

การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า



นายศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A THERMAL MODELING OF LADLE OPERATION DURING STEELMAKING
IN ELETRICAL ARC FURNANCE



Mr. Siripong Cheanklin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเข้ารับน้ำเหล็กระหว่างกา
ผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

โดย

นาย ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์

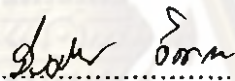
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

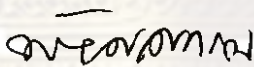
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิทธิพล เตียววณิชย์


คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับ
นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

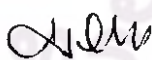

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

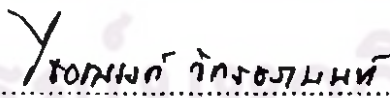
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิทธิพล เตียววณิชย์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์)

ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น: การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (A THERMAL MODELING OF LADLE OPERATION DURING STEELMAKING WITH ELECTRICAL ARC FURNACE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร. อธิพิณ เตียววณิชย์, 212 หน้า.

ในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า การควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิตมีความสำคัญที่สุด ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปในปัจจุบัน โรงงานควบคุมโดยการเผื่ออุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กจากเตาหลอม และ อุณหภูมิในการช้อนเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งมักจะเผื่อในทางสูงเนื่องจากขาดข้อมูลเกี่ยวกับการสูญเสียความร้อนในขั้นตอนต่างในระหว่างการผลิต จึงทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานโดยไม่จำเป็น

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงเป็นการศึกษาสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กขนาด 25 ตัน ในระหว่างรอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ จำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ใน 4 ขั้นตอนที่สำคัญ ได้แก่ ขั้นตอนการช้อนเบ้ารับน้ำเหล็ก, ขั้นตอนการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก, ขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็ก และขั้นตอนการรอกการช้อนเบ้ารับน้ำเหล็ก การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการจำลองใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดภาคสนาม และข้อมูลเชิงสถิติของการผลิตของโรงงานที่ทำการศึกษา

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ในระหว่างรอบการทำงานที่ 1 - 5 ความร้อนสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะสูงขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียความร้อนจากน้ำเหล็กไปยังเบ้าลดลง จึงสามารถลดอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมลงจาก 1700°C เหลือ 1690°C โดยอุณหภูมิน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดการถ่ายน้ำเหล็กยังสูงพอตามเงื่อนไขในการผลิต เป็นผลให้สามารถลดการใช้ไฟฟ้าในการหลอมได้ 7 kWh/ton ซึ่งสำหรับโรงงานที่ศึกษา จะสามารถประหยัดได้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าได้ 2.5 ล้านบาท/ปี

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนิติศ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

4970600021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : STEELMAKING PROCESS/ LADLE PREHEATING / HOLDING PERIOD
TEEMING / CONTINUOUS CASTING / ENERGY CONSERVATION / NUMERICAL
SIMULATION

SIRIPONG CHEANKLIN : A THERMAL MODELING OF LADLE OPERATION
DURING STEELMAKING WITH ELETRICAL ARC FURNANCE. THESIS

ADVISOR : PONGTORN CHARUNYAKORN, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR :
ITTIPON DIEWWANIT, Ph.D., 212 pp.

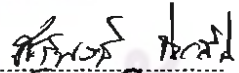
In steelmaking process with Electrical Arc Furnace (EAF), the ladles play the important role by received the molten steel tapping from EAF and teeming out at Continuous Casting station. Because of controlling molten steel temperature throughout process is very significant owing to the tight limit of molten steel temperature in tundish. Consequently, good understanding of heat transfer and thermal condition of molten steel and ladle is essential for proper control molten steel temperature and reduced energy consumptions of steelmaking process.

In this study, transient heat transfer during cyclic steelmaking process in a 25-ton ladle is numerically investigated. By using commercial software, the transient heat transfer simulations are performed by 4-step consist of preheating ladle, holding, teeming and cool down period. The simulation time of each period determined by statistical data analysis of steelmaking operations. The model validation and parameter adjustment are made by comparing modeling results with experimental data taken from field experiments in a steel factory.

The main results of this study related to the thermal condition of ladle during heat 1 - 5. The higher temperature distribution of ladle after 4 heat is reduced heat transfer form molten steel so decrease tapping temperature form 1700°C to 1690°C for saving electrical energy is possible. Refer to the calculating the specific electrical energy demand of the EAF equation by Iron and Steel Institute (2001), reduced 10 °C of tapping temperature will save electrical energy consumption 7 kWh/ton which be valued 2.5 million baht/year for the researched steel factory.

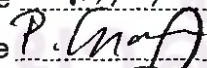
Department : ... Mechanical Engineering ...

Student's Signature



Field of Study : Mechanical Engineering ...

Advisor's Signature



Academic Year : ... 2009 ...

Co-advisor's Signature



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญาณกรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อธิทิพล เตี้ยวณิษฐ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้โอกาสสำคัญในการทำงานวิจัยฉบับนี้ รวมถึงการให้ความกรุณาถ่ายทอดความรู้คำแนะนำ ประสบการณ์ต่างๆ ที่มีคุณค่ายิ่ง อันเป็นแรงผลักดันให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล ที่ให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไชยณรงค์ จักรธรรานนท์ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านสละเวลาให้คำแนะนำ คำปรึกษา และถ่ายทอดความรู้ตลอดระยะเวลาในการทำงานวิจัยขึ้นนี้จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ บริษัทสยาม สตีล ซินติเกต จำกัด มหาชน ที่เอื้อเฟื้อข้อมูล อุปกรณ์ และสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบพระคุณคุณบุญล้ำ ศรีพิชัย ผู้อำนวยการโรงงาน คุณพิษณุ เจริญสมศักดิ์ ผู้จัดการโรงงาน คุณวันชัย มนูญพานิชย์ ผู้จัดการส่วนโรงหลอม คุณธนเสวงศ์ประยูร วิศวกรโรงหลอม ทีมวิศวกรและทีมช่างเทคนิคของบริษัทที่ช่วยให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยฉบับนี้ ผอ. วิกรม วัชรคุปต์ ผู้อำนวยการสถาบัน คุณหิน นววงศ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อธิทิพล เตี้ยวณิษฐ์ ที่ปรึกษาสถาบัน คุณณัฐพล รัตนมาลี หัวหน้าแผนกวิจัยและพัฒนา คุณทศพล เจริญไรสง นักวิจัย คุณอนันติ จิตรานุกเคราะห์ และคุณพลพร จาติเสถียร ผู้ช่วยนักวิจัย พี่ๆ เพื่อนๆ ที่คอยแนะนำและคำปรึกษา และที่สำคัญอย่างยิ่ง คุณจักรวาล จรุงศารทูล เพื่อนนักวิจัยผู้ร่วมทำการทดลอง และคอยช่วยเหลือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ ทีมงานจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณแมนพงษ์ ตั้งตระกูล คุณอภิสิทธิ์ บุญเกิด และคุณตรงจิตต์ ขวหา ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ อำนวยความสะดวกในงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ที่คอยให้สนับสนุน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จการศึกษา อันคุณประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ครอบครัว ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ป
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.4 แนวทางการศึกษาวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 การนำเสนอผลงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 ข้อมูลจากการศึกษาค้นคว้า.....	7
2.1 กระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า	7
2.1.1 เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	7
2.1.2 เบ้ารับน้ำเหล็ก.....	13
2.1.3 วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	16
2.1.4 อ่างรับน้ำเหล็ก	21
2.1.5 กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง.....	22
2.1.6 คุณสมบัติรับน้ำเหล็ก	23
2.1.7 คุณสมบัติสแตก.....	23

หน้า

2.1.8	ผลิตภัณฑ์.....	24
2.1.9	การควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิต.....	24
2.2	การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา.....	26
2.2.1	ผลการศึกษากการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนการอุ่น.....	26
2.2.2	ผลการศึกษาที่แสดงการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กในระหว่างการผลิต.....	30
2.2.3	ผลการศึกษากการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำเหล็ก และเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิต.....	33
2.2.4	ผลการศึกษาสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำในระหว่างกระบวนการผลิต.....	49
2.3	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	54
2.3.1	การนำความร้อน.....	54
2.3.2	การพาความร้อน.....	56
2.3.3	การแผ่รังสีความร้อน.....	58
บทที่ 3	ข้อมูลเชิงสถิติของการผลิต และข้อมูลจากการตรวจวัดภาคสนาม.....	64
3.1	ข้อมูลการผลิตในส่วนขอเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	66
3.1.1	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมเศษเหล็ก.....	66
3.1.2	ปริมาณการพ่นก๊าซออกซิเจน ปริมาณการเติมธาตุคาร์บอน ในการหลอมเศษเหล็ก.....	67
3.1.3	ระยะเวลาที่ใช้ในการหลอม (tap to tap time).....	67
3.1.4	อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ทำการเท.....	68
3.2	ข้อมูลวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ และ สแลก.....	68
3.3	ระยะเวลาของเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละสถานีการผลิต.....	69
3.3.1	ขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	69
3.3.2	ขั้นตอนการรอการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	70
3.3.3	ขั้นตอนการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	71
3.3.4	ขั้นตอนการรอการถ่ายน้ำเหล็ก.....	71
3.3.5	ขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็ก.....	72
3.3.6	ขั้นตอนการเทสแลก.....	73

หน้า

3.3.7	ขั้นตอนการรอกการอุ่น	73
3.4	อุณหภูมิน้ำเหล็กในแต่ละขั้นตอนการผลิต.....	75
3.5	ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างทำการอุ่น.....	75
3.5.1	เบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในการตรวจวัดภาคสนาม.....	75
3.5.2	การตรวจวัดภาคสนามของอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก	78
3.5.3	ผลการตรวจวัดภาคสนาม.....	78
3.5.4	พิจารณาเฉพาะการจำลองการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ทำการก่อสร้างใหม่ (การอุ่นครั้งแรก).....	81
3.5.5	พิจารณาเฉพาะการเย็นตัวของเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีวางตั้ง.....	83
3.6	ข้อมูลอุณหภูมิผิวนอกเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิตเหล็กกล้า	85
3.6.1	ผลการตรวจวัดภาคสนาม.....	85
3.7	ข้อมูลอุณหภูมิน้ำเหล็กในระหว่างการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก.....	89
3.7.1	ผลการตรวจวัดภาคสนาม.....	89
3.8	ข้อมูลอุณหภูมิผิวหน้าสแลกที่ปกคลุมน้ำเหล็ก.....	90
3.8.1	ผลการตรวจวัดภาคสนาม.....	90
3.9	ข้อมูลอุณหภูมิผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	92
3.9.1	ผลการตรวจวัดภาคสนาม.....	92
บทที่ 4	โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาวิจัย.....	93
4.1	การทำงานของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์.....	94
4.1.1	MeshCAST	94
4.1.2	PreCAST.....	94
4.1.3	DataCAST/ProCAST	99
4.1.4	ViewCAST.....	100
4.2	การตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม (validation).....	101
4.2.1	แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	101
4.2.2	กรณีที่ 1 อุณหภูมิผิวคงที่ (Constant Surface Temperature).....	102
4.2.3	กรณีที่ 2 อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ (Constant Surface Heat Flux)....	104
4.2.4	กรณีที่ 3 การพาความร้อนที่ผิวหน้า (Surface Convection)	106

หน้า

4.3 สรุปผลการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม (validation).....	108
4.4 การหาขนาดตารางที่เหมาะสมในการคำนวณ (mesh sizing).....	108
4.5 สรุปผลการเลือกขนาดตาราง.....	113
4.6 การเลือกขั้นระยะเวลามากที่สุด (maximum time step).....	113
4.7 สรุปผลการเลือกขั้นระยะเวลามากที่สุด.....	115
4.8 ข้อจำกัดของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์.....	115
4.9 ที่มาและความจำเป็นของโปรแกรม.....	116
4.10 การออกแบบโปรแกรม.....	117
4.10.1 จำนวนผิวในการคำนวณ.....	117
4.10.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	123
4.11 การทดสอบการคำนวณของโปรแกรม.....	123
4.12 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา.....	124
บทที่ 5 ผลการศึกษาวิจัย และอภิปรายผลการศึกษาวิจัย.....	128
5.1 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการอุ่นน้ำรับน้ำเหล็ก.....	128
5.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการพักน้ำรับน้ำเหล็ก.....	139
5.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก.....	147
5.4 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็ก.....	154
5.5 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในวงจรการทำงานของน้ำรับน้ำเหล็ก.....	161
บทที่ 6 สรุปผลการศึกษาวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	171
6.1 สรุปการศึกษาวิจัย.....	171
6.2 ปัญหาของงานวิจัย.....	171
6.2 ข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต.....	172
รายการอ้างอิง.....	173
ภาคผนวก.....	176
ภาคผนวก ก ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	177
ภาคผนวก ข ข้อมูลการตรวจวัด.....	180

หน้า

ภาคผนวก ค โปรแกรมคำนวณสมการเชิงเส้นหลายตัวแปร.....	199
ภาคผนวก ง การคำนวณพลังงานความร้อนสะสมภายในเข้รับน้ำเหล็ก	209
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	212



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1-1 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในการหลอมเศษเหล็กระหว่างผู้ประกอบการไทย และต่างประเทศ (สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2006)	2
ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของวัสดุทนไฟชนิด SK38 (บริษัท สยาม รีเฟรคตอรี อินดัสทรี)	15
ตารางที่ 2-2 รายละเอียดแบบจำลองที่ทำการศึกษา, Pan et al. (2003)	47
ตารางที่ 2-3 คุณสมบัติของน้ำเหล็กและการสูญเสียคุณสมบัติของน้ำเหล็กชั้นตอนต่างๆ, Zimmer et al. (2008)	51
ตารางที่ 2-4 สมการผลเฉลยการนำความร้อนหนึ่งมิติที่ขึ้นกับเวลา ด้วยวิธี semi-infinite solid	56
ตารางที่ 3-1 ส่วนประกอบเฉลี่ยทางเคมีของเหล็กกล้าที่ทำการผลิต	69
ตารางที่ 3-2 ระยะเวลาการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละรอบการผลิต	74
ตารางที่ 3-3 คุณสมบัติของน้ำเหล็กเฉลี่ยในระหว่างกระบวนการผลิต.....	75
ตารางที่ 3-4 คุณสมบัติในตำแหน่งต่างๆ ของผิวหน้าสแลก.....	91
ตารางที่ 3-5 คุณสมบัติในตำแหน่งต่างๆ ของผิวข้างด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	92
ตารางที่ 4-1 ข้อมูลแบบจำลองที่ใช้ในการสอบเทียบโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์.....	101
ตารางที่ 4-2 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการสอบเทียบ โปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์.....	102
ตารางที่ 4-3 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการหาค่าตาราง ที่เหมาะสม (mesh sizing)	111
ตารางที่ 4-4 ข้อมูลการแบ่งชั้นน้ำเหล็กในการจำลอง	118
ตารางที่ 4-5 พื้นที่ของแต่ละผิวในแต่ละชั้นของการคำนวณ	120
ตารางที่ 4-6 จำนวน node และ element ในแต่ละชั้นของการคำนวณ	125
ตารางที่ 5-1 คุณสมบัติทางความร้อนของอิฐทนไฟที่ใช้ในการคำนวณ.....	129
ตารางที่ 5-2 คุณสมบัติทางความร้อนของเปลือกเหล็กที่ใช้ในการคำนวณ.....	130
ตารางที่ 5-3 อัตราการถ่ายเทความร้อนของผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละส่วน	141
ตารางที่ 5-4 คุณสมบัติทางความร้อนของน้ำเหล็กที่ใช้ในการคำนวณ.....	148
ตารางที่ 5-5 การยุบรวมชั้นถ่าน้ำเหล็กในการจำลอง จาก 20 เป็น 10 ชั้น	155\

หน้า

ตารางที่ 5-6 การถ่ายเทความร้อนของผิวด้านในใบรับน้ำเหล็กในแต่แบบจำลอง แยกเป็นแต่ละพื้นผิว	156
ตารางที่ 5-7 ระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละชั้นของแบบจำลอง.....	157
ตารางที่ 5-8 ผลประหยัดของการลดอุณหภูมิหน้าเหล็กลง 10°C	161



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1-1 ปริมาณการใช้งานเหล็กโคมภัณฑ์และปริมาณเหล็กที่ผลิต จากการหลอมเศษเหล็ก ของประเทศไทยในแต่ละปี (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2552).....	2
รูปที่ 2-1 ปริมาณการผลิตเหล็กดิบของโลก (อัตราส่วนร้อยละ) ด้วยกระบวนการ เต้าหลอมอาร์คไฟฟ้า เต้าหลอมแบบเบสิกออกซิเจน (Basic Oxygen Furnace, BOF) และเต้าหลอมแบบโอเพนฮาร์ท (Basic Open Hearth, BOH)	8
รูปที่ 2-2 แผนผังส่วนประกอบของเต้าหลอมอาร์คไฟฟ้า ชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	11
รูปที่ 2-3 เต้าหลอมอาร์คไฟฟ้าของโรงงานที่ทำการศึกษา	12
รูปที่ 2-4 การเทน้ำเหล็กจากเต้าหลอมอาร์คไฟฟ้าไปยังเบ้ารับน้ำเหล็ก	12
รูปที่ 2-5 เบ้ารับน้ำเหล็ก ความจุ 25 ตัน.....	14
รูปที่ 2-6 วงจรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	17
รูปที่ 2-7 การก่อบีรับน้ำเหล็ก.....	17
รูปที่ 2-8 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อไล่ความชื้น โดยใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิง.....	18
รูปที่ 2-9 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	18
รูปที่ 2-10 เบ้ารับน้ำเหล็กขณะรอการเทน้ำเหล็กจากเต้าหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	19
รูปที่ 2-11 เบ้ารับน้ำเหล็กขณะทำการถ่ายน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก.....	19
รูปที่ 2-12 เบ้ารับน้ำเหล็กในขณะที่ทำการทดสอบ.....	20
รูปที่ 2-13 เบ้ารับน้ำเหล็กที่ทำการก่อสร้างใหม่.....	20
รูปที่ 2-14 เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมา 46 รอบ	21
รูปที่ 2-15 กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง	22
รูปที่ 2-16 เหล็กทรงยาว (billet) จากกระบวนการผลิต	24
รูปที่ 2-17 แผงผังแสดงตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ ในการทดลอง, Mohanty และ Satayayut (1992).....	28
รูปที่ 2-18 แผงผังแสดงเบ้ารับน้ำเหล็กขณะทำการอุ่น, Mohanty และ Satayayut (1992)	29
รูปที่ 2-19 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาของอิฐทนไฟระหว่างผลการทดลอง และผลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์, Mohanty และ Satayayut (1992)	29

หน้า

รูปที่ 2-20 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในการทดลองการอุ่น ถึงถ่ายน้ำเหล็ก, สมศักดิ์ คงโชติ (1993).....	30
รูปที่ 2-21 อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กหลังจากการอุ่นเปรียบเทียบผล จากการตรวจวัด และผลที่ได้จากการคำนวณ, Gupta และ Chandra (2004)....	31
รูปที่ 2-22 อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กหลังจากปล่อยให้เย็น เปรียบเทียบผลจากการตรวจวัด และผลที่ได้จากการคำนวณ, Gupta และ Chandra (2004).....	31
รูปที่ 2-23 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็ก ระหว่างการทำนาย ด้วยแบบจำลอง และจากการวัดอุณหภูมิ, Gupta และ Chandra (2004).....	32
รูปที่ 2-24 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำเหล็กในอ่างรับน้ำเหล็ก ระหว่างการทำนาย ด้วยแบบจำลอง และจากการวัดอุณหภูมิ, Gupta และ Chandra (2004).....	32
รูปที่ 2-25 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติ ที่ใช้ในการศึกษา, Chakraborty และ Sahai (1992).....	33
รูปที่ 2-26 การแจกแจงอุณหภูมิน้ำเหล็ก กรณีไม่มีการถ่ายความร้อนจากผิว ด้านบนของน้ำเหล็กที่ระยะเวลาการรอ a) 5 นาที b) 10 นาที c) 15 นาที d) 20 นาที, Chakraborty และ Sahai (1992).....	34
รูปที่ 2-27 การแจกแจงอุณหภูมิน้ำเหล็ก กรณีมีการถ่ายความร้อนจากผิวด้านบน ของน้ำเหล็กที่ระยะเวลาการรอ a) 5 นาที b) 10 นาที c) 15 นาที d) 20 นาที, Chakraborty และ Sahai (1992).....	35
รูปที่ 2-28 การแจกแจงอุณหภูมิน้ำเหล็ก กรณีไม่มีการถ่ายความร้อนจากผิวด้านบน ของน้ำเหล็กที่ระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็ก a) 5 นาที b) 20 นาที c) 30 นาที, Chakraborty และ Sahai (1992).....	36
รูปที่ 2-29 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถ่ายน้ำเหล็กตลอดช่วงการถ่ายน้ำเหล็ก กรณีไม่มีการถ่ายความร้อนจากผิว, Chakraborty และ Sahai (1992).....	36
รูปที่ 2-30 การแจกแจงอุณหภูมิน้ำเหล็ก กรณีมีการถ่ายความร้อนจากผิวด้านบน ของน้ำเหล็กที่ระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็ก a) 5 นาที b) 20 นาที c) 30 นาที, Chakraborty และ Sahai (1992).....	37

หน้า

รูปที่ 2-31 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถ่ายน้ำเหล็กตลอดช่วงการถ่ายน้ำเหล็ก
กรณีมีการถ่ายความร้อนจากผิว, Chakraborty และ Sahai (1992)..... 38

รูปที่ 2-32 แผนผังของเข้รับน้ำเหล็กที่ใช้ในการศึกษา, Xia และ Ahokainen (2001)..... 38

รูปที่ 2-33 โดเมนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา,
Xia และ Ahokainen (2001)..... 39

รูปที่ 2-34 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถ่ายน้ำเหล็กในช่วงรอการเทน้ำเหล็ก,
Xia และ Ahokainen (2001)..... 40

รูปที่ 2-35 ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นของเข้รับน้ำเหล็ก ต่อ thermal stratification,
Xia และ Ahokainen (2001)..... 41

รูปที่ 2-36 ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นของเข้รับน้ำเหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
เฉลี่ยของน้ำเหล็ก, Xia และ Ahokainen (2001) 41

รูปที่ 2-37 การสูญเสียความร้อนเฉลี่ยของน้ำเหล็กตลอดระยะเวลาการรอ,
Xia และ Ahokainen (2001)..... 42

รูปที่ 2-38 ความแตกต่างของอัตราการสูญเสียความร้อนที่ผิวหน้าน้ำเหล็กต่อการ
เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็ก, Xia และ Ahokainen (2001) 42

รูปที่ 2-39 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเข้รับน้ำเหล็กในระหว่างรอ,
Xia และ Ahokainen (2001)..... 43

รูปที่ 2-40 แผนผังเข้รับน้ำเหล็กขนาด 107 ต้นที่ทำการศึกษา, Pan et al. (2003)..... 44

รูปที่ 2-41 แนวทางการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการสอบเทียบ,
Pan et al. (2003)..... 45

รูปที่ 2-42 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวด้านในเข้รับน้ำเหล็ก ระหว่างการทำนายด้วย
แบบจำลอง และจากการวัดอุณหภูมิ, Pan et al. (2003) 46

รูปที่ 2-43 โดเมนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา, Pan et al. (2003) 46

หน้า

รูปที่ 2-44 ผลของตัวแปร 1) อุณหภูมิด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนทำการรับน้ำเหล็ก 2) ความหนาของสแลกที่อยู่ปกคลุมด้านบนของเบ้ารับน้ำเหล็ก 3) ระยะเวลาที่เบ้ารับน้ำเหล็กบรรจุน้ำเหล็กในระหว่างรอการถ่ายลงอ่างรับน้ำเหล็ก 4) อัตราการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก (teeming rate) ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถ่ายน้ำเหล็กในขณะช่วงทำการถ่ายน้ำเหล็ก, Pan et al. (2003).....	48
รูปที่ 2-45 สภาวะที่การถ่ายเทความร้อนเป็นฟังก์ชันของเวลา และตำแหน่ง (Non-Stationary state), Volkova and Janke (2003)	49
รูปที่ 2-46 เปรียบเทียบผลการทดลองวัดอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก กับผลที่ได้จากการทำนาย, Volkova and Janke (2003)	50
รูปที่ 2-47 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในการทดลอง, Zimmer et al. (2006)	51
รูปที่ 2-48 อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ในแต่ละกระบวนการ, Zimmer et al. (2006) ...	52
รูปที่ 2-49 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลา เปรียบเทียบระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กที่ ก่อตั้งใหม่กับเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้ว, Zimmer et al. (2006).....	52
รูปที่ 2-50 การแจกแจงอุณหภูมิในชั้นต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็ก, Zimmer et al. (2006)	53
รูปที่ 2-51 การแจกแจงอุณหภูมิที่เวลาใดๆ ของของแข็งมีลักษณะกึ่งต่อเนื่อง (semi-infinite solid) สำหรับเงื่อนไขที่ผิว 3 กรณี: กรณีที่ 1 อุณหภูมิผิวคงที่, กรณีที่ 2 อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ และ กรณีที่ 3 การพาความร้อนที่ ผิวหน้า, Incropera และ (DeWitt 2001)	55
รูปที่ 2-52 ผิวที่มีลักษณะล้อมรอบ (enclosure)	60
รูปที่ 2-53 การหาค่า view factor ระหว่างแผ่นวงกลมเรียบสองแผ่นที่วางห่างกัน	61
รูปที่ 2-54 ผิวปิดลักษณะยาว ประกอบด้วยผิว 3 ผิว	61
รูปที่ 3-1 ไบบันท์ที่ข้อมูลของสถานีเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า	65
รูปที่ 3-2 ไบบันท์ที่ข้อมูลของสถานีการหล่อแบบต่อเนื่อง.....	65
รูปที่ 3-3 ไบบันท์ที่ข้อมูลของสถานีอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	66
รูปที่ 3-4 การแจกแจงความถี่ (histogram) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอม	67

หน้า

รูปที่ 3-5 การแจกแจงความถี่ (histogram) ระยะเวลาที่ใช้ในการหลอม (tap to tap time) . 68

รูปที่ 3-6 ถ้วยรับสแลก 69

รูปที่ 3-7 การแจกแจงความถี่ (histogram) ระยะเวลาทำการอุ่นในระหว่างรอบการทำงาน 70

รูปที่ 3-8 การแจกแจงความถี่ (histogram) ระยะเวลาเฉลี่ยในการรอการเทน้ำเหล็ก..... 70

รูปที่ 3-9 การแจกแจงความถี่ (histogram) ระยะเวลาการเทน้ำเหล็ก
(Holding Time) 71

รูปที่ 3-10 การแจกแจงความถี่ (histogram) กรณีทำการหล่อแบบ 2 ช่อง (stand)..... 72

รูปที่ 3-11 การแจกแจงความถี่ (histogram) กรณีทำการหล่อแบบ 3 ช่อง (stand)..... 73

รูปที่ 3-12 การแจกแจงความถี่ (histogram) ระยะเวลาในขั้นตอนการรอการอุ่นเบ้า
รับน้ำเหล็ก..... 74

รูปที่ 3-13 แผนผังตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก 76

รูปที่ 3-14 เบ้ารับน้ำเหล็กที่ทำการฝังเทอร์โมคัปเปิลไว้ภายใน..... 77

รูปที่ 3-15 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด R ที่ฝังในเบ้ารับน้ำเหล็ก 77

รูปที่ 3-16 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K แบบตะเกียบ 77

รูปที่ 3-17 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด ยี่ห้อ Fluke รุ่น 561 HVAC Pro 78

รูปที่ 3-18 คุณหมุมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่ตำแหน่งผนังข้าง
ตลอดช่วงการทดลอง 79

รูปที่ 3-19 คุณหมุมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่ตำแหน่งผนังกัน
ตลอดช่วงการทดลอง 80

รูปที่ 3-20 เปรียบเทียบคุณหมุมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ระยะเดียวกัน ระหว่างผนังข้าง
และผนังกัน..... 80

รูปที่ 3-21 คุณหมุมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
ที่ตำแหน่งผนังข้างในช่วงทำการอุ่นครั้งที่ 1 81

รูปที่ 3-22 การแจกแจงคุณหมุมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ตำแหน่งผนังข้าง
ในช่วงทำการอุ่นครั้งที่ 1 82

หน้า

รูปที่ 3-23 อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ระยะต่างๆ
ที่เวลาใดๆ เทียบกับเวลา ในช่วงทำการอุ่นครั้งที่ 1 83

รูปที่ 3-24 อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ตำแหน่งผนังข้าง
ในช่วงการเย็นตัวของเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีวางตั้ง 84

รูปที่ 3-25 การแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ตำแหน่งผนังข้าง
ในช่วงการเย็นตัว ของเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีวางตั้ง 84

รูปที่ 3-26 กล้องถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด ยี่ห้อ Electrophysics รุ่น Hotshot XL
ช่วงการวัด -20 ถึง 500 °C 85

รูปที่ 3-27 ภาพถ่ายรังสีอินฟราเรดของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างรอบการทำงานที่ 1 ถึง 4..... 86

รูปที่ 3-28 ตำแหน่งของเปลือกนอกเบ้ารับน้ำเหล็กที่นำข้อมูลมาวิเคราะห์..... 86

รูปที่ 3-29 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก
ในระหว่างรอบการทำงานที่ 1 ถึง 4 87

รูปที่ 3-30 ภาพถ่ายรังสีอินฟราเรดของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการเย็นตัวแบบตั้ง..... 88

รูปที่ 3-31 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก
ในระหว่างการเย็นตัวแบบตั้ง 88

รูปที่ 3-32 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในน้ำเหล็กในระหว่างการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก..... 89

รูปที่ 3-33 กล้องถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด ยี่ห้อ FLIR รุ่น P640 ช่วงการวัด -40 ถึง 2000 °C . 90

รูปที่ 3-34 ภาพถ่ายรังสีอินฟราเรด และภาพถ่ายของผิวสแลก
ขณะเคลื่อนย้ายมาถึงสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง 91

รูปที่ 3-35 ภาพถ่ายรังสีอินฟราเรด และภาพถ่ายของผิวข้างด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก
ภายหลังจากการถ่ายน้ำเหล็ก 92

รูปที่ 4-1 โปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการศึกษา 93

รูปที่ 4-2 หน้าต่าง MeshCAST 94

รูปที่ 4-3 หน้าต่าง PreCAST 95

รูปที่ 4-4 หน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ..... 96

รูปที่ 4-5 การกำหนดอินเทอร์เฟซแบบ Equivalence 97

รูปที่ 4-6 การกำหนดอินเทอร์เฟซแบบ Coincident..... 97

หน้า

รูปที่ 4-7 การกำหนดอินเทอร์เฟสแบบ Non-coincident.....	98
รูปที่ 4-8 หน้าต่างในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต	99
รูปที่ 4-9 หน้าจอควบคุม	100
รูปที่ 4-10 หน้าต่าง view case	100
รูปที่ 4-11 แบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม.....	101
รูปที่ 4-12 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ กรณีที่ 1 อุณหภูมิผิวคงที่.....	103
รูปที่ 4-13 การแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ กรณีที่ 1 อุณหภูมิผิวคงที่.....	104
รูปที่ 4-14 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ กับเวลา กรณีที่ 2 อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่.....	105
รูปที่ 4-15 การแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ กรณีที่ 2 อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่.....	106
รูปที่ 4-16 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ กับเวลา กรณีที่ 3 การพาความร้อนที่ผิวหน้า	107
รูปที่ 4-17 การแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ กรณีที่ 3 การพาความร้อนที่ผิวหน้า	108
รูปที่ 4-18 แบบจำลองที่ใช้ในการหาค่าตารางที่เหมาะสม.....	109
รูปที่ 4-19 แบบจำลอง กรณีตารางมีขนาด 10 mm	110
รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตาราง ต่อจำนวน node และ element	110
รูปที่ 4-21 เปรียบเทียบผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อเปลี่ยนขนาดตาราง	112
รูปที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตาราง ต่อผลการคำนวณ และระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ.....	113
รูปที่ 4-23 เปรียบเทียบผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อเปลี่ยนขึ้นระยะเวลา.....	114
รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างขึ้นระยะเวลา ต่อผลการคำนวณ และระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ.....	114

หน้า

รูปที่ 4-25 ขั้นตอนการทำงานที่เลือกใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อน
ของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการถ่ายน้ำเหล็ก (teeming period) 116

รูปที่ 4-26 การแบ่งการลดระดับของน้ำเหล็กออกเป็น 22 ชั้น 119

รูปที่ 4-27 ความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบการมองเห็น 121

รูปที่ 4-28 การหาค่าตัวประกอบการมองเห็น 122

รูปที่ 4-29 หน้าต่างการปฏิบัติงานโปรแกรมที่เขียนขึ้น..... 123

รูปที่ 4-30 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา 124

รูปที่ 4-31 แบบจำลองที่ใช้ในช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และช่วงการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก .. 126

รูปที่ 4-32 แบบจำลองในช่วงการถ่ายน้ำเหล็ก และขั้นตอนในการจำลอง 127

รูปที่ 5-1 การถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการอุ่น 130

รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพการเปล่งรังสีของแก๊สเผาไหม้กับอุณหภูมิแก๊ส .. 131

รูปที่ 5-3 อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่าง
ทำการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่ 132

รูปที่ 5-4 อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่าง
ทำการอุ่น..... 133

รูปที่ 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกับอุณหภูมิแก๊ส..... 134

รูปที่ 5-6 ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ขณะ
ทำการอุ่น..... 136

รูปที่ 5-7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆในผนังข้าง เทียบกับเวลา ขณะทำการอุ่น.....
เปรียบเทียบกับผลการทดลอง 137

รูปที่ 5-8 การแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังเบ้าจากการจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ
ขณะทำการอุ่นเปรียบเทียบกับผลการทดลอง 137

รูปที่ 5-9 ความสัมพันธ์ของการอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผิวด้านใน
กับระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่น..... 138

รูปที่ 5-10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอัตราการถ่ายเทความร้อน
จากการเปล่งรังสีของพื้นผิวภายในแต่ละส่วน กับระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่น..... 140

รูปที่ 5-11 อุณหภูมิอากาศภายในเบ้าที่ใช้ในการจำลองการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก 142

หน้า

รูปที่ 5-12 ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ขณะทำการพัก	144
รูปที่ 5-13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆในผนังข้าง เทียบกับเวลา ขณะทำการพัก	145
รูปที่ 5-14 การแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ ขณะทำการพัก.....	145
รูปที่ 5-15 ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ขณะทำการรอการถ่ายน้ำเหล็ก	151
รูปที่ 5-16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆในผนังข้าง เทียบกับเวลา ขณะทำการรอการถ่ายน้ำเหล็ก	152
รูปที่ 5-17 การแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ ขณะทำการรอการถ่ายน้ำเหล็ก	152
รูปที่ 5-18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้ำเหล็กเทียบกับเวลา ขณะทำการรอการถ่ายน้ำเหล็ก	153
รูปที่ 5-19 ความสัมพันธ์ของการอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผิวด้านในเบ้า กับระยะเวลาที่ใช้ในการรอการถ่ายน้ำเหล็ก.....	153
รูปที่ 5-20 ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก.....	158
รูปที่ 5-21 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆในผนังข้าง เทียบกับเวลา ขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก.....	159
รูปที่ 5-22 การแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ ขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก.....	159
รูปที่ 5-23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ น้ำเหล็กเทียบกับเวลา ขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก.....	160
รูปที่ 5-24 รายละเอียดการจำลองการถ่ายเทความร้อนในวัฏจักรการทำงาน ของเบ้ารับน้ำเหล็ก ในแต่ละขั้นตอน	162

หน้า

รูปที่ 5-25 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดรอบการทำงานที่ 1 ถึง 5... 165

รูปที่ 5-26 การแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังเบ้าจากการจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ
ตลอดรอบการทำงานที่ 1 ถึง 5 167

รูปที่ 5-27 พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก
ที่ตำแหน่ง 5 mm ที่ระยะเวลาต่างๆ ตลอดรอบการทำงานที่ 1 ถึง 5 167

รูปที่ 5-28 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างขั้นตอนการรอ
การถ่ายน้ำเหล็ก และการถ่ายน้ำเหล็ก ระหว่าง 1) Heat 1 tap 1700 deg C:
เบ้ารับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 1 รับน้ำเหล็กอุณหภูมิ 1700°C และ
2) Heat 5 tap 1700 deg C: เบ้ารับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 5
รับน้ำเหล็กอุณหภูมิ 1700°C 168

รูปที่ 5-29 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างขั้นตอนการรอ
การถ่ายน้ำเหล็ก และการถ่ายน้ำเหล็ก ระหว่าง 1) Heat 1 tap 1700 deg C:
เบ้ารับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 1 รับน้ำเหล็กอุณหภูมิ 1700°C
2) Heat 5 tap 1700 deg C: เบ้ารับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 5
รับน้ำเหล็กอุณหภูมิ 1700°C และ 3) Heat 5 tap 1690 deg C:
เบ้ารับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 5 รับน้ำเหล็กอุณหภูมิ 1690°C 169



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
B	Basicity	
BOF	Basic Oxygen Furnace	
BOH	Basic Open Hearth	
CCM	Continues Casting Machine	
con	กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ค่าเท่ากับ 1 กระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง ค่าเท่ากับ -1	
C_p	ค่าความร้อนจำเพาะ	kJ/kg-K
EAF	Electric Arc Furnace	
F	ตัวประกอบการมองเห็น	
G_A	น้ำหนักน้ำเหล็กที่เทได้	ton
G_{DRI}	น้ำหนักของเหล็กพูน	ton
G_E	น้ำหนักของวัสดุทุกชนิดที่นำมาหลอม	ton
G_{HBI}	น้ำหนักของเหล็กพูนอัดก้อน	ton
G_{HM}	น้ำหนักของน้ำเหล็กหลอมเหลว	ton
G_Z	น้ำหนักของตัวทำตะกรันฟู (slag formers)	ton
Gr_L	Grashof Number	
\bar{h}	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย	
k	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน	W/m.K
M_G	ค่าจำเพาะการใช้การใช้แก๊สเชื้อเพลิง	m ³ /ton
M_L	ค่าจำเพาะการพ่นแก๊สออกซิเจน	m ³ /ton
M_N	ค่าจำเพาะการใช้แก๊สออกซิเจนในการสันดาปภายหลัง	m ³ /ton
Nu_L	ค่า Nusselt number	
Pr	ค่า Prandtl number	
q	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่	MJ/m ²
Q	ความร้อน	MJ
Ra	ค่า Rayleigh number	
t	ระยะเวลา	s

สัญลักษณ์	คำอธิบาย	หน่วย
t_N	ระยะเวลาในการหยุดจ่ายไฟของเตาหลอม (power-off time)	min
t_S	ระยะเวลาในการจ่ายไฟของเตาหลอม (power-on time)	min
T	อุณหภูมิ	$^{\circ}\text{C}$
T_a	อุณหภูมิบรรยากาศ	$^{\circ}\text{C}$
T_A	อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอม	$^{\circ}\text{C}$
W_R	พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการหลอมต่อน้ำเหล็กตัน	kWh/ton
α	Thermal diffusivity	m^2/s^2
β	coefficient of volume expansion	K^{-1}
ε	ค่าสภาพการเปล่งรังสี	
ρ	ความหนาแน่น	kg/m^3
σ	ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมันน์	$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

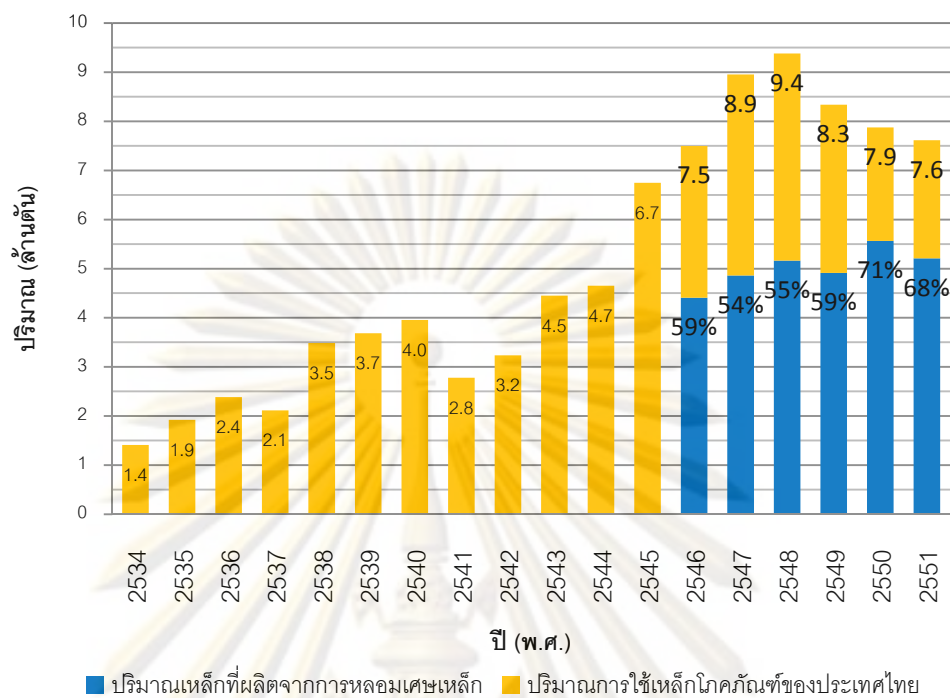
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การอนุรักษ์พลังงานในปัจจุบันนับว่าเป็นเรื่องที่สำคัญเป็นอย่างมากของสังคม เนื่องจากปัญหาหาค่าต้นทุนพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นราคาน้ำมัน หรือราคาไฟฟ้า ดังนั้นการอนุรักษ์พลังงานจึงมีบทบาทสำคัญในการลดต้นทุน นอกจากนี้การตื่นตัวในเรื่องปัญหาสิ่งแวดล้อมของโลก เช่น ปัญหาโลกร้อน (global warming) ก็ยิ่งผลักดันให้การอนุรักษ์พลังงานเป็นสิ่งสำคัญที่ทุกภาคส่วนของสังคมต้องหันมาให้ความสนใจ

ในส่วนของภาคการผลิต อุตสาหกรรมเหล็กนับเป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างอุตสาหกรรมในประเทศไทยเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็น อุตสาหกรรมขั้นพื้นฐาน (ต้นน้ำ) ที่อุตสาหกรรมอื่นๆ จำเป็นต้องพึ่งพาผลิตภัณฑ์เหล็กที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อ ไม่ว่าจะเป็น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล อุตสาหกรรมการก่อสร้าง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้งานอย่างแพร่หลายของผลิตภัณฑ์เหล็กนี้เองทำให้ในแต่ละปี ปริมาณการใช้งานผลิตภัณฑ์เหล็กซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะเศรษฐกิจในประเทศ มีแนวโน้มที่สูงขึ้น ในรูปที่ 1-1 แสดงให้เห็นว่าในปี พ.ศ. 2551 ประเทศไทยมีปริมาณการใช้เหล็กโภคภัณฑ์ทั้งสิ้น 7.6 ล้านตัน ในจำนวนนี้เป็นผลผลิตจากการนำเศษเหล็กกลับมาหลอมใหม่ด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าถึง 68.4% คิดเป็นปริมาณทั้งสิ้น 5.2 ล้านตัน ซึ่งต้องใช้พลังงานในการผลิตมากกว่า 6 ล้านเมกะวัตต์-ชั่วโมง จึงนับได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลังงานสูงมากเป็นอันดับต้นๆ แต่จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าผู้ประกอบการของประเทศไทยยังมีความสามารถในการผลิตต่ำกว่าเมื่อเทียบกับต่างประเทศ ปัจจัยหนึ่งอาจจะดูได้จากการใช้พลังงานไฟฟ้าในการหลอมเหล็กจากเศษเหล็ก ผลการศึกษาโครงการศึกษาเกณฑ์การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็ก (SEC) (สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2006) ประเมินว่าประเทศไทยที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าประมาณ 419 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตันน้ำเหล็ก ซึ่งสูงมากเมื่อเทียบกับประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น ประเทศสหรัฐอเมริกาที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตเพียง 316 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตันน้ำเหล็ก (ตารางที่ 1-1) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้พลังงานของอุตสาหกรรมเหล็กในประเทศไทยยังมีความสามารถในการประหยัดพลังงานลงได้อีก ประโยชน์ที่ได้นอกจากการใช้พลังงานต่อหน่วยการผลิตจะน้อยลงแล้ว ยังทำให้เป็นการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมเหล็กของประเทศไทยด้วย



หมายเหตุ ข้อมูลปริมาณเหล็กที่ผลิตจากการหลอมเศษเหล็กเริ่มเก็บตั้งแต่ปี 2546

รูปที่ 1-1 ปริมาณการใช้งานเหล็กโคคกัมภ์และปริมาณเหล็กที่ผลิตจากการหลอมเศษเหล็ก ของประเทศไทยในแต่ละปี (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2552)

ตารางที่ 1-1 เปรียบเทียบการใช้พลังงานในการหลอมเศษเหล็กระหว่างผู้ประกอบการไทยและต่างประเทศ (สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2006)

การหลอมเหล็กกล้า (EAF)	ไทย	สหรัฐอเมริกา
พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ในการหลอมจากเศษเหล็กเป็นน้ำเหล็กใน EAF (kWh/ton LS)	419	316
ปริมาณ ออกซิเจนในการหลอมเศษเหล็กใน EAF (Nm ³ /ton LS)	35	44.6
ปริมาณ แสงอิเล็กโทรด ในการหลอมเศษเหล็กใน EAF (kg/ton LS)	2.5	1.55
Yield การหลอมเศษเหล็ก (%)	90.7	92

กระบวนการในการหลอมเศษเหล็กเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทั่วไปนั้นเริ่มจาก การนำเศษเหล็กที่รับซื้อมาไปทำการหลอมให้เป็นน้ำเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (EAF: Electric Arc Furnace) หลังจากนั้นจึงทำการเทน้ำเหล็กที่ได้ไปยังเบ้ารับน้ำเหล็ก (ladle) น้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมจะมีอุณหภูมิประมาณ 1700°C จากนั้นจึงนำไปเทลงยังอ่างรับน้ำเหล็ก (tundish) ซึ่งอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสมในการเทไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก ประมาณ 1650°C

ในส่วนของเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นเองก่อนที่จะนำไปทำการรับน้ำเหล็กในแต่ละรอบนั้นจำเป็นต้องทำการอุ่น (preheat) ด้วยการพ่นเปลวไฟจากหัวเผา (burner) เข้าไปยังเบ้ารับน้ำเหล็ก เพื่อให้ความร้อนแก่เบ้ารับน้ำเหล็กจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นการป้องกันเบ้ารับน้ำเหล็กจากความเสียหายอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างกะทันหัน (thermal shock) และเป็นการลดการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กไปยังเบ้ารับน้ำเหล็ก

จากการสังเกตขั้นตอนการทำงานในโรงงานพบว่า การใช้พลังงานในการผลิตเป็นไปในลักษณะเผื่อในทางที่มาก ไม่ว่าจะเป็นระยะเวลาการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก รวมถึงอุณหภูมิ น้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่สูง เพื่อที่ว่าเมื่อไปถึงขั้นตอนการหล่อแบบต่อเนื่องแล้ว อุณหภูมิ น้ำเหล็กจะยังสูงพอที่จะสามารถทำการหล่อได้ ซึ่งอุณหภูมิของน้ำเหล็กในขั้นตอนการหล่อแบบต่อเนื่องนี้เองเป็นตัวแปรสำคัญที่จำเป็นต้องควบคุม เพื่อให้การผลิตเหล็กกล้ามีคุณภาพ ดังนั้นในกรณีที่น้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงเกินไป จึงจำเป็นที่จะต้องปล่อยให้เย็นตัวลงก่อน แล้วจึงเทลงยังอ่างรับน้ำเหล็ก ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้เป็นการสิ้นเปลืองพลังงานงานโดยไม่จำเป็น ซึ่งทั้งหมดนี้มาสาเหตุจากการขาดข้อมูลเกี่ยวกับสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการศึกษารื่องการสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กจึงมีความสำคัญ ที่ผ่านมานในต่างประเทศได้มีการศึกษาไปในหลากหลายแนวทางไม่ว่าจะเป็น การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กขนาดเล็ก (Ruz et al., 1999), การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่กระจายในชั้นวัสดุทนไฟ (refractory) (Volkova and Janke, 2003), การทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็กเพื่อจะควบคุมอุณหภูมิ น้ำเหล็กที่จะทำการเทลงยังเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิธีทางสถิติ (Gupta and Chandra, 2004) ส่วนในประเทศไทยที่ผ่านมามีเพียงการศึกษาในขณะที่ทำการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ด้วยการทดลองและ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เท่านั้น (Mohanty และ Satayayut, 1992) ทำให้ยังขาดข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการถ่ายเทพลังงานของเบ้ารับน้ำเหล็กในภาพรวมของกระบวนการผลิต ซึ่งผลการศึกษางานวิจัยนี้จะมีประโยชน์ในการช่วยกำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และนอกจากนี้ความรู้ที่ได้ยังสามารถไปใช้ในการกำหนดระดับอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมไฟฟ้าที่เหมาะสมเพื่อลด

การเผื่ออุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทในเตาหลอมไฟฟ้าโดยไม่จำเป็น ซึ่งจะเป็นการช่วยประหยัดต้นทุนด้านพลังงานของอุตสาหกรรมการผลิตเหล็ก

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะทางความร้อน ของเบ้ารับน้ำเหล็กขนาด 25 ตัน ระหว่างขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก, การรอกการเทน้ำเหล็ก, การเทน้ำเหล็กสำหรับการหล่อแบบต่อเนื่อง, และระหว่างการรอกการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากข้อมูลการวัดอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละขั้นตอน และข้อมูลจากการใช้โปรแกรมจำลองเชิงความร้อนทำนายอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็ก

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ขนาด 25 ตัน ในกระบวนการผลิตเหล็ก ในระหว่างขั้นตอนต่างๆดังต่อไปนี้
 - การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก
 - การรอกการเทน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก
 - การเทน้ำเหล็กสำหรับการหล่อแบบต่อเนื่อง
 - การรอกการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก
- 2) ไม่คิดการสูญเสียเนื้อวัสดุทนไฟ (refractory)
- 3) พิจารณาในส่วนของการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติตามทิศทางตั้งฉากกับผนังของเบ้า โดยไม่พิจารณาถึงปฏิกิริยาเคมีของน้ำเหล็ก

1.4 แนวทางการศึกษาวิจัย

ส่วนการเก็บข้อมูลภาคสนาม

ทำการศึกษากระบวนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก และประเมินอัตราการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยข้อมูลต่างๆ ดังนี้

- 1) ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการอุ่น และปล่อยให้เย็น จากการศึกษาเรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ, จักรวรรุ จรุงยศวรฑูล (2553)
- 2) เอกสารบันทึกข้อมูลการผลิตของโรงงาน

3) ตัวแปรอื่นๆที่เหมาะสมในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อน เช่น อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก, อุณหภูมิผิวนอกของเบ้ารับน้ำเหล็ก ฯลฯ

ส่วนการจำลองด้วยโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์

ผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลภาคสนาม นำมาการปรับปรุงการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ ให้เกิดความแม่นยำในการทำนายอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กเพิ่มมากขึ้น เพื่อใช้ในการจำลองอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก และคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษาเชิงวิชาการ ได้รับข้อมูลเกี่ยวกับ สภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าผล

ผลการศึกษาเชิงประยุกต์ นำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการกำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมในของการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมไฟฟ้า, คำนวณระยะเวลาที่เหมาะสมในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ยืดอายุการใช้งานของวัสดุทนไฟ และสามารถจัดกระบวนการที่เหมาะสมของการทำงานของโรงหลอม เพื่อประโยชน์ในการประหยัดพลังงาน และเพิ่มอัตราการผลิต

1.6 การนำเสนอผลงานวิจัย

ในระหว่างการศึกษาวិทยานิพนธ์เรื่อง การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ได้มีการนำเสนอบางส่วน ของผลการศึกษาในงานสัมมนาเชิงวิชาการต่างๆ ทั้งใน และนอกประเทศดังนี้

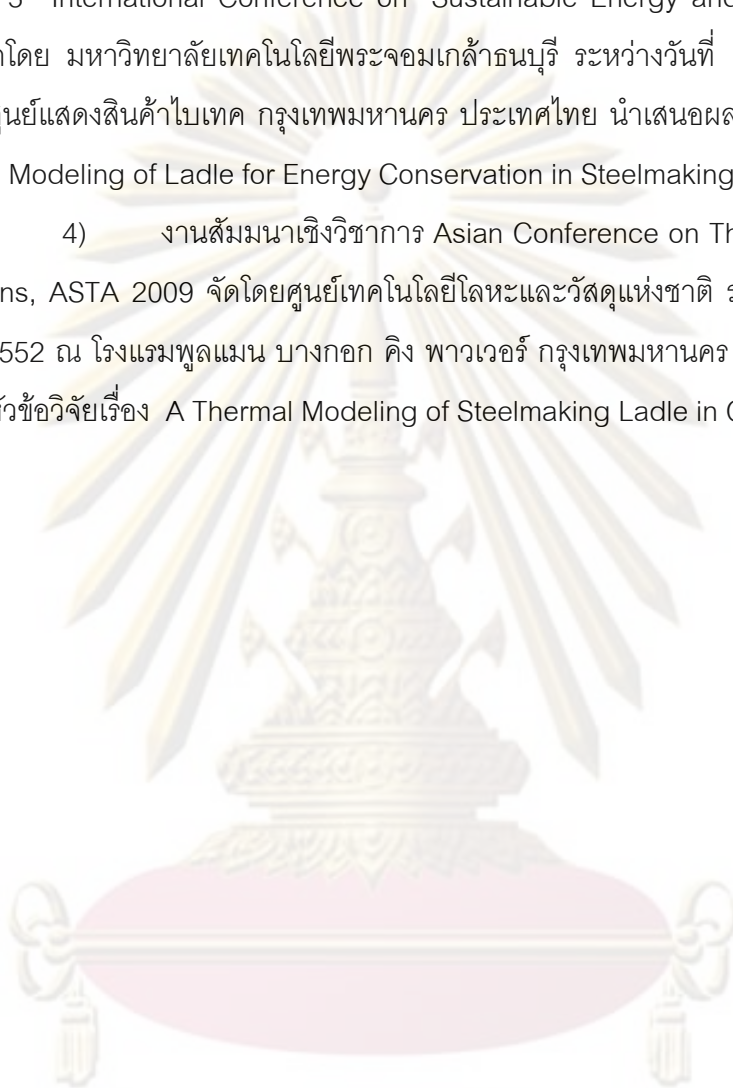
1) การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5 (5th Conference on Energy Network of Thailand, E-NETT) จัดโดยเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ระหว่างวันที่ 29 เมษายน – 1 พฤษภาคม 2552 ณ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก นำเสนอผลงานในหัวข้อวิจัยเรื่อง การจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อการประหยัดพลังงาน (A Thermal Modeling of Ladle Preheat to Obtain Energy Consumption)

2) งานสัมมนาเชิงวิชาการ 2009 SEAISI Conference and Exhibition จัดโดย สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (South East Asia Iron and Steel Institute, SEAISI) ระหว่างวันที่ 18 – 21 พฤษภาคม 2552 ณ โรงแรมแชงกรีลา เมือง

กั๊วลาต้ม่เปอ์ ประเทศมาเลเชีย นำเสนอผลงานในหัวข้อวิจัยเรื่อง A Thermal Modeling of Steelmaking Ladle During the Preheating and Holding Periods for Energy Conservation

3) งานสัมมนาเชิงวิชาการ World Renewable Energy Congress 2009 – Asia, The 3rd International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2009)” จัดโดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระหว่างวันที่ 19 – 22 พฤษภาคม 2552 ณ ศูนย์แสดงสินค้าไบเทค กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย นำเสนอผลงานในหัวข้อวิจัยเรื่อง A Thermal Modeling of Ladle for Energy Conservation in Steelmaking Process

4) งานสัมมนาเชิงวิชาการ Asian Conference on Thermal Analysis and Applications, ASTA 2009 จัดโดยศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ระหว่างวันที่ 17 – 18 ธันวาคม 2552 ณ โรงแรมพูลแมน บางกอก คิง พาวเวอร์ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย นำเสนอผลงานในหัวข้อวิจัยเรื่อง A Thermal Modeling of Steelmaking Ladle in Cycling Process



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ข้อมูลจากการศึกษาค้นคว้า

2.1 กระบวนการการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

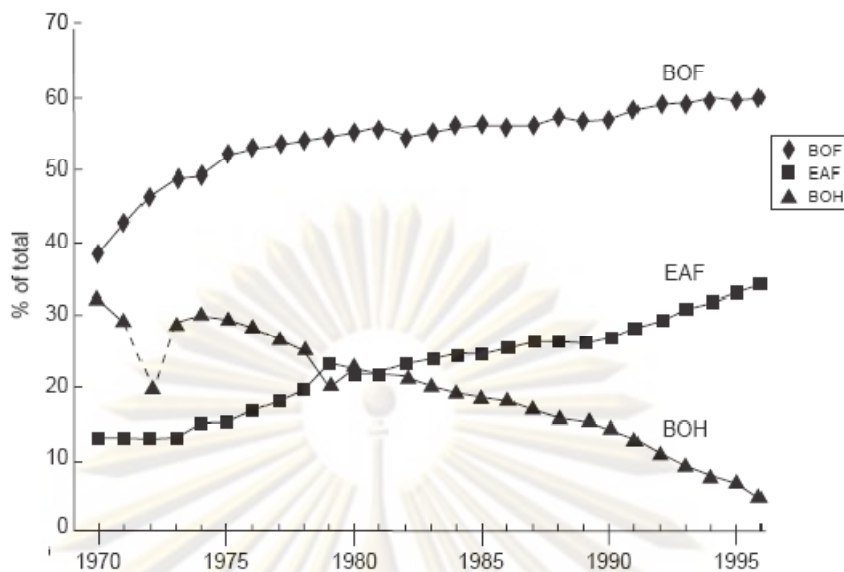
กระบวนการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า นับเป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กชั้นกลาง กล่าวคือการนำเศษเหล็ก (scrap) มาทำการหลอมปรับปรุงคุณสมบัติ และส่วนผสมทางเคมีให้ได้เป็นเหล็กกล้า โดยใช้ร่วมกับเครื่องมือหล่อแบบต่อเนื่อง (Continues Casting Machine, CCM) จะได้ผลิตภัณฑ์ที่สำเร็จได้แก่ เหล็กทรงยาว (billet) เหล็กทรงแบน (slab) และเหล็กทรงใหญ่ (bloom) โดยเหล็กทรงยาวที่ได้จะเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กเส้น เหล็กหลอดและเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ ส่วนเหล็กทรงแบน และ เหล็กทรงใหญ่ นั้นจะเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน และเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขนาดใหญ่ตามลำดับ

หนึ่งสำหรับประเทศไทยการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ซึ่งใช้เศษเหล็กเป็นวัตถุดิบในการผลิต ส่วนใหญ่จะเป็นการผลิตเพื่อให้ได้เหล็กเส้นและเหล็กหลอด เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้างต่อไป

ส่วนประกอบที่สำคัญในการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าได้แก่ 1) เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (EAF) 2) เบ้ารับน้ำเหล็ก (ladle) 3) อ่างรับน้ำเหล็ก (tundish) และ 4) เครื่องจักรทำการหล่อแบบต่อเนื่อง โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนจะได้กล่าวต่อไปดังนี้

2.1.1 เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เป็นเครื่องจักรที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการหลอมเศษเหล็กให้เปลี่ยนสภาพเป็นน้ำเหล็ก ซึ่งเริ่มมีความนิยมใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้นในช่วง 20 ปีมานี้ (รูปที่ 2-1) ส่วนหนึ่งสืบเนื่องมาจาก ความนิยมใช้เตาหลอมแบบเบสิกออกซิเจน (Basic Oxygen Furnace, BOF) แทนที่การผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมแบบโอเพนฮาร์ท (Basic Open Hearth, BOH) ซึ่งใช้เศษเหล็กในการผลิตเหล็กกล้าในปริมาณที่น้อยลง ส่งผลให้ราคาเศษเหล็กปรับตัวลดลง ประกอบกับความต้องการใช้งานเหล็กที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้การใช้งานเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นแนวทางหนึ่งในการผลิตเหล็กกล้าจากเศษเหล็ก โดยสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าสากล (International Iron and Steel Institute) คาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2010 ร้อยละ 50 ของเหล็กที่มีการผลิตในประเทศอเมริกา และ ร้อยละ 40 ของเหล็กที่ผลิตในทวีปยุโรป และประเทศญี่ปุ่นมาจากการผลิตด้วยหลอมอาร์คไฟฟ้า



รูปที่ 2-1 ปริมาณการผลิตเหล็กดิบของโลก (อัตราส่วนร้อยละ) ด้วยกระบวนการเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เตาหลอมแบบเบสิกออกซิเจน (Basic Oxygen Furnace, BOF) และเตาหลอมแบบโอเพนฮาร์ท (Basic Open Hearth, BOH)

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเตาอาร์คไฟฟ้า

Iron and Steel Institute (2000) ได้แสดงแบบจำลองปริมาณพลังงานไฟฟ้าของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (EAF) ที่จำเป็นต้องใช้ในการหลอมเหล็ก จากการคำนวณทางสถิติ และการประเมินแบบถดถอยหลายตัวแปร (multivariate regression evaluation) ของข้อมูลการผลิต ซึ่งได้แก่ ปริมาณเศษเหล็กวัตถุดิบ ปริมาณน้ำเหล็กที่เทได้ ปริมาณการใช้ออกซิเจน ปริมาณการใช้เชื้อเพลิงในการเผาไหม้ อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ทำการเท ระยะเวลาที่ใช้ในการหลอมแต่ละเตา ฯลฯ ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจำนวนทั้งสิ้น 35 โรงงาน ครอบคลุมทั้งชนิดที่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ มีและไม่มีการสันดาปภายหลัง (post-combustion) ซึ่งแสดงในสมการที่ 2.1

$$\frac{W_R}{kWh/t} = 300 + 900 \left[\frac{G_E}{G_A} - 1 \right] + 80 \frac{G_{DRI} + G_{HBI}}{G_A} - 300 \frac{G_{HM}}{G_A} + 1600 \frac{G_Z}{G_A} + 0.7 \left[\frac{T_A}{^\circ C} - 1600 \right] + 0.85 \frac{t_s + t_N}{min} - 8 \frac{M_G}{m^3/t} - 4.3 \frac{M_L}{m^3/t} - 2.8 \frac{M_N}{m^3/t} - 15 con \quad (2.1)$$

โดย

W_R	แทน	พลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการหลอมต่อน้ำเหล็กต้น (kWh/ton)
G_A	แทน	น้ำหนักน้ำเหล็กที่เทได้ (ton)
G_E	แทน	น้ำหนักวัตถุดิบทุกชนิดที่นำมาหลอม (ton)

		ซึ่ง $G_A < G_E$
G_{DRI}	แทน	น้ำหนักของเหล็กพูน (ton)
G_{HBI}	แทน	น้ำหนักของเหล็กพูนอัดก้อน (ton)
G_{HM}	แทน	น้ำหนักของน้ำเหล็กหลอมเหลว (ton)
G_Z	แทน	น้ำหนักของตัวทำตะกรันฟู (slag formers) (ton)
T_A	แทน	อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอม ($^{\circ}\text{C}$)
t_s	แทน	ระยะเวลาในการจ่ายไฟของเตาหลอม (power-on time) (min)
t_N	แทน	ระยะเวลาในการหยุดจ่ายไฟของเตาหลอม (power-off time) (min)
		ซึ่ง $t_N \leq 30 \text{ min}$
M_G	แทน	ค่าจำเพาะการใช้การใช้แก๊สเชื้อเพลิง (m^3/ton)
M_L	แทน	ค่าจำเพาะการพ่นแก๊สออกซิเจน (m^3/ton)
M_N	แทน	ค่าจำเพาะการใช้แก๊สออกซิเจนในการสันดาป ภายหลัง (m^3/ton)
con	แทน	กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง ค่าเท่ากับ 1 กระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง ค่าเท่ากับ -1

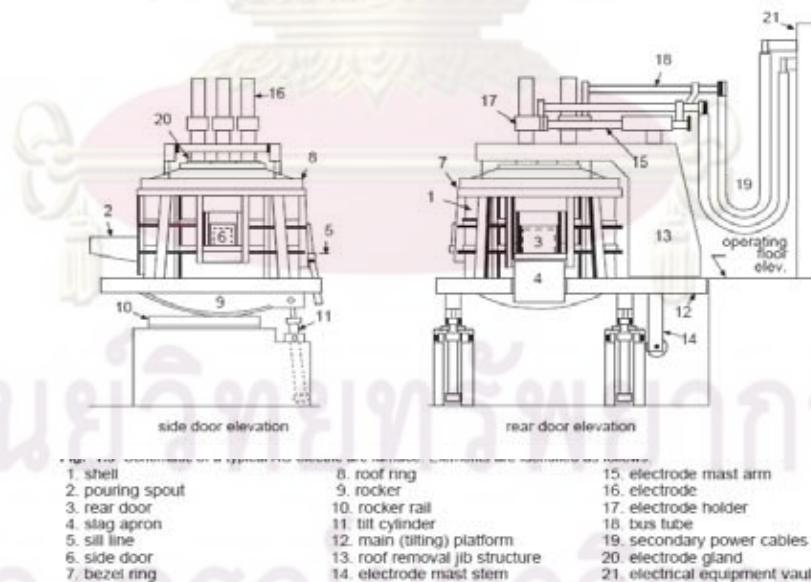
เมื่อพิจารณาสมการในแง่ของความเป็นไปได้ในการลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า พบว่าพจน์ทางซ้ายมือซึ่งแสดงถึงปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการหลอมต่อตันน้ำเหล็ก ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามค่าตัวแปรในพจน์ต่างๆ ทางด้านขวาของสมการ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

- 1) พจน์ที่มีตัวแปรน้ำหนักเศษเหล็กที่นำมาหลอม (พจน์ที่ 2) น้ำหนักของเหล็กพูน และน้ำหนักของเหล็กพูนอัดก้อน (พจน์ที่ 3) ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าของตัวแปรดังกล่าว แต่อย่างไรก็ดีการลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมด้วยการลดค่าตัวแปรเป็นไปได้อย่างยากในการปฏิบัติเนื่องจากส่งผลถึงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่ลดลง
- 2) พจน์ที่มีตัวแปรน้ำหนักของโลหะหลอมเหลว (พจน์ที่ 4) การใช้น้ำเหล็กหลอมเหลวเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กนั้นจะเป็นการลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเตาหลอม

- 3) พจนที่มีตัวแปรน้ำหนักของตัวทำตะกรันฟู (พจนที่ 5) น้ำหนักของตัวทำตะกรันฟูที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การใช้พลังงานไฟฟ้า เพิ่มมากขึ้น แต่อย่างไรก็ดี เนื่องจากตัวทำตะกรันฟูซึ่งมีหน้าที่ทำให้น้ำเหล็กที่ได้มีความสะอาด ดังนั้นการลดปริมาณตัวทำตะกรันฟูเพื่อประหยัดพลังงาน จึงไม่ใช่ทางเลือกที่เหมาะสม
- 4) พจนที่มีตัวแปรอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอม (พจนที่ 6) จากความจริงที่ว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการหลอมเพิ่มขึ้น ซึ่งสมการแสดงให้เห็นว่า ทุกๆอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เพิ่ม 1°C จากอุณหภูมิ 1600°C จะใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.7 kWh/ton ดังนั้นการกำหนดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กให้เหมาะสมกับสภาวะการทำงาน โดยไม่ให้อุณหภูมิน้ำเหล็กสูงเกินกว่าความจำเป็น (ไม่เผื่อ) จึงเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมในการลดพลังงานไฟฟ้า
- 5) พจนที่มีตัวแปรระยะเวลาที่ใช้ในการหลอม (พจนที่ 7) ซึ่งแยกเป็นระยะเวลาที่จ่ายไฟ และระยะเวลาที่หยุดจ่ายไฟ หรือรวมกันก็คือระยะเวลา tap to tap time จากสมการแสดงให้เห็นว่าปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการหลอมที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการลดระยะเวลา tap to tap time จะเป็นวิธีหนึ่งในการประหยัดพลังงานไฟฟ้า
- 6) พจนที่มีตัวแปรการใช้แก๊สช่วยในการให้ความร้อนแทนไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นการใช้แก๊สเชื้อเพลิง (พจนที่ 7) การพ่นแก๊สออกซิเจนเพื่อให้เกิดความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี (พจนที่ 8) หรือการมีการสันดาปภายหลัง (post-combustion) (พจนที่ 9) จะช่วยลดพลังงานไฟฟ้าในการหลอมลงได้
- 7) พจนที่มีตัวแปรกระบวนการผลิต (พจนที่ 9) กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง เช่น การป้อนเศษเหล็กเข้าเตาแบบต่อเนื่อง (Consteel) จะใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่ากระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องที่มีการป้อนเศษเหล็กเข้าเตาเป็นรอบๆ

เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของโรงงานที่ได้ทำการศึกษา

เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของโรงงานที่ได้ทำการศึกษา เป็นเตาหลอมขนาด 25 ตัน ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ในการหลอมเศษเหล็ก ซึ่งไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ละเฟสจะถูกป้อนให้แก่แท่งอิเล็กโทรดที่ทำจากคาร์บอน (carbon electrodes) แต่ละแท่ง โดยด้านบนของเตาหลอมสามารถเลื่อนเปิดได้เพื่อใส่เศษเหล็ก ซึ่งในการหลอมแต่ละรอบ (heat) จะมีการใส่เศษเหล็ก 3-4 ครั้ง หลังจากใส่เศษเหล็กในแต่ละครั้งฝาด้านบนของเตาหลอมจะเลื่อนปิด จากนั้นจึงทำการยื่นแท่งอิเล็กโทรดลงไปเพื่อทำการหลอม โดยในกระบวนการหลอมเศษเหล็กนั้นใช้พลังงานที่สำคัญในสองรูปแบบ คือ พลังงานจากไฟฟ้าประมาณร้อยละ 60 และพลังงานอีกประมาณร้อยละ 40 ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมี ระหว่างการรวมตัวกันของก๊าซออกซิเจนที่พุ่งเข้าไปในน้ำเหล็ก กับธาตุคาร์บอนในน้ำเหล็ก เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการปรับส่วนผสมของน้ำเหล็กโดยการเติมสารต่างๆ เช่น ซิลิกอน แมกนีเซียม วานาเดียม หรือ ไนโอเบียม เพื่อให้ได้คุณสมบัติน้ำเหล็กตามต้องการจะทำในขั้นตอนนี้ สูดท้ายเมื่อการหลอมเสร็จสิ้นเตาหลอมจะทำการเอียงเพื่อเทน้ำเหล็กออกทางปากกา (pouring spout) ไปยังเบ้ารับน้ำเหล็กที่รองรับอยู่ด้านล่าง โดยน้ำเหล็กที่ทำการเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามีอุณหภูมิประมาณ 1700 °C รูปที่ 2-2 แสดงภาพแผนผังส่วนประกอบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ รูปที่ 2-3 แสดงภาพเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของโรงงาน และรูปที่ 2-4 แสดงภาพขณะเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าไปยังเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 2-2 แผนผังส่วนประกอบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ชนิดไฟฟ้ากระแสสลับ, Blondelot. E.

et.al. (2000)



รูปที่ 2-3 เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของโรงงานที่ทำการศึกษา



รูปที่ 2-4 การเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าไปยังเบ้ารับน้ำเหล็ก

ศูนย์วิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.2 เบ้ารับน้ำเหล็ก

เบ้ารับน้ำเหล็ก เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะคล้ายถ้วยทรงกระบอกมีหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (EAF) ไปยังบริเวณที่ทำการหล่อแบบต่อเนื่อง ในปริมาณ 25 ถึง 300 ตัน ในแต่ละรอบการทำงาน (ขึ้นอยู่กับความสามารถในการผลิตของโรงงาน) โดยรับน้ำเหล็กเข้ามาทางปากเบ้า และปล่อยน้ำเหล็กออกไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก (tundish) ทางช่องเปิด (nozzle) ทางด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งในกรณีที่ทำการเคลื่อนย้ายน้ำเหล็กปล่องทางด้านล่างนี้จะถูกปิดไว้โดยประตูเลื่อน (slide gate)

การที่ต้องทำหน้าที่เคลื่อนย้ายน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1700 C ทำให้เบ้ารับน้ำเหล็กต้องมีความต้านทานความร้อน และมีคุณสมบัติเป็นฉนวนเพื่อที่จะลดการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็ก ซึ่งเบ้ารับน้ำเหล็กโดยทั่วไปก็จะประกอบด้วยส่วนของผิวด้านนอกที่ทำมาจากเหล็ก (steel shell) ถัดเข้าไปจะเป็นชั้นปลอดภัย (safety lining) และชั้นด้านในสุดซึ่งสัมผัสกับน้ำเหล็กซึ่งเรียกว่าชั้นทำงาน (working lining) โดยในสองชั้นนี้ใช้วัสดุทนไฟ (refractory) เป็นวัสดุในการก่อ นอกจากนี้ในบางโรงงานบริเวณของเบ้าส่วนที่ต้องสัมผัสกับสแลก จะมีการก่อด้วยวัสดุทนไฟที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียม ที่มีความทนทานมากกว่าในบริเวณที่สัมผัสกับสแลก โดยจะเรียกชั้นนี้ว่าชั้นสแลก (slag lining)

รูปที่ 2-5 แสดงแผนภาพเบ้ารับน้ำเหล็กของโรงงานผลิตเหล็กที่ทำการศึกษา เบ้ารับน้ำเหล็กนี้จะเป็นภาชนะรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางจากขอบนอก ด้านปากขนาด 2.17 เมตร และด้านก้นเบ้าขนาด 1.93 เมตร ความสูงตามแนวตั้งฉาก 2.5 เมตร ในส่วนของ ชั้นการทำงานก่อด้วยวัสดุทนไฟชนิด SK38 ซึ่งมีส่วนผสมของ alumina 85% คุณสมบัติแสดงในตารางที่ 2-1 ทางด้านข้างของเบ้าหนา 150 มิลลิเมตร ด้านก้นเบ้าหนา 180 มิลลิเมตร ถัดออกมาชั้นปลอดภัยซึ่งก่อด้วยวัสดุทนไฟชนิดเดียวกัน ด้านข้างของเบ้าหนา 64 มิลลิเมตร ด้านก้นเบ้าหนา 152 มิลลิเมตร ส่วนผนังด้านนอกสุดเป็นเหล็กหนา 20 มิลลิเมตร ที่ก้นเบ้าหนา 25 มิลลิเมตร น้ำหนักเบ้าเปล่าประมาณ 15 ตัน รับน้ำเหล็กได้ประมาณครั้งละ 20-25 ตัน

ตารางที่ 2-1 คุณสมบัติของวัสดุทนไฟชนิด SK38 (บริษัท สยาม รีเฟรกตอรี อินดัสทรี)

Classification	High-Alumina Brick, 80% Alumina	
Basic properties	Refractoriness Orton cone	38
	Bulk Density (kg/m ³)	2750
	Apparent Porosity (%)	18.5
	Cold Crushing Strength (kg/cm ²)	750
	Modulus of Rupture (kg/cm ²)	125
	Permanent Linear Change After Heating at 1600 °C (%)	1.0
Composition	Alumina (Al ₂ O ₃) (%)	80.0
	Silica (SiO ₂) (%)	14.5
	Iron Oxide (Fe ₂ O ₃) (%)	1.6
	Titania (TiO ₂) (%)	2.9
Thermal expansion	400 °C (%)	0.33
	800 °C (%)	0.51
	1000 °C (%)	0.69
	1200 °C (%)	0.87
	1400 °C (%)	1.05
Conductivity	400 °C (W/m.K)	2.20
	600 °C (W/m.K)	2.09
	800 °C (W/m.K)	2.03
	1000 °C (W/m.K)	2.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3 วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก

วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก (รูปที่ 2-6) ของโรงงานที่ได้ทำการศึกษานั้น เริ่มจากการก่อเบ้ารับน้ำเหล็ก หากการใช้งานของเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นไปโดยปกติ การก่อเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะเป็นเพียงการก่อวัสดุทนไฟในชั้นทำงาน (working lining) ขึ้นมาใหม่แทนวัสดุของเดิมที่เสียหายจากการใช้งาน รูปที่ 2-7 หลังจากนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อขึ้นใหม่ (green ladle) จะถูกเผาเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ภายในโดยการใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิงใส่เข้าไปภายในเบ้าแล้วจุดไฟเผา รูปที่ 2-8 แล้วจึงทำการอุ่น (preheat) ด้วยหัวเผาที่ใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง โดยการพ่นเปลวไฟจากหัวเผาเข้าไปตรงกลางของ เบ้ารับน้ำเหล็ก แก๊สร้อนจากการเผาไหม้ เมื่อปะทะกับก้นของเบ้ารับน้ำเหล็ก ก็จะไปออกและไหลย้อนไปตามผนังออกมาที่ปากของ เบ้ารับน้ำเหล็ก และถูกพ่นทิ้งออกไปจากขอบปากเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนี้เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญมาก เนื่องจากหากเบ้ารับน้ำเหล็กอุณหภูมิไม่สูงพอเมื่อนำไปรับน้ำเหล็กจะทำให้เบ้ารับน้ำเหล็กแตกได้ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อการทำงานเป็นอย่างมาก นอกจากนั้นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กยังเป็นการช่วยลดการสูญเสียความร้อนของน้ำที่บรรจุอยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กด้วย ระยะเวลาการอุ่นโดยเฉลี่ยของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่ของโรงงานที่ทำการศึกษาอยู่ที่ 2 ชั่วโมง รูปที่ 2-9 แสดงลักษณะการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก หลังจากนั้นเมื่อเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าพร้อมที่จะทำการเทน้ำเหล็ก เบ้ารับน้ำเหล็กจะเคลื่อนที่ไปทำการรับน้ำเหล็ก (taping) รูปที่ 2-10 เมื่อรับน้ำเหล็กแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะเคลื่อนที่ต่อไปยังบริเวณที่ทำการหล่อแบบต่อเนื่อง เนื่องจากลักษณะการหล่อจำเป็นต้องทำอย่างต่อเนื่อง (continuous casting) ทำให้ในช่วงแรกเบ้ารับน้ำเหล็กต้องรอ (holding period) เบ้ารับน้ำเหล็กไปก่อนหน้าถ้ำน้ำเหล็ก (teeming) ลงไปยังอ่างรับน้ำเหล็กให้หมดก่อน แล้วจึงเข้าทำการถ้ำน้ำเหล็กต่อทันที รูปที่ 2-11 แสดงขั้นตอนที่เบ้ารับน้ำเหล็กกำลังทำการถ้ำน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก หลังจากนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ทำการเทน้ำเหล็กแล้วจึงจะเคลื่อนที่ไปทำการเทสแลกทิ้งออกทางด้านปากเบ้ารับน้ำเหล็ก รูปที่ 2-12 หลังจากนั้นพนักงานของทางโรงงานจะทำการเช็คการทำงานของประตูเลื่อน (slide gate) เป่าช่องเปิด (nozzle) แล้วจึงนำเบ้ารับน้ำเหล็กกลับไปอุ่นอีกครั้งเพื่อรอการรับน้ำเหล็กรอบใหม่ เมื่อใช้งานเบ้ารับน้ำเหล็กไปจนครบ 23 - 25 ครั้ง จะทำการนำเบ้ารับน้ำเหล็กออกมารื้อวัสดุทนไฟบริเวณที่สัมผัสกับสแลก (slag) ออกไปแล้วก่อขึ้นมาใหม่ (ซ่อมเล็ก) และเมื่อใช้งานจนครบ 46 - 50 ครั้งก็จะทำการรื้อวัสดุทนไฟในส่วนองชั้นทำงานออกทั้งหมดแล้วก่อขึ้นใหม่ (ซ่อมใหญ่) รูปที่ 2-13 แสดงภาพเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อขึ้นใหม่ และรูปที่ 2-14 แสดงเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 46 ครั้ง



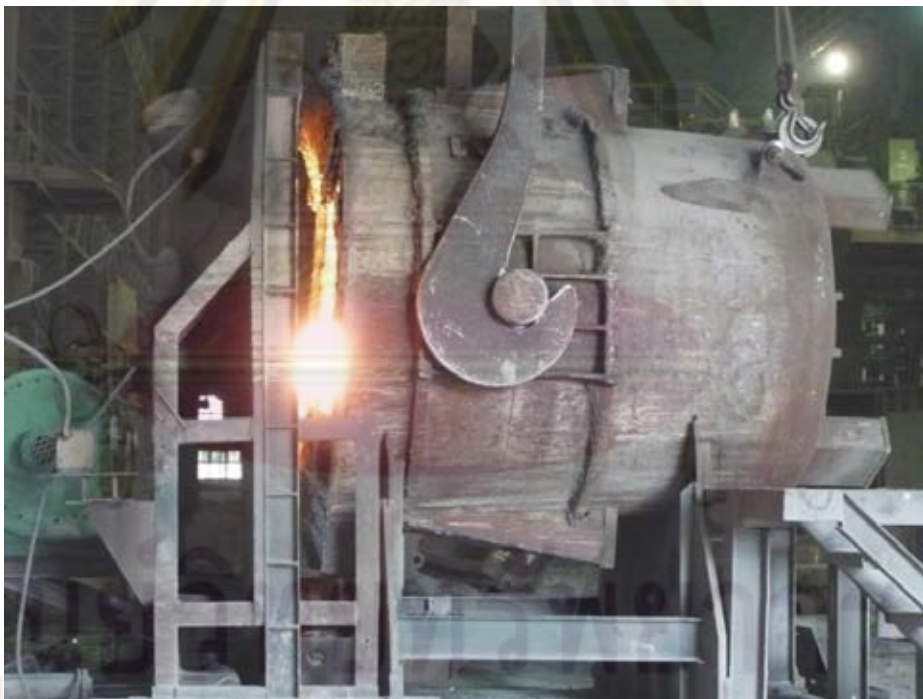
รูปที่ 2-6 วัฏจักรการทำงานของเข้รับน้ำเหล็ก



รูปที่ 2-7 การท่อก่เข้รับน้ำเหล็ก



รูปที่ 2-8 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อไล่ความชื้น โดยใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิง



รูปที่ 2-9 การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-10 เบ้ารับน้ำเหล็กขณะรอการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า



รูปที่ 2-11 เบ้ารับน้ำเหล็กขณะทำการถ่ายน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-12 เบ้ารับน้ำเหล็กในขณะที่ทำการทดสอบ



รูปที่ 2-13 เบ้ารับน้ำเหล็กที่ทำการก่อสร้างใหม่

คู่มือ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-14 เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมา 46 รอบ

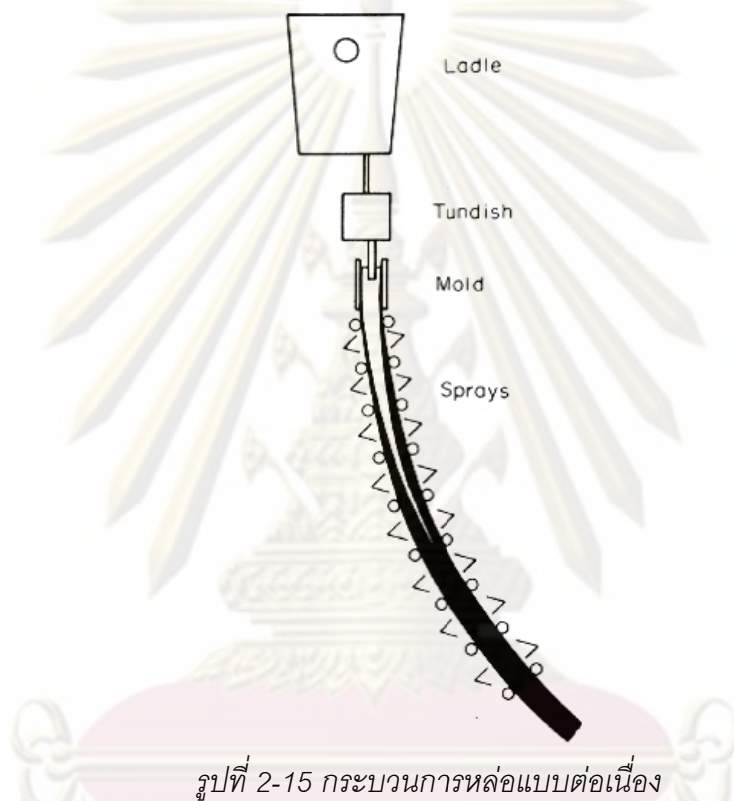
2.1.4 อ่างรับน้ำเหล็ก

อ่างรับน้ำเหล็ก (tundish) เป็นภาชนะรูปทรงคล้ายอ่าง โดยด้านบนจะมีช่องเปิดสำหรับรับน้ำเหล็กที่ไหลลงมาจากเบ้ารับน้ำเหล็ก และด้านล่างจะมีช่องเปิด 2-3 ช่อง (stand) เพื่อให้ น้ำเหล็ก ไหลลงไปยังแบบหล่อ (mold) ซึ่งในการผลิตเหล็กกล้าด้วยกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง อ่างรับน้ำเหล็กมีหน้าที่สำคัญได้แก่ 1) เป็นภาชนะสำหรับสะสม (reservoir) น้ำเหล็กให้สามารถทำการผลิตแบบต่อเนื่องได้ในระหว่างขั้นตอนการเปลี่ยนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กที่เทเสร็จสิ้นแล้ว ไปยังเบ้ารับน้ำเหล็กต่อไปที่รอกการเท 2) ควบคุมแรงดันที่เกิดจากระดับน้ำเหล็ก (hydrostatic head) ให้คงที่เพื่อให้การไหลของน้ำเหล็กไปยังแบบหล่อเป็นไปในลักษณะต่อเนื่อง (steady state) และ 3) ทิศทางการไหลของน้ำเหล็กในอ่างรับน้ำเหล็ก ช่วยป้องกันการไหลของสิ่งเจือปนลงไปยังแบบหล่อ

อ่างรับน้ำเหล็กของโรงงานที่ทำการศึกษ สามารถทำการรับน้ำเหล็กที่ถ่ายจากเบ้ารับน้ำเหล็ก ได้สูงสุด 8 ตา หลังจากนั้นจึงจำเป็นต้องทำการเปลี่ยนอ่างรับน้ำเหล็กใบใหม่

2.1.5 กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง

กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง รูปที่ 2-15 เป็นกระบวนการผลิตเหล็กกล้าที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ซึ่งจากการรายงานของ Sminov (2000) พบว่าการผลิตเหล็กกล้าร้อยละ 95 ของประเทศสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และประเทศในทวีปยุโรปใช้กระบวนการนี้ในการผลิต เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ ได้แก่ ต้นทุนการผลิตที่ต่ำ, ปริมาณผลผลิตต่อวัตต์สูง (high yield), มีความยืดหยุ่นในการผลิต และความสามารถในการควบคุมผลผลิตเหล็กที่ได้ให้มีคุณภาพสูง



รูปที่ 2-15 กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง

ในการหล่อแบบต่อเนื่องนั้นน้ำเหล็กหลอมเหลวจะถูกปล่อยออกทางช่องเปิด (nozzle) ทางด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็กปล่อยไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก (tundish) แล้วจึงไหลผ่านช่องเปิดของอ่างรับน้ำเหล็กตกลงไปยังแบบหล่อ (mold) ของเครื่องจักรทำการหล่อแบบต่อเนื่องด้านล่าง ซึ่งแบบหล่อจะเป็นตัวกำหนดถึงขนาดหน้าตัดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ว่าจะ เป็น เหล็กทรงยาว (billet) เหล็กทรงแบน (slab) หรือเหล็กทรงใหญ่ (bloom) หลังจากนั้นน้ำเหล็กก็จะเคลื่อนที่ผ่านลูกกลิ้ง (rolling) ซึ่งมีการสเปรย์น้ำเพื่อระบายความร้อนเพื่อให้เกิดการแข็งตัวจากบริเวณผิวด้านนอกเข้าไปยังด้านใน ระยะตั้งแต่น้ำเหล็กไหลผ่านแบบหล่อจนกระทั่งแข็งตัวถึงแกนกลางนี้เรียกว่า metallurgical length

2.1.6 คุณสมบัติของน้ำเหล็ก

คุณสมบัติของน้ำเหล็กที่ได้จากกระบวนการผลิตนั้น ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพเศษเหล็กที่ใช้เป็นวัตถุดิบ นอกจากนี้เองในระหว่างกระบวนการหลอมเศษเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โรงงานจะมีการสู่มตัวอย่างน้ำเหล็กที่ได้เพื่อวัดค่าส่วนประกอบทางเคมีของธาตุที่สำคัญได้แก่ คาร์บอน (C) ซิลิกอน (Si) แมงกานีส (Mn) ฟอสฟอรัส (P) และ กำมะถัน (S) หลังจากนั้นจึงทำการปรับส่วนผสมของน้ำเหล็กให้ตรงกับความต้องการของการผลิต ยกตัวอย่างเช่น หากปริมาณธาตุคาร์บอนที่วัดได้จากการสู่มมีค่ามากก็จะทำการพ่นก๊าซออกซิเจนเพื่อกำจัดธาตุคาร์บอนส่วนเกินในน้ำเหล็ก (รวมตัวเกิดเป็นคาร์บอนไดออกไซด์) ในทางกลับกันหากปริมาณคาร์บอนในน้ำเหล็กมีค่าน้อย ก็จะมีการเติมธาตุคาร์บอนลงในน้ำเหล็ก

2.1.7 คุณสมบัติสแลก

สแลกเป็นออกไซด์หลอมเหลวของธาตุที่ผสมอยู่ในน้ำเหล็ก ซึ่งเกิดระหว่างกระบวนการหลอมเศษเหล็ก ธาตุที่อยู่ในเศษเหล็กจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนที่พ่นเข้าไป เกิดเป็นออกไซด์หลอมเหลว ซึ่งจะลอยอยู่ผิวหน้าของน้ำเหล็กเนื่องจากสแลกหลอมเหลวมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำเหล็ก นอกจากนี้สแลกยังมาจากการเติม slag former (เช่น CaO หรือ/และ MgO) ลงไประหว่างกระบวนการหลอมเหล็ก ซึ่ง slag former ที่เติมลงไปนี้จะทำหน้าที่ปรับคุณสมบัติของสแลกให้เหมาะสมต่อการกำจัดธาตุที่ไม่ต้องการให้มีอยู่ในน้ำเหล็ก ในการปรับคุณสมบัติของสแลกนั้นจะควบคุม basicity ของสแลกเป็นสำคัญ ซึ่ง basicity นั้นเป็นอัตราส่วนระหว่าง basic oxide (ออกไซด์หลอมเหลวที่เป็นไอออนบวกและไอออนลบ เช่น CaO เมื่อหลอมเหลวจะแตกตัวเป็น Ca^{2+} และ O^{2-}) ต่อ acid oxide (ออกไซด์หลอมเหลวที่เกิดเป็น complex ion เช่น SiO_2 เมื่อหลอมเหลวจะกลายเป็น SiO_4^{4-}) โดยมากใช้ค่า B แทนซึ่ง

$$B = \frac{CaO [\%W]}{SiO_2 [\%W]} \quad (2.2)$$

ทั่วไปค่า B จะอยู่ในช่วง 1.5 – 2.0 สำหรับกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า นอกจากนี้หน้าที่หลักในการปรับคุณสมบัติของสแลกให้เหมาะสมต่อการกำจัดธาตุที่ไม่ต้องการแล้วนั้น สแลกยังมีประโยชน์ในด้านการเป็นฉนวนกันการสูญเสียความร้อนจากการอาร์คที่ปลายแท่งอิเล็กโทรด และความร้อนของน้ำเหล็ก (ทำได้โดยการทำให้สแลกมีปริมาณมากขึ้นจากเทคนิค slag foaming) อย่างไรก็ตามสแลกที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวทำความเสียหายให้แก่วัสดุทนไฟที่บุอยู่ภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า หรือ ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก

ในการกำจัดธาตุที่ไม่ต้องการในน้ำเหล็กนั้น จะทำการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเหล็กก่อน ซึ่ง condition ที่เหมาะสมต่อการกำจัดฟอสฟอรัสนั้นคือ ค่า B สูง และ ปริมาณ FeO ในสแลกสูง หลังจากนั้นจะทำการกำจัดกำมะถันในน้ำเหล็ก โดยการเทสแลกออกจากเตาอาร์ค

ไฟฟ้าก่อนเพื่อให้สแลกมีปริมาณของ FeO น้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้สแลกในเตาอาร์คไฟฟ้าจึงมีปริมาณของ FeO สูง ส่วนสแลกในบ่ารับน้ำเหล็กจะแทบไม่มี FeO อยู่เลย

สแลกที่เป็นเศษวัสดุที่เหลือจากการหลอมเศษเหล็กนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีก เช่น ผสมกับยางมะตอย เพื่อทำถนน นอกจากนี้ในประเทศญี่ปุ่นยังมีการศึกษาถึงการใส่สแลกเพื่อเป็นวัสดุในการปลูกสาหร่ายทะเล

2.1.8 ผลิตรภัณฑ์

ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของทางโรงงานที่ทำการศึกษาคือ เหล็กทรงยาว (billet) (รูปที่ 2-16) ชนิด SB40 หน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสความกว้าง 100x100 มิลลิเมตร ความยาว 3.11 เมตร ซึ่งจะเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กข้ออ้อยต่อไป



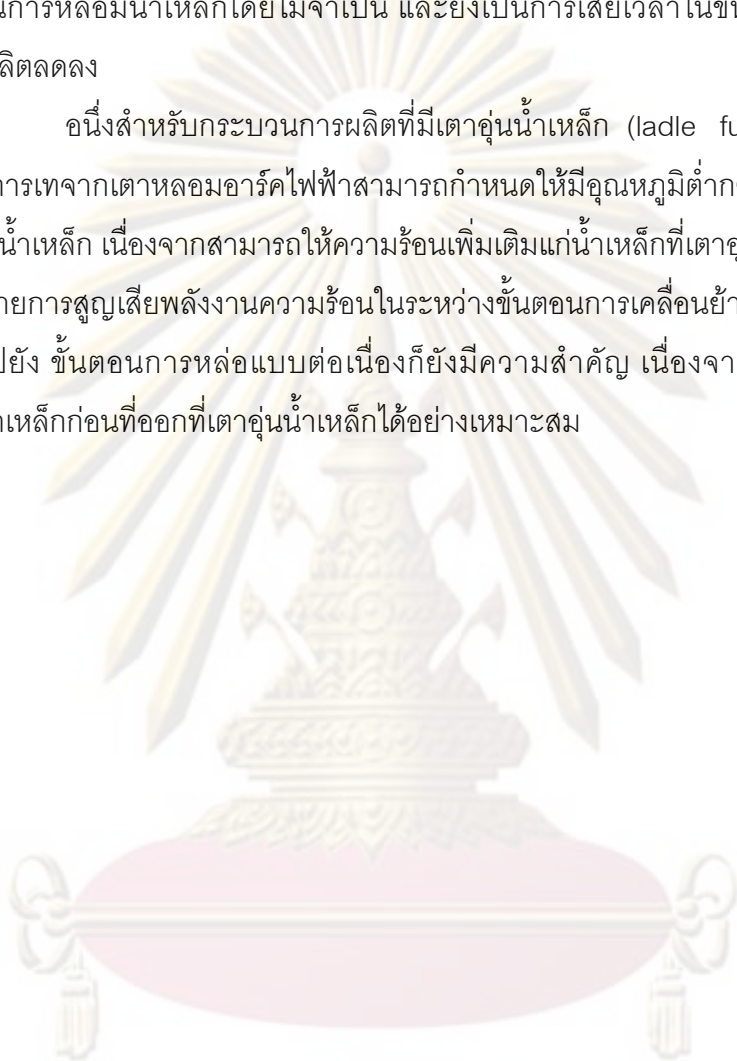
รูปที่ 2-16 เหล็กทรงยาว (billet) จากกระบวนการผลิต

2.1.9 การควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิต

กระบวนการการผลิตเหล็กกล้า การควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กในระหว่างทำการหล่อแบบต่อเนื่องจะมีความสำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากหากอุณหภูมิต่ำเกินไปก็จะเกิดการอุดตันที่แบบหล่อได้ หรือหากอุณหภูมิสูงเกินไปก็จะไม่สามารถทำให้เหล็กที่ทำการหล่อออกมาเป็นเส้น โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำการหล่อแบบต่อเนื่องจะอยู่ที่ประมาณ 1550 °C ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการกำหนดอุณหภูมินี้ได้แก่ อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ทำการเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ซึ่ง อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมจำเป็นต้องสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำการหล่อแบบต่อเนื่อง เพื่อชดเชยการสูญเสียพลังงานความร้อนของน้ำเหล็กในระหว่างการเคลื่อนย้ายน้ำเหล็ก, การรอกการหล่อแบบต่อเนื่อง และในระหว่างการหล่อแบบต่อเนื่อง ดังนั้นจึงเป็นเรื่องสำคัญอย่างยิ่งที่จะ

ทำนายนการสูญเสียพลังงานความร้อนนี้ เพื่อให้สามารถกำหนดอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ทำการเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ได้อย่างเหมาะสม เพราะถ้าหากอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทต่ำเกินไปก็จะทำให้เกิดชั้นเหล็กที่แข็งตัวในเบ้ารับน้ำเหล็ก หรือถ้าหากอุณหภูมิน้ำเหล็กสูงเกินไปก็จะไม่สามารถทำการหล่อแบบต่อเนื่องได้ทันที จำเป็นต้องทำการร่อนน้ำเหล็กเย็นตัวลง ซึ่งก็จะเป็นการสูญเสียทั้งพลังงานในการหลอมน้ำเหล็กโดยไม่จำเป็น และยังเป็นการเสียเวลาในขั้นตอนการผลิต ทำให้อัตราการผลิตลดลง

อนึ่งสำหรับกระบวนการผลิตที่มีเตาคุ่น้ำเหล็ก (ladle furnace) อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ทำการเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าสามารถกำหนดให้มีอุณหภูมิต่ำกว่ากระบวนการผลิตที่ไม่มีเตาคุ่น้ำเหล็ก เนื่องจากสามารถให้ความร้อนเพิ่มเติมแก่น้ำเหล็กที่เตาคุ่น้ำเหล็กได้ อย่างไรก็ตามทำนายนการสูญเสียพลังงานความร้อนในระหว่างขั้นตอนการเคลื่อนย้ายน้ำเหล็กจากเตาคุ่น้ำเหล็กไปยัง ขั้นตอนการหล่อแบบต่อเนื่องก็ยังคงมีความสำคัญ เนื่องจากสามารถใช้กำหนดอุณหภูมิน้ำเหล็กก่อนที่ออกที่เตาคุ่น้ำเหล็กได้อย่างเหมาะสม



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 การศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา

ที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในระบบการผลิตเหล็กกล้าในหลายแง่มุม ไม่ว่าจะเป็นการศึกษาการถ่ายเทพลังงานความร้อนทั้งในส่วนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็ก ในระหว่างขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิตตั้งแต่ ขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ขั้นตอนการรับน้ำเหล็ก ขั้นตอนการรอกการหล่อแบบต่อเนื่อง และขั้นตอนการหล่อแบบต่อเนื่อง รวมถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลถึงการถ่ายเทความร้อนน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่อย่างไรก็ดี วัตถุประสงค์โดยรวม ได้แก่ การที่จะพยายามทำการควบคุมเชิงความร้อนในระหว่างกระบวนการผลิต เพื่อให้สามารถกำหนดตัวแปรต่างๆ ของกระบวนการผลิต เช่น ระยะเวลาการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ทำการเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ระยะเวลาในการรอกการหล่อแบบต่อเนื่อง ความหนาของสแลก เพื่อให้การผลิตเหล็กกล้าที่ได้นั้นมีคุณภาพ เพิ่มอัตราการผลิต และประหยัดพลังงาน ซึ่งแนวทางในการศึกษาวิจัยที่ผ่านมา นั้นมีทั้งในส่วนที่ใช้การทดลอง การเก็บข้อมูลการปฏิบัติงานในโรงงานจริง การใช้วิธีทางสถิติ การจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำการคำนวณในคอมพิวเตอร์ หรือใช้หลายวิธีที่กล่าวมาข้างต้นควบคู่กันไป

หนึ่งในส่วนของการสรุปงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อความสอดคล้องของเนื้อหา จึงได้ทำการจัดหมวดหมู่ตามผลการศึกษาวิจัย ดังนี้

2.2.1 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนการอุ่น

Mohanty และ Satayayut (1992) ศึกษาการสร้างแบบจำลองพลวัต (dynamic model) ทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการอุ่น เปรียบเทียบกับผลการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ฝังเทอร์โมคัปเปิลไว้ในชั้นอิฐทนไฟ (รูปที่ 2-17) เพื่อวัตถุประสงค์ในการทำนายระยะเวลาที่เหมาะสมในการอุ่น โดยใช้สมการการนำความร้อนในหนึ่งมิติที่เปลี่ยนไปตามเวลา (one-dimensional transient heat conduction equation) ที่ตำแหน่งผนังข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก, ผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก และฝาอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (รูปที่ 2-18)

$$\frac{\partial T_{i,j}}{\partial t} = \alpha_{i,j} \frac{\partial^2 T_{i,j}}{\partial x^2} \quad t > 0, 0 < x < L_i \quad (2.3)$$

โดยมีสมมุติฐานดังนี้

- 1) การถ่ายเทความร้อนของทุกพื้นผิวเป็นการนำความร้อนในหนึ่งมิติ
- 2) การนำความร้อนที่ผิวข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งมีลักษณะเป็นผนังโค้ง (cylindrical wall) ใช้การคำนวณในลักษณะของผิวเรียบเนื่องมาจากอัตราส่วนของของรัศมีต่อความหนาของเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่ามากกว่า 10

- 3) การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซเผาไหม้ไปยังผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก พิจารณาเฉพาะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากกระบวนการแผ่รังสีเท่านั้น
- 4) อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของก๊าซเผาไหม้ไปยังผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าสม่ำเสมอทั่วกันทุกบริเวณ เนื่องมาจากการผสมที่ดีและการไหลแบบปั่นป่วนของก๊าซเผาไหม้

การจำลองมีเงื่อนไขเริ่มต้น ให้อุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งใดๆ มีค่าเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศ

$$T = T_a \quad t = 0, 0 \leq x \leq L_i \quad (2.4)$$

ประกอบกับ กำหนดให้บริเวณผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กได้รับการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ เป็นเงื่อนไขในการจำลองการถ่ายเทความร้อน

$$-k_{i,j} \frac{\partial T_{i,j}}{\partial x} = \sigma F (T_{Fl}^4 - T_{in,i}^4) \quad t > 0, x = 0 \quad (2.5)$$

กำหนดค่าตัวประกอบการมองเห็น (View factor, F) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับสภาพการเปล่งรังสีของแก๊สเผาไหม้เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ ด้วยวิธีของ Wimpress (1978)

$$F = -0.00404 + 1.06182\varepsilon - 0.1839\varepsilon^2 \quad (2.6)$$

ซึ่ง

$$\varepsilon = 0.362 - 2.92 \times 10^{-4} T_{Fl} + 6.77 \times 10^{-8} T_{Fl}^2 + \quad (2.7)$$

$$[0.34 - 2.05 \times 10^{-4} T_{Fl} - 1.21 \times 10^{-7} T_{Fl}^2] PL +$$

$$[-8.09 \times 10^{-2} + 5.91 \times 10^{-5} T_{Fl} + 3.84 \times 10^{-7} T_{Fl}^2] (PL)^2$$

$$P = 0.2780238 - 0.00193EA + 6.7 \times 10^{-5} (EA)^2 \quad (2.8)$$

$$L = 3.6V_{T,in}/A_{T,in} \quad (2.9)$$

$$EA = [(A/F) - (A/F)_{st}]/(A/F) \times 100 \quad (2.10)$$

ซึ่งอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ ประเมินมาจากการคำนวณสมดุลพลังงาน ที่เกิดการการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง และพลังงานที่สูญเสียไปกับไอเสียและกำหนดให้การสูญเสียความร้อนที่ผิวด้านนอกของเบ้ารับน้ำเหล็ก เกิดจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ของผิวด้านนอกไปยังบรรยากาศรอบข้าง

$$-k_{i,j} \frac{\partial T_{i,j}}{\partial x} = q_{co,i} + q_{ro,i} \quad t > 0, x = 0 \quad (2.11)$$

โดย

$$q_{ro,i} = h_{r,i}(T_{out,i} - T_a) \quad i = w, r, b \quad (2.12)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับการแผ่รังสีความร้อนจากวิธีการของ Perry และ Green (1984)

$$h_{r,i} = 0.9755 \varepsilon_s \left[\left(\frac{1.8(T_{out,i} - 273) + 492}{100} \right)^4 - \left(\frac{1.8(T_a - 273) + 492}{100} \right)^4 \right] \quad (2.13)$$

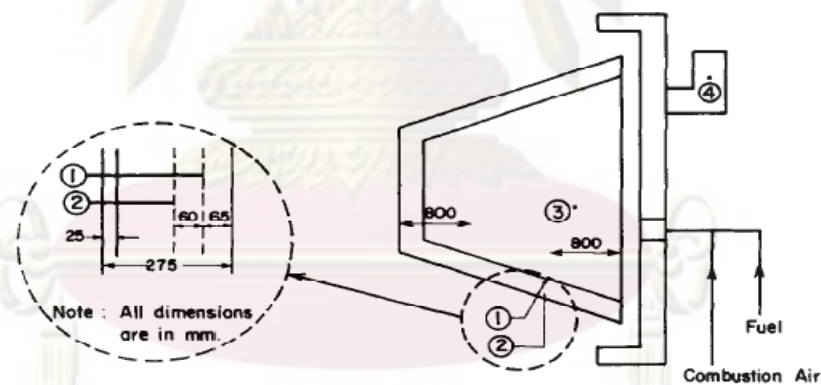
และ

$$q_{co,i} = h_{c,i}(T_{out,i} - T_a) \quad i = w, r, b \quad (2.14)$$

ซึ่งสัมพันธ์กับการพาความร้อนจากค่า Nusselt number ของการพาความร้อนธรรมชาติ

$$Nu = h_{r,i} C / k \quad (2.15)$$

ซึ่ง C ได้แก่ equivalent length ได้แก่ความสูงของเบ้ารับน้ำเหล็ก (h) รัศมีฝาครอบ (a) และรัศมีก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก (b) ซึ่งใช้ในการหาค่า $h_{c,w}$ $h_{c,r}$ และ $h_{c,b}$ ตามลำดับ

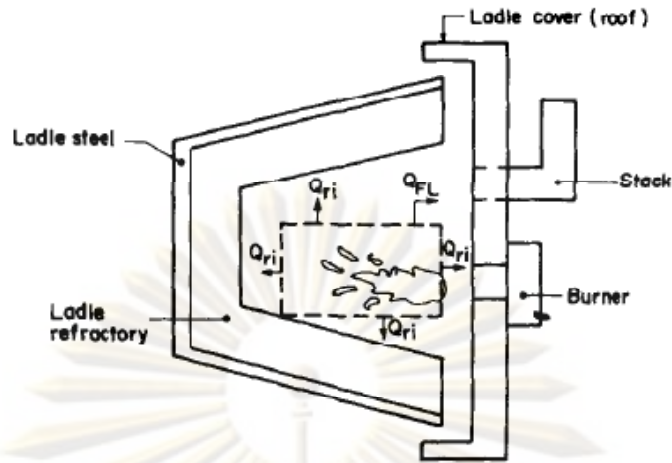


Thermocouple	location
1:	at a point 65 mm. away from inside refractory surface
2:	at a point 125 mm. away from inside refractory surface
3:	at 800 mm. from ladle roof
4:	in the exhaust stack

รูปที่ 2-17 แผนผังแสดงตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้

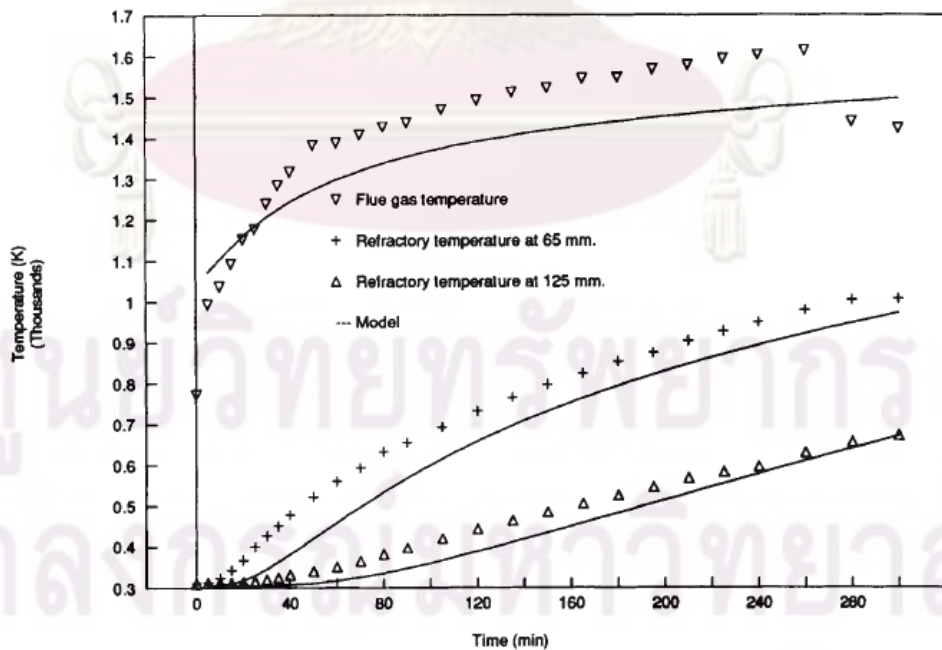
ในการทดลอง, Mohanty และ Satayayut (1992)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



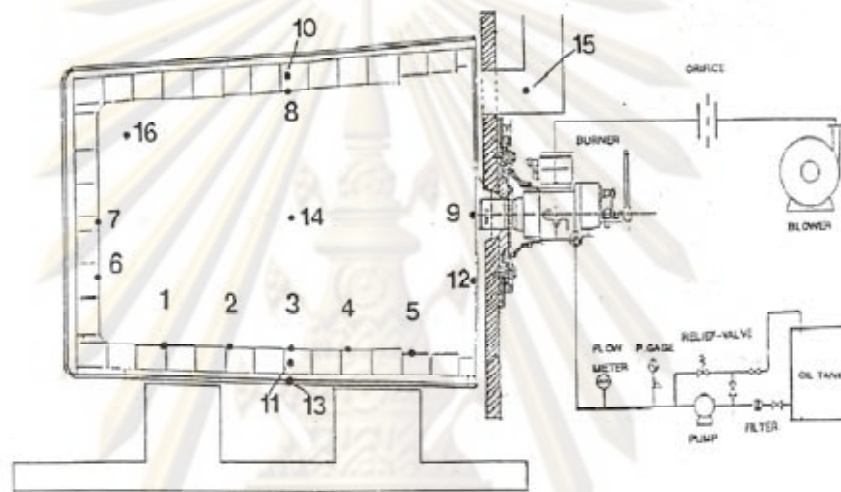
รูปที่ 2-18 แผนผังแสดงการรับน้ำเหล็กขณะทำการอุ่น, Mohanty และ Satayayut (1992)

ผลการศึกษาที่สำคัญพบว่า เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอิฐทนไฟต่อเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2-19 ค่าที่ได้จากการจำลองมีการเปลี่ยนแปลงไปในแนวโน้มเดียวกับค่าที่ได้จากการทดลอง แสดงว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ นอกจากนี้เมื่อระยะเวลาทำการอุ่นเพิ่มมากขึ้นค่าความแตกต่างระหว่างผลที่ได้การจำลอง กับผลที่ได้จากการทดลองจะมีค่าลดลง ซึ่งความแตกต่างนี้อาจเกิดเนื่องมาจาก 1) สมมติฐานที่ไม่คิดถึงการพาความร้อนจากผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ไปยังชั้นอิฐทนไฟ และ 2) การถ่ายเทความร้อนของแบบจำลองเป็นการนำความร้อนใน 1 มิติ



รูปที่ 2-19 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลาของอิฐทนไฟระหว่างผลการทดลอง และผลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์, Mohanty และ Satayayut (1992)

สมศักดิ์ คงโชติ (1993) การศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ด้วยการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ไว้ภายใน (รูปที่ 2-20) และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำลองการถ่ายเทความร้อน (finite different implicit scheme) ของเบ้ารับน้ำเหล็กในรูปแบบการเผาไหม้ในเตาเผารูปทรงกระบอก โดยพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของแก๊สร้อนที่ไหลย้อนกลับจากกันเบ้ามายังปากโดยเน้นไปที่ผลการแผ่รังสีของแก๊สร้อนไปยังผนังของเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการแบบจำลองกับจากผลการทดลอง พบว่าค่าอุณหภูมิที่ได้ในบริเวณกันถึงกลางเบ้ามีความใกล้เคียงกัน และต่างกันประมาณ 10% ในบริเวณกลางเบ้าถึงปากเบ้า



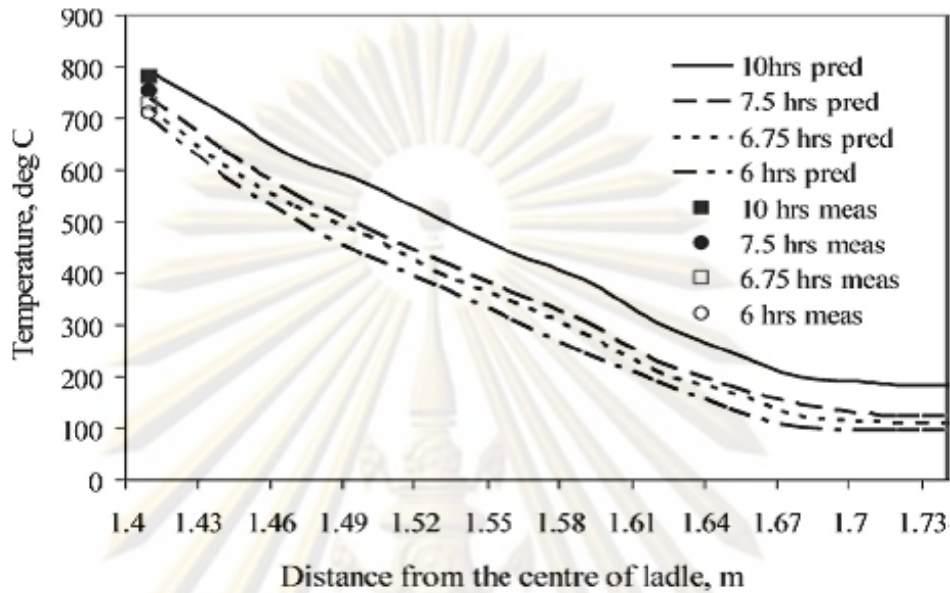
รูปที่ 2-20 ตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลในการทดลองการอุ่น
ถังถ่ายน้ำเหล็ก, สมศักดิ์ คงโชติ (1993)

อนึ่ง เมื่อพิจารณาผลการศึกษาของ Mohanty และ Satayayut และ สมศักดิ์ คงโชติ ชี้ไปในทางเดียวกันว่าการแผ่รังสีความร้อนของก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง เป็นกระบวนการที่มีอิทธิพลหลักในการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างทำการอุ่น

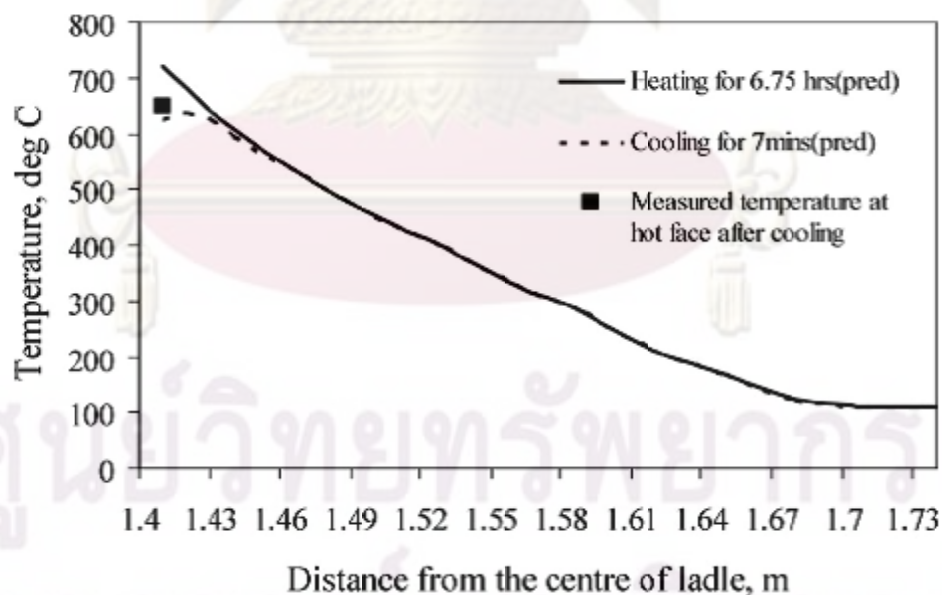
2.2.2 ผลการศึกษาที่แสดงการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กในระหว่างการผลิต

Gupta และ Chandra (2004) ศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กเพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง โดยเป็นการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในหนึ่งมิติ (one dimensional heat transfer) แยกระหว่างบริเวณผนังด้านข้าง และผนังกัน หลังจากนั้นจึงนำผลที่ได้มาใช้ในการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็ก โดยใช้วิธี lumped mass analysis ในการคำนวณการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็ก อนึ่งการสอบเทียบแบบจำลองทำโดยเปรียบเทียบอุณหภูมิผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กหลังการอุ่น และหลังการปล่อยให้เย็นตัวลงโดยใช้ไพโรมิเตอร์ กับผลที่ได้จากการคำนวณ รูปที่ 2-

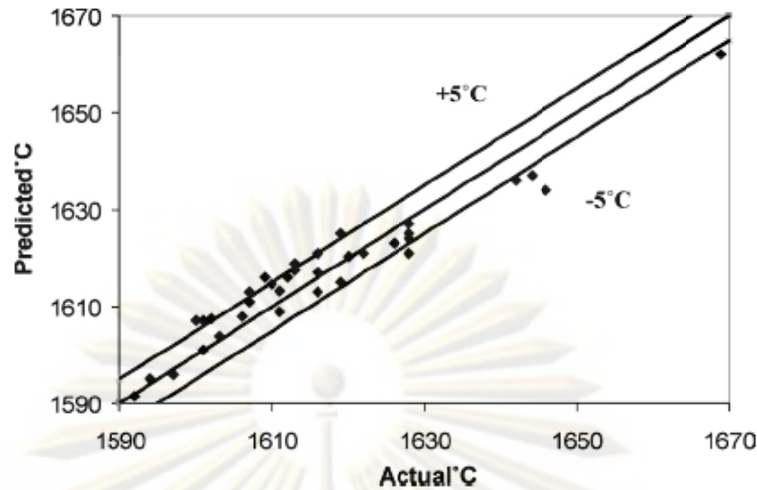
21 และรูปที่ 2-22 ซึ่งผลการทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดของโรงงานแสดงในรูปที่ 2-23 ซึ่งเมื่อใช้ประกอบกับการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลการผลิตของทางโรงงาน



รูปที่ 2-21 อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กภายหลังจากการอุ่นเปรียบเทียบผลจากการตรวจวัด และผลที่ได้จากการคำนวณ, Gupta และ Chandra (2004)

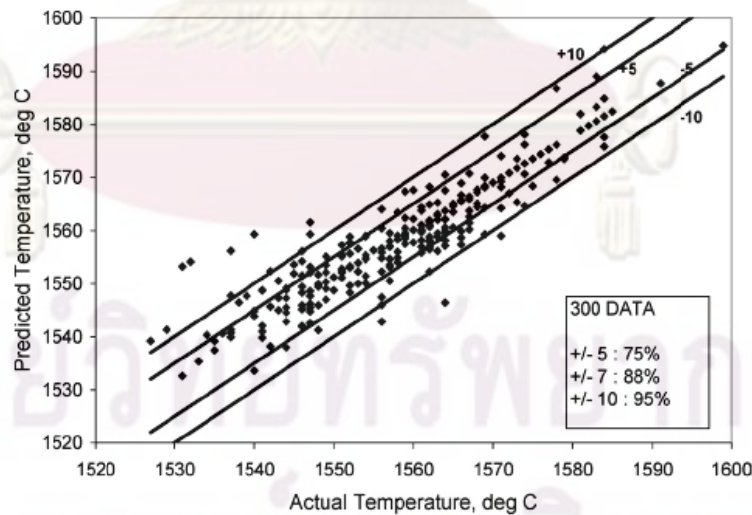


รูปที่ 2-22 อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กภายหลังจากปล่อยให้เย็นเปรียบเทียบผลจากการตรวจวัด และผลที่ได้จากการคำนวณ, Gupta และ Chandra (2004)



รูปที่ 2-23 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็ก ระหว่างการทำนายด้วยแบบจำลอง และจากการวัดอุณหภูมิ, Gupta และ Chandra (2004)

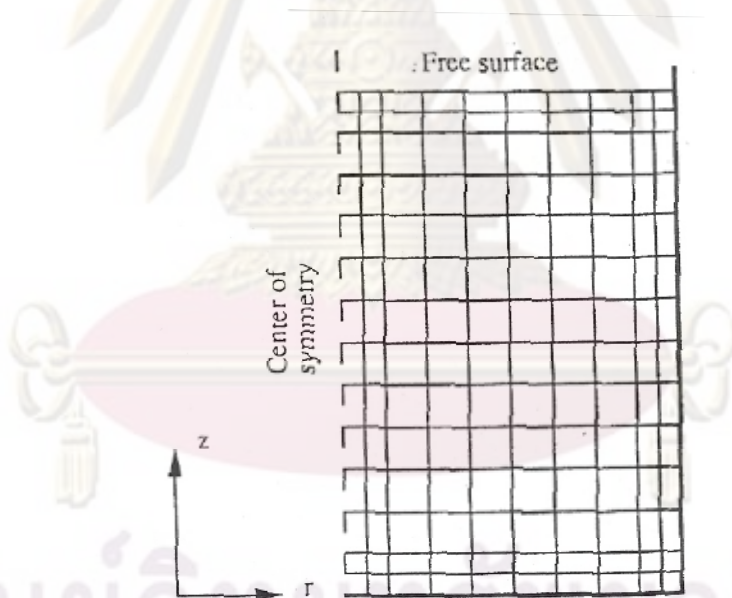
พบว่า 1) มีความสอดคล้องกันของอุณหภูมิของน้ำเหล็กในอ่างรับน้ำเหล็ก (tundish) ระหว่างการทำนายด้วยแบบจำลอง และจากการวัดอุณหภูมิ รูปที่ 2-24 2) ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่พบว่าพลังงานส่วนใหญ่สูญเสียไปกับไอเสีย และ3) การสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กในระหว่างที่บรรจุอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 55 – 60 เกิดจากการนำความร้อนผ่านผนังข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก, อีกร้อยละ 15 – 20 จากการนำความร้อนผ่านผนังก้น และ สุดท้ายอีกร้อยละ 25 – 30 เป็นการสูญเสียผ่านชั้นสแลก



รูปที่ 2-24 เปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำเหล็กในอ่างรับน้ำเหล็ก ระหว่างการทำนายด้วยแบบจำลอง และจากการวัดอุณหภูมิ, Gupta และ Chandra (2004)

2.2.3 ผลการศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิต

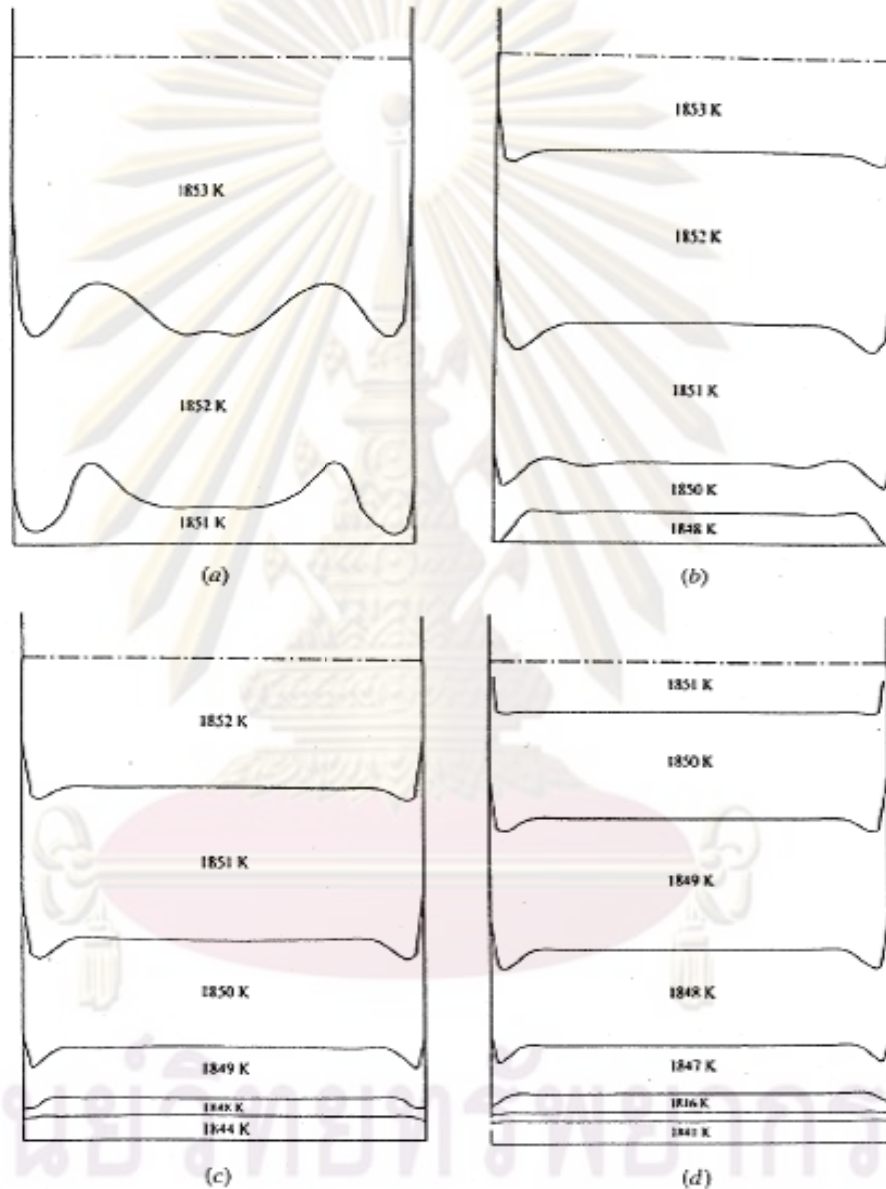
Chakraborty และ Sahai (1992) ได้ทำการศึกษาผลการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กที่เกิดจากสแลกที่ปกคลุมอยู่ด้านบนเหล็ก โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สองมิติ รูป 2-25 จำลองลักษณะการถ่ายเทความร้อน และการไหลของน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 3.35 เมตร สูง 4 เมตร ในขณะที่ทำการรอกและ ระหว่างการถ่ายน้ำเหล็กลงไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก โดยแบบจำลองปรับเปลี่ยนค่าการสูญเสียความร้อนที่ผิวด้านบนของน้ำเหล็กในสองลักษณะได้แก่ 1) กรณีสมมุติให้ไม่มีการถ่ายความร้อนจากผิวด้านบนของน้ำเหล็กเนื่องจากสแลกที่ปกคลุมด้านบนมีความหนาจนกระทั่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวน และ 2) กรณีสมมุติให้มีอัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนจากผิวด้านบนน้ำเหล็กมีค่า 100 kW/m^2 เนื่องจากความบางของชั้นสแลกที่ปกคลุมด้านบน โดยกำหนดให้ น้ำเหล็กภายในที่เวลาเริ่มต้นทำการคำนวณมีความเร็วเท่ากับศูนย์ และมีอุณหภูมิเท่ากันทั่วทั้งเบ้าที่ 1853 K นอกจากนั้นยังกำหนดให้การสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กไปยังผนังเบ้ารับน้ำเหล็กผ่านการนำความร้อนเกิดขึ้นที่อัตรา 12.5 kW/m^2 ในการจำลองทั้งสองกรณีทั้งในช่วงก่อน และระหว่างการถ่ายน้ำเหล็ก



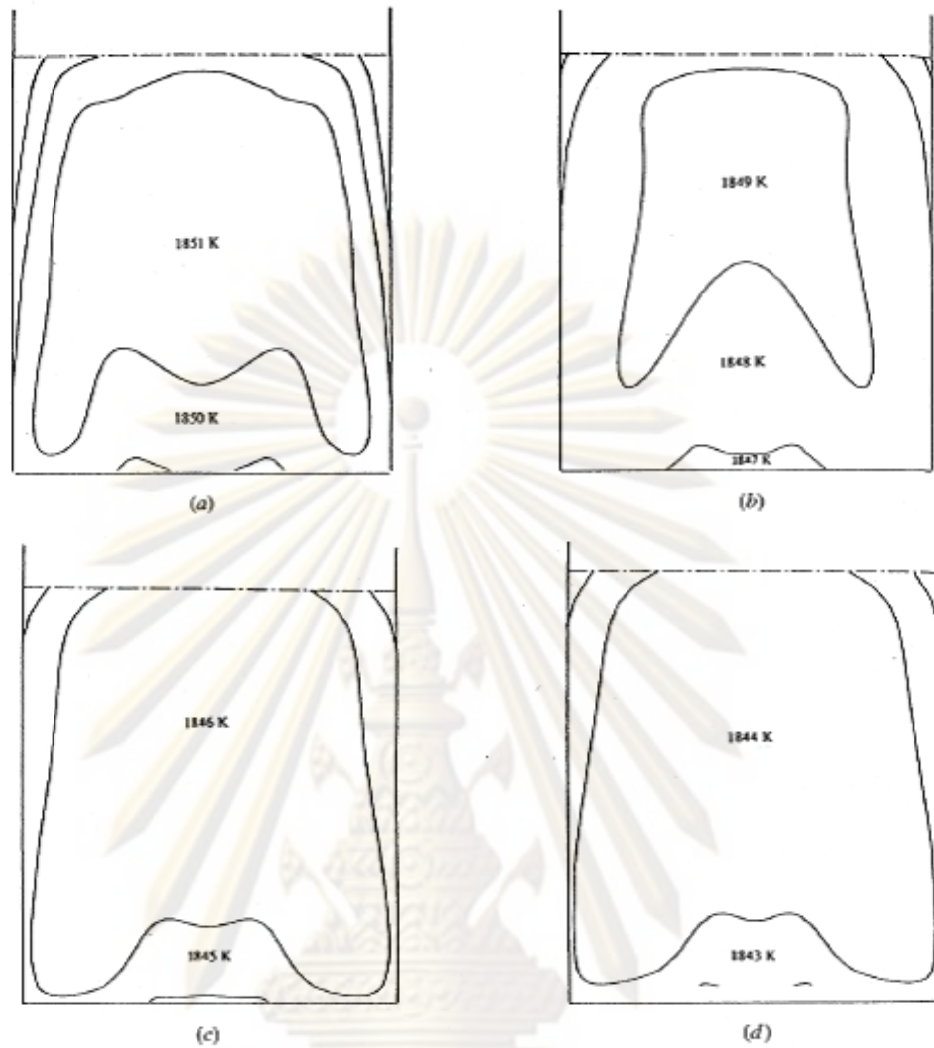
รูปที่ 2-25 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติ ที่ใช้ในการศึกษา,

Chakraborty และ Sahai (1992)

ผลของการศึกษาที่สำคัญแสดงให้เห็นว่า การแจกแจงอุณหภูมิน้ำเหล็กขณะรอการถ่ายน้ำเหล็ก (holding time) กรณีสมมุติให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนที่ผิวหน้าของน้ำเหล็ก เมื่อระยะเวลาการรอนานขึ้น พบว่า thermal stratification ของน้ำเหล็กเพิ่มมากขึ้น รูปที่ 2-26 แตกต่างจากกรณีที่มีการสูญเสียความร้อนที่ผิวหน้าน้ำเหล็ก ซึ่งอุณหภูมิน้ำเหล็กจะมีการแจกแจงตัวที่สม่ำเสมอกว่า รูปที่ 2-27



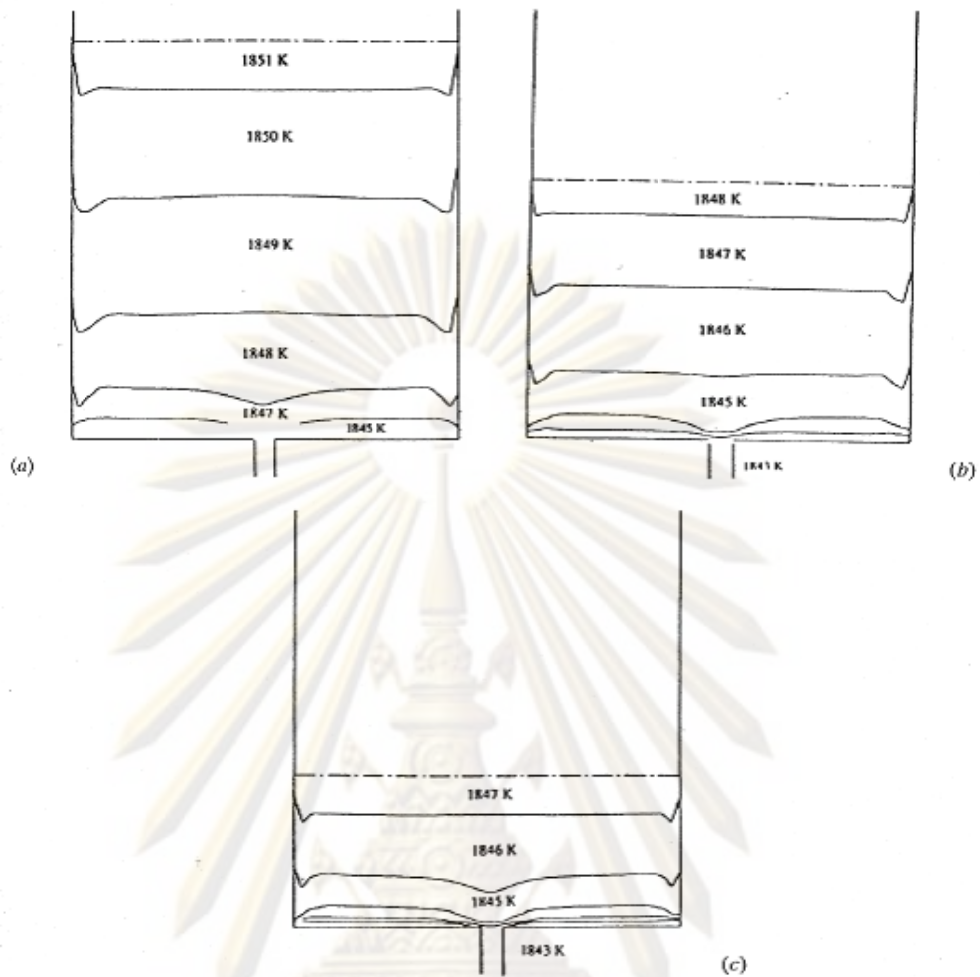
รูปที่ 2-26 การแจกแจงอุณหภูมิน้ำเหล็ก กรณีไม่มีการถ่ายความร้อนจากผิวด้านบนของน้ำเหล็กที่ระยะเวลาการรอ a) 5 นาที b) 10 นาที c) 15 นาที d) 20 นาที, Chakraborty และ Sahai (1992)



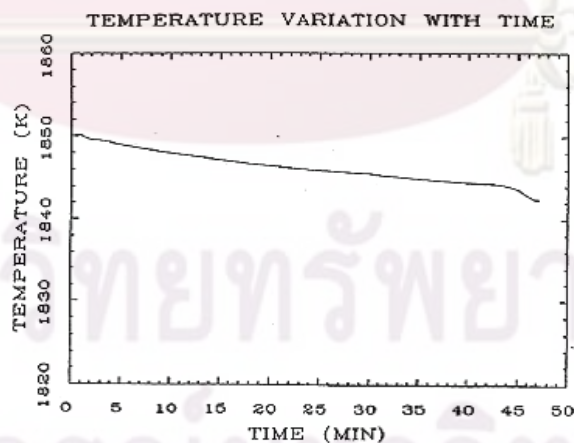
รูปที่ 2-27 การแจกแจงอุณหภูมิน้ำเหล็ก กรณีมีการถ่ายความร้อนจากผิวด้านบนของน้ำเหล็กที่
ระยะเวลาการรอ a) 5 นาที b) 10 นาที c) 15 นาที d) 20 นาที,

Chakraborty และ Sahai (1992)

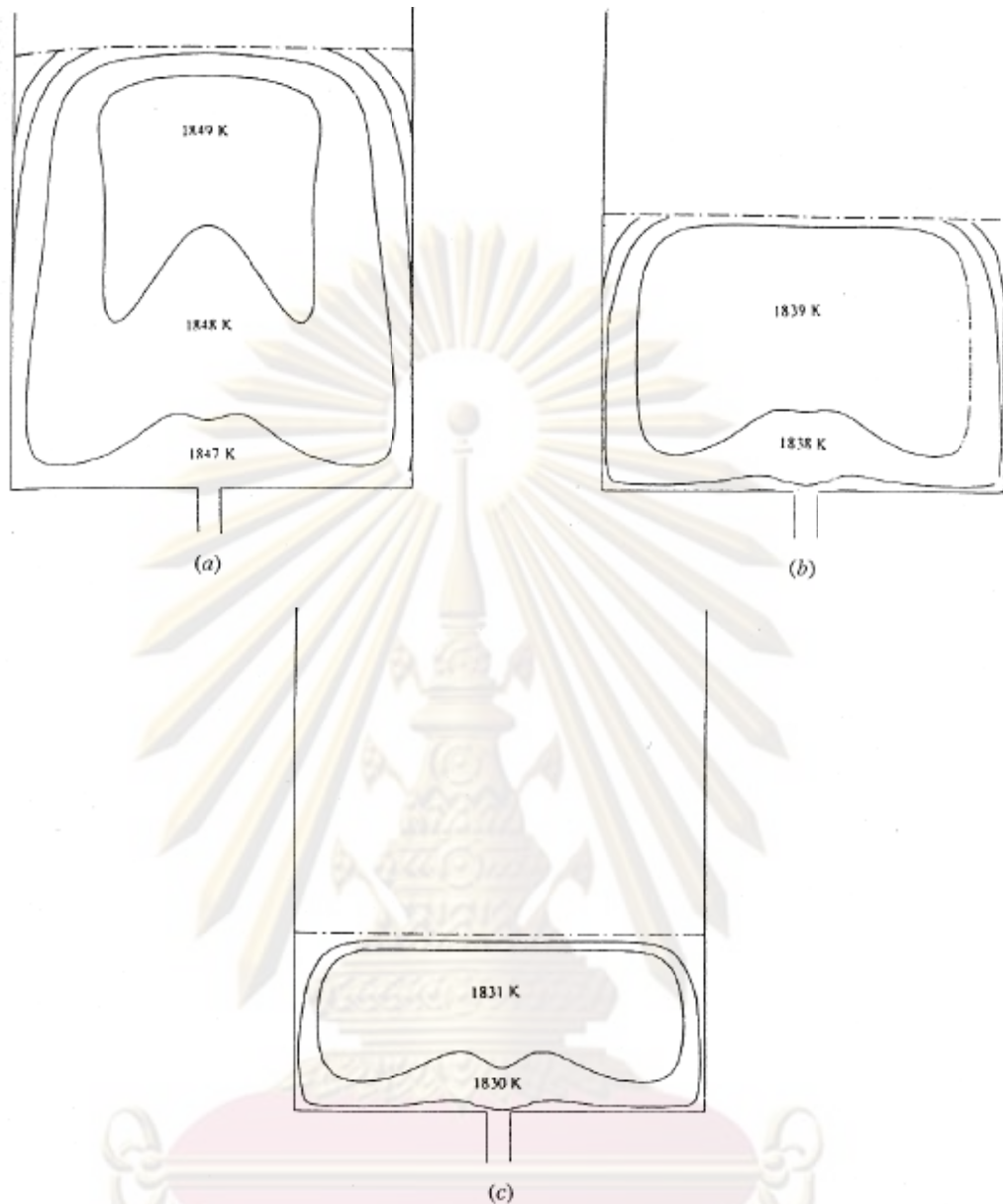
ในส่วนของอุณหภูมิน้ำเหล็กขณะทำการถ่ายนั้น พบว่ากรณีสมมุติให้ไม่การถ่ายเทความร้อนที่ผิวน้ำของน้ำเหล็ก รูปที่ 2-28 อุณหภูมิน้ำเหล็กจะลดลงเพียง 5 ถึง 10 °C ตลอดระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็ก 47 นาที รูปที่ 2-29 ซึ่งน้อยกว่ากรณีที่มีการสูญเสียความร้อนที่ผิวน้ำน้ำเหล็ก รูปที่ 2-30 ซึ่งอุณหภูมิน้ำเหล็กลดลงถึง 45 องศาเมื่อระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็กผ่านไป 47 นาที รูปที่ 2-31



รูปที่ 2-28 การแจกแจงอุณหภูมิน้ำเหล็ก กรณีไม่มีการถ่ายความร้อนจากผิวด้านบนของน้ำเหล็กที่ระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็ก a) 5 นาที b) 20 นาที c) 30 นาที, Chakraborty และ Sahai (1992)

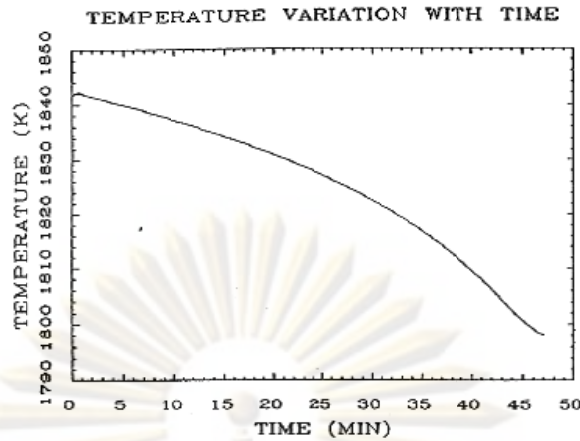


รูปที่ 2-29 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถ่ายน้ำเหล็กตลอดช่วงการถ่ายน้ำเหล็ก กรณีไม่มีการถ่ายความร้อนจากผิว, Chakraborty และ Sahai (1992)



รูปที่ 2-30 การแจกแจงอุณหภูมิในน้ำเหล็ก กรณีมีการถ่ายความร้อนจากผิวด้านบนของน้ำเหล็กที่ระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็ก a) 5 นาที b) 20 นาที c) 30 นาที, Chakraborty และ Sahai (1992)

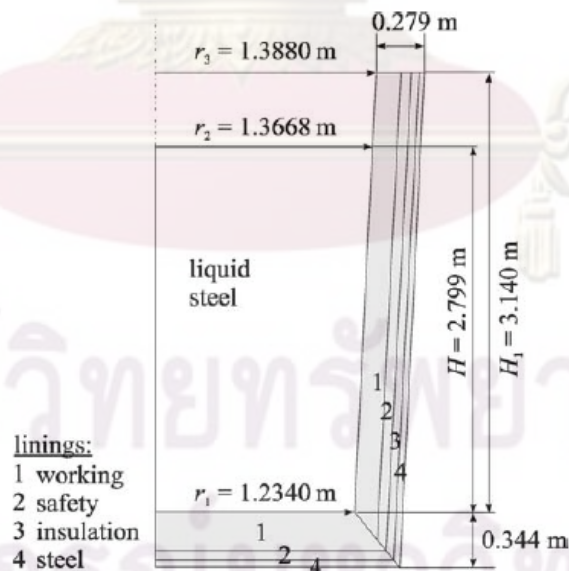
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



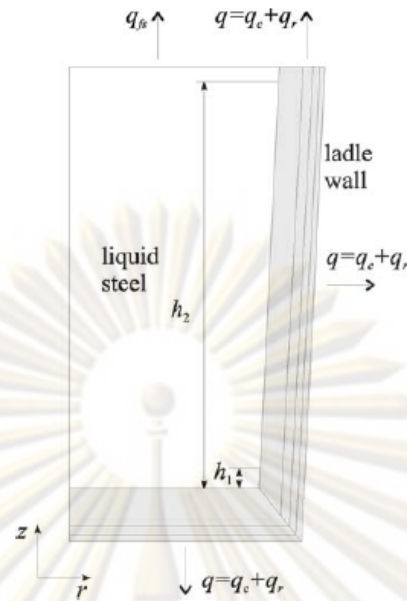
รูปที่ 2-31 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถ่ายน้ำเหล็กตลอดช่วงการถ่ายน้ำเหล็ก กรณีมีการถ่ายความร้อนจากผิว, Chakraborty และ Sahai (1992)

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอัตราการสูญเสียความร้อนผ่านชั้นสแลกที่ปกคลุมผิวหน้าของน้ำเหล็ก ส่งผลถึงการแจจแงอุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก และการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กในขณะที่ทำการถ่ายน้ำเหล็ก

Xia และ Ahokainen (2001) ศึกษาผลของอุณหภูมิเบื้องต้นของเบ้ารับน้ำเหล็ก และการสูญเสียความร้อนที่ผิวหน้าน้ำเหล็ก ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็ก และการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ในขณะที่ทำการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก ของเบ้ารับน้ำเหล็กขนาดความจุ 105 ตัน รูปที่ 2-32 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 มิติ รูปที่ 2-33



รูปที่ 2-32 แผนผังของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในการศึกษา, Xia และ Ahokainen (2001)



รูปที่ 2-33 โดเมนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา,

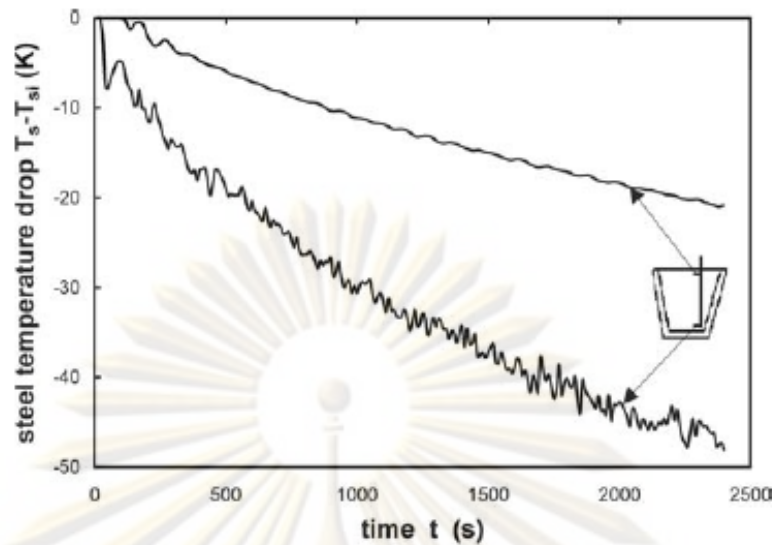
Xia และ Ahokainen (2001)

โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเต้าเท่ากับ 1948K โดยมีสมมุติฐานว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเต้าที่เวลาเริ่มต้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเต้า และกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นของอุณหภูมิผนังข้างและผนังก้นเต้ารับน้ำเหล็ก ในการจำลอง 2 ค่า (1073 และ 1423K) โดยมีสมมุติฐานว่าทั้งผนังข้างและผนังก้นเต้าอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เวลาเริ่มต้นมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเต้า

นอกจากนี้ในการจำลองยังกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของการสูญเสียความร้อน ที่บริเวณผิวน้ำเหล็ก 2 ค่า ได้แก่ 1) มีการสูญเสียความร้อนเท่ากับ 10^4 W/m² แทนกรณีสแลกมีความหนาแน่นน้อย และ 2) มีการสูญเสียความร้อนเท่ากับ 3000 W/m² แทนกรณีสแลกมีความหนาแน่นมาก

ผลของการศึกษาที่สำคัญพบว่า 1) มีการลดลงอุณหภูมิน้ำเหล็กในขณะที่ทำการรอการถ่ายน้ำเหล็ก เนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้กับเต้ารับน้ำเหล็ก บรรยากาศรอบข้าง โดยพบว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กที่บริเวณก้นเต้ารับน้ำเหล็กมีการลดลงเร็วกว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กบริเวณก้นเต้ารับน้ำเหล็ก รูปที่ 2-34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

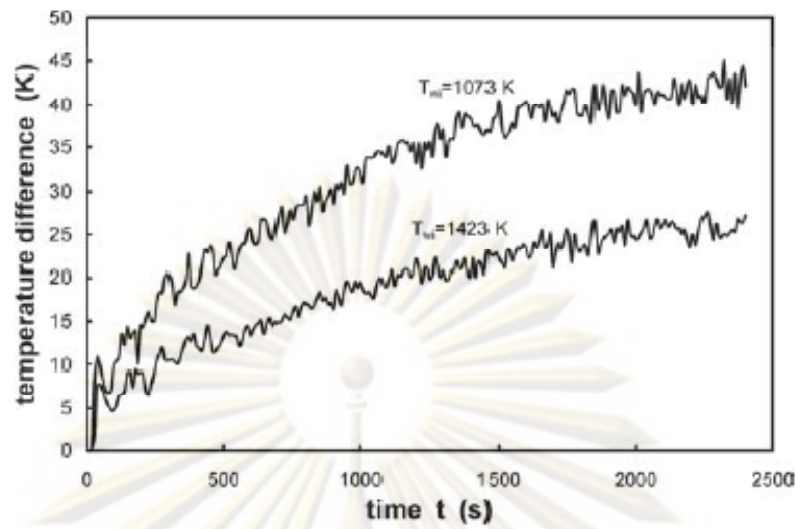


รูปที่ 2-34 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถ่ายน้ำเหล็กในช่วงรอการเทน้ำเหล็ก,
Xia และ Ahokainen (2001)

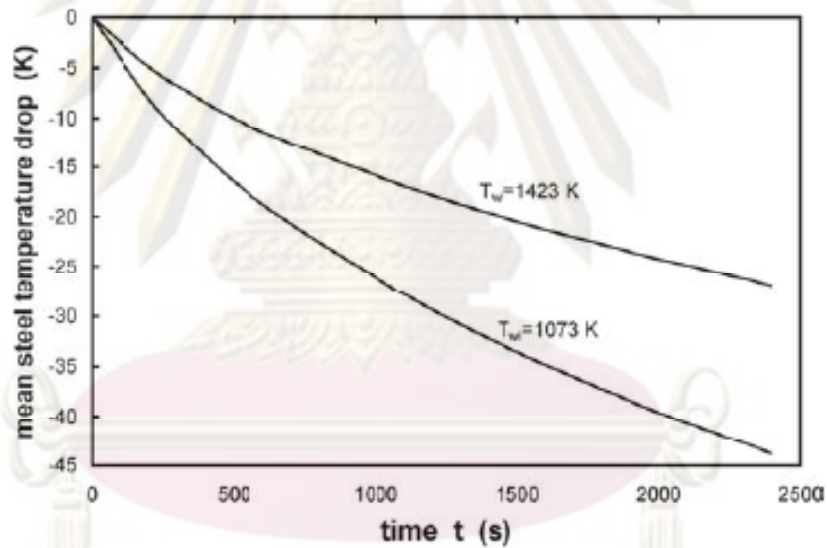
2) อุณหภูมิเริ่มต้นของเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนการรับน้ำเหล็กมีผลต่อ thermal stratification ของน้ำเหล็ก โดยอุณหภูมิเริ่มต้นที่มีค่าน้อยจะส่งผลให้ thermal stratification มีค่ามาก และจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา (thermal stratification แสดงด้วยผลต่างของอุณหภูมิน้ำเหล็กที่บริเวณปากเบ้า และบริเวณก้นเบ้า) รูปที่ 2-35 นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเหล็ก พบว่ากรณีที่อุณหภูมิเริ่มต้นของเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีค่ามาก อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเหล็กมีการลดลงน้อยกว่ากรณีที่อุณหภูมิเริ่มต้นของเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีค่าน้อย ตลอดระยะเวลาการรอ รูปที่ 2-36 เนื่องจากการสูญเสียความร้อนเฉลี่ยของน้ำเหล็กมีค่าน้อยกว่าตลอดระยะเวลาการรอ รูปที่ 2-37 3) ความแตกต่างการสูญเสียความร้อน ที่บริเวณผิวหน้าน้ำเหล็ก ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กที่บริเวณปากเบ้า มากกว่าที่บริเวณก้นเบ้า รูปที่ 2-38 4) การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผิวข้าง และผิวก้นเบ้ารับน้ำเหล็กในขณะที่ทำการรอมีความแตกต่างกัน และความแตกต่างเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาที่รอนานขึ้น รูปที่ 2-39

ศูนย์วิทยทรัพยากร

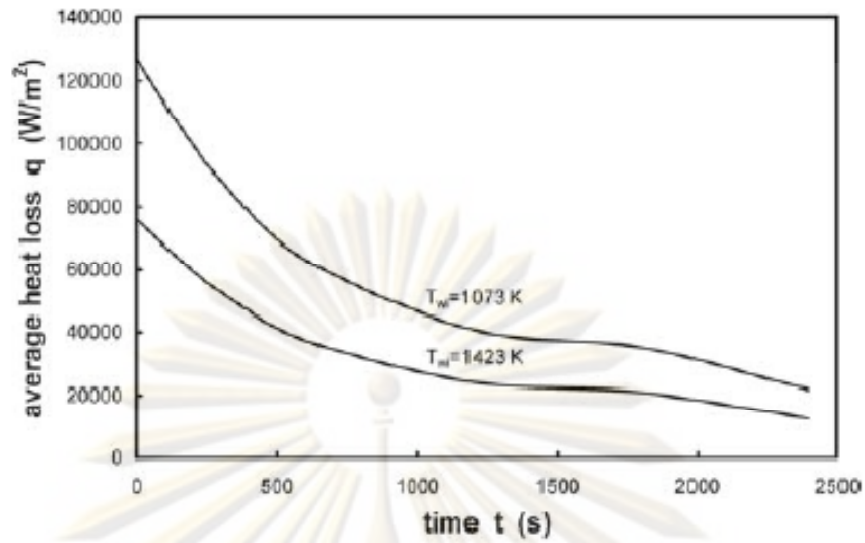
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



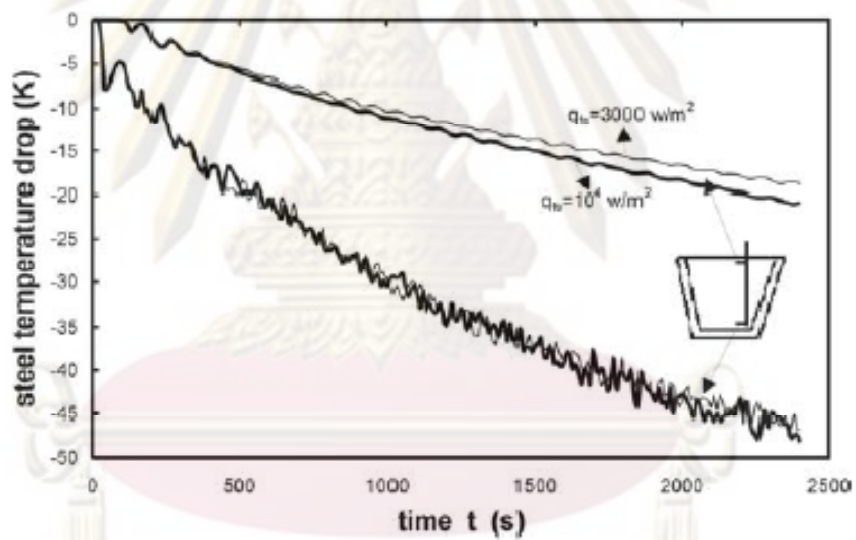
รูปที่ 2-35 ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นของเบ้ารับน้ำเหล็ก ต่อ thermal stratification, Xia และ Ahokainen (2001)



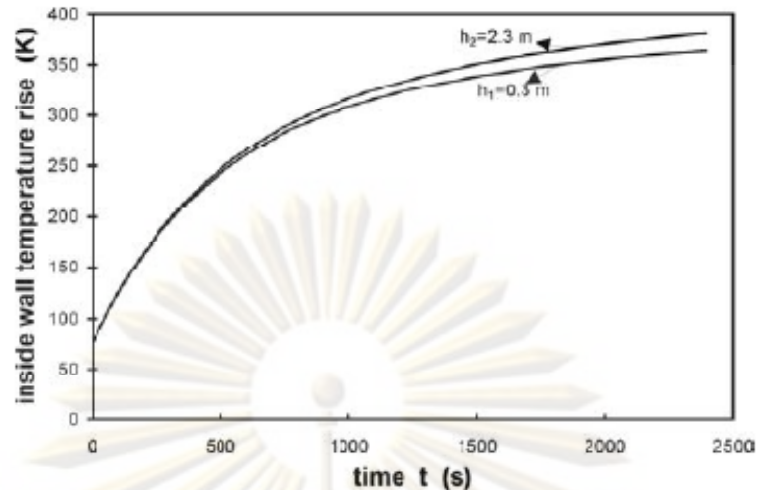
รูปที่ 2-36 ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นของเบ้ารับน้ำเหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเหล็ก, Xia และ Ahokainen (2001)



รูปที่ 2-37 การสูญเสียความร้อนเฉลี่ยของน้ำเหล็กตลอดระยะเวลาการรอ,
Xia และ Ahokainen (2001)



รูปที่ 2-38 ความแตกต่างของอัตราการสูญเสียความร้อนที่ผิวหน้าน้ำเหล็กต่อการ
เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็ก, Xia และ Ahokainen (2001)

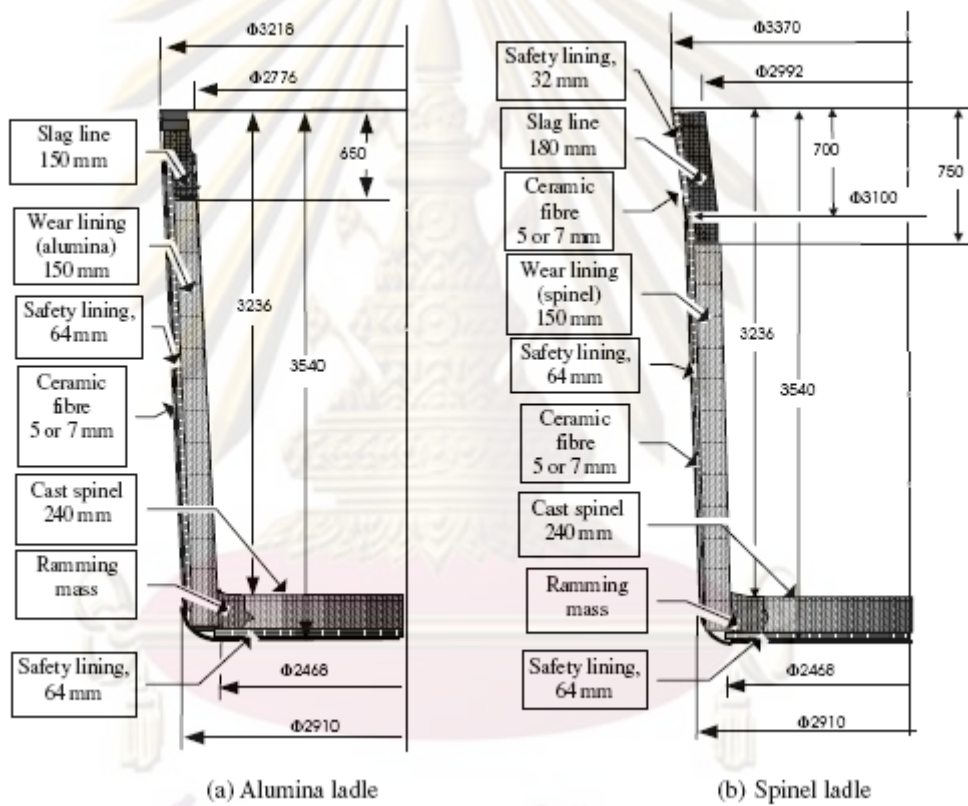


รูปที่ 2-39 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างรอ,

Xia และ Ahokainen (2001)

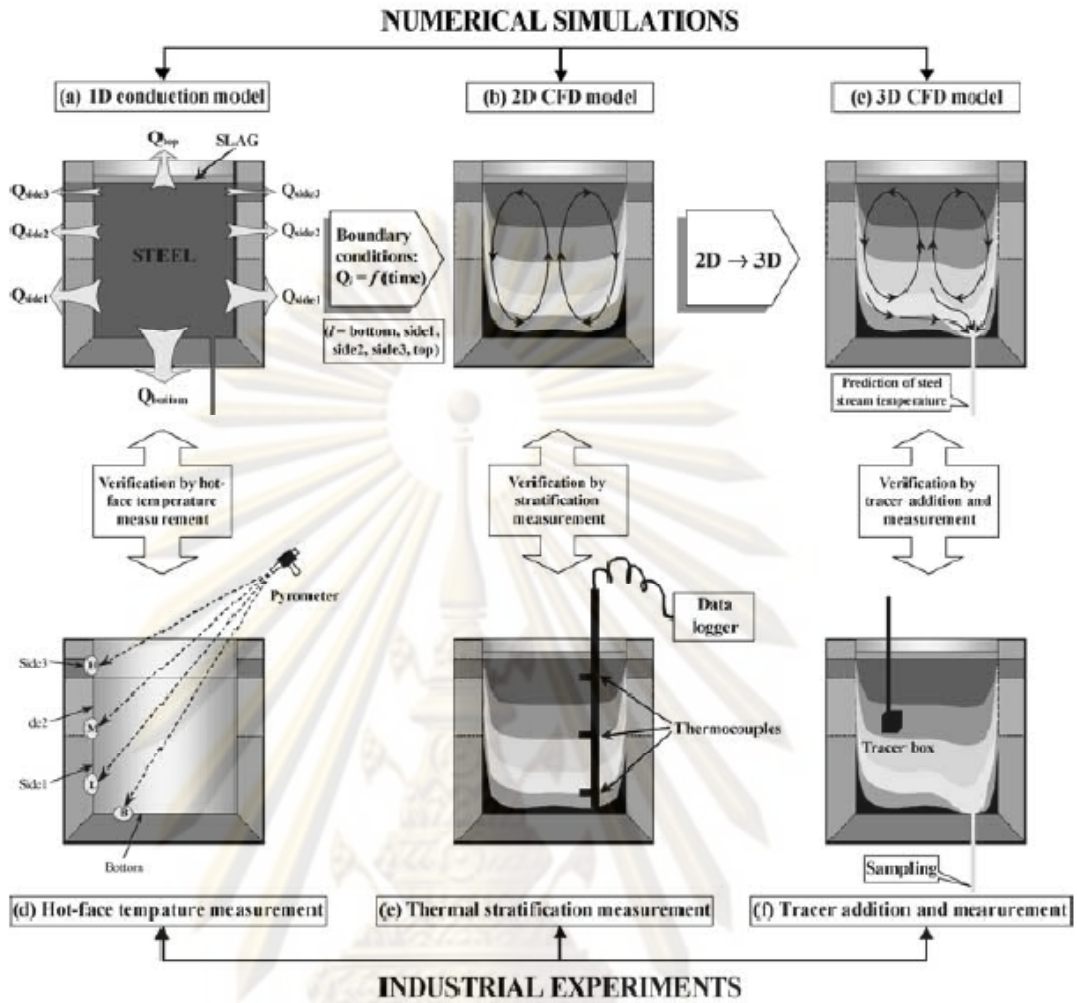
Pan et al. (2003) การศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่ออุณหภูมิน้ำเหล็กในขณะทำการรอ (holding period) และขณะทำการถ่ายน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก (teeming period) ของเบ้ารับน้ำเหล็ก ขนาด 107 ตัน ที่ก่อด้วยอิฐทนไฟสองชนิด ได้แก่ ชนิดที่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กก่อด้วยอิฐทนไฟชนิดอะลูมินา รูปที่ 2-40 a และชนิดที่ก่อด้วยอิฐทนไฟชนิด spinal mass รูปที่ 2-40 b ด้วยการใช่วิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 ขั้นตอนต่อเนื่องกันเพื่อจำลองการทำงาน รูปที่ 2-41 โดยในขั้นตอนแรกใช้ โปรแกรม TEMPSIM เพื่อทำนายอัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนต่อพื้นที่ผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยใช้สมมุติฐานว่าการนำความร้อน เกิดขึ้นในทิศทางผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็กตามแนวรัศมี ทิศทางผ่านผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก และทิศทางผ่านชั้นสแลกด้านบนบนตามแนวแกน โดยสอบเทียบแบบจำลอง (validation) จากการวัดอุณหภูมิผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กโดยการใช้ไพโรมิเตอร์ (pyrometer) รูปที่ 2-42 แสดงผลการวัดอุณหภูมิผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก เทียบกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองที่เวลาต่างๆ ในส่วนขั้นตอนที่สอง และสามนั้น การศึกษาได้ใช้โปรแกรม PHONICS ในการสร้างแบบจำลอง โดยในขั้นตอนที่สองทำการสร้างแบบจำลองสองมิติเพื่อจำลองการไหลภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เกิดจากการพาความร้อนที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ (natural convection flow) และผลของปรากฏการณ์ที่เกิดจากความแตกต่างของชั้นของอุณหภูมิ (thermal stratification phenomena) ในระหว่างการบรรจุน้ำเหล็กก่อนที่จะทำการถ่ายไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก โดยสอบเทียบแบบจำลองด้วยการวัดค่าความแตกต่างของชั้นอุณหภูมิน้ำเหล็ก (thermal stratification) จากการวัดอุณหภูมิผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กโดยการจุ่มเทอร์โมคัปเปิลที่ระดับความลึกต่างๆ และในขั้นตอนที่สามใช้แบบจำลองสามมิติเพื่อจำลองการไหลของน้ำเหล็ก และการถ่ายเทความร้อน

ในขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็กออกไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก และสอบเทียบแบบจำลองด้วยการใช้อุปกรณ์ติดตามการลดระดับของน้ำเหล็ก ด้วยวิธีการวัดคลื่นวิทยุที่สะท้อนกลับมา วัดระดับน้ำเหล็กในบ่ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ซึ่งในการศึกษาใช้การจำลองในขั้นตอนทั้งสาม แบบต่อเนื่องกัน กล่าวคือเริ่มจากการใช้แบบจำลองหนึ่งมิติในขั้นตอนแรกเพื่อให้ได้เงื่อนไขขอบเขตทางความร้อน (thermal boundary condition) สำหรับใช้กำหนดในการจำลองแบบสองมิติ และสามมิติ และใช้แบบจำลองสองมิติในขั้นตอนที่สองเพื่อจำลองการพาความร้อนที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural convection) เพื่อให้ได้เงื่อนไขเบื้องต้น ของความเร็วและอุณหภูมิน้ำเหล็กสำหรับทำการจำลองในแบบจำลองสามมิติในขั้นตอนที่สาม รูปที่ 2-43 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาทั้งสามขั้นตอน



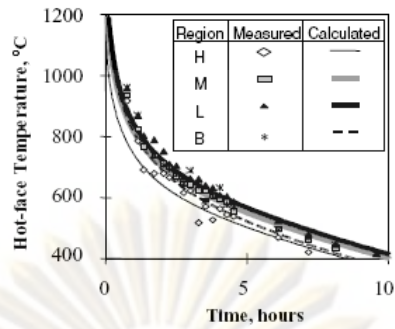
รูปที่ 2-40 แผนผังบ่ารับน้ำเหล็กขนาด 107 ตันที่ทำการศึกษา, Pan et al. (2003)

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

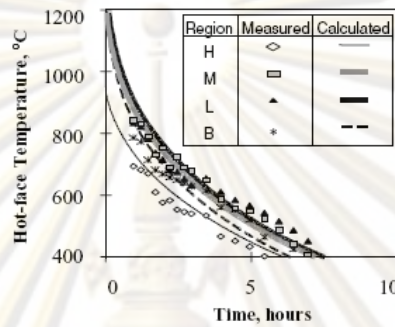


รูปที่ 2-41 แนวทางการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการสอบเทียบ,
Pan et al. (2003)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

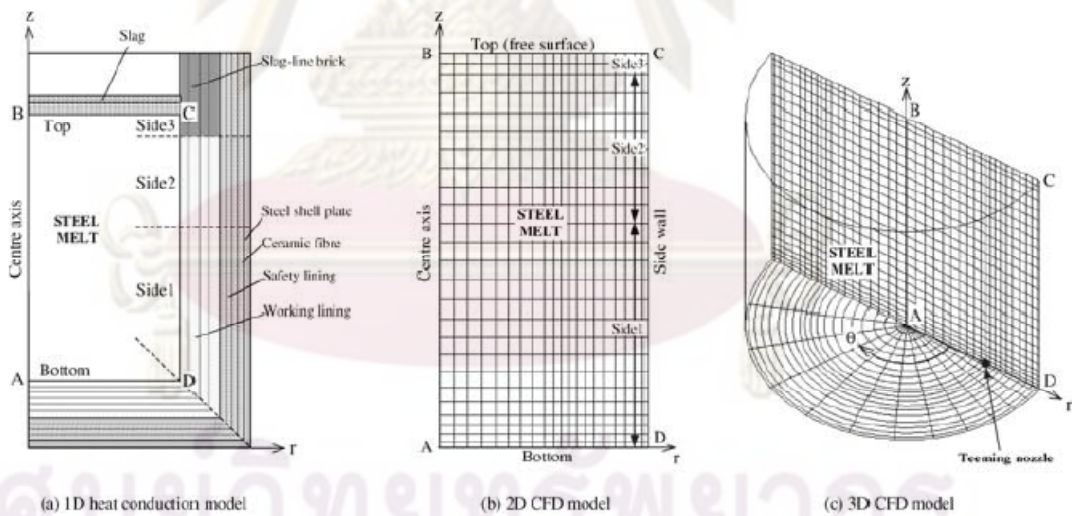


(a) Alumina ladle



(b) Spinel ladle

รูปที่ 2-42 เปรียบเทียบอุณหภูมิผิวด้านในเข้ารับน้ำเหล็ก ระหว่างการทำนายด้วยแบบจำลอง และจากการวัดอุณหภูมิ, Pan et al. (2003)



รูปที่ 2-43 โดเมนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการศึกษา, Pan et al. (2003)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวแปรสำคัญที่ส่งผลถึงอุณหภูมิน้ำเหล็กขณะทำการถ่ายน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่สนใจในการศึกษาได้แก่ 1) อุณหภูมิผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนทำการรับน้ำเหล็ก 2) ความหนาของสแลกที่อยู่ปกคลุมด้านบนของเบ้ารับน้ำเหล็ก 3) ระยะเวลาที่เบ้ารับน้ำเหล็กบรรจุ น้ำเหล็กในระหว่างรอการถ่ายลงอ่างรับน้ำเหล็ก (holding time) 4) อัตราการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก (teeming rate) โดยออกแบบการจำลองของการเปลี่ยนตัวแปร ตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 รายละเอียดแบบจำลองที่ทำการศึกษา, Pan et al. (2003)

Simulation case no. ^a	Hot-face temp. (°C)	Slag thickness ^b (mm)	Holding time (min)	Teeming rate ^c (tonnes/min)
A1	S1 1000	83	30	2.816
A2	S2 1000	55	20	2.488
A3	S3 1000	28	10	2.229
A4	S4 800	55	30	2.229
A5	S5 800	28	20	2.816
A6	S6 800	83	10	2.488
A7	S7 600	28	30	2.488
A8	S8 600	83	20	2.229
A9	S9 600	55	10	2.816

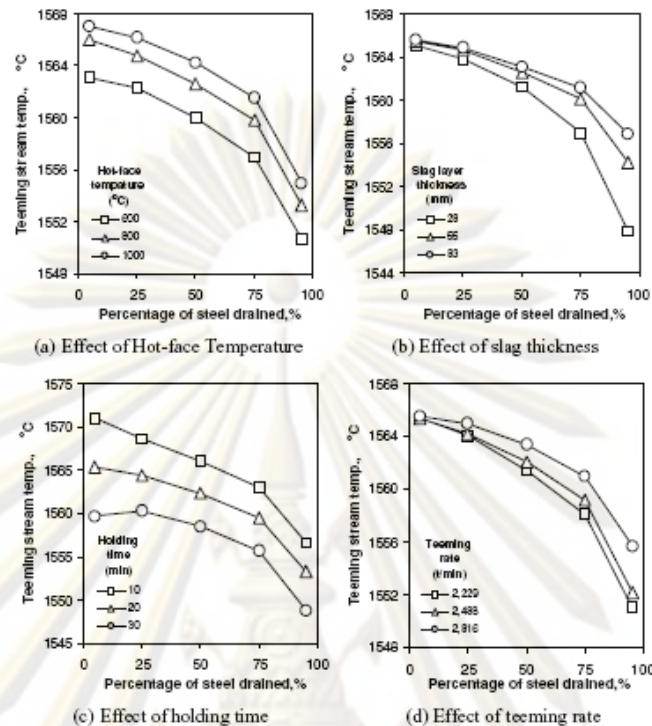
^a 'A' refers to alumina ladles and 'S' refers to spinel ladles.

^b The slag thickness of 28, 55 and 83 mm corresponds, respectively, to 500, 1000 and 1500 kg slag in 107-tonne steel ladles.

^c The teeming rates are calculated based on 107-tonne liquid steel drained for 38, 43 and 48 min, respectively.

ผลของการศึกษาที่สำคัญแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนอุณหภูมิน้ำเหล็กขณะทำการถ่ายจากเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นผลเนื่องมาจากตัวแปรทั้งสี่ตัว โดย 1) อุณหภูมิผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กจะส่งผลถึงระดับอุณหภูมิน้ำเหล็กในช่วงต้นขนาดถ่ายน้ำเหล็กที่แตกต่างกัน แต่ผลที่เกิดกับการลดลงของอุณหภูมิในขณะทำการถ่ายน้ำเหล็กนั้นมีค่าน้อย ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กจาก 600 เป็น 800 °C จะทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ถ่ายสูงขึ้นประมาณ 3 °C ตลอดช่วงทำการถ่ายน้ำเหล็ก รูปที่ 2-44 a 2) ความหนาของชั้นสแลกที่ปกคลุมผิวหน้าน้ำเหล็กซึ่งเป็นปัจจัยควบคุมการถ่ายเทความร้อนจากผิวหน้าน้ำเหล็ก (กรณีที่สแลกมีความหนา 28 มิลลิเมตร อัตราการสูญเสียพลังงานความร้อนที่ผิวด้านบนของน้ำเหล็กในระหว่างการรอการถ่ายน้ำเหล็กลงไปยังอ่างรับน้ำเหล็กมีค่าประมาณ 15 kW/m²) โดยความหนาของชั้นสแลกนั้นส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กในขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก โดยชั้นสแลกที่มีความหนามากขึ้นทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กลดลง รูปที่ 2-44 b 3) ระยะเวลาที่เบ้ารับน้ำเหล็กทำการรอเป็นปัจจัยที่ส่งผลอย่างมากต่อระดับระดับอุณหภูมิน้ำเหล็กในช่วงต้นขนาดถ่ายน้ำเหล็กที่แตกต่างกัน ซึ่งเวลาที่รอเพิ่มขึ้น 10 นาทีจะทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ถ่ายจากเบ้ารับน้ำเหล็กลดลง 4-5 °C รูปที่ 2-44 c 4) อัตราการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก (teeming rate) นั้นส่งผลต่อการลดลง

ของอุณหภูมิหน้าเหล็กในขณะที่ทำการถ่ายน้ำเหล็กเท่านั้น โดยการเพิ่มอัตราการถ่ายน้ำเหล็กทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหน้าเหล็กลดลง รูปที่ 2-44 d



- รูปที่ 2-44 ผลของตัวแปร 1) อุณหภูมิด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนทำการรับน้ำเหล็ก
 2) ความหนาของสแลกที่อยู่ปกคลุมด้านบนของเบ้ารับน้ำเหล็ก
 3) ระยะเวลาที่เบ้ารับน้ำเหล็กบรรจุน้ำเหล็กในระหว่างรอการถ่ายลงอ่างรับน้ำเหล็ก
 4) อัตราการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก (teeming rate) ต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิถ่ายน้ำเหล็กในช่วงทำการถ่ายน้ำเหล็ก, Pan et al. (2003)

ซึ่งอุณหภูมิด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนทำการรับน้ำเหล็กนี้เองทาง ข้าพเจ้าคิดว่า เป็นผลมาจากความร้อนสะสมภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ขึ้นกับระยะเวลาการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ก่อนนำไปทำการรับน้ำเหล็ก ดังนั้นการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ส่วนหนึ่งจึงมุ่งเน้นไปที่การหาความสัมพันธ์ของตัวแปรการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ส่งผลถึงการสูญเสียอุณหภูมิของน้ำเหล็กไปยังเบ้ารับน้ำเหล็ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

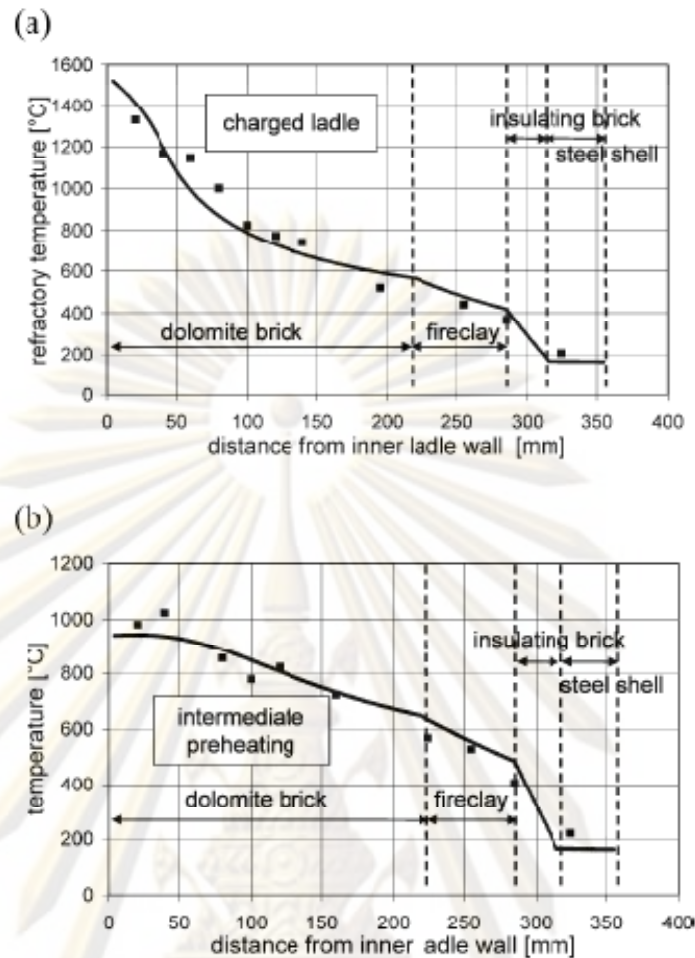
2.2.4 ผลการศึกษาสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำในระหว่างกระบวนการผลิต

Volkova และ Janke (2003) ทำการศึกษาโดยใช้แบบจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนของ เบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิต เพื่อทำนายอุณหภูมิในชั้นต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยพิจารณาการสูญเสียของชั้นวัสดุ ของอิฐทนไฟชนิด dolomite และ spinel mass โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีพื้นฐานมาจาก Fourier differential equation ในสภาวะที่การถ่ายเทความร้อนเป็นฟังก์ชันของเวลา และตำแหน่ง (non-stationary state) รูปที่ 2-45

ผลที่ได้จากการศึกษาที่สำคัญพบว่า ผลการจำลองที่ได้กับผลการทดลองวัดอุณหภูมิจริงในชั้นอิฐทนไฟชนิด dolomite ของผลการศึกษาก่อนหน้า ทั้งระหว่างขั้นตอนการเคลื่อนย้ายน้ำเหล็ก รูปที่ 2-46 a และ ขั้นตอนการอุ่นน้ำเหล็ก รูปที่ 2-46 b มีความสอดคล้องกัน นอกจากนี้ยัง ในระหว่างรอบการทำงานอิฐทนไฟชนิด spinel mass มีความร้อนสะสมมากกว่าอิฐทนไฟชนิด dolomite ซึ่งหมายความว่าน้ำเหล็กจะมีการสูญเสียความร้อนมากกว่าเมื่อบรรจุอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อด้วยอิฐทนไฟชนิด spinel mass

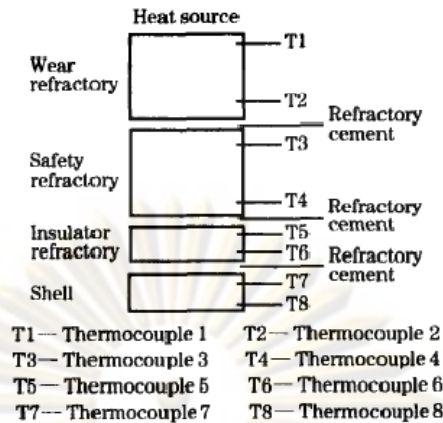
$$\begin{aligned}
 \bullet 1) \quad \frac{\partial T_w}{\partial t} &= \frac{\lambda_w(T_w)}{\rho_w(T_w) \cdot \bar{c}_{p,w}(T_w)} \cdot \left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) \\
 \bullet 2) \quad \frac{\partial T_b}{\partial t} &= \frac{\lambda_b(T_b)}{\rho_b(T_b) \cdot \bar{c}_{p,b}(T_b)} \cdot \frac{\partial^2 T_{sl}}{\partial x^2} \\
 \bullet 3) \quad \frac{\partial T_{sl}}{\partial t} &= \frac{\lambda_{sl}(T_{sl})}{\rho_{sl}(T_{sl}) \cdot \bar{c}_{p,sl}(T_{sl})} \cdot \frac{\partial^2 T_{sl}}{\partial x^2} \\
 \bullet 4) \quad T_{sl} &= T_{sl}
 \end{aligned}$$

รูปที่ 2-45 สภาวะที่การถ่ายเทความร้อนเป็นฟังก์ชันของเวลา และตำแหน่ง (Non-Stationary state), Volkova and Janke (2003)



รูปที่ 2-46 เปรียบเทียบผลการทดลองวัดอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก กับผลที่ได้จากการทำนาย, Volkova and Janke (2003)

Zimmer et al. (2008) การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการการผลิตเหล็ก โดยการวัดค่าอุณหภูมิจากการฝังเทอร์โมคอปเปิลชนิด N ในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งแนวสแลก (slag line position) และการวัดค่าอุณหภูมิผิวเหล็กภายนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยไพโรมิเตอร์ ประกอบกับข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิในชั้นวัสดุทนไฟที่ได้จากการทดลอง รูปที่ 2-47 แสดงตำแหน่งเทอร์โมคอปเปิลในการทดลอง



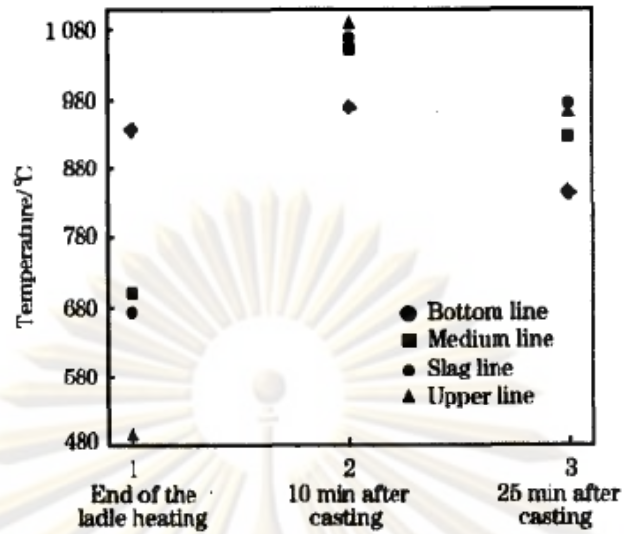
รูปที่ 2-47 ตำแหน่งเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในการทดลอง, Zimmer et al. (2006)

ผลการศึกษาที่สำคัญพบว่า 1) การสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กเกิดขึ้นมากในขั้นตอนการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมไฟฟ้าลงมายังเบ้ารับน้ำเหล็ก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการรักษาอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กให้สูงเพื่อลดการสูญเสีย ตารางที่ 2-3 2) ระยะเวลาหลังจากการถ่ายน้ำเหล็กจนถึงการรับน้ำเหล็กอีกครั้งมีผลต่อการสูญเสียความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กจะลดลงไปประมาณ 10% หลังจากเวลาผ่านไป 15 นาที รูปที่ 2-48 3) เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ เนื่องจากการสูญเสียอิฐทนไฟ และการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กในระหว่างรอบการทำงาน รูปที่ 2-49 4) รูปที่ 2-50 แสดงการแจกแจงอิฐทนไฟ ซึ่งความไม่ต่อเนื่องของอุณหภูมิเกิดเนื่องมาจากค่าความต้านทานทางความร้อนของปูนที่ใช้ประสานอิฐทนไฟในการทดลอง นอกจากนี้ Zimmer et al. ยังเสนอแนะว่าการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละตำแหน่งจะมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นกับขั้นตอนในการทำงาน ยิ่งไปกว่านั้นแต่ละระยะเวลาของกระบวนการยังขึ้นอยู่กับกระบวนการก่อนหน้าซึ่งทำให้การควบคุมอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีความยุ่งยาก

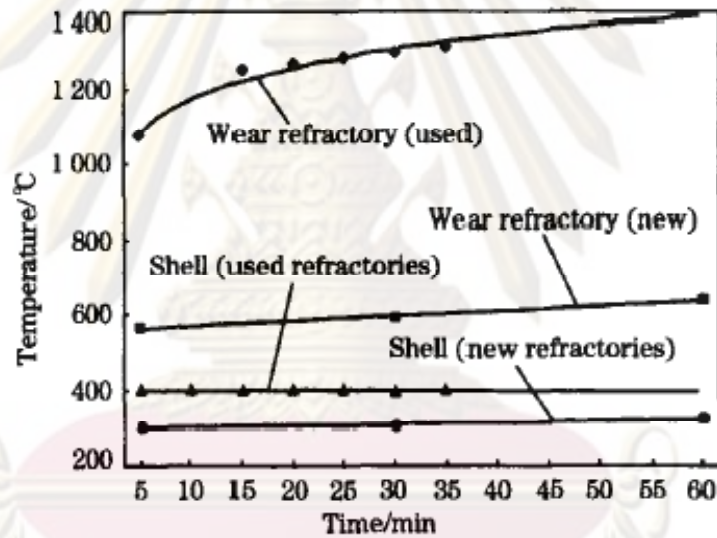
ตารางที่ 2-3 อุณหภูมิน้ำเหล็กและการสูญเสียอุณหภูมิน้ำเหล็กขั้นตอนต่างๆ, Zimmer et al. (2008)

Time/min	Processing step	Steel temperature/°C	Change in temperature/°C	Q/GJ	P _s /MW	C/MWh
0→20	Tapping	1 680→1 580	-100	-3.47	-2.89	-0.96
20→100	Ladle furnace	1 580→1 660	+80	+2.77	+0.46	+0.77
100→140	Vacuum	1 660→1 560	-100	-3.47	-0.41	-0.96
140→180	Casting	1 560→1 530	-30	-1.04	-0.10	-0.29
180	End of the cycle	1 530	-	-	-	-

Note: The positive values mean gain of temperature or energy and the negative values mean losses in the temperature or energy.



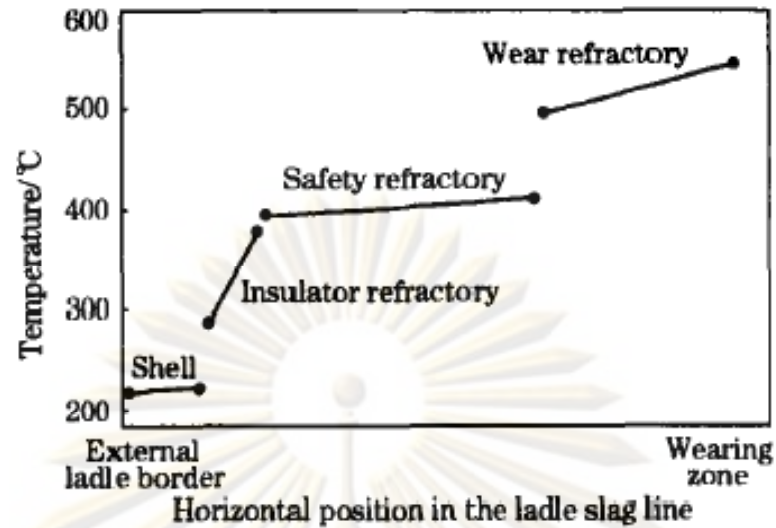
รูปที่ 2-48 อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ในแต่ละกระบวนการ, Zimmer et al. (2006)



รูปที่ 2-49 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อเวลา เปรียบเทียบระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กที่
ก่อนขึ้นใหม่กับเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้ว, Zimmer et al. (2006)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2-50 การแจกแจงอุณหภูมิในชั้นต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็ก, Zimmer et al. (2006)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การถ่ายเทความร้อน เป็นการถ่ายเทของพลังงานจากส่วนหนึ่งไปสู่อีกส่วนหนึ่ง เนื่องจากผลต่างของอุณหภูมิ (temperature difference) ของสองส่วนนั้น โดยที่การถ่ายเทความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้สามรูปคือ การนำความร้อน (conduction heat transfer) การพาความร้อน (convection heat transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (radiation heat transfer) โดยมีทิศทางจากส่วนที่อุณหภูมิสูงไปยังส่วนที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า

2.3.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อน ผ่านการสั่นของโมเลกุลที่อยู่ติดกันของตัวกลางของแข็ง หรือของเหลวที่อยู่นิ่ง โดยมีทิศทางการถ่ายเทความร้อนจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงไปยังตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยสมการอัตราการนำความร้อนหรือที่เรียกว่า Fourier's law ในหนึ่งมิติสามารถเขียนได้ดังนี้

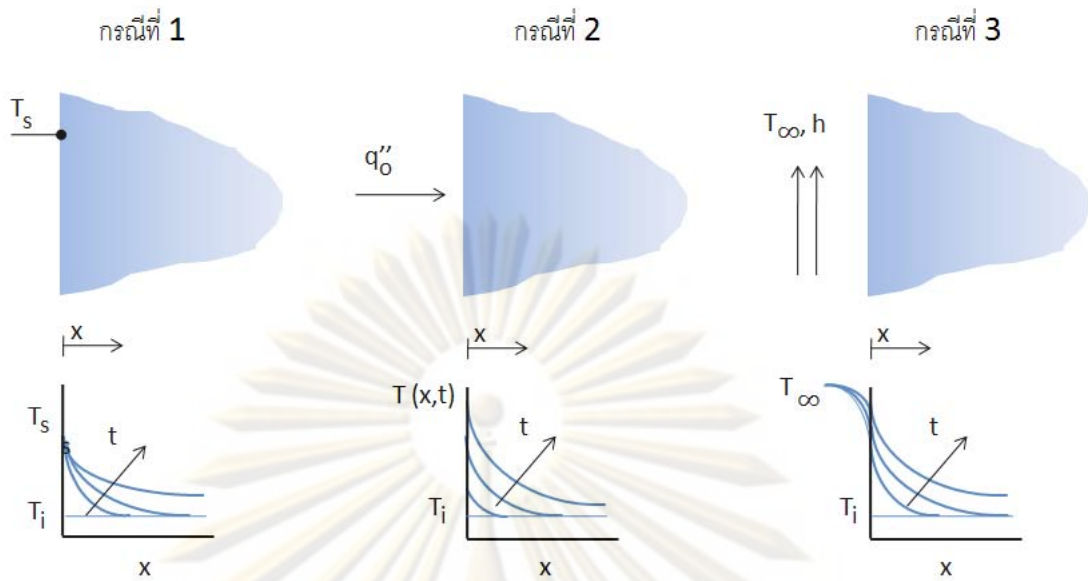
$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.16)$$

$$q_x'' = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (2.17)$$

โดย

q_x''	แทน	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ตามแนวแกน x (W/m^2)
k	แทน	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุ ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)
T_1	แทน	อุณหภูมิของตำแหน่งที่หนึ่ง (K)
T_2	แทน	อุณหภูมิของตำแหน่งที่สอง (K)
ΔT	แทน	ผลต่างของอุณหภูมิจากตำแหน่งที่หนึ่งและสอง (K)
L	แทน	ระยะทางระหว่างตำแหน่งที่หนึ่งและตำแหน่งที่สอง (m)

การนำความร้อนหนึ่งมิติที่ขึ้นกับเวลา (one dimension transient conduction) กรณีที่ของแข็งมีลักษณะกึ่งต่อเนือง (semi-infinite solid) กล่าวคือ ของแข็งมีลักษณะแผ่ออกสู่อินันต์ในทิศทางเดียว เช่น ปัญหาการนำความร้อนสู่พื้นโลก ค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งและเวลาใดๆ ในแต่ละกรณี รูปที่ 2-51 สามารถหาได้โดยใช้สมการผลเฉลยในตารางที่ 2-4



รูปที่ 2-51 การแจกแจงอุณหภูมิที่เวลาใดๆ ของของแข็งมีลักษณะกึ่งต่อเนือง (semi-infinite solid) สำหรับเงื่อนไขที่ผิว 3 กรณี:กรณีที่ 1 อุณหภูมิผิวคงที่, กรณีที่ 2 อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ และ กรณีที่ 3 การพาความร้อนที่ผิวหน้า, Incropera และ (DeWitt 2001)

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2-4 สมการผลเฉลยการนำความร้อนหนึ่งมิติที่ขึ้นกับเวลาดำวยวิธี semi-infinite solid

กรณี	เงื่อนไขที่ผิว	สมการ
1	อุณหภูมิผิวคงที่ Constant Surface Temperature: $T(0, t) = T_s$	$\frac{T(x,t)-T_s}{T_i-T_s} = \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) \quad (2.18)$ $q_s'' = \frac{k(T_\infty-T_i)}{\sqrt{\pi\alpha t}} \quad (2.19)$
2	อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ Constant Surface Heat Flux: $q_s'' = q_o''$	$T(x, t) - T_i = \frac{2q_o''(\alpha t)^{\frac{1}{2}}}{k} \exp\left(-\frac{q_o'' x}{\pi} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)\right) \quad (2.20)$
3	การพาความร้อนที่ผิวหน้า Surface Convection: $-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big _{x=0} = h[T_\infty - T(0, t)]$	$\frac{T(x,t)-T_i}{T_\infty-T_i} = \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right) - \left[\exp\left(\frac{hx}{k} + \frac{h^2\alpha t}{k^2}\right) \left[\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} + \frac{h\sqrt{\alpha t}}{k} \right] \right] \quad (2.21)$

อนึ่ง ในการสอบเทียบการทำงานของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ (บทที่ 4) ได้การเปรียบเทียบผลเฉลยการนำความร้อนหนึ่งมิติที่ขึ้นกับเวลา กับผลจากการจำลองของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ ซึ่งที่กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเหมือนกับที่ใช้ในการคำนวณด้วยสมการ ทั้ง 3 รูปแบบ

2.3.2 การพาความร้อน

การพาความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงาน ระหว่างผิวของแข็ง ไปยังของเหลวหรือก๊าซที่อยู่ติดกับพื้นผิวนั้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการนำความร้อนและการเคลื่อนที่ของของไหล ถ้าเป็นการพาความร้อนในลักษณะที่ของไหลได้รับอิทธิพลจากภายนอก เช่น พัดลม บั้ม เพื่อทำให้เกิดการไหล จะเรียกรูปการพาความร้อนในลักษณะนี้ว่า การพาความร้อนแบบบังคับ (forced convection) แต่ถ้าเป็นการพาความร้อนในลักษณะที่ของไหลด้วยแรงลอยตัว (buoyancy force) อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความหนาแน่นซึ่งเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิในของไหล จะเรียกรูปการพาความร้อนในลักษณะดังกล่าวนี้ว่า การพาความร้อนแบบอิสระหรือการพาความร้อนแบบธรรมชาติ (free convection or natural convection)

อัตราการพาความร้อนแบบบังคับจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิ โดยสามารถเขียนสมการการพาความร้อนตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ได้ดังนี้

$$q'' = h(T_\infty - T_s) \quad (2.22)$$

โดย

q''	แทน	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (W/m^2)
h	แทน	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/m^2 \cdot K$)
T_∞	แทน	อุณหภูมิพื้นผิว (K)
T_s	แทน	อุณหภูมิของของไหล (K)

กรณีการพาความร้อนธรรมชาติสำหรับกรไหลภายนอก (external flow) แบบปั่นป่วน (turbulent) ตัวแปรที่สำคัญในการกำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย \bar{h} ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของค่า Average Nusselt number (\overline{Nu}_L) ดังสมการ

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} = C Ra_L^n \quad (2.23)$$

ค่าคงที่ C และ n ขึ้นกับช่วงของค่า Rayleigh number, Ra_L ซึ่งหาได้จาก

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (2.24)$$

โดย

Gr_L	แทน	Grashof Number ซึ่งคืออัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัว (buoyancy force) ต่อแรงที่เกิดจากสภาพความหนืด (viscous force) ของของไหล
Pr	แทน	Prandtl number ซึ่งคืออัตราส่วนระหว่างโมเมนตัม และ thermal diffusivities
g	แทน	specific gravity (m/s^2)
β	แทน	coefficient of volume expansion (K^{-1})
L	แทน	ระยะสำคัญของวัตถุ (characteristic length)
ν	แทน	kinematics viscosity ของของไหล (m^2/s)
α	แทน	thermal diffusivities ของของไหล (m^2/s)

ซึ่งสมการที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย \bar{h} ในแต่ละกรณี แสดงในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 สมการที่ใช้ในการหาค่า Average Nusselt number (\bar{Nu}_L)

กรณี	เงื่อนไข	สมการ
แผ่นเรียบวางตั้ง	การไหลแบบปั่นป่วน	$\bar{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1+(0.492)^{9/16}]^{4/9}} \right\}^2 \quad (2.25)$
แผ่นเรียบวางเอียง	แทนค่า g ในสมการ Ra_L ด้วย $g \cos \theta$ ซึ่ง θ เป็นมุมเอียงของแผ่น โดย $0 \leq \theta \leq 60^\circ$	$\bar{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1+(0.492)^{9/16}]^{4/9}} \right\}^2 \quad (2.26)$
แผ่นเรียบวางนอน ด้านบนร้อน หรือด้านล่างเย็น	$10^4 \leq Ra_L \leq 10^7$	$\bar{Nu}_L = 0.54Ra_L^{1/4} \quad (2.27)$
	$10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}$	$\bar{Nu}_L = 0.15Ra_L^{1/4} \quad (2.28)$
แผ่นเรียบวางนอน ด้านบนเย็น หรือด้านล่างร้อน	$10^5 \leq Ra_L \leq 10^{10}$	$\bar{Nu}_L = 0.27Ra_L^{1/4} \quad (2.29)$

2.3.3 การแผ่รังสีความร้อน

การแผ่รังสีความร้อน เป็นการส่งผ่านพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอน (electromagnetic waves or photons) ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอะตอมหรือโมเลกุล การแผ่รังสีความร้อนมีความแตกต่างจากการนำความร้อนและการพาความร้อน เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางสำหรับการถ่ายเทความร้อน

สำหรับวัตถุใดๆที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์จะแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) เสมอ ผลต่างของอัตราการแผ่รังสีและการดูดกลืนรังสีโดยพื้นผิวก็คือ การแผ่รังสีความร้อนสุทธิของพื้นผิวนั้น ถ้าอัตราการดูดกลืนมากกว่าอัตราการแผ่รังสีจะเรียกพื้นผิวนั้นว่าได้รับพลังงานจากการแผ่รังสี แต่ถ้าอัตราการดูดกลืนน้อยกว่าอัตราการแผ่รังสีจะเรียกว่า สูญเสียพลังงานจากการแผ่รังสี

อัตราการแผ่รังสีสูงสุด จากวัตถุดำ (black body) ที่พื้นผิวมีอุณหภูมิสัมบูรณ์ T_s จาก Stefan-Boltzmann's Law สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.30)$$

โดย

E_b	แทน	อัตราการแผ่รังสีของวัตถุดำต่อหน่วยพื้นที่ (W/m^2)
σ	แทน	ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่า $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
T_s	แทน	อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

ในส่วนของสภาพวัตถุดำจริงในธรรมชาติที่มีการแผ่รังสีความร้อนน้อยกว่าวัตถุดำ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (2.31)$$

โดย

E	แทน	อัตราการแผ่รังสีวัตถุดำจริงต่อหน่วยพื้นที่ (W/m^2)
ε	แทน	ค่าสภาพเปล่งรังสี (emissivity) ของพื้นผิว

ซึ่งค่าสภาพการแผ่รังสี เป็นคุณสมบัติเฉพาะของพื้นผิวของวัตถุนั้นเป็นปริมาณไร้มิติ โดยจะมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

สำหรับการแผ่รังสีระหว่างผิววัตถุเทา (gray surface) ขนาดเล็กกับ สิ่งแวดล้อมที่แผ่คลุมวัตถุเทาสามารถเขียนได้ดังนี้

$$q'' = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (2.32)$$

โดย

q''	แทน	อัตราการแผ่รังสีจากวัตถุเทาไปยังสิ่งแวดล้อมต่อตารางเมตร (W/m^2)
σ	แทน	ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann มีค่า $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
ε	แทน	ค่าสภาพเปล่งรังสี (emissivity) ของพื้นผิว
T_s	แทน	อุณหภูมิของพื้นผิว (K)
T_{sur}	แทน	อุณหภูมิของพื้นผิวสิ่งแวดล้อม (K)

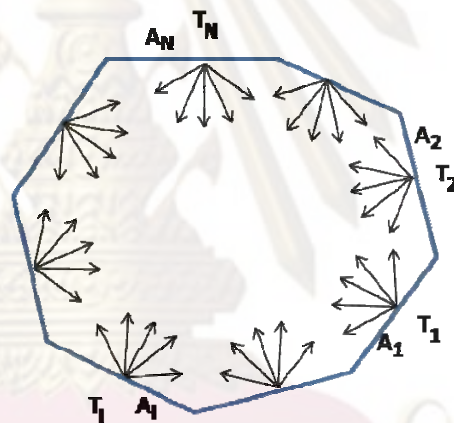
ในกรณีการแผ่รังสีระหว่างหลายพื้นผิว การถ่ายเทความร้อนยังขึ้นอยู่กับลักษณะทางเรขาคณิตและการวางตัวของพื้นผิวอีกด้วย ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวได้แก่ view factor, F_{ij} ซึ่งถูกนิยามว่าเป็นสัดส่วนของการแผ่รังสีออกจากผิววัสดุ i ต่อการรับการแผ่รังสีที่ผิววัสดุ j ซึ่งเขียนได้ในสมการ

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (2.33)$$

ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การมองเห็น F (view factor) ระหว่างสองพื้นผิวเขียนได้ในรูปของ Reciprocity relation

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (2.34)$$

นอกจากนี้ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การมองเห็น F (view factor) ของผิวที่มีลักษณะล้อมรอบ(enclosure) รูปที่ 2-52



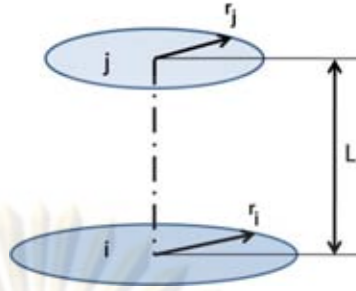
รูปที่ 2-52 ผิวที่มีลักษณะล้อมรอบ (enclosure)

ได้แก่ Summation rule

$$\sum_{j=1}^N F_{ij} = 1 \quad (2.35)$$

ซึ่งสามารถใช้กับพื้นผิวทั้ง N ในบริเวณล้อมรอบ โดยกฎที่ว่านี้มีที่มาจากความจริงที่ว่ารังสีทั้งหมดที่แผ่ออกจากผิว i ต้องมีการรับการแผ่รังสีโดยผิวที่มีลักษณะล้อมรอบ กรณีที่ผิวไม่สามารถมองเห็นตัวเอง เช่น ผิวเรียบ หรือผิวนูน ค่า F_{ii} จะมีค่าเท่ากับ 0

สูตรการหาค่าสัมประสิทธิ์การมองเห็น F (view factor) ที่สำคัญที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้แก่ สูตรการหาค่า view factor 3 มิติ ระหว่างแผ่นวงกลมเรียบสองแผ่นที่วางห่างกัน รูปที่



รูปที่ 2-53 การหาค่า view factor ระหว่างแผ่นวงกลมเรียบสองแผ่นที่วางห่างกัน

สามารถหาได้โดยใช้สมการ

$$F_{ij} = \frac{1}{2} \left\{ S - [S^2 - 4(r_j/r_i)^2]^{1/2} \right\} \quad (2.36)$$

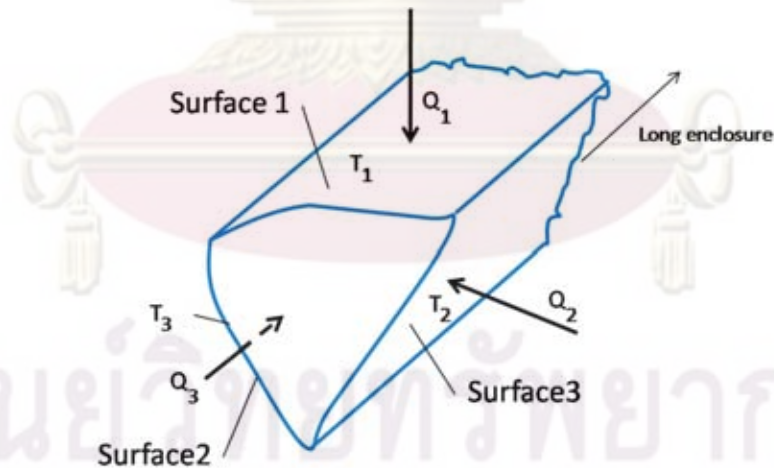
ซึ่ง

$$S = 1 + \frac{1+R_j^2}{R_i^2} \quad (2.37)$$

$$R_i = r_i/L \quad (2.38)$$

$$R_j = r_j/L \quad (2.39)$$

เมื่อพิจารณาการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวของวัตถุเทา (gray surface) ประกอบด้วยผิว 3 ผิว ที่มีลักษณะยาวทำให้ละการคำนวณการแผ่รังสีระหว่างหัวและท้าย ดังรูปที่ 2-54



รูปที่ 2-54 ผิวปิดลักษณะยาว ประกอบด้วยผิว 3 ผิว

กำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวทั้ง 3 คงที่ สมมติให้การแผ่รังสีมีค่าเท่ากันทั่วทั้งพื้นผิว โดยการถ่ายเทความร้อนจากภายนอก สามารถเขียนสมการการถ่ายเทความร้อนของผิวทั้ง 3 ได้ดังนี้

ผิวที่ 1

$$\frac{Q_1}{A_1} = \frac{\varepsilon_1}{1-\varepsilon_1} (\sigma T_1^4 - q_{o,1}) \quad (2.40)$$

$$\frac{Q_1}{A_1} = q_{o,1} - F_{1-1}q_{o,1} - F_{1-2}q_{o,2} - F_{1-3}q_{o,3} \quad (2.41)$$

ผิวที่ 2

$$\frac{Q_2}{A_2} = \frac{\varepsilon_2}{1-\varepsilon_2} (\sigma T_2^4 - q_{o,2}) \quad (2.42)$$

$$\frac{Q_2}{A_2} = q_{o,2} - F_{2-1}q_{o,1} - F_{2-2}q_{o,2} - F_{2-3}q_{o,3} \quad (2.43)$$

ผิวที่ 3

$$\frac{Q_3}{A_3} = \frac{\varepsilon_3}{1-\varepsilon_3} (\sigma T_3^4 - q_{o,3}) \quad (2.44)$$

$$\frac{Q_3}{A_3} = q_{o,3} - F_{3-1}q_{o,1} - F_{3-2}q_{o,2} - F_{3-3}q_{o,3} \quad (2.45)$$

เมื่อรวมสมการในแต่ละผิวเพื่อกำจัดตัวแปร q_o จะได้ระบบสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างถ่ายเทความร้อน (Q) และ อุณหภูมิ (T)

$$\frac{Q_1}{A_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - F_{1-1} \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} \right) - \frac{Q_2}{A_2} F_{1-2} \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} - \frac{Q_3}{A_3} F_{1-3} \frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \quad (2.46)$$

$$= (1 - F_{1-1})\sigma T_1^4 - F_{1-2}\sigma T_2^4 - F_{1-3}\sigma T_3^4 - \frac{Q_1}{A_1} F_{2-1} \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{Q_2}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - F_{2-2} \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} \right) - \frac{Q_3}{A_3} F_{2-3} \frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \quad (2.47)$$

$$= -F_{2-1}\sigma T_1^4 + (1 - F_{2-2})\sigma T_2^4 - F_{2-3}\sigma T_3^4 - \frac{Q_1}{A_1} F_{3-1} \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} - \frac{Q_2}{A_2} F_{3-2} \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} + \frac{Q_3}{A_3} \left(\frac{1}{\varepsilon_3} - F_{3-3} \frac{1-\varepsilon_3}{\varepsilon_3} \right) \quad (2.48)$$

$$= -F_{3-1}\sigma T_1^4 - F_{3-2}\sigma T_2^4 + (1 - F_{3-3})\sigma T_3^4$$

แต่อย่างไรก็ดีวิธีการนี้เป็นเพียงการหาค่าโดยประมาณ เนื่องจากสมมุติฐานที่กำหนดให้การแผ่รังสีมีค่าเท่ากันทั่วทั้งพื้นผิว ซึ่งการแบ่งพื้นผิวเพิ่มขึ้นจะทำให้การคำนวณแม่นยำยิ่งขึ้น ซึ่งกรณีการแผ่รังสีจากหลายพื้นผิวสามารถใช้ระบบสมการ

$$\begin{aligned}
& -\frac{Q_1}{A_1} F_{k-1} \frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} - \frac{Q_2}{A_2} F_{k-2} \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} - \dots \\
& + \frac{Q_k}{A_k} \left(\frac{1}{\varepsilon_k} - F_{k-k} \frac{1-\varepsilon_k}{\varepsilon_k} \right) - \dots - \frac{Q_N}{A_N} F_{N-N} \frac{1-\varepsilon_N}{\varepsilon_N} = \\
& -F_{k-1} \sigma T_1^4 - F_{k-2} \sigma T_2^4 - \dots + (1 - F_{k-k}) \sigma T_k^4 - \dots - F_{N-N} \sigma T_N^4 \quad (2.49)
\end{aligned}$$

สามารถเขียนในรูปของ index notation ของ N พื้นผิว

$$\sum_{j=1}^N \left(\frac{\delta_{kj}}{\varepsilon_j} - F_{k-j} \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j} \right) \frac{Q_j}{A_j} = \sum_{j=1}^N (\delta_{kj} - F_{k-j}) \sigma T_j^4 \quad (2.50)$$

k เป็นค่าตั้งแต่ 1 ถึง N

และ δ_{kj} คือ Kronecker delta ซึ่งกำหนดให้

$$\delta_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{เมื่อ } k = j \\ 0 & \text{เมื่อ } k \neq j \end{cases} \quad (2.51)$$

$$(2.52)$$

อนึ่งในบทที่ 5 ได้มีการเขียนเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาค่าการแผ่รังสีระหว่างหลายพื้นผิวนี้ จากสมการข้างต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ข้อมูลเชิงสถิติของการผลิต และข้อมูลจากการตรวจวัดภาคสนาม

การศึกษ้อัตราการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิตเหล็กกล้า โดยใช้โปรแกรมจำลองเชิงความร้อนทำนายอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กนั้น เพื่อให้แบบจำลองมีความสอดคล้องกับการปฏิบัติงานจริงของทางโรงงาน และมีความแม่นยำในการทำนายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลเชิงสถิติของการผลิต และข้อมูลจากการตรวจวัดภาคสนาม ในการออกแบบการจำลอง และสอบเทียบผลการจำลอง

Part1 ข้อมูลเชิงสถิติของการผลิต

การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และเครื่องจักรหล่อแบบต่อเนื่องของโรงงานที่ทำการศึกษานั้นพบว่า การผลิตในแต่ละวันแบ่งออกเป็น 3 กะ กะแรกเริ่มตั้งแต่เวลา 8.00 น. ถึง 16.00 น. กะที่สองตั้งแต่เวลา 16.00 น. ถึง 24.00 น. และกะที่สามตั้งแต่เวลา 24.00 น. ถึง 8.00 น. ซึ่งมีการหยุดการผลิตในระหว่างช่วงเวลา 18.00 น. ถึง 22.00 น. เนื่องจากไฟฟ้าในช่วงนี้มีราคาแพงกว่าราคาไฟฟ้าในช่วงอื่นของวัน (on peak) อัตราการผลิตในแต่ละวันอยู่ที่ 18 – 22 ตู (heat) ซึ่งในการผลิตเหล็กกล้าแต่ละเตาของโรงงานนั้น คนงานจะเป็นผู้บันทึกข้อมูลสำคัญในการผลิต เพื่อเป็นหลักฐานอ้างอิง ซึ่งการบันทึกข้อมูลนั้นทำที่ 3 สถานีการทำงาน ได้แก่ 1) สถานีเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า รูปที่ 3-1 ใบบันทึกข้อมูลของสถานีเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า 2) สถานีการหล่อแบบต่อเนื่อง รูปที่ 3-2 ใบบันทึกข้อมูลของสถานีการหล่อแบบต่อเนื่อง และ 3) สถานีอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก รูปที่ 3-3 ใบบันทึกข้อมูลของสถานีอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติของการผลิต จากเอกสารบันทึกข้อมูลการทำงานของทั้ง 3 สถานีในระหว่างวันที่ 1 - 21 ธันวาคม 2551 รวมระยะเวลาการผลิต 20 วัน (โรงงานหยุดทำการผลิตในวันที่ 5 ธันวาคม 2551) จำนวนการผลิตทั้งสิ้น 418 ตู แบ่งการพิจารณาข้อมูลออกเป็นส่วนๆ ดังนี้ ได้แก่ 1) ข้อมูลการผลิตในส่วน of เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า 2) ข้อมูลวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ และ สแลก 3) ระยะเวลาของเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละสถานีการผลิต และ 4) อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละขั้นตอนการผลิต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ใบรายงานเตาหลอม F-MS-09-004 REV.1

วันที่: 16/12/2561	เลขที่: 104498	ชนิดเตา: 5030	สถานที่: วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี
ชื่อช่าง: น.ส. อรุณรัตน์	ช่างควบคุม: น.ส. อรุณรัตน์	ช่างบันทึก: น.ส. อรุณรัตน์	ช่างวิเคราะห์: น.ส. อรุณรัตน์
ชนิดวัสดุ: เหล็กกล้า	ขนาด: 1634	น้ำหนัก: 23336	ชนิดชิ้นงาน: ชิ้นงาน

ลำดับ	เวลา	อุณหภูมิ	VOLT	กระแส	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	
07:03	เวลาเริ่ม	2620	1100																		
08:00	เวลา	2675	1100	495	90																
08:17	เวลา	4047	1100	105	100																
08:30	เวลา	-	1100	-	-																
08:42	เวลา	2746	1100	160	160																

อุณหภูมิ C _{max} : 47 °C	อุณหภูมิ C _{min} : 41 °C
อุณหภูมิ C ₁ : 47 °C	อุณหภูมิ C ₂ : 51 °C
อุณหภูมิ C ₃ : 47 °C	อุณหภูมิ C ₄ : 44 °C
อุณหภูมิ C ₅ : 47 °C	อุณหภูมิ C ₆ : 45 °C
อุณหภูมิ C ₇ : 47 °C	อุณหภูมิ C ₈ : 45 °C
อุณหภูมิ C ₉ : 47 °C	อุณหภูมิ C ₁₀ : 45 °C

หมายเหตุ: CaO สิ้นสุดที่ 100 - 110% ไม่เพียงพอ

รูปที่ 3-1 ใบบันทึกข้อมูลของสถานีเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ใบรายงาน CCM. F-MS-09-005 Rev.0

วันที่: 01/10/2561	เลขที่: 104537	ชนิดเตา: 1000	สถานที่: วิทยาลัยเทคนิคสุพรรณบุรี
ชื่อช่าง: น.ส. อรุณรัตน์	ช่างควบคุม: น.ส. อรุณรัตน์	ช่างบันทึก: น.ส. อรุณรัตน์	ช่างวิเคราะห์: น.ส. อรุณรัตน์
ชนิดวัสดุ: เหล็กกล้า	ขนาด: 1634	น้ำหนัก: 23336	ชนิดชิ้นงาน: ชิ้นงาน

ลำดับ	เวลา	อุณหภูมิ	VOLT	กระแส	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	ชนิด	
08:00	เวลา	1678	1100	10	10															
08:15	เวลา	1678	1100	10	10															
08:30	เวลา	1678	1100	10	10															
08:45	เวลา	1678	1100	10	10															

อุณหภูมิ C _{max} : 100 °C	อุณหภูมิ C _{min} : 100 °C
อุณหภูมิ C ₁ : 100 °C	อุณหภูมิ C ₂ : 100 °C
อุณหภูมิ C ₃ : 100 °C	อุณหภูมิ C ₄ : 100 °C
อุณหภูมิ C ₅ : 100 °C	อุณหภูมิ C ₆ : 100 °C
อุณหภูมิ C ₇ : 100 °C	อุณหภูมิ C ₈ : 100 °C
อุณหภูมิ C ₉ : 100 °C	อุณหภูมิ C ₁₀ : 100 °C

หมายเหตุ: CaO สิ้นสุดที่ 100 - 110% ไม่เพียงพอ

รูปที่ 3-2 ใบบันทึกข้อมูลของสถานีการหล่อแบบต่อเนื่อง

ใบรายงานการใช้อิฐเหล็ก (Ladle)

F-MS-05-006 REV. 1

ลำดับ	หมายเลข	ชนิด	เวลา	รวม	การไหล					เวลา			หมายเหตุ
					ชั่วโมง	นาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	วินาที	
1	U-101554	B-B	09:09:09	2	20	8	4	4	4	05:20	09:09	30	8-91
2	U-101556	S-B	10:10:10	2	39	4	4	4	4	09:30	10:10	35	8-98
3	U-101557	S-B	11:11:11	1	41	7	1	1	1	10:30	11:11	36	6-198
4	U-101559	S-A	12:12:12	2	40	5	1	1	1	11:42	12:12	42	8-93
5	U-101559	S-A	13:13:13	2	42	10	2	2	2	12:09	13:13	45	6-184
6	U-101559	S-B	14:14:14	1	41	6	2	2	2	12:40	14:14	37	8-94
7	U-101560	S-B	15:15:15	1	43	8	3	3	3	13:25	15:15	30	6-180
8	U-101561	S-B	16:16:16	1	44	10	3	3	3	13:40	16:16	32	8-95
9	U-101565	(S)-B	17:17:17	1	43	11	4	4	4	14:19	17:17	36	8-161
10	U-101565	(S)-B	18:18:18	2	43	8	4	4	4	14:27	18:18	47	11-161
11	U-101566	S-A	19:19:19	1	44	1	1	1	1	14:58	19:19	32	11-162
12	U-101566	S-B	20:20:20	2	44	2	2	2	2	15:26	20:20	45	9.1-160
13	U-101566	S-A	21:21:21	2	43	1	1	1	1	15:40	21:21	41	11-163
14	U-101567	S-B	22:22:22	2	43	5	3	3	3	16:08	22:22	42	9.1-161
15	U-101566	S-B	23:23:23	2	43	2	2	2	2	16:36	23:23	36	11-164
16	U-101569	S-A	01:01:01	2	44	4	4	4	4	16:50	01:01	39	9.1-162
17	U-101570	S-B	02:02:02	2	43	3	3	3	3	17:18	02:02	39	11-165
18	U-101571	S-A	03:03:03	2	44	1	1	1	1	17:46	03:03	34	9.1-163
19	U-101572	S-A	04:04:04	2	44	4	4	4	4	18:14	04:04	34	11-166
20	U-101573	S-B	05:05:05	2	46	6	4	4	4	18:42	05:05	38	

หมายเหตุ: No 8 ควบคุมเหล็ก 2.1 HEAT 08:40 น. No 5 ควบคุมเหล็ก 1.5 HEAT 08:50 น.

ผู้รายงาน: 2/1/11 - พรศกทพ.
(ช่างซ่อมแม่เหล็กเตาหลอม)

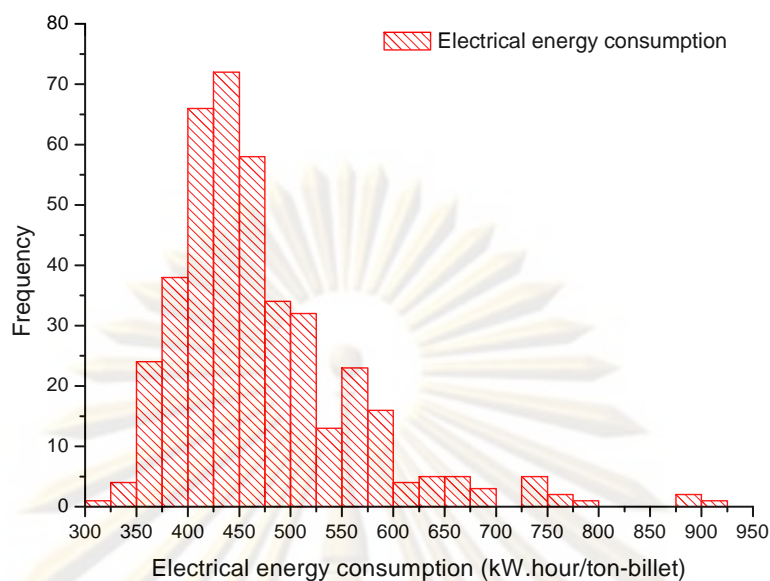
รูปที่ 3-3 ใบบันทึกข้อมูลของสถานีอุณหภูมิรับน้ำเหล็ก

3.1 ข้อมูลการผลิตในส่วนของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ข้อมูลการผลิตในส่วนของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่สำคัญได้แก่ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมเศษเหล็ก, ปริมาณการพ่นก๊าซออกซิเจน ปริมาณการเติมธาตุคาร์บอนในการหลอมเศษเหล็ก ระยะเวลาที่ใช้ในการหลอม (tap to tap time) และอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ทำการเท ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมเศษเหล็ก

เมื่อพิจารณาข้อมูลการใช้ไฟฟ้าในการหลอมเศษเหล็ก 409 เต้า (ตัดข้อมูลการทำงานของรอบการผลิตที่มีปัญหาออกไป) พบว่าโรงงานที่ทำการศึกษามีการใช้กำลังไฟฟ้าในการหลอมเศษเหล็กในแต่ละเต้าเฉลี่ยอยู่ที่ 10,814 kW หรือคิดเป็นพลังงานไฟฟ้าเฉลี่ย 10,466 kW-hour เมื่อเทียบเป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 472 kW.hour/billet รูปที่ 3-4 แสดงการแจกแจงความถี่ (histogram) ของข้อมูล



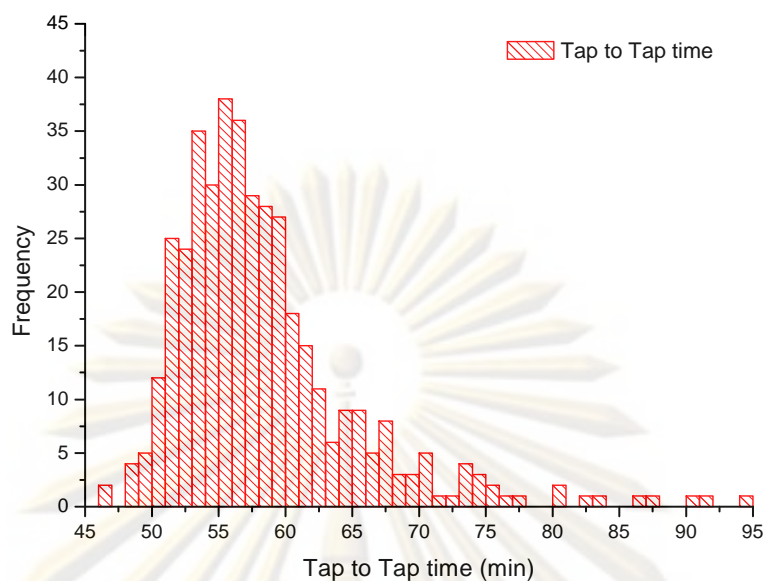
รูปที่ 3-4 การแจกแจงความถี่ (histogram) พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอม

3.1.2 ปริมาณการพ่นก๊าซออกซิเจน ปริมาณการเติมธาตุคาร์บอนในการหลอม เศษเหล็ก

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลการผลิตของโรงงานพบว่าในแต่ละรอบของการผลิตพบว่าปริมาณการพ่นก๊าซออกซิเจนอยู่ในช่วง 0 – 120 m³ และปริมาณการเติมธาตุคาร์บอนอยู่ในช่วง 0 – 90 kg ซึ่งทั้งปริมาณก๊าซออกซิเจน และธาตุคาร์บอนที่เติมลงไปนั้นน้ำเหล็กมีค่าไม่แน่นอนขึ้นกับการป้อนน้ำเหล็ก แต่โดยทั่วไปการทำงานจะไม่พร้อมกัน ยกตัวอย่างเช่น กรณีที่มีการพ่นก๊าซออกซิเจนจะไม่มีการเติมธาตุคาร์บอน

3.1.3 ระยะเวลาที่ใช้ในการหลอม (tap to tap time)

ค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่ใช้ในการหลอมเศษเหล็ก (tap to tap time) นับตั้งแต่สิ้นสุดการเทน้ำเหล็กในรอบก่อนหน้า จนกระทั่งทำการเทน้ำเหล็กในรอบต่อมา จากข้อมูลการผลิต 410 ต่ พบว่าในการหลอมเศษเหล็กแต่ละรอบนั้น ใช้เวลาในการหลอมเฉลี่ย 58 นาที ซึ่งมีการแจกแจงความถี่ (histogram) ดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 การแจกแจงความถี่ (histogram) ระยะเวลาที่ใช้ในการหลอม (tap to tap time)

3.1.4 อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ทำการเท

อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ทำการเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ซึ่งทำการวัดด้วยการหย่อนเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปในช่องเปิดของเตา ในแต่ละรอบการหลอม มีการทำการวัดหลายครั้ง เพื่อตรวจสอบว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาเหมาะสมต่อการเทหรือไม่ อุณหภูมิน้ำเหล็กเฉลี่ยที่ทำการเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าอยู่ที่ 1702°C (ข้อมูลการผลิต 410 เตา)

3.2 ข้อมูลวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ และ สแลก

จากข้อมูลการผลิตของโรงงานที่ทำการศึกษาพบว่า ในการหลอมเศษเหล็กในแต่ละรอบ จากปริมาณเศษเหล็กที่ใช้ในการหลอมเฉลี่ย 23.6 ตัน จะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหล็กทรงเฉลี่ย 21.8 ตัน คิดเป็นปริมาณผลผลิตต่อวัตถุดิบ (yield) เฉลี่ย 92.4% (ข้อมูลการผลิต 418 เตา) ส่วนประกอบเฉลี่ยทางเคมีของเหล็กกล้าที่ทำการผลิตได้ดังตารางที่ 3-1

ปริมาณสแลกที่เททิ้งจากเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละรอบของการหลอม ซึ่งประมาณจากปริมาตรสแลกในถ้วยรับสแลก พบว่าในการเทสแลกทิ้งแต่ละครั้งมีปริมาตรสแลกทั้งสิ้น 0.43 m^3 รูปที่ 3-6 แสดงภาพถ้วยรับสแลก

ตารางที่ 3-1 ส่วนประกอบเฉลี่ยทางเคมีของเหล็กกล้าที่ทำการผลิต

Steel Composition	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
Average	2.66	2.28	7.53	0.14	0.23
SD	0.35	0.59	0.96	0.05	0.06



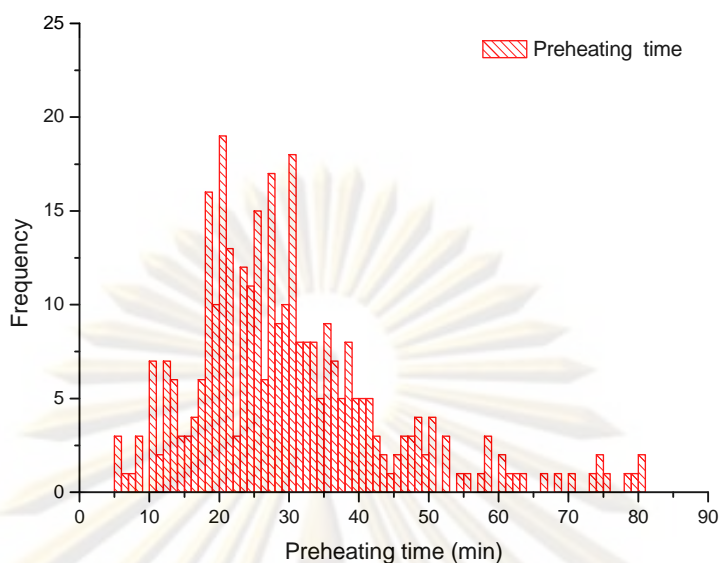
รูปที่ 3-6 ถ้วยรับสแลก

3.3 ระยะเวลาของเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละสถานีการผลิต

ระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอน ของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของโรงงานที่ทำการศึกษานั้นพบว่า นั้นสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

3.3.1 ขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

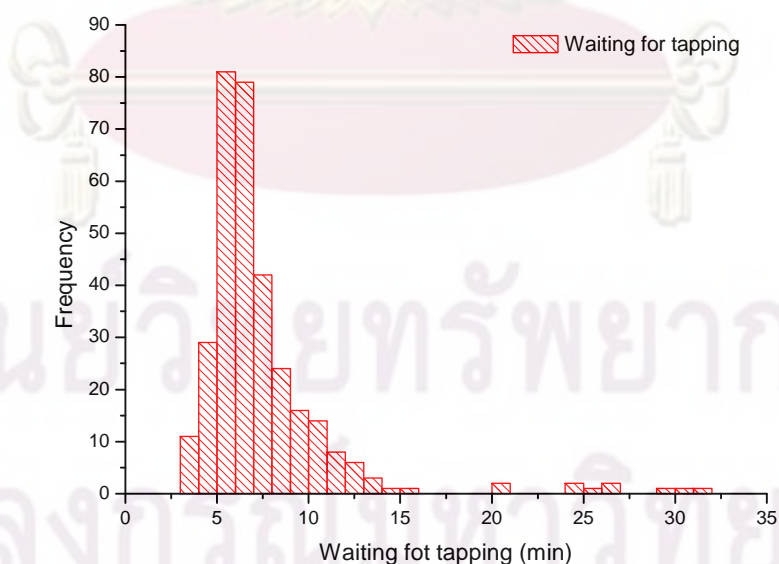
การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นสามารถแบ่งได้เป็นสองรูปแบบ ได้แก่ 1) การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เพิ่งทำการก่อขึ้นใหม่ (green ladle) หลังจากผ่านการซ่อมเล็ก หรือซ่อมใหญ่ จะทำการอุ่นเป็นระยะเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง และ 2) การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างรอบการทำงาน ซึ่งระยะเวลา ในการอุ่นไม่แน่นอนขึ้นกับจังหวะการทำงาน ของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ระยะเวลาเฉลี่ยในการอุ่นอยู่ที่ 29 นาที ซึ่งกรณีที่ไม่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กคิดได้เป็น 10.2% ของรอบการทำงาน ของเบ้ารับน้ำเหล็ก รูปที่ 3-7 แสดงฮิสโตแกรม (histogram) ข้อมูลระยะเวลาทำการอุ่นในระหว่างรอบการทำงาน



รูปที่ 3-7 การแจกแจงความถี่ (histogram) ระยะเวลาทำการอุ่นในระหว่างรอบการทำงาน

3.3.2 ขั้นตอนการรอการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ในการทำงานของโรงหลอมนั้น เมื่อเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ทำการป้อนน้ำเหล็กใกล้เสร็จ จะมีเรียกไปยังสถานีอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กเพื่อให้เคลื่อนย้ายเข้ารับน้ำเหล็กมารอรับน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ระยะเวลาเฉลี่ยในการรอของทางโรงงานอยู่ที่ 7 นาที รูปที่ 3-8



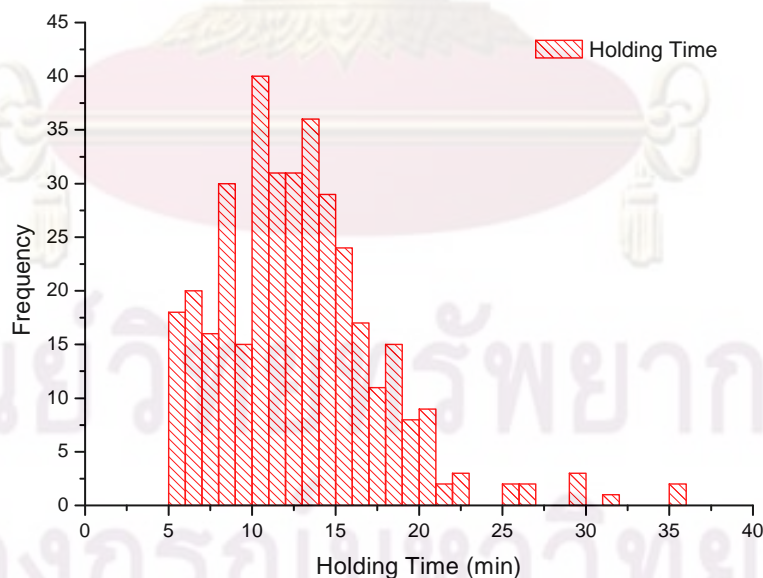
รูปที่ 3-8 การแจกแจงความถี่ (histogram) ระยะเวลาเฉลี่ยในการรอการเทน้ำเหล็ก

3.3.3 ขั้นตอนการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ข้อมูลจากเอกสารบันทึกข้อมูลการทำงาน แสดงให้เห็นว่า การเทน้ำเหล็กจากเตาหลอม ไปยังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้เวลา 2 นาที ซึ่งระยะเวลาในการเทค่อนข้างเท่ากันในแต่เตา

3.3.4 ขั้นตอนการรอการถ่ายน้ำเหล็ก

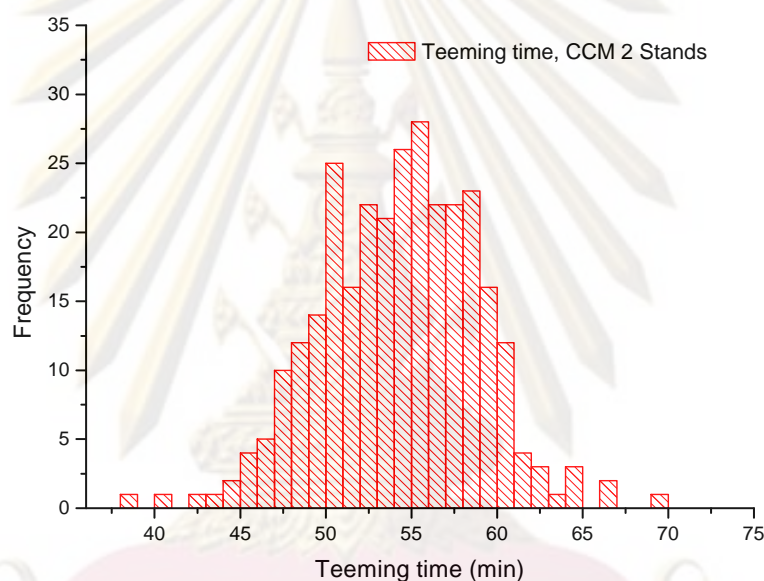
การรอการถ่ายน้ำเหล็ก เป็นช่วงระยะเวลาหลังจากที่เบ้ารับน้ำเหล็ก รับน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าแล้ว เคลื่อนย้ายมายังสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง เพื่อรอการถ่ายน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก (teeming) สาเหตุที่ต้องทำการรอนั้น เนื่องจากการผลิตเหล็กกล้าเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องในอ่างรับน้ำเหล็กต้องมีปริมาณน้ำเหล็กอยู่เสมอ ดังนั้นกรณีที่เป็นน้ำเหล็กจากเตานำ (เตานำ: การถ่ายน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็กใหม่ที่ภายในยังไม่มีน้ำเหล็ก) เบ้ารับน้ำเหล็กที่เคลื่อนย้ายมาถึงสถานีหล่อแบบต่อเนื่องจึงจำเป็นต้องรอ เพื่อให้เตาหลอมทำการเตรียมน้ำเหล็กสำหรับเบ้าต่อไปที่จะมารอการถ่ายน้ำเหล็กต่อ เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กใบแรกเทน้ำเหล็กสิ้นสุด ในกรณีที่เป็นน้ำเหล็กจากเตาตาม (เตาตาม: การถ่ายน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็กที่ภายในมีน้ำเหล็กอยู่แล้ว) เบ้ารับน้ำเหล็กจึงต้องรอเบ้ารับน้ำเหล็กใบก่อนหน้าทำการถ่ายน้ำเหล็กจนกระทั่งเมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กใบก่อนหน้าทำการถ่ายน้ำเหล็กเสร็จสิ้นจึงเข้าทำการถ่ายน้ำเหล็กต่อทันที ระยะเวลาเฉลี่ยของการรอการถ่ายน้ำเหล็กของทางโรงงานเท่ากับ 12 นาที รูปที่ 3-9 แสดงฮิสโตแกรม (histogram) ข้อมูลระยะเวลารอ



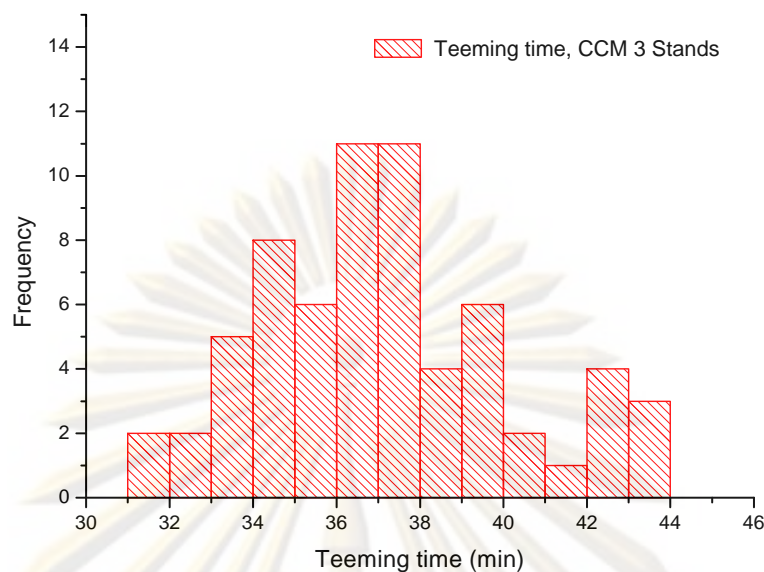
รูปที่ 3-9 การแจกแจงความถี่ (histogram) ระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็ก (Holding Time)

3.3.5 ขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็ก

ระยะเวลาในการถ่ายน้ำเหล็กจากบ่ารับน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก สามารถแบ่งออกได้เป็นสองกรณี ได้แก่ 1) กรณีที่อ่างรับน้ำเหล็กเปิดช่องถ่ายน้ำเหล็กไปยังแบบหล่อ 2 ช่อง (stand) (คิดเป็น 82% ของการผลิต) ใช้ระยะเวลาของการถ่ายน้ำเหล็กเฉลี่ยที่ 54 นาที และ 2) กรณีที่อ่างรับน้ำเหล็กเปิดช่องถ่ายน้ำเหล็กไปยังแบบหล่อ 3 ช่อง (stand) (คิดเป็น 18% ของการผลิต) ทำให้ต้องถ่ายน้ำเหล็กจากบ่ารับน้ำเหล็กด้วยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ระยะเวลาในการถ่ายน้ำเหล็กน้อยกว่ากรณีแรก ใช้เวลาเฉลี่ยทั้งสิ้น $39 \pm$ นาที รูปที่ 3-10 และ 30-11 แสดงฮิสโตแกรม (histogram) กรณีทำการหล่อแบบ 2 และ 3 ช่อง (stand) ตามลำดับ



รูปที่ 3-10 การแจกแจงความถี่ (histogram) กรณีทำการหล่อแบบ 2 ช่อง (stand)



รูปที่ 3-11 การแจกแจงความถี่ (histogram) กรณีทำการหล่อแบบ 3 ช่อง (stand)

3.3.6 ขั้นตอนการเทสแลก

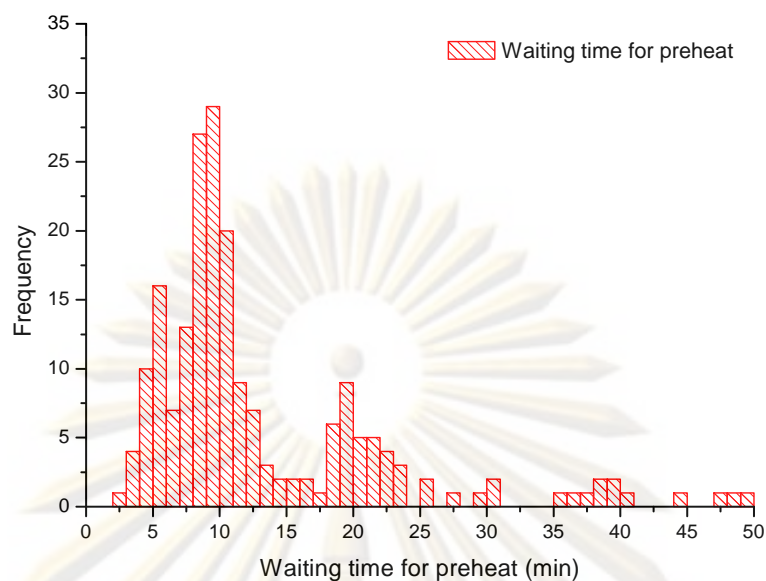
ภายหลังจากที่เบ้ารับน้ำเหล็กถ่ายน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็กแล้ว สแลกที่เหลืออยู่ภายในเบ้าต้องทำการเททิ้ง ระยะเวลาตั้งแต่สิ้นสุดการถ่ายน้ำเหล็กจนกระทั่งสิ้นสุดการเทสแลกทิ้งใช้เวลาประมาณ 8 นาที

3.3.7 ขั้นตอนการรอการอุ่น

ภายหลังจากเทสแลกแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกเคลื่อนย้ายกลับมายังสถานีอุ่น เบ้ารับน้ำเหล็ก คนงานจะทำการตรวจสอบสภาพประตูเลื่อน เป่าช่องถ่ายน้ำเหล็กด้วยแก๊สอาร์กอน และรอจังหวะเพื่อทำการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กอีกครั้ง จากการวิเคราะห์ข้อมูลการผลิตของทางโรงงานพบว่า ในขั้นตอนนี้ใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 13 นาที รูปที่ 3-12 แสดงฮิสโตแกรม (histogram) ระยะเวลาในขั้นตอนการรอการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ศูนย์วิจัยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3-12 การแจกแจงความถี่ (histogram) ระยะเวลาในขั้นตอนการรอการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ระยะเวลาการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละรอบการผลิตแยกเป็นค่าเฉลี่ย ค่าเฉลี่ยฐานนิยม แสดงในตารางที่ 3-2 ซึ่งจากข้อมูลที่ได้จึงนำไปทำการออกแบบรูปแบบการ จำลองการทดสอบความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กต่อไป (บทที่ 5)

ตารางที่ 3-2 ระยะเวลาการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละรอบการผลิต

	Mean (min)	Mode (min)
Tap to Tap Time	58	57
Preheat	29	21
Waiting for Tapping	7	6
Tapping*	2	2
Holding	12	11
Teeming (2 stands)	54	56
Slag draining**	8	8
Waiting for preheat	13	9

3.4 อุณหภูมิน้ำเหล็กในแต่ละขั้นตอนการผลิต

อุณหภูมิน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิตเหล็กกล้า เป็นตัวแปรควบคุมสำคัญ เพื่อให้แน่ใจได้ว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายในแบบหล่อ อยู่ในช่วงที่สามารถทำการผลิตได้ ดังนั้นในการควบคุมการผลิตของทางโรงงาน จึงมีการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กด้วยการยื่นเทอร์โมคัปเปิลลงไปในน้ำเหล็ก 3 ครั้งในระหว่างกระบวนการผลิต ได้แก่ 1) วัดอุณหภูมิน้ำเหล็กก่อนทำการเทจากเตาหลอมที่สถานีเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า 2) วัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กขณะเคลื่อนย้ายมาถึงสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง และ 3) วัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในอ่างรับน้ำเหล็ก ซึ่งการวัดครั้งที่ 1 และ 2 มีการทำการวัดในการผลิตทุกเตา ต่างจากการวัดในครั้งที่ 3 ซึ่งจะมีการวัดในทุกๆ 4 – 5 รอบการทำงาน ตารางที่ 3-3 แสดงข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละครั้ง

ตารางที่ 3-3 อุณหภูมิน้ำเหล็กเฉลี่ยในระหว่างกระบวนการผลิต

Measurement position	Average Temperature (°C)
EAF (before tapping)	1702
L/D	1694
Tundish	1577

Part 2 ข้อมูลจากการตรวจวัดภาคสนาม

ในการศึกษาอัตราการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ได้มีการเก็บข้อมูลภาคสนาม เพื่อใช้ในการสอบเทียบผลการจำลองของโปรแกรม รายละเอียดของข้อมูลที่ทำการเก็บมีดังนี้

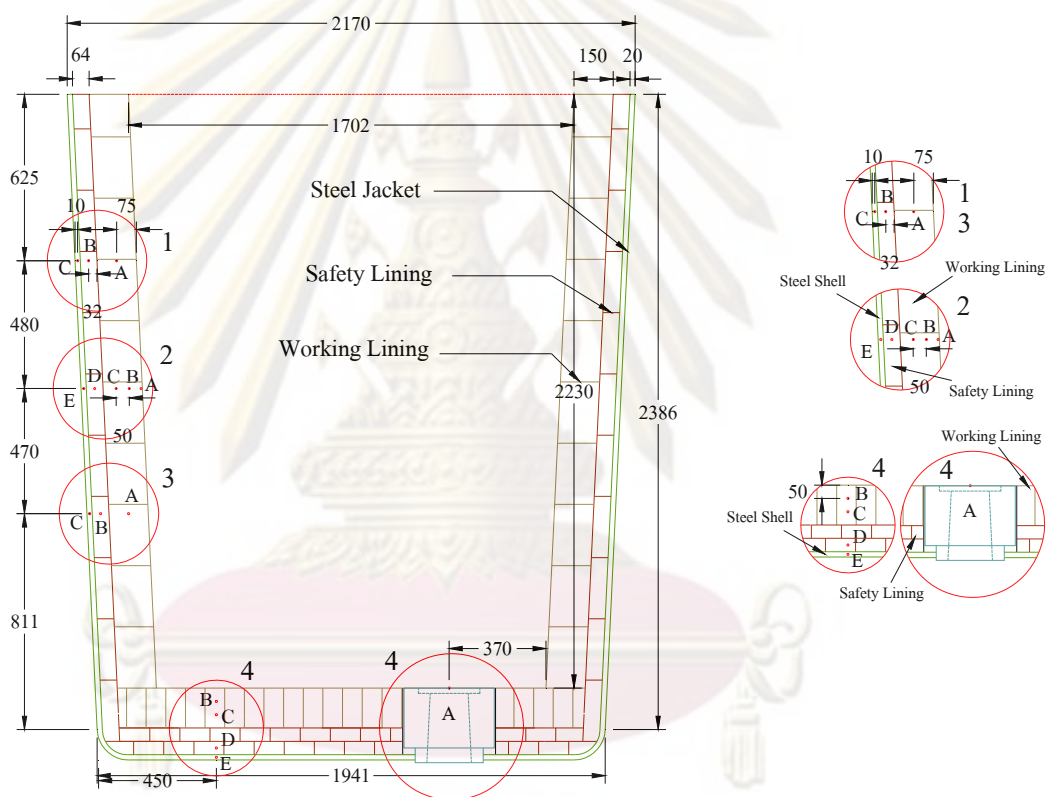
3.5 ข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างทำการอุ่น

การแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างทำการอุ่น เป็นข้อมูลที่ใช้ร่วมกันในการศึกษาเรื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นถึงถ่ายน้ำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ, จักรวูธ จรุงยุทธกุล (2010) ซึ่งกระทำในโรงงานเดียวกับที่ทำการศึกษา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จึงสามารถนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลอง

3.5.1 เบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในการตรวจวัดภาคสนาม

การทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาซึ่งใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ด้วยการฝังเทอร์โมคัปเปิลในผนังที่ระดับชั้นต่างๆ ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก รูปที่ 3-13 แสดงแผนผังตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก และรูปที่ 3-14 แสดงภาพเบ้ารับน้ำเหล็กที่ทำการฝังเทอร์โมคัปเปิลไว้ในชั้นทำงาน (working lining) และชั้นปลอดภัย (safety lining) ใช้

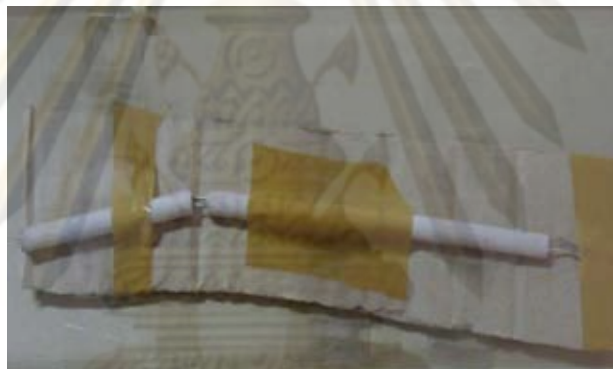
เทอร์โมคัปเปิล ชนิด R ช่วงการวัดอุณหภูมิ 0 ถึง 1,600 °C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร หุ้มด้วยปลอกเซรามิก รูปที่ 3-15 แสดงเทอร์โมคัปเปิล ชนิด R ที่ฝังในเบ้ารับน้ำเหล็ก ส่วนในชั้นเปลือกเหล็ก (steel shell) ใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ช่วงการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 1,400°C และใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K แบบตะเกียบ รูปที่ 3-16 ทำการวัดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้หรืออากาศภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 4A ในรูปที่ 3-13 (ภาคผนวก ก แสดงการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในการทดลอง) นอกจากนี้ยังมีการวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกเบ้ารับน้ำเหล็กด้วย เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด ยี่ห้อ Fluke รุ่น 561 HVAC Pro ตั้งค่า emissivity ที่ระดับสูง high รูปที่ 3-16



รูปที่ 3-13 แผนผังตำแหน่งที่ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 3-14 เบ้ารับน้ำเหล็กที่ทำการฝังเทอร์โมคัปเปิลไว้ภายใน



รูปที่ 3-15 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด R ที่ฝังในเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 3-16 เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K แบบตะเกียบ



รูปที่ 3-17 เทอร์โมมิเตอร์แบบอินฟราเรด ยี่ห้อ Fluke รุ่น 561 HVAC Pro

3.5.2 การตรวจวัดภาคสนามของอุณหภูมิต่อรับน้ำเหล็ก

การทดลองอุณหภูมิต่อรับน้ำเหล็กโดยใช้หัวเผาที่มีน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง ในแบบที่ 1 เป็นการทดลองซึ่งออกแบบการอุ่นให้ใกล้เคียงกับเงื่อนไขการทำงานจริงของโรงงาน ให้ได้ข้อมูลสถานะทางความร้อนของอุณหภูมิต่อรับน้ำเหล็ก ทั้งในการอุ่นอุณหภูมิต่อรับน้ำเหล็กที่ก่อสร้างใหม่ และการอุ่นอุณหภูมิต่อรับน้ำเหล็กในระหว่างรอบการทำงาน รวมทำการอุ่นทั้งสิ้น 3 รอบ ออกแบบขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) ในรอบแรกของการอุ่นเป็นการจำลองการอุ่นอุณหภูมิต่อรับน้ำเหล็กที่ทำการก่อสร้างใหม่ เป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง (อุ่นนานกว่าการทำงานปกติของโรงงานที่ 2 ชั่วโมง) การทำงานของหัวเผาควบคุมจากค่าอุณหภูมิไอเสียที่วัดจากปล่องหัวเผา (ตั้งไว้ที่ $1,000^{\circ}\text{C}$) หลังจากนั้นจึงดับหัวเผาเป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง
- 2) ในรอบที่ 2 เป็นการจำลองการอุ่นอุณหภูมิต่อรับน้ำเหล็กในระหว่างรอบการทำงาน การทำงานของหัวเผาควบคุมจากค่าอุณหภูมิไอเสียที่วัดจากปล่องหัวเผา (ตั้งไว้ที่ 850°C) เมื่ออุณหภูมิไอเสียที่วัดได้ถึงค่าที่ตั้งไว้ก็จะทำการดับหัวเผา เป็นเวลา 30 นาที แล้วจึงทำการอุ่นต่อในครั้งที่ 3 เมื่ออุณหภูมิไอเสียถึงเกณฑ์ที่ตั้งไว้ จึงดับหัวเผา
- 3) ในการหัวเผาในรอบที่ 3 จึงได้ทำการยกอุณหภูมิต่อรับน้ำเหล็กตั้งขึ้นเพื่อเก็บข้อมูลการเย็นตัวของอุณหภูมิต่อรับน้ำเหล็กในกรณีวางตั้ง เหมือนรูปแบบการทำงานจริง เป็นเวลา 60 นาที

3.5.3 ผลการตรวจวัดภาคสนาม

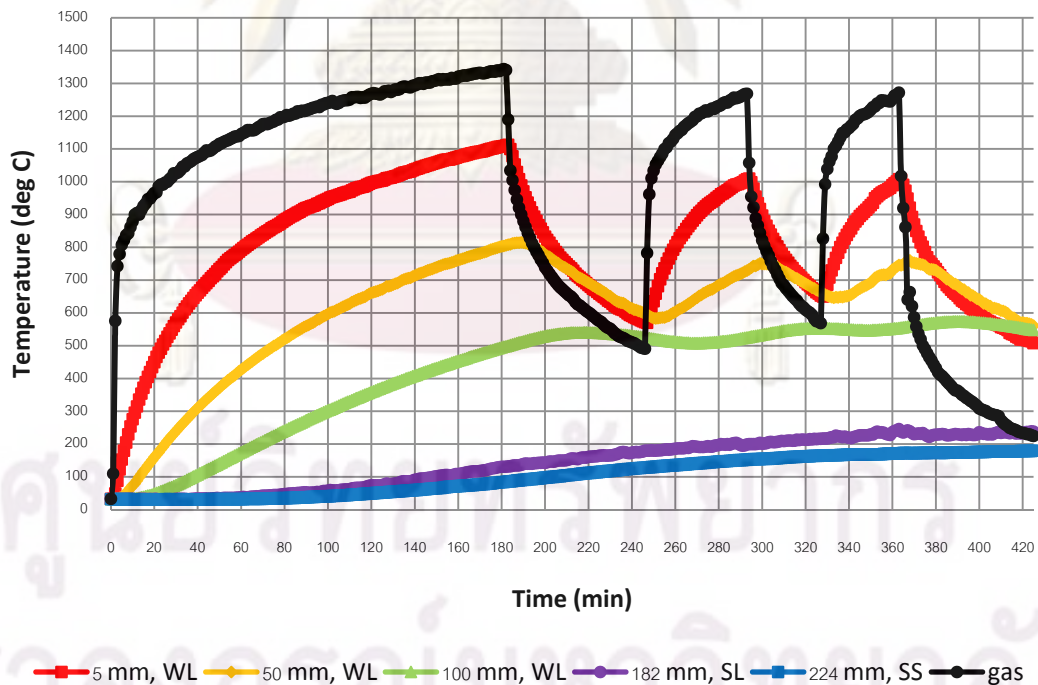
เมื่อพิจารณากราฟแสดงอุณหภูมิภายในอุณหภูมิต่อรับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ตำแหน่งผนังข้าง ตลอดช่วงการทดลอง รูปที่ 3-18 พบว่า ค่าอุณหภูมิที่วัดจากเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งไว้ในชั้นทำงาน (working lining) ที่ระยะ 5, 50 และ 100 mm จากผนังด้านใน มีการเปลี่ยนแปลงไปในแนวโน้มเดียวกับอุณหภูมิก๊าซที่กั้นอุณหภูมิต่อรับน้ำเหล็ก (สัณฐานก๊าซ) ทั้งในช่วง

การอุ่นและดับหัวเผา แตกต่าง ๆ จากค่าอุณหภูมิในชั้นปลอดภัย (safety lining) และชั้นเปลือกเหล็ก (steel shell) ที่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นตลอดช่วงการอุ่นและการดับหัวเผา

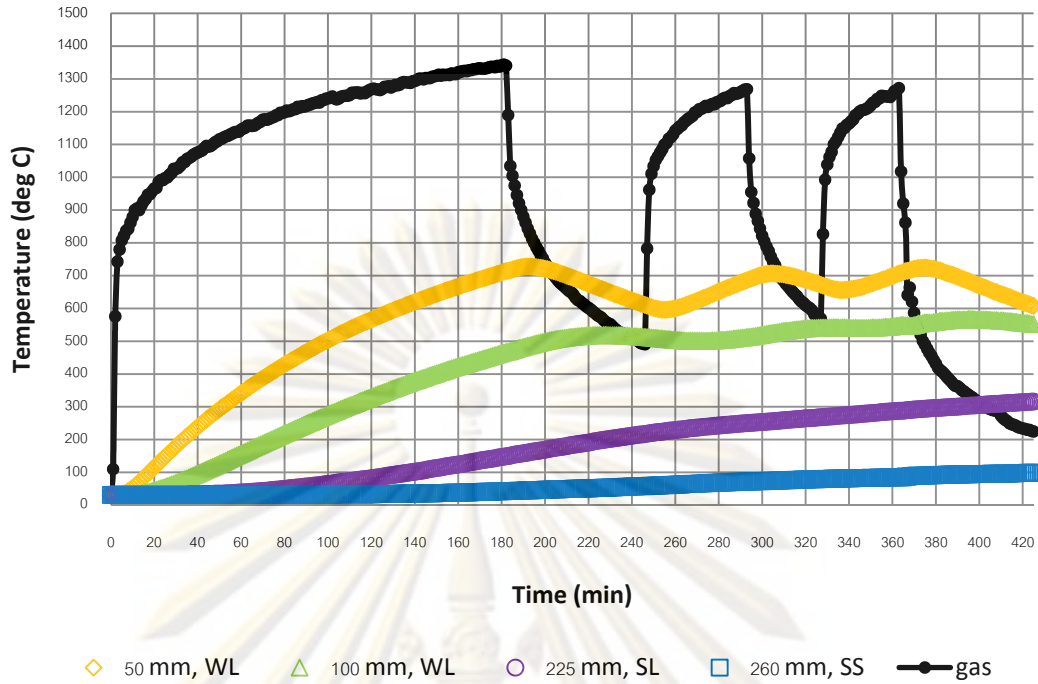
กราฟแสดงอุณหภูมิภายในเข้ารับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ที่ตำแหน่งผนังกัน รูปที่ 3-19 แสดงข้อมูลในลักษณะเดียวกัน

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางความร้อนที่ผิวด้านในเข้ารับน้ำเหล็กส่งผลอย่างชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเข้ารับน้ำเหล็กที่ชั้นทำงานแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ชั้นปลอดภัย (safety lining) และเปลือกเหล็ก (steel shell) ที่เป็นผลระหว่างการนำความร้อนจากด้านในเข้ารับน้ำเหล็ก และการสูญเสียความร้อนที่เปลือกเหล็กไปยังบรรยากาศในรูปแบบการพาและแผ่รังสีความร้อน

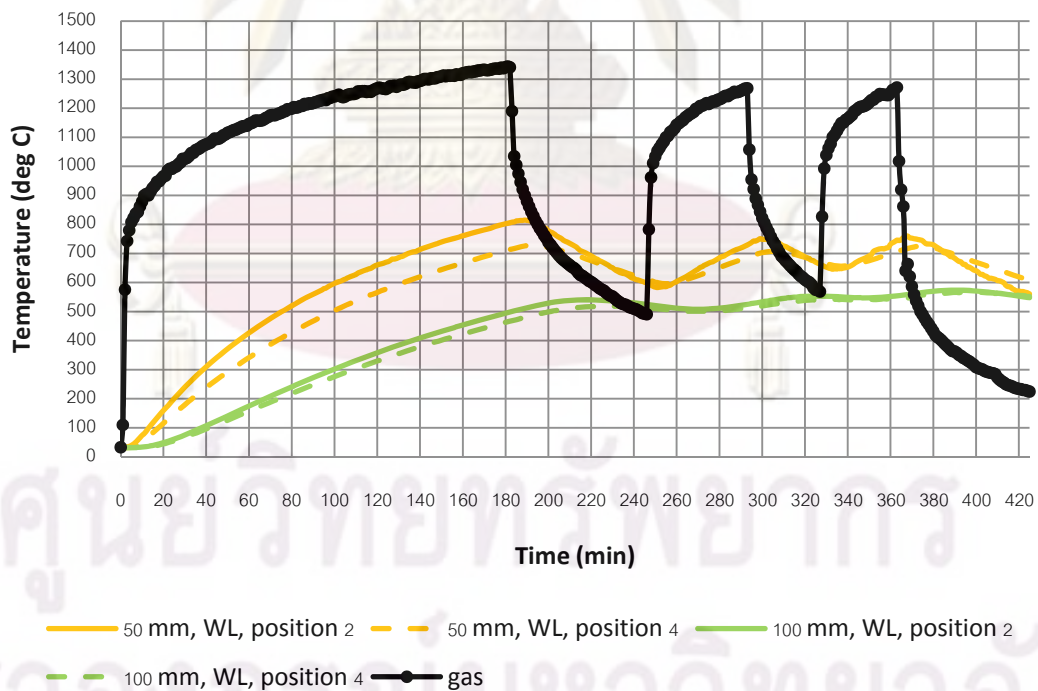
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิภายในเข้ารับน้ำเหล็กที่ระยะเดียวกัน ระหว่างผนังข้าง และผนังกัน รูปที่ 3-20 พบว่าที่ระยะจากผิวด้านใน 50 mm อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกัน ในช่วงการอุ่นอุณหภูมิผนังข้างจะสูงกว่าอุณหภูมิผนังกันเกือบตลอดช่วงทำการทดลอง แต่ช่วงดับหัวเผาอุณหภูมิมผนังข้างจะลดลงมากกว่าผนังกัน ซึ่งแสดงถึงการสูญเสียความร้อนที่มากกว่า ส่วนที่ระยะจากผิวด้านใน 100 mm พบว่าอุณหภูมิมัดได้ยังมีค่าและลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3-18 อุณหภูมิภายในเข้ารับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
ที่ตำแหน่งผนังข้าง ตลอดช่วงการทดลอง



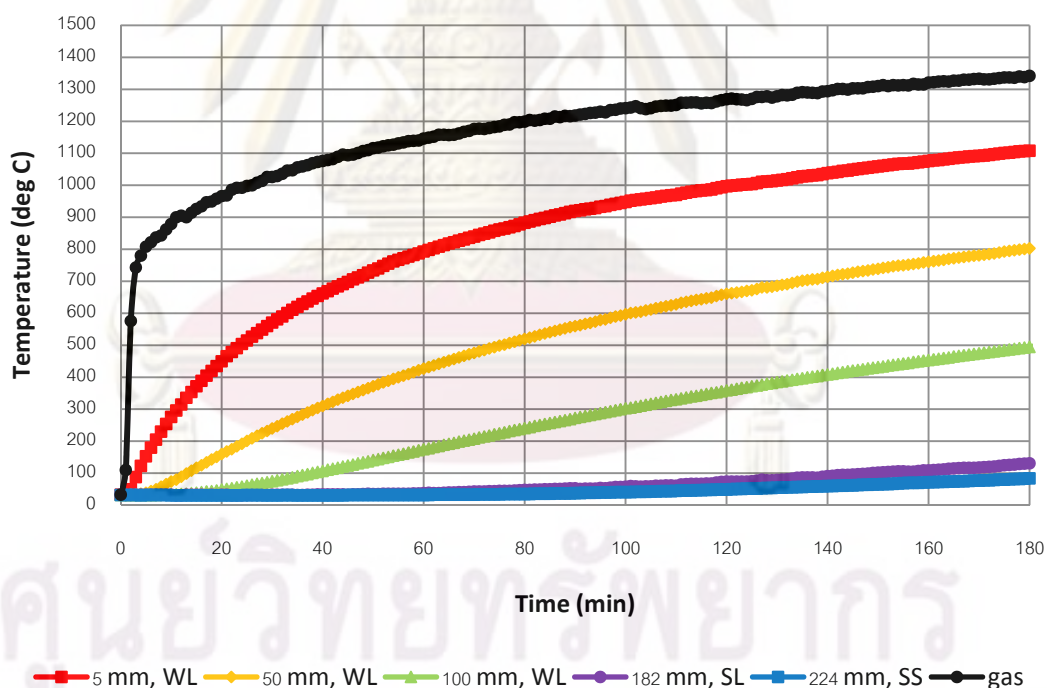
รูปที่ 3-19 อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ตำแหน่งผนังกัน ตลอดช่วงการทดลอง



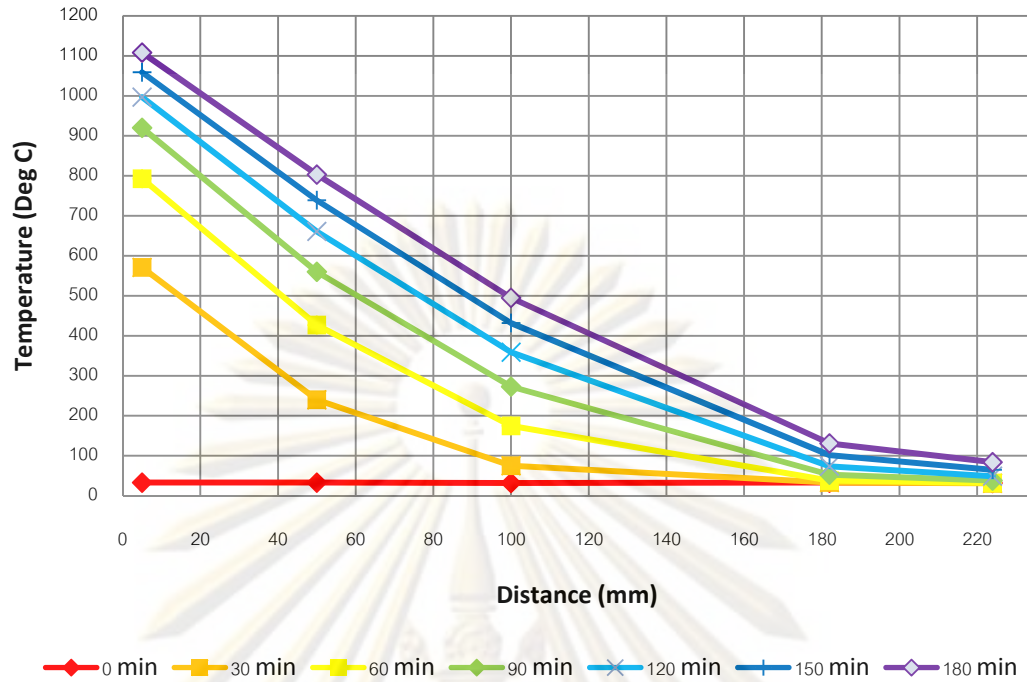
รูปที่ 3-20 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ระยะเดียวกันระหว่างผนังข้าง และผนังกัน

3.5.4 พิจารณาเฉพาะการจำลองการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ทำการก่อขึ้นใหม่ (การอุ่นครั้งแรก)

เมื่อพิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ รูปที่ 3-21 ประกอบกับกราฟการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ตำแหน่งผนังข้าง ในช่วงทำการอุ่นครั้งที่ 1 รูปที่ 3-22 พบว่าอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีการเพิ่มสูงขึ้นเหล็กในระหว่างช่วงการอุ่น 3 ชั่วโมง ที่เวลาเดียวกันอุณหภูมิที่ตำแหน่งใกล้กับผิวด้านในมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิในชั้นถัดมา ในช่วงต้นของการอุ่น (นาที่ที่ 0 - 60) อุณหภูมิที่ตำแหน่งใกล้ผิวด้านในสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอุณหภูมิมักมีการเพิ่มด้วยอัตราที่ลดลง เมื่อสิ้นสุดการอุ่นที่เวลา 3 ชั่วโมง อุณหภูมิที่ระยะ 5 mm จะสูงถึง 1100 C ในขณะที่เปลือกเหล็กจะมีอุณหภูมิประมาณ 100 C นอกจากนี้กราฟแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ระยะต่างๆที่เวลาใดๆ เทียบกับเวลา รูปที่ 3-23 ยังแสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่ง 5 mm จากผิวด้านในมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูงที่สุด อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพิ่มสูงสุดเมื่อเวลาผ่านไป 5 นาที ที่ 38 °C/min หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งอื่นเมื่อเวลา 90 นาทีเป็นต้นไป

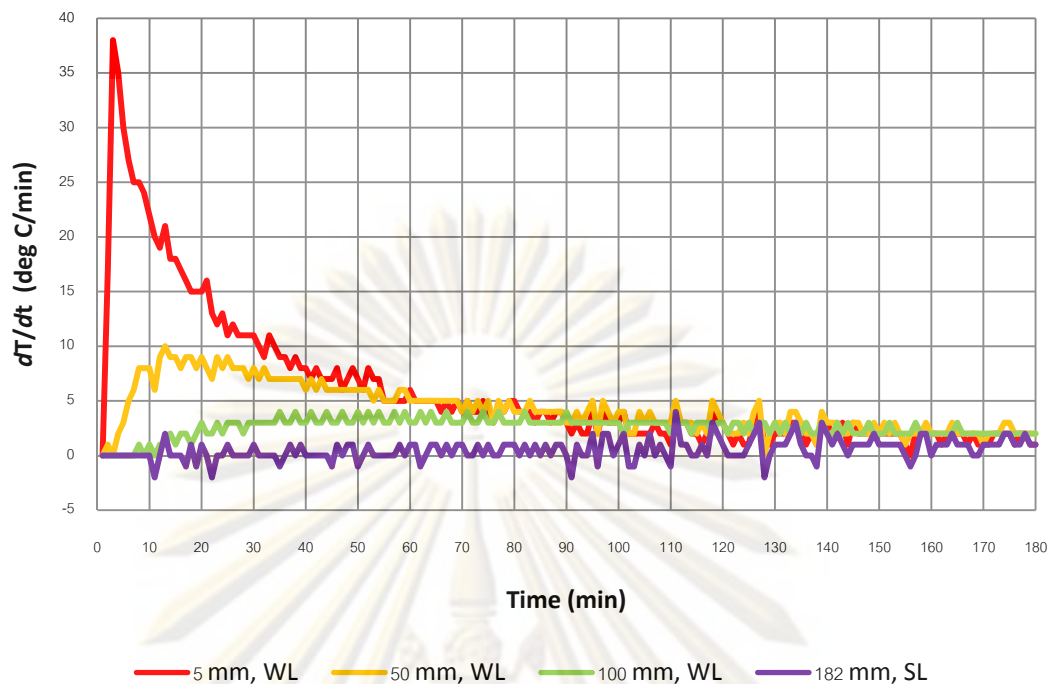


รูปที่ 3-21 อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ตำแหน่งผนังข้างในช่วงทำการอุ่นครั้งที่ 1



รูปที่ 3-22 การแจกแจงอุณหภูมิภายในเข็รับน้ำเหล็ก ที่ตำแหน่งผนังข้าง
ในช่วงทำการอุ่นครั้งที่ 1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

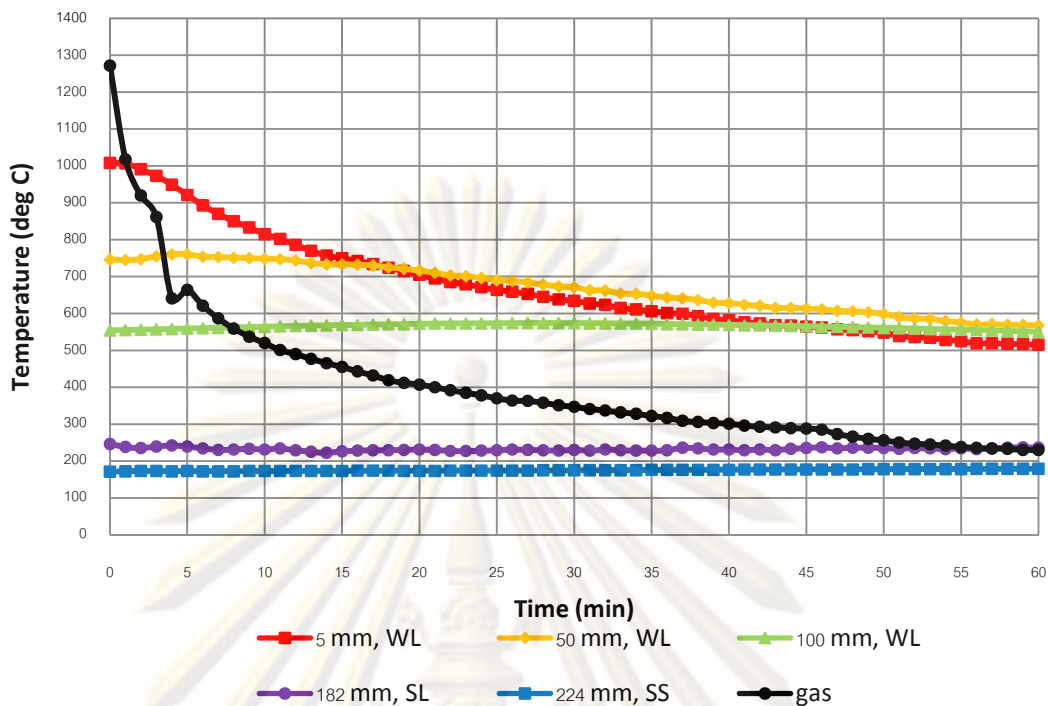


รูปที่ 3-23 อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ระยะต่างๆ
ที่เวลาใดๆ เทียบกับเวลา ในช่วงทำการอุ่นครั้งที่ 1

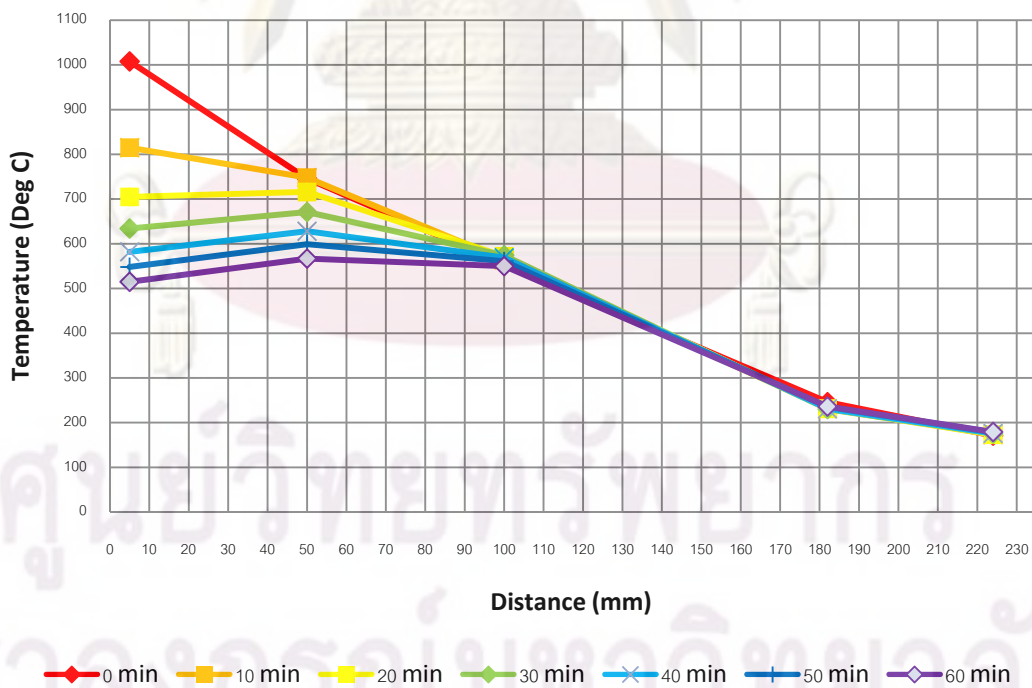
3.5.5 พิจารณาเฉพาะการเย็นตัวของเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีวางตั้ง

เมื่อพิจารณากราฟแสดงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ตำแหน่งผนังข้าง ในช่วงการเย็นตัวของเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีวางตั้ง รูปที่ 3-24 พบว่าอุณหภูมิในชั้นทำงานที่ตำแหน่ง 5 และ 50 mm มีการปรับตัวลดลง ที่ระยะ 5 mm การลดลงเป็นไปในแนวโน้มเดียวกับอุณหภูมิก๊าซที่กั้นเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งลดลงต่ำกว่าที่ตำแหน่ง 50 mm และ 100 mm เมื่อเวลาผ่านไป 18 และ 45 นาทีตามลำดับ ที่ในส่วนของตำแหน่ง 50 mm อุณหภูมิจะปรับตัวลดลงหลังจากผ่านเวลาที่ 10 ไปแล้ว

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 100, 182 และ 224 mm พบว่าอุณหภูมิก่อนข้างคงที่ มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ซึ่งจะได้ชัดในกราฟการแจจแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก รูปที่ 3-25 ที่แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิตั้งที่ตำแหน่ง 5 และ 50 mm เท่านั้นที่ลดลงอย่างชัดเจน ในช่วงการเย็นตัวของเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีวางตั้ง



รูปที่ 3-24 อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ตำแหน่งผนังข้าง ในช่วงการเย็นตัวของเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีวางตั้ง



รูปที่ 3-25 การแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ตำแหน่งผนังข้าง ในช่วงการเย็นตัวของเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีวางตั้ง

3.6 ข้อมูลอุณหภูมิผิวนอกเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิตเหล็กกล้า

ข้อมูลอุณหภูมิผิวนอกเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิตเหล็กกล้า เป็นหนึ่งในตัวแปรที่แสดงถึงสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งในการตรวจวัดอุณหภูมิผิวด้านนอกนี้สามารถทำการตรวจวัดทางอ้อม (Indirect Measurement) โดยการตรวจจذبรังสีอินฟราเรดที่แผ่พลังงานรังสีจากการสั่นสะเทือนในระดับโมเลกุลของวัสดุหนึ่ง ซึ่งมีการแปรผันตรงกับอุณหภูมิของวัสดุนั้นๆ ในการศึกษาค้างนี้ได้ทำการตรวจวัดด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด ยี่ห้อ Electrophysics รุ่น Hotshot XL ช่วงการวัด -20 ถึง 500 °C รูปที่ 3-26 ทำการถ่ายภาพผิวเปลือกเหล็ก (steel shell) ในรอบการทำงานที่ 1 ถึง 4 ของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อสร้างมาใหม่ ตั้งแต่กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อสร้างใหม่ จนกระทั่งรอการอุ่นอีกครั้ง ซึ่งในการตรวจวัดตั้งค่าสภาพการเปล่งรังสีความร้อน (emissivity) ที่ 0.79

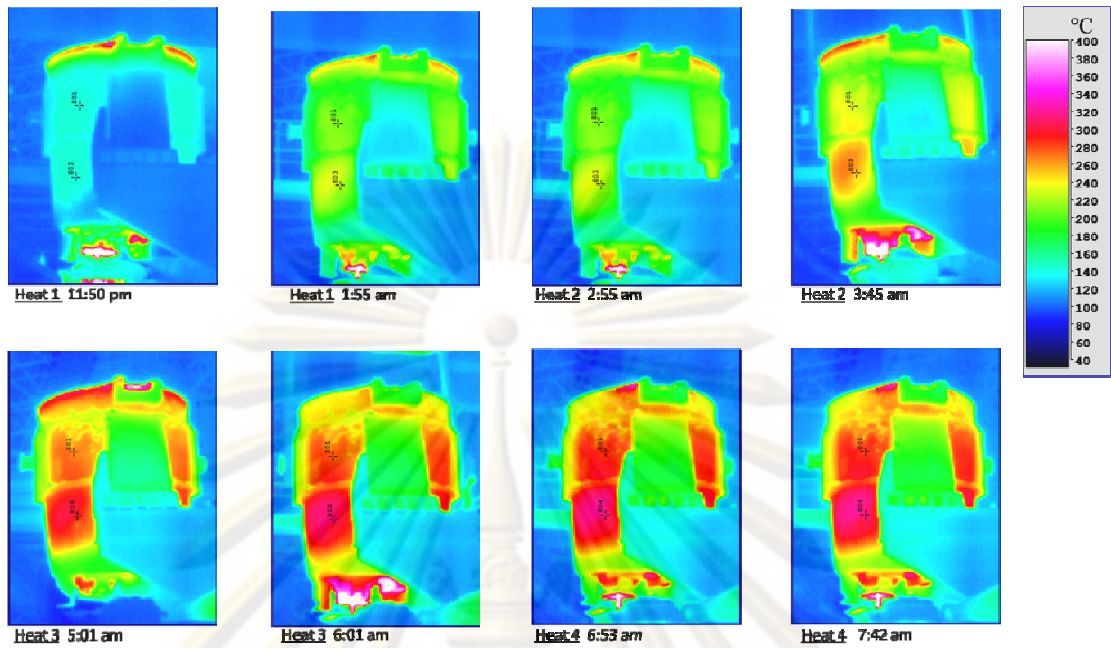


รูปที่ 3-26 กล้องถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด ยี่ห้อ Electrophysics รุ่น Hotshot XL
ช่วงการวัด -20 ถึง 500 °C

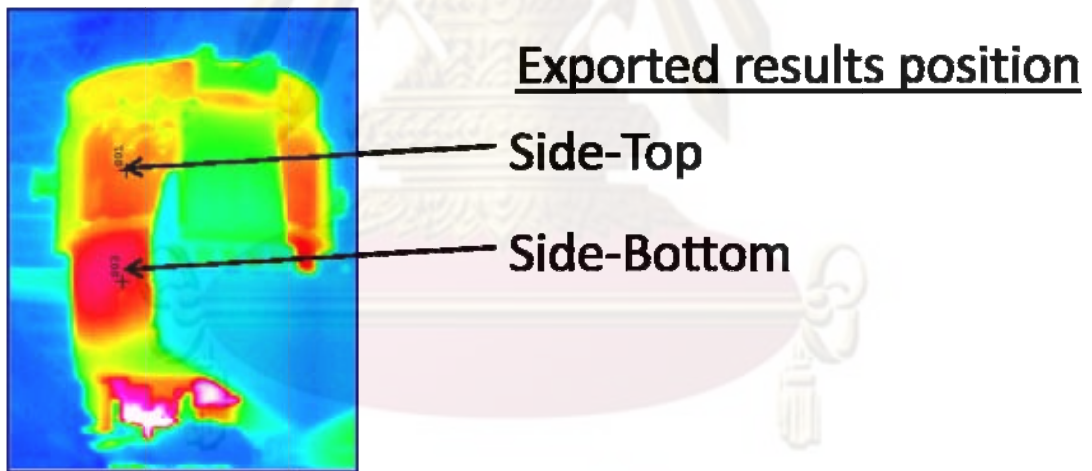
3.6.1 ผลการตรวจวัดภาคสนาม

ตัวอย่างภาพถ่ายรังสีอินฟราเรดของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างรอบการทำงานที่ 1 ถึง 4 ที่สถานีหล่อแบบต่อเนื่องในรูปที่ 3-27 แสดงให้เห็นถึงการแจกแจงอุณหภูมิบริเวณผิวเปลือกเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็ก เมื่อนำข้อมูลอุณหภูมิของผนังข้างสองตำแหน่ง รูปที่ 3-28 มาพล็อต

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาตลอดช่วงการทำงาน รูปที่ 3-29 พบว่าอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อรอบการทำงานเพิ่มขึ้น ซึ่งตำแหน่งผนังข้าง-ด้านล่างจะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่ตำแหน่งผนัง-ด้านบน อันน่าจะมีส่วนมาจากการถ่ายน้ำเหล็กจากเบ้าทางด้านล่าง ทำให้ผิวในด้านล่างของเบ้ามีการสัมผัสกับน้ำเหล็กที่นานกว่า ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนออกมาที่ผิวเปลือกเหล็กภายนอก

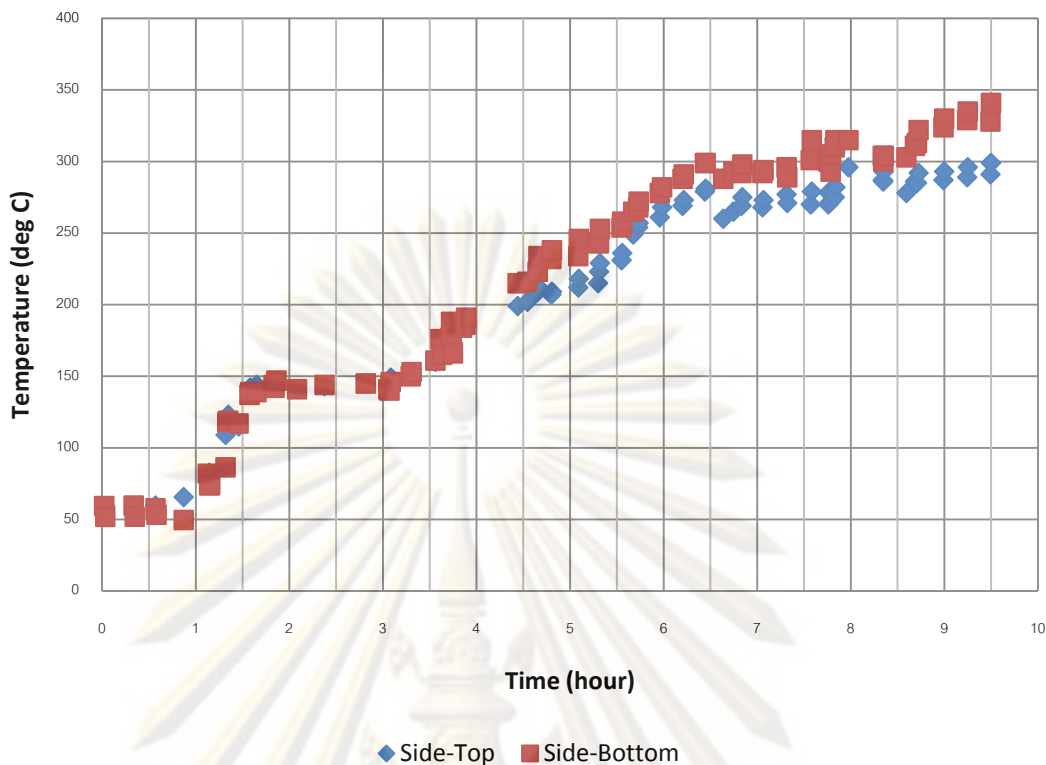


รูปที่ 3-27 ภาพถ่ายรังสีอินฟราเรดของเข่ารับน้ำเหล็กระหว่างรอบการทำงานที่ 1 ถึง 4



รูปที่ 3-28 ตำแหน่งของเปลือกนอกเข่ารับน้ำเหล็กที่นำข้อมูลมาวิเคราะห์

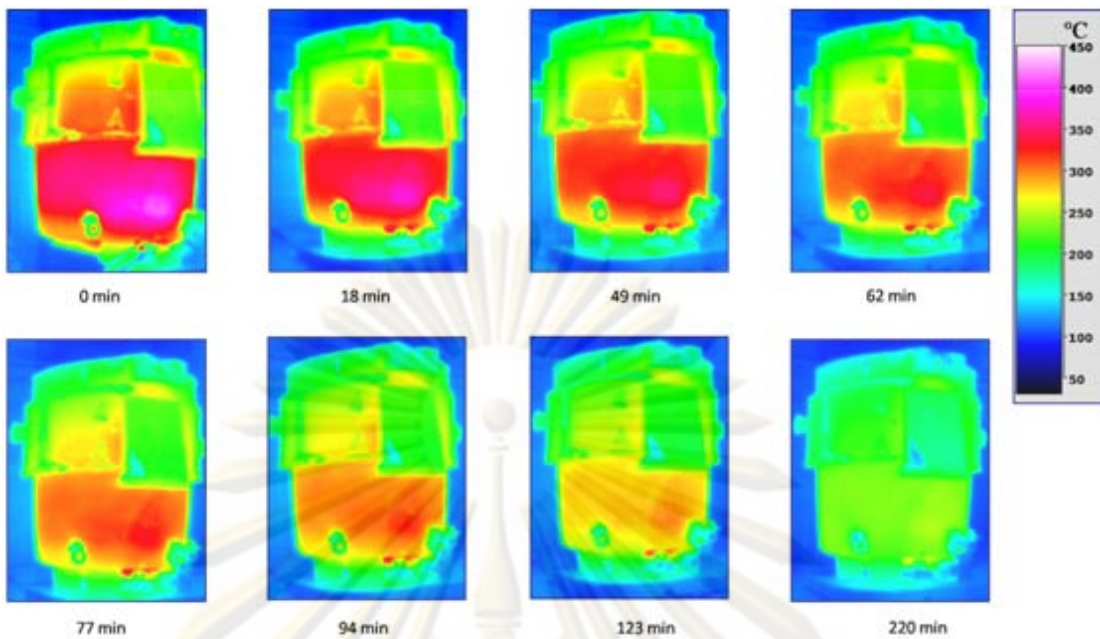
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



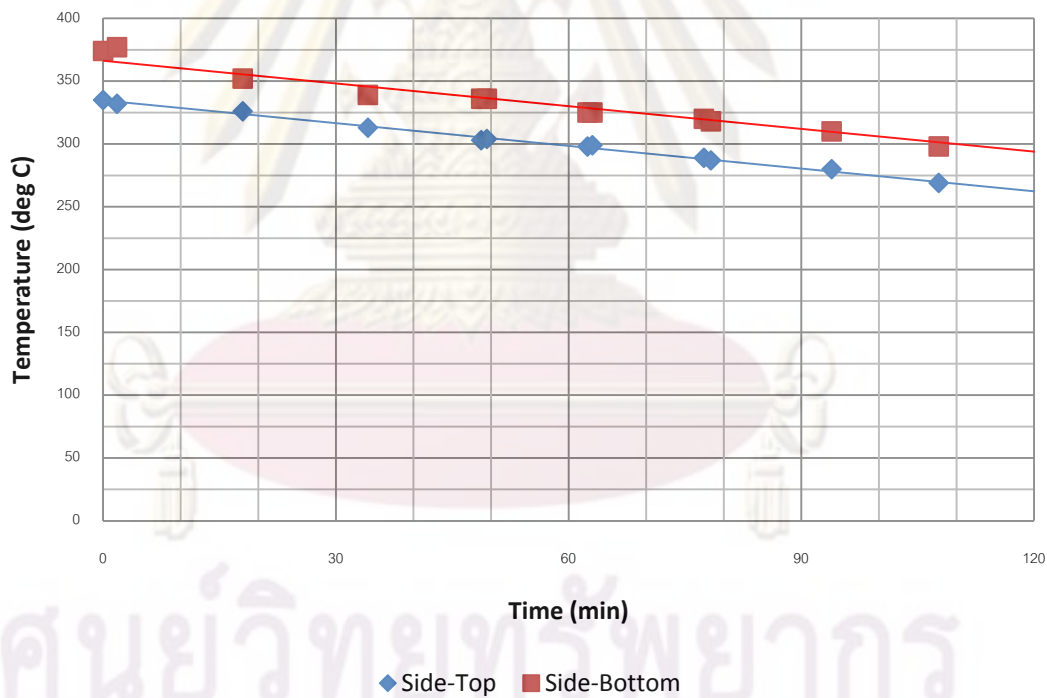
รูปที่ 3-29 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาของผนังเก็บน้ำเหล็ก
ในระหว่างรอบการทำงานที่ 1 ถึง 4

นอกจากข้อมูลอุณหภูมิเปลือกเหล็กของเก็บน้ำเหล็กในระหว่างการทำงานแล้ว
ในการศึกษาครั้งนี้ยังได้เก็บข้อมูลการเย็นด้วย รูปที่ 3-30 แสดงแจกแจงอุณหภูมิผิวนอกของเก็บ
น้ำที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 22 รอบการทำงาน ที่ระยะเวลาต่างๆ เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลง
ของอุณหภูมิเทียบกับเวลาในระหว่างการปล่อยให้เย็นเพื่อนำไปซ่อมเล็ก รูปที่ 3-31

พบว่าเมื่อเริ่มการพักอุณหภูมิที่ตำแหน่งผนังข้าง-ด้านล่างจะมีอุณหภูมิสูงกว่าที่
ตำแหน่งผนัง-ด้านบน เมื่อระยะเวลาในการพักนานขึ้นอุณหภูมิทั้งสองตำแหน่งจะลดลง ซึ่งที่
ตำแหน่งผนังข้าง-ด้านล่างจะมีมีการลดลงของอุณหภูมิที่มากกว่าตำแหน่งผนัง-ด้านบน



รูปที่ 3-30 ภาพถ่ายรังสีอินฟราเรดของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการเย็นตัวแบบตั้ง



รูปที่ 3-31 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก
ในระหว่างการเย็นตัวแบบตั้ง

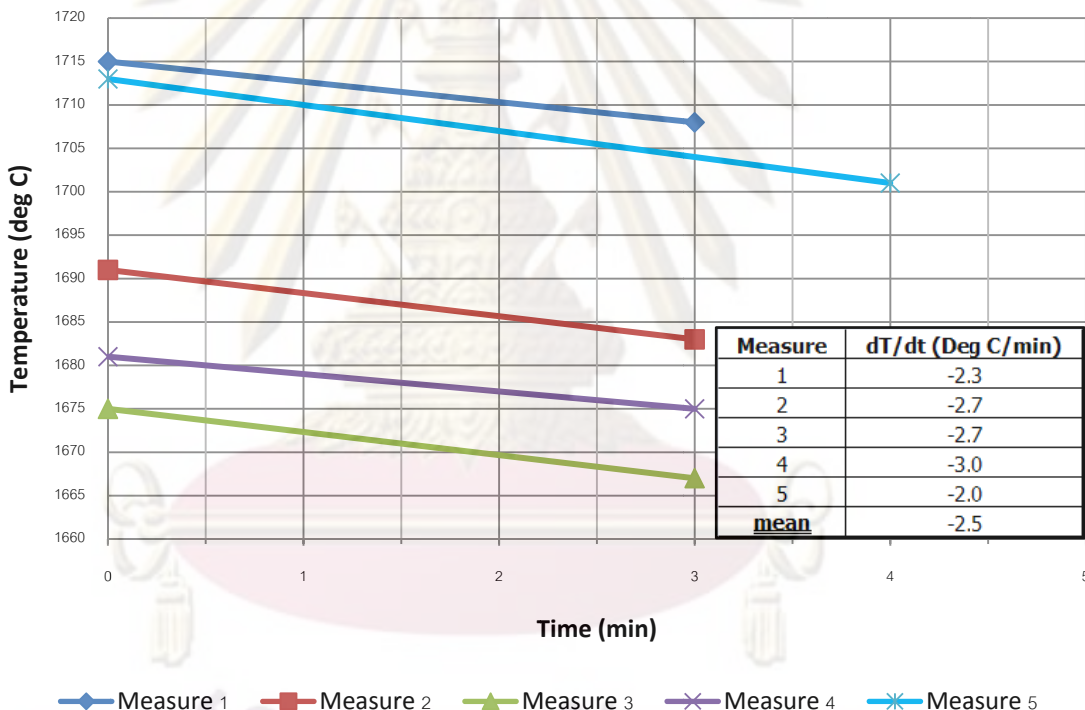
ศูนย์วิทยพัชกร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.7 ข้อมูลอุณหภูมิน้ำเหล็กในระหว่างการรอกถ่ายน้ำเหล็ก

เพื่อให้ทราบถึงข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กตั้งแต่ทำการเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และในช่วงระหว่างการรอกถ่ายน้ำเหล็ก ผู้วิจัยจึงทำการตรวจวัดภาคสนามขอร่องให้ทางโรงงานเพิ่มการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่มาถึงสถานีหล่อแบบต่อเนื่องอีกครั้ง โดยเว้นระยะจากการวัดครั้งแรกเมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กเคลื่อนย้ายมาถึงสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง ประมาณ 3-4 นาที

3.7.1 ผลการตรวจวัดภาคสนาม

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กในระหว่างการรอกถ่ายน้ำเหล็กในรูปที่ 3-32 แสดงให้เห็นถึงการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กเมื่อระยะเวลาในการรอกเพิ่มขึ้น ซึ่งอัตราเฉลี่ยการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ 2.5 C/min



รูปที่ 3-32 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กในระหว่างการรอกถ่ายน้ำเหล็ก

3.8 ข้อมูลอุณหภูมิผิวหน้าสแลกที่ปกคลุมน้ำเหล็ก

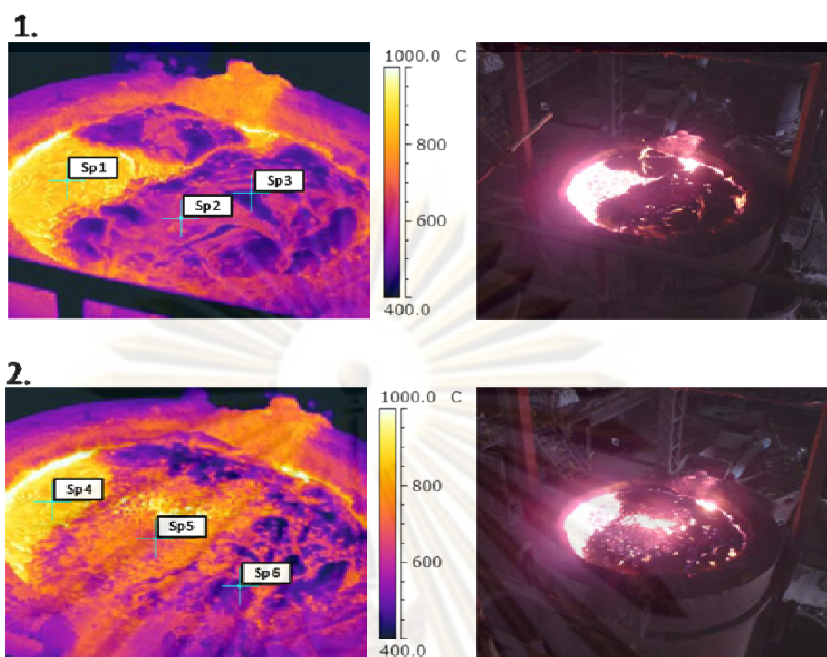
ข้อมูลอุณหภูมิผิวน้ำเหล็กเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญในการประเมินการสูญเสียความร้อนที่ผิวน้ำเหล็ก ที่ปกคลุมด้วยสแลก ซึ่งในการตรวจวัดภาคสนามกระทำด้วยการใช้กล้องถ่ายภาพรังสีอินฟราเรดยี่ห้อ FLIR รุ่น P640 ช่วงการวัด -40 ถึง 2000 °C รูปที่ 3-29 ถ่ายภาพผิวสแลก เมื่อเข้ารับน้ำเหล็กเคลื่อนย้ายมาอยู่ที่สถานีการหล่อแบบต่อเนื่อง ในการตรวจวัดแต่ละครั้งจะทำการถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด ซึ่งตั้งค่าสภาพการเปล่งรังสีความร้อน (emissivity) ที่ 0.85 จำนวน 2 ภาพ ที่เวลาห่างกัน 5 นาที



รูปที่ 3-33 กล้องถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด ยี่ห้อ FLIR รุ่น P640 ช่วงการวัด -40 ถึง 2000 C

3.8.1 ผลการตรวจวัดภาคสนาม

ภาพถ่ายรังสีอินฟราเรด และภาพถ่ายผิวน้ำสแลกที่ปกคลุมน้ำเหล็ก ในสองรอบการทำงานในรูปที่ 3-34 และตารางที่ 3-4 แสดงให้เห็นถึงสแลกที่ปกคลุมอยู่ที่ผิวน้ำเหล็ก ที่ผิวน้ำสแลกมีอุณหภูมิในช่วง 450 ถึง 960 °C ขึ้นกับความหนาของสแลก ซึ่งในบริเวณที่สแลกบางอุณหภูมิจะสูงกว่าบริเวณที่สแลกหนา อันน่าจะมาจากกรณีที่สแลกมีคุณสมบัติเป็นฉนวน นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลการตรวจวัดสองครั้ง พบว่าให้ผลได้ใกล้เคียงกัน



รูปที่ 3-34 ภาพถ่ายรังสีอินฟราเรด และภาพถ่ายของผิวสแลก
ขณะเคลื่อนย้ายมาถึงสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ 3-4 อุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ของผิวหน้าสแลก

Spot	Temperature (deg C)
Sp1	964
Sp2	637
Sp3	486
Sp4	952
Sp5	784
Sp6	469

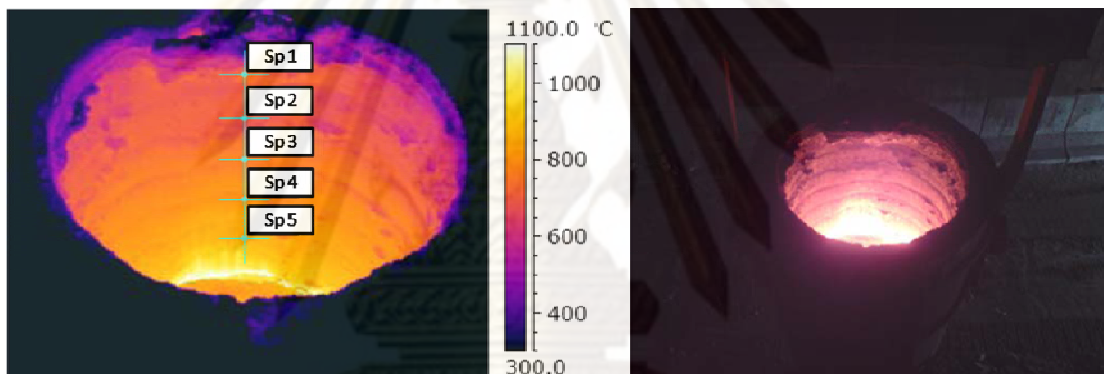
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.9 ข้อมูลอุณหภูมิผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก

อุณหภูมิผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งวัดทางอ้อมด้วยถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับการสอบเทียบ ผลการจำลองสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก การตรวจวัดภาคสนามทำด้วยกล้องถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด ซึ่งตั้งค่าสภาพการเปล่งรังสีความร้อน (emissivity) ที่ 0.8 ถ่ายภาพเบ้ารับน้ำเหล็กหลังเสร็จสิ้นการถ่ายน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก

3.9.1 ผลการตรวจวัดภาคสนาม

ภาพถ่ายรังสีอินฟราเรด และภาพถ่ายผิวข้างด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กภาพหลังการถ่ายน้ำเหล็กในรูปที่ 3-35 และตารางที่ 3-5 แสดงให้เห็นการแจกแจงอุณหภูมิผิวด้านใน พบว่าอุณหภูมิผิวด้านในอยู่ในช่วง 700 – 900 °C ซึ่งบริเวณขอบปากเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณที่ลึกลงไปข้างใน เนื่องจากการลดระดับของน้ำเหล็กในขณะที่ทำการถ่ายน้ำเหล็ก และบริเวณปากเบ้ายังมีการสัมผัสกับบรรยากาศภายนอก ทำให้มีการสูญเสียความร้อนมากกว่า



รูปที่ 3-35 ภาพถ่ายรังสีอินฟราเรด และภาพถ่ายของผิวข้างด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก
ภายหลังจากการถ่ายน้ำเหล็ก

ตารางที่ 3-5 อุณหภูมิในตำแหน่งต่างๆ ของผิวข้างด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก

Spot	Temperature (deg C)
Sp1	707
Sp2	750
Sp3	770
Sp4	804
Sp5	869

บทที่ 4

โปรแกรม และแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

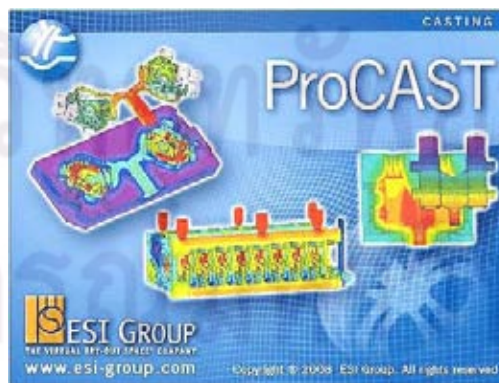
ปัจจุบันการใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ในการศึกษาปัญหาเชิงวิศวกรรมเป็นไปอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความสามารถในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน ซึ่งผลที่ได้ใกล้เคียงกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริง เช่น การใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบผลิตภัณฑ์เพื่อการลดระยะเวลา และค่าใช้จ่ายในการสร้างชิ้นงานทดสอบ (prototype)

ดังนั้นในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิตเหล็กกล้า จึงได้ใช้โปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ ร่วมกับโปรแกรมคำนวณสมการเชิงเส้นหลายตัวแปรที่ผู้วิจัยเขียนขึ้นเอง ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น โดยวิธีนี้ทำให้สามารถทำนายผลการเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ ของขั้นตอนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ได้อย่างสะดวก ซึ่งผลที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการผลิตต่อไป

Part 1 โปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

โปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ โปรแกรม ProCAST รูปที่ 4-1 ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยบริษัท ESI-group เป็นโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ออกแบบมาสำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการหล่อชิ้นงาน โดยมีความสามารถในการจำลองการถ่ายเทความร้อนในแบบสามมิติ, ลักษณะการไหล, ความเค้นที่เกิดขึ้นในหล่อโลหะในแบบสามมิติได้ โดยการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ที่จำเป็น เช่น คุณสมบัติเริ่มต้นของแบบหล่อ (mold), คุณสมบัติน้ำเหล็ก, ความหนาแน่นของน้ำเหล็ก, อัตราการไหลของน้ำเหล็ก, คุณสมบัติวัสดุที่ใช้เป็นแบบหล่อ เป็นต้น

ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงได้นำโปรแกรมมาปรับใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิต



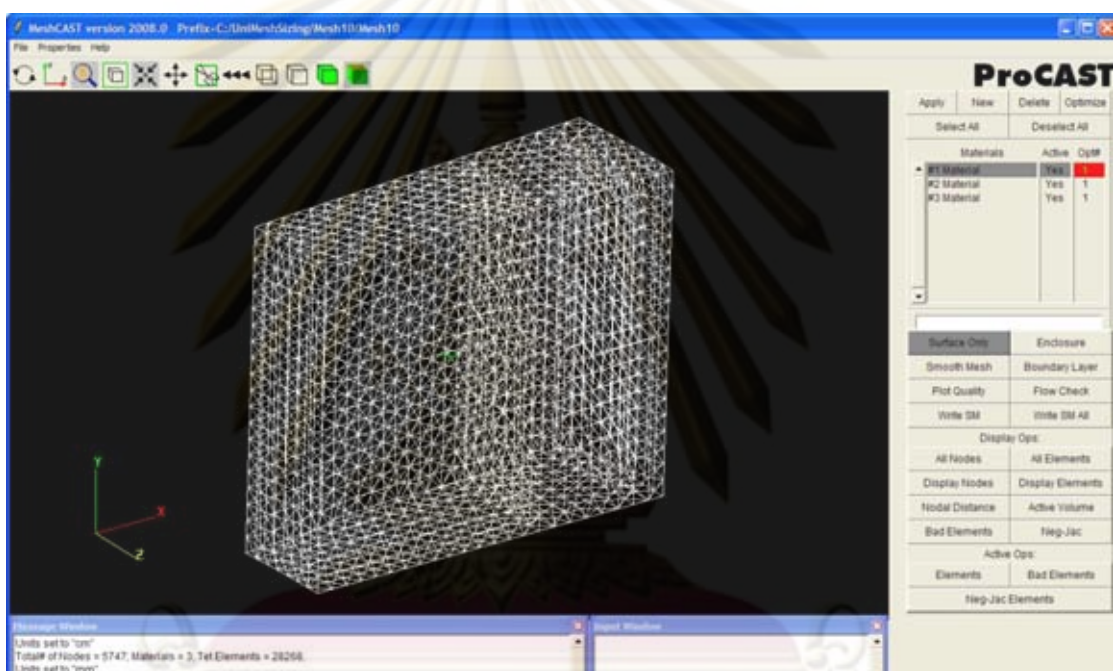
รูปที่ 4-1 โปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการศึกษา

4.1 การทำงานของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์

การทำงานของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ นั้นแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็นหลายๆ ส่วน (Module) แยกจากกันเป็น 4 ส่วน ได้แก่

4.1.1 MeshCAST

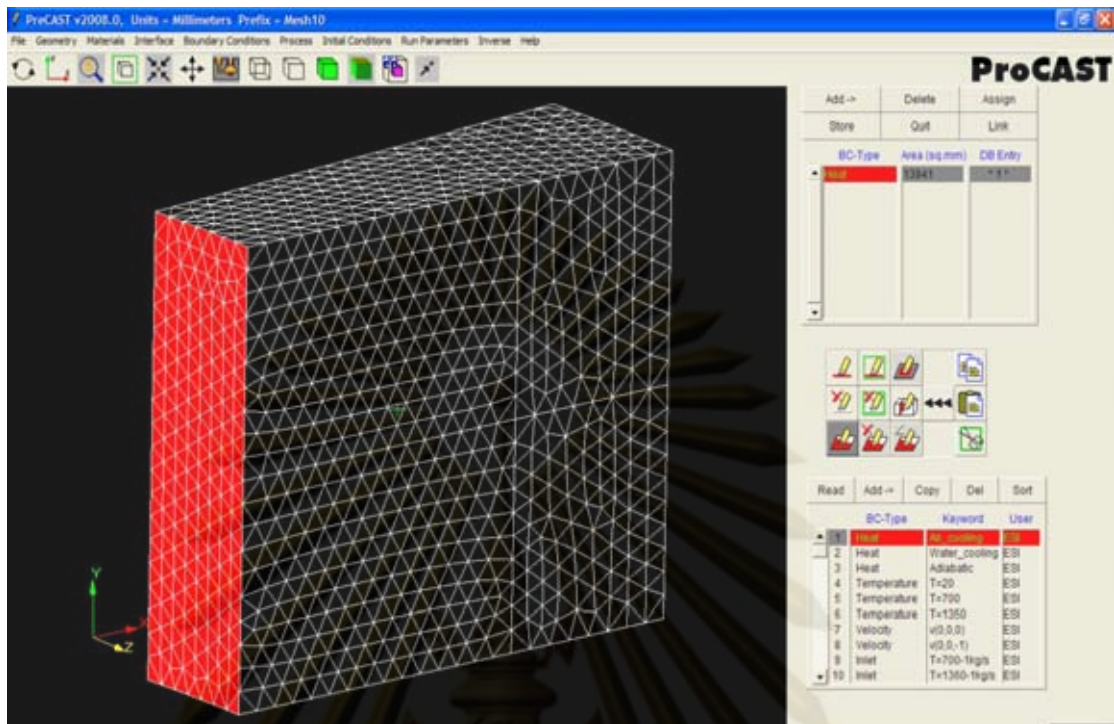
เป็นส่วนแรกของการทำงานโปรแกรม ทำหน้าที่สร้างแบบจำลองสามมิติเพื่อใช้ในการคำนวณจากไฟล์แบบสามมิติที่นำเข้ามาจากโปรแกรมเขียนแบบสามมิติ เช่น Solid work โดยการกำหนดขนาดของตารางสามมิติ (Mesh) ที่ใช้ในการคำนวณจะทำในขั้นตอนนี้ รูปที่ 4-2 แสดงหน้าต่าง MeshCAST



รูปที่ 4-2 หน้าต่าง MeshCAST

4.1.2 PreCAST

เป็นขั้นตอนที่ทำงานต่อจาก MeshCAST มีหน้าที่กำหนดคุณสมบัติทางกล และทางเทอร์โมไดนามิก ของวัสดุที่ทำกรคำนวณ, ค่าอินเตอร์เฟซระหว่างชิ้นวัสดุ (interface), ค่าเงื่อนไขขอบเขต (boundary condition), ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ซึ่งสามารถดึงผลของการจำลองครั้งก่อนหน้ามาเป็นค่าเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองครั้งใหม่ได้, ระยะเวลาจำลอง (simulation time) และขั้นระยะเวลา (time step) ที่ต้องการในการคำนวณ รูปที่ 4-3 การกำหนดค่าที่สำคัญในการคำนวณมีรายละเอียดดังนี้

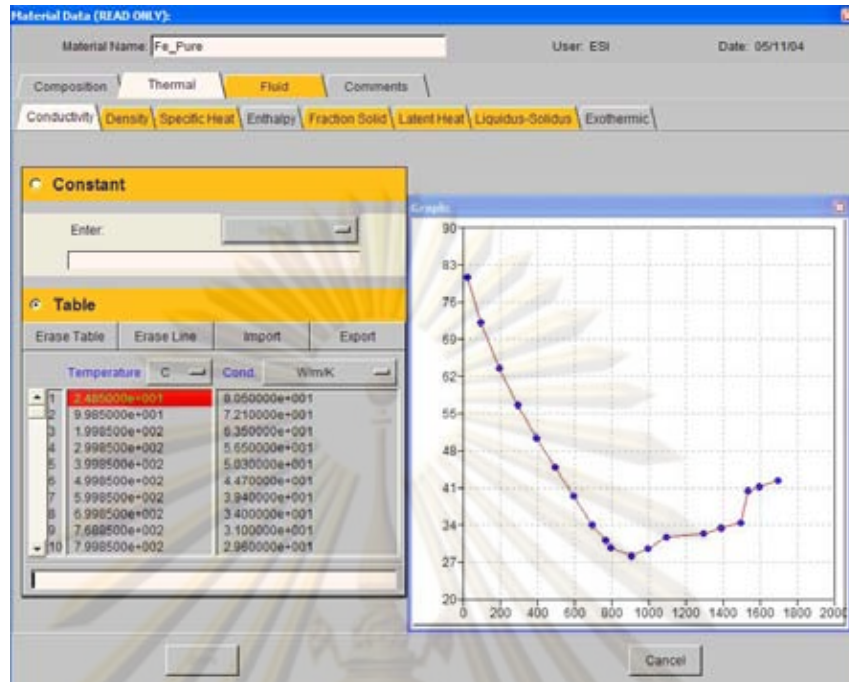


รูปที่ 4-3 หน้าต่าง PreCAST

4.1.2.1 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุที่สำคัญในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนได้แก่ ค่าสภาพการนำความร้อน ค่าความจุความร้อนจำเพาะ และค่าความหนาแน่น ซึ่งสามารถกำหนดได้ในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิ รูปที่ 4-4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-4 หน้าต่างการกำหนดคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ

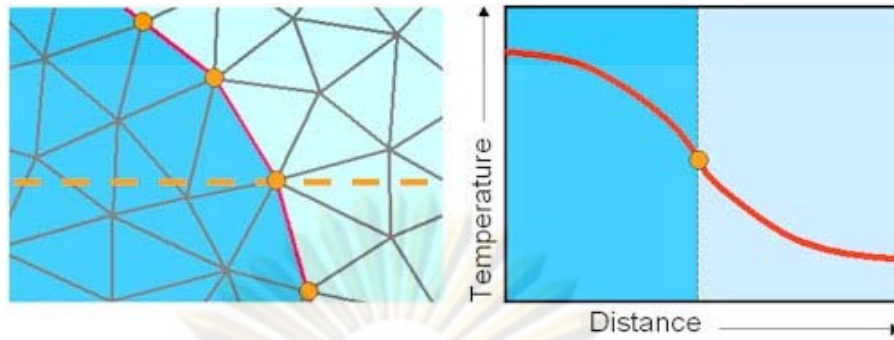
4.1.2.2 การกำหนดอินเทอร์เฟซระหว่างชิ้นวัสดุ

ในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างวัสดุ 2 ชิ้นที่สัมผัสกันด้วยโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์จำเป็นต้องจะกำหนดชนิดของผิวสัมผัส ที่หน้าจ่อินเทอร์เฟซซึ่งสามารถกำหนดได้ใน 3 รูปแบบได้แก่

1) แบบ Equivalence

กรณีนี้ node ที่รอยต่อระหว่างสองผิวจะใช้ node ชนิดเดียวกันในการคำนวณ ทำให้การแจกแจงอุณหภูมิของวัสดุทั้งสองชิ้นมีลักษณะต่อเนื่องกัน วิธีนี้ใช้กำหนดสำหรับกรณีที่ วัสดุทั้งสองชิ้นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน หรือ กรณีที่ไม่มีความต้านทานทางความร้อนที่ระหว่างผิววัสดุ ลักษณะการวางตัวของ node ในการคำนวณ และการแจกแจงอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 4-5

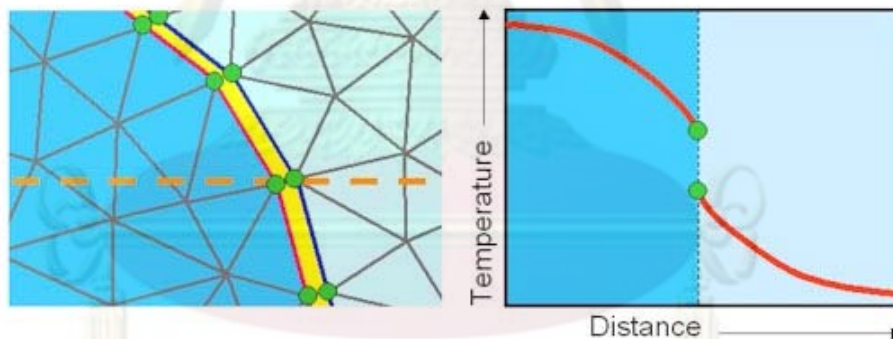
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-5 การกำหนดอินเทอร์เฟซแบบ Equivalence

2) แบบ Coincident

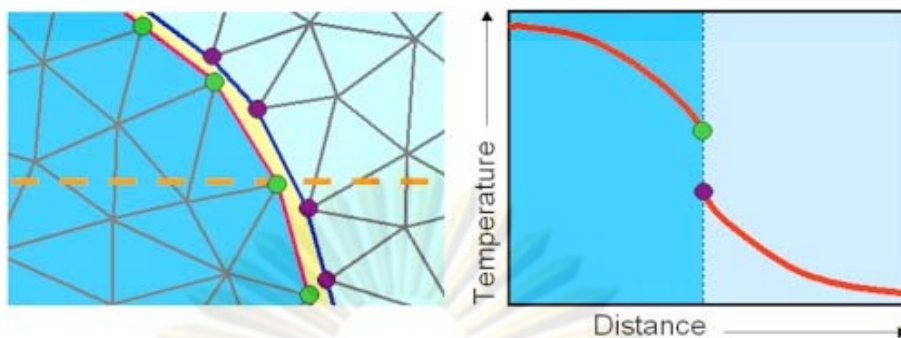
กรณีนี้ node ที่รอยต่อระหว่างสองผิวจะใช้ node แยกจากกันในการคำนวณ ซึ่งโปรแกรมจะทำการสร้าง node ในตำแหน่งเดียวกันเพิ่มขึ้นในตำแหน่งเดียวกัน ทำให้สามารถทำการจำลองการแจกแจงอุณหภูมิที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง เช่น ในกรณี ชิ้นงานหล่อ (casting) กับแบบหล่อ (mold) ได้ ลักษณะการวางตัวของ node ในการคำนวณ และการแจกแจงอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 4-6 ซึ่งการเลือกกำหนดแบบ Coincident จำเป็นที่ต้องกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient, $W/m^2.K$) ระหว่างสองผิววัสดุด้วย



รูปที่ 4-6 การกำหนดอินเทอร์เฟซแบบ Coincident

3) แบบ Non-coincident

กรณีนี้คล้ายกับกรณี แบบ Coincident ซึ่งจะมีการสร้าง node เพิ่มขึ้น เพียงแต่ node จะไม่อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับ node แรก ลักษณะการวางตัวของ node ในการคำนวณ และการแจกแจงอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 การกำหนดอินเทอร์เฟซแบบ Non-coincident

อย่างไรก็ดีในการศึกษาเบื้องต้นพบว่าการที่จะทำโมเดลที่สามารถทำการจำลองแบบหลายชั้นได้นั้น กรณีที่จำนวนชั้นวัสดุที่ทำการคำนวณในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน โปรแกรมจะยอมให้ทำการกำหนดผิวสัมผัสของชั้นที่เพิ่มเติมเข้าไปภายหลังด้วย การถ่ายเทความร้อนเป็นแบบ NCOINC เท่านั้น

4.1.2.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ของโปรแกรม

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในการคำนวณของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์สามารถกำหนดได้ในหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ ความดัน หรือ อัตราการไหลเข้าของมวล แต่อย่างไรก็ดีในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเข็รับน้ำเหล็กนี้ ได้เลือกใช้การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในรูปแบบของการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากความสะดวกในการทำงาน รูปที่ 4-8 แสดงหน้าต่างในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตการถ่ายเทความร้อนเป็นการอนุญาตให้มีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวที่กำหนดเงื่อนไขขอบเขตกับผิวด้านนอกที่ไม่ได้กำหนดเป็น โดเมนในการคำนวณ โดยสามารถกำหนดได้ในรูปตัวแปรสี่ตัว ได้แก่ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม, สภาพเปล่งรังสี (Emissivity) และ Heat Flux (Q_F) ซึ่งสอดคล้องกับสมการการถ่ายเทความร้อน

$$Q = Q_F + h(T - T_a) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_a^4) \quad (4.1)$$

อนึ่งโปรแกรมทำการคำนวณการถ่ายเทความร้อนเฉพาะตัวแปรที่กำหนดเท่านั้น กรณีที่ไม่มีการกำหนดตัวแปรใด เทอมนั้นของสมการจะไม่นำมาคำนวณ

รูปที่ 4-8 หน้าต่างในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

4.1.2.4 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions)

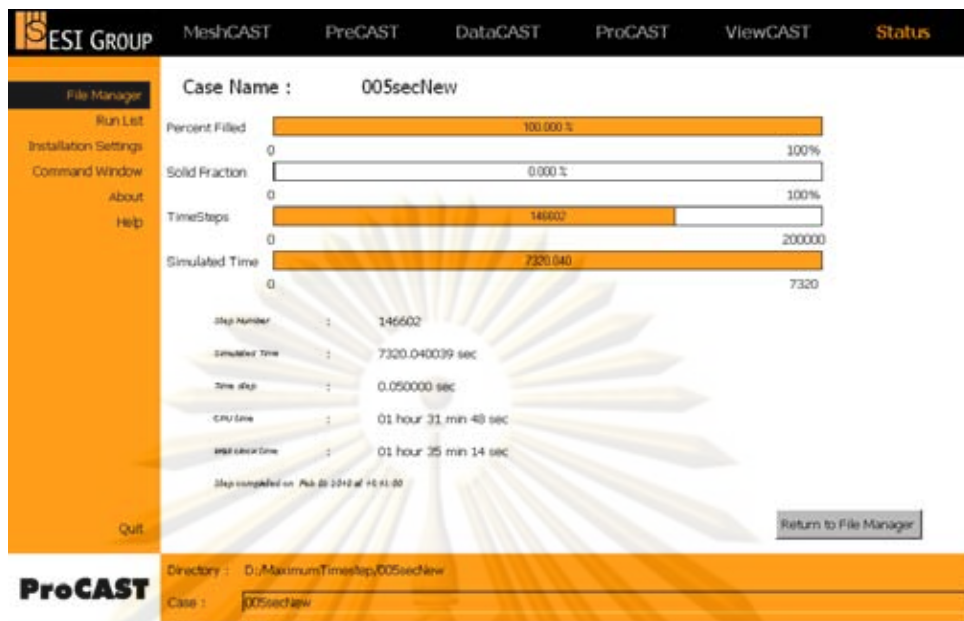
การกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้นในการคำนวณ ซึ่งหมายถึงการกำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้น สามารถทำได้ในสองรูปแบบได้แก่ 1) การกำหนดเป็นค่าอุณหภูมิในการคำนวณครั้งนั้นๆ และ 2) การนำค่าอุณหภูมิจากการคำนวณในครั้งก่อนหน้ามาเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดขั้นที่ใช้ในการตั้งข้อมูลด้วย หนึ่งวิธีการนี้ทำได้ในกรณีที่โดเมนของการจำลอง การถ่ายเทความร้อนสอดคล้องกัน

4.1.2.5 การกำหนดระยะเวลาการจำลอง (simulation time) และขั้นระยะเวลา (time step)

ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ จำเป็นที่จะต้องกำหนดระยะเวลาในการจำลอง (simulation time) เพื่อที่จะเป็นขอบเขตในการสิ้นสุดการคำนวณ และขั้นระยะเวลา (time step)

4.1.3 DataCAST/ProCAST

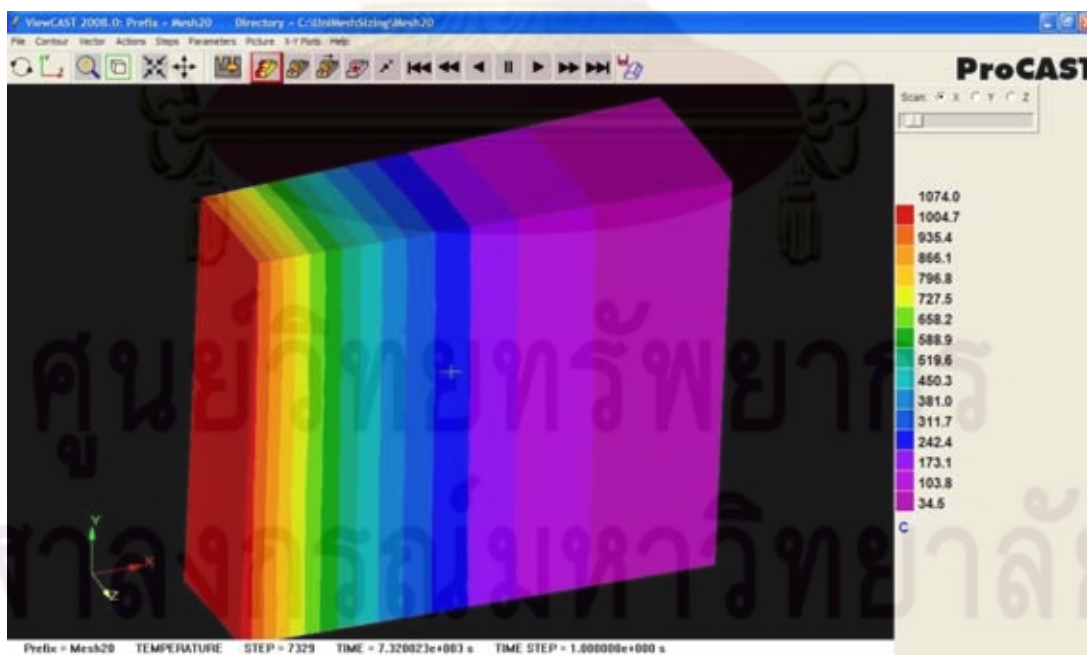
ขั้นตอนนี้มีหน้าที่ทำการคำนวณ ตามค่าที่ได้กำหนดไว้ในขั้นตอน PreCAST โดยรายละเอียดการคำนวณสามารถดูได้จากหน้าจอบทสรุป รูปที่ 4-9 ซึ่งแสดงข้อมูลที่สำคัญ เช่น สัดส่วนร้อยละการแข็งตัวของน้ำเหล็ก (Solid fraction) จำนวนขั้นในการคำนวณ (TimeSteps) ระยะเวลาที่จำลอง (Simulated time) ขั้นเวลาสุดท้ายที่ใช้ในการคำนวณ (Time step) และ ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Wall clock time)



รูปที่ 4-9 หน้าจอควบคุม

4.1.4 ViewCAST

ขั้นตอนนี้มีหน้าที่แสดงผลการคำนวณที่แต่ละชั้นเวลาที่ได้ทำการบันทึกข้อมูล ในรูปแบบสามมิติ ทั้งในรูปแบบของอุณหภูมิ หรืออัตราการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ยังสามารถส่งออก (export) ข้อมูลอุณหภูมิต่อเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ ในรูปไฟล์เอกสารได้ด้วย รูปที่ 4-10 แสดงหน้าต่าง ViewCAST



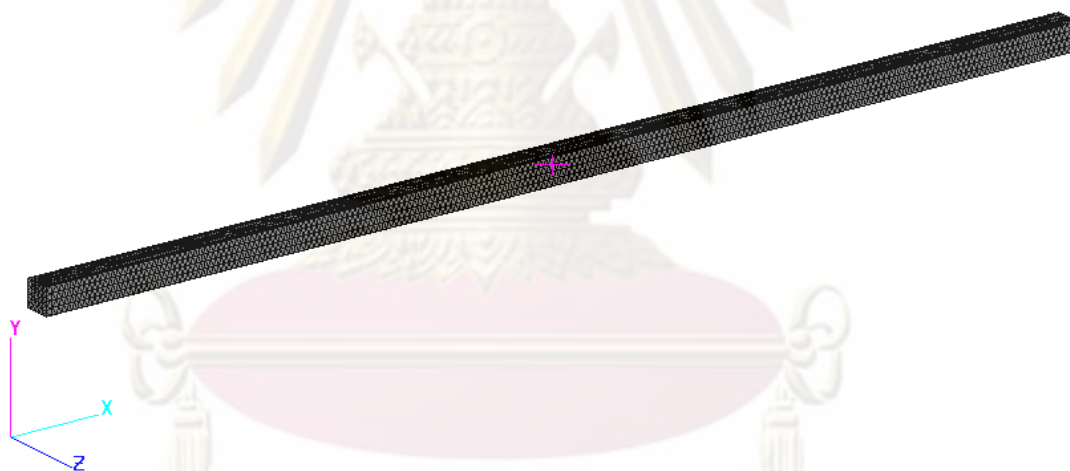
รูปที่ 4-10 หน้าต่าง view case

4.2 การตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม (validation)

เพื่อความมั่นใจในการใช้งานโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนนั้น ทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการทำงานของโปรแกรม ด้วยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ เช่น การแจกแจงอุณหภูมิ และอัตราการถ่ายเทความร้อน ที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมกับ ผลที่ได้จากการคำนวณการนำความร้อนหนึ่งมิติที่ขึ้นกับเวลา (one dimension transient conduction) กรณีที่ของแข็งมีลักษณะกึ่งอนันต์ (semi-infinite solid) ทั้งใน 3 กรณี ได้แก่ 1) อุณหภูมิผิวคงที่ (Constant Surface Temperature) 2) อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ (Constant Surface Heat Flux) และ 3) การพาความร้อนที่ผิวหน้า (Surface Convection) ซึ่งทฤษฎีได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.3.1

4.2.1 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

ในการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ ด้วยการคำนวณการถ่ายเทความร้อนหนึ่งมิติที่ขึ้นกับเวลา ได้ใช้แบบจำลองในรูปแบบแท่งสี่เหลี่ยม หน้าตัดขนาด 25x25 มิลลิเมตร ยาว 1000 มิลลิเมตร รูปที่ 4-11 และแสดงข้อมูลแบบจำลองในตารางที่ 4-1



รูปที่ 4-11 แบบจำลองที่ใช้ในการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม

ตารางที่ 4-1 ข้อมูลแบบจำลองที่ใช้ในการสอบเทียบโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์

Dimension (mm x mm x mm)	25 x 25 x 1000
Mesh size (mm)	5
Number of material	1
Nodes	7,833
Elements	31,394

กำหนดคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ ในการจำลองการถ่ายเทความร้อน ทั้ง 3 รูปแบบ ด้วยคุณสมบัติของ Plain carbon AISI 1100 แสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการสอบเทียบโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์

Material	Plain carbon AISI 1100 Mn \leq 1% Si \leq 0.1%
Density (kg/m ³)	7,854
Thermal Conductivity, k (W/m.K)	60.5
Specific heat, Cp (J/kg.K)	434
Thermal diffusivity, α (m ² /s)	1.77×10^{-5}

กำหนดในการถ่ายเทความร้อนเฉพาะในแนว x ที่ตำแหน่งผิว ด้าน x = 0 เท่านั้น ส่วนผิวด้านอื่นๆ กำหนดให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (adiabatic heat transfer surface)

4.2.2 กรณีที่ 1 อุณหภูมิผิวดังที่ (Constant Surface Temperature)

กรณีการถ่ายเทความร้อน ด้วยการกำหนดให้เป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบ อุณหภูมิผิวดังที่ เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จ กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ของแข็งมีลักษณะกึ่งอนันต์ (semi-infinite solid) ด้วยสมการที่ 2.18 และ 2.19 ในตารางที่ 2-4 ซึ่งกำหนดให้ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณให้เหมือนกับ เงื่อนไขขอบเขต และ เงื่อนไขเริ่มต้น มีค่าเท่ากับที่ใช้ในโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์

4.2.2.1 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

ที่ผิวด้าน x = 0 มีการกำหนด เงื่อนไขขอบเขตให้อุณหภูมิภายนอกผิวสัมผัสมีค่าคงที่เท่ากับ 800K

4.2.2.2 การกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้น

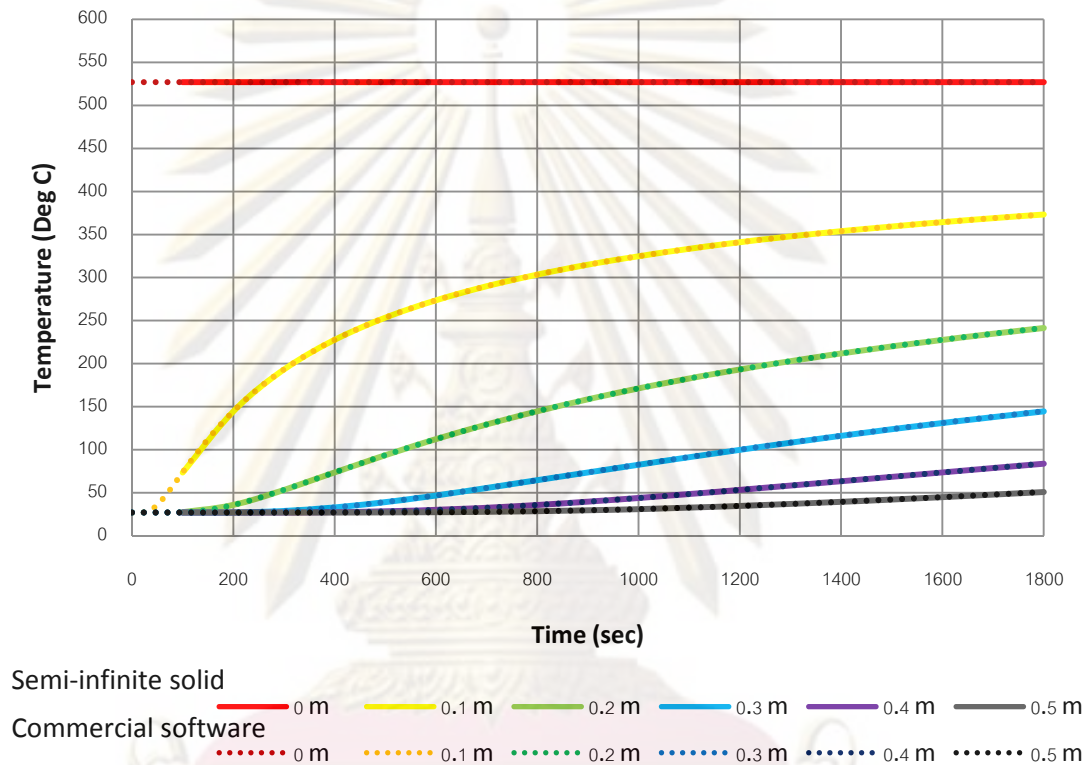
แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณมีการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นในการคำนวณเท่ากันทั่วทั้งชิ้นวัสดุ มีค่าเท่ากับ 300K (27 °C)

4.2.2.3 การกำหนดระยะเวลาการจำลอง (simulation time) และขั้นระยะเวลา (time step)

ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ กำหนดระยะเวลาในการจำลองทั้งสิ้น 60 นาที ด้วยการกำหนดขั้นระยะเวลาเริ่มต้น 0.001 วินาที และขั้นระยะเวลามากที่สุด 0.1 วินาที

4.2.2.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้

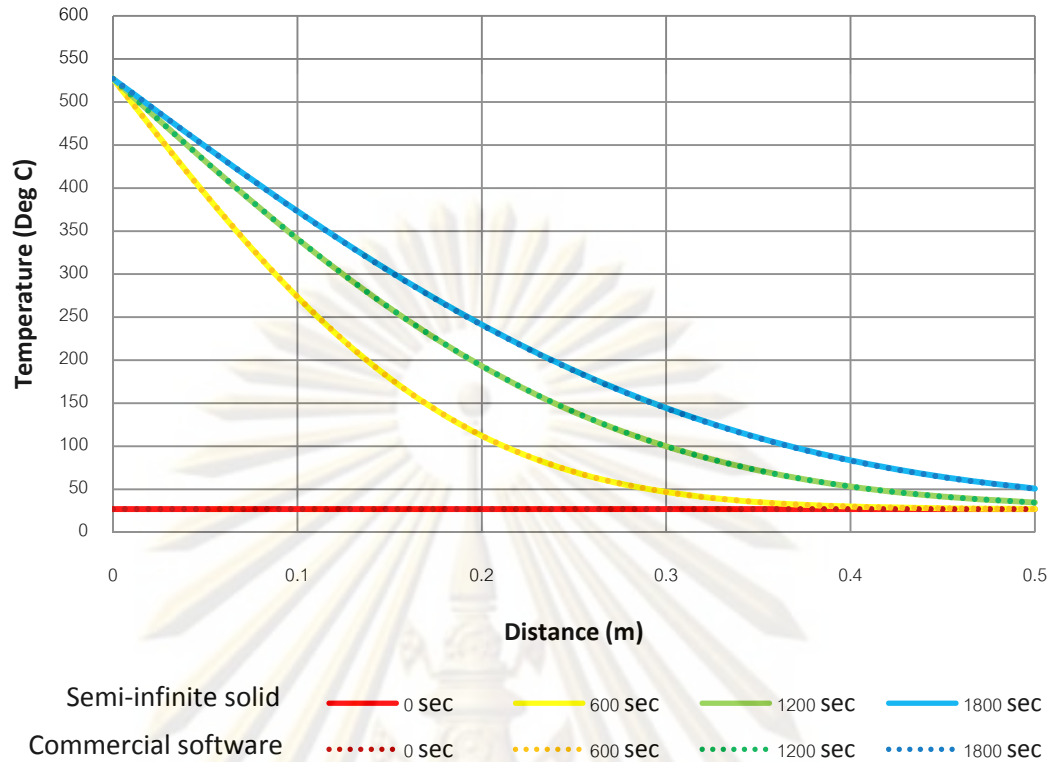
ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ และการแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ ของผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จ กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ของแข็งมีลักษณะกึ่งอนันต์ (semi-infinite solid) ในกรณีนี้อุณหภูมิที่ผิว $x = 0$ มีอุณหภูมิตั้งที่เท่ากับ 800K (527 °C) แสดงในรูปที่ 4-12 และรูปที่ 4-13 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันอย่างมาก



รูปที่ 4-12 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ กรณีที่ 1 อุณหภูมิผิวคงที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-13 การแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ กรณีที่ 1 อุณหภูมิผิวคงที่

4.2.3 กรณีที่ 2 อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ (Constant Surface Heat Flux)

กรณีการถ่ายเทความร้อน ด้วยการกำหนดให้เป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบ อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่ เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จ กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ของแข็งมีลักษณะกึ่งอนันต์ (semi-infinite solid) ด้วยสมการที่ 2.20 ในตารางที่ 2-4 ซึ่งกำหนดให้ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณให้เหมือนกับ เงื่อนไขขอบเขต และ เงื่อนไขเริ่มต้น มีค่าเท่ากับที่ใช้ในโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์

4.2.3.1 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

ที่ผิวด้าน $x = 0$ มีการกำหนด เงื่อนไขขอบเขตให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนใน ทิศทางเข้าสู่วัตถุที่ 10 kW/m^2

4.2.3.2 การกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้น

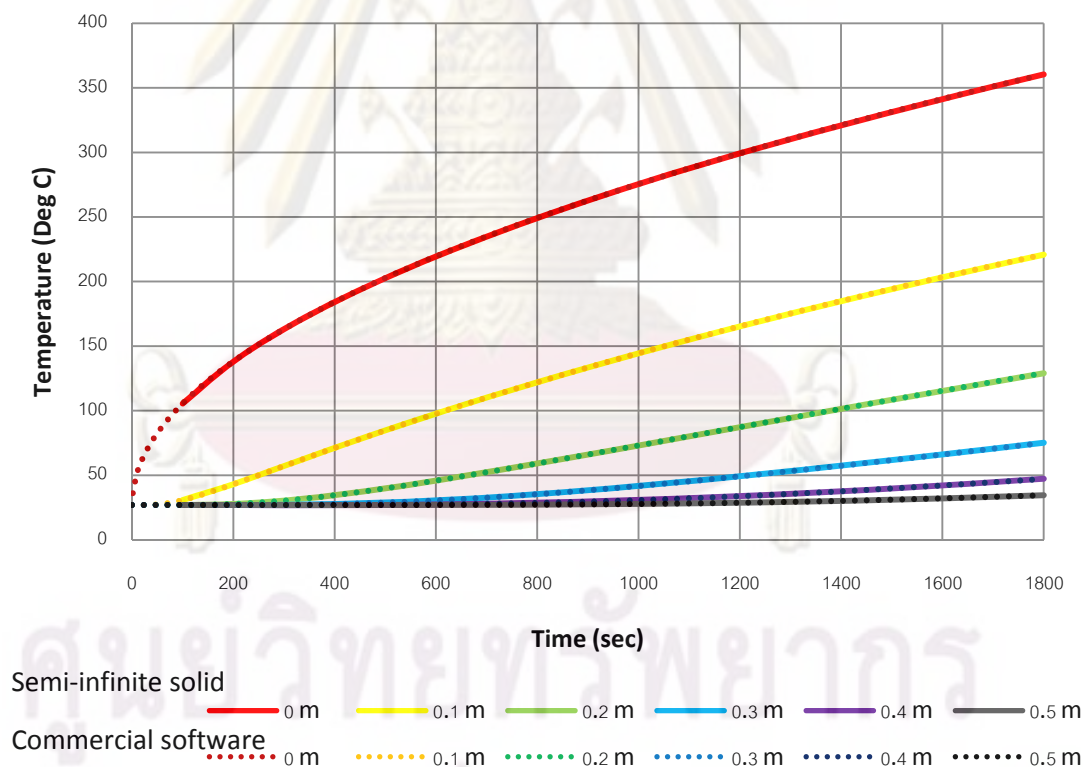
แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณมีการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นในการคำนวณ เท่ากันทั่วทั้งชิ้นวัตถุ มีค่าเท่ากับ 300K (27°C)

4.2.3.3 การกำหนดระยะเวลาการจำลอง (simulation time) และขั้นระยะเวลา (time step)

ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ กำหนดระยะเวลาในการจำลองทั้งสิ้น 60 นาที ด้วยการกำหนดขั้นระยะเวลาเริ่มต้น 0.001 วินาที และขั้นระยะเวลามากที่สุด 0.1 วินาที

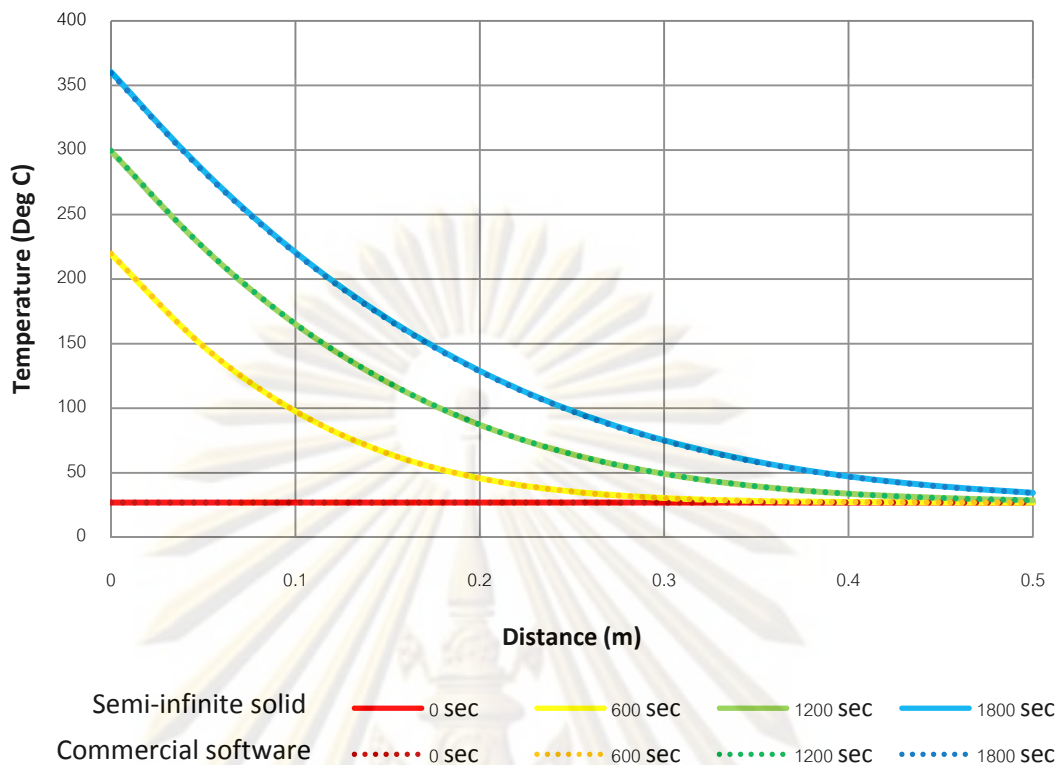
4.2.3.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้

ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ และการแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ ของผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จ กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ของแข็งมีลักษณะกึ่งอนันต์ (semi-infinite solid) ในกรณีที่มีผิวด้าน $x = 0$ มีการกำหนด เงื่อนไขขอบเขตให้มีอัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทางเข้าสู่วัตถุที่ 10 kW/m^2 แสดงในรูปที่ 4-14 และรูปที่ 4-15 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันอย่างมาก



รูปที่ 4-14 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ

กรณีที่ 2 อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่



รูปที่ 4-15 การแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ

กรณีที่ 2 อัตราการถ่ายเทความร้อนคงที่

4.2.4 กรณีที่ 3 การพาความร้อนที่ผิวหน้า (Surface Convection)

กรณีการถ่ายเทความร้อน ด้วยการกำหนดให้เป็นการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบ มีการพาความร้อนที่ผิวหน้า เปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จ กับ ผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ของแข็งมีลักษณะกึ่งอนันต์ (semi-infinite solid) ด้วยสมการที่ 2.21 ในตารางที่ 2-4 ซึ่งกำหนดให้ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณให้เหมือนกับ เงื่อนไขขอบเขต และ เงื่อนไขเริ่มต้น มีค่าเท่ากับที่ใช้ในโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์

4.2.4.1 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

ที่ผิวด้าน $x = 0$ มีการกำหนด เงื่อนไขขอบเขตให้มีการพาความร้อน ด้วยอุณหภูมิของไหลภายนอกเท่ากับ 1,000K ซึ่งกำหนดสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection coefficient) เท่ากับ $300 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

4.2.4.2 การกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้น

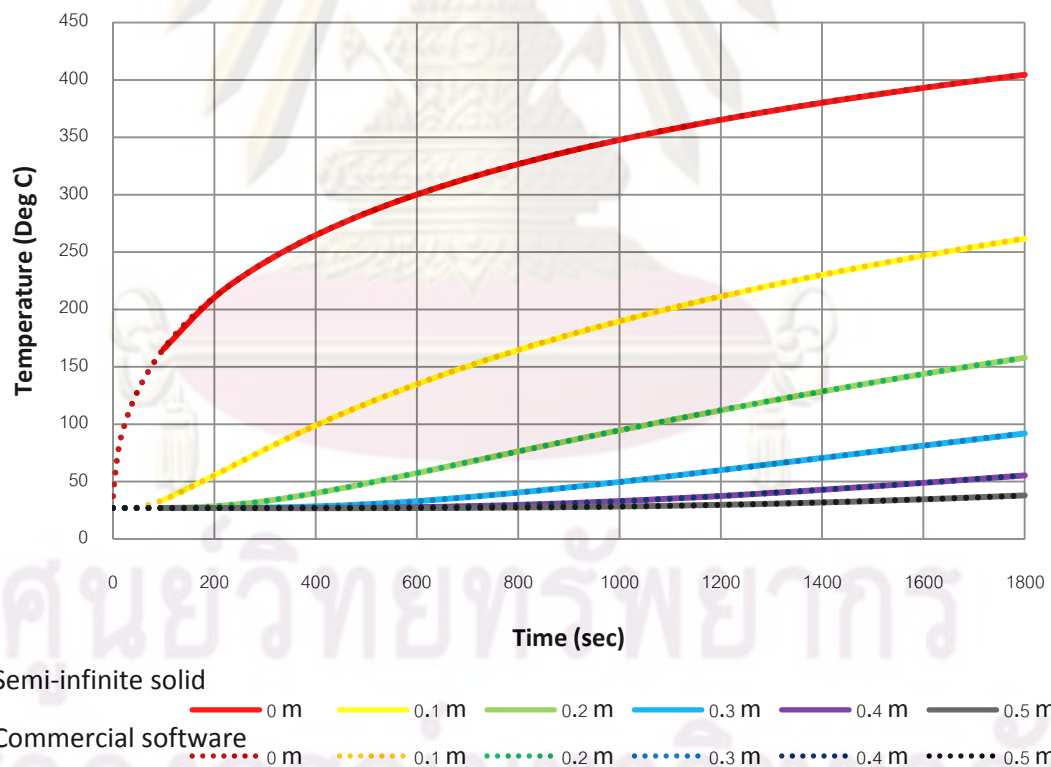
แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณมีการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นในการคำนวณ เท่ากันทั่วทั้งชิ้นวัตถุ มีค่าเท่ากับ 300K (27 °C)

4.2.4.3 การกำหนดระยะเวลาการจำลอง (simulation time) และขั้นระยะเวลา (time step)

ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ กำหนดระยะเวลาในการจำลองทั้งสิ้น 60 นาที ด้วยการกำหนดขั้นระยะเวลาเริ่มต้น 0.001 วินาที และขั้นระยะเวลามากที่สุด 0.1 วินาที

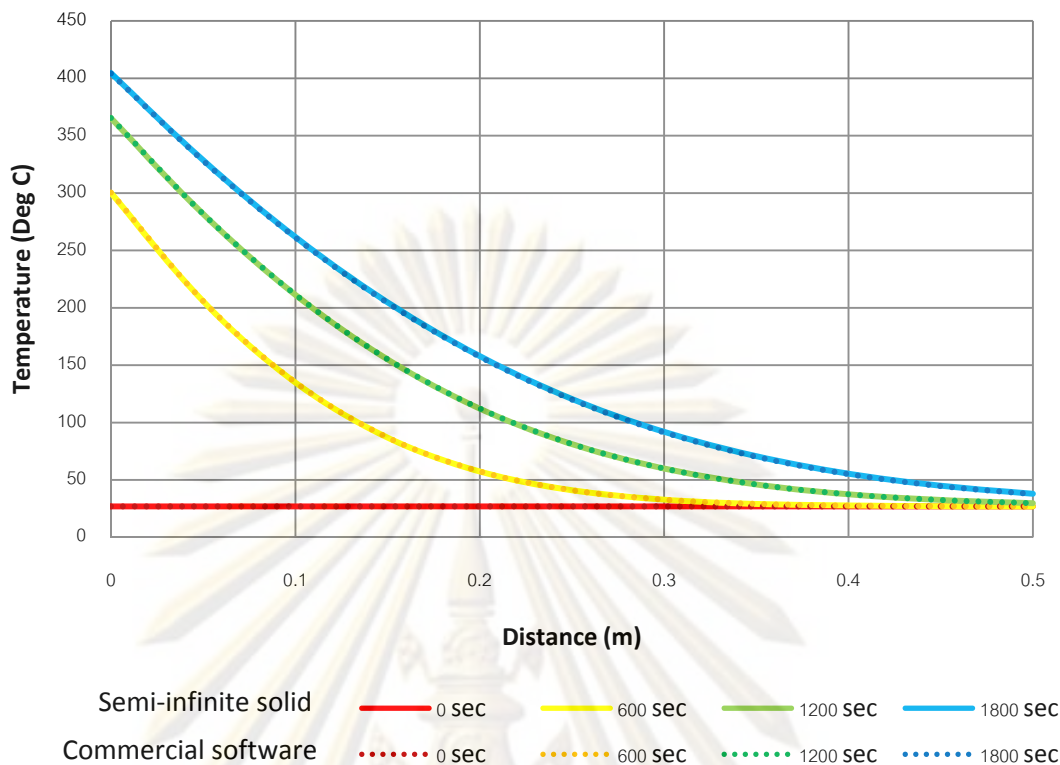
4.2.4.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้

ผลการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ และการแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ ของผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จ กับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีที่ของแข็งมีลักษณะกึ่งอนันต์ (semi-infinite solid) ในกรณีที่ผิวด้าน $x = 0$ มีการกำหนด เงื่อนไขขอบเขตให้มีการพาความร้อน ด้วยอุณหภูมิของไหลภายนอกเท่ากับ 1000K ซึ่งกำหนดสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection coefficient) เท่ากับ 300 $W/m^2.K$ แสดงในรูปที่ 4-16 และรูปที่ 4-17 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกันอย่างมาก



รูปที่ 4-16 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามเวลาที่ตำแหน่งต่างๆ

กรณีที่ 3 การพาความร้อนที่ผิวหน้า



รูปที่ 4-17 การแจกแจงอุณหภูมิภายในแบบจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ

กรณีที่ 3 การพาความร้อนที่ผิวหน้า

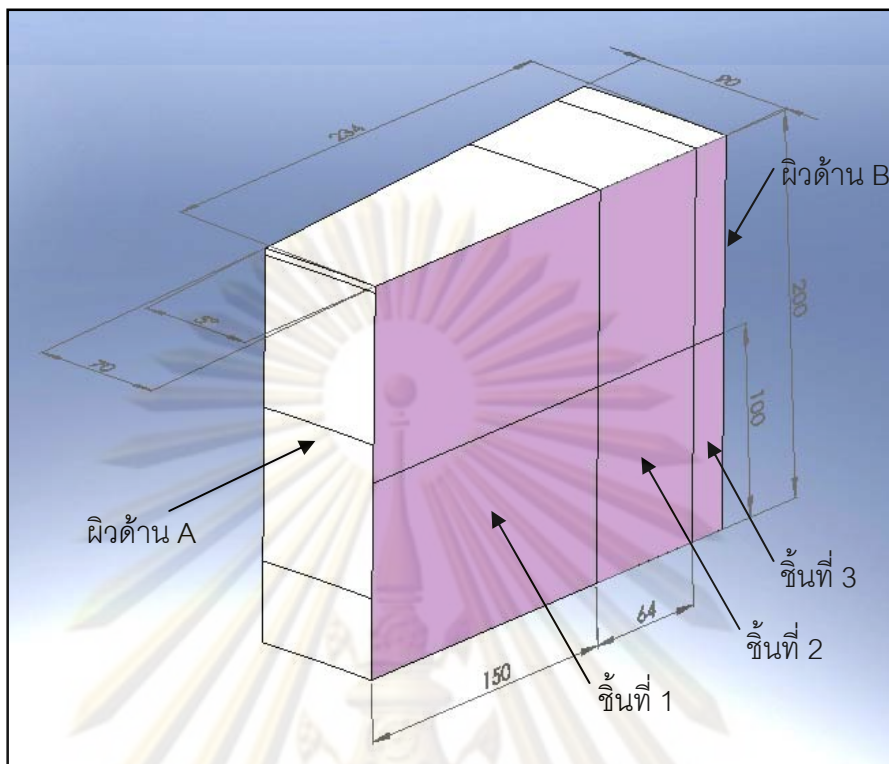
4.3 สรุปผลการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม (validation)

ผลการเปรียบเทียบการคำนวณของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์กับ ผลที่ได้จากการคำนวณการนำความร้อนหนึ่งมิติที่ขึ้นกับเวลา (one dimension transient conduction) กรณีที่ของแข็งมีลักษณะกึ่งอนันต์ (semi-infinite solid) ทั้งใน 3 กรณี ทำให้เชื่อมั่นได้ว่าโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์สามารถใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติที่ขึ้นกับเวลาได้

4.4 การหาขนาดตารางที่เหมาะสมในการคำนวณ (mesh sizing)

การหาค่าตาราง (mesh) ของแบบจำลองที่เหมาะสมในการคำนวณ มีความจำเป็น เนื่องจากค่าตารางที่เหมาะสมจะทำให้คอมพิวเตอร์ใช้ระยะเวลาใช้ในการคำนวณน้อยที่สุด ซึ่งผลการคำนวณมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการใช้ตารางที่ละเอียดกว่าในการคำนวณ

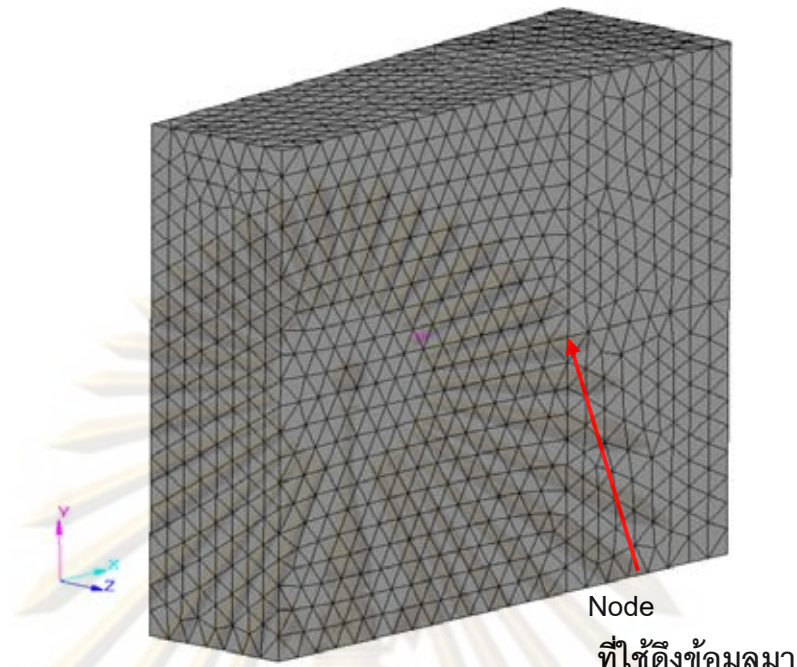
เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณมีขนาดใหญ่เท่ากับขนาดจริงของบ้ำรับน้ำเหล็ก การหาค่าตารางที่เหมาะสมจึงไม่สะดวกที่จะใช้แบบจำลองจริงในการศึกษา ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้ส่วนหนึ่งของแบบจำลองจริงในการศึกษาแทน รูปที่ 4-18 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการหาค่าตารางที่เหมาะสม ซึ่งประกอบด้วยวัสดุ 3 ชั้น



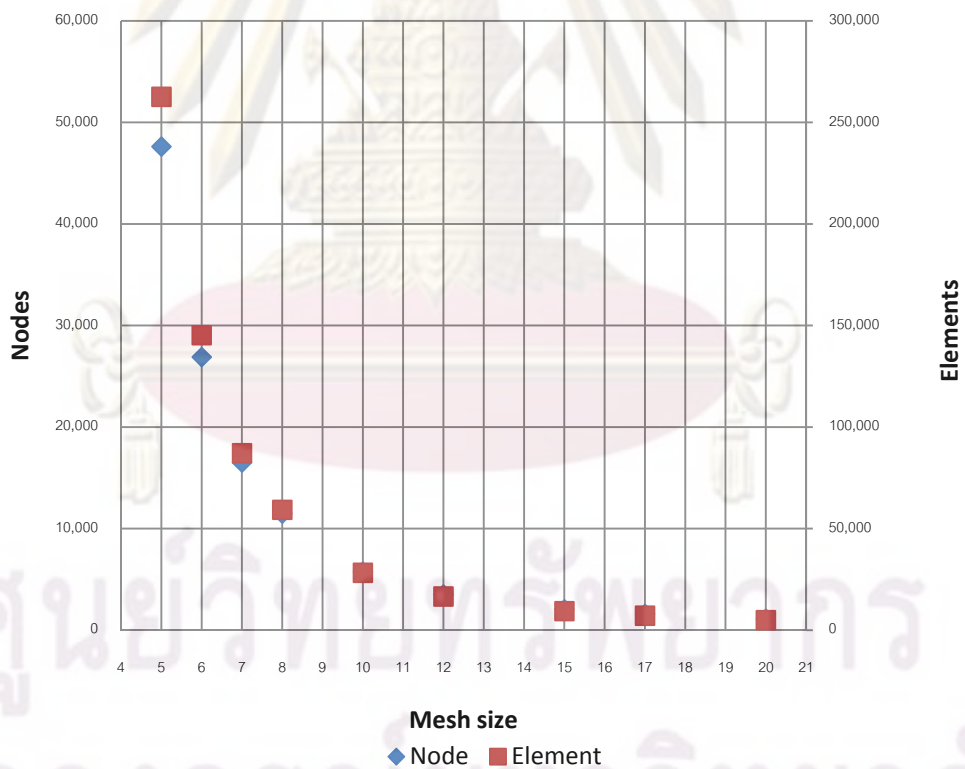
รูปที่ 4-18 แบบจำลองที่ใช้ในการหาค่าตารางที่เหมาะสม

การหาค่าตารางที่เหมาะสมนั้น ได้ทำการเปลี่ยนขนาดตารางที่ใช้ต่างๆ กัน เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณ ทั้งสิ้น 10 รูปแบบ ได้แก่ ตารางขนาด 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 17, 20 และ ขนาด 5 และ 10 mm ผสมกัน รูปที่ 4-19 แสดงแบบจำลองเมื่อทำการตีตารางขนาด 10 mm ซึ่งจากขนาดตารางทั้ง 9 ค่าทำให้ได้ค่าจำนวน node และ element แสดงในรูปที่ 4-20 ซึ่งจะสังเกตได้ว่า กรณีที่ตารางมีขนาดเล็กจะมีจำนวน node และ element มากกว่าตารางที่มีขนาดใหญ่ โดยขนาดตาราง ต่อจำนวน node และ element มีความสัมพันธ์ของการลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4-19 แบบจำลอง กรณีตารางมีขนาด 10 mm



รูปที่ 4-20 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตาราง ต่อจำนวน node และ element

กำหนดคุณสมบัติทางความร้อนของวัตถุของวัสดุทั้ง 3 ชั้น ในการคำนวณเพื่อหาขนาดตารางที่เหมาะสม ด้วยคุณสมบัติของวัสดุทนไฟ ชนิด SK38 แสดงในตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ในการหาค่าตารางที่เหมาะสม (mesh sizing)

Material	Refractory, SK38	
Density (kg/m ³)	2,750	
Thermal Conductivity, k (W/m.K)	Temperature (°C)	Conductivity, k (W/m.K)
	400	2.20
	600	2.09
	800	2.03
	1,000	2.00
Specific heat, Cp (J/kg.K)	1,100	
Thermal diffusivity, α (m ² /s)	$7.27 \times 10^{-7} - 6.61 \times 10^{-7}$	

4.4.1.1 การกำหนดอินเทอร์เฟซระหว่างชั้นวัสดุ

กำหนดอินเทอร์เฟซระหว่างวัสดุชั้นที่ 1 กับ ชั้นที่ 2 และระหว่างชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 กำหนดอินเทอร์เฟซในรูปแบบ Equivalence เนื่องจากวัสดุชั้นที่ 1 2 และ 3 ในการจำลองเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน

4.4.1.2 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

ที่ผิวด้าน A $x = 0$ มีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้เสมือนว่ามีการรับความร้อนจาก ทั้งในรูปของการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งกำหนดสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convection coefficient) เท่ากับ $50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ และ ค่าการเปล่งรังสีความร้อน, ϵ (emissivity) เท่ากับ 0.7 จากบรรยากาศภายนอกอุณหภูมิ $800 \text{ }^\circ\text{C}$ นอกจากนั้นยังกำหนดให้ที่ผิวด้าน A มีอัตราการถ่ายเทความร้อนในทิศทางเข้าสู่วัสดุที่ 5 kW/m^2

ที่ผิวด้าน B มีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้เสมือนว่ามีการสูญเสียความร้อนจาก ผิวด้านนอกสู่บรรยากาศ ในรูปของการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งกำหนดสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (convection coefficient) เท่ากับ $20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ และ ค่าการเปล่งรังสี (emissivity) ϵ เท่ากับ 0.78 ไปสู่บรรยากาศภายนอกอุณหภูมิ $35 \text{ }^\circ\text{C}$

4.4.1.3 การกำหนดเงื่อนไขเบื้องต้น

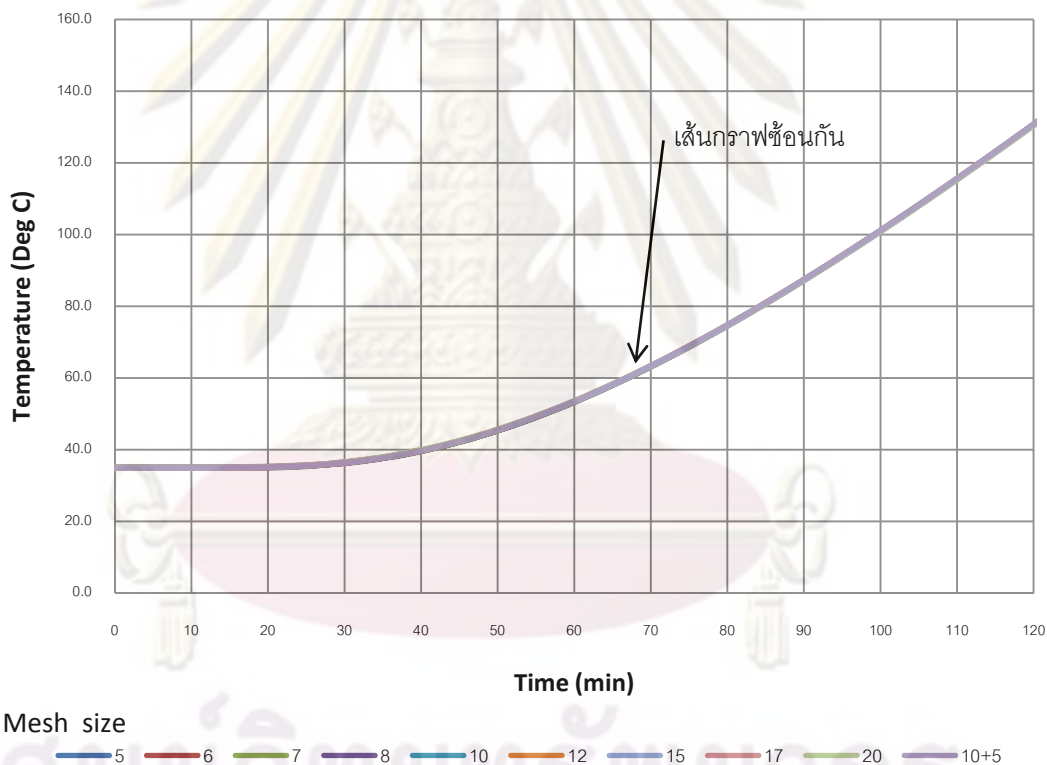
แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณมีการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นในการคำนวณเท่ากันทั่วทั้งชั้นวัสดุ มีค่าเท่ากับ $35 \text{ }^\circ\text{C}$

4.4.1.4 การกำหนดระยะเวลาการจำลอง (simulation time) และขั้นระยะเวลา(time step)

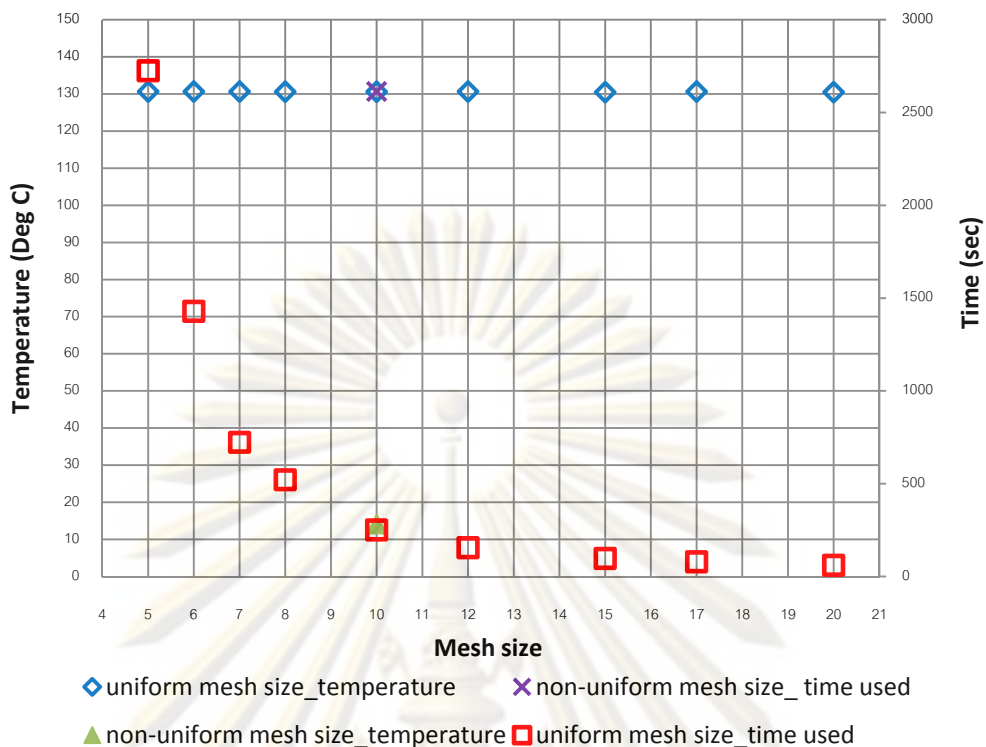
ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ กำหนดระยะเวลาในการจำลองทั้งสิ้น 120 นาที ด้วยการกำหนดขั้นระยะเวลาเริ่มต้น 0.001 วินาที และขั้นระยะเวลามากที่สุด 1 วินาที

4.4.1.5 เปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนขนาดตาราง

การเปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนขนาดตารางจากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของ node ที่อยู่ระหว่างวัสดุชั้นที่ 1 และ 2 ตำแหน่งของ node ดังแสดงในรูปที่ 4-21 พบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดตารางส่งผลต่อการคำนวณอุณหภูมิน้อยมาก อย่างไรก็ตาม ขนาดตารางที่เล็กลงจะใช้ระยะเวลาในการคำนวณเพิ่มมากขึ้น รูปที่ 4-22



รูปที่ 4-21 เปรียบเทียบผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อเปลี่ยนขนาดตาราง



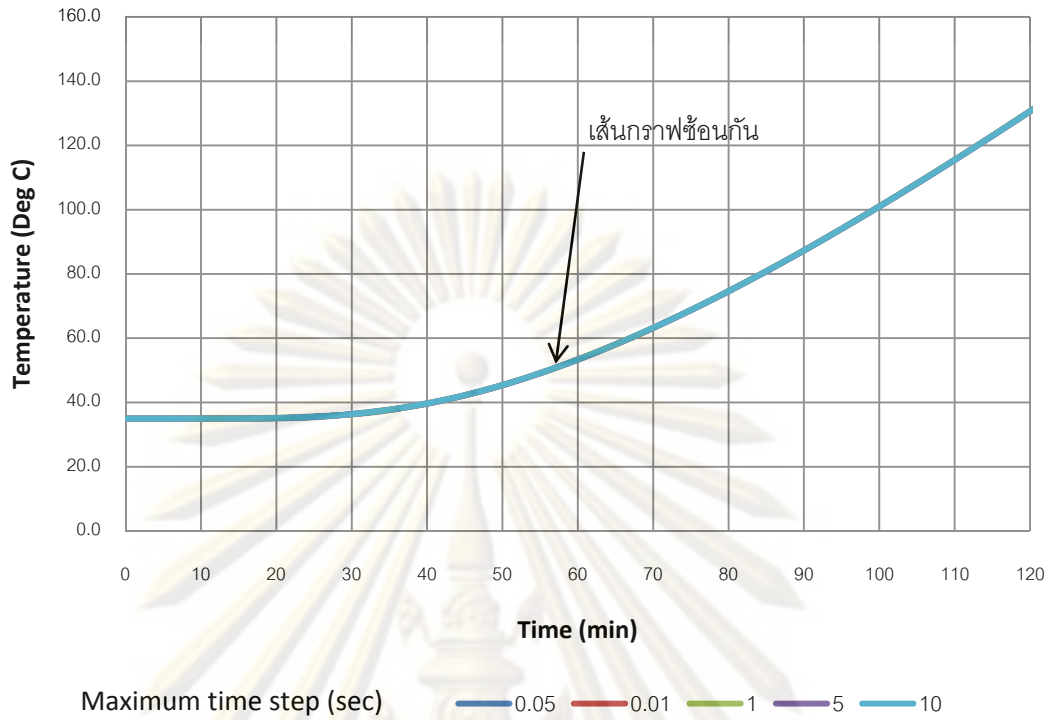
รูปที่ 4-22 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตาราง ต่อผลการคำนวณ และระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

4.5 สรุปผลการเลือกขนาดตาราง

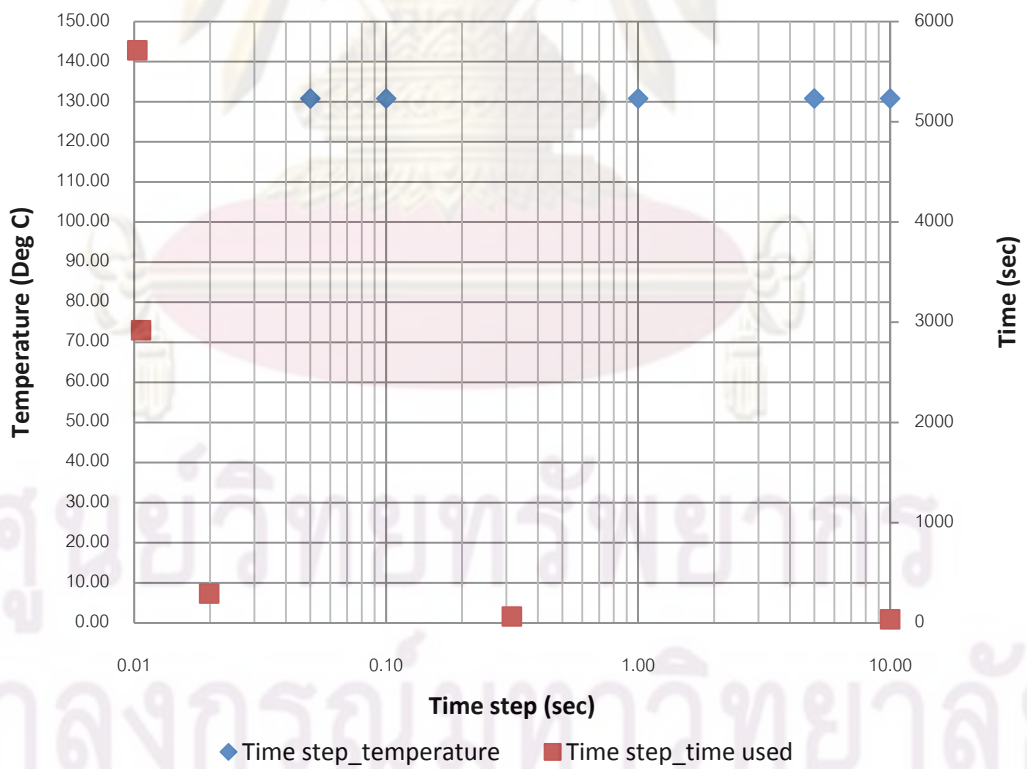
เพื่อความเหมาะสมในส่วนของการคำนวณการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำ เหล็กจึงเลือกใช้ ตารางสองขนาด ได้แก่ตารางขนาด 10 mm ในบริเวณทั่วไป และตารางขนาด 5 mm ในบริเวณที่เป็นแนวเดียวกับแนวการฝังเทอร์โมคัปเปิลภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก

4.6 การเลือกขั้นระยะเวลามากที่สุด (maximum time step)

การเลือกขั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการคำนวณ เพื่อที่จะพิจารณาผลของการคำนวณ ทำโดยการใช้แบบจำลองและการกำหนดค่าเหมือนกับที่ใช้ในการหาขนาดตารางที่เหมาะสมในการคำนวณ (mesh sizing) แต่ทำการเลือกขั้นระยะเวลามากที่สุด (maximum time step) ที่ต่างกัน ได้แก่ 0.05, 0.1, 1, 5 และ 10 วินาที ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงขั้น ระยะเวลาส่งผลต่อการคำนวณอุณหภูมิน้อยมาก รูปที่ 4-23 แต่ขั้นระยะเวลาน้อยลงจะใช้ ระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณเพิ่มมากขึ้น รูปที่ 4-24



รูปที่ 4-23 เปรียบเทียบผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เมื่อเปลี่ยนขั้นระยะเวลา



รูปที่ 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่างขั้นระยะเวลา ต่อผลการคำนวณ และระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

4.7 สรุปผลการเลือกชั้นระยะเวลามากที่สุด

เพื่อความเหมาะสมในส่วนของ การคำนวณการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำ เหล็กจึงเลือกใช้ ชั้นระยะเวลามากที่สุดที่ 1 วินาที

4.8 ข้อจำกัดของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์

ผลจากการทดลองใช้งานโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ พบว่าโปรแกรมมีข้อจำกัด บางประการในการทำงาน เช่น การจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้า (teeming period) ซึ่งน้ำเหล็กภายในเบ้าต้องมีการลดระดับลงเรื่อยๆ ซึ่งโปรแกรมไม่สามารถทำการจำลองได้ เนื่องจากโปรแกรมออกแบบมาสำหรับเงื่อนไขปัญหาที่มีการเทน้ำเหล็กเข้าสู่แบบหล่อเท่านั้น ดังนั้นการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในขั้นตอนนี้ จึงใช้วิธีการแบ่งแบบจำลองออกเป็นส่วนๆ ซึ่งแต่ละส่วนมีระดับน้ำเหล็กที่ลดระดับลงเรื่อยๆ ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนของผิวหน้าน้ำเหล็ก และผิวข้างจะได้กำหนดจากการคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของผิวหลายผิว ที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB

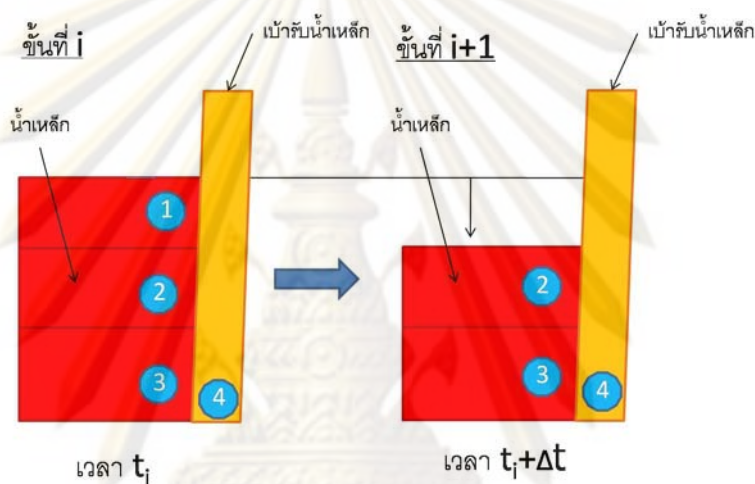
ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Part 2 โปรแกรมคำนวณสมการเชิงเส้นหลายตัวแปร

4.9 ที่มาและความจำเป็นของโปรแกรม

เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.5 การจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการถ่ายน้ำเหล็ก (teeming period) จึงใช้วิธีการจำลองโดยแบ่งโมเดลออกเป็นส่วนๆ ซึ่งแต่ละส่วนมีระดับน้ำเหล็กที่บรรจุอยู่ภายในแตกต่างกัน เสมือนว่าน้ำเหล็กมีการลดระดับลงเรื่อยๆ ในระหว่างการถ่ายน้ำเหล็กออก ประกอบกับการดึงผลลัพธ์จากการคำนวณขั้นก่อน มาใช้เป็นอุณหภูมิเบื้องต้นในการคำนวณขั้นต่อไป แสดงขั้นตอนการทำงานในรูปที่ 4-25



หมายเหตุ นำมาของแบบจำลองส่วนที่ 2, 3 และ 4
จากการคำนวณในขั้นที่ i มาใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณขั้นที่ $i+1$

รูปที่ 4-25 ขั้นตอนการทำงานที่เลือกใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการถ่ายน้ำเหล็ก (teeming period)

การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวหน้าสแลก และผิวข้างด้านในของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการจำลองกำหนดเงื่อนไขขอบเขตในรูปของ อัตราการถ่ายเทความร้อน ซึ่งอัตราการถ่ายเทความร้อนได้มาจากการคำนวณสองส่วนได้แก่ 1) การประเมินการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนธรรมชาติ และ 2) การแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิวหลายพื้นผิว ประกอบด้วย ผิวหน้าสแลก พื้นผิวข้างภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่แบ่งออกเป็นส่วนๆ ตามการแบ่งชั้นน้ำเหล็ก และบรรยากาศภายนอกซึ่งกำหนดให้เป็นผิวๆ หนึ่ง

การเขียนโปรแกรมคำนวณการแผ่รังสีความร้อน ระหว่างพื้นผิวหลายผิวได้ใช้ทฤษฎีที่กล่าวถึงไว้ในหัวข้อที่ 2.3.3

4.10 การออกแบบโปรแกรม

การออกแบบโปรแกรมเพื่อทำการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างผิวหลายผิวนั้น เมื่อพิจารณาจากสมการการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวหลายผิว ที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.3.3 พบว่าตัวแปรที่ต้องกำหนดในการคำนวณ ได้แก่ 1) จำนวนผิว ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับน้ำเหล็กลดลง 2) พื้นที่ของแต่ละผิว 3) สัมประสิทธิ์การมองเห็น, F (view factor) ของผิวแต่ละคู่ 4) สภาพการเปล่งรังสี (emissivity), ϵ และ 5) อุณหภูมิของแต่ละผิว ซึ่งรายละเอียดการหาค่าของแต่ละตัวแปร มีดังนี้

4.10.1 จำนวนผิวในการคำนวณ

จำนวนผิวที่ใช้ในการคำนวณขึ้นกับชั้นของน้ำเหล็กที่ลดระดับลงไป แบบจำลองแบ่งการลดระดับของน้ำเหล็กออกเป็น 20 ชั้น ซึ่งปริมาตรน้ำเหล็กในแต่ละชั้น, อัตราส่วนปริมาตรร้อยละต่อความจุเต็มเบ้า, ระยะจากขอบปากเบ้าถึงผิวน้ำสแลก และ จำนวนผิวของแต่ละชั้น แสดงในตารางที่ 4-4

ศูนย์วิทยทรัพยากร

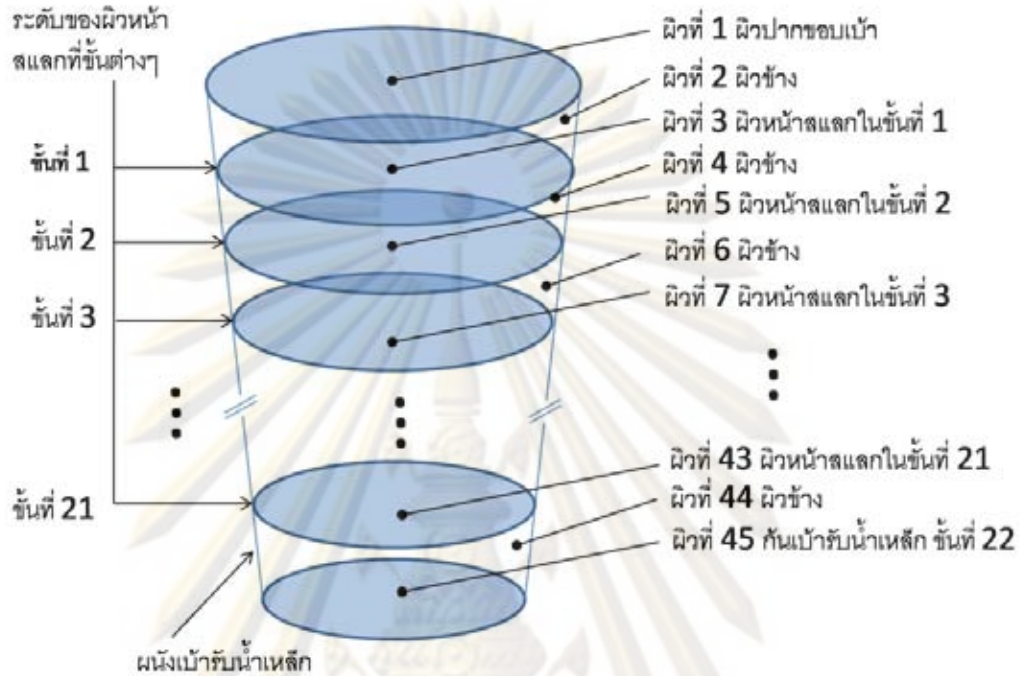
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4-4 ข้อมูลการแบ่งชั้นน้ำเหล็กในการจำลอง

ชั้น	กระบวนการ	ปริมาณน้ำเหล็กภายใน เบ้า (m ³)	สัดส่วน ปริมาตรต่อ ความจุเต็มเบ้า (%)	ระยะจากขอบ ปากถึง ผิวหน้าสแลก (m)	จำนวนผิวที่ใช้ ในการคำนวณ
1	รอกการถ่ายน้ำเหล็ก	3.54	79.36	0.41	3
2	ถ่ายน้ำเหล็ก 1	3.39	75.87	0.49	4
3	ถ่ายน้ำเหล็ก 2	3.23	72.38	0.56	5
4	ถ่ายน้ำเหล็ก 3	3.07	68.89	0.63	6
5	ถ่ายน้ำเหล็ก 4	2.92	65.41	0.71	7
6	ถ่ายน้ำเหล็ก 5	2.76	61.92	0.78	8
7	ถ่ายน้ำเหล็ก 6	2.61	58.43	0.86	9
8	ถ่ายน้ำเหล็ก 7	2.45	54.94	0.93	10
9	ถ่ายน้ำเหล็ก 8	2.30	51.45	1.01	11
10	ถ่ายน้ำเหล็ก 9	2.14	47.97	1.09	12
11	ถ่ายน้ำเหล็ก 10	1.98	44.48	1.16	13
12	ถ่ายน้ำเหล็ก 11	1.83	40.99	1.24	14
13	ถ่ายน้ำเหล็ก 12	1.67	37.50	1.32	15
14	ถ่ายน้ำเหล็ก 13	1.52	34.01	1.40	16
15	ถ่ายน้ำเหล็ก 14	1.36	30.53	1.48	17
16	ถ่ายน้ำเหล็ก 15	1.21	27.04	1.57	18
17	ถ่ายน้ำเหล็ก 16	1.05	23.55	1.65	19
18	ถ่ายน้ำเหล็ก 17	0.90	20.06	1.73	20
19	ถ่ายน้ำเหล็ก 18	0.74	16.57	1.82	21
20	ถ่ายน้ำเหล็ก 19	0.58	13.08	1.90	22
20	ถ่ายน้ำเหล็ก 20	0.43	9.60	1.99	23
21	รอกเทสแลก	0.43	9.60	1.99	23
22	เบ้าปล่าว	0.00	0.00	2.23	24

4.10.1.1 พื้นที่ของแต่ละผิว

พื้นที่ของแต่ละผิว หากจากการคำนวณทางเรขาคณิต ซึ่งลำดับของผิวแสดงในรูปที่ 4-26 และขนาดพื้นที่ผิวแต่ละผิวแสดงในตารางที่ 4-5



รูปที่ 4-26 การแบ่งการลดระดับของน้ำเหล็กออกเป็น 22 ชั้น

ตารางที่ 4-5 พื้นที่ของแต่ละผิวในแต่ละชั้นของการคำนวณ

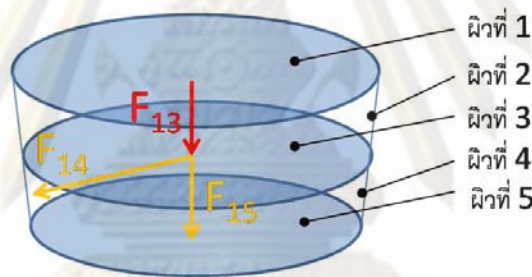
ชั้น	กระบวนการ	จำนวนผิวที่ใช้ในการคำนวณ	พื้นที่ปากเบ้า, ผิวที่ 1 (m ²)	ผิวด้านข้างผนังที่	พื้นที่ (m ²)	ผิวหน้าสแลกที่	พื้นที่ผิวหน้าสแลก (m ²)
1	รอกการถ่ายน้ำเหล็ก	3	2.28	ผิวที่ 2	2.19	ผิวที่ 3	2.17
2	ถ่ายน้ำเหล็ก 1	4	2.28	ผิวที่ 4	0.38	ผิวที่ 5	2.15
3	ถ่ายน้ำเหล็ก 2	5	2.28	ผิวที่ 6	0.38	ผิวที่ 7	2.13
4	ถ่ายน้ำเหล็ก 3	6	2.28	ผิวที่ 8	0.38	ผิวที่ 9	2.12
5	ถ่ายน้ำเหล็ก 4	7	2.28	ผิวที่ 10	0.38	ผิวที่ 11	2.10
6	ถ่ายน้ำเหล็ก 5	8	2.28	ผิวที่ 12	0.38	ผิวที่ 13	2.08
7	ถ่ายน้ำเหล็ก 6	9	2.28	ผิวที่ 14	0.38	ผิวที่ 15	2.06
8	ถ่ายน้ำเหล็ก 7	10	2.28	ผิวที่ 16	0.39	ผิวที่ 17	2.04
9	ถ่ายน้ำเหล็ก 8	11	2.28	ผิวที่ 18	0.39	ผิวที่ 19	2.02
10	ถ่ายน้ำเหล็ก 9	12	2.28	ผิวที่ 20	0.39	ผิวที่ 21	2.01
11	ถ่ายน้ำเหล็ก 10	13	2.28	ผิวที่ 22	0.39	ผิวที่ 23	1.99
12	ถ่ายน้ำเหล็ก 11	14	2.28	ผิวที่ 24	0.39	ผิวที่ 25	1.97
13	ถ่ายน้ำเหล็ก 12	15	2.28	ผิวที่ 26	0.39	ผิวที่ 27	1.95
14	ถ่ายน้ำเหล็ก 13	16	2.28	ผิวที่ 28	0.40	ผิวที่ 29	1.93
15	ถ่ายน้ำเหล็ก 14	17	2.28	ผิวที่ 30	0.40	ผิวที่ 31	1.91
16	ถ่ายน้ำเหล็ก 15	18	2.28	ผิวที่ 32	0.40	ผิวที่ 33	1.89
17	ถ่ายน้ำเหล็ก 16	19	2.28	ผิวที่ 34	0.40	ผิวที่ 35	1.87
18	ถ่ายน้ำเหล็ก 17	20	2.28	ผิวที่ 36	0.40	ผิวที่ 37	1.85
19	ถ่ายน้ำเหล็ก 18	21	2.28	ผิวที่ 38	0.41	ผิวที่ 39	1.83
20	ถ่ายน้ำเหล็ก 19	22	2.28	ผิวที่ 40	0.41	ผิวที่ 41	1.81
21	ถ่ายน้ำเหล็ก 20	23	2.28	ผิวที่ 42	0.41	ผิวที่ 43	1.79
22	รอกเทสแลก	23	2.28	ผิวที่ 42	0.41	ผิวที่ 43	1.79
23	เบ้าปล่าว	24	2.28	ผิวที่ 44	1.14	ผิวที่ 45*	1.74

*ผิวที่ 45 เป็นผิวก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก

4.10.1.2 ตัวประกอบมุมมองเห็น, F (view factor)

การคำนวณการหาค่าตัวประกอบมุมมองเห็น F (view factor) เริ่มจาก การหาค่าสัมประสิทธิ์การมองเห็นในชั้นที่ 1 ก่อน ซึ่งชั้นนี้จะมีผิวทั้งสิ้น 3 ผิว ได้แก่ ผิวที่ 1 ผิวปากขอบเบ้า, ผิวที่ 2 ผิวข้างผนัง และ ผิวที่ 3 ผิวหน้าสแลก ซึ่งค่าตัวประกอบมุมมองเห็น F_{13} สามารถหาได้โดยใช้ในสูตรการหาค่าตัวประกอบมุมมองเห็น 3 มิติ ระหว่างแผ่นวงกลมเรียบสองแผ่นที่วางห่างกัน ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.3.3 หลังจากนั้นจึงใช้ความสัมพันธ์ Reciprocity relation และ Summation rule ในการหาค่าตัวประกอบมุมมองเห็น $F_{11}, F_{12}, F_{21}, F_{22}, F_{23}, F_{31}, F_{32}$ และ F_{33} ตามลำดับ

สำหรับในกรณีการหาค่าสัมประสิทธิ์การมองเห็นชั้นอื่นๆ จากการพิจารณาพบว่า เนื่องจากรูปทรงของเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีลักษณะลึกเข้าไปด้านในทำให้ สามารถเขียนความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การมองเห็นเพิ่มเติมได้อีก เช่น กรณีการหาค่าตัวประกอบมุมมองเห็น ในชั้นที่ 2 ซึ่งมี 4 ผิวจะพบว่าค่าตัวประกอบมุมมองเห็น F_{13} จะสัมพันธ์กับผิวที่ 4 และ 5 ดังแสดงรูปที่ 4-27

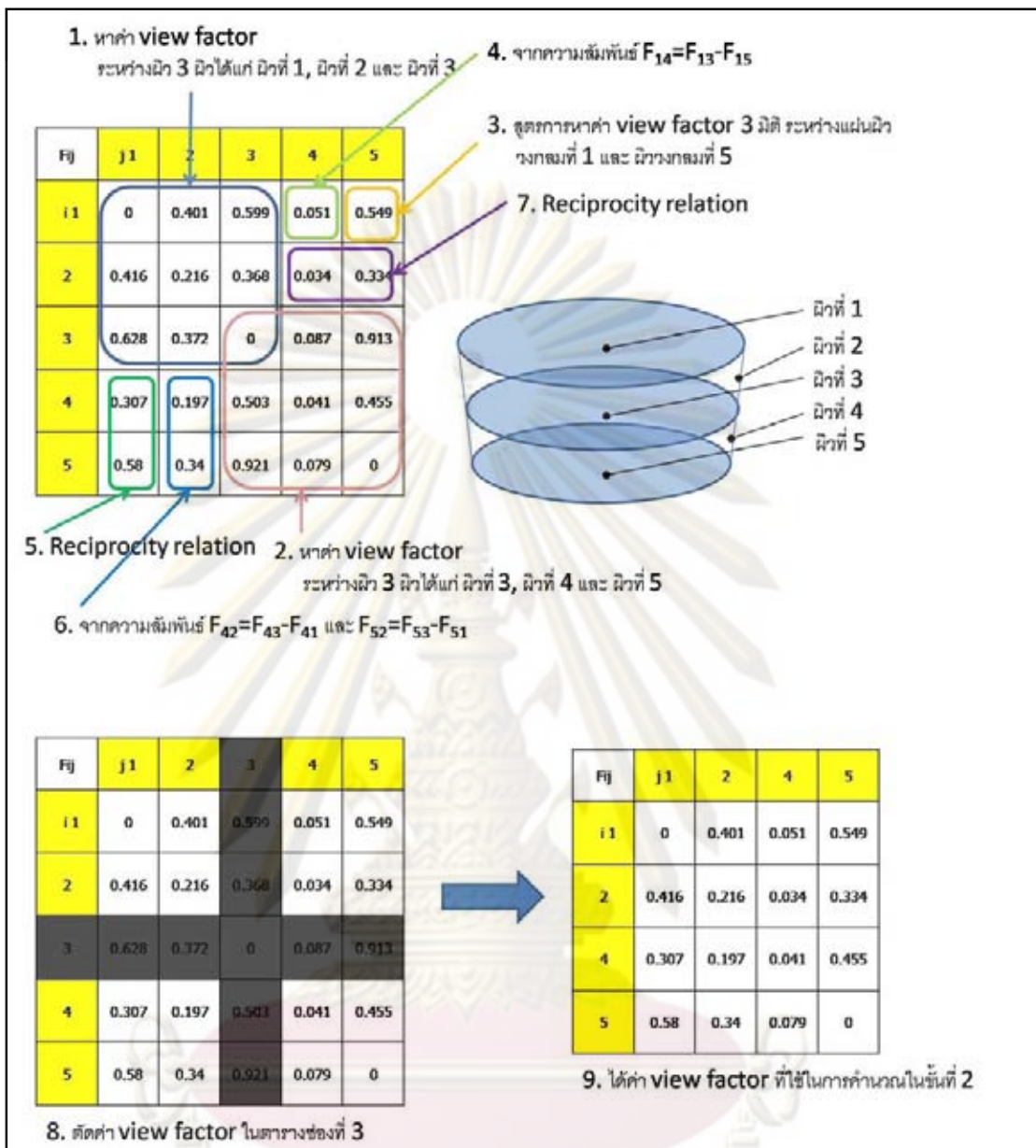


รูปที่ 4-27 ความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบมุมมองเห็น

สามารถเขียนได้ในรูปความสัมพันธ์

$$F_{13} = F_{14} + F_{15} \quad (4.2)$$

สำหรับชั้นอื่นก็ใช้กระบวนการเช่นเดียวกันนี้ในการหาค่าตัวประกอบมุมมองเห็น ด้วยขั้นตอนที่แสดงไว้ในรูปที่ 4-28



รูปที่ 4-28 การหาค่าตัวประกอบมุมมองเห็น

4.10.1.3 สภาพการเปล่งรังสี (emissivity), ϵ และ อุณหภูมิของแต่ละผิว

สภาพการเปล่งรังสี (emissivity), ϵ และ อุณหภูมิของแต่ละผิวเป็นตัวแปรที่ต้องกำหนดโดยผู้ใช้งานโปรแกรม ซึ่งสภาพการเปล่งรังสี (emissivity), ϵ เป็นคุณสมบัติของผิววัสดุที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่ง ในที่นี้ได้แก่ ผิวที่ด้านบนที่การถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศ ผิวด้านในเข้าส่วนเหนือระดับน้ำเหล็ก และผิวหน้าสแลกที่ปกคลุมผิวน้ำเหล็ก

อุณหภูมิของแต่ละผิวเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จในขั้นก่อนหน้า

4.10.2 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเริ่มจากผู้ใช้ต้องใส่ค่าอุณหภูมิ และ สัมประสิทธิ์การเปล่งรังสีความร้อนของแต่ละผิว ในรูป array หลังจากนั้นจึงเรียกใช้คำสั่ง RadMatrixInput ซึ่งประกอบด้วยตัวแปร ชั้นของแบบจำลองที่ต้องการคำนวณ ตัวแปร array อุณหภูมิ และ สัมประสิทธิ์การเปล่งรังสีความร้อนของแต่ละผิว หลังจากนั้นโปรแกรมจะเรียกค่าสัมประสิทธิ์การมองเห็นของชั้นที่ทำการคำนวณ และพื้นที่ผิว จากค่าหาไว้แล้วมาใช้ในการคำนวณ แล้วจึงทำการแก้ระบบสมการเชิงเส้นหลายตัวแปรของการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีระหว่างหลายพื้นผิว สุดท้ายจึงทำการแสดงผลค่าที่คำนวณได้ รูปที่ 4-29 แสดงการใช้งานโปรแกรมและผลลัพธ์ที่ได้

หนึ่งในการการศึกษาวิจัยได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการเขียนโปรแกรมซึ่งรายละเอียดคำสั่งของโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ค.

```

MATLAB 7.6.0 (R2008a)
File Edit Debug Desktop Window Help
Current Directory: C:\Documents and Settings\Sripong Cheankin\My Documents\MATLAB
Workspace
Name Value
T [40 430 800]
e [1 0.6500 0.8000]
Command Window
>> T=[40 430 800]
e=[1 0.65 0.8]
RadMatrixInput(1,T,e)
T =
    40    430    800
e =
    1.0000    0.6500    0.8000
Number of surface : 3
Surface Temperature(K) Emissivity Radiation Heat transfer (kW) Heat flux (W/sq.m)
1 313 1.000000 -99.474219 -43722.153642
2 703 0.650000 -18.538875 -8454.815941
3 1073 0.800000 118.013094 54181.408257
>>
Command History
e = [1 0.65 0.65 0.65 0.65 0.65]
RadMatrixInput(22,T,e)
T = [32 1200 1200 1200 1200 1200]
e = [1 0.85 0.85 0.85 0.85 0.85]
RadMatrixInput(22,T,e)
T=[40 430 800]
e=[1 0.65 0.8]

```

รูปที่ 4-29 หน้าต่างการใช้งานโปรแกรมที่เขียนขึ้น

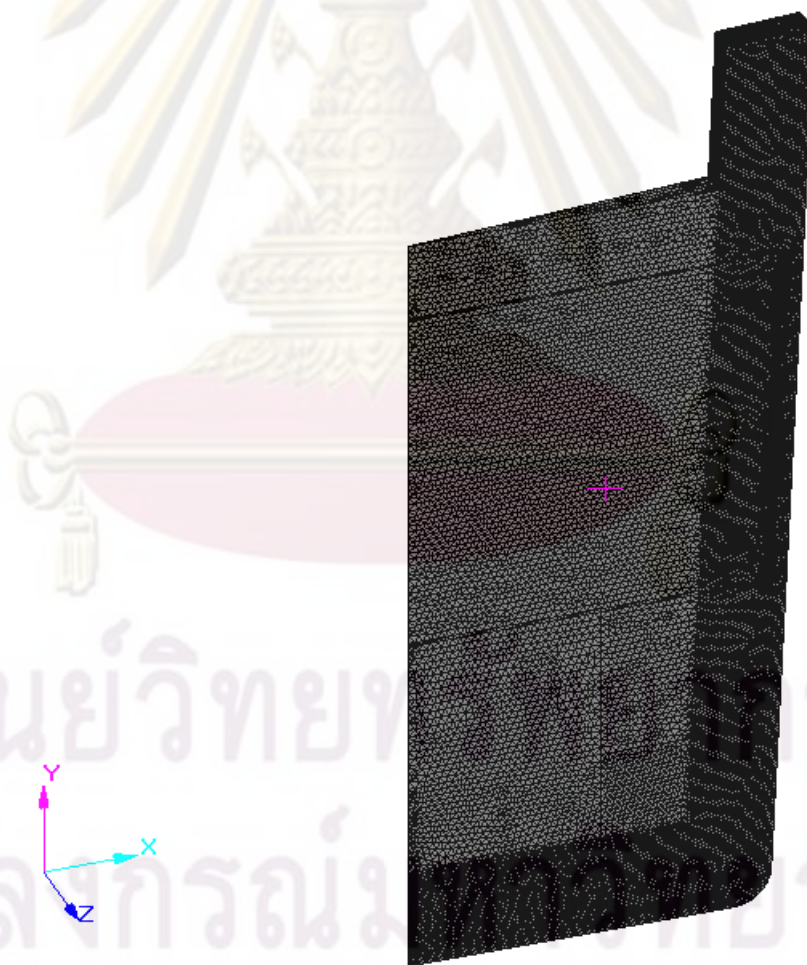
4.11 การทดสอบการคำนวณของโปรแกรม

การสอบเทียบผลการคำนวณของโปรแกรมที่เขียนขึ้น ทำโดยการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณด้วยมือ ซึ่งพบว่ามีความตรงกันทำให้เชื่อมั่นได้ว่าโปรแกรมที่เขียนขึ้นมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้

Part 3 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

4.12 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาสภาวะทางความร้อนอัตราการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ขนาด 25 ตัน ในครั้งนี้ได้ใช้แบบจำลองในขนาด 1 ต่อ 1 สร้างตามแผนผังเบ้ารับน้ำเหล็กรูปที่ 2-5 และเนื่องจากความสามารถในการจำลองแบบสมมาตรในระบบแกนทรงกระบอกของโปรแกรม ทำให้เลือกใช้แบบจำลองเพียงเสี้ยวหนึ่งของเบ้ารับน้ำเหล็ก (5° ตามแกนรัศมี) โดยแบ่งตารางในขนาด 5 mm ในการคำนวณในตำแหน่งเดียวกับที่มีการฝังเทอร์โมคัปเปิลในการทดลอง ขนาด 10 mm ในบริเวณส่วนอื่นๆ ของเบ้า และขนาด 20 mm ในบริเวณน้ำเหล็ก รูปที่ 4-30 แสดงแบบจำลองที่ใช้ ซึ่งในการคำนวณการถ่ายเทความร้อนแบ่งแบบจำลองออกเป็นส่วนๆ ตามช่วงการจำลองการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งตารางที่ 4-6 แสดงจำนวน node และ element ที่ใช้ในชั้นต่างๆ ของการ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4-30 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

ตาราง 4-6 จำนวน node และ element ในแต่ละชั้นของการคำนวณ

ชั้น	กระบวนการ	จำนวนวัสดุ	node	element
1	ค้ำรับน้ำหนัก	3	88,455	448,172
2	รอกการเทน้ำหนัก	3	88,455	448,172
3	รอกการถ่ายน้ำหนัก	24	118,015	581,428
4	ถ่ายน้ำหนัก 1	23	116,809	575,958
5	ถ่ายน้ำหนัก 2	22	115,579	570,331
6	ถ่ายน้ำหนัก 3	21	114,272	564,404
7	ถ่ายน้ำหนัก 4	20	113,051	558,890
8	ถ่ายน้ำหนัก 5	19	111,822	553,344
9	ถ่ายน้ำหนัก 6	18	110,608	547,886
10	ถ่ายน้ำหนัก 7	17	109,385	542,356
11	ถ่ายน้ำหนัก 8	16	108,160	536,835
12	ถ่ายน้ำหนัก 9	15	106,934	531,330
13	ถ่ายน้ำหนัก 10	14	105,683	525,657
14	ถ่ายน้ำหนัก 11	13	104,463	520,172
15	ถ่ายน้ำหนัก 12	12	103,282	514,882
16	ถ่ายน้ำหนัก 13	11	102,063	509,370
17	ถ่ายน้ำหนัก 14	10	100,836	503,840
18	ถ่ายน้ำหนัก 15	9	99,612	498,299
19	ถ่ายน้ำหนัก 16	8	98,411	492,926
20	ถ่ายน้ำหนัก 17	7	97,261	487,754
21	ถ่ายน้ำหนัก 18	6	96,057	482,355
22	ถ่ายน้ำหนัก 19	5	94,829	476,851
23	ถ่ายน้ำหนัก 20	4	93,578	471,200
24	รอกเทสแลก	4	93,578	471,200
25	เชื่อม และรอกการค้ำ	3	88,455	448,172

4.12.1 ช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และช่วงการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก

ในช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และช่วงการพักเบ้ารับน้ำเหล็กใช้แบบจำลองที่มีเฉพาะเบ้ารับน้ำเหล็กเท่านั้น แสดงในรูปที่ 4-31 แยกเป็นชั้นวัสดุ 3 ชั้น ได้แก่ ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กชั้นทำงาน (working lining), ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กชั้นปลอดภัย (safety lining) และเปลือกเหล็กด้านนอก (steel shell)



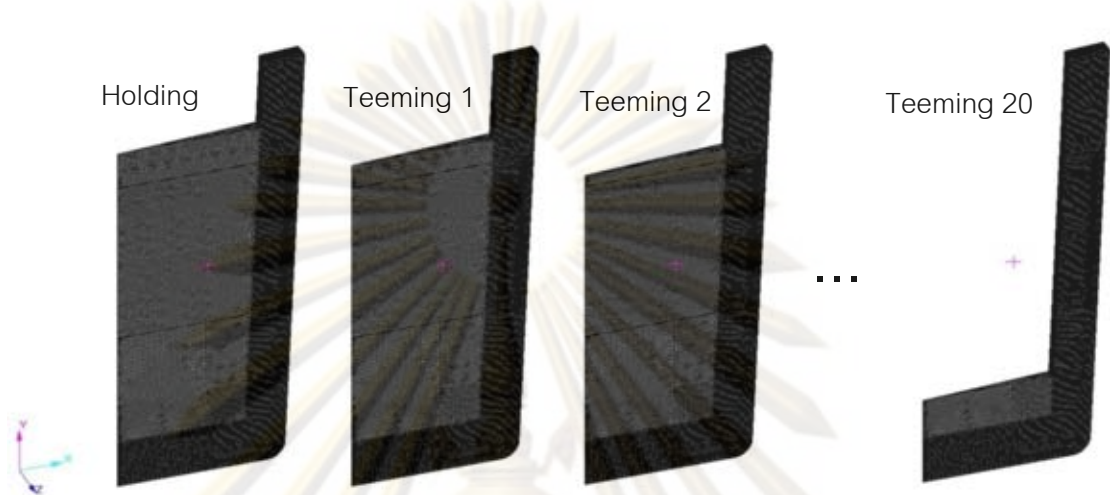
รูปที่ 4-31 แบบจำลองที่ใช้ในช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และช่วงการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก

4.12.2 ช่วงการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก

ในช่วงการรอกการถ่ายน้ำเหล็กแบบจำลองใช้แบบจำลองเดียวกับที่ใช้ในช่วงช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และช่วงการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่จะเพิ่มเติมส่วนของน้ำเหล็กที่อยู่ภายในเบ้า ซึ่งปริมาณของน้ำเหล็กในเบ้าได้มาจากค่าปริมาณน้ำเหล็ก และสแลกเฉลี่ยของทางโรงงาน แบบจำลองแบ่งออกเป็นชั้น ทั้งสิ้น 20 ชั้นเพื่อจะได้ใช้ประโยชน์ต่อไปในการจำลองช่วงการถ่ายน้ำเหล็ก รูปที่ 4-30 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในขั้นตอนนี้

4.12.3 ช่วงการถ่ายน้ำเหล็ก

ในช่วงการถ่ายน้ำเหล็ก ในการจำลองในขั้นตอนนี้จะแบ่งย่อยแบบจำลองออกเป็นชั้นตามจำนวนระดับชั้นน้ำเหล็ก รูปที่ 4-32 แสดงแบบจำลองที่ใช้ และขั้นตอนในการจำลองในขั้นตอนนี้



รูปที่ 4-32 แบบจำลองในช่วงการถ่ายน้ำเหล็ก และขั้นตอนในการจำลอง

บทที่ 5

ผลการศึกษาวิจัย และอภิปรายผลการศึกษาวิจัย

การศึกษากายภาพของความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ด้วยการจำลองการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ เมื่อพิจารณาวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.1.3 พบว่าการถ่ายเทความร้อนในแต่ละขั้นตอนมีความแตกต่างกันตามลักษณะการทำงาน ในการศึกษาจึงทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนแยกกันในแต่ละขั้นตอน ทั้งสิ้น 4 ขั้นตอนได้แก่ 1) ขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก 2) ขั้นตอนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก 3) ขั้นตอนการรอการถ่ายน้ำเหล็ก และ 4) ขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็ก เพื่อให้ได้ผลจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรในการทำงานในขั้นตอนนั้นๆ หลังจากนั้นจึงทำการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดทั้งวัฏจักรการทำงาน เพื่อให้เห็นถึงภาพรวมของการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งรายละเอียดการศึกษาแสดงในหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

5.1 การศึกษากายภาพของความร้อนในระหว่างขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (preheating period) เพื่อป้องกันความเสียหายของเบ้ารับน้ำเหล็กจาก thermal shock และลดการสูญเสียความร้อนจากน้ำเหล็กให้แก่เบ้ารับน้ำเหล็ก ในขั้นตอนนี้นั้นด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กได้รับการถ่ายเทความร้อนจากก๊าซร้อน ที่มาจากการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง ซึ่งการหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นประเด็นสำคัญที่น่าสนใจในการศึกษา

5.1.1 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

วัตถุประสงค์หลัก

เพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กต่อสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งได้แก่อุณหภูมิ และการสะสมความร้อน โดยระยะเวลาที่ใช้จำลองการอุ่นอยู่ในช่วง 0 – 3 ชั่วโมง ซึ่งเป็นระยะเวลาที่นานกว่าการทำงานของโรงงานซึ่งใช้เวลา 2 ชั่วโมง

ผลการศึกษาที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับผลจากการตรวจวัดอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ทำการอุ่นโดยน้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิง

วัตถุประสงค์รอง

เพื่อทดสอบการกำหนดค่าตัวแปรคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ เพื่อที่จะใช้ในการจำลองขั้นอื่นๆ

5.1.2 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองที่ใช้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งมีเพียงเฉพาะส่วนของเบ้าเท่านั้น รายละเอียดตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.12.1

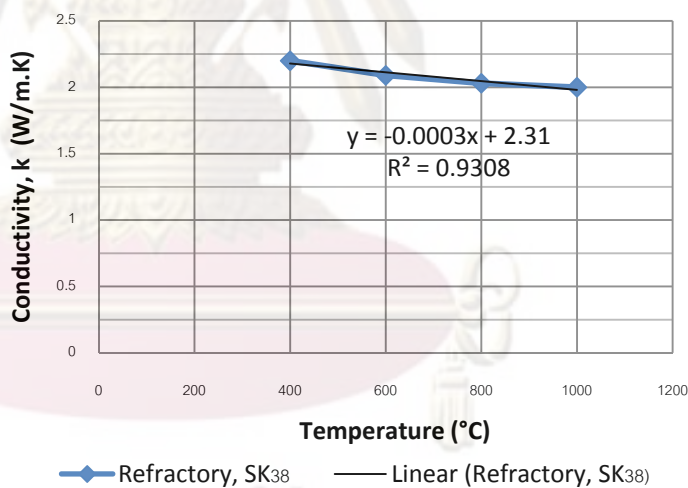
5.1.3 การกำหนดค่าตัวแปรในการศึกษา

การจำลองมีการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่ มีการกำหนดค่าโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการศึกษาดังต่อไปนี้

5.1.3.1 การกำหนดคุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุ

คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ในการศึกษาแยกเป็น 2 ชนิดได้แก่ 1) อิฐทนไฟที่อยู่ในชั้นทำงาน และชั้นปลอดภัย และ 2) เปลือกเหล็กที่อยู่ด้านนอกของเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ 5-1 และตารางที่ 5-2 ตามลำดับ

ตารางที่ 5-1 คุณสมบัติทางความร้อนของอิฐทนไฟที่ใช้ในการคำนวณ

Material	อิฐทนไฟ ชนิด SK38
Density (kg/m^3)	2,750
Thermal conductivity, k (W/m.K)	
Specific heat, C_p (J/kg.K)	1,100
Thermal diffusivity, α (m^2/s)	$7.27 \times 10^{-7} - 6.61 \times 10^{-7}$

ตารางที่ 5-2 คุณสมบัติทางความร้อนของเปลือกเหล็กที่ใช้ในการคำนวณ

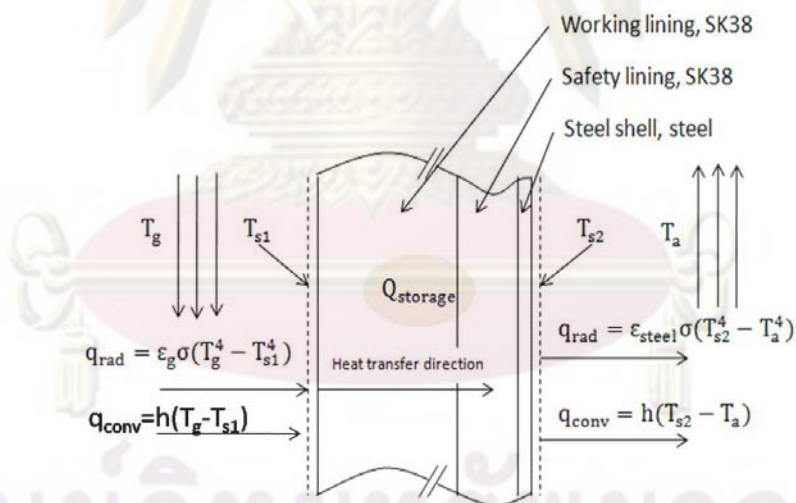
Material	เปลือกเหล็ก (steel shell)
Density (kg/m ³)	7,800
Thermal conductivity, k (W/m.K)	52
Specific heat, Cp (J/kg.K)	787
Thermal diffusivity, α (m ² /s)	8.47×10^{-6}

5.1.3.2 การกำหนดอินเทอร์เฟซระหว่างชั้นวัสดุ

กำหนดอินเทอร์เฟซระหว่างชั้นทำงาน/ชั้นปลอดภัย และชั้นปลอดภัย/ชั้นเปลือกเหล็ก โดยสมมติว่าไม่มีค่าความต้านทานทางความร้อน (thermal resistance) จึงเลือกกำหนดค่าอินเทอร์เฟซในรูปแบบ equivalence

5.1.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ของโปรแกรม

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างทำการอุ่นสามารถเขียนเป็นแผนผังการถ่ายเทความร้อนได้ ในรูปที่ 5-1 ซึ่งจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ผิวด้านใน และด้านนอกของเบ้ารับน้ำเหล็ก

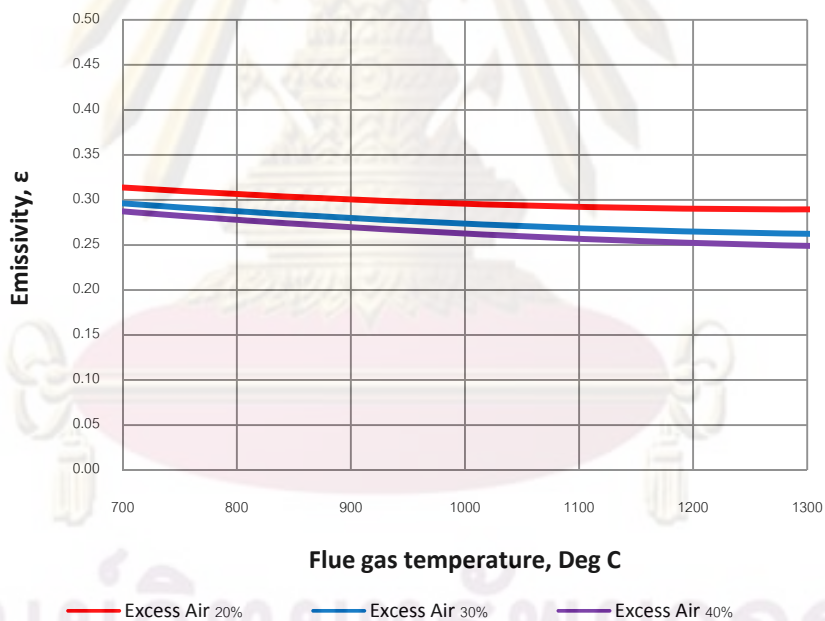


รูปที่ 5-1 การถ่ายเทความร้อนบนผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการอุ่น

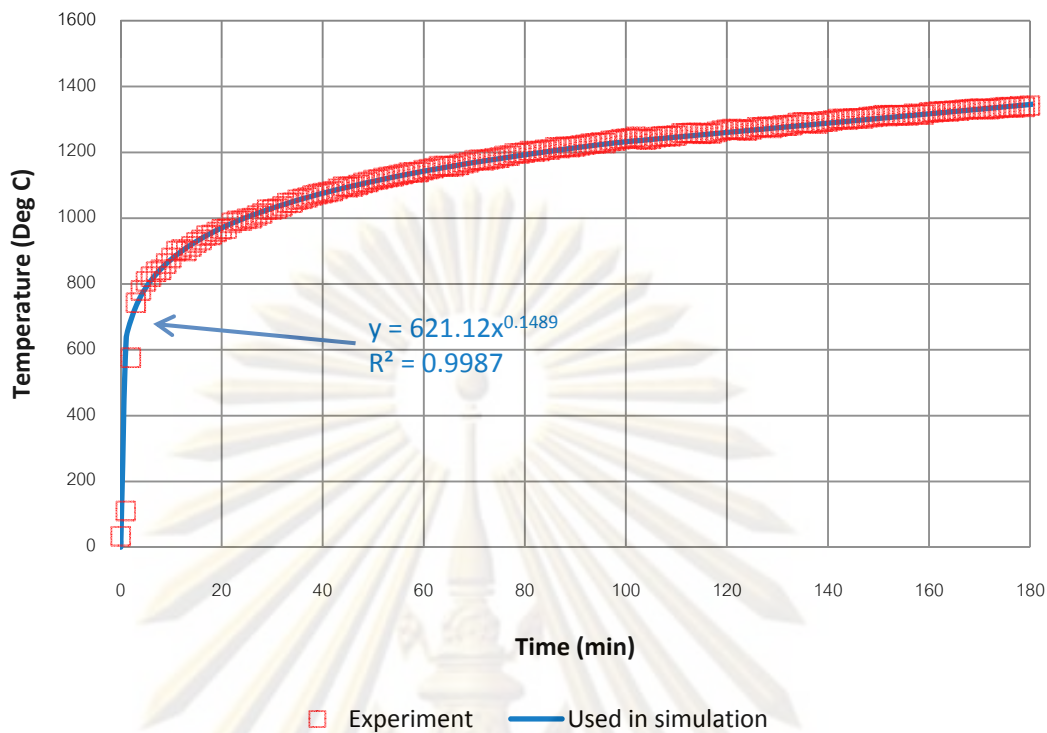
ผิวด้านในบ่ารับน้ำเหล็ก

กรณีผิวด้านในบ่ารับน้ำเหล็ก จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาของ สมศักดิ์ คงโชติ (1993) และ Mohanty และ Satayayut (1992) พบว่าการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการอุ่นบ่ารับน้ำเหล็กมาจากการแผ่รังสีความร้อนเป็นหลัก แต่อย่างไรก็ดีเพื่อให้การจำลองมีความสมบูรณจึงได้ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้มีการถ่ายเทความร้อนทั้งจากการแผ่รังสี และการพาความร้อน

เงื่อนไขขอบเขตส่วนของการแผ่รังสีความร้อน กำหนดให้เสมือนมีการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ ซึ่งคำนวณค่าสภาพการเปล่งรังสีของแก๊สเผาไหม้เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ ด้วยวิธีของ Wimpress (1978) ซึ่งในการจำลองใช้ค่าอากาศส่วนเกิน 30% ดังแสดงในรูปที่ 5-2 และค่าอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ ที่หาจากเส้นแนวโน้มของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้บริเวณกันบ่ารับน้ำเหล็ก ที่วัดได้จากการทดลอง ที่ตั้งแต่นาทีที่ 10 จนถึงนาทีที่ 180 ดังแสดงในรูปที่ 5-3 โดยกำหนดเท่ากันทั่วทั้งบริเวณผิวด้านในบ่ารับน้ำเหล็ก

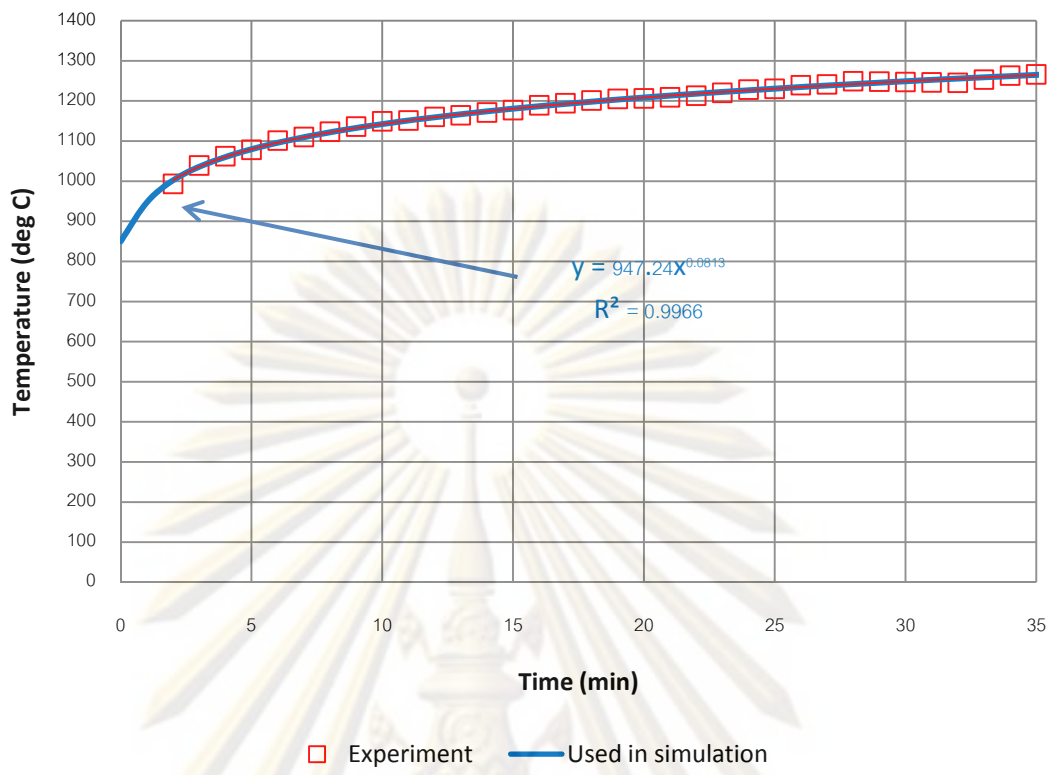


รูปที่ 5-2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพการเปล่งรังสีของแก๊สเผาไหม้กับอุณหภูมิแก๊ส



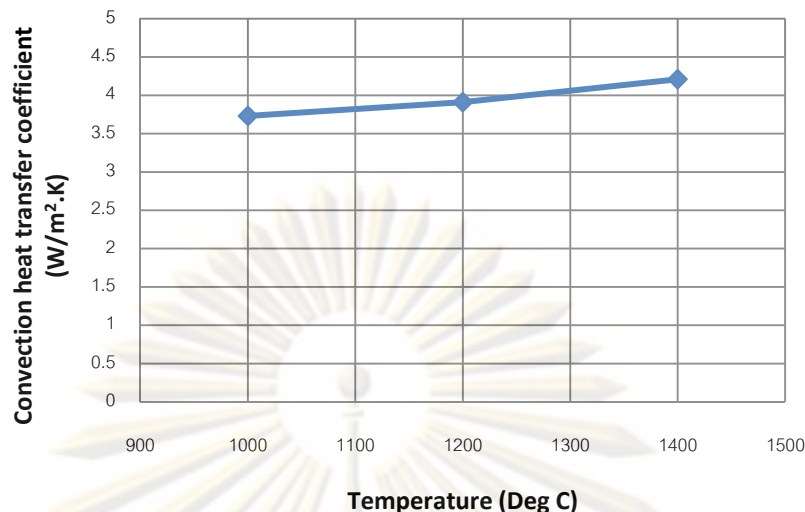
รูปที่ 5-3 คุณสมบัติของก๊าซเผาไหม้ที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างทำการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่

หนึ่งสำหรับการจำลองการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างรอบการทำงาน ได้ใช้ค่าคุณสมบัติแก๊สเผาไหม้ ที่หาจากเส้นแนวโน้มของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้บริเวณกันเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่วัดได้จากการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างรอบการทำงาน ตั้งแต่เวลาที่ 2 จนถึงเวลาที่ 35 ดังแสดงในรูปที่ 5-4



รูปที่ 5-4 อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างทำการอุ่น

เงื่อนไขขอบเขตส่วนของการพาความร้อน ประเมินความเร็วของก๊าซเผาไหม้ที่ไหลผ่านผนังด้านในเข้ารับน้ำเหล็กจากการคำนวณอัตราการไหลของก๊าซเผาไหม้ ด้วยการแบ่งอัตราส่วนพื้นที่การไหลเข้า และไหลออกเท่ากับ 1:1 ทำให้ได้ค่าความเร็วของก๊าซเผาไหม้ที่ไหลผ่านผนังด้านในเข้ารับน้ำเหล็กมีความเร็วเท่ากับ 2.8 m/s โดยสัมพันธ์กับการพาความร้อนเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิก๊าซ แสดงในรูปที่ 5-5 ซึ่งอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ที่เวลาต่างๆ ใช้เดียวกับที่ใช้ในเงื่อนไขขอบเขตส่วนการแผ่รังสีความร้อน



รูปที่ 5-5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกับอุณหภูมิแก๊ส

ผิวด้านนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก

ที่ผิวด้านนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก มีการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้มีการสูญเสียความร้อนไปยังบรรยากาศรอบข้างด้วยการแผ่รังสีความร้อน และการพาความร้อน ซึ่งเงื่อนไขขอบเขตการแผ่รังสีกำหนดให้ผิวด้านนอกเบ้ารับน้ำเหล็กแผ่รังสีไปยังสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิ 38°C ด้วยค่าสภาพการเปล่งรังสี (ϵ) ของผิวเปลือกเหล็กด้านนอกเบ้ารับน้ำเหล็กเท่ากับ 0.79

ในส่วนเงื่อนไขขอบเขตการพาความร้อนนั้น กำหนดสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอิสระเท่ากับ 5.4 W/m².K อ้างอิงจากผลการศึกษารื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ, จักรวรรุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2553) และอากาศภายนอกมีอุณหภูมิเท่ากับ 38°C

5.1.3.4 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions)

แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณมีการกำหนดอุณหภูมิเริ่มต้นในการคำนวณเท่ากันทั่วทั้งชิ้นวัตถุ มีค่าเท่ากับ 38 °C

5.1.3.5 การกำหนดระยะเวลาการจำลอง (simulation time) และขั้นระยะเวลา (time step)

ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ กำหนดระยะเวลาในการจำลองทั้งสิ้น 180 นาที ด้วยการกำหนดขั้นระยะเวลาเริ่มต้น 0.001 วินาที และขั้นระยะเวลามากที่สุด 1 วินาที

5.1.4 ผลการศึกษา และอภิปรายผลการศึกษา

ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จ ทำการจำลองการอุ่นทั้งสิ้น 180 นาที แสดงในรูปที่ 5-6 จะเห็นได้ว่า เบ้ารับน้ำเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นตลอดช่วงทำการอุ่น ซึ่งการเพิ่มของอุณหภูมิเริ่มจากที่ผิวด้านในของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กก่อน หลังจากนั้นอุณหภูมิของผนังชั้นถัดมาจะเพิ่มตาม

ในช่วง 45 นาทีแรกอุณหภูมิที่ผิวด้านในของเบ้ารับน้ำเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิจะลดลง ซึ่งสังเกตได้จากสีของผิวด้านใน

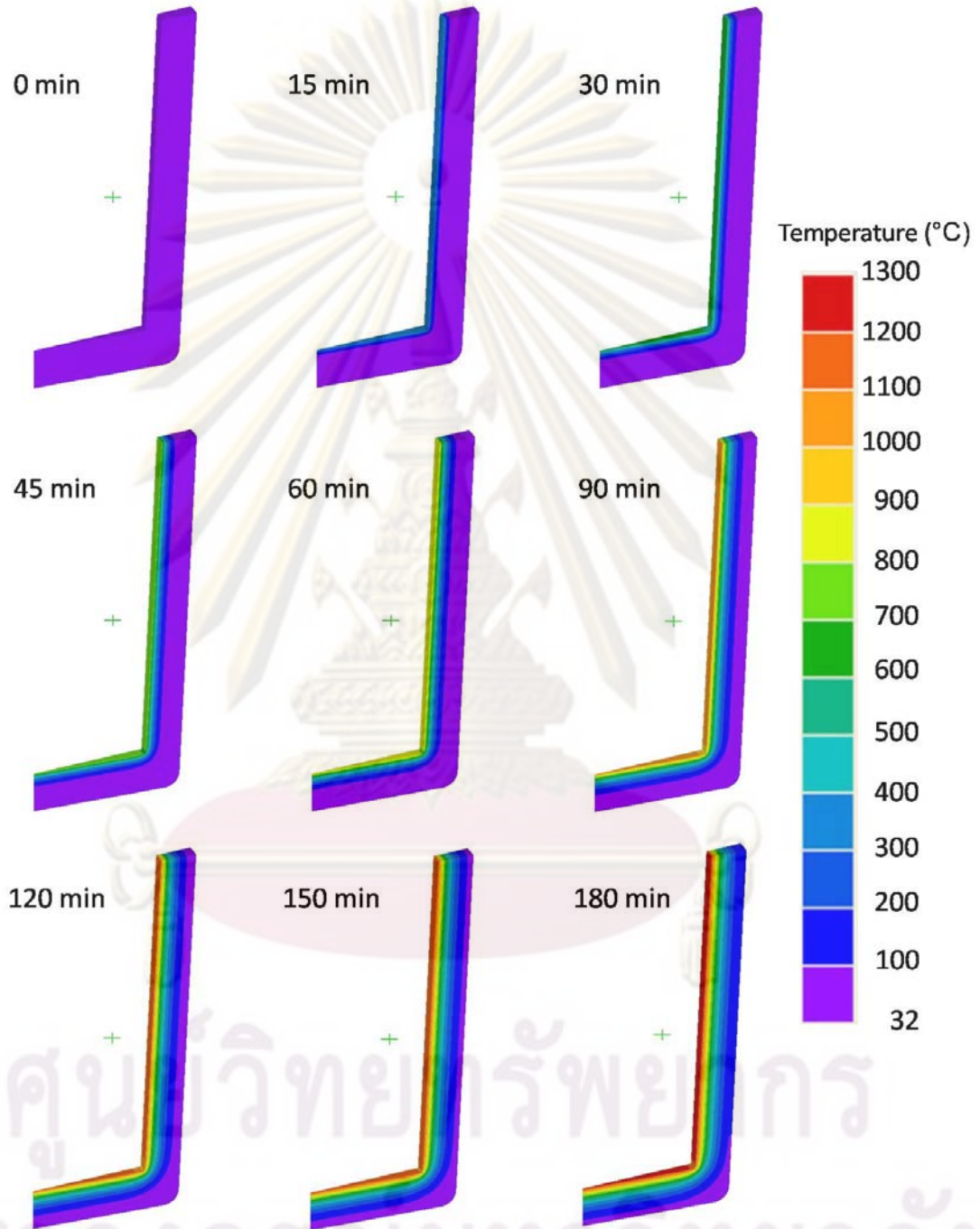
แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิผิวด้านนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดช่วงการอุ่นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากเนื่องจากความสามารถในการสะสมความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กและความเป็นฉนวนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก

รูปที่ 5-7 และ 5-8 เป็นการพล็อตเปรียบเทียบระหว่างค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิล ที่ฝังไว้ในผนังด้านของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 2 กับค่าที่ตำแหน่งเดียวกันในแบบจำลองที่ใช้อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ก้นเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นส่วนหนึ่งของตัวเงื่อนไขขอบเขต ผลปรากฏว่าการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยแบบจำลองให้ผลที่ค่อนข้างสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวัด

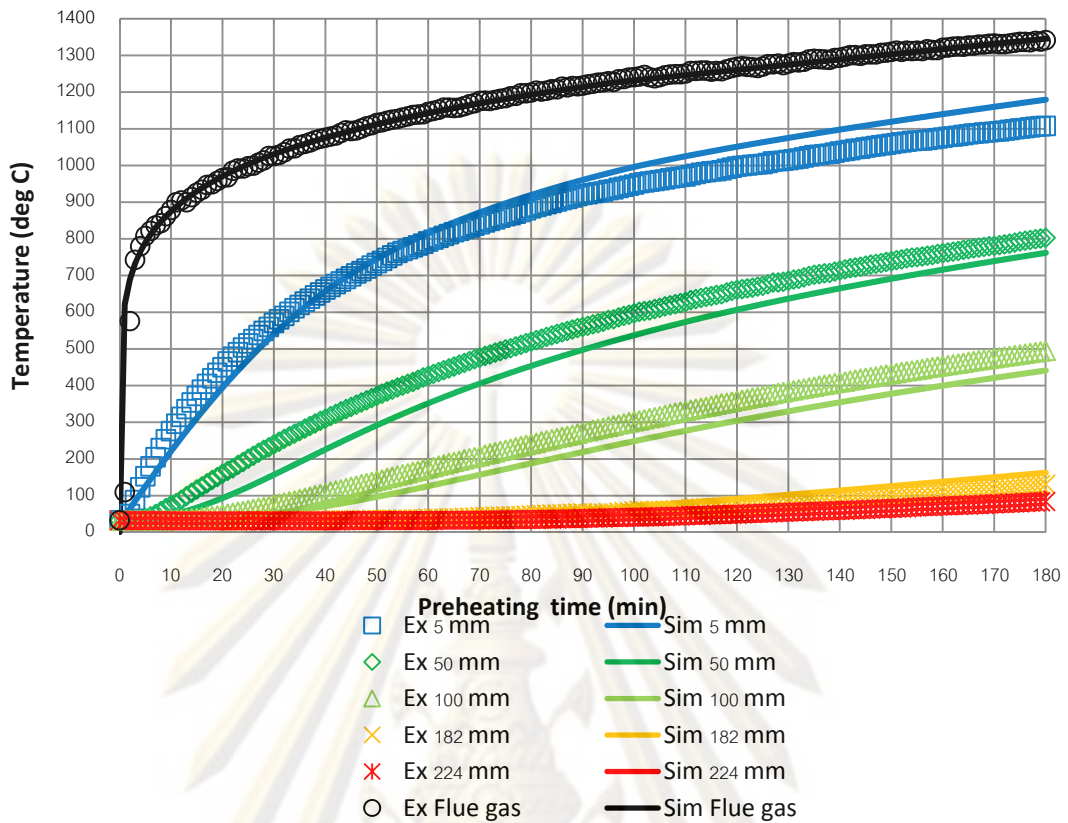
เมื่อพิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 5-7 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งใกล้ๆ กับผิวของผนังด้านในที่ระยะ 5mm ที่ระยะเวลาเริ่มต้นของการอุ่น (นาทีที่ 0 ถึง 60) มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่รวดเร็วกว่าตำแหน่งที่อยู่ลึกเข้าไปในผนังเนื่องจากคุณสมบัติของอิฐทนไฟ ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อน แต่ที่ระยะเวลาในการอุ่นเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 5 mm จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง ต่างจากตำแหน่ง 50 และ 100 mm ที่การเพิ่มของอุณหภูมิมักมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงการอุ่น 180 นาที

เมื่อพิจารณากราฟแสดงการแจกแจงอุณหภูมิในผนังข้าง ณ เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5-8 พบว่าเมื่อระยะเวลาที่ทำการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเพิ่มขึ้นความร้อนจากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะถ่ายเทเข้าลึกเข้าไปยังผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กได้มากขึ้น สังเกตได้จากอุณหภูมิภายในผนังที่เพิ่มสูงขึ้นตามเวลาแต่ระยะเวลาที่นานขึ้นในการอุ่นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการแจกแจงของอุณหภูมิที่ลดลง ซึ่งเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของการอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผิวผิวด้านใน กับระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่น ดังแสดงในรูปที่ 5-9 พบว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังด้านในจะเพิ่มสูงสุดประมาณ 40kW/m^2 ที่ระยะเวลาการอุ่นเท่ากับ 35 นาที หลังจากนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าลดลง

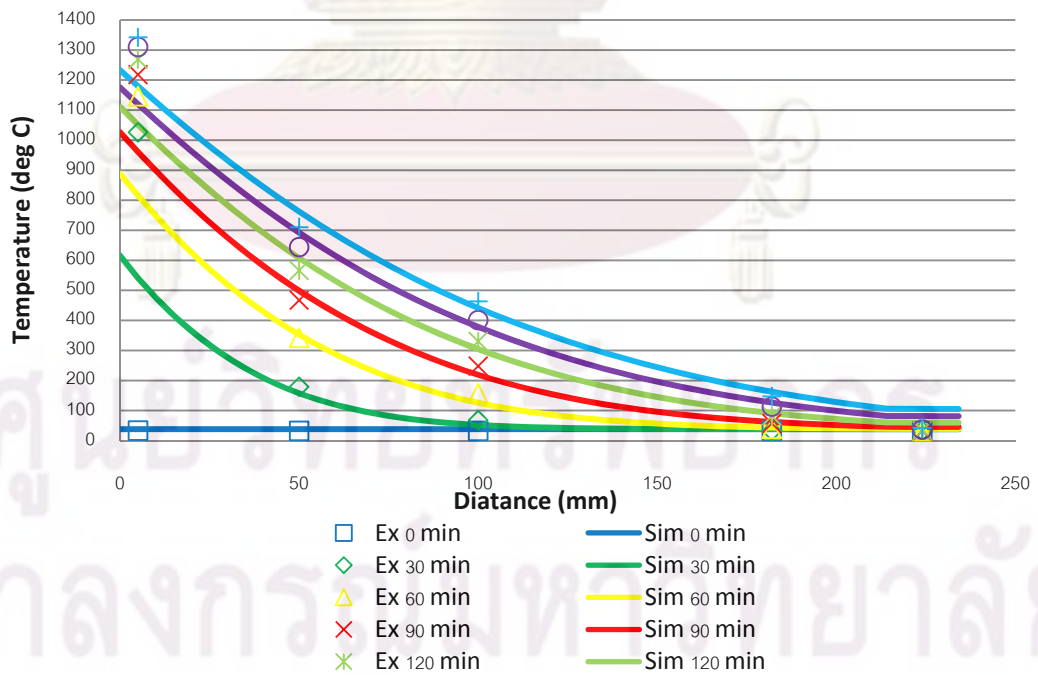
เนื่องจากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าระยะเวลาการอุ่นที่เพิ่มจาก 2 เป็น 3 ชั่วโมง ส่งผลให้อุณหภูมิผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กเพิ่มขึ้นเพียง 150 °C เท่านั้น



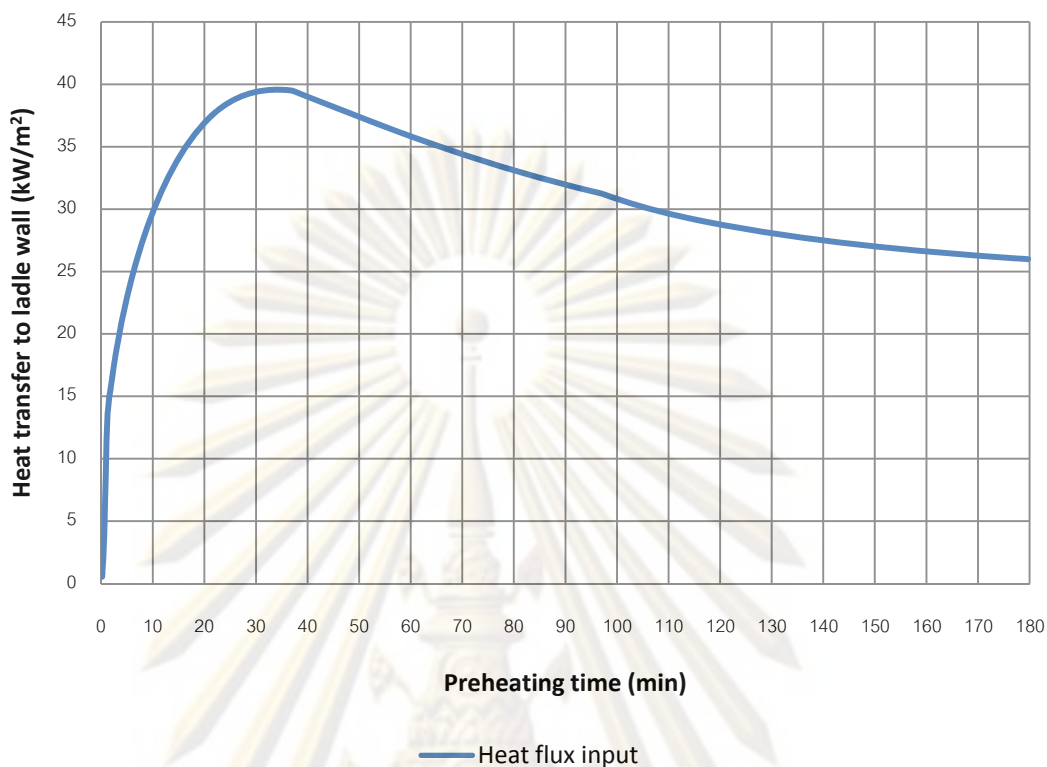
รูปที่ 5-6 ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ขณะทำการอุ่น



รูปที่ 5-7 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆในผนังข้าง เทียบกับเวลา ขณะทำการอุ่น เปรียบเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 5-8 การแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังน้ำจากการจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ ขณะทำการอุ่นเปรียบเทียบกับผลการทดลอง



รูปที่ 5-9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผิวด้านใน
กับระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่น

5.1.5 สรุปผลการศึกษา

ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จ มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง โดยการแผ่รังสีความร้อนเป็นกลไกสำคัญในการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ไปยังเบ้ารับน้ำเหล็ก, การวัดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ก้นเบ้ารับน้ำเหล็กสามารถใช้เป็นตัวแปรในการควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และระยะเวลาการอุ่นที่นานขึ้นจะส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวของผนังด้านในเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่ลดลง

นอกจากนี้ผลการจำลองยังบ่งชี้ว่า คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุที่ใช้ก่อเบ้า ที่ใช้ในการจำลองมีความเหมาะสม

5.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก

ขั้นตอนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กหมายถึงรวมถึง ขั้นตอนการรอกการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และขั้นตอนการรอกการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ในระหว่างขั้นตอนนี้ผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กมีการสูญเสียความร้อนให้แก่บรรยากาศภายนอกจากการแผ่รังสี และการพาความร้อนธรรมชาติ ซึ่งข้อมูลการสูญเสียความร้อนของเบ้าเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก

5.2.1 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ในระหว่างขั้นตอนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก แบบตั้งขึ้น ซึ่งมีการสูญเสียความร้อนจากการพาความร้อนธรรมชาติและการแผ่รังสีความร้อน ใช้ระยะเวลาในการจำลองการพักน้ำเหล็กที่ 0 – 30 นาที

5.2.2 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองที่ใช้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในขั้นตอนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งมีเพียงเฉพาะส่วนของเบ้าเท่านั้น รายละเอียดตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.12.1

5.2.3 การกำหนดค่าตัวแปรในการศึกษา

การจำลองมีการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่ มีการกำหนดค่าโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการศึกษาดังต่อไปนี้

5.2.3.1 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

การจำลองในขั้นตอนนี้กำหนดค่าคุณสมบัติทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในชั้นทำงาน ชั้นปลอกดัก และเปลือกเหล็ก เหมือนกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

5.2.3.2 การกำหนดอินเทอร์เฟซระหว่างชั้นวัสดุ

กำหนดอินเทอร์เฟซระหว่างชั้นทำงาน/ชั้นปลอกดัก และชั้นปลอกดัก/ชั้นเปลือกเหล็ก เหมือนกับกรณีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

5.2.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ของโปรแกรม

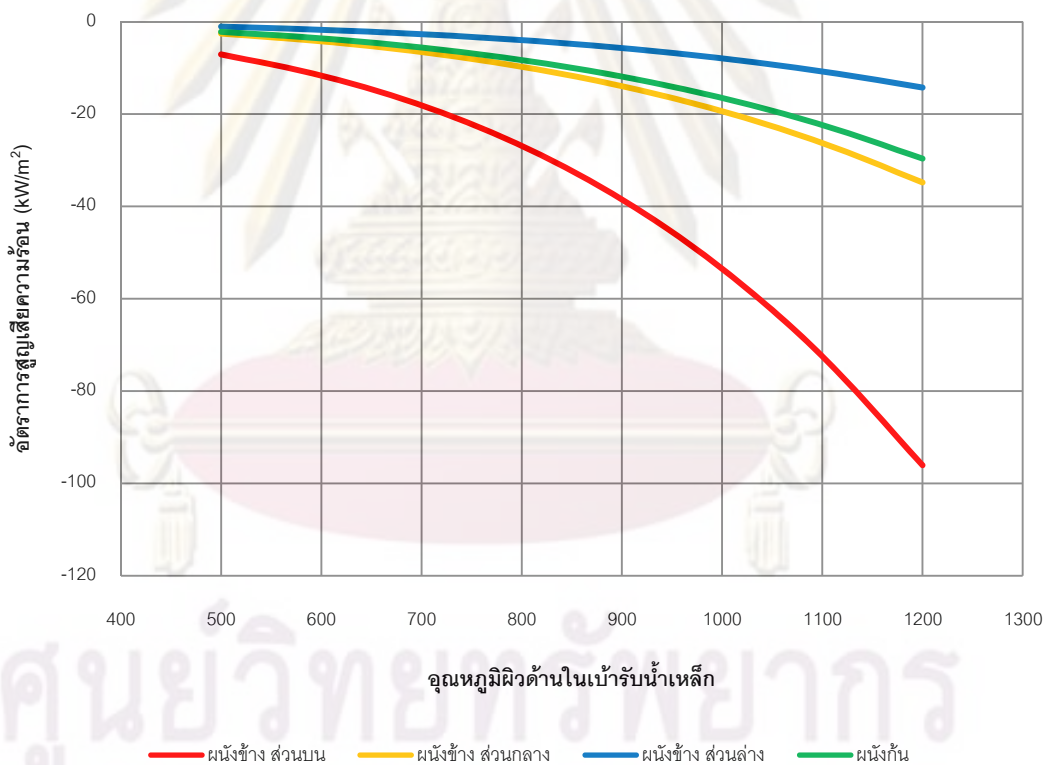
ในระหว่างขั้นตอนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก เบ้าจะมีการสูญเสียความร้อนออกจากทั้งผนังด้านในและผนังด้านนอก ผ่านการแผ่รังสี และการพาความร้อน

เมื่อพิจารณาควบคู่กับข้อมูลผลการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการพักเบ้ารับน้ำเหล็กแบบตั้งขึ้น ที่ได้จากการตรวจวัดในโรงงาน ดังแสดงในรูปที่ 3-25 ซึ่งพบว่าอุณหภูมิภายในเบ้า ที่ระยะ 0 - 100 mm จากผนังด้านใน เท่านั้นที่มีการลดลงมากในระหว่างพักเบ้ารับน้ำเหล็ก

ผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก

เงื่อนไขขอบเขตส่วนของการแผ่รังสีความร้อน กำหนดโดยการคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน จากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิว ของผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กที่แบ่งออกเป็น ส่วนๆ ด้วยโปรแกรมคำนวณสมการเชิงเส้นหลายตัวแปร ที่เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการเปล่งรังสีของพื้นผิวภายในแต่ละส่วน ดังแสดงในรูปที่ 5-10



รูปที่ 5-10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการเปล่งรังสีของพื้นผิวภายในแต่ละส่วน กับระยะเวลาที่ใช้ในการอุ่น

ลักษณะรูปทรงของเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีลักษณะเป็นถ้วยทำให้ที่บริเวณปากเบ้าจะมีการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีไปยังบรรยากาศ มากกว่าที่ตำแหน่งก้นเบ้า ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กในขณะที่ทำการพักจึงได้กำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนของผิวแต่ละส่วน ซึ่งประเมินจากการใช้โปรแกรมคำนวณสมการเชิงเส้นหลายตัวแปร (หัวข้อที่ 4.9) คำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีของผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งค่าที่ใช้ในการจำลองแสดงในตารางที่ 5-3

ตารางที่ 5-3 อัตราการถ่ายเทความร้อนของผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละส่วน

ผิว	Heat transfer rate (kW/m ²)
ผิวข้างลำดับที่ 2	-18.14
ผิวข้างลำดับที่ 4-6	-13.52
ผิวข้างลำดับที่ 8-10	-11.33
ผิวข้างลำดับที่ 12-14	-9.61
ผิวข้างลำดับที่ 16-18	-8.12
ผิวข้างลำดับที่ 20-22	-6.86
ผิวข้างลำดับที่ 24-26	-5.80
ผิวข้างลำดับที่ 28-30	-4.92
ผิวข้างลำดับที่ 32-34	-4.19
ผิวข้างลำดับที่ 36-38	-3.60
ผิวข้างลำดับที่ 40-42	-3.12
ผิวข้างลำดับที่ 44	-2.85
ผิวก้น	-4.14

เงื่อนไขขอบเขตส่วนของการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนธรรมชาตินั้น แยกเป็นส่วนของผิวข้างด้านใน และ ผิวก้นด้านใน ซึ่งมีค่า Rayleigh number เท่ากับ 8.7×10^8 และ 2.6×10^8 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อใช้สมการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ที่แสดงไว้ในตารางที่ 2-4 จะได้ว่า

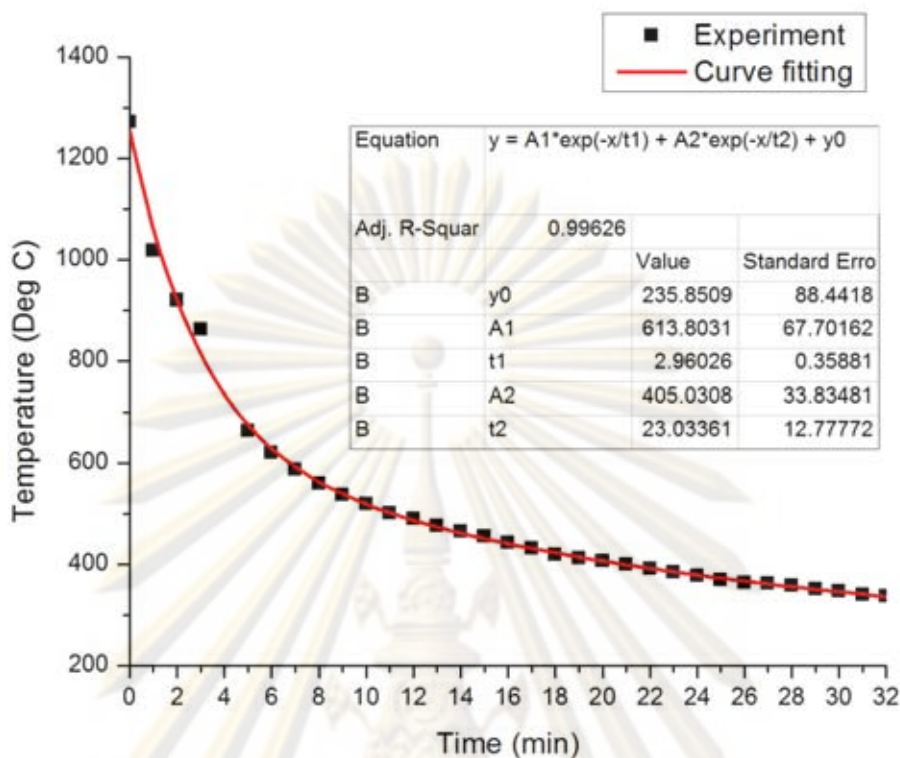
ที่ผนังข้างด้านในมีค่า

$$\bar{h} = 4.45 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (5.1)$$

และผนังก้นด้านในมีค่า

$$\bar{h} = 4.95 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} \quad (5.2)$$

ในส่วนของคุณสมบัติอากาศภายในเบ้าที่ใช้ในการทดลองนั้น หาได้จากการใช้ค่าแนวโน้มของข้อมูลคุณบัติอากาศจากการตรวจวัดในหัวข้อที่ 3.3.5 โดยใช้โปรแกรม Origin ในการสร้างสมการ ดังแสดงในรูปที่ 5-11



รูปที่ 5-11 อุณหภูมิอากาศภายในเบ้าที่ใช้ในการจำลองการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก

ผิวด้านนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเหมือนกับกรณีการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่

5.2.3.4 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions)

ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในขณะพักเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นได้ใช้ข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองการอุ่น ในหัวข้อที่ 5.1 ที่ระยะเวลาการอุ่นผ่านไปเท่ากับ 180 นาที เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลอง

5.2.3.5 การกำหนดระยะเวลาการจำลอง (simulation time) และขั้นระยะเวลา (time step)

ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ กำหนดระยะเวลาในการจำลองทั้งสิ้น 30 นาที ด้วยการกำหนดขั้นระยะเวลาเริ่มต้น 0.001 วินาที และขั้นระยะเวลามากที่สุด 1 วินาที

5.2.4 ผลการศึกษา และอภิปรายผลการศึกษา

ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการพักเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จ ทำการจำลองการอุ่นทั้งสิ้น 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 5-12 เมื่อสังเกตได้จากสีของผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กพบว่า เห็นได้ว่าเบ้ารับน้ำเหล็กมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิลดลงตลอดช่วงทำการพัก ซึ่งอุณหภูมิที่ผิวจะมีการลดลงก่อน หลังจากนั้นอุณหภูมิของผนังชั้นถัดมาจะลดลงตามมา และการลดลงของอุณหภูมิที่ปากเบ้าจะมากกว่าการลดลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งก้นเบ้า

ในช่วง 10 นาทีแรกอุณหภูมิที่ผิวด้านในของเบ้ารับน้ำเหล็กลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการลดลงของอุณหภูมิจะลดลง

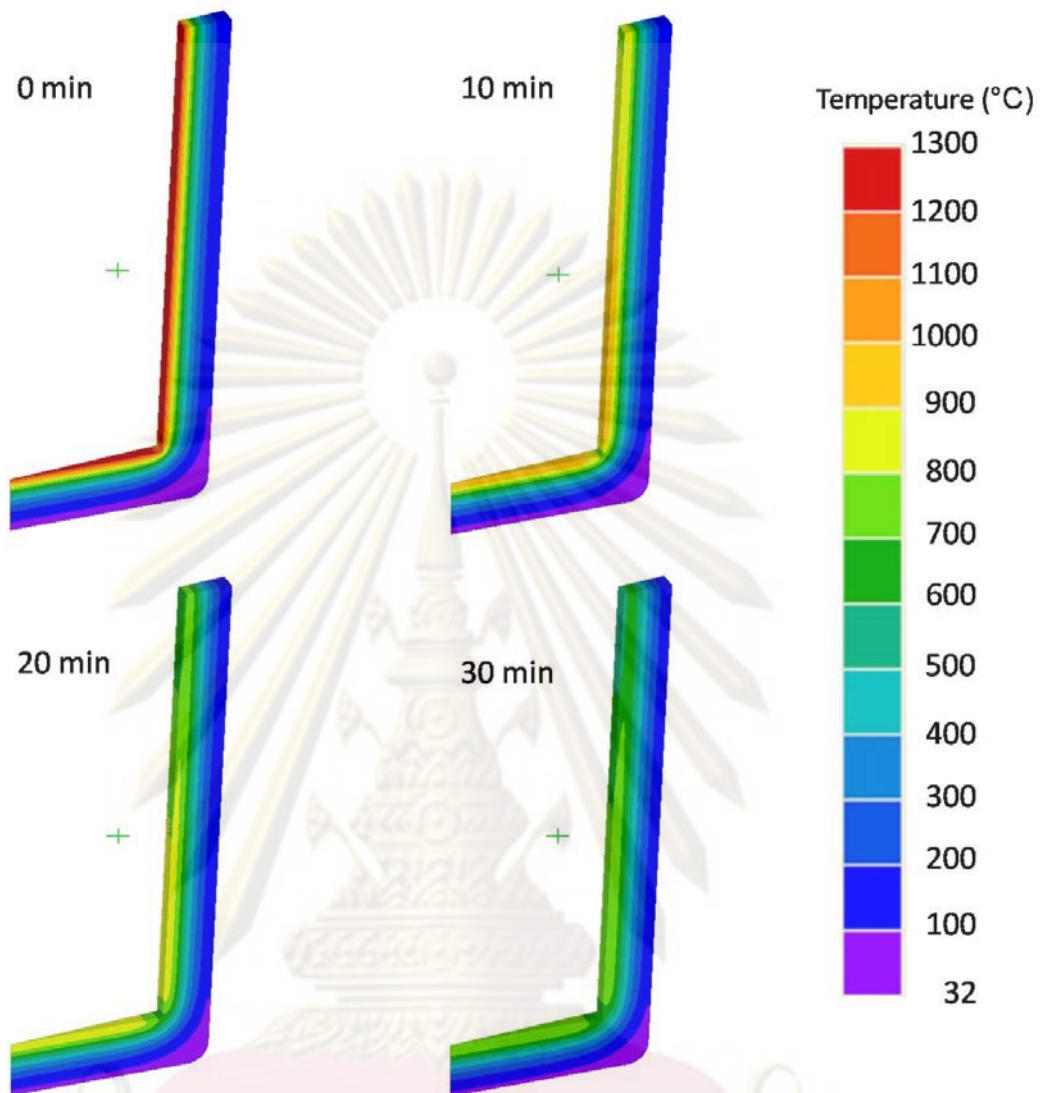
แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิผิวด้านนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดช่วงการพักมีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก เช่นเดียวกับกรณีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

เมื่อพิจารณากากราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 5-13 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งใกล้ๆ กับผิวของผนังด้านในที่ระยะ 5mm มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่รวดเร็วกว่าตำแหน่งที่อยู่ลึกเข้าไปในผนังเนื่องจากคุณสมบัติของอิฐทนไฟ ที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนต่างจากตำแหน่ง 50 และ 100 mm ที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยตลอดช่วงการพัก

เมื่อพิจารณากากราฟแสดงการแจกแจงอุณหภูมิในผนังข้าง ณ เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5-14 พบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 0 -70 mm จากผิวด้านในจะมีการลดลงอย่างรวดเร็ว แตกต่างจากที่ตำแหน่งมากกว่า 70 mm ที่อุณหภูมิจะมีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากผลของการนำความร้อนผ่านวัสดุทนไฟ

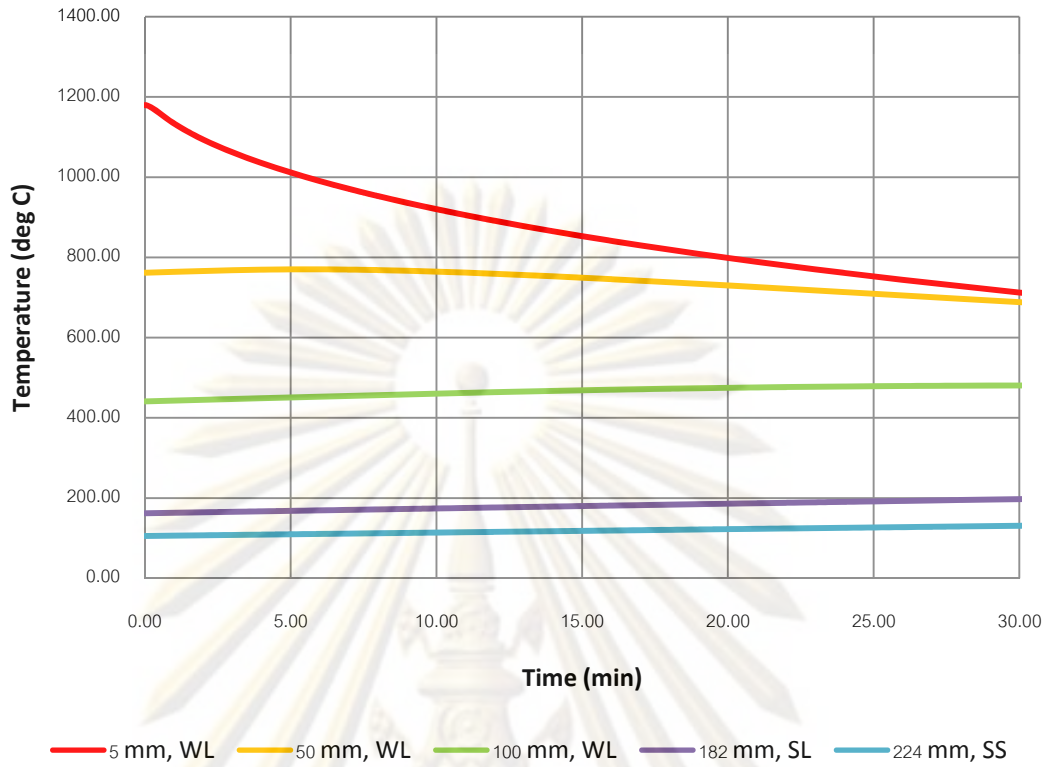
ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

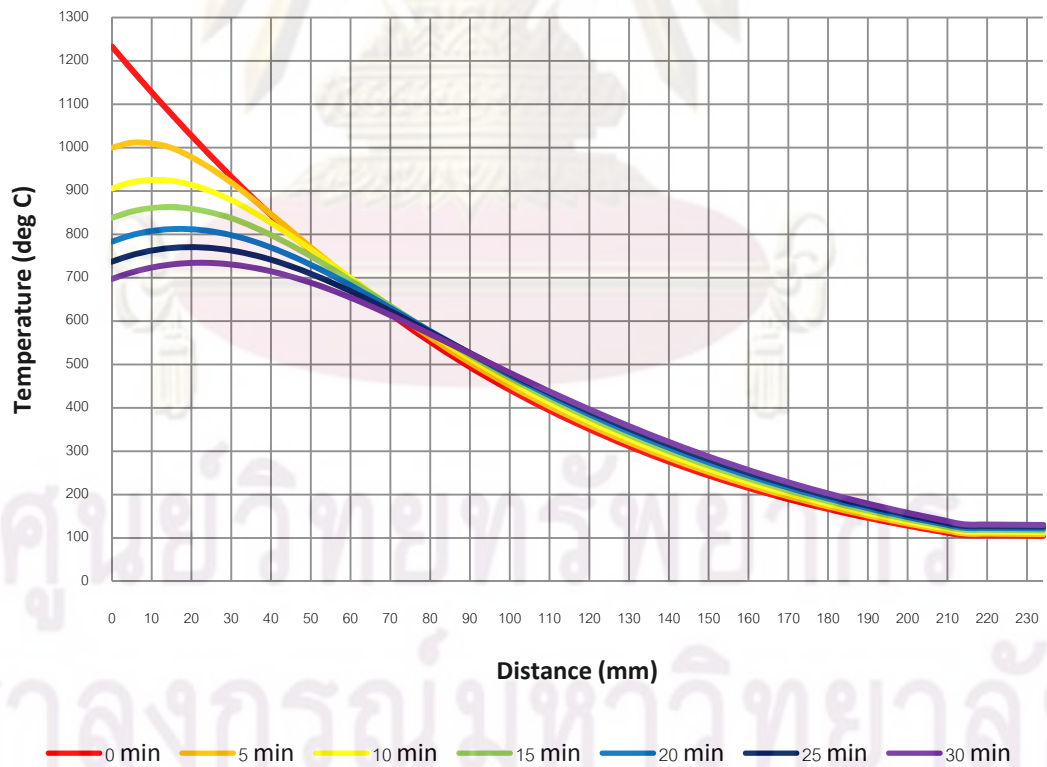


รูปที่ 5-12 ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเข้รับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ
ขณะทำการพัก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-13 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆในผนังข้าง เทียบกับเวลา ขณะทำการพัก



รูปที่ 5-14 การแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังเข้าจากการจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ ขณะทำการพัก

5.2.5 สรุปผลการศึกษา

ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก ด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จ แสดงให้เห็นถึงการลดลงของอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กในขณะทำการพัก ซึ่งในระหว่างการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก ผิวด้านในเบ้าจะมีการสูญเสียความร้อนอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในการปฏิบัติงานจึงควรลดระยะเวลาการพักเบ้าให้น้อยลงเพื่อลดการสูญเสียอุณหภูมิ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการรอการถ่ายน้ำเหล็ก

ขั้นตอนการรอการถ่ายน้ำเหล็ก (holding period) ซึ่งเป็นขั้นตอนหลังจากที่เบ้ารับน้ำเหล็กรับน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และรอการถ่ายน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก ในขั้นตอนนี้ผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กจะได้รับการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กที่บรรจุอยู่ภายใน ซึ่งข้อมูลในส่วนของการถ่ายเทความร้อนของน้ำเหล็กไปยังเบ้าที่สภาวะทางความร้อนต่างๆ จะมีความสำคัญในการกำหนดอุณหภูมิน้ำเหล็กที่มาจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่เหมาะสม

5.3.1 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

วัตถุประสงค์หลัก

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อนของน้ำเหล็ก และเบ้ารับน้ำเหล็ก ในระหว่างตั้งรอการถ่ายน้ำเหล็กเป็นระยะเวลา 0 – 30 นาที

5.3.2 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองที่ใช้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในขั้นตอนการรอการถ่ายน้ำเหล็ก เป็นแบบจำลองเบ้าที่เพิ่มเติมส่วนของน้ำเหล็กภายใน รายละเอียดตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.12.2

5.3.3 การกำหนดค่าตัวแปรในการศึกษา

การจำลองมีการกำหนดค่าโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการศึกษาดังต่อไปนี้

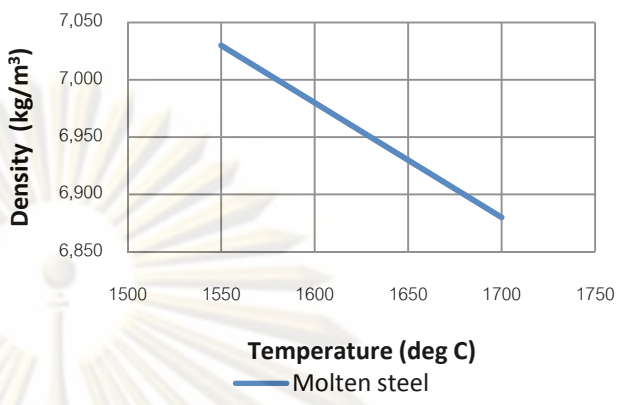
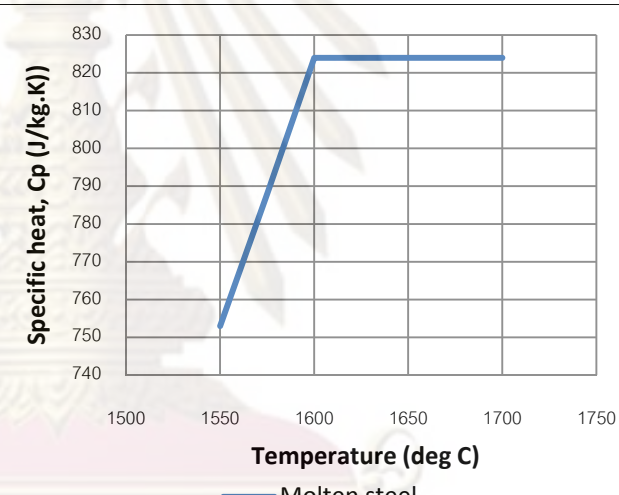
5.3.3.1 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

การจำลองในขั้นตอนนี้กำหนดค่าคุณสมบัติทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในชั้นทำงาน ชั้นปลอกภัย และเปลือกเหล็ก เหมือนกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ในส่วนของคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำเหล็กนั้น การจำลองมีสมมุติฐานให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กในส่วนใดๆ ของแบบจำลองเกิดขึ้นพร้อมกัน (Lump capacitance method) ซึ่งทำได้โดยการกำหนดให้ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) มีค่ามาก กรณีนี้กำหนดให้เท่ากับ 10,000 W/m.K

ซึ่งคุณสมบัติทางความร้อนของน้ำเหล็กในแบบจำลองขั้นตอนนี้ กำหนดดังแสดงในตารางที่ 5-4

ตารางที่ 5-4 คุณสมบัติทางความร้อนของน้ำเหล็กที่ใช้ในการคำนวณ

Material	น้ำเหล็ก (molten steel)										
Density (kg/m^3)	 <table border="1"> <caption>Data for Density vs Temperature</caption> <thead> <tr> <th>Temperature (deg C)</th> <th>Density (kg/m^3)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1550</td> <td>7,030</td> </tr> <tr> <td>1600</td> <td>6,960</td> </tr> <tr> <td>1650</td> <td>6,900</td> </tr> <tr> <td>1700</td> <td>6,880</td> </tr> </tbody> </table>	Temperature (deg C)	Density (kg/m^3)	1550	7,030	1600	6,960	1650	6,900	1700	6,880
Temperature (deg C)	Density (kg/m^3)										
1550	7,030										
1600	6,960										
1650	6,900										
1700	6,880										
Thermal conductivity, k (W/m.K)	10,000										
Specific heat, Cp (J/kg.K)	 <table border="1"> <caption>Data for Specific heat, Cp vs Temperature</caption> <thead> <tr> <th>Temperature (deg C)</th> <th>Specific heat, Cp (J/kg.K)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1550</td> <td>750</td> </tr> <tr> <td>1600</td> <td>825</td> </tr> <tr> <td>1650</td> <td>825</td> </tr> <tr> <td>1700</td> <td>825</td> </tr> </tbody> </table>	Temperature (deg C)	Specific heat, Cp (J/kg.K)	1550	750	1600	825	1650	825	1700	825
Temperature (deg C)	Specific heat, Cp (J/kg.K)										
1550	750										
1600	825										
1650	825										
1700	825										

5.3.3.2 การกำหนดอินเทอร์เฟซระหว่างชิ้นวัสดุ

กำหนดอินเทอร์เฟซระหว่างชิ้นทำงาน/ชิ้นปลดภัย และชิ้นปลดภัย/ชิ้นเปลือกเหล็ก เหมือนกับกรณีการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

สำหรับอินเทอร์เฟซระหว่างน้ำเหล็ก/ชิ้นทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก นั้นเลือกกำหนดในรูปแบบ Non-coincident เพราะน้ำเหล็กเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลองที่เพิ่มเข้ามาจากแบบจำลองเดิมที่มีเฉพาะส่วนของเบ้า ซึ่งค่า Heat transfer coefficient ($\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) ระหว่างน้ำเหล็ก/ชิ้นทำงานกำหนด การเลือกใช้ค่าที่ทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำเหล็ก/ชิ้นทำงาน ของแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งสรุปได้ว่าค่า Heat transfer coefficient ที่มีค่าเท่ากับ $500 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ซึ่งทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อน

ระหว่างน้ำเหล็กและชั้นทำงาน มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Xia และ Ahokainen (2001) ดังแสดงในรูปที่ 2-37

5.3.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ของโปรแกรม

ผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กเหนือระดับน้ำเหล็ก

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กเหนือระดับน้ำเหล็กด้วยค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กเหนือระดับน้ำเหล็กที่ 20 kW/m^2 ที่ได้จากการประเมินการถ่ายเทความร้อน ด้วยโปรแกรมคำนวณสมการเชิงเส้นหลายตัวแปรที่กำหนดให้การแผ่รังสีความร้อนของผิวน้ำสแลกที่มีอุณหภูมิคงที่เท่ากับ 800°C

ผิวด้านบนน้ำเหล็ก

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตโดยการประเมินการสูญเสียความร้อนจากการแผ่รังสีของผิวน้ำน้ำเหล็กไปยังบรรยากาศรอบข้างโดยอาศัยข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิผิวสแลกโดยใช้กล้องถ่ายภาพรังสีอินฟราเรด ทำให้กำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากผิวสแลกที่ 59.9 kW/m^2

ผิวด้านนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเหมือนกับกรณีการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่

5.3.3.4 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions)

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองการถ่ายเทความร้อน ในส่วนของเบ้ารับน้ำเหล็กโดยการใช้ข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองการอุ่น ในหัวข้อที่ 5.1 ที่ระยะเวลาการอุ่นผ่านไปเท่ากับ 120 นาที ซึ่งอุณหภูมิผิวของเบ้ามีค่าประมาณ $1,100^\circ\text{C}$ และกำหนดอุณหภูมิน้ำเหล็กเริ่มต้นที่ $1,700^\circ\text{C}$

5.3.3.5 การกำหนดระยะเวลาการจำลอง (simulation time) และขั้นระยะเวลา (time step)

ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ กำหนดระยะเวลาในการจำลองทั้งสิ้น 30 นาที ด้วยการกำหนดขั้นระยะเวลาเริ่มต้น 0.001 วินาที และขั้นระยะเวลามากที่สุด 1 วินาที

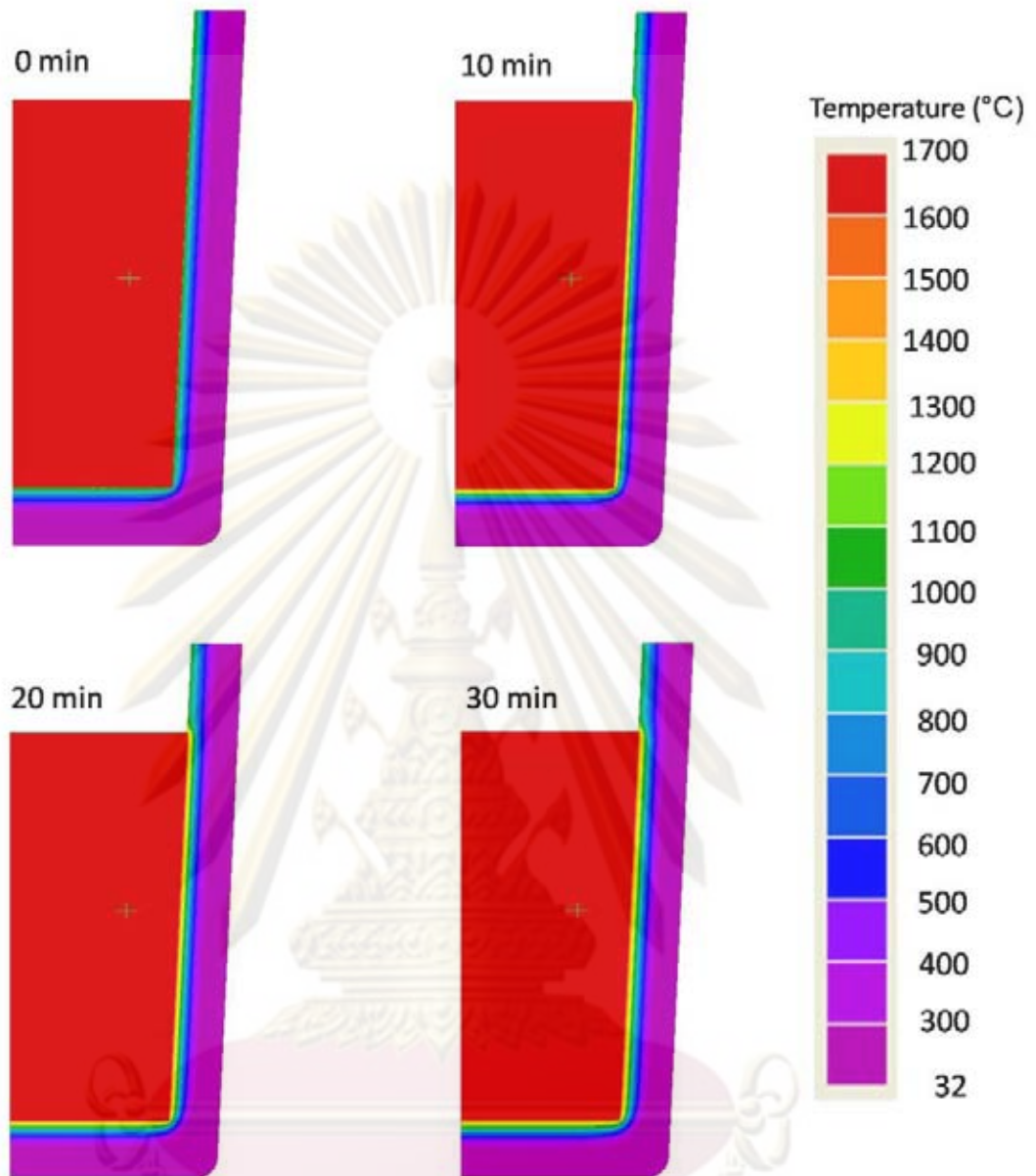
5.3.4 ผลการศึกษา และอภิปรายผลการศึกษา

ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก เป็นระยะเวลาตั้งแต่ 0 - 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 5-15 พบว่าเมื่อรับน้ำเหล็กบริเวณที่สัมผัสกับน้ำเหล็กจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วในช่วง 10 นาทีแรก

เมื่อพิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา ดังแสดงในรูปที่ 5-16 พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งใกล้ๆ กับผิวของผนังด้านในที่ระยะ 5mm มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่รวดเร็วเนื่องจากอยู่ใกล้กับน้ำเหล็ก จึงได้รับการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กมากกว่า ตำแหน่ง 50 และ 100 mm ที่อยู่ไกลออกไป

เมื่อพิจารณากราฟแสดงการแจกแจงอุณหภูมิในผนังข้าง ณ เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5-17 พบว่าการอุณหภูมิภายในผนังจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก นอกจากนี้กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กเทียบกับเวลา ขณะทำการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก รูปที่ 5-18 แสดงให้เห็นว่าในขณะการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก อุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเบ้าจะมีการลดลง ซึ่งการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กในช่วงแรกของการรอกการถ่ายน้ำเหล็กจะมากกว่าในช่วงหลัง โดยมีอัตราการลดลงเฉลี่ยที่ $2.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ สอดคล้องกับผลจากการตรวจวัดภาคสนามในหัวข้อที่ 3.7

อัตราการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กมายังเบ้ารับน้ำเหล็กแสดงในรูปที่ 5-19 สังเกตได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงในช่วงแรกเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็ก หลังจากนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเนื่องจากบริเวณเบ้ารับน้ำเหล็กที่สัมผัสกับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

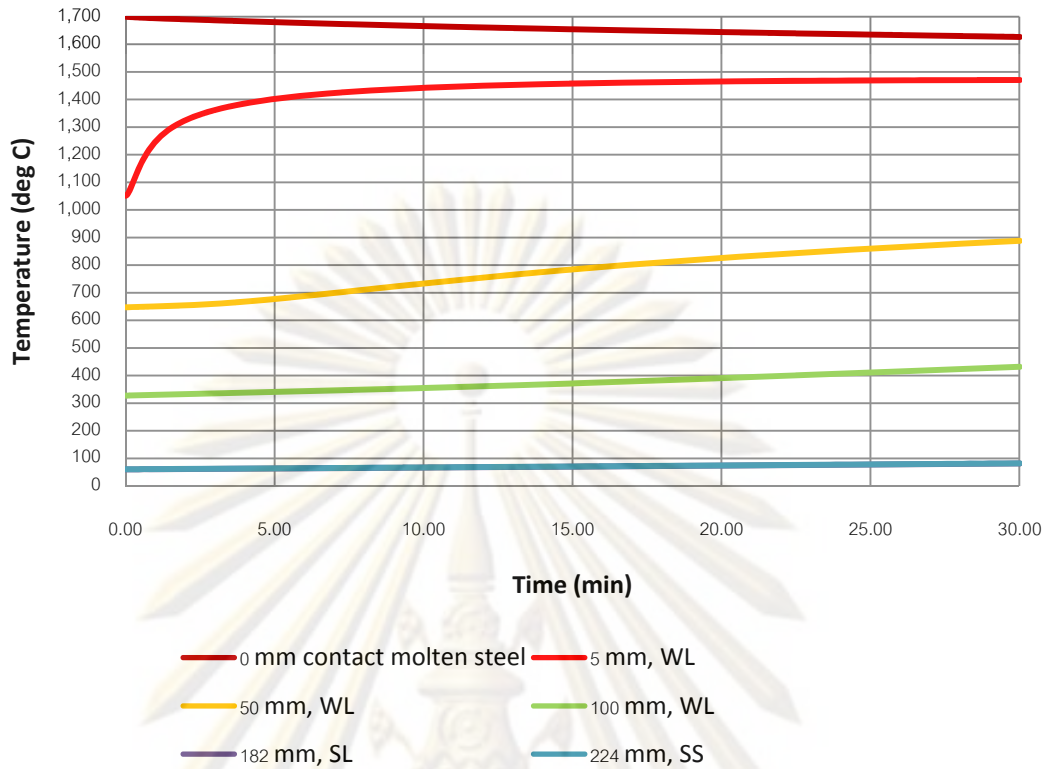


รูปที่ 5-15 ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ

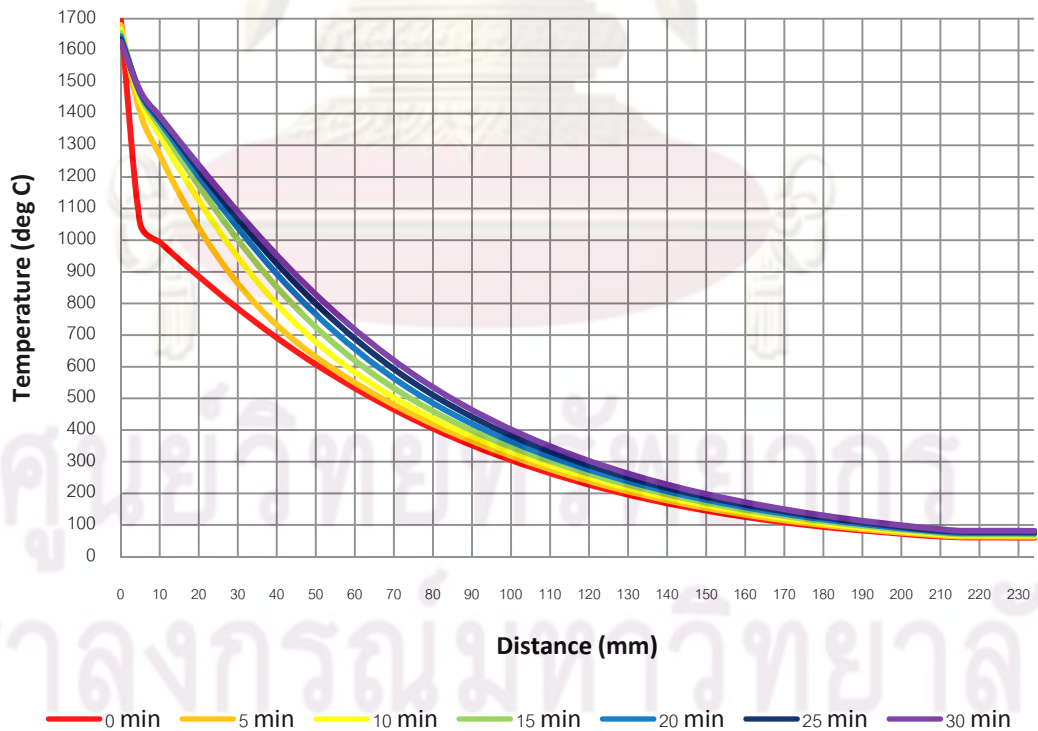
ขณะทำการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร

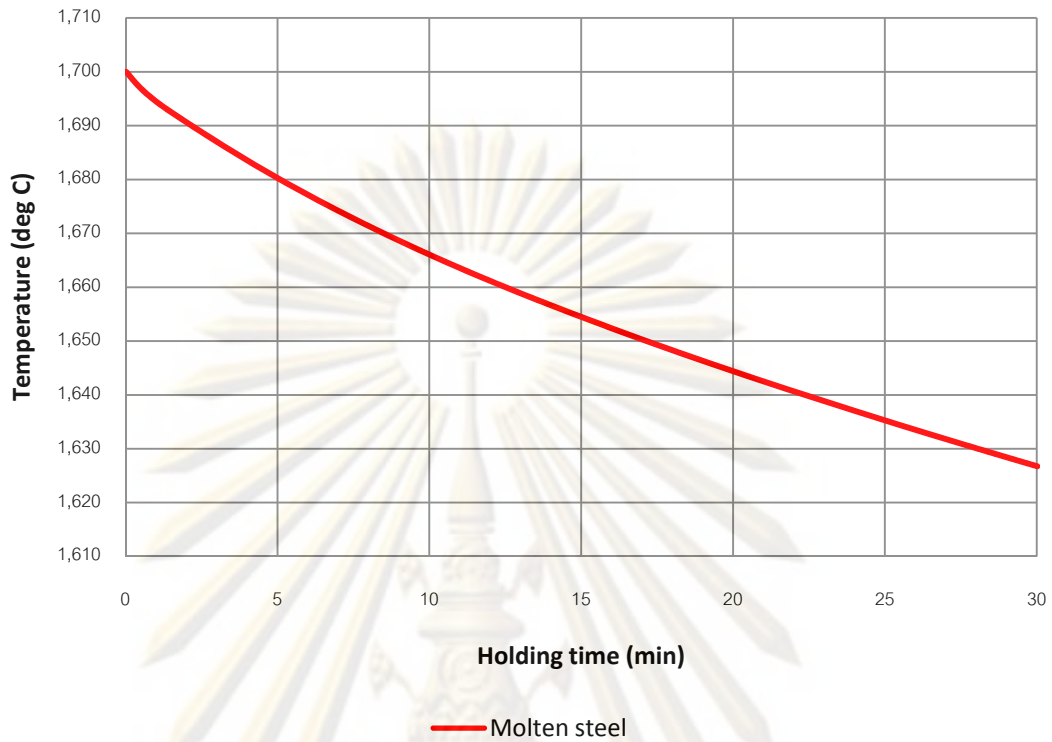
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



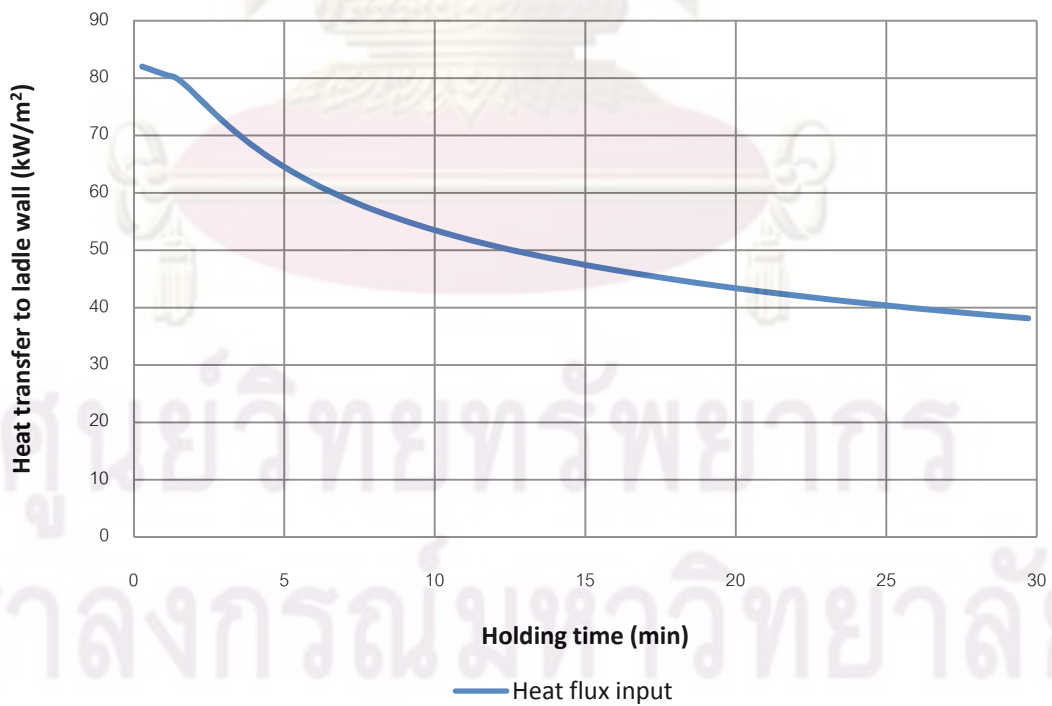
รูปที่ 5-16 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆในผนังข้าง เทียบกับเวลา ขณะทำการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก



รูปที่ 5-17 การแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังเบ้าจากการจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ ขณะทำการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก



รูปที่ 5-18 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเหล็กเทียบกับเวลา
ขณะทำการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก



รูปที่ 5-19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผิวด้านในเบ้า
กับระยะเวลาที่ใช้ในการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก

5.3.5 สรุปผลการศึกษา

ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก ด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเหล็ก และเบ้ารับน้ำเหล็กในขณะทำการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก โดยจะเห็นได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำเหล็กมายังเบ้าในช่วงต้นของการบรรจุน้ำเหล็กยังมีค่าสูง หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิบริเวณผิวด้านในเพิ่มขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนจะลดลง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ควบคุมอัตราการถ่ายเทความร้อนของน้ำเหล็กในระหว่างที่บรรจุอยู่ภายในเบ้า ดังนั้น

5.4 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็ก

ขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็ก ซึ่งน้ำเหล็กภายในเบ้าจะมีการลดระดับลงไปเรื่อยๆ ตามระยะเวลา ในขั้นตอนนี้การถ่ายเทความร้อนของผนังเบ้าด้านในจะแบ่งออกเป็นสองบริเวณ ได้แก่ 1) บริเวณด้านบนเหนือระดับน้ำเหล็ก การถ่ายเทความร้อนที่ส่วนนี้จะเป็นการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวหลายผิว ได้แก่ ผิวข้าง ผิวหน้าสแลกที่ปกคลุมผิวหน้าน้ำเหล็ก และผิวเสมือนด้านบนบริเวณขอบปากเบ้ารับน้ำเหล็ก และการพาความร้อนธรรมชาติของอากาศที่สัมผัสกับผนังข้างด้านใน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนในส่วนนี้จะคล้ายกับการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก และ 2) บริเวณด้านล่างระดับน้ำเหล็กที่มีการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กเข้าสู่ผนังด้านใน ซึ่งเหมือนกับขั้นตอนการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก

5.4.1 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อนของน้ำเหล็ก และเบ้ารับน้ำเหล็ก ในระหว่างขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็กไปยังอ่างรับน้ำเหล็ก

5.4.2 แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา

แบบจำลองที่ใช้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนในขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็ก รายละเอียดตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.12.3 ซึ่งแม้ว่าแบบจำลอง และโปรแกรมคำนวณสมการเชิงเส้นหลายตัวแปรจะได้ออกแบบมาสำหรับการแบ่งขั้นตอนในการจำลองออกเป็น 20 ขั้นก็ตาม แต่เพื่อความสะดวกในการศึกษาจึงเลือกใช้เพียง 10 ขั้น โดยรวมขั้นการถ่ายน้ำเหล็กขั้นที่ติดกันเข้าด้วยกัน ตามตารางที่ 5-5

ตารางที่ 5-5 การยุบรวมชั้นถ่ายน้ำเหล็กในการจำลอง จาก 20 เป็น 10 ชั้น

ลำดับชั้นการถ่ายน้ำเหล็กที่	แบบจำลองชั้นที่
1 และ 2	1
3 และ 4	2
5 และ 6	3
7 และ 8	4
9 และ 10	5
11 และ 12	6
13 และ 14	7
15 และ 16	8
17 และ 18	9
19 และ 20	10

5.4.3 การกำหนดค่าตัวแปรในการศึกษา

การจำลองมีการกำหนดค่าโปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการศึกษาดังต่อไปนี้

5.4.3.1 การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ

คุณสมบัติทางความร้อนของวัสดุในส่วนของเบ้ารับน้ำเหล็กและ น้ำเหล็ก กำหนดเหมือนกับในหัวข้อที่ 5.1.3.1 และหัวข้อที่ 5.3.3.1 ตามลำดับ

5.4.3.2 การกำหนดอินเทอร์เฟซระหว่างชั้นวัสดุ

กำหนดอินเทอร์เฟซระหว่างชั้นวัสดุเหมือนกับการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการรอกการถ่ายน้ำเหล็กในหัวข้อที่ 5.3.3.2

5.4.3.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ของโปรแกรม

ผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กเหนือระดับน้ำเหล็ก

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตบริเวณผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กเหนือระดับน้ำเหล็กด้วยค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผิวด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กเหนือระดับน้ำเหล็ก ที่ได้จากการประเมินการถ่ายเทความร้อน ด้วยโปรแกรมคำนวณสมการเชิงเส้นหลายตัวแปร ดังแสดงในตารางที่ 5-6

ผิวด้านบนน้ำเหล็ก

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเหมือนกับกรณีการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก

ผิวด้านนอกเข้รับน้ำเหล็ก

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตเหมือนกับกรณีการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างขั้นตอนการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่

ตารางที่ 5-6 การถ่ายเทความร้อนของผิวด้านในเข้รับน้ำเหล็กในแต่ละแบบจำลอง แยกเป็นแต่ละพื้นผิว

	ชั้นในการจำลอง									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ลำดับผิวข้าง	อัตราการถ่ายเทความร้อน (kW/m ²)									
2	-8.8	-8.8	-4.4	-4.4	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2
4	-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2
6	-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2
8		-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4	-4.4	-2.2	-2.2	-2.2
10		-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4	-4.4	-2.2	-2.2	-2.2
12			-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4	-2.2
14			-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4	-2.2
16				-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4
18				-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4
20					-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4	-4.4
22					-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4	-4.4
24						-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4
26						-30.6	-16.6	-8.8	-4.4	-4.4
28							-30.6	-16.6	-8.8	-4.4
30							-30.6	-16.6	-8.8	-4.4
32								-30.6	-16.6	-8.8
34								-30.6	-16.6	-8.8
36									-30.6	-16.6
38									-30.6	-16.6
40										-30.6
42										-30.6

5.4.3.4 การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (initial conditions)

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองการถ่ายเทความร้อน ทั้งในส่วนของน้ำเหล็กและเข้รับน้ำเหล็ก โดยการใช้อยู่ข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองในขั้นตอนการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก เมื่อระยะเวลาในการรอกผ่านไป 12 นาที ซึ่งระยะเวลานี้อ้างอิงจากข้อมูลการผลิตของโรงงานตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3

5.4.3.5 การกำหนดระยะเวลาการจำลอง (simulation time) และขั้นระยะเวลา (time step)

เนื่องจากแบบจำลองได้แบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยๆ ทั้งสิ้น 10 ขั้นตอน แม้ว่าแบบจำลองซึ่งระยะเวลาการจำลองในแต่ละขั้นตอนเท่ากับ 5.6 นาที รวมระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็กทั้งสิ้น 56 นาที ซึ่งระยะเวลานี้อ้างอิงจากข้อมูลการผลิตของโรงงานตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.3 ตารางที่ 5-7 แสดงระยะเวลาในแต่ละขั้นตอน

ตารางที่ 5-7 ระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละขั้นของแบบจำลอง

แบบจำลองขั้นที่	ระยะเวลาในการถ่ายน้ำเหล็ก (นาที)	
	เริ่ม	สิ้นสุด
1	0.0	5.6
2	5.6	11.2
3	11.2	16.8
4	16.8	22.4
5	22.4	28.0
6	28.0	33.6
7	33.6	39.2
8	39.2	44.8
9	44.8	50.4
10	50.4	56.0
รวมระยะเวลาถ่ายน้ำเหล็ก (นาที)		56.0

ในการจำลองในแต่ละขั้นย่อยกำหนดขั้นระยะเวลาเริ่มต้น 0.001 วินาที และขั้นระยะเวลามากที่สุด 1 วินาที

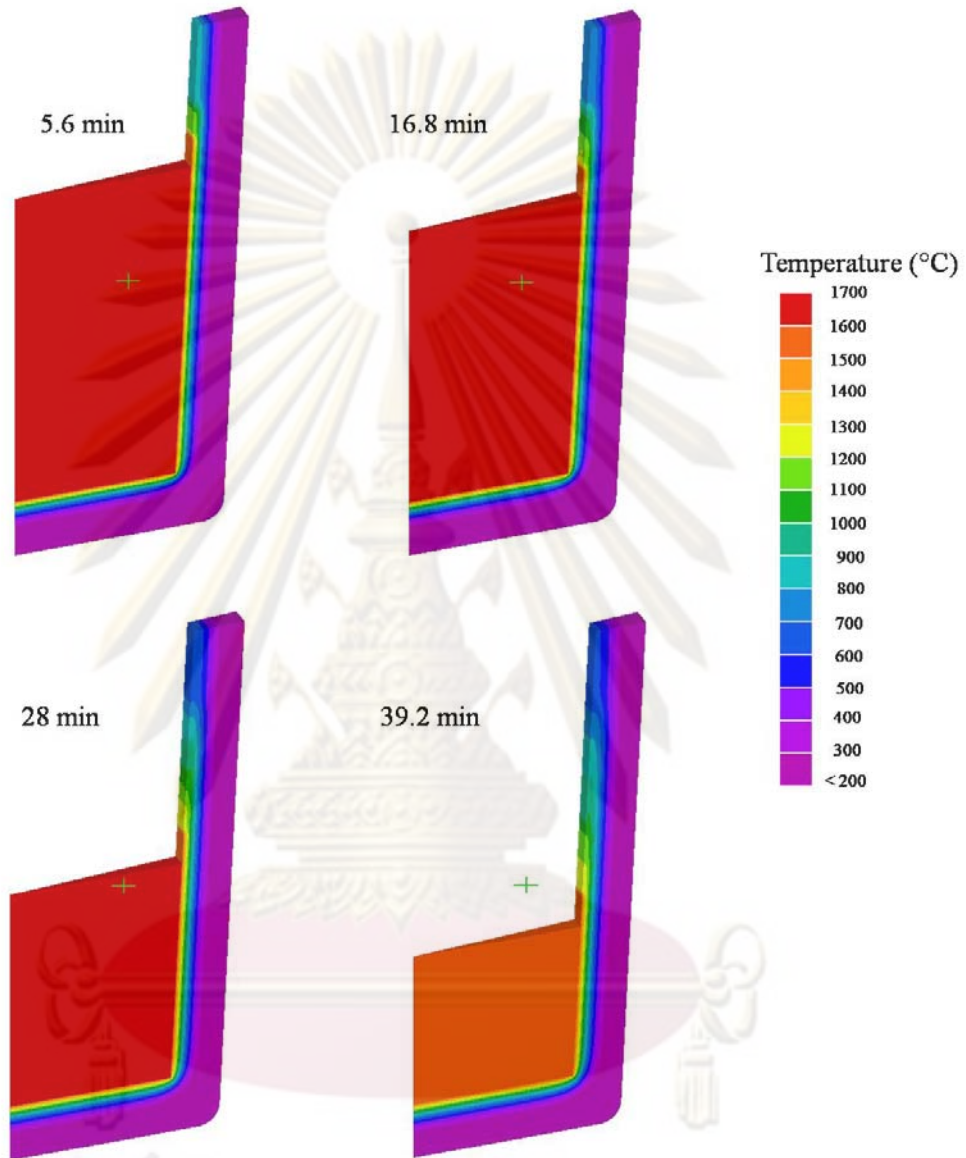
5.4.4 ผลการศึกษา และอภิปรายผลการศึกษา

ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนในระหว่างการถ่ายน้ำเหล็ก แสดงในรูปที่ 5-20 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเหล็ก และเป้าในขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก

เมื่อพิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลา รูปที่ 5-21 ช่วงที่ผิวเป้ารับน้ำเหล็กยังสัมผัสกับน้ำเหล็ก การถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กจะทำให้อุณหภูมิกายในผนังสูงขึ้น แต่เมื่อระดับน้ำเหล็กลดต่ำกว่าตำแหน่งผนัง ผนังบริเวณใกล้ผิวจะสูญเสียความร้อนให้แก่บรรยากาศรอบข้าง ทำให้อุณหภูมิกายในผนังลดลง ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่ตำแหน่งที่ 5 mm แตกต่างจากตำแหน่งที่ 50 และ 100 mm ที่อยู่ไกลออกไป ที่อุณหภูมียังเพิ่มสูงขึ้นอีก เนื่องจากผลของการนำความร้อน

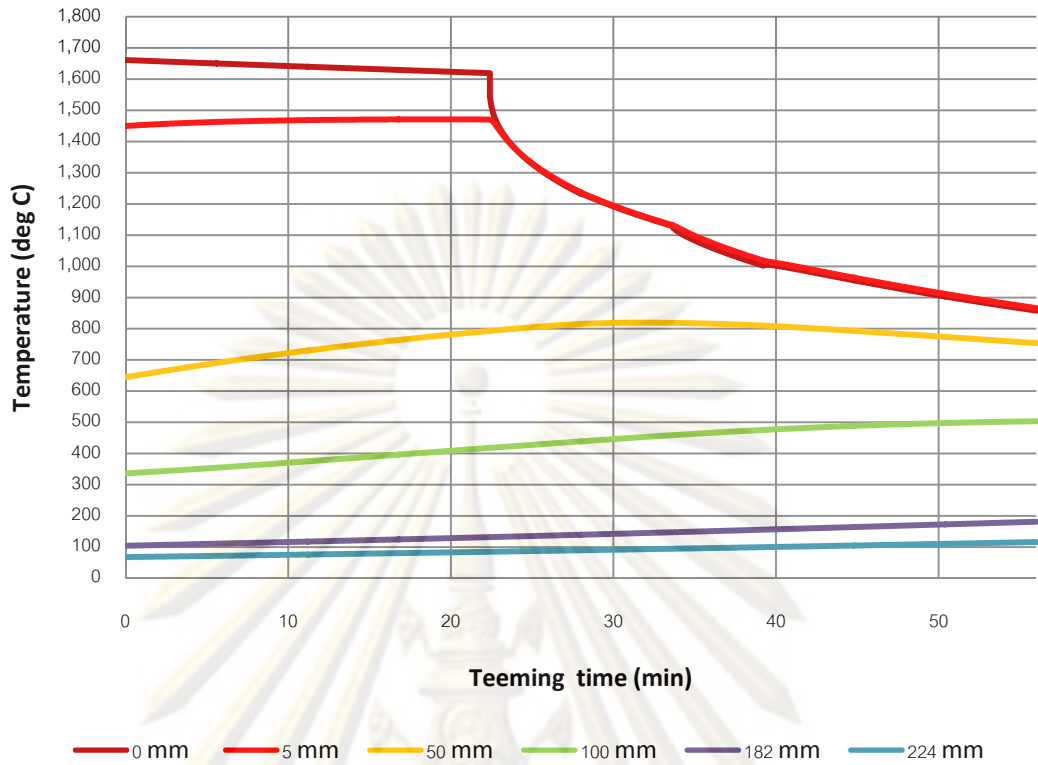
เมื่อพิจารณากราฟแสดงการแจกแจงอุณหภูมิในผนังข้าง ณ เวลาต่างๆ รูปที่ 5-22 พบว่าการอุณหภูมิกายในผนังจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นเมื่อยังสัมผัสกับน้ำเหล็ก เมื่อระดับน้ำเหล็ก

ลดต่ำลง การสูญเสียความร้อนทำให้อุณหภูมิบริเวณใกล้เคียงผิวด้านในลดต่ำลง แต่ผลของการนำความร้อนจะยังทำให้ที่ตำแหน่งด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กอุณหภูมิยังคงเพิ่มสูงขึ้น

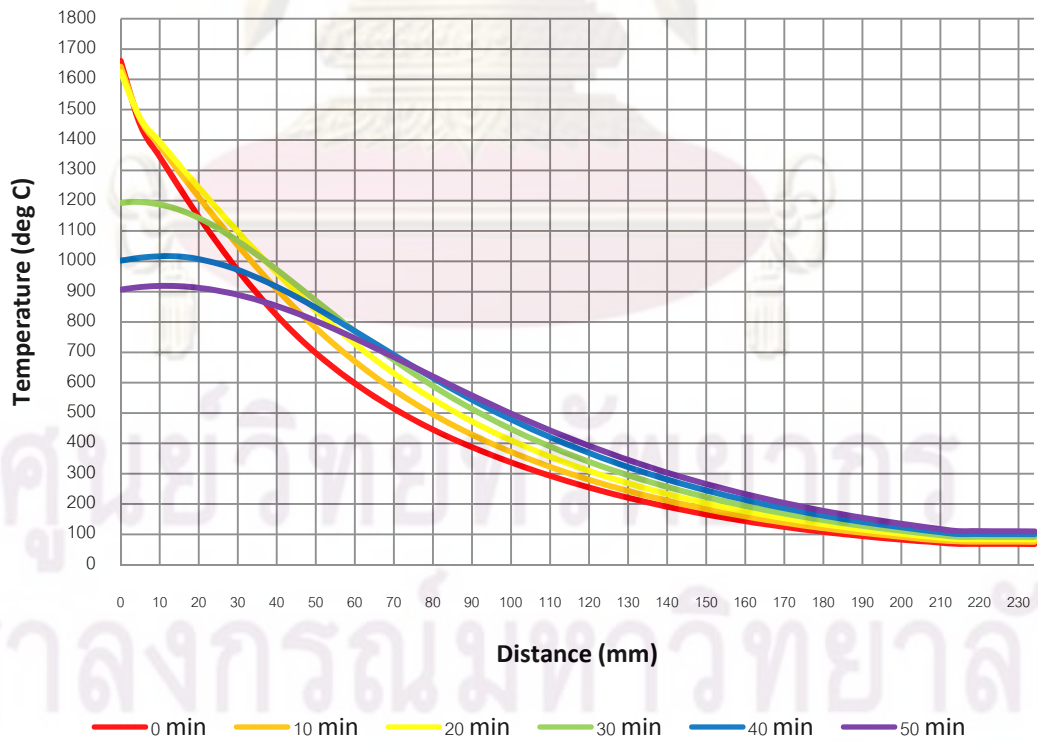


รูปที่ 5-20 ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ
ขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

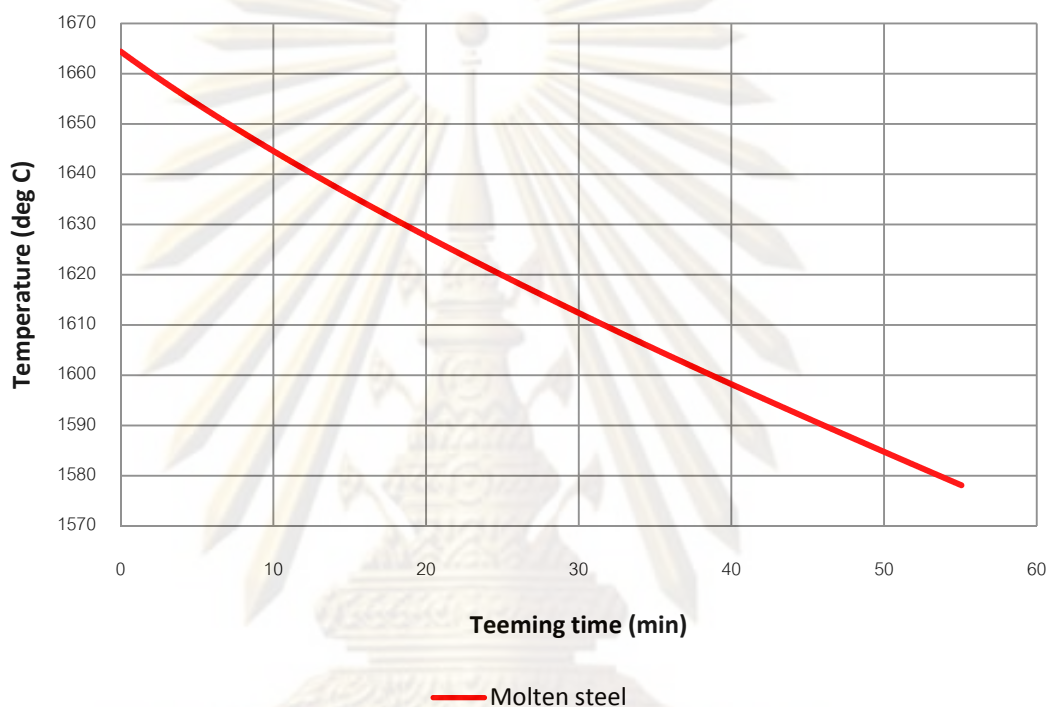


รูปที่ 5-21 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆในผนังข้าง เทียบกับเวลา ขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก



รูปที่ 5-22 การแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังเต้าจากการจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ ขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก

นอกจากนี้เมื่อพิจารณากราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กเทียบกับเวลา ขณะทำการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก รูปที่ 5-23 พบว่าในขณะการถ่ายน้ำเหล็ก อุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเบ้าจะมีการลดลง ซึ่งเมื่อสิ้นสุดการถ่ายน้ำเหล็กเป็นระยะเวลา 56 นาที น้ำเหล็กภายในเบ้าจะมีอุณหภูมิลดลง 86°C



รูปที่ 5-23 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กเทียบกับเวลา
ขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก

5.4.5 สรุปผลการศึกษา

ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็ก ด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเหล็ก และเบ้ารับน้ำเหล็กในขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก ทำให้สรุปได้ว่าวิธีการดังกล่าวนี้สามารถใช้จำลองการถ่ายเทความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้าในระหว่างขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็กได้

5.5 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก

5.5.1 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อนของน้ำเหล็ก และเบ้ารับน้ำเหล็ก ในระหว่างวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ในรอบการทำงานที่ 1 – 5

5.5.2 แนวทางในการจำลองการถ่ายเทความร้อน

ใช้แบบจำลองในขั้นตอนที่ 5.1 ถึง 5.4 จำลองการถ่ายเทความร้อนในวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ด้วยวิธีการจำลองแบบต่อเนื่องกันไป จนครบรอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก

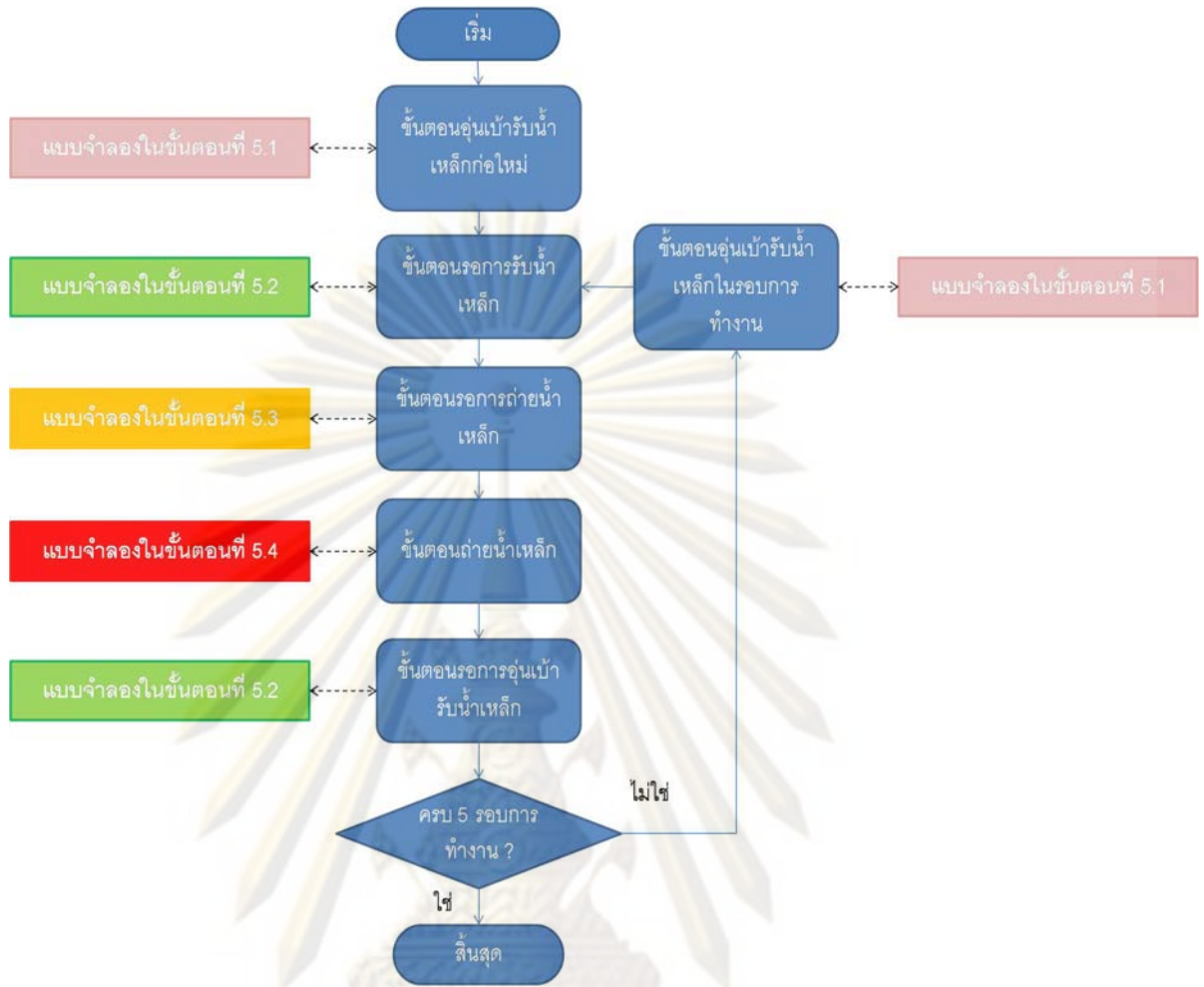
5.5.3 ระยะเวลาในแต่ละขั้นตอน

ระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ใช้ในการจำลองนั้น อ้างอิงจากข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.3 เพื่อความเหมาะสมในการจำลองจึงได้ ตัดขั้นตอนการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และขั้นตอนการเทสแลกออกไป และปรับเปลี่ยนระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนซึ่งแสดงในตารางที่ 5-7 ซึ่งรายละเอียดการจำลองในแต่ละขั้นตอน แสดงในรูปที่ 5-24

เนื่องจากในการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้เบ้ารับน้ำเหล็ก 2 ใบสลับกันรับน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ทำให้ระยะเวลาของวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก จะเป็น 2 เท่าของระยะเวลาการหลอม (tap to tap time)

ตารางที่ 5-7 ระยะเวลาในแต่ละขั้นตอนของวัฏจักรจำลองการทำงานของเบ้ารับ

Heat	Simulation period	Simulation time (min)
0	Preheat green ladle	120
1	Waiting for Tapping	6
	Holding	13
	Teeming	56
	Waiting for preheat	18
2 - 5	Preheat	21
	Waiting for Tapping	6
	Holding	13
	Teeming	56
	Waiting for preheat	18
	Ladle Cycling	114
	Tap to Tap time	57



รูปที่ 5-24 รายละเอียดการจำลองการถ่ายเทความร้อนในวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละขั้นตอน

5.5.4 ผลการศึกษา และอภิปรายผลการศึกษา

เมื่อพิจารณากราฟการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเทียบกับเวลาตลอด 5 รอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 5-25 พบว่าในเบ้ารับน้ำเหล็กชั้นทำงานที่ตำแหน่ง 5 mm มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วตามขั้นตอนการทำงาน ในขณะที่ตำแหน่ง 50 mm และ 100 mm มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามขั้นตอนการทำงานเช่นกัน แต่อุณหภูมิมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อรอบการทำงานมากขึ้น แต่ในส่วนของคุณภูมิที่ตำแหน่ง 182 mm และ 224 mm ซึ่งอยู่ในชั้นปลอดภัย และเปลือกเหล็ก อุณหภูมิที่สองตำแหน่งนี้เพิ่มขึ้นตลอดไม่ขึ้นกับขั้นตอนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่อัตราการเพิ่มของคุณภูมิมีค่าลดลงตามรอบการทำงานที่มากขึ้น

เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละรอบ ตำแหน่งที่ 5 mm จะมียุณหภูมิอยู่ในช่วงประมาณ 1,000 ถึง 1,100 °C ซึ่งจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านขั้นตอนการรอการรับน้ำเหล็ก แต่อย่างไรก็ดีการลดระยะเวลาการรอการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมเป็นไปได้ยากในทางปฏิบัติเนื่องจากในการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เบ้ารับน้ำเหล็กมีหน้าที่ต้องมารอการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอม ซึ่งการเทน้ำเหล็กจะเกิดขึ้นเมื่อผู้ปฏิบัติงานสามารถป้อนน้ำเหล็กให้ได้ตามส่วนผสมที่ต้องการ

พิจารณาขั้นตอนการรอการถ่ายน้ำเหล็กของแต่ละรอบการทำงาน เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กรับน้ำเหล็กแล้ว อุณหภูมิภายในผนังจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อสัมผัสกับน้ำเหล็ก ที่ตำแหน่ง 5 mm จากผิวด้านใน เมื่อสิ้นสุดการรอการถ่ายน้ำเหล็กในรอบการทำงานแรก จะมียุณหภูมิประมาณ 1,450 °C ซึ่งจะเพิ่มสูงขึ้นในรอบการทำงานถัดไป

สำหรับในขั้นตอนการถ่ายน้ำเหล็ก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 5, 50 และ 100 mm จากผิวด้านใน มีรูปแบบเดียวกันในแต่ละรอบการทำงาน โดยอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นเมื่อรอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กเพิ่มขึ้น

ขั้นตอนการรอการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก เป็นขั้นตอนที่เบ้ารับน้ำเหล็กสูญเสียความร้อน ซึ่งในการศึกษาได้ใช้วิธีการจำลอง เหมือนกับขั้นตอนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งที่ตำแหน่ง 5 และ 50 mm จากผิวด้านในมีอุณหภูมิลดลง แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวด้านใน นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 5 mm เมื่อสิ้นสุดการรอการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นเวลา 18 นาที ในรอบการทำงานที่ 3 มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิก่อนรับน้ำเหล็กในรอบที่ 1 จากข้อมูลข้างต้นทำให้สรุปได้ว่า เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กผ่านการทำงานในรอบที่ 3 หาระยะเวลาในการรอการรับน้ำเหล็กไม่เกิน 18 นาที นับตั้งแต่สิ้นสุดการถ่ายน้ำเหล็ก สามารถรับน้ำเหล็กมาทำการผลิตต่อได้เลย โดยไม่จำเป็นต้องอุ่นเบ้าอีก

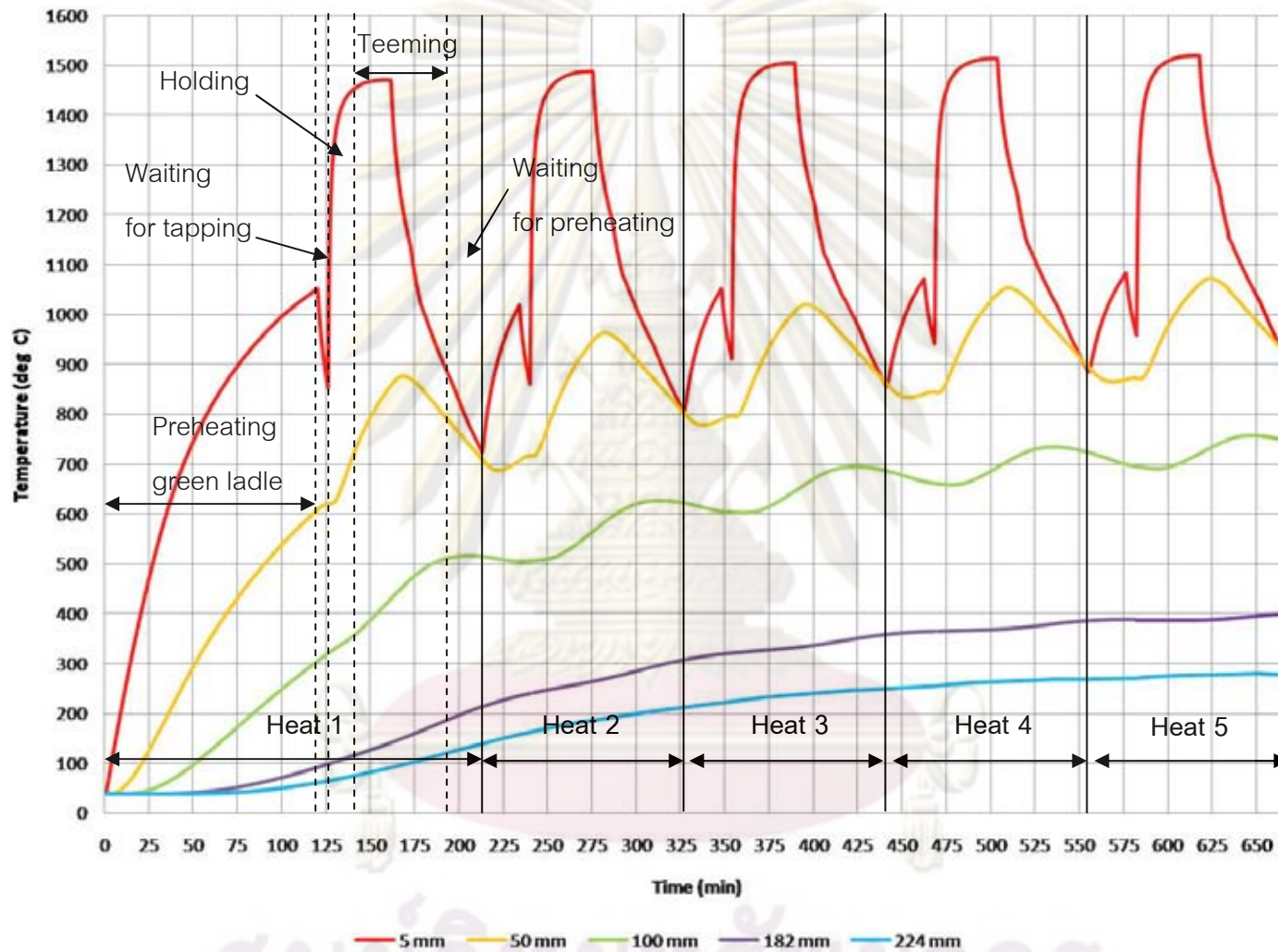
อนึ่งการจัดการเวลาที่ใช้ระหว่างขั้นตอนการรอกการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เหมาะสมจะช่วยลดการสูญเสียความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก และการใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กได้

การแจกแจงอุณหภูมิในผนังข้าง เมื่อสิ้นสุดการทำงานรอบที่ 1 ถึง 5 แสดงในรูปที่ 5-26 พบว่าการแจกแจงอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามรอบการทำงานแบบต่อเนื่อง ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อสิ้นสุดการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ทำการก่อขึ้นใหม่ ที่ตำแหน่งใกล้ผิวด้านใน อุณหภูมิจะสูงกว่าเมื่อสิ้นสุดการทำงานในรอบที่ 1 และ 2 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดการทำงานในรอบที่ 3 ข้อมูลข้างต้นบ่งชี้ว่าเมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กผ่านการทำงานในรอบที่ 3 ถ้าระยะเวลาการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก เพื่อรอกการรับน้ำเหล็กไม่เกิน 18 นาที การแจกแจงอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กจะสูงพอให้สามารถทำการรับน้ำเหล็กต่อเนื่องได้โดยไม่ต้องทำการอุ่น

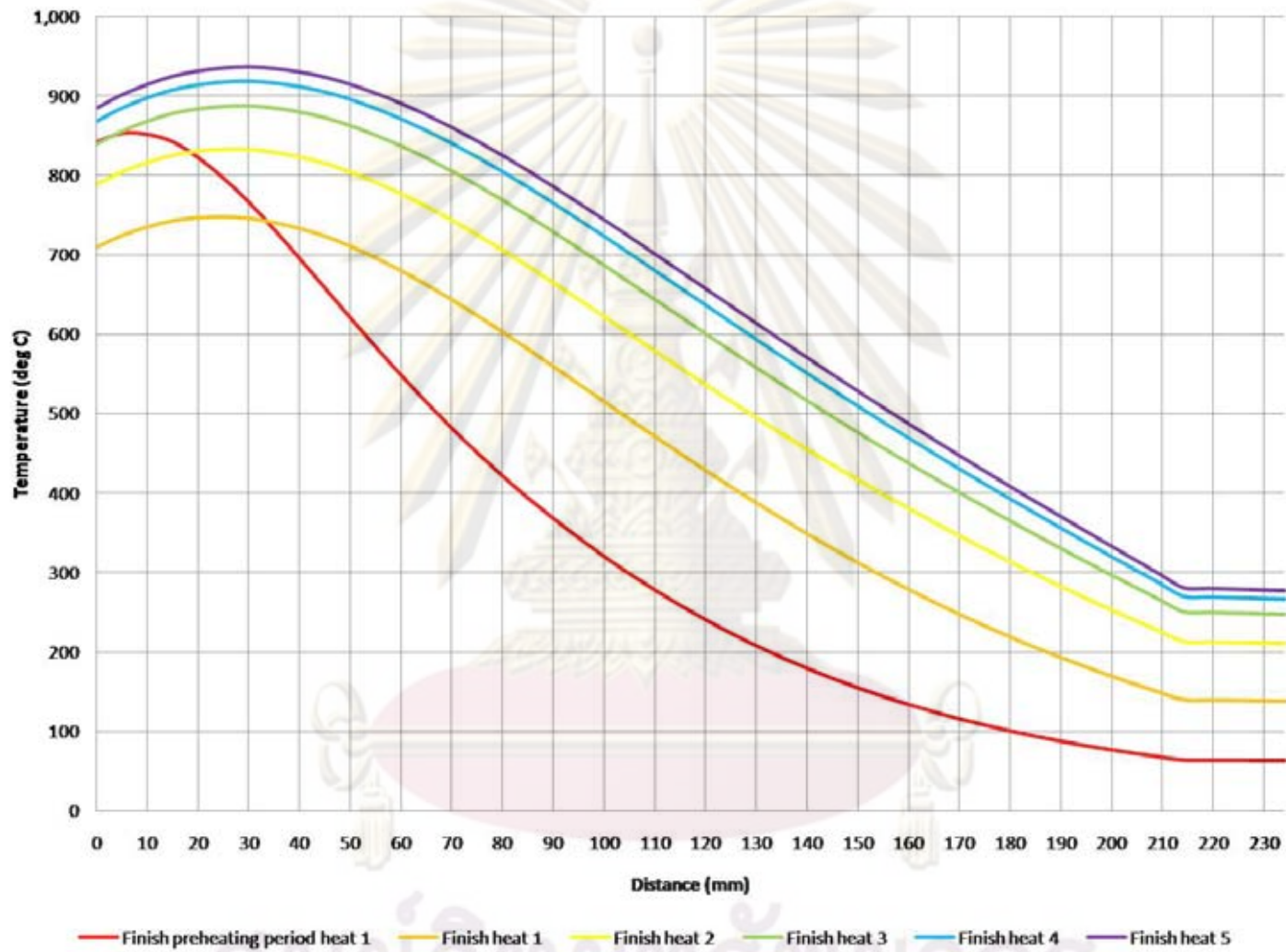
รูปที่ 5-27 แสดงพลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งหามาด้วยวิธีที่แสดงในภาคผนวก ง เปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 50 mm จากผิวด้านใน พบว่ามีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน ดังนั้นอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 50 mm สามารถใช้เป็นตัวแปรที่แสดงถึงสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการทำงานได้

รูปที่ 5-28 สังเกตได้ว่าอุณหภูมิหน้าเหล็กในเบ้าตลอดช่วงการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก และถ่ายน้ำเหล็ก กรณีอุณหภูมิที่ 1700°C ในรอบการทำงานของเบ้ารอบที่ 5 จะสูงกว่าในรอบการทำงานที่ 1 จึงเป็นที่มาของการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 5 ใหม่ด้วยอุณหภูมิเทหน้าเหล็ก 1690°C เพื่อหาความเป็นไปได้ของการลดอุณหภูมิการเทหน้าเหล็กจากเตาหลอม

รูปที่ 5-29 ผลจากการจำลอง โดยเปลี่ยนอุณหภูมิเทหน้าเหล็กที่ 1690°C พบว่าอุณหภูมิหน้าเหล็กเมื่อสิ้นสุดการถ่ายน้ำเหล็กยังสูงกว่า ในรอบการทำงานที่ 1 ที่มีอุณหภูมิเทหน้าเหล็ก 1700°C ทำให้สรุปได้ว่าการปรับลดอุณหภูมิเทหน้าเหล็กลดลง 10°C ในรอบการทำงานที่ 5 ของเบ้ารับน้ำเหล็ก มีความเป็นไปได้ ซึ่งจะเป็นการลดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมเศษเหล็ก ซึ่งเมื่อทำการประเมินผลประหยัด โดยอ้างอิงจากสมการจำลองปริมาณพลังงานไฟฟ้าของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดย Iron and Steel Institute (2000) สมการที่ 2.1 ในหัวข้อที่ 2.1.1 เตาอาร์คไฟฟ้า ซึ่งในพจน์ที่ 6 ของสมการซึ่งเป็นพจน์ที่มีตัวแปรอุณหภูมิหน้าเหล็กที่เทจากเตาหลอม จากความจริงที่ว่าอุณหภูมิหน้าเหล็กที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการหลอมเพิ่มขึ้น สมการแสดงให้เห็นว่า ทุกๆ อุณหภูมิหน้าเหล็กที่เพิ่ม 1°C จากอุณหภูมิ 1600°C จะใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.7 kWh/ton การคำนวณผลประหยัดแสดงในตารางที่ 5-8 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการลดอุณหภูมิเทหน้าเหล็กจากเดิม 1700°C ลง 10°C เป็นผลให้สามารถลดการใช้ไฟฟ้าในการหลอมได้ 7 kWh/ton ซึ่งสำหรับโรงงานที่ศึกษาจะสามารถประหยัดได้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าได้ 2.5 ล้านบาท/ปี

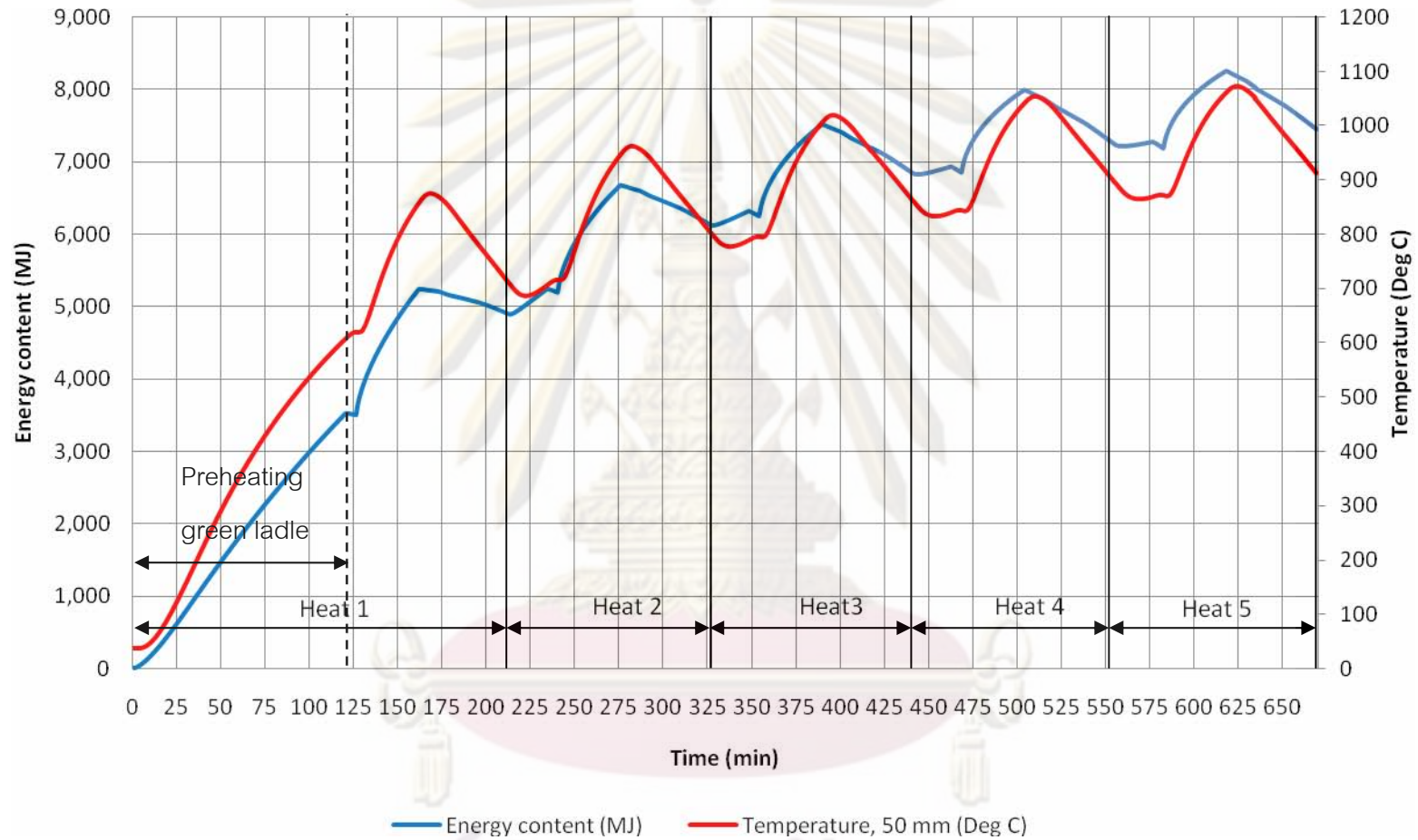


รูปที่ 5-25 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดรอบการทำงานที่ 1 ถึง 5

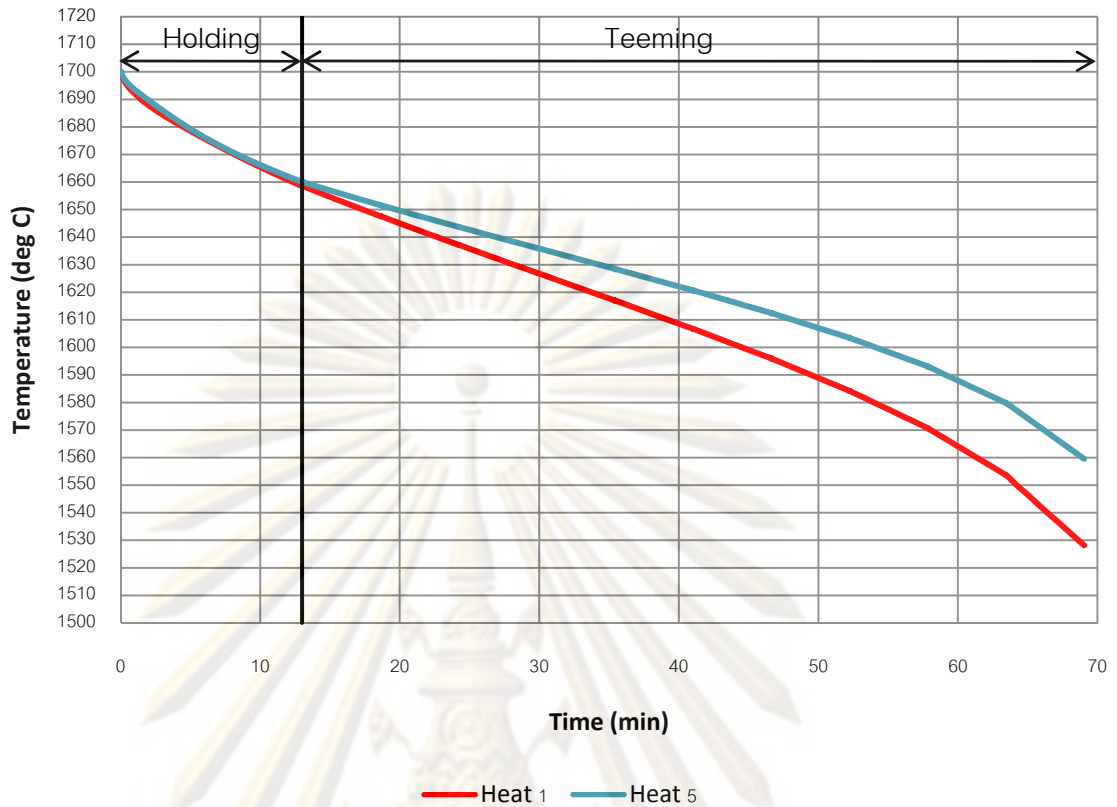


รูปที่ 5-26 การแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังเบ้าจากการจำลองที่ระยะเวลาต่างๆ ตลอดรอบการทำงานที่ 1 ถึง 5

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



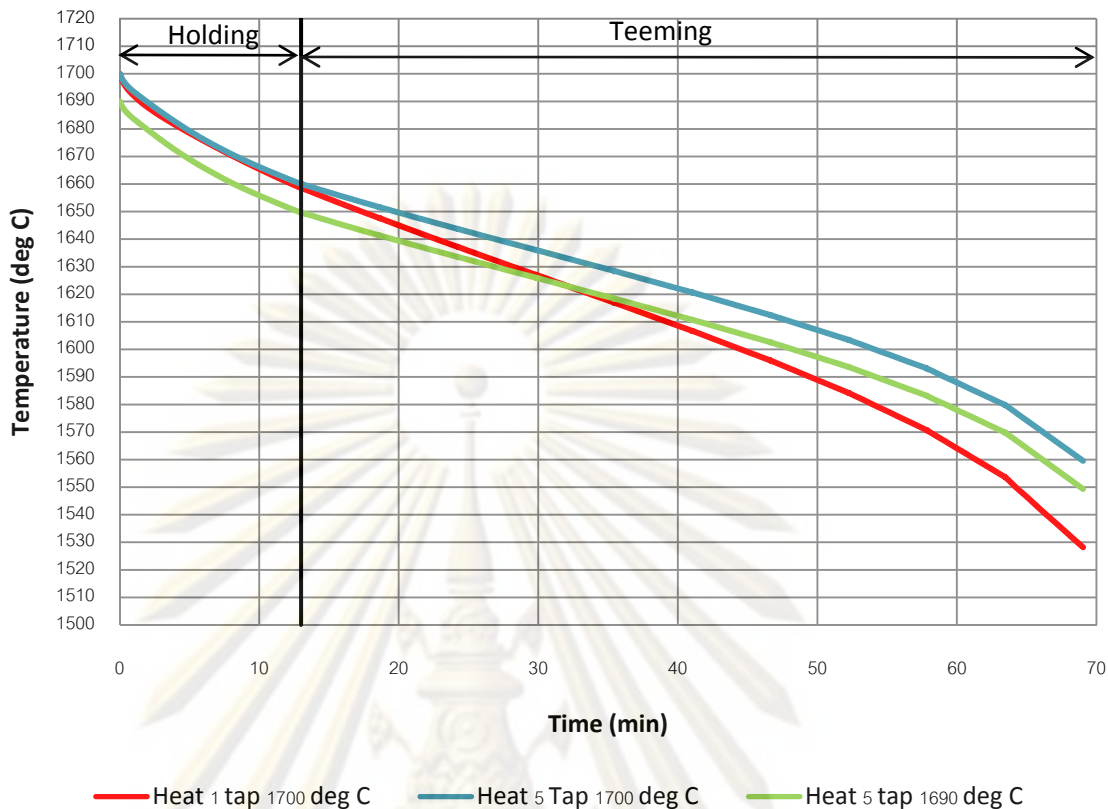
รูปที่ 5-27 พลังงานสะสมภายในน้ำรับน้ำเหล็กเปรียบเทียบกับอุณหภูมิภายในน้ำรับน้ำเหล็ก
ที่ตำแหน่ง 5 mm ที่ระยะเวลาต่างๆ ตลอดรอบการทำงานที่ 1 ถึง 5



รูปที่ 5-28 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างขั้นตอนการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก และการถ่ายน้ำเหล็ก ระหว่าง 1) Heat 1 tap 1700 deg C: ใช้น้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 1 ใช้น้ำเหล็กอุณหภูมิ 1700 °C และ 2) Heat 5 tap 1700 deg C: ใช้น้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 5 ใช้น้ำเหล็กอุณหภูมิ 1700 °C

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5-29 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างขั้นตอนการรอกการถ่ายน้ำเหล็ก และการถ่ายน้ำเหล็ก ระหว่าง 1) Heat 1 tap 1700 deg C: ใช้น้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 1 ใช้น้ำเหล็กอุณหภูมิ 1700 °C 2) Heat 5 tap 1700 deg C: ใช้น้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 5 ใช้น้ำเหล็กอุณหภูมิ 1700 °C และ 3) Heat 5 tap 1690 deg C: ใช้น้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 5 ใช้น้ำเหล็กอุณหภูมิ 1690 °C

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5-8 ผลประหยัดของการลดอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กลง 10 °C

พลังงานไฟฟ้าที่ลดลง	
เหนือน้ำเหล็กอุณหภูมิ 1700°C (kW.h/ton)	70
เหนือน้ำเหล็กอุณหภูมิ 1690°C (kW.h/ton)	63
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมที่ลดลง	7
อัตราการผลิต	
อัตราการผลิตของโรงงาน (ton/year)	150,000
อัตราส่วนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านรอบการทำงานที่ 5	0.8
อัตราการผลิตของโรงงานที่ทำการเหนือน้ำเหล็กอุณหภูมิ 1690 °C (ton/year)	120,000
ผลประหยัด	
พลังงานไฟฟ้าที่ลดลง (kW.h/year)	840,000
ราคาไฟฟ้าต่อหน่วย (Baht/kW.h)	3
ต้นทุนการผลิตที่ลดลง (Baht)	2,520,000

5.5.5 สรุปผลการศึกษา

ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 1 – 5 ด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดช่วงการทำงาน ทำให้สามารถสรุปได้ว่าวิธีการที่ใช้ในการศึกษามีความเหมาะสม และผลที่ได้จากการศึกษายังสามารถนำไปปรับปรุงการทำงานของโรงงานเพื่อผลการประหยัดพลังงานได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการศึกษาวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปการศึกษาวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาสภาวะทางความร้อน อัตราการถ่ายเทความร้อน และ คุณณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กขนาด 25 ตัน ระหว่างขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก, การพักเบ้ารับน้ำเหล็ก, การรอกการเทน้ำเหล็ก และ การถ่ายน้ำเหล็กสำหรับการหล่อแบบต่อเนื่อง โดยการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนจากข้อมูลการวัดอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละขั้นตอน และข้อมูลจากการใช้โปรแกรมสำเร็จเชิงพาณิชย์ จำลองการถ่ายความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ในระหว่างรอบการทำงานที่ 1 - 5 ความร้อนสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะสูงขึ้น ส่งผลให้การสูญเสียความร้อนจากน้ำเหล็กไปยังเบ้าลดลง จึงสามารถลดอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมลงจาก 1700°C เหลือ 1690°C โดยอุณหภูมิของน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดการถ่ายน้ำเหล็กยังสูงพอตามเงื่อนไขในการผลิต เป็นผลให้สามารถลดการใช้ไฟฟ้าในการหลอมได้ 7 kWh/ton ซึ่งสำหรับโรงงานที่ศึกษา จะสามารถประหยัดได้ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานไฟฟ้าได้ 2.5 ล้านบาท/ปี

อนึ่ง สำหรับผลการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีลักษณะเป็นคุณสมบัติเฉพาะของทางโรงงาน เนื่องจากการจำลองการถ่ายเทความร้อนมีปัจจัยเฉพาะที่เป็นคุณสมบัติของโรงงาน เช่น การก่อเบ้ารับน้ำเหล็ก คุณสมบัติวัสดุที่ใช้ก่อเบ้ารับน้ำเหล็ก ระยะเวลาการทำงานในแต่ละขั้นตอน อุณหภูมิเทน้ำเหล็ก เป็นต้น แต่อย่างไรก็ดีวิธีที่ใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนยังสามารถนำไปปรับใช้กับโรงงานที่มีกำลังลักษณะการผลิตใกล้เคียงกัน เพียงแต่จำเป็นต้องปรับตัวแปรที่ใช้ในการจำลองให้เป็นของโรงงานนั้นๆ

6.2 ปัญหาของงานวิจัย

การศึกษาสภาวะทางความร้อนในงานวิจัยครั้งนี้ยังขาดข้อมูลการตรวจวัดการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นตอนการรับน้ำเหล็ก และถ่ายน้ำเหล็ก เนื่องจากปัญหาเรื่องความปลอดภัยของโรงงาน ทำให้ไม่มีข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้าในขั้นตอนการทำงานดังกล่าวมาเปรียบเทียบความถูกต้องของการจำลอง แต่อย่างไรก็ดีผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลอื่นเท่าที่สามารถตรวจวัดได้ เช่น ข้อมูลอุณหภูมิผิวเปลือกเหล็กเบ้ารับน้ำเหล็ก ข้อมูลภาพถ่ายถ่ายรังสีอินฟราเรดของผนังเบ้าด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก เป็นต้น ในการประเมินอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการกำหนดค่าเงินเอนไซม์ขอบเขตในการศึกษา

6.3 ข้อเสนอแนะของงานวิจัยในอนาคต

วิธีที่ใช้ในการศึกษาการจำลองสภาวะทางความร้อนของเข้รับน้ำเหล็ก มีความยุ่งยากในการทำงาน และไม่สามารถทำการทำนายในแบบทันที (real time) ได้ ซึ่งในอนาคตควร จะทำการศึกษาในการปรับปรุงโปรแกรมที่ใช้ทำนายสภาวะทางความร้อนให้สามารถใช้งานได้ง่าย ในแบบทันทีเพื่อที่จะเป็นประโยชน์ต่อการใช้งานจริง ณ ขณะทำงานของผู้ปฏิบัติงาน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

จักรวรรุ จรุงศารทูลและพงษ์ธร จริญญากรณ์. การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ้งถั่ง ถ่ายน้ำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงาน แห่งประเทศไทยครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก, 2552.

จักรวรรุ จรุงศารทูล. การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ้งถั่งรับน้ำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น, จักรวรรุ จรุงศารทูลและพงษ์ธร จริญญากรณ์. การจำลองการถ่ายเทความร้อน ของเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการอุ้งถั่งรับน้ำเหล็กเพื่อการประหยัดพลังงาน. การประชุม วิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 5, มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก, 2552.

สมศักดิ์ คงโชติ. การศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในการอุ้งถั่งรับน้ำเหล็กใน อุตสาหกรรมโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2536.

ภาษาอังกฤษ

Austin, P. R., Camplin, J. M., Herbertson, J., and Taggart, I. J. Mathematical modeling of thermal stratification and drainage of steel ladles. ISIJ international 32 (1992): 192-202.

Blondelot, E., et.al. EAF Technology. Belgium: Ceuterick n.v., 2000.

Chakraborty, S., and Sahai, Y. Effect of holding time and surface cover in ladles on liquid steel flow in continuous casting tundishes. Metallurgical Transactions B 23B (April 1992): 153-164.

- Davila, O., Morales, R. D., and Garcia-demedices, L. Mathematical simulation of fluid dynamic during steel draining operations from a ladle. Metallurgical and Materials Transaction B 37B (February 2006): 71-87.
- Fredman, T. P., and Saxen, H. Model for temperature profile estimation in the refractory of a metallurgical ladle. Metallurgical and Materials Transaction B 29B (June 1998): 651-659.
- Fredman, T. P., Torrkulla, J., and Saxen, H. two-dimensional dynamic simulation of the thermal state of ladles. Metallurgical and Materials Transaction B 30B (April 1999): 323-330.
- Fredman, T. P. Heat transfer in steelmaking ladle refractories and steel temperature. Scandinavian Journal of Metallurgy 29 (2000): 232-258.
- Fox, R. W., Mcdonald A. T., and Pritchard, P. J. Introduction to Fluid Mechanics. Sixth Edition. USA; John Wiley & Sons, 2004.
- Grip, C. E., Jonsson, K. O., Eriksson, S., Jonsson, L., Jonsson, P., and Pan, Y. Theoretical and practical study of thermal stratification and drainage in ladles of different geometry. Scandinavian Journal of Metallurgy 29 (2000): 30-38.
- Gupta, N., and Chandra, S. Temperature prediction model for controlling casting superheat temperature. ISIJ International 44 (2004): 1517-1526.
- Incropera, F. P., and Dewitt, D.P. Introduction to Heat Transfer. Third Edition. USA : John Wiley & Sons, 1996.
- Kays, W. M., and Crawford, M. E. Convective Heat and Mass Transfer. Third Edition. Singapore; Magraw-Hill, 1993.

Mohanty, B., and Satayayut, J. Dynamic model for ladle preheater performance evaluation. International Journal of Energy Research 16 (1992): 51-60.

Pan, Y., Grip, C., and Bjorkman, B. Numerical studies on the parameters influencing steel ladle heat loss rate, thermal stratification during holding and steel stream temperature during teeming. Scandinavian Journal of Metallurgy 32 (2003): 71-85.

Tetrault, C., Young, S., Roldan, D., and Zhou, C. Q. CFD analysis of heat loss in steel ladle cycling. 2nd International energy conversion engineering conference. pp. 1-8. Rhode island: .American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.

Volkova, O., and Janke, D. Modelling of temperature distribution refractory ladle lining for steelmaking. ISIT International 43 (2003): 1185-1190.

Xia. J. L., and Ahokainen, T. Transient flow and heat transfer in a steelmaking ladle during the holding period. Metallurgical and Materials Transaction B.32B (August 2001): 733-741.

Xia. J. L., and Ahokainen, T. Homogenization of temperature field in a steelmaking ladle with gas injection. Scandinavian Journal of Metallurgy 32 (2003): 211-217.

Zimmer, A., Lima, A. N. C., Trommer.R.M., Braaganca.S.R., and Bergmann.C.P. Heat transfer in steelmaking ladle. J. of Iron and Steel Research 15 (2008): 11-14.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

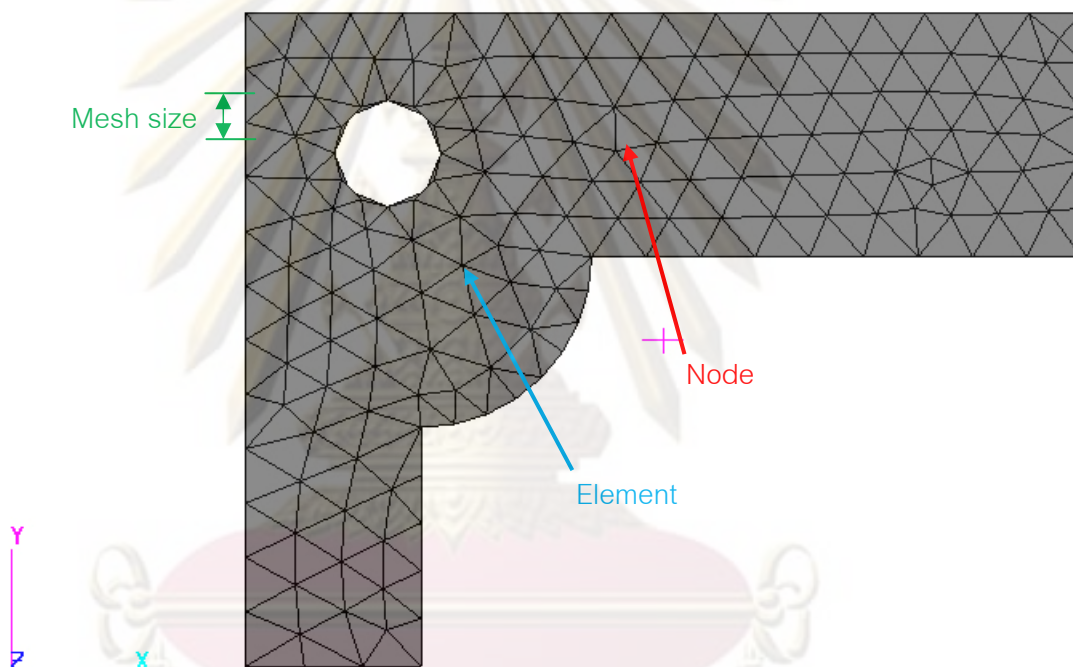


ภาคผนวก ก
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

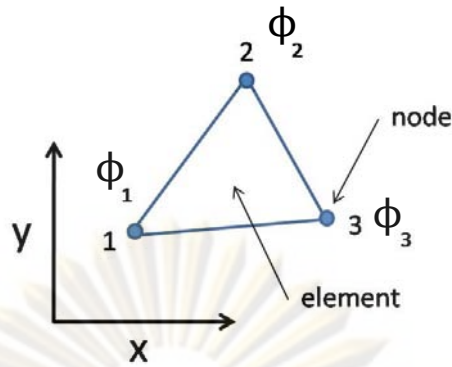
ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์หนึ่งนเป็นระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่เป็นลักษณะสมการเชิงอนุพันธ์ ด้วยการคำนวณหาผลเฉลยโดยประมาณ จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ของปัญหาในคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีข้อดีคือสามารถทำการจำลองปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ เนื่องจากแบ่งรูปร่างปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ (element) ที่ไม่จำเป็นต้องมีขนาดที่เท่ากัน จากการกำหนดขนาดของตาราง (mesh size) ทำให้แบบจำลองที่ได้มีความใกล้เคียงกับปัญหาจริง รูปที่ ก.1 แสดงการจำลองปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ ก.1 การจำลองปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ขั้นตอนการทำงานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นั้นเริ่มจากการแบ่งปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ซึ่งจุดเชื่อมต่อระหว่างเอลิเมนต์เรียกว่าจุดต่อ (node) หลังจากนั้นจึงทำการเลือกฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์ ยกตัวอย่างกรณีของ เอลิเมนต์แบบสองมิติ ซึ่งประกอบด้วยจุดต่อ 3 จุด ซึ่งมีตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดทั้ง 3 รูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 เอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยจุดต่อ (node) 3 จุด

แต่ละจุดที่มีตัวแปรไม่ทราบค่า (ϕ)

ซึ่งค่าตัวแปรเหล่านี้สามารถเขียนฟังก์ชันการประมาณภายใน ได้ดังนี้

$$\phi(x, y) = N_1(x, y)\phi_1 + N_2(x, y)\phi_2 + N_3(x, y)\phi_3$$

โดย

$N_i(x, y)$, $i = 1, 2, 3$ แทนฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

หลังจากนั้นจึงสร้างสมการของแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งสร้างขึ้นสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ในกรณีนี้สมการจะอยู่ในรูปแบบ

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_i \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{Bmatrix}_i = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{Bmatrix}_i$$

$i = 1, 2, 3$ แทนตำแหน่งเอลิเมนต์

จากนั้นจึงรวมสมการของแต่ละเอลิเมนต์เป็นระบบสมการ

$$\sum (\text{element equations}) \rightarrow [k]_{\text{sys}} \{\phi\}_{\text{sys}} = \{F\}_{\text{sys}}$$

ตัวย่อ sys หมายถึงเมตริกซ์ของระบบสมการ

แล้วจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตเพื่อหาค่าตัวแปร (ϕ) ของแต่ละเอลิเมนต์ จึงได้คำตอบของค่าตัวแปรในแต่ละเอลิเมนต์ ซึ่งสามารถใช้คำนวณหาค่าต่อเนื่องอื่นๆ ที่สนใจได้



ภาคผนวก ข
ข้อมูลการตรวจวัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลการตรวจวัดการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้น้ำมันดีเซล

ตาราง ก. 1 ข้อมูลดิบจากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาที่ใช้ น้ำมันดีเซล ณ วันที่ 1 สิงหาคม 2551

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
16:40:06	32	33	32	33	32	32	32	32	33	32	31	33	32	32	32	31	31	32
16:41:06	32	34	32	33	33	32	33	32	33	33	31	33	32	32	32	31	31	32
16:42:06	33	31	32	33	33	32	33	32	33	33	31	110	32	32	32	31	34	35
16:43:06	32	33	32	50	34	32	33	32	34	33	31	576	32	32	32	31	44	229
16:44:06	32	33	32	88	34	32	33	32	33	33	31	743	32	32	32	31	54	417
16:45:06	32	34	32	123	36	32	33	31	34	33	31	780	32	32	32	31	61	499
16:46:06	33	33	32	153	39	32	33	32	33	33	31	808	33	32	32	31	70	538
16:47:06	33	33	32	180	44	32	33	32	34	33	31	822	35	32	32	31	77	556
16:48:06	34	33	32	205	50	32	33	32	35	33	31	837	38	32	32	31	83	567
16:49:06	34	34	32	230	58	33	33	32	36	33	31	843	43	32	32	31	87	580
16:50:06	36	34	32	254	66	33	33	32	39	33	31	862	47	32	32	31	91	588
16:51:06	37	33	32	276	74	34	33	31	41	33	31	879	52	33	32	31	96	597
16:52:06	40	30	32	296	80	34	31	31	41	31	31	900	58	33	32	31	107	603
16:53:06	42	32	32	315	89	35	31	31	46	31	31	905	64	34	32	31	121	610
16:54:06	44	33	32	336	99	36	33	31	51	33	31	900	70	34	32	31	123	615
16:55:06	47	34	32	354	108	38	33	31	55	33	31	914	76	35	32	31	123	618
16:56:06	50	33	32	372	117	39	33	31	59	33	31	926	83	37	32	31	121	626
16:57:06	53	34	32	389	125	41	33	31	63	33	31	934	89	38	32	31	119	631
16:58:06	56	33	32	405	134	43	32	31	67	33	31	947	96	39	32	31	118	637
16:59:06	60	33	32	420	143	44	33	31	72	33	31	949	102	41	32	31	118	642

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
17:00:06	63	33	32	435	151	46	32	31	76	33	31	958	109	43	32	31	120	648
17:01:06	67	33	32	450	160	49	33	31	82	33	31	966	116	45	32	31	122	654
17:02:06	70	33	32	466	168	51	33	31	86	33	31	968	122	46	32	31	123	659
17:03:06	74	31	32	479	175	53	31	31	90	32	31	986	129	49	32	31	129	661
17:04:06	78	31	32	491	184	56	31	31	95	31	31	992	135	51	32	31	139	663
17:05:06	82	32	32	504	192	58	31	31	100	32	31	992	142	53	32	31	144	668
17:06:06	86	32	32	515	201	61	32	32	106	32	31	998	148	55	32	31	147	671
17:07:06	90	33	32	527	209	64	32	31	111	33	31	1000	154	58	32	31	149	678
17:08:06	94	32	32	538	217	67	32	32	116	33	31	1008	160	60	32	31	151	680
17:09:06	98	33	32	549	225	69	32	31	121	33	31	1014	167	63	32	31	155	684
17:10:06	102	33	32	560	232	72	32	31	126	33	31	1026	173	65	32	31	159	687
17:11:06	107	33	32	571	240	75	33	31	131	33	31	1026	179	68	32	31	164	691
17:12:06	111	33	32	581	247	78	33	31	136	33	31	1029	186	70	32	31	167	693
17:13:06	115	33	32	590	255	81	33	31	141	33	31	1036	192	73	32	31	172	698
17:14:06	120	33	32	601	262	84	33	32	146	33	31	1046	198	76	32	31	174	700
17:15:06	123	34	32	611	269	87	33	31	151	33	31	1047	204	79	32	31	180	702
17:16:06	128	32	32	620	276	91	32	31	155	32	32	1056	210	81	32	31	186	705
17:17:06	132	33	32	629	283	94	32	31	161	33	31	1059	215	84	33	31	200	709
17:18:06	136	34	32	637	290	97	33	31	166	34	31	1063	221	87	33	31	202	714
17:19:06	140	34	32	646	297	101	33	31	171	34	32	1069	227	90	33	31	201	716
17:20:06	145	34	32	654	304	104	34	31	176	34	32	1073	233	93	33	31	203	717
17:21:06	149	34	32	662	310	107	34	31	181	34	32	1076	239	96	33	31	203	722
17:22:06	153	34	32	669	317	111	34	31	186	34	32	1079	244	99	33	31	204	723
17:23:06	157	34	32	677	323	114	34	31	191	34	32	1082	250	102	33	31	206	728

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
17:24:06	162	34	32	684	330	117	34	31	195	34	32	1089	255	105	34	31	211	729
17:25:06	166	34	32	691	336	121	34	31	200	34	32	1096	261	108	34	31	211	731
17:26:06	170	34	32	698	342	124	33	32	204	34	32	1094	266	111	34	31	212	735
17:27:06	174	34	32	706	348	127	34	32	209	35	32	1096	272	114	34	31	215	739
17:28:06	178	35	32	712	354	131	34	32	214	35	32	1101	277	117	34	31	214	740
17:29:06	182	35	32	719	360	134	35	32	219	35	32	1107	282	120	35	31	214	743
17:30:06	186	36	33	727	366	137	36	32	224	36	32	1110	287	123	35	31	211	747
17:31:06	191	36	33	734	372	141	35	32	228	36	32	1116	292	126	35	31	207	751
17:32:06	195	35	33	740	378	144	35	32	233	36	32	1118	298	129	35	31	208	752
17:33:06	199	37	33	748	384	148	36	32	237	37	32	1122	302	132	35	31	210	755
17:34:06	203	37	33	755	389	151	36	32	242	37	32	1125	307	135	36	31	209	758
17:35:06	207	37	33	762	395	155	36	32	246	37	32	1127	312	139	36	31	213	762
17:36:06	211	37	33	767	400	158	36	32	250	37	32	1131	317	142	36	31	219	765
17:37:06	215	36	33	772	405	161	36	32	254	37	32	1134	322	145	37	31	227	766
17:38:06	219	36	33	777	410	165	36	32	258	36	32	1138	327	148	37	31	240	768
17:39:06	223	38	33	782	416	168	37	32	263	37	32	1139	332	151	38	31	248	770
17:40:06	227	39	33	787	422	172	37	32	268	38	32	1140	337	154	38	31	252	771
17:41:06	231	39	34	793	427	175	38	32	272	39	32	1146	342	157	39	31	253	774
17:42:06	235	40	34	798	432	178	39	32	277	40	32	1149	346	160	39	31	253	775
17:43:06	239	39	34	803	437	182	38	33	280	39	32	1152	351	163	39	31	257	778
17:44:06	242	39	34	808	442	185	38	33	284	39	32	1158	356	166	40	31	271	779
17:45:06	246	40	34	813	447	189	39	33	289	40	33	1158	360	169	40	31	284	779
17:46:06	250	41	34	818	452	192	40	33	293	41	33	1157	365	173	41	31	285	782
17:47:06	254	42	34	822	457	195	40	33	298	42	33	1158	369	176	41	31	287	785

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
17:48:06	258	43	34	827	462	199	41	33	302	43	33	1162	374	179	42	31	286	790
17:49:06	262	43	35	831	467	202	41	33	306	43	33	1167	378	182	42	31	283	790
17:50:06	265	44	35	836	472	205	42	33	310	44	33	1170	383	185	43	31	282	795
17:51:06	269	44	35	840	476	208	43	33	314	44	33	1176	387	188	43	31	285	795
17:52:06	273	44	35	845	481	212	43	34	318	45	33	1177	391	191	44	31	291	796
17:53:06	277	45	35	849	485	215	43	34	322	45	34	1176	396	194	44	31	297	796
17:54:06	280	46	35	853	490	218	44	34	326	46	34	1179	400	197	45	31	295	799
17:55:06	284	47	36	858	494	222	44	34	330	47	34	1182	404	200	46	31	293	802
17:56:06	288	47	36	862	499	225	45	34	334	47	34	1184	408	203	46	31	293	802
17:57:06	291	46	36	865	502	228	45	35	337	47	34	1189	412	206	47	31	296	805
17:58:06	295	47	36	869	507	232	45	35	341	48	34	1190	417	209	47	31	303	808
17:59:06	298	48	36	873	511	235	46	35	345	49	34	1197	421	212	48	31	309	811
18:00:06	302	50	37	878	516	238	47	35	349	50	34	1197	425	215	49	31	307	813
18:01:06	305	50	37	883	520	241	48	35	353	50	35	1199	429	218	49	31	305	815
18:02:06	309	50	37	887	524	244	48	35	357	51	35	1204	433	221	50	31	309	816
18:03:06	312	51	37	891	528	248	49	36	361	52	35	1202	437	224	51	32	314	817
18:04:06	316	52	38	895	533	251	49	36	364	52	35	1204	441	227	52	32	311	821
18:05:06	319	53	38	898	537	254	50	36	368	53	35	1208	444	230	52	32	301	823
18:06:06	323	53	38	902	541	257	50	36	372	54	35	1208	448	233	53	32	301	826
18:07:06	326	54	38	906	545	260	51	37	375	55	36	1215	452	236	54	32	303	826
18:08:06	329	54	38	909	549	263	51	37	379	55	36	1213	456	239	54	32	309	826
18:09:06	333	55	39	913	553	266	52	37	383	56	36	1217	460	242	55	32	309	829
18:10:06	336	56	39	917	557	269	53	37	386	57	36	1216	464	245	56	32	303	832
18:11:06	339	55	39	920	560	273	53	38	389	57	36	1218	467	248	57	32	303	833

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
18:12:06	343	53	40	922	563	276	51	38	391	55	37	1221	471	251	57	32	323	832
18:13:06	346	56	40	925	567	279	52	39	395	57	37	1223	475	253	58	32	340	833
18:14:06	349	54	40	927	570	282	52	39	398	58	37	1226	479	256	59	32	357	835
18:15:06	353	55	41	929	574	285	52	39	402	58	38	1227	482	259	60	32	385	837
18:16:06	356	58	41	933	579	288	54	40	406	60	38	1230	486	262	60	32	387	837
18:17:06	359	56	41	935	581	291	53	40	408	59	38	1228	490	265	61	32	400	835
18:18:06	362	59	41	939	586	294	55	40	413	61	38	1235	493	268	62	32	411	835
18:19:06	365	61	42	942	590	297	57	41	417	63	39	1236	497	270	63	32	399	840
18:20:06	369	61	42	945	593	300	57	41	420	63	39	1240	500	273	64	32	399	837
18:21:06	372	63	42	948	597	303	58	41	424	65	39	1241	503	276	65	32	404	839
18:22:06	375	64	43	952	601	305	60	41	427	66	40	1243	507	279	65	32	397	843
18:23:06	378	64	43	954	603	308	59	42	430	66	40	1247	510	282	66	32	402	840
18:24:06	381	62	44	956	605	311	58	42	432	65	40	1241	514	284	67	32	428	845
18:25:06	384	62	44	958	609	314	59	42	435	65	41	1238	517	287	68	33	448	847
18:26:06	387	62	44	960	612	317	59	43	437	65	41	1241	521	290	69	33	461	846
18:27:06	390	65	44	962	616	320	61	43	441	68	41	1246	524	293	70	33	471	844
18:28:06	393	65	45	965	619	323	61	44	445	69	42	1248	527	295	71	33	472	844
18:29:06	396	66	46	967	622	326	62	44	447	69	42	1249	530	298	71	33	477	843
18:30:06	399	66	46	969	625	329	62	44	450	69	43	1249	533	301	72	33	483	845
18:31:06	402	65	47	970	628	331	61	45	453	70	43	1251	537	304	73	33	485	844
18:32:06	405	70	47	974	633	334	65	46	458	73	43	1258	540	306	74	33	471	839
18:33:06	408	71	47	977	636	337	66	46	461	74	43	1258	543	309	75	33	467	841
18:34:06	411	73	48	980	639	340	67	46	464	76	44	1259	546	311	76	33	471	843
18:35:06	414	73	48	982	642	342	67	47	467	76	44	1259	549	314	77	33	473	846

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
18:36:06	417	72	49	984	644	345	67	47	468	75	45	1256	552	317	78	33	485	848
18:37:06	420	73	49	985	647	348	68	48	472	76	45	1258	555	319	79	33	492	847
18:38:06	422	72	50	987	649	351	68	48	474	76	46	1257	558	322	79	33	496	847
18:39:06	425	77	50	991	654	353	71	49	479	80	46	1262	560	325	80	33	486	849
18:40:06	428	80	50	994	658	356	73	49	483	83	46	1266	563	327	81	33	474	849
18:41:06	431	81	51	997	661	359	74	49	486	84	47	1269	566	330	82	33	471	848
18:42:06	433	81	51	999	663	361	74	50	488	85	47	1271	569	332	83	33	474	849
18:43:06	436	80	52	1000	665	364	74	51	490	84	48	1269	572	335	84	34	496	851
18:44:06	439	79	52	1002	667	367	74	51	492	83	48	1268	575	338	85	34	506	855
18:45:06	441	79	53	1003	670	369	74	52	494	83	49	1266	577	340	86	34	511	855
18:46:06	444	81	53	1004	672	372	75	52	497	84	49	1270	580	342	87	34	516	855
18:47:06	447	85	53	1007	676	374	77	52	502	88	49	1276	583	345	88	34	510	853
18:48:06	449	88	54	1011	681	377	80	53	506	91	50	1276	586	347	89	34	491	856
18:49:06	452	85	55	1012	681	380	78	54	507	90	50	1278	589	350	90	34	497	856
18:50:06	454	83	55	1013	683	382	78	54	508	89	51	1274	591	353	91	34	510	859
18:51:06	457	86	56	1015	686	385	79	55	511	91	51	1278	594	355	92	34	515	860
18:52:06	460	88	56	1017	689	387	80	55	514	92	52	1282	597	357	93	34	523	857
18:53:06	462	89	57	1019	691	390	81	56	516	92	52	1281	599	360	94	35	524	859
18:54:06	465	92	57	1022	695	392	83	56	520	96	53	1283	602	362	95	35	519	860
18:55:06	467	94	58	1025	699	395	86	57	524	99	53	1289	604	365	96	35	502	861
18:56:06	470	95	58	1028	702	397	87	57	527	100	53	1291	607	367	97	35	492	860
18:57:06	472	96	59	1029	704	400	87	58	529	100	54	1290	610	370	98	35	501	862
18:58:06	475	97	59	1031	706	402	87	58	532	102	55	1289	612	372	99	35	513	864
18:59:06	477	96	60	1032	707	404	86	59	533	100	55	1288	615	374	100	35	520	864

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
19:00:06	480	98	60	1035	711	407	89	59	536	103	56	1293	617	377	101	35	511	865
19:01:06	482	100	61	1038	714	409	91	60	539	105	56	1294	620	379	102	35	500	866
19:02:06	484	101	61	1040	717	411	92	60	542	106	57	1297	622	381	103	36	498	865
19:03:06	487	103	62	1042	720	414	94	61	545	108	57	1301	625	383	104	36	492	868
19:04:06	489	103	62	1045	722	416	95	61	547	109	57	1301	627	386	105	36	494	870
19:05:06	492	104	63	1046	724	419	95	62	549	110	58	1299	630	388	106	36	502	870
19:06:06	494	106	63	1049	727	421	96	62	552	111	58	1303	632	390	107	36	504	872
19:07:06	496	107	64	1051	730	423	97	63	555	113	59	1303	635	393	109	36	495	875
19:08:06	499	108	64	1053	732	425	98	64	557	114	60	1303	637	395	110	36	490	876
19:09:06	501	108	65	1055	734	428	99	64	560	115	60	1307	639	397	111	36	491	877
19:10:06	503	110	65	1057	737	430	101	65	562	116	61	1308	642	399	112	36	492	878
19:11:06	506	111	66	1059	739	432	102	65	564	117	61	1310	644	401	113	37	493	877
19:12:06	508	113	67	1061	742	434	103	66	567	119	62	1313	647	404	114	37	496	879
19:13:06	510	114	67	1063	744	437	104	66	569	120	62	1310	649	406	115	37	493	880
19:14:06	513	115	68	1065	747	439	105	67	571	121	63	1313	651	408	116	37	489	881
19:15:06	515	116	68	1067	749	441	106	68	573	121	63	1312	654	410	118	37	488	883
19:16:06	517	115	70	1068	750	443	106	69	575	121	64	1313	656	413	119	37	497	883
19:17:06	519	115	70	1068	752	445	105	70	577	122	65	1312	658	415	120	38	506	883
19:18:06	522	116	71	1070	754	448	105	70	579	123	66	1317	660	417	121	38	514	882
19:19:06	524	118	71	1072	756	450	107	70	582	125	66	1315	663	419	122	38	516	883
19:20:06	526	120	71	1074	759	452	109	71	584	126	67	1315	665	421	123	38	505	884
19:21:06	528	120	72	1076	761	454	109	72	586	127	67	1321	667	423	124	38	505	887
19:22:06	531	122	73	1078	763	456	110	72	589	129	68	1322	669	425	125	38	495	887
19:23:06	533	122	74	1079	765	458	111	73	591	130	68	1324	672	427	126	39	500	890

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
19:24:06	535	123	74	1081	767	460	112	73	593	131	69	1325	674	429	127	39	502	890
19:25:06	537	125	74	1083	770	462	114	74	596	133	70	1324	676	431	129	39	503	891
19:26:06	539	126	75	1085	772	465	115	74	598	133	70	1327	678	433	130	39	504	892
19:27:06	541	128	75	1087	774	467	116	75	600	135	71	1327	680	435	131	39	505	892
19:28:06	543	128	76	1088	776	469	117	75	602	136	72	1330	682	437	132	40	509	894
19:29:06	545	130	77	1090	778	471	117	76	605	138	72	1330	685	439	133	40	511	896
19:30:06	548	130	77	1091	780	473	117	77	607	139	73	1332	687	441	134	40	512	898
19:31:06	550	131	78	1092	781	475	118	77	609	139	73	1333	689	443	136	40	519	898
19:32:06	552	132	78	1093	783	477	119	78	611	140	74	1331	691	445	137	40	526	901
19:33:06	554	133	79	1095	785	479	120	78	613	142	75	1331	693	447	138	41	526	900
19:34:06	556	134	80	1097	787	481	121	79	614	142	75	1333	695	449	139	41	525	901
19:35:06	558	135	80	1099	790	483	123	80	616	143	76	1335	697	451	140	41	521	902
19:36:06	560	137	81	1101	793	485	125	80	619	145	76	1337	699	453	141	41	518	901
19:37:06	562	139	81	1102	795	487	126	81	620	145	77	1337	701	455	142	41	513	903
19:38:06	564	139	82	1104	797	489	127	82	623	147	78	1336	703	457	143	42	506	906
19:39:06	566	141	83	1106	799	491	129	82	625	148	78	1340	706	459	145	42	503	906
19:40:06	568	142	83	1107	801	493	130	83	627	149	79	1338	707	461	146	42	501	906
19:41:06	570	143	84	1108	803	495	131	84	629	150	79	1342	710	463	147	42	501	908
19:42:06	572	144	84	1109	804	497	131	84	631	152	80	1344	712	465	148	42	502	908
19:43:06	574	145	85	1111	806	498	131	85	633	153	81	1341	714	467	149	43	506	910
19:44:06	576	145	86	1113	808	500	132	86	635	154	81	1190	715	468	150	43	502	886
19:45:06	578	146	86	1100	809	502	132	86	637	155	82	1035	717	470	151	43	473	763
19:46:06	580	147	87	1078	812	504	134	87	639	157	83	1005	719	472	153	43	441	697
19:47:06	582	148	88	1053	813	506	135	88	640	157	83	975	721	474	154	43	413	656

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
19:48:06	584	149	88	1030	814	508	135	89	642	159	84	946	723	476	155	44	388	627
19:49:06	586	149	89	1008	814	510	135	89	644	159	85	921	724	479	156	44	367	605
19:50:06	588	152	90	989	815	511	137	90	646	160	85	900	726	480	157	44	349	587
19:51:06	589	153	90	971	814	513	139	91	647	162	86	880	727	482	158	44	334	572
19:52:06	591	154	91	953	813	515	141	91	649	162	87	862	728	484	159	45	320	559
19:53:06	593	155	92	937	811	517	140	92	650	163	87	844	728	486	160	45	308	546
19:54:06	594	155	92	922	808	519	140	93	651	164	88	829	728	487	162	45	296	535
19:55:06	596	155	93	907	804	520	140	93	652	163	89	813	728	489	163	45	286	523
19:56:06	597	156	94	894	801	522	142	94	652	164	89	800	727	491	164	45	277	512
19:57:06	598	157	95	881	797	523	142	95	653	165	90	787	726	493	165	46	268	503
19:58:06	598	158	95	868	793	525	143	95	654	167	90	776	725	494	166	46	260	493
19:59:06	599	159	96	857	789	527	143	96	655	168	91	763	724	496	167	46	253	484
20:00:06	600	160	97	846	785	528	144	97	655	169	92	753	723	497	168	46	246	475
20:01:06	600	159	97	833	778	529	143	98	655	169	93	739	721	499	169	47	239	467
20:02:06	600	159	98	823	774	531	145	98	654	170	93	730	720	500	171	47	233	459
20:03:06	600	161	98	814	771	532	147	99	654	171	94	720	718	502	172	47	227	452
20:04:06	600	162	99	804	766	533	147	100	654	173	95	711	716	503	173	47	222	446
20:05:06	600	162	100	795	760	534	146	100	654	174	95	702	714	504	174	48	217	440
20:06:06	599	163	101	786	756	535	148	101	654	175	96	693	712	506	175	48	212	433
20:07:06	599	163	101	778	752	536	150	102	652	176	97	685	710	507	176	48	208	427
20:08:06	598	164	102	769	746	537	150	102	651	177	98	678	707	508	177	48	203	422
20:09:06	598	166	103	762	742	537	150	103	650	178	98	672	705	509	178	49	199	416
20:10:06	597	169	103	755	739	538	150	104	650	180	99	666	703	510	179	49	195	410
20:11:06	596	171	104	749	735	539	151	105	649	181	100	660	700	511	180	49	191	405

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
20:12:06	595	172	105	742	731	539	153	105	648	182	100	654	698	512	182	49	187	400
20:13:06	594	173	105	736	727	540	156	106	647	184	101	650	696	513	183	49	183	395
20:14:06	593	173	106	729	723	540	156	107	645	184	102	643	693	513	184	50	180	390
20:15:06	592	173	107	720	716	540	155	107	644	185	102	633	691	514	185	50	176	385
20:16:06	591	173	107	713	710	540	154	108	641	185	103	626	688	515	186	50	173	380
20:17:06	589	175	108	708	707	540	157	109	639	185	104	623	686	515	187	50	170	377
20:18:06	588	176	109	702	704	540	159	110	637	185	105	617	683	516	188	51	168	373
20:19:06	586	178	109	697	700	541	159	110	636	188	105	612	680	516	189	51	165	369
20:20:06	585	178	110	691	696	541	159	111	635	189	106	606	678	517	190	51	162	365
20:21:06	584	179	110	685	692	540	161	112	632	189	107	602	675	517	191	51	159	361
20:22:06	582	180	111	680	688	540	162	112	631	191	107	597	673	517	192	51	157	356
20:23:06	581	181	112	674	683	540	162	113	629	191	108	591	670	518	194	52	154	353
20:24:06	579	183	112	670	680	540	163	114	628	194	109	586	667	518	195	52	152	349
20:25:06	578	182	113	664	675	539	163	114	625	193	110	580	665	518	196	52	149	346
20:26:06	576	183	114	659	672	539	165	115	624	194	110	576	662	518	197	52	147	343
20:27:06	575	183	114	654	668	539	165	116	622	195	111	572	660	518	198	53	146	339
20:28:06	573	183	115	649	664	538	166	116	618	194	112	565	657	519	199	53	144	336
20:29:06	571	184	116	644	660	538	165	117	617	195	112	559	655	519	200	53	142	333
20:30:06	570	184	116	638	654	537	165	118	615	196	113	555	652	518	201	53	140	330
20:31:06	568	187	117	634	651	537	166	118	615	199	114	552	649	518	202	54	139	326
20:32:06	567	186	117	628	645	536	166	119	610	195	115	546	647	518	203	54	137	323
20:33:06	565	184	118	622	640	536	168	120	606	195	115	539	644	518	204	54	135	321
20:34:06	564	185	118	618	636	535	169	120	604	196	116	534	642	518	205	55	134	320
20:35:06	562	185	119	614	633	534	172	121	602	197	117	529	640	518	206	55	134	317

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
20:36:06	560	187	120	611	631	534	175	122	600	197	118	526	637	518	207	55	133	315
20:37:06	558	188	120	609	630	533	176	122	598	198	118	524	635	517	208	55	131	311
20:38:06	557	188	121	604	626	533	175	123	596	199	119	520	632	517	209	56	130	307
20:39:06	555	189	122	599	621	532	173	124	592	197	120	515	629	517	210	56	128	304
20:40:06	553	189	122	594	616	531	172	124	589	196	121	513	627	516	211	56	127	301
20:41:06	552	189	123	591	614	530	174	125	586	196	122	510	625	516	212	57	125	298
20:42:06	550	191	123	587	610	529	175	125	584	196	122	508	622	515	213	57	124	295
20:43:06	548	193	124	584	609	529	176	126	583	197	123	504	620	515	214	57	123	293
20:44:06	547	193	125	581	606	528	175	127	581	199	124	500	618	514	215	58	121	291
20:45:06	545	193	125	578	604	527	176	127	578	199	124	495	615	514	216	58	120	288
20:46:06	543	195	126	575	601	526	177	128	578	202	125	493	613	513	216	58	119	285
20:47:06	541	197	126	572	599	525	180	128	576	203	126	491	611	513	217	58	117	281
20:48:06	540	199	127	570	595	524	180	129	575	205	126	783	609	512	218	58	129	342
20:49:06	538	199	127	586	591	523	180	129	573	206	127	962	606	512	219	59	152	508
20:50:06	536	199	128	611	587	522	181	130	571	207	127	1011	604	511	220	59	178	601
20:51:06	535	200	128	636	584	521	180	130	568	205	128	1034	601	510	221	59	205	645
20:52:06	533	201	128	659	583	520	180	131	566	206	129	1053	600	510	222	60	233	665
20:53:06	531	200	129	682	584	519	181	131	566	210	129	1064	598	509	223	60	256	685
20:54:06	530	202	130	703	585	518	181	132	564	210	130	1076	597	508	223	60	274	696
20:55:06	528	201	130	721	586	517	182	133	560	209	131	1086	596	508	224	61	290	703
20:56:06	527	200	130	736	586	516	183	133	558	208	131	1100	596	507	225	61	306	712
20:57:06	526	201	131	752	589	515	184	134	557	208	132	1105	596	506	226	61	326	721
20:58:06	525	201	131	766	591	514	183	134	556	209	133	1118	597	506	227	61	342	726
20:59:06	524	203	132	780	596	513	184	135	555	210	133	1123	598	505	228	62	352	731

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
21:00:06	524	205	133	793	600	513	185	135	555	211	134	1131	599	504	228	62	360	738
21:01:06	523	205	133	805	603	512	186	136	556	213	134	1143	600	504	229	62	372	743
21:02:06	523	207	133	816	608	511	187	136	557	214	135	1148	602	503	230	63	381	745
21:03:06	523	207	134	828	612	511	187	137	555	214	136	1155	604	503	231	63	393	751
21:04:06	523	207	134	837	615	510	187	137	555	212	136	1159	606	502	231	63	403	758
21:05:06	523	207	135	846	619	509	187	138	553	212	137	1168	608	502	232	64	412	761
21:06:06	524	206	136	856	623	509	189	138	554	213	138	1173	611	501	233	64	422	767
21:07:06	524	205	136	865	628	509	188	139	555	214	138	1179	613	501	234	64	426	771
21:08:06	525	205	136	873	632	508	191	140	557	216	138	1183	616	501	235	65	431	775
21:09:06	526	205	137	882	637	508	194	140	559	218	139	1188	618	501	235	65	442	777
21:10:06	526	206	138	890	642	508	193	141	560	218	139	1198	621	501	236	65	449	777
21:11:06	527	208	138	898	646	508	192	141	563	220	140	1200	624	501	237	65	450	782
21:12:06	529	210	139	906	652	508	191	142	565	221	141	1208	626	501	237	66	453	787
21:13:06	530	211	139	912	655	508	191	142	565	219	141	1209	629	501	238	66	459	788
21:14:06	531	211	140	919	660	509	191	143	566	219	142	1213	632	501	239	66	466	790
21:15:06	533	209	140	925	663	509	192	143	566	218	142	1218	634	501	239	67	469	796
21:16:06	534	207	140	931	667	509	194	144	568	219	143	1215	637	501	240	67	472	799
21:17:06	535	210	141	936	670	510	192	144	568	217	143	1220	640	501	240	67	475	802
21:18:06	537	210	141	940	672	510	192	145	569	218	144	1224	643	502	241	67	480	803
21:19:06	539	208	142	945	676	511	195	145	574	222	144	1223	646	502	242	68	486	807
21:20:06	540	208	142	951	681	511	196	146	575	223	145	1229	649	502	242	68	488	811
21:21:06	542	207	143	956	685	512	197	147	575	221	146	1231	652	503	243	68	486	815
21:22:06	544	208	143	962	689	513	200	147	578	222	146	1234	654	504	243	69	486	815
21:23:06	546	210	144	965	691	514	199	147	580	222	147	1240	657	504	244	69	490	817

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
21:24:06	547	209	144	970	695	514	198	148	583	223	147	1243	660	504	245	69	493	821
21:25:06	549	210	144	974	699	515	200	148	586	225	148	1242	663	505	245	69	500	823
21:26:06	551	207	145	979	703	516	198	149	584	221	148	1248	665	506	246	70	506	825
21:27:06	553	206	145	984	707	517	201	149	586	221	149	1251	668	506	246	70	504	827
21:28:06	555	207	145	989	711	518	203	150	589	222	149	1257	671	508	247	70	509	825
21:29:06	557	214	146	992	714	519	204	150	594	226	150	1255	673	508	247	71	509	829
21:30:06	559	213	146	993	716	520	201	151	595	226	150	1257	676	509	248	71	513	831
21:31:06	560	215	147	996	719	522	197	151	596	224	151	1260	679	510	249	71	518	832
21:32:06	562	217	147	999	722	523	195	151	598	223	151	1264	681	511	249	71	513	834
21:33:06	564	215	148	1004	726	524	196	152	599	223	152	1268	684	511	250	72	510	837
21:34:06	566	215	148	1008	729	525	199	152	603	227	152	1269	686	513	250	72	516	839
21:35:06	568	215	149	1010	733	526	200	153	605	227	153	1058	689	513	251	72	503	789
21:36:06	570	222	149	999	738	528	200	153	615	237	152	955	691	514	251	72	464	675
21:37:06	572	225	150	979	743	529	200	154	618	240	153	922	694	515	252	72	425	615
21:38:06	574	218	150	955	743	530	200	154	614	233	153	889	696	516	252	73	394	577
21:39:06	576	223	150	935	747	531	201	154	619	235	153	867	699	517	253	73	368	550
21:40:06	578	226	150	917	751	532	204	154	624	241	153	844	701	518	253	73	344	527
21:41:06	580	226	150	897	749	534	201	155	623	236	154	822	703	519	254	73	324	508
21:42:06	582	226	150	880	749	535	202	155	628	241	154	805	704	520	254	73	307	493
21:43:06	583	227	151	866	749	536	203	155	628	239	154	789	705	522	255	74	292	480
21:44:06	585	226	151	851	748	537	206	155	629	239	155	775	706	523	255	74	280	469
21:45:06	587	225	152	839	748	539	207	156	627	235	155	758	707	524	256	74	269	460
21:46:06	588	223	152	826	746	540	206	156	627	232	156	743	707	525	256	74	260	452
21:47:06	589	223	153	815	743	541	206	157	628	232	156	732	706	526	257	74	252	443

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
21:48:06	590	222	153	803	740	542	207	157	628	231	156	717	706	527	257	75	245	435
21:49:06	591	220	153	792	735	543	208	158	629	233	157	704	705	528	258	75	238	426
21:50:06	592	222	153	781	730	545	210	158	632	238	157	691	705	530	259	75	232	419
21:51:06	593	221	154	771	726	546	209	159	632	237	158	684	704	531	259	76	226	413
21:52:06	593	221	154	762	724	546	210	159	633	238	158	675	702	532	260	76	220	407
21:53:06	593	220	155	753	720	548	211	160	633	239	159	667	701	532	260	76	215	399
21:54:06	594	222	155	744	716	548	211	160	633	239	159	659	700	533	261	76	210	393
21:55:06	594	221	155	737	712	549	210	161	630	236	160	651	698	534	261	77	206	388
21:56:06	594	220	156	728	707	550	210	161	629	236	160	644	697	535	262	77	202	383
21:57:06	593	220	156	722	705	550	214	161	628	235	161	638	695	536	262	77	197	378
21:58:06	593	221	156	715	701	551	212	162	626	234	161	629	693	536	263	77	193	373
21:59:06	592	222	157	708	697	552	214	162	627	235	162	622	691	537	263	78	189	368
22:00:06	592	222	157	701	693	552	214	162	626	236	162	617	689	538	264	78	186	363
22:01:06	591	222	157	694	689	552	213	163	624	236	163	610	687	538	265	78	182	359
22:02:06	590	222	158	687	685	553	213	163	624	237	163	605	685	539	265	78	179	355
22:03:06	590	221	159	682	681	553	215	163	624	238	163	601	683	539	265	79	176	351
22:04:06	589	222	158	675	677	553	214	164	621	237	164	594	681	540	266	79	173	347
22:05:06	588	224	158	670	675	554	216	164	619	236	164	582	679	540	266	79	170	342
22:06:06	587	224	158	663	670	553	215	164	617	236	164	575	677	540	267	79	167	339
22:07:06	586	224	159	659	667	553	216	164	616	238	164	574	675	541	268	79	164	336
22:08:06	585	225	159	653	663	553	216	165	616	240	164	569	672	541	268	80	162	332
22:09:06	583	226	159	650	660	553	217	165	614	240	165	827	670	541	269	80	169	383
22:10:06	582	225	159	664	656	553	217	165	613	240	165	993	668	541	269	80	189	549
22:11:06	581	226	160	686	653	553	217	165	610	238	165	1039	666	541	270	80	216	630

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
22:12:06	580	225	160	708	650	553	219	166	609	240	166	1062	663	542	270	80	246	668
22:13:06	578	228	159	730	648	552	221	166	608	241	166	1078	661	542	271	81	269	694
22:14:06	577	232	160	749	646	552	221	166	609	243	166	1101	659	542	271	81	286	705
22:15:06	576	236	159	768	648	552	226	166	610	247	166	1110	658	542	272	81	300	714
22:16:06	575	234	160	784	647	552	224	166	609	248	166	1123	657	542	273	81	315	723
22:17:06	573	234	160	801	649	551	223	167	606	248	166	1136	656	541	273	81	328	736
22:18:06	573	232	160	814	648	551	221	167	606	249	167	1149	656	542	274	81	343	743
22:19:06	572	228	161	827	650	550	223	167	604	247	167	1151	657	542	274	82	374	750
22:20:06	571	226	161	838	651	550	221	168	600	245	167	1160	657	541	275	82	396	758
22:21:06	570	229	161	849	653	549	219	168	597	243	168	1164	658	541	275	82	410	763
22:22:06	570	228	161	858	656	549	218	169	596	242	168	1171	659	540	276	82	422	768
22:23:06	570	229	161	870	660	549	221	169	596	243	169	1177	660	540	276	82	437	770
22:24:06	570	232	161	879	665	548	223	169	594	241	169	1189	661	541	277	83	442	780
22:25:06	570	233	161	887	670	548	225	169	595	242	168	1194	663	540	277	83	438	786
22:26:06	570	234	161	896	674	548	227	169	594	241	169	1201	664	540	278	83	438	792
22:27:06	570	234	161	902	678	548	227	169	595	242	168	1205	666	540	279	83	439	799
22:28:06	570	235	160	909	681	547	227	168	596	243	168	1206	668	540	279	83	441	804
22:29:06	571	235	160	915	684	547	227	168	596	243	168	1209	671	540	280	83	443	809
22:30:06	572	235	161	922	688	547	227	169	599	245	169	1213	673	540	280	83	449	809
22:31:06	573	240	161	929	692	547	230	169	604	250	169	1220	675	541	281	84	458	806
22:32:06	573	241	162	936	696	548	229	169	607	252	169	1228	677	542	281	83	454	805
22:33:06	574	252	161	950	707	548	235	169	615	262	169	1230	680	541	282	83	441	814
22:34:06	575	251	161	956	711	548	238	169	620	267	168	1239	682	541	282	84	425	821
22:35:06	576	253	161	962	714	549	235	169	623	269	168	1241	684	542	283	84	416	823

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
22:36:06	578	251	161	967	716	549	236	169	623	268	168	1249	687	542	284	84	416	825
22:37:06	579	246	161	971	717	550	235	170	618	259	168	1248	689	543	284	84	435	822
22:38:06	580	242	162	974	716	550	231	170	616	256	169	1247	691	544	285	84	466	826
22:39:06	582	237	163	978	719	551	229	171	612	250	170	1246	694	543	285	85	484	832
22:40:06	583	237	163	982	721	551	228	171	614	250	170	1245	697	544	286	85	496	834
22:41:06	584	248	163	990	732	552	236	171	624	261	170	1253	698	544	286	85	494	835
22:42:06	586	252	163	996	737	553	240	171	631	268	170	1263	701	546	287	85	477	841
22:43:06	588	252	162	1001	741	553	242	171	631	267	169	1266	704	547	287	85	470	840
22:44:06	589	253	162	1008	746	554	246	171	631	265	169	1272	707	547	288	85	461	847
22:45:06	591	248	163	1007	745	555	238	172	629	260	170	1018	708	549	288	85	409	778
22:46:06	593	247	164	991	747	556	235	173	634	262	170	920	711	549	288	85	341	654
22:47:06	594	252	162	973	755	557	239	173	643	274	170	862	714	548	289	88	287	557
22:48:06	596	247	163	949	760	558	242	172	649	280	170	641	715	548	290	86	244	485
22:49:06	598	247	165	921	760	559	239	173	648	276	171	664	717	547	290	88	209	432
22:50:06	600	243	165	893	754	560	234	172	647	273	172	621	719	547	291	89	181	396
22:51:06	601	241	165	870	753	561	230	172	646	268	172	587	721	549	292	89	158	370
22:52:06	603	243	166	850	751	562	231	172	647	268	173	559	722	550	292	90	139	348
22:53:06	605	244	166	833	750	563	233	173	649	267	173	537	724	554	293	89	123	330
22:54:06	606	243	166	815	748	564	231	173	650	268	174	520	724	553	293	89	110	314
22:55:06	607	246	167	802	747	565	234	173	652	269	174	501	724	555	294	90	99	300
22:56:06	608	249	166	786	744	566	229	173	655	271	174	490	725	557	294	90	90	291
22:57:06	610	244	167	770	737	567	225	173	654	269	175	477	724	557	295	90	82	286
22:58:06	610	243	167	757	733	568	222	173	655	269	175	465	723	557	295	91	75	280
22:59:06	611	249	167	750	733	569	226	173	658	274	176	455	721	557	296	91	69	273

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
23:00:06	611	248	167	742	732	569	228	174	658	273	176	443	721	558	296	91	64	268
23:01:06	611	250	166	734	730	570	229	174	660	275	176	432	719	559	297	91	59	260
23:02:06	611	252	166	724	725	571	229	174	661	278	177	419	717	559	297	92	55	252
23:03:06	611	250	167	715	721	571	230	173	662	279	177	412	716	562	297	92	52	246
23:04:06	611	253	167	705	716	572	231	173	660	277	177	407	713	562	298	92	49	241
23:05:06	610	252	167	695	710	573	230	173	659	277	178	400	710	562	298	92	47	236
23:06:06	610	250	168	685	703	573	227	174	655	273	178	392	708	563	299	93	45	233
23:07:06	609	252	167	679	701	573	227	174	656	275	178	385	706	563	299	93	43	231
23:08:06	608	250	168	671	696	573	228	174	654	274	178	378	704	564	300	93	41	228
23:09:06	607	251	168	664	690	574	229	174	654	275	179	370	702	565	300	93	40	223
23:10:06	606	252	168	659	688	574	231	174	652	275	179	364	699	565	300	94	39	218
23:11:06	605	253	168	653	684	574	230	174	653	278	179	363	697	566	301	93	37	214
23:12:06	604	254	168	645	678	574	229	175	650	276	179	358	694	566	301	93	37	211
23:13:06	602	252	169	638	673	574	228	175	647	275	180	351	691	565	302	94	36	208
23:14:06	601	253	169	634	671	574	230	175	648	278	180	347	689	566	302	94	35	204
23:15:06	600	251	169	627	663	573	228	175	645	276	180	341	686	565	303	94	34	202
23:16:06	598	254	169	623	662	573	231	175	643	276	180	337	684	568	303	94	34	199
23:17:06	597	251	169	615	654	573	229	175	640	274	181	332	681	567	304	94	33	196
23:18:06	595	253	169	611	653	573	228	175	640	276	181	328	679	567	304	94	33	194
23:19:06	594	253	170	606	648	572	228	176	637	276	181	322	675	566	304	95	33	191
23:20:06	592	251	170	601	643	571	229	176	635	276	181	317	672	565	305	95	32	187
23:21:06	590	254	170	599	641	571	236	176	634	277	182	309	670	566	305	95	32	183
23:22:06	589	252	171	593	636	570	234	176	631	277	182	306	667	566	306	95	32	180
23:23:06	587	251	171	585	629	570	231	176	628	275	182	303	665	566	306	95	32	177

เวลา	อุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลในตำแหน่งต่างๆ (°C)																	
	1A	1B	1C	2A	2B	2C	2D	2E	3A	3B	3C	4A	4B	4C	4D	4E	5A	6A
23:24:06	585	254	170	582	628	569	231	176	628	277	182	301	663	566	307	95	31	175
23:25:06	584	254	171	576	623	568	229	177	626	277	183	296	660	565	307	95	31	172
23:26:06	582	256	171	573	621	568	231	177	623	277	183	293	657	565	308	96	31	170
23:27:06	580	255	171	568	615	567	229	177	621	277	183	291	654	564	308	96	31	168
23:28:06	578	256	171	567	615	566	233	177	620	278	183	289	651	564	309	95	31	168
23:29:06	576	258	171	564	613	565	235	177	619	281	183	288	650	564	309	96	31	167
23:30:06	575	259	171	562	611	564	237	177	618	283	183	285	646	562	309	96	31	166
23:31:06	573	258	171	557	607	564	234	177	617	284	184	273	644	563	310	96	30	163
23:32:06	571	260	171	555	606	563	236	177	616	285	184	266	642	563	310	96	30	161
23:33:06	569	261	171	552	603	562	236	178	613	284	184	260	640	562	311	96	30	160
23:34:06	568	261	171	548	599	561	235	178	612	285	184	256	637	561	311	96	30	158
23:35:06	566	257	172	539	590	560	233	178	607	282	184	250	635	561	312	96	30	157
23:36:06	564	257	172	536	586	559	235	178	603	280	185	247	632	560	312	97	30	156
23:37:06	562	259	172	534	585	558	234	178	602	281	185	245	629	559	312	97	30	153
23:38:06	561	258	172	528	579	557	232	178	598	279	185	242	627	559	313	97	30	152
23:39:06	559	258	172	525	575	556	234	178	596	279	185	238	624	557	313	98	30	151
23:40:06	557	257	173	519	570	555	232	179	593	278	185	236	622	557	314	98	30	151
23:41:06	555	259	172	519	571	554	234	179	593	280	185	234	619	556	314	98	30	149
23:42:06	553	260	173	518	569	552	236	179	591	281	186	233	617	555	314	98	30	148
23:43:06	552	260	173	517	569	551	237	179	590	282	186	230	615	555	315	99	30	146
23:44:06	550	262	172	515	567	550	236	179	590	285	186	230	613	554	315	98	30	144
23:45:07	548	262	173	514	565	549	239	179	588	285	186	227	610	552	316	99	30	143
23:46:07	547	261	173	508	561	548	238	180	584	283	186	225	608	552	316	99	30	141

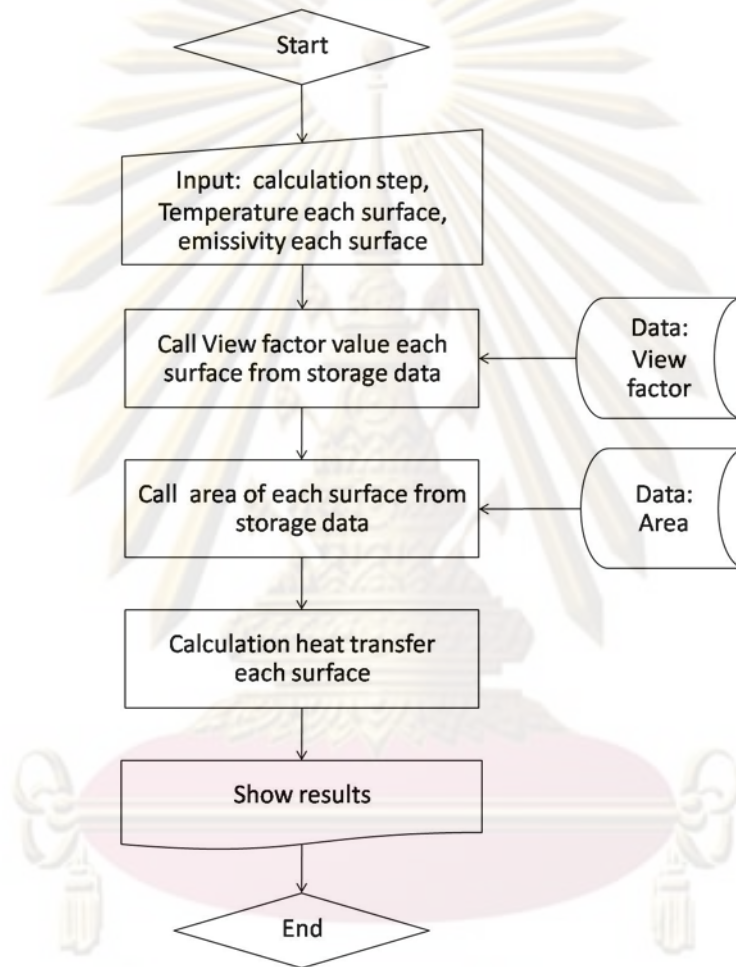


ภาคผนวก ค
โปรแกรมคำนวณสมการเชิงเส้นหลายตัวแปร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายละเอียดโปรแกรมคำนวณสมการเชิงเส้นหลายตัวแปร

โปรแกรมเขียนขึ้นด้วย m-file ชื่อ RadMatrixInput.m ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้ รูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำนวณสมการเชิงเส้นหลายตัวแปร

รายละเอียดคำสั่งของโปรแกรม

```

%This program is used for calculation multi surface net radiation
heat transfer.
% Input
%   N: calculation step
%   TC: Array of Temperature for each surface
%   e: Array of Emissivity for each surface
% Output
%   1. Radiation heat transfer of each surface for maintenance
input temperature
%   + meaning heat transfer into surface
%   - meaning heat transfer out of surface
%   covert results when used as boundary condition in Procast
%   2. Heat flux of each surface
%
% Example
% Step 2 of calculation
% 4 Surface:   1 Ambient       40 deg C
%              2 Side wall    800 deg C emissivity 0.7
%              3 Side wall    800 deg C emissivity 0.7
%              4 Slag cover   900 deg C emissivity 0.9
%
% Build array for collect input data
%   T = [40 800 800 900]
%   e = [1 0.7 0.7 0.9]
%
% Using program
%   RadMatrixInput(2,T,e)
%
% Results
%   Surface Temperature(K) Emissivity Radiation Heat
transfer(kW) Heat flux(kW/sq.m)
%   1           313           1.000000      -192.961792
-84.812981
%   2           1073          0.700000       37.790179
17.234541
%   3           1073          0.700000       3.525270
9.383205
%   4           1173          0.900000      151.646342
70.467631
function []=RadMatrixInput(N,TC,e)
% n : number of surface used for referent number of calculation
n=N+2;
fprintf(' Number of surface :   %d \n',n);
%Convert Temperature from degree celcius to kelvin
TK=TC+273;
%Load view factor from view factor data store in VF.mat
load VF
if n==3
    F=VF_3S;
elseif n==4
    F=VF_4S;
elseif n==5
    F=VF_5S;
elseif n==6
    F=VF_6S;
elseif n==7
    F=VF_7S;

```

```

elseif n==8
    F=VF_8S;
elseif n==9
    F=VF_9S;
elseif n==10
    F=VF_10S;
elseif n==11
    F=VF_11S;
elseif n==12
    F=VF_12S;
elseif n==13
    F=VF_13S;
elseif n==14
    F=VF_14S;
elseif n==15
    F=VF_15S;
elseif n==16
    F=VF_16S;
elseif n==17
    F=VF_17S;
elseif n==18
    F=VF_18S;
elseif n==19
    F=VF_19S;
elseif n==20
    F=VF_20S;
elseif n==21
    F=VF_21S;
elseif n==22
    F=VF_22S;
elseif n==23
    F=VF_23S;
elseif n==24
    F=VF_24S;
else n>24
    fprintf(' Error: over step calculation');
end
%load area from area data store in VF.mat
% a: Array that store area data
a=Area(:,N);
a=a(1:n);
%
A=zeros(n);
for i=1:n
    for j=1:n
        if i==j
            A(i,j)=(1/e(j)-F(i,j)*(1-e(j))/e(j))/a(j);
        else
            A(i,j) = -( F(i,j) *( 1-e(j))/ e(j))/a(j);
        end
    end
end
% SBK: Stefan-Boltzman Constant = 5.67x10^-8
SBK=5.67*10^-8;
b=zeros(n);
for i=1:n
    for j=1:n
        if i==j
            b(i,j)=+(1-F(i,j))*SBK*TK(j)^4;
        else

```

```

        b(i,j)=- F(i,j)*SBK*TK(j)^4;
    end
end
end
B=sum(b')';
%Calculation radiation heat transfer of each surface
Q=(A\B)/1000;
%Calculate heat flux
q=Q./a;
%Display results
fprintf(' Surface Temperature(K) Emissivity Radiation Heat
transfer(kW) Heat flux(kW/sq.m)\n ');
for i=1:n
    fprintf('%d ',i);
    fprintf('%d ',TK(i));
    fprintf('%2f ',e(i));
    fprintf('%2f ',Q(i));
    fprintf('%2f \n ',q(i));
end

```



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่า View factor ที่ใช้ในการคำนวณ

F _{ij}	j 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
i 1	0.00	0.40	0.60	0.05	0.55	0.05	0.50	0.04	0.46	0.04	0.42	0.04	0.39	0.03	0.35	0.03	0.32	0.03	0.30	0.02	0.27	0.02	0.25
2	0.42	0.22	0.37	0.03	0.33	0.03	0.30	0.03	0.27	0.03	0.25	0.02	0.22	0.02	0.20	0.02	0.18	0.02	0.16	0.02	0.14	0.02	0.13
3	0.63	0.37	0.00	0.09	0.91	0.08	0.83	0.07	0.76	0.07	0.69	0.06	0.63	0.06	0.57	0.05	0.52	0.05	0.47	0.04	0.43	0.04	0.39
4	0.31	0.20	0.50	0.04	0.46	0.38	0.07	0.01	0.07	0.01	0.06	0.01	0.05	0.01	0.05	0.00	0.04	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.03
5	0.58	0.34	0.92	0.08	0.00	0.09	0.91	0.08	0.83	0.07	0.76	0.07	0.69	0.06	0.63	0.06	0.57	0.05	0.52	0.05	0.47	0.04	0.43
6	0.28	0.18	0.46	0.04	0.50	0.04	0.45	0.04	0.41	0.04	0.37	0.04	0.34	0.03	0.30	0.03	0.27	0.03	0.25	0.03	0.22	0.02	0.20
7	0.54	0.31	0.85	0.07	0.92	0.08	0.00	0.09	0.91	0.08	0.83	0.08	0.75	0.07	0.68	0.06	0.62	0.06	0.56	0.05	0.51	0.05	0.46
8	0.25	0.17	0.42	0.04	0.46	0.04	0.50	0.04	0.45	0.04	0.41	0.04	0.37	0.04	0.34	0.03	0.30	0.03	0.27	0.03	0.24	0.03	0.22
9	0.49	0.28	0.78	0.07	0.84	0.07	0.92	0.08	0.00	0.09	0.91	0.08	0.83	0.08	0.75	0.07	0.68	0.06	0.62	0.06	0.56	0.05	0.51
10	0.23	0.15	0.39	0.04	0.42	0.04	0.46	0.04	0.50	0.05	0.45	0.04	0.41	0.04	0.37	0.04	0.33	0.03	0.30	0.03	0.27	0.03	0.24
11	0.46	0.26	0.71	0.06	0.78	0.07	0.84	0.07	0.92	0.08	0.00	0.09	0.91	0.08	0.82	0.08	0.75	0.07	0.68	0.06	0.61	0.06	0.56
12	0.21	0.14	0.35	0.03	0.39	0.04	0.42	0.04	0.46	0.04	0.50	0.04	0.45	0.04	0.41	0.04	0.37	0.04	0.33	0.03	0.30	0.03	0.27
13	0.42	0.23	0.66	0.06	0.71	0.06	0.77	0.07	0.84	0.08	0.92	0.08	0.00	0.09	0.91	0.08	0.82	0.08	0.74	0.07	0.67	0.06	0.61
14	0.19	0.13	0.32	0.03	0.35	0.03	0.38	0.04	0.42	0.04	0.46	0.04	0.50	0.05	0.45	0.04	0.41	0.04	0.37	0.04	0.33	0.03	0.30
15	0.39	0.21	0.60	0.05	0.65	0.06	0.71	0.06	0.77	0.07	0.84	0.08	0.92	0.08	0.00	0.09	0.91	0.09	0.82	0.08	0.74	0.07	0.67
16	0.17	0.12	0.29	0.03	0.32	0.03	0.35	0.03	0.38	0.04	0.42	0.04	0.46	0.04	0.50	0.05	0.45	0.04	0.41	0.04	0.37	0.04	0.33
17	0.36	0.19	0.55	0.05	0.60	0.05	0.65	0.06	0.71	0.06	0.77	0.07	0.84	0.08	0.91	0.09	0.00	0.10	0.90	0.09	0.82	0.08	0.74
18	0.16	0.11	0.26	0.03	0.29	0.03	0.32	0.03	0.35	0.03	0.38	0.04	0.42	0.04	0.46	0.04	0.50	0.05	0.45	0.04	0.41	0.04	0.37
19	0.33	0.17	0.51	0.04	0.55	0.05	0.59	0.05	0.65	0.06	0.70	0.06	0.77	0.07	0.84	0.08	0.91	0.09	0.00	0.10	0.90	0.09	0.82
20	0.14	0.10	0.24	0.02	0.26	0.03	0.29	0.03	0.31	0.03	0.34	0.03	0.38	0.04	0.42	0.04	0.46	0.04	0.50	0.05	0.45	0.05	0.41
21	0.31	0.16	0.47	0.04	0.50	0.04	0.54	0.05	0.59	0.05	0.64	0.06	0.70	0.06	0.76	0.07	0.83	0.08	0.91	0.09	0.00	0.10	0.90
22	0.13	0.09	0.22	0.02	0.24	0.02	0.26	0.03	0.28	0.03	0.31	0.03	0.34	0.03	0.38	0.04	0.41	0.04	0.46	0.04	0.50	0.05	0.45
23	0.29	0.14	0.43	0.03	0.46	0.04	0.50	0.04	0.54	0.05	0.59	0.05	0.64	0.06	0.70	0.06	0.76	0.07	0.83	0.08	0.91	0.09	0.00

ค่า View factor ที่ใช้ในการคำนวณ (ต่อ)

F _{ij}	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
i 1	0.02	0.23	0.02	0.21	0.02	0.19	0.02	0.18	0.01	0.16	0.01	0.15	0.01	0.14	0.01	0.13	0.01	0.12	0.01	0.11	0.02	0.09
2	0.01	0.11	0.01	0.10	0.01	0.09	0.01	0.08	0.01	0.07	0.01	0.06	0.01	0.06	0.01	0.05	0.01	0.05	0.00	0.04	0.01	0.03
3	0.04	0.36	0.03	0.32	0.03	0.30	0.03	0.27	0.02	0.25	0.02	0.22	0.02	0.21	0.02	0.19	0.02	0.17	0.01	0.16	0.03	0.12
4	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
5	0.04	0.39	0.04	0.35	0.03	0.32	0.03	0.29	0.03	0.27	0.02	0.24	0.02	0.22	0.02	0.20	0.02	0.18	0.02	0.17	0.04	0.13
6	0.02	0.17	0.02	0.16	0.02	0.14	0.02	0.12	0.01	0.11	0.01	0.10	0.01	0.09	0.01	0.08	0.01	0.07	0.01	0.06	0.02	0.04
7	0.04	0.42	0.04	0.38	0.04	0.35	0.03	0.32	0.03	0.29	0.03	0.26	0.02	0.24	0.02	0.22	0.02	0.20	0.02	0.18	0.04	0.14
8	0.02	0.19	0.02	0.17	0.02	0.15	0.02	0.14	0.02	0.12	0.01	0.11	0.01	0.09	0.01	0.08	0.01	0.07	0.01	0.07	0.02	0.05
9	0.05	0.46	0.04	0.42	0.04	0.38	0.04	0.34	0.03	0.31	0.03	0.28	0.03	0.26	0.02	0.23	0.02	0.21	0.02	0.19	0.04	0.15
10	0.03	0.21	0.02	0.19	0.02	0.17	0.02	0.15	0.02	0.13	0.02	0.12	0.01	0.10	0.01	0.09	0.01	0.08	0.01	0.07	0.02	0.05
11	0.05	0.50	0.05	0.45	0.04	0.41	0.04	0.37	0.04	0.34	0.03	0.31	0.03	0.28	0.03	0.25	0.02	0.23	0.02	0.21	0.05	0.16
12	0.03	0.24	0.03	0.21	0.02	0.19	0.02	0.17	0.02	0.15	0.02	0.13	0.02	0.12	0.01	0.10	0.01	0.09	0.01	0.08	0.02	0.06
13	0.06	0.55	0.05	0.50	0.05	0.45	0.04	0.41	0.04	0.37	0.04	0.33	0.03	0.30	0.03	0.27	0.03	0.25	0.02	0.22	0.05	0.17
14	0.03	0.27	0.03	0.24	0.03	0.21	0.02	0.19	0.02	0.16	0.02	0.15	0.02	0.13	0.02	0.11	0.01	0.10	0.01	0.09	0.03	0.06
15	0.06	0.61	0.06	0.55	0.05	0.49	0.05	0.45	0.04	0.40	0.04	0.36	0.04	0.33	0.03	0.30	0.03	0.27	0.03	0.24	0.06	0.19
16	0.03	0.30	0.03	0.26	0.03	0.23	0.03	0.21	0.02	0.18	0.02	0.16	0.02	0.14	0.02	0.13	0.02	0.11	0.01	0.10	0.03	0.07
17	0.07	0.67	0.07	0.60	0.06	0.54	0.05	0.49	0.05	0.44	0.04	0.40	0.04	0.36	0.03	0.32	0.03	0.29	0.03	0.26	0.06	0.20
18	0.04	0.33	0.04	0.29	0.03	0.26	0.03	0.23	0.03	0.21	0.02	0.18	0.02	0.16	0.02	0.14	0.02	0.12	0.02	0.11	0.03	0.08
19	0.08	0.74	0.07	0.66	0.07	0.60	0.06	0.54	0.05	0.48	0.05	0.44	0.04	0.39	0.04	0.35	0.03	0.32	0.03	0.29	0.07	0.22
20	0.04	0.37	0.04	0.33	0.04	0.29	0.03	0.26	0.03	0.23	0.03	0.20	0.02	0.18	0.02	0.16	0.02	0.14	0.02	0.12	0.04	0.08
21	0.09	0.81	0.08	0.73	0.07	0.66	0.07	0.59	0.06	0.53	0.05	0.48	0.05	0.43	0.04	0.39	0.04	0.35	0.03	0.31	0.08	0.24
22	0.05	0.41	0.04	0.36	0.04	0.32	0.04	0.29	0.03	0.26	0.03	0.23	0.03	0.20	0.02	0.18	0.02	0.15	0.02	0.14	0.04	0.09
23	0.10	0.90	0.09	0.81	0.08	0.73	0.07	0.66	0.07	0.59	0.06	0.53	0.05	0.47	0.05	0.43	0.04	0.38	0.04	0.34	0.09	0.26

ค่า View factor ที่ใช้ในการคำนวณ (ต่อ)

F _{ij}	j 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
24	0.12	0.08	0.19	0.02	0.21	0.02	0.23	0.02	0.26	0.03	0.28	0.03	0.31	0.03	0.34	0.03	0.37	0.04	0.41	0.04	0.45	0.05	0.50
25	0.27	0.13	0.39	0.03	0.42	0.03	0.46	0.04	0.49	0.04	0.54	0.05	0.58	0.05	0.63	0.06	0.69	0.06	0.76	0.07	0.83	0.08	0.91
26	0.11	0.07	0.18	0.02	0.19	0.02	0.21	0.02	0.23	0.02	0.25	0.03	0.28	0.03	0.31	0.03	0.34	0.03	0.37	0.04	0.41	0.04	0.45
27	0.25	0.12	0.36	0.03	0.39	0.03	0.42	0.03	0.45	0.04	0.49	0.04	0.53	0.05	0.58	0.05	0.63	0.06	0.69	0.07	0.75	0.07	0.83
28	0.10	0.06	0.16	0.01	0.17	0.02	0.19	0.02	0.21	0.02	0.23	0.02	0.25	0.03	0.28	0.03	0.30	0.03	0.34	0.03	0.37	0.04	0.41
29	0.23	0.10	0.33	0.02	0.36	0.03	0.38	0.03	0.41	0.03	0.45	0.04	0.49	0.04	0.53	0.05	0.57	0.05	0.63	0.06	0.68	0.07	0.75
30	0.09	0.05	0.14	0.01	0.16	0.01	0.17	0.02	0.19	0.02	0.20	0.02	0.23	0.02	0.25	0.03	0.27	0.03	0.30	0.03	0.33	0.04	0.37
31	0.21	0.09	0.31	0.02	0.33	0.02	0.35	0.03	0.38	0.03	0.41	0.03	0.44	0.04	0.48	0.04	0.52	0.05	0.57	0.05	0.62	0.06	0.68
32	0.08	0.05	0.13	0.01	0.14	0.01	0.15	0.01	0.17	0.02	0.18	0.02	0.20	0.02	0.22	0.02	0.25	0.03	0.27	0.03	0.30	0.03	0.33
33	0.20	0.08	0.28	0.02	0.30	0.02	0.32	0.02	0.35	0.03	0.37	0.03	0.40	0.03	0.44	0.04	0.48	0.04	0.52	0.05	0.56	0.05	0.62
34	0.07	0.04	0.12	0.01	0.13	0.01	0.14	0.01	0.15	0.01	0.16	0.02	0.18	0.02	0.20	0.02	0.22	0.02	0.24	0.03	0.27	0.03	0.30
35	0.18	0.08	0.26	0.02	0.28	0.02	0.30	0.02	0.32	0.02	0.34	0.03	0.37	0.03	0.40	0.03	0.43	0.04	0.47	0.04	0.51	0.05	0.56
36	0.07	0.04	0.10	0.01	0.11	0.01	0.12	0.01	0.13	0.01	0.15	0.01	0.16	0.02	0.18	0.02	0.20	0.02	0.22	0.02	0.24	0.03	0.27
37	0.17	0.07	0.24	0.02	0.26	0.02	0.27	0.02	0.29	0.02	0.31	0.02	0.34	0.03	0.37	0.03	0.39	0.03	0.43	0.04	0.47	0.04	0.51
38	0.06	0.03	0.09	0.01	0.10	0.01	0.11	0.01	0.12	0.01	0.13	0.01	0.14	0.01	0.16	0.02	0.18	0.02	0.19	0.02	0.21	0.02	0.24
39	0.16	0.06	0.22	0.01	0.24	0.02	0.25	0.02	0.27	0.02	0.29	0.02	0.31	0.02	0.33	0.03	0.36	0.03	0.39	0.03	0.42	0.04	0.46
40	0.05	0.03	0.08	0.01	0.09	0.01	0.10	0.01	0.11	0.01	0.12	0.01	0.13	0.01	0.14	0.01	0.16	0.02	0.17	0.02	0.19	0.02	0.21
41	0.15	0.06	0.21	0.01	0.22	0.01	0.23	0.02	0.25	0.02	0.26	0.02	0.28	0.02	0.31	0.02	0.33	0.03	0.36	0.03	0.38	0.03	0.42
42	0.05	0.03	0.08	0.01	0.08	0.01	0.09	0.01	0.10	0.01	0.11	0.01	0.12	0.01	0.13	0.01	0.14	0.01	0.15	0.02	0.17	0.02	0.19
43	0.14	0.05	0.19	0.01	0.20	0.01	0.21	0.01	0.23	0.02	0.24	0.02	0.26	0.02	0.28	0.02	0.30	0.02	0.32	0.03	0.35	0.03	0.38
44	0.04	0.02	0.06	0.00	0.07	0.01	0.07	0.01	0.08	0.01	0.09	0.01	0.09	0.01	0.10	0.01	0.11	0.01	0.12	0.01	0.14	0.01	0.15
45	0.12	0.04	0.16	0.01	0.16	0.01	0.17	0.01	0.18	0.01	0.19	0.01	0.21	0.01	0.22	0.02	0.24	0.02	0.25	0.02	0.27	0.02	0.29

ค่า View factor ที่ใช้ในการคำนวณ (ต่อ)

Fij	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
24	0.05	0.45	0.05	0.41	0.04	0.36	0.04	0.32	0.04	0.29	0.03	0.25	0.03	0.22	0.03	0.20	0.02	0.17	0.02	0.15	0.05	0.10
25	0.09	0.00	0.10	0.90	0.09	0.81	0.08	0.73	0.07	0.65	0.07	0.58	0.06	0.52	0.05	0.47	0.05	0.42	0.04	0.38	0.10	0.28
26	0.05	0.50	0.05	0.45	0.05	0.40	0.04	0.36	0.04	0.32	0.04	0.28	0.03	0.25	0.03	0.22	0.03	0.19	0.02	0.17	0.05	0.12
27	0.08	0.91	0.09	0.00	0.10	0.90	0.09	0.81	0.08	0.72	0.08	0.65	0.07	0.58	0.06	0.52	0.05	0.46	0.05	0.41	0.11	0.31
28	0.04	0.45	0.05	0.50	0.05	0.45	0.05	0.40	0.04	0.36	0.04	0.32	0.04	0.28	0.03	0.25	0.03	0.22	0.03	0.19	0.06	0.13
29	0.07	0.82	0.08	0.91	0.09	0.00	0.10	0.90	0.09	0.80	0.08	0.72	0.08	0.64	0.07	0.57	0.06	0.51	0.05	0.46	0.12	0.34
30	0.04	0.41	0.04	0.45	0.05	0.50	0.05	0.45	0.05	0.40	0.04	0.36	0.04	0.32	0.04	0.28	0.03	0.25	0.03	0.22	0.07	0.15
31	0.07	0.75	0.07	0.82	0.08	0.91	0.09	0.00	0.10	0.90	0.09	0.80	0.09	0.72	0.08	0.64	0.07	0.57	0.06	0.51	0.14	0.37
32	0.04	0.37	0.04	0.41	0.04	0.45	0.05	0.50	0.05	0.45	0.05	0.40	0.05	0.36	0.04	0.32	0.04	0.28	0.03	0.24	0.08	0.17
33	0.06	0.68	0.07	0.74	0.08	0.82	0.08	0.90	0.10	0.00	0.11	0.89	0.10	0.80	0.09	0.71	0.08	0.63	0.07	0.56	0.15	0.41
34	0.03	0.33	0.04	0.37	0.04	0.41	0.04	0.45	0.05	0.50	0.05	0.45	0.05	0.40	0.05	0.35	0.04	0.31	0.04	0.27	0.09	0.19
35	0.05	0.61	0.06	0.67	0.07	0.74	0.08	0.82	0.09	0.90	0.10	0.00	0.11	0.89	0.10	0.80	0.09	0.71	0.08	0.63	0.17	0.45
36	0.03	0.29	0.03	0.33	0.04	0.36	0.04	0.40	0.04	0.45	0.05	0.50	0.05	0.45	0.05	0.40	0.05	0.35	0.04	0.31	0.10	0.21
37	0.05	0.56	0.05	0.61	0.06	0.67	0.07	0.74	0.08	0.81	0.09	0.90	0.10	0.00	0.11	0.89	0.10	0.79	0.09	0.70	0.20	0.51
38	0.03	0.26	0.03	0.29	0.03	0.32	0.04	0.36	0.04	0.40	0.05	0.45	0.05	0.50	0.05	0.45	0.05	0.40	0.05	0.35	0.11	0.24
39	0.04	0.50	0.05	0.55	0.05	0.60	0.06	0.67	0.07	0.73	0.08	0.81	0.09	0.90	0.10	0.00	0.11	0.89	0.10	0.79	0.22	0.57
40	0.02	0.23	0.03	0.26	0.03	0.29	0.03	0.32	0.04	0.36	0.04	0.40	0.05	0.45	0.05	0.50	0.06	0.45	0.05	0.40	0.12	0.28
41	0.04	0.46	0.04	0.50	0.05	0.55	0.05	0.60	0.06	0.66	0.07	0.73	0.08	0.81	0.09	0.90	0.10	0.00	0.11	0.89	0.25	0.63
42	0.02	0.21	0.02	0.23	0.03	0.26	0.03	0.29	0.03	0.32	0.04	0.36	0.04	0.40	0.05	0.44	0.05	0.50	0.06	0.45	0.13	0.31
43	0.03	0.41	0.04	0.45	0.04	0.49	0.05	0.54	0.05	0.60	0.06	0.66	0.07	0.73	0.08	0.81	0.09	0.90	0.10	0.00	0.29	0.71
44	0.02	0.17	0.02	0.19	0.02	0.21	0.02	0.23	0.03	0.26	0.03	0.29	0.03	0.32	0.04	0.36	0.04	0.40	0.05	0.45	0.15	0.40
45	0.02	0.32	0.03	0.34	0.03	0.37	0.03	0.41	0.04	0.45	0.04	0.49	0.05	0.54	0.06	0.60	0.06	0.66	0.07	0.74	0.26	0.00

ขนาดพื้นที่ของแต่ละผิวที่ใช้ในการคำนวณ

ผิว	พื้นที่ (m ²)	ผิว	พื้นที่ (m ²)
1	2.28	24	0.39
2	2.19	25	1.97
3	2.17	26	0.39
4	0.38	27	1.95
5	2.15	28	0.40
6	0.38	29	1.93
7	2.13	30	0.40
8	0.38	31	1.91
9	2.12	32	0.40
10	0.38	33	1.89
11	2.10	34	0.40
12	0.38	35	1.87
13	2.08	36	0.40
14	0.38	37	1.85
15	2.06	38	0.41
16	0.39	39	1.83
17	2.04	40	0.41
18	0.39	41	1.81
19	2.02	42	0.41
20	0.39	43	1.79
21	2.01	44	1.14
22	0.39	45	1.74
23	1.99		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ง
การคำนวณพลังงานสะสมภายในเข้รับน้ำเหล็ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณพลังงานความร้อนสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก

พลังงานความร้อนสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก (Energy content, Q_{Ladle}) ในระหว่างการทำงานสามารถหาได้จาก

$$Q_{ladle} = Q_{Side\ wall} + Q_{Bottom\ wall}$$

ที่ผนังด้านข้าง

$$Q_{Side\ wall} = \int_{r_i}^{r_o} C_p T(r) dm$$

$$= \int_{r_i}^{r_{i1}} C_{p\ refractory} T_{refractory}(r) dm_{refractory}$$

$$+ \int_{r_{i1}}^{r_o} C_{p\ steel\ shell} T_{steel\ shell}(r) dm_{steel\ shell}$$

เมื่อ	$m_{refractory}$	คือมวลของเบ้ารับน้ำเหล็ก (kg)
	$C_{p\ refractory}$	คือค่าความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ SK38 มีค่าเท่ากับ 1,200 J/kg-K
	$T_{refractory}(r)$	คืออุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่เป็นฟังก์ชันของรัศมี โดย $T(r)$ นี้หาได้จากการผลการจำลองการถ่ายเทความร้อน
	$m_{steel\ shell}$	คือมวลของเบ้ารับน้ำเหล็ก (kg)
	$C_{p\ steel\ shell}$	คือค่าความร้อนจำเพาะของอิฐทนไฟ SK38 มีค่าเท่ากับ 787 J/kg-K
	$T_{steel\ shell}(r)$	คืออุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่เป็นฟังก์ชันของรัศมี โดย $T(r)$ นี้หาได้จากการผลการจำลองการถ่ายเทความร้อน
	r_i	คือรัศมีด้านในผนังข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก
	r_{i1}	คือรัศมีส่วนด้านในของเปลือกเหล็ก
	r_o	คือรัศมีด้านนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก
	โดย	

$$dm = 2\pi phr dr, \quad h \text{ คือความสูงเบ้ารับน้ำเหล็ก}$$

ที่ผนังด้านล่าง

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{Bottom wall}} &= \int_0^{l_o} C_p T(l) dm \\
 &= \int_0^{l_i} C_{p_{\text{refractory}}} T_{\text{refractory}}(l) dm_{\text{refractory}} \\
 &\quad + \int_{l_i}^{l_o} C_{p_{\text{steel shell}}} T_{\text{steel shell}}(l) dm_{\text{steel shell}}
 \end{aligned}$$

$T_{\text{refractory}}(l)$ คืออุณหภูมิภายในชั้นอิฐทนไฟเบอร์รับน้ำเหล็ก
ที่เป็นฟังก์ชันของระยะ โดย $T(l)$ นี้หาได้จากการผล
การจำลองการถ่ายเทความร้อน

$T_{\text{steel shell}}(r)$ คืออุณหภูมิภายในชั้นเปลือกเหล็กเบอร์รับน้ำเหล็ก
ที่เป็นฟังก์ชันของระยะ โดย $T(l)$ นี้หาได้จากการผล
การจำลองการถ่ายเทความร้อน

l_i คือระยะถึงชั้นผิวด้านนอกชั้นปลอดภัย

l_o คือรัศมีด้านนอกเบอร์รับน้ำเหล็ก

โดย

$$dm = 2\pi r_i^2 \rho dl$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น เกิดเมื่อวันที่ 12 เมษายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดพัทลุง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพฯ เมื่อปีการศึกษา 2548 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2549 ระหว่างการศึกษารับทุนอุดหนุนค่าเล่าเรียนจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และได้มีโอกาสเข้าทำงานกับสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ในตำแหน่งผู้ช่วยนักวิจัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย