

การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ
ระหว่างการแข็งตัวของชิ้นงานในแบบหล่อชนิดถาวร



นางสาว วันทนีย์ พุกกะคุปต์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโลหการ ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ

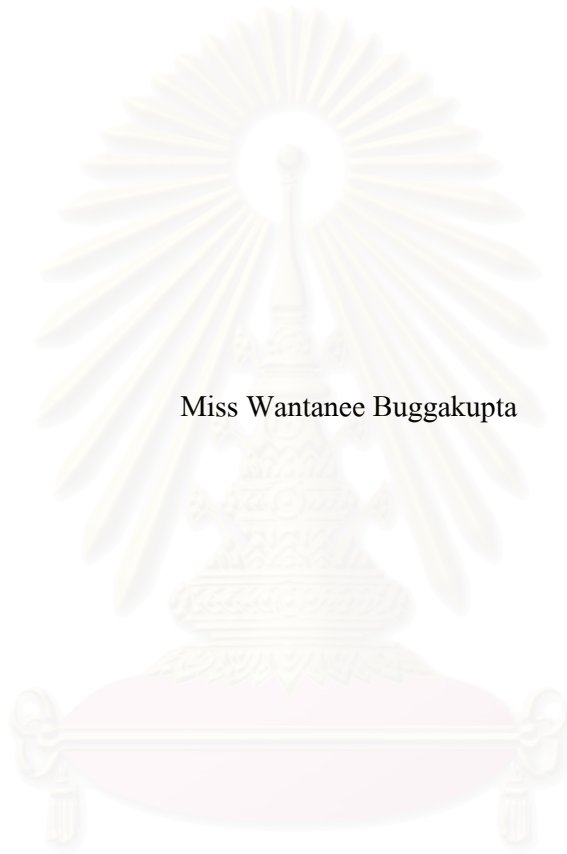
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0732-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MEASUREMENT OF HEAT TRANSFER COEFFICIENTS
AT METAL/MOLD INTERFACE DURING SOLIDIFICATION OF CASTING
IN A PERMANENT MOLD



Miss Wantanee Buggakupta

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Metallurgical Engineering

Department of Metallurgical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic year 2001

ISBN 974-03-0732-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อระหว่างการแข็งตัวของชิ้นงานในแบบหล่อชนิดถาวร
โดย	นางสาว วันทนีย์ พุกกะคุปต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมโลหการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิทธิพล เตี้ยวณิชย์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	Professor Takateru Umeda

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประสงค์ ศรีเจริญชัย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิทธิพล เตี้ยวณิชย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(Professor Takateru Umeda)

..... กรรมการ
(อาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์)

วันทนีย์ พุกกะคุปต์ : การตรวจวัดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อระหว่างการแข็งตัวของชิ้นงานในแบบหล่อชนิดถาวร.

(MEASUREMENT OF HEAT TRANSFER COEFFICIENTS AT METAL/MOLD INTERFACE DURING SOLIDIFICATION OF CASTING IN A PERMANENT MOLD) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิพิณ เดียววิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา
ร่วม : Professor Takateru Umeda , 117 หน้า ISBN 974-03-0732-9.

งานวิจัยนี้ศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อชนิดถาวรขณะชิ้นงานเกิดการเย็นตัวและแข็งตัวอย่างมีทิศทางในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดังกล่าวได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขซึ่งอาศัยข้อมูลที่วัดได้จากการทดลองเป็นหลัก นอกจากนี้ยังศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ 4 ปัจจัย อันได้แก่ (1) อุณหภูมิเท (2) ส่วนผสมของโลหะที่นำมาหล่อ (3) ชนิดของสารเคลือบผิวแบบหล่อและ (4) ความหนาของสารเคลือบผิวแบบหล่อ

ผลการวิจัยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อนั้นแปรผันตามเวลา กล่าวคือเพิ่มขึ้นสูงในช่วงแรกจนถึงค่าสูงสุดแล้วลดลงอย่างต่อเนื่องในเวลาต่อมา ส่วนปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อพบว่า อุณหภูมิเทที่สูงขึ้น สารเคลือบผิวที่มีสมบัตินำความร้อนได้ดีและชั้นความหนาของสารเคลือบผิวที่บางลงส่งเสริมให้อัตราการถ่ายเทความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้น นอกจากนี้เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้มาใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองการแข็งตัวของน้ำโลหะพบว่าผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับผลที่วัดได้จากการทดลอง จึงสรุปได้ว่ารูปแบบการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากงานวิจัยนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

ภาควิชา.....วิศวกรรมโลหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....โลหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2544..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170512721 : MAJOR METALLURGICAL ENGINEERING

KEY WORD : HEAT TRANSFER / HEAT TRANSFER COEFFICIENT / PERMANENT
MOLD / METAL-MOLD INTERFACE

WANTANEE BUGGAKUPTA : MEASUREMENT OF HEAT TRANSFER
COEFFICIENTS AT METAL/MOLD INTERFACE DURING SOLIDIFICATION OF
CASTING IN A PERMANENT MOLD. THESIS ADVISOR : DR. ITTIPON
DIEWWANIT, Sc.D. THESIS COADVISOR : Professor TAKATERU UMEDA, Ph.D.
117 pp. ISBN 974-03-0732-9.

Experiments and simple numerical analyses were carried out to determine the rate of heat transfer at metal/mold interface during solidification in the form of heat transfer coefficient based on experimental data. Molten aluminum alloy was cast in a H13 mold and uni-directionally solidified. Temperatures at both metal and mold regions at various selected locations were monitored and analyzed heat transfer behaviour between mold and casting. Effects of coating conditions: coating type and coating thickness, and casting conditions: pouring temperature and alloy composition, were also evaluated.

It was found that the rate of heat transfer varies with time. High pouring temperature, thin coating layer, high thermal conductive mold coating promote the rate of heat transfer across the interface. When the calculated heat transfer coefficient was applied as one of the initial parameters for casting simulation, it was shown that calculated temperatures agree with measured temperature. The calculation method employed in this study can be another alternative to determine heat transfer coefficient at metal/mold interface.

DepartmentMetallurgical Engineering.... Student's signature.....
Field of study...Metallurgical Engineering... Advisor's signature.....
Academic year2001..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อธิพล เดี่ยวฉิมชัย Professor Takateru Umeda และ อาจารย์ สุวันชัย พงษ์สุกิจวัฒน์ เป็นอย่างสูงสำหรับการอุทิศตนและสละเวลาอันมีค่าของพวกท่านในการถ่ายทอดความรู้ อบรมสั่งสอน ตลอดจนให้กำลังใจและคำแนะนำต่างๆ ทั้งในด้านการเรียนและการทำงานด้วยความเมตตา คุณอรจิรา ชาญเทพ คุณอุษณีย์ กิตกำธร และเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ กลุ่มวิจัยการแข็งตัวของน้ำโลหะที่สละเวลาและแรงงานช่วยเหลือให้การทำงานเป็นอย่างตลอดรอดฝั่ง คุณธนสาร อินทรกำธรชัยและคุณทรงเกียรติ หาญสันติ ที่ให้คำปรึกษาด้านคอมพิวเตอร์ คุณสมคิด ทองศิลา คุณวิจิต ปรเกษมพรหม และเพื่อนๆ ภาควิชาวัสดุศาสตร์เซรามิกส์สำหรับความเอื้อเฟื้อวัสดุอุปกรณ์และสถานที่ใช้ในการเตรียมการทดลองอย่างเต็มที่ บริษัทสยามอุตสาหกรรมวัสดุทนไฟจำกัดสำหรับการอนุเคราะห์วัสดุทนไฟ รวมทั้งศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับความอนุเคราะห์ทางด้านทุนการวิจัย ตลอดจนผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ข้าพเจ้ามิได้เอ่ยนามในที่นี้ทุกท่าน

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ปรีทรรศน์ พันธบุรุษย์ที่ได้แนะนำให้ข้าพเจ้าสอบเข้าเรียนต่อระดับบัณฑิตศึกษาที่ภาควิชาแห่งนี้ รวมทั้งครอบครัวและบุคคลอันเป็นเคารพรักสำหรับกำลังใจและการสนับสนุนทางการศึกษาตลอดมา

วันทนีย์ พุกกะคุปต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปฏิทรรศน์วรรณกรรม.....	5
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน.....	5
2.2 ลักษณะทั่วไปและความสำคัญของกระบวนการหล่อขึ้นรูปโลหะโดยใช้แบบหล่อชนิดถาวร.....	7
2.3 ปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในระบบงานหล่อ.....	8
2.4 การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อในแบบหล่อชนิดถาวร.....	12
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อในแบบหล่อชนิดถาวร.....	15
3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	22
3.1 การเตรียมการทดลอง.....	22
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อ.....	22
3.1.2 การเตรียมระบบงานหล่อ.....	23
3.1.2.1 การเตรียมแบบหล่อขึ้นงาน.....	23
3.1.2.2 การเตรียมโลหะที่นำมาหลอม.....	25
3.1.2.3 การติดตั้งหัววัดคู่ความร้อน.....	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.2.4 การเคลือบผิวแบบหล่อโลหะด้วยสารเคลือบผิว.....	26
3.1.2.5 การหลอมและการตรวจวัดอุณหภูมิภายในชิ้นงานและแบบหล่อ.....	26
3.2 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ.....	27
3.2.1 การประมาณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อ.....	27
3.2.2 การประมาณค่าฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ.....	29
3.2.3 การประมาณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงาน.....	30
3.2.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ.....	35
3.2.4.1 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อโดยไม่พิจารณาพลังงานสะสมในวัสดุ.....	35
3.2.4.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อโดยพิจารณาพลังงานสะสมในวัสดุ.....	36
3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อในแบบหล่อชนิดถาวร.....	37
3.3.1 อุณหภูมิเท.....	37
3.3.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่นำมาหล่อ.....	38
3.3.3 ชนิดของสารเคลือบผิวแบบหล่อ.....	38
3.3.4 ความหนาของสารเคลือบผิวแบบหล่อ.....	38
3.4 การประเมินความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้.....	39
4 ผลการทดลอง.....	40
4.1 ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชิ้นงานกับแบบหล่อ.....	40
4.2 ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ.....	40
4.2.1 ผลการประมาณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อ.....	40
4.2.2 ผลการประมาณค่าฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ.....	41
4.2.3 ผลการประมาณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงาน.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่าง ชั้นงานกับแบบหล่อ.....	42
4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นงานกับ แบบหล่อในแบบหล่อชนิดถาวร.....	43
4.3.1 ผลของอุณหภูมิเท.....	43
4.3.2 ผลของส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่นำมาหล่อ.....	43
4.3.3 ผลของชนิดของสารเคลือบผิวแบบหล่อ.....	44
4.3.4 ผลของความหนาของสารเคลือบผิวแบบหล่อ.....	45
4.4 การประเมินความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อ ระหว่างชั้นงานกับแบบหล่อที่คำนวณได้.....	45
5 อภิปรายผลการทดลอง.....	46
5.1 ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในชั้นงานกับแบบหล่อ.....	46
5.2 ผลการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นงาน กับแบบหล่อ.....	47
5.2.1 ผลการประมาณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อ.....	47
5.2.2 ผลการประมาณค่าฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นงานกับ แบบหล่อ.....	47
5.2.3 ผลการประมาณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชั้นงาน.....	48
5.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นงานกับ แบบหล่อ.....	49
5.4 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นงานกับ แบบหล่อในแบบหล่อชนิดถาวร.....	49
5.4.1 ผลของอุณหภูมิเท.....	49
5.4.2 ผลของส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่นำมาหล่อ.....	50
5.4.3 ผลของชนิดของสารเคลือบผิวแบบหล่อ.....	51
5.4.4 ผลของความหนาของสารเคลือบผิวแบบหล่อ.....	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	53
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	53
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
รายการอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก.....	58
ภาคผนวก ก วิธีวัดความหนาของสารเคลือบผิว.....	59
ภาคผนวก ข การประมาณข้อมูลด้วยการถดถอยแบบน้อยสุด.....	61
ภาคผนวก ค การประมาณค่า error function.....	65
ภาคผนวก ง ส่วนผสมทางเคมีของสารเคลือบผิวแบบหล่อ.....	67
ประวัติผู้เขียน.....	117

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1	ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ทนไฟ..... 69
ตารางที่ 2	ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อน H13..... 70
ตารางที่ 3	สมบัติทางกายภาพเหล็กกล้าเครื่องมือร้อนเกรด H13..... 70
ตารางที่ 4	ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ในการทดลอง..... 70
ตารางที่ 5	สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ในการทดลอง.. 70
ตารางที่ 6	การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุด บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวหนาประมาณ 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน..... 71
ตารางที่ 7	การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุด บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมที่มีส่วนผสมทางเคมีต่างกันกับแบบหล่อที่เคลือบด้วย white coating..... 71 (ก) ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน..... 71 (ข) ที่อุณหภูมิ superheat เท่ากันและความหนาประมาณ 100 ไมโครเมตร..... 72
ตารางที่ 8	การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยและค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวต่างชนิดกันในช่วงความหนาของสารเคลือบผิว 100 ไมโครเมตรและที่อุณหภูมิเท่าเดียวกัน..... 73
ตารางที่ 9	การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยและค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมกับแบบหล่อที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวต่างชนิดและความหนาต่างกัน ที่อุณหภูมิ 1053 K. 73
ตารางที่ 10	การแบ่งช่วงเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่เทลงสู่แบบหล่อที่เคลือบด้วย white coating ที่สภาวะต่างๆ (ก) เวลาที่ตำแหน่ง 5 15 และ 35 มิลลิเมตร ห่างจากรอยต่อในฝั่งชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ liquidus และ solidus (ข) รากที่สองของเวลาสำหรับการคำนวณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานแบบพิจารณาค่าความร้อนแฝง..... 74

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 11	75
การแบ่งช่วงเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่เคลือบด้วย graphite-based coating ที่สภาวะต่างๆ (ก) เวลาที่ตำแหน่ง 5 15 และ 35 มิลลิเมตรห่างจากรอยต่อในฝั่งชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ liquidus และ solidus (ข) รากที่สองของเวลาสำหรับการคำนวณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานแบบพิจารณาค่าความร้อนแฝง.....	75
ตารางที่ 12	76
การแบ่งช่วงเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A380 ที่เคลือบด้วย white coating ที่สภาวะต่างๆ (ก) เวลาที่ตำแหน่ง 5 15 และ 35 มิลลิเมตรห่างจากรอยต่อในฝั่งชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ liquidus และ solidus (ข) รากที่สองของเวลาสำหรับการคำนวณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานแบบพิจารณาค่าความร้อนแฝง.....	76
ตารางที่ 13	77
การแบ่งช่วงเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A390 ที่เคลือบด้วย white coating ที่สภาวะต่างๆ (ก) เวลาที่ตำแหน่ง 5 15 และ 35 มิลลิเมตรห่างจากรอยต่อในฝั่งชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ liquidus และ solidus (ข) รากที่สองของเวลาสำหรับการคำนวณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานแบบพิจารณาค่าความร้อนแฝง.....	77
ตารางที่ 14	78
สมการเส้นตรงที่ได้จากการถดถอยเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง liquidus และระยะทาง solidus กับเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่สภาวะการหล่อต่างๆ.....	78
ตารางที่ 15	79
สมการเส้นตรงที่ได้จากการถดถอยเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง liquidus และระยะทาง solidus กับเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A380 ที่สภาวะการหล่อต่างๆ.....	79
ตารางที่ 16	79
สมการเส้นตรงที่ได้จากการถดถอยเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง liquidus และระยะทาง solidus กับเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A390 ที่สภาวะการหล่อต่างๆ.....	79
ตารางที่ 17	80
ตารางค่า error function.....	80

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1	(ก) ลักษณะของแบบหล่อชนิดถาวร (ข) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์โลหะที่หล่อขึ้นรูปในแบบหล่อชนิดถาวร..... 81
ภาพที่ 2	การถ่ายเทความร้อน ณ บริเวณต่างๆในระบบงานหล่อ..... 82
ภาพที่ 3	(ก) การถ่ายเทความร้อนในแบบหล่อที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน (ข) การถ่ายเทความร้อนในแบบหล่อที่มีสมบัตินำความร้อน..... 83
ภาพที่ 4	(ก) ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อภายหลังเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบหล่อ (ข) ช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ..... 84
ภาพที่ 5	รูปทรงและมิติของกระบอกปูนซีเมนต์ทนไฟ..... 85
ภาพที่ 6	รูปทรงและมิติของแบบหล่อกระบอกปูนซีเมนต์ทนไฟ..... 86
ภาพที่ 7	รูปทรงและมิติของฐานแบบหล่อที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด H13..... 87
ภาพที่ 8	แนวการเจาะร่องสำหรับติดตั้งหัววัดคู่ความร้อนบริเวณฐานของแบบหล่อ..... 88
ภาพที่ 9	ตำแหน่งติดตั้งหัววัดคู่ความร้อนในระบบงานหล่อ..... 89
ภาพที่ 10	กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการประมาณความหนาของสารเคลือบผิวบนผิวแบบหล่อ. 90
ภาพที่ 11	(ก) การหาเวลาที่บริเวณต่างๆ ในฝั่งชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ liquidus และอุณหภูมิ solidus จากกราฟการเย็นตัวของชิ้นงานที่ได้ (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง liquidus และระยะทาง solidus กับรากที่สองของเวลาที่สร้างจากกราฟการเย็นตัวของชิ้นงาน..... 91
ภาพที่ 12	(ก) การแบ่งความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง liquidus และระยะทาง solidus กับรากที่สองของเวลาเพื่อคำนวณอุณหภูมิรอยต่อฝั่งแบบหล่อแบบพิจารณาค่าความร้อนแฝงของการแข็งตัว (ข) การหาค่าสัดส่วนของเฟสของแข็งซึ่งสมมติให้การแข็งตัวของโลหะเป็นไปในลักษณะพาราโบลา (parabolic growth)..... 92
ภาพที่ 13	การไหลของความร้อนที่ไหลเข้าและออกจากบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ..... 93
ภาพที่ 14	การแบ่งพื้นที่บริเวณชิ้นงานกับแบบหล่อใกล้รอยต่อเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่พิจารณาการสะสมของพลังงานในวัสดุ..... 94
ภาพที่ 15	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่บริเวณต่างๆ ในฝั่งชิ้นงานและแบบหล่อที่วัดได้จากหัววัดคู่ความร้อน..... 95

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 16	การเปรียบเทียบแสดงการแปรผันกับเวลาของ (ก) ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) และ (ข) อุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อที่คำนวณได้จากฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก ฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ฟังก์ชันพหุนามกำลังสามและ error function..... 96
ภาพที่ 17	การแปรผันกับเวลาของค่าฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณได้จากฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก ฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ฟังก์ชันพหุนามกำลังสามและ error function..... 97
ภาพที่ 18	(ก) การประมาณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานด้วยการถดถอยเชิงเส้น (ข) การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนฝั่งแบบหล่อและชิ้นงานที่ได้จากการถดถอยเชิงเส้น..... 98
ภาพที่ 19	อุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อที่ได้จากการคำนวณโดยพิจารณาค่าความร้อนแฝงในวัสดุ..... 99
ภาพที่ 20	การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อที่คำนวณ โดยพิจารณาและไม่พิจารณาการสะสมของพลังงานในวัสดุ..... 100
ภาพที่ 21	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงาน อุณหภูมิพื้นผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อ ฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อกับเวลา..... 101
ภาพที่ 22	การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating หนา 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน..... 102
ภาพที่ 23	การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย graphite-based coating หนา 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน..... 103
ภาพที่ 24	การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมที่มีส่วนผสมทางเคมีต่างกับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating หนา 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ 1053 K..... 104

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 25	การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมที่มีส่วนผสมทางเคมีต่างกับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating หน้า 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิเทเหนื่ออุณหภูมิ liquidus ของอะลูมิเนียมแต่ละตัว 100 K.....	105
ภาพที่ 26	การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating และ graphite-based coating หน้า 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิเทเหนื่ออุณหภูมิ liquidus 50 K.....	106
ภาพที่ 27	การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating และ graphite-based coating หน้า 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิเทเหนื่ออุณหภูมิ liquidus 100 K.....	107
ภาพที่ 28	การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating และ graphite-based coating หน้า 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิเทเหนื่ออุณหภูมิ liquidus 150 K.....	108
ภาพที่ 29	การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating ที่ความหนาต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิเท 1053 K.....	109
ภาพที่ 30	การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย graphite-based coating ที่ความหนาต่างๆ กันอุณหภูมิเท 1053 K.....	110
ภาพที่ 31	ภาพจำลองการเย็นตัวของชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ในแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating หนาประมาณ 100 ไมโครเมตรที่อุณหภูมิเท 1053 K ด้วยคอมพิวเตอร์ที่เวลาต่างๆ กัน.....	111
ภาพที่ 32	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิที่คำนวณได้โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ลงสู่แบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating หนาประมาณ 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิเท 1053 K เป็นตัวแปรเบื้องต้น.....	112

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 33	ชั้นของสารเคลือบผิวแบบหล่อ (ความหนา 100 ไมโครเมตร)..... 113
ภาพที่ 34	ลักษณะของหัวกด vicker (ใช้ในการประมาณความหนาของเคลือบ)..... 114
ภาพที่ 35	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารเคลือบผิวแบบหล่อชนิดที่มีสมบัติเป็น นำความร้อน..... 115
ภาพที่ 36	ผลวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารเคลือบผิวแบบหล่อชนิดที่มีสมบัติเป็น ฉนวนความร้อน (white coating)..... 116



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของงานวิจัย

การหล่อเป็นกระบวนการขึ้นรูปโลหะที่สำคัญมากกระบวนการหนึ่งเนื่องจากการหล่อนั้นสามารถผลิตชิ้นงานโลหะที่มีรูปทรงซับซ้อนได้หลายรูปแบบ อีกทั้งยังเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างประหยัดในการผลิตชิ้นงานต้นแบบเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการขึ้นรูปอื่นๆ ความต้องการผลิตภัณฑ์โลหะในปัจจุบันยังคงอยู่ในระดับสูงและมีแนวโน้มสูงขึ้น ประกอบกับเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการหล่อก็มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทำให้ผลิตภัณฑ์โลหะประมาณ 90 %¹ ยังคงขึ้นรูปด้วยวิธีการนี้ เป็นที่ทราบกันดีว่าการจะได้ผลิตภัณฑ์หล่อโลหะที่มีคุณภาพดีนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการ อาทิ การออกแบบชิ้นงานและส่วนต่างๆของระบบงานหล่อ คุณภาพของน้ำโลหะและสถานะของการหล่อโลหะ เป็นต้น การออกแบบและผลิตงานหล่อที่มีคุณภาพสูงจะต้องคำนึงถึงสิ่งเหล่านี้เป็นหลัก ในสมัยก่อนการผลิตชิ้นงานหล่อที่มีคุณภาพสูงต้องอาศัยประสบการณ์ความชำนาญเฉพาะบุคคลในการออกแบบ แล้วจึงทดลองหล่อจริงเพื่อดูว่าระบบงานหล่อหรือสถานะนั้นๆ จะได้ผลดีหรือไม่ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สิ้นเปลืองทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายอีกทั้งให้ผลลัพธ์ที่ไม่แน่นอน อันที่จริงคุณภาพของผลิตภัณฑ์หล่อโลหะขึ้นอยู่กับลักษณะการเย็นตัวและแข็งตัวของน้ำโลหะภายในโพรงแบบเป็นหลัก การแข็งตัวของน้ำโลหะมีผลโดยตรงต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางกล และการเกิดข้อบกพร่องภายในชิ้นงานหล่อ เป็นต้น การทราบถึงปรากฏการณ์การแข็งตัวของน้ำโลหะจึงมีความสำคัญอย่างมากในการทำนายและวิเคราะห์ปัญหาต่างๆในกระบวนการหล่อ ปรากฏการณ์ที่มีความเกี่ยวข้องกับการแข็งตัวของโลหะโดยตรงก็คือการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ยังมีปรากฏการณ์อื่นๆ ได้แก่ การไหลตัวของน้ำโลหะ การเปลี่ยนสถานะและการเปลี่ยนเฟส การแผ่รังสีความร้อน การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดของชิ้นงานและแบบหล่อ การเกิดความเค้น เกิดขึ้นในแบบหล่อเช่นเดียวกัน ปรากฏการณ์ต่างๆเหล่านี้แม้ว่าจะสามารถอธิบายได้ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ แต่ในบางครั้ง สมการเหล่านั้นก็มีความซับซ้อนเกินกว่าความสามารถของมนุษย์ที่จะแก้ปัญหาททางคณิตศาสตร์ที่ยู่ยากเช่นนั้นได้ในเวลาที่จำกัด²⁻⁴

เนื่องด้วยเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาเป็นอย่างมากในช่วงสามทศวรรษที่ผ่านมา ดังนั้นคอมพิวเตอร์จึงเข้ามามีบทบาทในทุกสาขารวมถึงกระบวนการหล่อขึ้นรูปโลหะด้วย การนำคอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรม (Computer-Aided Engineering, CAE) มาใช้ในกระบวนการ

หล่อขึ้นรูปโลหะก็คือการนำคอมพิวเตอร์มาคำนวณหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ นั่นเอง นอกจากคอมพิวเตอร์จะสามารถแก้สมการที่ยุ่งยากซับซ้อนได้ในเวลาอันรวดเร็วแล้ว มันยังสามารถแสดงผลการคำนวณในรูปแบบสีและกราฟข้อมูลซึ่งทำให้วิศวกรสามารถวิเคราะห์และประเมินผลของการหล่อได้สะดวกยิ่งขึ้น โดยไม่ต้องทำการทดลองหล่อจริง อันยังประโยชน์ในการแก้ไขและป้องกันข้อบกพร่องต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการหล่อหลอมรวมทั้งการพัฒนาผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ๆ เป็นอย่างมาก

อย่างไรก็ตาม การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในงานวิศวกรรมการหล่อยังคงมีข้อจำกัดอยู่กล่าวคือ ความถูกต้องของข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณ หากข้อมูลเบื้องต้นไม่ถูกต้องผลการคำนวณก็จะมีคามผิดพลาดไปด้วย ข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม ประกอบด้วย (1) รูปทรงและมิติของระบบงานหล่อ (2) สมบัติทางกายภาพของวัสดุ (3) สภาวะเริ่มต้นและ (4) สภาวะขอบเขตของการหล่อ ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าการทำนายลักษณะการแข็งตัวของโลหะในโพรงแบบนั้นขึ้นกับการถ่ายเทความร้อนเป็นหลัก ข้อมูลเบื้องต้นที่มีความสำคัญมากตัวหนึ่งในการคำนวณปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนก็คือสภาวะขอบเขต เช่น ความดัน พื้นผิวสมมาตรบรรยากาศภายนอกและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อของวัสดุต่างๆ เป็นต้น แต่สภาวะขอบเขตตัวที่มีความสำคัญต่อการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานภายในแบบหล่อมากที่สุดก็คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ ถึงแม้ว่าค่าดังกล่าวจะมีอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์อยู่แล้วแต่ก็เป็นเพียงค่าคงที่โดยประมาณเท่านั้น อันที่จริงแล้วค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นกับปัจจัยหลายประการแตกต่างกันไปในแต่ละสภาวะการหล่อและไม่ใช่ค่าซึ่งคงที่ตลอดเวลา อีกทั้งยังไม่สามารถใช้เครื่องมือใดตรวจวัดโดยตรงจากการทดลองได้ การจะทราบถึงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจึงเป็นข้อมูลที่ได้จากการคำนวณเท่านั้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการประเมินการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับเวลา เพื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อที่คำนวณได้ไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นตัวหนึ่งสำหรับการคำนวณการถ่ายเทความร้อนและปรากฏการณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแข็งตัวของน้ำโลหะ รวมทั้งยังได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ อันจะยังประโยชน์ต่อการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของผลิตภัณฑ์หล่อโลหะในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อทราบถึงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อชนิดถาวรในรูปของค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
- 1.2.2 เพื่อเสนอแนวทางการศึกษาและคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อชนิดถาวร รวมทั้งประเมินความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้และประยุกต์ใช้กับการจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์
- 1.2.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ ได้แก่ (1) อุณหภูมิของน้ำโลหะ (2) ชนิดและส่วนผสมของโลหะที่นำมาหล่อ (3) ชนิดของสารเคลือบผิวแบบหล่อและ (4) ความหนาของสารเคลือบแบบหล่อ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมผสมกับแบบหล่อชนิดถาวรในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยสร้างแบบจำลองทางกายภาพอย่างง่ายขึ้นเพื่อจำลองการไหลของความร้อนผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ แบบจำลองดังกล่าวมีการควบคุมให้ชิ้นงานเกิดการเย็นตัวอย่างมีทิศทางด้วยน้ำหล่อเย็นโลหะที่นำมาหล่อคือโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอน 3 เกรดด้วยกัน คือ A356 A380 และ A390 วัสดุที่ใช้เป็นแบบหล่อชนิดถาวรเป็นเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด H13 จากนั้นทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้งในชิ้นงานและแบบหล่อภายหลังที่เทโลหะหลอมเหลวลงสู่โพรงแบบ ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อภายใต้สมมติฐานที่ว่า การเย็นตัวของชิ้นงานในโพรงแบบเกิดขึ้นในทิศทางเดียวและสมบัติทางกายภาพของวัสดุไม่แปรตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่ออีก 4 ปัจจัยด้วยกัน อันได้แก่ (1) อุณหภูมิของน้ำโลหะ (2) ส่วนผสมของโลหะที่นำมาหล่อ (3) ชนิดของสารเคลือบผิวและ (4) ความหนาของสารเคลือบผิวแบบหล่อ การประเมินความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะทำโดยเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จากการทดลองกับอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่หาได้เป็นตัวแปรต้นว่ามีความสอดคล้องใกล้เคียงกันหรือไม่เพียงใด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงลักษณะการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
- 1.4.2 ทราบถึงแนวทางการศึกษา การตรวจวัดและประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ
- 1.4.3 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ได้แก่ (1) อุณหภูมิเทน้ำโลหะ (2) ชนิดของโลหะที่นำมาหล่อ (3) ชนิดของสารเคลือบผิวแบบหล่อและ(4) ความหนาของสารเคลือบผิวแบบหล่อที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ
- 1.4.4 นำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นฐานข้อมูลในการจำลองกระบวนการหล่อขึ้นรูปด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อปรับปรุงและพัฒนางานทางด้านวิศวกรรมการหล่อโลหะ
- 1.4.5 เผยแพร่ข้อมูลไปสู่ภาคการผลิตและผู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นประโยชน์ด้านวิชาการและด้านอุตสาหกรรมต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ปรีทรรศน์วรรณกรรม

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลไกด้วยกันคือ (1) การนำความร้อน (2) การแผ่รังสีความร้อนและ (3) การพาความร้อน

การนำความร้อน (conduction) เป็นปรากฏการณ์การส่งผ่านความร้อนจากการเคลื่อนที่ของโมเลกุลในตัวกลางที่อยู่นิ่งหรือตัวกลางที่มีผิวสัมผัสอยู่ติดกัน ทฤษฎีการนำความร้อนสามารถแสดงโดยกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ดังสมการ

$$q_x = -k \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

เมื่อ q_x = ฟลักซ์ความร้อนในทิศทาง x

$\left(\frac{dT}{dx} \right)$ = ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของ 2 บริเวณในทิศทาง x

k = ค่าการนำความร้อนของวัสดุ

ฟลักซ์ความร้อนจะแปรผันตามความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างสองบริเวณและค่าการนำความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน (radiation) เป็นการปลดปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางหรือบรรยากาศ รูปสมการการแผ่รังสีความร้อนจะแตกต่างจากการนำความร้อนโดยสิ้นเชิง กล่าวคือฟลักซ์พลังงานหรือ emissive power แปรผันตามอุณหภูมิสัมบูรณ์ยกกำลังสี่ ดังสมการ

$$e = \epsilon \sigma T^4 \quad \text{สมการที่ 2.2}$$

เมื่อ e = ฟลักซ์ของการแผ่รังสี

σ = ค่าคงที่ Stefan Boltzmann มีค่าเท่ากับ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

ϵ = ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัสดุที่แผ่รังสีนั้น

ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของพื้นผิวใดๆที่จะปล่อยพลังงานออกมาเทียบกับวัสดุในอุดมคติ (วัตถุดำ) มีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 ขึ้นกับชนิดของวัสดุ

การพาความร้อน (convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวของวัสดุผ่านไปยังของไหลหรือตัวกลางที่มีการเคลื่อนที่รอบพื้นผิวดังกล่าว การคำนวณพลັกซ์การพาความร้อนสามารถกระทำได้หากทราบสภาพการพาความร้อน แต่สภาพการพาความร้อนไม่สามารถตรวจวัดได้โดยตรง ดังนั้นจึงได้มีการนิยามพลังงานความร้อนที่ของแข็งส่งผ่านไปยังของไหลต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยอุณหภูมิว่า “ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน” (heat transfer coefficient) สมการที่ใช้คือ

$$q_s = h(T_s - T_f) \quad \text{สมการที่ 2.3}$$

เมื่อ q_s = พลັกซ์ความร้อนบริเวณผนังพื้นผิว

h = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

T_s และ T_f = อุณหภูมิของพื้นผิววัสดุและของไหล ตามลำดับ

ในทางปฏิบัติการถ่ายเทความร้อนทั้ง 3 รูปแบบมักเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน การแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนจะใช้สมการสมดุลทางความร้อน (heat balance) จากกฎข้อที่หนึ่งทางเทอร์โมไดนามิกส์โดยพิจารณาระบบที่มีปริมาตรที่แน่นอน (control volume) และความร้อนสามารถไหลผ่านไปมาได้ ที่เวลาขณะใดๆ “อัตราการถ่ายเทพลังงานทางความร้อนและ/หรือทางกลที่เข้าสู่ระบบรวมกับอัตราการถ่ายเทพลังงานที่เกิดขึ้นภายในระบบลบด้วยอัตราการถ่ายเทพลังงานทางความร้อนและ/หรือทางกลที่ไหลออกจากระบบนั้นจะมีค่าเท่ากับอัตราการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่สะสมอยู่ในระบบนั้น”⁶ สมการทั่วไปที่ใช้แสดงความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_g - \dot{Q}_{out} = \frac{dQ_{st}}{dt} = \dot{Q}_{st} \quad \text{สมการที่ 2.4}$$

เมื่อ \dot{Q}_{in} = อัตราการไหลเข้าของพลังงานความร้อนเข้าสู่ระบบ

\dot{Q}_{out} = อัตราการไหลออกของพลังงานความร้อนออกจากระบบ

\dot{Q}_g = อัตราการเปลี่ยนรูปหรือเกิดขึ้นของพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบ (ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตร)

\dot{Q}_{st} = อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่สะสมอยู่ในระบบ

การพิจารณาการถ่ายเทความร้อนข้างต้นยังอาจประยุกต์ใช้ในกรณีที่ระบบเป็นพื้นผิวที่มีขนาดแน่นอน (control surface) ได้ แต่แตกต่างจากในกรณีการถ่ายเทความร้อนในระบบที่ควบคุม

ปริมาณแน่นอนตรงที่ไม่พิจารณาอัตราการเปลี่ยนรูปหรือที่เกิดขึ้นเองและการสะสมของพลังงานภายในระบบ แม้ว่าพลังงานดังกล่าวอาจมีสะสมในตัวกลางก็ตามดังสมการ

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = 0 \quad \text{สมการที่ 2.5}$$

ในระบบงานหล่อ การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นทั้ง 3 รูปแบบเสมอกล่าวคือการนำความร้อนผ่านตัวกลาง (เช่น โลหะที่แข็งตัวแล้ว แบบหล่อ) คู่พื้นผิว จากนั้นเกิดการพาความร้อนจากพื้นผิวสู่ของไหลและเกิดการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิว (เช่น ผนังแบบหล่อด้านนอก) ไปยังสู่บรรยากาศรอบๆ สมการสมดุลพลังงานที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวในรูปของฟลักซ์ความร้อนได้ดังนี้

$$q_{conduction} - q_{convection} - q_{radiation} = 0 \quad \text{สมการที่ 2.6}$$

2.2 ลักษณะทั่วไปและความสำคัญของกระบวนการหล่อขึ้นรูปโลหะโดยใช้แบบหล่อชนิดถาวร^{1,7}

กระบวนการหล่อโดยใช้แบบหล่อชนิดถาวรเป็นกระบวนการหล่อขึ้นรูปที่ใช้แบบหล่อที่ทำจากกราฟไฟอย่างแข็งหรือโลหะจำพวกเหล็กกล้าเครื่องมือและเหล็กหล่อ แบบหล่อชนิดถาวรประกอบด้วยชิ้นส่วนตั้งแต่ 2 ชิ้นขึ้นไป ส่วนของไส้แบบเป็นทรายหรือปูนปลาสเตอร์ดังภาพที่ 1 โลหะที่นำมาหล่อในแบบหล่อชนิดนี้มีหลายชนิด เช่น โลหะผสมอะลูมิเนียม โลหะผสมแมกนีเซียม โลหะผสมสังกะสี และโลหะผสมทองแดง เป็นต้น กระบวนการหล่อแบบนี้เหมาะกับการผลิตชิ้นงานลักษณะเดียวกันในปริมาณมาก เมื่อเปรียบเทียบกระบวนการหล่อในแบบหล่อชนิดถาวรกับกระบวนการหล่อในแบบทราย พบว่าการหล่อในแบบหล่อชนิดถาวรมีข้อได้เปรียบหลายประการ เช่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีรูปทรงและมิติใกล้เคียงกัน สามารถผลิตชิ้นงานในปริมาณมากๆ โอกาสการเกิดข้อบกพร่องเนื่องจากความชื้นต่ำมาก ผิวของชิ้นงานหล่อค่อนข้างเรียบและชิ้นงานมีความแน่นตัว (soundness) สูง ส่งผลให้ชิ้นงานหล่อมีสมบัติทางกลที่ดีกว่า แบบหล่อมีความทนทานใช้งานได้มากกว่า 100,000 ครั้ง อีกทั้งยังสามารถควบคุมอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานได้ด้วยการหล่อเย็นซึ่งส่งผลให้อัตราการผลิตสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่หล่อในแบบหล่อชนิดถาวรส่วนใหญ่เป็นชิ้นส่วนยานยนต์ เครื่องจักรกล เครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์ทางทะเล อาทิ ห้องเครื่องยนต์ ลูกปืน ครอบสูบ ลูกสูบลูกสูบ มือเตอร์ หัวเชื่อม ฯลฯ

โดยทั่วไปก่อนทำการเติมน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบนั้นจะมีการใช้สารเคลือบผิวเคลือบบนผนังด้านในแบบหล่อซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำโลหะเสียก่อน สารเคลือบผิวจะเป็นตัวยืดอายุการใช้งานของแบบหล่อโดยป้องกันความเสียหายต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้น เช่น การแข็งตัวหรือการเชื่อมติดของ

ขึ้นงานกับผนังแบบหล่อ การเปลี่ยนรูปร่างกะทันหันของแบบหล่อเนื่องจากความร้อน นอกจากนี้ยังใช้เป็นตัวควบคุมอัตราและทิศทางการยื่นตัวของชิ้นงานในบางบริเวณได้อีกด้วย ความหนาของเคลือบจะแตกต่างกันตามบริเวณส่วนที่เป็นปากกรู รู ล้น และทางเดินน้ำโลหะมักเคลือบด้วยสารเคลือบที่เป็นฉนวนให้หนาไว้เพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน การเคลือบผิวโดยมากจะทำการผสมเคลือบกับน้ำให้สฟอที่จะทำการสเปรย์หรืออาจทาด้วยแปรงก็ได้ จากนั้นทำการติดตั้งส่วนประกอบของแบบหล่อ เช่น ไม้แบบ และประกอบแบบหล่อให้เรียบร้อยก่อนเทหรือใช้ความดันป้อนน้ำโลหะเข้าสู่แบบหล่อ ทิ้งให้เย็นตัวแล้วแกะชิ้นงานออก ทำความสะอาดผิวแบบหล่อก่อนเคลือบผิวด้วยสารเคลือบผิวอีกครั้ง ทำซ้ำเช่นนี้เรื่อยไป สารเคลือบผิวแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดโดยใช้สมบัติทางความร้อนของสารเคลือบผิวเป็นเกณฑ์ คือ (1) สารเคลือบผิวที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนประกอบด้วยวัสดุจำพวกเซรามิกส์ เช่น ดินขาว ไวต์ติ้ง (whiting) ผสมโซเดียมซิลิเกตและน้ำ และ (2) สารเคลือบผิวที่มีสมบัตินำความร้อน ซึ่งมักมีวัสดุที่นำความร้อนได้ดี เช่น กราไฟต์ เป็นส่วนผสมหลัก สารเคลือบผิวชนิดนี้บางครั้งอาจมีสมบัติเป็นตัวหล่อลื่นด้วย

กระบวนการหล่อโดยใช้แบบหล่อชนิดถาวรสามารถแบ่งออกได้หลายชนิดโดยอาศัยวิธีการป้อนน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบเป็นเกณฑ์ เช่น การหล่อโดยใช้แรงโน้มถ่วง การหล่อโดยใช้ความดัน การหล่อโดยใช้แรงเหวี่ยง การหล่อโดยใช้การเอียง การหล่อแบบต่อเนื่อง เป็นต้น

2.3 ปრაกฏการณ์ถ่ายเทความร้อนในระบบงานหล่อ

กระบวนการหล่อขึ้นรูปโลหะเป็นกระบวนการที่ต้องทำให้โลหะกลายเป็นของเหลวด้วยความร้อนและเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบหล่อ อุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวแตกต่างจากแบบหล่ออย่างมากความร้อนจึงถ่ายเทจากโลหะหลอมเหลวไปยังบริเวณแบบหล่อที่อุณหภูมิต่ำกว่า การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นการเย็นตัวและการแข็งตัวของชิ้นงาน การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง โครงสร้างจุลภาค การเกิดความเค้นที่ส่วนต่างๆ ล้วนมีความเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนแทบทั้งสิ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากบริเวณต่างๆ ทั้งในชิ้นงานและแบบหล่อภายหลังการเทโลหะหลอมเหลวสู่โพรงแบบแสดงดังภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องจากโลหะหลอมเหลวออกไปยังบรรยากาศรอบนอก หากกำหนดให้บริเวณต่างๆเหล่านี้เป็นตัวต้านทานการไหลตัวของความร้อน พบว่าความต้านทานที่เกิดขึ้นในแบบหล่อแบ่งเป็น 5 บริเวณ⁸ ได้แก่

1. ความต้านทานจากโลหะหลอมเหลว
2. ความต้านทานจากชั้นของโลหะที่แข็งตัวแล้ว
3. ความต้านทานบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นของโลหะที่แข็งตัวกับแบบหล่อ

4. ความต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่เป็นแบบหล่อ
5. ความต้านทานบริเวณรอยต่อผนังภายนอกแบบหล่อกับบรรยากาศ

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในส่วนต่างๆ พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในโลหะหลอมเหลวเองนั้นค่อนข้างน้อยและมีค่าไม่แน่นอน ทั้งนี้เป็นเพราะการไหลวนของกระแสไฟฟ้าโลหะภายหลังการเทลงสู่โพรงแบบ แต่น้ำโลหะส่วนที่อยู่ใกล้กับผิวของแบบหล่อจะมีอุณหภูมิลดลง ส่วนของโลหะหลอมเหลวที่สัมผัสกับผิวของแบบหล่อจะกลายเป็นชั้นผิวแข็งและหนาขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งชั้นผิวของโลหะที่แข็งตัวแล้วนี้เองจะกลายเป็นตัวต้านการไหลตัวของความร้อนจากโลหะหลอมเหลวสู่ผนังแบบหล่อ ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่ออุณหภูมิจะลดลงอย่างชัดเจน และยังคงลดลงต่อเนื่องจากผิวของแบบหล่อที่สัมผัสกับชิ้นงานจนถึงผนังแบบหล่อด้านนอกและบรรยากาศตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนในระบบงานหล่อที่มีผลต่ออัตราการแข็งตัวและการแข็งตัวของชิ้นงาน โดยตรงมีเพียง 3 บริเวณเท่านั้น ได้แก่ (1) ความต้านทานที่เกิดจากชั้นของโลหะที่แข็งตัวแล้ว (2) ความต้านทานบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ และ (3) ความต้านทานในเนื้อวัสดุแบบหล่อ

การถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นผิวโลหะที่แข็งตัวแล้วเป็นกลไก “การนำความร้อน” อัตราการไหลของความร้อนผ่านความต้านทานบริเวณชั้นผิวโลหะที่แข็งตัวแล้วสามารถอธิบายได้จากสมการการกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ ดังสมการ

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

เมื่อ α_s = ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานในเฟสของแข็ง
 T = อุณหภูมิ
 t = เวลา
 x = ตำแหน่งใดๆ ในทิศทาง x

หากกำหนดสภาวะขอบเขต $x = 0$ เมื่อ $T = T_o$ และ $x = S$ เมื่อ $T = T_M$ แทนลงในสมการข้างต้น ประกอบกับอัตราการคายความร้อนและการนำความร้อนที่ส่วนหน้าของการแข็งตัวมีค่าเท่ากัน จะได้ว่า

$$\Delta H_f \rho_s \left(\frac{\partial S}{\partial t} \right) = k_s \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=S} \quad \text{สมการที่ 2.8}$$

แก้สมการที่ 2.7 และ 2.8 จะได้ว่า

$$S = 2\gamma\sqrt{\alpha_s t} \quad \text{สมการที่ 2.9}$$

เมื่อ $\gamma e^{\gamma^2} \operatorname{erf}(\gamma) = (T_M - T_o) \frac{C_s}{\Delta H_f \sqrt{\pi}}$ กรณีแบบหล่อที่มีการหล่อเย็น สมการที่ 2.10

$$\gamma e^{\gamma^2} \left(\frac{\sqrt{k_s \rho_s C_s}}{k_m \rho_m C_m} + \operatorname{erf}(\gamma) \right) = (T_M - T_o) \frac{C_s}{\Delta H_f \sqrt{\pi}}$$

กรณีแบบหล่อที่ไม่มีการหล่อเย็น สมการที่ 2.11

จากสมการที่ 2.9 การเกิดชั้นผิวแข็งแปรผันตรงกับรากที่สองของเวลา ซึ่งอาจเขียนสมการข้างต้นได้อีกรูปแบบหนึ่ง

$$S = A\sqrt{t} - B \quad \text{สมการที่ 2.12}$$

เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุและสภาวะของการหล่อ

สำหรับบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อนั้นการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นด้วยกลไก “การพาความร้อน” ผ่านรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ หากพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในทิศทางเดียวและสมมติให้แบบหล่อมีความหนามากพอ อุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวเท่ากับ T_M และอุณหภูมิเริ่มต้นของแบบหล่อเท่ากับ T_o จะพบว่าที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ อัตราการปลดปล่อยพลังงานระหว่างเกิดการแข็งตัวของโลหะหลอมเหลวมีค่าเท่ากับอัตราการพาความร้อน

$$\rho_s \Delta H_f \left(\frac{\partial S}{\partial t} \right) = h(T_c^S - T_m^S) = h(T_M - T_o) \quad \text{สมการที่ 2.13}$$

เมื่อ $T_c^S =$ อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสฝั่งชิ้นงาน

$T_m^S =$ อุณหภูมิที่ผิวสัมผัสฝั่งแบบหล่อ

อินทิเกรตจาก $S = 0$ และ $t = 0$ จะได้ว่า

$$S = \frac{h(T_M - T_o)}{\rho_s \Delta H_f} \cdot t \quad \text{สมการที่ 2.14}$$

จากสมการที่ 2.14 จะเห็นว่าความหนาของชั้นผิวโลหะที่แข็งตัวแล้วแปรผันตรงกับเวลา นอกจากนี้ตัวแปรอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อการแข็งตัวของโลหะก็คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ (h)

ความต้านทานในเนื้อวัสดุที่เป็นแบบหล่อมีผลในกรณีที่แบบหล่อทำจากวัสดุที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน เช่น ทราย “การนำความร้อน” จะเป็นไปได้ยากเนื่องจากค่าการนำความร้อนของวัสดุมีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานสู่แบบหล่อในทิศทางเดียว สมมติให้แบบหล่อมีความหนา δ และอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวเท่ากับ T_M และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเป็น T_o เช่นเดียวกับสองกรณีแรก การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ จะคล้ายกับสมการที่ 2.7

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_m \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad \text{สมการที่ 2.15}$$

α_m = ค่าการนำความร้อนของแบบหล่อ

เมื่อทำให้อยู่ในรูปของ analytical solution จะได้ว่า

$$\frac{T - T_o}{T_M - T_o} = \text{erf} \left(\frac{-x}{2\sqrt{\alpha_m t}} \right) \quad \text{สมการที่ 2.16}$$

หากอัตราการคายความร้อนของชิ้นงานผ่านผิวสัมผัสจะมีค่าเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่แบบหล่อ จะได้ว่า

$$\Delta H_f \rho_s \left(\frac{\partial S}{\partial t} \right) = k_m \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} \quad \text{สมการที่ 2.17}$$

ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของ 2 บริเวณในแบบหล่อได้จากอนุพันธ์ของสมการที่ 2.16 เทียบกับเวลาและแทนลงในสมการที่ 2.17

$$\rho_s \Delta H_f \left(\frac{\partial S}{\partial t} \right) = \sqrt{\frac{k_m \rho_m C_m}{\pi}} (T_M - T_o) \quad \text{สมการที่ 2.18}$$

จะได้ว่า

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{T_M - T_o}{\rho_s \Delta H_f} \right) \cdot \sqrt{k_m \rho_m C_m} \cdot \sqrt{t} \quad \text{สมการที่ 2.19}$$

จากสมการ 2.19 แสดงให้เห็นว่าความหนาของชั้นผิวแข็งแปรผันกับรากที่สองเช่นเดียวกับในกรณีความต้านทานที่เกิดจากชั้นผิวแข็งของโลหะ

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าจะเห็นได้ว่าอัตราการเย็นตัวและการแข็งตัวของชิ้นงานแปรผันตามเวลา การพิจารณาว่าบริเวณใดเป็นบริเวณที่ควบคุมอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานทั้งหมดสามารถตัดสินใจได้จากเงื่อนไขดังต่อไปนี้

- (1) ความต้านทานบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อเป็นตัวกำหนดอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานก็ต่อเมื่อ $h \ll \frac{k_s}{S}$
- (2) ความต้านทานของแบบหล่อเป็นตัวกำหนดอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานก็ต่อเมื่อ $h^2 \ll \frac{k_m \rho_m C_m}{t}$

การใช้เงื่อนไขข้างต้นเพื่ออธิบายปัจจัยที่ควบคุมการเย็นตัวของชิ้นงานจำเป็นต้องอาศัย “ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ” ด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป

จากสมการ 2.10, 2.11, 2.14 และ 2.19 จะเห็นว่าสมบัติของวัสดุที่เป็นแบบหล่อเป็นสิ่งสำคัญมากปัจจัยหนึ่งที่กำหนดการถ่ายเทความร้อนและการเย็นตัวของชิ้นงาน ภาพที่ 3 แสดงลักษณะการถ่ายเทความร้อนในแบบหล่อต่างชนิดกัน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแบบหล่อทรายเกิดขึ้นได้ช้าเนื่องจากทรายมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน ความแตกต่างของอุณหภูมิจากบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล้อมีน้อยมากเมื่อเทียบกับเนื้อวัสดุที่เป็นแบบหล่อ การไหลของความร้อนจากชิ้นงานไปสู่ในแบบหล่อทรายจึงถูกกำหนดด้วยสมบัติทางความร้อนของทรายเอง ในขณะที่อุณหภูมิบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อจะลดลงอย่างรวดเร็วในแบบหล่อชนิดถาวรซึ่งมีการนำความร้อนได้ดี ทั้งนี้เพราะที่บริเวณดังกล่าวมีความต้านทานการไหลของความร้อนอยู่ ดังนั้นในกรณีที่แบบหล่อเป็นแบบหล่อเป็นโลหะหรือแบบหล่อชนิดถาวร ปัจจัยที่ควบคุมการเย็นตัวของชิ้นงานคือความต้านทานบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อนั่นเอง

2.4 การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อในแบบหล่อชนิดถาวร

หลังจากที่เทโลหะหลอมเหลวสู่โพรงแบบหล่อ โลหะหลอมเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวแบบหล่อและเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้น แต่เนื่องจากในความเป็นจริงพื้นผิวของแบบหล่อไม่เรียบสนิท การที่โลหะหลอมเหลวจะแนบสนิทไปกับผิวแบบหล่อจึงเป็นไปได้ยาก ผิวสัมผัสระหว่างโลหะหลอมเหลวกับแบบหล่อจะเกิดขึ้นเฉพาะบางบริเวณเท่านั้นขึ้นกับความขรุขระของพื้นผิวแบบหล่อ ส่วนของผิวแบบที่ลู่ยื่นออกมาจะสัมผัสกับโลหะหลอมเหลวได้ดีในขณะที่พื้นผิวแบบหล่อส่วนที่

อยู่ต่ำกว่าโลหะหลอมเหลวจะแทรกตัวเข้าไปไม่ถึงกลายเป็นที่ว่างแทรกอยู่ระหว่างโลหะชิ้นงานกับแบบหล่อ ด้วยเหตุนี้ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นไม่เท่ากัน บริเวณที่ผิวสัมผัสสนิทย่อมมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าและการแข็งตัวจะเริ่มต้นในบริเวณผิวสัมผัสนั้นดังภาพที่ 4(ก) เมื่อเวลาผ่านไปโลหะหลอมเหลวกลายเป็นของแข็งมากขึ้น บริเวณที่เกิดการแข็งตัวก่อนจะดึงรั้งส่วนที่ยังเป็นของเหลวรอบๆ ตัวมันเข้ามาทำให้โลหะหลอมเหลวส่วนนั้นไม่อยู่ชิดกับผิวแบบ นอกจากนี้เมื่อส่วนที่แข็งตัวมีความหนาพอจะเกิดการหดตัวและเคลื่อนออกจากผิวแบบหล่อ อีกทั้งความร้อนจากโลหะหลอมเหลวยังทำให้ผิวของแบบหล่อเกิดการเปลี่ยนแปลงและแบบหล่อเกิดการขยายตัว เหตุการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นเหล่านี้ส่งผลให้การสัมผัสกันระหว่างโลหะกับแบบหล่อลดลงกลายเป็น “ช่องว่าง” ดังภาพที่ 4(ข) ช่องว่างนี้เป็นอุปสรรคต่อการไหลของความร้อนตลอดจนการเย็นตัวของชิ้นงานภายในแบบหล่อชนิดถาวรเป็นอย่างมาก^{8,10} ดังนั้นการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนจึงต้องคำนึงช่องว่างที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อนี้เข้าไปด้วย ซึ่งสามารถประเมินได้ในรูปของค่าฟลักซ์ความร้อนและ/หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อโดยรวมประกอบด้วย 3 ส่วน¹⁰ ดังนี้ คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อนผ่านจุดสัมผัสระหว่างโลหะชิ้นงานกับผิวแบบหล่อ (h_s) สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อนผ่านช่องว่างอากาศบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ (h_g) และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนผ่านช่องว่างอากาศ (h_r) ดังสมการ

$$h = h_s + h_g + h_r \quad \text{สมการที่ 2.20}$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อนผ่านจุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อได้จากการพิจารณาการไหลของความร้อนจากชิ้นงานไปยังแบบหล่อผ่านจุดสัมผัสของวัสดุทั้งสองชนิด การส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนผ่านจุดสัมผัสอาจทำได้โดยทำให้ชิ้นงานในสถานะของเหลวสัมผัสกับผิวของแบบหล่อได้ยาวนานที่สุด การให้ความดันในขณะที่เติมเต็มน้ำโลหะเข้าสู่แบบหล่อเป็นการเพิ่มความดันที่จุดสัมผัสระหว่างโลหะชิ้นงานกับแบบหล่อบริเวณรอยต่อ (interfacial contact pressure) ให้สูงขึ้นและส่งผลให้ความร้อนไหลผ่านจุดสัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสองได้มากขึ้น สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อนบริเวณจุดสัมผัสที่สถานะคงตัว

$$h_s \propto \frac{\bar{k}}{c} \left(\frac{P}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{สมการที่ 2.21}$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h บริเวณนี้แปรผันโดยตรงกับ “ P ” ซึ่งก็คือความดันที่จุดสัมผัสบริเวณรอยต่อนั่นเอง นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนดังกล่าวยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ด้วย เช่น ความเรียบของผิวแบบห่อ (c คือ wavelength of surface roughness) และค่าการนำความร้อนเฉลี่ยบริเวณพื้นผิวสัมผัส (\bar{k}) ด้วย ส่วนค่า proportional constant เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับรูปทรงและมิติของชิ้นงานและแบบห่อด้วย

ในการพิจารณาการนำความร้อนผ่านช่องว่างอากาศอาจมองได้ว่าช่องว่างนั้นเป็นวัสดุตัวหนึ่ง (อากาศ) ที่อยู่ตรงกลางระหว่างชิ้นงานกับแบบห่อโดยที่ผิวของแบบห่อและชิ้นงานมีความเรียบและอยู่ขนานกัน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อนผ่านช่องว่างอากาศแสดงดังสมการ

$$h_g = \frac{k_g}{x_g} \quad \text{สมการที่ 2.22}$$

เมื่อ x_g และ k_g เป็นความกว้างและค่าการนำความร้อนของอากาศที่อยู่ในช่องว่างตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านช่องว่างอากาศแปรผกผันกับความกว้างของช่องว่าง แต่ถ้าช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับ mean free path ของก๊าซในช่องว่าง และผิวสัมผัสมีความเรียบมากและมีความดันจากภายนอกกระทำต่อชิ้นงาน กรณีดังกล่าวจำเป็นต้องพิจารณาผลของ free molecular conduction ด้วยซึ่ง free molecular conduction นี้จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างเช่น ได้จัดดังสมการ

$$h_g = \frac{k_g}{(x_g + g_1 + g_2)} \quad \text{สมการที่ 2.23}$$

เมื่อ g คือ temperature jump distance ของพื้นผิวทั้งสองฝั่ง (วัสดุชนิดที่ 1 และ 2) ของรอยต่อ

การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีผ่านช่องว่างอากาศคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสี

$$h_r = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1} \quad \text{สมการที่ 2.24}$$

จากการศึกษาพบว่า การถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อนผ่านจุดสัมผัสระหว่างโลหะกับผิวแบบห่อมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนตรงเท่าที่ผิวชิ้นงานสัมผัสกับแบบห่อ ส่วนค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนมีผลต่อสัมประสิทธิ์ที่รอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อโดยรวมน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ เพราะค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีมีค่าเพียงประมาณ 1% ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการนำความร้อนผ่านช่องว่างเท่านั้น ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อโดยรวมจึงขึ้นอยู่กับ การนำความร้อน ณ จุดสัมผัสของชิ้นงานกับแบบหล่อและการนำความร้อนผ่านช่องว่างอากาศเป็นส่วนใหญ่

2.5 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อในแบบหล่อชนิดถาวร

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อเริ่มมีขึ้นประมาณทศวรรษที่ 70 การถ่ายเทความร้อนบริเวณดังกล่าวสามารถพิจารณาได้ทั้งในรูปของค่าพลັกซ์ความร้อน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนหรือความต้านทานการไหลของความร้อนที่รอยต่อก็ได้ สำหรับการศึกษาค่าการถ่ายเทความร้อนโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอนด้วยกัน ขั้นตอนแรกเป็นการสร้างแบบจำลองทางกายภาพ (physical model) เพื่อจำลองปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะชิ้นงานกับแบบหล่อขณะที่ชิ้นงานเกิดการเย็นตัว การสร้างแบบจำลองทางกายภาพมักเป็นรูปทรงอย่างง่าย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกิดขึ้นตลอดจนการควบคุมตัวแปรต่างๆ ในระบบเป็นไปอย่างสะดวกยิ่งขึ้น ลักษณะของแบบจำลองทางกายภาพที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมของการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อมีหลายลักษณะ เช่น การเทโลหะหลอมเหลวลงสู่โพรงแบบ¹¹⁻¹² การจุ่มวัสดุที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกับแบบหล่อลงสู่อ่างโลหะหลอมเหลว¹⁵⁻¹⁶ การหยดโลหะหลอมเหลวลงบนผิววัสดุ ฯลฯ จากนั้นจึงตรวจวัดและบันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในชิ้นงานกับแบบหล่อด้วยหัววัดคู่ความร้อน การวัดระยะเคลื่อนที่ของชิ้นงานและแบบหล่อเพื่อประเมินความกว้างของช่องว่างบริเวณรอยต่อที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวด้วยทรานสดิวเซอร์^{10,13} เป็นต้น ขั้นตอนที่สองเป็นการนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากการทดลองมาใช้ร่วมกับตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพของวัสดุชิ้นงานและแบบหล่อ สภาวะเบื้องต้นและมิติของระบบเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบต่างๆ อาทิ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method) ไฟไนต์อีเลเมนต์ (Finite Element Method) และ Boundary Element Method ในการแก้สมการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนและปรากฏการณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในช่วงแรกจะมุ่งเน้นไปในด้านความสัมพันธ์ระหว่างการถ่ายเทความร้อนที่มีต่อลักษณะการแข็งตัวและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน โครงสร้างจุลภาคบริเวณของชิ้นงานที่สัมผัสกับรอยต่อจะมีความละเอียดกว่าโครงสร้างจุลภาคส่วนอื่นๆ โครงสร้างบริเวณดังกล่าวเรียกว่า chilled structure ลักษณะโครงสร้างจุลภาคเช่นนี้ น่าจะมีความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานด้วย การศึกษาอัตราการไหลของความร้อนมักใช้สมมติฐานง่ายๆ เช่น ความต้านทานบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อเป็นศูนย์ ($h = \infty$) อันที่จริงสมมติฐานนี้ไม่สอดคล้องกับการแข็งตัวของชิ้นงานภายในแบบหล่อที่เป็นโลหะเนื่องจากการเย็นตัวและการแข็งตัวของชิ้นงานในแบบหล่อชนิดถาวรนั้นขึ้นกับความต้านทานการบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อเป็นหลัก

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประเมินสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อในช่วงแรกๆ เริ่มขึ้นในราวปี 1970 M. Prate และ H. Biloni¹² ได้ทำการประยุกต์แบบจำลองการไหลตัวอย่างง่าย (metal fluidity test) ของ Flemings เพื่อประเมินการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ รวมทั้งศึกษาผลของการถ่ายเทความร้อนที่มีต่อความหนาแน่นของการเกิดเดนไดรต์ในช่วงต้นของการแข็งตัว (predendritic nuclei per unit area) ในโลหะผสมอะลูมิเนียมทองแดง สมมติฐานในการทดลองนี้ยังควบคุมให้ตัวแปรต่างๆ อย่างง่าย เพื่อให้การคำนวณสะดวกขึ้น อาทิ ผนังของแบบจำลองการไหลตัวมีความหนาเพียงพอที่จะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบ semi-infinite ทางไหลของโลหะหลอมเหลวมีขนาดเล็มากจนความแตกต่างระหว่างโลหะส่วนที่ยังคงเป็นของเหลวอยู่กับส่วนที่แข็งตัวแล้วสามารถละทิ้งได้ และอัตราการไหลตัวเฉลี่ยมีค่าคงที่จนสิ้นสุดการไหลตัวรวมทั้งสมบัติทางกายภาพของวัสดุไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากการวิจัยนี้จะอยู่ในรูปของค่าคงที่ในช่วง $1000-10000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ ขึ้นกับสภาวะการหล่อที่แตกต่างกัน ในช่วงเวลาเดียวกันได้มีการศึกษาว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสัมพันธ์กับเวลาหรือไม่ นักวิจัยหลายท่านได้ตั้งสมมติฐานว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไม่น่าจะเป็นค่าคงที่ตลอด เพราะหลังจากที่โลหะหลอมเหลวถูกเทลงสู่แบบหล่อและเกิดการเย็นตัวนั้นมีความเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นตลอดเวลาทั้งในชิ้นงานและแบบหล่อ ไม่เพียงแต่อุณหภูมิเท่านั้นแต่รวมไปถึงการขยายตัวและหดตัวของวัสดุเนื่องจากความร้อนอีกด้วย จากงานวิจัยหลายชิ้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้นั้นมีค่าแปรตามเวลาโดยจะมีค่าสูงในช่วงแรกจนถึงค่าสูงสุดและลดลงในเวลาต่อมา แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามเวลานั้นไม่ใช่ว่าจะเป็นในลักษณะนี้เสมอไป ดังตัวอย่างงานวิจัยชิ้นหนึ่งที่จุ่มแท่งโลหะลงในอ่างโลหะหลอมเหลวและตรวจวัดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแท่งโลหะซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแปรผันตามเวลาที่เพิ่มขึ้นใน

ลักษณะเป็นเส้นตรง อย่างไรก็ตาม การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเหล่านี้ยังอาศัยคณิตศาสตร์อย่างง่าย ๆ ไม่สลับซับซ้อนมากนัก

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่นิยมใช้กันมากมี 2 วิธีได้แก่ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (FDM) และไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM) ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขทั้งสองแบบนี้เป็นวิธีที่ใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนและปรากฏการณ์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องได้ดีเนื่องจากสามารถคำนวณปัญหาที่มีตัวแปรเป็นค่าไม่คงที่แต่ขึ้นกับเวลาหรืออุณหภูมิ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุ เช่น ค่าการนำความร้อนและความจุความร้อน (แปรตามอุณหภูมิ) หรือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้ (แปรตามเวลา) เป็นต้น โดยทั่วไปการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนอาจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบตามที่มาของข้อมูลเบื้องต้น วิธีการคำนวณที่ใช้สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุ รูปทรงมิติของชิ้นงาน สภาวะเบื้องต้น และสภาวะขอบเขตที่กำหนดขึ้นเป็นข้อมูลเบื้องต้น และให้ผลลัพธ์เป็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ จากนั้นทำการประเมินความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยพิจารณาว่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่กำหนดให้กับอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงมากน้อยเพียงใดเรียกว่าการคำนวณโดยตรง (direct method) อีกวิธีหนึ่งเรียกว่าการคำนวณแบบย้อนกลับ (inverse method)¹⁴ วิธีนี้แตกต่างจากการคำนวณโดยตรงตรงที่ใช้ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากการทดลองเป็นตัวแปรเบื้องต้นหนึ่งในการคำนวณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุ สภาวะเบื้องต้นและรูปทรงมิติของชิ้นงาน ผลการคำนวณที่ได้จะเป็นสภาวะขอบเขต (ในที่นี้ก็คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั่นเอง) หลักการของการคำนวณแบบย้อนกลับมีอยู่ถ้าในการทดลองนั้นมีการติดตั้งหัววัดคู่ความร้อนจำนวน N_m ตัวอยู่ที่ตำแหน่ง x_j เมื่อ $j = 1, 2, \dots, N_m$ เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (T_{ij}^m) ณ time step ใดๆ t_i เมื่อ $i = 1, \dots, N_t$ อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จากการทดลองจะใช้ในการประมาณกลุ่มของตัวแปรที่ไม่ทราบค่า β (ในที่นี้คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน) จำนวน N_β ตัวที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ ผลการคำนวณที่ได้จะออกมาในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเลย ความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จะควบคุมโดยอาศัยหลักสถิติมาใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนหรือฟลักซ์ความร้อนที่พื้นผิว การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนหรือฟลักซ์ความร้อนบริเวณพื้นผิวจะแสดงอยู่ในอนุกรมเลขยกกำลังซึ่งครอบคลุมช่วงเวลาที่เราสนใจ ค่าที่ได้จากอนุกรมเลขยกกำลังจะใช้สำหรับปรับผลของอุณหภูมิที่คำนวณได้ (T_{ij}^c) ให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้โดยทำให้ค่าความผิดพลาดระหว่างอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากตัวแปร β ($S(\beta)$) มีค่าต่ำสุดด้วยวิธีการกำลังสองน้อยสุดและการกำหนดค่าความเบี่ยงเบน (α_T และ α_k) ดังสมการ

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_m} \frac{1}{\sigma_T^2} [T_{ij}^m - T_{ij}^c(\beta)]^2 + \sum_{k=1}^{N_\beta} \frac{1}{\sigma_k^2} [\beta_k - \beta_k^o]^2 \quad \text{สมการที่ 2.25}$$

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงหลังจะใช้วิธีการคำนวณแบบย้อนกลับเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการคำนวณจะให้ผลลัพธ์เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับเวลาโดยตรง แต่วิธีการนี้ยังมีความสลับซับซ้อนอยู่มากและยากต่อการทำความเข้าใจและต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในคณิตศาสตร์ขั้นสูงรวมทั้งความรู้ทางด้านคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณอีกด้วย

ส่วนปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ นั้นเป็นสิ่งที่นักวิจัยมักศึกษาควบคู่ไปกับวิธีการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4 ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ที่เกิดจากการนำความร้อนผ่านจุดสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อและการนำความร้อนผ่านช่องว่างอากาศ เราอาจจำแนกสิ่งที่มีผลต่อการส่งผ่านความร้อนผ่านจุดสัมผัสระหว่างโลหะชิ้นงานกับแบบหล่อและช่องว่างอากาศนี้ออกได้เป็น 3 ประการหลักๆ อันได้แก่

- (1) การสัมผัสกันระหว่างพื้นผิว (surface micro-contact)
 - (2) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของแบบหล่อและชิ้นงานเนื่องจากความร้อน (thermal displacement of metal and mold)
- และ (3) รูปร่างและมิติของชิ้นงานและแบบหล่อ (topology)

ปัจจัยทั้งสามประการนี้มีความเกี่ยวเนื่องสัมพันธ์กันอยู่ กล่าวคือหากพื้นที่การสัมผัสกันระหว่างผิวชิ้นงานกับผิวแบบหล่อมามากและยาวนานเท่าไรอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านรอยต่อจะเกิดได้ดีขึ้นเท่านั้น แต่เนื่องจากทั้งชิ้นงานและแบบหล่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและขนาดเนื่องจากความร้อน โลหะหลอมเหลวที่สัมผัสกับผิวจึงแบบหล่อจะกลายเป็นของแข็งและหดตัวเคลื่อนออกห่างจากผิวสัมผัส ในขณะที่แบบหล่อเองก็เกิดการขยายตัวเนื่องจากได้รับความร้อนจากโลหะหลอมเหลวเช่นกัน ส่งผลให้บริเวณระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อกว้างขึ้นและกลายเป็นช่องว่าง การหดตัวหรือการขยายตัวของวัสดุจะเกิดขึ้นมากน้อยเพียงไรขึ้นกับชนิดและสมบัติทางกายภาพของวัสดุนั้นๆ ถึงกระนั้นการเกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อยังต้องพิจารณาร่วมกับรูปร่างและมิติของชิ้นงานและโพรงแบบด้วยเพราะชิ้นงานแต่ละชนิดมีความโค้งเว้าแตกต่างกัน การหดตัวและการถ่ายเทความร้อนในแต่ละบริเวณจึงเกิดขึ้นในลักษณะที่แตกต่างกันด้วย ยกตัวอย่าง เช่น ผนังของแบบหล่อ

กับไส้แบบ ส่วนของโลหะหลอมเหลวที่สัมผัสกับผนังของแบบหล่อเมื่อเกิดการเย็นตัวลงชิ้นงานจะหดตัวออกจากผนังของแบบหล่อมมากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อลดลงเนื่องจากอากาศจะขัดขวางการถ่ายเทความร้อน ในทางตรงกันข้ามโลหะหลอมเหลวที่สัมผัสกับไส้แบบเมื่อเย็นตัวลงและหดตัว ชั้นผิวแข็งของโลหะจะเคลื่อนตัวเข้าใกล้กับไส้แบบมากขึ้น การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับไส้แบบจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เป็นต้น ดังนั้นเราจึงอนุมานได้ว่าการส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อจึงน่าจะกระทำได้ โดยพยายามทำให้ผิวสัมผัสโลหะชิ้นงานไม่ว่าจะในสถานะของเหลวหรือของแข็งมีส่วนที่สัมผัสกับแบบหล่อให้มากที่สุดและสัมผัสกันให้นานที่สุด หรือทำให้ช่องว่างที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อมีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ วิธีหนึ่งที่ใช้ก็คือการใช้ความดันช่วยในการเติมเต็มน้ำโลหะเข้าสู่โพรงแบบ

ความดันอาจแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือความดันที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงและความดันภายนอกที่มากระทำ งานวิจัยที่ศึกษาผลของความดันจากแรงโน้มถ่วงได้แก่งานวิจัยของ Griffiths¹¹ ที่ได้ทำการศึกษาการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิกอนกับแบบหล่อทองแดงในระบบด้วยการหล่อโดยอาศัยแรงโน้มถ่วงและควบคุมการเย็นตัวในทิศทางเดียว พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในแนวตั้งจากบนลงล่างมีค่าสูงกว่าในแนวนอนและแนวตั้งจากล่างขึ้นบนตามลำดับ เนื่องการไหลของความร้อนในแนวตั้งจากบนลงล่างมีน้ำหนักของโลหะหลอมเหลวกดอยู่ทำให้ผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับผิวแบบหล่อดีกว่าแนวอื่น ๆ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากการทดลองนี้อยู่ในช่วง $2500-6000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ เมื่อเปรียบเทียบกับช่วงของค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากกระบวนการหล่อที่ใช้ความดันภายนอกช่วยแล้วมีค่าน้อยกว่าประมาณ 10 เท่า ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณความดันที่ใช้ด้วย จากงานวิจัยของ Hong¹⁷ และคณะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด A380 กับแบบหล่อเหล็กกล้า H13 ที่ระดับความดัน $8.75 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ ถึง $17.5 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ มีค่าอยู่ในช่วง $7.9 \times 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ถึง $8.7 \times 10^4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ตามลำดับขึ้นกับระดับความดันที่ใช้ ผลการทดลองเช่นนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ J. Papai และ C. Mobley²² ที่พบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนและปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านรอยต่อสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้น

อีกวิธีหนึ่งก็คือการทำให้โลหะคงอยู่ในสภาวะของเหลวซึ่งโลหะสามารถสัมผัสกับพื้นผิวแบบหล่อได้ดี การคงสภาวะของโลหะให้อยู่ในรูปของเหลวทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิหรืออุณหภูมิของแบบหล่อให้สูงขึ้น จากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดในกรณีที่แบบหล่อมีอุณหภูมิเริ่มต้นสูงมีค่าสูงกว่าแบบหล่ออุณหภูมิเริ่มต้นต่ำ²³ ผลการทดลองนี้ได้อภิปรายไว้ว่าการที่แบบหล่อมีอุณหภูมิสูงช่วยส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนที่รอยต่อ แม้ว่าโลหะ

หลอมเหลวจะเย็นตัวช้าลงแต่ก็ทำให้การเกิดชั้นผิวแข็ง การหดตัวของชิ้นงานและการเกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อช้ากว่าเดิม ส่งผลให้การสัมผัสกันระหว่างแบบหล่อกับชิ้นงานยาวนานขึ้นและความร้อนสามารถไหลผ่าน ณ จุดสัมผัสได้มากขึ้น ส่วนในกรณีที่แบบหล่อมีอุณหภูมิต้านั้น โลหะหลอมเหลวที่สัมผัสกับผิวแบบจะเกิดการแข็งตัวเป็นชั้นผิวแข็งเกือบจะทันที (artificial solidification) ที่โลหะหลอมเหลวสัมผัสกับผิวของแบบหล่อ ซึ่งชั้นผิวแข็งนี้เองทำให้เกิดการหดตัวเป็นช่องว่างระหว่างรอยต่อและการสัมผัสระหว่างชิ้นงานกับผิวแบบลดลงช่องว่างและชั้นผิวแข็งนี้กลายเป็นตัวที่ขัดขวางการไหลของความร้อน

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ ได้แก่ ชนิดและสมบัติของวัสดุและรูปแบบของชิ้นงาน ปัจจัยที่เกิดจากวัสดุเป็นปัจจัยที่ขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุชนิดใดๆ ที่เกี่ยวข้องในระบบงานหล่อ เช่น ค่าการนำความร้อน ความจุความร้อน ความหนาแน่น ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนสถานะ ค่าความร้อนแฝงของการเปลี่ยนเฟส การเปลี่ยนแปลงขนาด ฯลฯ วัสดุที่เกี่ยวข้องกับการหล่อไม่ว่าจะเป็นชนิดของแบบหล่อหรือโลหะที่นำมาหล่อหลอม ทุ่นเย็น หรือแม้กระทั่งสารเคลือบผิวล้วนเป็นสิ่งที่ส่งผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งสิ้น ดังจะเห็นได้จากการเย็นตัวในแบบหล่อทรายและแบบหล่อโลหะที่แตกต่างกันมาก งานวิจัยหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าปัจจัยที่เกิดจากวัสดุนี้มีผลต่อการถ่ายเทความร้อน ดังเช่นงานวิจัยของ Prate ที่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม-ทองแดงกับแบบหล่อทองแดงมีค่าต่างกันขึ้นกับปริมาณของทองแดงที่ผสมอยู่ในอะลูมิเนียม นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนยังขึ้นกับชนิดของแบบหล่ออีกด้วย งานวิจัยเดียวกันได้ทำการเปลี่ยนชนิดของแบบหล่อจากทองแดงเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าไร้สนิม พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อมิค่าไม่เท่ากัน กล่าวคือทองแดงมีค่าสูงสุด รองลงมาคือเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำและเหล็กกล้าไร้สนิมตามลำดับ ผลการวิจัยนี้คล้ายๆ กับงานวิจัยของ C.A. Muojekwu¹⁵ และคณะที่ได้ประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการจุ่มแท่งโลหะต่างชนิดกันลงในอ่างโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิคอนหลอมเหลว วัสดุที่ทำแท่งโลหะเป็นวัสดุชนิดเดียวกับแบบหล่อมี่ 4 ชนิดคือ ทองแดง ทองเหลือง เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กหล่อ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและฟลักซ์ความร้อนที่ไหลผ่านรอยต่อมีค่าไม่เท่ากัน โดยแท่งโลหะที่ทำจากทองแดงให้ค่าสัมประสิทธิ์สูงสุด ทองเหลือง เหล็กกล้าคาร์บอนและเหล็กหล่อให้ค่าที่ลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลจากความแตกต่างของสภาพนำความร้อนของวัสดุแต่ละชนิดนั่นเอง การใช้สารเคลือบผิวแบบหล่อก็มีผลโดยตรงต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อด้วยเช่นกัน Wei และคณะ²² เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานอะลูมิเนียมภายในแบบหล่อที่ใช้และไม่ใช้สารเคลือบผิวแบบหล่อในกระบวนการหล่อแบบฉีด เมื่อใช้สารเคลือบผิวที่มีสมบัติเป็นฉนวนที่มีส่วนผสมทาง

เคมีและสมบัติทางความร้อนต่างกัน พบว่าอุณหภูมิของชิ้นงานที่สัมผัสกับแบบหล่อที่ใช้สารเคลือบผิวลดลงช้ากว่าในกรณีที่ไม่ใช้สารเคลือบผิวอย่างเห็นได้ชัด อุณหภูมิสูงสุดของชิ้นงานที่สัมผัสกับสารเคลือบผิวที่ส่วนผสมของกราไฟต์เป็นหลักมีค่าใกล้เคียงกับแบบหล่อที่ไม่ใช้สารเคลือบผิว หรือจากการศึกษาของ F. Michael²³ ที่ใช้สารเคลือบผิวเซรามิกส์หลายชนิดประกอบด้วย vermiculite zirconium oxide และ mica ในการทดลอง พบว่าที่ความหนา 100 ไมโครเมตรและอุณหภูมิตั้งต้นแบบหล่อ 473 K เท่ากัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อที่เคลือบสารเคลือบผิวแต่ละชนิดแตกต่างกันโดย mica ให้ค่าสูงสุด รองลงมาก็คือ vermiculite และ zirconium oxide ผลการทดลองเช่นนี้สามารถอธิบายในแง่ของสมบัติทางความร้อนของวัสดุได้เช่นเดียวกับในกรณีของแบบหล่อ แต่ในกรณีของสารเคลือบผิวนั้นยังต้องพิจารณาความหนาและความเรียบของสารเคลือบผิวร่วมด้วย

นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนในชิ้นงานขึ้นเดียวกับอาจเกิดขึ้นแตกต่างกันและลักษณะการหดตัวก็แตกต่างกันไปด้วยดังที่ยกตัวอย่างไปแล้ว งานวิจัยที่ศึกษาลักษณะรูปทรงต่อการถ่ายเทความร้อนที่รอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ ได้แก่ Lee และ Kim²⁴ ซึ่งประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะผสมอะลูมิเนียมกับผนังแบบหล่อเปรียบเทียบกับผนังแกนกลางที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด SKD61 แบบหล่อที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแบบหล่อทรงกระบอกมีแกนกลางกระบอกเช่นกันอยู่ด้านใน พบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับผนังแบบหล่อมีลักษณะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงในเวลาต่อมา ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับผนังแกนกลางกลับมีลักษณะตรงกันข้ามกล่าวคือเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนตามเวลาเช่นนี้แตกต่างกันเนื่องจากลักษณะการหดตัวที่ส่งผลให้การสัมผัสกันระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อเป็นไปตามรูปทรงของโพรงแบบ ชิ้นงานที่เกิดการเย็นตัวโดยเคลื่อนตัวออกจากแบบหล่อจะมีแนวโน้มการถ่ายเทความร้อนลดลง

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยการสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมกับแบบหล่อชนิดถาวรอย่างง่ายซึ่งควบคุมให้การเย็นตัวเกิดขึ้นในลักษณะทิศทางเดียว และทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในชิ้นงานกับแบบหล่อที่เวลาใดๆ ขณะชิ้นงานเกิดการเย็นตัวในโพรงแบบรวม ทั้งศึกษาปัจจัยที่อาจมีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณดังกล่าว ได้แก่ (1) อุณหภูมิเท (2) ส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่นำมาหล่อ (3) ชนิดของสารเคลือบผิวและ (4) ความหนาของสารเคลือบผิว

โลหะผสมที่นำมาทำการหล่อในงานวิจัยนี้มี 3 ชนิด ได้แก่ อะลูมิเนียมผสมเกรด A356 A380 และ A390 ส่วนโลหะที่นำมาทำเป็นแบบหล่อ ได้แก่ เหล็กกล้าเครื่องมือเกรด H13 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่ใช้ทำแบบหล่อชนิดถาวร การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของชิ้นงานกับแบบหล่อที่เวลาใดๆ จะใช้หัววัดคู่ความร้อนชนิด K และบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์ด้วย data logger ซึ่งจะแปลงสัญญาณความต่างศักย์เป็นอุณหภูมิ อุณหภูมิจะถูกบันทึกทุกๆ 0.5 วินาที ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่บันทึกได้จากการทดลองจะนำมาคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เป็นฟังก์ชันกับเวลาต่อไป

3.1 การเตรียมการทดลอง

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการหล่อ

- 1) ปูนซีเมนต์ทนไฟ
- 2) เบ้าหลอมโลหะ (crucible) ขนาด A2
- 3) แท่งอะลูมิเนียมผสมเกรด A356
- 4) แท่งอะลูมิเนียมผสมเกรด A380
- 5) แท่งอะลูมิเนียมผสมเกรด A390

- 6) สารเคลือบผิวแบบหล่อชนิดที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน (insulating mold coating)
- 7) สารเคลือบผิวแบบหล่อชนิดที่มีสมบัตินำความร้อน (conductive mold coating)
- 8) เหล็กกล้าเครื่องมือเกรด H13
- 9) หัววัดคู่ความร้อนชนิด K แบบลวดและแบบแท่งจุ่ม
- 10) เต้าไฟฟ้า
- 11) ชุดควบคุมบรรยากาศภายในเตา
- 12) ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์
- 13) แท่งคนที่ทำจากกราไฟต์
- 14) ฟลักซ์คลุมผิว
- 15) data logger ยี่ห้อ YOGOKAWA รุ่น DA100
- 16) ส่วนประกอบของระบบหล่อเย็น เช่น สายยางเสริมใยแก้ว ข้อต่อและแหวนรัดท่อ เหลือง
- 17) C-clamp

3.1.2 การเตรียมระบบงานหล่อ

3.1.2.1 การเตรียมแบบหล่อขึ้นงาน

แบบหล่อสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ส่วนที่เป็นผนังด้านข้างของแบบหล่อและ (2) ส่วนฐานของแบบหล่อ ส่วนที่เป็นผนังด้านข้างของแบบหล่อมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก กลวงทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนความร้อนเพื่อควบคุมความร้อนถ่ายเทไหลผ่านน้อยที่สุด โดยวัสดุที่นำมาใช้คือปูนซีเมนต์ทนไฟที่มีปริมาณอะลูมินาสูงเกรด CAST 17M™ ส่วนฐานของแบบหล่อทำจากวัสดุที่เป็นโลหะซึ่งจะถูกกลึงไสตัดเจาะเพื่อให้สวมเข้ากับกระบอกปูนทนไฟได้พอดี วัสดุที่นำมาเป็นฐานของแบบหล่อคือเหล็กกล้าเครื่องมือเกรด H13 เมื่อประกอบแบบหล่อทั้งสองชิ้นเข้าด้วยกันแล้วโครงแบบลักษณะทรงกระบอก รูปทรงของกระบอกปูนแสดงอยู่ในภาพที่ 5

การขึ้นรูปกระบอกปูนซีเมนต์ทนไฟให้เป็นทรงกระบอกทำได้ด้วยการหล่อปูนลงในแบบหล่อปูนซึ่งประกอบด้วยแกนกลางทำจากโลหะกลึงให้เป็นรูปทรงกระบอกยึดติดบนฐานที่เป็นแผ่นพลาสติกอะคริลิกอย่างหนา ผนังของแบบหล่อปูนซีเมนต์ทำจากท่อพีวีซี ส่วนผสมและสมบัติของปูนซีเมนต์ทนไฟแสดงดังตารางที่ 1 ที่ผนังของแบบหล่อปูนซีเมนต์และแกนกลางโลหะเจาะเป็นรูขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตรจำนวน 6 รูในระดับที่ตรงกันห่างจากปากของแบบหล่อปูนซีเมนต์ 5.5 6.5 และ 8.5 เซนติเมตร รูปทรงของแบบหล่อกระบอกปูนซีเมนต์แสดงอยู่

ในภาพที่ 6 ก่อนเทปูนซีเมนต์ที่ผสมแล้วลงสู่แบบหล่อปูนจะต้องเสียบไม้ขนาดเล็กไว้ผ่านรูขนาดเล็กเพื่อที่ว่าเมื่อแกะปูนที่แข็งตัวดีแล้วออกจากแบบหล่อส่วนนี้จะเป็นรูกลวงซึ่งใช้ในการติดตั้งหัววัดคู่ความร้อน และทาวาสลินให้หนาทั่วทั้งแบบหล่อเพื่อให้ง่ายต่อการแกะปูนที่เซตตัวออกจากแบบหล่อ การผสมปูนซีเมนต์ทนไฟทำในหม้อผสมปูน ขั้นตอนการเตรียมกระบอบอกปูนซีเมนต์ทนไฟแต่ละชิ้นเป็นดังนี้

- ผงปูนซีเมนต์ทนไฟ CAST 17M	850	กรัม
- น้ำ	120	กรัม
- ผง Castament FS10 (สารช่วยเพิ่มการไหลตัวของปูน)	4	กรัม
- ผง Lithium Carbonate (สารช่วยเร่งการเซตตัวของปูน)	0.085	กรัม

สารเพิ่มการไหลตัวของปูนใส่ลงไปเพื่อให้ปูนไหลเข้าไปสู่แบบหล่อได้ดี ส่วนสารช่วยเร่งการเซตตัวใส่เพื่อลดระยะเวลาการเซตตัวของปูนให้สั้นลง การเติมสารเร่งการเซตตัวจะเติมให้ปริมาณไม่เกิน 0.5 และ 0.01% โดยน้ำหนักปูนตามลำดับ การผสมปูนซีเมนต์ทนไฟจะต้องผสมแบบแห้งเพื่อให้ผงปูนและผงปรับสมบัติของปูนเข้ากันได้ดีเสียก่อนประมาณ 2-3 นาที จากนั้นเติมน้ำลงไปและปั่นส่วนผสมทั้งหมดเป็นเวลา 2 นาทีด้วยความเร็วของการผสมปานกลางจนปูนมีลักษณะเป็นครีมไหลตัวได้ดี การผสมแบบเปียกไม่ควรผสมนานเกินไปเพราะอาจทำให้ปูนเซตตัวภายในหม้อบดได้ เมื่อเทปูนที่ผสมแล้วลงสู่แบบหล่อที่ประกอบไว้เรียบร้อยแล้วให้ใช้ช้อนขูดบริเวณฐานของแบบหล่อเบาๆ ประมาณ 10 นาทีเพื่อไล่ฟองอากาศที่ค้างในปูน เมื่อปูนเซตตัวแล้วให้แกะปูนออกแล้วล้างวาสลินออกให้หมดและทิ้งไว้ให้แห้ง นำกระบอบอกปูนไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 1023 K เพื่อไล่ความชื้นและสิ่งเจือปนต่างๆ ตลอดจนเพิ่มความแข็งแรงให้กระบอบอกปูนซีเมนต์

ส่วนฐานของแบบหล่อเตรียมจากเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนเกรด H13 กลึงไปตัดเจาะให้มีรูปร่างดังภาพที่ 7 ตารางที่ 2 และ 3 แสดงส่วนผสมและสมบัติทางกายภาพของเหล็กกล้าชนิดนี้ ส่วนที่ยื่นล้ำเข้าไปในกระบอบอกปูนซีเมนต์มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 เซนติเมตร สูง 5 เซนติเมตร ส่วนที่อยู่นอกกระบอบอกปูนซีเมนต์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตรซึ่งจะให้เป็นท่อทะลุตลอดในแนวขนานกับพื้นและทำเกลียวเพื่อต่อระบบหล่อเย็น จากนั้นตัดแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสมมาตรกันในแนวขนานกับท่อด้วยเครื่องตัด wire cut ขนาดความหนาหลอด 0.3 มิลลิเมตร ผิวหน้าด้านในของฐานแบบหล่อที่ถูกตัดซีกหนึ่งจะทำการเซาะร่องความกว้าง 0.6 มิลลิเมตร ลึก 1 มิลลิเมตร เพื่อซ่อนสายของหัววัดคู่ความร้อนที่ติดตั้งภายในแบบหล่อและทำให้ชิ้นส่วนทั้งสองประกบกันได้สนิท แนวของการเซาะร่องอยู่ในภาพที่ 8 การเซาะร่องในแนวขนานกับ

บริเวณผิวหน้าของแบบหล่อที่สัมผัสกับโลหะหลอมเหลวจะอยู่ห่างจากผิวสัมผัส 2 5 10 และ 20 มิลลิเมตร ส่วนร่องที่อยู่ในแนวตั้งฉากกับผิวหน้าที่สัมผัสกับโลหะหลอมเหลวด้วยเพื่อเดินสายลวด หัววัดคู่ความร้อนออกทางด้านฐานของแบบหล่อ โดยตำแหน่งของร่องจะอยู่ชิดกับขอบข้าง การวางแบบหล่อที่ติดตั้งหัววัดคู่ความร้อนเรียบร้อยแล้วจะต้องวางบนวัสดุผิวเรียบได้ระนาบที่ได้ทำการปาดผิวและตัดช่องไว้เพื่อไม่ให้ส่วนของสายหัววัดคู่ความร้อนที่พ้นจากฐานของแบบหล่อถูกทับซึ่งอาจก่อเกิดการเสียหาย ผิวหน้าของฐานแบบหล่อส่วนที่สัมผัสกับโลหะหลอมเหลวจะต้องขัดให้เรียบ การเก็บรักษาแบบหล่อส่วนฐานนี้ทำได้โดยการทำน้ำมันให้ทั่วเพื่อป้องกันสนิม ก่อนนำไปใช้งานผิวหน้าที่สัมผัสกับโลหะหลอมเหลวจะต้องไม่มีคราบน้ำมันหรือออกไซด์ ทาแบบหล่อด้วยสารเคลือบผิวแบบหล่อและทำให้แห้งสนิท จากนั้นจึงหนีบด้วย C-clamp เพื่อให้แบบหล่อประกบกันได้สนิทยิ่งขึ้น

3.1.2.2 การเตรียมโลหะที่นำมาหลอม

โลหะที่นำมาหลอมเป็นอะลูมิเนียมผสมสำหรับงานหล่อเกรด A356 A380 และ A390 ในรูปของอินกอต ส่วนผสมและสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของอะลูมิเนียมทั้งสามชนิดมีความแตกต่างดังแสดงในตารางที่ 4 และ 5 ตัดแบ่งอะลูมิเนียมให้มีขนาดเล็กลงและชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 210 - 220 กรัมสำหรับการหล่อแต่ละครั้ง

3.1.2.3 การติดตั้งหัววัดคู่ความร้อน

หัววัดคู่ความร้อนที่ใช้เป็นหัววัดคู่ความร้อนชนิด K ซึ่งประกอบด้วยลวด 2 ชนิดคือโครเมล(chromel) กับอะลูเมล (alumel) มีประสิทธิภาพในการวัดอุณหภูมิที่อยู่ในช่วง 253 K ถึง 1643 K หัววัดคู่ความร้อนจะถูกติดตั้งในระบบงานหล่อทั้งหมด 7 ตำแหน่ง โดยติดตั้งอยู่ในชิ้นงานหล่อ 3 ตำแหน่งและในฐานของแบบหล่อ 4 ตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 9 ขนาดของหัววัดคู่ความร้อนที่เลือกใช้มีขนาดต่างกัน หัววัดคู่ความร้อนที่ติดตั้งในฝั่งชิ้นงานมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 มิลลิเมตรและส่วนที่ติดตั้งอยู่ในแบบหล่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 มิลลิเมตร การติดตั้งหัววัดคู่ความร้อนแต่ละตำแหน่งภายในชิ้นงานทำได้โดยการร้อยสายของลวดโครเมลผ่านรูที่อยู่บนผนังด้านข้างของกระบอกปูนซีเมนต์ทนไฟรูปละ 1 เส้น อีกรูหนึ่งที่อยู่ในระดับเดียวกันร้อยด้วยลวดอะลูเมล ปลายของลวดทั้งสองเส้นที่โผล่ออกมาจากกระบอกปูนซีเมนต์ทนไฟจะนำมามัดให้ติดกันเพื่อเชื่อมเป็นปมหรือ bead ด้วยหัวเชื่อมก๊าซอะเซทิลีน-ออกซิเจน เมื่อเชื่อม bead เรียบร้อยแล้วดึงปลายลวดที่เหลือทั้งสองให้ตึงและวางตำแหน่งให้ปมอยู่กึ่งกลางกระบอกปูนซีเมนต์ทนไฟ ส่วนการติดตั้งหัววัดคู่ความร้อนที่อยู่ในฐานของแบบหล่อโลหะนั้นจะใช้หัววัดคู่ความร้อนขนาดเล็กที่มีปลอกหุ้มเพื่อป้องกันการสัมผัสกันระหว่างสายเปลือยกับแบบหล่อโลหะซึ่งอาจก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนและค่าที่บันทึกได้คลาดเคลื่อนไป การเชื่อมหัววัดคู่ความร้อนที่ติดตั้งในฐานของแบบหล่อ

จะเชื่อมลวดติดกับผิวโลหะด้วยเครื่อง spot welder ที่แนวสมมาตรหรือแนวแกน สายของหัววัดคู่ ความร้อนที่เหลื่อจะถูกเก็บไว้ในร่องด้านข้างที่เซาะด้วย wire cut ไว้แล้ว ช่องว่างที่เหลื่อระหว่าง สายของหัววัดคู่ความร้อนกับร่องจะอัดด้วยสีที่มีส่วนผสมของไทเทเนียมออกไซด์ให้เต็มและทิ้งไว้ จนแห้ง ไทเทเนียมออกไซด์จะป้องกันไม่ให้สายของหัววัดคู่ความร้อนเคลื่อนที่ไปมาและป้องกัน สัญญาณรบกวนจากการสัมผัสของสายเปลือยกับแบบหล่อโลหะในกรณีปลอกหุ้มสายนั้นเกิดการ ชำรุดเสียหายเนื่องจากความร้อนขณะทำการวัดอุณหภูมิ

3.1.2.4 การเคลือบผิวแบบหล่อโลหะด้วยสารเคลือบผิว

การเคลือบผิวแบบหล่อโลหะในส่วนที่สัมผัสกับโลหะหลอมเหลวทำโดยทาสารเคลือบผิว ลงบนแบบหล่อที่ทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว และออกไซด์ออกจนหมดแล้ว สารเคลือบผิวแบบ หล่อที่ใช้ในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิดคือสารเคลือบผิวที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน (white coating) และสารเคลือบผิวที่มีสมบัตินำความร้อนได้ดี (conductive mold coating) การทาเคลือบจะควบคุม ความหนาให้อยู่ในช่วง 2 ช่วงคือ 100 ± 20 และ 300 ± 30 ไมโครเมตร การควบคุมความหนาของสาร เคลือบผิวทำให้โดยการเปรียบเทียบกับ calibration curve ดังภาพที่ 10 ขั้นตอนการสร้าง calibration curve แสดงอยู่ในภาคผนวก ก

3.1.2.5 การหลอมและการตรวจวัดอุณหภูมิภายในชิ้นงานกับแบบหล่อ

ระบบงานหล่อจะต้องประกอบให้เรียบร้อยโดยการสวมกระบอกปูนซีเมนต์ทนไฟเข้ากับ ฐานของแบบหล่อที่ได้ทาสารเคลือบผิวแล้ว ต่อระบบนำหล่อเย็นอันประกอบด้วยสายยาง ข้อต่อ และแหวนรัดทองเหลืองเข้าสู่ฐานแบบหล่อเพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดการแข็งตัวอย่างมีทิศทางในทิศทาง เดียวรวมทั้งป้องกันไม่ให้อุณหภูมิที่ฐานสูงเกินไป ปลายของหัววัดคู่ความร้อนทั้ง 7 ตำแหน่งจะต่อ กับเครื่อง data logger ซึ่งเป็นเครื่องแปลงสัญญาณความต่างศักย์เป็นอุณหภูมิและเก็บบันทึกการ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทุก 0.5 วินาที ระวังอย่าให้สายของหัว วัดคู่ความร้อนที่ติดตั้งภายในชิ้นงานสัมผัสกันเองหรือกับโลหะอื่นเพราะอาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนได้ ขั้นตอนของการตรวจวัดอุณหภูมิในระบบงานหล่อมี่ดังนี้

- 1) นำอะลูมิเนียมผสมที่เตรียมไว้ใส่ลงในเบ้าหลอมกราไฟต์
- 2) หลอมอะลูมิเนียมผสมในเตาไฟฟ้าที่มีการควบคุมบรรยากาศด้วยก๊าซอาร์กอน ทิ้งไว้ที่ อุณหภูมิ 1123 K เป็นเวลา 10 นาที
- 3) นำเบ้าหลอมออกจากเตา เติมฟลักซ์คลุมผิวลงไปแล้วนำเบ้าหลอมเข้าเตาใหม่อีกครั้ง

- 4) ปรับอุณหภูมิเตาไปที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการเท็จจริงประมาณ 100 - 150 K เพื่อชดเชยการสูญเสียความร้อนขณะที่นำเบ้าหลอมออกจากเตาและเทลงสู่แบบ เมื่ออุณหภูมิเตาสูงถึงอุณหภูมิที่ได้ตั้งเอาไว้แล้ว ทิ้งไว้ 5 นาที
- 5) เปิดน้ำเข้าสู่ระบบหล่อเย็นและเริ่มบันทึกอุณหภูมิที่อ่านได้จากหัววัดคู่ความร้อนด้วย data logger
- 6) นำเบ้าหลอมออกจากเตา ตักตะกรันที่ลอยอยู่บนผิวหน้าโลหะหลอมเหลวให้หมด
- 7) วัดอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวโดยจุ่มหัววัดคู่ความร้อนแบบจุ่มก่อนเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบหล่อภายใน 3 วินาที
- 8) ทิ้งไว้ 5 นาทีเพื่อให้เครื่องบันทึกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ตลอดช่วงการเย็นตัวของชิ้นงานในแบบหล่อ

ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของชิ้นงานและแบบหล่อ ณ ตำแหน่งและที่เวลาใดๆ ที่วัดได้จากการทดลองจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อต่อไป

3.2 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

ในงานวิจัยนี้ การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อจะอาศัยข้อมูลที่วัดได้จากการทดลองเป็นหลักร่วมกับสมบัติทางกายภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้อง โดยมีสมมติฐานว่าการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางเดียว การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนย่อยๆ ดังต่อไปนี้

3.2.1 การประมาณค่าอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อ

การหาอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งแบบหล่อจะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่าแบบจำลองการถดถอย (regression) เพื่อประดิษฐ์ฟังก์ชันหรือสมการเส้นแนวโน้มที่สามารถเข้ากันได้ (fit) กับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับระยะทาง ณ เวลาใดๆ ที่ได้จากการทดลอง ฟังก์ชันเส้นแนวโน้มนี้จะต้องให้ค่าความผิดพลาดระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองและฟังก์ชันดังกล่าวน้อยที่สุด การพิจารณาความใกล้เคียงกันระหว่างค่าประมาณจากฟังก์ชันกับค่าที่ได้จากการทดลองทำได้โดยการประเมินค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 หากค่าประมาณจากฟังก์ชันที่

ประคิษฐ์ขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ได้ R^2 จะมีค่าเข้าใกล้ 1 ค่า R^2 คำนวณได้จาก

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{\left(\sum Y_i^2\right) - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}} \quad \text{สมการที่ 3.1}$$

เมื่อ Y_i = ค่าข้อมูลที่ได้จากการทดลอง
 \bar{Y} = ค่าที่ได้จากฟังก์ชันหรือสมการเส้นแนวโน้มที่ประคิษฐ์ขึ้น
 n = จำนวนชุดข้อมูล

ฟังก์ชันที่ใช้ในการอธิบายอุณหภูมิที่จุดต่างๆภายในแบบหล่อส่วนที่เป็นโลหะ ได้แก่

- ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก (hyperbolic function)
- ฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง (parabolic function)
- ฟังก์ชันพหุนามกำลังสาม (cubic function) ซึ่งละพจน์กำลังสองทิ้งไป
- error function

รูปแบบของฟังก์ชันทั้ง 4 ณ เวลาใดๆ เป็นดังนี้

ฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก $T_{hyp}(x) = \frac{A_{hyp}}{x+a} + \frac{B_{hyp}}{x+b}$ สมการที่ 3.2

ฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง $T_{par}(x) = A_{par}(x^2) + B_{par}(x) + C$ สมการที่ 3.3

ฟังก์ชันพหุนามกำลังสาม $T_{cub}(x) = A_{cub}(x^3) + B_{cub}(x) + C$ สมการที่ 3.4

error function $T_{erf}(x) = A_{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) + B_{erf}$ ($\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ และ $t > 0$) สมการที่ 3.5

เมื่อ T = อุณหภูมิที่ตำแหน่งใดๆ
 x = ตำแหน่งใดๆในแบบหล่อโลหะ
 a, b = ค่าคงที่ในฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก
 t = เวลา
 α = thermal diffusivity
 k = ค่าการนำความร้อน
 ρ = ความหนาแน่น
 C_p = ค่าความจุความร้อน
 A, B, C = ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการที่เวลาใดๆ

จากสมการข้างต้นสามารถคำนวณอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งแบบหล่อได้จากประมาณนอกช่วง (extrapolation) โดยแทนค่าระยะทาง x เท่ากับศูนย์ จะได้ว่าอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งแบบหล่อ ($T_m^S(x=0)$ หรือ T_m^S) แตกต่างกันขึ้นกับลักษณะสมการดังนี้

$$\text{ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก} \quad T_{m, hyp}^S = \frac{A_{hyp}}{a} + \frac{B_{hyp}}{b} + C \quad \text{สมการที่ 3.6}$$

$$\text{ฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง} \quad T_{m, par}^S = C_{par} \quad \text{สมการที่ 3.7}$$

$$\text{ฟังก์ชันพหุนามกำลังสาม} \quad T_{m, cub}^S = C_{cub} \quad \text{สมการที่ 3.8}$$

$$\text{error function} \quad T_{m, erf}^S = B_{erf} \quad \text{สมการที่ 3.9}$$

3.2.2 การประมาณค่าฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

ค่าฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1

$$q_{interface} = q_m = -k_m \left(\frac{dT_m}{dx} \right)_{x=0} \quad \text{สมการที่ 2.1}$$

เมื่อ $q_{interface}$ = ฟลักซ์ความร้อนที่ไหลผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

q_m = ฟลักซ์ความร้อนที่ไหลเข้าสู่แบบหล่อ

k_m = ค่าการนำความร้อนของแบบหล่อ

$\left(\frac{dT_m}{dx} \right)_{x=0}$ = ความแตกต่างของอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งแบบหล่อซึ่งได้จาก

อนุพันธ์อันดับ ที่หนึ่งของฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณอุณหภูมิพื้นผิวฝั่งแบบหล่อเทียบกับระยะทาง x เมื่อ $x = 0$

งานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ไหลผ่านบริเวณรอยต่อมีค่าเท่ากับฟลักซ์ความร้อนที่ไหลเข้าสู่แบบหล่อโดยการคำนวณจะคำนึงกฎทรงพลังงาน (Energy Conservation) ที่ว่าพลังงานที่ไหลเข้าสู่และไหลออกจากระบบที่เวลาใดๆ มีค่าเท่ากันเสมอ

ค่าอุณหภูมิและฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อฝั่งแบบหล่อที่ได้จะนำไปใช้ในการประมาณค่าอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานต่อไป

3.2.3 การประมาณค่าอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งชิ้นงานหล่อ

การประมาณอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งชิ้นงานจะอาศัยหลักการของกฎทรงพลังงาน การคำนวณกระทำได้ 2 วิธีดังนี้

- (1) ไม่พิจารณาการปลดปล่อยความร้อนแฝงของการแข็งตัวของชิ้นงาน
- (2) พิจารณาการปลดปล่อยความร้อนแฝงของการแข็งตัวของชิ้นงาน

การประมาณอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งชิ้นงานหล่อ ณ เวลาใดๆ แบบไม่พิจารณาความร้อนแฝงของการแข็งตัวนั้นคำนวณได้จากการถดถอยสร้างสมการเส้นแนวโน้มที่เข้ากันได้กับข้อมูลการกระจายอุณหภูมิ ณ บริเวณต่างๆและการประมาณนอกช่วงเช่นเดียวกับการประมาณอุณหภูมิของผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อ แต่ต่างกันตรงที่เส้นแนวโน้มมีลักษณะเป็นเส้นตรงดังสมการ

$$T_c^S(x) = A(x) + B \quad \text{สมการที่ 3.10}$$

เมื่อ $T_c^S =$ อุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งชิ้นงาน

$A, B =$ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงที่เวลาใดๆ

ฟลักซ์ความร้อนที่ไหลออกจากชิ้นงาน (q_c) หาได้จากสมการที่ 2.1 เช่นเดียวกับฟลักซ์ความร้อนในฝั่งแบบหล่อ

ส่วนการประมาณอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งชิ้นงานที่เวลาใดๆ แบบพิจารณาค่าความร้อนแฝงของการแข็งตัวอาศัยหลักความจริงที่ว่า ระหว่างที่โลหะหลอมเหลวกำลังแข็งตัวจะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนจำนวนหนึ่งเรียกว่าความร้อนแฝงของการแข็งตัว ขั้นตอนในการคำนวณอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งชิ้นงานหล่อแบบที่พิจารณาความร้อนแฝงมีดังนี้

- ลากเส้นอุณหภูมิ liquidus (T_L) และอุณหภูมิ solidus หรือ eutectic (T_S หรือ T_{EU}) ของโลหะผสมไปตัดกับกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฝั่งชิ้นงาน จุดตัดระหว่างเส้นอุณหภูมิ liquidus และอุณหภูมิ solidus กับกราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่ง 5 15 และ 35 มิลลิเมตรที่ได้ นั้นหมายความว่าเวลาที่ตำแหน่งหัววัดคู่ความร้อน ณ ตำแหน่ง 5 15 และ 35 มิลลิเมตรห่างจากรอยต่อ (หัววัดคู่ความร้อนตัวที่ 1 2 และ 3) อยู่ในสถานะของเหลว (t_{LI} , t_{L2} และ t_{L3}) และของแข็ง (t_{S1} , t_{S2} และ t_{S3}) ทั้งหมดตามลำดับดังภาพที่ 11(ก)

- นำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง liquidus (x_L) และระยะทาง solidus (x_S) กับเวลาที่สองของเวลาดังภาพที่ 11(ข) ระยะทางที่เพิ่มไปตามเส้น liquidus และเส้น solidus ที่เวลาใดๆ หมายถึงระยะทางดังกล่าวมีอุณหภูมิเท่ากับ T_l และ T_s ตามลำดับ จากนั้นใช้การถอดรอยแบบเชิงเส้นประมาณความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้สมการของเส้น liquidus และเส้น solidus อยู่ในรูปของ $x = A\sqrt{t} - B$ ดังภาพที่ 12

- ตำแหน่งหัววัดคู่ความร้อนที่อยู่ห่างจากรอยต่อ 5 มิลลิเมตร (x_c^I) เป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้รอยต่อมากที่สุด ดังนั้นในการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานใกล้กับบริเวณรอยต่อจะใช้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่วัดได้จากหัววัดคู่ความร้อนตัวนี้เป็นหลัก เมื่อลากเส้นที่ตำแหน่ง 5 มิลลิเมตรนี้ไปตัดกับสมการเส้น liquidus และเส้น solidus แล้วจะสามารถแบ่งช่วงเวลาได้เป็น 5 ช่วงโดยใช้เวลาที่สอง (t_{zone}) ของช่วงเวลายังเป็นเกณฑ์ดังนี้

ช่วงที่ 1 เริ่มตั้งแต่เวลา 0 ถึง $t_{zone(1)}$ อุณหภูมิที่ตำแหน่งบริเวณรอยต่อจนถึง 5 มิลลิเมตรยังคงสูงกว่าอุณหภูมิ liquidus ของโลหะผสม พลิกซ์ความร้อนที่ไหลผ่านบริเวณรอยต่อจะเกิดจากนำความร้อนผ่านโลหะหลอมเหลว ดังสมการ

$$q_m(t) = k_L \left(\frac{T_c^I - T_c^{S(I)}}{x_c^I} \right) \quad \text{สมการที่ 3.11}$$

เมื่อ k_L = ค่าการนำความร้อนของโลหะในสถานะของเหลว

T_c^I = อุณหภูมิที่หัววัดคู่ความร้อนตัวที่ 1 ในชิ้นงานบันทึกได้

x_c^I = ตำแหน่งของหัววัดคู่ความร้อนตัวที่ 1 ซึ่งอยู่ห่างจากรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อเข้าไปในฝั่งชิ้นงาน 5 มิลลิเมตร

ในงานวิจัยนี้กำหนดให้ค่าการนำความร้อนของโลหะในสถานะของเหลว (k_L) จะมีค่ามากกว่าค่าการนำความร้อนในสถานะของแข็ง (k_S) ประมาณ 10 เท่าเนื่องจากเกิดการไหลวนของโลหะหลอมเหลวภายในโพรงแบบภายหลังการเท การถ่ายเทความร้อนจึงเกิดขึ้นได้ดี⁹

ดังนั้นอุณหภูมิของชิ้นงานที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อในช่วงที่ 1 คือ

$$T_c^{S(I)} = T_c^I - \left(\frac{q_m \cdot x_c^I}{k_L} \right) \quad \text{สมการที่ 3.12}$$

ช่วงที่ 2 เริ่มตั้งแต่ เวลาเท่ากับ $t_{zone(1)}$ ถึง $t_{zone(2)}$ อุณหภูมิของชิ้นงานเริ่มลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิ liquidus โลหะเริ่มเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็ง โดยการปลดปล่อยความร้อนแฝงลักษณะที่โลหะในเฟสของแข็งอยู่ร่วมกันเฟสของเหลวเมื่อโลหะหลอมเหลวมีอุณหภูมิลดลงมาอยู่

ในช่วงอุณหภูมิหลอมเหลวกับอุณหภูมิ eutectic เรียกว่าสภาวะ mushy พลั๊กซ์ความร้อนที่ไหลผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อจึงประกอบด้วย 2 ส่วนคือการนำความร้อนผ่านโลหะที่อยู่ในสภาวะ mushy และการคายความร้อนแฝงออกมา⁸⁻⁹ ดังสมการที่ 3.13

$$q_m(t) = \{ (k_S f_S + k_L f_L) \cdot \left(\frac{T_L - T_c^S}{x_L} \right) \} + \{ \rho_S \Delta H_f \cdot \left(\frac{\partial f_S}{\partial t} \right) \} \quad \text{สมการที่ 3.13}$$

เมื่อ k_S = ค่าการนำความร้อนของชิ้นงานในสภาวะของแข็ง

f_S, f_L = สัดส่วนของเฟสของแข็งและเฟสของเหลวตามลำดับ

T_L = อุณหภูมิหลอมเหลว

x_L = ระยะทาง liquidus

ρ_S = ความหนาแน่นของชิ้นงานในเฟสของแข็ง

ΔH_f = ความร้อนแฝงของการแข็งตัว

$\left(\frac{\partial f_S}{\partial t} \right)$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนเฟสของแข็ง

สมการที่ 3.13 สามารถเขียนอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$q_m(t) = \{ (k_S f_S + k_L f_L) \cdot \left(\frac{T_L - T_c^{S(2)}}{x_L} \right) \} + \{ \rho_S \Delta H_f \cdot \left(\frac{\partial f_S}{\partial x} \right) \cdot \left(\frac{dx_L}{dt} \right) \} \quad \text{สมการที่ 3.14}$$

เมื่อ $\left(\frac{\partial f_S}{\partial x} \right)$ = การเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของเฟสของแข็งเทียบกับระยะทาง

$\left(\frac{dx_L}{dt} \right)$ = อัตราการแข็งตัว

f_S เป็นตัวแปรที่ขึ้นกับอุณหภูมิและเวลาในการเย็นตัว ถ้า f_S ได้จากการประมาณโดยใช้สมมติฐานว่าลักษณะการแข็งตัวของโลหะเมื่อเทียบกับเวลาไปในลักษณะพาราโบลา (parabolic growth) ดังแสดงในภาพที่ 12(จ) จะได้ว่า f_S ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อมามีค่าเท่ากับ

$$f_S^{x=0}(t) = \frac{\sqrt{t} - t_{zone(1)}}{t_{zone(3)} - t_{zone(1)}} \quad \text{สมการที่ 3.15}$$

ส่วนค่า $\left(\frac{\partial f_S}{\partial x} \right)$ จะประมาณให้เท่ากับครึ่งหนึ่งของสัดส่วนเฟสของแข็งบริเวณรอยต่อ

ระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ ดังนั้นที่เวลาใดๆ ในช่วงที่ 2

$$\left(\frac{\partial f_S}{\partial x}\right) \approx \frac{f_S^{x=0}(t)}{2} \quad \text{สมการที่ 3.16}$$

สำหรับค่าระยะทาง liquidus หรือ x_L (ระยะทางที่ชิ้นงานเริ่มเข้าสู่สถานะ mushy) หาได้จากสมการเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับรากที่สองของเวลาที่ประดิษฐ์ขึ้นจากการถดถอยเชิงเส้น สมการดังกล่าวอยู่ในรูปของ

$$x_L = A_L \sqrt{t} - B_L \quad \text{สมการที่ 3.17}$$

และอัตราการแข็งตัว $\left(\frac{\partial x_L}{\partial t}\right)$ คำนวณได้จากการหาสมการเชิงอนุพันธ์อันดับที่ 1 ของสมการที่ 3.17 เทียบกับเวลาได้แก่

$$\left(\frac{dx_L}{dt}\right) = \frac{d(x_L)}{dt} = \frac{A_L}{2\sqrt{t}} \quad \text{สมการที่ 3.18}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรทั้งหมดที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.15 ถึงสมการที่ 3.18 ลงในสมการที่ 3.14 และจัดรูปสมการใหม่ จะได้ว่าอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งชิ้นงานในช่วงที่ 2 มีค่าเท่ากับ

$$T_c^{S(2)}(t) = T_L - (A_L \sqrt{t} - B_L) \cdot \left(\frac{q_m - \{\rho_{c,S} \Delta H_F \left(\frac{f_S^{x=0}}{2}\right) \cdot \left(\frac{A_L}{2\sqrt{t}}\right)\}}{k_{c,S} \left[\frac{\sqrt{t} - t_{zone(1)}}{t_{zone(3)} - t_{zone(1)}}\right] + k_{c,L} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{t} - t_{zone(1)}}{t_{zone(3)} - t_{zone(1)}}\right)\right]} \right) \quad \text{สมการที่ 3.19}$$

ช่วงที่ 3 เริ่มตั้งแต่ $t_{zone(2)}$ ถึง $t_{zone(3)}$ ช่วงนี้ระยะทางตั้งแต่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อจนถึงตำแหน่งหัววัดคู่ความร้อนตัวที่ 1 (5 มิลลิเมตร) อยู่ในสถานะ mushy ทั้งหมด สมการฟลักซ์ความร้อนจึงมีลักษณะคล้ายกับในช่วงที่ 2 แต่แตกต่างกันเล็กน้อยตรงที่การพิจารณา x_L , f_S และ $\left(\frac{\partial f_S}{\partial x}\right)$ กล่าวคือระยะทางที่นำมาคำนวณนั้นจะใช้ตำแหน่งหัววัดคู่ความร้อนตัวที่ 1 ซึ่งอยู่ห่างจากรอยต่อ 5 มิลลิเมตรเป็นหลัก ค่า f_S รอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ ($f_S^{x=0}$) ในช่วงที่ 3 นี้ยังคงเหมือนเดิมตามสมการที่ 3.14 ส่วนการประมาณค่า f_S ที่ระยะทาง 5 มิลลิเมตรจากรอยต่อ ($f_S^{x=5}$) นั้นได้จาก

$$f_S^{x=5}(t) = \frac{\sqrt{t} - t_{zone(2)}}{t_{zone(4)} - t_{zone(2)}} \quad \text{สมการที่ 3.20}$$

สำหรับการประมาณค่าความร้อนแฝงที่ถ่ายเทจากตำแหน่ง 5 มิลลิเมตรไปสู่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ นั้น จะให้มีค่าเท่ากับเฉลี่ยระหว่างสัดส่วนของแข็งที่บริเวณรอยต่อกับสัดส่วนของแข็งที่ 5 มิลลิเมตร ดังสมการ

$$\left(\frac{\partial f_S}{\partial x}\right) \approx \frac{f_S^{x=0} + f_S^{x=5}}{2} \quad \text{สมการที่ 3.21}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรทั้งหมดที่คำนวณข้างต้นลงในสมการ 3.14 รูปสมการที่ใช้หาอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งชิ้นงานในช่วงที่ 3 เป็นดังนี้

$$T_c^{S(3)}(t) = T_c^l - (x_c^l) \cdot \left(\frac{q_m - \{ \rho_{c,S} \Delta H_f \left(\frac{f_S^{x=0} + f_S^{x=5}}{2} \right) \cdot \left(\frac{A_L}{2\sqrt{t}} \right) \}}{k_{c,S} \left[\frac{\sqrt{t} - t_{zone(2)}}{t_{zone(4)} - t_{zone(2)}} \right] + k_{c,L} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{t} - t_{zone(2)}}{t_{zone(4)} - t_{zone(2)}} \right) \right]} \right) \quad \text{สมการที่ 3.22}$$

ช่วงที่ 4 เริ่มจาก $t_{zone(3)}$ ถึง $t_{zone(4)}$ อุณหภูมิของชิ้นงานที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิ eutectic ซึ่งก็คือที่บริเวณดังกล่าว ณ เวลา $t_3 < t < t_4$ เกิดการแข็งตัวอย่างสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นฟลักซ์ความร้อนในช่วงนี้จึงเป็นการนำความร้อนผ่านโลหะที่เป็นของแข็งเท่านั้นซึ่งก็คือ

$$q_m(t) = k_{c,S} \left(\frac{T_S - T_c^{S(4)}}{x_S} \right) \quad \text{สมการที่ 3.23}$$

เมื่อ $x_S =$ ระยะทาง solidus

ค่า x_S หาได้จากสมการเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับรากที่สองของเวลาที่ประดิษฐ์ขึ้นจากการถอดออกเชิงเส้นเช่นเดียวกับ x_L ในสมการที่ 3.17

$$x_S = A_S \sqrt{t} - B_S \quad \text{สมการที่ 3.24}$$

อุณหภูมิของชิ้นงานที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อเท่ากับ

$$T_c^{S(4)} = T_S - \left(\frac{q_m \cdot x_S}{k_{c,S}} \right) \quad \text{สมการที่ 3.25}$$

ช่วงที่ 5 เวลาตั้งแต่ $t_{zone(4)}$ ขึ้นไป ช่วงนี้เป็นช่วงที่อุณหภูมิของชิ้นงาน ณ ตำแหน่ง 5 มิลลิเมตรซึ่งกลายเป็นของแข็งโดยสมบูรณ์แล้วค่อยๆลดลง พลังความร้อนจะพิจารณาได้ว่าเป็นการนำความร้อนผ่านสถานะของแข็งเท่านั้น

$$q_m(t) = k_{c,s} \left(\frac{T_c^I - T_c^{S(5)}}{x_c^I} \right) \quad \text{สมการที่ 3.26}$$

และจะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งแบบหล่อมีค่าเท่ากับ

$$T_c^{S(5)} = T_c^I - \left(\frac{q_m \cdot x_c^I}{k_{c,s}} \right) \quad \text{สมการที่ 3.27}$$

จากการคำนวณข้างต้นจะได้อุณหภูมิบริเวณรอยต่อฝั่งชิ้นงานที่แปรผันตามเวลา อุณหภูมิบริเวณรอยต่อทั้งสองฝั่งและค่าพลังความร้อนจะนำมาใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อต่อไป

3.2.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

ในงานวิจัยนี้การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อสามารถแบ่งเป็น 2 กรณี คือ (1) กรณีที่พิจารณาการสะสมของพลังงานในวัสดุและ (2) กรณีที่ไม่พิจารณาการสะสมของพลังงานในวัสดุ อย่างไรก็ตาม ทั้งสองกรณีจะพิจารณาการสะสมของพลังงานในวัสดุที่เป็นแบบหล่อและไม่พิจารณาการแผ่รังสีความร้อนและพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเองภายในระบบยกเว้นจากการคายความร้อนแฝงในขณะเกิดการแข็งตัวเท่านั้น การไหลของความร้อนเข้าสู่บริเวณรอยต่อที่ใช้ในการคำนวณแสดงดังภาพที่ 13

3.2.4.1 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบ

หล่อ โดยไม่พิจารณาพลังงานที่สะสมในวัสดุ

กรณีนี้จะสมมติให้การสะสมของพลังงานในวัสดุมีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ ซึ่งหมายความว่าพลังงานไหลจากบริเวณรอยต่อไปสู่เนื้อแบบหล่อโดยไม่สูญเสียความร้อน จากสมการที่ 2.4 จะได้ว่า

$$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_g - \dot{Q}_{out} = \frac{dQ_{st}}{dt} = \dot{Q}_{st} = 0 \quad \text{สมการที่ 3.28}$$

จะได้ว่า

$$hS(T_c^S - T_m^S) - k_m S \left(\frac{T_m^S - T_m^I}{x_m^I} \right) = 0 \quad \text{สมการที่ 3.29}$$

เมื่อ T_m^I = อุณหภูมิที่หัววัดคู่ความร้อนตัวที่ 1 ภายในแบบหล่อโลหะบันทึกได้
 x_m^I = ตำแหน่งของหัววัดคู่ความร้อนตัวที่ 1 ห่างจากบริเวณรอยต่อเข้าไปในฝั่งในแบบหล่อโลหะ (ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 2 มิลลิเมตร)
 S = พื้นที่หน้าตัดที่ความร้อนไหลผ่าน

จะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกรณีไม่พิจารณาพลังงานสะสมในวัสดุมีค่าเท่ากับ

$$h = \frac{k_m \left(\frac{T_m^S - T_m^I}{x_m^I} \right)}{T_c^S - T_m^S} \quad \text{สมการที่ 3.30}$$

3.2.4.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อโดยพิจารณาพลังงานที่สะสมในวัสดุ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในกรณีนี้จะพิจารณาให้มีการสะสมของพลังงานในฝั่งแบบหล่อเท่านั้น การคำนวณวิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบผลต่างสืบเนื่องหนึ่งมิติซึ่งเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใน 1 ช่วงเวลา (time derivative) ภาพที่ 14 แสดงการแบ่งแบบหล่อที่ใกล้กับรอยต่อเป็นส่วนย่อยๆ เรียกว่าเอลิเมนต์ (element) จุดกึ่งกลางของเอลิเมนต์เรียกว่า node โดย node แรกจะอยู่บริเวณผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อ (x_0^m) จากสมการที่ 2.4 จะได้ว่า

$$\dot{Q}_{in} + \dot{Q}_g^0 - \dot{Q}_{out} = \frac{dQ_{st}}{dt} = \dot{Q}_{st} \quad \text{สมการที่ 3.31}$$

ซึ่งเขียนได้ว่า

$$hS(T_c^S - T_m^S) - k_m \left(\frac{dT_m}{dx} \right) = \rho_m C_{p,m} S \Delta x \cdot \left(\frac{dT}{dt} \right) \quad \text{สมการที่ 3.32}$$

เมื่อ Δx = ความหนาของครึ่งเอลิเมนต์ที่อยู่ใกล้บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อมามากที่สุด

ρ_m = ความหนาแน่นของวัสดุที่เป็นแบบหล่อ

$C_{p,m}$ = ค่าความจุความร้อนของวัสดุที่เป็นแบบหล่อ

$\left(\frac{dT}{dt} \right)$ = อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ที่เวลา t ใดๆ สมการที่ 3.32 สามารถขยายความสมการได้เป็น

$$h(T_c^{S^t} - T_m^{S^t}) - k_m \left(\frac{T_m^{S^t} - T_m^{I^t}}{\Delta x_0 + \Delta x_1} \right) = \rho_m C_{p,m} \Delta x_0 \cdot \left(\frac{T_m^{I^{t+\Delta t}} - T_m^{I^t}}{\Delta t} \right) \quad \text{สมการที่ 3.33}$$

เมื่อ $\Delta x_0, \Delta x_1 =$ ความกว้างของครึ่งเอลิเมนต์ที่อยู่ใกล้รอยต่อและเอลิเมนต์ถัดมา

ตามลำดับ

$\Delta t =$ ความกว้างของช่วงเวลา (time step) ที่สนใจ

$t =$ เวลาขณะใดๆที่สนใจ

$t + \Delta t =$ เวลาขณะถัดไป 1 ช่วงเวลา

จะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อพิจารณาพลังงานสะสมมีค่าเท่ากับ

$$h = \frac{\rho_m C_{p,m} \Delta x_0 \cdot \left(\frac{T_m^{I^{t+\Delta t}} - T_m^{I^t}}{\Delta t} \right) - k_m \left(\frac{T_m^{S^t} - T_m^{I^t}}{\Delta x_0 + \Delta x_1} \right)}{T_c^{S^t} - T_m^{S^t}} \quad \text{สมการที่ 3.34}$$

3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่ออาจแบ่งได้เป็น 3 ปัจจัยหลักโดยแบ่งตามที่มาคือ (1) ปัจจัยที่เกิดจากแบบหล่อ (2) ปัจจัยที่เกิดจากชิ้นงาน และ (3) ปัจจัยที่เกิดจากการเคลือบผิว สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะปัจจัยที่เกิดจากชิ้นงาน ได้แก่ อุณหภูมิเทกับชนิดของโลหะผสม และปัจจัยที่เกิดจากการเคลือบผิวซึ่งได้แก่ ชนิดและความหนาของสารเคลือบผิว รายละเอียดการศึกษาปัจจัยดังกล่าวเป็นดังต่อไปนี้

3.3.1 อุณหภูมิเท

อะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ถูกหลอมและเทลงสู่แบบหล่อที่อุณหภูมิแตกต่างกัน กล่าวคือ เหนืออุณหภูมิ liquidus (888 K) ประมาณ 50 100 และ 150 K (เท่ากับ 938 988 และ 1038 K ตามลำดับ) ผิวหน้าของแบบหล่อโลหะที่สัมผัสกับโลหะหลอมเหลวจะทาด้วยสารเคลือบผิวที่มีความหนาอยู่ในช่วง 100 ± 20 ไมโครเมตร

3.3.2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่นำมาหล่อ

ธาตุผสมหลักอย่างซิลิคอนมีผลต่ออุณหภูมิ liquidus และสมบัติอื่นๆ ของอะลูมิเนียมผสมเป็นอย่างมาก อะลูมิเนียมผสมที่ใช้ศึกษาคือเกรด A356 A380 และ A390 อะลูมิเนียมผสมแต่ละเกรดจะถูกหลอมและเทลงสู่แบบหล่อใน 2 ลักษณะคือ (1) เทที่อุณหภูมิเท่ากันคือประมาณ 1053 K และ (2) เทที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิ liquidus (อุณหภูมิ superheat) ของอะลูมิเนียมผสมแต่ละชนิดเท่ากัน ที่ผิวของแบบหล่อโลหะที่สัมผัสกับโลหะหลอมเหลวจะทำด้วยสารเคลือบผิวที่เป็นฉนวน (white coating) ที่มีความหนา 100 ± 20 ไมโครเมตรโดยประมาณ

3.3.3 ชนิดสารเคลือบผิว

สารเคลือบผิวที่ใช้ในการศึกษามี 2 ชนิดคือ (1) สารเคลือบที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนอยู่ในรูปของเหลวสีขาวมีวัสดุจำพวกเซรามิกส์เป็นองค์ประกอบหลัก และ(2) สารเคลือบที่มีสมบัตินำความร้อนซึ่งมีกราไฟต์เป็นส่วนผสมหลักอยู่ในรูปของผง (ต้องนำมาผสมกับน้ำแล้วจึงทาลงบนผิวของแบบหล่อโลหะ) อะลูมิเนียมผสมเกรด A356 จะถูกหลอมและเทลงสู่แบบหล่อที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวแต่ละชนิดที่อุณหภูมิเท่ากัน

3.3.4 ความหนาของสารเคลือบผิวแบบหล่อ

เทอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 A380 และ A390 ที่อุณหภูมิ 1053 K ลงสู่แบบหล่อที่มีสารเคลือบผิวเคลือบอยู่โดยความหนาของสารเคลือบผิวมี 2 ช่วงคือ 100 ± 20 และ 300 ± 30 ไมโครเมตรโดยประมาณ

ในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนอกจากจะเทียบค่าเหล่านั้นที่ ณ เวลาใดๆ ที่สภาวะการหล่อต่างๆ กัน นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบในรูปของค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย (\bar{q}) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (\bar{h}) ดังสมการที่ 3.35 และ 3.36 รวมทั้งค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดด้วย

$$\bar{h} = \frac{\int_0^t h(t) \cdot \Delta T dt}{\int_0^t \Delta T dt}$$

สมการที่ 3.35

$$\bar{q} = \frac{\int_0^t q(t) dt}{t}$$

สมการที่ 3.36

3.4 การประเมินความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้

การประเมินความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อทำได้โดยการใช้ค่าดังกล่าวที่คำนวณได้เป็นตัวแปรเบื้องต้นในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งและเวลาใดๆ โดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ProCAST™ version 4.0.0 ขั้นตอนการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์เป็นดังนี้

- 1) วาดรูปทรงและมิติของแบบหล่อด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer-Aided Design, CAD) โปรแกรมที่ใช้คือ IDEAS™
- 2) กำหนดขนาดของเมช (meshing) เพื่อระบุตำแหน่งต่างๆของระบบงานหล่อที่สร้างขึ้น โปรแกรมที่ใช้คือ MeshCAST™ version 2.0
- 3) กำหนดข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็นในการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งและเวลาต่างๆ อันประกอบด้วย รูปทรงและมิติของระบบซึ่งวาดไว้ในขั้นตอนที่ 1 สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของวัสดุที่เกี่ยวข้อง (ตารางที่ 1 ถึงตารางที่ 5) สภาพะเบื้องต้นในการหล่อได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นของแบบหล่อและโลหะหลอมเหลว และสภาวะขอบเขต เช่น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำกับแบบหล่อโลหะ ($h = 8368 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับแบบหล่อ ($h = 20 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อที่คำนวณได้ก่อนหน้านี
- 4) เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่คำนวณได้กับอุณหภูมิที่วัดได้ ณ ตำแหน่งเดียวกันว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกันหรือไม่เพียงใด

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การตรวจวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงในชิ้นงานและแบบหล่อ

ภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในชิ้นงานและแบบหล่อกับเวลา จะเห็นได้ว่าภายหลังที่โลหะหลอมเหลวถูกเทลงสู่โพรงแบบจนเต็ม อุณหภูมิของชิ้นงานจะลดลงอย่างต่อเนื่องโดยบริเวณที่อยู่ใกล้กับบริเวณรอยต่อมีอัตราการเย็นตัวสูงกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป กล่าวคือที่ตำแหน่ง 5 มิลลิเมตรอุณหภูมิต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 15 และ 35 มิลลิเมตรตามลำดับ เมื่อเวลาผ่านไปความแตกต่างของอุณหภูมิแต่ละตำแหน่งในชิ้นงานจะลดลงเรื่อยๆ ส่วนอุณหภูมิในฝั่งแบบหล่อบริเวณใกล้กับรอยต่อคือตำแหน่ง 2 มิลลิเมตรจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 วินาทีแรกและมีอุณหภูมิสูงสุดเมื่อเทียบกับบริเวณที่อยู่ถัดมาคือ 5 10 และ 20 มิลลิเมตรซึ่งอุณหภูมิก่อนๆ เพิ่มขึ้น อุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งจะเพิ่มจนถึงค่าสูงสุดและลดลงอย่างช้าๆ ในเวลาต่อมา

4.2 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่ออาจพิจารณาได้ทั้งจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนหรือฟลักซ์ความร้อน แต่ค่าที่มีความสำคัญสำหรับการนำไปใช้ในการวิเคราะห์อื่นๆ คือค่าฟลักซ์ความร้อนที่รอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้นเราจะคำนวณจากค่าฟลักซ์ความร้อนอีกทีหนึ่งซึ่งจะแปรผันตามสมมติฐานและตัวแปรอื่นๆ ที่นำมาพิจารณา ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจและเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ผู้เขียนจะอ้างถึงค่าฟลักซ์ความร้อนกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนควบคู่กันไป

4.2.1 การประมาณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อ

จากการเปรียบเทียบค่า R^2 ซึ่งได้จากการถดถอยแบบไม่เชิงเส้นด้วยฟังก์ชัน 4 รูปแบบคือ ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก ฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ฟังก์ชันพหุนามกำลังสามที่ละพจน์กำลังสองถึง

และ error function ที่เวลาใดๆพบว่าในช่วงแรกค่า R^2 ของฟังก์ชันมีแนวโน้มเข้าสู่ 1 และมีค่ามากกว่า 0.95 แต่ค่าที่ได้จากฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกจะเบี่ยงเบนออกจาก 1 เมื่อเวลาผ่านไปดังภาพที่ 16(ก) เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิบริเวณผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อที่คำนวณได้จากการประมาณนอกช่วง แต่ละฟังก์ชันพบว่าอุณหภูมิบริเวณผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อของฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ฟังก์ชันพหุนามกำลังสามที่ละพจน์กำลังสองทิ้งและ error function มีค่าใกล้เคียงกัน ในขณะที่อุณหภูมิบริเวณผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อที่ได้จากฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงเนื่องจากอุณหภูมิบริเวณผิวรอยต่อมีค่าต่ำกว่าส่วนอื่นของแบบหล่อที่อยู่ห่างจากรอยต่อออกไป ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกจึงไม่เหมาะในการใช้หาอุณหภูมิบริเวณผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อดังภาพที่ 16(ข)

4.2.2 การประมาณฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับฝั่งแบบหล่อ

ภาพที่ 17 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อกับเวลา ค่าฟลักซ์ความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดก่อนที่จะลดลงอย่างต่อเนื่องในเวลาผ่านไป โดยที่ฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากแต่ละฟังก์ชันมีความแตกต่างกันไม่มากนัก ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากฟังก์ชันพหุนามกำลังสองและไฮเปอร์โบลิกให้ค่าค่อนข้างสูงและแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย รองลงมาคือ error function และฟังก์ชันพหุนามกำลังสามที่ละพจน์กำลังสองทิ้งตามลำดับ สำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากฟังก์ชันพหุนามกำลังสามที่ละพจน์กำลังสองทิ้งในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อต่อไป

4.2.3 การประมาณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงาน

การประมาณอุณหภูมิบริเวณผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานที่ได้จากการถดถอยเชิงเส้นแสดงในภาพที่ 18(ก) จากค่าอุณหภูมินี้เมื่อนำไปคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนที่ไหลออกจากชิ้นงานเข้าสู่รอยต่อ (q_c) และเปรียบเทียบกับคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนที่ไหลออกจากรอยต่อสู่แบบหล่อ (q_m) ที่กำหนดให้เป็นฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อที่ได้จากการถดถอยดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าฟลักซ์ความร้อนของทั้งสองฝั่งมีค่าไม่เท่ากันดังแสดงในภาพที่ 18(ข) ซึ่งไม่สอดคล้องกับกฎทรงพลังงานและสมมติฐานที่กำหนดไว้

อุณหภูมิบริเวณผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานแบบที่พิจารณาการปลดปล่อยความร้อนแฝงของการแข็งตัวซึ่งอ้างอิงฟลักซ์ความร้อนที่ไหลออกจากรอยต่อเข้าสู่แบบหล่อจะสอดคล้องกับกฎทรงพลังงาน อุณหภูมิทั้ง 5 ช่วงเวลาเป็นไปดังภาพที่ 19 จากภาพจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิในช่วงที่ 1 และ 2 ลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยอุณหภูมิในช่วงที่ 1 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกจนถึงค่าสูงสุดและค่อยๆ

ลดลงในอัตราที่ค่อนข้างรวดเร็วเมื่อเทียบกับช่วงเวลาอื่นๆ รอยต่อระหว่างช่วงที่ 1 และ 2 ค่อนข้างสั้นจนแยกออกไม่ชัดเจน ในช่วงที่ 3 อุณหภูมิจะเริ่มคงที่และสูงขึ้นเล็กน้อยในตอนท้ายก่อนเข้าช่วงที่ 4 ช่วงที่ 4 และ 5 อุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามเวลา

4.2.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อคำนวณได้ 2 วิธีดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.2.4 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณแบบไม่พิจารณาการสะสมของพลังงานในวัสดุ (\dot{Q}_{st}) มีค่าสูงกว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณแบบพิจารณาพลังงานสะสมในวัสดุไม่มากนักดังแสดงในภาพที่ 20 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้ง 2 วิธีมีแนวโน้มคล้ายคลึงกัน การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแปรปรวนเล็กน้อย แต่หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดแล้วจึงลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้แปรผันตามเวลา ในช่วงที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นช่วงที่ชิ้นงานยังคงเป็นโลหะหลอมเหลวค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นจนกระทั่งก่อนถึงช่วงที่ 3 ค่าจะลดลง ช่วงที่ 3 และ 4 มีการเปลี่ยนแปลงคือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและลดลงเล็กน้อยจนหมดช่วงที่ 4 รอยต่อระหว่างช่วงที่ 4 และ 5 มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแต่หลังจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างต่อเนื่องกับเวลา

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อ อุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงาน พลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อกับเวลาแสดงในภาพที่ 21 จะเห็นว่าอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อเพิ่มขึ้นแล้วจึงลดลงอย่างช้าๆ ในขณะที่อุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานลดลงอย่างต่อเนื่อง พลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อเพิ่มสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดและลดลงในเวลาต่อมา แต่เวลาที่ค่าพลักซ์ความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อสูงขึ้นจนถึงค่าสูงสุดต่างกัน กล่าวคือพลักซ์ความร้อนขึ้นถึงค่าสูงสุดในช่วงวินาทีแรกๆ หลังโลหะหลอมเหลวไหลเต็มแบบแต่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อจะขึ้นถึงค่าสูงสุดหลังจากนั้น

4.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

สภาวะการหล่อที่แตกต่างกันส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อแตกต่างกัน ดังจะเห็นได้จากค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและสูงสุดในช่วง 150 วินาทีแรกที่สภาวะการหล่อต่างๆ กันซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 6 ถึงตารางที่ 9 หรืออาจพิจารณาได้จากการแบ่งช่วงเวลาเพื่อคำนวณอุณหภูมิผิวรอยต่อซึ่งแตกต่างกันอีกด้วย จะเห็นได้จากเวลาที่ตำแหน่ง 5 15 และ 35 มิลลิเมตรในฝั่งชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ liquidus และอุณหภูมิ solidus และการแบ่งช่วงเวลาที่สองของเวลาทั้ง 5 ช่วง คือ $t_{zone (1)}$ ถึง $t_{zone (4)}$ แตกต่างกันในสภาวะการหล่อต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 10 ถึงตารางที่ 13 สมการเส้นตรงที่เข้ากับความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง liquidus ($x_L = A_L \sqrt{t} - B_L$) และระยะทาง solidus ($x_S = A_S \sqrt{t} - B_S$) กับเวลาของอะลูมิเนียมผสมชนิดต่างๆ ที่ได้จากการทดลองเชิงเส้นของแต่ละสภาวะการหล่อแสดงอยู่ในตารางที่ 14 ถึงตารางที่ 16

4.3.1 ผลของอุณหภูมิเท

เมื่อผิวของแบบหล่อถูกเคลือบด้วยสารเคลือบผิวชนิดและความหนาเดียวกัน อุณหภูมิเทที่สูงขึ้นจาก 50 K เป็น 100 K และ 150 K เหนืออุณหภูมิ liquidus ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ทำให้การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อดีขึ้นทั้งในกรณีที่แบบหล่อถูกเคลือบผิวด้วย white coating และ graphite-based coating ดังจะเห็นได้จากค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแปรผันตามอุณหภูมิเทในภาพที่ 22 และภาพที่ 23 เมื่อพิจารณาค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและสูงสุดหลังการเทพบว่าให้ผลสอดคล้องกันดังตารางที่ 6

4.3.2 ผลของส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่นำมาหล่อ

การเปรียบเทียบส่วนผสมทางเคมีกระทำได้ใน 2 ลักษณะด้วยกันคือ (1) เปรียบเทียบที่อุณหภูมิเทเดียวกัน และ (2) เปรียบเทียบที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิ liquidus (อุณหภูมิ superheat) เท่ากันดังภาพที่ 24 และ 25 ตามลำดับ แต่จากภาพการเปรียบเทียบทั้ง 2 ลักษณะจะเห็นได้ว่าเป็นการยากที่จะระบุผลของส่วนผสมทางเคมี เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ไม่มีแนว โนม์ที่

ชัดเจน ดังนั้นการเปรียบเทียบผลของส่วนผสมทางเคมีจะใช้ค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยใน 150 วินาทีแรกภายหลังการติดตั้งแสดงในตารางที่ 7 เป็นเกณฑ์

จากตารางที่ 7(ก) พบว่าที่อุณหภูมิเท่ากันคือ 1053 K อะลูมิเนียมผสมกลุ่ม hypoeutectic (ปริมาณซิลิกอนต่ำกว่า 11.8%) ซึ่งได้แก่ A356 และ A380 นั้น อะลูมิเนียมผสมเกรด A356 มีค่าฟลักซ์เฉลี่ยสูงกว่าอะลูมิเนียมผสมเกรด A380 เล็กน้อยทั้งในกรณีที่สารเคลือบผิวแบบหล่อมีความหนา 100 และ 300 ไมโครเมตร แต่เมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมผสมเกรด A390 พบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนของอะลูมิเนียมผสมเกรด A390 มีค่าสูงสุด รองลงมาคือค่าฟลักซ์ความร้อนของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 และ A380 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาผลของส่วนผสมทางเคมีของโลหะที่นำมาหลอมที่อุณหภูมิ superheat เท่ากัน จากตารางที่ 7(ข) พบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยของสำหรับอะลูมิเนียมผสมในกลุ่ม hypoeutectic ที่อุณหภูมิ superheat 50 K และ 100 K อะลูมิเนียมผสมเกรด A380 และ A356 มีค่าใกล้เคียงกันแต่ อะลูมิเนียมผสมเกรด A380 มีค่าสูงกว่า A356 ไม่มากนัก เมื่อเทียบกับอะลูมิเนียมผสมเกรด A390 ด้วยแล้วพบว่าอะลูมิเนียมผสมเกรด A380 ยังคงมีค่าสูงสุด สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย พบว่าที่อุณหภูมิ superheat เท่ากับ 50 K และ 100 K อะลูมิเนียมเกรด A380 มีค่าสูงสุด รองลงมาคืออะลูมิเนียมผสมเกรด A390 และ A356 ตามลำดับ

4.3.3 ผลของชนิดสารเคลือบผิวแบบหล่อ

เมื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวแบบ white coating ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนและ graphite-based coating ซึ่งมีสมบัตินำความร้อน ณ อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ 50 100 และ 150 K เหนืออุณหภูมิ liquidus แสดงในภาพที่ 26 ถึง 28 ตามลำดับ รวมทั้งค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและสูงสุดในตารางที่ 8 พบว่าในกรณีที่อุณหภูมิของอะลูมิเนียมผสมและความหนาของสารเคลือบผิวใกล้เคียงกัน ค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวที่นำความร้อนมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบหล่อที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน (เคลือบที่มีเซอร์โคเนียมซิลิเกต) เป็นส่วนผสมหลัก

4.3.4 ผลของความหนาของสารเคลือบผิว

เมื่อความหนาของสารเคลือบผิวแบบหล่อเพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณความร้อนไหลผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อลดลง ดังจะเห็นได้จากค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างอะลูมิเนียมผสม A356 กับแบบหล่อในกรณีที่สารเคลือบผิว 100 ไมโครเมตรมีค่าสูงกว่ากรณีที่สารเคลือบผิวหนาประมาณ 300 ไมโครเมตรในเคลือบทั้งสองชนิดดังแสดงในภาพที่ 29 และ 30 นอกจากนี้ยังพบว่าอะลูมิเนียมผสม A380 และ A390 ก็ให้ผลเช่นเดียวกันดังแสดงในตารางที่ 9 เป็นที่น่าสังเกตว่าฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณได้ในกรณีที่สารเคลือบผิวมีความหนา 300 ไมโครเมตรโดยประมาณนั้นมีความแปรปรวนในช่วงแรกคือสูงขึ้นและลดลงเล็กน้อยก่อนสูงขึ้นอีกครั้งจนถึงค่าสูงสุดและลดลงในเวลาต่อมา อุณหภูมิที่วัดได้ภายหลังการเทโลหะหลอมเหลวสู่โพรงแบบในฝั่งแบบหล่อที่ตำแหน่ง 2 มิลลิเมตรที่คำนวณได้ก็มีความแปรปรวนในลักษณะนี้เช่นเดียวกัน

4.4 การประเมินความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อที่คำนวณได้

การประเมินความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อทำได้โดยการค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้ทุกๆ 2.5 วินาทีในช่วง 150 วินาทีแรกจะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการจำลองการเย็นตัวของชิ้นงานด้วยคอมพิวเตอร์ ภาพที่ 31 แสดงตัวอย่างภาพจำลองการเย็นตัวและการแข็งตัวของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่อุณหภูมิ 1053 K ในแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating หนาประมาณ 100 ไมโครเมตร ณ ตำแหน่งต่างๆที่สนใจ อุณหภูมิที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้ในช่วง 50 วินาทีแรกเท่านั้นแต่หลังจากนั้นอุณหภูมิทั้งมีค่าคู่ออกจากกัน นอกจากนี้การเย็นตัวในโพรงแบบหล่อก็เกิดขึ้นอย่างทีทีศทางในลักษณะทิศทางเดียวดังในภาพที่ 32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

อภิปรายผลการทดลอง

5.1 ผลการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชิ้นงานและแบบหล่อ

อุณหภูมิของชิ้นงานที่อยู่ใกล้บริเวณรอยต่อลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับบริเวณที่อยู่ห่างจากรอยต่อออกไปเนื่องจากโลหะหลอมเหลวสัมผัสกับผนังของแบบหล่อซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าค่อนข้างมาก ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างโลหะหลอมเหลวกับผนังของแบบหล่อนี้เองที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการแข็งตัว ความหนาของชั้นโลหะที่แข็งตัวแล้วจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ขณะที่อุณหภูมิของชิ้นงานลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งส่งผลให้ความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละบริเวณลดลงไปด้วย อุณหภูมิบริเวณที่อยู่ห่างจากรอยต่อมีอัตราการเย็นตัวช้ากว่าบริเวณที่อยู่ใกล้รอยต่อ นอกจากนี้ความร้อนในบริเวณที่อยู่ด้านในของชิ้นงานยังต้องไหลผ่านความต้านทาน 2 อีกบริเวณคือส่วนที่เป็นโลหะที่แข็งตัวแล้วกับและรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

ส่วนอุณหภูมิฝั่งแบบหล่อจะสูงขึ้นเรื่อยๆ บริเวณที่อยู่ใกล้รอยต่อมากกว่าจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณที่อยู่ห่างจากรอยต่อออกมา ทั้งนี้เป็นเพราะสาเหตุ 3 ประการคือ ประการแรกผิวแบบหล่อเป็นบริเวณที่สัมผัสกับโลหะหลอมเหลวโดยตรง ความร้อนสามารถถ่ายเทความร้อนสู่แบบหล่อได้รวดเร็วเนื่องจากอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิของแบบหล่อโลหะมาก ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อที่สูงมากนี้เป็นตัวผลักดันให้ความร้อนไหลไปยังผิวของแบบหล่อ สาเหตุประการที่ 2 ตำแหน่งของหัววัดคู่ความร้อน ยิ่งหัววัดคู่ความร้อนอยู่ห่างจากรอยต่อมากเท่าไรความต้านทานการไหลของความร้อนเนื่องจากความหนาของชั้นวัสดุจะเพิ่มขึ้นเท่านั้น ประการที่ 3 คือผลของสารเคลือบผิวที่เคลือบบริเวณผิวของแบบหล่อที่สัมผัสกับโลหะหลอมเหลว ชั้นของสารเคลือบผิวเป็นอุปสรรคต่อการถ่ายเทความร้อนเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของแบบหล่อจะลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากการหล่อเย็นด้วยน้ำตลอดเวลาดึงเอาความร้อนจากแบบหล่อ

5.2 การประเมินค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

5.2.1 การประมาณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อ

การใช้ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) เป็นเพียงตัวบ่งบอกประสิทธิภาพของสมการเส้นแนวโน้มที่สามารถให้ค่าที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองหรือไม่เพียงใด จากวิธีนี้แสดงเพียงว่าสมการเส้นแนวโน้มที่เวลาใดๆที่ให้ค่า R^2 ใกล้เคียง 1 น่าจะให้ผลการประมาณอุณหภูมิบริเวณรอยต่อจากการประมาณนอกช่วงที่เชื่อถือได้ จากภาพที่ 16 ฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ฟังก์ชันพหุนามกำลังสามที่ละพจน์กำลังสองทิ้งและ error function ให้ค่า R^2 ใกล้เคียง 1 ส่วน ฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกมีค่าดูออกจาก 1 แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ฟังก์ชันพหุนามกำลังสามที่ละพจน์กำลังสองทิ้งและ error function สามารถนำมาใช้ในการคำนวณได้ อย่างไรก็ตาม error function ก็สามารถนำมาใช้ได้เช่นกันแต่การวิธีคำนวณสมการรูปแบบนี้จะยุ่งยากกว่า ส่วนอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้จากฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงจึงไม่ควรนำสมการดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณในขั้นตอนต่อไป

อุณหภูมิพื้นผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อที่ได้จากการประมาณนอกช่วงแสดงการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแล้วจึงลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในแบบหล่อในช่วงแรกๆ นั้นอุณหภูมิภายในแบบหล่อใกล้กับพื้นผิวกับส่วนที่อยู่ถัดออกมาจากรอยต่อมีความแตกต่างกันมาก สมการเส้นแนวโน้มในช่วงเวลาดังกล่าวจากตำแหน่ง 2 มิลลิเมตรไปยังพื้นผิวของแบบหล่อจึงชันมาก เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิในแต่ละตำแหน่งเริ่มใกล้เคียงกันมากขึ้น ความชันของสมการเส้นแนวโน้มจะลดลงและเกือบคงที่เมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิพื้นผิวที่คำนวณได้จากการประมาณนอกช่วงจึงลดลงอย่างช้าๆ ตามไปด้วย

5.2.2 การประมาณฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

ฟลักซ์ความร้อนคำนวณได้จากผลคูณระหว่างค่าการนำความร้อนของชิ้นงานกับความแตกต่างของอุณหภูมิในแต่ละบริเวณ (thermal gradient) เมื่อ $x=0$ thermal gradient นั้นหาได้จากอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของสมการเส้นแนวโน้มที่ใช้ในการประมาณอุณหภูมิพื้นผิวฝั่งแบบหล่อ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์ความร้อนจึงขึ้นกับสมการเส้นแนวโน้มโดยตรง ฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณได้มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุดและลดลงอย่างต่อเนื่องในเวลาต่อมา การ

เปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้เกิดจากในขณะที่โลหะเป็นของเหลวอยู่นั้นโลหะหลอมเหลวสามารถไหลและกระจายตัวได้ดีบนผิวแบบหล่อ ทำให้การสัมผัสกันระหว่างโลหะหลอมเหลวกับผิวแบบหล่อในช่วงนี้จะมากที่สุด เมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิเริ่มลดลง โลหะหลอมเหลวกลายเป็นของแข็งที่ละเอียดๆ และเกิดการหดตัวประกอบกับมีการขยายตัวของแบบหล่อเนื่องจากความร้อน ทั้งชิ้นงานและแบบหล่อจะเคลื่อนที่ออกจากกันกลายเป็นช่องว่างอยู่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ ความร้อนจึงต้องไหลผ่านส่วนของโลหะที่แข็งตัวแล้ว ช่องว่างอากาศและชั้นของสารเคลือบผิว ความร้อนจึงไหลผ่านไปยังแบบหล่อได้น้อยลงไปด้วย ดังที่เห็นจากภาพที่ 20 ว่าค่าฟลักซ์ความร้อนลดลงเรื่อยๆ หลังจากถึงค่าสูงสุดแล้ว

5.2.3 การประมาณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงาน

ลักษณะการลดลงของอุณหภูมิพื้นผิวฝั่งชิ้นงานที่คำนวณได้ในแต่ละช่วงมีความแตกต่างกัน ความแปรปรวนของอุณหภูมิในช่วงที่ 1 เป็นผลมาจากกระแสไหลวนของโลหะที่ยังเป็นของเหลวอยู่ภายในโพรงแบบ เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะอุณหภูมิเทโลหะหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิ liquidus เมื่อโลหะหลอมเหลวดังกล่าวสัมผัสกับผิวของแบบหล่อจึงไม่แข็งตัวในทันที อย่างไรก็ตามการลดลงของอุณหภูมิในช่วงที่ 1 ดำเนินไปอย่างรวดเร็วเพราะความร้อนผ่านโลหะในสภาวะของเหลวได้ดี กว่าโลหะในสภาวะของแข็งและความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิก่อนข้างสูง ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่สั้นมากจนแยกความแตกต่างกับรอยต่อช่วงที่ 1 ไม่ชัดเจนเพราะเฟสของแข็งที่เกิดขึ้นยังมีไม่มากนัก ความร้อนแฝงที่ถูกปลดปล่อยออกมายังมีน้อยมาก ในขณะที่ช่วงที่ 3 เฟสของแข็งเริ่มเกิดมากขึ้นเรื่อยๆตามเวลาและมีความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาขณะชิ้นงานเกิดการแข็งตัว อุณหภูมิจึงเริ่มคงที่และสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงท้าย เป็นที่น่าสังเกตว่าอุณหภูมิตอนปลายของช่วงที่ 3 เพิ่มขึ้นสูงทั้งๆที่น่าจะลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกับอุณหภูมিসวนอื่นๆ ที่วัดได้ในชิ้นงาน ทั้งนี้อาจเป็นผลจากสมมติฐานและรูปแบบของสมการที่ใช้ในการคำนวณ ดังนั้นการประมาณอุณหภูมิพื้นผิวทั้งสองฝั่งไปพร้อมๆ กัน (iteration) โดยปรับอุณหภูมิทั้งสองฝั่งเพื่อให้ค่าฟลักซ์ความร้อนที่ไหลออกจากชิ้นงานและเข้าสู่แบบหล่อมีค่าเท่ากัน อาจทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อลดลงอย่างต่อเนื่องยิ่งขึ้น สำหรับช่วงที่ 4 และ 5 เป็นช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิตอน solidus โลหะที่บริเวณดังกล่าวกลายเป็นของแข็งอย่างสมบูรณ์ ความร้อนไหลผ่านโลหะในสภาวะของแข็งเพียงอย่างเดียวและไม่มีปลดปล่อยความร้อนแฝงเนื่องจากการแข็งตัวอีกต่อไป อีกทั้งมีการหล่อเย็นด้วยน้ำทำให้อุณหภูมิของแบบหล่อลดลง เป็นเหตุให้อุณหภูมิใน 2 ช่วงสุดท้ายนี้จึงลดลงอย่างต่อเนื่องในเวลาต่อมา

5.3 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

ช่วงเวลานับตั้งแต่การเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบหล่อจนถึงตอนกลางของช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่โลหะเป็นของเหลวและของแข็งผสมกันเกิดการถ่ายเทความร้อนได้ดี สาเหตุเนื่องจาก (1) ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวกับแบบหล่อค่อนข้างมาก ทำให้ความร้อนไหลผ่านมายังแบบหล่อที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า (2) ยังมีปริมาณของโลหะในเฟสของเหลวเหลืออยู่ซึ่งค่าการนำความร้อนของโลหะในสถานะของเหลวสูงกว่าโลหะในสถานะของแข็ง (3) โลหะชิ้นงานและแบบหล่อยังไม่เคลื่อนตัวออกจากกันกลายเป็นช่องว่างอากาศระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ การความร้อนจึงยังคงถ่ายเทได้ดี เมื่อสิ้นสุดช่วงที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าลดลงและน่าจะมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องในช่วงที่ 4 แต่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้กลับมีค่าสูงขึ้น ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะลักษณะการคำนวณและสมมติฐานที่ใช้

สาเหตุที่เวลาที่ค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขึ้นถึงค่าสูงสุดไม่พร้อมกันนั้นเนื่องจากฟลักซ์ความร้อนเป็นค่าที่ขึ้นกับ thermal gradient เพียงอย่างเดียวในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนขึ้นกับค่าฟลักซ์ความร้อนและ thermal gradient ดังสมการที่ 2.3

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเมื่อไม่พิจารณาและพิจารณาการสะสมพลังงานในวัสดุที่มีค่าแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยนั้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาการสะสมของพลังงานในชั้นผิวแข็งของโลหะที่แข็งตัวแล้วซึ่งขึ้นกับเวลาร่วมด้วย แต่พิจารณาการสะสมของความร้อนในเนื้อแบบหล่อเท่านั้นซึ่งห่างจากริเวณรอยต่อเพียง 2 มิลลิเมตรเท่านั้น อีกทั้งการถ่ายเทความร้อนคิดเพียงทิศทางเดียวทำให้ความกว้างและพื้นที่หน้าตัดไม่มีผลต่อพลังงานสะสมดังกล่าวมากนัก

5.4 การปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

5.4.1 ผลของอุณหภูมิเท

อุณหภูมิเทที่สูงขึ้นส่งเสริมการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อด้วยสาเหตุหลายประการ ประการแรกอุณหภูมิเทที่สูงขึ้นทำให้ thermal gradient บริเวณรอยต่อ

ระหว่างโลหะหลอมเหลวกับแบบหล่อซึ่งเป็นตัวผลักดันให้ความร้อนถ่ายเทไปมีค่าสูงขึ้นการถ่ายเทความร้อนเกิดได้ดีขึ้น ประการที่สองความสามารถในการไหลตัวหรือความหนืดของโลหะหลอมเหลวแปรผกผันกับอุณหภูมิ อุณหภูมิหลอมเหลวที่สูงขึ้นทำให้ความหนืดของโลหะหลอมเหลวลดลง การไหลและการแผ่ตัวของโลหะหลอมเหลวบนพื้นผิวแบบหล่อจึงดีขึ้น ส่งผลให้ผิวสัมผัสระหว่างโลหะหลอมเหลวกับผิวแบบหล่อมมีแนวโน้มสูงขึ้นและขึ้นงานกับแบบหล่อสัมผัสกับได้นานขึ้น ประการที่สามโลหะหลอมเหลวที่เทลงสู่โพรงแบบที่อุณหภูมิต่ำเกิดการแข็งตัวและเกิดช่องว่างได้รวดเร็วกว่าโลหะหลอมเหลวที่เทสู่แบบที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากไม่จำเป็นต้องกำจัดความร้อนส่วนเกินเพื่อเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งมากเท่ากับในกรณีอุณหภูมิสูงกว่า อาจพิจารณาได้จากเวลาที่เริ่มเกิดการแข็งตัวหรือ $t_{zone(1)}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเทสูงขึ้นเวลาที่ใช้ในการแข็งตัวจะมากขึ้นตามไปด้วย

5.4.2 ผลของส่วนผสมของโลหะที่นำมาหล่อ

จากผลการทดลองที่อุณหภูมิเทเท่ากันคือ 1053 K และสภาวะการเคลือบผิวเหมือนกันพบว่าค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของอะลูมิเนียมผสมเกรด A390 สูงกว่าอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 และ A380 ทั้งในกรณีที่สารเคลือบผิวแบบหล่อมีความหนา 100 และ 300 ไมโครเมตร ผลลัพธ์เช่นนี้สามารถอธิบายได้จากการเกิดช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหลอกับสมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมผสมแต่ละชนิด ถ้าชิ้นงานมีการหดตัวมากจะทำให้เกิดช่องว่างบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหลอกว้างขึ้นและการไหลของความร้อนผ่านช่องว่างดังกล่าวจะลดลงตามไปด้วย อะลูมิเนียมผสมทั้ง 3 เกรดต่างกันตรงปริมาณธาตุผสมหลักซึ่งได้แก่ซิลิกอน โดยทั่วไปธาตุซิลิกอนจะทำให้การหดตัวของอะลูมิเนียมผสมลดลงเนื่องจากซิลิกอนมีสัมประสิทธิ์การหดตัวต่ำ ดังนั้นอะลูมิเนียมผสมเกรด A390 ซึ่งมีปริมาณธาตุซิลิกอนถึง 17% จึงน่าจะมีการหดตัวน้อยที่สุด ช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้นก็น่าจะแคบกว่าช่องว่างที่เกิดจากการหดตัวจากอะลูมิเนียมผสม 2 เกรดที่เหลือ นอกจากนี้ความร้อนแฝงของซิลิกอนมีค่าค่อนข้างสูง เมื่ออะลูมิเนียมผสมเกรด A390 เกิดการเย็นตัวจะปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาค่อนข้างมาก เป็นผลให้ค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของ A390 มีค่าสูงสุด แต่เมื่อพิจารณาอุณหภูมิเทและอุณหภูมิหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสมแต่ละชนิดพบว่าผลลัพธ์กลับขัดแย้งกัน จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าโลหะในสภาวะของเหลวจะแผ่ตัวสัมผัสได้ดีและทำให้ความร้อนไหลผ่านบริเวณจุดสัมผัสระหว่างโลหะกับผิวแบบหล่อได้ดี จากเหตุผลดังกล่าวจะสรุปได้ว่าที่อุณหภูมิเท 1053 K อะลูมิเนียมผสมเกรด A380 ซึ่งมีอุณหภูมิ liquidus ต่ำที่สุดจะคงสภาวะของเหลวได้นานที่สุดและสัมผัสกับผิวแบบหล่อได้ดีที่สุดน่าจะให้ค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุด ในขณะที่อะลูมิเนียมผสมเกรด A390 ก็จะแข็งตัวก่อนเนื่องจาก

อุณหภูมิ liquidus สูงที่สุด ค่าฟลักซ์และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณรอยต่อระหว่าง อะลูมิเนียมผสมเกรด A390 กับแบบหล่อก็น่าจะมีค่าที่สุด

สำหรับผลการทดลองเมื่อใช้อุณหภูมิ superheat เป็นเกณฑ์นั้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยของอะลูมิเนียมผสมทั้ง 3 เกรดที่อุณหภูมิ superheat 50 K และ 100 K มีลักษณะขัดแย้งกับผลการทดลองในหัวข้อ 5.3.1 ที่พบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าฟลักซ์และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย โลหะที่มีส่วนผสมทางเคมีแตกต่างกันย่อมมีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ซึ่งก็หมายถึงรวมถึงอุณหภูมิ liquidus ด้วย อะลูมิเนียมผสมแต่ละชนิดมีอุณหภูมิ liquidus มีค่าต่างกันกล่าวคืออุณหภูมิ liquidus ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 A380 และ A390 มีค่าเท่ากับ 888 K 868 K และ 923 K ตามลำดับ การทดลองใช้ superheat เป็นเกณฑ์จึงทำให้อุณหภูมิไม่เท่ากัน เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของโลหะหลอมเหลวมีค่าไม่เท่ากัน temperature gradient ซึ่งเป็นตัวผลักดันให้การถ่ายเทความร้อนดำเนินไปก็แตกต่างกันด้วย ดังตัวอย่างเช่นที่อุณหภูมิ superheat 50 K อุณหภูมิของอะลูมิเนียมผสมแต่ละชนิดคือ 938 K สำหรับ A356 918 K สำหรับ A380 และ 973 K สำหรับ A390 ในกรณีที่โลหะชิ้นงานเป็นอะลูมิเนียมผสมเป็น A390 จะมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคืออะลูมิเนียมผสมเกรด A356 และ A380 ตามลำดับ อีกทั้งค่าการนำความร้อนของอะลูมิเนียมผสมเกรด A380 มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับค่าการนำความร้อนของอะลูมิเนียมผสมอีก 2 ชนิดที่เหลือ จากเหตุผลข้างต้นค่าฟลักซ์ความร้อนในอะลูมิเนียมผสมเกรด A390 จึงน่าจะดีที่สุด รองลงมาคืออะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ไม่ใช่อะลูมิเนียมผสมเกรด A380

กล่าวโดยสรุปคือจากงานวิจัยนี้พบว่าผลของส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมที่มีต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อไม่ชัดเจน

5.4.3 ผลของชนิดของสารเคลือบผิวแบบหล่อ

สารเคลือบผิวที่มีสมบัตินำความร้อนได้ดีทำให้การถ่ายเทความร้อนสูงกว่าสารเคลือบผิวที่มีสมบัติเป็นฉนวนที่ความหนาและที่อุณหภูมิเท่ากัน ที่เป็นเช่นนี้เพราะความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากชั้นสารเคลือบผิวที่มีสมบัตินำความร้อนได้ดีมีค่าต่ำกว่าในกรณีที่สารเคลือบผิวมีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน ความต้านทานการถ่ายเทความร้อน (thermal resistance, R) ในเนื้อวัสดุสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 5.1

$$R = \frac{x}{k}$$

สมการที่ 5.1

จะเห็นได้ว่าค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนในวัสดุ (R) เป็นปฏิภาคผกผันกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในสมการที่ 2.22

สิ่งที่กำหนดความต้านทานการไหลของความร้อนผ่านชั้นวัสดุโดยตรงก็คือความหนา (x) และค่าการนำความร้อน (k) ของวัสดุนั้นๆ กรณีที่สารเคลือบผิวมีสมบัตินำความร้อนดี ค่าการนำความร้อนมีค่าสูงย่อมส่งผลให้ความต้านทานในของชั้นเคลือบลดลง วัสดุเซรามิกส์ส่วนใหญ่มีค่าการนำความร้อนอยู่ในช่วงประมาณ $0.4 - 4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ในขณะที่ค่าการนำความร้อนของกราไฟต์มีค่าประมาณ $180 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ²⁵ จะเห็นได้ว่าค่าการนำความร้อนของกราไฟต์กับวัสดุเซรามิกส์นั้นแตกต่างกันประมาณ 10-100 เท่า ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นเคลือบที่มีกราไฟต์เป็นส่วนผสมหลักเกิดขึ้นได้ดีกว่าชั้นเคลือบที่มีเซอร์โคเนียมซิลิเกตเป็นส่วนผสมหลัก

5.4.4 ผลของความหนาของสารเคลือบผิวแบบหล่อ

สารเคลือบผิวที่มีความหนาทำให้การถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานไปยังแบบหล่อลดลง ทั้งนี้สามารถอธิบายจากสมการที่ 5.1 ได้เช่นกัน ความหนาที่เพิ่มขึ้นทำให้ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นเมื่อสารเคลือบผิวเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน นอกจากนี้สาเหตุอีกประการหนึ่งที่ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงคือโอกาสที่ช่องว่างหรือฟองอากาศจะแทรกอยู่ในชั้นสารเคลือบผิว ดังภาพที่ 33 ช่องว่างเหล่านี้เป็นตัวที่ขัดขวางการนำความร้อนผ่านชั้นเคลือบ นอกจากนี้เมื่อเคลือบผิวด้วยความหนา โอกาสที่สารเคลือบผิวจะเกิดการปริแตกขนาดเล็กภายในชั้นเคลือบเนื่องจากการดึงรั้งจากการหดตัวภายหลังที่เคลือบแห้งดีแล้วมีสูงและทำให้อากาศแทรกตัวอยู่ระหว่างรอยปริแตกเหล่านี้ได้ จากภาพที่ 29(ก) อุณหภูมิที่วัดได้ในฝั่งแบบหล่อและปลั๊กซ์ความร้อนที่ไหลผ่านรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวที่หนานั้น ในช่วงแรกสูงขึ้นและลดลงก่อนที่จะค่าจะขึ้นถึงค่าสูงสุด สาเหตุเกิดเมื่อโลหะหลอมเหลวสัมผัสกับชั้นผิวเคลือบ พลังงานความร้อนบางส่วนจะถูกอากาศที่แทรกอยู่ระหว่างชั้นเคลือบจะดึงออกไปทำให้อากาศขยายตัวและลอยเข้าสู่โลหะหลอมเหลว เมื่ออากาศออกจากชั้นเคลือบแล้วอุณหภูมิจะสูงขึ้นอีกครั้งจนถึงค่าสูงสุด

บทที่ 6

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

- 6.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและค่าฟลักซ์ความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อเป็นค่าที่แปรเปลี่ยนกับเวลา กล่าวคือค่าทั้งสองเพิ่มขึ้นในช่วงแรกจนถึงค่าสูงสุดก่อนที่จะค่อยๆ ลดลงกับเวลา
- 6.1.2 อุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวที่สูงส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อสูงขึ้น
- 6.1.3 สารเคลือบผิวที่มีค่าการนำความร้อนสูงช่วยให้อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อสูงขึ้น หากสภาวะการหล่อหลอมและการเคลือบแบบหล่อเหมือนกัน
- 6.1.4 อัตราการถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อลดลงเมื่อความหนาของสารเคลือบผิวแบบหล่อเพิ่มขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

- 6.2.1 ควรมีการเผากรอบอกปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนของผนังแบบหล่อให้มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องเพื่อช่วยให้การถ่ายเทความร้อนเกิดในทิศทางตามแนวแกน
- 6.2.2 ควบคุมปัจจัยอื่นๆ ที่อาจมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานให้รัดกุมยิ่งขึ้น เช่น อุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวก่อนเทเข้าสู่แบบ ความเร็วในการเทโลหะหลอมเหลว
- 6.2.3 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงาน ได้แก่ อัตราการเพิ่มสัดส่วนของแข็งขณะเกิดการแข็งตัว และสมบัติทางกายภาพของวัสดุ อาทิ ค่าความร้อนแฝงของการแข็งตัวของโลหะ ค่าความจุความร้อนและความหนาแน่นของวัสดุล้วนเป็นค่าที่

ขึ้นกับเวลาและอุณหภูมิตั้งขึ้น ดังนั้นค่าตัวแปรดังกล่าวควรมีความละเอียดยิ่งขึ้น
ตลอดจนพิจารณาปรากฏการณ์อื่นๆที่เกี่ยวข้องร่วมด้วย

- 6.2.4 การควบคุมความหนาของสารเคลือบผิวแบบหล่อควรใช้การสเปรย์สารเคลือบผิวแทน
การทา เพราะจะให้ผิวสารเคลือบผิวที่มีความหนาสม่ำเสมอกว่า และควรมีการตรวจ
วัดความหนาอย่างละเอียด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Davis, J. R., et al. Metal Handbook. Vol.15. 9 th ed. : Casting. United State of Umerica: ASM International, 1991.
2. Ohkana, I.; Nagasaka, Y.; and Murakami, T. A. Computer Simulation System of Casting Processes for Concurrent Engineering Approach. 4th Pacific Conference of Modeling of Casting, and Solidification Processes (1994) : 46-51
3. Lee, Y. C.; Choi, J. K.; and Hong, C. P. Development of an Integrated Simulation System and Its Application to Casting Design. 4th Pacific Conference of Modeling of Casting, and Solidification Processes (1994) : 52-57
4. Takahashi, I.; and Uchida, T. Development of Hicass for Modelling of Casting Processes. 4th Pacific Conference of Modeling of Casting and Solidification Processes (1994) : 40-41
5. Geiger, G.H.; and Pourier, D.R. Transport Phenomena in Materials Processing. United state of America: TMS, 1994 .
6. Incropera, F. P.; and DeWitt, D. P. Introduction to Heat Transfer. 2 nd ed. Singapore: John Wiley & Sons, 1990.
7. Jorstad, J. L.; and Reynolds, W.M. Aluminum Casting Technology. 2 nd ed. United State of America: American Foundrymen's Society, 1997.
8. Campbell, J. Casting. 2 nd ed. Singapore: John Wiley & Sons, 1990.
9. Flemings, M. C. Solidification Processing. United state of America : McGraw-Hill, 1974.

10. Ho, K.; and Pehlke, R. D. Mechanism of Heat Transfer at a Metal-Mold Interface. AFS Transaction vol. 61 (1984): 587-598
11. Griffiths, W. D. A Model of the interfacial Heat Transfer Coefficient during Unidirectional Solidification of an Aluminum Alloy. Metallurgical and Material Transaction vol. 31B (April 2000): 285-295
12. Prates, M.; and Biloni, H. Variables affecting the Nature of the Chill Zone. Metallurgical Transaction vol.3 (June 1972): 1501-1510
13. Ho, K.; and Pehlke, R. D. Transient Methods for Determination of Metal-Mold Interfacial Heat Transfer. AFS Transaction vol. 80 (1983): 689-698
14. Rappaz, M.; et al. Application of Inverse Methods to the Estimation of Boundary Conditions and Properties. Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes 7 Mineral, Metal and Material Society. (1995): 449-457
15. Muojekwu, C. A.; Samarasekera, I. V.; and Brimacombe, J. K. Heat Transfer and Microstructure during the Early Stages of Metal Solidification. Metallurgical and Materials Transaction vol. 26 (April 1995): 361-382
16. Wei, S.; Dillingham, J.; Jiranek, M. R., et al. Influence of Mold Coating on Heat Transport in Permanent Mold Casting Process. AFS Transactions vol. 90 (1996): 251-262
17. Hong, C. P.; Umeda, T.; and Kimura, Y. Numerical Models for Casting Solidification: Part2. Application of the Boundary Element Method to Solidification Problems. Metallurgical Transaction vol. 15B (March 1984): 101-107
18. Sugiyama, M.; Umeda, T.; Takeuchi, H.; and Kato, H. Heat Transfer Coefficient of Metal-Mold Interface in the Metal Mold Casting of Copper Alloy. IMONO JFS Transaction vol.47 (1974): 820-826

19. Umeda, T.; Takeuchi, H.; Kato, H.; and Sugiyama, M. Influence of the Solute Content of Aluminum Alloy on the Heat Transfer in Mold Casting. IMONO JFS Transaction vol. 47 (1975): 809-815
20. Sugiyama, M.; Umeda, T.; Takeuchi, H.; and Kato, H. Heat Transfer in Mold-Casting. IMONO JFS Transaction vol.47 (1975): 178-183
21. Hong, S.; Backman, D. G.; and Mehrabian, R. Heat Transfer Coefficient in Aluminum Alloy Die Casting. Metallurgical Transaction vol. 10B (June 1979): 299-301
22. Papai, J.; and Mobley, C. Die Thermal Fields and Heat Fluxes during Die Casting of 380 Aluminum alloy in H-13 Steel Dies. Congress and Exposition: Driving Die Casting into 21st Century, North American Die Casting Association (NADCA), pp. 377-385. United State of America, 1991.
23. Michael, F.; Louchez, P. R.; and Samuel, F. H. Heat Transfer Coefficient during Solidification of Al – Si Alloys : Effects of Mold Temperature, Coating Type and Thickness. AFS Transaction vol.9 (1995): 275-283
24. Kim, T. G. and Lee, Z. H. Time varying Heat Transfer Coefficient between Tube-Shaped Casting and Metal Mold. International Journal of Heat and Mass Transfer vol. 40, no.15 (1997): 3515-3525
25. Kingery, W. D.; Bowen, H. K.; and Uhlmann, D. R. Introduction to Ceramics. 2 nd ed. Singapore: John Wiley & Sons, 1976.
26. ปราโมทย์ เตชะอำไพ. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
27. Kurz, W.; and Fisher, D. J. Fundamental of Solidification. 3 rd ed. Netherlands: Trans Tech Publications, 1989.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีวัดความหนาของสารเคลือบผิวบนแบบหล่อ

วิธีวัดความหนาของสารเคลือบผิวบนแบบหล่อมียุ่ขั้นตอนดังนี้

1. ตัดเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 (SKD61) ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เซนติเมตรตามแนวขวางแกนให้สูงประมาณ 1.5-2 เซนติเมตร ปาดผิวหน้าด้วยเป็นระนาบเรียบด้วยเครื่องกลึงและตัดแบ่งครึ่งตามแนวนานแกนให้สมมาตรกัน
2. นำชิ้นเหล็กกล้ามาขัดให้ผิวเรียบอีกครั้งด้วยกระดาษทรายและผ้าขัดกับผงอะลูมินา
3. ไข่แปรงจุ่มลงในสารเคลือบผิวแบบหล่อและทาลงบนผิวหน้าของเหล็กกล้าที่ประกบกันพอดีให้ทั่ว ทิ้งไว้ให้แห้งหรือเป่าด้วยเครื่องเป่าผมจนเคลือบแห้งสนิท
4. แยกชิ้นเหล็กกล้าที่ประกบกันอยู่ออกซ้่าๆแล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ,SEM) โดยวางชิ้นเหล็กกล้าในแนวที่สามารถเห็นรอยต่อระหว่างชิ้นเหล็กกล้ากับสารเคลือบผิวแบบหล่อได้ชัดเจน
5. ส่องดูเคลือบบริเวณต่างๆตลอดแนวรอยต่อเพื่อประมาณความหนาของเคลือบอย่างคร่าวๆจากจิคบอกระยะที่ปรากฏบนจอกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
6. หลังจากนั้นนำชิ้นเหล็กกล้าอีกชิ้นหนึ่งมาล้างผิวให้สะอาด นำมาทดสอบด้วยเครื่องวัดความแข็งแบบ Vicker และ Microvicker ที่น้ำหนักต่างๆกันกล่าวคือ 50, 100, 200, 300, 500, 1000, 2000, 5000, 10000, 20000 กรัม น้ำหนักละ 4-5 จุด ลักษณะห้วกด vicker และ microvicker แสดงอยู่ดังภาพที่ 34 การคำนวณความลึกรอยกดจากฐานปริมาตรจนยอดของปริมาตรจากค่าเส้นทแยงมุม (D_1 และ D_2) ที่อ่านได้จากเครื่องวัดความแข็ง ขั้นตอนการคำนวณมีดังนี้

- 6.1) หาเส้นทแยงมุมเฉลี่ยของปริมาตร

$$\bar{D} = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

สมการที่ ก.1

- 6.2) หาความยาวฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัสของปริมาตรจากกฎพีทาโกรัส

$$a^2 + b^2 = c^2$$

สมการที่ ก.2

เมื่อ a และ $b =$ ด้านประกอบมุมฉากด้านที่ 1 และ 2

$$c = \text{ด้านตรงข้ามมุมฉาก}$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$a = \sqrt{\frac{D^2}{2}}$$

สมการที่ ก.3

6.3) หาคความยาวสั้นของพีรามิดจากตรีโกณมิติ

$$l = \frac{a}{2} \sin 68^\circ$$

สมการที่ ก.4

6.4) หาคความสูงของพีรามิดจากกฎพีทาโกรัส

$$h = \sqrt{l^2 + \frac{D^2}{2}}$$

สมการที่ ก.5

7. เมื่อทราบความสูงของพีรามิดจากการคำนวณแล้ว นำชิ้นเหล็กกล้าที่กดด้วยหัวกดมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscope) โดยการโฟกัสที่รอยกดบริเวณผิวเหล็ก (ซึ่งก็คือฐานของพีรามิด) ให้ชัดเจนก่อน จากนั้นจึงปรับโฟกัสไปที่ยอดพีรามิดที่อยู่ลึกเข้าไปให้ผิวเหล็กกล้าด้วยการปรับปุ่มปรับภาพหยาบ (Coarse Adjustment) สังเกตที่ขีดบอกตำแหน่งที่ปุ่มปรับภาพว่าระยะระหว่างผิวเหล็กกล้ากับยอดพีรามิดต้องหมุนปุ่มปรับภาพหยาบไปที่ขีด
8. สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนขีดที่เปลี่ยนไปเพื่อปรับระยะ โฟกัสกับความสูงของพีรามิด และใช้กราฟนี้เป็นกราฟมาตรฐานในการวัดขั้นต่อไป
9. ในการวัดความหนาของสารเคลือบผิวนั้น จะทำได้ด้วยการนำชิ้นงานที่เคลือบผิวเรียบร้อยแล้วมาชุบเคลือบออกเล็กน้อยแล้วจึงนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ ขั้นแรกต้องโฟกัสที่ผิวเคลือบก่อนแล้วปรับโฟกัสไปยังบริเวณที่เป็นผิวเหล็ก คู่อำนาจขีดบนปุ่มปรับภาพหยาบที่ใช้ในการปรับโฟกัสและอ่านค่าจากกราฟมาตรฐานที่ได้มาแล้วข้างต้น ทดสอบที่หลายๆ บริเวณจึงจะทราบความหนาเฉลี่ยของสารเคลือบผิวตามต้องการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

การประมาณข้อมูลด้วยการถดถอยแบบน้อยสุด²⁶

การถดถอยเป็นกระบวนการสร้างสมการเส้นแนวโน้มที่ให้ค่าตอบเข้ากับข้อมูลทางวิทยาศาสตร์หรือทางวิศวกรรมซึ่งมักเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง สมการเส้นแนวโน้มที่สร้างขึ้นอาจเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งก็ได้แล้วแต่การกระจายของข้อมูล แต่สมการเส้นแนวโน้มจะต้องพยายามให้เกิดค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขชนิดนี้เรียกว่า “การถดถอยแบบน้อยสุด” (least-square regression) ในงานวิจัยนี้ใช้การถดถอยแบบน้อยสุดเพื่อประมาณอุณหภูมิบริเวณผิวรอยต่อทั้งฝั่งขึ้นงานและแบบหล่อ ซึ่งใช้การถดถอยแบบเชิงเส้นและการถดถอยแบบพหุนามตามลำดับ

การถดถอยเชิงเส้น (linear regression) เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการสร้างสมการเส้นแนวโน้มหรือประดิษฐ์ฟังก์ชันสำหรับข้อมูลใดๆ ถ้าหากชุดข้อมูลประกอบด้วย x_i และ y_i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$ จำนวน n ข้อมูล จะได้ว่า

$$g(x_i) = a_0 + a_1(x_i) \quad \text{สมการที่ ข.1}$$

เมื่อ a_0 และ a_1 เป็นค่าคงที่ไม่ทราบค่าซึ่งต้องคำนวณจากเงื่อนไขที่ว่าสมการเส้นแนวโน้มที่ประดิษฐ์ขึ้นจะต้องให้ค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยน้อยที่สุดจากทุกข้อมูล หากกำหนดให้ $g(x_i)$ เป็นฟังก์ชันเส้นแนวโน้มที่สร้างขึ้น $d(x_i)$ เป็นค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่ง x_i และ E เป็นค่าความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดขึ้นจาก n ข้อมูล จะได้ว่า

$$E = \sum_{i=1}^n [d(x_i)]^2 \quad \text{สมการที่ ข.2}$$

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - g(x_i)]^2 \quad \text{สมการที่ ข.3}$$

แทนสมการที่ (ข.1) ลงในสมการที่ (ข.3)

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1(x_i))]^2 \quad \text{สมการที่ ข.4}$$

การหาค่าคงตัวที่ไม่ทราบค่า a_0 และ a_1 สามารถใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดจากวิธีการหาค่าต่ำสุด (minimization) ของค่าความผิดพลาดที่เกี่ยวข้องกับตัวที่ไม่ทราบค่าด้วยการหาอนุพันธ์เทียบกับตัวที่ไม่ทราบค่าตัวนั้น

$$\frac{dE}{da_0} = 0 \quad \text{สมการที่ ข.5/1}$$

$$\frac{dE}{da_1} = 0 \quad \text{สมการที่ ข.5/2}$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ ข.5/1 และ ข.5/2 จะได้ว่า

$$na_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_1 = \sum_{i=1}^n y_i \quad \text{สมการที่ ข.6/1}$$

$$\text{และ } \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_1 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad \text{สมการที่ ข.6/2}$$

ซึ่งจะเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่งว่า

$$a_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad \text{สมการที่ ข.7}$$

$$\text{และ } a_1 = \frac{n\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2} \quad \text{สมการที่ ข.8}$$

วิธีการถดถอยแบบเชิงเส้นเพื่อประมาณอุณหภูมิบริเวณผิวรอยต่อทั้งฝั่งชิ้นงาน และยังประยุกต์ใช้ในการหาสมการเส้นแนวโน้มของ error function สำหรับอุณหภูมิบริเวณผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อด้วย

การถดถอยแบบพหุนาม (polynomial regression) เป็นวิธีการสร้างสมการเส้นแนวโน้มสำหรับข้อมูลที่มีการกระจายโดยทั่วไปไม่อยู่ในรูปเชิงเส้น ขั้นตอนระเบียบวิธีการถดถอยแบบพหุนามมีลักษณะคล้ายกับแบบเชิงเส้นแต่แตกต่างกันตรงรูปแบบสมการ กล่าวคือชุดข้อมูลประกอบด้วย x_i และ y_i เมื่อ $i=1,2,\dots, n$ จำนวน n ข้อมูล สำหรับฟังก์ชันพหุนามอันดับที่ m

$$g(x) = a_0 + a_1(x) + a_2(x)^2 + \dots + a_m(x)^m \quad \text{สมการที่ ข.9}$$

เมื่อ a_0, a_1, \dots, a_m เป็นค่าคงที่ไม่ทราบค่าซึ่งมีทั้งหมด $m + 1$ ตัว ในการหาค่าคงตัวไม่ทราบค่าใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดเช่นเดียวกับแบบเชิงเส้น

$$E = \sum_{i=1}^n [d(x_i)]^2 \quad \text{สมการที่ ข.10}$$

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - g(x_i)]^2 \quad \text{สมการที่ ข.11}$$

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1(x_i) + \dots + a_m(x)^m)]^2 \quad \text{สมการที่ ข.12}$$

โดยหาค่าต่ำสุดของความผิดพลาดโดยเฉลี่ยที่เกี่ยวข้องกับตัวที่ไม่ทราบค่า ก่อให้เกิดระบบสมการที่ประกอบด้วยสมการย่อย $m + 1$ ชุด

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dE}{da_0} = 0 \\ \frac{dE}{da_1} = 0 \\ \vdots \\ \frac{dE}{da_m} = 0 \end{array} \right\} m + 1 \text{ สมการ} \quad \text{สมการที่ ข.13}$$

ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับค่าคงตัวที่ไม่ทราบค่าแต่ละตัว ดังตัวอย่างสมการแรกและสมการที่สองของระบบสมการที่สร้างขึ้นคือ

$$na_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_2 + \dots + \left(\sum_{i=1}^n x_i^m \right) a_m = \sum_{i=1}^n y_i \quad \text{สมการที่ ข.14/1}$$

$$\left(\sum_{i=1}^n x_i \right) a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) a_1 + \dots + \left(\sum_{i=1}^n x_i^{m+1} \right) a_m = \sum_{i=1}^n x_i y_i \quad \text{สมการที่ ข.14/2}$$

ระบบสมการดังกล่าวเขียนในรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^m \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m & \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} & \sum_{i=1}^n x_i^{m+2} & \dots & \sum_{i=1}^n x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^m y_i \end{Bmatrix}$$

สมการที่ ข.15

จากนั้นคำนวณค่าคงที่ไม่ทราบค่า a_0, a_1, \dots, a_m ซึ่งมีทั้งหมด $m + 1$ ตัว ได้จากวิธีการแก้ระบบสมการแบบเกาส์ (Gauss Elimination method) ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

การประมาณค่า error function²⁷

สำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนในทิศทางเดียวและไม่พิจารณาพลังงานที่เกิดขึ้นในระบบ (heat generation) หากกำหนดให้ $\alpha (= \frac{k}{\rho C_p})$ เป็นค่าคงที่ การกระจายอุณหภูมิที่ตำแหน่งและเวลาต่างๆเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad 0 \leq x \leq \infty \quad \text{สมการที่ ค.1}$$

$$\frac{T - T_s}{T_o - T_s} = \text{erf} \left(\frac{x}{z \sqrt{\alpha t}} \right) \quad \text{สมการที่ ค.2}$$

อาจเขียนสมการที่ ค.2 ในรูปทั่วไปได้ว่า

$$T(x, t) = A \cdot \text{erf}(Z) + B \quad \text{สมการที่ ค.3}$$

เมื่อ $A = T_o - T_s$

$$B = T_s$$

$$Z = \frac{x}{2(\alpha t)^{1/2}} \quad \text{เมื่อ } 0 < t$$

จากสมการ ค.3 จะเห็นได้ว่ามีลักษณะคล้ายกับสมการเส้นตรง $T(x) = A + B(x)$ แสดงว่าสามารถประยุกต์ใช้การถดถอยเชิงเส้นกับ error function ได้ดังที่กล่าวในภาคผนวก ข

อุณหภูมิที่ตำแหน่งและ ณ เวลาใดๆ เป็นค่าเฉพาะที่ขึ้นกับ $\text{erf}(Z)$ ซึ่ง $\text{erf}(Z)$ ก็เป็นค่าคงตัวที่ตำแหน่งและเวลาใดๆเช่นกัน

$$\text{erf}(Z) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_{-\infty}^Z \exp(-Z^2) dZ \quad \text{สมการที่ ค.4}$$

ค่า $\text{erf}(Z)$ สามารถคำนวณได้จากการประมาณ

$$\text{erf}(Z) = 1 - (a_1 c + a_2 c^2 + a_3 c^3 + a_4 c^4 + a_5 c^5) \exp(-Z^2) \quad \text{สมการที่ ค.5}$$

เมื่อ $c = \frac{1}{1 + a_0 Z}$

และ

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.3275911 & a_1 &= 0.254829592 & a_2 &= -0.284496736 \\ a_3 &= 1.421413741 & a_4 &= -1.453152027 & a_5 &= 1.061405429 \end{aligned}$$

ขั้นตอนในการประมาณอุณหภูมิที่ตำแหน่งและเวลาใดๆเริ่มจากหาค่า Z จาก ตำแหน่งและเวลาที่สนใจและใช้สมการที่ ค.5 หาค่า $erf(Z)$ เพื่อแทนลงในสมการที่ ค.2 ต่อไป หรืออาจใช้วิธีการประมาณค่าในช่วง (interpolation) โดยใช้ตารางค่า error function ซึ่งเป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z กับ $erf(Z)$ ในตารางที่ 17 ก็ได้เช่นกัน

ค่าอุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุหาได้จากสมการ ค.3

$$T_s = A \cdot erf(0) - B = B \quad \text{สมการที่ ค.6}$$

และค่าฟลักซ์ความร้อนหาได้จากสมการ 2.1 โดยการหาอนุพันธ์ของสมการ ค.3 เทียบกับระยะทาง

$$q = -k \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = -k \left[\frac{A}{\pi \alpha t} \right] \quad \text{สมการที่ ค.7}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ส่วนผสมทางเคมีของสารเคลือบผิวแบบหล่อ

สารเคลือบผิวที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีด้วยกัน 2 ชนิดคือ

- (1) สารเคลือบผิวที่มีสมบัตินำความร้อน (white coating)
- (2) สารเคลือบผิวที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน (graphite-based coating)

ชื่อทางการค้าของสารเคลือบผิวที่มีสมบัตินำความร้อนและสารเคลือบผิวที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อนคือ Graphite I75L™ และ Zirox25™ ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD) ของสารเคลือบผิวทั้ง 2 ชนิดแสดงอยู่ในภาพที่ 35 และภาพที่ 36 พบว่าสารเคลือบผิวที่มีสมบัตินำความร้อน (Graphite I75L™) ประกอบด้วยกราไฟต์ ซิลิกา Muscovite และ Kaolinite (ดินขาว) ส่วนสารเคลือบผิวที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน (Zirox25™) นั้นประกอบด้วยเซอร์โคเนียมซิลิเกตเพียงอย่างเดียว

ส่วนผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence (XRF) ของสารเคลือบผิวทั้งสองชนิดนั้น เป็นดังต่อไปนี้

Graphite I75L™ เครื่อง XRF ไม่สามารถตรวจวัดปริมาณของคาร์บอน (C) ในรูปของกราไฟต์ได้ เนื่องจากคาร์บอนเป็นธาตุเบา แต่เครื่องสามารถตรวจจับปริมาณของซิลิกา อะลูมินา นอกจากนี้ยังพบออกไซด์ของธาตุอัลคาไลน์และอัลคาไลน์เอิร์ทตัวอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบของ Muscovite และ Kaolinite เช่น Na K Ca Mg ซึ่งอออนของธาตุเหล่านี้สามารถแทนที่กันเองในโครงสร้างได้ อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบโดยประมาณของ Graphite I75L™ จากบริษัท Werner Hartmann Industrial ซึ่งเป็นผู้ผลิตสารเคลือบผิวดังกล่าวระบุไว้ว่าเคลือบประกอบด้วย “กราไฟต์อยู่ในช่วง 50-80 % ผสมกับสารประกอบเซรามิกส์อีกราว 20-50%” ส่วนผสมโดยประมาณคือ

คาร์บอน	ประมาณ 65 %
Volatile matter	ละทิ้งได้ (insignificant)
จีเถ้า	ประมาณ 30 %
ความชื้น	ประมาณ 2 %

Zirox25 ประกอบด้วย ZrO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 และออกไซด์ของธาตุอัลคาไลน์ อัลคาไลน์เอิร์ท และธาตุทรานซิชัน เช่น K_2O , CaO , TiO_2 , Fe_2O_3 , Na_2O , MgO อีกเล็กน้อย การปริมาณของออกไซด์ที่ตรวจวัดได้จาก XRF คือ Na_2O 0.34 ส่วน MgO 0.738 ส่วน Al_2O_3 1.7 ส่วน SiO_2 30.388 ส่วน P_2O_5 0.797 ส่วน K_2O 0.04 ส่วน CaO 0.185 ส่วน TiO_2 0.18 ส่วน Fe_2O_3 0.135 ส่วน และ ZrO_2 44.345 ส่วน รวมทั้งสิ้น 78.8 ส่วน

จากข้อมูลดังกล่าวนำมาหาปริมาณ $ZrSiO_4$ โดยน้ำหนักในเคลือบได้ดังนี้

compound	XRF results	%	molecular weight	mole	mole fraction	mole fraction × molecular weight
Na_2O	0.34	0.43	62	0.0069	0.0097	0.6014
MgO	0.738	0.93	40	0.0233	0.0328	1.312
Al_2O_3	1.7	2.16	102	0.0213	0.0300	3.0600
SiO_2	30.388	38.54	60	0.1853*	0.2610	15.66
P_2O_5	0.79	1.01	142	0.0071	0.0100	1.42
K_2O	0.04	0.05	94	0.0005	0.0007	0.0658
CaO	0.185	0.24	56	0.0043	0.0061	0.3416
TiO_2	0.18	0.22	80	0.0029	0.0041	0.328
Fe_2O_3	0.135	0.16	159.6	0.0011	0.0016	0.2554
ZrO_2	44.345	56.26	123	0.4574	0.6440	79.212
total	78.8	100		0.7101	1	102.26

*เนื่องจาก ZrO_2 ทั้งหมดกลายเป็น $ZrSiO_4$ ($ZrO_2 \cdot SiO_2$) ซึ่งจะได้ว่า ZrO_2 1 โมล จะจับกับ SiO_2 1 โมล ในที่นี้จำนวนโมลของ ZrO_2 เท่ากับ 0.4574 ดังนั้น SiO_2 ที่จับกับ ZrO_2 จึงเท่ากับ 0.4574 เช่นกัน จำนวนโมลของ SiO_2 ที่คำนวณได้จริงคือ 0.6427 เพราะฉะนั้นปริมาณของ “free silica” จึงมีค่าเท่ากับ $0.6427 - 0.4574 = 0.1853$ และปริมาณของ $ZrSiO_4$ จะเท่ากับปริมาณ ZrO_2 ที่มีอยู่ด้วยเช่นกัน

จะได้ว่า ปริมาณของ $ZrSiO_4$ โดยน้ำหนักมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{amount of } ZrSiO_4(\text{ by weight }) &= \frac{\text{mole of } ZrO_2 \times \text{molecular wt. of } ZrO_2}{\text{total mole of coating} \times \text{molecular wt. of coating}} \\ &= \left(\frac{123 \times 0.4574}{0.7101 \times 102.26} \right) = 0.7748 \end{aligned}$$

∴ ปริมาณของ $ZrSiO_4$ เป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก = 77.48 %

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของปูนซีเมนต์ทนไฟ

สมบัติ	CAST 17M™
<u>Classification</u>	High-alumina castable ASTM C401-91, Class F
<u>Chemical composition</u>	
Al ₂ O ₃ (alumina)	85.7 %
SiO ₂ (silica)	6.2 %
Fe ₂ O ₃ (iron oxide)	1.6 %
Max. grain size of aggregate	5 mm
Amount of water required for casting	10-15 %
<u>Mechanical properties</u>	
Modulus of rupture	
after drying at 110 °C	70 kg cm ⁻²
after heating at 1705 °C	90 kg cm ⁻²
Cold crush strength	
after drying at 110 °C	400 kg cm ⁻²
after heating at 1705 °C	700 kg cm ⁻²
<u>Thermo-physical properties (typical)</u>	
Thermal conductivity	
400 °C (673 K)	0.157 W m ⁻¹ K ⁻¹
600 °C (873 K)	0.161 W m ⁻¹ K ⁻¹
800 °C (1073 K)	0.142 W m ⁻¹ K ⁻¹
Thermal expansion	
600 °C (873 K)	0.33 %
800 °C (1073 K)	0.52 %
1000 °C (1273 K)	0.70 %
Bulk density	2650 kg m ⁻³
Apparent density	2310 kg m ⁻³
Heat capacity	0.778 kJ kg ⁻¹ K ⁻¹

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนเกรด H13

% ธาตุผสม	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
H13	0.405	0.35	1.0	5.125	1.425	1.0

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของเหล็กกล้าเครื่องมือทำงานร้อนเกรด H13

สมบัติทางกายภาพ	H13
Thermal conductivity, $W m^{-1} K^{-1}$	25.6
Heat capacity, $kJ kg^{-1} K^{-1}$	0.483
Density, $kg m^{-3}$	7850
Liquidus temperature, K	1693
Solidus temperature, K	-
Latent heat of solidification, $kJ kg^{-1}$	-

ตารางที่ 4 ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของ	% ธาตุผสม								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al alloy									
A356	7.07	0.084	<0.001	<0.001	0.243	<0.001	<0.001	0.068	92.57
A380	9.82	1.021	2.211	0.132	0.234	0.030	0.747	0.046	85.56
A390	18.12	0.886	4.897	0.163	0.640	0.052	0.615	0.030	74.30

ตารางที่ 5 สมบัติทางกายภาพและทางความร้อนของอะลูมิเนียมผสมที่ใช้ในการทดลอง

สมบัติทางกายภาพ	ชนิดของอะลูมิเนียมผสม		
	A356	A380	A390
Thermal conductivity, $W m^{-1} K^{-1}$	159	96	134
Heat capacity, $kJ kg^{-1} K^{-1}$	0.88	0.963	0.853
Density, $kg m^{-3}$	2680	2740	2730
Liquidus temperature, K	888	868	923
Solidus temperature, K	828	813	778
Latent heat of solidification, $kJ kg^{-1}$	389	389	778

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวหนาประมาณ 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ชนิดเคลือบ	อุณหภูมิเท (K)	ฟลักซ์ความร้อน×10 ⁵ (W m ⁻²)		สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(W m ⁻² K ⁻¹)	
		เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
white coating	T _L + 50	2.477	6.042	2343	3001
	T _L + 100	2.566	6.316	2535	3317
	T _L + 150	3.461	9.360	4475	5686
graphite based coating	T _L + 50	2.874	6.651	2587	4481
	T _L + 100	3.156	7.719	3910	5925
	T _L + 150	3.391	9.875	4972	8201

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย ค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมที่มีส่วนผสมทางเคมีต่างกัน กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating ที่ (ก) อุณหภูมิเดียวกัน และ (ข) อุณหภูมิ superheat เท่ากัน

(ก) ที่อุณหภูมิเท 1053 K

ความหนาเคลือบ (μm)	ชนิดของอะลูมิเนียมผสม	ฟลักซ์ความร้อน×10 ⁵ (W m ⁻²)		สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน(W m ⁻² K ⁻¹)	
		เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
100 ± 20	A356	2.646	8.978	3481	6508
	A380	2.546	10.31	2589	7193
	A390	2.764	8.11	3774	7332
300 ± 30	A356	2.092	4.682	1506	2620
	A380	2.044	3.823	1305	1951
	A390	2.461	5.155	1737	2740

(ข) ที่อุณหภูมิ superheat เท่ากันและความหนาเคลือบอยู่ในช่วง 100 ± 20 ไมโครเมตร

อุณหภูมิเท (K)	ชนิดของ อะลูมิเนียม ผสม	ฟลักซ์ความร้อน $\times 10^5$ (W m ⁻²)		สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (W m ⁻² K ⁻¹)	
		เฉลี่ย	สูงสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
T _L +50	A356	2.477	6.042	2343	3001
	A380	2.573	7.491	3805	6139
	A390	2.754	7.478	2624	3333
T _L +100	A356	2.566	6.316	2535	3317
	A380	2.818	7.603	3854	5885
	A390	3.185	9.657	3422	4916

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยและค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด
(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วยสารเคลือบต่างชนิดกัน ที่ช่วงความหนาของสารเคลือบผิวประมาณ 100 ± 20 ไมโครเมตรและที่อุณหภูมิเทเดียวกัน (เมื่อ W = white coating และ G = graphite-based coating)

(ก) ค่าฟลักซ์ความร้อน

อุณหภูมิเท (K)	ฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย $\times 10^5$ (W m ⁻²)		ฟลักซ์ความร้อนสูงสุด $\times 10^5$ (W m ⁻²)	
	W	G	W	G
T _L + 50	2.477	6.042	2.874	6.651
T _L + 100	2.566	6.315	3.156	7.179
T _L + 150	3.461	9.360	3.391	9.875

(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

อุณหภูมิเท (K)	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (W m ⁻² K ⁻¹)		สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุด (W m ⁻² K ⁻¹)	
	W	G	W	G
T _L + 50	2343	2587	3001	4482
T _L + 100	2535	3910	3317	5926
T _L + 150	4474	4972	5626	8021

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ยและค่าฟลักซ์ความร้อนสูงสุด
(ข) ค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสม กับแบบหล่อที่เคลือบด้วยสารเคลือบผิวที่ชนิดและช่วงความหนาต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิ 1053 K

(ก) ค่าฟลักซ์ความร้อน

ชนิดของอะลูมิเนียมผสม	ชนิดเคลือบ	ฟลักซ์ความร้อนเฉลี่ย $\times 10^5$ ($W m^{-2}$)		ฟลักซ์ความร้อนสูงสุด $\times 10^5$ ($W m^{-2}$)	
		100 μm	300 μm	100 μm	300 μm
A356	white coating	2.646	2.092	8.978	4.682
	graphite coating	2.508	2.035	9.053	6.046
A380	white coating	2.546	2.044	10.31	3.823
A390	white coating	2.764	2.461	8.110	5.155

(ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อ

ชนิดของอะลูมิเนียมผสม	ชนิดเคลือบ	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย ($W m^{-2} K^{-1}$)		สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุด ($W m^{-2} K^{-1}$)	
		100 μm	300 μm	100 μm	300 μm
A356	white coating	3481	1506	6508	2620
	graphite coating	3062	2661	4480	3568
A380	white coating	2589	1305	7193	1951
A390	white coating	3774	1737	7332	2740

ตารางที่ 10 การแบ่งช่วงเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่เคลือบแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating ที่สภาวะต่างๆ

(ก) เวลาที่ตำแหน่ง 5 15 และ 35 มิลลิเมตรในฝั่งชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ liquidus และอุณหภูมิ solidus

อุณหภูมิเท (K)	ความหนาเคลือบ (μm)	ระยะห่างจากรอยต่อ (มิลลิเมตร)	t_L (วินาที)	t_s (วินาที)
$T_L + 50$	100 ± 20	5	4.3	20.1
		15	5.1	26.1
		35	6.3	47.8
$T_L + 100$	100 ± 20	5	3.1	13.5
		15	6.7	37.8
		35	7.5	49.5
$T_L + 150$	100 ± 20	5	6	29.8
		15	9.6	36.3
		35	13	61.4
1053	100 ± 20	5	5	16.3
		15	9.8	36.5
		35	11	48.5
1053	300 ± 30	5	6	14
		15	8	18.2
		35	9.5	21

(ข) รากที่สองของเวลาสำหรับคำนวณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานแบบพิจารณา ค่าความร้อนแฝง

อุณหภูมิเท (K)	ความหนาเคลือบ (μm)	รากที่สองของเวลาในการแบ่งช่วงการคำนวณ			
		$t_{\text{zone}(1)}$	$t_{\text{zone}(2)}$	$t_{\text{zone}(3)}$	$t_{\text{zone}(4)}$
$T_L + 50$	100 ± 20	1.9	2.15	3.9	4.3
$T_L + 100$	100 ± 20	2.25	2.36	3.75	4.3
$T_L + 150$	100 ± 20	2.35	2.6	4.35	4.8
1053	100 ± 20	2.3	2.51	4	4.5
1053	300 ± 30	2.4	2.55	3.7	3.85

ตารางที่ 11 การแบ่งช่วงเวลาของอะลูมิเนียมผสมแมกเนซียมเกรด A356 ที่เคลือบแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย graphite-based coating ที่สภาวะต่างๆ

(ก) เวลาที่ตำแหน่ง 5 15 และ 35 มิลลิเมตรในฝั่งขึ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ liquidus และอุณหภูมิ solidus

อุณหภูมิเท (K)	ความหนาเคลือบ (μm)	ระยะห่างจากรอยต่อ (มิลลิเมตร)	t_L (วินาที)	t_s (วินาที)
T_L+50	100 ± 20	5	4.1	17.2
		15	4.5	35.2
		35	5.1	49.6
T_L+100	100 ± 20	5	6	20.1
		15	9.1	36
		35	11.9	55.5
T_L+150	100 ± 20	5	6.5	20.5
		15	11.5	36.3
		35	12	51.8
1053	100 ± 20	5	6	21.8
		15	12	37.6
		35	15	56.8
1053	300 ± 30	5	8.8	30
		15	13.8	43.8
		35	16	65

(ข) รากที่สองของเวลาสำหรับคำนวณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งขึ้นงานแบบพิจารณา ค่าความร้อนแฝง

อุณหภูมิเท (K)	ความหนาเคลือบ (μm)	รากที่สองของเวลาในการแบ่งช่วงการคำนวณ			
		$t_{\text{zone}(1)}$	$t_{\text{zone}(2)}$	$t_{\text{zone}(3)}$	$t_{\text{zone}(4)}$
$T_L + 50$	100 ± 20	1.9	2.1	4.05	4.5
$T_L + 100$	100 ± 20	2.4	2.6	4.25	4.75
$T_L + 150$	100 ± 20	2.65	2.8	4.4	4.8
1053	100 ± 20	2.5	2.7	4.4	4.9
1053	300 ± 30	3	3.2	5.2	5.6

ตารางที่ 12 การแบ่งช่วงเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A380 ที่เคลงสู่แบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating ที่สภาวะต่างๆ

(ก) เวลาที่ตำแหน่ง 5, 15 และ 35 มิลลิเมตรในฝั่งขึ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ liquidus และอุณหภูมิ solidus

อุณหภูมิเท (K)	ความหนาเคลือบ (μm)	ระยะห่างจากรอยต่อ (มิลลิเมตร)	t_L (วินาที)	t_s (วินาที)
$T_L + 50$	100 ± 20	5	4	12.8
		15	4.5	29
		35	5.5	48.3
$T_L + 100$	100 ± 20	5	5.2	18
		15	7.3	30
		35	8.2	52.2
$T_L + 150$	100 ± 20	5	6.5	29.5
		15	11	45
		35	12	66.5
1053	100 ± 20	5	7	22
		15	14.5	43
		35	16	64
1053	300 ± 30	5	10	27
		15	14.5	43.5
		35	19	67.5

(ข) รากที่สองของเวลาสำหรับคำนวณอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งขึ้นงานแบบพิจารณา ค่าความร้อนแฝง

อุณหภูมิเท (K)	ความหนาเคลือบ (μm)	รากที่สองของเวลาในการแบ่งช่วงการคำนวณ			
		$t_{\text{zone}(1)}$	$t_{\text{zone}(2)}$	$t_{\text{zone}(3)}$	$t_{\text{zone}(4)}$
$T_L + 50$	100 ± 20	1.9	2.05	3.3	3.9
$T_L + 100$	100 ± 20	2.3	2.4	3.85	4.35
$T_L + 150$	100 ± 20	2.6	2.8	5.15	5.6
1053	100 ± 20	2.75	2.95	4.5	5.05
1053	300 ± 30	3.1	3.3	4.9	5.4

ตารางที่ 13 การแบ่งช่วงเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A390 ที่เคลงสู่แบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating ที่สภาวะต่างๆ

(ก) เวลาที่ตำแหน่ง 5 15 และ 35 มิลลิเมตรในผังชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ liquidus และอุณหภูมิ solidus

อุณหภูมิเท (K)	ความหนาเคลือบ (μm)	ระยะห่างจากรอยต่อ (มิลลิเมตร)	t_L (วินาที)	t_s (วินาที)
$T_L+50\text{ K}$	100 ± 20	5	4.9	34.5
		15	6	56.8
		35	6.9	82.5
$T_L+100\text{ K}$	100 ± 20	5	4.5	41.7
		15	7.5	63.5
		35	8.3	88.5
$T_L+150\text{ K}$	100 ± 20	5	5.5	45.5
		15	8	69.5
		35	12	97.5
1053	100 ± 20	5	4	30
		15	10	69.5
		35	13	97.5
1053	300 ± 30	5	8	42
		15	11.6	73
		35	14.6	101.8

(ข) รากที่สองของเวลาสำหรับคำนวณอุณหภูมิผิวรอยต่อผังชิ้นงานแบบพิจารณา ค่าความร้อนแฝง

อุณหภูมิเท (K)	ความหนาเคลือบ (μm)	รากที่สองของเวลาในการแบ่งช่วงการคำนวณ			
		$t_{\text{zone}(1)}$	$t_{\text{zone}(2)}$	$t_{\text{zone}(3)}$	$t_{\text{zone}(4)}$
T_L+50	100 ± 20	2.2	2.3	5.62	6.18
T_L+100	100 ± 20	2.15	2.3	6.2	6.7
T_L+150	100 ± 20	2.2	2.42	6.5	7
1053	100 ± 20	2	2.3	5.4	6.1
1053	300 ± 30	2.8	3	6.3	6.9

ตารางที่ 14 สมการเส้นตรงที่ได้จากการถดถอยเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง liquidus และระยะทาง solidus กับเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ที่สภาวะการหล่อต่างๆ

สภาวะการหล่อ	สถานะ	$x = A\sqrt{t} - B$		
		A	B	R ²
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 50 \text{ K}$	L	70.14098	141.6357	0.98997
	S	12.14329	48.47845	0.99315
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 100 \text{ K}$	L	64.72492	144.8414	0.83606
	S	9.765625	36.54297	0.80605
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 150 \text{ K}$	L	26.23226	62.06815	0.94449
	S	9.759906	42.48292	0.99423
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท 1053 K	L	31.03566	71.49375	0.72575
	S	11.08475	44.63941	0.84793
white coating หนา 300 μm อุณหภูมิเท 1053 K	L	50.32459	121.9063	0.91101
	S	38.03728	141.3085	0.89421
graphite-based coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 50 \text{ K}$	L	130.9638	261.2334	0.99212
	S	10.34019	41.83021	0.89859
graphite-based coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 100 \text{ K}$	L	31.58161	75.53689	0.93022
	S	10.51204	44.50378	0.95929
graphite-based coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 150 \text{ K}$	L	37.54317	99.36552	0.64163
	S	11.81628	51.57925	0.93375
graphite-based coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท 1053 K	L	22.94683	56.52723	0.82559
	S	10.87205	48.12403	0.95983
graphite-based coating หนา 300 μm อุณหภูมิเท 1053 K	L	32.55102	117.4148	0.82264
	S	11.88058	61.49268	0.98506

ตารางที่ 15 สมการเส้นตรงที่ได้จากการถดถอยเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง liquidus และระยะทาง solidus กับเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A80 ที่สภาวะการหล่อต่างๆ

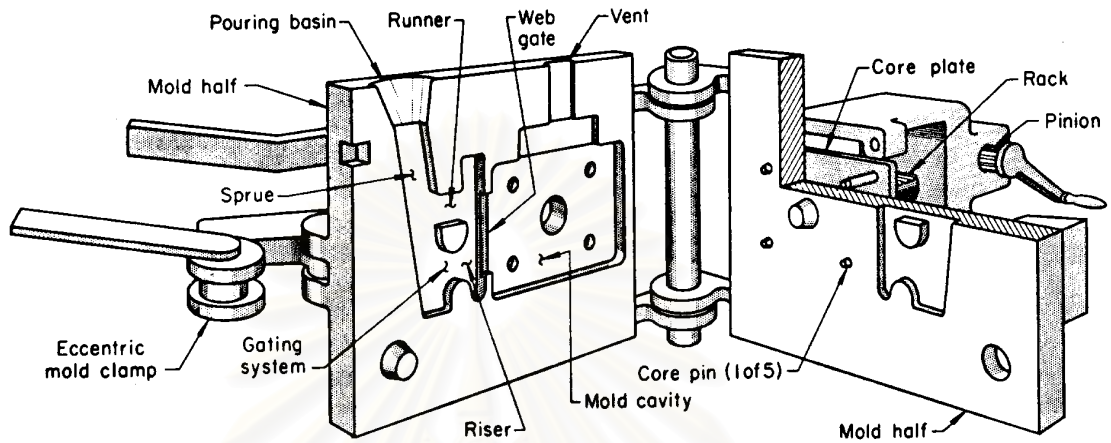
สภาวะการหล่อ	สถานะ	$x = A\sqrt{t} - B$		
		A	B	R ²
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 50$ K	L	92.53262	183.9086	0.90011
	S	9.25155	30.67814	0.94502
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 100$ K	L	56.04439	128.2408	0.81725
	S	10.23688	39.48775	0.99175
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 150$ K	L	36.81343	96.16772	0.71477
	S	11.81343	58.39458	0.97644
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท 1053 K	L	24.96443	68.65966	0.69755
	S	9.534706	42.83848	0.93193
white coating หนา 300 μm อุณหภูมิเท 1053 K	L	26.22194	80.69016	0.94537
	S	10.21826	49.81198	0.97834

ตารางที่ 16 สมการเส้นตรงที่ได้จากการถดถอยเชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง liquidus และระยะทาง solidus กับเวลาของอะลูมิเนียมผสมเกรด A390 ที่สภาวะการหล่อต่างๆ

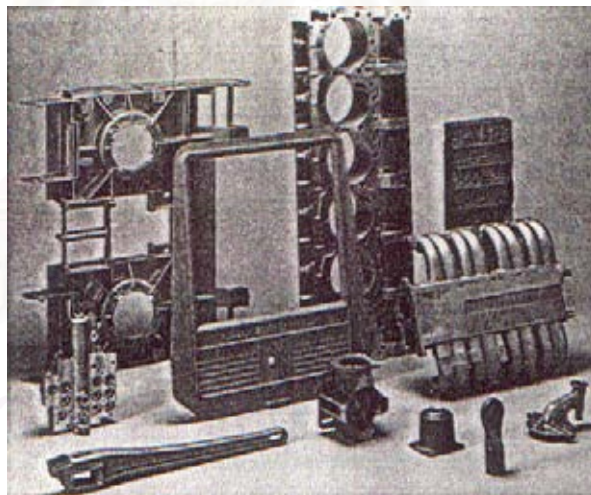
สภาวะการหล่อ	สถานะ	$x = A\sqrt{t} - B$		
		A	B	R ²
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 50$ K	L	76.54623	167.6975	0.92761
	S	9.734255	54.65395	0.95607
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 100$ K	L	36.01786	77.84541	0.74412
	S	10.57876	65.71105	0.95879
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท $T_L + 150$ K	L	27.38676	60.51378	0.98765
	S	9.962144	64.53875	0.96042
white coating หนา 100 μm อุณหภูมิเท 1053 K	L	20.38445	41.24386	0.81647
	S	7.320108	39.46636	0.8745
white coating หนา 300 μm อุณหภูมิเท 1053 K	L	31.91218	88.6265	0.92116
	S	8.759636	55	0.92749

ตารางที่ 17 ตาราง error function

Z	erf(Z)	Z	erf(Z)	Z	erf(Z)	Z	erf(Z)
0.00	0.0000	0.26	0.2869	0.52	0.5379	0.78	0.7300
0.01	0.0113	0.27	0.2974	0.53	0.5465	0.79	0.7361
0.02	0.0226	0.28	0.3079	0.54	0.5549	0.80	0.7421
0.03	0.0338	0.29	0.3183	0.55	0.5633	0.81	0.7480
0.04	0.0451	0.30	0.3286	0.56	0.5716	0.82	0.7538
0.05	0.0564	0.31	0.3389	0.57	0.5798	0.83	0.7595
0.06	0.0676	0.32	0.3491	0.58	0.5879	0.84	0.7651
0.07	0.0789	0.33	0.3593	0.59	0.5959	0.85	0.7707
0.08	0.0901	0.34	0.3694	0.60	0.6039	0.86	0.7761
0.09	0.1013	0.35	0.3794	0.61	0.6117	0.87	0.7814
0.10	0.1125	0.36	0.3893	0.62	0.6194	0.88	0.7867
0.11	0.1236	0.37	0.3992	0.63	0.6270	0.89	0.7918
0.12	0.1348	0.38	0.4090	0.64	0.6346	0.90	0.7969
0.13	0.1459	0.39	0.4187	0.65	0.6420	0.91	0.8019
0.14	0.1569	0.40	0.4284	0.66	0.6494	0.92	0.8068
0.15	0.1680	0.41	0.4380	0.67	0.6566	0.93	0.8116
0.16	0.1790	0.42	0.4475	0.68	0.6638	0.94	0.8163
0.17	0.1900	0.43	0.4569	0.69	0.6708	0.95	0.8209
0.18	0.2009	0.44	0.4662	0.70	0.6778	0.96	0.8254
0.19	0.2118	0.45	0.4755	0.71	0.6847	0.97	0.8299
0.20	0.2227	0.46	0.4847	0.72	0.6914	0.98	0.8342
0.21	0.2335	0.47	0.4937	0.73	0.6981	0.99	0.8385
0.22	0.2443	0.48	0.5027	0.74	0.7047	1.00	0.8427
0.23	0.2550	0.49	0.5117	0.75	0.7112	1.30	0.9340
0.24	0.2657	0.50	0.5205	0.76	0.7175	1.80	0.9891
0.25	0.2763	0.51	0.5292	0.77	0.7238	2.00	0.9953

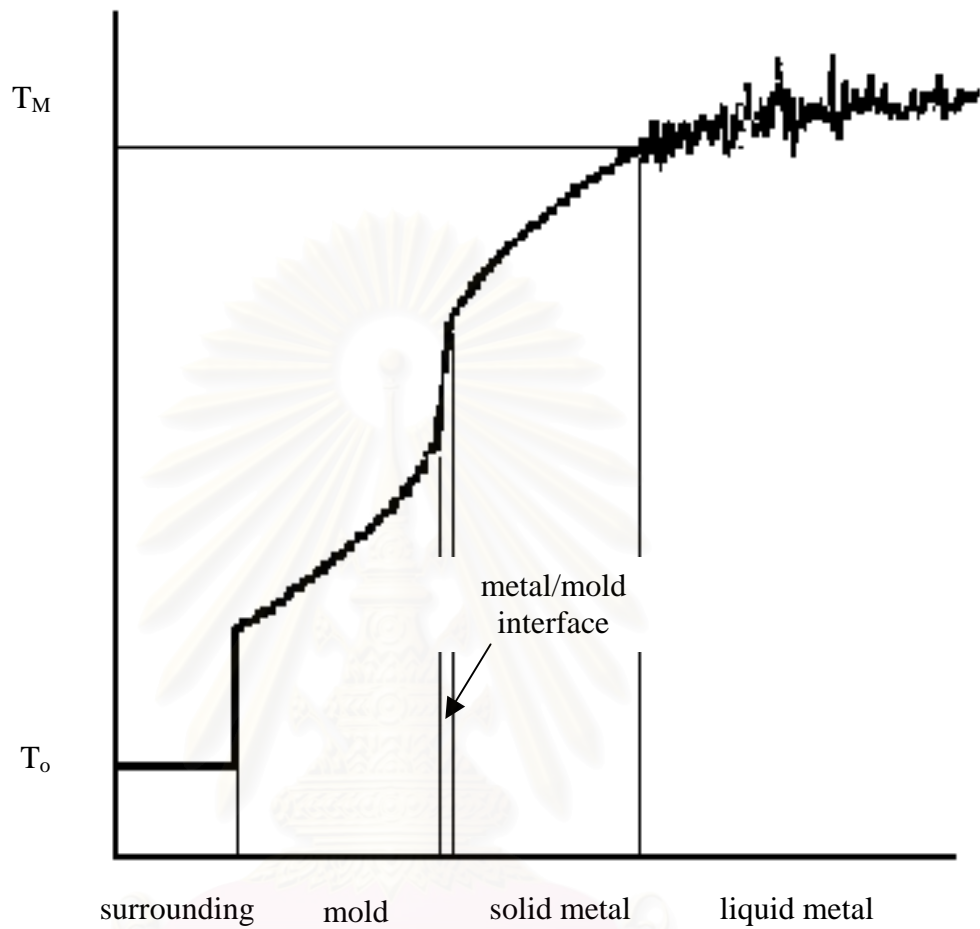


(ก)



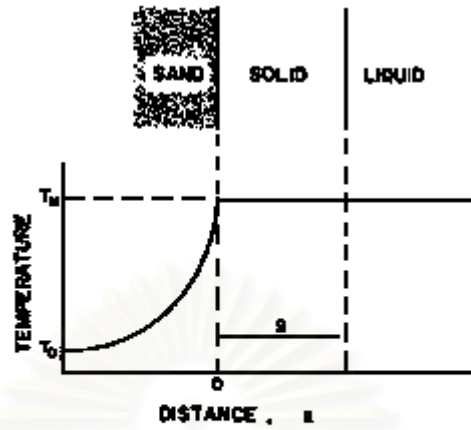
(ข)

ภาพที่ 1 (ก) ลักษณะของแบบหล่อชนิดถาวร¹ (ข) ตัวอย่างผลิตภัณฑ์โลหะหล่อที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อในแบบหล่อชนิดถาวร⁷

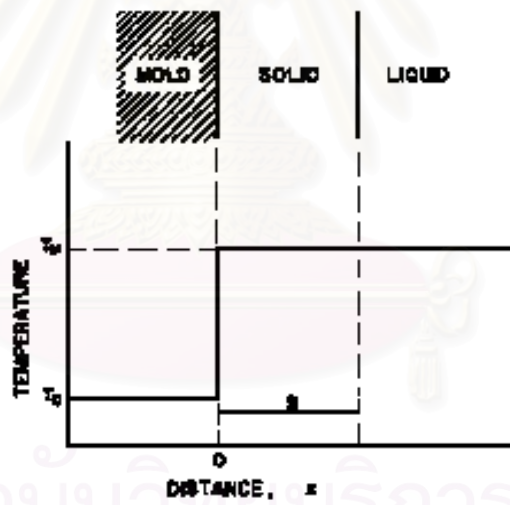


ภาพที่ 2 การถ่ายเทความร้อน ณ บริเวณต่างๆ ในระบบงานหล่อ อุณหภูมิจะลดลงอย่างต่อเนื่องจากโลหะหลอมเหลวจนถึงผนังด้านนอกของแบบหล่อ⁸

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

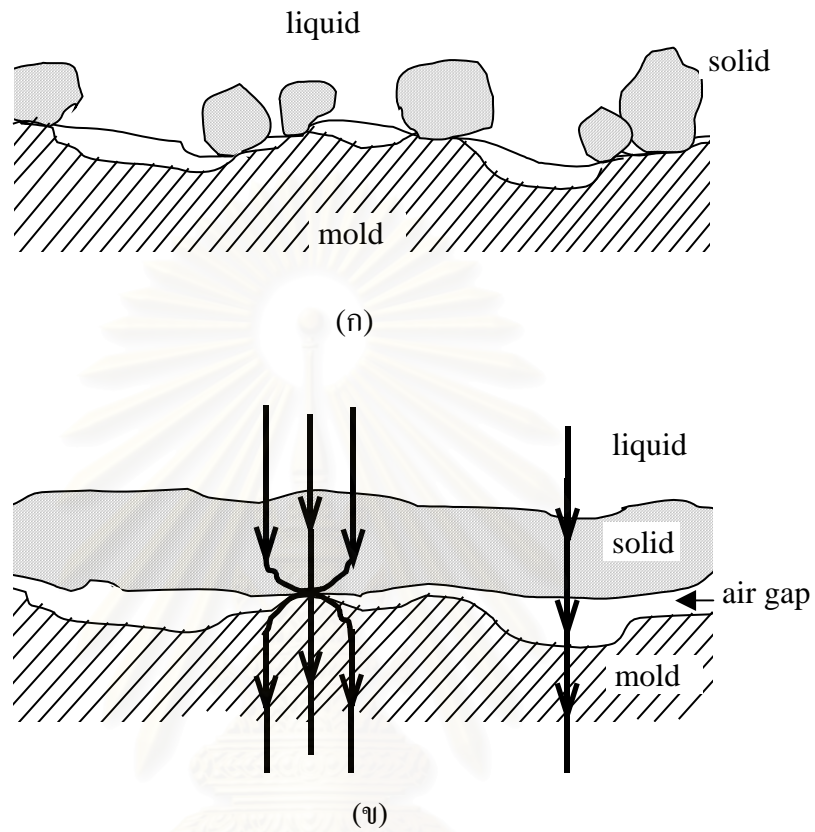


(ก)



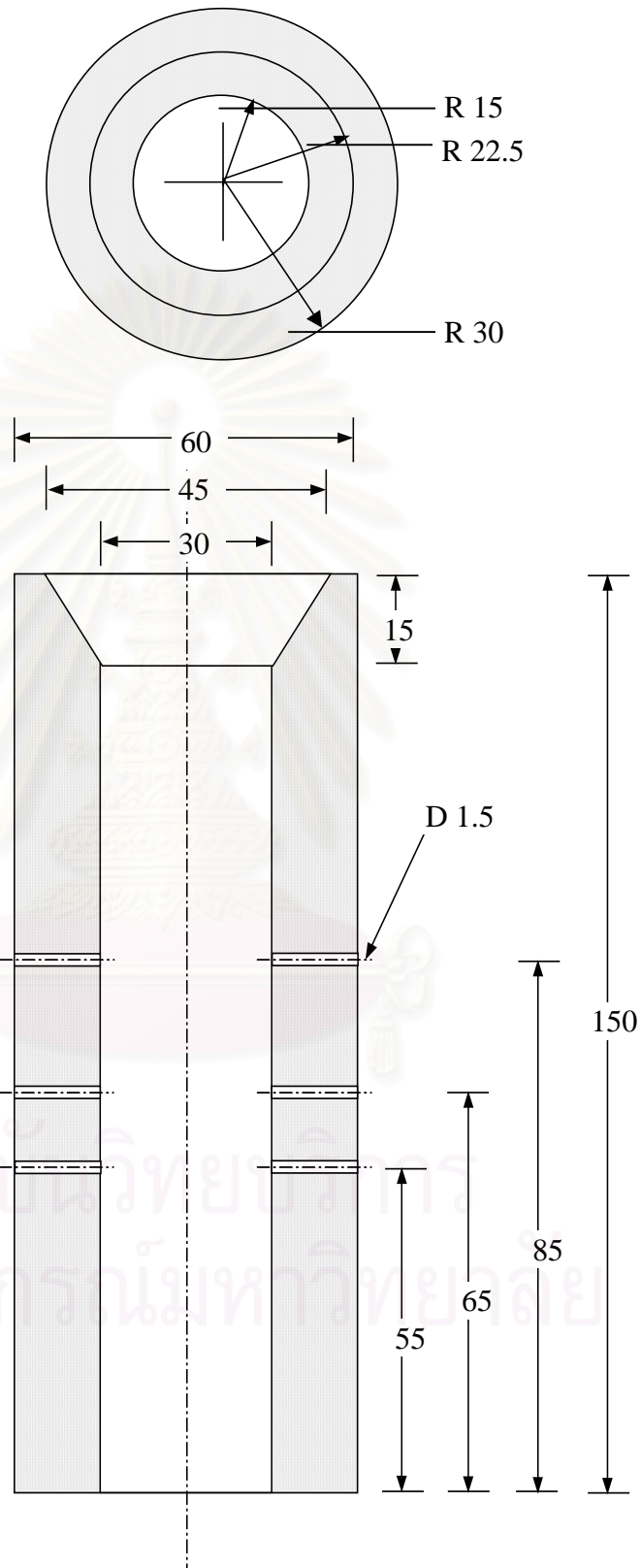
(ข)

ภาพที่ 3 (ก) การถ่ายเทความร้อนในแบบหล่อที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน (ข) แบบหล่อ ที่มีสมบัตินำความร้อนได้ดีซึ่งมีความต้านทานบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อเป็นปัจจัยควบคุมอัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน

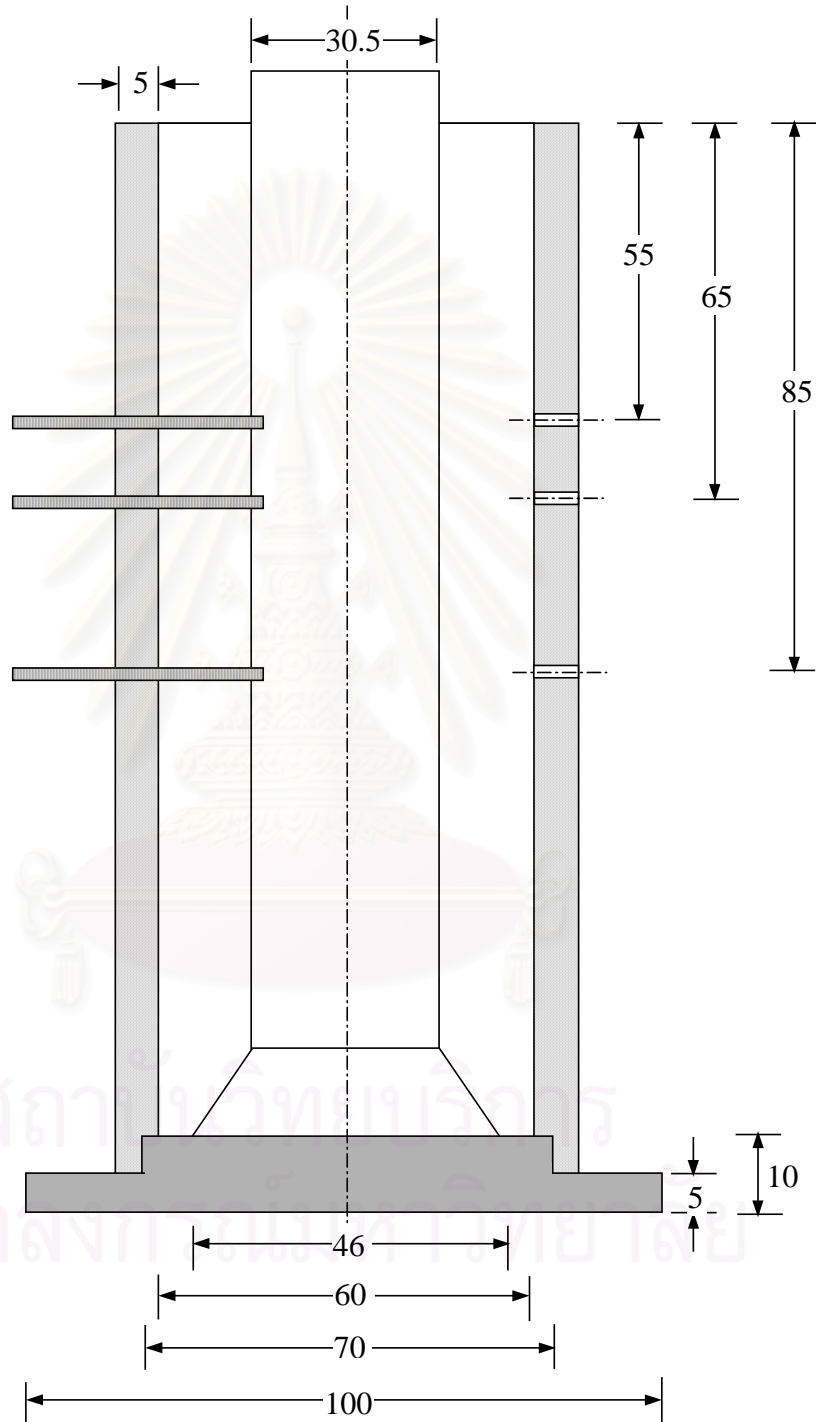
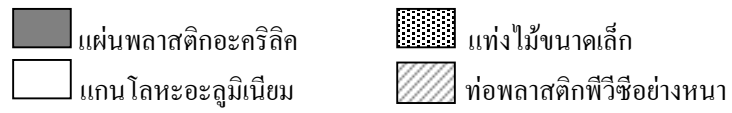


ภาพที่ 4 (ก) ลักษณะพื้นผิวสัมผัสระหว่างโลหะหลอมเหลวกับผิวแบบหล่อภายหลังจากที่โลหะหลอมเหลวถูกเทลงสู่แบบหล่อ ส่วนยอดของผิวแบบหล่อที่ขรุขระเป็นจุดเริ่มต้นการแข็งตัว (ข) การเปลี่ยนแปลงที่ผิวสัมผัสในเวลาต่อมา จะเกิดช่องว่างเนื่องจากการขยายตัวของแบบหล่อและการหดตัวของชั้นผิวโลหะที่แข็งตัวแล้ว^{10,13}

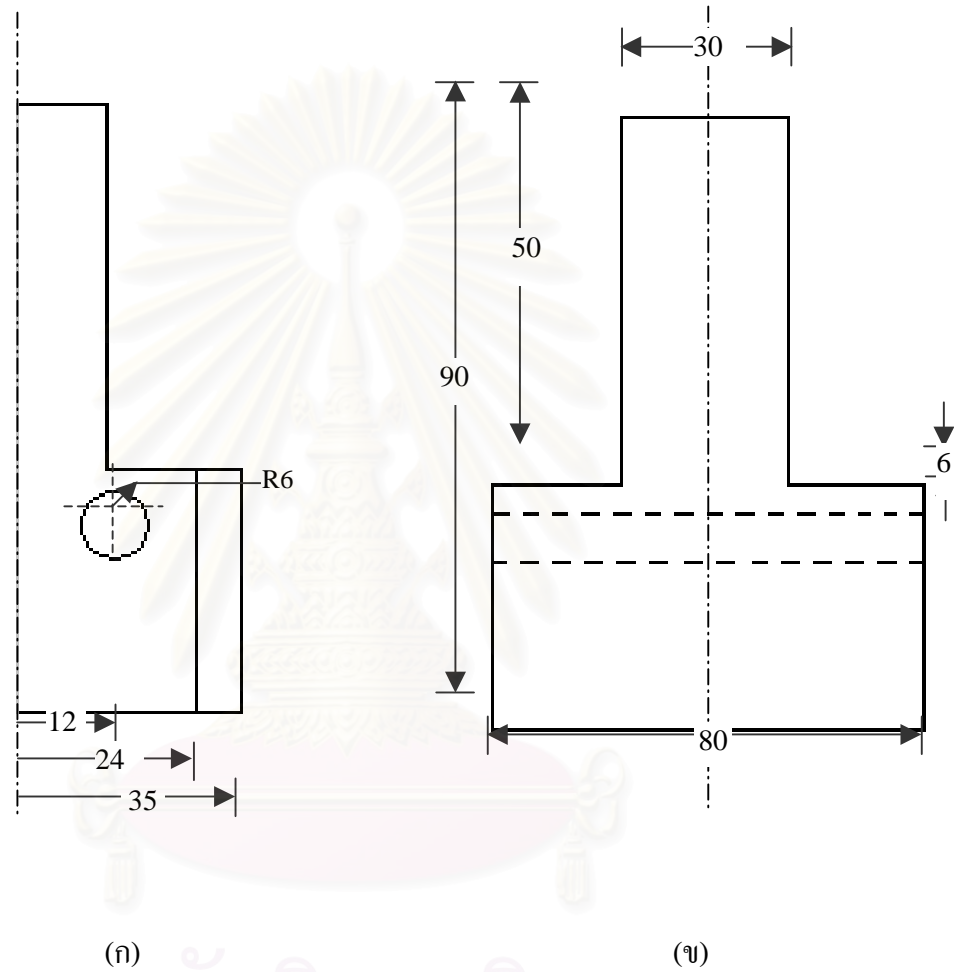
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



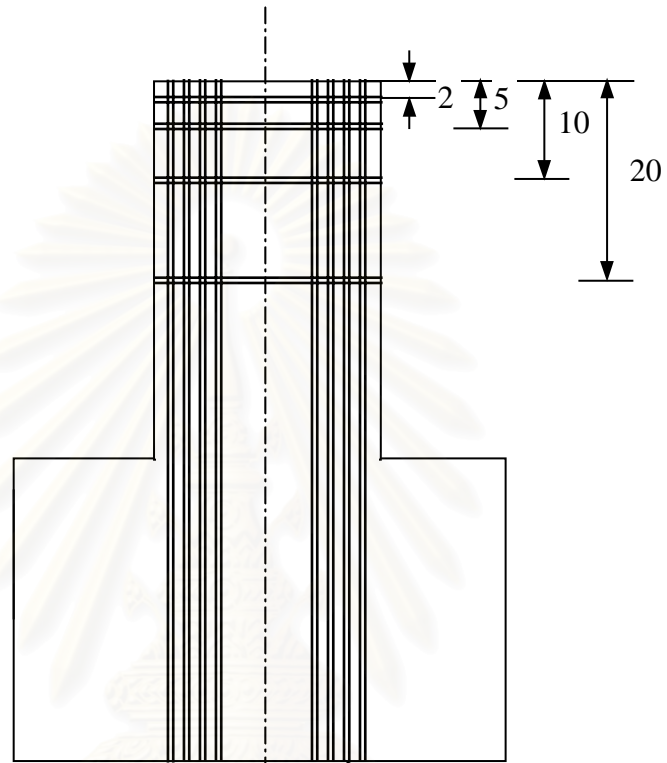
ภาพที่ 5 ครอบปูนซีเมนต์ทนไฟที่เป็นผนังแบบหล่อ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



ภาพที่ 6 แบบหล่อกระบอบกปูนซีเมนต์ต้นไฟ (หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



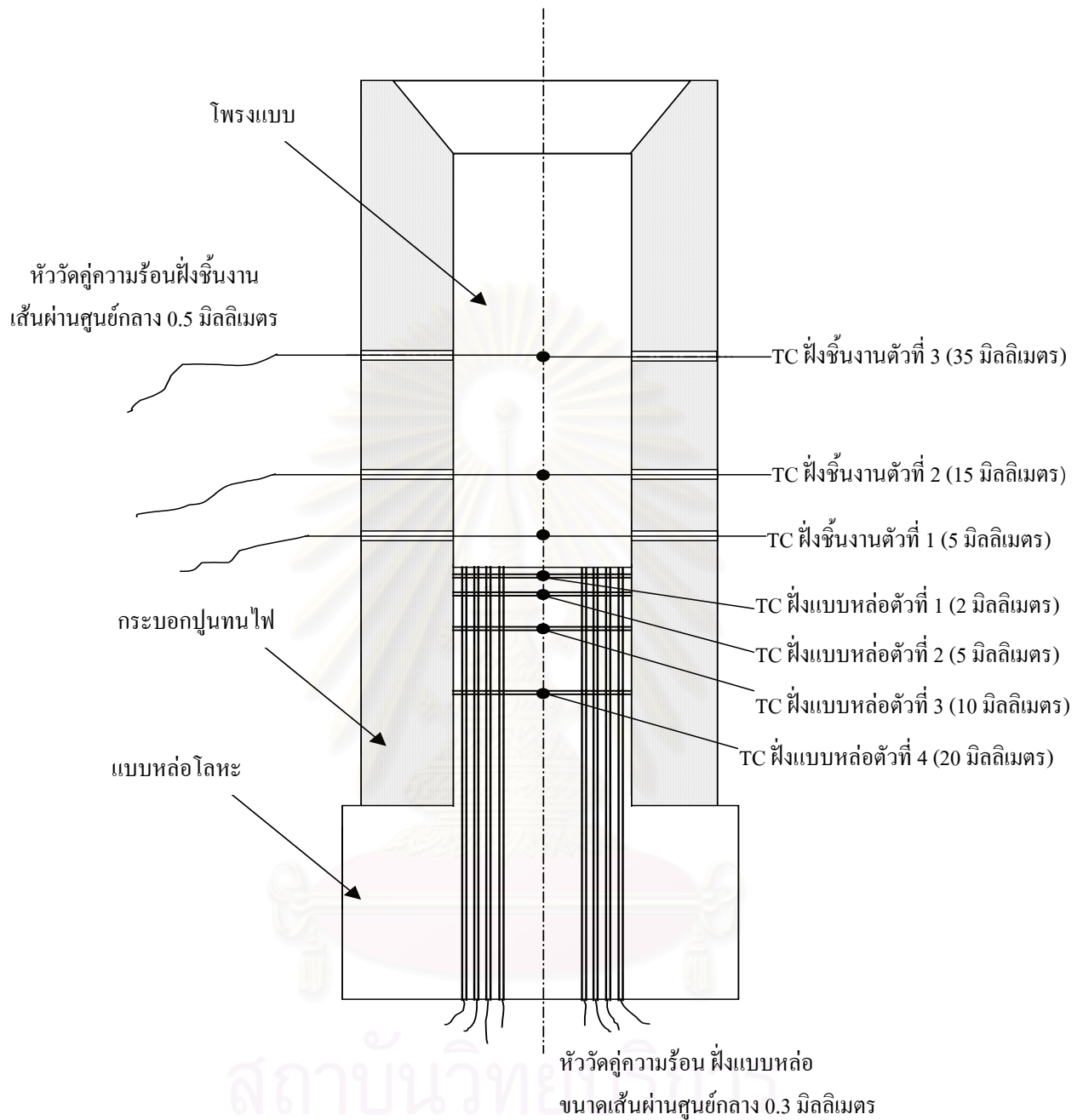
ภาพที่ 7 ฐานของแบบหล่อที่ทำจากเหล็กกล้าเครื่องมือ H13 (ก) ด้านข้าง (ข) ด้านหน้า
(หน่วยเป็นมิลลิเมตร)



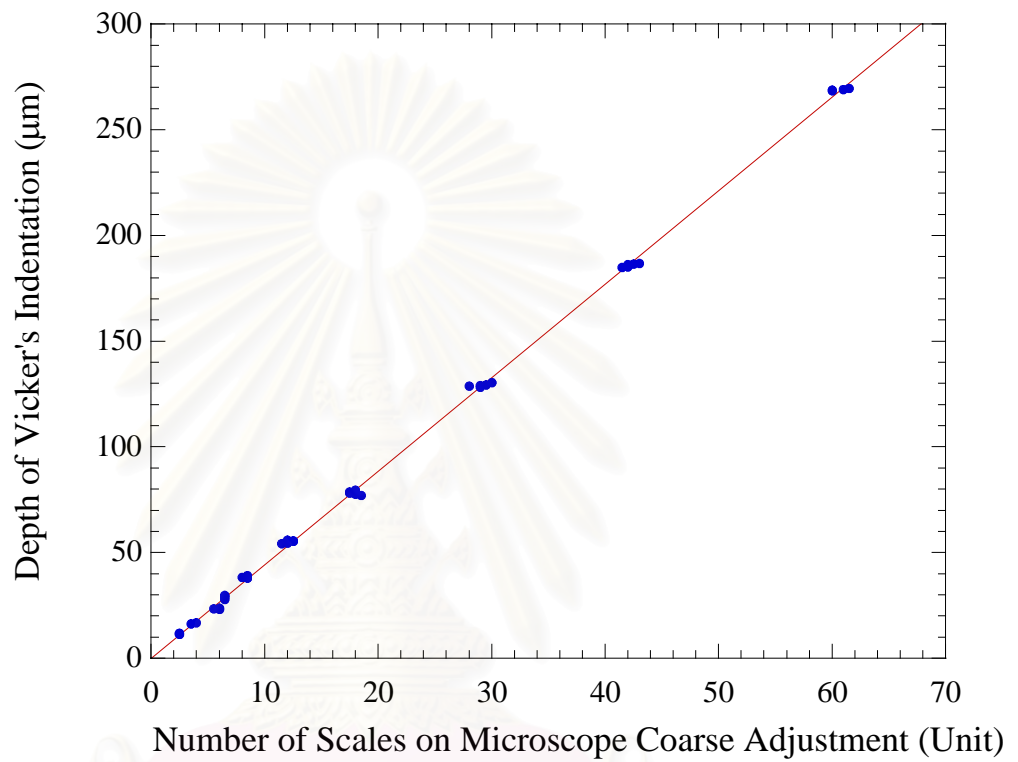
ร่องกว้าง 0.6 มิลลิเมตร ลึก 1 มิลลิเมตร
อยู่ห่างกันประมาณ 0.8 มิลลิเมตร

ภาพที่ 8 แนวเซาะร่องเพื่อวางสายของหัววัดคู่ความร้อนที่แบบหล่อโลหะ
(หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

สภามหาวิทยาลัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

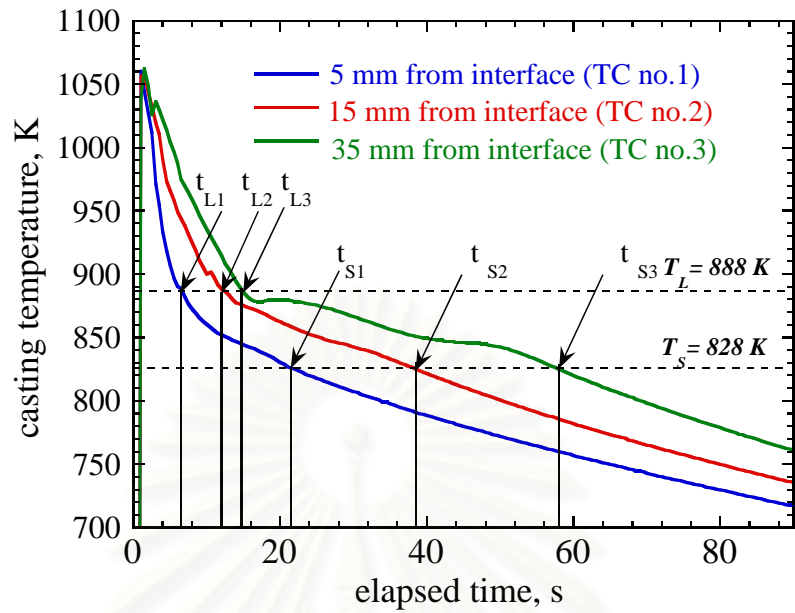


ภาพที่ 9 ตำแหน่งของหัววัดคู่ความร้อน (TC) ภายในชิ้นงานแบบหล่อโลหะ
ในวงเล็บเป็นระยะทางที่หัววัดคู่ความร้อนห่างจากบริเวณรอยต่อ

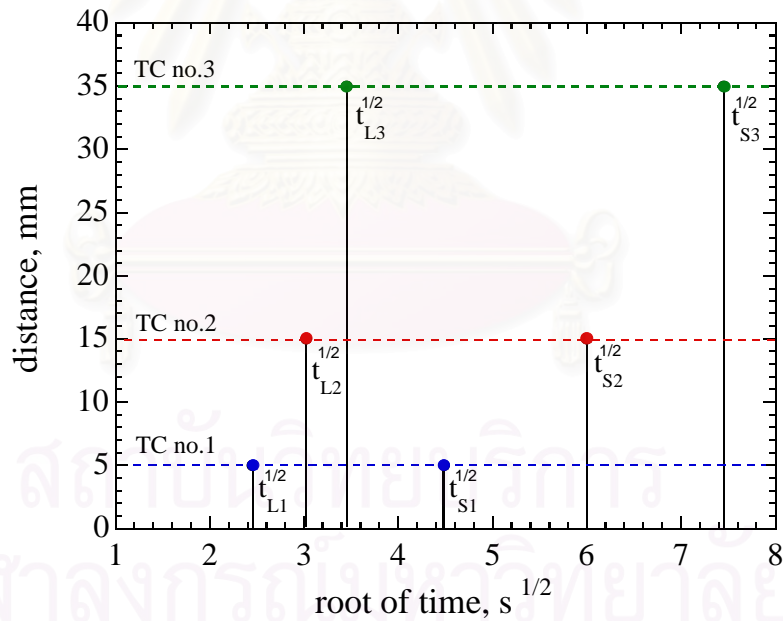


ภาพที่ 10 กราฟมาตรฐานใช้ในการประมาณความหนาของสารเคลือบผิวบนผิวของแบบหล่ออย่างง่าย (ขั้นตอนการสร้างกราฟมาตรฐานแสดงในภาคผนวก ก)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

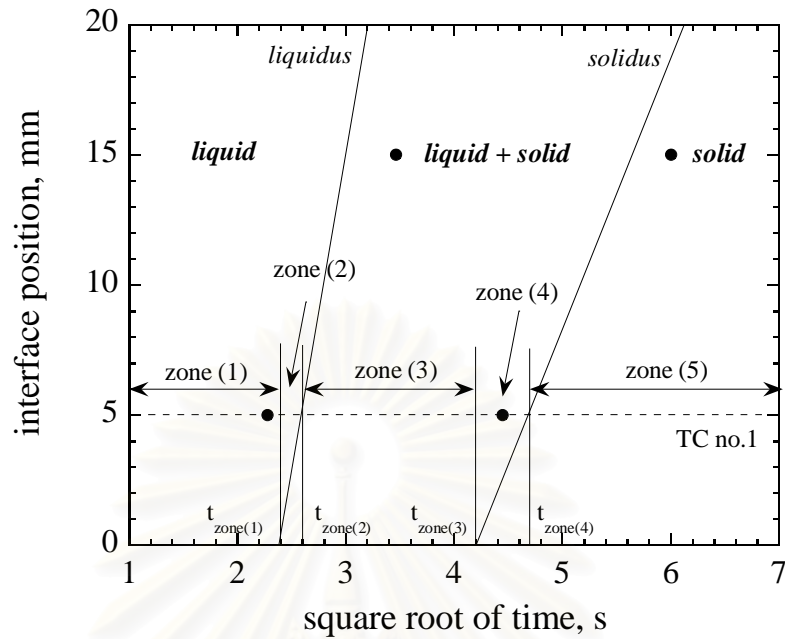


(ก)

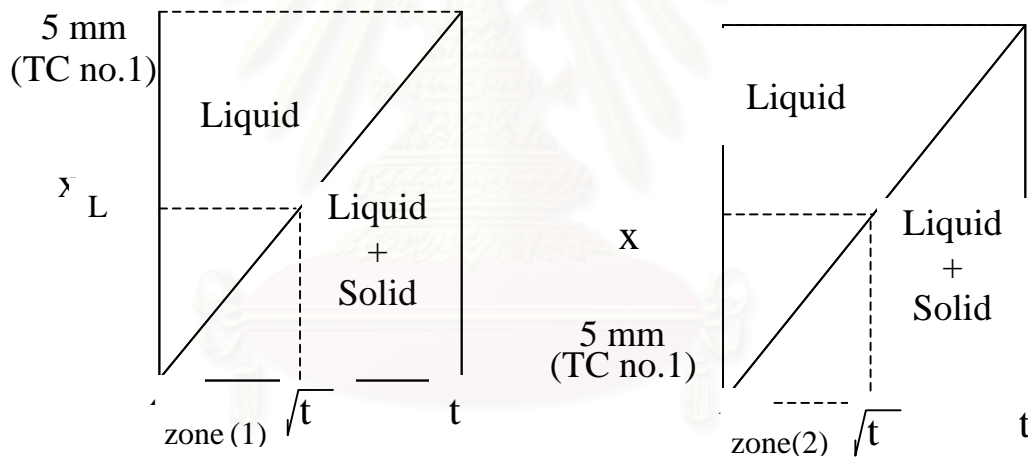


(ข)

ภาพที่ 11 (ก) การหาเวลาที่บริเวณต่างๆ ในฝั่งชิ้นงานมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ liquidus และ solidus จากกราฟการเขียนตัวของชิ้นงานที่ได้จากการทดลอง (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง liquidus และระยะทาง solidus กับรากที่สองของเวลา



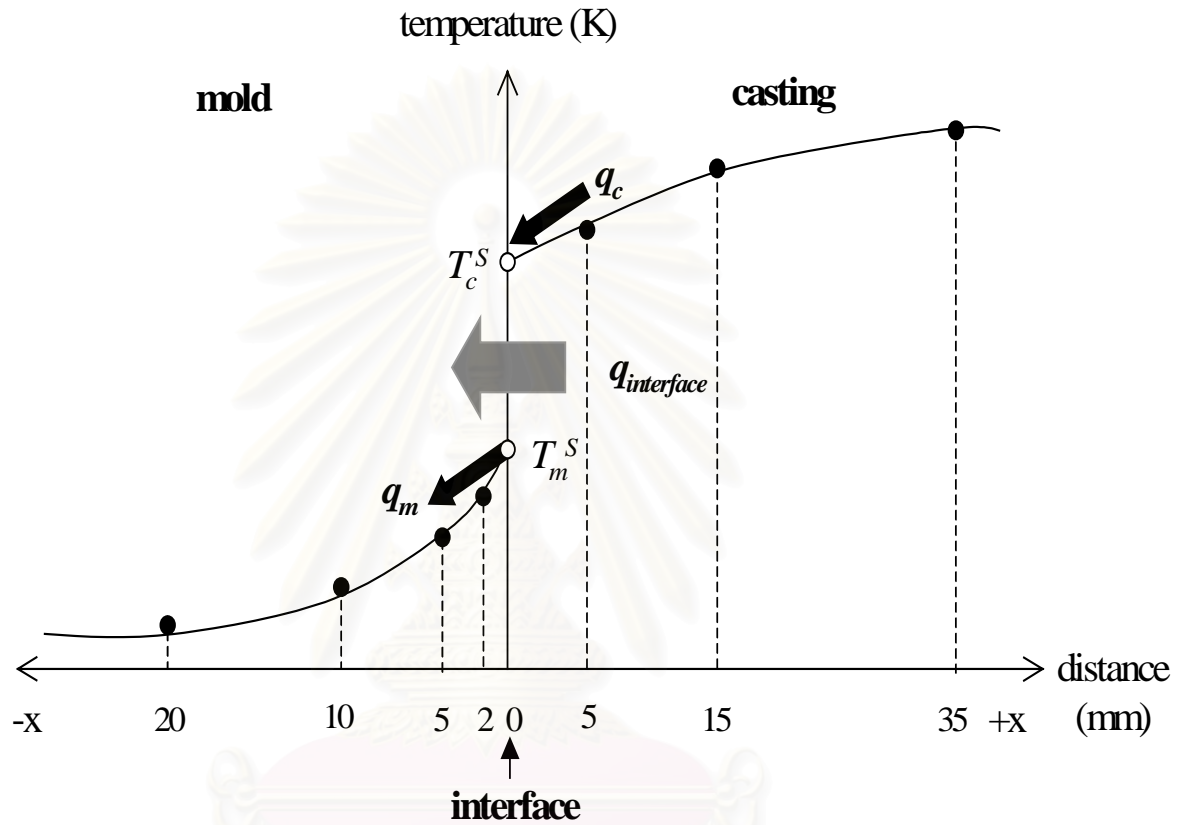
(ก)



$$f_S^{x=0mm} \approx \frac{\sqrt{t} - t_{zone(1)}}{t_{zone(3)} - t_{zone(1)}} \qquad f_S^{x=5mm} \approx \frac{\sqrt{t} - t_{zone(2)}}{t_{zone(4)} - t_{zone(2)}}$$

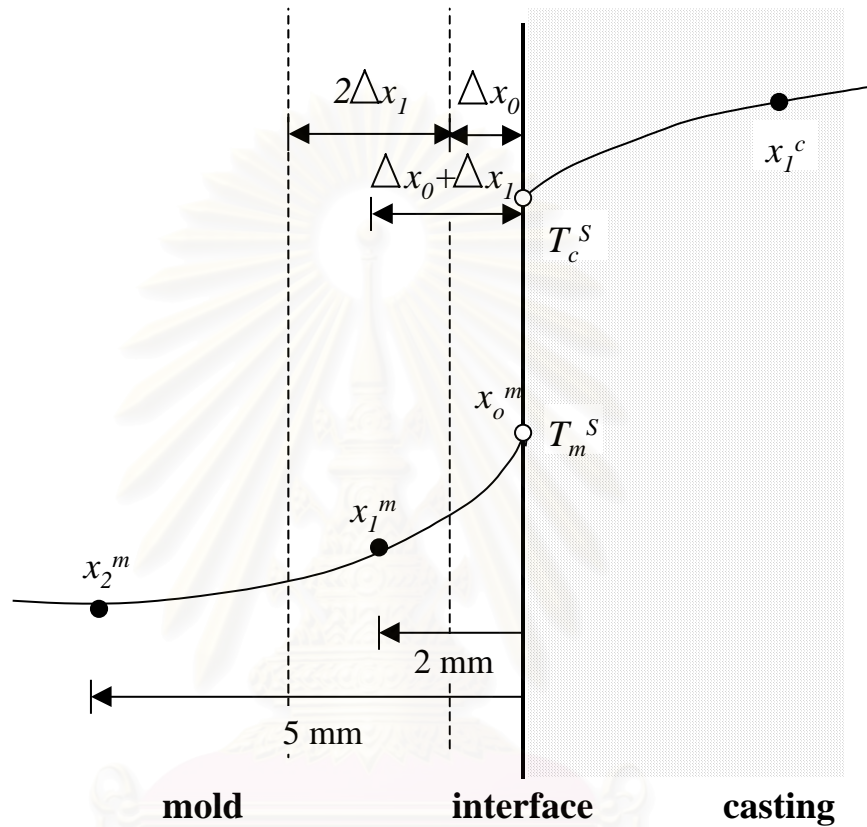
(ข)

ภาพที่ 12 (ก) การแบ่งบริเวณ 5 มิลลิเมตรในชิ้นงานใกล้ๆ บริเวณรอยต่อเป็น 5 ช่วงเพื่อใช้ในการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานโดยใช้เวลาเป็นเกณฑ์ (ข) การประมาณสัดส่วนเฟสของแข็งที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อเมื่อชิ้นงานเริ่มเกิดการแข็งตัวใกล้กับรอยต่อ, $f_S^{x=0mm}$ ในช่วงที่ 2 และบริเวณ 5 มิลลิเมตรห่างจากรอยต่อ, $f_S^{x=5mm}$ ในช่วงที่ 3

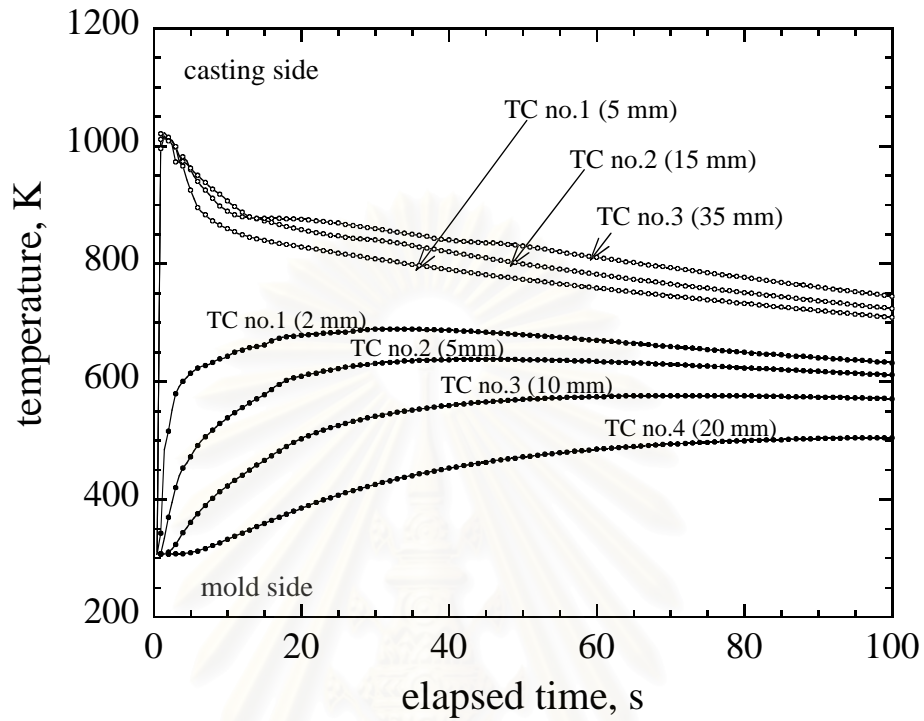


ภาพที่ 13 การไหลของฟลักซ์ความร้อนออกจากชิ้นงาน (q_c) และไหลเข้าสู่แบบหล่อ (q_m) ผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงาน กับแบบหล่อ

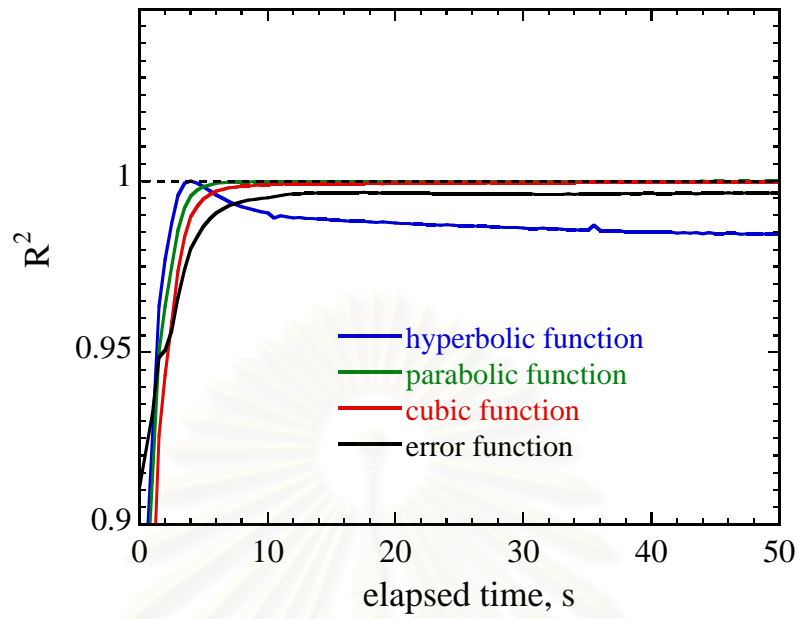
สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



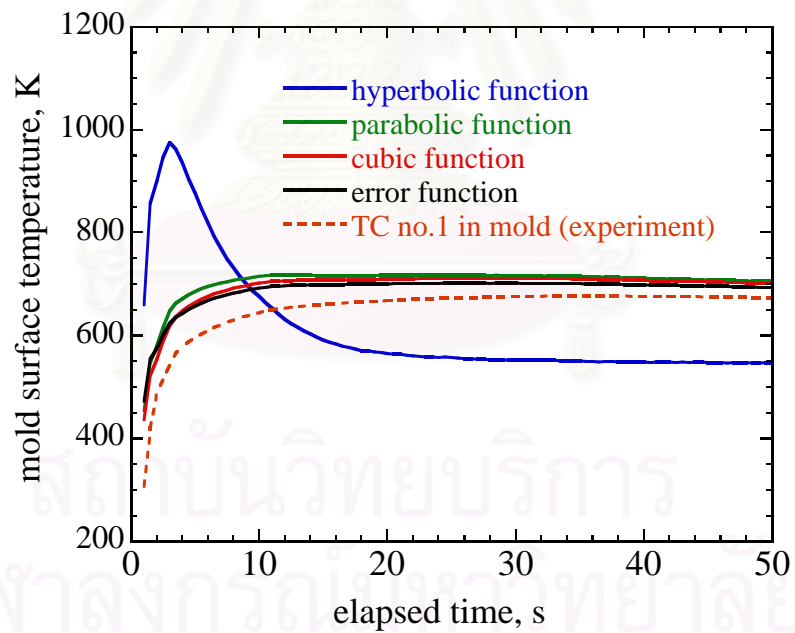
ภาพที่ 14 การแบ่งบริเวณใกล้รอยต่อฝั่งแบบหล่อเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่พิจารณา time step (พิจารณาการสะสมพลังงานความร้อนในฝั่งแบบหล่อ) ที่เวลาใดๆ โดยกำหนดให้ตำแหน่งหัววัดคู่ความร้อนตัวที่ 1 ในแบบหล่อเป็นตำแหน่ง node x_1^m และที่บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อมี node x_0^m อยู่เป็น node ภายนอกแบบหล่อ (external node)



ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่วัดได้ ณ บริเวณต่างๆ ในฝั่งขึ้นงานกับแบบหล่อ หลังจากเทโลหะหลอมเหลวลงสู่แบบหล่อ

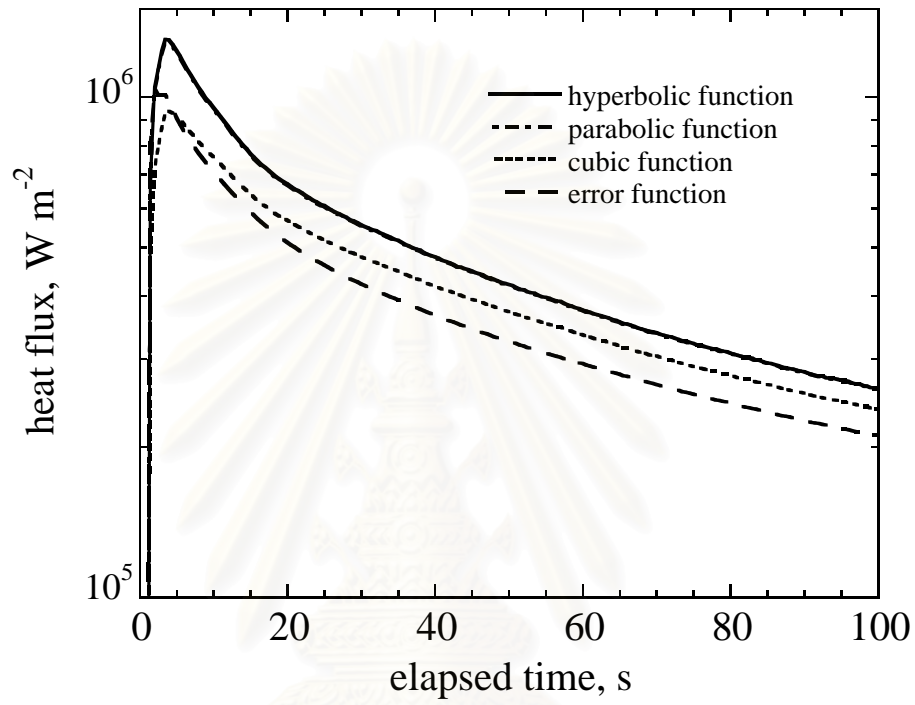


(ก)



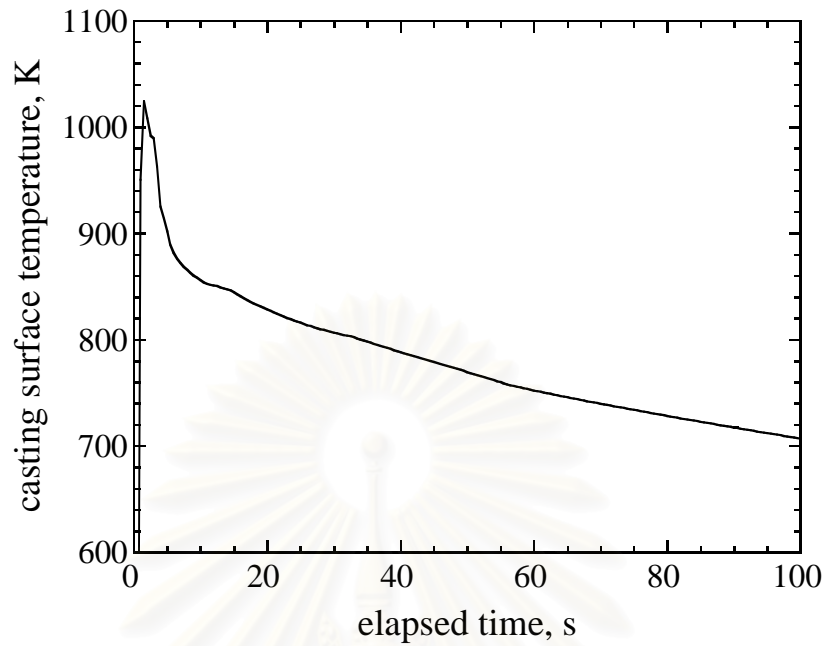
(ข)

ภาพที่ 16 การเปรียบเทียบแสดงการแปรผันกับเวลาของ (ก) ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) (ข) อุณหภูมิพื้นผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อที่คำนวณได้จากฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก ฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ฟังก์ชันพหุนามกำลังสามและ error function

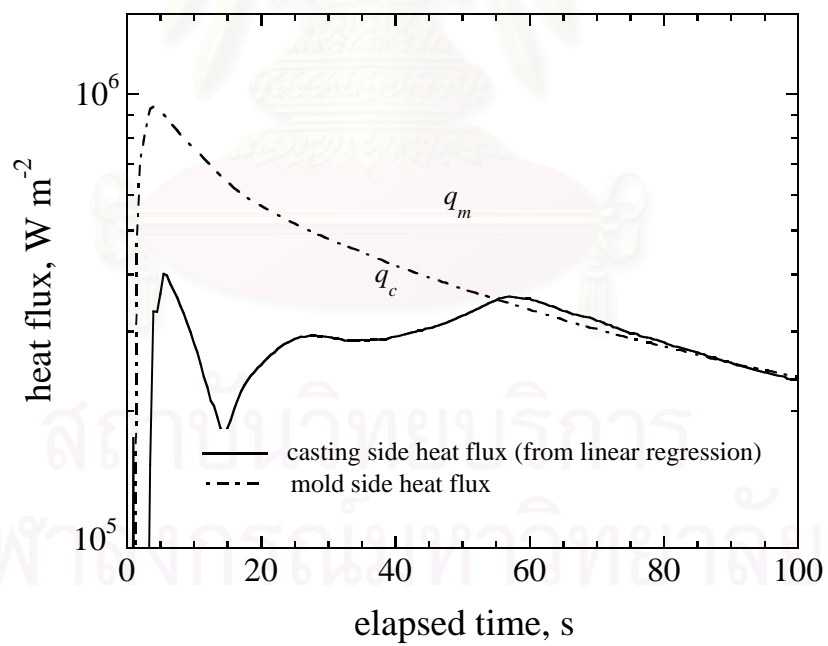


ภาพที่ 17 การแปรผันกับเวลาของค่าฟลักซ์ความร้อนที่คำนวณได้จากฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก ฟังก์ชันพหุนามกำลังสอง ฟังก์ชันพหุนามกำลังสาม และ error function

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

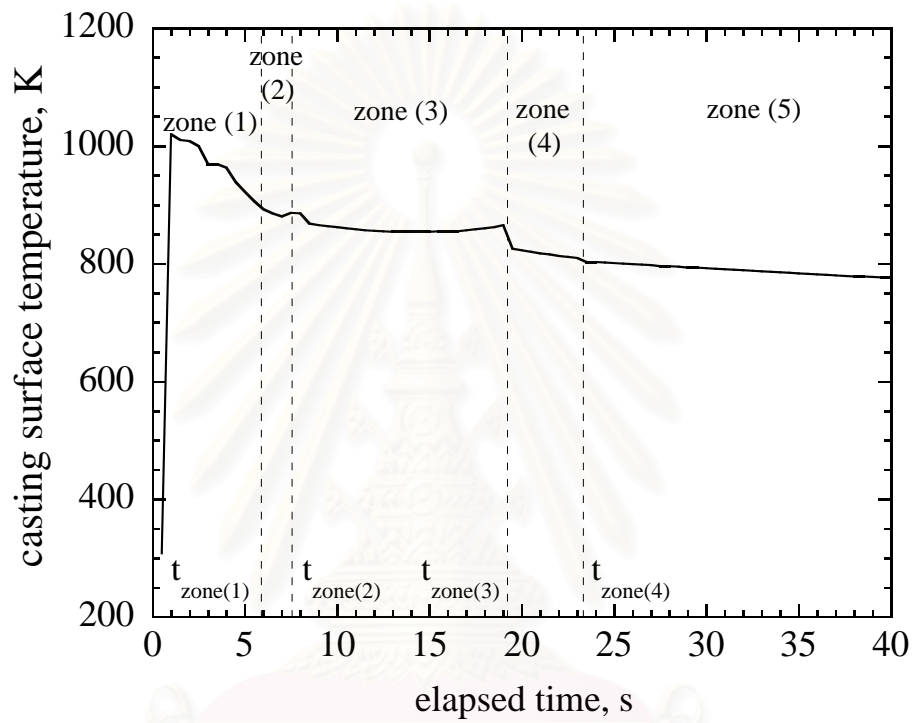


(ก)



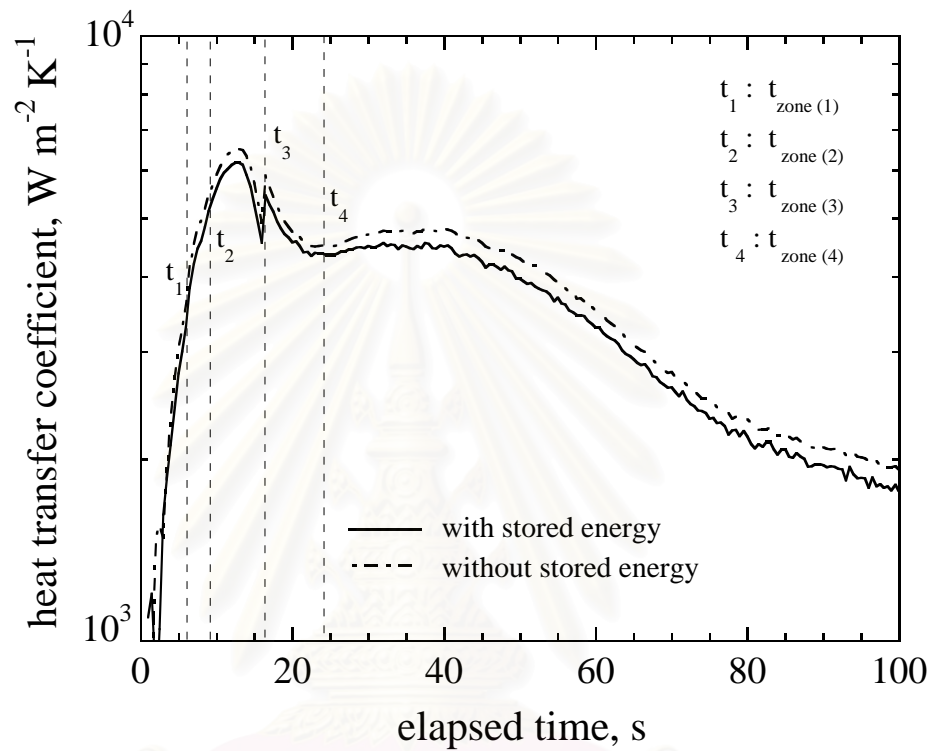
(ข)

ภาพที่ 18 (ก) อุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานที่คำนวณได้แบบจำลองด้วยการถดถอยเชิงเส้น
 (ข) การเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ความร้อนฝั่งแบบหล่อและชิ้นงานที่ได้จากการถดถอยแบบเชิงเส้น



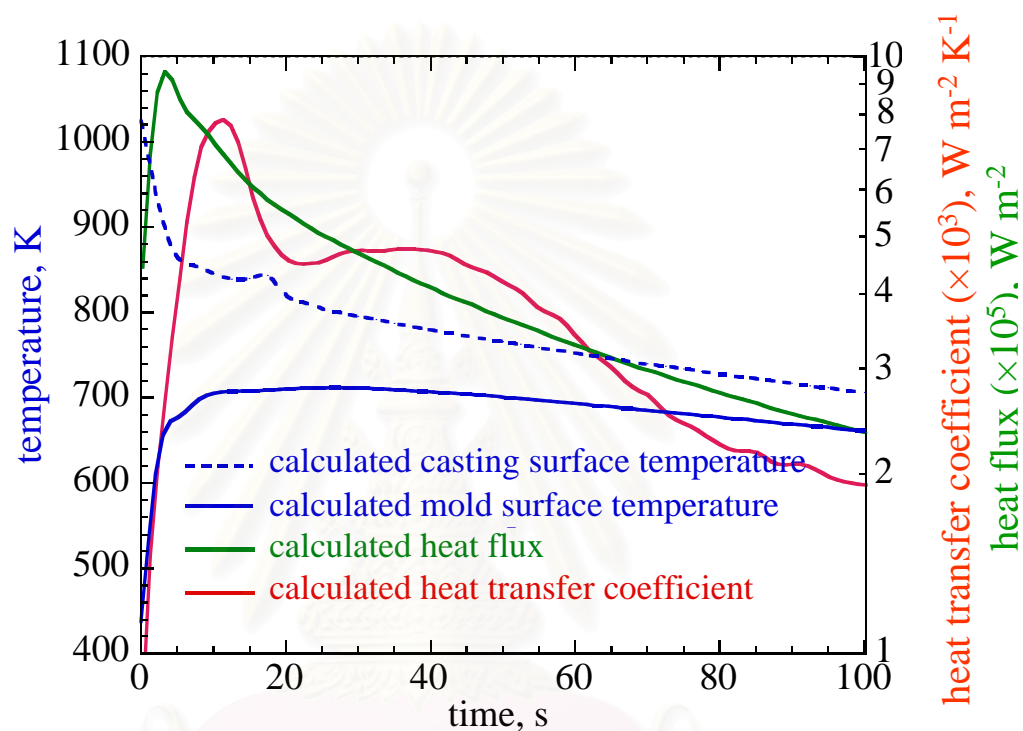
ภาพที่ 19 อุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งแบบหล่อที่ได้จากการคำนวณค่าความร้อนแฝงของการแข็งตัวของวัสดุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

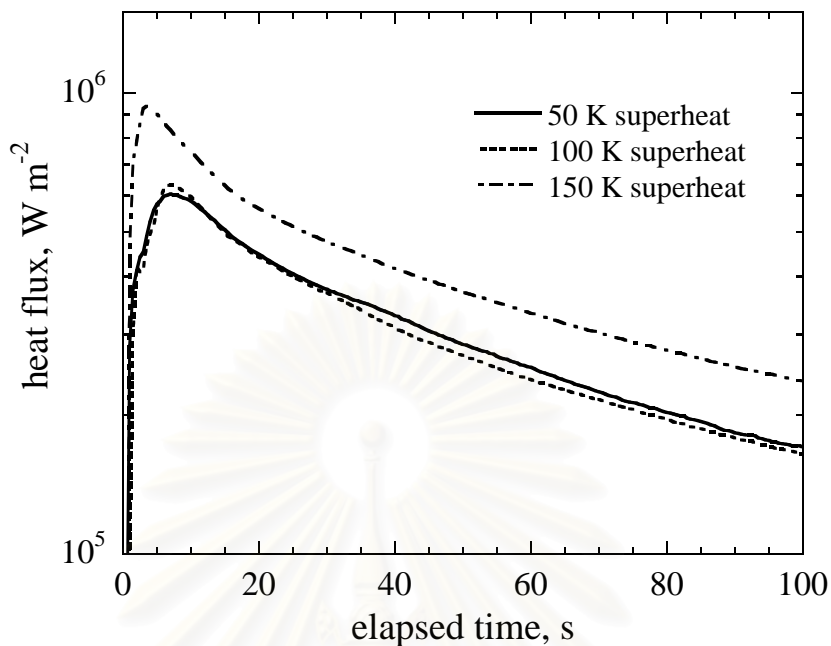


ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อที่คำนวณได้โดยไม่พิจารณาและพิจารณาการสะสมของพลังงานในวัสดุ (การพิจารณาพลังงานสะสมในวัสดุคำนวณด้วยการแบ่งเอลิเมนต์และ time step)

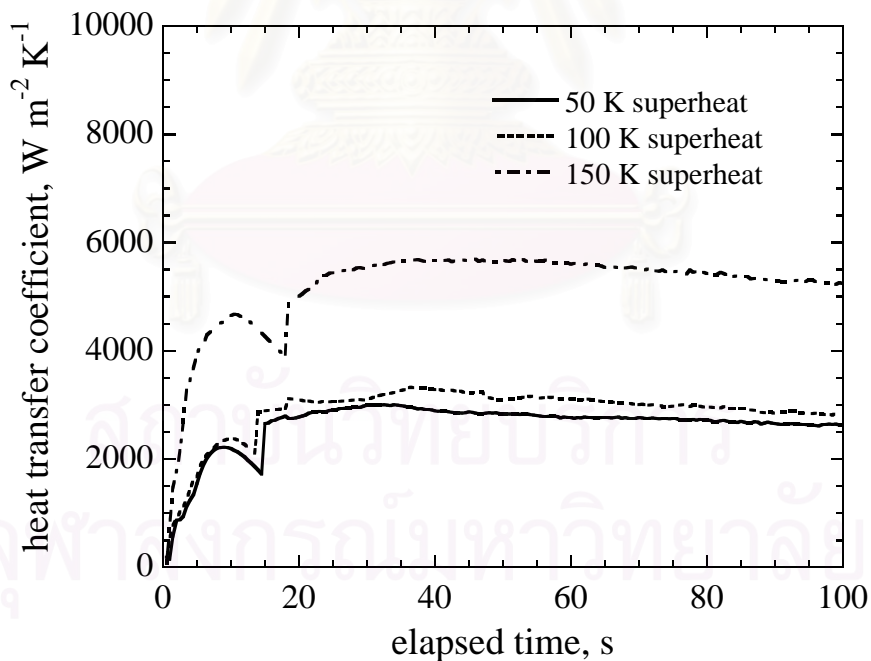
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิผิวรอยต่อฝั่งชิ้นงานและแบบหล่อ ค่าฟลักซ์ความร้อนและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานกับแบบหล่อที่คำนวณได้กับเวลา (อะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating หนา 100 ไมโครเมตร เทที่อุณหภูมิ 1053 K)

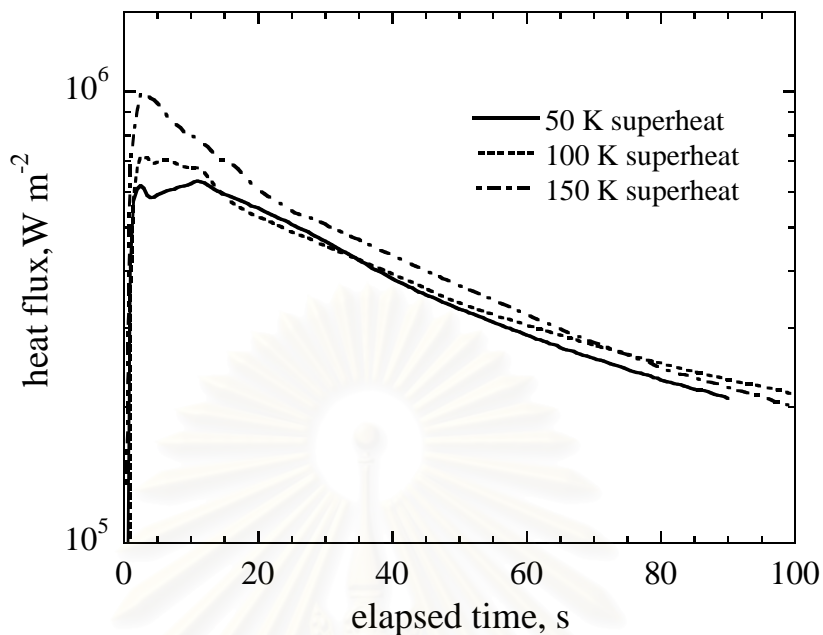


(ก)

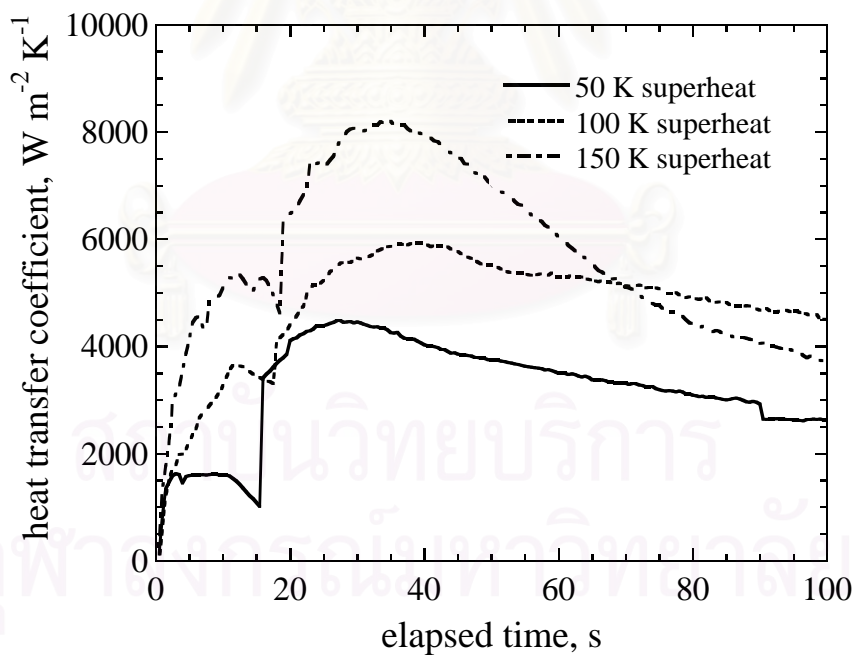


(ข)

ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating หนา 100 ไมโครเมตร เทที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

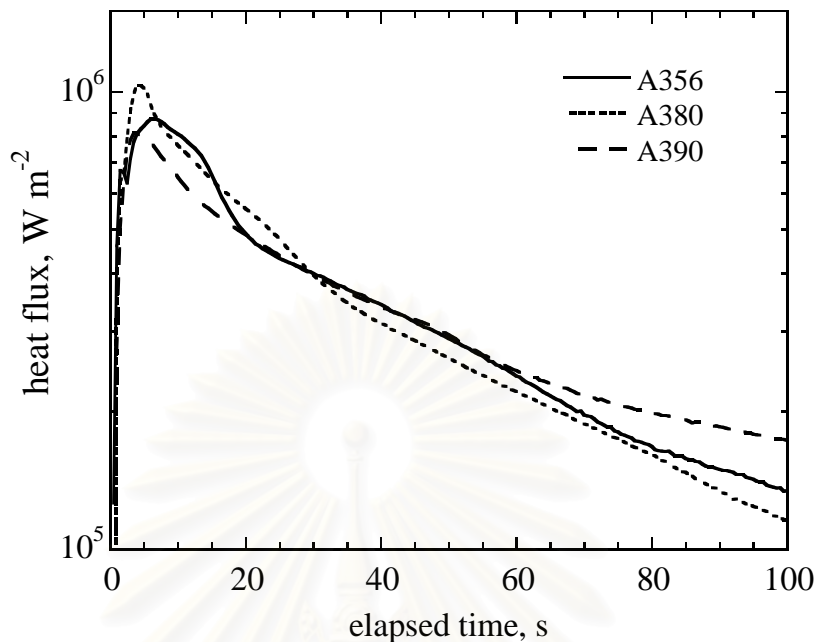


(ก)

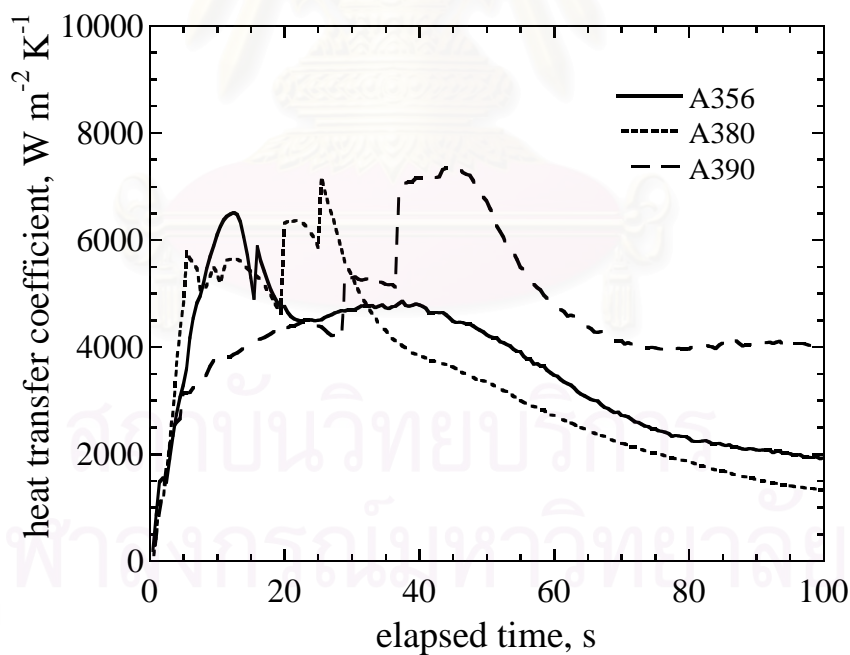


(ข)

ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย graphite-based coating หนา 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน

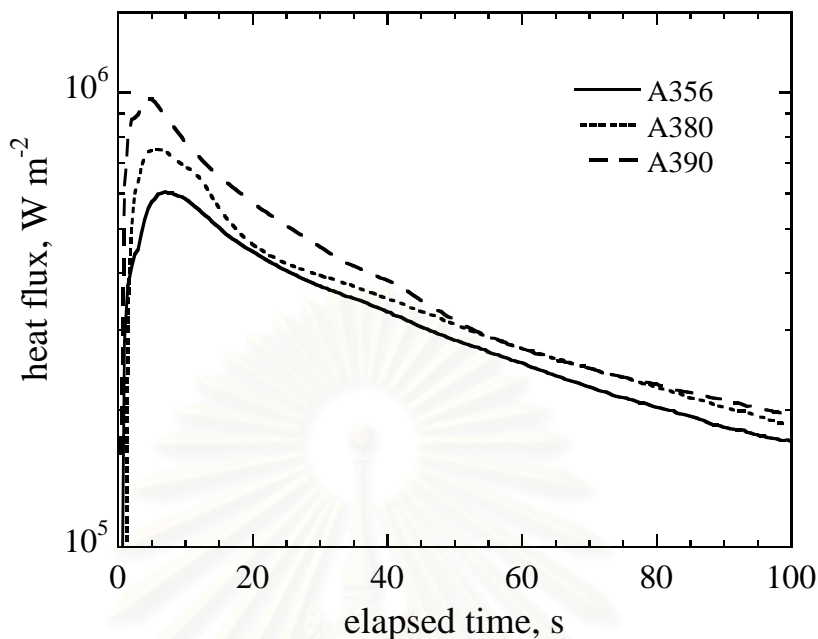


(ก)

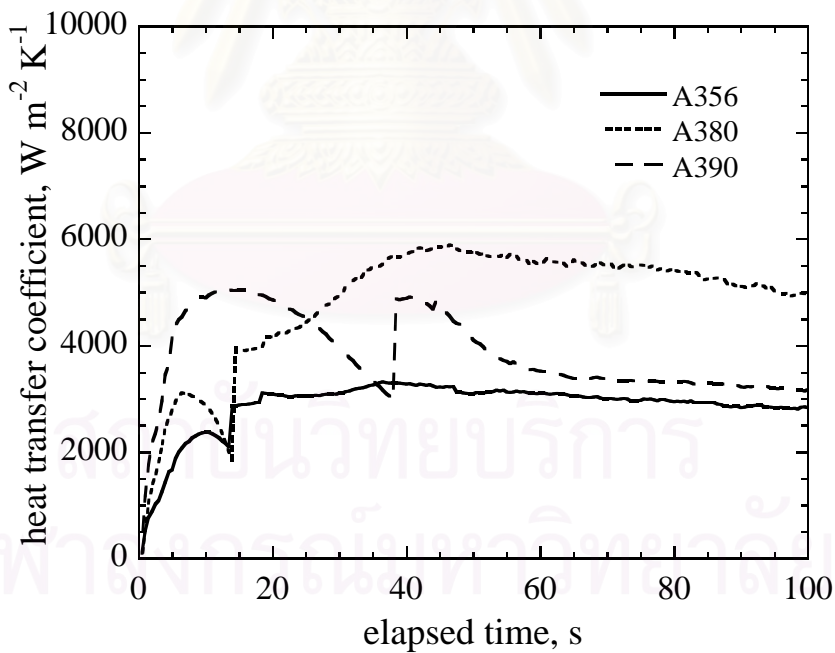


(ข)

ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมที่มีส่วนผสมทางเคมีต่างๆ กันกับแบบหล่อที่เคลือบด้วย white coating หนา 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิเท 1053 K

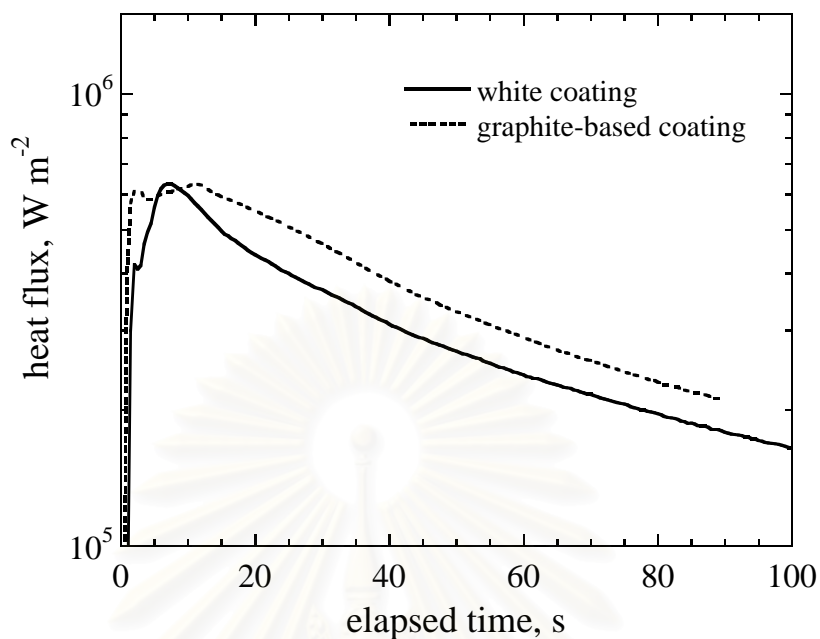


(ก)

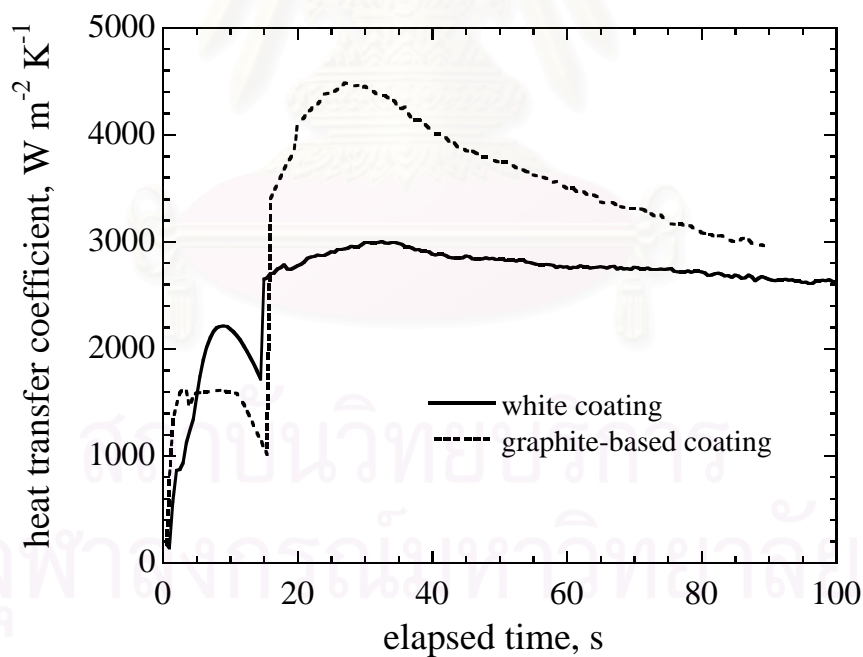


(ข)

ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมทางเคมีต่างๆกันกับแบบหล่อที่เคลือบด้วย white coating หนา 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิเทเหนื้ออุณหภูมิ liquidus ของอะลูมิเนียมผสมแต่ละตัวเท่ากับ 100 K

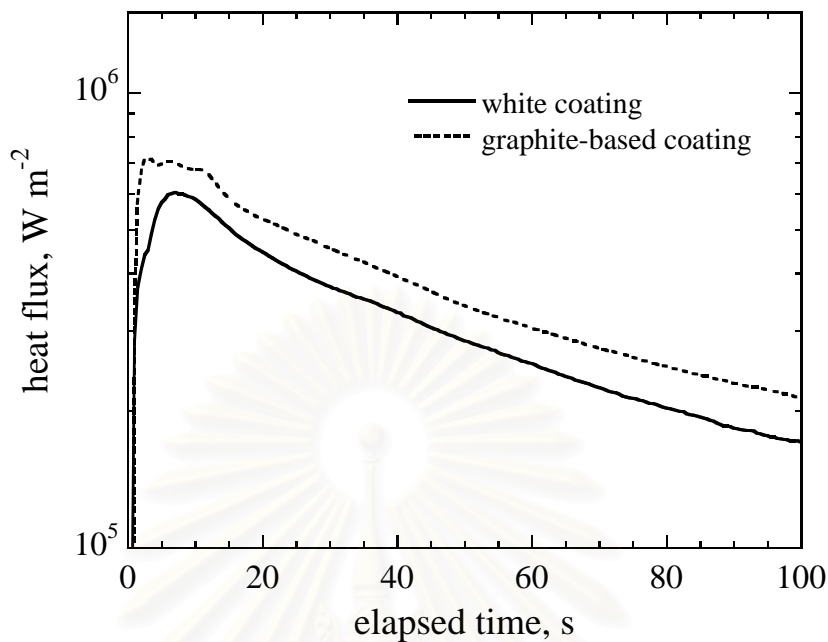


(ก)

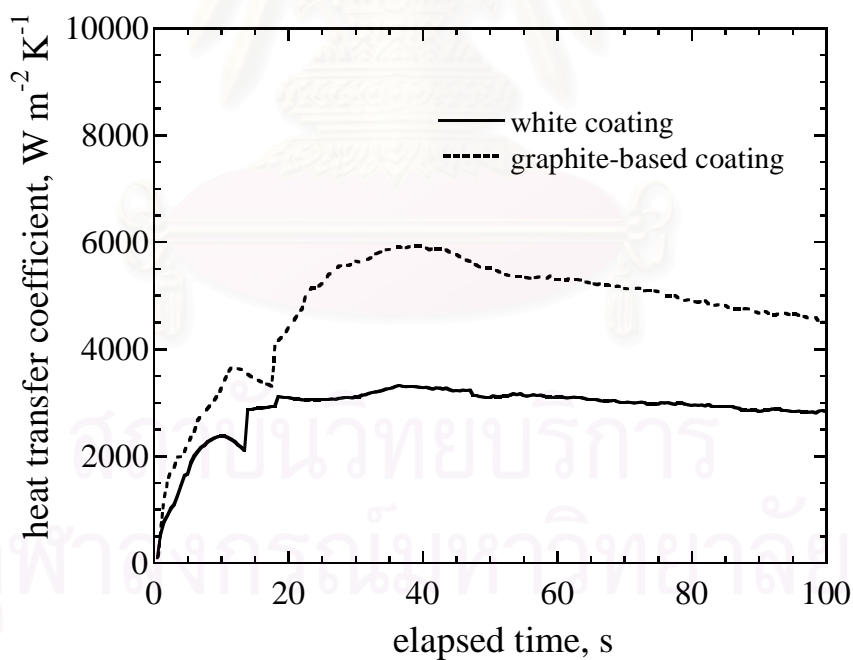


(ข)

ภาพที่ 26 การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิว ด้วย white coating และ graphite-based coating หนา 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิ เหนืออุณหภูมิ liquidus 50 K

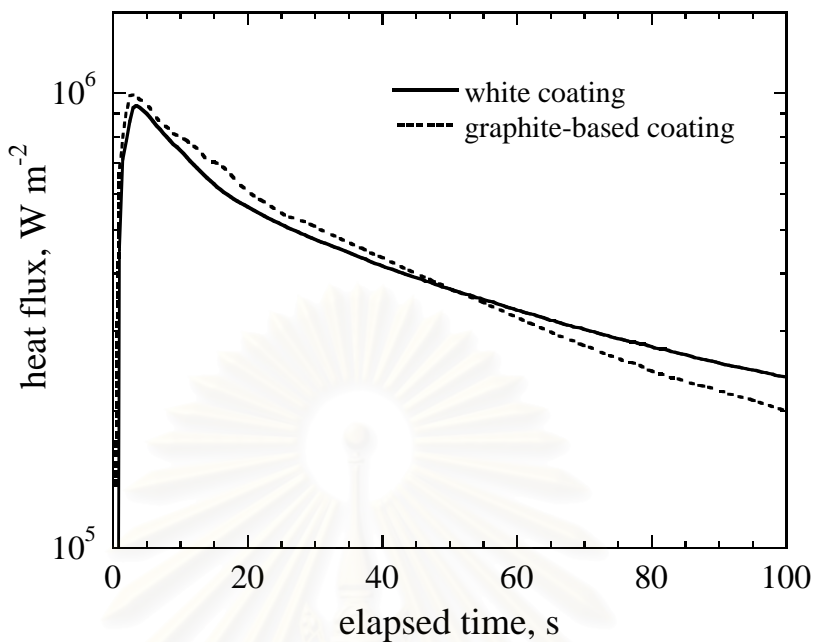


(ก)

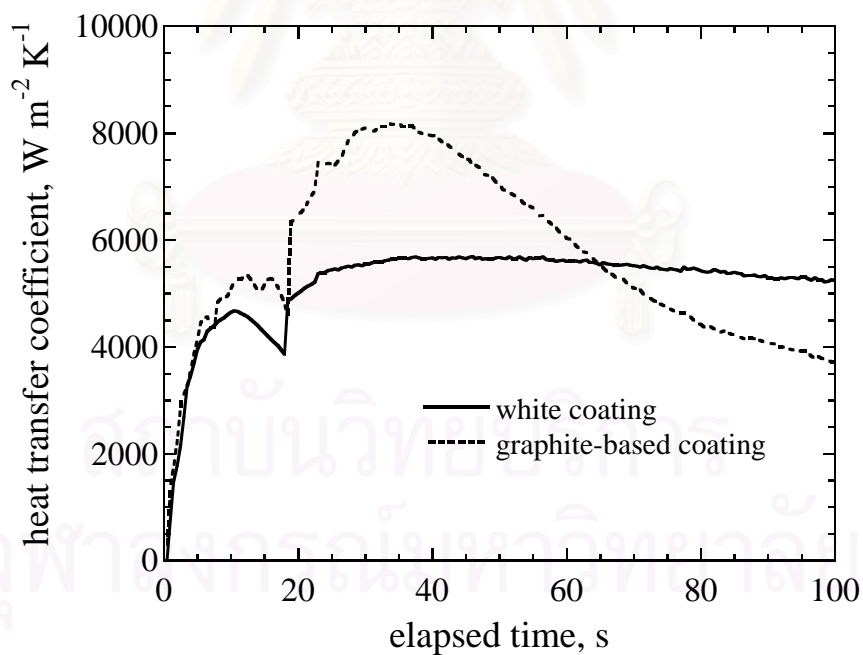


(ข)

ภาพที่ 27 การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating และ graphite-based coating หนา 100 ไมโครเมตร ที่อุณหภูมิเหนืออุณหภูมิ liquidus 100 K

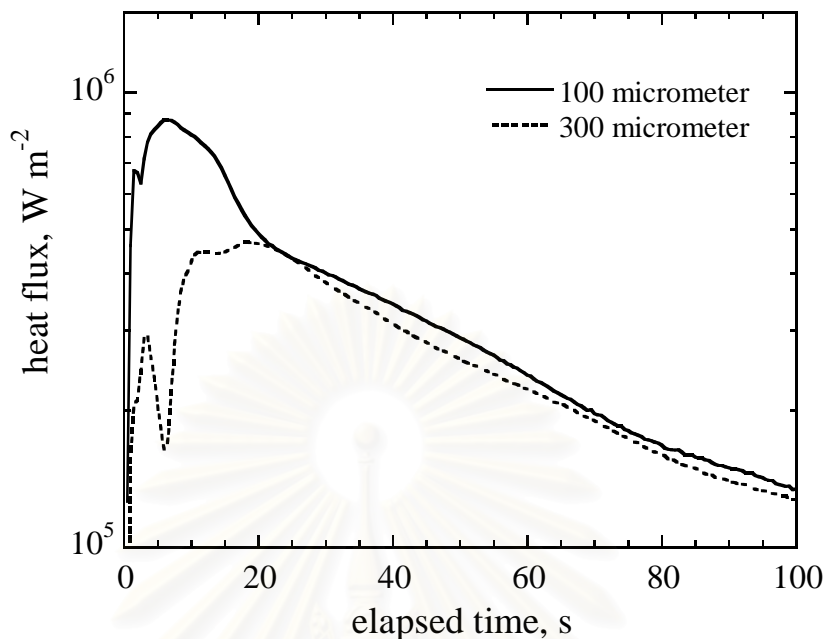


(ก)

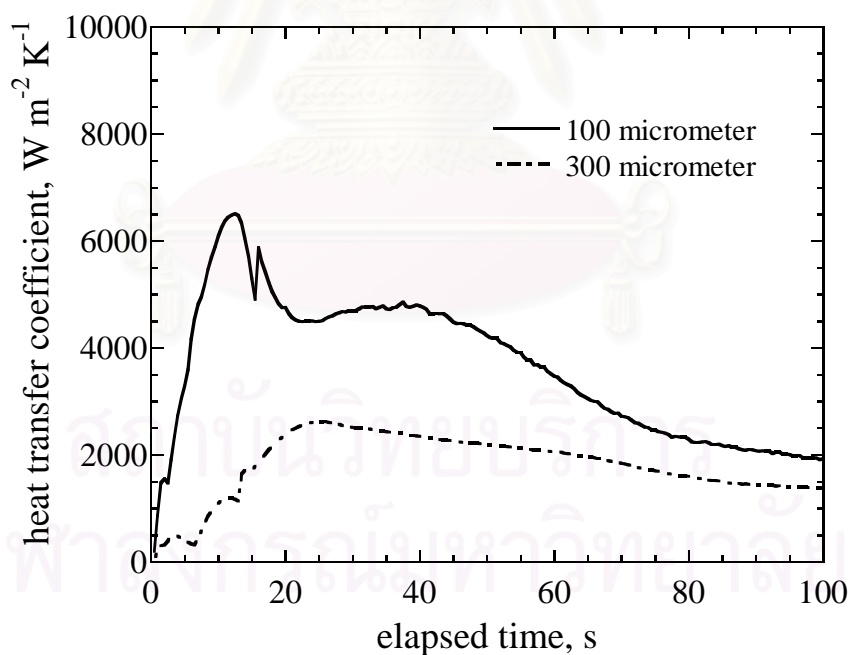


(ข)

ภาพที่ 28 การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิว ด้วย white coating และ graphite-based coating หนา 100 ไมโครเมตร เทที่อุณหภูมิ เหนืออุณหภูมิ liquidus 150 K

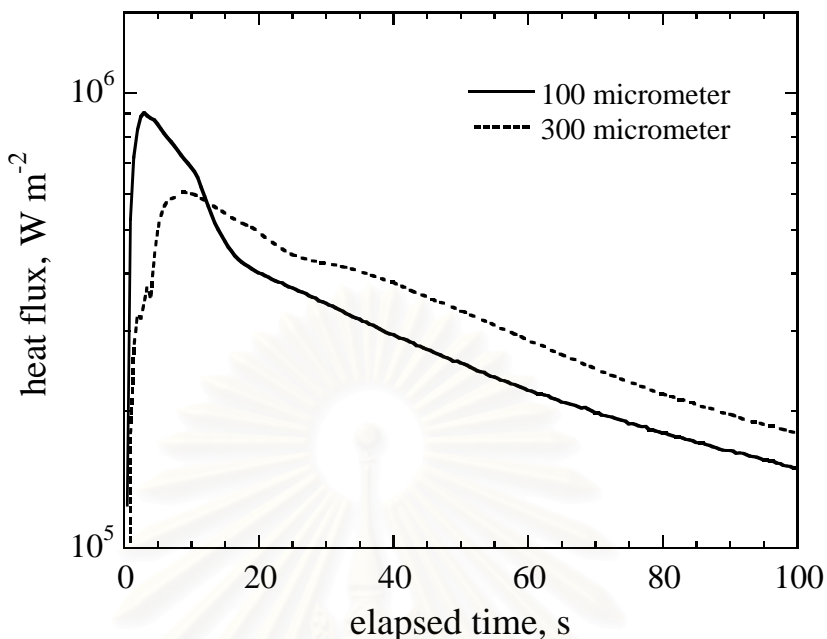


(ก)

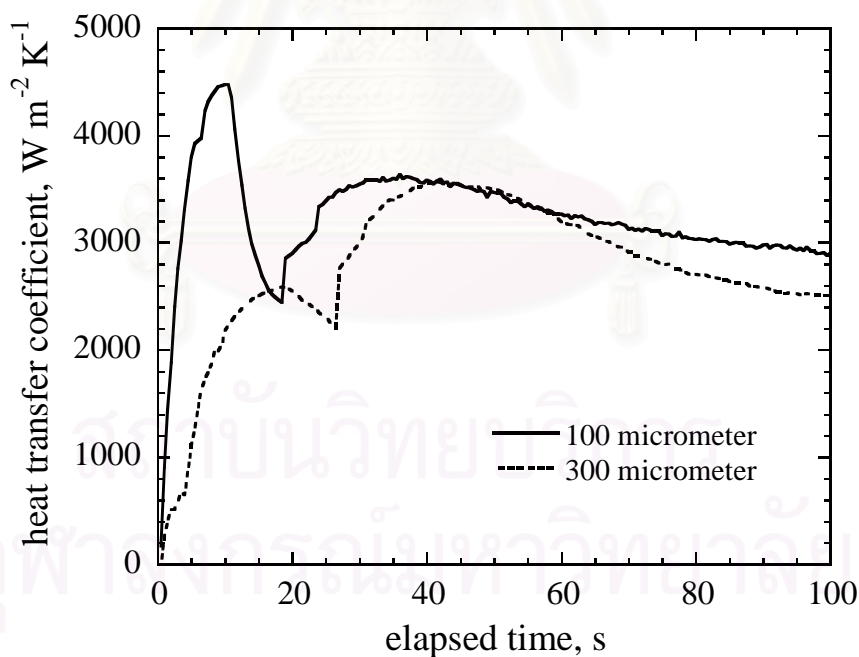


(ข)

ภาพที่ 29 การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating ที่ความหนาต่างกัน อุณหภูมิเท 1053 K

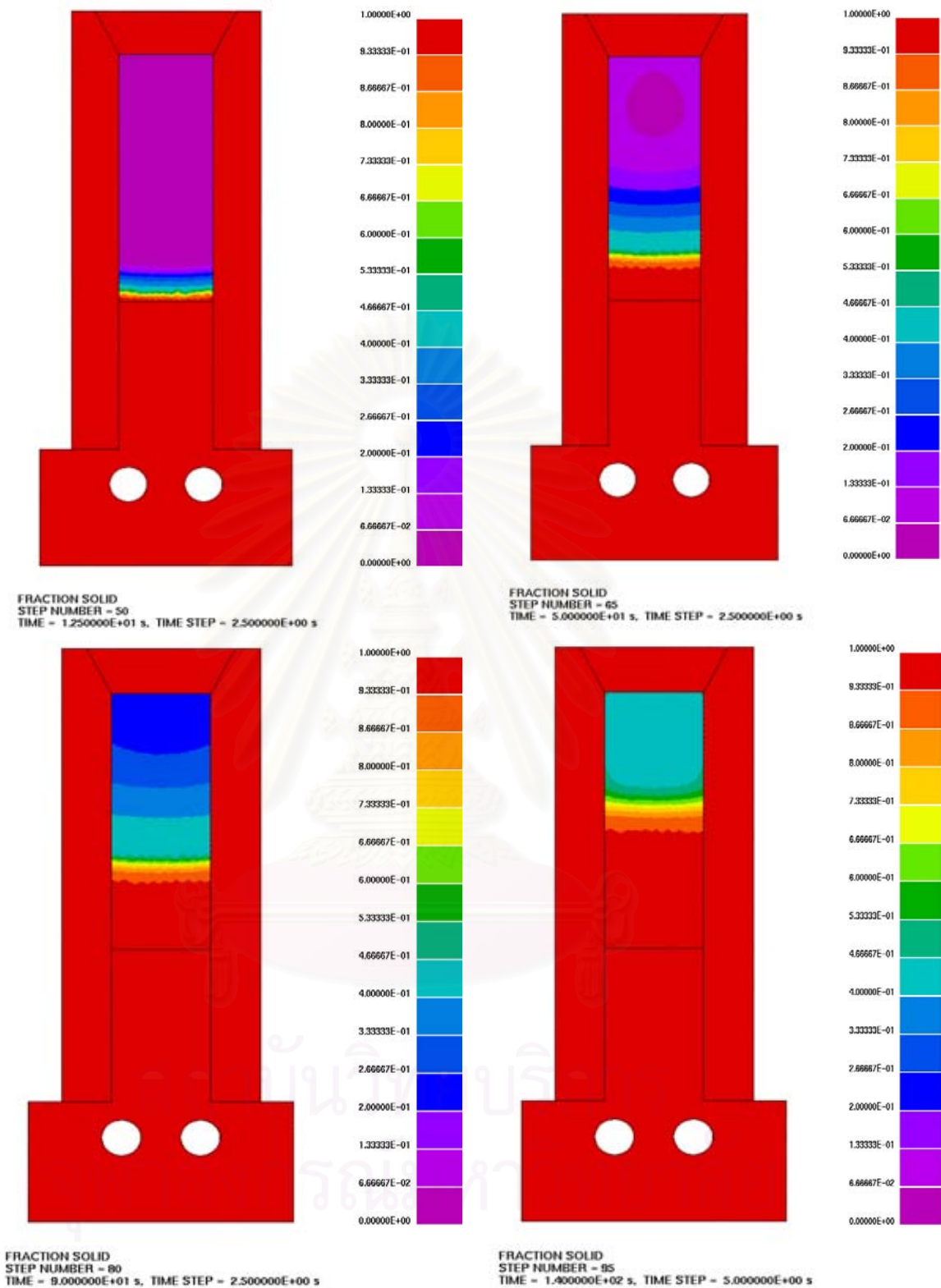


(ก)

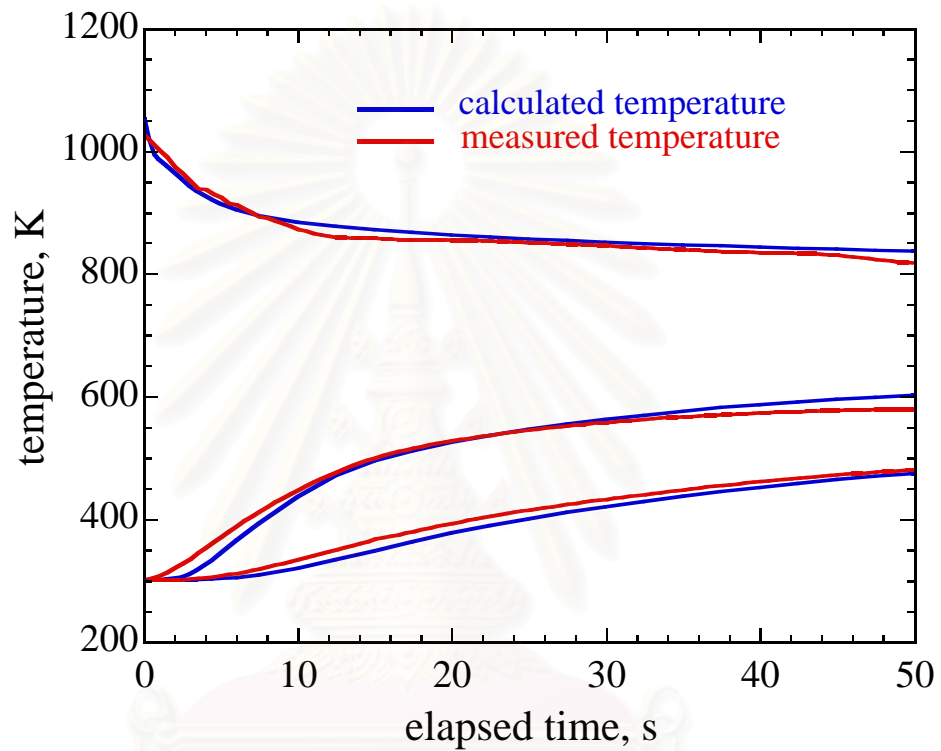


(ข)

ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบ (ก) ค่าฟลักซ์ความร้อนและ (ข) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน บริเวณรอยต่อระหว่างชิ้นงานอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 กับแบบหล่อที่เคลือบผิว ด้วย graphite-based coating ที่ความหนาต่างกัน อุณหภูมิเท 1053 K



ภาพที่ 31 ภาพการจำลองการเย็นตัวของชิ้นงานภายในแบบหล่อด้วยคอมพิวเตอร์ที่เวลาต่างๆ ของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ลงสู่แบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating หนาประมาณ 100 ไมโครเมตร อุณหภูมิเท 1053 K

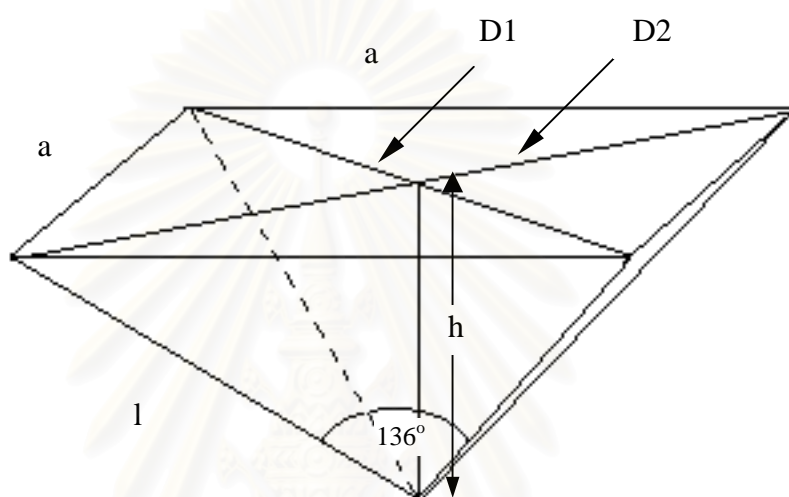


ภาพที่ 32 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้กับอุณหภูมิที่คำนวณด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 ลงสู่แบบหล่อที่เคลือบผิวด้วย white coating หนาประมาณ 100 ไมโครเมตร อุณหภูมิเท 1053 K ที่ได้จากการทดลองเป็นตัวแปรเบื้องต้น



ภาพที่ 33 ชั้นของสารเคลือบผิวแบบหล่อหนาประมาณ 100 ไมโครเมตร มีโพรงอากาศขนาดเล็กระจายอยู่ทั่วไปข้างในชั้นเคลือบ

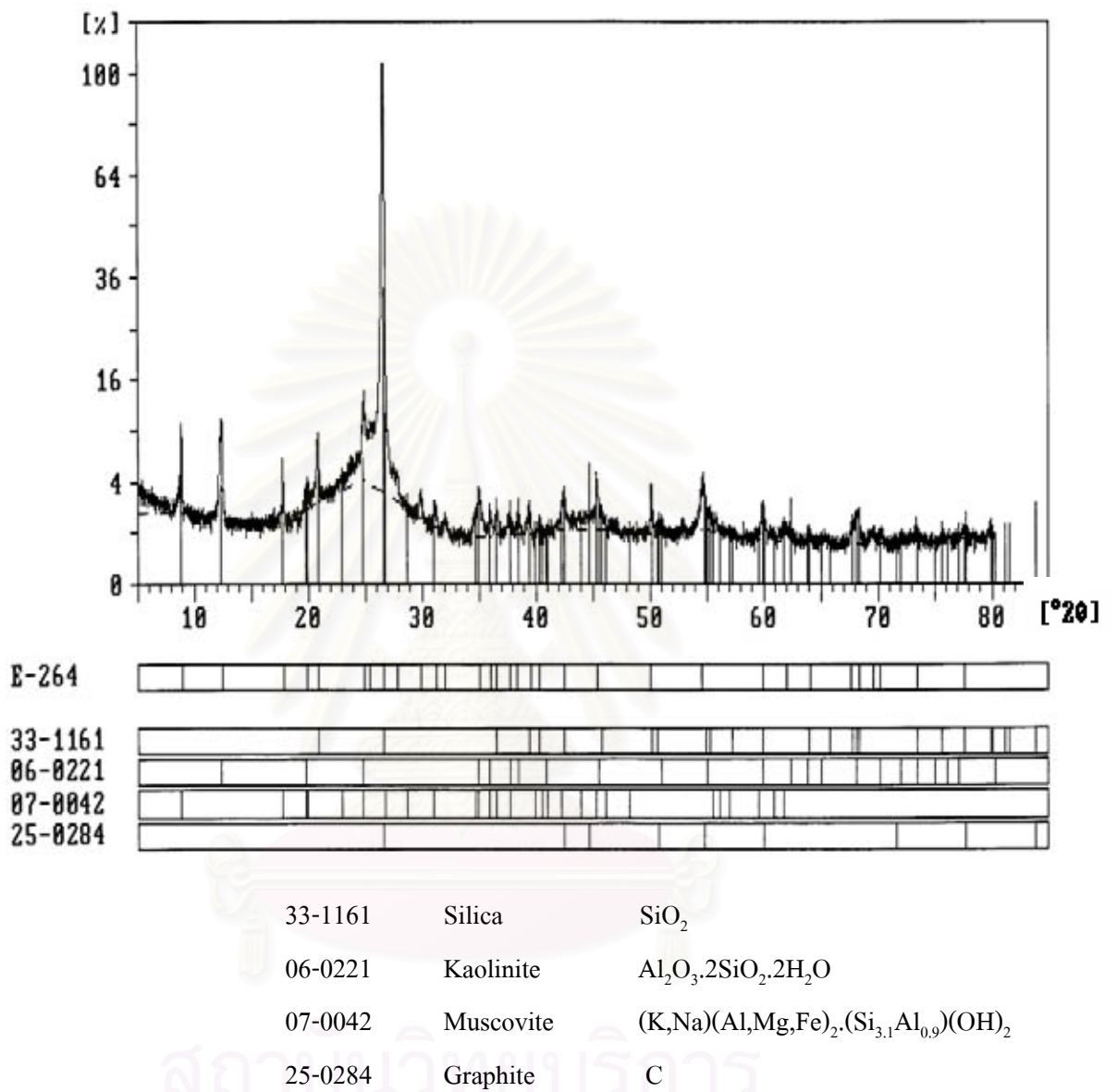
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



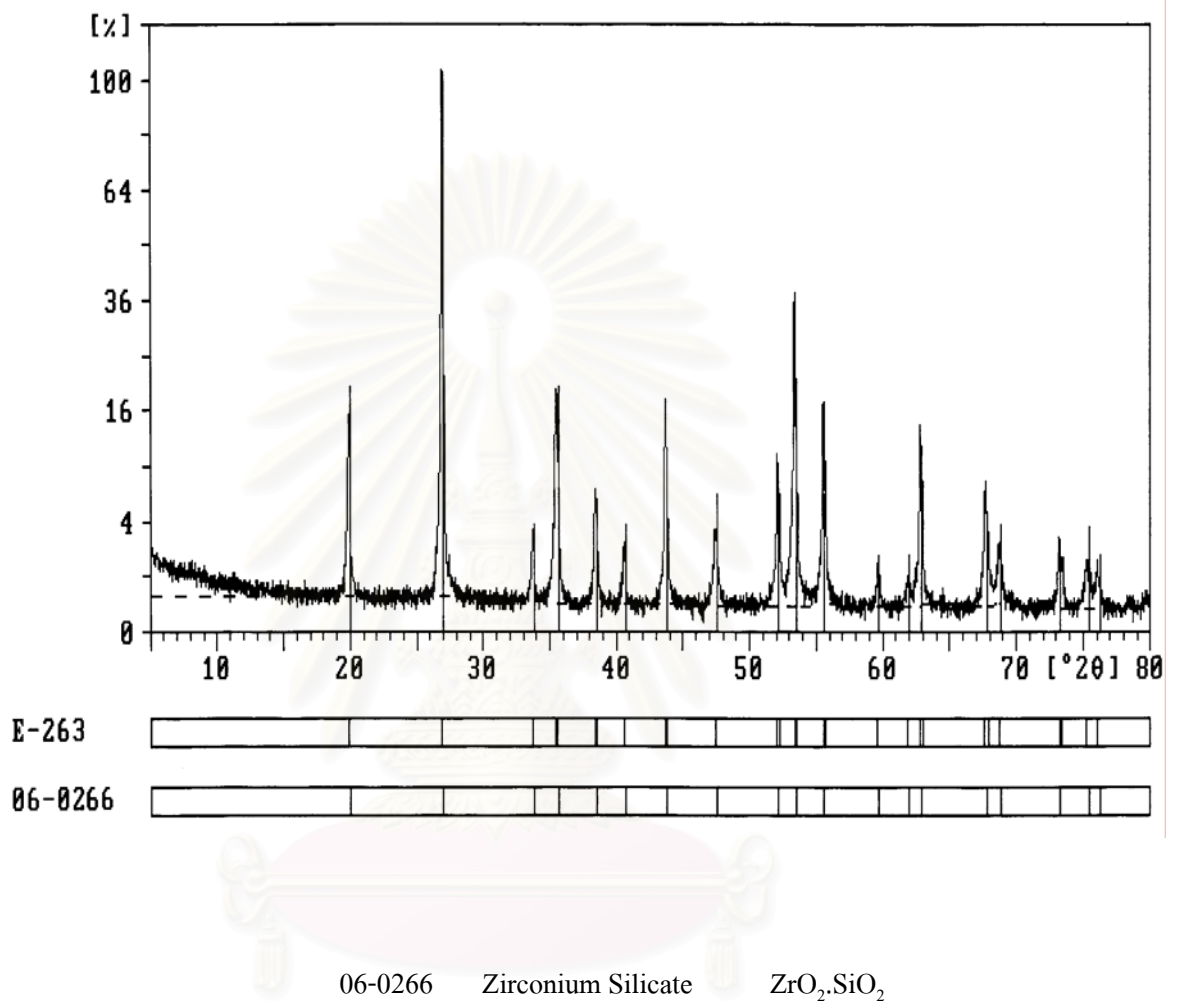
ภาพที่ 34

ลักษณะของหัวกดเครื่องวัดความแข็ง Vicker Hardness ซึ่งใช้ในการประมาณความหนาของเคลือบอย่างง่าย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 35 ผลวิเคราะห์ X-Ray Diffractometer ของสารเคลือบผิวที่มีสมบัตินำความร้อนได้ดี (graphite-based coating)



ภาพที่ 36 ผลวิเคราะห์ X-Ray Diffractometer ของสารเคลือบผิวที่มีสมบัติเป็นฉนวนความร้อน (white coating)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาว วันทนีย์ พุกกะคุปต์
วัน-เดือน-ปีเกิด	12 พฤษภาคม 2520
ที่อยู่	70/48 ซอยโอพาร์ 2 ถนนนวมินทร์ แขวงคลองกุ่ม เขตบึงกุ่ม กรุงเทพมหานคร 10240
วุฒิการศึกษา	ประถมศึกษา โรงเรียนสาธิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2531 มัธยมศึกษา โรงเรียนสาธิตจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2536 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์ (เซรามิกส์) คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2540
ประสบการณ์	ผู้ช่วยวิจัยตั้งแต่ปี 2542 - ปัจจุบัน
ผลงานวิจัย	งานวิจัยเรื่อง “Determination of Heat Transfer Coefficient at Metal/Mold Interface during Directional Solidification in Metallic Mold” เสนอในการประชุม Asian Foundry Congress ครั้งที่ 7 ณ กรุง ไทเป ประเทศไต้หวัน ระหว่างวันที่ 12-15 ตุลาคม 2544
ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน	กลุ่มวิจัยการแข็งตัวของน้ำโลหะ (Solidification Research Laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
โทรศัพท์ติดต่อ	02-218-6946