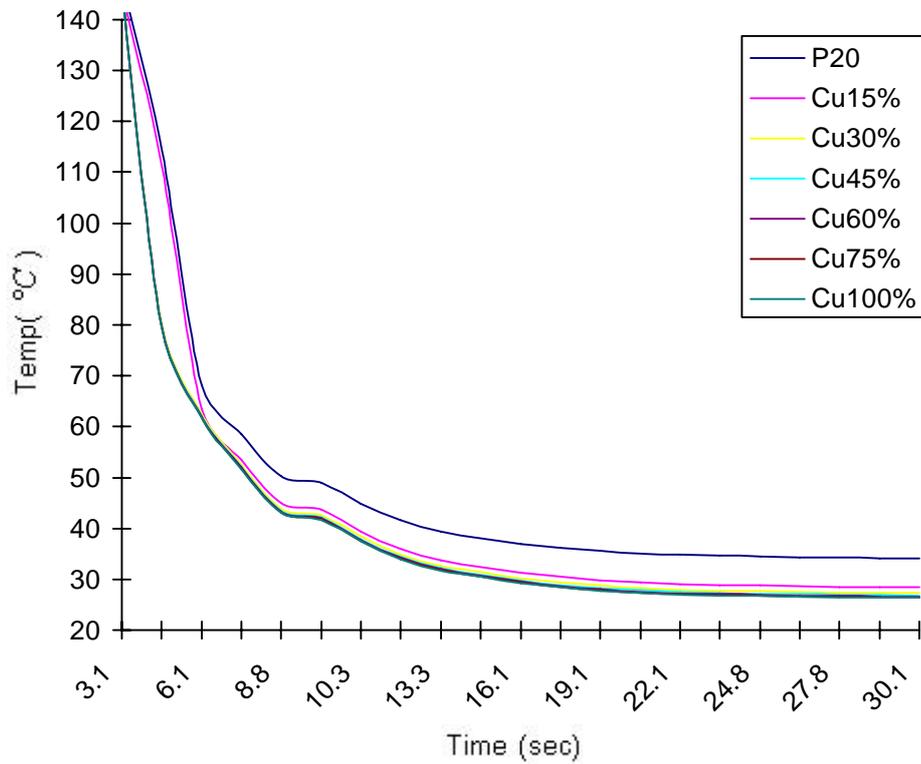
ในทำนองเดียวกันสำหรับความหนาอื่นๆเราจะทำการสร้างกราฟและตารางเปรียบเทียบเพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อความหนาอื่น ๆ



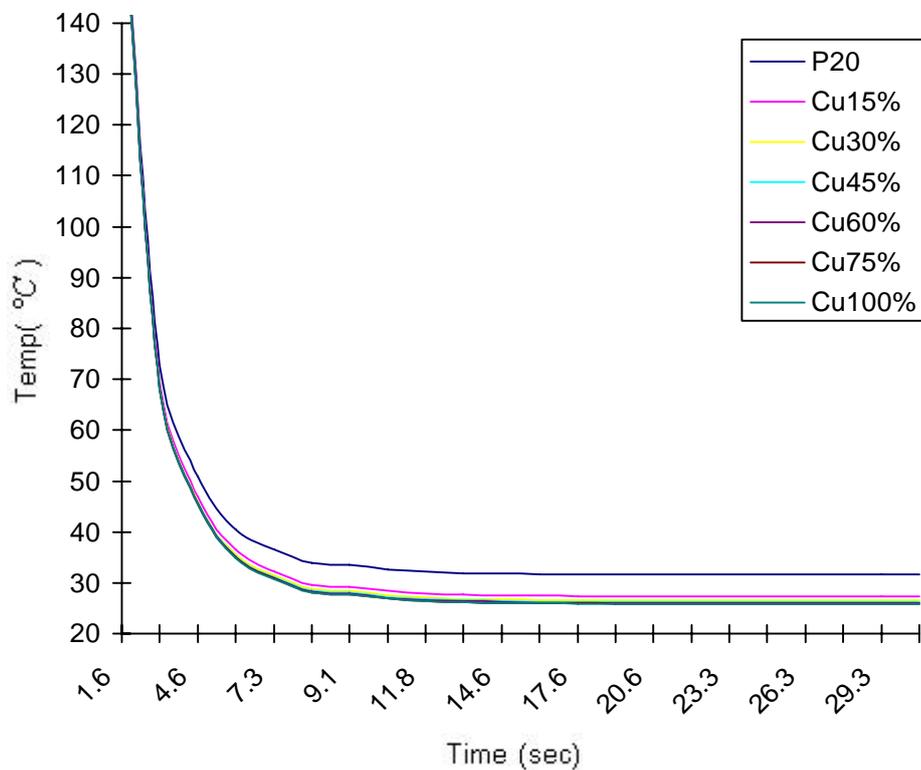
ภาพที่ 4-34 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 2.5 mm ในช่วงที่มีความแตกต่างกัน



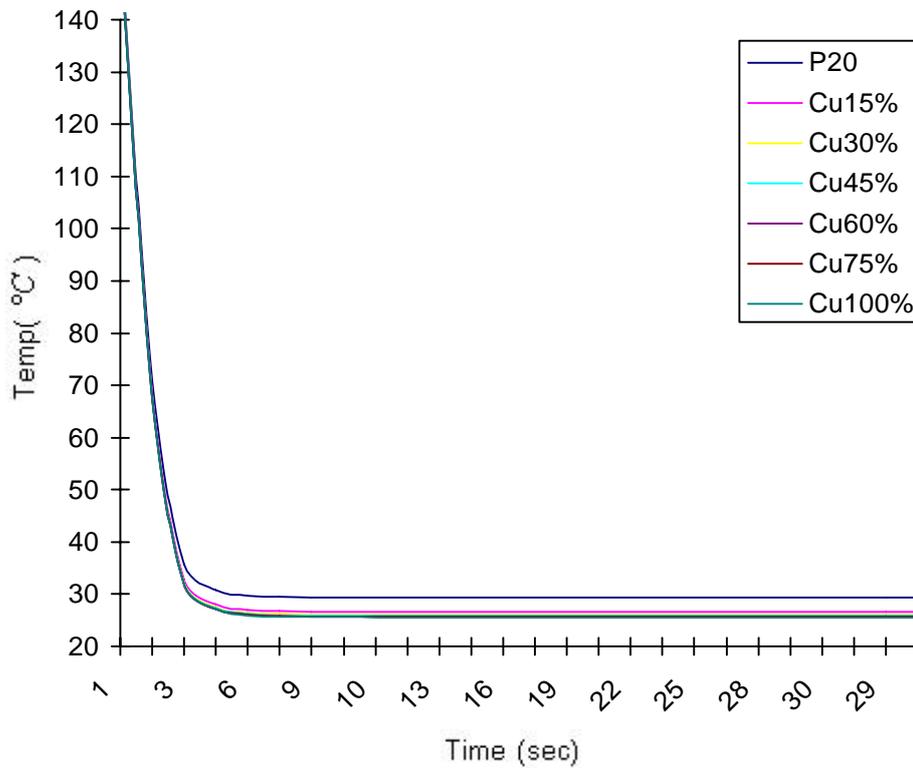
ภาพที่ 4-35 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 2 mm ในช่วงที่มีความแตกต่างกัน



ภาพที่ 4-36 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 1.5 mm ในช่วงที่มีความแตกต่างกัน



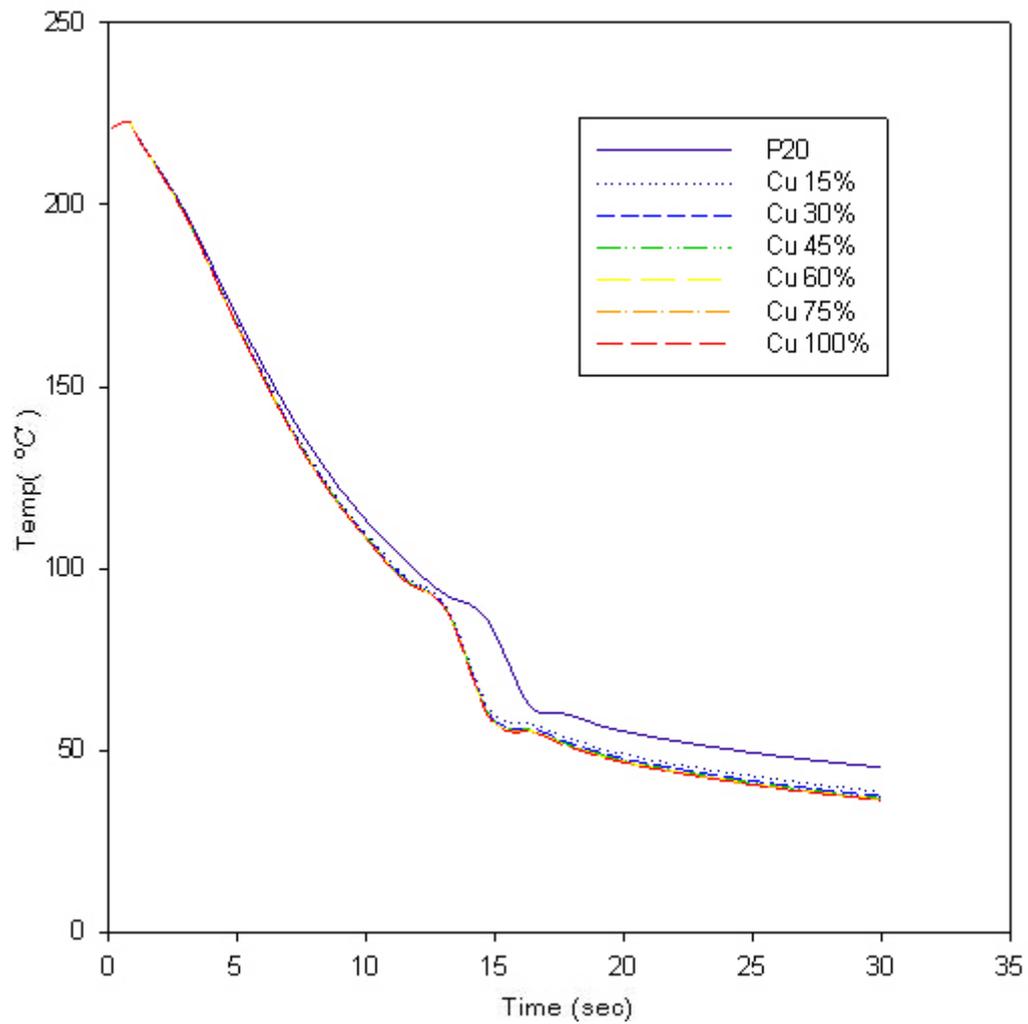
ภาพที่ 4-37 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 1 mm ในช่วงที่มีความแตกต่างกัน



ภาพที่ 4-38 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชิ้นงานหนา 0.5 mm ในช่วงที่มีความแตกต่างกัน

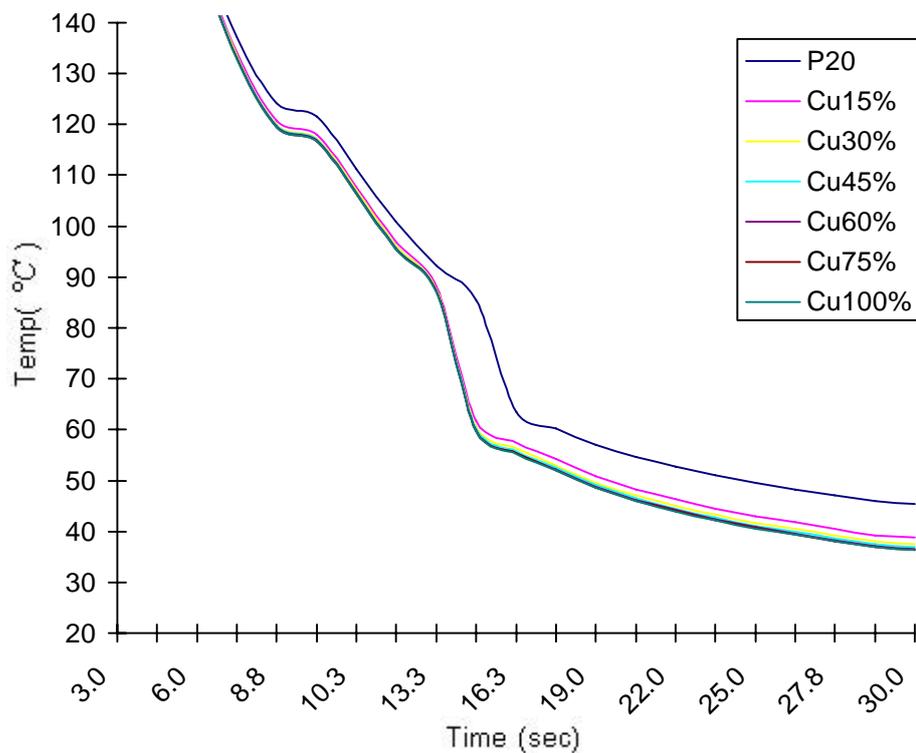
#### 4.2.2 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในพลาสติกกลุ่ม Polystyrene (PS)

ในการทดลองก็จะทำเช่นเดียวกัน เพียงแต่เราจะทำการเปลี่ยนวัสดุนี้จาก PP เป็น PS และเปลี่ยนอุณหภูมิปลดชิ้นงานเป็น 70 °C ซึ่งจากการวิเคราะห์เราจะได้อกราฟ ดังใน ภาพที่ 4-39

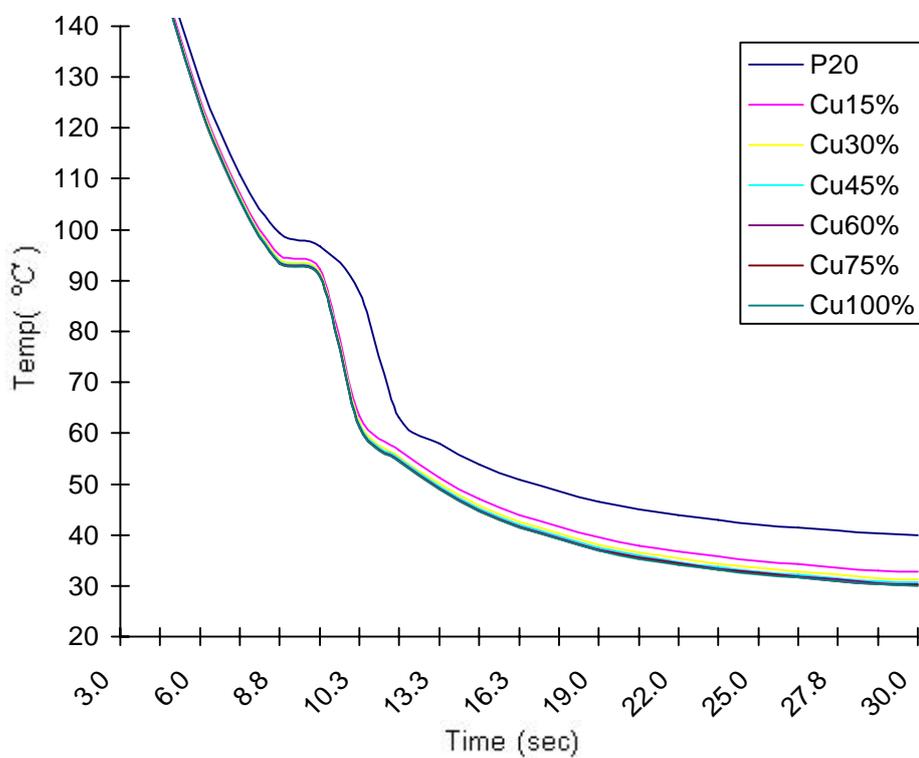


ภาพที่ 4-39 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของชิ้นงานช่วงความหนา 3 mm

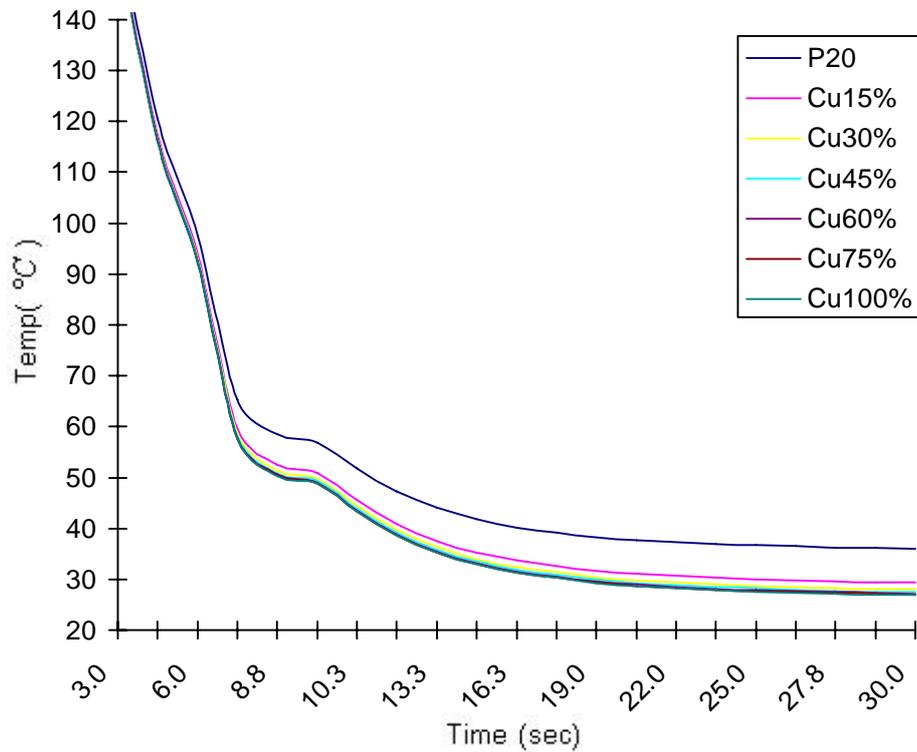
เช่นเดียวกับกับพลาสติก PP เพื่อให้ง่ายต่อการอ่านผลวิเคราะห์ เราจะทำการสร้างกราฟเฉพาะในช่วงที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิเท่านั้นซึ่งจะได้ผลวิเคราะห์ดังต่อไปนี้



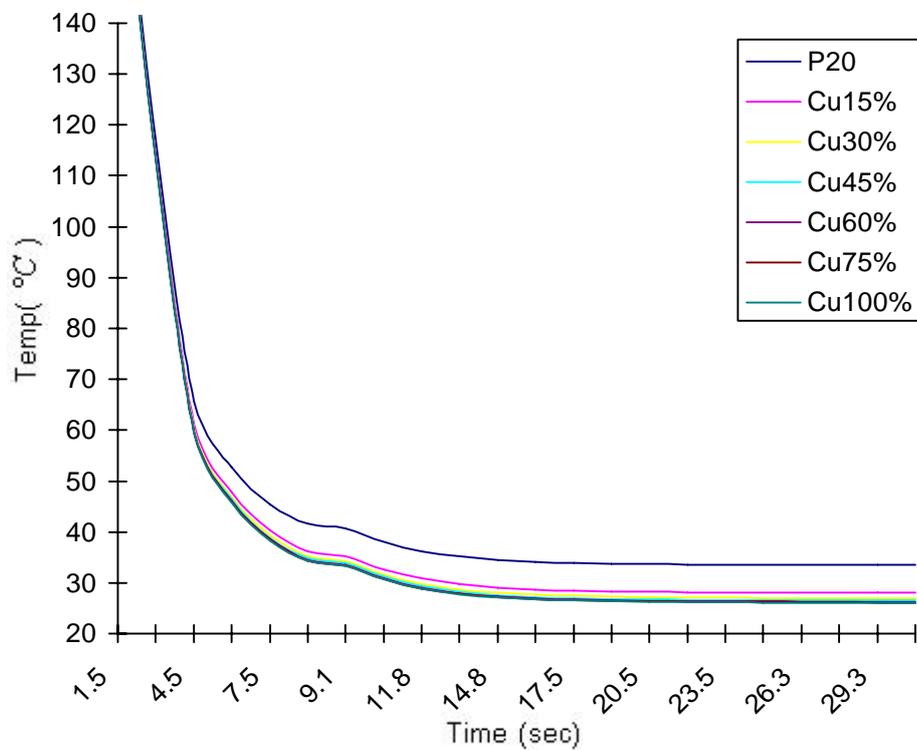
ภาพที่ 4-40 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของชิ้นงาน PS ช่วงความหนา 3 mm



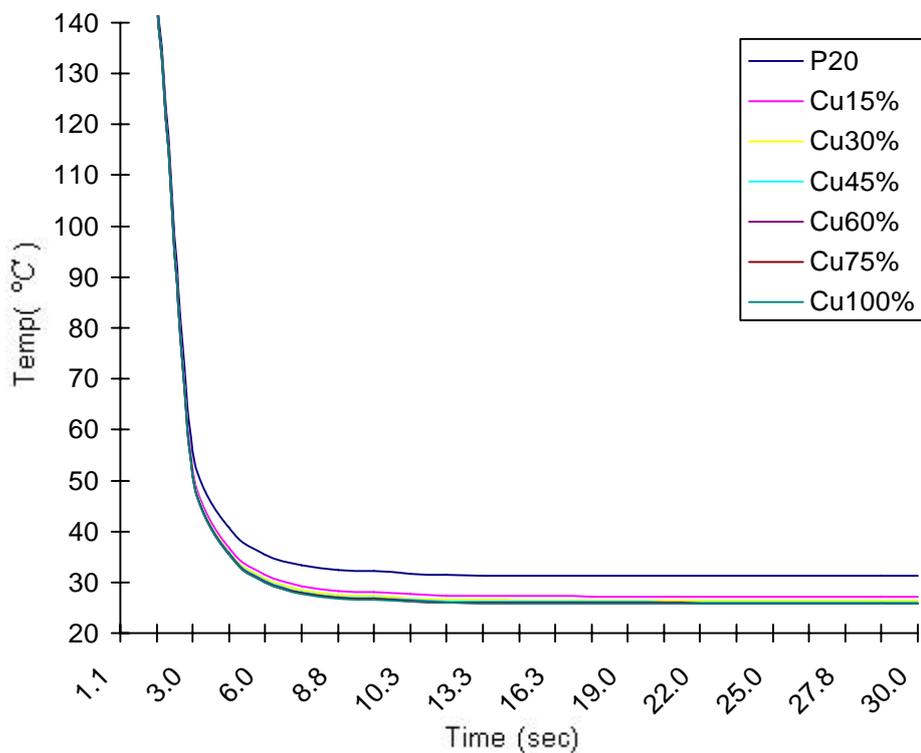
ภาพที่ 4-41 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของชิ้นงาน PS ช่วงความหนา 2.5 mm



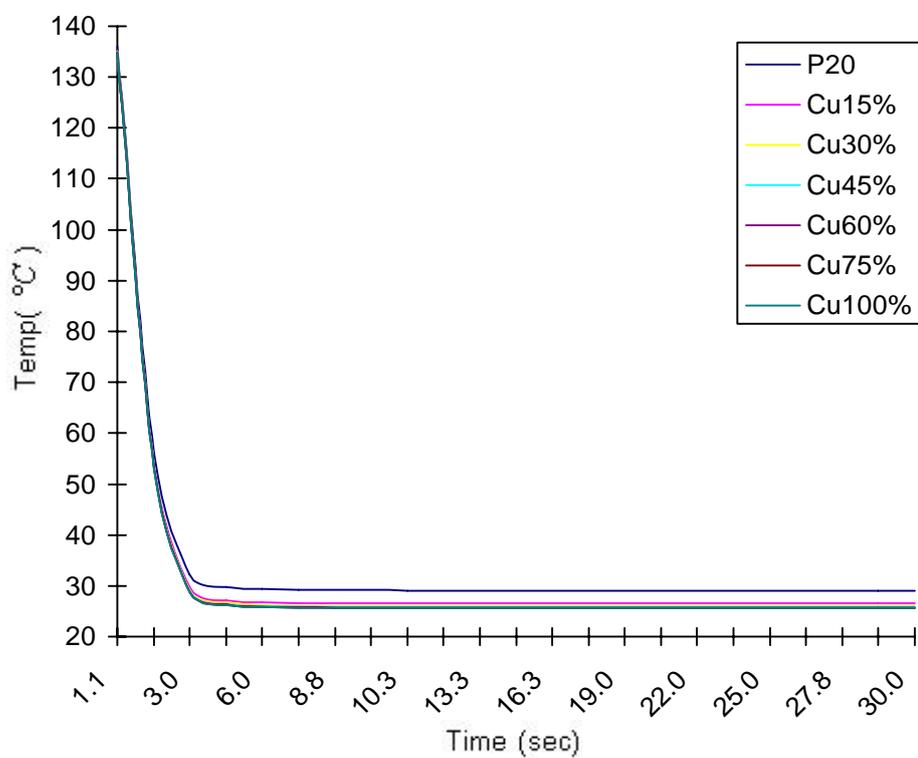
ภาพที่ 4-42 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของชิ้นงาน PS ช่วงความหนา 2 mm



ภาพที่ 4-43 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของชิ้นงาน PS ช่วงความหนา 1.5 mm



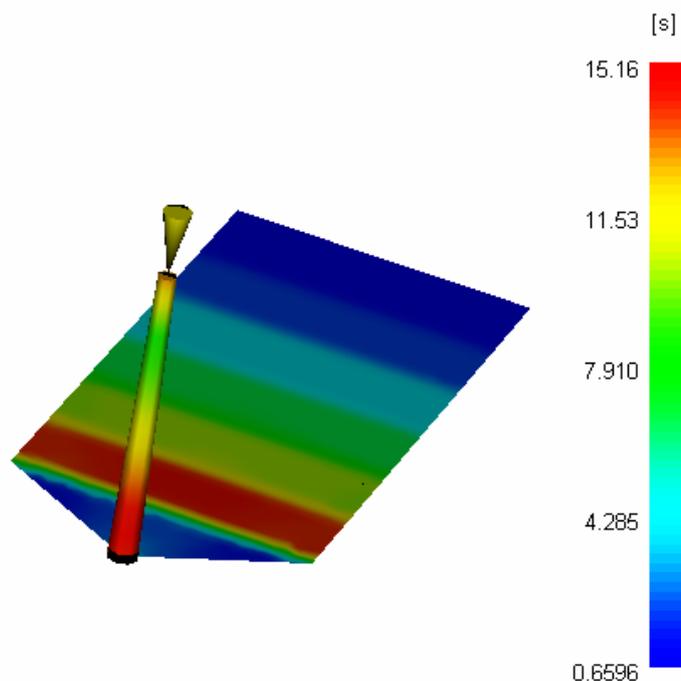
ภาพที่ 4-44 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของชิ้นงาน PS ช่วงความหนา 1 mm



ภาพที่ 4-45 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของชิ้นงาน PS ช่วงความหนา 0.5 mm

### 4.2.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลาแข็งตัวของพลาสติก Polypropylene (PP)

เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบเวลาหล่อเย็น เราจะใช้ผลวิเคราะห์ Time to Freeze ดังในภาพที่ 4-46 เป็นตัวเปรียบเทียบอีกหนึ่ง ซึ่งผลวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถบอกเวลาที่พลาสติกลดอุณหภูมิจนเกิดเป็นชั้นของแข็งในชิ้นงาน



ภาพที่ 4-46 ผลวิเคราะห์ Time to Freeze (Mid Plane)

และจากการวิเคราะห์ในพลาสติก PP เราจะได้ผลการวิเคราะห์ดังนี้

ตารางที่ 4-13 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 3 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	14.940	0	0
Cu15%	14.110	0.83	5.55
Cu30%	13.970	0.97	6.49
Cu45%	13.910	1.03	6.89
Cu60%	13.870	1.07	7.16
Cu75%	13.850	1.09	7.29
Cu100%	13.840	1.1	7.36

ตารางที่ 4-14 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 2.5 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	10.370	0	0
Cu15%	9.788	0.582	5.61
Cu30%	9.688	0.682	6.57
Cu45%	9.645	0.725	6.99
Cu60%	9.622	0.748	7.21
Cu75%	9.602	0.768	7.40
Cu100%	9.601	0.769	7.41

ตารางที่ 4-15 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 2 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	6.577	0	0
Cu15%	6.245	0.332	5.04
Cu30%	6.185	0.392	5.96
Cu45%	6.163	0.414	6.29
Cu60%	6.147	0.430	6.53
Cu75%	6.139	0.438	6.65
Cu100%	6.135	0.442	6.72

ตารางที่ 4-16 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 1.5 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	3.641	0	0
Cu15%	3.495	0.146	4.00
Cu30%	3.468	0.173	4.75
Cu45%	3.455	0.186	5.10
Cu60%	3.451	0.190	5.21
Cu75%	3.447	0.194	5.32
Cu100%	3.445	0.196	5.38

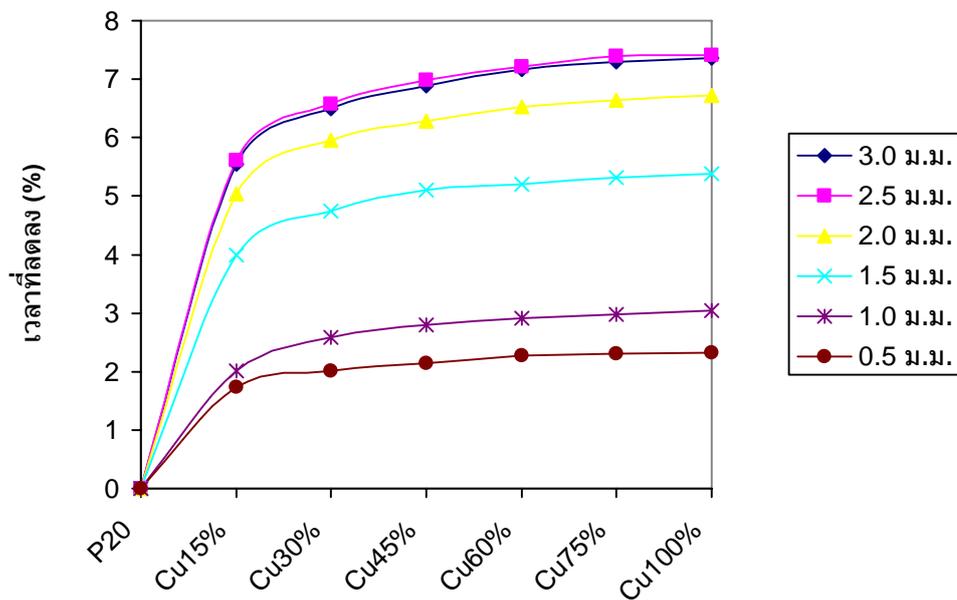
ตารางที่ 4-17 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 1 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	1.577	0	0
Cu15%	1.545	0.032	2.02
Cu30%	1.536	0.041	2.59
Cu45%	1.533	0.044	2.79
Cu60%	1.531	0.046	2.91
Cu75%	1.530	0.047	2.98
Cu100%	1.529	0.048	3.04

ตารางที่ 4-18 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงานหนา 0.5 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	0.3908	0	0
Cu15%	0.3840	0.0068	1.74
Cu30%	0.3829	0.0079	2.02
Cu45%	0.3824	0.0084	2.14
Cu60%	0.3819	0.0089	2.27
Cu75%	0.3818	0.0090	2.30
Cu100%	0.3817	0.0091	2.32

จากข้อมูลในตารางที่ 4-13 ถึง 4-18 ถ้าเรานำ ร้อยละของเวลาที่ลดลงมาสร้างกราฟใหม่จะได้ดังในภาพที่ 4-47



ภาพที่ 4-47 ร้อยละของเวลาที่ลดลงในชิ้นงาน PP แต่ละช่วงความหนา

จากภาพที่ 4-4 จะเห็นว่าการฝังทองแดงในแม่พิมพ์จะช่วยลดเวลาเย็นตัวได้พอสมควร โดยเฉพาะในชิ้นงานที่มีความหนามาก ๆ จะเห็นว่าจะสามารถลดลงได้ถึง 8 % แต่ในชิ้นงานที่มีความหนาไม่มากนักอาจจะไม่ส่งผลกระทบต่อให้เห็นได้อย่างชัดเจน

4.2.3 ผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของเวลาแข็งตัวในพลาสติกกลุ่ม Polystyrene (PS)  
ตารางที่ 4-19 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 3 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	14.80	0	0
Cu15%	13.71	1.09	7.36
Cu30%	13.52	1.28	8.64
Cu45%	13.44	1.36	9.18
Cu60%	13.40	1.4	9.45
Cu75%	13.37	1.43	9.66
Cu100%	13.35	1.45	9.79

ตารางที่ 4-20 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 2 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	10.29	0	0
Cu15%	9.507	0.783	7.60
Cu30%	9.375	0.915	8.89
Cu45%	9.317	0.973	9.45
Cu60%	9.287	1.003	9.74
Cu75%	9.269	1.021	9.92
Cu100%	9.261	1.029	10.00

ตารางที่ 4-21 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 2.5 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	6.497	0	0
Cu15%	6.055	0.442	6.80
Cu30%	5.978	0.519	7.98
Cu45%	5.947	0.55	8.46
Cu60%	5.929	0.568	8.74
Cu75%	5.919	0.578	8.89
Cu100%	5.915	0.582	8.95

ตารางที่ 4-22 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 1.5 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	3.581	0	0
Cu15%	3.382	0.199	5.55
Cu30%	3.349	0.232	6.47
Cu45%	3.335	0.246	6.86
Cu60%	3.327	0.254	7.09
Cu75%	3.322	0.259	7.23
Cu100%	3.320	0.261	7.28

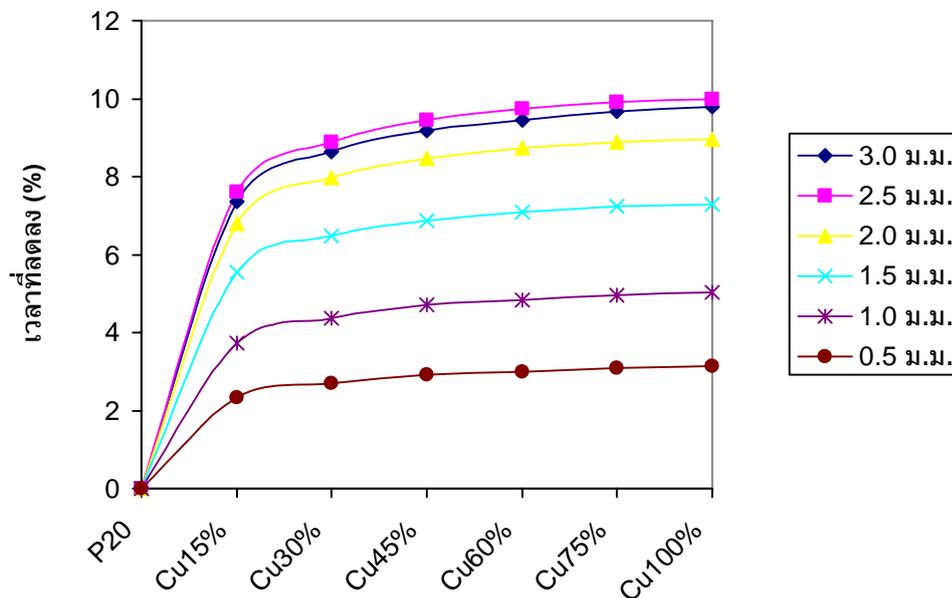
ตารางที่ 4-23 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 1 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	1.550	0	0
Cu15%	1.492	0.058	3.74
Cu30%	1.482	0.068	4.38
Cu45%	1.477	0.073	4.70
Cu60%	1.475	0.075	4.83
Cu75%	1.473	0.077	4.96
Cu100%	1.472	0.078	5.03

ตารางที่ 4-24 เวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน PS หนา 0.5 mm และร้อยละของเวลาที่ลดลง

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงเวลาเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิแข็งตัว		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	0.3794	0	0
Cu15%	0.3705	0.0089	2.34
Cu30%	0.3691	0.0103	2.71
Cu45%	0.3683	0.0111	2.92
Cu60%	0.3680	0.0114	3.00
Cu75%	0.3677	0.0117	3.08
Cu100%	0.3675	0.0119	3.13

จากข้อมูลในตารางที่ 4-19 ถึง 4-24 ถ้าเรานำ ร้อยละของเวลาที่ลดลงมาสร้างกราฟใหม่  
จะได้ดังในภาพที่ 4-48



ภาพที่ 4-48 แสดงร้อยละของเวลาที่ลดลงในชิ้นงาน PS แต่ละช่วงความหนา

จากภาพที่ 4-48 จะเห็นว่าการฝังทองแดงในแม่พิมพ์ที่ใช้ฉีดพลาสติกกลุ่ม PS จะลดเวลาการเย็นตัวได้ดีกว่าพลาสติกกลุ่ม PP โดยเฉพาะในชิ้นงานที่มีความหนามาก ๆ จะช่วยลดลงได้ถึง 10%

#### 4.3 ผลกระทบต่อรอบเวลาการฉีด (Cycle Time)

จากผลวิเคราะห์ทั้ง 2 ตัวที่ผ่านมา เรายังไม่สามารถนำค่าดังกล่าว มาประเมินเป็นผลกระทบต่อเวลาหล่อเย็นและรอบเวลาการฉีดได้ เนื่องจากผลวิเคราะห์ทั้ง 2 ตัวเป็นค่าเฉลี่ยตลอดหน้าตัดซึ่งอาจจะมีบางจุดในชิ้นงานยังไม่แข็งตัวจริง ๆ ดังนั้นเราจึงจะทำการวิเคราะห์ใหม่โดยใช้ชิ้นงานเดิมทั้ง 2 ชิ้น แต่ในการกำหนดเงื่อนไขการวิเคราะห์เราจะไม่กำหนดเวลาหล่อเย็นให้ตายตัว เราจะใช้วิธีกำหนดเป็นเงื่อนไขการปลดชิ้นงานซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก ดังตารางที่ 4-25

ตารางที่ 4-25 เงื่อนไขการปลดชิ้นงานของพลาสติกทั้ง 2 ชนิด

ชนิดของพลาสติก	เงื่อนไขการปลด	
	อุณหภูมิที่สามารถปลดได้	ปริมาณชั้นของแข็ง
PP	70 °C	100 %
PS	75 °C	100 %

ในการวิเคราะห์เราจะให้ชิ้นงานในภาพที่ 4-4 เป็นชิ้นงาน Model A และชิ้นงานในภาพที่ 4-27 เป็นชิ้นงาน Model B ซึ่งจากการวิเคราะห์เราจะได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4-26 รอบเวลาในการฉีดของชิ้นงาน Model A เมื่อใช้พลาสติก PP

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงรอบเวลาจนถึงการปลดชิ้นงาน (Cycle Time)		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	39.87	0	0
Cu15%	35.42	4.45	11.16
Cu30%	32.13	7.74	19.41
Cu45%	28.68	11.19	28.06
Cu60%	25.98	13.89	34.83
Cu75%	23.50	16.37	41.05
Cu100%	14.05	25.82	64.76

ตารางที่ 4-27 รอบเวลาในการฉีดของชิ้นงาน Model A เมื่อใช้พลาสติก PS

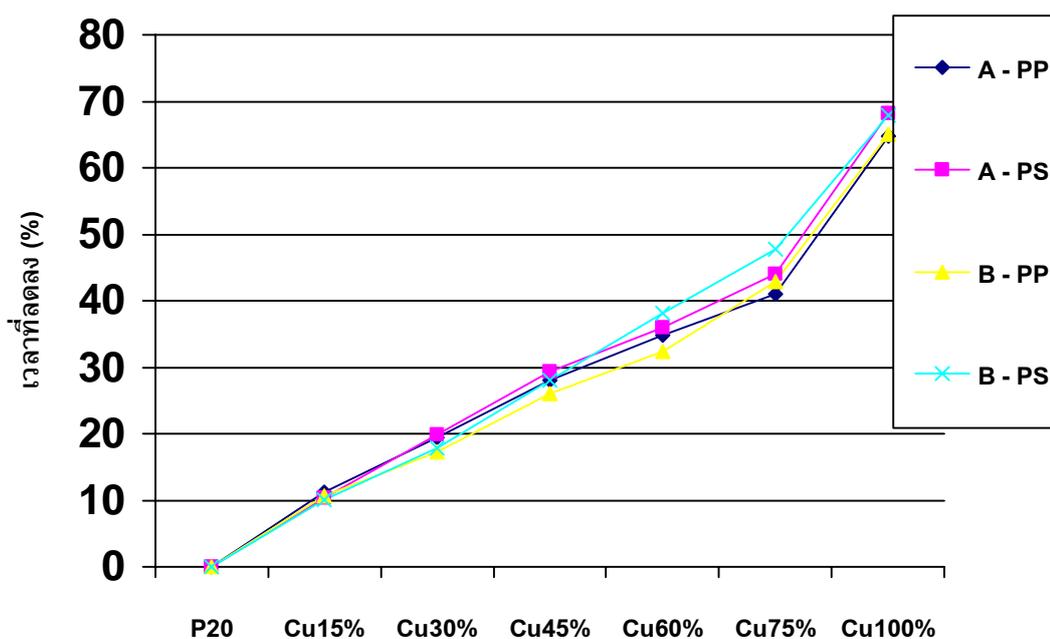
วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงรอบเวลาจนถึงการปลดชิ้นงาน (Cycle Time)		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	32.74	0	0
Cu15%	29.35	3.39	10.35
Cu30%	26.24	6.50	19.85
Cu45%	23.12	9.62	29.38
Cu60%	20.98	11.76	35.91
Cu75%	18.32	14.42	44.04
Cu100%	10.4	22.34	68.23

ตารางที่ 4-28 รอบเวลาในการฉีดของชิ้นงาน Model B เมื่อใช้พลาสติก PP

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงรอบเวลาจนถึงการปลดชิ้นงาน (Cycle Time)		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น เปอร์เซ็นต์
P20	27.24	0	0
Cu15%	24.35	2.89	10.60
Cu30%	22.54	4.7	17.25
Cu45%	20.13	7.11	26.10
Cu60%	18.42	8.82	32.37
Cu75%	15.55	11.69	42.91
Cu100%	9.53	17.71	65.01

ตารางที่ 4-29 รอบเวลาในการฉีดของชิ้นงาน Model B เมื่อใช้พลาสติก PS

วัสดุแม่พิมพ์	ช่วงรอบเวลาจนถึงการปลดชิ้นงาน (Cycle Time)		
	เวลา	ผลต่าง	คิดเป็น %
P20	23.792	0	0
Cu15%	21.38	2.412	10.13
Cu30%	19.532	4.260	17.90
Cu45%	17.104	6.688	28.11
Cu60%	14.736	9.056	38.06
Cu75%	12.44	11.352	47.71
Cu100%	7.624	16.168	67.95



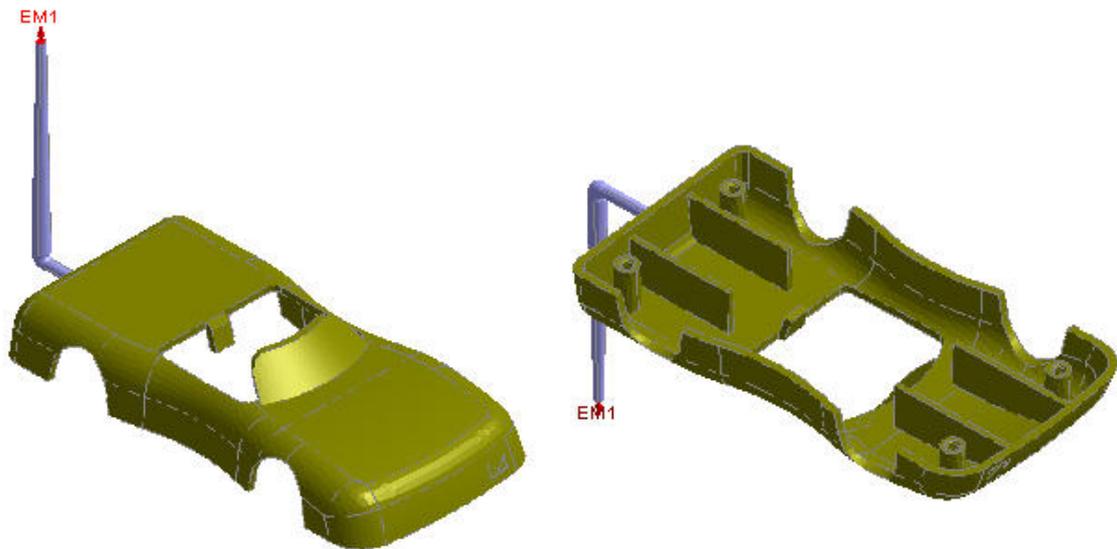
ภาพที่ 4-49 ร้อยละของเวลาที่ลดลงเมื่อใช้ทองแดงเข้าช่วยในการถ่ายเทความร้อน

จากกราฟจะเห็นว่าเมื่อเราใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์ จะสามารถช่วยลดเวลาหล่อเย็นลงได้ เยอะพอสมควร ซึ่งเวลาที่ลดลงจะขึ้นอยู่กับขนาดของทองแดงที่ใช้ฝังและรูปร่างของชิ้นงาน รวมถึงความหนา โดยที่ถ้าเราฝังทองแดงเข้าใกล้ชิ้นงานมากเท่าใด จะยิ่งช่วยลดเวลาหล่อเย็นลงได้มากขึ้นตามไปด้วย แต่ในการฝังทองแดงต้องคำนึงถึงจุดคุ้มทุน และความยุ่งยากที่เพิ่มขึ้นในการชุบเท้าเพื่อฝังทองแดงว่าคุ้มค่ากับงานที่เราจะนำทองแดงไปประยุกต์ใช้หรือไม่

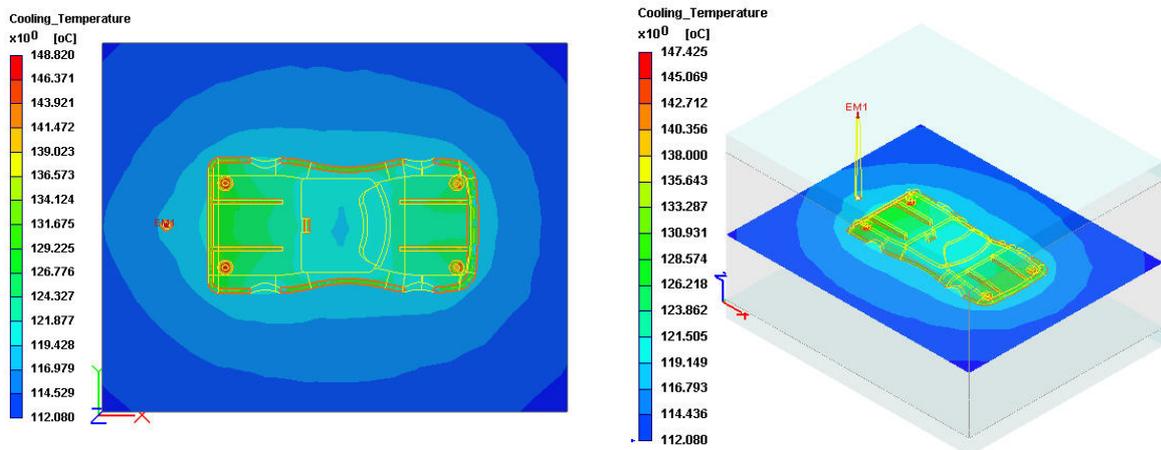
#### 4.4 การศึกษาหารูปร่างของทองแดงที่เหมาะสม

จากการทดลองในหัวข้อที่ผ่าน ๆ มาทำให้ทราบแล้วว่ายิ่งเราฝังทองแดงเข้าใกล้ชิ้นงานเท่าใด ก็จะช่วยลดเวลาหล่อเย็นลงได้มากตามเช่นกัน แต่เนื่องจากชิ้นงานฉีดมีอยู่ด้วยกันหลายรูปแบบและหลายระบบทางเข้า ซึ่งขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบว่าจะวางชิ้นงานและระบบทางเข้าอย่างไร ดังนั้นเราจึงต้องทำการทดลองหารูปร่างของทองแดงที่เหมาะสมกับชิ้นงานแบบต่าง ๆ โดยเราจะทำการทดลองกับชิ้นงานที่มีรูปทรงหลากหลาย โดยจะใช้ชิ้นงานที่เป็นชิ้นงานฉีดจริง เพื่อจะหารูปแบบของการกระจายความร้อน โดยเราจะพิจารณาจากแนวการกระจายของอุณหภูมิในเบ้าพิมพ์ มาเป็นตัวชี้บ่งรูปร่างของทองแดง ดังนี้

กรณีศึกษาที่ 1 แม่พิมพ์ฉีดรถของเล่น



ภาพที่ 4-50 รูปชิ้นงานรถของเล่นที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 1

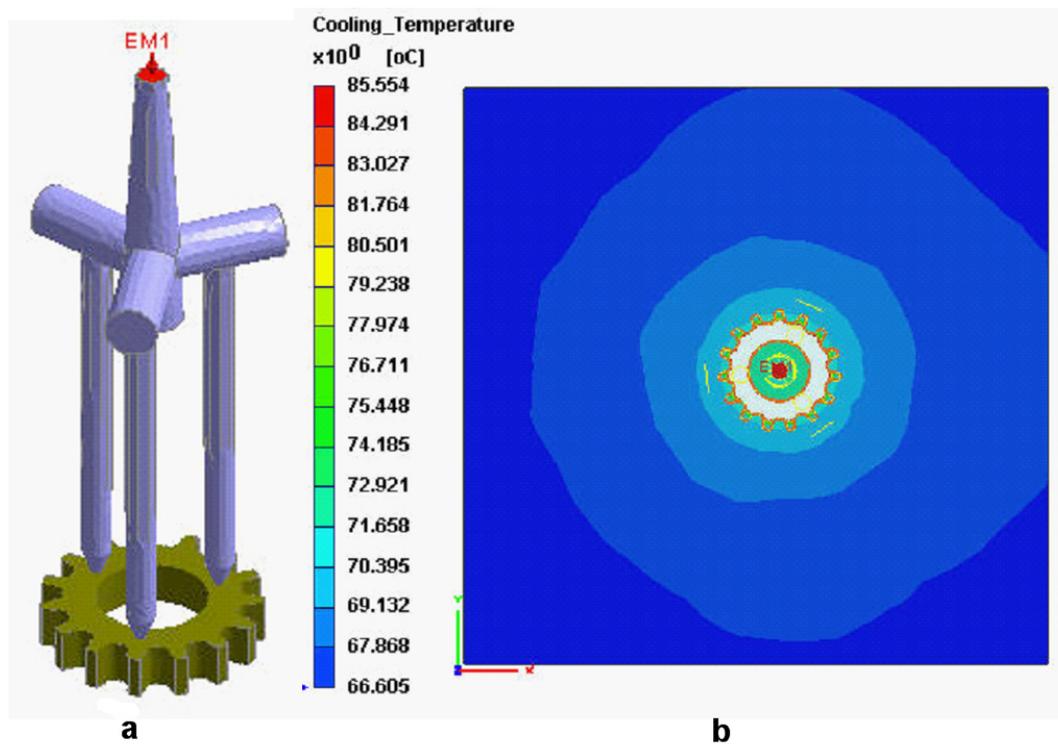


ภาพที่ 4-51 แนวการกระจายความร้อนในเบ้าพิมพ์ของแม่พิมพ์ชิ้นงานรถของเล่น

จากแนวการกระจายอุณหภูมิในแม่พิมพ์เราจะเห็นว่าความร้อนจะกระจายออกรอบ ๆ ขอบของชิ้นงานในปริมาณใกล้เคียงกันทุก ๆ ด้านดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่า เราสามารถนำ

รูปร่างขอบของชิ้นงานมาเป็นตัวออกแบบรูปร่างทองแดงได้ ดังนั้นเพื่อความแน่ใจเราจะทำการทดลองกรณีศึกษาเพิ่มและทดลองเปลี่ยนรูปร่างของชิ้นงานให้แตกต่างออกไป

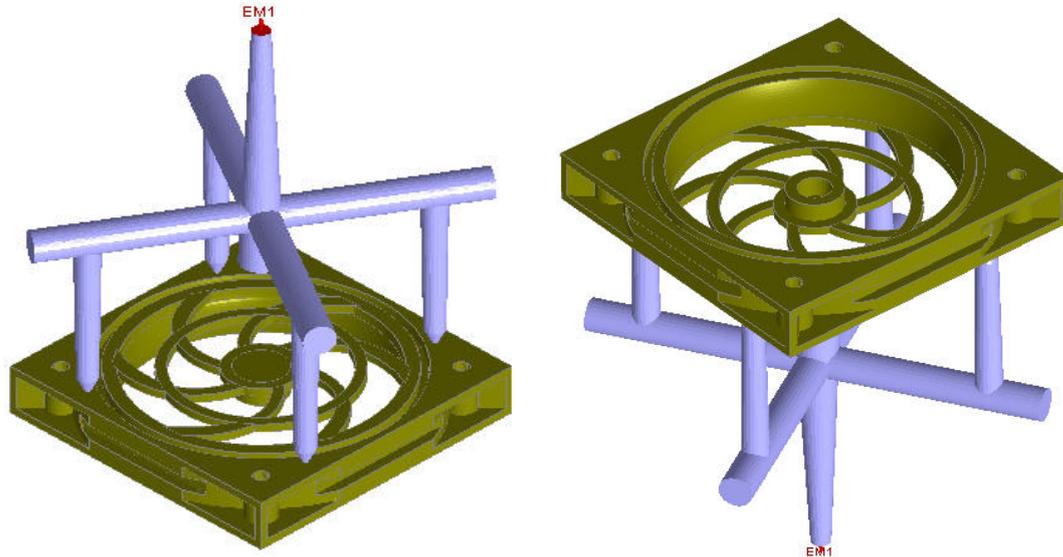
กรณีศึกษาที่ 2 แม่พิมพ์ฉีดเฟืองพลาสติก



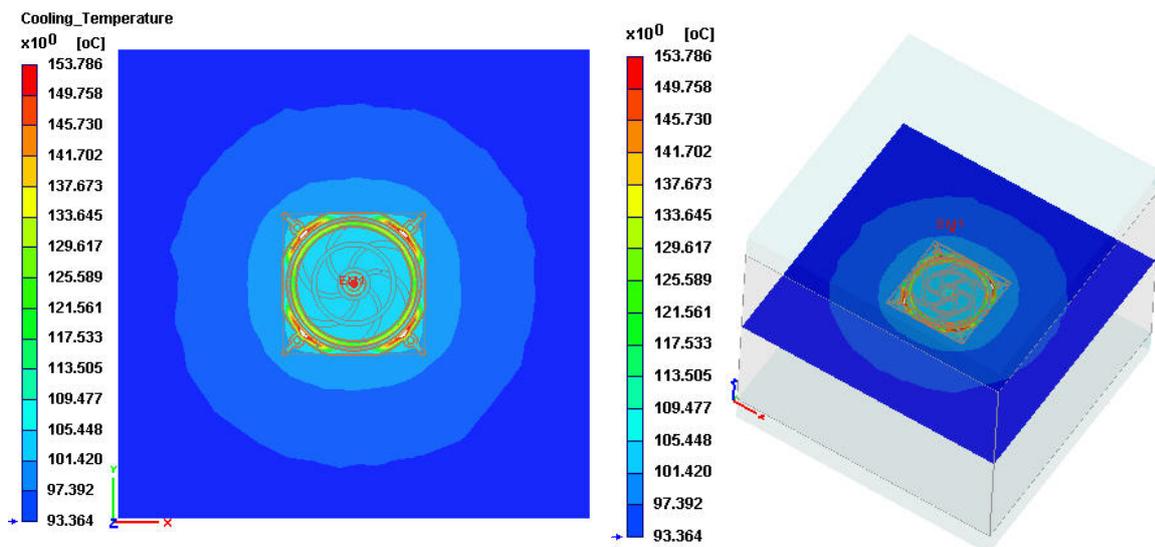
ภาพที่ 4-52 (a)รูปชิ้นงานพร้อมระบบป้อน(b)แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์

ในกรณีศึกษาชิ้นงานเป็นเฟืองพลาสติก ซึ่งมีรูปร่างเส้นขอบซับซ้อนแต่เราจะเห็นว่าแนวการกระจายของอุณหภูมิก็จะออกจากจากขอบชิ้นงานในปริมาณใกล้เคียงกัน จนดูคล้ายเป็นวงกลม ดังนั้นในกรณีนี้เราสามารถใช้ทองแดงเป็นรูปวงกลมแทนได้ซึ่งจะง่ายต่อการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์กว่าทำทองแดงให้เป็นทรงเดียวกับรูปขอบชิ้นงาน

### กรณีศึกษาที่ 3 แม่พิมพ์ฉีดพดลในคอมพิวเตอร



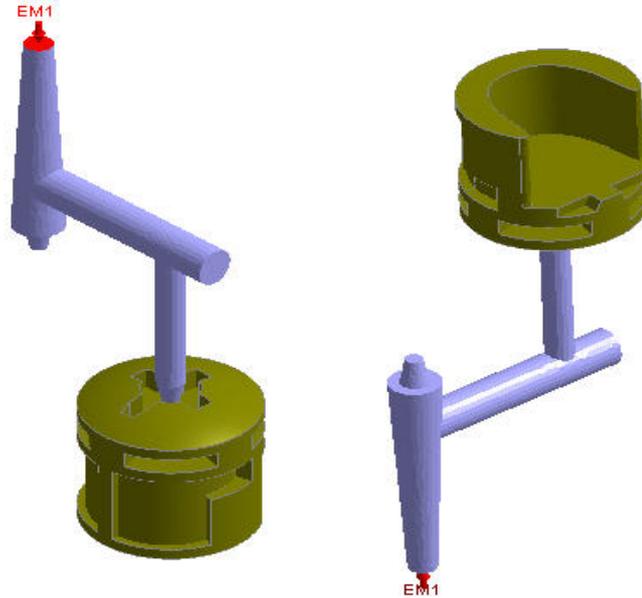
ภาพที่ 4-53 รูปชิ้นงานใบพัดลมในคอมพิวเตอรพร้อมระบบป้อน



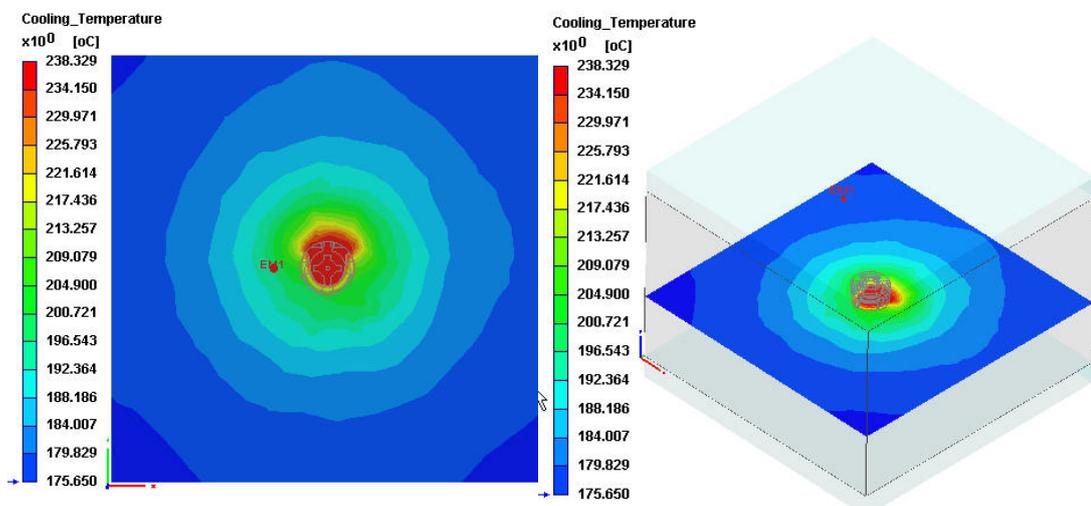
ภาพที่ 4-54 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ใบพัดลมในคอมพิวเตอร

ในกรณีศึกษาชิ้นงานเป็นพัดลมระบายความร้อนในคอมพิวเตอร ซึ่งมีรูปร่างเส้นขอบงานเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส แต่ชิ้นงานจะมีเนื้อพลาสติกเยอะบริเวณมุมซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสะสมได้ และเมื่อเราพิจารณาดูแนวเส้นการกระจายของอุณหภูมิจะเห็นว่าแนวการกระจายตัวจะออกมารอบ ๆ ขอบชิ้นงานในปริมาณใกล้เคียงกันซึ่งเราสามารถใช้ทองแดงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสหรือวงกลมก็ได้ในกรณีนี้

กรณีศึกษาที่ 4 แม่พิมพ์ฉีดชิ้นส่วนปริ้นเตอร์



ภาพที่ 4-55 รูปชิ้นงานขึ้นส่วนปริ้นเตอร์



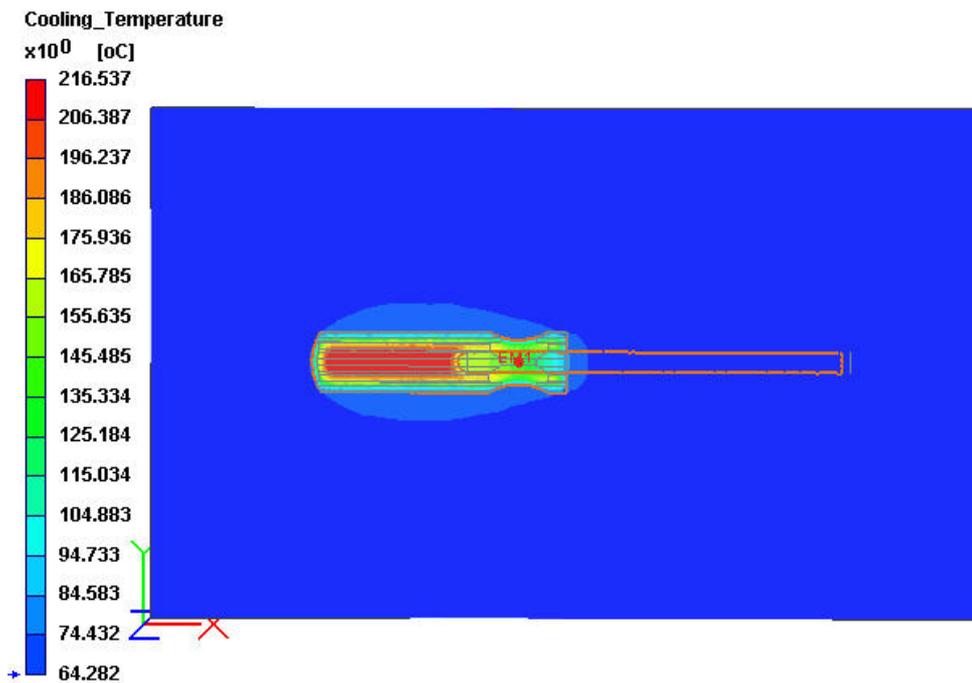
ภาพที่ 4-56 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ขึ้นส่วนปริ้นเตอร์

กรณีศึกษาต่อมา เราใช้ชิ้นงานที่มีเส้นขอบของชิ้นงานเป็นวงกลม แต่รูปทรงไม่สมมาตร ซึ่งจะมีปริมาณเนื้อพลาสติกรอบ ๆ ตัวไม่เท่ากัน จากผลการวิเคราะห์เราจะเห็นว่าในบริเวณใกล้ ๆ ชิ้นงานจะมีความร้อนที่สะสมมากในบริเวณที่มีปริมาณเนื้อพลาสติกเยอะแต่เมื่อขยายออกมาเรื่อย ๆ แนวการกระจายความร้อนก็ออกมาในรูปทรงใกล้เคียงวงกลม ดังนั้นเราก็สามารถใช้ทองแดงเป็นวงกลมในกรณีนี้ได้เช่นกัน

กรณีศึกษาที่ 5 แม่พิมพ์ฉีดด้ามไขควง



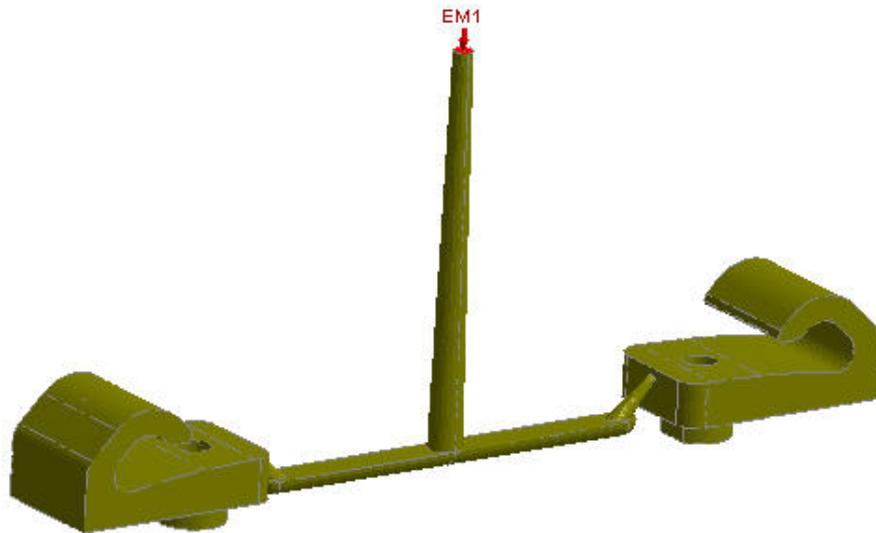
ภาพที่ 4-57 รูปชิ้นงานด้ามไขควง



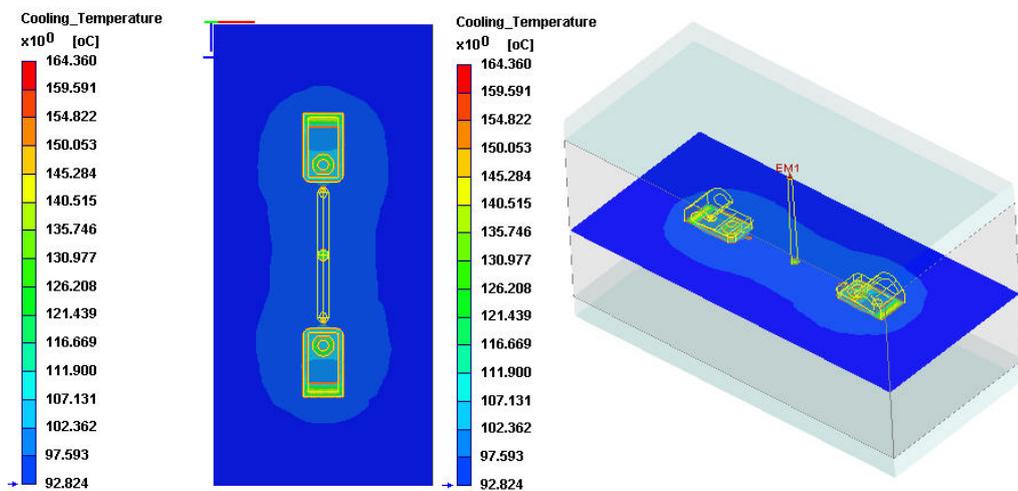
ภาพที่ 4-58 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ด้ามไขควง

กรณีศึกษาต่อมาเราจะใช้ชิ้นงานที่มีความหนามาก ๆ และมีการฉีดหุ้มชิ้นงานที่เป็นเหล็ก ซึ่งอาจจะส่งผลต่อแนวการกระจายตัวของอุณหภูมิ โดยเราเลือกใช้แม่พิมพ์ฉีดด้ามไขควงในกรณีศึกษานี้ และจากการวิเคราะห์พบว่าความร้อนจะกระจายออกรอบ ๆ ชิ้นงานเช่นกันแต่จะมีบางจุดซึ่งมีปริมาณเนื้อพลาสติกเยอะจะมีการกระจายตัวของความร้อนสูงกว่า แต่ก็แตกต่างกันในปริมาณที่ไม่สูงมากนักซึ่งในกรณีนี้ เราสามารถใช้ทองแดงเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในการออกแบบได้

### กรณีศึกษาที่ 6 แม่พิมพ์ฉีดแบบ 2 เบ้าพิมพ์



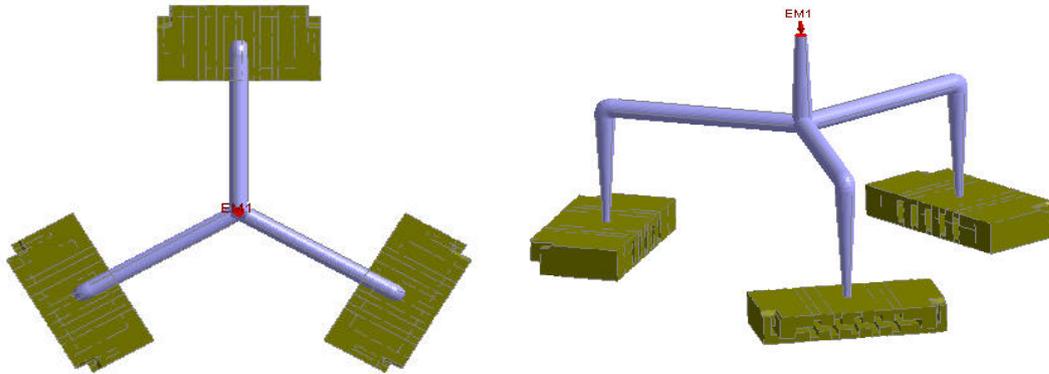
ภาพที่ 4-59 รูปชิ้นงานที่ใช้ในกรณีศึกษา 2 เบ้าพิมพ์



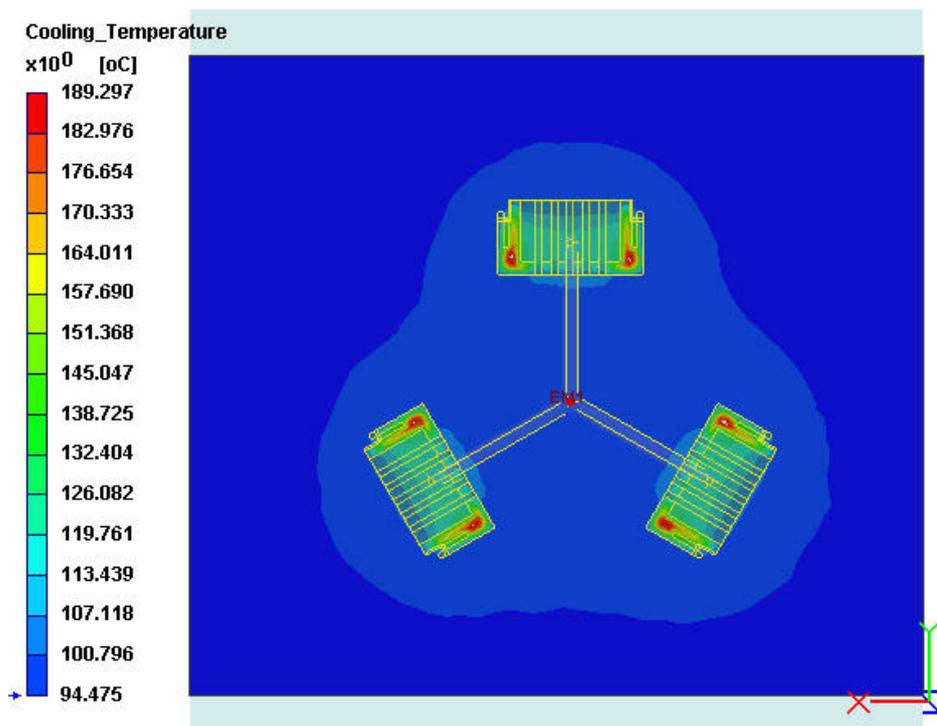
ภาพที่ 4-60 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ 2 เบ้าพิมพ์

กรณีศึกษาต่อมาเราทดลองกับแม่พิมพ์ที่มี 2 เบ้าพิมพ์เพื่อศึกษาถึงความแตกต่างของการกระจายตัวของความร้อน และจากผลวิเคราะห์เราพบว่าในบริเวณที่เป็นเบ้าพิมพ์มีความร้อนกระจายออกมาสูงกว่าบริเวณทางวิ่ง แต่ทั้งนี้ก็จะขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานว่ามีขนาดใหญ่แค่ไหน ซึ่งในกรณีนี้ถ้าเป็นแม่พิมพ์ขนาดใหญ่ และมีระยะห่างของเบ้าพิมพ์แต่ละเบ้าพิมพ์เพียงพอเราสามารถฝั่งทองแดงแยกตามเบ้าพิมพ์ โดยให้รูปร่างของทองแดงใกล้เคียงกับรูปร่างของขอบชิ้นงาน แต่ถ้าเป็นแม่พิมพ์ขนาดเล็กเราสามารถให้ทองแดงเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมหรือวงกลมขึ้นอยู่กับรูปร่างของแม่พิมพ์ในการออกแบบได้เช่นกัน

กรณีศึกษาที่ 7 แม่พิมพ์ฉีดแบบ 3 เบ้าพิมพ์



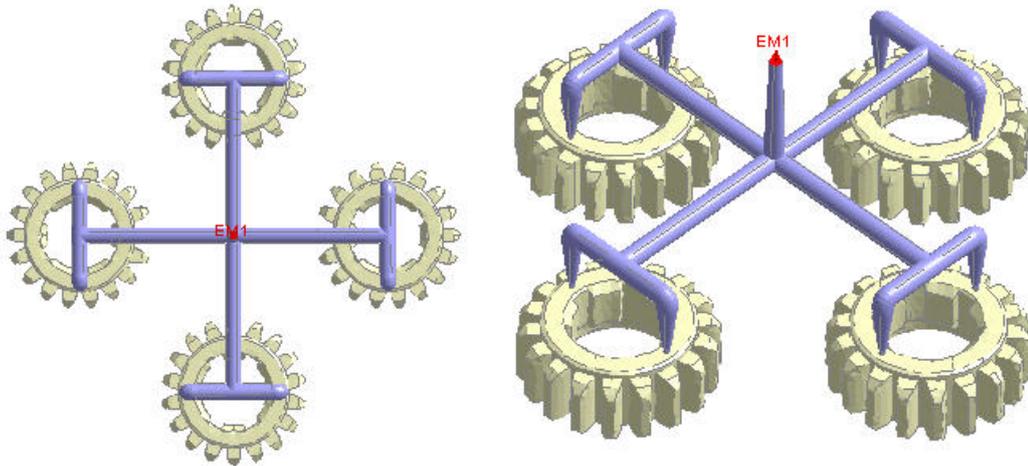
ภาพที่ 4-61 รูปชิ้นงานที่ใช้ในกรณีศึกษา 3 เบ้าพิมพ์



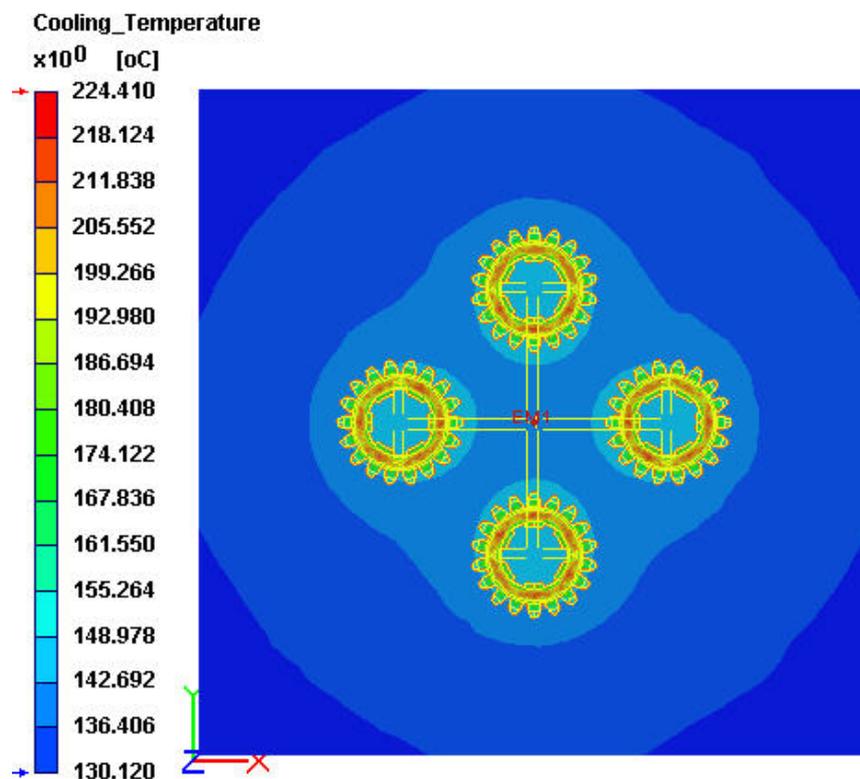
ภาพที่ 4-62 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ 3 เบ้าพิมพ์

ในกรณีศึกษาต่อมาเราทดลองใช้แม่พิมพ์ที่มีจำนวนเบ้าพิมพ์เพิ่มขึ้น โดยทดลองกับแม่พิมพ์แบบ 3 เบ้าพิมพ์ จากการวิเคราะห์เราพบว่า บริเวณที่เป็นเบ้าพิมพ์มีความร้อนกระจายออกมาสูงกว่าเช่นกัน แต่เมื่อขยายออกมาเรื่อยๆ แนวความร้อนก็จะกระจายเป็นรูปทรงสามเหลี่ยมตามการวางรูปแบบของเบ้าพิมพ์ ดังนั้นในแม่พิมพ์แบบหลายเบ้าพิมพ์เราสามารถออกแบบรูปร่างของทองแดงจากการวางตำแหน่งเบ้าพิมพ์ได้

กรณีศึกษาที่ 8 แม่พิมพ์ฉีดแบบ 4 เบ้าพิมพ์



ภาพที่ 4-63 รูปชิ้นงานที่ใช้ในกรณีศึกษา 4 เบ้าพิมพ์



ภาพที่ 4-64 แนวการกระจายความร้อนในแม่พิมพ์ 4 เบ้าพิมพ์

กรณีศึกษาต่อมาเราเพิ่มการวางเบ้าพิมพ์เป็น 4 เบ้าเพื่อตรวจสอบยืนยันแนวทางการออกแบบทองแดงตามแนวคิดในกรณีศึกษาที่ 7 ซึ่งจากผลวิเคราะห์เราพบว่า รูปแบบการกระจายความร้อนใกล้เคียงกัน คือบริเวณที่เป็นเบ้าพิมพ์มีความร้อนกระจายออกมาสูงกว่า แต่เมื่อขยายออกมาเรื่อยๆ แนวความร้อนก็จะกระจายเป็นรูปทรงตามการวางรูปแบบของเบ้าพิมพ์

ดังนั้นในแม่พิมพ์แบบหลายเบ้าพิมพ์ เราจะออกแบบรูปร่างของทองแดงจากการวางตำแหน่งเบ้าพิมพ์

จากกรณีศึกษาทั้งหมดเราสามารถสรุปแนวทางในการออกแบบรูปร่างของทองแดงในแม่พิมพ์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

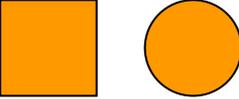
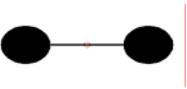
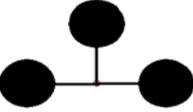
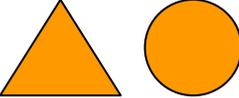
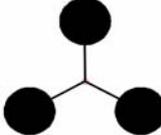
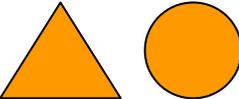
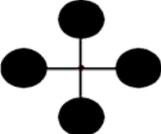
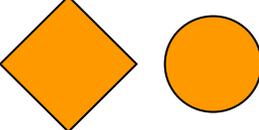
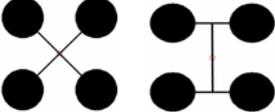
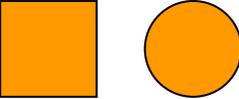
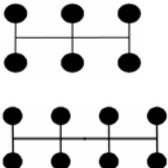
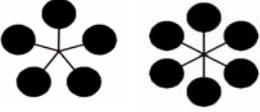
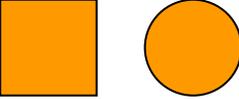
#### 1. แม่พิมพ์แบบ 1 เบ้าพิมพ์ (Single Cavity)

ในกรณีที่เป็นแม่พิมพ์แบบเบ้าพิมพ์เดียว เราสามารถใช้รูปร่างเส้นขอบของชิ้นงานมาเป็นตัวช่วยในการออกแบบรูปร่างของทองแดงได้ โดยให้รูปร่างของทองแดงมีรูปร่างเหมือนหรือใกล้เคียงกับชิ้นงานแต่ไม่ควรออกแบบทองแดงให้มีรูปร่างซับซ้อนมากนัก เพราะอาจจะทำให้การวางระบบหล่อเย็นทำได้ยาก และการประกอบทองแดงเข้ากับเบ้ายึดประสบปัญหาซึ่งจะส่งผลให้ผิวสัมผัสระหว่างทองแดงกับเบ้าเหล็กไม่สนิทกัน แต่ในกรณีที่เป็นแม่พิมพ์ขนาดเล็ก (ขนาดแม่พิมพ์ไม่เกิน 300 x 300) เราสามารถใช้ทองแดงเป็นรูปทรง 4 เหลี่ยมหรือเป็นวงกลมได้ โดยประมาณจากรูปร่างของชิ้นงานซึ่งจะง่ายต่อการสร้างและออกแบบแม่พิมพ์

#### 2. แม่พิมพ์แบบหลายเบ้าพิมพ์ (Multi Cavity)

ในกรณีที่เป็นแม่พิมพ์แบบหลายเบ้าพิมพ์ เราสามารถใช้การวางตำแหน่งเบ้าพิมพ์มาเป็นแนวทางในการออกแบบได้ แต่ในกรณีที่เป็นแม่พิมพ์ขนาดใหญ่และมีระยะห่างระหว่างเบ้าพิมพ์เยอะพอสมควร เราสามารถที่จะวางทองแดงแยกตามเบ้าพิมพ์ได้ โดยใช้รูปร่างแบบเดียวกับแม่พิมพ์แบบ 1 เบ้าพิมพ์ได้ โดยเราสามารถสรุปรูปร่างของทองแดงที่เหมาะสมกับรูปแบบการวางเบ้าพิมพ์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

ตารางที่ 4-30 รูปร่างของทองแดงที่เหมาะสมกับรูปแบบการวางเบ้าพิมพ์ต่าง ๆ

รูปแบบเบ้าพิมพ์	รูปร่างของทองแดงที่แนะนำ	
	Simple	Complex
เบ้าพิมพ์เดี่ยว		ตามเส้นขอบรูปชิ้นงาน
		
		
		
		
		
		
		

จากตารางที่ 4-30 จะเป็นแนวทางในการเลือกใช้รูปร่างของทองแดงสำหรับชิ้นงานแบบต่าง ๆ แต่อย่างที่เราได้กล่าวไว้แล้วในข้างต้นว่าถ้าหากรูปร่างของทองแดงซับซ้อนมากนัก จะทำให้การวางระบบหล่อเย็นทำได้ยาก ดังนั้นสำหรับแม่พิมพ์โดยทั่วไป จึงแนะนำให้เลือกใช้รูปร่างของทองแดงในแบบ Simple ซึ่งอาจจะต้องใช้ขนาดของก้อนทองแดงขนาดใหญ่กว่า แต่ถ้าหากต้องการลดปริมาณทองแดงก็สามารถเลือกใช้แบบ Complex ได้

#### 4.4.1 การทดลองใช้รูปร่างทองแดงแบบต่างๆ

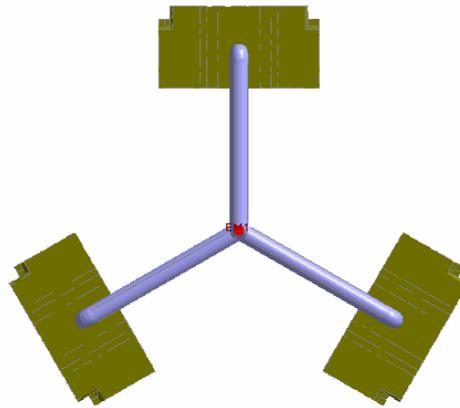
เนื่องจากเราได้ทำการออกแบบ รูปร่างทองแดงแบบต่างๆ เพื่อใช้กับชิ้นงานในรูปแบบต่างๆกัน ดังนั้นเราจึงจำเป็นที่จะต้องวิเคราะห์เป็นกรณีศึกษาเพิ่มเติม เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพ ของรูปร่างทองแดงในแบบต่างๆ ดังนี้

กรณีศึกษาที่ 9 แม่พิมพ์ฉีด 3 เบ้าพิมพ์ฝังทองแดงแบบต่างๆ

ในการทำกรณีศึกษา นี้ เราจะทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่าง แม่พิมพ์ที่ไม่ฝังทองแดง กับแม่พิมพ์ที่ฝังทองแดงในแบบ Simple และฝังทองแดงแบบ Complex ดังในภาพที่ 4-65

Model\_Shaded Model

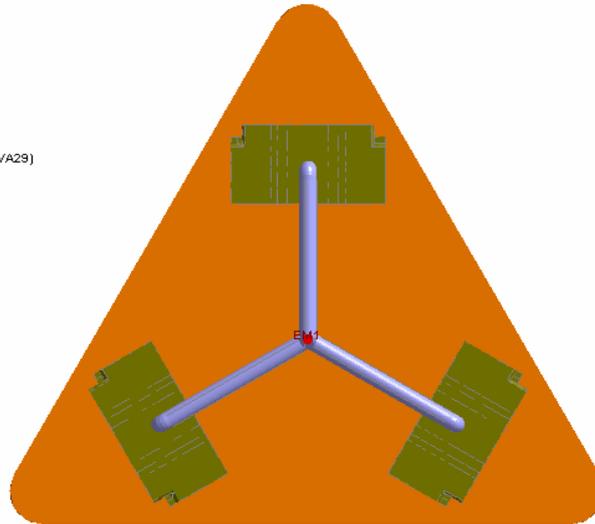
■ Part-1:ABS(ASAHI VA29)  
■ Cold Runner:ABS(ASAHI VA29)



(a) ไม่ฝังทองแดง

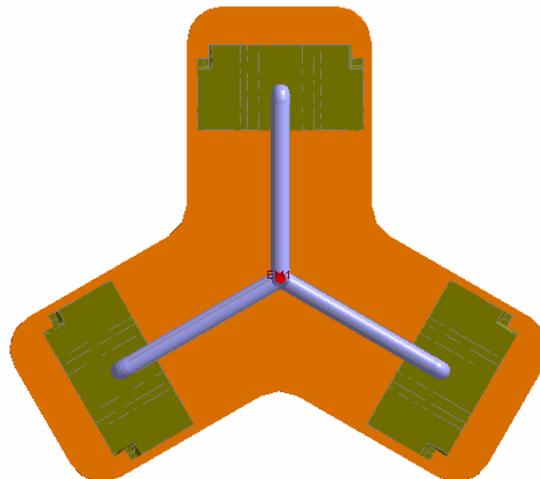
ภาพที่ 4-65 รูปแบบของเบ้าพิมพ์และรูปร่างทองแดงที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 9

Model\_Shaded Model



(b) ทองแดงแบบ Sample

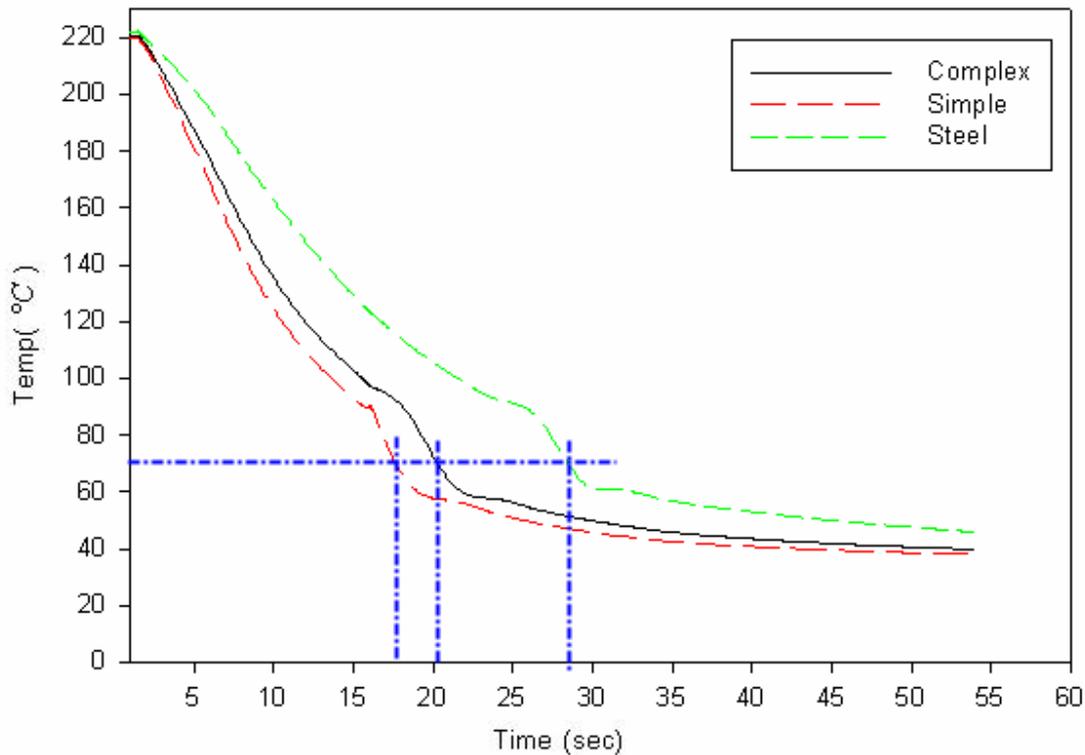
Model\_Shaded Model



(c) ทองแดงแบบ Complex

### ภาพที่ 4-65 (ต่อ)

โดยในการศึกษาเราจะใช้ ผลวิเคราะห์เวลาหล่อเย็นมาเป็นตัวเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของก้อนทองแดงซึ่งจะได้ค่าของผลวิเคราะห์ดังนี้



ภาพที่ 4-66 อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานเมื่อฝังทองแดงแบบต่างๆ

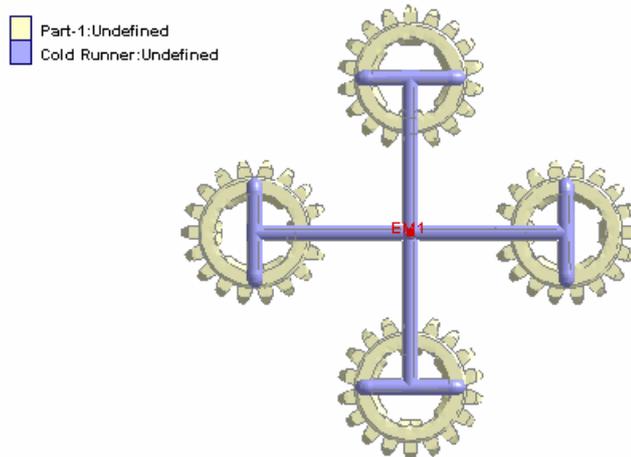
จากภาพที่ 4-66 จะเห็นว่าการฝังทองแดงทั้งสองแบบ ส่งผลกระทบต่ออัตราการเย็นตัวไม่แตกต่างกันมากนัก โดยเมื่อเรากำหนดอุณหภูมิปลดชิ้นงานที่ 70°C จะได้เวลาเย็นตัวที่แตกต่างกันดังนี้

ตารางที่ 4-31 ค่าความแตกต่างของเวลาหล่อเย็นสำหรับกรณีศึกษาที่ 9

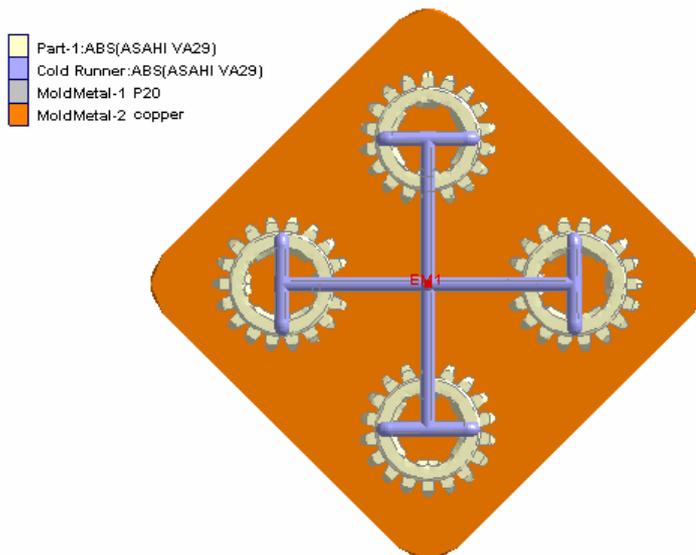
วัสดุ	เวลาเย็นตัว (s)	ผลต่าง	คิดเป็น%
Steel	28	0	0
Simple	17.5	10.5	37.5
Complex	20	8	28.5

จากตารางที่ 4-31 จะเห็นว่าการฝังทองแดงในแบบ Simple จะช่วยลดเวลาหล่อเย็นได้ดีกว่าแบบ Complex ประมาณ 2.5 วินาที หรือประมาณ 9 % ซึ่งก็ไม่แตกต่างกันมากนัก แต่การฝังทองแดงในแบบ Complex จะมีข้อดีที่ตรงที่ใช้ขนาดทองแดงเล็กกว่าและแม่พิมพ์จะมีความแข็งแรงมากกว่าการฝังแบบ Simple เพื่อเป็นการตรวจสอบเพิ่มเติม เราจะทำการศึกษาอีก 1 กรณีศึกษาโดยใช้ชิ้นงานที่มีความแตกต่างออกไป

กรณีศึกษาที่ 10 แม่พิมพ์ฉีดแบบ 4 เบ้าพิมพ์ฝังทองแดงแบบต่างๆ  
 ในกรณีศึกษา นี้ เราจะทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบระหว่าง แม่พิมพ์ที่ไม่ฝังทองแดง  
 กับแม่พิมพ์ที่ฝังทองแดงในแบบ Simple และฝังทองแดงแบบ Complex ดังในภาพที่ 4-67

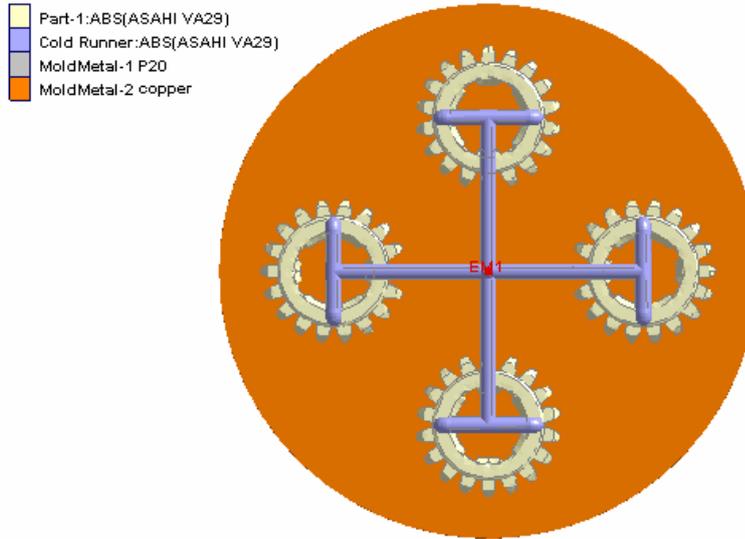


(a) ไม่ฝังทองแดง

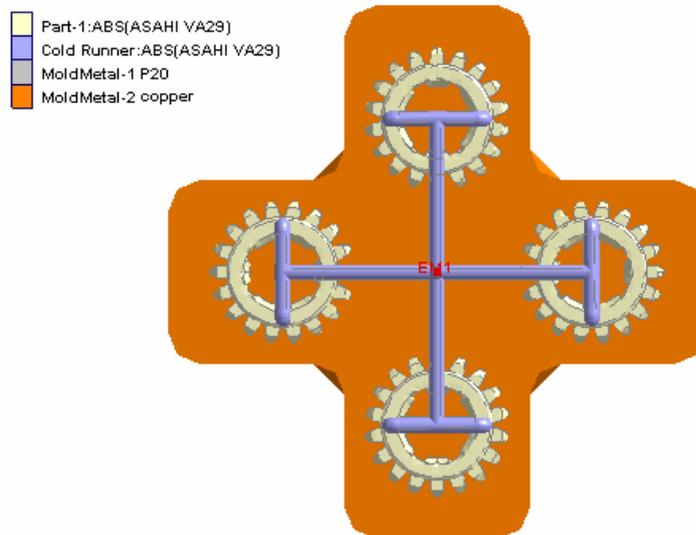


(b) ทองแดงแบบ Simple 1

ภาพที่ 4-67 รูปแบบของเบ้าพิมพ์และรูปร่างทองแดงที่ใช้ในกรณีศึกษาที่ 10



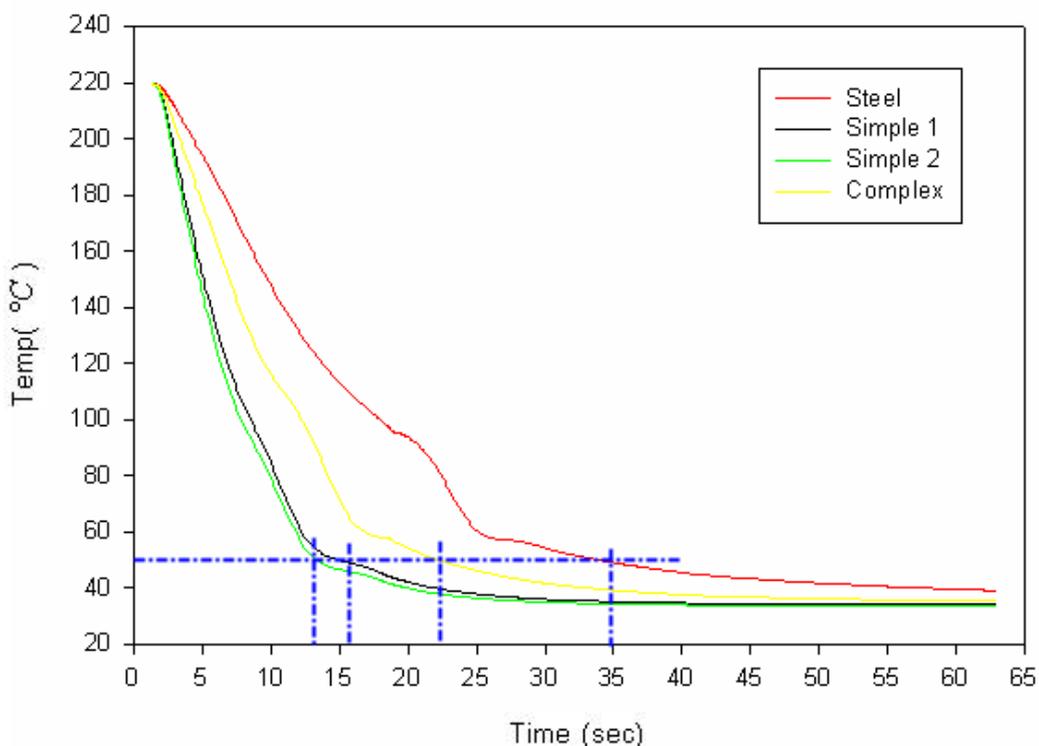
(c) ท่องแดงแบบ Simple 2



(d) ท่องแดงแบบ Complex

### ภาพที่ 4-67 (ต่อ)

ในการทดลองนี้เราจะทำการวิเคราะห์ด้วยกันทั้งหมด 4 แบบ คือแบบไม่ฝังท่องแดง แบบ ฝังท่องแดงแบบ Simple 1 ซึ่งเป็นแบบทรง 4 เหลี่ยม แบบ Simple 2 ซึ่งเป็นแบบวงกลม และแบบสุดท้ายคือแบบ Complex ซึ่งได้ค่าของผลวิเคราะห์ของเวลาเย็นตัวดังนี้



ภาพที่ 4-68 อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานเมื่อฝังทองแดงแบบต่างๆในกรณีศึกษาที่ 10

จากกราฟในภาพที่ 4-68 เราจะนำมาหาค่าเวลาเย็นตัวเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทองแดง โดยกำหนดอุณหภูมิปลดชิ้นงาน ที่ 50 °C จะได้เวลาเย็นตัวที่แตกต่างกันดังนี้

ตารางที่ 4-32 ค่าความแตกต่างของเวลาหล่อเย็นสำหรับกรณีศึกษาที่10

วัสดุ	เวลาเย็นตัว (s)	ผลต่าง	คิดเป็น%
Steel	35	0	0
Simple 1	15.5	19.5	55.7
Simple 2	14	21	60
Complex	22	13	37.1

เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4-32 จะเห็นว่าทองแดงในแบบ Simple ทั้ง 2 แบบช่วยลดเวลาหล่อเย็นได้ดีกว่าแบบ Complex ส่วนทองแดงในแบบ Simple 1 และ Simple 2 ช่วยลดเวลาหล่อเย็นได้ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเราจะสรุปได้ว่าถ้าหากเราต้องการใช้ทองแดงช่วยลดเวลาหล่อเย็นเป็นหลักเราควรพิจารณาใช้รูปร่างทองแดงแบบ Simple เป็นอันดับแรก แต่ถ้าหากเราต้องการแม่พิมพ์ที่แข็งแรงกว่า และใช้ปริมาณทองแดงน้อยกว่า ซึ่งส่งผลต่อน้ำหนักของแม่พิมพ์ โดยที่เราอาจจะไม่จำเป็นต้องให้ชิ้นงานเย็นตัวเร็วนัก เราอาจจะพิจารณาใช้ทองแดงในแบบ Complex เป็นตัวเลือกต่อมาก็ได้

#### 4.5 เทคนิคอื่น ๆ ในการออกแบบแม่พิมพ์และก้อนทองแดง

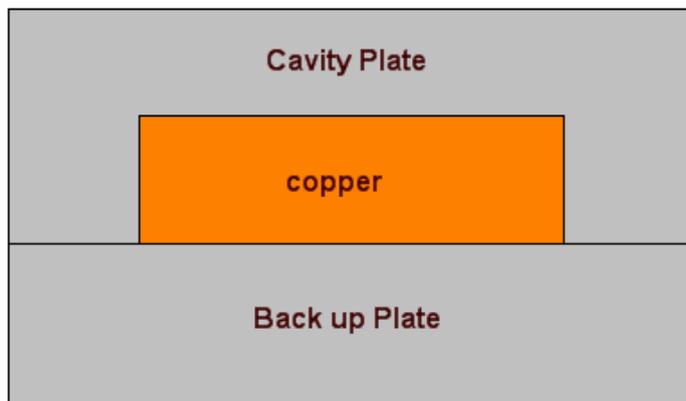
ในการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์แบบใช้ทองแดง ยังมีอีกหลายอย่างที่จำเป็นต้องกำหนด เช่น ระบบจับยึดก้อนทองแดง ระบบหล่อเย็นในก้อนทองแดง ซึ่งแต่ละอย่างล้วนมีความสำคัญ และต้องออกแบบให้ถูกต้อง ดังนี้

##### 4.5.1 ระบบจับยึด

ในการจับยึดก้อนทองแดงเราสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม หลัก ๆ คือ

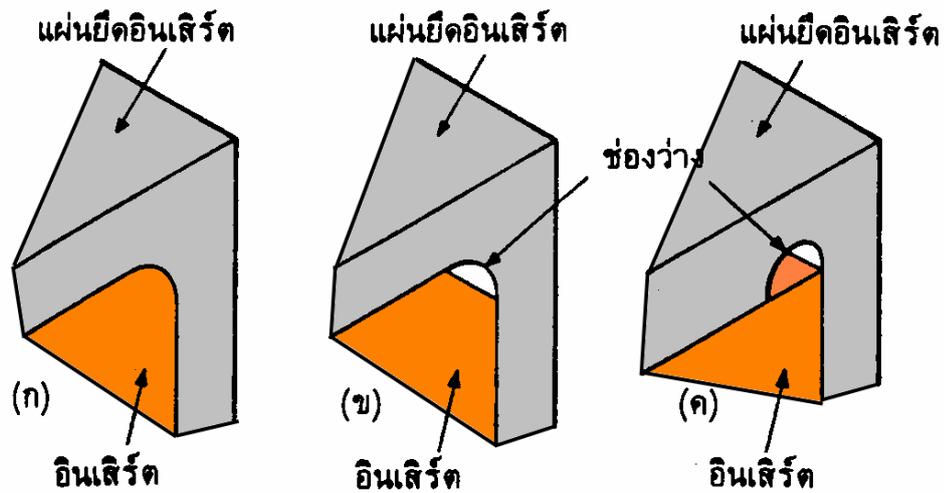
##### 1. แบบไม่ใช้สกรูในการจับยึด

ในการออกแบบการฝังทองแดงแบบไม่ใช้สกรู จะต้องใช้แผ่นรองหลัง (Cavity Plate) เป็นตัวระบองทองแดงให้อยู่ในเบ้าพิมพ์ดังในภาพที่ 4-69



ภาพที่ 4-69 การจับยึดทองแดงโดยใช้แผ่นรองหลัง

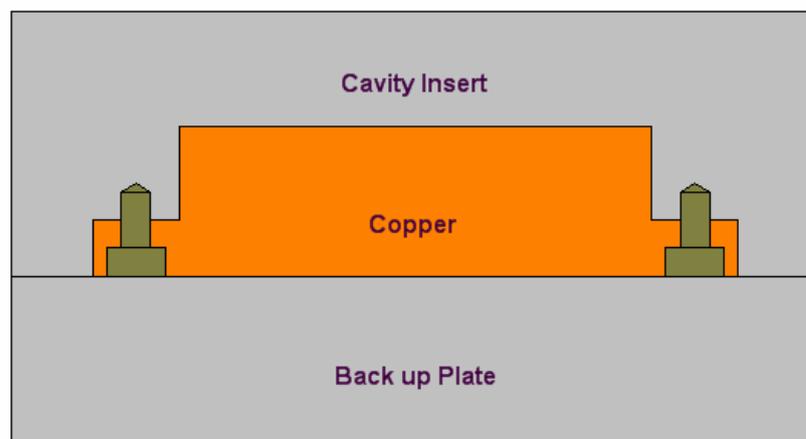
โดยปกติในการชุบเบ้าฝังทองแดงจะใช้ดอกกัด (End mill) เป็นเครื่องมือในการชุบซึ่ง ภายหลังจากการชุบบริเวณมุมของเบ้าทองแดง จะเกิดเป็นรัศมีตามดอกกัดดังนั้นเราจึงต้อง ออกแบบทั้งก้อนทองแดงและเบ้าฝังให้มีรูปร่างตามภาพที่ 4-70



ภาพที่ 4-70 การเข้ามมแผ่นทองแดงแบบต่าง ๆ

## 2. แบบใช้สกรูในการจับยึด

สำหรับแม่พิมพ์แบบใช้สกรูยึด จะมีแผ่นรองหลังเป็นตัวประคองหรือไม่ก็ได้ แต่ที่ก่อนทองแดงจะต้องมีป่าสำหรับเจาะรูไว้ยึดกับเบ้าฝัง ซึ่งจะทำให้ต้องใช้ทองแดงก้อนใหญ่กว่าแบบไม่ใช้สกรูดังในภาพที่ 4-71

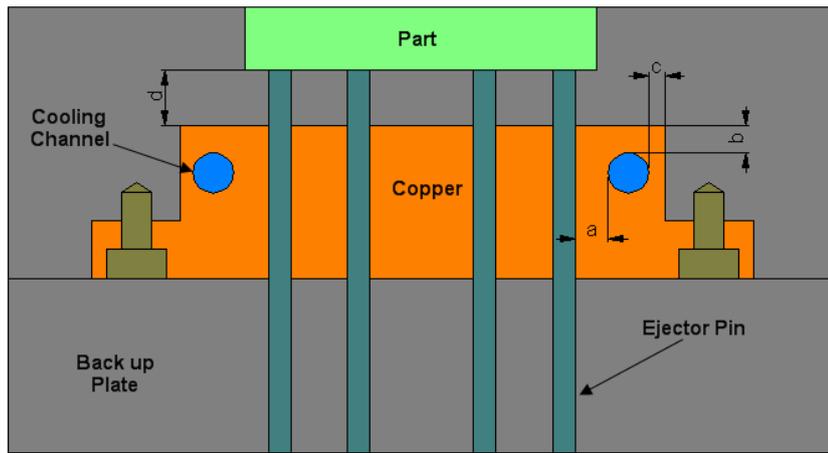


ภาพที่ 4-71 การฝังทองแดงแบบมี پایึดสกรู

### 4.5.2 การออกแบบระบบหล่อเย็นในก้อนทองแดง

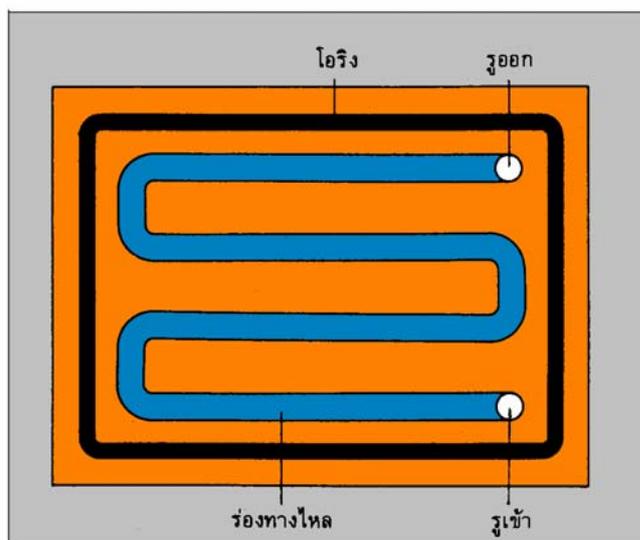
เนื่องจากเรานำทองแดงมาเป็นตัวช่วยระบายความร้อนออกจากชิ้นงาน ดังนั้นเราจึงต้องมีการหล่อเย็นก้อนทองแดงเป็นอย่างดี เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนของทองแดง โดยในการออกแบบเราจะต้องคำนึงถึงระบบปลดชิ้นงานด้วยและโดยปกติขนาดของรูหล่อเย็นจะอยู่ที่ประมาณ 8 – 10 mm ข้อกำหนดในการเจาะรูหล่อเย็น มีอยู่ว่า การเจาะรู ที่ลึก

ตั้งแต่เล็ก 0 -150 mm จะต้องให้รูที่เจาะห่างจากรูหรือผิวชิ้นส่วนอื่น ๆ ไม่น้อยกว่า 3 mm การเจาะรูที่เล็กมากกว่า 150 mm จะต้องให้รูที่เจาะห่างจากรูหรือผิวชิ้นส่วนอื่น ๆ ไม่น้อยกว่า 5 mm [12] ซึ่งเมื่อเราดูจากภาพที่ 4-64 แล้วหมายความว่าระยะ a, b และ c > 3 mm เมื่อความยาวรูหล่อเย็นน้อยกว่า 150 mm และระยะ a, b และ c > 5 mm เมื่อความยาวรูหล่อเย็นมากกว่า 150 mm



ภาพที่ 4-72 เจ็อนไขการเจาะรูน้ำหล่อเย็น

อีกวิธีในการหล่อเย็นก้อนทองแดงคือการกัดเป็นร่องทางไหลของน้ำหล่อเย็นแต่ในวิธีนี้ต้องคำนึงถึงการหลบตำแหน่งสลักตันปลดด้วยดังในภาพที่ 4-73



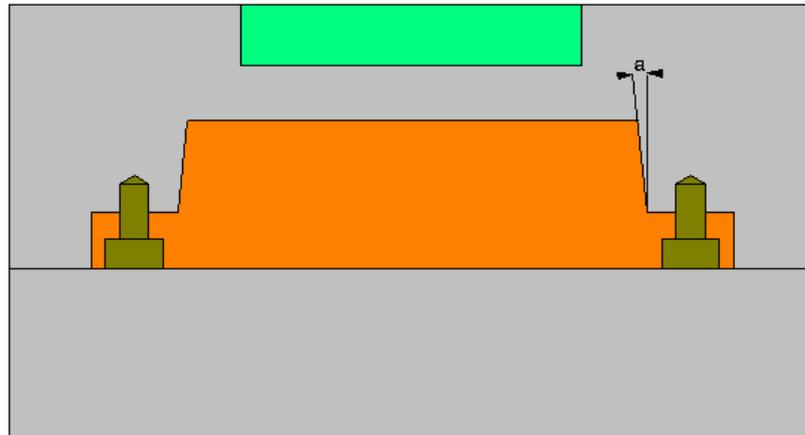
ภาพที่ 4-73 แสดงการหล่อเย็นแบบกัดเป็นร่องทางไหล

#### 4.5.3 การกำหนดระยะห่างของทองแดงกับเบ้าพิมพ์

ในการกำหนดความลึกของก้อนทองแดง เราจะต้องคำนึงถึงระยะนำเลื้อนของสลักปลดด้วย เนื่องจากทองแดงมีความแข็งต่ำเมื่อใช้ไปนานอาจจะเกิดการสึกหลอได้ง่าย ดังนั้นเราจึงต้องเหลือเนื้อเหล็กตามระยะ  $d$  จากภาพที่ 4-72 ไว้อย่างน้อย 2 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางสลักปลดที่โตที่สุดที่ใช้ในแม่พิมพ์

#### 4.5.4 การออกแบบผิวเอียงที่ทองแดง

ในบางครั้งเราสามารถออกแบบทองแดงให้มีผิวเอียงเท่า ๆ กันรอบตัวเพื่อช่วยให้ง่ายต่อการประกอบและสามารถเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างทองแดงกับเบ้าฝังได้อีกด้วย ในการออกแบบมุม  $a$  โดยปกติควรอยู่ที่ประมาณ  $1 - 3^\circ$  เพราะถ้ามากเกินไปก็จะทำให้พื้นที่สัมผัสบริเวณผิวด้านบนลดลง ดังในภาพที่ 4-74



ภาพที่ 4-74 การทำมุมเอียงรอบ ๆ ชิ้นงาน

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากผลการวิเคราะห์และการทดลองทั้งหมดที่ผ่านมา เราจะเห็นว่าเราสามารถนำทองแดง มาช่วยในการหล่อเย็นแม่พิมพ์ได้ โดยเฉพาะแม่พิมพ์ที่ไม่สามารถเจาะรูน้ำหล่อเย็นให้กระจาย ทั่วถึงตามจุดต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดความร้อนสะสมในแม่พิมพ์ โดยสามารถแยกสรุปผลกระทบ ของการใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์ได้ดังนี้

5.1.1 ผลกระทบต่อการเกิดรอยยุบตัว (Sink Mark) เราพบว่า การฝังทองแดงในแม่พิมพ์จะ ช่วยลดการเกิดรอยยุบตัว (Sink Mark) ในพลาสติกกลุ่ม Semi Crystalline Thermoplastic ได้ อย่างชัดเจน แต่ในพลาสติกกลุ่ม Amorphous Thermoplastic จะไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อใช้ ทองแดงฝังเพื่อช่วยการระบายความร้อน

5.1.2 ผลกระทบต่อการบิดตัว (Warpage) จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่า การฝังทองแดง ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้น ของการบิดตัวในชิ้นงานฉีด ที่เป็นพลาสติกกลุ่ม Amorphous Thermoplastic แต่ปริมาณที่เพิ่มขึ้นน้อยมากจนไม่น่าจะส่งผลกระทบต่อคุณภาพงานฉีดเมื่อเทียบ กับการใช้แม่พิมพ์จากเหล็กทั่วไป โดยเฉพาะถ้าเรามีเส้นแนวเสริมแรง จะเห็นว่า การบิดตัวแทบไม่ แตกต่างจากแม่พิมพ์ที่ทำจากเหล็กเลย แต่ในแม่พิมพ์ที่ใช้พลาสติกกลุ่ม Semi Crystalline Thermoplastic ในการฉีด จะช่วยลดการบิดตัวของชิ้นงานลงได้แต่ไม่มากนัก โดยถ้าเราฝัง ขนาดของทองแดงในปริมาณที่ไม่มากนักจะช่วยลดการบิดตัวได้มากกว่า

5.1.3 ผลกระทบต่อเวลาหล่อเย็น การใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์ จะช่วยลดเวลาต่อรอบการ ฉีดลงได้สูงสุดถึงประมาณ 40% ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาและรูปร่างชิ้นงาน

และในการศึกษาต่อมาทำให้เราทราบข้อควรคำนึงในการออกแบบดังต่อไปนี้

5.1.4 ความลึกของทองแดง ในการฝังทองแดงเราต้องฝังทองแดงให้อยู่ใกล้กับเบ้าพิมพ์มาก ที่สุด โดยที่เราต้องเหลือเนื้อเหล็กไว้อย่างน้อยต้องพอสำหรับระยะนำเลื้อนของสลักปลดและ เพลาต้นกลับ และต้องพอสำหรับประครอง ก้อนอินเสิร์ตในกรณีที่แม่พิมพ์ของเรามีการฝังอิน เซิร์ต อีกข้อที่ควรคำนึงถึงคือเราไม่ควรใช้ก้อนทองแดงที่บางเกินไปเพราะจะทำให้เจาะรูหล่อ เย็นในก้อนทองแดงไม่ได้

5.1.2 ความกว้างและความยาวของทองแดง ขนาดความกว้างของก้อนทองแดงที่ใช้ควรวาย กว่าขอบของเบ้าพิมพ์ออกมาประมาณ 10-20 mm เพื่อให้สามารถเจาะรูหล่อเย็นได้ใน กรณีที่มี ระบบปลดที่ซับซ้อน และเพื่อให้ความร้อนกระจายออกมาให้ห่างจากเบ้าพิมพ์ป้องกันการเกิด ความร้อนสะสม

5.1.3 ความเรียบผิวของทองแดงและเบ้าสำหรับฝังทองแดง พื้นที่ผิวของคู่สัมผัสจะส่งผลต่อคุณภาพของการถ่ายเทความร้อนโดยตรง เพราะถ้าผิวของทองแดงและเบ้าที่ใช้ฝังไม่เรียบจะส่งผลให้พื้นที่สัมผัสลดลง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอและไม่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นผิวคู่สัมผัสดังกล่าวควรจะต้องมีความเรียบพอสมควร และผิวด้านข้างควรทำเป็นมุมเอียงเพื่อช่วยเพิ่มเนื้อที่สัมผัสและป้องกันการประกบกันไม่สนิทของทองแดงและเบ้าฝัง

5.1.4 ต้นทุนการผลิตและจุดคุ้มทุน เนื่องจากการฝังทองแดงต้องใช้ค่าใช้จ่ายเพิ่ม ในการทำแม่พิมพ์ดังนั้น เราจึงต้องคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่จะตามมา เทียบกับการลดลงของเวลานี้ว่าคุ้มกันหรือไม่ ในกรณีที่เป็นแม่พิมพ์ราคาถูก และไม่ต้องการกำลังการผลิตที่สูงอาจจะไม่คุ้มกับค่าใช้จ่ายและเวลาที่ต้องใช้เพิ่มขึ้นในการฝังทองแดง

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ เช่น แบบ Split mold, Side Core, Hot runner ซึ่งในแม่พิมพ์แต่ละชนิด ต่างก็มีชิ้นส่วนที่สำคัญและมีรูปทรงเฉพาะตัว ซึ่งบางชิ้นส่วนใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน เช่น เบ้าพิมพ์ในแม่พิมพ์ Split mold และ ตัว Core Slide ที่ใช้ในแม่พิมพ์ Side Core ทำให้ในบางครั้ง เราประสบปัญหาเกี่ยวกับการระบายความร้อนออกจากชิ้นส่วนดังกล่าว เนื่องจากชิ้นส่วนดังกล่าวส่วนใหญ่ ทำการสร้างระบบหล่อเย็นลำบาก หรือบางครั้งอาจทำไม่ได้เลย ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำทองแดง หรือวัสดุที่นำความร้อนได้ดีอื่นๆ เข้าไปใช้ช่วยในการออกแบบแม่พิมพ์เพื่อช่วยแก้ปัญหาในการสร้างระบบหล่อเย็น

## เอกสารอ้างอิง

1. Natraj I. A Study of the Use of Aluminum Alloy Molds on Heat Transfer Rate and Sink Marks in Plastic Injection Molding M.S. Thesis Purdue University : West Lafayette,c2000.
2. Mellinger D.C. Heat Transfer Analysis of an Injection Molding System M.S. Thesis University of Kentucky :Lexington KY, c1997.
3. Isaias S. A Study of Heat Transfer Characteristics of Copper Alloy Materials for use in Injection Molding M.S. Thesis Ohio State University :Columbus OH, c1991.
4. Menges, G., Michaeli W. and Mohren P. How to Make Injection Molds 3rd ed. Cincinnati Hanser Gardner, c2000Mellinger D.C.
5. Battey. D.J. Sink Mark Prediction in Injection Molded Plastic Parts by Finite Element Analysis M.S. Thesis Michigan Technological University : Houghton MI, c1997.
6. Max Jako and G.A. Hawkins. Element of Heat Transfer 3rd ed., John Wiley & Sons Inc. New york ,c1957.
7. Yunus A. Cengel. Heat Transfer A Practical Approach McGraw-Hill, Hightstown NJ, c1998.
8. Michael L. Berins. Plastics Engineering Handbook of Society of the Plastics Industry New York : Von Nonstrand. Reinhold,c1982.
9. วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม. งานฉีดพลาสติก,กรุงเทพฯ ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2540.
10. บริษัทเทคโนโลยีอินสตรูเมนต์ จำกัด. คู่มือการใช้งานเทอร์โมคัปเปิล
11. ชาลี ตระการกุล. การออกแบบแม่พิมพ์ฉีด, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) กรุงเทพฯ, ศูนย์หนังสือกรุงเทพ, 2545.

ภาคผนวก ก

ตารางคุณสมบัติต่าง ๆ ของวัสดุ

ตารางที่ ก-1 แสดงค่าคุณสมบัติต่าง ๆ ของพลาสติก

ชนิดของ พลาสติก	อุณหภูมิ หลอมละลาย $^{\circ}C$	อุณหภูมิ แม่พิมพ์ $^{\circ}C$	อุณหภูมิ ปลดชิ้นงาน $^{\circ}C$	ค่าความ หนาแน่น $g/cm^3$
ABS	200 – 270	50 – 80	60 – 100	1.03
HDPE	200 – 300	40 – 60	60 – 110	0.82
LDPE	170 – 245	20 – 60	50 – 90	0.79
PA 6	235 – 275	60 – 95	70 – 110	1.05
PA 66	260 – 300	60 – 90	80 – 140	1.05
PBTP	230 – 270	30 – 90	80 – 140	1.05
PC	270 – 320	85 – 120	90 – 140	1.14
PMMA	180 – 260	10 – 80	70 – 110	1.14
POM	190 – 230	40 – 120	90 – 150	1.3
PP	200 – 300	20 – 100	60 – 100	0.83
PS	160 – 280	10 – 80	60 – 100	1.01
PVC แข็ง	150 – 210	20 – 70	60 – 100	1.35
PVC อ่อน	120 – 190	20 – 55	60 – 100	1.23
SAN	200 – 270	40 – 80	60 – 110	1.05

ภาคผนวก ข

ค่าที่วัดได้จากห้ววัดอุณหภูมิ

ตารางที่ ข-1 ค่าที่วัดได้จากห้ววัดอุณหภูมิ

เวลา	อุณหภูมิ		เวลา	อุณหภูมิ	
	เหล็กอย่างเดียว	ฝิ่งทองแดง		เหล็กอย่างเดียว	ฝิ่งทองแดง
0	28.5	30.1	105	108.2	90.1
5	137.3	137	110	106.8	88.9
10	136.2	136.8	115	104.5	87.4
15	136.8	136.8	120	102.2	86.8
20	136.8	136.8	125	100.9	85.3
25	135.9	134.6	130	99.1	82.4
30	133.1	132.8	135	98.3	80.6
35	130.2	130.2	140	95.8	79.5
40	127.4	127.3	145	93.2	77.8
45	125.6	123.4	150	85.8	75.2
50	123.5	119.9	155	78.3	74.8
55	126.3	117.3	160	73.4	72.1
60	124.2	112.4	165	71.3	70.7
65	122.3	110.1	170	70.1	68.3
70	119.8	106.3	175	69.8	65.2
75	117.3	102.1	180	65.4	59.3
80	116.5	100.9	185	54.3	53.2
85	114.2	98.6	190	49.2	47.1
90	112.8	94.7	195	47.8	42.5
95	113.2	91.6	200	47.3	41.8
100	110.4	92.4			

ภาคผนวก ค

ตารางค่าที่ได้จากผลวิเคราะห์

ตารางที่ ค-1 ค่าการยุบตัวของพลาสติก PS หลังการฉีด

จุดที่วัด	ขนาด รอยยุบ (มิลลิเมตร)						
	P20	Cu 15%	Cu 30%	Cu 45%	Cu 60%	Cu 75%	Cu 100%
A	0.0083	0.0070	0.0066	0.0064	0.0063	0.0063	0.0063
B	0.0101	0.0095	0.0091	0.0090	0.0090	0.0090	0.0091
C	0.0467	0.0400	0.0397	0.0392	0.0388	0.0389	0.0387
D	0.0299	0.0300	0.0235	0.0288	0.0232	0.0228	0.0221
E	0.0070	0.0070	0.0066	0.0062	0.0064	0.0061	0.0061
F	0.0280	0.0230	0.0258	0.0272	0.0270	0.0269	0.0268

ตารางที่ ค-2 ค่าการยุบตัวของพลาสติก PP หลังการฉีด

จุดที่วัด	ขนาด รอยยุบ (มิลลิเมตร)						
	P20	Cu 15%	Cu 30%	Cu 45%	Cu 60%	Cu 75%	Cu 100%
A	0.0874	0.0684	0.0653	0.0639	0.0631	0.0628	0.0628
B	0.1069	0.0816	0.0783	0.0774	0.0771	0.0765	0.0758
C	0.0944	0.0616	0.0567	0.0547	0.0536	0.0528	0.0527
D	0.0525	0.0284	0.0250	0.0236	0.0218	0.0214	0.0215
E	0.0822	0.0513	0.0476	0.0459	0.0451	0.0444	0.0444
F	0.1688	0.1495	0.1456	0.1477	0.147	0.1425	0.1421

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายอุเทน คณะวาปี

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การศึกษาตัวแปรที่มีอิทธิพลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนและการหดตัวของ  
ชิ้นงานฉีดพลาสติก โดยการใช้ทองแดงฝังในแม่พิมพ์

สาขาวิชา : วิศวกรรมการผลิต

### ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2521 สถานที่เกิดอำเภอบางเขน จังหวัดกรุงเทพฯ เป็นบุตรคนที่ 4 ในจำนวนพี่น้อง 4 คน ของนายสมภารและนางประจวบ คณะวาปี ที่อยู่ปัจจุบัน เลขที่ 1023/38 ซอยสาธุประดิษฐ์ 34 ถนนสาธุประดิษฐ์ แขวงบางโพงพาง เขตยานนาวา จังหวัดกรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10120

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง แผนกวิชาช่างกลโรงงาน (ออกแบบแม่พิมพ์) จาก วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี พ.ศ. 2542 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยีเครื่องกล (ออกแบบแม่พิมพ์) จากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปี พ.ศ. 2544