

**การถ่ายโอนความร้อนและการออกแบบระบบหล่อเย็นสำหรับแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่
สร้างจากวัสดุอีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม**
**Heat Transfer and Cooling System Design in Plastic Injection Mould making from
Aluminium Filled Epoxy Resin**

ชัชพล ชั่งชู

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ติดต่อ: โทรศัพท์: (662) 942-8555, โทรสาร: (662) 579-4576,
E-mail: fengcpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้วัสดุประเภทอีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมในการสร้างแม่พิมพ์ของประเทศ
ไทยได้ดำเนินการอย่างเป็นระบบและต่อเนื่องมาประมาณ 3-4 ปีแล้ว ซึ่งจากผลการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็น
ว่าในบางกรณีเช่น การนำวัสดุประเภทอีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมมาสร้างเป็นอินเสิร์ทก่อนนำไปประกอบเป็น
แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกนั้นจะประสบปัญหาเกี่ยวกับการหล่อเย็นชิ้นงานพลาสติกและการควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ให้
อยู่ในระดับที่ต้องการ ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการวิจัยในหัวข้อนี้ขึ้น ซึ่งในการวิจัย
นี้ได้มีการทดลองจำลองการถ่ายโอนความร้อนจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังท่อน้ำหล่อเย็น ซึ่งผลการทดลอง
แสดงให้เห็นว่าช่องว่างเล็กๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสระหว่างอินเสิร์ทและฐานแม่พิมพ์มีสภาพเป็นฉนวนความร้อน
และมีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกอย่างมีนัยยะ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้นำผลการ
ทดลองที่ได้ไปใช้ในการเสนอแนะระบบการหล่อเย็นที่เหมาะสมกับแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ใช้วัสดุประเภทอีพ็อกซีเร
ซินเติมอะลูมิเนียมเป็นอินเสิร์ทเพื่อแก้ปัญหาทั้งสองข้างต้นอีกด้วย

คำหลัก: อีพ็อกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม การฉีดพลาสติก แม่พิมพ์ การถ่ายโอนความร้อน

Abstract

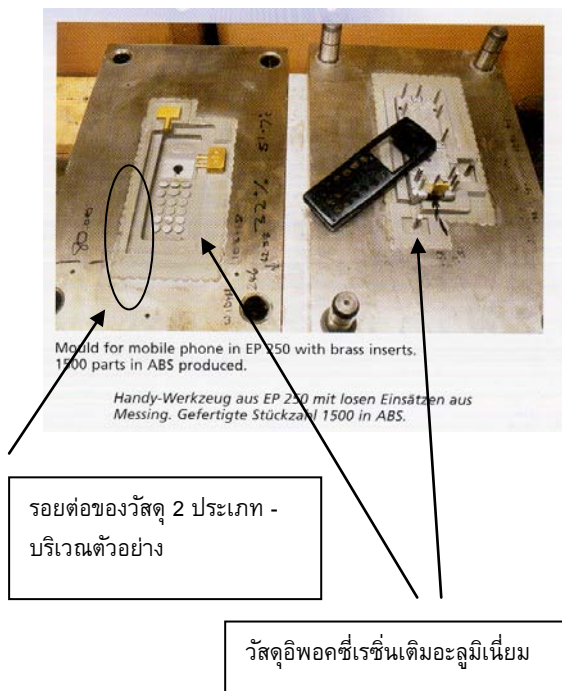
In Thailand, the applications of aluminium filled epoxy resin have been researched continuously and systematically since three to four years ago. In some cases, aluminium filled epoxy resin were used as inserts of plastic injection moulds. However, two major problems were indicated which are longer cooling time and unsuitable mould temperature. In order to solve these problems, hence, in this research the experiments for simulating the heat transfer from the heat source to the cooling system have been done. Experimental results indicated that small gaps locating between the insert and the mould base act as insulator. This insulation affects the heat transfer in plastic injection mould significantly. By employing

these experimental results, the suitable cooling system for the plastic injection mould using aluminium filled epoxy resin as inserts was also introduced.

Keywords: aluminium filled epoxy resin, plastic injection, mould.

1. บทนำ

ในปัจจุบันการใช้แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเรซินเติมอะลูมิเนียมเริ่มเป็นที่แพร่หลายมากขึ้นตามลำดับ ซึ่งวัตถุประสงค์หลักดั้งเดิมของการใช้แม่พิมพ์ประเภทดังกล่าวคือ ต้องการสร้างแม่พิมพ์สำหรับชิ้นงานต้นแบบหรือสำหรับการผลิตชิ้นงานในปริมาณที่ไม่มากนักภายใต้ระยะเวลาอันจำกัด แต่ในปัจจุบันแม่พิมพ์สำหรับการผลิตจริงในสายการผลิตได้มีการใช้วัสดุดังกล่าวในการสร้างแม่พิมพ์กันแพร่หลายมากขึ้น ตัวอย่างหนึ่งของการใช้แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเรซินเติมอะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมคือ การสร้างแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกสำหรับชิ้นงานต้นแบบ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่สร้างจากวัสดุฉีดพลาสติกเรซินเติมอะลูมิเนียม [1]

จากภาพที่ 1 แสดงให้เห็นถึงวัสดุฉีดพลาสติกเรซินเติมอะลูมิเนียมจะถูกใช้เป็นคอร์ (core) และคาร์วิตตี (cavity) ของแม่พิมพ์ โดยทำการสวมประกอบลงในฐานแม่พิมพ์ (mould base) ที่ทำจากวัสดุเหล็กกล้า ซึ่งการสวมประกอบดังกล่าวจะก่อให้เกิดช่องว่างเล็กๆ ขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสของวัสดุทั้งสอง

จากตัวอย่างในภาพที่ 1 หากพิจารณาในลักษณะภาพอย่างง่ายจะสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2 โดยในภาพดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นจากชิ้นงานพลาสติกไปยังส่วนต่างๆ ของแม่พิมพ์ซึ่งความร้อนที่ถูกถ่ายโอนออกไปนั้นจะไหลผ่านช่องว่าง (เกิดจากรอยต่อของวัสดุ 2 ชั้น) ซึ่งช่องว่างดังกล่าวจะมีสภาพเป็นฉนวนซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการถ่ายโอนความร้อนจากวัสดุชิ้นหนึ่งไปยังอีกวัสดุอีกชิ้นหนึ่ง [2-3] ในที่นี้ก็คือจากคอร์และคาร์วิตตีไปยังแผ่นเหล็กกล้า (ฐานแม่พิมพ์)

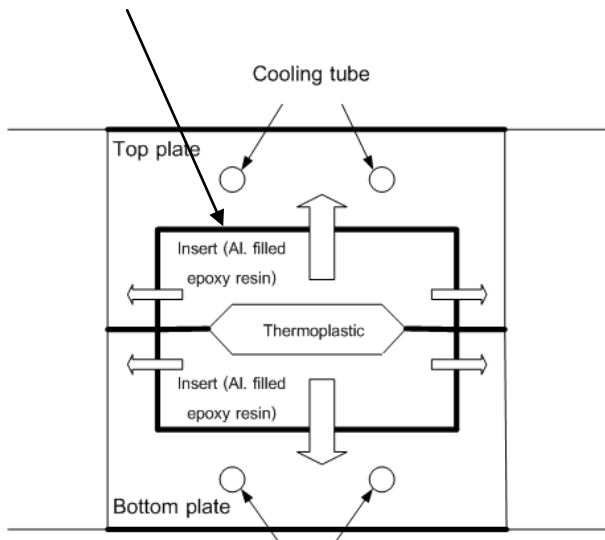
ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการหล่อเย็นชิ้นงานพลาสติกของแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกที่ใช้วัสดุประเภทฉีดพลาสติกเรซินเติมอะลูมิเนียม (อันจะส่งผลถึงการลดเวลาในการหล่อเย็นและการควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์ในระดับที่เหมาะสม) การวิจัยชิ้นนี้จึงทำการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกเพื่อนำผลที่ได้ไปออกแบบระบบการหล่อเย็นที่เหมาะสมต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องกัด CNC (Bridgeport รุ่น VMC600X)
2. เครื่องหล่อสูญญากาศ (MCP รุ่น 5/01)

รอยต่อของวัสดุ 2 ประเภท - มี
สภาพเป็นฉนวนความร้อน



ภาพที่ 2 ภาพตัดขวางซึ่งแสดงแบบจำลองของ
แม่พิมพ์อย่างง่าย

3. เครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด
(DOSTMANN electronic รุ่น ScanTemp 5020-0420)
4. Dial gauge (Mitutoyo รุ่น 513-3049M)
5. Magnetic stand (Mitutoyo รุ่น 7010SN)
6. แท่นวัดความตรง (Straightness)
7. ดอกกัด (endmill) ขนาด 10 mm (SANDVIK รุ่น R216.34-10030-AS14N 1620)
8. ฮีทเตอร์คาร์ทริดจ์ ขนาด 240 W (HIGH TEMPERATURE รุ่น HT30426)
9. ผงอะลูมิเนียม ขนาด 0 – 60 ไมโครเมตร
10. น้ำยาเรซิน EP 310 A
11. สารทำให้แข็งตัว (hardener) (Sika ชนิด Biresin L84T)

2.2. วิธีการดำเนินการทดลอง

1) การเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบ

เนื่องจากการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ชิ้นงานทดสอบ 2 ประเภท คือ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมและเหล็กกล้า S50C ซึ่งชิ้นทดสอบแต่ละประเภทมี

การจัดเตรียมชิ้นทดสอบที่แตกต่างกันดังรายละเอียดต่อไปนี้

ก. อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม

เตรียมส่วนผสมโดยใช้ผงอะลูมิเนียม 45 % น้ำยาเรซิน 44% และสารทำให้แข็งตัว 11% โดยมวล โดยขั้นตอนการผสมให้ผสมตามคำแนะนำของผู้ผลิต จากนั้นนำส่วนผสมที่ได้ไปหล่อเป็นชิ้นงานขนาด 60 x 60 x 60 mm โดยประมาณ จากนั้นจึงปล่อยให้ชิ้นงานแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 24 ชั่วโมง) จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปกัดปาดผิวให้ได้ขนาด 50 x 50 x 50 mm จำนวน 15 ก้อน

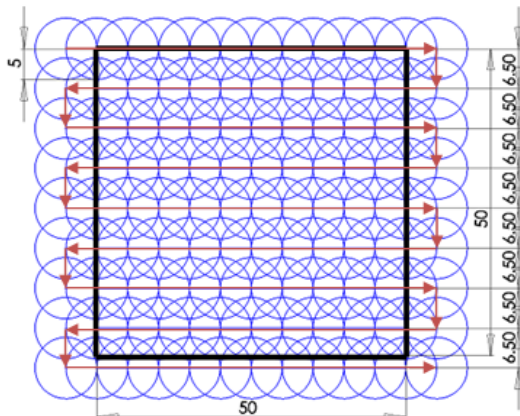
ข. เหล็กกล้า S50C

นำมานำเหล็กท่อนยาวหน้าตัด 50 x 50 mm มาตัดด้วยเลื่อยไฟฟ้าเป็นก้อนขนาด 50 x 50 x 50 mm จำนวน 30 ก้อน แล้วจึงนำไปปาดผิวด้านที่ถูกเลื่อยให้ขนานกัน จากนั้นจึง แบ่งเป็นเหล็กชุด A จำนวน 15 ก้อน และ เหล็กชุด B จำนวน 15 ก้อน

2) การเตรียมผิวชิ้นงาน

เนื่องจากอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมเป็นวัสดุเชิงประกอบที่ยังไม่มีการวิจัยถึงเงื่อนไขการกัด (cutting condition) ที่เหมาะสม ซึ่งต่างจากเหล็ก S50C ที่ทางบริษัทผู้ผลิตมีกัดได้ระบุเงื่อนไขการกัดไว้แล้ว ดังนั้นในการวิจัยนี้ทางผู้วิจัยจึงได้ตัดสินใจเลือกใช้เงื่อนไขการกัดเดียวกันกับเหล็ก S50C โดยเงื่อนไขการกัดดังกล่าวคือความเร็วรอบ (speed) ที่ 6,847 rpm และอัตราป้อน (feed) 2,602 mm/min จากนั้นจึงเพิ่มความเร็วรอบอีก 4 ค่า โดยการเลือกใช้ค่าเบี่ยงเบน $\pm 20\%$ และ $\pm 40\%$ จากค่าที่เลือกไว้ซึ่งจะได้ 4,108 5,478 6,847 8,216 และ 9,585 rpm ในทำนองเดียวกันอัตราป้อนจะใช้ 3 ค่า โดยการเลือกใช้ค่าเบี่ยงเบน $\pm 20\%$ จากค่าที่เลือกไว้ซึ่งจะได้ 2,082 2,602 และ 3,122 mm/min ส่วนการกินลึก (depth of cut) กำหนดคงที่เป็น 0.1 mm โดยแนวการเดินของดอกกัดห่างกัน 6.5 มิลลิเมตร (ภาพที่ 3) โดยการกัดชิ้นงานจะเป็นการกัดแห้ง (ผลที่ได้คือชิ้นงานอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมจำนวน 15 ก้อน (R1 - R15)

เหล็กชุด A จำนวน 15 ก้อน ($S_a1 - S_a15$) และ เหล็กชุด B จำนวน 15 ก้อน ($S_b1 - S_b15$)



ภาพที่ 3 การเลื่อนแนวเดินดอกกัดบนชิ้นงาน



ภาพที่ 4 ตำแหน่งที่ใช้วัดอุณหภูมิ

3) การหาค่าความหยาบผิวแบบระนาบ

เนื่องจากผิวชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเครื่องจักรนั้นมึลักษณะเป็นระนาบที่กระจายตัวไม่สม่ำเสมออันเป็นผลเนื่องมาจากแนวการเดินของมีดกัด (ดังภาพที่ 3) ดังนั้นการวัดค่าความหยาบละเอียดของผิวชิ้นงานที่เหมาะสมจึงควรเป็นการวัดโดยวิธีการของ Unal [4] ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นการระบุค่าความหยาบของพื้นผิวด้วยตัวเลขค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิว (SRC – Surface Roughness Coefficient)

4) การทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่าง

ในการวิจัยนี้การเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่างอันเนื่องมาจากผิวสัมผัสของวัสดุ 2 ชั้นนั้น ได้

แบ่งการทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

case 1 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b$) โดยวางแนวการเดินดอกกัดให้ขนานกัน

case 2 เหล็ก กับ เหล็ก ($S_a - S_b'$) โดยวางแนวการเดินดอกกัดให้ตั้งฉากกัน

case 3 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R$) โดยวางแนวการเดินดอกกัดให้ขนานกัน

case 4 เหล็ก กับ อีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ($S_a - R'$) โดยวางแนวการเดินดอกกัดให้ตั้งฉากกัน โดยวิธีการทดสอบการเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่างมีขั้นตอนโดยสรุปดังนี้

1. เปิดฮีตเตอร์ให้อุณหภูมิจุด T_H (ภาพที่ 4) มีค่าคงที่เท่ากับ $220\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. วางชิ้นทดสอบทั้งสองก้อนซ้อนกันโดยให้ด้านที่ผ่านการกัดสัมผัสกัน
3. ปิดฉนวน (แผ่นไม้) ทางด้านหน้าและด้านหลัง วางตุ้มน้ำหนัก 1 กิโลกรัม ทางด้านบน ทิ้งให้ถ่ายเทความร้อนเป็นเวลา 5 นาที (เพื่อให้การกระจายอุณหภูมิในชิ้นทดสอบเข้าสู่สภาวะคงตัว)
4. เปิดฉนวน (แผ่นไม้) ทางด้านหน้า วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_H , T_1 , T_2 , T_3 และ T_4 (ภาพที่ 4) บันทึกผล

3. ผลการทดลอง

เมื่อดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนที่ได้รับไว้ข้างต้น ผู้วิจัยสังเกตพบว่เมื่อเพิ่มความเร็วในการกัดให้สูงขึ้นนั้นจะทำให้พื้นผิวที่ได้มีความเรียบมากขึ้น (ค่า SRC มีค่าลดลง) แต่ในทางตรงกันข้ามหากทำการเพิ่มอัตราป้อนกลับทำให้พื้นผิวที่ได้มีความหยาบมากขึ้น (ค่า SRC มีค่าสูงขึ้น) โดยปรากฏการข้างต้นนั้นจะเกิดขึ้นกับวัสดุทั้งสองประเภทคือทั้งเหล็กกล้า S50C และอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม ดังผลในตารางที่ 1

อย่างไรก็ตามจากการสังเกตยังพบอีกว่าเศษวัสดุที่เกิดจากกระบวนการกัดนั้นในกรณีของการกัดอีพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมจะมีลักษณะเป็นเศษผงละเอียด

ในขณะที่การกัดเหล็กกล้า S50C จะให้เศษวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า

เมื่อผู้วิจัยได้นำผลการทดลองจากการทดลองในขั้นตอนที่ 4 มาเขียนกราฟสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อ/ช่องว่าง (ΔT_{gap}) กับค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของทั้งสองหน้าสัมผัสที่สัมผัสกัน (SRC) สำหรับกรณีต่างๆ ทั้ง 4 กรณี ผลที่ได้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 5 ซึ่งจากภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าผลต่างของอุณหภูมิ ณ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัสดุเหล็กกล้ากับเหล็กกล้าจะมีค่าที่ต่ำกว่าผลต่างของอุณหภูมิ ณ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างวัสดุเหล็กกล้ากับกั๊ดอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมอย่างเด่นชัดและมีนัยยะสำคัญ นอกจากนี้ผลการทดลองที่ได้แสดงในภาพที่ 5 ยังแสดงให้เห็นว่าทิศทางของแนวการเดินของมีดกัดมีได้ส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่ออย่างมีนัยยะสำคัญแต่อย่างใด

และหากทำการพิจารณาอุณหภูมิที่ลดลง ณ บริเวณรอยต่อในลักษณะของค่าเฉลี่ยแล้ว การลดลงของอุณหภูมิที่รอยต่อสำหรับกรณีต่างๆ สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2

4. วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการสังเกตในผลการทดลองที่ระบุว่าเศษวัสดุที่เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดชิ้นงานกั๊ดอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมมีลักษณะเป็นผงขนาดเล็กนั้น สาเหตุหลักของปรากฏการณ์ดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ วัสดุอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมนั้นเกิดจากการยึดเกาะอนุภาคอะลูมิเนียมขนาดเล็กเข้าด้วยกันโดยใช้เรซิน และจากสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ทราบกันโดยทั่วไปว่าความแข็งแรงของเรซินนั้นจะต่ำกว่าความแข็งแรงของอะลูมิเนียม ดังนั้นเมื่อมีดกัดทำการตัดเฉือนตัววัสดุอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมความเค้นเฉือน (shear stress) และอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณ shear zone จะทำให้การยึดเกาะวัสดุผสมที่เกิดจากเรซินถูกทำลายลงในขณะที่อนุภาคผงอะลูมิเนียมยังมีสภาพเช่นเดิม ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้คือ เศษวัสดุที่เกิดจากกระบวนการกัดจะลักษณะเป็นผงขนาดเล็ก

สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์ที่ทำการศึกษาในการวิจัยนี้ มีประเด็นที่สนใจจะพิจารณาเพิ่มเติมอยู่ 2 ประเด็นดังนี้คือ ประเด็นแรกคือ การกำหนดอุณหภูมิ T_H ให้มีค่า 220 °C นั้น เป็นการกำหนดให้อุณหภูมิดังกล่าวใกล้เคียงกับอุณหภูมิทั่วไปของพลาสติกเหลวขณะที่ถูกฉีดเข้ามาในแม่พิมพ์ซึ่งจะทำให้ผลการศึกษากฎการถ่ายโอนความร้อนมีค่าใกล้เคียงความจริงมากขึ้น ส่วนประเด็นที่สองนั้นจะเป็นความแตกต่างระหว่างทิศทางการไหลของความร้อน ซึ่งในสภาพความเป็นจริงนั้นความร้อนจะไหลจากแหล่งกำเนิดความร้อน (พลาสติกเหลว) ผ่านอินสูลิเทรท (วัสดุอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม) ฐานแม่พิมพ์ (เหล็กกล้า) ไปสู่อ่อน้ำหล่อเย็นตามลำดับ (ดังภาพที่ 2) แต่อย่างไรก็ตามหากในการวิจัยนี้เรียงลำดับวัสดุตามสภาพความเป็นจริงคือ แหล่งกำเนิดความร้อน วัสดุอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม และเหล็กกล้า S50C ตามลำดับและยอมให้ก้อนวัสดุอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมสัมผัสกับแหล่งกำเนิดความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน (ประมาณ 5 นาที เพื่อให้การกระจายตัวของอุณหภูมิที่วัสดุก้อนต่างๆ คงที่) จะทำให้ก้อนวัสดุอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมใหม่ได้ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงเรียงลำดับก้อนวัสดุเสียใหม่เป็นดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งหากเราสนใจเฉพาะผลต่างของค่า $T_2 - T_3$ (ผลจากการเป็นฉนวนความร้อนของช่องว่างบริเวณผิวสัมผัส) ทิศทางการไหลของความร้อนจะมีผลต่อค่า ΔT ดังกล่าวไม่แตกต่างกันมากนัก

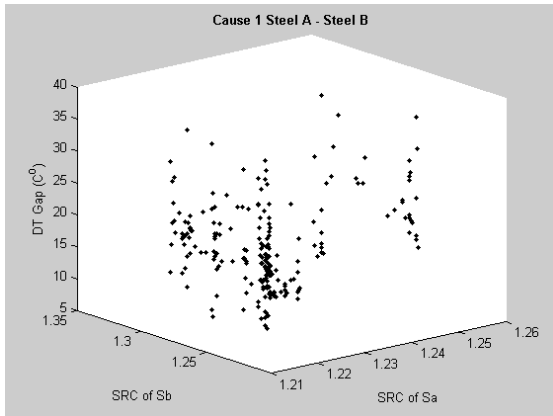
และเมื่อนำผลการศึกษากฎการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์ข้างต้นมาใช้ในการสร้างสมการการถ่ายโอนความร้อนอย่างง่ายแล้วสมการการถ่ายโอนความร้อนอย่างง่ายสำหรับแม่พิมพ์ที่ใช้อินสูลิเทรทเป็นวัสดุอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียม (ภาพที่ 6(b)) นั้นจะสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1) ซึ่งสมการดังกล่าวจะแตกต่างจากสมการที่ใช้กันโดยทั่วไปในภาคอุตสาหกรรม (ซึ่งสร้างจากแบบจำลองแม่พิมพ์ในภาพที่ 6(a))

ตารางที่ 1 ค่า SRC สำหรับวัสดุและเงื่อนไขการกัดต่างๆ

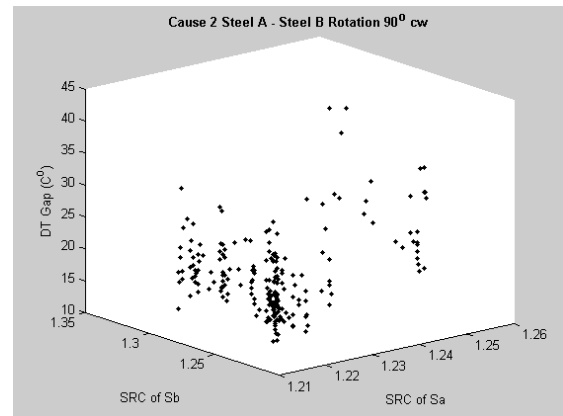
Sample	Speed (rpm)	Feed (mm/min)	Surface roughness coefficient (SRC)		
			S_a	S_b	R
1	4,108	2,082	1.243	1.287	1.290
2	4,108	2,602	1.245	1.278	1.271
3	4,108	3,122	1.224	1.274	1.274
4	5,478	2,082	1.220	1.231	1.230
5	5,478	2,602	1.217	1.254	1.269
6	5,478	3,122	1.213	1.255	1.285
7	6,847	2,082	1.214	1.219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

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ลดลงที่รอยต่อช่องว่างอากาศ ($\Delta \bar{T}_{Gap}$)

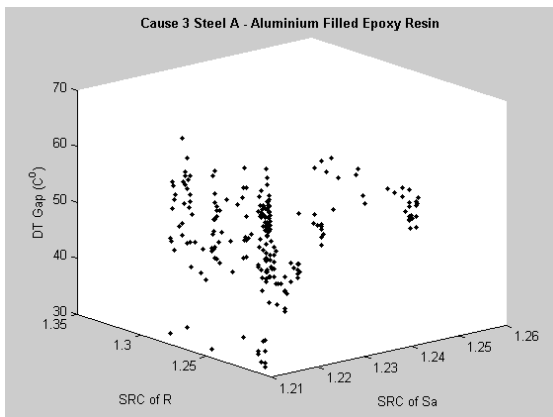
Case	Code A	Code B	$\Delta \bar{T}_{Gap}$ (C°)
1	S_a	S_b	21.4
2	S_a	S_b'	22.2
3	S_a	R'	51.3
4	S_a	R	51.4



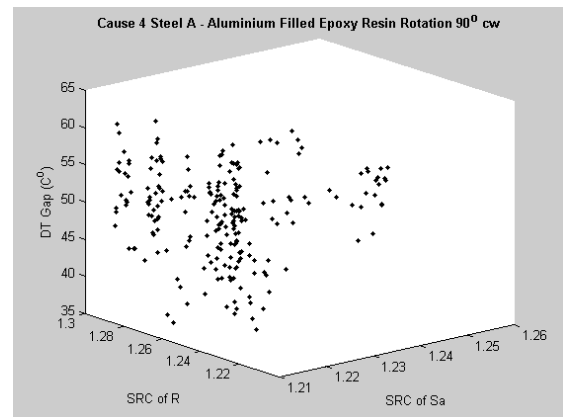
(a)



(b)

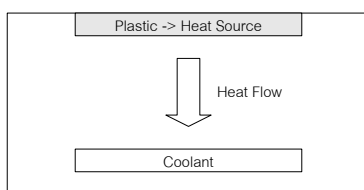


(c)

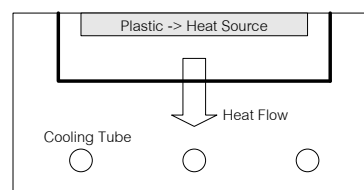


(d)

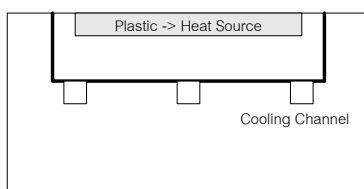
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า SRC ของวัสดุแต่ละชิ้นกับผลต่างของอุณหภูมิบริเวณ $T_2 - T_3$



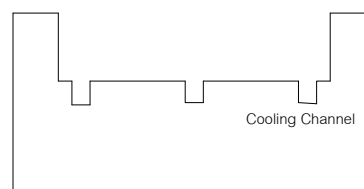
(a)



(b)



(c)



(d)

ภาพที่ 6 ลักษณะระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์แบบต่าง ๆ

$$Q_c = \frac{T_p - T_c}{\frac{x_r}{k_r A} + \frac{1}{h_c A} + \frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi n d_c \ell h_{cl}}} + \frac{T_p - T_c}{\frac{x_m}{k_m A} + \frac{1}{\pi n d_c \ell h_{cl}}} \quad (1)$$

$$Q_c = \frac{T_p - T_c}{\frac{x_r}{k_r A} + \frac{1}{n s_c \ell h_{cl}}} + \frac{T_p - T_c}{\frac{1}{n s_c \ell h_{cl}}} \quad (2)$$

โดยที่

A = พื้นที่หน้าตัด (m^2)

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

k_m = ค่าสภาพการนำความร้อนของฐานแม่พิมพ์

ℓ = ความยาวของท่อน้ำหล่อเย็น (m)

Q_c = ความร้อนที่ถ่ายเทออกโดยน้ำหล่อเย็น

T_c = อุณหภูมิหน้าหล่อเย็น ($^\circ C$)

x_r = ความหนาของอินสูลิเทียมทำจากอิพอกซีเรซิน
เติมอะลูมิเนียม (m)

d_c = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อสารหล่อเย็น (m)

h_{cl} = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของสารหล่อเย็น
($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

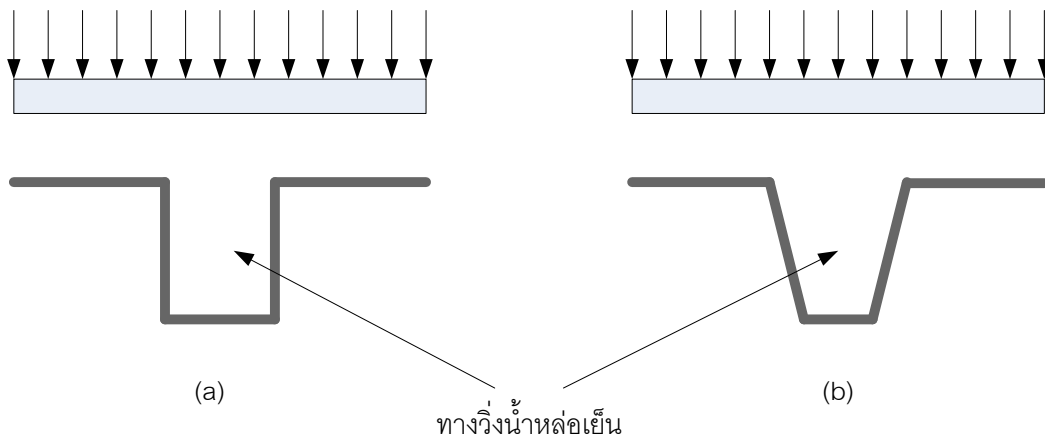
k_r = ค่าสภาพการนำความร้อนของอิพอกซีเรซินเติม
อะลูมิเนียม

n = จำนวนท่อสารหล่อเย็น

T_p = อุณหภูมิของพลาสติกเหลว ($^\circ C$)

x_m = ความหนาของฐานแม่พิมพ์วัดจากอินสูลิเทียม
ผิวท่อน้ำหล่อเย็นด้านบน (m)

s_c = พื้นที่หน้าตัดของท่อสารหล่อเย็น (m^2)



ภาพที่ 7 การปรับแต่งรูปทรงของทางวิ่งน้ำหล่อเย็นให้สามารถทนต่อแรงกดได้ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามจากสมการที่ 1 จะพบว่า ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์ใน ภาพที่ 6(b) นั้น มีแนวโน้มที่จะมีค่าที่ต่ำเนื่องจากผล ของความเป็นฉนวนความร้อนบริเวณผิว/หน้าสัมผัส ระหว่างอินสเทรทและฐานแม่พิมพ์ (โดยในการวิจัยนี้ค่า $\square T_{Gap}$ มีค่าประมาณ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งส่งผลให้ค่า h_c เฉลี่ยมี ค่าเท่ากับ 55.98 และ $53.93\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับกรณี ที่ 3-4 ตามลำดับ เปรียบเทียบกับค่า $\square T_{Gap}$ มี ค่าประมาณ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งส่งผลให้ค่า h_c เฉลี่ยมีค่า เท่ากับ 263.74 และ $229.31\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ สำหรับกรณี ที่ 1-2 ตามลำดับ) ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพ การถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์ผู้วิจัยใคร่ขอเสนอ การจัดวางระบบหล่อเย็นเสียใหม่เป็นดังแสดงในภาพ ที่ 6(c) ซึ่งสมการการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์ จะลดรูปจากสมการที่ (1) เป็นสมการที่ (2) ซึ่งจะ พบว่าความเป็นฉนวนความร้อนบริเวณรอยต่อของอิน สเทรทและฐานแม่พิมพ์จะไม่มีผลใดๆ ทั้งสิ้น ดังนั้น ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนความร้อนของแม่พิมพ์ก็ จะเพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 6(d) นั้นจะพบว่าลักษณะทางเดินสาร หล่อเย็นจะมีลักษณะดังเช่นที่แสดงในภาพที่ 7(a) แต่ อย่างไรก็ตามเมื่อแผ่นอินสเทรทซึ่งอยู่ (ด้านบน) ถูกกดลง มาเนื่องจากแรงปิดแม่พิมพ์บริเวณขอบของทางวิ่งน้ำ หล่อเย็นซึ่งมีลักษณะเป็นมุมฉากจะก่อให้เกิด stress concentration ขึ้นที่แผ่นอินสเทรท ซึ่งความเค้นดังกล่าว จะก่อให้เกิดการเสียหายต่อแผ่นอินสเทรทได้ ดังนั้นลักษณะ ทางวิ่งหล่อเย็นควรจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมูดัง แสดงในภาพที่ 7(b) ซึ่งขนาดที่เหมาะสมนั้น ผู้ออกแบบ แม่พิมพ์อาจใช้คำแนะนำที่ระบุไว้ในเอกสารของ ชาลี [5] พสุและคณะ [6] หรือ Ress [7] ก็ได้

5. สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่าการใช้อินสเทรทที่ทำจาก วัสดุอิพอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมและการติดตั้งระบบ หล่อเย็นแบบที่นิยมกันทั่วไปนั้นจะส่งผลให้การถ่าย โอนความร้อนในแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกลดลงอย่างมีนัย

ยะสำคัญ ดังนั้นเพื่อเป็นการควบคุมอุณหภูมิแม่พิมพ์อิ พอกซีเรซินเติมอะลูมิเนียมให้อยู่ในระดับที่ต้องการ (เพื่อมิให้แม่พิมพ์เกิดความเสียหายและเกิดการขึ้นรูป พลาสติกที่ไม่สมบูรณ์) ผู้ออกแบบแม่พิมพ์จึงควร ออกแบบระบบหล่อเย็นแม่พิมพ์ใหม่ดังที่นำเสนอใน การวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.mcp-group.com> accessed on June 2008.
- [2] Holman JP. (2002), *Heat transfer*, 9th edition. McGraw-Hill, Singapore
- [3] Syed M.S. Wahid and Madhusudana C. V., (2000), Gap conductance in contact heat transfer, *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.43, pp.4483-4487.
- [4] Unal et al., 2004. Discontinuity Surface Roughness Measurement Techniques and The Evaluation of Digital Photogrammetric Method, *Paper presented in Geo-Imagery Bridging Continents 20th ed., International Society for Photogrammetry and Remote Sensing :ISPRS*, Istanbul Turkey.
- [5] ชาลี ตระกาลกุล (2539), *ออกแบบแม่พิมพ์ฉีด 1*, สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- [6] พสุ โลหารชุน, เจริญ วัฒนันหนู, ไพบุลย์ แจ้งเสนาะ, วิวัฒน์ ตันติขจรโกศล และ อมรวัฒน์ พรหมเคน (2534), *เทคโนโลยีแม่พิมพ์ฉีดพลาสติกและการ ออกแบบเชิงวิเคราะห์, สถาบันพัฒนาอุตสาหกรรม เครื่องจักรกลและโลหะการ*, หจก.ภาพพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- [7] Ress H. (1995), *Mold Engineering*, Hanser Publishers, Munich.