

การควบคุมการอุ่นเป่ารับน้ำเกลือร่วมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน

นายชัชวาลย์ วุฒิสิริศาสตร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

CONTROL OF LADLE PREHEATING COMBINED WITH ELECTRIC ARC FURNACE
OPERATION FOR ENERGY CONSERVATION

Mr. Chatchawas Wuttisirisart

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กพร้อมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน
โดย	นายชัชวีสต์ วุฒิศิริศาสตร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันหพศ จันทรานูวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันหพศ จันทรานูวัฒน์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐเดช เพ็ญวรวงศ์)

ชัชวีสต์ วุฒิสรีศาสตร: การควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กร่วมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการ
ประหยัดพลังงาน (CONTROL OF LADLE PREHEATING COMBINED WITH ELECTRIC
ARC FURNACE OPERATION FOR ENERGY CONSERVATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
หลัก: รศ.ดร.พงษ์ธร จริญญากรณ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผศ.ดร.สันหพศ จันทรานูวัฒน์
265 หน้า.

อุตสาหกรรมเหล็กเป็นอุตสาหกรรมที่มีใช้พลังงานสูงมาก โดยเฉพาะกระบวนการผลิตเหล็ก
ด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จึงต้องหาวิธีการเพื่อลดการใช้พลังงานในกระบวนการนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นการศึกษาวิจัยเพื่อหาวิธีการควบคุม และออกแบบต้นแบบระบบควบคุมเพื่อให้เกิดการประหยัด
พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

หลักการของการควบคุมในการศึกษาวิจัยนี้คือการปรับอุณหภูมิเทน้ำเหล็กในเตาหลอมให้
สัมพันธ์กับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ดังนั้นในการควบคุมจะต้องทราบถึงสถานะทาง
ความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อให้ระบบนำไปคำนวณและกำหนดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม ใน
การศึกษานี้จึงได้ออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำ
เหล็ก และสอบเทียบแบบจำลองกับข้อมูลจากการตรวจวัดในวัฏจักรทำงานจริงของเบ้ารับน้ำเหล็กใน
โรงงานแห่งหนึ่ง และนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอบเทียบแล้วนำมาประดิษฐ์เป็น โปรแกรม
คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลหาอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม

ผลการศึกษาวิจัยได้ต้นแบบ โปรแกรมควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กร่วมกับเตาหลอมอาร์ค
เมื่อนำไปใช้ประเมินศักยภาพความประหยัดที่จะเกิดขึ้นในโรงงานแห่งหนึ่ง พบว่าจะสามารถลด
อุณหภูมิเทน้ำเหล็กโดยเฉลี่ยได้ 29.3°C ซึ่งก่อให้เกิดความประหยัดโดยประมาณ 471.73 kWh ต่อรอบ
การหลอม หรือ 20.51 kWh/t ต่อรอบการหลอม คิดเป็นร้อยละ 4.12 ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเตา
หลอม ซึ่งคิดเป็นมูลค่า 1,415.19 บาทต่อรอบการหลอม หรือ 61.53 บาทต่อตันผลิตภัณฑ์ต่อรอบการ
หลอม หากประเมินผลประหยัดที่สามารถเกิดขึ้นได้ใน 20 รอบการหลอมจะสามารถประหยัดไฟฟ้าที่
ใช้ในการหลอมลงได้ 9434.6 kWh คิดเป็นมูลค่า 28,303.8 บาท

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2554..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5370223821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: STEELMAKING PROCESS / LADLE / CONTROLLING SYSTEM

CHATCHAWAS WUTTISIRISART: CONTROL OF LADLE PREHEATING COMBINED WITH ELECTRIC ARC FURNACE OPERATION FOR ENERGY CONSERVATION. ADVISOR: PONGTORN CHARUNYAKORN, Ph.D. CO-ADVISOR: SUNHAPOS CHATRANUWATHANA, Ph.D., 265 pp.

Steelmaking industry is a high energy demand industry, especial steelmaking process by electric arc furnace (EAF). Energy reduction in this process is crucial to the overall energy conservation. The objective of this thesis is to create controlling procedure and design a pilot controlling system, in order to conserve operating energy in the steelmaking process.

The main concept of controlling system in this study is to adjust steel tapping temperature to a suitable value in accordance with the thermal state of the ladle. Therefore, to control the tapping temperature, the thermal state of the ladle must be defined for a proper tapping temperature evaluation. So, mathematical models have been created to predict thermal state of the ladle and verified with the measured data. Then verified models have been applied to invent the computer program in order to evaluate the appropriate tapping temperature.

The pilot controlling program was employed to estimate the saving potential of the observed factory. It was found that, the tapping temperature is able to drop at an average of 29.3 °C. This would lead to the electricity saving of 471.73 kWh per heat or 20.51 kWh/t per heat which is 4.12% of electrical energy consumption in EAF. In the other word, 1,415.19 Baht per heat or 61.53 Baht per ton of product per heat could be saved. For the whole observed 20 heats, a total electricity reduction of 9,434.6 kWh and saving of 28,303.8 Baht would be realized.

Department:Mechanical Engineering..... Student's Signature.....
 Field of Study:Mechanical Engineering..... Advisor's Signature.....
 Academic Year:2011..... Co-Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จริญญาภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสในการทำงานวิจัยนี้ รวมถึงได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ คอยชี้แนะแนวทาง และช่วยเหลือด้านต่างๆ มากมายจนเสมือนเป็นบิดาในสถานศึกษาให้แก่ข้าพเจ้า และข้าพเจ้าจะขอเก็บคำสอน “Beat to Death” ของท่านเป็นเครื่องเตือนใจไว้ และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันหพศ จันทรานูวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่คอยให้คำแนะนำและเปิดมุมมองการทำให้ง่าย (Simplify) ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานการสอบวิทยานิพนธ์ และให้บทเรียนเรื่องการซื้อตรงต่อคำพูดแก่ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐเดช เพ็ญวงวงศ์ ที่สละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้ ตลอดจนการประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้ความประทับใจในการเรียนวิชาอุณหพลศาสตร์ในระดับปริญญาตรีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ บริษัทสยาม สตีล ซินดิเกตจำกัด มหาชน ที่ให้การสนับสนุนการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ คุณบุญล้ำ ศรีพิชัย คุณพิชญ์ เจริญสมศักดิ์ คุณวันชัย มนูญพานิชย์ คุณชเนต วงศ์ประยูร รวมถึงเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานทุกท่านที่ให้ความกรุณาอำนวยความสะดวกแก่ข้าพเจ้าตลอดการเก็บข้อมูล

ขอขอบคุณ คุณศักดิ์ศิริ พุ่มพฤษ จากบริษัท พีพี ซิสเต็ม จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์อุปกรณ์สำหรับการเก็บข้อมูล และคอยช่วยเหลือให้คำแนะนำในการสร้างและติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อการตรวจวัด

ขอขอบคุณคุณอนันต์ จิตรานุเคราะห์ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้ความไว้วางใจในการปฏิบัติงานแก่ข้าพเจ้า ขอขอบคุณคุณพลพร จาติเสถียร คุณณัฐพล รัตนมาลี คุณมโน จันทร์กระจ่าง คุณหนึ่ง กลับทวี จากสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย ที่คอยสนับสนุนข้าพเจ้าตลอดมา

ขอบคุณคุณกิตติศักดิ์ ไร่ไพรุจพิงส์ และคุณยุรนันท์ ลิมนันท์ทวี ที่คอยช่วยเหลือให้งานนี้ ลุล่วงสำเร็จได้ ขอขอบคุณคุณฉมมน ยงวัฒนา ที่คอยเป็นกำลังใจ เข้าใจข้าพเจ้าตลอดการศึกษาวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยเลี้ยงดู ให้กำลังใจ และสนับสนุนข้าพเจ้ามาโดยตลอด ความสำเร็จประการใดที่ข้าพเจ้าได้ก่อไว้ในการศึกษาวิจัยนี้ ข้าพเจ้าขอทูนขึ้นห้อมอบแด่ท่านทั้งสอง และประโยชน์ที่สังคมได้รับจากการวิจัยนี้ ขอให้เป็นอย่างคุณความดีของท่านทุกประการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉุ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.6 การนำเสนอผลงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 หลักการทำงานของหัวเผา และการใช้พลังงานเพื่อการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	6
2.2 การประเมินประสิทธิภาพของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	10
2.3 การถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	15
2.4 การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่ อ่างรับน้ำเหล็ก.....	24
2.5 ระบบติดตามสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	31
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	34
3.1 อุปกรณ์ในการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	34
3.1.1 เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF).....	34
3.1.2 เบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle).....	36
3.1.3 การหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting).....	37
3.2 กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	40
3.2.1 วัฏจักรการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	40
3.2.2 วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	42

	หน้า
3.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfers) ระหว่างกระบวนการหลอมเหล็ก.....	44
3.3.1 การนำความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	44
3.3.2 การพาความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	45
3.3.3 การแผ่รังสีความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	47
3.4 วงจรต้านทางความร้อน (Thermal circuit).....	56
3.5 การประเมินประสิทธิภาพเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและการเผาไหม้เพื่อการอุ่น เบ้ารับน้ำเหล็ก.....	60
3.5.1 การประเมินประสิทธิภาพเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	61
3.5.2 การประเมินประสิทธิภาพการเผาไหม้เพื่อการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	63
บทที่ 4 การออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	66
4.1 การวิเคราะห์พลังงานภายในกระบวนการผลิตเหล็ก.....	66
4.2 การนำความร้อนของผนังข้างและผนังก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	69
4.3 แบบจำลองระหว่างกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	71
4.4 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า.....	74
4.5 แบบจำลองระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	79
4.6 แบบจำลองระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่ อ่างรับน้ำเหล็ก.....	83
4.7 แบบจำลองระหว่างกระบวนการขนย้ายสแลคไปเททิ้ง.....	90
4.8 สรุปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็ก และเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	91
4.8.1 สรุปเงื่อนไขค่าขอบในกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	92
4.8.2 สรุปเงื่อนไขค่าขอบในกระบวนการถ่ายเทความร้อนออกจาก เบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า.....	92
4.8.3 สรุปเงื่อนไขค่าขอบในกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	93
4.8.4 สรุปเงื่อนไขค่าขอบในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่ อ่างรับน้ำเหล็ก.....	93
4.8.5 สรุปเงื่อนไขค่าขอบในกระบวนการขนย้ายสแลคไปเททิ้ง.....	95
4.8.6 สรุปเงื่อนไขค่าขอบที่ผนังภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	95

บทที่ 5 การตรวจวัด และการบันทึกข้อมูล.....	96
5.1 ข้อมูลเบื้องต้นในการทำงานของระบบการหลอมเหล็กในสถานที่เก็บข้อมูล.....	96
5.1.1 ผลิตภัณฑ์ที่ผลิต.....	97
5.1.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน.....	98
5.2 อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัด และวิธีการตรวจวัด.....	100
5.2.1 อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัด.....	100
5.2.2 วิธีการตรวจวัด.....	101
5.2.3 การเก็บข้อมูลจากรายงานการปฏิบัติงาน.....	108
5.3 ผลการตรวจวัด และการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดเบื้องต้น.....	108
5.3.1 ผลการตรวจวัดจาก Thermocouple ที่ฝังไว้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	108
5.3.2 การวิเคราะห์ผลการเก็บข้อมูลเบื้องต้น.....	114
5.3.3 ผลการตรวจวัดจากกล้องถ่ายภาพความร้อน.....	124
5.4 การจำแนกลักษณะกระบวนการจากการตรวจวัด.....	127
5.4.1 กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	128
5.4.2 การพักเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	130
5.4.3 กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	133
5.4.4 กระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก.....	136
5.4.5 การขนย้ายสแลคไปเททิ้ง.....	138
บทที่ 6 การออกแบบระบบควบคุม.....	141
6.1 ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่อง.....	141
6.2 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องในการแก้ปัญหา.....	145
6.2.1 การแบ่งพื้นที่ภายในขอบเขตที่สนใจ.....	145
6.2.2 การสร้างสมการผลต่างสี่บเนื่อง.....	146
6.2.2.1 จุดต่อภายในเนื้อของผนัง.....	147
6.2.2.2 จุดต่อระหว่างผนังอิฐและเปลือกเหล็ก.....	149
6.2.2.3 จุดต่อบริเวณผิวภายนอก.....	151
6.2.2.4 จุดต่อบริเวณผิวภายใน.....	153
ระหว่างกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	153
ระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่าถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศ.....	155

ระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	156
ระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กเทน้ำเหล็กลงสู่ อ่างรับน้ำเหล็ก.....	158
ระหว่างกระบวนการขนย้ายแอสลคไปเททิ้ง.....	160
6.3 การออกแบบโปรแกรมควบคุม.....	161
6.3.1 การออกแบบภาพรวมของโปรแกรม.....	162
6.3.2 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก”.....	169
6.3.3 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การพักเบ้ารับน้ำเหล็ก”.....	171
6.3.4 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การขนถ่ายน้ำเหล็ก”.....	173
6.3.5 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่ อ่างรับน้ำเหล็ก”.....	176
6.3.6 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การขนย้ายแอสลคไปเททิ้ง”.....	179
6.3.7 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การทำนายอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม”.....	181
บทที่ 7 ผลการศึกษาวิจัย และการวิเคราะห์ผล.....	184
7.1 ผลการจำลองตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	185
7.1.1 ผลการจำลองระหว่างกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	187
7.1.2 ช่วงการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า.....	192
7.1.3 ช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	195
7.1.4 ช่วงการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก.....	198
7.1.5 ช่วงการขนย้ายแอสลคไปเททิ้ง.....	202
7.1.6 ผลการจำลองการแปรผันอุณหภูมิตลอดอายุของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	204
7.1.7 ผลการวิเคราะห์การจำลองการแปรผันอุณหภูมิของน้ำเหล็ก.....	210
7.2 การวิเคราะห์สัถยภาพในการลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็ก.....	214
7.3 ลักษณะโปรแกรมควบคุมที่พัฒนาขึ้น.....	217
บทที่ 8 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	221
8.1 สรุปผล.....	221
8.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	222
รายการอ้างอิง.....	225
ภาคผนวก.....	229

ภาคผนวก ก รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูล.....	230
ภาคผนวก ข แผนผังลักษณะการเจาะอิฐ และแปลนกล่องป้องกันความร้อน และแรงกระแทก.....	241
ภาคผนวก ค สรุปผลการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 และการวิเคราะห์.....	248
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	265

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 4-1	ค่าตัวต้านทานต่างๆในวงจรต้านทานความร้อน.....	77
ตารางที่ 5-1	ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กข้ออ้อยในแต่ละชั้นคุณภาพตาม มอก.....	97
ตารางที่ 5-2	สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อยในแต่ละชั้นคุณภาพตาม มอก.....	97
ตารางที่ 5-3	รายละเอียดและลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล.....	102
ตารางที่ 5-4	ข้อมูลที่ต้องการจากรายงานการปฏิบัติงาน.....	108
ตารางที่ 5-5	สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานของเข้าน้ำเหล็ก.....	110
ตารางที่ 5-6	สรุปข้อมูลการอุ่นเข้าน้ำเหล็กตลอดการเก็บข้อมูล.....	129
ตารางที่ 5-7	สรุปข้อมูลการพักเข้าน้ำเหล็กตลอดการเก็บข้อมูล.....	133
ตารางที่ 5-8	สรุปข้อมูลการขนถ่ายน้ำเหล็กตลอดการเก็บข้อมูล.....	135
ตารางที่ 5-9	สรุปข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิในน้ำเหล็กตลอดการทดลอง.....	136
ตารางที่ 5-10	สรุปข้อมูลการเทน้ำเหล็กตลอดการเก็บข้อมูล.....	137
ตารางที่ 5-11	สรุปข้อมูลกระบวนการขนย้ายสลักไปเทที่ตลอดการเก็บข้อมูล.....	139
ตารางที่ 6-1	รายละเอียดการแบ่งพื้นที่พิจารณาในผนังและกั้นเข้าน้ำเหล็ก.....	145
ตารางที่ 6-2	สรุปสมการผลต่างสปีนนิ่งของตำแหน่งจุดต่อต่างๆในกรณีต่าง.....	160
ตารางที่ 7-1	สมบัติต่างๆที่ใช้ในการคำนวณสภาวะทางความร้อนของเข้าน้ำเหล็ก และน้ำเหล็ก.....	186
ตารางที่ 7-2	ค่าประกอบการคำนวณต่างๆในกรณีการอุ่นเข้าน้ำเหล็ก.....	187
ตารางที่ 7-3	ตัวประกอบการมองเห็นในการคำนวณ.....	192
ตารางที่ 7-4	ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเหล็กระหว่างการเทน้ำเหล็ก.....	198
ตารางที่ 7-5	ตารางเปรียบเทียบผลการตรวจวัดและการจำลอง.....	213
ตารางที่ 7-6	ผลการทำนายอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมและการวิเคราะห์ศักยภาพการ ประหยัดของโปรแกรมควบ.....	215

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2-1	การแจกแจงอุณหภูมิในผนังเข้รับน้ำเหล็กตามผลการทดลองและการคำนวณของ Saunder (1983)..... 6
รูปที่ 2-2	อุณหภูมิภายในเข้รับน้ำเหล็กจากการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Mohanty และ Satayayut (1992)..... 7
รูปที่ 2-3	ค่าการดูดซับรังสีภายในเข้รับน้ำเหล็กที่ใช้ในการคำนวณที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่ Z คือรัศมีไร้มิติ และ H_m คือความสูงไร้มิติ (สมศักดิ์ คง โชติ, 1993)..... 8
รูปที่ 2-4	อุณหภูมิในเข้รับน้ำเหล็กจากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยที่ Z คือรัศมีไร้มิติ และ H_m คือความสูงไร้มิติ (สมศักดิ์ คง โชติ, 1993)..... 9
รูปที่ 2-5	จากการทดลองของ Chirattananon และ Gao (1995) ประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดเฉพาะช่วงการใช้ปริมาณกระแสระดับหนึ่งเท่านั้น แต่เวลาที่ใช้ในการหลอมจะแปรผกผันกับกระแสที่ใช้..... 11
รูปที่ 2-6	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและอุณหภูมิเศษเหล็ก อุณหภูมิไอเสีย และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นตามการทดลองของ Camdali, Tunc และ Karakas (2002)..... 13
รูปที่ 2-7	ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองของ Fredman และ Saxen (1997) เทียบกับผลจากการทดลอง..... 17
รูปที่ 2-8	การกำหนดพิกัดในการพิจารณาแบบจำลองของ Fredman, Torrkulla และ Saxen (1998)..... 17
รูปที่ 2-9	ตัวอย่างผลการทดลองที่ตำแหน่ง upper side wall ในการทดลองและการคำนวณตามแบบจำลอง เส้นทึบแสดงค่าจากการวัด และเส้นปะจากการคำนวณ (Fredman, Torrkulla and Saxen, 1998)..... 18
รูปที่ 2-10	แผนภาพแสดงการถ่ายเทความร้อนในแบบจำลองของ Xia และ Ahokainen (2001)..... 19
รูปที่ 2-11	ลักษณะเวกเตอร์ความเร็วของน้ำเหล็กในเข้ และเส้นคงอุณหภูมิที่ลดลงในเข้รับน้ำเหล็กที่วินาทีที่ 40 ของการจำลอง (Xia and Ahokainen, 2001)..... 20

รูปที่ 2-12	อุณหภูมิของน้ำเหล็กจากการทดลองบริเวณผิวหน้าของเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีการลดลงของอุณหภูมิน้อยกว่าบริเวณก้นเบ้ารับน้ำเหล็กเนื่องจากการหมุนวนของน้ำเหล็กภายใน(Xia and Ahokainen, 2001).....	20
รูปที่ 2-13	(ซ้าย) ผนังที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างกระบวนการต้ม (ขวา) ผนังที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นสูงกว่าจะมีการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็กต่ำกว่า (Xia and Ahokainen, 2001).....	21
รูปที่ 2-14	ลักษณะการถ่ายเทพลังงานในเบ้ารับน้ำเหล็กที่พิจารณา และอุณหภูมิที่แจกแจงในชั้นต่างๆ ตามแบบจำลองของ Volkova และ Janke (2003)	22
รูปที่ 2-15	ผลการคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิภายในวัสดุทนไฟจากโคโรไมท์ (ซ้าย) จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ในแมกนีเซียมเตรตระออกไซด์ (ขวา) (Volkova and Janke, 2003).....	22
รูปที่ 2-16	ตำแหน่งต่างๆที่ Zimmer และคณะ (2008) ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	23
รูปที่ 2-17	การแจกแจงอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กตามการทดลองของ Zimmer และคณะ (2008).....	23
รูปที่ 2-18	การแจกแจงอุณหภูมิไร้มิติที่สัดส่วนระดับความสูงต่างๆของน้ำเหล็กต่างตามเวลาไร้มิติต่างๆ เมื่อสมมติให้ไม่มีการแยกชั้นอุณหภูมิ (Egerton et. Al., 1979).....	26
รูปที่ 2-19	ที่ความเร็วไร้มิติในการเทน้ำเหล็กสูงขึ้นน้ำเหล็กจะหมดจากเบ้ารับน้ำเหล็กเร็วขึ้นแต่อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทก็จะลดต่ำลงอย่างรวดเร็วด้วย (Egerton et. Al., 1979).....	26
รูปที่ 2-20	การแจกแจงอุณหภูมิไร้มิติต่อเวลาไร้มิติเมื่อให้มีการแบ่งชั้นทางอุณหภูมิจากการตั้งทิ้งไว้ด้วยระยะเวลาตั้งแต่ 0 - 45 นาที (Egerton et. Al., 1979).....	27
รูปที่ 2-21	การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของ Egerton และคณะ (1979).....	27
รูปที่ 2-22	ความเร็วไร้มิติ (-H*) และรัศมีไร้มิติ (R*) ที่เวลาไร้มิติ (T) ใดๆ (Egerton et al., 1980)	28

รูปที่ 2-23	การแจกแจงอุณหภูมิไร้มิติตามเวลาไร้มิติ เปรียบเทียบระหว่างการคำนวณแบบให้มีการสีกก่อนที่รู้เทน้ำเหล็กและไม่สีกก่อนกับผลการทดลอง (Egerton et al., 1980)	29
รูปที่ 2-24	การลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทออกมาในกรณีต่างๆ (Austin et. Al., 1991).....	30
รูปที่ 2-25	ผลการคำนวณอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กตามแบบจำลอง 3 มิติ เปรียบเทียบกับการทดลอง (Grip et. Al., 2000).....	30
รูปที่ 2-26	ลักษณะการฝัง Thermocouple แล้วต่อสายสัญญาณออกมาหา SAW ด้านนอกผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก (Fachebeger และ Erlacher, 2010).....	32
รูปที่ 2-27	ลักษณะชุดส่งสัญญาณที่ภายในติดตั้ง Passive RFID ไว้เพื่อส่งสัญญาณการตรวจวัดอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กระยะไกลของ Dannert.....	33
รูปที่ 3-1	ลักษณะและส่วนประกอบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	35
รูปที่ 3-2	ปริมาณการใช้เตาหลอมชนิดต่างๆในการผลิตเหล็กตั้งแต่ปี 1970 – 1996.....	36
รูปที่ 3-3	ลักษณะของเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	36
รูปที่ 3-4	อุปกรณ์และชิ้นส่วนในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง.....	38
รูปที่ 3-5	ความสัมพันธ์ระหว่าง Metallurgical Length ความเร็วในการหล่อ.....	39
รูปที่ 3-6	แผนภาพแสดงวัฏจักรการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	41
รูปที่ 3-7	วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	42
รูปที่ 3-8	ลักษณะการแผ่รังสีจากพื้นผิว A_1	48
รูปที่ 3-9	ลักษณะการแผ่รังสีภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นการแผ่รังสีในพื้นที่ปิดล้อม.....	50
รูปที่ 3-10	ลักษณะการแผ่รังสีบนพื้นผิวใดๆ.....	51
รูปที่ 3-11	การแผ่รังสีจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2 โดยมีพื้นผิว A_3 เป็นเกราะกำบังรังสี.....	55
รูปที่ 3-12	วงจรต้านทานความร้อนในการนำความร้อนใน 1 มิติ.....	57
รูปที่ 3-13	ตัวอย่างวงจรต้านทานความร้อนผสมระหว่างการนำและการพาความร้อนใน 1 มิติ.....	58
รูปที่ 3-14	วงจรต้านทานความร้อนในการแผ่รังสีความร้อน.....	59

รูปที่ 3-15	วงจรถ้าทานความร้อนของพื้นผิว k ในพื้นที่ปิดล้อมด้วยพื้นผิวทั้งหมด n ผิว.....	59
รูปที่ 3-16	วงจรถ้าทานความร้อนการแผ่รังสีจากผิว A_1 ไปยัง A_2 กรณีที่มี เพราะก้าบังความร้อน.....	60
รูปที่ 4-1	การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังข้างและผนังก้าภายในเบ้ารับน้ำเหล็กใน ปริมาตรควบคุม.....	70
รูปที่ 4-2	การแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการอุ่น.....	73
รูปที่ 4-3	การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า.....	75
รูปที่ 4-4	วงจรถ้าทานความร้อนของการแผ่รังสีภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	76
รูปที่ 4-5	การแปลงวงจรถ้าทาน (Delta, Δ) ให้กลายเป็นวงจรวารี (Wye, Y)	77
รูปที่ 4-6	การแปลงวงจรถ้าทานความร้อนแบบเดลต้า (Delta, Δ) เป็นวงจรวารี (Wye, Y)	79
รูปที่ 4-7	เปรียบเทียบกฎกระแสของเคอร์ชอร์ฟและสมการทางความร้อนที่จุดต่อ.....	79
รูปที่ 4-8	ปริมาตรควบคุมในการออกแบบแบบจำลองและการถ่ายเทความร้อนระหว่าง การขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	81
รูปที่ 4-9	การถ่ายเทความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมในผนังข้างและผนังก้า เบ้ารับน้ำเหล็ก.....	83
รูปที่ 4-10	ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็ก จากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่มีฝาปิดระหว่างกระบวนการ.....	85
รูปที่ 4-11	แผนภาพการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนอย่างง่ายภายใน กระบวนการ.....	87
รูปที่ 4-12	วงจรถ้าทานความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนในกระบวนการเทน้ำเหล็ก จากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก.....	88
รูปที่ 4-13	วงจรถ้าทานความร้อนที่ถูกลดรูปและแปลงจากวงจรถ้าทานความร้อนใน รูปที่ 4.12.....	89
รูปที่ 4-14	ลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการขน ย้ายสแลคไปเททิ้ง.....	91
รูปที่ 5-1	วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กในกระบวนการหลอมเหล็กในโรงงานที่ ศึกษาวิจัยและเก็บข้อมูล.....	99

รูปที่ 5-2	แผนผังและเส้นทางการเคลื่อนที่ของเบ้ารับน้ำเหล็กในโรงงานที่ทำการศึกษาวิจัยและเก็บข้อมูล.....	100
รูปที่ 5-3	ขนาดของเบ้ารับน้ำเหล็ก และตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple ในการเก็บข้อมูล.	104
รูปที่ 5-4	ลักษณะอิฐที่มีการเจาะและเซาะร่องเพื่อเดินสาย Thermocouple.....	106
รูปที่ 5-5	ลักษณะอุปกรณ์ป้องกันความร้อนและแรงกระแทก.....	107
รูปที่ 5-6	ลักษณะกล่องป้องกันอุณหภูมิและภาคตัดขวางของกล่อง.....	107
รูปที่ 5-7	ผลการตรวจวัดอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กตลอด 20 รอบการทำงาน.....	110
รูปที่ 5-8	แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆต่อเวลา และกิจกรรมต่างที่เกิดขึ้นระหว่างนาฬิกาที่ 0 – 330.....	116
รูปที่ 5-9	แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆต่อเวลา และกิจกรรมต่างที่เกิดขึ้นระหว่างนาฬิกาที่ 320 – 520.....	118
รูปที่ 5-10	แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆต่อเวลา และกิจกรรมต่างที่เกิดขึ้นระหว่างนาฬิกาที่ 480 – 680.....	123
รูปที่ 5-11	แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆต่อเวลา และกิจกรรมต่างที่เกิดขึ้นระหว่างนาฬิกาที่ 630 – 800	123
รูปที่ 5-12	ภาพถ่ายความร้อนผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กขณะล้างรูเทด้วยออกซิเจน.....	125
รูปที่ 5-13	ภาพถ่ายความร้อนผนังภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็กขณะล้างรูเทด้วยออกซิเจน.....	125
รูปที่ 5-14	ภาพถ่ายความร้อนผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ขณะรอรับน้ำเหล็กหน้าเตาหลอม.....	126
รูปที่ 5-15	ภาพถ่ายความร้อนน้ำเหล็กบรรจุในเบ้ารับน้ำเหล็กขณะขนถ่ายไปสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง.....	126
รูปที่ 5-16	ภาพถ่ายความร้อนผนังภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็กขณะรอเทน้ำเหล็กที่สถานีหล่อแบบต่อเนื่อง.....	127
รูปที่ 5-17	ช่วงการเริ่มต้น(เส้นสีแดง) และสิ้นสุด(เส้นสีดำ)การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่เวลาต่างๆตลอดกระบวนการเก็บข้อมูล.....	129
รูปที่ 5-18	ช่วงการเริ่มต้น(เส้นสีแดง) และสิ้นสุด(เส้นสีดำ) การพักเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่เวลาต่างๆตลอดกระบวนการเก็บข้อมูล.....	132
รูปที่ 5-19	ช่วงการเริ่มต้น(เส้นสีแดง) และสิ้นสุด(เส้นสีดำ) การขนถ่ายน้ำเหล็ก ที่เวลาต่างๆตลอดกระบวนการเก็บข้อมูล.....	135

รูปที่ 5-20	ช่วงการเริ่มต้น(เส้นสีแดง) และสิ้นสุด(เส้นสีดำ) การเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก ที่เวลาต่างๆตลอดกระบวนการเก็บข้อมูล.....	137
รูปที่ 5-21	ช่วงการเริ่มต้น(เส้นสีแดง) และสิ้นสุด(เส้นสีดำ) การขนย้ายแอสลคไปเททิ้งที่เวลาต่างๆตลอดกระบวนการเก็บข้อมูล.....	138
รูปที่ 6-1	รูปร่างลักษณะทั่วไปของขอบเขตที่สนใจและลักษณะการแบ่งปริมาตรควบคุมภายใน.....	142
รูปที่ 6-2	ลักษณะการจุดต่อต่างๆภายในผนังและก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	147
รูปที่ 6-3	ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อภายในเนื้อของผนัง.....	149
รูปที่ 6-4	ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อระหว่างผนังอิฐและเปลือกเหล็ก.....	151
รูปที่ 6-5	ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อบริเวณผิวภายนอก.....	153
รูปที่ 6-6	ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อบริเวณผิวภายนอกระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	155
รูปที่ 6-7	ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อบริเวณผิวภายในระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศ.....	156
รูปที่ 6-8	ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อบริเวณผิวภายในระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	158
รูปที่ 6-9	ลักษณะการพิจารณาแบบแบ่งช่วงระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก.....	159
รูปที่ 6-10	แผนภูมิสายงานภาพรวมของโปรแกรม.....	165
รูปที่ 6-11	แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก”	170
รูปที่ 6-12	แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การพักเบ้ารับน้ำเหล็ก”	172
รูปที่ 6-13	แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การขนถ่ายน้ำเหล็ก”	174
รูปที่ 6-14	แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การเทน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก”	177
รูปที่ 6-15	แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การย้ายแอสลคไปเททิ้ง”	180
รูปที่ 6-16	แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสม”.....	183
รูปที่ 7-1	ขนาดของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ทำการจำลอง.....	186
รูปที่ 7-2	ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในการคำนวณ.....	188

รูปที่ 7-3	การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กก่อใหม่ที่เวลาต่างๆ ระหว่างการอุ่นด้วยหัวเผาแบบเผาตั้ง เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล.....	189
รูปที่ 7-4	การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้แล้วที่เวลาต่างๆ ระหว่างการอุ่นด้วยหัวเผาแบบธรรมดา เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล.....	190
รูปที่ 7-5	การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้แล้วที่เวลาต่างๆ ระหว่างการอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล.....	191
รูปที่ 7-6	การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้แล้วที่เวลาต่างๆ ระหว่างการติดตั้งประตูเลื่อน เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล.....	193
รูปที่ 7-7	การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้แล้วที่เวลาต่างๆ ระหว่างการร่อนน้ำเหล็กจากเตาหลอม เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล.....	194
รูปที่ 7-8	การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้แล้วที่เวลาต่างๆ ระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็ก เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล....	196
รูปที่ 7-9	การแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	197
รูปที่ 7-10	การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ระหว่างการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กระหว่างช่วงเวลานาทีที่ 337 - 391 เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล.....	200
รูปที่ 7-11	การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ระหว่างการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กระหว่างช่วงเวลานาทีที่ 684 - 729 เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล.....	201
รูปที่ 7-12	การแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็กระหว่างช่วงเวลานาทีที่ 337 – 391.....	202
รูปที่ 7-13	การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ระหว่างการการขนย้ายแสลคไปที่ทิ้ง เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล.....	203

รูปที่ 7-14	ผลการจำลองการแปรผันของอุณหภูมิในผนังเข้รับน้ำเหล็กตลอดอายุใช้งาน ของผนังเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการตรวจวัด.....	205
รูปที่ 7-15	ผลการจำลองและการตรวจวัดการแปรผันของอุณหภูมิในช่วง 4 รอบ การทำงานแรก.....	207
รูปที่ 7-16	ผลการจำลองและการตรวจวัดการแปรผันของอุณหภูมิในช่วง 12 รอบ การทำงานต่อมา.....	209
รูปที่ 7-17	ผลการจำลองและการตรวจวัดการแปรผันของอุณหภูมิในช่วง 12 รอบ การทำงานต่อมา.....	210
รูปที่ 7-18	ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กจากการจำลองของน้ำเหล็กในช่วง นาที่ที่ 334 – 391 ของการเก็บข้อมูล.....	211
รูปที่ 7-19	แผนภูมิเปรียบเทียบผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ตรวจวัดได้และจาก การจำลอง.....	214
รูปที่ 7-20	ลักษณะส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของต้นแบบระบบควบคุมที่ได้ออกแบบ.....	220

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐานที่สำคัญ เนื่องจากเหล็กและเหล็กกล้าต่างเป็นวัตถุดิบที่จำเป็นในการผลิตของอุตสาหกรรมต่างๆ ปริมาณการใช้เหล็กโภคภัณฑ์และปริมาณเหล็กที่ผลิตจากการหลอมเศษเหล็กของประเทศไทยตั้งแต่ปี 2534 ถึง 2551 (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, 2552) มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งตั้งแต่ปี พ.ศ.2542 - 2553 ปริมาณผลผลิตจากเหล็กและเหล็กกล้าในประเทศไทยต่างก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด เป็นเรื่องยืนยันที่ทำให้สามารถทราบได้ว่าในประเทศไทยมีการผลิตเหล็กที่สูงมากขึ้น ซึ่งในกระบวนการการผลิตเหล็กนั้นต้นทุนทางด้านพลังงานเป็นต้นทุนที่สูงเป็นอันดับที่ 2 รองจากต้นทุนทางด้านวัตถุดิบ จากข้อมูลสถิติของสถาบันพลังงานสภาอุตสาหกรรมระหว่างปี พ.ศ.2543 - 2545 การใช้พลังงานในอุตสาหกรรมเหล็กมีการใช้พลังงานคิดเป็นมูลค่ากว่า 2.9 พันล้านบาทต่อปี ในปี พ.ศ.2545 คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 12 ของปริมาณการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมทั้งหมด 30 กลุ่มอุตสาหกรรม ในภาพรวมอุตสาหกรรมเหล็กจึงเป็นกลุ่มอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้พลังงานสูงมาก

การลดต้นทุนทางพลังงานในปัจจุบันเป็นประเด็นที่ทั้งทางภาคเอกชนและรัฐบาลต่างๆ ทั่วโลกให้ความสนใจ เนื่องจากราคาเชื้อเพลิงในโลกนับวันยิ่งปรับตัวสูงขึ้นตามความต้องการพลังงานที่มากขึ้นภายใต้ทรัพยากรที่จำกัด อีกทั้งประเด็นทางด้านสิ่งแวดล้อมอันเนื่องมาจากการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกจากการเผาไหม้ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ดังนั้นการจัดการการใช้พลังงานในอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานสูงเช่น อุตสาหกรรมเหล็กให้ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อลดต้นทุนในการผลิต อันเป็นผลให้เพิ่มศักยภาพในการแข่งขันและสร้างสรรค์การทำงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการการผลิตเหล็กเพื่อการลดใช้พลังงานในอุตสาหกรรมนี้ นอกจากนั้นแล้วผลจากการลดต้นทุนทางพลังงานที่ใช้ในอุตสาหกรรมเหล็กได้นั้นยังส่งผลดีให้แก่ผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมและธุรกิจอื่นๆภายในประเทศที่เกี่ยวข้องเช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ และธุรกิจก่อสร้าง ทำให้สามารถลดต้นทุนได้อีกด้วย อันจะเป็นผลดีต่อภาคประชาชน และเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ

จากการสำรวจของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย สถิติโรงงานผลิตเหล็กในประเทศไทยพบว่ามีการใช้กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (EAF: Electric Arc

Furnace) คิดเป็นร้อยละ 84 ของจำนวนโรงงานผลิตเหล็กทั้งหมดที่มีในประเทศไทย ดังนั้นการศึกษาจึงจะมุ่งศึกษาไปยังกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า อันจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อกลุ่มอุตสาหกรรมผู้ผลิตเหล็กในประเทศไทยเป็นวงกว้าง

กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้นใช้วิธีการสร้างความร้อนจากกระแสไฟฟ้าที่วิ่งจากขั้วที่มีแรงดันสูงไปยังขั้วที่มีแรงดันต่ำผ่านตัวกลางที่เป็นแก๊ส ลักษณะของการอาร์คนั้นจะสามารถพบได้บ่อยในชีวิตประจำวันเช่น การเชื่อมโลหะ(Welding) ฟ้าผ่า ฟ้าแลบ หรือประกายไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเตาเสียบที่เสียบไม้สนิท ซึ่งภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้นจะจัดสภาพให้แก่อิเล็กโทรดมีแรงดันไฟฟ้าที่สูง และเศษเหล็กที่ต้องการจะหลอมมีแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำ เมื่อความต่างศักย์ของอิเล็กโทรดและเศษเหล็กสูงเพียงพอกระแสไฟฟ้าจะวิ่งจากอิเล็กโทรดเข้ามายังเศษเหล็กและเกิดความร้อนขึ้นมหาศาล ความร้อนจากการอาร์คนี้สามารถสูงได้ถึง 4000 เคลวิน(3727 องศาเซลเซียส) ทำให้เศษเหล็กหลอมละลายเป็นน้ำเหล็กเหลว เมื่อได้น้ำเหล็กเหลวแล้ว น้ำเหล็กจากเตาหลอมจะถูกเทลงไปยังเบ้ารับน้ำเหล็ก(Ladle) เพื่อขนถ่ายน้ำเหล็กไปเทเพื่อเข้าสู่กระบวนการหล่อเหล็กให้ได้รูปทรงต่างๆ ตามที่ต้องการต่อไป

แต่การใช้เบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อรับน้ำเหล็กเหลวจากเตาหลอมนั้นจะต้องใช้เบ้ารับน้ำเหล็กที่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิภายในที่เหมาะสม เนื่องจากเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิต่ำเมื่อได้รับน้ำเหล็กเหลวที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 1600 องศาเซลเซียส นั้นจะทำให้ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กภายในและภายนอกมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันมาก เป็นผลให้ผนังภายในและภายนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กมีการขยายตัวที่แตกต่างกันเกิดเป็นความเค้นจากความร้อน (Thermal Stress) หากความเค้นนี้สูงมากจะทำให้เบ้ารับน้ำเหล็กแตกหักได้ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าความเสียหายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน (Thermal Shock) ดังนั้นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนการใช้งานนั้นเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ทุกรอบการหลอม (Heat)

จากกระบวนการในการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จะมีการใช้พลังงานหลักอยู่เพียงสองกระบวนการได้แก่ การหลอมเศษเหล็ก และการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเท่านั้น(บางแห่งอาจมีการเพิ่มกระบวนการอุ่นน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กด้วย) และในส่วนขั้นตอนการขนถ่ายน้ำเหล็กและการเทน้ำเหล็กนั้นจะมีเพียงการสูญเสียพลังงานออกจากน้ำเหล็กเท่านั้น ดังนั้นในการจัดการการใช้พลังงานนั้นจะต้องเข้าไปคำนึงถึงการใช้พลังงานในสองกระบวนการนี้

จากการสำรวจของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยในปี พ.ศ. 2547 พบว่าการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้นอยู่ที่ 545 kWh/t ในขณะที่ประเทศชั้นนำในอุตสาหกรรมเหล็กอย่างประเทศเยอรมนีใช้พลังงานในเตาหลอมประเภทเดียวกันนี้เพียง 388 kWh/t เท่านั้น ด้วยเหตุนี้จึงสามารถระบุได้ว่าเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในประเทศไทยยังสามารถใช้วิธีการต่างๆเพื่อลด

การใช้พลังงานได้อีกมาก การลดใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้นจึงเป็นประเด็นสำคัญที่จำเป็นต้องทำการศึกษา โดย ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น (2552) ได้คำนวณปริมาณพลังงานที่สามารถประหยัดได้ในการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าขนาด 25 ตันในโรงงานแห่งหนึ่งพบว่า การลดอุณหภูมิในการเทน้ำเหล็กลงเพียง 10 องศาเซลเซียส สามารถประหยัดพลังงานปีละ 840,000 kWh ลดต้นทุนทางพลังงานลงปีละ 2.5 ล้านบาท วิธีการลดการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยการลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กลงจึงเป็นวิธีการที่การศึกษานี้จะนำมาใช้ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการควบคุมและมีตัววัดเป็นอุณหภูมิซึ่งสามารถหาได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กเหลวจากเตาหลอมลง อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เนื่องจากคุณภาพของเหล็กขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของน้ำเหล็กเหลวที่จะ แข็งตัวเป็นเหล็กแข็งต่อไป ความเข้าใจการลดลงของอุณหภูมิตั้งแต่ระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็กเหลวจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งอัตราการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กเหลวในเบ้ารับน้ำเหล็กจะขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานภายใน (Energy Content) ที่สะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในการขนถ่ายด้วย เนื่องจากการที่เบ้ารับน้ำเหล็กมีพลังงานสะสมภายในสูงจะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กเหลวมายังเบ้ารับน้ำเหล็กต่ำ ทำให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กเหลวลดต่ำลง ดังเช่นการเก็บกาแฟร้อนไว้ในแก้วเซรามิกที่ร้อนจะทำให้น้ำกาแฟร้อนได้นานกว่าการใส่กาแฟร้อนไว้ในแก้วเซรามิกที่เย็น ดังนั้นพลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจึงเป็นสิ่งสำคัญมากสำหรับการรักษาอุณหภูมิ นั่นคือการที่จะลดการใช้พลังงานด้วยการลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กเหลวจากเตาหลอม ต้องทำให้สัมพันธ์กับการสะสมพลังงานภายในของเบ้ารับน้ำเหล็กด้วย ซึ่งปริมาณพลังงานภายในที่สะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะถูกกำหนดจากปริมาณพลังงานที่ใช้ในขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนั่นเอง

ในการศึกษาของ จักรวราช จรุงสารทูล (2552) พบว่าหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burner) ใช้สำหรับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กขนาด 25 ตัน หัวเผานี้สามารถให้พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กได้สูงถึงร้อยละ 55.81 ของพลังงานที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งสูงกว่าการใช้หัวเผาแบบธรรมดาถึงร้อยละ 15.1 ผลการศึกษานี้ ทำให้ได้ภาพที่ชัดเจนว่าการใช้พลังงานใน หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟนั้นคุ้มค่ากว่าการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 40 ถึง 50 เท่านั้น

เนื่องด้วยประสิทธิภาพในการให้พลังงานสะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่สูงของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ ทำให้มีแนวโน้มที่ดีที่จะสามารถลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กลงเพื่อลดการใช้พลังงานลงได้ การศึกษานี้จึงจะใช้แนวทางนี้ในการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟเพื่อการลดใช้พลังงานในกระบวนการหลอมเหล็กทั้งหมด

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อศึกษารูปแบบและวิธีการที่เหมาะสมในการควบคุมการทำงานในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ร่วมกับการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน และสร้างระบบควบคุมเพื่อเป็นแนวทางให้เจ้าหน้าที่ควบคุมเตาควบคุมการทำงาน เพื่อการประหยัดพลังงาน

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 เก็บข้อมูลการใช้พลังงานในการหลอมเหล็กของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กต่อต้นน้ำเหล็ก โดยที่การศึกษานี้จะเน้นที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าขนาด 25 ต้นน้ำเหล็ก ไม่มีหัวเผา และไม่มีกระบวนการผลิตเหล็กขั้นทุติยภูมิ
- 1.3.2 ทำการออกแบบระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ซึ่งทำงานในลักษณะกึ่งอัตโนมัติ โดยการประมวลข้อมูลการทำงานในส่วนของการหลอมแล้วสรุปเป็นวิธีการควบคุมการทำงานของเตาหลอม เพื่อให้คนควบคุมเตาใช้ประกอบการควบคุมเตาให้สัมพันธ์กับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก
- 1.3.3 ทำการทดสอบระบบควบคุมกับข้อมูลการทำงาน เพื่อประเมินศักยภาพการประหยัดพลังงานจากการใช้ระบบช่วยควบคุมที่พัฒนาขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 สามารถทำนายสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กได้
- 1.4.2 ได้ต้นแบบระบบควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก เพื่อเป็นแนวทางให้เจ้าหน้าที่ควบคุมเตาหลอมควบคุมเตาเพื่อการประหยัดพลังงาน

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาข้อมูล ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ดัดตั้งอุปกรณ์ และเครื่องมือตรวจวัดเพื่อการวิจัย
- 1.5.3 สังเกต และเก็บข้อมูลในกระบวนการทำงานของเตาหลอมและเบ้ารับน้ำเหล็ก ก่อนการติดตั้งระบบควบคุม เพื่อการเปรียบเทียบผลการใช้พลังงาน
- 1.5.4 วิเคราะห์ และจัดระเบียบข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับการใช้พลังงานในกระบวนการทำงานของเตาหลอมและเบ้ารับน้ำเหล็ก
- 1.5.5 บันทึกข้อมูลการทำงานและปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการทำงานของเตาหลอมเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็ก

- 1.5.6 ออกแบบต้นแบบระบบควบคุม และประเมินศักยภาพความประหยัดของการใช้ต้นแบบระบบควบคุม
- 1.5.7 สรุปผลการศึกษาวิจัย และจัดทำเอกสารเพื่อการเผยแพร่

1.6 การนำเสนอผลงานวิจัย

- 1.6.1 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 25, The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT), 19 – 21 ตุลาคม 2554, อ่าวนางวิไลรีสอร์ท จังหวัดกระบี่ นำเสนอผลงานในหัวข้อเรื่อง การลดใช้พลังงานในการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในกรณีที่อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาเริเจนเนอเรทีฟ (Energy Reduction in Steelmaking Process Employing Regenerative Burner for Ladle Preheating)
- 1.6.2 การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8, The 8th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT), 2 – 4 พฤษภาคม 2555, โรงแรมดักกลีลา จังหวัดมหาสารคาม นำเสนอผลงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง การควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กร่วมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน: ผลการตรวจวัดในวัฏจักรทำงานจริง (Control of Ladle Preheating Combined with Electric Arc Furnace Operation for Energy Conservation: Measurement in Actual Working Cycles)

บทที่ 2

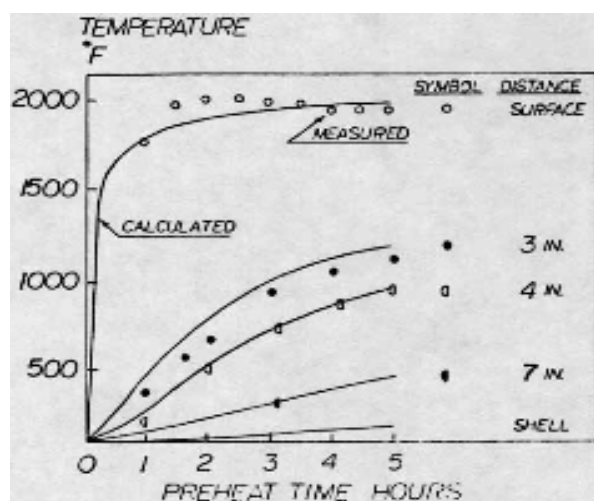
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการสร้างระบบควบคุมการใช้พลังงานในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ซึ่งในแต่ละส่วนของกระบวนการจะมีลักษณะปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนรูปแบบที่แตกต่างกันเกิดขึ้น จึงต้องศึกษาถึงรูปแบบของแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ลักษณะนั้นจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมาก่อน โดยที่การศึกษานี้จะแบ่งขอบเขตการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็นหัวเรื่องต่างๆตามขั้นตอนตามกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยมีเนื้อหา ดังนี้

2.1 หลักการทำงานของหัวเผา และการใช้พลังงานเพื่อการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความจำเป็นต่อกระบวนการหลอมเหล็กทุกรูปแบบ เนื่องจากเบ้ารับน้ำเหล็กทำหน้าที่ขนถ่ายน้ำเหล็ก เมื่อจะเริ่มต้นใช้งาน เบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องถูกเผาเพื่อไล่ความชื้น และปรับอุณหภูมิภายในของเบ้ารับน้ำเหล็กให้สูงเพียงพอเพื่อลดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันเมื่อได้รับน้ำโลหะเหลว ซึ่งจะทำให้เกิดความเค้นทางความร้อนขึ้นสูงจนเบ้ารับน้ำเหล็กเกิดความเสียหายได้

ต้นแบบการสร้างสมการและการทดลองหาการแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นมีการศึกษาโดย Saunder (1983) ผลการคำนวณและการทดลองที่ได้นั้นค่อนข้างสอดคล้องกันแต่ผลงานของ Saunder ไม่ได้เปิดเผยการคำนวณอย่างชัดเจนไว้

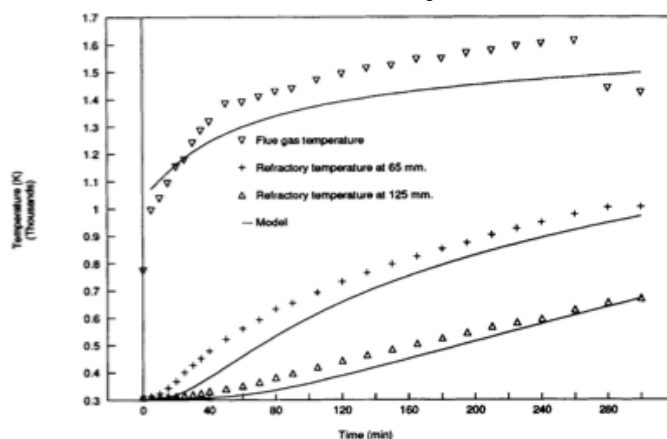


รูปที่ 2-1 การแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กตามผลการทดลองและ

การคำนวณของ Saunder (1983)

การศึกษาของ Joyce (1989) ชี้ให้เห็นว่าประโยชน์อีกอย่างหนึ่งของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กคือการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิที่สูงมากขึ้นจะช่วยลดการถ่ายเทพลังงานของน้ำเหล็กสู่เบ้ารับน้ำเหล็กได้ เนื่องจากลดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิระหว่างน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กลง สิ่งก็ตามมาคือ เมื่อสามารถลดการสูญเสียพลังงานในน้ำเหล็กที่อยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยวิธีนี้ได้ เตาหลอมเหล็กก็ไม่จำเป็นต้องอุ่นน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงมากเพื่อเพื่อการสูญเสียความร้อนที่จะเกิดขึ้นระหว่างการขนถ่าย การลดอุณหภูมิที่น้ำเหล็กส่งผลให้ประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการอุ่นน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิสูง และเมื่อไม่มีความจำเป็นจะต้องอุ่นน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิสูง เวลาที่ใช้ในการหลอมเหลวเหล็กก็จะลดต่ำลง เวลาในแต่ละรอบการเทน้ำเหล็กจะสั้นลง ทำให้เกิดประสิทธิผลสูงขึ้น

เนื่องจากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นสามารถใช้ประโยชน์ในการลดการใช้พลังงานลงได้ Mohanty และ Satayayut (1992) จึงมีความสนใจที่จะทำการศึกษาระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กอย่างจริงจัง โดยสิ่งที่มุ่งเน้นในการศึกษาคือการหาแบบจำลองทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการอุ่น Mohanty และ Satayayut ได้พิจารณาความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้โดยสมการการเผาไหม้ และให้แก๊สร้อนจากการเผาไหม้แผ่รังสีความร้อนสู่ผนังภายในของเบ้ารับน้ำเหล็ก ในการสร้างแบบจำลองทั้งคู่ได้กำหนดให้รังสีความร้อนที่แผ่ออกจากแก๊สร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ส่งพลังความร้อนที่คงที่มายังผนังภายใน ผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบจำลองนี้ คือการประมาณค่าอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างกับค่าที่ได้จากการทดลอง แต่มีแนวโน้มที่เป็นไปตามการทดลองจริง ทั้งนี้ในการทดลองคาดว่าสาเหตุอาจเนื่องมาจาก การสมมติระบบให้มีการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนด้วยการแผ่รังสีเท่านั้น ไม่รวมการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนด้วย อีกทั้งยังพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในสองมิติที่ใช้ในแบบจำลองนี้ว่าจะสร้างความยุ่งยากมากเกินไปในการใช้โดยที่ไม่มีนัยสำคัญอันใดต่อผลที่ได้



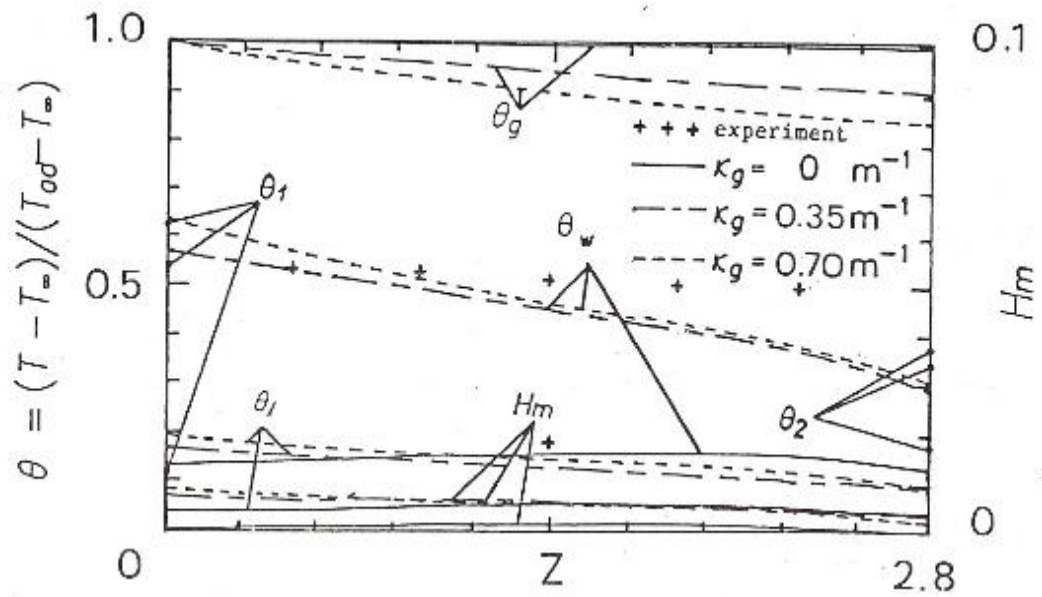
รูปที่ 2-2 อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจากการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Mohanty และ Satayayut (1992)

การศึกษาของ Mohanty และ Satayayut นี้ ถึงแม้ว่ายังต้องมีการปรับปรุงการสมมติระบบ ให้มีความแม่นยำมากขึ้นไปอีก แต่แนวคิดของทั้งคู่ก็มีประโยชน์มากต่อการออกแบบจำลองทาง ความร้อนระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และได้บทสรุปที่ชี้ชัดว่าอัตราการเผาไหม้ที่สูงขึ้นจะส่งผล ให้เพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กอย่างชัดเจน และการเพิ่มปริมาณออกซิเจนที่ ใช้ในการเผาไหม้จะทำให้อุณหภูมิของแก๊สเสียสูงขึ้น ทำให้ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้น ตามไปด้วย

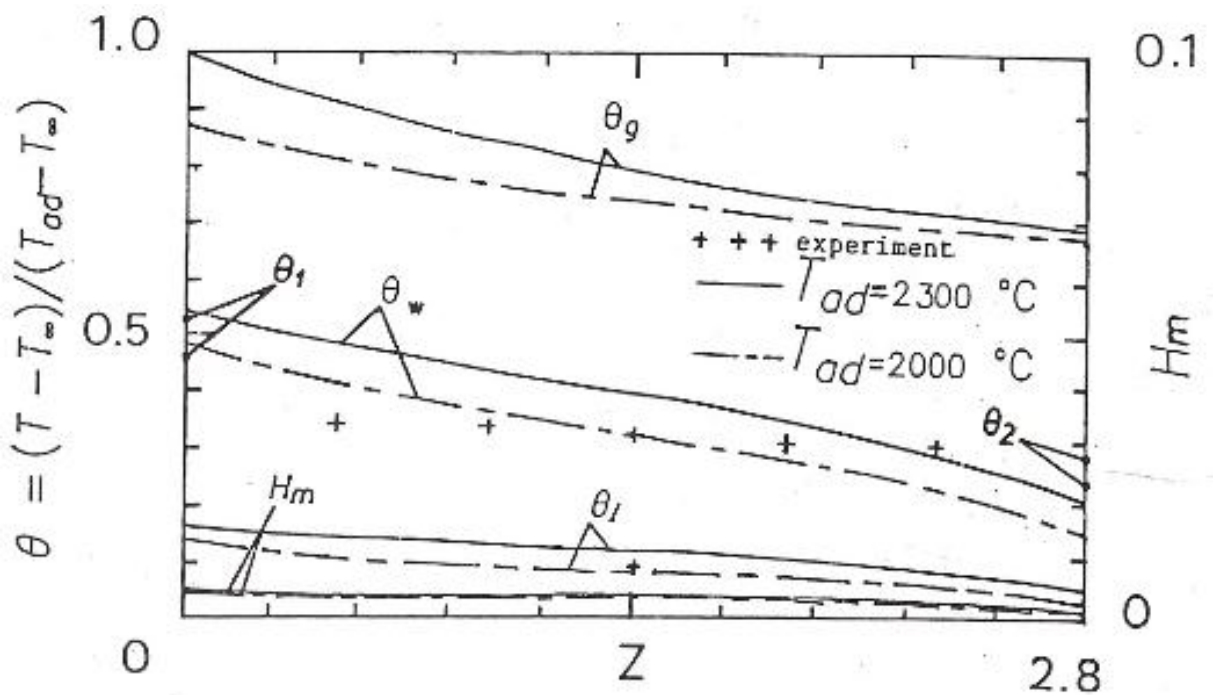
ต่อมา สมศักดิ์ คง โขติ (1993) ได้ศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กและพยายามที่จะ สร้างแบบจำลองทางความร้อนระหว่างการอุ่นเบ้า โดยการศึกษาเจาะลึกลงไปถึงการแผ่รังสีของ แก๊สร้อนที่เกิดขึ้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก สมศักดิ์ได้สมมติให้เบ้ารับน้ำเหล็กได้รับความร้อนผ่าน การแผ่รังสีความร้อนเพียงอย่างเดียวโดยพิจารณาการดูดซับรังสีแต่ไม่พิจารณาการกระเจิงรังสีของ แก๊สร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก และสมมติให้ผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กประพฤติตัวเป็นวัตถุดำ ความซับซ้อนในการคำนวณคือสมศักดิ์ได้พิจารณาให้มวลของแก๊สร้อนในแต่ละจุดต่างก็มี การถ่ายเทความร้อนด้วยการถ่ายเทรังสีความร้อนไปยังส่วนตั้งของผนังภายในของเบ้ารับน้ำเหล็ก และผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กก็แผ่รังสีความร้อนกลับมายังแก๊สร้อนและผนังภายในส่วนอื่นๆ

เนื่องจากการคำนวณของสมศักดิ์ ถึงแม้จะเก็บค่าในรูปตัวแปรไร้มิติ แต่ก็ยังมีความ ซับซ้อนสูง และปัจจัยที่มากจึงต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงเลขเข้ามาช่วยในการคำนวณ ผลสรุปที่ได้ นั้น ปรากฏชัดว่าอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะสูงขึ้นจากความร้อนจากการแผ่รังสีของแก๊ส ร้อนเป็นหลัก เนื่องจากผลของการคำนวณให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลอง ดังนั้นการทดลองของ สมศักดิ์จึงยืนยันว่าหากอุณหภูมิเปลวไฟสูงมากขึ้นก็จะได้แก๊สร้อนที่มีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลต่อการ เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กอย่างชัดเจน แต่สิ่งที่คาดว่าเป็นความคลาดเคลื่อนใน การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมศักดิ์นี้จะอยู่ที่การสมมติให้แก๊สร้อนภายในเบ้ารับน้ำ เหล็กไหลจากกันมายังปากเบ้า หากมีการศึกษาเกี่ยวกับการไหลเวียนของแก๊สร้อนภายในที่ละเอียด มากยิ่งขึ้น จะทำให้สามารถนำความสัมพันธ์นั้นมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพิ่มเติมให้มีความแม่นยำในการทำนายอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กให้ใกล้เคียงและแม่นยำมากขึ้น

ทั้งนี้ทั้งนั้นในการทดลอง และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายอุณหภูมิ ของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการอุ่นเบ้า นั้น ต่างมีการจำลองและทดลองเพียงการอุ่นด้วยหัวเผาแบบ ธรรมดา ในขณะที่สังคมโลกกำลังเผชิญกับวิกฤตทางด้านพลังงาน ภาคอุตสาหกรรมเหล็กต่างๆทั่ว โลกเริ่มมีความสนใจในการใช้หัวเผาประสิทธิภาพสูงสำหรับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กมากขึ้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เคยถูกใช้ในช่วงเวลาที่ผ่านมาจึงต้องมีการปรับปรุงรูปสมการเพื่อให้ สอดรับการใช้งานที่กำลังจะเกิดขึ้น



รูปที่ 2-3 ค่าการดูดซับรังสีภายในเข้รับน้ำเหล็กที่ใช้ในการคำนวณที่อุณหภูมิต่างๆ โดยที่ Z คือ รัศมีไร้มิติ และ H_m คือความสูงไร้มิติ (สมศักดิ์ คงโชติ, 1993)



รูปที่ 2-4 อุณหภูมิในเข้รับน้ำเหล็กจากผลการทดลองเปรียบเทียบกับ การคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยที่ Z คือรัศมีไร้มิติ และ H_m คือความสูงไร้มิติ (สมศักดิ์ คงโชติ, 1993)

2.2 การประเมินประสิทธิภาพของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

เนื่องจากการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าทั้งหมดนั้น จะต้องทราบถึงวิธีการในการประเมินประสิทธิภาพด้วยเนื่องจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นอีกอุปกรณ์หนึ่งที่ใช้พลังงานเข้าสู่กระบวนการหลอม หากต้องการใช้พลังงานในกระบวนการหลอมเหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทราบถึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ชนิดนี้ก็เป็นสิ่งสำคัญเพื่อที่จะประเมินวิเคราะห์ปริมาณการใช้พลังงานในอุปกรณ์ชนิดนี้ได้เหมาะสม

J. C. Ho และ T. T. Chandratilleke (1990) ชาวสิงคโปร์ ได้คิดวิธีการประเมินประสิทธิภาพเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยหลักการประเมินประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 และ 2 ของวิชาอุณหพลศาสตร์ ดังนี้

$$\eta_1 = \frac{\text{minimum energy to perform the task}}{\text{actual energy input}} \quad (2.1)$$

$$\eta_2 = \frac{\text{minimum energy to perform the task}}{\text{actual exergy input}} \quad (2.2)$$

ค่า η_1 ในสมการข้างต้นแทนประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 1 ของวิชาอุณหพลศาสตร์ คือ พลังงานน้อยที่สุดที่ใช้ในการทำภารกิจซึ่งในการหลอมเหล็กก็คือ พลังงานน้อยที่สุดที่ใช้ในการหลอมเหล็กให้เป็นน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิตามต้องการต่อด้วยพลังงานทั้งหมดที่ใส่ให้แก่ระบบ ส่วนค่า η_2 แทนประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 2 ของวิชาอุณหพลศาสตร์ คือ พลังงานน้อยที่สุดที่ใช้ในการทำภารกิจต่อด้วยเอ็กเซอร์จี (Exergy) ที่ใช้ทั้งหมด ซึ่งค่าพลังงานและเอ็กเซอร์จี สามารถหาได้ดังนี้

$$\text{minimum energy} = m(h_2 - h_1) = mc(T_2 - T_1) + mh_{if} \quad (2.3)$$

$$\text{minimum exergy} = mc(T_2 - T_1) - mcT_0 \ln \frac{T_2}{T_1} + mh_{if} \left(1 - \frac{T_0}{T_2} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ	h_1, h_2	แทนเ็นทรีลปีของสถานะเริ่มต้น และสิ้นสุดตามลำดับ
	T_1, T_2	แทนอุณหภูมิของสถานะเริ่มต้น และสิ้นสุดตามลำดับ
	m	แทนมวลของสสารที่ถูกให้พลังงาน
	h_{if}	แทนพลังงานแฝงของการหลอมเหลว
	T_0	แทนอุณหภูมิลิ่งแวดล้อมโดยรอบ
	c	แทนความร้อนจำเพาะของสสารนั้น

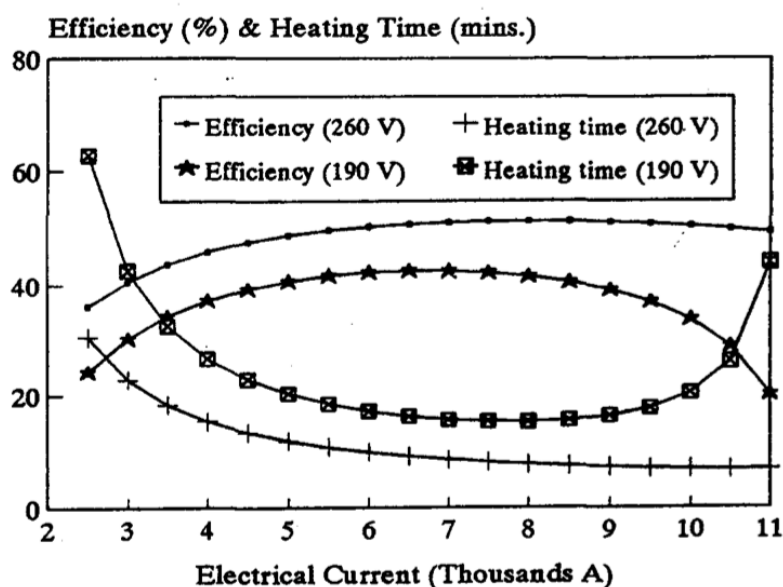
วิธีการของ Ho และ Chandratilleke นั้นค่อนข้างเรียบง่าย สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานในทางอุตสาหกรรมได้โดยง่าย นอกจากการนิยามประสิทธิภาพที่ใช้พิจารณาแล้ว ทั้งคู่ยังได้นำเสนอประสิทธิภาพของเตาหลอมของ National Iron and Steel Mill (NISM) พร้อมทั้งแสดงการ

อุณหภูมิลีกก่อนการหลอมต่างก็ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเตาหลอมได้เป็นอย่างดี ทำให้เห็นภาพถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพด้วยวิธีนี้ และการใช้งานนิยามของประสิทธิภาพที่กล่าวถึงนี้ได้เป็นอย่างดี แต่วิธีการนี้ยังมีความยุ่งยากในการตรวจวัดองค์ประกอบของค่าธาตุต่างๆเพื่อหาพลังงานที่แฝงเข้ามากับวัสดุ และออกไปกับฝุ่นผงและผลิตภัณฑ์ จึงต้องใช้ความเชี่ยวชาญ และเวลาในการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์

นอกจากวิธีการประเมินประสิทธิภาพของ Ho และ Chandratilleke แล้ว การประเมินประสิทธิภาพยังถูกกล่าวถึงในงานของ S. Chirattananon และ Z. Gao (1995)

การประเมินประสิทธิภาพของ Chirattananon และ Gao จะพิจารณาเฉพาะพลังงานจากกระแสไฟฟ้า โดยให้ประสิทธิภาพเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่เหล็กดูดซับเข้าไปต่อด้วยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปทั้งหมดในกระบวนการหลอม วิธีการนี้เพิ่มความสะดวกในการประเมินประสิทธิภาพแต่จะให้ภาพของประสิทธิภาพที่เกิดขึ้นสูงกว่าวิธีการของ Ho และ Chandratilleke ตามกฎข้อที่ 1 ของวิชาอุณหพลศาสตร์ เนื่องจากเปรียบเทียบกับพลังงานไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

Chirattananon และ Gao ได้ใช้วิธีการประเมินประสิทธิภาพนี้ในการศึกษาหาความสัมพันธ์เพื่อระบุการใช้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการหลอม ได้ผลดังรูปที่ 2 – 5 คือประสิทธิภาพของเตาหลอมจะสูงสุดที่ปริมาณกระแสช่วงหนึ่งเท่านั้น แตกต่างกับเวลาที่ใช้ในการหลอมจะแปรผกผันกับปริมาณกระแสที่ใช้ให้เห็นได้ชัด



รูปที่ 2-5 จากการทดลองของ Chirattananon และ Gao (1995) ประสิทธิภาพสูงสุดจะเกิดเฉพาะช่วงการใช้ปริมาณกระแสระดับหนึ่งเท่านั้น แต่เวลาที่ใช้ในการหลอมจะแปรผกผันกับกระแสที่ใช้

การประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีนี้ให้ความสะดวกในการคำนวณหา แต่ความหมายเชิงกายภาพของวิธีการประเมินนี้สะท้อนได้ชัดเจนเฉพาะปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการนำวิธีการนี้ไปใช้ประเมินประสิทธิภาพของเตาหลอมเพื่อหาภาพโดยรวมจึงเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมนัก

นอกจากวิธีการประเมินประสิทธิภาพตามแนวทางของกฎข้อที่ 1 ในวิชาอุณหพลศาสตร์แล้ว วิธีการประเมินประสิทธิภาพตามแนวทางกฎข้อที่ 2 ก็มีปรากฏอยู่ในงานวิจัยของ U. Camdali, M. Tunc และ A. Karakas (2002) ด้วย

งานวิจัยของนักวิจัยชาวตุรกีทั้ง 3 ท่านนี้พยายามที่จะเสนอการใช้การประเมินตามกฎข้อที่ 2 โดยการประเมินเอนโทรปีในระบบนั้นมีความละเอียดมาก ในการคำนวณได้คำนึงถึงสารประกอบหลักๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการทั้งหมด และพิจารณาความร้อนที่สูญเสียไม่ว่าจะเป็นการนำความร้อนจากทางก้นเตาหลอม การแผ่รังสีและพาความร้อนออกทางช่องเปิดต่างๆการ และการนำความร้อนผ่านแท่งอิเล็กโทรด

การวัดประสิทธิภาพด้วยวิธีการนี้และแนวคิดในการคำนวณค่าต่างๆในบทความนี้ได้ระบุไว้ละเอียดและชัดเจน อีกทั้งยังมีการใช้ประสิทธิภาพจากการคำนวณตามรูปแบบที่กล่าวไว้ในบทความนี้ตรวจเช็คความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพกับอุณหภูมิการอุ่นเศษเหล็กก่อนการหลอม อุณหภูมิไอเสีย และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น

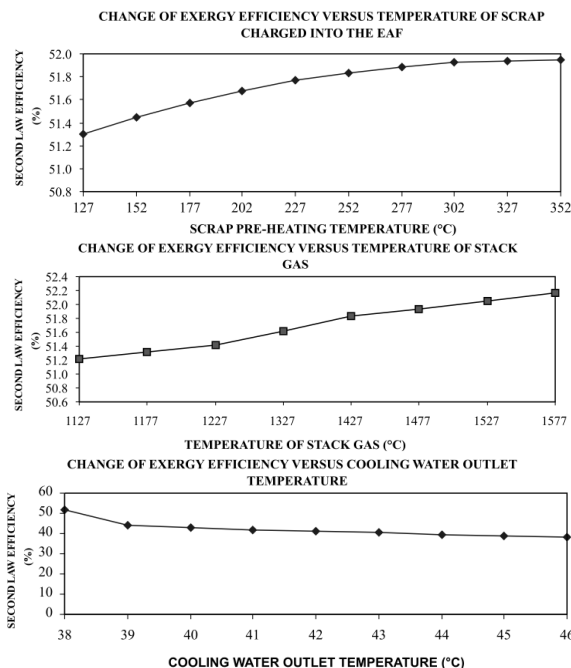
การสร้างวิธีการประเมินประสิทธิภาพของ Camdali, Tunc และ Karakas นั้นใช้หลักการพิจารณาประสิทธิภาพตามกฎข้อที่ 2 ที่ Ho และ Chandratelleke เคยได้ระบุไว้ เพียงแต่ปรับการคำนวณให้มีความแม่นยำมากขึ้น

ไม่ว่าอย่างไรก็ตาม วิธีการประเมินประสิทธิภาพที่ถูกใช้เท่าที่ผ่านมา ต่างก็มีความยุ่งยากซับซ้อนในขั้นตอนของการหาปริมาณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการทั้งหมด Köhle (1992) จึงได้คิดค้นสมการที่ง่ายต่อการหาค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการ โดยการสร้างสมการเริ่มต้นจากสมดุลพลังงานงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

สมการที่ใช้พิจารณานี้ประกอบไปด้วยพลังงานที่ใส่ให้แก่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าอยู่ฝั่งซ้ายของสมการ และพลังงานที่ออกจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในรูปแบบต่างๆจะอยู่ทางฝั่งขวาของสมการ

พลังงานที่ใส่ให้แก่เตาหลอมในการพิจารณาของ Köhle นั้นจะประกอบไปด้วยพลังงานจากไฟฟ้า (Electric energy) พลังงานจากปฏิกิริยาเคมี ($E_{\text{reactions}}$) และพลังงานจากน้ำเหล็กที่ใส่เติมลงในเตา (E_{HM}) (กรณีที่มีการใช้น้ำเหล็กผสมกับเศษเหล็ก) ส่วนพลังงานที่ออกจากเตาหลอมจะประกอบด้วยพลังงานที่อยู่ในน้ำเหล็กที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ (E_{steel}) รวมกับพลังงานในแสลค

(E_{slag}) พลังงานในแก๊สที่ออกจากเตา ($E_{off\ gas}$) พลังงานในน้ำหล่อเย็น (E_{CW}) และพลังงานที่สูญเสียอื่นๆ ($E_{el.losses}$)



รูปที่ 2-6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและอุณหภูมิเศษเหล็ก อุณหภูมิไอเสีย และอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นตามการทดลองของ Camdali, Tunc และ Karakas (2002)

$$E_{\text{electric energy}} + E_{\text{reactions}} + E_{\text{HM}} = E_{\text{steel}} + E_{\text{slag}} + E_{\text{off gas}} + E_{\text{CW}} + E_{\text{el. losses}} \quad (2.5)$$

Köhle ได้รวบรวมข้อมูลจากโรงงานต่างๆ และใช้วิธีการทางสถิติสร้างสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์ในสมการเพื่อสะดวกแก่การใช้งานในการประเมินพลังงานที่ใช้ในโรงหลอม ดังนั้นสมการของ Köhle นี้ไม่ได้คำนวณหาพลังงานที่ใช้ในทางตรงแต่เป็นค่าทางสถิติ สมการของ Köhle ประพจน์ตัวเสมือนกล่องดำ ที่ให้ค่าผลลัพธ์โดยไม่ได้แสดงผ่านกายภาพของปรากฏการณ์ ดังนั้นความแม่นยำของการทำนายพลังงานด้วยวิธีการนี้แม้จะให้ความสะดวก แต่ก็ไม่แม่นยำเท่ากับการคำนวณหาพลังงานที่ใช้ด้วยวิธีตรง ซึ่งรูปสมการที่ Köhle ทำขึ้นในปี 1992 มีรูปดังนี้

$$W_R = 300 \frac{kWh}{t} + 900 \frac{kWh}{t} \left(\frac{G_E}{G_A} - 1 \right) + 1600 \frac{kWh}{t \cdot K} \frac{G_Z}{G_A} + 0.7 \frac{kWh}{t \cdot K} (T_A - 1600^\circ C) + 0.85 \frac{kWh}{t \cdot \min} t_c - \left\{ 8 \frac{kWh}{m^3} M_G + 4.3 \frac{kWh}{m^3} M_L + 2.8 \frac{kWh}{m^3} M_N \right\} \quad (2.6)$$

เมื่อ W_R คือปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเตาหลอมแต่ละรอบการหลอม (kWh/t)
 G_E คือมวลของเศษเหล็กที่ใส่ลงในเตาหลอม (t)
 G_A คือมวลของน้ำเหล็กที่เทได้จากเตาหลอม (t)

G_Z	คือมวลของสารที่เติมลงในน้ำเหล็ก (t)
T_A	คืออุณหภูมิเหนือน้ำเหล็ก (K)
t_c	คือรอบเวลาการเหนือน้ำเหล็กรอบหนึ่งถึงอีกรอบหนึ่ง (min)
M_G	คือปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติในหัวเผา (m^3/t)
M_L	คือปริมาณออกซิเจนที่ใช้ปนเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (m^3/t)
M_N	คือปริมาณออกซิเจนที่ใช้ปนเพื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ (m^3/t)

ต่อมา Köhle ได้พัฒนาสมการของตนเองให้สอดคล้องกับเทคโนโลยีการผลิตในปัจจุบันมากขึ้น ในปี Köhle (2002) ได้แสดงสมการใหม่จากการสำรวจข้อมูลครั้งใหม่ได้เพิ่มพจน์ต่างๆที่ส่งผลต่อการผลิตเพิ่มขึ้นด้วยดังนี้

$$\frac{W_R}{kWh/t} = 375 + 400 \left(\frac{G_E}{G_A} - 1 \right) + 80 \frac{G_{DRI/HBI}}{G_A} - 50 \frac{G_{Shr}}{G_A} - 350 \frac{G_{HM}}{G_A} + 1000 \frac{G_Z}{G_A} + 0.3 \left[\frac{T_A}{^\circ C} - 1600 \right] + 1 \frac{t_S + t_N}{min} - 8 \frac{M_G}{m^3/t} - 4.3 \frac{M_L}{m^3/t} - 2.8 \frac{M_N}{m^3/t} + NV \frac{W_V - W_{V_m}}{kWh/t} \quad (2.7)$$

เมื่อ	G_{DRI}	คือน้ำหนักของ Direct Reduced Iron
	G_{HBI}	คือน้ำหนักของ Hot Briquette Iron
	G_{Shr}	คือน้ำหนักของ Shredder
	G_{HM}	คือน้ำหนักของ Hot Metal
	W_V	คือพลังงานที่สูญเสียในการหลอม (หากสามารถหาได้)
	W_{V_m}	คือค่าเฉลี่ยของพลังงานที่สูญเสียในการหลอมเหลว
	NV	คือตัวประกอบจำเพาะของเตาหลอม

เนื่องจากความสะดวกในการใช้สมการของ Köhle ภาคอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้ เพราะตัวแปรต่างๆในสมการสามารถหาค่าได้ง่าย และเป็นค่าที่ทางอุตสาหกรรมจำเป็นต้องเก็บข้อมูลบันทึกไว้อยู่แล้ว

สมการของ Köhle ได้รับการแจกแจงวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์โดย H. Pfeifer และ M. Kirschen เพื่อการนำสมการของ Köhle ไปประยุกต์ใช้ได้ตรงกับสภาพโรงหลอมแต่ละแห่ง นอกจากการแสดงวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ Köhle แล้ว Pfeifer และ Kirschen ยังได้นำเสนอรูปสมการเพื่อประเมินประสิทธิภาพของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าตามกฎข้อที่ 1 ของวิชาอุณหพลศาสตร์ โดยให้ประสิทธิภาพเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อพลังงานที่ใช้ทั้งหมด

$$\eta_N = \frac{\text{energy benefit}}{\text{energy input}} \quad (2.8)$$

แต่พลังงานที่ก่อให้เกิดประโยชน์นี้ในความหมายของ Pfeifer และ Kirschen คือพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการหลอมเหลว ซึ่งจะรวมถึงพลังงานในน้ำเหล็กและในแอสลคด้วยจึงทำให้สมการกลายเป็น

$$\eta_{EAF} = \frac{\text{enthalpy steel + slag}}{\text{total energy input}} \quad (2.9)$$

จากนิยามประสิทธิภาพเตาหลอมของ Pfeifer และ Kirschen จะเห็นได้ว่าการประเมินประสิทธิภาพที่ได้ในกระบวนการเดียวกันจะสูงกว่าของ Ho และ Chandratilleke เนื่องจากรวมพลังงานในแอสลคเข้าไปด้วย

วิธีการประเมินประสิทธิภาพเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในการศึกษาที่ผ่านมาต่างก็ขึ้นกับแง่มุมของการศึกษา ดังนั้นการเลือกใช้การประเมินประสิทธิภาพด้วยวิธีการต่างๆ ต้องคำนึงถึงงานที่จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบ และในการศึกษาประสิทธิภาพเตาหลอมในที่ต่างๆ ต้องทราบถึงที่มาของวิธีการคำนวณหาประสิทธิภาพเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดเมื่อใช้เปรียบเทียบด้วย

2.3 การถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็ก

หน้าที่หลักของเบ้ารับน้ำเหล็กคือการขนถ่ายน้ำเหล็ก ซึ่งในกระบวนการนี้จะเป็นกระบวนการที่เบ้ารับน้ำเหล็กได้สัมผัสกับน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงถึง 1600°C อันจะทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในปริมาณมหาศาลจากน้ำเหล็กสู่ผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก สภาวะทางความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กจะเปลี่ยนแปลงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการต่อไปต้องเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เราจึงต้องติดตามสภาวะทางความร้อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในกระบวนการนี้อย่างจริงจังเพื่อนำไปใช้สร้างระบบควบคุมกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าต่อไป นอกจากนั้นแล้วอุณหภูมิของน้ำเหล็กเป็นอีกประเด็นที่ต้องให้ความสนใจ เนื่องจาก ที่สถานีหล่อแบบต่อเนื่องจะต้องควบคุมอุณหภูมิในรางรับน้ำเหล็ก เพื่อรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์เหล็กที่จะได้

ในเมื่อทั้งเบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็กนั้นต้องสัมผัสกัน มีการถ่ายเทความร้อนให้แก่กัน ในการศึกษาเราจึงต้องศึกษาสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็กควบคู่กันไปด้วย

การศึกษาเกี่ยวกับการแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กขณะขนถ่ายน้ำเหล็กมีการศึกษาที่ชัดเจนโดย T. P. Fredman และ H. Saxen (1997) ทั้งคู่ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเบ้ารับน้ำเหล็กโดยใช้ฟังก์ชันทรงกระบอก ให้การแจกแจงอุณหภูมิขึ้นกับรัศมีและเวลาเท่านั้น โดยที่กระบวนการพิจารณาให้เป็นกึ่งสถานะคงตัว และตั้งรูปสมการสำหรับชั้นต่างๆ ในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กได้ดังนี้

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right], i=1, \dots, N \quad (2.10)$$

$$-k \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \Big|_{r_{i-1}} = h(r_{i-1}) [T_{i-1} - T(r_{i-1}, t)] \quad (2.11)$$

$$-k \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \Big|_{r_i} = h(r_i) [T(r_i, t) - T_i] \quad (2.12)$$

$$T(r, 0) = f(r) \quad (2.13)$$

จะเห็นว่าในสมการที่ (2.11) และ (2.12) แทนเงื่อนไขขอบเขตจะจัดให้มีการถ่ายเทความร้อนในรูปของผลต่างอุณหภูมิระหว่างชั้น ($T(r,t)$) รอบข้างคู่กับสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อน (h) ซึ่งสัมประสิทธิ์นี้เป็นการลดรูปสมการให้เป็นการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน โดยในแบบจำลองนี้จะให้สัมประสิทธิ์ตัวนี้มีค่าเป็นความสามารถในการนำความร้อนของรอยต่อระหว่างชั้นหารด้วยความกว้างรอยต่อนั้น

$$\frac{k_i^{(i-1)}}{l_i} = h(r_i) \quad (2.14)$$

สมการที่ (2.10) – (2.13) นี้จะอยู่ในรูปสมการที่เป็นสถานะคงตัว ไม่ขึ้นกับเวลาทำให้สามารถแก้สมการให้อยู่ในรูป

$$T_{st}^{(i)}(r) = [\ln(r) \quad 1] C^{(i)} \begin{bmatrix} T_{i-1} \\ T_i \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

เมื่อ C เป็นเมตริกซ์ค่าคงตัวของสมบัติต่างๆของผนังเข้ารับน้ำเหล็ก แต่ฟังก์ชันของอุณหภูมิที่หาได้นี้ก็ยังเป็นรูปที่ไม่ขึ้นกับเวลาจึงแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์อีกครั้งโดยให้ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิในสถานะคงตัวนั้นเป็นค่าขอบเขตของระบบสมการ มีรูปสมการดังนี้

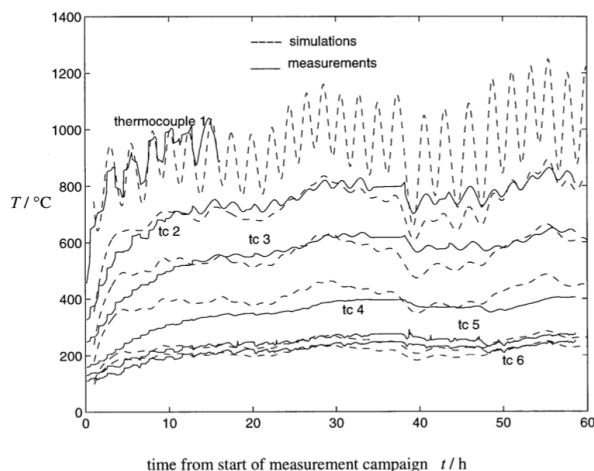
$$\frac{1}{\alpha^{(i)}} \frac{\partial T_r(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T_r(r,t)}{\partial r} \right] \quad (2.16)$$

$$k^{(i)} \frac{\partial T_r(r,t)}{\partial t} \Big|_{r_{i-1}} = h(r_{i-1}) T_r(r_{i-1}, t) \quad (2.17)$$

$$-k^{(i)} \frac{\partial T_r(r,t)}{\partial t} \Big|_{r_i} = h(r_i) T_r(r_i, t) \quad (2.18)$$

$$T_r(r, 0) = f(r) - T_r^{(i)}(r) \quad (2.19)$$

สมการที่ (2.16) – (2.19) นี้จะใช้วิธีการแยกตัวแปร (Separation of Variable) ในการพิจารณาหาฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิต่อไป ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองนี้ถูกนำไปเทียบเคียงกับผลการทดลองในกระบวนการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรม

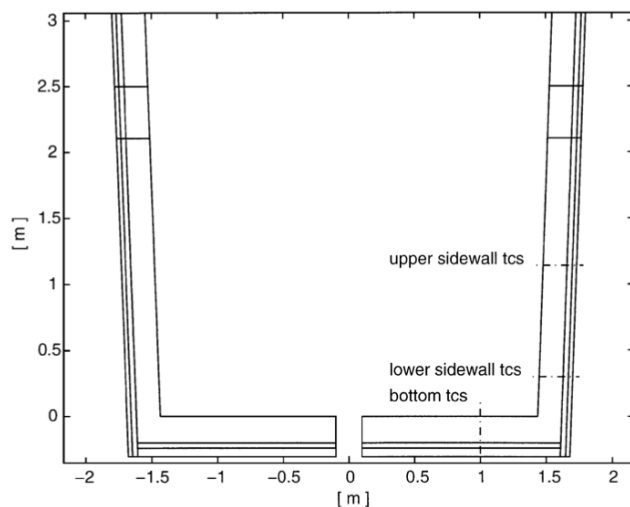


รูปที่ 2-7 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองของ Fredman และ Saxen (1997) เทียบกับ

ผลจากการทดลอง

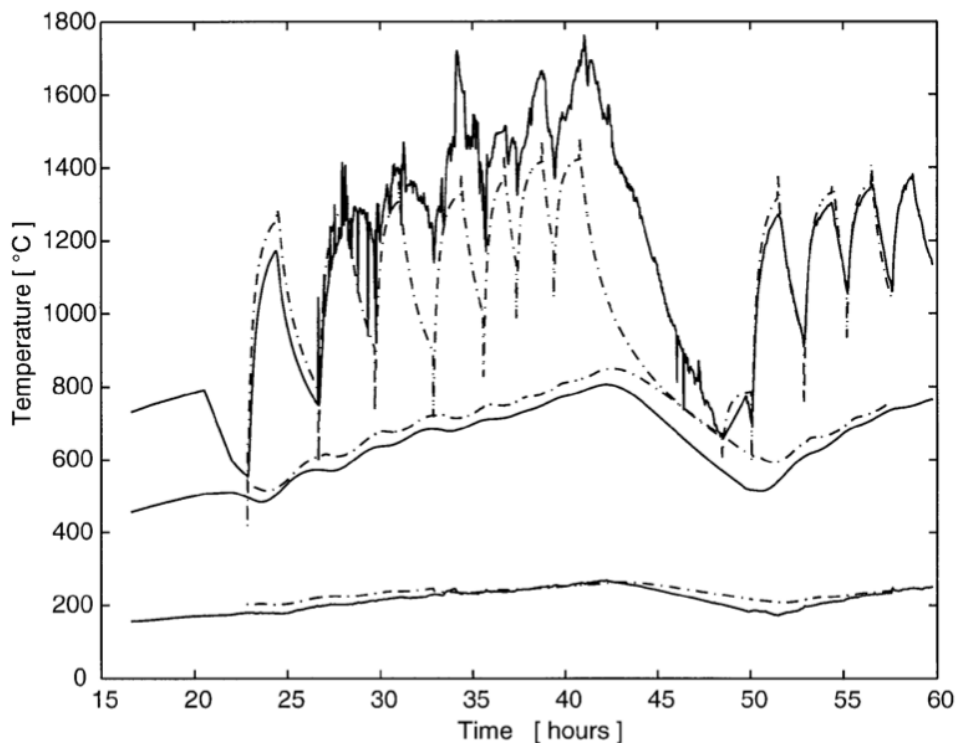
จากการเปรียบเทียบแบบจำลองของ Fredman และ Saxen ได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก แต่วิธีการคำนวณหาผลเฉลยของ Fredman และ Saxen นั้นต้องแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) ที่ยุ่งยากซับซ้อน การประยุกต์ใช้งานในทางอุตสาหกรรมอาจจะไม่สะดวกรวดเร็วนัก

แต่เนื่องจากความแม่นยำเมื่อเทียบกับผลการทดลองของ Fredman และ Saxen ทำให้ในปีต่อมา Fredman, Saxen และ J. Torrkulla (1998) ต่อเติมแบบจำลองทางความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กเพิ่มเติมด้วยการพิจารณาการนำความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นแบบ 2 มิติ คือยังคงความสมมาตรตามแนวแกนกลางของเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่ให้การแจกแจงอุณหภูมิที่ระดับความสูงต่างๆตามแนวแกนกลางของเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าไม่คงที่



รูปที่ 2-8 การกำหนดพิกัดในการพิจารณาแบบจำลองของ Fredman, Torrkulla และ Saxen (1998)

การแก้ระบบสมการย่อยเชิงอนุพันธ์แบบ 2 มิติย่อมมีความยุ่งยากมากขึ้นแต่ผลการทดลองที่ได้นั้นก็สามารถปรากฏผลที่ใกล้เคียงกับการทดลองได้เป็นอย่างดี



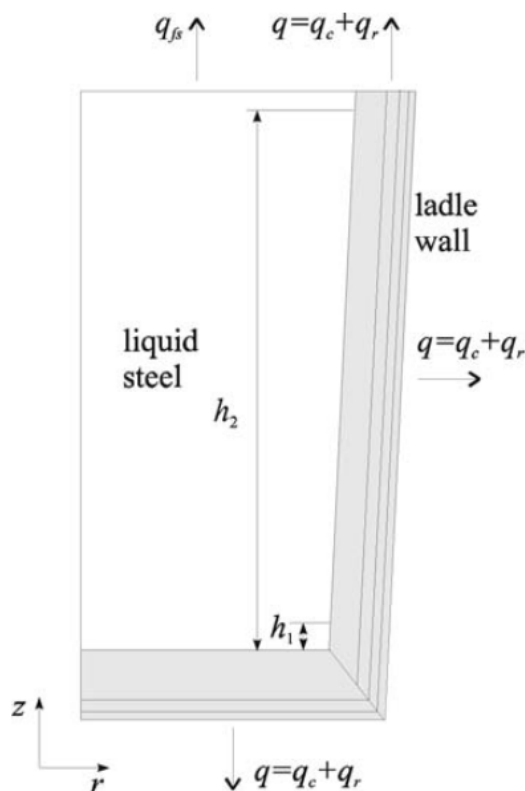
รูปที่ 2-9 ตัวอย่างผลการทดลองที่ตำแหน่ง upper side wall ในการทดลองและการคำนวณตามแบบจำลอง เส้นทึบแสดงค่าจากการวัด และเส้นปะจากการคำนวณ

(Fredman, Torrkulla and Saxen, 1998)

เนื่องจากความซับซ้อนของการแก้สมการสูงมากยิ่งขึ้นทั้ง 3 ท่านจึงต้องประดิษฐ์คอมพิวเตอร์โปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณ และใช้งานในภาคสนามที่สามารถแปรค่าต่างๆตามรูปทรงของเข้รับน้ำเหล็กและสมบัติต่างๆในผนังเข้รับน้ำเหล็กได้อีกด้วย

ในบทสรุปของการทดลองของ Fredman, Torrkulla และ Saxen นั้นกล่าวถึงความแม่นยำของแบบจำลองที่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งาน และกล่าวถึงแนวทางในอนาคตที่ทั้งสามจะสร้างแบบจำลองสำหรับทำนายสถานะทางความร้อนในรางรับน้ำเหล็กต่อไปด้วย

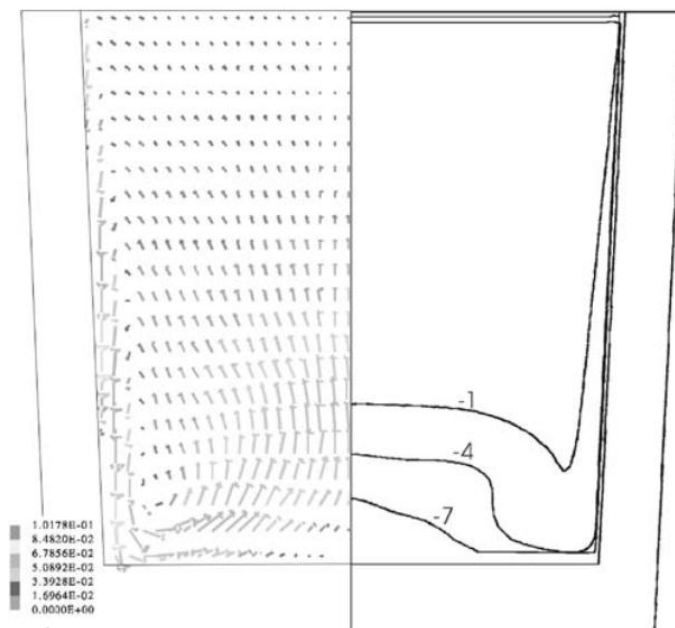
นอกจากงานของ Fredman และคณะแล้ว ยังปรากฏงานของ J. L. Xia และ T. Ahokainen (2001) ที่สร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในเข้รับน้ำเหล็ก โดยในการออกแบบแบบจำลองนี้พิจารณาการถ่ายเทความร้อนแบบ 2 มิติ ให้น้ำเหล็กมีการสูญเสียพลังงานผ่านทางพาและการแผ่รังสีที่ผิวหน้าของแอสลคที่ปกคลุมน้ำเหล็กในอัตราที่คงที่ และกำหนดค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิผิวของผนังภายในเข้รับน้ำเหล็กที่แตกต่างกัน



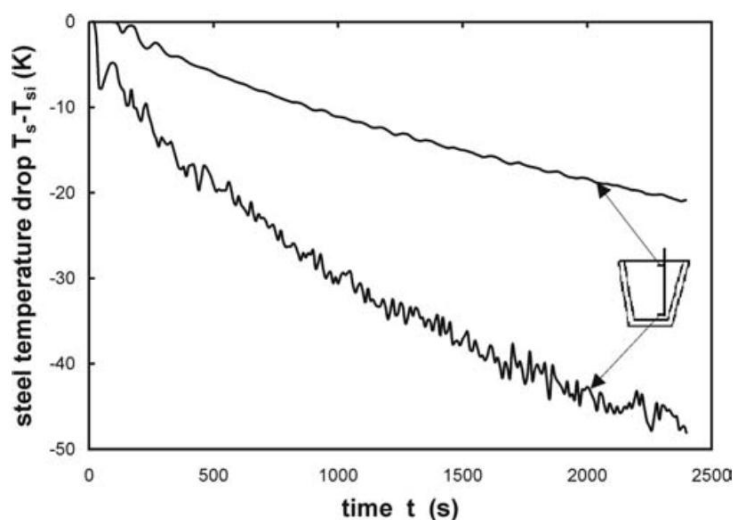
รูปที่ 2-10 แผนภาพแสดงการถ่ายเทความร้อนในแบบจำลองของ Xia และ Ahokainen (2001)

แบบจำลองของ Xia และ Ahokainen นั้นได้ออกแบบมาให้คำนึงถึงการหมุนวนของน้ำเหล็กภายใน โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนในน้ำเหล็กที่คำนวณจาก Nusselt Number ที่แตกต่างกัน ให้บริเวณผิวหน้าส่วนที่ติดกับชั้นแสลคมีค่า Nusselt Number เป็น $Nu = 0.15Ra^{1/3}$ โดยที่ Rayleigh Number เป็น 2.1×10^7 ให้บริเวณส่วนกลางของเบ้ารับน้ำเหล็กเป็น $Nu = 0.1Ra^{1/3}$ โดยที่ Rayleigh Number เป็น 2.1×10^8 และส่วนก้นของเบ้ารับน้ำเหล็กเป็น $Nu = 0.27Ra^{1/4}$ โดยที่ Rayleigh Number เป็น 2.0×10^8 นอกจากนี้ยังกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นที่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิที่แตกต่างกันในแต่ละกรณี โดยกรณีแรกมีอุณหภูมิผนังเริ่มต้นที่ 1423 K และอีกกรณีมีอุณหภูมิเริ่มต้น 1073 K

แบบจำลองนี้ต้องการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยใน 2 มิติที่ขึ้นกับเวลา ดังนั้นจึงต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการแก้ระบบสมการด้วยระเบียบวิธีเชิงเลข และแสดงผลเป็นรูปภาพแสดงเวกเตอร์และเส้นคงอุณหภูมิออกมา ในการคำนวณนั้นปรากฏการหมุนวนเริ่มเกิดขึ้นในวินาทีที่ 40 ของการจำลองและเกิดอย่างต่อเนื่อง น้ำเหล็กส่วนที่เย็นก็จะจมลงสู่ก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก ส่วนน้ำเหล็กที่ร้อนก็จะลอยตัวสู่ผิวหน้าเบ้ารับน้ำเหล็กต่อไป ในการทดลองจึงพบว่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กบริเวณส่วนก้นของเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าส่วนอื่น



รูปที่ 2-11 ลักษณะเวกเตอร์ความเร็วของน้ำเหล็กในเบ้า และเส้นคงอุณหภูมิที่ลดลงในเบ้ารับน้ำเหล็กที่วินาทีที่ 40 ของการจำลอง (Xia and Ahokainen, 2001)

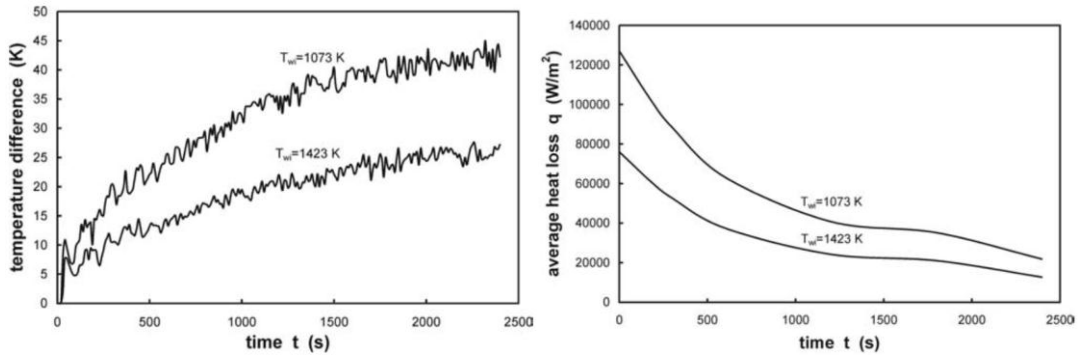


รูปที่ 2-12 อุณหภูมิของน้ำเหล็กจากการทดลองบริเวณผิวหน้าของเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีการลดลงของอุณหภูมిన้อยกว่าบริเวณก้นเบ้ารับน้ำเหล็กเนื่องจากการหมุนวนของน้ำเหล็กภายใน

(Xia and Ahokainen, 2001)

นอกจากนั้นแล้ว ในการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้อุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าที่แตกต่างกันก็ทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในผนังที่แตกต่างกัน เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผนังมีอุณหภูมิเริ่มต้นสูงกว่าจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในที่ต่ำกว่า ดังนั้นเมื่อนำมาแสดงการสูญเสีย

ความร้อนผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงกว่ามีการถ่ายเทความร้อนน้อยกว่าผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้เห็นได้ชัดเจนว่า การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิภายในที่สูงขึ้นสามารถลดปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็กได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 2-13 (ซ้าย) ผนังที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นสูงจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างกระบวนการต่ำ (ขวา) ผนังที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นสูงกว่าจะมีการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็กต่ำกว่า

(Xia and Ahokainen, 2001)

จากการศึกษาของ Xia และ Ahokainen พบว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยภายในน้ำเหล็กตามการเปลี่ยนแปลงเวลานั้น จะอยู่ในรูปของสมการกำลังสี่ ทั้งคู่จึงได้สร้างสมการทำนายจากผลการทดลองเพื่อความสะดวกในการใช้งานของภาคอุตสาหกรรมไว้ ที่อุณหภูมิผนังเบ้าเริ่มต้นเป็น 1073 K ในช่วงเวลาไม่เกิน 2400 วินาที มีฟังก์ชันอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆดังนี้

$$T_{s,ave}(t) = T_{si} - 4.36 \times 10^{-2}t + 2.607 \times 10^{-5}t^2 - 1.03 \times 10^{-8}t^3 + 1.598 \times 10^{-11}t^4 \quad (2.20)$$

หากอุณหภูมิเริ่มต้นของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเป็น 1423 K จะมีฟังก์ชันการแจกแจงเป็น

$$T_{s,ave}(t) = T_{si} - 2.64 \times 10^{-2}t + 1.586 \times 10^{-5}t^2 - 6.34 \times 10^{-9}t^3 + 9.93 \times 10^{-13}t^4 \quad (2.21)$$

นอกจากฟังก์ชันอุณหภูมิแล้วทั้งคู่ยังได้สร้างฟังก์ชันปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆอีกด้วย

แบบจำลองของ Xia และ Ahokainen นั้นให้ภาพที่ชัดเจนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในน้ำเหล็ก และการหมุนวนภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก อีกทั้งยังสร้างสมการที่ง่ายต่อการทำนายอุณหภูมิเฉลี่ยในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาใดๆ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ถูกตีพิมพ์ไว้ในบทความอื่นๆแล้ว ยังมีความคลาดเคลื่อนอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการใช้สมการการทำนายของ Xia และ Ahokainen ควรที่จะคำนึงถึงเงื่อนไขต่างๆให้รอบคอบ

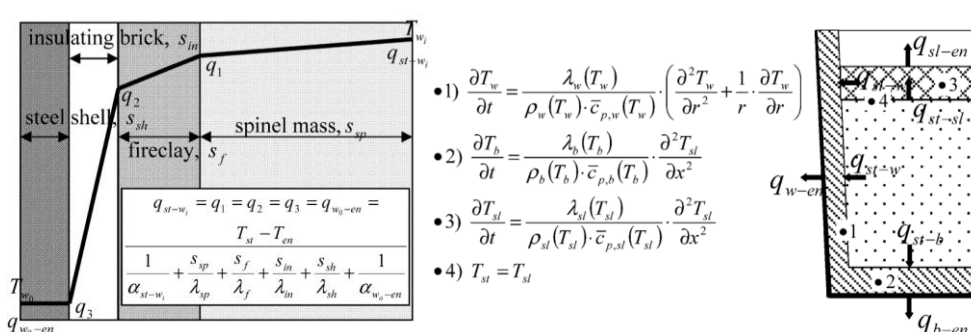
นอกจากรูปสมการที่ใช้ในการทำนายของ Xia และ Ahokainen แล้ว Tom P. Fredman (2000) เคยนำเสนอรูปสมการของ Yngve Sundberg ในบทความทบทวนวรรณกรรมเรื่อง “Heat

Transfer in Steelmaking ladle refractories and steel temperature” ว่าการแจกแจงอุณหภูมิในเหล็กต่อเวลาใดๆนั้นจะอยู่ในรูป

$$T_{steel}(t) = T_{steel}(0) - A\sqrt{t} - Bt \tag{2.22}$$

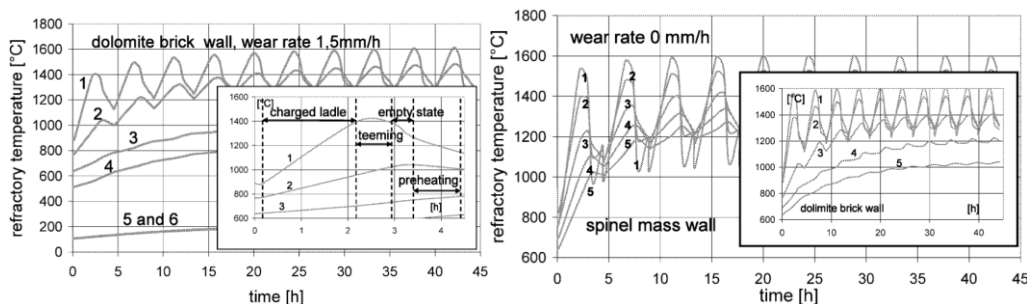
เมื่อ A และ B เป็นค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากข้อมูลทางสถิติของทางโรงงาน สมการของ Yngve Sundberg นี้ให้ความสะดวกแก่ภาคอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก แต่ที่มาของสมการนี้ Fredman ไม่ได้กล่าวไว้ชัดเจน

นอกจากรูปแบบการถ่ายเทความร้อนยังมีการปรากฏของการศึกษาความแตกต่างในกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กระหว่างวัสดุทนไฟชนิดต่างๆดังการศึกษาของ O. Volkova และ D. Jangke (2003) ได้สร้างแบบจำลองที่สมมติให้การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีปริมาณคงที่ และทดลองทำการคำนวณในกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กใช้วัสดุทนไฟเป็น โดโรไมท์ และแม็กนีเซียมออกไซด์



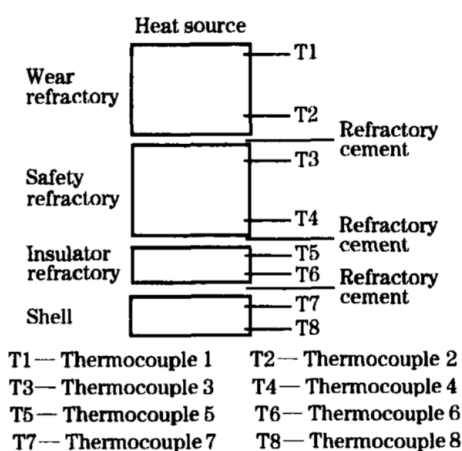
รูปที่ 2-14 ลักษณะการถ่ายเทพลังงานในเบ้ารับน้ำเหล็กที่พิจารณา และอุณหภูมิที่แจกแจงในชั้นต่างๆ ตามแบบจำลองของ Volkova และ Janke (2003)

ผลที่ได้คือแม็กนีเซียมออกไซด์จะมีความร้อนทำให้การแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กสูงกว่าอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่บุด้วยโดโรไมท์ นอกจากการหาแบบจำลองแล้ว Volkova และ Janke ยังได้ให้สมมติฐานว่าการพองที่ก้นของเบ้ารับน้ำเหล็กอาจจะน่าจะมีสัมพันธ์กับเปลวไฟ

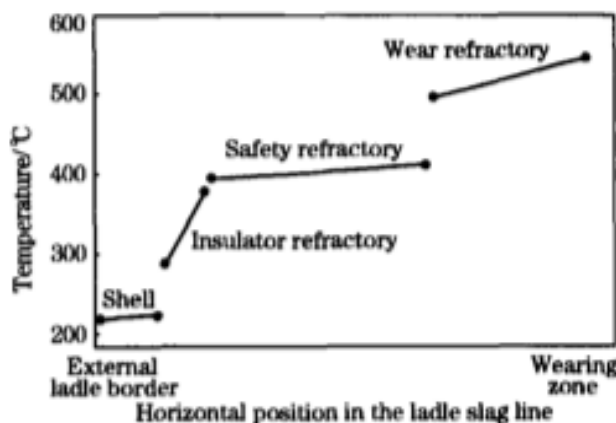


รูปที่ 2-15 ผลการคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิภายในวัสดุทนไฟจากโดโรไมท์ (ซ้าย) จะมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ในแม็กนีเซียมออกไซด์ (ขวา) (Volkova and Janke, 2003)

ที่ผ่านมาชิ้นส่วนใหญ่แล้วจะเป็นการจำลองการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ประกอบกับการทดลองเพียงเล็กน้อย ทำให้ข้อมูลการสูญเสียพลังงานบางส่วนขาดหายไป Andre Zimmer และคณะ (2008) จึงได้ทำการทดลองฝังอุปกรณ์วัดความร้อนอย่างละเอียดภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ถึงแม้ว่าการทดลองของ Zimmer และคณะ ไม่ได้สร้างแบบจำลองใดๆ แต่การนำเสนอผลการทดลองทำให้เห็นภาพของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วงระหว่างรอยต่อของแต่ละชั้น นั้นทำให้ทราบว่าวัสดุประสานวัสดุทนไฟในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นมีความต้านทานทางความร้อนสูง



รูปที่ 2-16 ตำแหน่งต่างๆที่ Zimmer และคณะ (2008) ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 2-17 การแจกแจงอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กตามการทดลองของ Zimmer และคณะ (2008)

นอกจากนั้นแล้ว Zimmer และคณะยังได้วิเคราะห์การสูญเสียความร้อนระหว่างกระบวนการขนถ่ายต่างๆ ทำให้ทราบได้ชัดเจนว่าความร้อนในน้ำเหล็กจะสูญเสียออกไปมากใน

ระหว่างการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก และการทำสุญญากาศเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก และหากมี Ladle Furnace จะเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่จะสามารถเพิ่มอุณหภูมิในน้ำเหล็กได้

แบบจำลองทางความร้อนเพื่อการทำนายอุณหภูมิภายในน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กในการศึกษาที่ผ่านมาต่างมีแนวคิดและความยุ่งยากซับซ้อนที่แตกต่างกัน ดังนั้นการใช้งานจึงควรเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมกับเป้าหมายที่ต้องการต่อไป

2.4 การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก

การถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเทน้ำเหล็กนี้เป่าประสงค์หลักคือการทำนายอุณหภูมิในน้ำเหล็กที่ถูกเทออกมา เนื่องจากน้ำเหล็กที่ถูกเทออกมานั้นจะเข้าสู่กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งต้องการการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับอุปกรณ์และรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะได้จากการหล่อแบบต่อเนื่อง

โดยทั่วไปในการพิจารณาอุณหภูมิที่จะได้นั้นได้จากการหาอัตราการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กขณะเท โดยการตรวจวัด และเก็บเป็นข้อมูลทางสถิติ เมื่อนำมาวิเคราะห์ใช้เพียงตัวแปรเวลาเป็นหลักในการคิดคำนวณอุณหภูมิที่ลดลง แต่วิธีการนี้ไม่สามารถแสดงกายภาพของระบบได้ จึงมีการศึกษาค้นคว้าเพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จะเกิดขึ้นในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการเทนี้

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเทน้ำเหล็กนั้น มีการวิเคราะห์ไว้โดย P. Egerton, J. A. Howarth, G. Poos และ S. Taylor-Reed (1979) โดยการสร้างแบบจำลองนั้นได้รูปแบบมาจากแบบจำลองของน้ำที่ไหลออกจากหลอดอะคิลิกในการศึกษาของ J. W. Hlinka (1976) ก่อนหน้านี้ ร่วมกับแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวสัมผัสของ J. Szlekely และ R. G. Lee (1968)

เพื่อความสะดวกในการคำนวณ Egerton และคณะ ได้สมมติให้น้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กไม่มีการหมุนวน และอุณหภูมิน้ำเหล็กภายในสม่ำเสมอตลอดทั่วถึงกันทั้งหมด

Egerton และคณะเริ่มด้วยการนำเสนอการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงของน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กขณะเทออกทางกันเบ้ารับน้ำเหล็กให้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ โดยสร้างขึ้นมาจากสมการสมดุลมวล และสมการของแบร์นูลี ได้รูปดังนี้

$$\frac{dh}{dt} = \frac{-2H}{t_f} \left(1 - \frac{t}{t_f}\right), \quad h(0) = H \quad (2.23)$$

เมื่อ h เป็นระดับน้ำเหล็กเมื่อวัดจากกันเบ้ารับน้ำเหล็ก เมื่อเริ่มต้นจะมีความสูงเป็น H และใช้เวลาในการเทน้ำเหล็กให้หมดจากเบ้าเป็นเวลา t_f ซึ่งเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเทน้ำเหล็ก Egerton และคณะจัดให้เป็นฟังก์ชันของรูปทรงของเบ้ารับน้ำเหล็กและระดับความสูงน้ำเหล็กเริ่มต้น

$$t_f = \frac{A_L}{A_N C_N} \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (2.24)$$

แล้วจึงกำหนดสมการเชิงอนุพันธ์ของน้ำเหล็กในเป่ารับน้ำเหล็กที่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างการเทน้ำเหล็กให้มีเพียงการนำความร้อนและการพาความร้อนเท่านั้น

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{2}{t_f} \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) \frac{\partial T}{\partial z} = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.25)$$

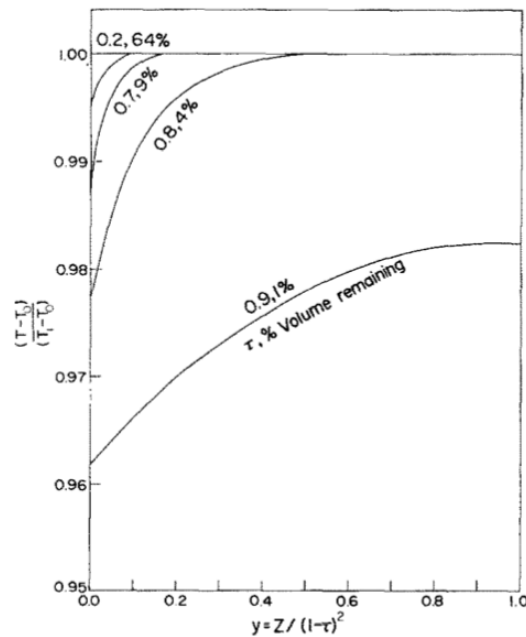
เนื่องจากการที่สมการต้องเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายนอกและต้องแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย เพื่อที่จะหาคำตอบในสมการรูปแบบปิด(Closed Form) จึงต้องทำให้ตัวแปรอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ และได้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือสมมติให้เมื่อเริ่มต้นน้ำเหล็กไม่มีการแบ่งแยกชั้นของอุณหภูมิทุกส่วนภายในมีอุณหภูมิเสมอกัน และไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นแสลค แสลคประพุดิตัวดังเช่นฉนวนความร้อน ทำให้สามารถลดตัวแปรต่างๆลงได้เป็นจำนวนมากจึงง่ายแก่การสร้างสมการรูปแบบปิด ส่วนในส่วนที่ 2 นั้น ได้สมมติให้เริ่มต้นน้ำเหล็กมีการแยกชั้นของอุณหภูมิ และมีการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นแสลค

ผลการคำนวณจากแบบจำลองสามารถเห็นได้จากรูปที่ 2 - 17 เมื่อแกนตั้งเป็นอุณหภูมิไร้มิติ ที่คำนวณจาก $\frac{(T-T_0)}{(T_1-T_0)}$ โดยที่ T คืออุณหภูมิขณะใดๆ T_0 คืออุณหภูมิตั้งแควดล้อม และ T_1 คือ

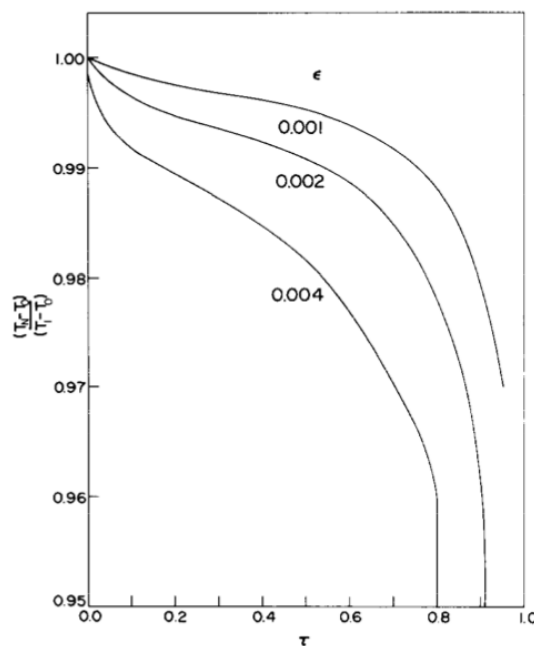
อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเหล็กก่อนเท ในความหมายของตัวแปรนี้คือการแสดงปริมาณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กจากสถานะเริ่มต้นเทน้ำเหล็กเทียบกับอุณหภูมิตั้งแควดล้อม ส่วนแกนนอนเป็นความสูงสัมพัทธ์ของน้ำเหล็กที่ระดับต่างๆของเวลานั้นๆ ในรูปที่ 2 - 17 ยังได้แสดงลักษณะการแจกแจงอุณหภูมิตามเวลาไร้หน่วยที่เวลาต่างๆ(τ) ซึ่งเวลาไร้หน่วยเป็นการเทียบกันระหว่างเวลาที่ขณะใดๆต่อเวลาที่ใช้ในการเทน้ำเหล็กทั้งหมด นอกจากนั้นแล้วแผนภูมินี้ยังแสดงปริมาณน้ำเหล็กที่เหลืออยู่ในเป่ารับน้ำเหล็กเทียบกับเวลาไร้มิติว่าเป็นร้อยละเท่าใดของปริมาณความจุในขณะเริ่มต้นการเทน้ำเหล็ก

ดังจากนิยามต่างๆที่กำหนดไว้ทำให้พบว่าที่เวลาเริ่มต้นอุณหภูมิไร้หน่วยย่อมมีค่าเท่ากับ 1 ตลอดทั้งความสูงของน้ำเหล็กเนื่องจากไม่มีการแบ่งชั้นทางอุณหภูมิและลดลงมาเรื่อยๆตามเวลา ในขณะที่ปริมาตรเหลือเพียงร้อยละ 1 หรือที่เวลาไร้หน่วยเป็น 0.9 อุณหภูมิน้ำเหล็กก็มีความแตกต่างกันตั้งแต่ช่วง 0.96 - 0.98 ตามแต่ละระดับความสูงของน้ำเหล็ก

ในแบบจำลองเดียวกันพบว่าที่ความเร็วไร้มิติของน้ำเหล็กในขณะที่เทหากความเร็วไร้มิตินี้สูงขึ้นอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ได้ก็จะลดต่ำลงอย่างรวดเร็วด้วยดังรูปที่ 2 - 18



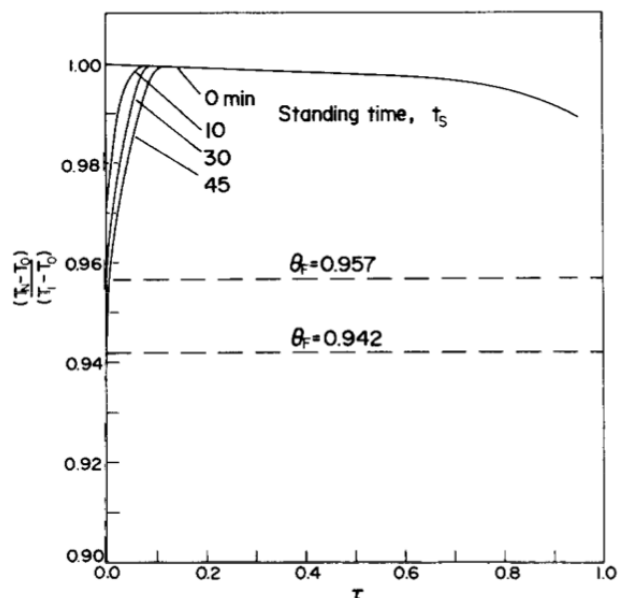
รูปที่ 2-18 การแจกแจงอุณหภูมิไรมิตที่สัดส่วนระดับความสูงต่างๆของน้ำเหลือต่างตามเวลาไรมิตต่างๆ เมื่อสมมติให้ไม่มีการแยกชั้นอุณหภูมิ (Egerton et. Al., 1979)



รูปที่ 2-19 ที่ความเร็วไรมิตในการเทน้ำเหลือสูงขึ้นน้ำเหลือจะหมดจากเบ้ารับน้ำเหลือเร็วขึ้นแต่ อุณหภูมิน้ำเหลือที่เทก็จะลดต่ำลงอย่างรวดเร็วด้วย (Egerton et. Al., 1979)

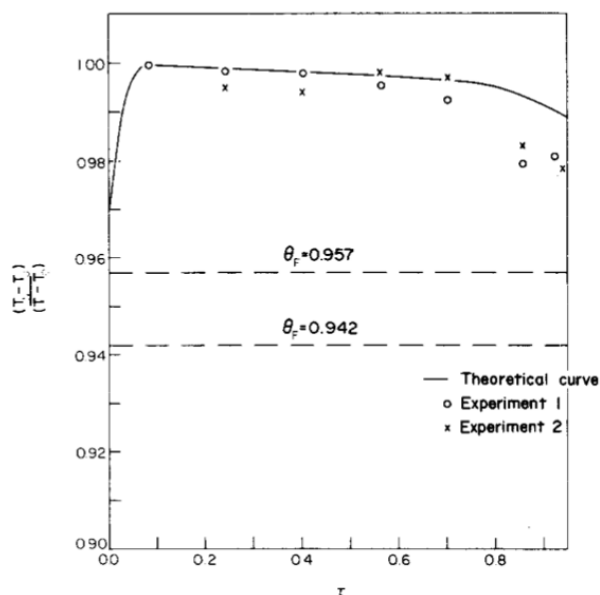
หากแต่ในส่วนที่ 2 ของการคำนวณได้กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้มีการแบ่งชั้นทางอุณหภูมิของน้ำเหลือภายในแต่ยังคงให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นสแลค โดยการแบ่งชั้นทางอุณหภูมิรูปแบบต่างๆที่ใช้พิจารณา พิจารณาจากลักษณะที่หากปล่อยเบ้ารับน้ำเหลือและน้ำเหลือภายในไว้

ให้มีการถ่ายเทความร้อนหมุนวนตามหลักการพาความร้อนแบบธรรมชาติจะได้รับการแจกแจงอุณหภูมิไร้มิติเทียบกับเวลาไร้มิติต่างรูปที่ 2 - 19



รูปที่ 2-20 การแจกแจงอุณหภูมิไร้มิติต่อเวลาไร้มิตีเมื่อกำหนดให้มีการแบ่งชั้นทางอุณหภูมิจากการตั้งทิ้งไว้ด้วยระยะเวลาตั้งแต่ 0 - 45 นาที (Egerton et. Al., 1979)

นอกจากนั้นแล้ว Egerton และคณะยังนำเสนอผลการคำนวณเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองโดยให้ความเร็วไร้มิตีในการเทเป็น 0.004 และการแยกชั้นทางอุณหภูมิจากการปล่อยเบ้ารับน้ำเหล็กทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที แจกแจงดังรูปที่ 2 - 20



รูปที่ 2-21 การเปรียบเทียบผลการทดลองและผลการคำนวณของ Egerton และคณะ (1979)

ถึงแม้ว่าแบบจำลองของ Egerton และคณะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองในตอนต้นของการเทน้ำเหล็กแต่เมื่อใกล้สิ้นสุดการเท แบบจำลองของ Egerton และคณะก็มีความคลาดเคลื่อนสูง อาจจะมีผลเนื่องจากการสมมติระบบให้ปราศจากการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นแอสลค

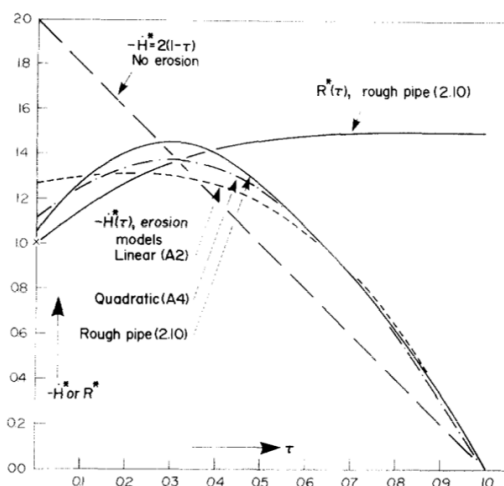
ในปีต่อมา Egerton และคณะ (1980) ได้ปรับปรุงแบบจำลองของตนเองให้คำนึงถึงการสีกกร่อนของรูเทน้ำเหล็ก เนื่องจากการไหลของน้ำเหล็กจะทำให้รูเทสีกกร่อนอันจะส่งผลต่อความเร็วในการไหลของน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก ในการออกแบบแบบจำลองนี้ Egerton ได้ใช้สมการแบร์นูลีในการประดิษฐ์ฟังก์ชันขนาดของรูเทต่อเวลาเป็น

$$(p_B - p_N)/\rho = [fL/2D(t)]v_N^2 \quad (2.26)$$

เมื่อ p_B คือแรงดันของน้ำเหล็กที่กั้นเบ้ารับน้ำเหล็ก ส่วน p_N เป็นแรงดันน้ำเหล็กหลังออกจากรูเทน้ำเหล็ก $D(t)$ เป็นฟังก์ชันขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรูเทน้ำเหล็ก L เป็นความยาวของรูเทน้ำเหล็ก v_N เป็นความเร็วของน้ำเหล็กที่ไหลออกจากรูเทน้ำเหล็ก ส่วน f เป็นตัวประกอบการเสียดสีมีค่าดังนี้

$$f^{-1/2} = 2 \log_{10}(D/2e) + 1.74 \quad (2.27)$$

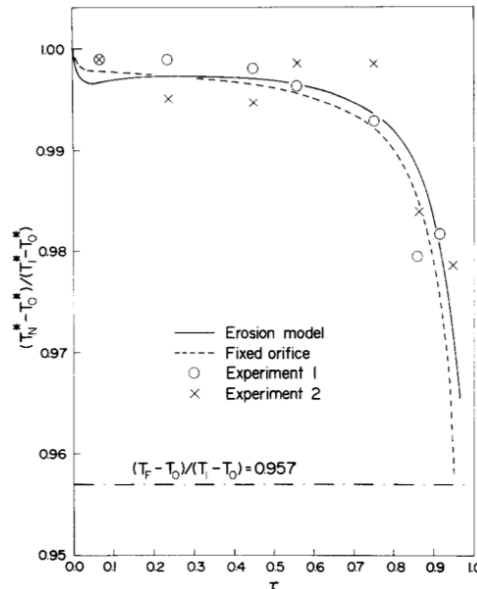
Egerton ได้แก้สมการหาความสัมพันธ์ของความเร็วไร้มิติกับขนาดรัศมีไร้มิติของรูเทน้ำเหล็กตามเวลาไร้มิติต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2-21



รูปที่ 2-22 ความเร็วไร้มิติ (-H*) และรัศมีไร้มิติ (R*) ที่เวลาไร้มิติ (τ) ใดๆ (Egerton et al., 1980)

และแก้สมการเชิงอนุพันธ์เช่นเดิมทำให้ได้ผลการจำลองดังรูปที่ 2-22 จะพบว่าในระยะเริ่มต้นของการเทอุณหภูมิน้ำเหล็กทั้งในแบบที่พิจารณาการสีกกร่อนของรูเทน้ำเหล็กและไม่พิจารณาการสีกกร่อนต่างก็ให้อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเททั้งหมด อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ได้นั้นแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย และทั้งสองแบบจำลองก็ให้ค่าที่ใกล้เคียงการทดลอง ดังนั้นผลของการสีกกร่อนหากพิจารณาเพียงรอบเดียวความแตกต่างที่จะเกิดขึ้นไม่ได้

ปรากฏค่ามากนัก ดังนั้นในการพิจารณาเบ้ารับน้ำเหล็กในระยะสั้น การคำนึงถึงการสึกกร่อนของรู
 เทน้ำเหล็กสามารถละเลยได้



รูปที่ 2-23 การแจกแจงอุณหภูมิไว้มิติตามเวลาไว้มิติ เปรียบเทียบระหว่างการคำนวณแบบให้มีการ
 สึกกร่อนที่รูเทน้ำเหล็กและไม่สึกกร่อนกับผลการทดลอง (Egerton et al., 1980)

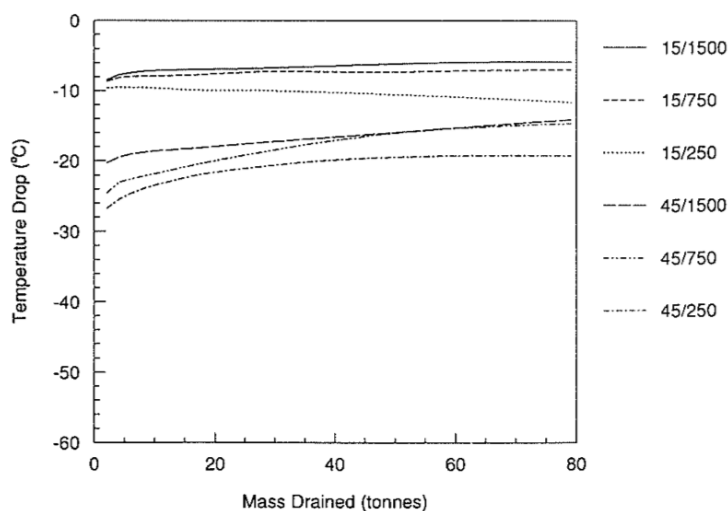
นอกจากงานของ Egerton แล้ว ยังมีการศึกษาของ P. R. Austin, J. M. Camplin, J. Herbertson และ I. J. Taggart (1991) แบบจำลองของ Austin และคณะนี้ใช้การแก้สมการอนุพันธ์
 มวล อนุพันธ์โมเมนต์ และอนุพันธ์พลังงานควบคู่กันไป โดยให้ในสมการอนุพันธ์โมเมนต์มีผล
 จากแรงลอยตัวของของไหลเข้ามาเพื่อสร้างลักษณะการหมุนวนภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ผลที่ได้มี
 ความคล้ายคลึงกับงานของ Xia และ Ahokainen ที่อุณหภูมิของน้ำเหล็กส่วนเกินเบ้ารับน้ำเหล็กจะมี
 อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กบริเวณผิว เมื่อสามารถจำลองการแยกชั้นทางอุณหภูมิของน้ำ
 เหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กได้แล้ว การศึกษานี้จึงได้ศึกษาต่อไปยังการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะที่
 เทน้ำเหล็กออกจากเบ้า โดยได้จำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทออกมาได้เป็นในกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กถูก
 ตั้งทิ้งไว้ 15 และ 45 นาทีก่อนการเท และเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเทด้วยอัตรา 250 750 และ
 1500 ตันต่อชั่วโมง ดังรูปที่ 2 – 23

พบว่าหากเบ้ารับน้ำเหล็กใช้เวลาในการตั้งทิ้งไว้ต่ำอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทออกมาจะมีการ
 ลดลงต่ำตามไปด้วย และน้ำเหล็กจะมีการลดลงของอุณหภูมิมากขึ้นเมื่อเทน้ำเหล็กออกมาด้วย
 ความเร็วต่ำ

Austin และคณะได้นำเสนอรูปสมการทั่วไปของผลการจำลองที่ได้ให้สอดคล้องกับผลการ
 คำนวณตามแบบจำลองในรูปที่ 2 – 23 เพื่อความสะดวกในการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมดังนี้

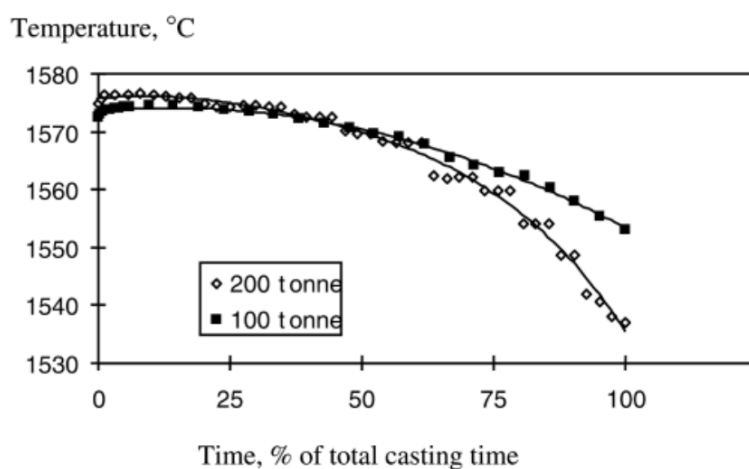
$$T = a + bt + c \cdot e^{-dt} \quad (2.28)$$

เมื่อ a , b , c และ d เป็นค่าคงที่ของสมการ รูปสมการที่ Austin และคณะนำเสนอนี้เป็นรูปที่ให้ความสะดวกในการทำนายแต่ก็เป็นเพียงสมการที่ได้จากการเทียบกับผลของการคำนวณไม่ได้ผ่านการทดลองจริง นอกจากนั้นแล้วแบบจำลองของ Austin ปรากฏผลจากการสมมติให้ผิวหน้าของเบ้ารับน้ำเหล็กมีอัตราการเย็นตัวที่คงที่ ทำให้รูปสมการของ Austin และคณะต้องใช้โดยคำนึงถึงการใช้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสม



รูปที่ 2-24 การลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทออกมาในกรณีต่างๆ (Austin et. Al., 1991)

ทั้งผลงานของ Egerton และ Austin ต่างก็คำนึงถึงเพียง 2 มิติเท่านั้น ต่อมา C. E. Grip, K. O. Jonsson, S. Erikson, L. Jonsson, P. Jonsson และ Y. Pan (2000) ได้ทำการคำนวณการไหลของน้ำเหล็กในรูปแบบ 3 มิติด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) ผลที่ได้มีความแสดงดังรูปที่ 2 – 24



รูปที่ 2-25 ผลการคำนวณอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กตามแบบจำลอง 3 มิติ เปรียบเทียบกับการทดลอง (Grip et. Al., 2000)

ผลงานของ Grip และคณะ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลอง แต่รูปแบบสมการที่ใช้ในการคำนวณก็ไม่ได้อยู่ในรูปที่เป็นสมการรูปปิดจึงไม่สะดวกในการประยุกต์ใช้

นอกจากนั้นแล้วในการวิพากษ์ของ Fredman (2000) ได้กล่าวถึงการสร้างแบบจำลองของ Hoppmann W. และคณะ (1989) ที่ต้องการทำนายอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเหล็กขณะเทเพื่อนำไปใช้ในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้เสนอปริมาณการถ่ายเทความร้อนสุทธิในขณะเทเป็น

$$q(t) = \sum_i a_i \exp(b_i t), \quad (2.29)$$

ซึ่งนั่นหมายความว่า การเปลี่ยนแปลงความร้อนต่อเวลาจะได้อธิบายโดย

$$\frac{dT_{steel}}{dt} = \sum_i c_i \exp(b_i t) \quad (2.30)$$

สุดท้ายแล้ว Hoppmann และคณะจะได้รูปฟังก์ชันของน้ำเหล็กต่อเวลาเพื่อนำไปใช้ในโปรแกรมที่ต้องการคือ

$$T_{steel}(t) = T_{steel}(0) + \sum_i \frac{C_i}{b_i} [\exp(b_i t) - 1] \quad (2.31)$$

การนำไปใช้ของ Hoppmann และคณะนี้ Fredman ได้กล่าวถึงความคลาดเคลื่อนที่จะได้จากสมการอยู่ในช่วง $\pm 5^\circ\text{C}$ ทั้งนี้ทั้งนั้น รูปแบบที่ Hoppmann สร้างขึ้นไม่ถูกกล่าวถึงที่มาในการวิพากษ์ของ Fredman จึงไม่ทราบถึงขอบเขตที่มาของสมการอย่างชัดเจน

2.5 ระบบติดตามสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็ก

ในการติดตามสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กมีปรากฏระบบตรวจวัดและติดตามในงานการศึกษาของ Fachberger และ Erlacher (2010) ที่ได้ใช้ Surface acoustic wave (SAW) ติดไว้บริเวณผิวเปลือกเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อใช้ในการรับค่าอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจาก Thermocouple ที่ฝังอยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กทำให้สามารถติดตามสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กจากระยะไกลได้ โดยเมื่อต้องการเรียกที่ตรวจวัดได้จะมีอุปกรณ์สื่อสารไปยัง SAW ให้ส่งค่าที่ตรวจวัดกลับมาได้ ทำให้ทราบอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆได้ ซึ่งกระบวนการในลักษณะนี้ก็มีมีการประยุกต์ใช้งานจริงในงานของ Dannert แห่ง VDEh-Betriebsforschungsinstitut (BFI) ที่ทดลองการตรวจวัดอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กแล้วใช้การรับค่าจากทางไกลเช่นนี้กับ Passive RFID การทดลองของ Dannert นี้เป็นการประยุกต์ให้กับโรงงานเอกชนในประเทศเยอรมนี จึงไม่ปรากฏลักษณะรายละเอียดและปีที่ทำการศึกษา

นอกจากนั้นแล้วยังมีระบบที่ถูกพัฒนาจนเป็นระบบติดตามเบ้ารับน้ำเหล็กในเชิงพาณิชย์อีกด้วย ซึ่งได้แก่ โปรแกรมที่มีชื่อทางการค้าว่า “Ladle Tracking Application” ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท IPACT ประเทศสหรัฐอเมริกา ที่สร้างระบบติดตามตำแหน่ง และระยะเวลาในการ

ปฏิบัติงานต่างๆ ระบบนี้จะมีลักษณะเป็นการให้ข้อมูลเพื่อการจัดการเบ้ารับน้ำเหล็ก ให้สามารถทำงานได้ตรงตามจังหวะไม่ติดขัดในกระบวนการ โดยมีการประหยัดพลังงานในการผลิตเป็นประโยชน์อย่างหนึ่งของการจัดการลำดับการใช้งานเบ้ารับน้ำเหล็กที่ดี



รูปที่ 2-26 ลักษณะการฝัง Thermocouple แล้วต่อสายสัญญาณออกมาหา SAW ด้านนอกผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก (Fachebeger และ Erlacher, 2010)

อีกโปรแกรมที่มีการพัฒนาโดยบริษัท Corus Consulting Limited ได้สร้างโปรแกรมที่มีชื่อว่า “Ladle Thermal Tracking” ใช้เพื่อการคำนวณหาค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสมกับสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในขณะนั้น ซึ่งภายในมีการรวมผลจากการสึกกร่อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก และการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กตั้งแต่ในเตาหลอมจนถึงแม่พิมพ์สำหรับการหล่อแบบต่อเนื่องอีกด้วย โดยในรายละเอียดการโฆษณาได้อวดอ้างถึงศักยภาพความประหยัดที่เกิดจากการลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กในการผลิตเหล็กทรงแบนได้สูงถึงปีละ 200,000 เหรียญสหรัฐต่อปี ซึ่งลักษณะของโปรแกรมนี้อาจมีลักษณะที่คล้ายกับลักษณะของระบบควบคุมที่มหาวิทยาลัยนี้ต้องการจะออกแบบ แต่โปรแกรม “Ladle Thermal Tracking” นี้เป็น โปรแกรมเชิงพาณิชย์ จึงไม่ปรากฏวิธีการออกแบบโปรแกรมแต่ประการใด

โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเทน้ำเหล็กให้เหมาะสมเพื่อการประหยัดพลังงานในลักษณะเช่นนี้ ก็ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท SMS Demag ของประเทศเยอรมนีด้วยเช่นกัน ซึ่งระบบที่ SMS Demag นี้พัฒนาขึ้นนอกจากการติดตามสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กแล้วยังจะรวมถึงการติดตามตำแหน่งของเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อการจัดการการใช้งานเบ้ารับน้ำเหล็กอีกด้วย

แต่แม้โปรแกรมระบบควบคุมต่างๆที่ได้นำเสนอนั้นจะสามารถใช้งานได้ในการปฏิบัติงานจริงแต่ทั้งสิ้นส่วนใหญ่ต่างก็มีผลเชิงพาณิชย์แล้ว ทำให้วิธีการทำงานของโปรแกรมและระบบต่างๆที่กล่าวมานั้นยากแก่การค้นคว้าในรายละเอียด



รูปที่ 2-27 ลักษณะชุดส่งสัญญาณที่ภายในติดตั้ง Passive RFID ไว้เพื่อส่งสัญญาณการตรวจวัด
อุณหภูมิผนังเข้าน้ำเหล็กกระยะไกลของ Dannert

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบระบบควบคุมเพื่อการประหยัดพลังงานในการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องใช้ความรู้เกี่ยวกับภาพรวมในการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า อันจะประกอบไปด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เบ้ารับน้ำเหล็ก การหล่อแบบต่อเนื่อง และกระบวนการทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้ รวมถึงความรู้เกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการหลอมเหล็กทั้งหมด อันจะประกอบไปด้วย การนำความร้อน (Conductive Heat Transfers) การพาความร้อน (Convective Heat Transfers) และการแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiative Heat Transfers)

3.1 อุปกรณ์ในการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

3.1.1 เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF)

เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าถูกคิดค้นหลักการในการหลอมขึ้นครั้งแรกในปี 1880 โดยนายวิลเลียม ซีเมนส์ (William Siemens) โดยใช้ไฟฟ้ากระแสตรงในการอาร์ค และถูกพัฒนาเป็นระบบกระแสสลับต่อมา โดยมีการใช้ในภาคอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรกที่ประเทศเยอรมนีในปี 1906 หลักการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้นคือการสร้างความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรด (Electrode) ทั้ง 2 ขั้ว โดยที่ขั้วแรกจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นบวก เรียกว่าแอโนด (Anode) และขั้วที่มีค่าแรงดันเป็นลบ เรียกว่าแคโทด (Cathode) เมื่อแรงดันระหว่างขั้วทั้ง 2 มีค่ามากเพียงพอจะดึงประจุลบและบวกของแก๊สที่คั่นระหว่าง 2 ขั้ว เกิดเป็นแก๊สที่มีศักย์ทางไฟฟ้า ทำให้กระแสสามารถไหลผ่านจากแอโนดไปยังแคโทดปรากฏลักษณะเป็นเส้นกระแสไฟฟ้า ที่ให้ทั้งพลังงานแสง เสียง และความร้อน พลังงานความร้อนที่ได้จากปรากฏการณ์นี้จะมีความร้อนที่สูงมากจนสามารถทำให้เศษเหล็ก หลอมละลายกลายเป็นน้ำเหล็กได้ซึ่งในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านี้จะใช้แท่งแกรไฟต์ (Graphite) เป็นแคโทดและเศษเหล็กเป็นแอโนด นอกจากการใช้กระแสไฟฟ้าในการหลอมแล้ว เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าส่วนใหญ่ยังมีการใช้ออกซิเจนช่วยในการให้พลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) และบางเตาหลอมยังมีหัวเผาช่วยในการให้ความร้อนแก่เตาหลอมอีกด้วย

กระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านี้ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นทุกปีตามสถิติของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าสากล(International Iron and Steel Institute) เนื่องจากเตาหลอมประเภทนี้เป็นกรนำเหล็กที่ใช้แล้วนำกลับมาหลอมใช้ใหม่ ซึ่งสภาวะอุตสาหกรรมเหล็กในช่วง 20 ปีที่ผ่านมาได้มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณเศษเหล็กมากขึ้นทำให้ราคาเศษเหล็กลดต่ำลงถึงแม้ว่าราคาเศษเหล็กในปัจจุบันได้ปรับตัวสูงขึ้นแล้ว แต่การหลอมด้วยเตาหลอมชนิดนี้ยังคงความนิยมอยู่เนื่องจากการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้ สามารถลดต้นทุนด้านต่างๆของการหลอม จึงทำให้กระบวนการนี้ยังคงขีดความสามารถในการแข่งขันได้

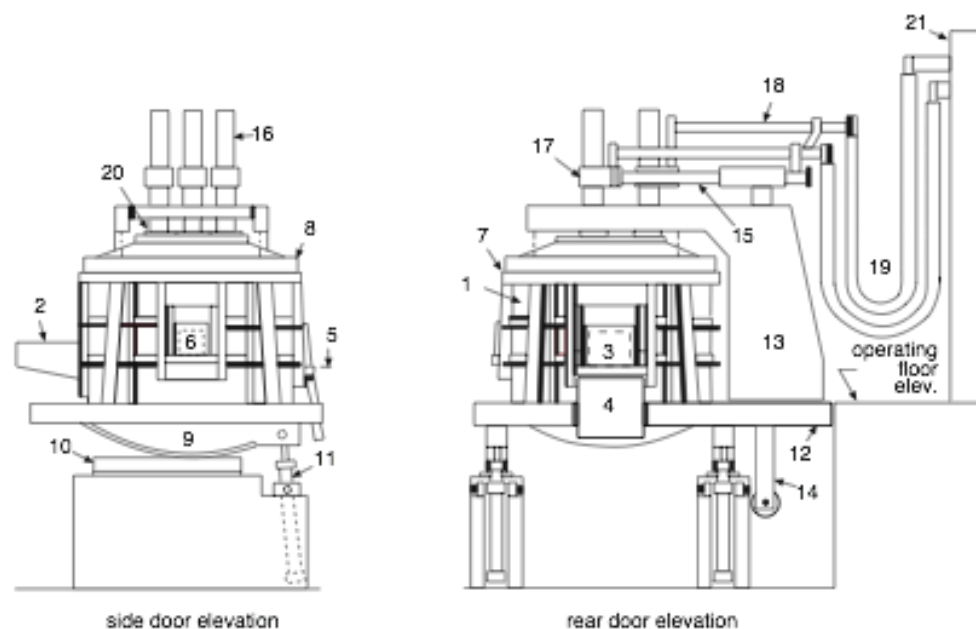


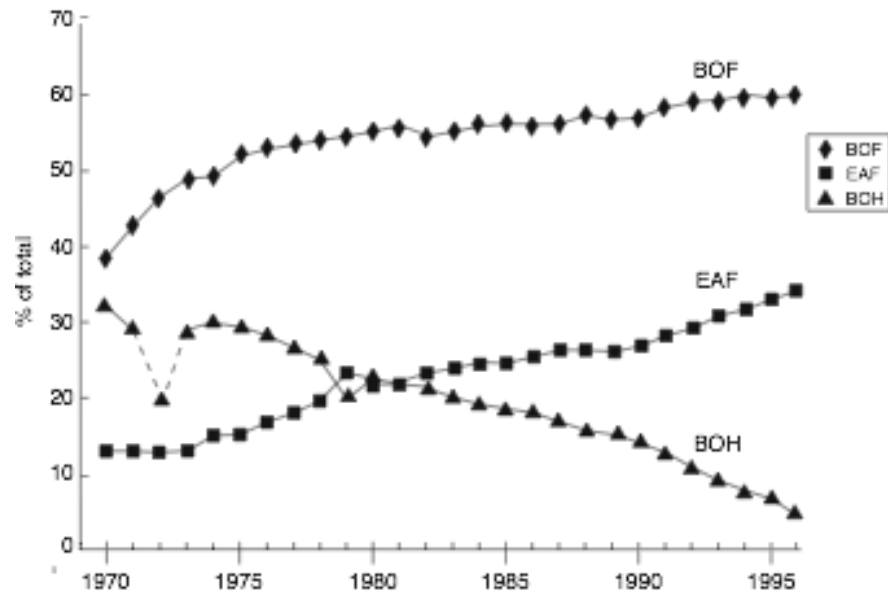
Fig. 1.5 Schematic of a typical AC electric arc furnace. Elements are identified as follows:

- | | | |
|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1. shell | 8. roof ring | 15. electrode mast arm |
| 2. pouring spout | 9. rocker | 16. electrode |
| 3. rear door | 10. rocker rail | 17. electrode holder |
| 4. slag apron | 11. tilt cylinder | 18. bus tube |
| 5. sill line | 12. main (tilting) platform | 19. secondary power cables |
| 6. side door | 13. roof removal jib structure | 20. electrode gland |
| 7. bezel ring | 14. electrode mast stem | 21. electrical equipment vault |

Copyright © 1998, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA. All rights reserved.

รูปที่ 3-1 ลักษณะและส่วนประกอบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

(Fruehan et al., 1998)



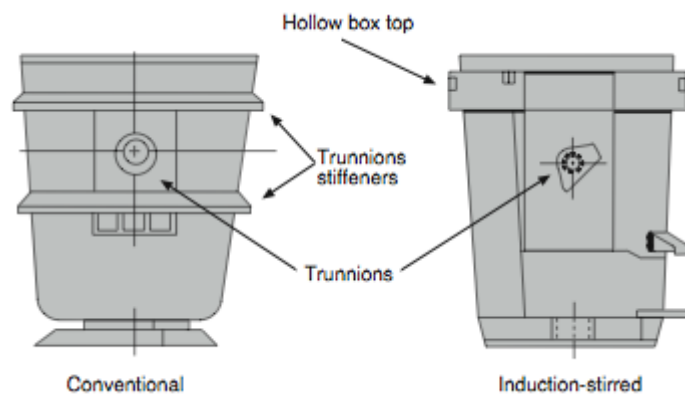
รูปที่ 3-2 ปริมาณการใช้เตาหลอมชนิดต่างๆในการผลิตเหล็กตั้งแต่ปี 1970 - 1996

(Fruehen et al., 1998)

3.1.2 เป้ารับน้ำเหล็ก (Ladle)

เป้ารับน้ำเหล็กเป็นอุปกรณ์สำหรับขนถ่ายน้ำเหล็กมีลักษณะเหมือนถังเหล็กภายในบุด้วยเซรามิกเพื่อกันความร้อนจากน้ำเหล็กที่บรรจุอยู่ภายใน

เป้ารับน้ำเหล็กเป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการหลอมเหล็กแบบต่างๆ นอกจากหน้าที่หลักในการขนถ่ายน้ำเหล็กแล้วเป้ารับน้ำเหล็กยังมีหน้าที่เป็นภาชนะสำหรับกระบวนการปรับค่าธาตุต่างๆภายในน้ำเหล็ก(Alloying) อีกด้วย



รูปที่ 3-3 ลักษณะของเป้ารับน้ำเหล็ก (Fruehan et al., 1998)

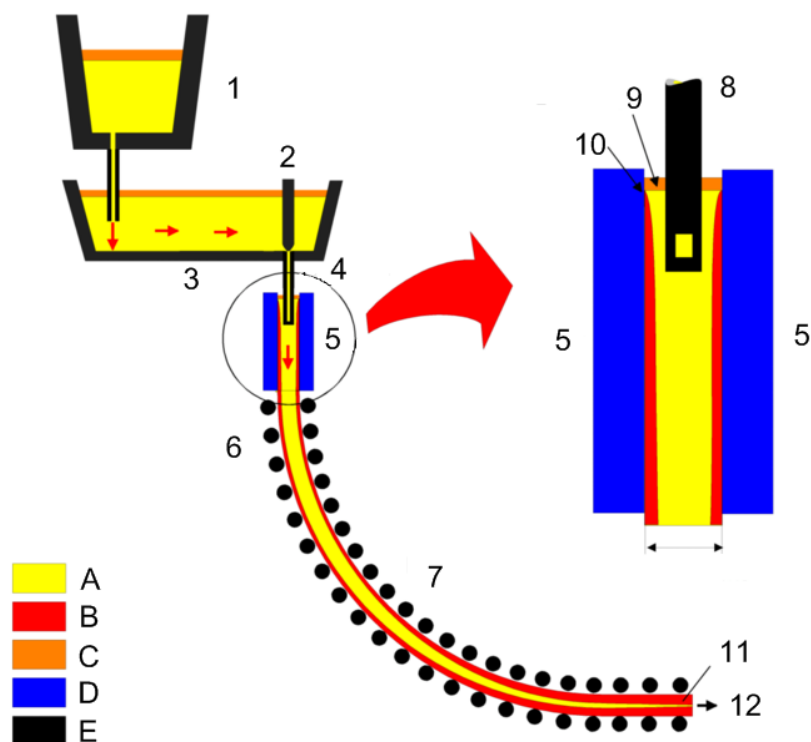
เนื่องจากเข้รับน้ำเหล็กเป็นอุปกรณ์ที่ต้องรับความร้อนสูงจากน้ำเหล็กที่บรรจุอยู่ภายใน การออกแบบวัสดุทนไฟ(Refractory) เพื่อบุภายในผนังเข้รับน้ำเหล็กต้องมีการออกแบบที่ดี เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อสภาพถัง รักษาอุณหภูมิน้ำเหล็ก สามารถดึงออกซิเจนจากออกไซด์ของเหล็กเหลวเพื่อให้เกิดเป็นเนื้อเหล็กมากขึ้น และใช้ปริมาณวัสดุทนไฟที่น้อยเพื่อความประหยัด

โดยปกติแล้วการบุผนังของเข้รับน้ำเหล็กจะมีชั้นสำคัญทั้งหมด 3 ชั้น เริ่มจากชั้นนอกสุดเป็นชั้นผิวเหล็ก(Steel Shell) ทำขึ้นจากเหล็กจะอยู่ภายนอกสุดของเข้รับน้ำเหล็กทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของเข้รับน้ำเหล็กให้เกิดเป็นรูปทรงที่แน่นอน ถัดเข้ามาภายในจะถูกบุด้วยวัสดุทนไฟ 1 ชั้นเป็นชั้นเพื่อความปลอดภัย(Safety Line) และวัสดุทนไฟอีกชั้นที่ใช้สัมผัสกับน้ำเหล็ก เรียกชั้นนี้ว่า ชั้นทำงาน(Working Line) แต่เนื่องจากการหลอมเหล็กจะเกิดออกไซด์ของสารประกอบต่างๆที่เราไม่ต้องการ ในกระบวนการที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำเหล็กจะลอยตัวแยกชั้นออกจากน้ำ เหล็กเหลวปกคลุมอยู่บนผิวหน้าของน้ำเหล็ก สารประกอบเหล่านั้นถูกเรียกว่า แสลด(Slag) แสลดจึงกลายเป็นส่วนสัมผัสอีกส่วนหนึ่งของน้ำเหล็ก จึงทำให้การออกแบบวัสดุทนไฟในชั้นบนสุดของเข้รับน้ำเหล็กต้องใช้วัสดุที่แตกต่างจากส่วนที่สัมผัสน้ำเหล็ก เรียกชั้นนี้ว่าชั้น แสลด(Slag Line)

ถึงแม้ว่าผนังภายในเข้รับน้ำเหล็กนั้นจะถูกบุด้วยวัสดุทนไฟ แต่ก็ไม่สามารถนำไปใช้ได้ โดยทันทีเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันเมื่อสัมผัสกับน้ำเหล็กจะสามารถสร้างความเสียหายให้แก่วัสดุทนไฟเหล่านี้ได้ ก่อนการใช้งานเข้รับน้ำเหล็กจึงต้องถูกเผาเพื่อไล่ความชื้น และปรับอุณหภูมิภายในเข้รับน้ำให้เพียงพอเพื่อลดความเสียหายของวัสดุทนไฟจะทำให้ลดการสูญเสียพลังงานจากน้ำเหล็กสู่ผนังเข้รับน้ำเหล็กนี้ได้อีกด้วย

3.1.3 การหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting)

การหล่อแบบต่อเนื่องจะเป็นกระบวนการสุดท้ายของการผลิตเหล็กทรงยาว(Billet) เหล็กทรงแบน (Slab) และเหล็กทรงใหญ่ (Bloom) การหล่อด้วยวิธีนี้เป็นที่นิยมมากที่สุด ในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ เนื่องจากสามารถควบคุมคุณภาพได้ง่าย ผลิตได้มาก และใช้ต้นทุนในการผลิตต่ำ



1. Ladle 2.Stopper 3.Tundish 4.Shroud 5.Mold 6.Roll support 7.Turning Zone

8. Shroud 9.Bath level 10.Meniscus 11.Withdrawal unit 12.Slab

A. Liquid metal B. Solidified metal C. Slag D. Water-cooled copper plates E. Refractory material

รูปที่ 3-4 อุปกรณ์และชิ้นส่วนในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง

[ข้อมูลจาก: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lingotamento_Continuo-Continuous_Casting.png]

การหล่อแบบต่อเนื่องนั้นมีการเริ่มต้นตั้งแต่การเทน้ำเหล็กออกจากเป่ารับน้ำเหล็กที่ขนถ่ายน้ำเหล็กมายังสถานี น้ำเหล็กที่ถูกเทออกมาจะลงสู่รางรับน้ำเหล็ก(Tundish) และรางรับน้ำเหล็กจะคอยส่งน้ำเหล็กลงไปยังแบบหล่อ(Mold)ในแนวตั้งอย่างต่อเนื่อง เพื่อไม่ให้ น้ำเหล็กแข็งจับกับแบบหล่อ แบบหล่อจึงต้องถูกสั้นอยู่ตลอดเวลา และแรงโน้มถ่วงของโลกจะคอยดึงน้ำเหล็กไหลออกจากแบบหล่อเป็นรูปทรงตามที่ต้องการ เมื่อเหล็กเหลวไหลออกจากแบบหล่อแล้ว น้ำเหล็กจะถูกลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วด้วยละอองน้ำจากหัวฉีด(Nozzle) ประกอบกับลูกกลิ้งจะคอยรีดให้ลำน้ำเหล็กที่ออกจากแบบหล่อยังคงรักษารูปร่าง และรูปทรงของหน้าตัดให้เหมือนเดิม ทำให้น้ำเหล็กเย็นตัวและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งที่มีรูปร่างตามแบบหล่อ ก่อนที่เหล็กที่หล่อได้จะถูกส่งไปตัดตามความยาวที่ต้องการ

เนื่องจากการหล่อลักษณะนี้ ในการหล่อแต่ละรอบนั้น เป้ารับน้ำเหล็กต้องมาเติม น้ำเหล็กในรางรับน้ำเหล็กให้ทัน ภายในรางรับน้ำเหล็กจะขาดน้ำเหล็กไม่ได้ หากน้ำเหล็กภายในรางรับน้ำเหล็กหมดลง การหล่อแบบต่อเนื่องในรอบนั้นก็จะจบลง ส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ไม่ต่อเนื่อง ควบคุมคุณภาพไม่ได้ และได้ผลิตภัณฑ์ในปริมาณต่ำ ด้วยลักษณะของการหล่อที่น้ำเหล็กจะต้องไหลเข้าแบบหล่ออย่างต่อเนื่องนี้ ทำให้กระบวนการนี้ถูกเรียกว่าการหล่อแบบต่อเนื่อง

Table 6-2 Metallurgical lengths for construction steel cast in the bloom caster, 250 × 250 mm.

Cooling Rate / kg water per kg steel	Casting Speed / m min ⁻¹			
	1.2	1.4	1.6	1.8
0.3	22.48	26.55	30.43	34.65
0.4	21.78	25.57	29.10	33.12
0.5	20.96	24.43	27.55	31.26
0.6	20.04	23.17	25.57	29.22

Table 6-3 Metallurgical lengths for ultra-low carbon steel cast in the slab caster, 1200 × 230 mm.

Cooling Rate / kg water per kg steel	Casting Speed / m min ⁻¹					
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.4	19.03	23.06	27.23	31.55	36.06	40.73
0.5	18.30	22.16	26.16	30.30	34.62	39.10
0.6	17.67	21.38	25.23	29.22	33.36	37.70
0.7	17.11	20.70	24.43	28.30	32.28	36.47
0.8	16.63	20.10	23.70	27.46	31.35	35.40

Table 6-4 Metallurgical lengths for linepipe steel cast in the slab caster, 1200 × 230 mm.

Cooling Rate / kg water per kg steel	Casting Speed / m min ⁻¹					
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.4	20.17	24.50	28.98	33.65	38.55	43.56
0.5	19.40	23.56	27.86	32.35	37.02	41.87
0.6	18.75	22.74	26.88	31.20	35.70	40.37
0.7	18.17	22.02	26.04	30.21	34.56	39.10
0.8	17.65	21.40	25.30	29.33	33.57	37.97

Table 6-5 Metallurgical lengths for engineering steel cast in the billet caster, 130 × 130 mm.

Cooling Rate / kg water per kg steel	Casting Speed / m min ⁻¹		
	3.0	4.0	5.0
0.8	17.20	22.40	28.00
0.9	16.70	21.53	26.83
1.0	16.20	20.73	25.66
1.1	15.70	19.86	24.42
1.2	15.20	19.06	23.33

รูปที่ 3-5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Metallurgical Length ความเร็วในการหล่อ และอัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยละอองน้ำ

[ข้อมูลจาก: Continuous Casting User Manual, steeluniversity.org]

ภายในกระบวนการหล่อนี้จะมีตัวแปรที่สำคัญต่อการออกแบบควบคุมคือ ระยะจากแบบหล่อถึงจุดที่น้ำเหล็กเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งจนหมด ลึกลงถึงแกนกลางลำเหล็กแล้ว จะเรียกระยะนี้ว่า Metallurgical Length

Metallurgical Length นี้มีความสำคัญต่อกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องมากเนื่องจาก Metallurgical Length จะเป็นตัวกำหนดทั้งความเร็วในการไหลของน้ำเหล็กจากรางรับน้ำเหล็กลงสู่แบบหล่อ และอุณหภูมิของน้ำเหล็กในรางรับ หากอุปกรณ์ที่ติดตั้งมีขนาดรองรับ Metallurgical Length ที่สั้น ต้องใช้ความเร็วในการเทน้ำเหล็กจากรางรับน้ำเหล็กถึงแบบหล่อต่ำ หรือรักษาอุณหภูมิของน้ำเหล็กภายในรางรับน้ำเหล็กให้ต่ำลงมา ความสัมพันธ์ของ Metallurgical Length ความเร็วของน้ำเหล็กที่ผ่านแบบหล่อ และอัตราการถ่ายเทความร้อนที่วัดจากปริมาณน้ำต่อปริมาณเหล็ก ตามแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์จะมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3 – 5

ดังนั้นในการออกแบบสถานีหล่อแบบต่อเนื่องนี้ หากจำเป็นต้องทราบถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องการจะผลิต วิศวกรก็จะคำนวณถึงความเหมาะสมของอุปกรณ์ที่ใช้ระบายความร้อน และความเร็วในการเทน้ำเหล็กเข้าสู่แบบหล่อ ให้สัมพันธ์กันกับกระบวนการอื่นๆในการหลอมเหล็กทั้งหมดด้วย จึงจะได้ Metallurgical Length ออกมาหากแต่ Metallurgical Length ที่ได้นั้นจะสามารถเปลี่ยนแปลงได้น้อยมากเมื่อสถานีการหล่อแบบต่อเนื่องได้ ถูกสร้างขึ้นแล้ว Metallurgical Length จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการออกแบบการควบคุมระบบเป็นอย่างมาก

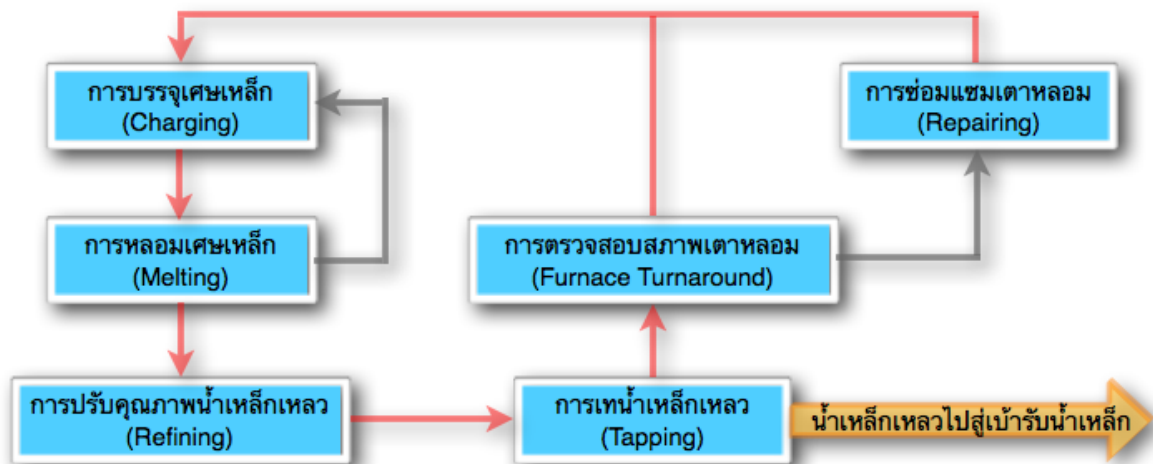
3.2 กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

การออกแบบระบบควบคุมเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กเพื่อการประหยัดพลังงานได้นั้น จะต้องเข้าใจวัฏจักรการทำงานของอุปกรณ์ทั้ง 2 ว่ามีขั้นตอนการใช้งานเป็นเช่นไร จึงจะทำให้เกิดความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ในการทำงานของอุปกรณ์ทั้ง 2 วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจะแยกการอธิบายออกเป็นวัฏจักรการทำงานของแต่ละอุปกรณ์ดังนี้

3.2.1 วัฏจักรการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

การทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจะมีลักษณะทำงานเป็นรอบเตา(Heat) แต่ละรอบเตาจะได้น้ำเหล็กมาปริมาณหนึ่ง ดังเช่นการทำงานของหม้อหุงข้าวที่จะให้ข้าวหุงสุกออกมาทีละหม้อแต่ละรอบเตาจะมีขั้นตอนการทำงาน ดังแผนภาพในรูปที่ 3 – 6

ในการปฏิบัติงานเวลาที่ใช้ในการทำงานแต่ละรอบเตาจะถูกวัดตั้งแต่การเทน้ำเหล็ก (Tapping) จนถึงการเทน้ำเหล็กรอบต่อไป จึงเรียกเวลาที่ใช้ในการทำงานแต่ละรอบว่าเวลาจากการเทรอบหนึ่งสู่การเทอีกรอบหนึ่ง (Tap to Tap Time: TTT) ซึ่งค่าเวลาดังนี้ถูกใช้เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพในการทำงานต่อเวลาของเตาหลอม



รูปที่ 3-6 แผนภาพแสดงวัฏจักรการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

จากแผนภาพในรูปที่ 3 – 6 นั้น เตาหลอมจะเริ่มต้นด้วยการบรรจุเศษเหล็ก (Charging) เข้าสู่เตาหลอมแล้วจึงเริ่มต้นการหลอมเศษเหล็ก (Melting) ด้วยการอาร์คผสมกับการใช้เปลวไฟจากหัวเผา และพลังงานจากปฏิกิริยาออกซิไดซ์ เมื่อเศษเหล็กหลอมละลายจนเป็นน้ำเหล็กแล้ว หากยังไม่ได้ปริมาณน้ำเหล็กตามที่ต้องการก็จะกลับไปบรรจุเศษเหล็กเพิ่มอีก และเริ่มต้นการหลอมเศษเหล็กที่บรรจุเพิ่มเข้ามาอีกครั้ง ทำซ้ำสองกระบวนการนี้จนภายในเตาหลอมได้ปริมาณน้ำเหล็กตามที่ต้องการแล้วจึงเริ่มต้นการปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (Refining)

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก โดยการลดปริมาณฟอสฟอรัส ซิลิกา ซิลิกอน อะลูมิเนียม แมงกานีส และคาร์บอนที่เจือปนอยู่ในน้ำเหล็ก ด้วยการฟ่นออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาจับกับธาตุต่างๆที่ไม่ต้องการเพื่อก่อให้เกิดออกไซด์ของธาตุนั้นให้กลายเป็นสแลคลอยตัวขึ้นปกคลุมน้ำเหล็ก แต่ในบางกรณีเมื่อสแลคประกอบไปด้วยออกไซด์ของเหล็กมากเกินไปก็จะฟ่นคาร์บอนลงไปบนเนื้อสแลคเพื่อให้คาร์บอนเข้าไปจับกับออกซิเจนของเหล็กออกไซด์เกิดเป็น คาร์บอนมอนอกไซด์ และเหล็กกลับมา

เมื่อสิ้นสุดการปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก น้ำเหล็กก็อยู่ในสถานะที่พร้อมจะเท (Tapping) ออกจากเตาหลอมสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก เมื่อน้ำเหล็กถูกเทออกจากเตาหลอมจนหมดสิ้นต้องมีการตรวจสอบสภาพเตาหลอม (Furnace Turnaround) เพื่อตรวจสอบความพร้อมของเตาหลอมเพื่อการหลอมในรอบต่อไป หากเตาหลอมมีการเสียหายเพียงเล็กน้อยและสภาพเตายังอยู่ในสภาพที่สามารถใช้งานต่อไปได้ ก็จะเริ่มการบรรจุเศษเหล็กสู่เตาหลอมครบรอบวัฏจักรการทำงาน หากเตา

หลอมไม่อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน ระบบการทำงานจะถูกปิดลง(Shut Down) เพื่อทำการซ่อมแซม เตาหลอมให้มีสภาพที่พร้อมใช้งานอีกครั้งก่อนที่บรรจุเศษเหล็กเพื่อการหลอมอีกครั้ง ถ้าหากเตาหลอมมีความเสียหายจนต้องปิดเตาลงเพื่อทำการซ่อมแซมจะยิ่งทำให้ระยะเวลาจากการเทรอบหนึ่งสู่การเทอีกรอบหนึ่งเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน ทำให้เกิดประสิทธิผลที่ต่ำจึงไม่เป็นที่ต้องการของผู้ประกอบการ

3.2.2 วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก

เบ้ารับน้ำเหล็กเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในกระบวนการหลอมเหล็กมากเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการขนถ่ายน้ำเหล็ก หากเบ้ารับน้ำเหล็กชำรุดเสียหาย หรือล่าช้าขณะใช้งานจนเป็นเหตุให้ไม่สามารถใช้งานเบ้ารับน้ำเหล็กได้จะทำให้กระบวนการผลิตเหล็กเสียประสิทธิผลได้ โดยทั่วไปจึงมีการใช้งานเบ้ารับน้ำเหล็กมากกว่า 1 เบ้า และใช้การเวียนกันตามแต่ละกระบวนการให้สัมพันธ์กันตลอดการผลิต ดังนั้นความเข้าใจที่ดีในวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการควบคุมระบบการผลิตเหล็กทั้งหมด



รูปที่ 3-7 วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก (ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น, 2552)

ในวัฏจักรการทำงานโดยทั่วไปของเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีขั้นตอนการทำงานดังแผนภาพ ในรูปที่ 3 – 7 เมื่อวัฏจักรเริ่มต้นที่การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก(Preheating)ให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน(Thermal Shock) เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กที่อุณหภูมิสูงกว่า 1700°C หลังจากอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจนได้ที่แล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกยกไปรอการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจนกว่าเตาหลอมจะพร้อมเทน้ำเหล็ก เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กได้รับน้ำเหล็กจากเตาหลอมเรียบร้อยแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะขนถ่ายน้ำเหล็กมายังสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง(Continues Casting Station) ที่สถานีนี้หากวางรับน้ำเหล็ก(Tundish)ยังไม่พร้อมจะรับน้ำเหล็กที่มาถึง เบ้ารับน้ำเหล็กต้องรอการถ่ายน้ำเหล็ก(Holding) ในขั้นตอนรอการถ่ายน้ำเหล็กนี้อาจจะมีการเติมแคลเซียมและซิลิกาเข้าไปเพื่อ ปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กอีกครั้งได้ เมื่อพร้อมน้ำเหล็กจึงจะถูกถ่าย(Teeming) จากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก ในการถ่ายน้ำเหล็กนั้นจะต้องใช้ความระมัดระวังเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากน้ำเหล็กที่ลงสู่รางรับน้ำเหล็กนั้นจะเป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนที่น้ำเหล็กจะถูกหล่อเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป จึงต้องระวังให้เหล็กตกลงมาในรางรับน้ำเหล็กน้อยที่สุด เพื่อรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่จะได้ต่อไป อีกทั้งยังต้องคอยรักษาอุณหภูมิน้ำเหล็กให้ได้ตามที่ต้องการสัมพันธ์กับความสามารถในการหล่อเหล็กให้แข็งของเครื่องหล่อแบบต่อเนื่องอีกด้วย

เมื่อการถ่ายน้ำเหล็กเสร็จสิ้นจะเหลือสแลคที่ไม่ต้องการอยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ก็จะถูกเทสแลคออกจากเบ้า(Slag Removing) หลังจากนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กจึงถูกนำไปตรวจสอบสภาพ หากเบ้ารับน้ำเหล็กมีความเสียหายเพียงเล็กน้อยก็จะนำก๊าซเฉื่อยมาเป่าช่องถ่ายน้ำเหล็กไม่ให้อุดตันแล้วนำกลับไปใช้ใหม่ หากแต่เบ้ารับน้ำเหล็กอยู่ในสภาพที่พร้อมตรงกันกับน้ำเหล็กที่หลอมในเตาหลอมพร้อมเท เบ้ารับน้ำเหล็กก็สามารถถูกนำไปรับน้ำเหล็กต่อโดยไม่ต้องผ่านการอุ่นอีกได้

ส่วนเบ้ารับน้ำเหล็กที่ไม่อยู่ในสภาพที่ใช้งานต่อไปได้ หากมีความเสียหายเพียงขั้นทำงานก็จะรีอิวสคูทไฟเฉพาะชั้นทำงานและก่อเฉพาะชั้นนี้ขึ้นใหม่ หากความเสียหายมากก็ต้องก่อใหม่ทั้งชั้นปลอกกั๊ยและชั้นทำงาน โดยทั่วไปแล้วมักจะรีอิวสคูทไฟชั้นทำงานทุก 20 - 25 รอบการทำงาน และรีอิวสคูทไฟทั้งหมดเมื่อผ่านการทำงานมา 45 - 50 รอบการทำงาน ทั้งนี้ทั้งนั้นขึ้นอยู่กับสภาพการทำงานของโรงงานแต่ละแห่งและวัสดุทนไฟประเภทต่างๆที่เลือกใช้

หากมีการซ่อมแซมโดยการก่อวัสดุทนไฟภายในเบ้ารับน้ำเหล็กขึ้นมาใหม่ เบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะถูกเรียกว่าเบ้ารับน้ำเหล็กก่อใหม่(Green Ladle) ก่อนที่จะที่จะนำเบ้ารับน้ำเหล็กก่อใหม่ไปใช้

ต้องผ่านการอุ่นเป็นระยะเวลา ที่นานกว่าการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กที่ใช้งานแล้วเพื่อไล่ความชื้นออกจากวัสดุทนไฟให้หมดเพื่อป้องกันการเปลี่ยนสถานะและขยายตัวอย่างฉับพลันของน้ำภายใน วัสดุทนไฟเมื่อได้รับความร้อนจากน้ำเหล็กจนทำให้วัสดุทนไฟเกิดความเสียหายได้ ระยะเวลาในการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กก่อใหม่นี้โดยทั่วไปจะใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมงในการอุ่น ก่อนที่จะส่งออกไปใช้งานต่อไป

3.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfers) ระหว่างกระบวนการหลอมเหล็ก

การถ่ายเทความร้อนเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการหลอมเหล็กซึ่งสามารถวัดได้จากความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของตำแหน่งที่ถูกพิจารณา ซึ่งอุณหภูมินี้เองที่เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญสำหรับคุณภาพเหล็กจากกระบวนการหลอม การออกแบบระบบควบคุมจึงต้องมีความเข้าใจถึงการถ่ายเทความร้อน เพื่อให้เกิดการใช้พลังงานที่เหมาะสมและสามารถคงคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ โดยที่การศึกษานี้จะเน้นไปที่การถ่ายเทความร้อนภายในเข้รับน้ำเหล็ก และน้ำเหล็กในเข้รับน้ำเหล็กในกระบวนการต่างๆ

3.3.1 การนำความร้อนในเข้รับน้ำเหล็ก

การนำความร้อนในเข้รับน้ำเหล็กนั้นจะเกิดขึ้นบริเวณผนังเข้รับน้ำเหล็ก ซึ่งจะนำความร้อนจากน้ำเหล็กออกไปสู่บรรยากาศผ่านผนังเข้ โดยในการศึกษานี้จะพิจารณาให้ภายในผนังเข้รับน้ำเหล็กมีเพียงการนำความร้อนเท่านั้น เนื่องจากผนังเข้รับน้ำเหล็กเป็นของแข็งทั้งหมด และความสัมพันธ์ระหว่างความชันอุณหภูมิ (Temperature gradient) ภายในผนังเข้รับน้ำเหล็กและการนำความร้อนจะใช้กฎของฟูเรียร์ (Fourier's Law) ในการพิจารณา

$$Q_{cond} = -kA_{cond} \nabla T \quad (3.1)$$

เมื่อ	Q_{cond}	คือปริมาณความร้อนจากการนำความร้อน (W)
	k	คือสภาพการนำความร้อนของตัวกลาง (W/m-K)
	A_{cond}	คือพื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่านตัวกลาง (m^2)
	T	คือการแจกแจงอุณหภูมิภายในเข้รับน้ำเหล็ก (K)

ในสมการที่ (3.1) จะเป็นความสัมพันธ์ของอัตราการถ่ายเทความร้อนกับความชันอุณหภูมิภายในเข้รับน้ำเหล็ก หากแต่ในการออกแบบระบบควบคุมการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กร่วมกับเตาหลอมจำเป็นจะต้องทราบถึงสถานะทางอุณหภูมิของเข้รับน้ำเหล็กอยู่เสมอซึ่งสถานะทางอุณหภูมิ นี้จะ

ขึ้นอยู่กับเวลา เราจึงต้องคำนวณหาการแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่เป็นฟังก์ชันของเวลาด้วย

เนื่องจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กของแข็งทั้งหมด สมดุลพลังงานภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นดังสมการที่ (3.2)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (3.2)$$

- เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของวัสดุทนไฟที่ใช้บุผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก (kg/m^3)
 c คือค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุทนไฟที่ใช้บุผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ($kJ/kg-K$)
 t คือระยะเวลาที่ทำการพิจารณาการเปลี่ยนของอุณหภูมิ (s)

ในการศึกษานี้ สมการที่ (3.1) และ (3.2) จะมีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นสมการหลักในการคำนวณหาการแจกแจงอุณหภูมิภายในผนัง และปริมาณความร้อนที่ผ่านภายในผนัง ซึ่งผลลัพธ์ของฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิ และปริมาณความร้อนที่คำนวณได้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) และเงื่อนไขค่าขอบ (Boundary Condition) ของปัญหาด้วย

ฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิภายในผนัง และปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านที่จะคำนวณได้นี้ใช้ประกอบกับการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนจะเป็นผลให้ทราบสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กอันจะเป็นประโยชน์แก่การกำหนดการใช้งาน และการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนี้ต่อไป

3.3.2 การพาความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก

ลักษณะการพาความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะมีกระบวนการพาความร้อนอยู่สองด้าน คือการพาความร้อนระหว่างผนังเหล็กและอากาศภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก และการพาความร้อนระหว่างวัสดุทนไฟชั้นทำงานที่บุภายในเบ้ารับน้ำเหล็กกับน้ำเหล็ก ซึ่งการพาความร้อนนั้นก็แบ่งออกเป็นการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) และการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural Convection) การพาความร้อนแบบบังคับนั้นจะใช้ของไหลที่ใช้ในการพาความร้อนไหลเข้ามาพาความร้อนออกไปจากระบบเช่นการเปิดพัดลมเข้าใส่วัสดุที่ร้อน หรือการเปิดน้ำให้หมุนเวียนรอบเตาหลอมเหล็กเพื่อการระบายความร้อนต่างจากการพาความร้อนโดยธรรมชาติที่จะใช้กลไกทางธรรมชาติโดยที่ เมื่อของไหลที่สัมผัสกับบริเวณที่ต้องการจะระบายความร้อนได้รับความร้อนเข้าไปปริมาตรจะขยายทำให้ความหนาแน่นลดน้อยลง ของไหลส่วนนั้นก็จะลอยตัว

สูงขึ้นส่วนของไหลที่อุณหภูมิต่ำกว่าก็จะไหลเข้าแทนที่ความร้อนจึงถูกพาออกจากแหล่งกำเนิดความร้อนออกไปเรื่อยๆได้

แต่ลักษณะการพาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเขารับน้ำเหล็กนั้นไม่มีการกระตุ้น ของไหลทั้งภายในและภายนอกเขารับน้ำ เราจึงพิจารณาการพาความร้อนในเขารับน้ำเหล็กนี้เป็นการพาความร้อนแบบธรรมชาติ

จากกฎการทำความเย็นของนิวตัน(Newton's Law of Cooling) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q_{conv} = hA(T_i - T_f) \quad (3.3)$$

- เมื่อ Q_{conv} คืออัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน (W)
 h คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน(Heat Transfers Coefficient) ($W/m^2 \cdot K$)
 A คือพื้นที่ที่ระบายความร้อน (m^2)
 T_i คืออุณหภูมิของของไหลที่พาความร้อน (K)
 T_f คืออุณหภูมิของพื้นผิวผนัง (K)

เพื่อที่จะหาอัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน ตัวแปรต่างๆในสมการที่ (3.3) นั้นต่างสามารถตรวจวัดได้ มีเพียงสัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ไม่สามารถหาได้ด้วยการตรวจวัดจากการศึกษาต่างๆจึงต้องหาค่าสัมประสิทธิ์นี้จาก Nusselt Number

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3.4)$$

- เมื่อ Nu คือ Nusselt Number (Dimensionless)
 L คือความยาวของบริเวณถ่ายเทความร้อน (m)

ในการศึกษานี้คำนวณหา Nusselt Number โดยใช้สมการ [Ecker , 1937]

$$Nu = 0.68 \left(\frac{Pr}{0.952 + Pr} \right)^{0.25} Gr^{0.25} Pr^{0.25} \quad (3.5)$$

- เมื่อ Pr คือ Prandtl Number (Dimensionless)
 Gr คือ Grashof Number (Dimensionless)

ตัวแปรไร้มิติทั้งสองตัวที่กล่าวถึงในสมการที่ (3.5) มีค่าดังนี้

$$Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (3.6)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.7)$$

- เมื่อ g คือค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)

- β คือค่าสัมประสิทธิ์การขยายปริมาตรของของไหลระบายความร้อน ($^{\circ}C^{-1}$)
 ΔT คือผลต่างระหว่างอุณหภูมิของไหลและผิวเบ้ารับน้ำเหล็ก ($^{\circ}C$)
 μ คือค่าความหนืดเชิงจลน์ของของไหล (kg/m-s)
 c_p คือค่าความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่ (kJ/kg-K)

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจะต้องใช้สมการ (3.3) - (3.7) ประกอบการคำนวณร่วมกับสมบัติต่างๆของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็กภายในเบ้า

การถ่ายเทความร้อนด้วยการพา นั้นมีความซับซ้อนมากกว่าการนำความร้อนมาก สมการและวิธีการคำนวณที่นำมาเสนอนี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งของความสัมพันธ์ในการถ่ายเทความร้อนเท่านั้น $120^{\circ}C$

3.3.3 การแผ่รังสีความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก

ระหว่างกระบวนการผลิตเหล็กเบ้ารับน้ำเหล็กจะได้รับความร้อนทั้งจากการอุ่นและจากน้ำเหล็กทำให้อุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กสูงกว่าอุณหภูมิจึงแวดล้อมภายนอกมาก ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมินี้เป็นผลให้เกิดการแผ่รังสีความร้อนออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นปริมาณสูง ดังนั้นความเข้าใจที่ดีเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของปริมาณการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนนั้น จะทำให้สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กได้แม่นยำยิ่งขึ้น

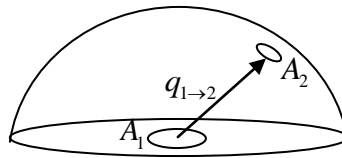
ซึ่งปริมาณการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนที่ใช้ในการพิจารณาในการศึกษานี้จะเป็นดังสมการที่ (3.8)

$$Q_{rad} = \epsilon \sigma A (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (3.8)$$

- เมื่อ Q_{rad} คือปริมาณความร้อนในการแผ่รังสีความร้อน (W)
 ϵ คือค่า Effective Emissivity ของพื้นผิวที่แผ่รังสี (Dimensionless)
 σ คือค่าคงที่ สเตฟาน-โบลต์ซมาน (Stefan-Boltzmann) มีค่า 5.67×10^{-8} ($W/m^2 \cdot K^4$)
 A คือพื้นที่ที่ระบายความร้อน (m^2)
 T คืออุณหภูมิของพื้นผิวที่แผ่รังสี (K)
 T_{∞} คืออุณหภูมิเฉลี่ยของสิ่งแวดล้อมโดยรอบพื้นที่แผ่รังสีความร้อน (K)

3.3.3.1 ตัวประกอบการมองเห็น (View-Factor)

การแผ่รังสีภายในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะมีความซับซ้อนกว่าการแผ่รังสีในพื้นที่เปิดโล่งสู่บรรยากาศ เนื่องจากภายในเบ้ารับน้ำเหล็กการแผ่รังสีของแต่ละพื้นผิวต่างๆ ต่างก็มีความสัมพันธ์กัน เช่นผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะได้รับรังสีจากผนังกันภายในของเบ้ารับน้ำเหล็ก และได้รับรังสีจากผนังที่อยู่ตรงข้ามกัน นอกจากนั้นผนังเบ้ารับน้ำเหล็กยังมีการแผ่รังสีออกสู่บรรยากาศผ่านทางปากเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งการคำนวณหาปริมาณรังสีที่ออกจากพื้นผิวหนึ่งไปยังอีกพื้นผิวหนึ่งจะต้องทราบถึงสัดส่วนของพลังงานจากรังสีที่ออกจากพื้นผิวหนึ่งไปยังพื้นผิวหนึ่งผ่านทางตัวประกอบการมองเห็น



รูปที่ 3-8 ลักษณะการแผ่รังสีจากพื้นผิว A_1

ตัวประกอบการมองเห็น(View-Factor) หมายถึงสัดส่วนของพลังงานที่ปลดปล่อยออกจากพื้นผิวหนึ่งไปยังพื้นผิวหนึ่ง หากเราพิจารณาพื้นผิว A_1 ในรูปที่ 3 – 8 พื้นผิว A_1 นี้จะมีการปลดปล่อยพลังงานทั้งหมดผ่านการแผ่รังสีไปยังผิวครึ่งทรงกลม แต่หากต้องการทราบถึงปริมาณพลังงานที่พื้นผิว A_1 ปลดปล่อยผ่านการแผ่รังสีไปยังพื้นผิว A_2 ซึ่งอยู่บนผิวครึ่งทรงกลมปริมาณรังสีที่ไปถึงยัง A_2 นั้นต้องเป็นสัดส่วนของปริมาณรังสีทั้งหมดออกจากพื้นผิว A_1 ซึ่งสามารถเขียนรูปสมการได้ดังนี้

$$q_{1 \rightarrow 2} = F_{1 \rightarrow 2} A_1 q_1'' \quad (3.9)$$

เมื่อ $q_{1 \rightarrow 2}$ คือปริมาณรังสีที่ออกจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2 (W)
 $F_{1 \rightarrow 2}$ คือตัวประกอบการมองเห็นของพื้นที่ A_1 มองไปยัง A_2 (Dimensionless)
 q_1'' คือฟลักซ์ของรังสีที่ออกจากพื้นที่ A_1 (W/m^2)

ดังจะเห็นได้จากสมการที่ (3.9) นั่นคือผลคูณของฟลักซ์ที่ออกจากพื้นที่ A_1 ทั้งหมดเมื่อคูณกับพื้นที่ A_1 จะเป็นปริมาณพลังงานที่ปลดปล่อยออกจากการแผ่รังสีจากพื้นที่ A_1 นั่นเอง

$$q_1 = A_1 q_1'' \quad (3.10)$$

เมื่อ q_1 คือพลังงานทั้งหมดที่พื้นผิว A_1 ปลดปล่อยออกจากการแผ่รังสี (W)

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (3.9) และ (3.10) แล้วจะพบว่าตัวประกอบการมองเห็นต้องมีค่าน้อยกว่า 1 เนื่องจากปริมาณพลังงานที่ออกจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2 นั้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ออกมาจากการแผ่รังสี นั่นหมายความว่าหากพื้นผิว A_1 แผ่รังสีไปยังพื้นผิวโดยรอบจำนวน n พื้นผิว ผลรวมของพลังงานที่แผ่รังสีออกจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว n นั้นๆจะต้องเท่ากับปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ปลดปล่อยออกมาจากพื้นผิว A_1 จากการแผ่รังสีความร้อน

$$q_1 = \sum_{i=1}^n F_{1 \rightarrow i} A_i q_i'' \quad (3.11)$$

เมื่อ $F_{1 \rightarrow i}$ คือตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_i ที่ปิดล้อมจำนวน n พื้นผิว (Dimensionless)

จากสมการที่ (3.11) จะเห็นได้ว่าเมื่อแทนสมการที่ (3.10) ลงไปแล้วแก้สมการจะได้

$$1 = \sum_{i=1}^n F_{1 \rightarrow i} \quad (3.12)$$

ดังนั้นสามารถสรุปได้จากสมการที่ (3.12) คือผลรวมของตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิวใดๆที่แผ่รังสีออกไปยังพื้นผิวต่างๆโดยรอบต้องมีค่าเท่ากับ 1

แต่เพียงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.12) ยังไม่เพียงพอสำหรับการหาตัวประกอบการมองเห็นในกรณีอื่นๆที่มีจำนวนพื้นผิวที่ประกอบกลายเป็นพื้นที่ปิดล้อมจำนวนมาก ความสัมพันธ์ที่สำคัญอีกความสัมพันธ์คือความสัมพันธ์แบบเห็นกันและกัน (Reciprocity Relation) ซึ่งสัมพันธ์กันดังนี้

$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i} \quad (3.13)$$

เมื่อ A_i คือพื้นที่แผ่รังสีของพื้นผิว i (m^2)

A_j คือพื้นที่แผ่รังสีของพื้นผิว j (m^2)

$F_{i \rightarrow j}$ คือตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว i ไปยังพื้นผิว j (Dimensionless)

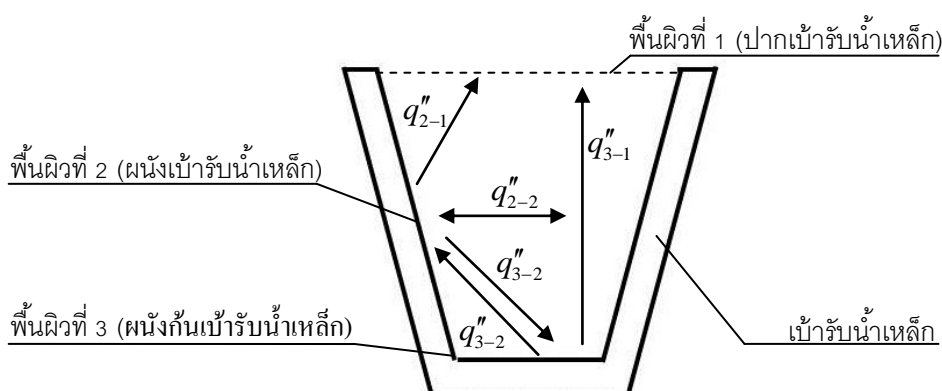
$F_{j \rightarrow i}$ คือตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว j ไปยังพื้นผิว i (Dimensionless)

ความสัมพันธ์จากสมการที่ (3.12) และ (3.13) เป็นความสัมพันธ์ที่จะใช้ในการคำนวณหาปริมาณพลังงานที่ถ่ายเทด้วยการแผ่รังสีความร้อนในบารับน้ำเหล็กต่อไป

3.3.3.2 การแผ่รังสีในพื้นที่ปิดล้อม

เนื่องจากเบ้ารับน้ำเหล็กที่สถานะต่าง ๆ นั้น ผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีการแปรผันของอุณหภูมิอยู่ตลอดเวลาซึ่งในกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กผ่านการอุ่นหรือสัมผัสน้ำเหล็กมานั้น อุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะสูง ส่งผลให้การแผ่รังสีความร้อนมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมาก จึงต้องใช้ความเข้าใจเกี่ยวกับกายภาพการแผ่รังสีที่มากยิ่งขึ้น

การแผ่รังสีของผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะมีผลจากการแผ่รังสีของผนังส่วนต่างๆ ให้แก่กัน เช่นผนังเบ้ารับน้ำเหล็กด้านต่างๆ จะแผ่รังสีให้ผนังส่วนที่อยู่ในทิศทางตรงกันข้าม ผนังกันภายในเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะมีการแผ่รังสีให้แก่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในส่วนต่างๆ และบางส่วนของรังสีจากผนังกันภายในเบ้ารับน้ำเหล็กและผนังก็จะมีการแผ่รังสีออกสู่บรรยากาศออกไปทางปากเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งการแผ่รังสีในลักษณะที่แต่ละพื้นผิวมีความสัมพันธ์กันเช่นนี้คือลักษณะของการแผ่รังสีของพื้นผิวในพื้นที่ปิดล้อม เพื่ออธิบายปรากฏการณ์การแผ่รังสีจะต้องทราบถึงหลักการเบื้องต้นซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

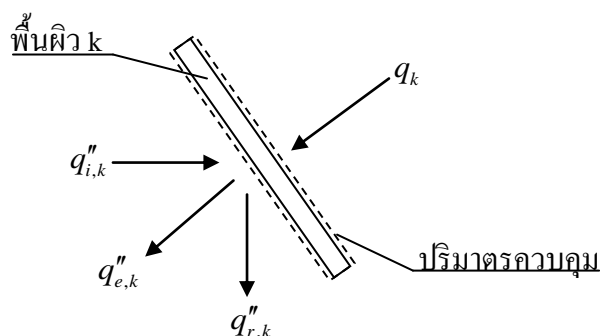


รูปที่ 3 – 9 ลักษณะการแผ่รังสีภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นการแผ่รังสีในพื้นที่ปิดล้อม

หากพิจารณาพื้นผิวจำนวน k ผิวที่ประกอบขึ้นเป็นพื้นที่ปิดล้อมแล้วนั้น พื้นผิวเหล่านั้นจะประกอบไปด้วยรังสีที่ตกกระทบลงบนพื้นผิว k นั้นๆ ($q''_{i,k}$) รังสีที่สะท้อนออกจากพื้นผิว k นั้นๆ ($q''_{r,k}$) และรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิว k นั้นๆ ($q''_{e,k}$) ดังแสดงในรูปที่ 3 – 10

ซึ่งตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน บนพื้นผิว k ที่พิจารณาพลังงานต้องอยู่ในสมดุล ดังนั้นเมื่อรังสีที่เข้าและออกในพื้นที่ผิว k ที่ถูกพิจารณาในรูปที่ 3 – 10 นั้นต้องทำให้เกิดสมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุมนั้นๆด้วย แต่ในบางกรณีเพียงรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อนและรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวนั้นไม่สมดุลกันซึ่งเป็นผลมาจากสมบัติทางกายภาพของพื้นผิวนั้นๆ จึงต้องมีความร้อนเข้า

หรือออกจากพื้นผิวนั้น (q_k) เพื่อให้พลังงานที่เข้าและออกจากพื้นผิวนั้นสมดุลกัน ซึ่งความร้อนนี้จะเป็นตัวแสดงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวที่เราพิจารณา



รูปที่ 3-10 ลักษณะการแผ่รังสีบนพื้นผิวใดๆ

ดังนั้นบนพื้นผิว k ใดๆ สามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานของพื้นผิวนั้น ได้ดังนี้

$$q_k = (q''_{e,k} + q''_{r,k} - q''_{i,k}) A_k \quad (3.14)$$

เมื่อ

$$q''_{o,k} = q''_{e,k} + q''_{r,k} \quad (3.15)$$

ดังนั้น

$$q_k = (q''_{o,k} - q''_{i,k}) A_k \quad (3.16)$$

เมื่อ A_k คือพื้นที่ผิว k ใดๆที่พิจารณา (m^2)

$q''_{o,k}$ คือฟลักซ์ของรังสีที่ออกจากพื้นผิว k ใดๆ (W/m^2)

ซึ่งรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวสามารถแจกแจงได้ดังสมการที่ (3.8) นั่นคือ

$$q''_{e,k} = \varepsilon_k \sigma T_k^4 \quad (3.17)$$

เมื่อ ε_k คือค่า Effective Emissivity ของพื้นผิว k ใดๆที่แผ่รังสี (Dimensionless)

T_k คืออุณหภูมิของพื้นผิว k ใดๆที่แผ่รังสี (K)

ส่วนรังสีที่สะท้อนออกจากพื้นผิว k ใดๆ เมื่อพิจารณาให้พื้นผิว k ใดๆเป็นวัตถุเทา รังสีที่ออกจากพื้นผิวจะมีเพียงรังสีสะท้อนและรังสีที่ปลดปล่อยออกจากพื้นผิวเองเท่านั้น ดังนั้นผลรวมของ Emissivity และ Reflexivity จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ (3.18)

$$\varepsilon_k + \rho_k = 1 \quad (3.18)$$

เมื่อ ρ_k คือค่า Reflexivity ของพื้นผิว k ใดๆ ที่ถูกรังสีสะท้อน (Dimensionless)

ดังนั้นเพื่อลดจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าสามารถจัดรูปสมการให้ Reflexivity อยู่ในรูป Emissivity ได้ดังนี้

$$\rho_k = 1 - \varepsilon_k \quad (3.19)$$

เมื่อพิจารณาถึงรังสีที่สะท้อนออกจากพื้นผิว k ที่พิจารณานั้นจะสัมพันธ์กับรังสีสะท้อน ดังนี้

$$q_{r,k}'' = \rho_k q_{i,k}'' \quad (3.20)$$

ดังนั้น
$$q_{r,k}'' = (1 - \varepsilon_k) q_{i,k}'' \quad (3.21)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.17) และ (3.21) ลงในสมการที่ (3.15) จะทำให้ได้ความสัมพันธ์

$$q_{o,k}'' = \varepsilon_k \sigma T_k^4 + (1 - \varepsilon_k) q_{i,k}'' \quad (3.22)$$

จากสมการที่ (3.22) จะเห็นได้ว่าเมื่อนำค่ารังสีที่ออกจากพื้นผิว k ใดๆ ($q_{o,k}''$) ลงไปแทนในสมการที่ (3.14) จะสามารถทำให้สมการลดจำนวนตัวแปรได้ ซึ่งจะทำให้ความร้อนสุทธิที่เข้าหรือออกจากพื้นผิวนั้น (q_k) เป็นฟังก์ชันของรังสีที่กระทบหรือออกจากพื้นผิว k ใดๆ ที่พิจารณา ซึ่งในการตรวจวัดนั้น การตรวจวัดปริมาณรังสีที่ออกจากพื้นผิวที่พิจารณาสามารถทำได้ง่ายกว่าจึงจะจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของรังสีที่ออกจากพื้นผิวแทน

ดังนั้นเมื่อจัดรูปสมการที่ (3.22) จะได้

$$q_{i,k}'' = \frac{q_{o,k}'' - \varepsilon_k \sigma T_k^4}{(1 - \varepsilon_k)} \quad (3.23)$$

แทนสมการที่ (3.17), (3.21) และ (3.23) ลงในสมการที่ (3.14) และจัดรูปจะได้

$$q_k = \frac{\varepsilon_k}{(1 - \varepsilon_k)} A_k (\sigma T_k^4 - q_{o,k}'') \quad (3.24)$$

จากสมการที่ (3.24) จะเห็นได้ว่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าหรือออกจากพื้นผิวใดๆ นั้นจะสัมพันธ์กับปริมาณรังสีที่ออกจากพื้นผิวนั้น แต่เนื่องจากในพื้นที่ปิดล้อมที่มีพื้นผิวจำนวนมาก พื้นผิวแต่ละพื้นผิวย่อมถ่ายเทความร้อนผ่านการแผ่รังสีความร้อนให้แก่กัน ดังนั้นความสัมพันธ์ในสมการที่ (3.24) ต้องได้รับการพัฒนาให้สัมพันธ์กับพื้นผิวปิดล้อมอื่นๆ เพิ่มเติม

หากพิจารณาปริมาณรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิว k ไปยังพื้นผิว j ปริมาณรังสีที่ตกกระทบลงบนพื้นผิว j จะมีค่าตามสัดส่วนของตัวประกอบการมองเห็นระหว่างพื้นผิว k ที่มองเห็นพื้นผิว j สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$q_{k \rightarrow j} = F_{k \rightarrow j} A_k q_{o,k}'' \quad (3.25)$$

เมื่อ $q_{k \rightarrow j}$ คือปริมาณรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิว k ไปยังพื้นผิว j (W)

$F_{k \rightarrow j}$ คือตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว k ไปยังพื้นผิว j (Dimensionless)

ในทางกลับกันปริมาณรังสีที่ออกจากพื้นผิว j ไปยังพื้นผิว k สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$q_{j \rightarrow k} = F_{j \rightarrow k} A_j q''_{o,j} \quad (3.26)$$

เมื่อ $q_{j \rightarrow k}$ คือปริมาณรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิว k ไปยังพื้นผิว j (W)
 $F_{j \rightarrow k}$ คือตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว k ไปยังพื้นผิว j (Dimensionless)
 A_j คือพื้นที่ผิวของพื้นผิว j ใดๆที่พิจารณา (m^2)
 $q''_{o,j}$ คือฟลักซ์ของรังสีที่ออกจากพื้นผิว j ใดๆที่พิจารณา (W/m^2)

เนื่องจากตัวประกอบการมองเห็นนั้นมีความสัมพันธ์แบบเห็นกันและกันดังสมการที่ (3.27)

$$F_{1 \rightarrow 2} A_1 = F_{2 \rightarrow 1} A_2 \quad (3.27)$$

จะสามารถนำความสัมพันธ์นี้ประยุกต์ใช้กับสมการที่ (3.26) ได้ดังนี้

$$q_{j \rightarrow k} = F_{k \rightarrow j} A_k q''_{o,j} \quad (3.28)$$

หากพิจารณาถึงปริมาณรังสีที่แลกเปลี่ยนระหว่างพื้นผิว k และพื้นผิว j สุทธิแล้วจะเป็นผลต่างของปริมาณรังสีที่ออกจากพื้นผิว k ไปยัง j และจากพื้นผิว j ไปยัง k แสดงได้ดังนี้

$$q_{k \leftrightarrow j} = q_{k \rightarrow j} - q_{j \rightarrow k} \quad (3.29)$$

เมื่อ $q_{k \leftrightarrow j}$ คือปริมาณรังสีสุทธิที่แลกเปลี่ยนระหว่างพื้นผิว k และพื้นผิว j (W)

หากแทนค่าสมการที่ (3.29) ด้วยสมการที่ (3.25) และ (3.28) จะได้

$$q_{k \leftrightarrow j} = F_{k \rightarrow j} A_k q''_{o,k} - F_{k \rightarrow j} A_k q''_{o,j}$$

$$q_{k \leftrightarrow j} = F_{k \rightarrow j} A_k (q''_{o,k} - q''_{o,j}) \quad (3.30)$$

เมื่อทราบถึงปริมาณรังสีที่แลกเปลี่ยนระหว่างพื้นผิว k ใดๆที่พิจารณากับพื้นที่ปิดล้อมอื่นๆ แล้ว ปริมาณความร้อนที่เข้าและออกจากพื้นผิว k นั้นๆจะเป็นผลรวมของปริมาณรังสีที่แลกเปลี่ยนระหว่างพื้นผิวปิดล้อมอื่นๆ ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$q_k = \sum_{j=1}^N q_{k \leftrightarrow j} \quad (3.31)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.30) ลงในสมการที่ (3.31) และจัดรูปได้ดังนี้

$$q_k = \sum_{j=1}^N F_{k \rightarrow j} A_k (q''_{o,k} - q''_{o,j})$$

$$q_k = \sum_{j=1}^N \frac{(q''_{o,k} - q''_{o,j})}{1/F_{k \rightarrow j} A_k} \quad (3.32)$$

จะเห็นว่าสมการที่ (3.32) และสมการที่ (3.24) ต่างก็มีค่าเท่ากับปริมาณความร้อนสุทธิที่เข้าหรือออกจากพื้นผิว k เช่นกันดังนั้นจะสามารถนำทั้ง 2 สมการรวมกันได้เป็น

$$\frac{\varepsilon_k}{(1-\varepsilon_k)} A_k (\sigma T_k^4 - q''_{o,k}) = \sum_{j=1}^N \frac{(q''_{o,k} - q''_{o,j})}{1/F_{k \rightarrow j} A_k} \quad (3.33)$$

จัดรูปสมการที่ (3.33) เพื่อให้ทั้ง 2 ฝั่งของสมการมีลักษณะคล้ายกันจะจัดได้เป็น

$$\frac{(\sigma T_k^4 - q''_{o,k})}{(1-\varepsilon_k)/\varepsilon_k A_k} = \sum_{j=1}^N \frac{(q''_{o,k} - q''_{o,j})}{1/F_{k \rightarrow j} A_k} \quad (3.34)$$

จะเห็นว่าพจน์แรกของสมการที่ (3.34) นั้นคือค่าของปริมาณฟลักซ์ของรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำที่มีอุณหภูมิผิว T_k ดังนี้

$$E_{b,k} = \sigma T_k^4 \quad (3.35)$$

เมื่อ $E_{b,k}$ คือปริมาณฟลักซ์ของรังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำที่อุณหภูมิผิว T_k (W/m^2)

เมื่อแทนค่าของสมการที่ (3.35) ลงในสมการที่ (3.34) จะได้รูปสมการเป็น

$$\frac{(E_{b,k} - q''_{o,k})}{(1-\varepsilon_k)/\varepsilon_k A_k} = \sum_{j=1}^N \frac{(q''_{o,k} - q''_{o,j})}{1/F_{k \rightarrow j} A_k} \quad (3.36)$$

ในสมการที่ (3.36) จะอยู่ในรูปของผลต่างของฟลักซ์รังสี หากพิจารณาตัวส่วนของสมการที่ (3.36) ทั้ง 2 ฝั่งของสมการจะพบว่าค่าตัวส่วนเหล่านี้เป็นค่าตัวลดทอนปริมาณการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นซึ่งในที่นี้จะอุปมาได้ว่าตัวส่วนที่ปรากฏในสมการที่ (3.36) นั้นเป็นค่าความต้านทานในการแผ่รังสีความร้อน

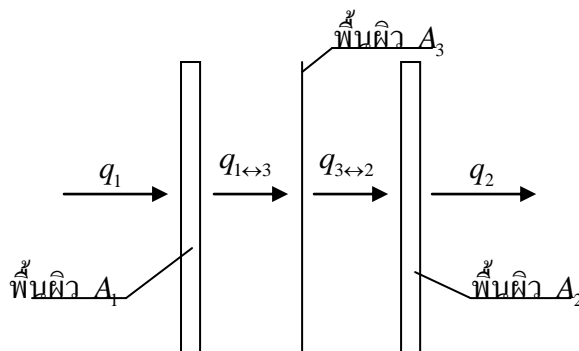
3.3.3.3 เกราะกำบังรังสี (Radiation shield)

ในการแผ่รังสีในเข็รับน้ำเหล็กนั้น โดยปกติแล้วรังสีจะถูกระบายออกสู่บรรยากาศผ่านทางปากเข็รับน้ำเหล็กเป็นหลัก แต่ในบางกรณีนั้นปากเข็รับน้ำเหล็กไม่ได้เปิดโล่งสู่บรรยากาศจะมีฝาครอบปิดบังการแผ่รังสีออกจากเข็รับน้ำเหล็ก

เพื่อที่จะเข้าใจถึงลักษณะการแผ่รังสีที่ผ่านสิ่งกีดขวางปิดบังไว้นั้น จะต้องทราบถึงการถ่ายเทรังสีในลักษณะที่มีเกราะกำบังรังสีในเบื้องต้นก่อน

เมื่อพิจารณาให้มีการแผ่รังสีจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2 โดยมีพื้นผิว A_3 ซึ่งประพุดิตัวเป็นเกราะกำบังรังสีอยู่ระหว่างพื้นผิว A_1 และ A_2 ดังรูปที่ 3-11 และมีความร้อนส่งออกจาก

พื้นผิว A_1 ในปริมาณ q_1 และเข้าสู่พื้นผิว A_2 ในปริมาณ q_2 ในขณะที่ระหว่างนั้นพื้นผิว A_1 จะต้องแผ่รังสีผ่านพื้นผิว A_3 ในปริมาณสุทธิ $q_{1\leftrightarrow 3}$ และพื้นผิว A_3 ซึ่งเป็นเกราะกำบังรังสีจะแผ่รังสีต่อไปยังพื้นผิว A_2 ในปริมาณสุทธิ $q_{3\leftrightarrow 2}$



รูปที่ 3-11 การแผ่รังสีจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2 โดยมีพื้นผิว A_3 เป็นเกราะกำบังรังสี

เมื่อพิจารณาพื้นผิว A_1 ด้วยสมการที่ (3.24) จะได้

$$q_1 = \frac{(\sigma T_1^4 - q''_{o,1})}{(1 - \varepsilon_1) / \varepsilon_1 A_1} \quad (3.37)$$

ในขณะที่พิจารณาพื้นผิว A_3 ด้วยสมการที่ (3.24) จะได้

$$q_3 = \frac{(\sigma T_3^4 - q''_{o,3,1})}{(1 - \varepsilon_{3,1}) / \varepsilon_{3,1} A_3} \quad (3.38)$$

เมื่อ $q''_{o,3,1}$ คือฟลักซ์ของรังสีที่ออกจากผิว A_3 ที่หันหน้าไปทางผิว A_1 (W/m^2)

$\varepsilon_{3,1}$ คือค่า Emissivity ของผิว A_3 ที่หันหน้าไปทางผิว A_1 (Dimensionless)

ในขณะที่ความร้อนที่ถ่ายเทระหว่างพื้นผิว A_1 และ A_3 สามารถพิจารณาด้วยสมการที่ (3.30) ดังนี้

$$q_{1\leftrightarrow 3} = \frac{(q''_{o,1} - q''_{o,3,1})}{1 / F_{1\rightarrow 3} A_1} \quad (3.39)$$

หากพิจารณาว่าความร้อนจากการแผ่รังสีออกจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_3 เท่านั้นดังนั้น

$$q_1 = -q_3 = q_{1\leftrightarrow 3} \quad (3.40)$$

ดังนั้นสมการที่ (3.37), (3.38) และ (3.39) สามารถเชื่อมความสัมพันธ์กันได้ดังนี้

$$\frac{(\sigma T_1^4 - q''_{o,1})}{(1-\varepsilon_1)/\varepsilon_1 A_1} = \frac{(q''_{o,3,1} - \sigma T_3^4)}{(1-\varepsilon_{3,1})/\varepsilon_{3,1} A_3} = \frac{(q''_{o,1} - q''_{o,3,1})}{1/F_{1 \rightarrow 3} A_1} \quad (3.41)$$

ซึ่งในลักษณะเดียวกันในการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีจากพื้นผิว A_3 ไปยังพื้นผิว A_2 จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{(\sigma T_3^4 - q''_{o,3,2})}{(1-\varepsilon_{3,2})/\varepsilon_{3,2} A_3} = \frac{(q''_{o,2} - \sigma T_2^4)}{(1-\varepsilon_2)/\varepsilon_2 A_2} = \frac{(q''_{o,3,2} - q''_{o,2})}{1/F_{3 \rightarrow 2} A_2} \quad (3.42)$$

เมื่อ $q''_{o,3,2}$ คือฟลักซ์ของรังสีที่ออกจากผิว A_3 ที่หันหน้าไปทางผิว A_2 (W/m^2)

$\varepsilon_{3,2}$ คือค่า Emissivity ของผิว A_3 ที่หันหน้าไปทางผิว A_2 (Dimensionless)

จากสมการที่ (3.41) และสมการที่ (3.42) เมื่อทราบถึงอุณหภูมิของพื้นผิว A_1, A_2 ตัวประกอบมองเห็นค่าต่างๆ และค่า Emissivity ของพื้นผิวต่างๆ จะสามารถแก้สมการเพื่อหาค่าฟลักซ์ที่ออกจากพื้นผิวต่างๆ ได้ และค่าฟลักซ์ต่างๆออกจากพื้นผิวต่างๆนั้นสามารถแทนค่าในสมการที่ (3.37 – 3.39) เพื่อหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากพื้นผิวหนึ่งไปยังพื้นผิวหนึ่งได้ และในทำนองเดียวกันก็สามารถใช้วิธีการเดียวกันในการหาค่า q_2 และ $q_{3 \leftrightarrow 2}$ ต่อไปได้

3.4 วงจรต้านทานความร้อน (Thermal circuit)

เนื่องจากในหัวข้อที่ 3.3.3.3 นั้นต้องแก้สมการที่ (3.41) และ (3.42) นั้นเป็นไปได้ด้วยความยุ่งยาก และเมื่อมีพื้นผิวเข้ามาเกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีมากขึ้นจะยากแก่การแก้สมการมากขึ้น การใช้วงจรต้านทานความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องสามารถช่วยให้การวิเคราะห์ปัญหาสามารถทำได้ง่ายขึ้น

วงจรต้านทานความร้อนนั้นมีแนวคิดเหมือนตามการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้ากระแสตรงตามกฎของโอห์มซึ่งตามกฎของโอห์มนั้นกระแสไฟฟ้าจะเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานและความต้านทานทางไฟฟ้าตัวต้านทานนั้นตามสมการที่ (3.43)

$$I_{elec} = \frac{E_{elec,2} - E_{elec,1}}{R_{elec}} \quad (3.43)$$

เมื่อ R_{elec} คือค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (Ω)

$E_{elec,2}$ คือแรงดันไฟฟ้าด้านหลังตัวต้านทาน (V)

$E_{elec,1}$ คือแรงดันไฟฟ้าด้านหน้าตัวต้านทาน (V)

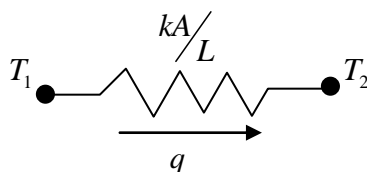
I_{elec} คือกระแสไฟฟ้าที่ผ่านตัวต้านทาน (A)

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ การนำความร้อนใน 1 มิติ ตามกฎของฟูเรียร์แล้วสามารถจัดรูปให้อยู่ในลักษณะเดียวกันกับกฎของโอห์มแล้วจะได้ลักษณะดังนี้

$$q = -kA \frac{T_2 - T_1}{L}$$

$$q = \frac{T_1 - T_2}{L/kA} \quad (3.44)$$

เมื่อเปรียบเทียบสมการที่ (3.43) และ (3.44) แล้วจะมีความคล้ายคลึงกันกัน โดยจะได้ว่า พจน์ L/kA ในสมการที่ (3.44) เปรียบได้กับตัวต้านทานทางไฟฟ้า (R_{elec}) ในสมการที่ (3.43) ซึ่งหากนำมาเขียนแผนภาพวงจรจะสามารถเขียนได้ดังรูปที่ 3-



รูปที่ 3-12 วงจรต้านทานความร้อนในการนำความร้อนใน 1 มิติ

เนื่องจากลักษณะที่สอดคล้องกัน พจน์ L/kA จึงถูกเรียกว่าค่าความต้านทานทางความร้อน

$$R_{therm} = L/kA \quad (3.45)$$

เมื่อ R_{therm} คือค่าความต้านทานทางความร้อน (K/W)

ในการทำงานเดียวกันตามกฎการทำความเย็นของนิวตันก็สามารถจัดรูปตัวต้านทานทางความร้อนได้เช่นกันดังนี้

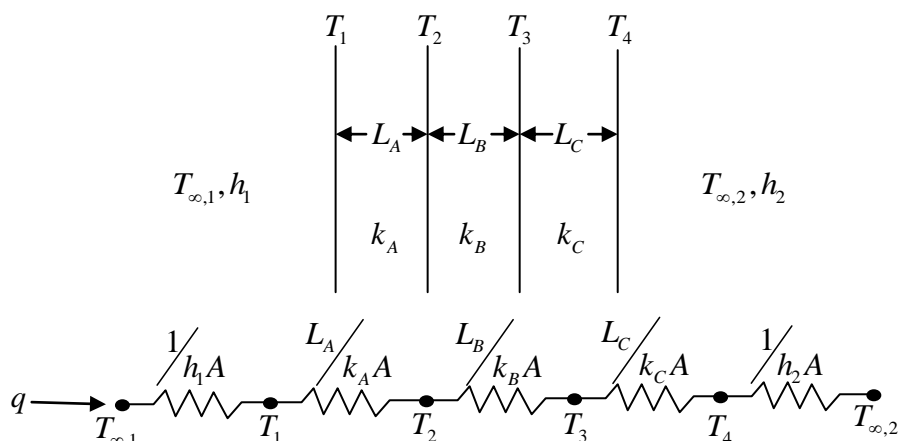
$$q = hA(T_1 - T_2)$$

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{1/hA} \quad (3.46)$$

ซึ่งในที่นี้ตัวต้านทานทางความร้อนคือพจน์ $1/hA$ นั่นเอง การจัดรูปในลักษณะนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาใน 1 มิติได้ง่ายขึ้น เช่นตัวอย่างในรูปที่ 3-13 เมื่อผนังประกอบด้วยวัสดุ 3 ชนิดเข้าด้วยกันโดยวัสดุแต่ละชนิดมีค่าการนำความร้อนที่แตกต่างกัน โดยที่ผนังทั้ง 2 ด้านมีการพาความร้อนออกไปด้วยอากาศที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน

จะพบว่าเมื่อพิจารณาตามลักษณะวงจรต้านทานความร้อนที่ปรากฏในรูปที่ 3-13 สามารถสรุปเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$q = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,2})}{\sum R_{therm}} \quad (3.47)$$



รูปที่ 3-13 ตัวอย่างวงจรต้านทานความร้อนผสมระหว่างการนำและการพาความร้อนใน 1 มิติ

ซึ่งค่าความต้านทานรวมทางความร้อนของวงจรต้านทานความร้อนนี้คือ

$$\sum R_{therm} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_A}{k_A A} + \frac{L_B}{k_B A} + \frac{L_C}{k_C A} + \frac{1}{h_2 A} \quad (3.48)$$

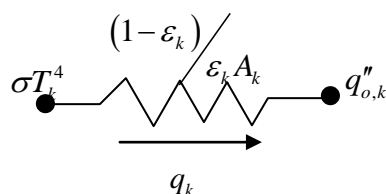
ตลอดที่ผ่านมาจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความต้านทานทางความร้อนนั้นจะเป็นสมบัติและลักษณะของตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นการใช้วงจรต้านทานความร้อนนี้ หากทราบถึงสมบัติ ลักษณะขนาดของตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน และอุณหภูมิบางจุดก็สามารถหาปริมาณการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ เช่นในสมการที่ (3.47) หากทราบถึงอุณหภูมิของอากาศในฝั่งซ้ายและฝั่งขวาของผนัง ก็สามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ออกไปได้

อย่างไรก็ดีส่วนที่นำเสนอขึ้นนี้มีเฉพาะการนำความร้อนและการพาความร้อน แต่ในความเป็นจริงโดยเฉพาะการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการผลิตเหล็กนั้นการแผ่รังสีความร้อนยังเป็นอีกวิธีการในการถ่ายเทความร้อนที่มีบทบาทมาก แต่ลักษณะของการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนนั้นลักษณะของสมการจะแตกต่างจากการนำและการพาความร้อนที่การแผ่รังสีความร้อนนั้นเป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนด้วยการนำและการพาความร้อนมีลักษณะเชิงเส้น การพิจารณาที่แตกต่างออกไปเล็กน้อย

หากพิจารณาจากสมการที่ (3.24) จะเห็นว่าสามารถจัดรูปให้อยู่ในลักษณะที่คล้ายคลึงกับกฎของโอห์มในทางไฟฟ้าได้ดังนี้

$$q_k = \frac{(\sigma T_k^4 - q_{o,k}'')}{\frac{(1 - \epsilon_k)}{\epsilon_k A_k}} \quad (3.49)$$

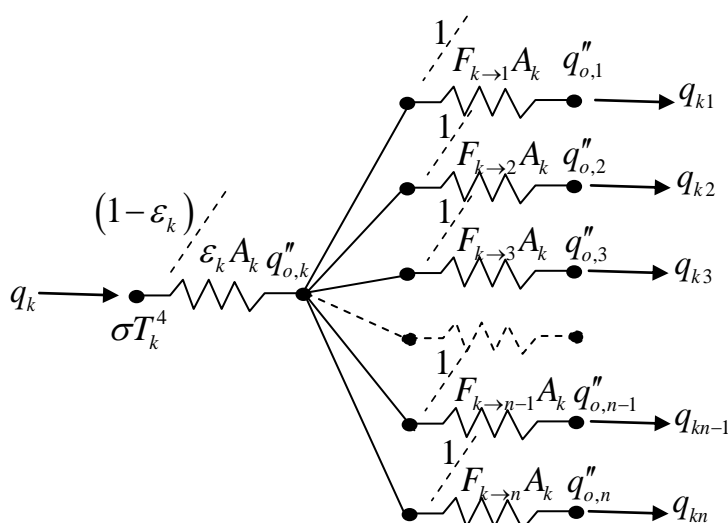
ซึ่งในที่นี้จะเห็นได้ชัดเจนว่าในฝั่งขวามือของสมการนั้นพจน์ที่เป็นตัวเศษต่างก็เป็นพลักซ์ทางความร้อนด้วยกันทั้งคู่ ส่วนตัวส่วนก็เป็นพจน์ที่ขึ้นกับสมบัติและลักษณะของพื้นผิวที่มีการแผ่รังสี จากสมการที่ (3.49) จึงสามารถนำมาเขียนเป็นวงจรต้านทานความร้อนได้ดังรูปที่ 3 - 14



รูปที่ 3-14 วงจรต้านทานความร้อนในการแผ่รังสีความร้อน

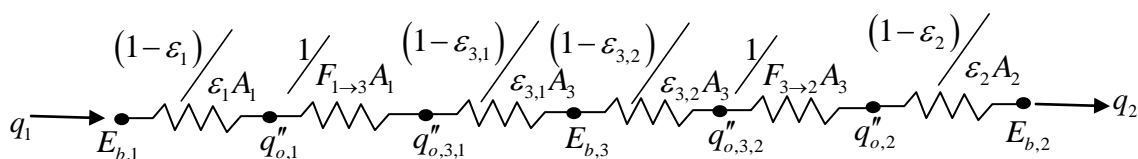
จะเห็นได้ว่าในวงจรต้านทานความร้อนค่าความต้านทานทางความร้อนที่ปรากฏในการแผ่รังสีออกจากพื้นผิวนั้นขึ้นอยู่กับค่า Emissivity ของพื้นผิวนั้น ส่วนผลต่างของฟลักซ์ของพื้นผิวและฟลักซ์ของรังสีที่ออกจากพื้นผิว k ใดๆ นั้นมีลักษณะเทียบเคียงกับผลต่างของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในวงจรก็เปรียบได้ดังความร้อนที่ไหลเข้าหรือออกจากพื้นผิว

แต่ในรูปที่ 3 – 14 เป็นการจำลองจากสมการที่ (3.49) เท่านั้นซึ่งนอกจากสมการที่ (3.49) ยังมีสมการที่ (3.32) ที่ใช้สำหรับคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าหรือออกจากพื้นผิว ซึ่งเมื่อนำสมการที่ (3.32) มาวิเคราะห์จะพบว่าทางฝั่งขวาของสมการตัวส่วนก็เป็นผลต่างระหว่างฟลักซ์ของรังสีที่ออกจากพื้นผิว k ไปยัง j ซึ่งในที่นี้สามารถเทียบได้กับผลต่างของแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทานในกฎของโอห์มนั่นเอง และตัวส่วนเทียบได้กับตัวต้านทานในการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งสามารถแทนลักษณะของวงจรได้ดังฝั่งขวาของวงจรในรูปที่ 3 – 15 ซึ่งจะทำให้สามารถวิเคราะห์ได้เพิ่มเติมว่ารังสีที่ออกจากพื้นผิว k ไปยังพื้นผิว j ต่างๆ n พื้นผิวนั้นค่าความต้านทานทางความร้อนจะแปรผกผันกับตัวประกอบการมองเห็น

รูปที่ 3-15 วงจรต้านทานความร้อนของพื้นผิว k ในพื้นที่ปิดล้อมด้วยพื้นผิวทั้งหมด n ผิว

ซึ่งหากพิจารณาต่อถึงสมการที่ (3.34) ที่ประกอบขึ้นจากสมการที่ (3.24) และสมการที่ (3.32) จะสามารถนำมาเขียนเป็นลักษณะของวงจรต้านทานความร้อนดังรูปที่ 3 – 15

การวิเคราะห์การแผ่รังสีความร้อนในลักษณะดังกล่าวนี้เมื่อนำไปประยุกต์ใช้สามารถสร้างความสะดวกสบายในการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งในการแผ่รังสีความร้อนได้เช่นกรณีที่มีเกราะกำบังรังสีในหัวข้อ 3.3.3.3 สมการที่ (3.41) และ (3.42) สามารถนำมาสร้างเป็นวงจรต้านทานความร้อนได้ดังรูปที่ 3 – 16



รูปที่ 3-16 วงจรต้านทานความร้อนการแผ่รังสีจากผิว A_1 ไปยัง A_2 กรณีที่มีเกราะกำบังความร้อน

จะสามารถเขียนสมการเพื่อหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2 โดยการแผ่รังสีความร้อนได้ดังนี้

$$q_{1 \rightarrow 2} = \frac{(E_{b,1} - E_{b,2})}{\frac{(1-\varepsilon_1)}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{F_{1 \rightarrow 3} A_1} + \frac{(1-\varepsilon_{3,1})}{\varepsilon_{3,1} A_3} + \frac{(1-\varepsilon_{3,2})}{\varepsilon_{3,2} A_3} + \frac{1}{F_{3 \rightarrow 2} A_3} + \frac{(1-\varepsilon_2)}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (3.50)$$

สมการที่ (3.50) แสดงให้เห็นว่าการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากพื้นผิว A_1 ไปยังพื้นผิว A_2 โดยการแผ่รังสีความร้อนสามารถหาค่าได้โดยไม่ต้องทราบถึงอุณหภูมิของเกราะกำบังอุณหภูมิเลย ทราบเพียงสมบัติและลักษณะรูปทรงก็เพียงพอสำหรับการคำนวณ ซึ่งเป็นประโยชน์มากแก่การคำนวณและวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

จะเห็นว่าลักษณะการสร้างวงจรในรูปที่ 3 – 15 นี้จะแตกต่างจากวงจรการนำความร้อนและการพาความร้อนใน 1 มิติ ดังนั้นในการพิจารณาเลือกใช้วงจรทั้ง 2 แบบที่กล่าวถึงในที่นี้ต้องใช้ความเข้าใจและแยกแยะการใช้งานตามแต่จุดประสงค์การวิเคราะห์นั่นเอง

ข้อดีของการสร้างวงจรต้านทานความร้อนนั้นคือง่ายต่อการวิเคราะห์ลักษณะการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางต่างๆ แต่การสร้างวงจรต้านทานความร้อนก็มีข้อจำกัดคือสามารถสร้างได้เฉพาะการพิจารณาการถ่ายเทร้อนใน 1 มิติเท่านั้นและสร้างวงจรให้ประกอบไปด้วยการแผ่รังสีความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนยังมีลักษณะที่แตกต่างกันอาจก่อให้เกิดความสับสนได้

3.5 การประเมินประสิทธิภาพเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและการเผาไหม้เพื่อการอุ่นน้ำรับน้ำหลัก

ในการควบคุมการอุ่นน้ำรับน้ำหลักให้สัมพันธ์กับการใช้เตาหลอมด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของเตาหลอมหลักและหัวเผาเพื่อการอุ่นน้ำรับน้ำหลักร่วม

ด้วย เนื่องจากระบบควบคุมที่จะสามารถทำให้ประหยัดพลังงานมากขึ้นจะต้องเลือกใช้พลังงานกับอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างคุ้มค่า ซึ่งวิธีการที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพอุปกรณ์ทั้งสองแสดงไว้ดังนี้

3.5.1 การประเมินประสิทธิภาพเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ในการประเมินประสิทธิภาพของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้น จะใช้การประเมินจากพลังงานที่เหล็กหรือเหล็กเหลวได้รับต่อปริมาณพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหล็กภายในเตาหลอมทั้งหมดดังสมการที่ (3.51)

$$\eta_{EAF} = \frac{E_{st}}{E_{EAF,in}} \quad (3.51)$$

เมื่อ η_{EAF} คือประสิทธิภาพเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Dimensionless)

E_{st} คือพลังงานที่เหล็กหรือเหล็กเหลวได้รับต่อตันน้ำเหล็ก (MJ/t)

$E_{EAF,in}$ คือพลังงานที่ใช้ในเตาหลอมทั้งหมดต่อตันน้ำเหล็ก (MJ/t)

ดังนั้นในการพิจารณาประสิทธิภาพเตาหลอมนั้นจะต้องทราบถึงพลังงานที่น้ำเหล็กได้รับและพลังงานที่ใช้ในเตาหลอมเหล็ก ซึ่งจะสามารถประเมินได้โดยง่ายด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

3.5.1.1 พลังงานที่เหล็กหรือเหล็กเหลวได้รับ

พลังงานที่เหล็กหรือเหล็กเหลวได้รับจะพิจารณาจาก พลังงานที่เหล็กมีในสถานะเริ่มต้น ลบออกจากพลังงานที่เหล็กเหลวมีในสถานะสุดท้าย เนื่องจากเหล็กที่นำมาหลอมภายในเตาหลอม จะต้องมีการเปลี่ยนสถานะ จึงต้องมีการรวมปริมาณความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของเหล็กเข้าไปด้วย

$$\begin{aligned} E_{st} &= m_{st}c_{p,s}(T_l - T_i) + m_{st}l + m_{st}c_{p,l}(T_f - T_l) \\ &= m_{st} \{c_{p,s}(T_l - T_i) + l + c_{p,l}(T_f - T_l)\} \end{aligned} \quad (3.52)$$

เมื่อ m_{st} คือมวลของน้ำเหล็กในรอบการหลอม (kg)

$c_{p,s}$ คือค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของเหล็ก ($kJ/kg \cdot K$)

$c_{p,l}$ คือค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ของน้ำเหล็ก ($kJ/kg \cdot K$)

T_i คืออุณหภูมิเหล็กขณะใส่ลงเตาหลอม (K)

T_l คืออุณหภูมิหลอมเหลวของเหล็ก (K)

T_f คืออุณหภูมิเทน้ำเหล็ก (K)

1 คือค่าความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของเหล็ก (kJ/kg)

3.5.1.2 พลังงานที่ใช้ในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ในการประเมินประสิทธิภาพสิ่งที่ประเมินได้ยากคือปริมาณพลังงานที่ใช้ในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเนื่องจากพลังงานที่ใช้ในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้นประกอบไปด้วยพลังงานจากไฟฟ้าออกซิเจน และหัวเผาเพื่อความสะดวกในการพิจารณา การศึกษานี้จะใช้วิธีการประเมินการใช้พลังงานตามหลักสมการของ Köhler (1992) ดังนี้

$$W_R = 300 \frac{kWh}{t} + 900 \frac{kWh}{t} \left(\frac{G_E}{G_A} - 1 \right) + 1600 \frac{kWh}{t} \frac{G_Z}{G_A} + 0.7 \frac{kWh}{t \cdot K} (T_A - 1600^\circ C) + 0.85 \frac{kWh}{t \cdot \min} t_c - \left\{ 8 \frac{kWh}{m^3} M_G + 4.3 \frac{kWh}{m^3} M_L + 2.8 \frac{kWh}{m^3} M_N \right\} \quad (3.53)$$

เมื่อ W_R คือปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเตาหลอมแต่ละรอบการหลอม (kWh/t)

G_E คือมวลของเศษเหล็กที่ใส่ลงในเตาหลอม (t)

G_A คือมวลของน้ำเหล็กที่เทได้จากเตาหลอม (t)

G_Z คือมวลของสารที่เติมลงในน้ำเหล็ก (t)

T_A คืออุณหภูมิเทน้ำเหล็ก (K)

t_c คือรอบเวลาการเทน้ำเหล็กรอบหนึ่งถึงอีกรอบหนึ่ง (min)

M_G คือปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติในหัวเผา (m^3/t)

M_L คือปริมาณออกซิเจนที่ใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (m^3/t)

M_N คือปริมาณออกซิเจนที่ใช้เพื่อทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ (m^3/t)

จากสมการที่ (3.53) เห็นได้ชัดเจนว่าปริมาณไฟฟ้าที่มากขึ้นเมื่อสารที่เติมลงในน้ำเหล็ก รอบเวลาในการเทน้ำเหล็กถึงการเทน้ำเหล็กอีกรอบ และอุณหภูมิในการเทน้ำเหล็ก และแปรผกผันกับปริมาณน้ำเหล็กที่เทได้ ปริมาณการใช้แก๊สธรรมชาติ และออกซิเจน

จากสมการนี้จะพบว่าพจน์ที่แปรผกผันกับปริมาณการใช้ไฟฟ้านั้นจะเป็นพจน์ที่ แสดงค่าเป็นลบเนื่องจากสมการที่ (3.53) นี้จะพิจารณาจากพลังงานที่ใช้ทั้งหมดถูกลบออกด้วยพลังงานอื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการเช่นแก๊สธรรมชาติ และออกซิเจน ดังนั้นหากต้องการทราบถึงพลังงานที่ใช้

ทั้งหมดภายในกระบวนการทำด้วยการย้ายข้างสมการ นำพจน์ที่มีค่าเป็นลบไปไว้ยังฝั่งขวาของสมการจะได้เป็นพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในเตาหลอม

$$E_{EAF,m} = W_R + 8 \frac{kWh}{m^3} M_G + 4.3 \frac{kWh}{m^3} M_L + 2.8 \frac{kWh}{m^3} M_N$$

$$= 300 \frac{kWh}{t} + 900 \frac{kWh}{t} \left(\frac{G_E}{G_A} - 1 \right) + 1600 \frac{kWh}{t} \frac{G_Z}{G_A} + 0.7 \frac{kWh}{t \cdot K} (T_A - 1600^\circ C) + 0.85 \frac{kWh}{t \cdot \min} t_c \quad (3.54)$$

จากสมการที่ (3.54) ทำให้เราเห็นชัดเจนว่าพลังงานที่ใช้ในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้นจะประกอบไปด้วยพลังงานไฟฟ้า (W_R) พลังงานจากแก๊สธรรมชาติ (M_G) พลังงานจากออกซิเจนที่ใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (M_L) และพลังงานจากออกซิเจนที่ใช้ทำปฏิกิริยากับคาร์บอนมอนอกไซด์ (M_N)

ส่วนอีกส่วนของสมการที่ (3.12) นั้นจะสัมพันธ์กับปัจจัยการใช้พลังงานซึ่งขึ้นอยู่กับมวลของเศษเหล็กที่ใส่ลงไปในเตาหลอม (G_E) มวลของน้ำเหล็กที่เทได้จากเตาหลอม (G_A) มวลของสารที่เติมลงในน้ำเหล็ก (G_Z) อุณหภูมิเทน้ำเหล็ก (T_A) และรอบเวลาการเทน้ำเหล็กรอบหนึ่งถึงอีกรอบหนึ่ง (t_c)

จากรูปสมการของ Köhle นี้ ทำให้สะดวกต่อการหาพลังงานที่ต้องใช้ในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามากเพียงใช้ข้อมูลปริมาณพลังงานที่ใช้ หรือปัจจัยการใช้พลังงานก็สามารถทำนายพลังงานที่ใช้ทั้งหมดภายในเตาหลอมได้

3.5.2 การประเมินประสิทธิภาพเผาไหม้เพื่อการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นอีกขั้นตอนที่มีการใช้พลังงานภายในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า การประเมินประสิทธิภาพในการศึกษานี้จะใช้การคำนวณจากสัดส่วนพลังงานที่สะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (Energy Content) ต่อพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมด

$$\eta_{EAF} = \frac{E_{ladle}}{E_{fuel}} \quad (3.55)$$

ซึ่งปริมาณพลังงานที่สะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (E_{ladle}) และพลังงานที่ใช้ในการเผาไหม้ (E_{fuel}) สามารถหาได้จากนี้

3.5.2.1 พลังงานที่สะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก

พลังงานที่สะสมภายในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะสามารถคำนวณหาได้จาก

$$E_{ladle} = E_{ladle,B} + E_{ladle,S} \quad (3.56)$$

เมื่อ $E_{ladle,B}$ คือพลังงานที่สะสมในผนังด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็ก (J)

$E_{ladle,S}$ คือพลังงานที่สะสมในผนังด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก (J)

พลังงานแต่ละตัวสามารถแจกแจงเป็นปฏิยานุพันธ์ของฟังก์ชันที่ขึ้นกับมวล ค่าความร้อนจำเพาะ และการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กได้ดังนี้

$$E_{ladle,B} = \int_0^{l_{re}} c_{p,re} T_{re,B}(l) dm_{re,B} + \int_{l_{re}}^{l_{sh}} c_{p,sh} T_{sh,B}(l) dm_{sh,B} \quad (3.57)$$

$$E_{ladle,S} = \int_0^{r_{re}} c_{p,re} T_{re,S}(r) dm_{re,S} + \int_{r_{re}}^{r_{sh}} c_{p,sh} T_{sh,S}(r) dm_{sh,S} \quad (3.58)$$

เมื่อ $c_{p,re}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุทนไฟ (J/kg-K)

$c_{p,sh}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของชั้นเปลือกเหล็ก (J/kg-K)

$m_{re,B}$ คือมวลของวัสดุทนไฟส่วนล่างของเบ้ารับน้ำเหล็ก (kg)

$m_{sh,B}$ คือมวลของชั้นเปลือกเหล็กส่วนล่างของเบ้ารับน้ำเหล็ก (kg)

$m_{re,S}$ คือมวลของวัสดุทนไฟส่วนข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก (kg)

$m_{sh,S}$ คือมวลของชั้นเปลือกเหล็กส่วนข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก (kg)

$T_{re,B}$ คือฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิในวัสดุทนไฟส่วนล่างเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)

$T_{sh,B}$ คือฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิชั้นเปลือกเหล็กส่วนล่างเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)

$T_{re,S}$ คือฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิในวัสดุทนไฟส่วนข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)

$T_{sh,S}$ คือฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิชั้นเปลือกเหล็กส่วนข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)

l_{re} คือความหนาของวัสดุทนไฟส่วนล่างเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

l_{sh} คือความหนาของชั้นเปลือกเหล็กส่วนล่างเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

r_{re} คือความหนาของวัสดุทนไฟส่วนข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

r_{sh} คือความหนาของชั้นเปลือกเหล็กส่วนข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

3.5.2.2 พลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมด

พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้จะหาจากปริมาตรเชื้อเพลิงที่ใช้คูณกับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง

$$E_{fuel} = V_{fuel} \times LHV \quad (3.59)$$

เมื่อ V_{fuel} คือปริมาตรเชื้อเพลิงที่ใช้ทั้งหมดในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^3)

LHV คือค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (MJ/litre)

บทที่ 4

การออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

หลักการของระบบควบคุมในการศึกษาวิจัย และออกแบบระบบควบคุมนี้คือการปรับลดอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กให้มีความสัมพันธ์กับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่นำมาจากถ่านน้ำเหล็กเพื่อไปเทออกยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่องโดยไม่สร้างความเสียหายให้แก่กระบวนการทำงาน โดยเฉพาะน้ำเหล็กที่เป็นวัตถุดิบหลักจะต้องยังคงรักษาอุณหภูมิไม่ให้ต่ำเกินไปและจับตัวแข็งก่อนจะเข้าสู่แบบหล่อ ด้วยเหตุนี้การทราบถึงสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการควบคุมการทำงานของกระบวนการให้เกิดการประหยัดพลังงานด้วยเช่นกัน

ในการออกแบบระบบควบคุมจำเป็นต้องอาศัยการทำนายสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กในเงื่อนไขต่างๆ ได้ เพื่อให้ทราบถึงสถานะทางความร้อนของทั้งสองในอนาคตว่าเพียงพอต่อการทำงานมากน้อยเพียงใด ซึ่งการทำนายสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นต้องทำนายผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความใกล้เคียงกับสถานะการปฏิบัติงาน

การออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิจัยนี้จะแสดงการพิจารณาของพลังงานภายในกระบวนการทั้งหมดในภาพรวม และแบ่งการพิจารณาลักษณะของแบบจำลองออกเป็นขั้นตอนต่างๆ อันได้แก่ขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ขั้นตอนการรอรับน้ำเหล็ก ขั้นตอนที่เบ้ารับน้ำเหล็กบรรจุน้ำเหล็กและขนถ่ายไปยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง ขั้นตอนการเทน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก และขั้นตอนการนำแสลคที่เหลืออยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กออกไปเททิ้ง โดยแบบจำลองในขั้นตอนต่างๆดังกล่าวนี้จะอธิบายการออกแบบแบบจำลองต่อไปในบทนี้

4.1 การวิเคราะห์พลังงานภายในกระบวนการผลิตเหล็ก

เพื่อที่จะทำนายอุณหภูมิที่ต้องใช้ในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จะต้องทราบถึงอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กที่เตาหลอมจะผลิต ซึ่งหากจะทราบถึงอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กที่จำเป็นจะต้องเทออกจากเตาหลอม อุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กนั้นจะต้องมีความสอดคล้องกับการลดลงของอุณหภูมิระหว่าง กระบวนการต่างๆด้วย ในการศึกษาจึงต้องวิเคราะห์พลังงานในกระบวนการเพื่อทำนายอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กที่ต้องการจะเท

กำหนดให้ระบบเป็นเบ้ารับน้ำเหล็ก และเหล็กเหลว สมการพลังงานจะเป็น

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE \quad (4.1)$$

เมื่อไม่มีการขยายตัวของระบบ การเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์มีค่าน้อยมาก ดังนั้น

$$\Delta U = (U_{steel,2} + U_{ladle,2}) - (U_{steel,1} + U_{ladle,1}) \quad (4.2)$$

และ

$$Q = Q_{holding,1} + Q_{trap} + Q_{trans} + Q_{holding,2} \quad (4.3)$$

ทำให้สมการพลังงานกลายเป็น

$$U_{steel,1} = (U_{steel,2} + U_{ladle,2}) - (U_{ladle,1}) - Q_{holding,1} - Q_{trap} - Q_{trans} - Q_{holding,2} \quad (4.4)$$

- เมื่อ
- $U_{steel,1}$ แทนพลังงานในน้ำเหล็กก่อนเทลงเบ้ารับน้ำเหล็ก (kJ)
 - $U_{steel,2}$ แทนพลังงานในน้ำเหล็กก่อนเทลงอ่างรับน้ำเหล็ก (kJ)
 - $U_{ladle,1}$ แทนพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่ออุ่นเสร็จ (kJ)
 - $U_{ladle,2}$ แทนพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อเทน้ำเหล็กลงอ่างน้ำเหล็ก (kJ)
 - $Q_{holding,1}$ แทนพลังงานที่สูญเสียในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการรอเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (kJ)
 - Q_{trap} แทนพลังงานที่สูญเสียในน้ำเหล็กระหว่างการเทลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก (kJ)
 - Q_{trans} แทนพลังงานที่สูญเสียในระบบระหว่างการขนถ่ายไปยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง (kJ)
 - $Q_{holding,2}$ แทนพลังงานที่สูญเสียในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการรอเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก (kJ)

ซึ่งค่าพลังงานในน้ำเหล็กก่อนเทลงเบ้ารับน้ำเหล็ก ($U_{steel,1}$) สามารถหาได้จาก

$$U_{steel,1} = m_{steel} c_{p,steel} T_1 \quad (4.5)$$

- เมื่อ
- m_{steel} แทนมวลของน้ำเหล็ก (kg)
 - $c_{p,steel}$ แทนความร้อนจำเพาะของน้ำเหล็ก (kJ/kg · K)
 - T_1 แทนอุณหภูมิน้ำเหล็ก ขณะเทออกจากเตาหลอม (K)

พลังงานในน้ำเหล็กก่อนเทลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ($U_{steel,2}$) สามารถหาได้จาก

$$U_{steel,2} = m_{steel} c_{p,steel} T_2 \quad (4.6)$$

เมื่อ T_1 แทนอุณหภูมิน้ำเหล็ก ขณะเทลงอ่างรับน้ำเหล็ก (K)

ส่วนพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก (U_{ladle}) สามารถหาได้จาก

$$U_{ladle} = U_{ladle,sw} + U_{ladle,bw} \quad (4.7)$$

เมื่อ $U_{ladle,sw}$ แทนพลังงานสะสมในผนังของเบ้ารับน้ำเหล็ก (kJ)

$U_{ladle,bw}$ แทนพลังงานสะสมในก้นของเบ้ารับน้ำเหล็ก (kJ)

ซึ่งพลังงานทั้ง 2 ส่วนนี้สามารถแจกแจงได้เป็น

$$U_{ladle,sw} = \int_{r_m}^{r_{out}} c_{p,ladle} T(r) dm_{ladle} \quad (4.8)$$

$$U_{ladle,bw} = \int_0^l c_{p,ladle} T(l) dm_{ladle} \quad (4.9)$$

เมื่อ $c_{p,ladle}$ แทนความร้อนจำเพาะของเบ้ารับน้ำเหล็ก ($kJ/kg \cdot K$)

m_{ladle} แทนมวลของเบ้ารับน้ำเหล็ก (kg)

$T(r)$ แทนการแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)

$T(l)$ แทนการแจกแจงอุณหภูมิในก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)

จากสมการที่ (4.4) พบว่าพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่ออุ่นเสร็จ ($U_{ladle,1}$) เมื่อมีค่ามากขึ้นจะสามารถลดพลังงานในน้ำเหล็กก่อนการเทลงเบ้ารับน้ำเหล็ก ($U_{steel,1}$) ได้ เมื่อพลังงานในน้ำเหล็ก ขณะเทลงอ่างรับน้ำเหล็ก ($U_{steel,2}$) ต้องได้ค่าที่ทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กเหมาะสมแก่กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง ดังนั้นค่า $U_{steel,2}$ จะถูกควบคุมให้มีค่าอยู่ในช่วงแคบๆ เท่านั้น และพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อเทน้ำเหล็กลงอ่างน้ำเหล็ก ($U_{ladle,2}$) จะเป็นผลจากพลังงาน $U_{ladle,1}$, $U_{steel,1}$ และพลังงานที่สูญเสียต่างๆ ($Q_{holding,1}$, Q_{trap} , Q_{trans} , $Q_{holding,2}$) ซึ่งพลังงานสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กนี้จะเป็นฟังก์ชันของการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ($T(r)$, $T(l)$)

ดังนั้นการศึกษานี้ต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กและอุณหภูมิน้ำเหล็กกับการสูญเสียความร้อนต่างๆ เพื่อปรากฏเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก และอุณหภูมิของน้ำเหล็กในสถานะต่างๆ นำมาคำนวณหาพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และการหลอมเหล็ก

รายละเอียดการทำนายอุณหภูมิในเข้รับน้ำเหล็กและอุณหภูมิน้ำเหล็กจะต้องแบ่งการพิจารณาการถ่ายเทความร้อนและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเหล็กและเข้รับน้ำเหล็กออกเป็นขั้นตอนต่างๆ เพื่อความสะดวกในการพิจารณาดังแสดงในหัวข้อถัดไป

4.2 การนำความร้อนของผนังข้างและผนังก้นภายในเข้รับน้ำเหล็ก

ในการพิจารณาสภาวะทางความร้อนของเข้รับน้ำเหล็กนั้นจะต้องทราบถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในว่ามี การแจกแจงอุณหภูมิภายในตามระดับความลึกต่างๆ จึงจะสามารถคำนวณหาปริมาณพลังงานภายในที่สะสมภายในผนังเข้รับน้ำเหล็กได้ตามสมการที่ (4.8) และ (4.9) แต่การแจกแจงอุณหภูมิตามระดับความลึกนั้นก็ต้องเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาขึ้นกับสภาพการนำความร้อนของผนังเข้รับน้ำเหล็ก

เมื่อพิจารณาเส้นประเป็นปริมาตรควบคุมในรูปที่ 4 - 1 จะมีความร้อนไหลผ่านผนังเข้รับน้ำเหล็กเข้ามาในปริมาตรควบคุม (q_{in}) และส่งผ่านเข้าไปในผนังเข้รับน้ำเหล็กด้วยผ่านชั้นทำงาน (Working Lining) ชั้นปลอดภัย (Safety Lining) และเปลือกเหล็ก (Steel Shell) ด้วยการนำความร้อน (q_{cond}) และถ่ายเทออกจากผิวเปลือกเหล็กของเข้รับน้ำเหล็กด้วยการพาความร้อน (q_{conv}) และการแผ่รังสีความร้อน (q_{rad}) ซึ่งการนำความร้อนในผนังเข้รับน้ำเหล็กนั้นสามารถหาค่าปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านได้ด้วยการใช้กฎของฟูเรียร์ ตามสมการที่ (3.1) จะได้ว่า

$$Q_{cond} = -kA_{cond} \nabla T \quad (4.10)$$

หากนำการนำความร้อนในสมการที่ (4.10) มาพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในปริมาตรควบคุมจะมีสมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุมนี้ตามสมการที่ (3.2) ดังนี้

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (4.11)$$

ส่วนความร้อนที่ถ่ายเทออกจากผิวเปลือกเหล็กผ่านการพาความร้อนสามารถคำนวณหาจากกฎการทำความเย็นของนิวตัน ตามสมการที่ (3.3) ดังนี้

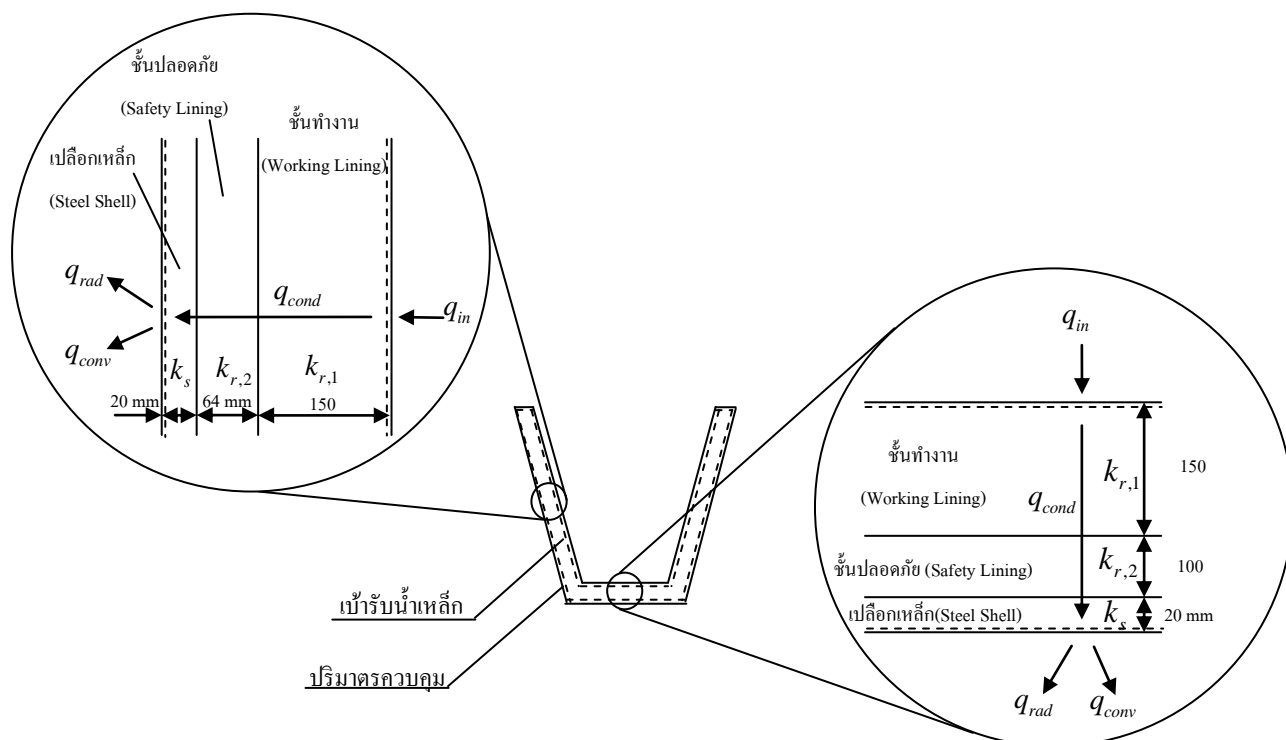
$$Q_{conv} = hA(T_i - T_f) \quad (4.12)$$

ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนหาได้จากการสมการที่ (3.4 - 3.7) ร่วมกันคำนวณ ส่วนการแผ่รังสีความร้อนนั้นที่บริเวณผิวเปลือกเหล็กถือเป็นพื้นที่เปิดโล่งออกสู่บรรยากาศในทันทีจึง

เสมือนให้บรรยากาศโดยรอบประพุดตัวเหมือนวัตถุดำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศที่พิจารณาซึ่งในที่นี้คือ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งในลักษณะนี้จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.8) ดังนี้

$$Q_{rad} = \epsilon \sigma A (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (4.13)$$

จากสมการที่ (4.11) ถึงสมการที่ (4.13) นั้นสามารถนำไปอธิบายปริมาณการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังข้างและผนังกันภายในเบ้ารับน้ำเหล็กได้ แต่ยังไม่เพียงพอแก่การหาปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ผนังข้างและผนังกันภายในเบ้ารับน้ำเหล็กได้ เนื่องจากปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้ามาภายในปริมาตรควบคุมนั้นขึ้นอยู่กับกรณีการใช้งานเบ้ารับน้ำเหล็กในกระบวนการต่างๆ นั่นคือเงื่อนไขขอบของการวิเคราะห์การถ่ายเทพลังงานของปริมาตรควบคุมที่กำหนดไว้ในรูปที่ 4-1 นั้นจะต้องพิจารณาเป็นค่าที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะเป็นการแจกแจงการสร้างเงื่อนไขค่าขอบที่นำมาพิจารณาร่วมกับสมการการนำความร้อนและเงื่อนไขค่าขอบของการถ่ายเทความร้อนออกจากปริมาตรควบคุมซึ่งได้แสดงไว้ในสมการที่ (4.11 – 4.13)



รูปที่ 4-1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังข้างและผนังกันภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในปริมาตรควบคุม

4.3 แบบจำลองระหว่างกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยปกติแล้ว จะใช้การอุ่นด้วยการใช้หัวเผาสร้างเปลวไฟภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นนั้นหัวเผาจะต้องมีการใช้เชื้อเพลิงและอากาศสำหรับการเผาไหม้ในการสันดาป และได้ผลิตภัณฑ์จากการสันดาปเป็นไอเสียที่อยู่ในลักษณะของแก๊สร้อนและถูกปล่อยออกทางปล่องไอเสียลักษณะดังรูปที่ 4 – 2 ดังนั้นส่วนที่สำคัญของขั้นตอนการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กคือการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก และการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนไปยังพื้นผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก

การออกแบบแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนั้น J. Jaroonsaratul และคณะ (2009) ได้นำเสนอการใช้แบบจำลองทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กของ Mohanty และ Satayayut (1992) ร่วมกับค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ของแก๊สร้อนจากการเผาไหม้ตามการศึกษาของ Wimpress (1978) ผลที่ได้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองมาก ในการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการนี้จึงยึดแนวทางของ Jaroonsaratul และคณะ (2009) เนื่องจากการทดลองของ Jaroonsaratul และคณะทำร่วมกับโรงงานอุตสาหกรรมเดียวกันกับการศึกษานี้

แต่ข้อแตกต่างระหว่างแบบจำลองที่ Jaroonsaratul และคณะ (2009) ใช้กับแบบจำลองของ Mohanty และ Satayayut (1992) คืออุณหภูมิไอเสีย ในแบบจำลองของ Mohanty และ Satayayut (1992) จะใช้อุณหภูมิไอเสียที่ได้จากการคำนวณ แต่ในแบบจำลองของ Jaroonsaratul และคณะ (2009) จะใช้อุณหภูมิไอเสียที่ได้จากการเก็บข้อมูลระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ในแบบจำลองที่ออกแบบในการศึกษานี้ประกอบไปด้วยข้อสมมติระบบดังนี้

1. ในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ
2. เนื่องจากอัตราส่วนรัศมีทรงกระบอกของเบ้ารับน้ำเหล็กมากกว่าความหนาของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กถึง 10 เท่า จึงให้ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นแผ่นราบเรียบ
3. เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงการถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากการแผ่รังสีความร้อนเป็นหลัก การถ่ายเทความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะพิจารณาเพียงการแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเท่านั้น ส่วนภายนอกผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีการถ่ายเทความร้อนกับสิ่งแวดล้อมทั้งการแผ่รังสี และการพาความร้อน

4. ให้การแผ่รังสีภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีฟลักซ์ที่คงที่ทั่วถึงเท่ากันทั้งหมดเบ้ารับน้ำเหล็กอาศัยจากการผสมกันอย่างดีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก

ลักษณะการพิจารณาปริมาตรควบคุมนั้นเป็นไปตามแบบที่แสดงในรูปที่ 4 – 1 แบบจำลองจะแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ส่วนผนังข้างเบ้ารับน้ำเหล็กและผนังก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่ในขั้นตอนนี้ลักษณะและฟลักซ์ของรังสีที่ออกจากแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นทั่วถึงเท่ากันหมดดังข้อสมมติที่ 4 หากพิจารณาการถ่ายเทความร้อนภายในปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 4 – 1 นั้น ผนังข้างและผนังก้นภายในของเบ้ารับน้ำเหล็กจะได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (q''_{ph}) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก หากพิจารณาปริมาตรควบคุมล้อมรอบแก๊สเผาไหม้ที่อยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กดังรูปที่ 4 – 2 จะสามารถคำนวณหาปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่แก๊สเผาไหม้นั้นเปล่งรังสีออกมาได้ด้วยสมการที่ (4.14)

$$q''_{ph} = F\sigma(T_{FL}^4 - T_{ladle,surf}^4) \quad (4.14)$$

โดยที่

$$F = -0.00404 + 1.06182\varepsilon - 0.1839\varepsilon^2$$

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

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

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

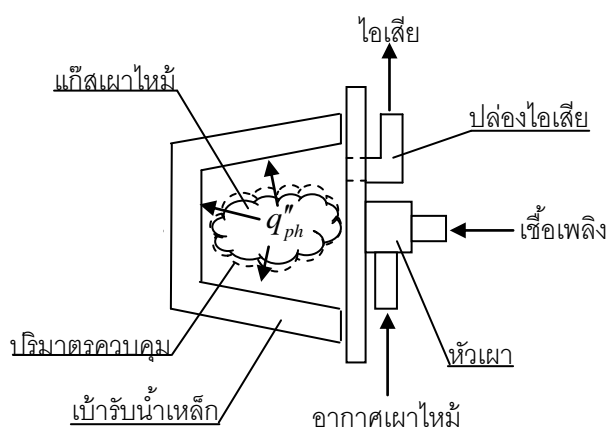
$$P = 0.2780238 - 0.00193EA + (6.7 \times 10^{-5})(EA)^2$$

$$L = 3.6V_{T,in} / A_{T,in}$$

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

- เมื่อ T_{FL} คืออุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ (K)
- $T_{ladle,surf}$ คืออุณหภูมิของผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)
- F คือตัวประกอบการแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก
(Dimensionless)
- ε คือสภาพการเปล่งรังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก
(Dimensionless)
- P คือแรงดันย่อยของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ (atm)

- EA คือร้อยละของอากาศส่วนเกินจากการเผาไหม้ (%)
- L คือระยะรังสีเฉลี่ยของแก๊สเผาไหม้ในเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)
- $V_{T,in}$ คือปริมาตรภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^3)
- $A_{T,in}$ คือพื้นที่ผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^2)
- (A/F) คืออัตราส่วนมวลอากาศต่อเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ (Dimensionless)



รูปที่ 4-2 การแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการอุ่น

จากสมการที่ (4.14) จะสามารถนำไปใช้สร้างเป็นเงื่อนไขค่าขอบได้เนื่องจากพลั๊กซ์ความร้อนที่เข้าสู่ผนังข้างและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนผ่านผนังข้างและผนังกันภายในเบ้ารับน้ำเหล็กด้วย ดังนั้นสามารถกำหนดเงื่อนไขค่าขอบได้ว่าพลั๊กซ์ที่มาจาก การแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้จะเท่ากับพลั๊กซ์ของความร้อนที่ถ่ายเทผ่านการนำความร้อนเข้าไปยังภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กดังนี้

$$q''_{ph} = q''_{cond} \quad (4.15)$$

จากสมการที่ (4.15) จะเห็นว่าทางฝั่งซ้ายมือของสมการนั้นจะเป็นปริมาณพลั๊กซ์รังสีจากไอเสียที่เข้ามายังผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ส่วนฝั่งขวาของสมการคือพลั๊กซ์ของการนำความร้อนเข้าไปในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก เมื่อแทนค่าสมการที่ (4.11) และ (4.15) ลงไปในสมการที่ (4.15) จะได้

$$F\sigma(T_{FL}^4 - T_{ladle,surf}^4) = -k \frac{dT}{dx} \quad (4.16)$$

สมการที่ (4.16) จะใช้เป็นเงื่อนไขค่าขอบของการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผนังและกันภายในเบ้ารับน้ำเหล็กต่อไป

4.4 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนนอกจากเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า

ในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้น เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กได้รับการอุ่นเพียงพอแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกเคลื่อนย้ายไปรอรับน้ำเหล็กยังบริเวณหน้าเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ซึ่งเบ้ารับน้ำเหล็กที่อุ่นเสร็จนั้นจะมีอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่สูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กส่งผลให้สภาวะทางความร้อนเปลี่ยนแปลงไป การออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงต้องคำนึงถึงสภาวะที่เบ้ารับน้ำเหล็กที่ไม่มีการบรรจุน้ำเหล็กอยู่ภายใน เพื่อที่จะได้ทราบเงื่อนไขเริ่มต้นที่แท้จริงของผนังข้างและผนังกันภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่แท้จริงในขณะที่เบ้ารับน้ำเหล็กเริ่มต้นรับน้ำเหล็กจากเตาหลอม อันจะส่งผลต่อสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กในกระบวนการอื่นๆต่อไป

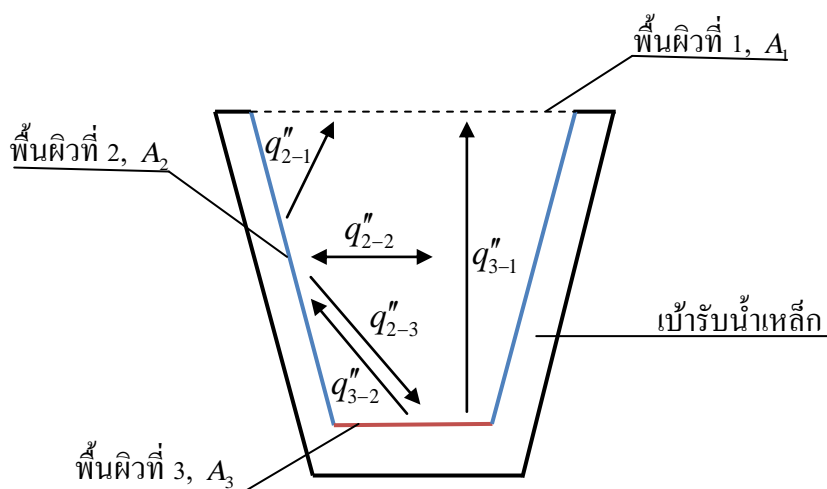
การถ่ายเทความร้อนออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กที่ไม่ได้บรรจุน้ำเหล็กในลักษณะนี้ยังปรากฏในขั้นตอนที่เบ้ารับน้ำเหล็กนำแสลคที่เหลือจากการเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กเททิ้งเรียบร้อยแล้วและทำการล้างรูเทด้วยออกซิเจนก่อนนำกลับไปอุ่นเพื่อรอใช้ในรอบการหลอมต่อไป ซึ่งสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่สิ้นสุดกระบวนการนี้จะต้องใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กต่อไป ดังนั้นแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีที่ไม่มีมีการบรรจุน้ำเหล็กจึงมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบควบคุมต่อไป

ในการออกแบบแบบจำลองนั้นได้พิจารณาจากลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4 – 3 เมื่อภายในเบ้ารับน้ำเหล็กแบ่งออกเป็นพื้นที่ปิดล้อมจำนวน 3 พื้นที่ จะพบว่าที่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กนั้น (พื้นที่ 2, A_2) จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังฝั่งตรงกันข้าม ในขณะที่เดียวกันก็มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับกันภายในของเบ้ารับน้ำเหล็ก (พื้นที่ 3, A_3) ด้วยเช่นกัน ส่วนความร้อนที่ถ่ายเทออกไปนั้นจะต้องผ่านทางปากเบ้ารับน้ำเหล็ก (พื้นที่ 1, A_1) ซึ่งการแลกเปลี่ยนความร้อนในลักษณะนี้ความซับซ้อนจะอยู่ที่การแผ่รังสีความร้อน

หากพิจารณาพื้นที่ภายในและปากเบ้ารับน้ำเหล็ก จะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นพื้นที่ปิดล้อมด้วยพื้นที่จำนวน 3 พื้นที่ และเมื่อพิจารณาประกอบกับข้อสมมติดังนี้

1. พื้นที่ในพื้นที่ยี่ปิดล้อมดังรูปที่ 4 – 3 แต่ละพื้นที่ยี่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่

2. พื้นผิวที่ 1 แทนปากเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งเป็นช่องเปิดสำหรับถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศ จึงสมมติให้พื้นผิวที่ 1 นี้ประพฤติตัวเป็นพื้นผิววัตถุดำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศ (T_u)
3. พื้นผิวที่ 2 และ 3 ประพฤติตัวเป็นพื้นผิวของวัตถุเทาที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน
4. พื้นผิวที่ 1, 2 และ 3 มีพื้นที่ผิวเป็น A_1 , A_2 และ A_3 ตามลำดับ



รูปที่ 4-3 การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า

สิ่งที่ต้องการทราบในการออกแบบจำลองเพื่อสร้างเงื่อนไขขอบนั้นคือปริมาณความร้อนที่เข้าหรือออกจากพื้นผิวที่ 2 และ 3 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบริเวณผนังและก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากการประยุกต์ใช้สมการที่ (3.24) ได้ดังนี้

$$q_2 = \frac{(\sigma T_2^4 - q_{o,2}'')}{(1 - \varepsilon_2) / \varepsilon_2 A_2} \quad (4.17)$$

$$q_3 = \frac{(\sigma T_3^4 - q_{o,3}'')}{(1 - \varepsilon_3) / \varepsilon_3 A_3} \quad (4.18)$$

เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวที่ 2 และ 3 เป็นตัวแปรทราบค่า แต่ตัวแปร $q''_{o,2}$ และ $q''_{o,3}$ เป็นตัวแปรไม่ทราบค่าสมการที่ (4.17) และ (4.18) จึงไม่เพียงพอสำหรับการแก้ปัญหาเพื่อหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าหรือออกจากพื้นผิว (q_2 และ q_3) จึงต้องอาศัยสมการความสัมพันธ์เพิ่มเติม

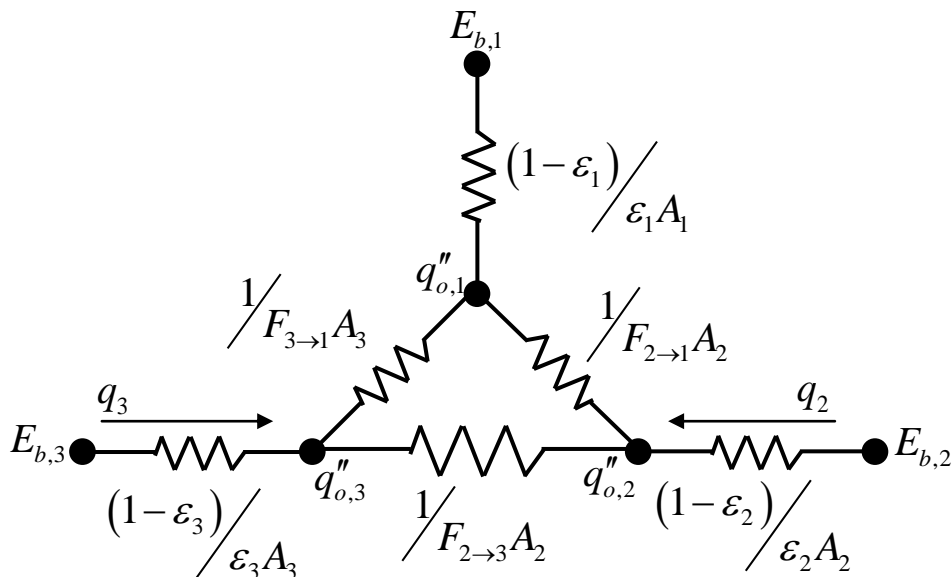
เมื่อพิจารณาพื้นผิวในพื้นที่ปิดล้อมดังแสดงในรูปที่ 4-3 ลักษณะดังกล่าวตามข้อสมมติข้างต้นนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสมการที่ (3.36) และสร้างเป็นระบบสมการได้ดังนี้

$$\frac{(E_{b,1} - q''_{o,1})}{(1 - \varepsilon_1) / \varepsilon_1 A_1} = \frac{(q''_{o,1} - q''_{o,1})}{1 / F_{1 \rightarrow 1} A_1} + \frac{(q''_{o,1} - q''_{o,2})}{1 / F_{1 \rightarrow 2} A_1} + \frac{(q''_{o,1} - q''_{o,3})}{1 / F_{1 \rightarrow 3} A_1} \quad (4.19)$$

$$\frac{(E_{b,2} - q''_{o,2})}{(1 - \varepsilon_2) / \varepsilon_2 A_2} = \frac{(q''_{o,2} - q''_{o,1})}{1 / F_{2 \rightarrow 1} A_2} + \frac{(q''_{o,2} - q''_{o,2})}{1 / F_{2 \rightarrow 2} A_2} + \frac{(q''_{o,2} - q''_{o,3})}{1 / F_{2 \rightarrow 3} A_2} \quad (4.20)$$

$$\frac{(E_{b,3} - q''_{o,3})}{(1 - \varepsilon_3) / \varepsilon_3 A_3} = \frac{(q''_{o,3} - q''_{o,1})}{1 / F_{3 \rightarrow 1} A_3} + \frac{(q''_{o,3} - q''_{o,2})}{1 / F_{3 \rightarrow 2} A_3} + \frac{(q''_{o,3} - q''_{o,3})}{1 / F_{3 \rightarrow 3} A_3} \quad (4.21)$$

จากสมการที่ (4.17 - 4.21) สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรต้านทานความร้อนได้ดังรูปที่ 4-4



รูปที่ 4-4 วงจรต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก

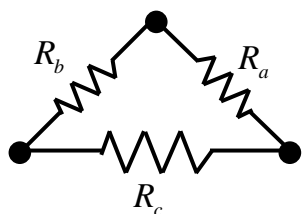
จะสังเกตได้ว่าลักษณะของวงจรต้านทานความร้อนมีลักษณะเป็นวงจรเดลต้า (Delta, Δ) ซึ่งยากแก่การแก้ปัญหาเพื่อหาค่าฟลักซ์ของรังสีที่ออกจากพื้นผิวต่างๆ ($q''_{o,1}$, $q''_{o,2}$ และ $q''_{o,3}$) จึงต้อง

ประยุกต์ใช้ความรู้ทางวิชาไฟฟ้ากระแสตรงในการแปลงวงจรเดลต้าให้กลายเป็นวงจรวาร์ย์ (Wye, Y) ซึ่งลักษณะการแปลงสามารถคำนวณเปลี่ยนค่าความต้านทานได้ดังแสดงในรูปที่ 4-5 ซึ่งในลักษณะวงจรในรูปที่ 4-4 สามารถกำหนดให้ค่าตัวต้านทานต่างๆ แทนด้วยตัวแปรดังตารางที่ 4-1 เพื่อไม่ให้เกิดความสับสนในการแปลงวงจรเดลต้าในรูปที่ 4-4 ให้กลายเป็นวงจรวาร์ย์ในรูปที่ 4-6

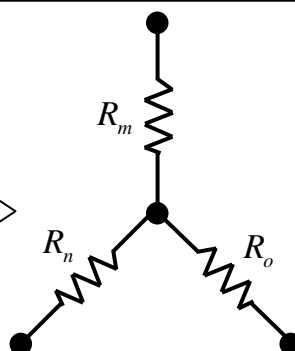
ตารางที่ 4-1 ค่าตัวต้านทานต่างๆในวงจรต้านทานความร้อน

ตัวต้านทาน	ค่าตัวต้านทาน	ตัวต้านทาน	ค่าตัวต้านทาน
R_1	$(1-\varepsilon_1)/\varepsilon_1 A_1$	R_{21}	$1/F_{2 \rightarrow 1} A_2$
R_2	$(1-\varepsilon_2)/\varepsilon_2 A_2$	R_{23}	$1/F_{2 \rightarrow 3} A_2$
R_3	$(1-\varepsilon_3)/\varepsilon_3 A_3$	R_{31}	$1/F_{3 \rightarrow 1} A_3$

วงจรแบบเดลตา (Delta, Δ)



วงจรแบบวาร์ย์ (Wye, Y)



$$R_m = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b + R_c},$$

$$R_n = \frac{R_a R_c}{R_a + R_b + R_c},$$

$$R_o = \frac{R_b R_c}{R_a + R_b + R_c}$$

รูปที่ 4-5 การแปลงวงจรเดลตา (Delta, Δ) ให้กลายเป็นวงจรวาร์ย์ (Wye, Y)

จากรูปที่ 4 – 6 จะเห็นได้ว่าวงจรวาร์ยที่แปลงมานั้นจะเกิดจุดต่อ (Node) ขึ้นมาใหม่ 1 จุด ซึ่งให้จุดนี้เป็นจุดต่อ N ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าหากสามารถแก้สมการหาค่าฟลักซ์ที่จุดต่อ N (q_N'') จะทำให้ง่ายแก่การหาปริมาณความร้อนที่เข้าหรือออกจากพื้นผิวที่ 1 และ 2 ตามสมการที่สร้างจากวงจรต้านทานความร้อนในรูปที่ 4 – 6 ดังนี้

$$q_2 = \frac{(\sigma T_2^4 - q_N'')}{R_2 + R_{II}} \quad (4.22)$$

$$q_3 = \frac{(\sigma T_3^4 - q_N'')}{R_3 + R_{III}} \quad (4.23)$$

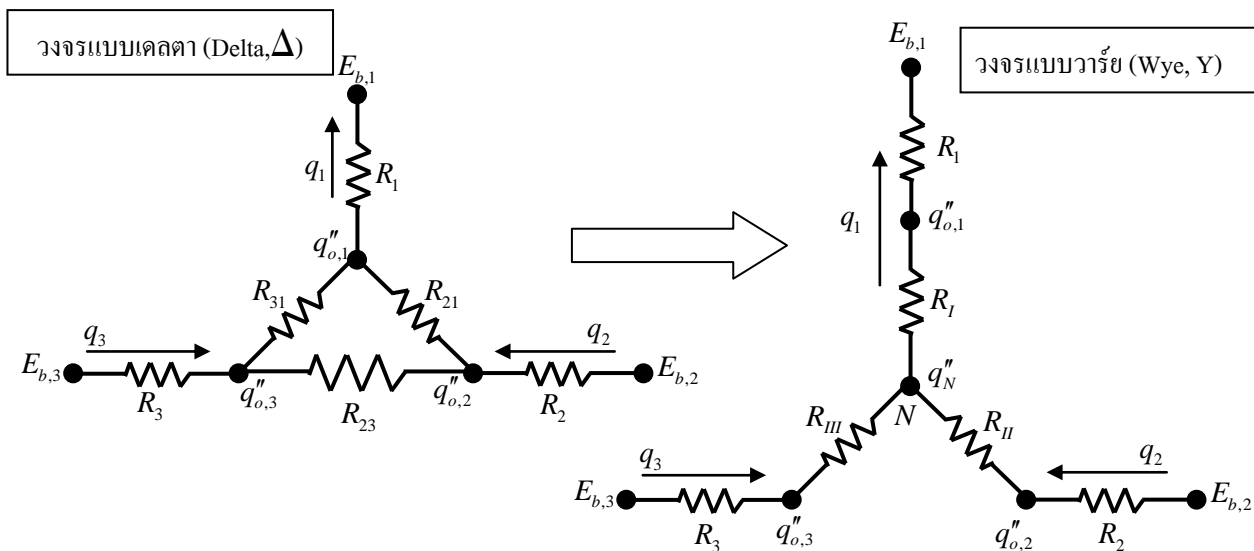
ส่วนค่าฟลักซ์ที่จุดต่อ N (q_N'') สามารถหาได้โดยการประยุกต์กฎกระแสของเคอร์ชอร์ฟ (Kirchoff's Current Law: KCL) ที่ระบุว่ากระแสที่เข้าและออกจากจุดต่อใดๆย่อมสมดุลกัน ซึ่งกฎกระแสของเคอร์ชอร์ฟนี้จะสามารถเปรียบเทียบได้ว่าที่จุดต่อใดๆ ปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าต้องเท่ากับปริมาณความร้อนที่ไหลออกจากจุดต่อนั้นดังแสดงการอธิบายในรูปที่ 4 – 7 ซึ่งจากการประยุกต์นี้จะสามารถสร้างสมการสมดุลความร้อนที่ไหลเข้าและออกจุดต่อ N ได้ดังสมการที่ (4.24)

$$q_1 = q_2 + q_3 \quad (4.24)$$

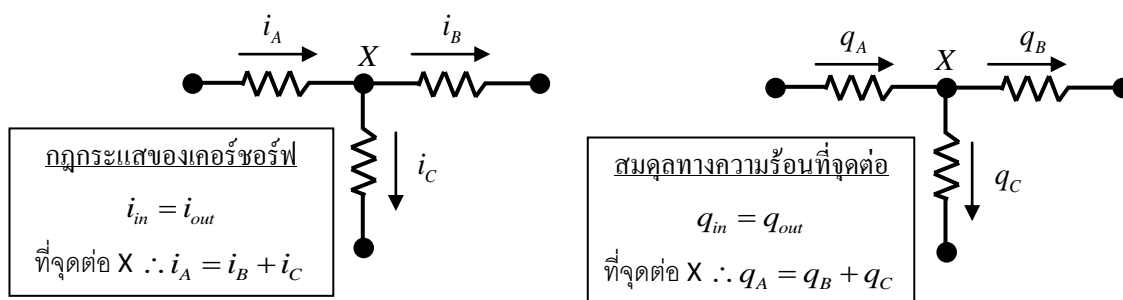
เมื่อแทนค่าต่างความร้อนที่ไหลเข้าออกจากพื้นผิวต่างๆในพื้นที่ปิดล้อมที่พิจารณาแล้ว สามารถพัฒนาสมการที่ (4.24) ไปเป็น

$$\frac{(\sigma T_1^4 - q_N'')}{R_1 + R_I} = \frac{(\sigma T_2^4 - q_N'')}{R_2 + R_{II}} + \frac{(\sigma T_3^4 - q_N'')}{R_3 + R_{III}} \quad (4.25)$$

จากสมการที่ (4.25) นี้เมื่อทราบถึงสมบัติของพื้นผิวต่างๆที่ปิดล้อมและอุณหภูมิของพื้นผิวต่างๆเหล่านั้นสามารถคำนวณเพื่อหาค่าฟลักซ์ที่จุดต่อ N นั้นได้ และใช้ค่าฟลักซ์ที่จุดต่อ N ที่คำนวณได้นั้นแทนลงไปนสมการที่ (4.22) และ (4.23) จะสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าหรือออกจากพื้นผิวที่ 2 และ 3 (q_2 และ q_3) ได้และใช้ปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าหรือออกจากพื้นผิวที่คำนวณได้นี้เป็นเงื่อนไขค่าขอบของการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผนังและกั้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็กต่อไป



รูปที่ 4-6 การแปลงวงจรต้านทานความร้อนแบบเดลต้า (Delta, Δ) เป็นวงจรวาร์รี่ (Wye, Y)



รูปที่ 4-7 เปรียบเทียบกฎกระแสของเคอร์ชอฟฟ์และสมดุลทางความร้อนที่จุดต่อ

4.5 แบบจำลองระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก

ในการออกแบบแบบจำลองเพื่อทำนายสภาวะทางความร้อนนั้น ส่วนที่สำคัญที่สุดคือความแม่นยำในการออกแบบแบบจำลองในการทำนายสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็ก เนื่องจากเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต หากแบบจำลองไม่สามารถทำนายสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กได้แม่นยำ ส่งผลให้การกำหนดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กสูงหรือต่ำกว่าความเป็นจริงไป ซึ่งน้ำเหล็กมีอุณหภูมิเทน้ำเหล็กออกจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าสูงเกินไปจะทำให้อุณหภูมิของน้ำเหล็กที่เข้าสู่กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องสูงเกินไปทำให้น้ำเหล็กไม่เปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งตลอดหน้าตัดของผลิตภัณฑ์ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์เสียหาย หากกำหนดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่ต่ำเกินไปน้ำ

เหล็กสามารถเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็งระหว่างกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งได้ อาจก่อให้เกิดการอุดตันในอุปกรณ์และสร้างความเสียหายให้แก่ระบบการผลิตได้

ระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็กนั้น สภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กต่างก็มีความสัมพันธ์กัน จะมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางความร้อนที่สอดคล้องกันตลอดกระบวนการ เนื่องจากน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กจะสัมผัสกันตลอดการขนถ่ายน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าไปยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง

ในการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการนี้จะตั้งข้อสมมติดังนี้

1. แบบจำลองนี้จะใช้อุณหภูมิเทน้ำเหล็ก (Tapping Temperature) เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเหล็กที่อยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก
2. อุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการขนถ่ายมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาตรน้ำเหล็ก
3. ผิวของผนังและก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำเหล็กระหว่างการขนถ่ายตลอดคือว่ามีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำเหล็กตลอดการขนถ่าย
4. การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนออกจากน้ำเหล็กจะต้องผ่านผิวแสลคที่ปกคลุมเหนือน้ำเหล็กซึ่งผิวแสลคมีอุณหภูมิที่แตกต่างจากอุณหภูมิน้ำเหล็ก

การออกแบบแบบจำลองเริ่มจากการกำหนดปริมาตรควบคุมภายในระบบ เนื่องจากในกระบวนการนี้ต้องทำนายถึงสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กควบคู่กันไปตลอดกระบวนการ จึงต้องแยกพิจารณาปริมาตรควบคุมระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็กดังแสดงในรูปที่ 4 – 8 จะเห็นได้ว่าในปริมาตรควบคุมที่ 1 จะล้อมรอบน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กและปริมาตรควบคุมที่ 2 จะล้อมรอบผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก

หากพิจารณาในปริมาตรควบคุมที่ 1 จะสามารถพิจารณาสมดุลพลังงานของปริมาตรควบคุมที่ 1 นี้ได้ดังนี้

$$\Delta U_{st} = Q_{st,loss} \quad (4.26)$$

ซึ่ง

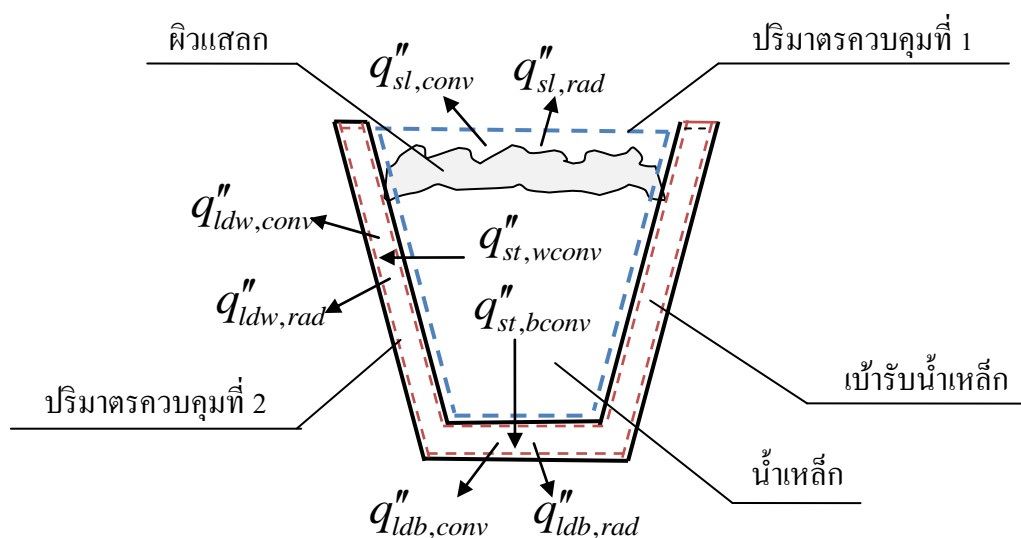
$$\Delta U_{st} = m_{st} c_{p,st} \Delta T_{st} \quad (4.27)$$

และ

$$Q_{st,loss} = q''_{st,bconv} A_{d,b} + q''_{st,wconv} A_{d,w} + q''_{sl,conv} A_{sl} + q''_{sl,rad} A_{sl} \quad (4.28)$$

เมื่อ ΔU_{st} คือการเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายในของน้ำเหล็ก (W)

- $Q_{st,loss}$ คือความร้อนที่สูญเสียออกจากน้ำเหล็ก (W)
- m_{st} คือมวลของน้ำเหล็กในปริมาตรควบคุม (kg)
- $c_{p,st}$ คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำเหล็ก ($J/kg \cdot K$)
- ΔT_{st} คือผลต่างของอุณหภูมิน้ำเหล็กในแต่ละสถานะ (K)
- $q''_{st,bconv}$ คือฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กด้วยการพาความร้อนจากน้ำเหล็กไปยังก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (W/m^2)
- $q''_{st,wconv}$ คือฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กด้วยการพาความร้อนจากน้ำเหล็กไปยังผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (W/m^2)
- $q''_{sl,conv}$ คือฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กผ่านทางผิวแผลกด้วยการพาความร้อน (W/m^2)
- $q''_{sl,rad}$ คือฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กผ่านทางผิวแผลกด้วยการแผ่รังสีความร้อน (W/m^2)
- $A_{ld,b}$ คือพื้นที่ผิวของก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^2)
- $A_{ld,w}$ คือพื้นที่ผิวของผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^2)
- A_{sl} คือพื้นที่ผิวของผิวแผลกที่ปกคลุมน้ำเหล็กอยู่ (m^2)



รูปที่ 4-8 ปริมาตรควบคุมในการออกแบบแบบจำลองและการถ่ายเทความร้อนระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็ก

ดังนั้นเมื่อแทนค่าสมการที่ (4.27) และ (4.28) ลงในสมการที่ (4.26) และจัดรูปได้ดังนี้

$$m_{st} c_{p,st} \Delta T_{st} = q''_{st,bconv} A_{ld,b} + q''_{st,wconv} A_{ld,w} + q''_{sl,conv} A_{sl} + q''_{sl,rad} A_{sl} \quad (4.29)$$

จัดรูป:

$$\Delta T_{st} = \frac{1}{m_{st} c_{p,st}} (q''_{st,bconv} A_{ld,b} + q''_{st,wconv} A_{ld,w} + q''_{sl,conv} A_{sl} + q''_{sl,rad} A_{sl}) \quad (4.30)$$

จากสมการที่ (4.30) จะพบว่าสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กได้เมื่อทราบถึงปริมาณฟลักซ์ที่ออกจากปริมาตรควบคุมที่ 1 ซึ่งฟลักซ์ของการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน ($q''_{sl,conv}$) และการแผ่รังสีความร้อน ($q''_{sl,rad}$) ผ่านผิวสแลกสามารถหาค่าได้เมื่อทราบถึงอุณหภูมิของพื้นผิวที่สามารถหาค่าได้ แต่การคำนวณหาปริมาณฟลักซ์ที่ออกจากน้ำเหล็กไปกับการพาความร้อนผ่านทางผนังข้างและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นต้องอาศัยการพิจารณาเพิ่มเติมในปริมาตรควบคุมที่ 2

ในปริมาตรควบคุมที่ 2 นั้นถูกยกมาแสดงรายละเอียดเพิ่มเติมในรูปที่ 4 – 9 จะพบว่าที่ผนังข้างหรือกันเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะสัมผัสกับของเหลว ทำให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนบริเวณผนังเบ้ารับน้ำเหล็กนี้มีลักษณะการถ่ายเทความร้อนจากการพาความร้อนจากน้ำเหล็กเข้าสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยความร้อนที่เข้าสู่ผนังข้างและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4.31) และ (4.32) ตามลำดับ

$$q''_{st,wconv} = h_{st-ld} (T_w(r_i) - T_{st}) \quad (4.31)$$

$$q''_{st,bconv} = h_{st-ld} (T_b(0) - T_{st}) \quad (4.32)$$

เมื่อพิจารณาในปริมาตรควบคุมที่ 2 ความร้อนที่เข้าสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกนำความร้อนเข้าไปในปริมาตรควบคุมนี้ทำให้ สามารถนำสมการที่ (4.31) และ (4.32) มาสร้างเป็นเงื่อนไขค่าขอบที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของผนังข้างและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กได้ดังสมการที่ (4.33) และ (4.34) ตามลำดับซึ่งสามารถแจกแจงได้ดังนี้

$$q''_{st,wconv} = h_{st-ld} (T_w(x) - T_{st}) = -k \frac{dT_w(x)}{dx}, \quad x = r_i \quad (4.33)$$

$$q''_{st,bconv} = h_{st-ld} (T_b(l) - T_{st}) = -k \frac{dT_b(l)}{dl}, \quad l = 0 \quad (4.34)$$

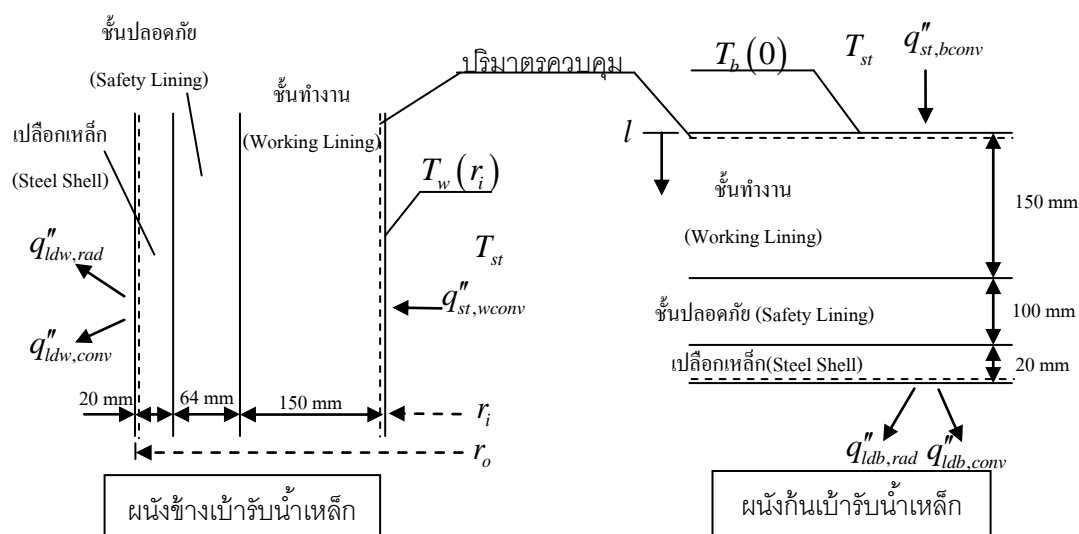
เมื่อ $T_w(x)$ คือฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังเบ้าข้างรับน้ำเหล็ก

$T_b(l)$ คือฟังก์ชันการแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก

T_{st} คืออุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)

โดยสรุปนั้นการหาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่อยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็ก ระหว่างการขนถ่ายนั้นจะสามารถหาได้จากสมการที่ (4.30) ซึ่งสองพจน์แรกทางขวามือของสมการที่ (4.30) นี้จะเป็นปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกจากน้ำเหล็กผ่านการพาความร้อนเข้าไปยังเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งปริมาณความร้อนนี้สามารถหาได้จากสมการที่ (4.31) และ (4.32) ซึ่งทั้งสองสมการนี้จะ เป็นเงื่อนไขค่าขอบน้ำเหล็ก และสามารถนำไปสร้างเป็นเงื่อนไขค่าขอบของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กได้ ดังสมการที่ (4.33) และ (4.34) ดังนั้นสมการที่ (4.31) – (4.34) จะเป็นสมการที่เชื่อมความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิน้ำเหล็กและผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ดังนั้นในการแก้ไขปัญหาเพื่อที่จะหาค่าอุณหภูมิ ในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็กสมการที่ (4.30) – (4.34) จะต้องถูกใช้ประกอบการแก้ไขปัญหาลงไป พร้อมกัน

ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเห็นได้ว่าสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กใน กระบวนการนี้จะมีความสัมพันธ์กันตลอดเวลาที่มีการขนถ่าย



รูปที่ 4-9 การถ่ายเทความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมในผนังข้างและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก

4.6 แบบจำลองระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

ในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กนั้นจะมีลักษณะ ความสัมพันธ์ของสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กคล้ายคลึงกับความสัมพันธ์ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก แต่จะมีข้อแตกต่างที่ระดับความสูงของน้ำเหล็กในเบ้ารับ

น้ำเหล็กจะไม่คงที่เนื่องจากมีการเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นมวลของน้ำเหล็กที่พิจารณาในกระบวนการจะไม่คงที่เช่นกัน นอกจากนั้นแล้วเมื่อระดับความสูงของน้ำเหล็กลดลงลักษณะการถ่ายเทความร้อนก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย เนื่องจากผิวแผลกที่ปกคลุมน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กอยู่นั้นจะได้รับการแลกเปลี่ยนความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก และความร้อนจากผิวแผลกก็ถ่ายเทออกผ่านทางปากเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยเช่นกัน ลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในขณะที่เทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4--10 จะเห็นได้ว่าการถ่ายเทความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในขณะที่เทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กนั้นจะมีลักษณะคล้ายกับการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่าดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.5 แต่จะมีความแตกต่างที่การแลกเปลี่ยนความร้อนในพื้นที่ 3, A_3 ในรูปที่ 4-10 จะกลายเป็นผิวแผลก และนอกจากนั้นแล้วความแตกต่างอีกประการหนึ่งคือในระหว่างการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กปากเบ้ารับน้ำเหล็กไม่ได้มีการเปิดโล่งออกสู่บรรยากาศเหมือนในหัวข้อที่ 4.5 แต่จะมีฝาปิดไว้ตลอดการเทน้ำเหล็กทำให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

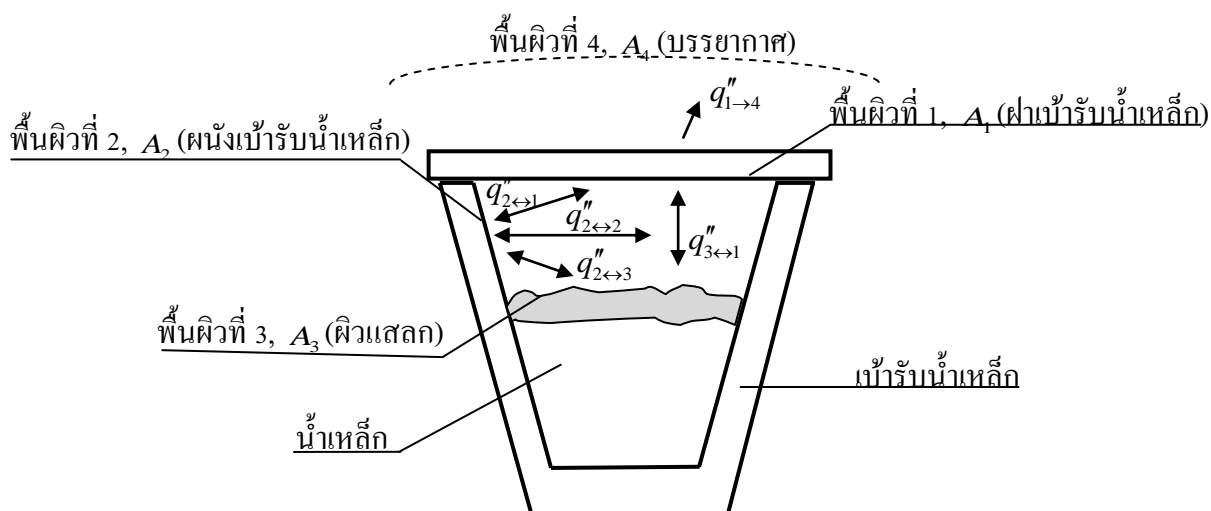
นอกจากนั้นแล้วในหัวข้อที่ผ่านมาจะสามารถแยกพื้นผิวต่างๆ ให้มีอุณหภูมิสม่ำเสมอตลอดพื้นผิวได้แต่ในกระบวนการเทน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นระดับน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดทำให้ยากแก่การระบุอุณหภูมิส่วนผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กได้

เพื่อออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการนี้จะตั้งข้อสมมติดังนี้

1. อุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งปริมาตรน้ำเหล็ก
2. ผิวของผนังข้างและผนังก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการถือว่าอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำเหล็ก
3. การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนออกจากรู้น้ำเหล็กจะต้องผ่านผิวแผลกที่ปกคลุมเหนือน้ำเหล็กซึ่งผิวแผลกมีอุณหภูมิที่แตกต่างจากอุณหภูมิน้ำเหล็ก
4. พื้นผิวในพื้นที่ปิดล้อมดังรูปที่ 4 – 10 แต่ละพื้นผิวมีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว
5. พื้นผิวในพื้นที่ปิดล้อมดังรูปที่ 4 – 10 ทั้ง 3 พื้นผิวมีการประพฤติตัวเป็นวัตถุเทา

6. พื้นผิวที่ 1 ในรูปที่ 4 – 10 ซึ่งเป็นฝาเบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นดั่งเกราะกำบังรังสี ที่มีค่า Emissivity ในแต่ละด้านของพื้นผิวไม่เท่ากัน
7. พื้นผิวที่ 4 ในรูปที่ 4 – 10 ซึ่งเป็นบรรยากาศโดยรอบประพุดิตัวเป็นวัตถุดำที่อุณหภูมิบรรยากาศ

นอกจากนั้นแล้วเพื่อสร้างเงื่อนไขค่าขอบที่ไม่ซับซ้อนมากเกินไป จำเป็นต้องจำกัดจำนวนพื้นผิวที่พิจารณาในการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายผ่านการแผ่รังสีภายในเบ้ารับน้ำเหล็กให้ยังคงเป็นพื้นที่ปิดล้อมจำนวน 3 ผิว จึงแบ่งช่วงการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ระดับน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีระดับความสูงเกินจุดกึ่งกลางของผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กตามระดับความสูง และช่วงที่ระดับน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีระดับความสูงต่ำกว่าจุดกึ่งกลางของผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 4-10 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่มีฝาปิดระหว่างกระบวนการ

ในการจำแนกระดับความสูงของน้ำเหล็กนั้นเพื่อความสะดวกในการพิจารณาจะใช้เวลาในการระบุระดับความสูงของน้ำเหล็กว่าจะสูงหรือต่ำกว่าจุดกึ่งกลางภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยจะแบ่งให้ที่เวลาร้อยละ 40 แรกของเวลาในการเทน้ำเหล็กทั้งหมดเป็นช่วงที่ระดับน้ำเหล็กมีระดับที่สูงกว่าจุดกึ่งกลางผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก และเวลาที่ร้อยละ 60 ส่วนหลังของเวลาในการเทน้ำเหล็กทั้งหมดเป็นช่วงที่ระดับน้ำเหล็กมีระดับต่ำกว่าจุดกึ่งกลางผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งความ

แตกต่างระหว่างกรณีที่ระดับน้ำเหล็กสูงกว่าระดับค้ำกลางผนังภายในเขารับน้ำเหล็กนั้นเงื่อนไขค่าขอบจะเป็นการกำหนดให้อุณหภูมิที่ผิวผนังภายในเขารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิกับอุณหภูมิน้ำเหล็ก ส่วนในกรณีที่ระดับน้ำเหล็กต่ำกว่าค้ำกลางผนังภายในเขารับน้ำเหล็กเงื่อนไขค่าขอบจะเป็นปริมาณความร้อนที่เข้าหรือออกจากพื้นผิวซึ่งปริมาณนั้นจะต้องมีความสัมพันธ์กับการแผ่รังสีภายในพื้นที่ปิดล้อมนั้นๆ ดังสมการที่ (4.35) และ (4.37) ส่วนผิวก้นภายในเขารับน้ำเหล็กนั้นจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำเหล็กตลอดกระบวนการดังสมการที่ (4.36) และ (4.38)

$$h_{st-ld} (T_w(x) - T_{st}) = -k \frac{dT_w(x)}{dx}, \quad x = r_i, \quad t \leq 0.4t_{teem} \quad (4.35)$$

$$h_{st-ld} (T_b(l) - T_{st}) = -k \frac{dT_b(l)}{dl}, \quad l = 0, \quad t \leq 0.4t_{teem} \quad (4.36)$$

$$-kA_2 \frac{dT_w(x)}{dx} = q_2, \quad x = r_i, \quad t > 0.4t_{teem} \quad (4.37)$$

$$h_{st-ld} (T_b(l) - T_{st}) = -k \frac{dT_b(l)}{dl}, \quad l = 0, \quad t > 0.4t_{teem} \quad (4.38)$$

เมื่อ t_{teem} คือเวลาที่ใช้ในการเทน้ำเหล็กจากเขารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก (s)

ซึ่งเงื่อนไขค่าขอบในสมการที่ (4.35) – (4.38) นั้นต้องทราบถึงอุณหภูมิน้ำเหล็กและปริมาณความร้อนที่เข้าหรือออกจากผนังเขารับน้ำเหล็ก อุณหภูมิน้ำเหล็กนั้นสามารถพิจารณาได้ด้วยสมดุลพลังงานภายในน้ำเหล็กดังเช่นวิธีการเดียวกันในหัวข้อที่ 4.6 จะทำให้ได้สมการดังนี้

$$m_{st} c_{p,st} \Delta T_{st} = q''_{st,bcond} A_{ld,b} + q''_{st,wcond} A_{ld,w} + q''_{sl,conv} A_{sl} + q''_{sl,rad} A_{sl} \quad (4.39)$$

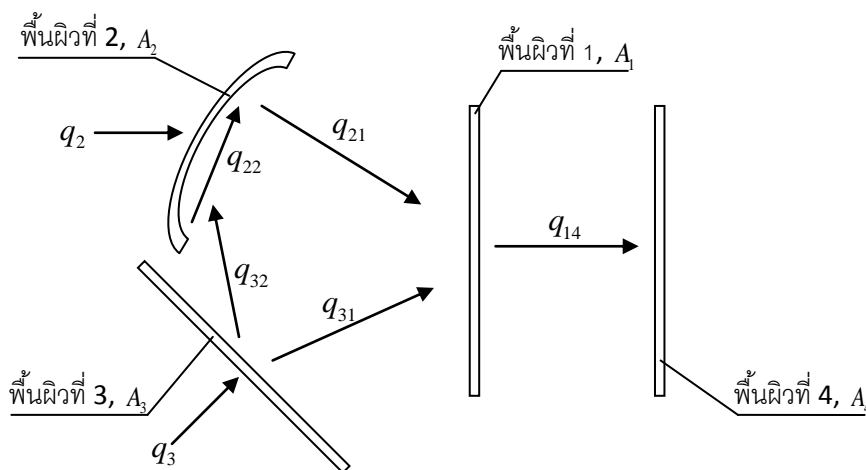
ในสมการที่ (4.39) นี้สามารถหาปริมาณพลังงานที่ถ่ายเทจากน้ำเหล็กเข้าสู่เขารับน้ำเหล็กได้ด้วยวิธีการเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.6 สมการที่ (4.31) – (4.34) ส่วนที่จะมีความยุ่งยากซับซ้อนจะอยู่ที่การถ่ายเทความร้อนผ่านการแผ่รังสีความร้อนซึ่งสามารถเขียนลักษณะแผนภาพการถ่ายเทความร้อนอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 4 – 11 นั่นคือลักษณะการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการนี้ พื้นผิวที่ 1 และ 3 จะมีลักษณะเป็นผิวราบทำให้ไม่มีการแผ่รังสีถึงตัวพื้นผิวเอง แต่ในพื้นที่ 2 มีลักษณะเป็นผิวทรงกระบอกจะมีการแผ่รังสีเข้าหาตัวเอง

จากรูปที่ 4 – 11 นั้นสามารถนำมาเขียนสมการประกอบแผนภาพตามหลักการตามสมการที่ (3.36) ได้ดังนี้

$$\frac{(E_{b,1} - q''_{o,1i})}{(1 - \varepsilon_{1i}) / \varepsilon_{1i} A_1} = \frac{(q''_{o,1i} - q''_{o,1i})}{1 / F_{1i \rightarrow 1i} A_1} + \frac{(q''_{o,1i} - q''_{o,2})}{1 / F_{1i \rightarrow 2} A_1} + \frac{(q''_{o,1i} - q''_{o,3})}{1 / F_{1i \rightarrow 3} A_1} \quad (4.40)$$

$$\frac{(E_{b,2} - q''_{o,2})}{(1 - \varepsilon_2) / \varepsilon_2 A_2} = \frac{(q''_{o,2} - q''_{o,1i})}{1 / F_{2 \rightarrow 1i} A_2} + \frac{(q''_{o,2} - q''_{o,2})}{1 / F_{2 \rightarrow 2} A_2} + \frac{(q''_{o,2} - q''_{o,3})}{1 / F_{2 \rightarrow 3} A_2} \quad (4.41)$$

$$\frac{(E_{b,3} - q''_{o,3})}{(1 - \varepsilon_3) / \varepsilon_3 A_3} = \frac{(q''_{o,3} - q''_{o,1i})}{1 / F_{3 \rightarrow 1i} A_3} + \frac{(q''_{o,3} - q''_{o,2})}{1 / F_{3 \rightarrow 2} A_3} + \frac{(q''_{o,3} - q''_{o,3})}{1 / F_{3 \rightarrow 3} A_3} \quad (4.42)$$



รูปที่ 4-11 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนอย่างง่ายภายในกระบวนการเทน้ำ
เหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก

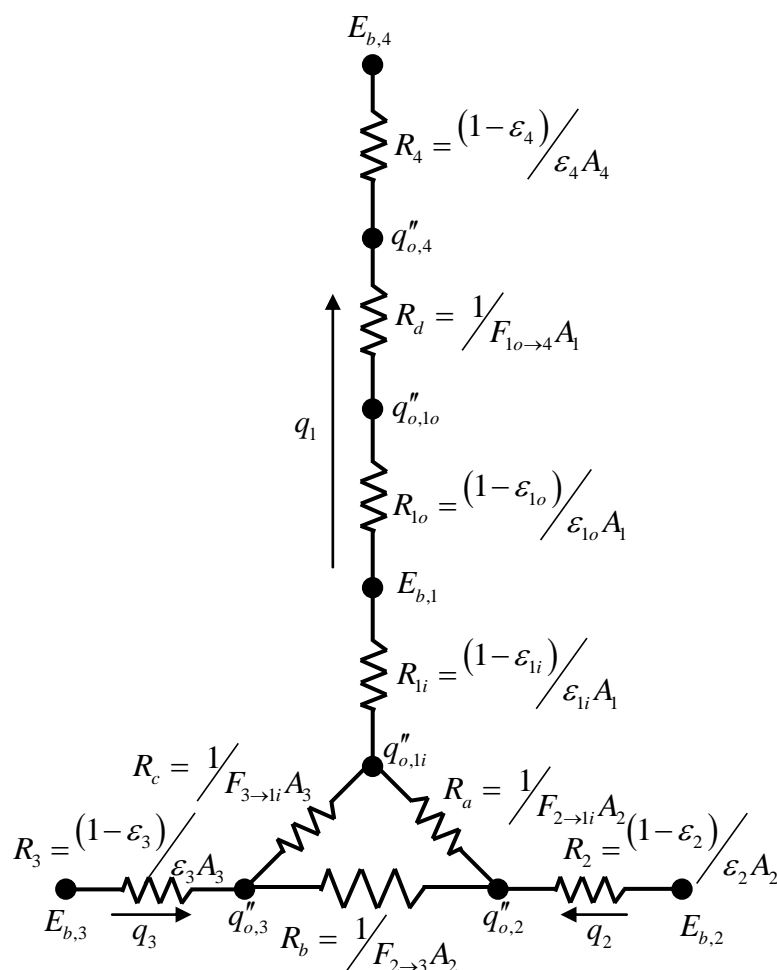
ส่วนพื้นผิว 1 ที่ประพฤติตัวเป็นเกราะกำบังรังสีจะสามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ในลักษณะเช่นเดียวกับสมการที่ (3.42) ได้ดังนี้

$$\frac{(E_{b,1} - q''_{o,1o})}{(1 - \varepsilon_{1o}) / \varepsilon_{1o} A_1} = \frac{(q''_{o,4} - E_{b,4})}{(1 - \varepsilon_4) / \varepsilon_4 A_4} = \frac{(q''_{o,1o} - q''_{o,4})}{1 / F_{1o \rightarrow 4} A_1} \quad (4.43)$$

เมื่อตัวห้อย $1i$ หมายถึงพื้นผิวที่ 1 ด้านที่หันหน้าเข้าสู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก และตัวห้อย $1o$ หมายถึงพื้นผิวที่ 1 ด้านที่หันหน้าออกสู่ภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก

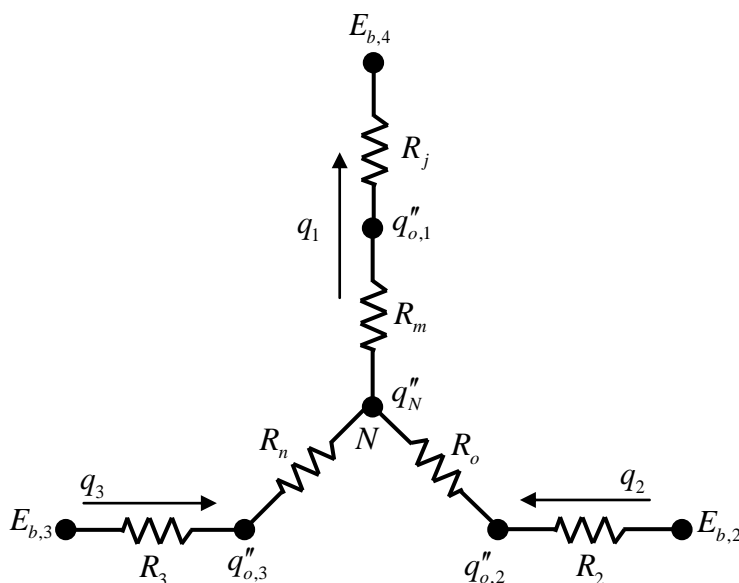
เมื่อนำสมการที่ (4.40) – (4.43) มาสร้างเป็นวงจรต้านทานความร้อนเพื่อให้ง่ายแก่การทำ
ความเข้าใจจะได้ลักษณะวงจรดังรูปที่ 4 – 12

ซึ่งในที่นี้ q_3 คือปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนที่ออกจากผิวแสลค(มีค่า
เท่ากับ $q''_{sl,rad} A_{sl}$ ในสมการที่ 4.41) ซึ่งจะต้องนำไปใช้ในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
น้ำเหล็กระหว่างกระบวนการ ส่วน q_2 คือปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนที่ออกจาก
ผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กส่วนที่อยู่เหนือระดับน้ำเหล็กซึ่งจะใช้เป็นเงื่อนไขค่าขอบใน
สมการที่ (4.37)



รูปที่ 4-12 วงจรต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับ
น้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

เมื่อรวบรวมค่าความต้านทานในวงจรต้านทานความร้อนและแปลงวงจรความต้านทานแบบเดลตา ให้กลายเป็นแบบวาร์รี่ตามวิธีการดังแสดงในรูปที่ 4-6 จะได้วงจรต้านทานความร้อนที่เรียบง่ายขึ้นดังรูปที่ 4-13



รูปที่ 4-13 วงจรต้านทานความร้อนที่ถูกลดรูปและแปลงจากวงจรต้านทานความร้อนในรูปที่ 4.12

$$\text{เมื่อ} \quad R_m = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b + R_c}, \quad R_n = \frac{R_a R_c}{R_a + R_b + R_c}, \quad R_o = \frac{R_b R_c}{R_a + R_b + R_c},$$

$$R_j = R_{i_1} + R_{i_o} + R_d + R_4$$

จากรูปแบบวงจรต้านทานความร้อนในรูปที่ 4-13 มีลักษณะคล้ายคลึงกับวงจรต้านทานความร้อนแบบวาร์รี่ในรูปที่ 4-6 ดังนั้นวิธีการหาค่าสามารถกระทำได้ในลักษณะเดียวกันดังนี้

$$q_2 = \frac{(E_{b,2} - q''_N)}{R_2 + R_o} \quad (4.44)$$

$$q_3 = \frac{(E_{b,3} - q''_N)}{R_3 + R_n} \quad (4.45)$$

โดยที่ค่า q''_N สามารถหาค่าได้จากการแก้สมการสมดุลความร้อนที่จุดต่อ N ดังนี้

$$\frac{(E_{b,4} - q_N'')}{R_m + R_j} = \frac{(E_{b,2} - q_N'')}{R_2 + R_o} + \frac{(E_{b,3} - q_N'')}{R_3 + R_n} \quad (4.46)$$

ดังนั้นในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กนั้นระดับน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เงื่อนไขขอบจึงขึ้นกับเวลาด้วยตามสมการที่ (4.35) – (4.38) โดยที่อุณหภูมิน้ำเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.39) และปริมาณความร้อนที่ออกจากผิวแผลกและผนังเบ้ารับน้ำเหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.44) และ (4.45) โดยประกอบการคำนวณร่วมกับสมการที่ (4.46)

4.7 แบบจำลองระหว่างกระบวนการขนย้ายแผลกไปเททิ้ง

เมื่อการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กเสร็จสิ้น ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กยังคงเหลือแผลกบางส่วนไว้ เนื่องจากแผลกคือมลทินที่ไม่ต้องการให้สิ่งเหล่านั้นลงมาปนเปื้อนกับน้ำเหล็กในแบบหล่ออันจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้เสียหาย แผลกที่เหลืออยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกเคลื่อนย้ายไปเททิ้งยังด้วยรับแผลกซึ่งระหว่างกระบวนการนั้นแผลกที่หลงเหลืออยู่ยังคงมีอุณหภูมิที่สูงสามารถแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผนังเบ้ารับน้ำเหล็กได้ กระบวนการนี้จึงต้องแยกพิจารณาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกกระบวนการ

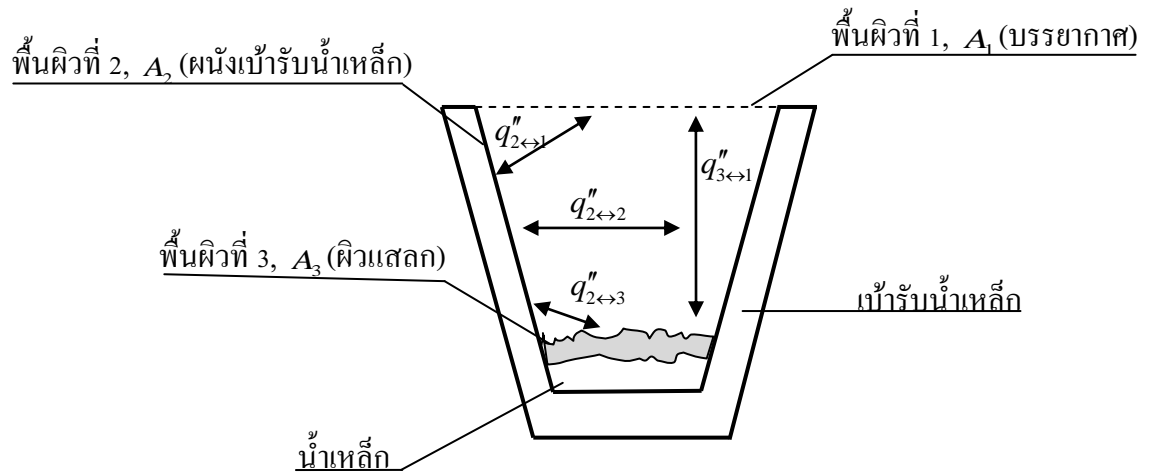
หากพิจารณาลักษณะการแผ่รังสีภายในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นในกรณีเช่นนี้การถ่ายเทความร้อนจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการแผ่รังสีภายในเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่าที่ปากเบ้ารับน้ำเหล็กเปิดออกให้มีการถ่ายเทความร้อนออกทางปากเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่บริเวณก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะถูกปกคลุมด้วยแผลกที่เหลืออยู่ภายในเบ้า สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 – 14

จากรูปที่ 4 – 14 จะพบว่าระหว่างกระบวนการผนังเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับพื้นผิวต่างๆ ส่วนก้นเบ้ารับน้ำเหล็กจะสัมผัสกับน้ำเหล็กส่วนที่เหลือค้างอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กและแผลกที่ต้องขนย้ายไปเททิ้งจากลักษณะดังกล่าวสามารถนำมาพิจารณาเพื่อสร้างเป็นเงื่อนไขค่าขอบของกระบวนการนี้ได้ดังนี้

$$-kA_2 \frac{dT_w(x)}{dx} = q_2, \quad x = r_i \quad (4.47)$$

$$h_{st-lid}(T_b(l) - T_{st}) = -k \frac{dT_b(l)}{dl}, \quad l = 0 \quad (4.48)$$

เนื่องจากลักษณะการหาปริมาณความร้อนที่ไหลเข้าและออกจากผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กสามารถดำเนินการได้ตามวิธีการวิเคราะห์ห่อแบบแบบจำลองในหัวข้อ 4.5 และ 4.7 ในหัวข้อนี้จึงจะทำการแจกแจงรายละเอียดของที่มาของตัวแปรต่างๆไว้



รูปที่ 4-14 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการขนย้ายแสลคไปเททิ้ง

เมื่อแสลคได้ถูกเทออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกซ่อมแซมและทำความสะอาดเตาเหล็กด้วยออกซิเจน และกลับสู่กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ทำให้กระบวนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กครบรอบวัฏจักร ลักษณะการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่วนเวียนเช่นนี้เรื่อยไปจึงทำให้แบบจำลองที่ออกแบบในหัวข้อที่ 4.2 – 4.8 นี้จะต้องผ่านการคำนวณรอบแล้วรอบเล่าจนกระทั่งเบ้ารับน้ำเหล็กสิ้นสภาพถูกส่งออกจากวัฏจักรการทำงานเข้าสู่การซ่อมแซมและก่อผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่

4.8 สรุปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็ก

ในการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบแบบจำลองสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะประกอบไปด้วยสมหลัก (Governing Equation) ซึ่งสร้างขึ้นจากสมดุลพลังงานภายในปริมาตรควบคุมที่สร้างขอบเขตล้อมรอบน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กดังแสดงในสมการที่ (4.11) และ (4.26) ดังนี้

สมการหลักสำหรับแบบจำลองทางความร้อนของบ้านน้ำเหล็ก

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (4.11)$$

สมการหลักสำหรับแบบจำลองทางความร้อนของน้ำเหล็ก

$$\Delta U_{st} = Q_{st,loss} \quad (4.26)$$

หรือ

$$m_{st} c_{p,st} \Delta T_{st} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} \quad (4.26a)$$

สมการหลักทั้ง 2 นี้จะต้องใช้พิจารณาไปควบคู่กันในกรณีที่อยู่ในบ้านน้ำเหล็กบรรจุน้ำเหล็กอยู่ แต่หากกรณีที่ไม่มือน้ำเหล็กบรรจุอยู่ในบ้านน้ำเหล็กการพิจารณาก็จะพิจารณาเพียงสมการหลักสำหรับแบบจำลองทางความร้อนของบ้านน้ำเหล็ก สมการที่ (4.11) เท่านั้น

แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นสมการที่ (4.11) และ (4.26) ในแต่ละกระบวนการก็จะมีเงื่อนไขค่าขอบที่แตกต่างกันตามแต่ละลักษณะทางกายภาพของแต่ละกระบวนการซึ่งสามารถสรุปเงื่อนไขค่าขอบภายในผนังและกันภายในบ้านน้ำเหล็กในแต่ละกระบวนการได้ดังนี้หัวข้อย่อยต่อไป

4.8.1 สรุปเงื่อนไขค่าขอบในกระบวนการอุ่นบ้านน้ำเหล็ก

ในกระบวนการนี้เงื่อนไขค่าขอบจะมาจากแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในบ้านน้ำเหล็กตามสมการที่ (4.16) โดยที่การแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในบ้านน้ำเหล็กนั้นถูกสมมติให้แผ่รังสีทั่วถึงกัน โดยทั่วพื้นที่ภายในผนังบ้านน้ำเหล็กดังนี้

$$F \sigma (T_{FL}^4 - T_w^4) = -k \frac{dT_w}{dx} \quad , x = r_i \quad (4.16a)$$

$$F \sigma (T_{FL}^4 - T_b^4) = -k \frac{dT_b}{dl} \quad , l = 0 \quad (4.16b)$$

4.8.2 สรุปเงื่อนไขค่าขอบในกระบวนการถ่ายเทความร้อนออกจากบ้านน้ำเหล็กเปล่า

ในกระบวนการนี้เงื่อนไขค่าขอบคือปริมาณความร้อนที่เข้าหรือออกจากพื้นผิวที่พิจารณาไม่ว่าจะเป็นผนังข้างหรือผนังกันภายในบ้านน้ำเหล็ก ซึ่งจะต้องคำนวณจากการถ่ายเทความร้อนผ่านการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวต่างๆภายในบ้านน้ำเหล็ก ซึ่งสามารถสรุปเงื่อนไขค่าขอบได้ดังนี้

$$-k \frac{dT_w}{dx} = q_2 \quad , x = r_i \quad (4.51a)$$

$$-k \frac{dT_b}{dl} = q_3 \quad , l = 0 \quad (4.51b)$$

ซึ่งค่า q_2 และ q_3 สามารถหาได้จากสมการที่ (4.22) และ (4.23) ตามลำดับ โดยแก้สมการที่ (4.25) ประกอบการคำนวณหา q_2 และ q_3 ควบคู่ไปด้วย

4.8.3 สรุปเงื่อนไขค่าขอบในกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก

ในกระบวนการนี้จะมีการสัมผัสกันระหว่างน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งต้องใช้สมการที่ (4.11) และ (4.26) พิจารณาไปควบคู่กัน นั่นคือความร้อนในน้ำเหล็กจะส่งผลกระทบต่อสภาวะทางความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก และการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กก็ส่งผลกระทบต่อสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กเป็นเช่นนี้ตลอดกระบวนการ ดังนั้นเงื่อนไขค่าขอบในกระบวนการนี้จึงเป็นเสมือนตัวที่เชื่อมความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยผ่านอุณหภูมิน้ำเหล็กที่สามารถนำไปแทนได้ทั้งสมการที่ (4.11) และ (4.12) ดังนี้

$$q''_{st,wconv} = h_{st-ld} (T_w(x) - T_{st}) = -k \frac{dT_w(x)}{dx} \quad , x = r_i \quad (4.33)$$

$$q''_{st,bconv} = h_{st-ld} (T_b(l) - T_{st}) = -k \frac{dT_w(l)}{dl} \quad , l = 0 \quad (4.34)$$

ส่วนเงื่อนไขค่าขอบของน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะเป็น

$$Q_{l,conv} = q''_{st,bconv} A_{ld,b} + q''_{st,wconv} A_{ld,w} \quad (4.28a)$$

$$Q_{conv} = h_{sl} A_{sl} (T_{sl} - T_a) \quad (4.28b)$$

$$Q_{rad} = \varepsilon_{sl} \sigma A_{sl} (T_{sl}^4 - T_a^4) \quad (4.28c)$$

เมื่อสมการที่ (4.28a), (4.28b) และ (4.28c) แจกแจงมาจากสมการที่ (4.28) ส่วนฟลักซ์ของความร้อนจากการนำความร้อนในสมการที่ (4.28a) สามารถหาได้จากการคำนวณสมการที่ (4.31) – (4.34) ประกอบควบคู่ไปด้วย

4.8.4 สรุปเงื่อนไขค่าขอบในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

ในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กนั้นระดับความสูงของน้ำเหล็กจะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ในการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงหลีกเลี่ยงเงื่อนไขทางเวลาไม่ได้ โดยเงื่อนไขทางด้านเวลาในการออกแบบแบบจำลองนี้จะแบ่งให้เป็นช่วงเวลาร้อย

ละ 40 แรกของเวลาการเทน้ำเหล็กทั้งหมดเป็นช่วงเวลาที่ระดับน้ำเหล็กอยู่สูงกว่าจุดกึ่งกลางของระดับความสูงผนังภายในเขารับน้ำเหล็ก ในช่วงนี้อุณหภูมิผนังภายในเขารับน้ำเหล็กจะเท่ากับอุณหภูมิของน้ำเหล็ก แต่เมื่อช่วงเวลาร้อยละ 60 หลังของเวลาการเทน้ำเหล็กทั้งหมดจะเป็นช่วงเวลาที่ระดับน้ำเหล็กอยู่ต่ำกว่าจุดกึ่งกลางของระดับความสูงผนังภายในเขารับน้ำเหล็ก ในช่วงนี้จะถือว่าผิวผนังภายในเขารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิแตกต่างจากอุณหภูมิน้ำเหล็กแล้ว และจะมีการถ่ายเทความร้อนออกไปยังพื้นผิวต่างๆภายในเขารับน้ำเหล็ก

ความแตกต่างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการนี้และกระบวนการถ่ายเทความร้อนในเขารับน้ำเหล็กเปลา่นั้นจะแตกต่างกันเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของระบบ เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนในเขารับน้ำเหล็กเปลา่นั้นจะไม่มีฝาปิด แต่ในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเขารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กจะมีฝาปิดตลอดกระบวนการทำให้ลักษณะบางประการของการถ่ายเทความร้อนจะแตกต่างกันเล็กน้อย ซึ่งในแบบจำลองนี้ได้กำหนดให้ฝาที่ปิดปากเขารับน้ำเหล็กไว้มีลักษณะเป็นเกราะกำบังรังสี จากแบบจำลองที่ได้อธิบายไปนั้นจะสามารถแสดงสมการเงื่อนไขค่าขอบของผนังเขารับน้ำเหล็กได้ดังนี้

$$h_{st-lid} (T_w(x) - T_{st}) = -k \frac{dT_w(x)}{dx}, \quad x = r_i, \quad t \leq 0.4t_{teem} \quad (4.35)$$

$$h_{st-lid} (T_b(l) - T_{st}) = -k \frac{dT_b(l)}{dl}, \quad l = 0, \quad t \leq 0.4t_{teem} \quad (4.36)$$

$$-kA_2 \frac{dT_w(x)}{dx} = q_2, \quad x = r_i, \quad t > 0.4t_{teem} \quad (4.37)$$

$$h_{st-lid} (T_b(l) - T_{st}) = -k \frac{dT_b(l)}{dl}, \quad l = 0, \quad t > 0.4t_{teem} \quad (4.38)$$

ส่วนเงื่อนไขค่าขอบของน้ำเหล็กจะเป็น

$$Q_{l,conv} = q_{st,bconv}'' A_{ld,b} + q_{st,wconv}'' A_{ld,w} \quad (4.28a)$$

$$Q_{conv} = h_{sl} A_{sl} (T_{sl} - T_a) \quad (4.28b)$$

$$Q_{rad} = q_3 \quad (4.28c)$$

ซึ่งค่า q_2 และ q_3 สามารถหาได้จากสมการที่ (4.44) และ (4.45) ตามลำดับ โดยแก้สมการที่ (4.46) ประกอบการคำนวณหา q_2 และ q_3 ควบคู่ไปด้วย

4.8.5 สรุปเงื่อนไขค่าขอบในกระบวนการขนย้ายแสงลไปเททิ้ง

ดังกล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.8 การขนย้ายแสงลไปเททิ้งนั้นมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกันกับการถ่ายเทความร้อนในเข้รับน้ำเหล็กเปล่า เนื่องจากทั้งสองกระบวนการนี้ไม่มีฝาปิดเหมือนกัน แต่มีข้อแตกต่างกันตรงที่ระหว่างกระบวนการขนย้ายแสงลไปเททิ้งนั้นส่วนก้นภายในเข้รับน้ำเหล็กยังคงสัมผัสกับแสงลและน้ำเหล็กที่เหลือเล็กน้อยจากการเท ทำให้ความร้อนที่ออกจากผิวแสงลส่งผลให้แสงลและน้ำเหล็กที่เหลือมีอุณหภูมิค่อยๆ ลดลง และก้นภายในเข้รับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหลืออยู่ ดังนั้นจะสามารถกำหนดให้เงื่อนไขค่าขอบภายในเข้รับน้ำเหล็กในกระบวนการนี้เป็น

$$-kA_2 \frac{dT_w(x)}{dx} = q_2 \quad , x = r_i \quad (4.47)$$

$$h_{st-lt} (T_b(l) - T_{st}) = -k \frac{dT_b(l)}{dl} \quad , l = 0 \quad (4.48)$$

ส่วนเงื่อนไขค่าขอบของน้ำเหล็กที่เหลือและแสงลนั้นจะเป็นเช่นเดียวกันกับสมการที่ (4.28a) – (4.28c) และแก้สมการหาค่าความร้อนที่ไหลเข้าหรือไหลออกจากพื้นผิว q_2 และ q_3 ได้ด้วยวิธีการเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.9.4

4.8.6 สรุปเงื่อนไขค่าขอบที่ผนังภายนอกเข้รับน้ำเหล็ก

เนื่องจากในกระบวนการต่างๆ นั้นผนังภายนอกเข้รับน้ำเหล็กนั้นจะไม่มีปัจจัยใดมากระทบ ผนังภายนอกเข้รับน้ำเหล็กจึงจะทำหน้าที่ระบายความร้อนที่รับมาจากภายในออกจากผนังเข้รับน้ำเหล็กด้วยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนตลอด ทำให้เงื่อนไขค่าขอบของผนังภายนอกเข้รับน้ำเหล็กซึ่งแจกแจงเพิ่มเติมจากสมการที่ (4.33) ได้ดังนี้

$$kA_{ld,w} \frac{dT_w(x)}{dx} = q''_{ldw,conv} A_{ld,w} + q''_{ldw,rad} A_{ld,w} \quad , x = r_o \quad (4.33a)$$

$$kA_{ld,b} \frac{dT_b(l)}{dl} = q''_{ldb,conv} A_{ld,b} + q''_{ldb,rad} A_{ld,b} \quad , l = 270 \text{ mm} \quad (4.33b)$$

ส่วนฟลักซ์ความร้อน $q''_{ldw,conv}$, $q''_{ldw,rad}$, $q''_{ldb,conv}$ และ $q''_{ldb,rad}$ สามารถหาค่าได้จากการประยุกต์ใช้สมการที่ (3.3) และ (3.8) ในการหาค่าต่อไป

บทที่ 5

การตรวจวัด และการบันทึกข้อมูล

การสร้างระบบควบคุมเพื่อให้การอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กและเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างสัมพันธ์กันจะทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน ซึ่งการสร้างระบบควบคุมต้องทราบถึงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะทางความร้อนของเป่ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็กที่อยู่ภายในเป่าผ่านทางแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกต้องแบบก็จำเป็นต้องมีการสอบเทียบความแม่นยำด้วยข้อมูลที่มาจากการเก็บข้อมูลจากภาคสนาม

ในบทนี้ จึงจะนำเสนอผลการตรวจวัด และการวิเคราะห์สภาวะทางความร้อนของเป่ารับน้ำเหล็กตลอดวัฏจักรการทำงานเพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับการสอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจำเป็นต้องมีการออกแบบวิธีการและอุปกรณ์โดยเฉพาะเพื่อใช้ในการตรวจวัดสภาวะทางความร้อนของอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าที่มีสภาพการทำงานอันเลวร้ายด้วย

โดยเนื้อหาภายในบทนี้จะมีลำดับการนำเสนอในหัวข้อต่างๆดังนี้

1. ข้อมูลเบื้องต้นในการทำงานของระบบการหลอมเหล็กในสถานที่เก็บข้อมูล
2. อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัด และวิธีการตรวจวัด
3. ผลการตรวจวัด และการวิเคราะห์ผลการตรวจวัด
4. การจำแนกลักษณะกระบวนการจากผลการตรวจวัด

5.1 ข้อมูลเบื้องต้นในการทำงานของระบบการหลอมเหล็กในสถานที่เก็บข้อมูล

เพื่อออกแบบวิธีการเก็บข้อมูล และเข้าใจถึงลักษณะของสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเป่ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการผลิตเหล็กกล้า นั้น จะต้องทราบถึงลักษณะทางกายภาพของการปฏิบัติงานภายในโรงงานที่จะออกแบบติดตั้งว่าลักษณะการทำงานของสถานที่เก็บข้อมูลนั้นจะส่งผลต่อสภาวะทางความร้อนต่างๆลักษณะใด และผลิตภัณฑ์ที่ผลิตนั้นเป็นเช่นใด ในหัวข้อนี้จึงจะแบ่งการอธิบายออกเป็นข้อมูลของผลิตภัณฑ์ที่ โรงงานที่ไปศึกษาเก็บข้อมูล และขั้นตอนการปฏิบัติงานภายในโรงงานนั้น

5.1.1 ผลิตภัณฑ์ที่ผลิต

จากโรงงานที่ทำการเก็บข้อมูลนั้น ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จะออกจากสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง ในรูปของเหล็กทรงยาว (Billet) มีขนาดหน้าตัด 100×100 ตารางมิลลิเมตร ยาว 3 เมตร น้ำหนัก โดยประมาณ 230 กิโลกรัมต่อแท่ง โดยเหล็กทรงยาวที่ผลิตได้นั้นจะนำไปผ่านกระบวนการรีดให้เป็นเหล็กข้ออ้อย SD30 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 24-2548) เหล็กเส้นเสริมคอนกรีต: เหล็กข้ออ้อย ซึ่งเหล็กข้ออ้อยนั้นจะมีมาตรฐานในแต่ละชั้นคุณภาพเปรียบเทียบ ส่วนประกอบทางเคมีได้ดังตารางที่ 5 – 1 และสมบัติทางกลในตารางที่ 5 – 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบการระบุชื่อชั้นคุณภาพนั้น ตัวเลข 2 หลักหลังตัวอักษร SD คือตัวย่อของค่าความต้านแรงดึงที่จุดคราก นั่นคือเหล็กชั้นคุณภาพ SD 30 ที่ได้คุณภาพจะต้องมีความต้านแรงดึงที่จุดครากได้ประมาณ 300 MPa นั่นเอง

ตารางที่ 5-1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กข้ออ้อยในแต่ละชั้นคุณภาพตาม มอก.

ชั้นคุณภาพ	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)				
	คาร์บอน สูงสุด	แมงกานีส สูงสุด	ฟอสฟอรัส สูงสุด	กำมะถัน สูงสุด	คาร์บอน + (แมงกานีส/6) สูงสุด
SD 30	0.27	-	0.05	0.05	0.50
SD 40	-	1.80	0.05	0.05	0.55
SD 50	-	1.80	0.05	0.05	0.60
ความคลาด เคลื่อนไม่เกิน	± 0.03	± 0.05	± 0.01	± 0.01	-

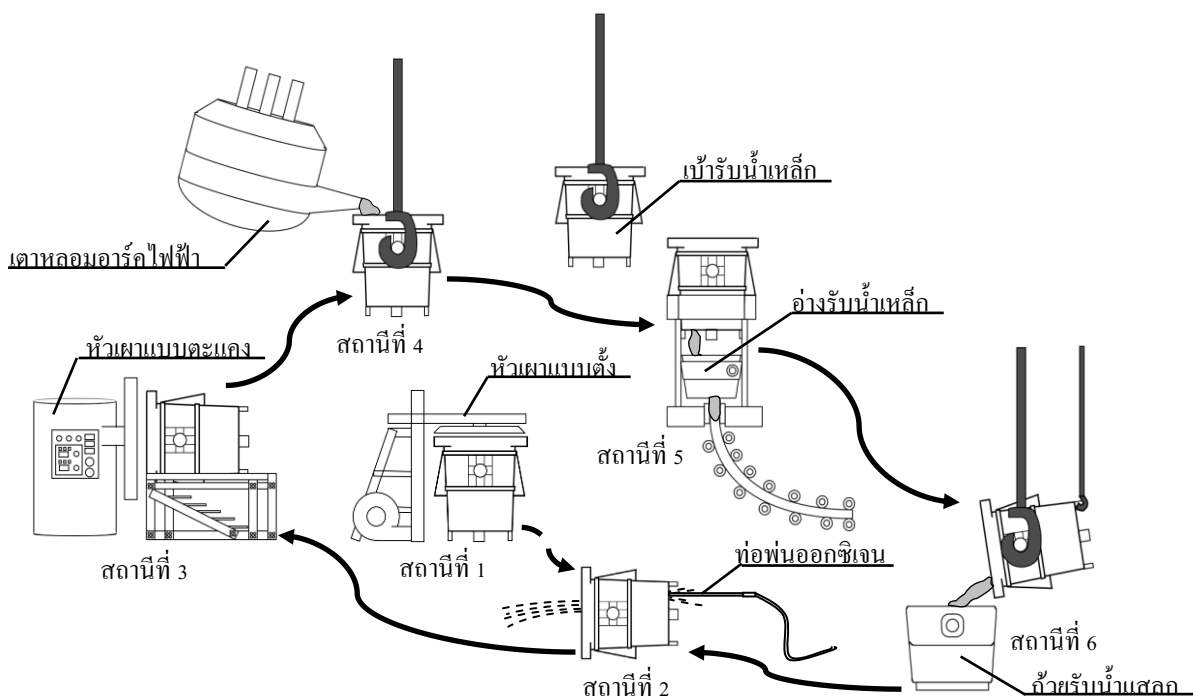
ตารางที่ 5-2 สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อยในแต่ละชั้นคุณภาพตาม มอก.

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึง (MPa)	ความต้านแรงดึงที่จุดคราก (MPa)	ความยืด (ร้อยละ)
SD 30	480	295	17
SD 40	560	390	15
SD 50	620	490	13

5.1.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน

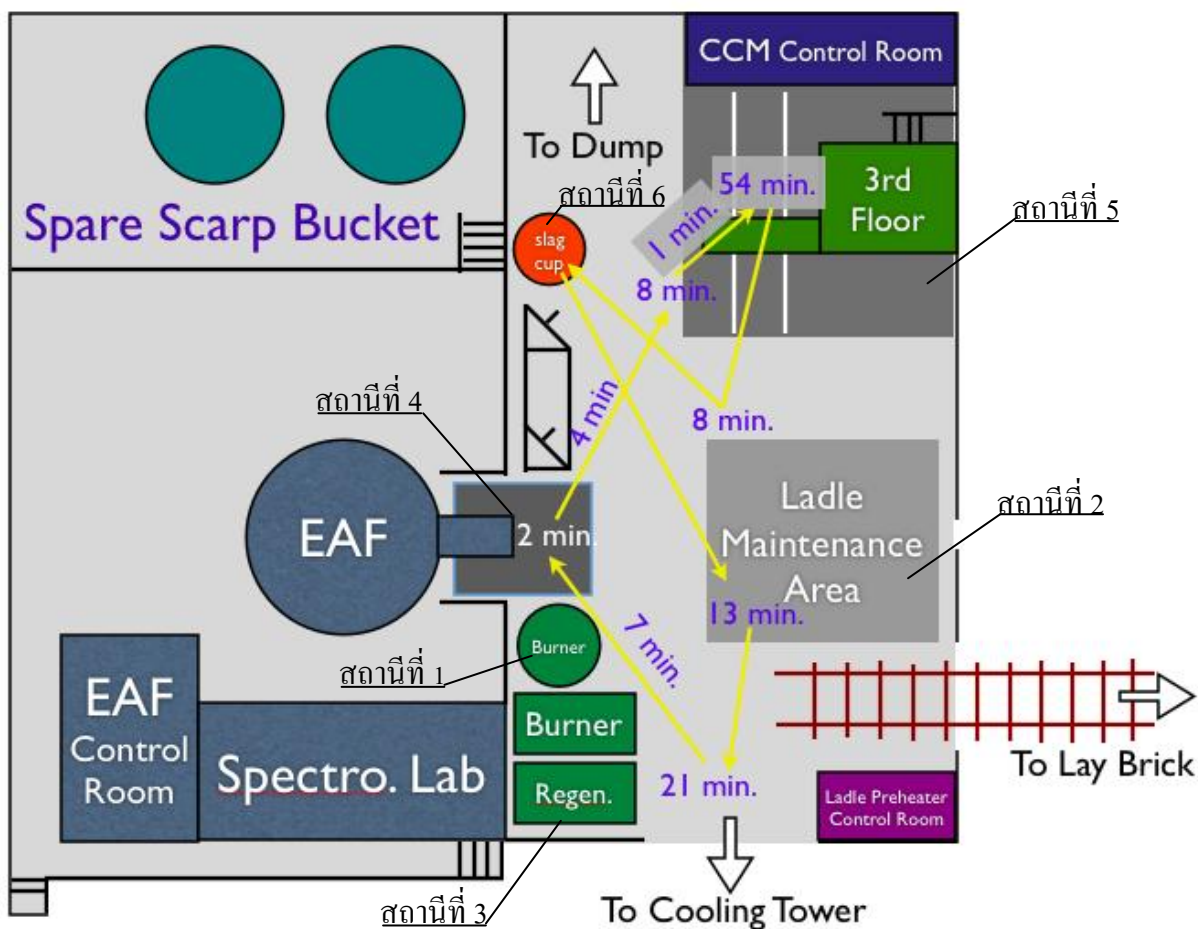
ภายในโรงงานที่ทำการศึกษาและเก็บข้อมูลจะมีขนาดความจุเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและเบ้ารับน้ำเหล็กขนาด 25 ตันน้ำเหล็ก โดยภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าไม่มีหัวเผา ใช้เพียงเศษเหล็กเป็นวัตถุดิบ และไม่มีกระบวนการผลิตเหล็กขึ้นทุติยภูมิ โดยในกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กประกอบไปด้วยหัวเผา 3 ชนิดได้แก่ หัวเผาแบบตั้ง หัวเผาแบบนอน และหัวเผาแบบริเจนเนอเรทีฟ

มีขั้นตอนการทำงานสามารถอธิบายได้ตามรูปที่ 5 – 1 โดยลำดับการปฏิบัติงานจะเริ่มต้นจากสถานีที่ 1 เป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบตั้งเพื่อไล่ความชื้นออกจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก เมื่อเสร็จกระบวนการแล้วเบ้ารับน้ำเหล็กจะเคลื่อนย้ายไปยังสถานีที่ 2 เพื่อติดตั้งประตูเลื่อน (Sliding Gate) สำหรับควบคุมการเทน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก เมื่อติดตั้งเสร็จแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกอุ่นด้วยหัวเผาที่วางตะแคงเพื่อให้ปรับอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กให้สูงเพียงพอสำหรับการป้องกันการเปลี่ยนอุณหภูมิแบบฉับพลันเมื่อรับน้ำเหล็กที่สถานีที่ 3 และจะถูกนำมารับน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่สถานีที่ 4 ซึ่งเมื่อออกจากสถานีนี้แล้วเบ้ารับน้ำเหล็กจะบรรจุน้ำเหล็กอยู่เต็มเบ้า น้ำเหล็กเหล่านี้จะถูกขนถ่ายไปยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง(สถานีที่ 5 ในรูปที่ 5 – 1) เพื่อเทน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กและเข้าสู่กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องต่อไป ซึ่งระหว่างการเทน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นน้ำเหล็กจะถูกเทออกจากเบ้าผ่านทางประตูเลื่อนที่ติดตั้งไว้บริเวณกันเบ้ารับน้ำเหล็ก เมื่อเวลาผ่านไประดับน้ำเหล็กภายในเบ้าจะค่อยๆลดลงตามเวลาจนเหลือเพียงแสลคที่ปกคลุมผิวหน้าของน้ำเหล็ก แสลคเหล่านี้จะถูกนำไปเทออกทางปากเบ้ารับน้ำเหล็กลงไปในถ้วยรับน้ำแสลคที่สถานีที่ 6 แล้วจึงถูกเคลื่อนย้ายมายังสถานีที่ 2 ใหม่เพื่อทำความสะอาดและตรวจเช็คสภาพประตูเลื่อน เมื่อเสร็จสิ้นการบำรุงแล้วเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกยกไปอุ่นยังสถานีที่ 3 หรือในบางกรณีที่เร่งรีบอาจงดเว้นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กแล้วนำไปรับน้ำเหล็กที่สถานีที่ 4 เลย ดังนั้นเมื่อการทำงานผ่านรอบการทำงานแรกไปแล้วนั้น เบ้ารับน้ำเหล็กจะมีลักษณะการทำงานเป็นวัฏจักร โดยเวียนจากสถานีที่ 2 ไปยังสถานีที่ 3, 4, 5 และ 6 ตามลำดับ ซึ่งในกรณีที่ไม่มีเกิดเหตุขัดข้องภายในกระบวนการ กระบวนการจะวนเป็นวัฏจักรดังเช่นอธิบายจนเบ้ารับน้ำเหล็กสิ้นสภาพการทำงาน



รูปที่ 5-1 วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กในกระบวนการหลอมเหล็กในโรงงานที่ศึกษาวิจัย และเก็บข้อมูล

โดยที่การรวมวัฏจักรการทำงานดังที่ได้อธิบายตามรูปที่ 5 – 1 ใวนั้นสามารถแสดงดังแผนผังภายในโรงงานที่ทำการศึกษาและเก็บข้อมูลได้ดังรูปที่ 5 – 2 ซึ่งในรูปที่ 5 – 2 นั้นจะแสดงเวลาในแต่ละขั้นตอนโดยอาศัยข้อมูลจากการศึกษาของ ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น (2552) โดยลักษณะเส้นทางการเคลื่อนที่ของเบ้ารับน้ำเหล็กภายในโรงงานจะแสดงด้วยลูกศรสีเหลืองภายในรูป



รูปที่ 5-2 แผนผังและเส้นทางการเคลื่อนที่ของเบ้ารับน้ำเหล็กในโรงงานที่ทำการศึกษาวิจัย และเก็บข้อมูล

5.2 อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัด และวิธีการตรวจวัด

5.2.1 อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัด

เพื่อหาสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการ อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กต้องถูกตรวจวัด ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากการฝัง Thermocouple ลงไปในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจุดต่างๆที่ต้องการตรวจวัดและบันทึกค่าที่ได้เหล่านั้นด้วย Data Logger แต่เนื่องจากเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการใช้งานภายในกระบวนการจะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา อีกทั้งยังต้องเผชิญกับสถานะแวดล้อมที่มีทั้งความร้อนสูงและฝุ่นละอองจำนวนมาก ทำให้การที่ผู้ปฏิบัติงานต้องเดินตามไปยังสถานีต่างๆระหว่างกระบวนการเต็มไปด้วยความยากลำบาก

ในการเก็บข้อมูลจึงต้องอาศัย Data Logger ที่สามารถส่งสัญญาณข้อมูลที่ตรวจวัดผ่านคลื่นวิทยุมายังผู้ปฏิบัติงาน และให้ Data Logger นั้นติดตามเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างปฏิบัติงานในกระบวนการต่างๆตลอดเวลา เพื่อที่จะได้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดระยะเวลาการทำงานทั้งหมดของเบ้ารับน้ำเหล็ก และรับทราบถึงความผิดปกติใดๆที่จะเกิดขึ้น นอกจากนั้นแล้วสถานะแวดล้อมระหว่างกระบวนการต่างๆยังเต็มไปด้วยฝุ่นละอองและความร้อน Data Logger ที่ติดตามเบ้ารับน้ำเหล็กอาจได้รับความเสียหายจากสภาพแวดล้อมเหล่านั้น จึงต้องมีกล่องป้องกันอุณหภูมิห่อหุ้ม Data Logger ไม่ให้เกิดความเสียหายระหว่างกระบวนการด้วย





นอกจากนั้นแล้วอุณหภูมิพื้นผิวบางตำแหน่งของเบ้ารับน้ำเหล็กและผิวสแลกที่ปกคลุมน้ำเหล็กอยู่นั้นไม่สามารถที่จะติดตั้ง Thermocouple เพื่อตรวจวัดได้ เนื่องจากปัจจัยด้านอุณหภูมิที่สูงและสภาพการทำงานเต็มไปด้วยอันตราย จึงต้องใช้กล้องถ่ายภาพความร้อน และไพโรมิเตอร์ในการตรวจวัดอุณหภูมิผิวเหล่านั้นจากระยะไกลด้วย

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดนั้นถูกแสดงไว้ในตารางที่ 5 – 3 โดยมีรายละเอียดเพิ่มเติมของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวภาคผนวก ก

5.2.2 วิธีการตรวจวัด

การตรวจวัดอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กนี้ จะให้การฝัง Thermocouple ลงไปยังภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ยังบริเวณอิฐก้อนที่ 1 จำนวน 3 ตำแหน่ง อิฐก้อนที่ 5 จำนวน 3 ตำแหน่ง และบริเวณผิวเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยอิฐแต่ละก้อนนั้น ติดตั้ง Thermocouple ที่ระยะ 20 มิลลิเมตร 50 มิลลิเมตร และ 100 มิลลิเมตร จากผิวอิฐ ดังแสดงในรูปที่ 5 – 3 โดยข้อมูลอุณหภูมิที่อ่านค่าได้จาก Thermocouple จะถูกบันทึกลงไปใน Data Logger และส่งสัญญาณวิทยุค่าที่อ่านได้ออกมายังเสารับสัญญาณและจะถูกประมวลผลแสดงเป็นแผนภูมิระหว่าง อุณหภูมิของ Thermocouple และ Data Logger ต่อเวลา บนคอมพิวเตอร์ และสามารถดาวน์โหลดข้อมูลที่เก็บได้ทั้งหมดลงไปยังคอมพิวเตอร์ได้เมื่อสิ้นสุดการเก็บข้อมูล โดยรายละเอียดการติดตั้งแต่ละระบบเป็นดังนี้

ตารางที่ 5-3 รายละเอียดและลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล

ลำดับ	รายการ	ชื่อทางการค้า	รูปภาพ
1.	Thermocouple	Furnace Thermocouple Type K 1.6 mm dia. Mineral Insulated	
2.	กล่องป้องกันอุณหภูมิ	Furnace Thermal Barrier	
3.	อุปกรณ์รับสัญญาณ		
4.	Data Logger	Tpad21 TP2016	

ตารางที่ 5-3 รายละเอียดและลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูล (ต่อ)

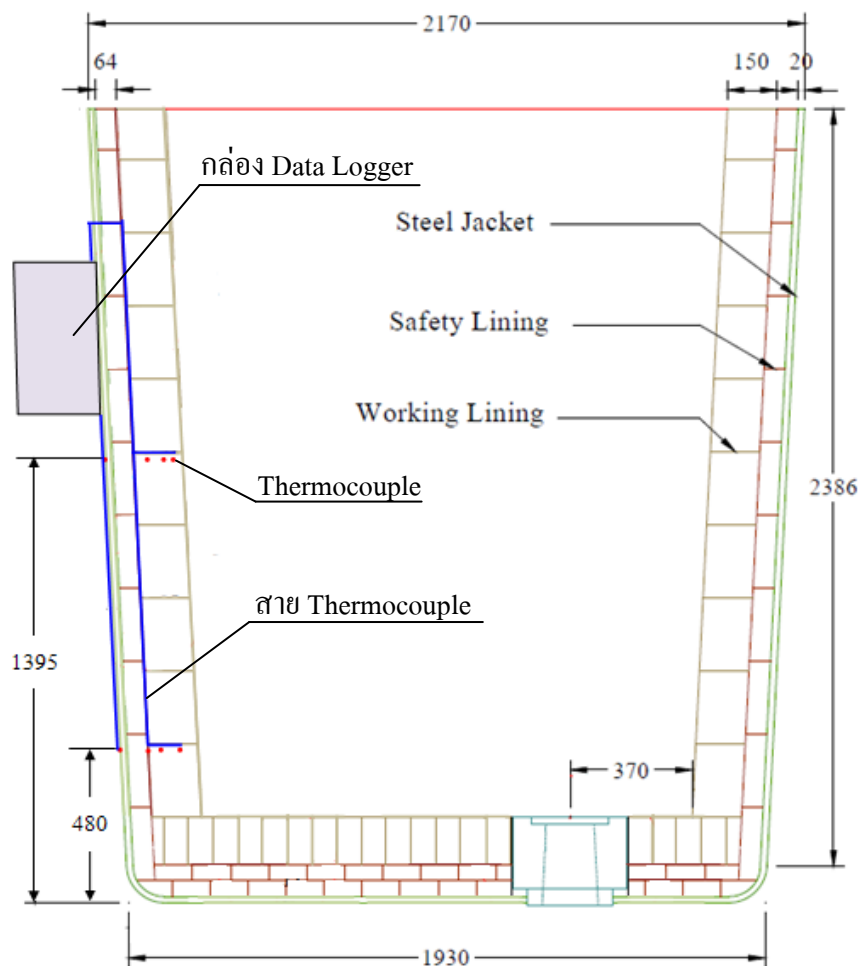
ลำดับ	รายการ	ชื่อทางการค้า	รูปภาพ
5.	Pyrometer	Raytek Raynger 3i	
6.	กล้องถ่ายภาพความร้อน	FLIR P640	

5.2.2.1 การเดินสาย Thermocouple

วัสดุทนไฟที่ใช้ในการบุผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในโรงงานที่ทำการศึกษาวิจัยนั้น ใช้อิฐ SK 38 ซึ่งเป็นอิฐชนิด High-Alumina โดยมีส่วนผสมของ อะลูมินา (Al_2O_3) เป็นหลัก มากถึงร้อยละ 80 โดยมวล นอกจากนั้นแล้วยังประกอบด้วย ซิลิกา (SiO_2) ร้อยละ 14.5 เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ร้อยละ 1.6 และไทเทเนียม (TiO_2) ร้อยละ 2.9 โดยจะเห็นได้ว่าธาตุส่วนใหญ่ที่เป็นองค์ประกอบมีส่วนผสมของโลหะ เมื่ออยู่ในสภาพสัมผัสกับน้ำเหล็กจะมีการละลายเอาออกไซด์ของโลหะเหล่านี้ออกมาจากอิฐ นอกจากนั้นในบางตำแหน่งที่ต้องรับแรงกระแทกของดำนํ้าเหล็กในขณะที่เท แรงกระแทกเหล่านี้ก็เป็นอีกปัจจัยที่ทำให้ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเสียหายและสึกกร่อน

ดังนั้นเมื่อผ่านการใช้งาน ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจึงจะพุกร่อนไปเรื่อยๆ และเมื่อน้ำผนังเบ้ารับน้ำเหล็กพุกร่อนจนถึงจุดที่มีการฝัง Thermocouple ไว้ สาย Thermocouple ที่เดินอยู่ภายในเบ้ารับ

น้ำเหล็กจะมีโอกาสเสียหายเนื่องจากความร้อนปริมาณมหาศาลจากน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงถึง $1,600^{\circ}\text{C}$ จะหลอมละลายสาย Thermocouple จนหมด และอาจมีการซึมผ่านตามเส้นทางการเดินสายของ Thermocouple ด้วย



รูปที่ 5-3 ขนาดของเบ้ารับน้ำเหล็ก และตำแหน่งติดตั้ง Thermocouple ในการเก็บข้อมูล

การติดตั้งสาย Thermocouple จึงต้องเดินไปในชั้นอิฐโดยที่ทำให้เกิดช่องว่างน้อยที่สุดเพื่อป้องกันการซึมผ่านของน้ำเหล็กออกมาข้างภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก วิธีการหนึ่งคือการเจาะร่องบนอิฐที่ใช้ติดตั้ง Thermocouple และเดินสาย Thermocouple ในร่องที่ได้เตรียมไว้ดังรูปที่ 5 – 3 และใช้มอร์ตาร์เทปิดทับร่องสาย Thermocouple เพื่อไม่ให้เกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อของอิฐแต่ละก้อน

นอกจากนั้นสายของ Thermocouple นั้นจะต้องเดินผ่านรูระบายอากาศ (Vent Hole) เพื่อลดการตัดแปลงเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยการเดินสายเบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องเดินขนานไปกับชั้นปลอดภัยจนถึงรูระบายอากาศที่อยู่ทางด้านบนของเบ้ารับน้ำเหล็ก (เส้นสีฟ้าในรูปที่ 5 – 3) เพื่อความ

ปลอดภัยในกรณีที่มีน้ำเหล็กซึมออกมาจากผิวในของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะซึมมาตามทางเดินของสาย Thermocouple จะต้องผ่านชั้นปลอดภัยจึงจะออกมาสร้างความเสียหายให้แก่ผิวเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็กได้ นอกจากนั้นแล้วการเดินสาย Thermocouple ให้ออกจากผิวเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็กยังเป็นการป้องกันการรั่วซึมของน้ำเหล็กออกมาข้างนอกเบ้า เนื่องจากที่ระดับสูงแรงดันของน้ำเหล็กย่อมต่ำกว่าที่ระดับต่ำจึงทำให้โอกาสในการรั่วซึมออกมาตามทางที่สาย Thermocouple เดินไปนั้นเป็นไปได้น้อยกว่า

นอกจากนั้นแล้วสาย Thermocouple ยังต้องเดินตามผิวเปลือกเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็กเข้าสู่ Data Logger ที่ติดตั้งไว้บริเวณผิวเปลือกเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็กเช่นกัน จึงมีโอกาสน้ำเหล็กจะสามารถกระเด็นมาโดยสาย Thermocouple และขาดได้ จึงมีระบบป้องกันสาย Thermocouple ที่เดินบนผิวเปลือกเหล็กปิดสาย Thermocouple ตลอดจนถึง Data Logger

5.2.2.2 การเจาะรูบนอิฐสำหรับติดตั้งสาย Thermocouple

เนื่องจากการเก็บข้อมูลต้องการทราบถึงลักษณะการแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ดำเนินไประหว่างกิจกรรมต่างๆ ตามสภาพการปฏิบัติงานจริง จึงต้องรักษาให้การแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในตำแหน่งที่มีการฝัง Thermocouple เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิไม่มีการรบกวนจากปัจจัยอื่น จึงต้องฝัง Thermocouple ในตำแหน่งที่เหลื่อมกัน โดยให้ตำแหน่งฝัง Thermocouple ทั้ง 2 ตำแหน่ง (A และ B) ต้องอยู่บนระนาบเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวตัดยาวของเบ้ารับน้ำเหล็กที่แตกต่างกัน

ซึ่งในการเก็บข้อมูลนี้ได้ออกแบบให้ตำแหน่งฝัง Thermocouple อยู่ในอิฐก้อนเดียวกันเพื่อความสะดวกในการเดินสาย Thermocouple ดังรูปที่ 5 – 4 (แบบแปลนการเจาะดังแสดงในภาคผนวก [ข]) โดยที่ตำแหน่งของอิฐที่ฝัง Thermocouple ทั้งก้อนที่ 1 และก้อนที่ 5 นั้นจะอยู่ในแนวเดียวกันตามความสูงของเบ้ารับน้ำเหล็ก และตรงกับตำแหน่งรูระบายอากาศเพื่อสร้างเส้นทางเดินสาย Thermocouple ที่สั้นและสะดวกแก่การติดตั้ง



รูปที่ 5-4 ลักษณะอิฐที่มีการเจาะและเซาะร่องเพื่อเดินสาย Thermocouple

5.2.2.3 การติดตั้ง Data Logger

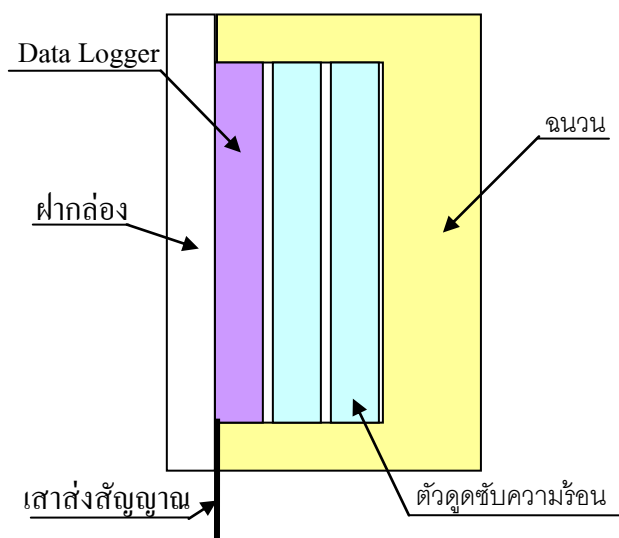
เนื่องจากการเก็บข้อมูลจะต้องมีการวัดอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่อง จึงจำเป็นต้องติด Data Logger และอุปกรณ์ส่งสัญญาณ เพื่อส่งค่าอุณหภูมิที่วัดได้จาก Thermocouple ที่ฝังอยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมายังจุดรับสัญญาณ และติดตามอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่วัดได้ตลอดเวลา แต่เนื่องจากสภาพการทำงานที่ต้องเผชิญกับความร้อนจากน้ำเหล็ก และแรงกระแทกที่อาจเกิดขึ้นจากตะขอที่ใช้ยกเบ้ารับน้ำเหล็ก Data Logger จึงต้องมีการสร้างอุปกรณ์ป้องกันทั้งความร้อนและแรงกระแทก

ลักษณะของอุปกรณ์ป้องกันความร้อนและแรงกระแทกมีลักษณะดังรูปที่ 5 – 5 ซึ่งประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กโดยภายในบรรจุกล่องป้องกันอุณหภูมิ(Furnace Thermal Barrier) และภายในกล่องป้องกันอุณหภูมินี้จะบรรจุ Data Logger ซึ่งจะมีลักษณะภายนอกและภาคตัดยาวดังรูปที่ 5 – 6 จะเห็นได้ว่าจากกล่องป้องกันอุณหภูมิถึงอุปกรณ์ป้องกันภายนอกนั้นจะมีเสาอากาศจากเครื่อง Data Logger ต่อกออกมาทางด้านบน และภายในกล่องป้องกันอุณหภูมิจะประกอบไปด้วยชั้นฉนวน และตัวดูดซับความร้อน (Heat Sink) ซึ่งฉนวนจะทำหน้าที่หน่วงความร้อนที่เข้ามาสู่ Data Logger และตัวดูดซับความร้อนจะคอยดูดซับความร้อนที่เข้ามายัง Data Logger ไม่ให้อุณหภูมิของ Data Logger สูงเกินขีดจำกัด แต่เนื่องจากตัวดูดซับความร้อนภายในบรรจุด้วยพาราฟินชนิดหนึ่งซึ่ง

จะเมื่อจุดจับความร้อนเข้าไปจะเริ่มเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นของเหลว เมื่อพาราฟินในตัวจุดจับความร้อนกลายเป็นของเหลวจนหมด พาราฟินเหลวจึงจะเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้ Data Logger มีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ ดังนั้นจึงต้องมีการเปลี่ยนตัวจุดจับความร้อนอย่างสม่ำเสมอเพื่อป้องกันไม่ให้ Data Logger ภายในเสียหาย



รูปที่ 5-5 ลักษณะอุปกรณ์ป้องกันความร้อนและแรงกระแทก



รูปที่ 5-6 ลักษณะกล่องป้องกันอุณหภูมิและภาคตัดยาวของกล่อง

5.2.3 การเก็บข้อมูลจากรายงานการปฏิบัติงาน

เนื่องจากการศึกษานี้จำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ของสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเป่ารับน้ำเหล็กในกรณีการใช้งานในสภาวะต่างๆ ซึ่งผลลัพธ์ของการทราบความสัมพันธ์นี้จะนำไปสู่การออกแบบระบบเพื่อควบคุมการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กและอุณหภูมิเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้เกิดการประหยัดพลังงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของการใช้พลังงาน และเวลาในการปฏิบัติงานในขั้นตอนต่างๆ โดยข้อมูลที่ต้องการจากรายงานการปฏิบัติการมีรายละเอียดดังตารางที่ 5 – 4

ตารางที่ 5-4 ข้อมูลที่ต้องการจากรายงานการปฏิบัติงาน

ลำดับ	รายการ	ที่มา
1.	เวลาในการปฏิบัติงานแต่ละกิจกรรม (T.O.D.)	- ใบรายงานเตาหลอม - ใบรายงาน CCM - ใบรายงานการใช้ถังเทน้ำเหล็ก (Ladle) - ใบบันทึกการเผาถังรับน้ำเหล็ก (L/D)
2.	อุณหภูมิเทน้ำเหล็ก (°C)	- ใบรายงานเตาหลอม
3.	อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ไปถึงยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง (°C)	- ใบรายงานเตาหลอม - ใบรายงาน CCM
4.	ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเตาหลอม (kW)	- ใบรายงานเตาหลอม
5.	ปริมาณเชื้อเพลิงในการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็ก (liter)	- ใบบันทึกการเผาถังรับน้ำเหล็ก (L/D)
6.	ปริมาณแกลบที่ใช้หลังเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้า (ถุง)	- ใบรายงาน CCM
7.	ปริมาณแกลบที่ใช้ที่สถานีหล่อแบบต่อเนื่อง (ถุง)	- ใบรายงาน CCM
8.	ปริมาณแร่ (FeSi, Si-Mn) ที่โยนลงในเป่ารับน้ำเหล็ก (kg)	- ใบรายงานเตาหลอม

5.3 ผลการตรวจวัด และการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดเบื้องต้น

5.3.1 ผลการตรวจวัดจาก Thermocouple ที่ฝังไว้ภายในเป่ารับน้ำเหล็ก

จากการเก็บข้อมูลระหว่างการปฏิบัติงานจริงของโรงงาน จะมีการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 2 ครั้ง ได้แก่ครั้งที่ 1 ระหว่างวันที่ 7 – 9 ธันวาคม 2554 รวมผลการเก็บข้อมูลครั้งนี้ทั้งสิ้น 10 รอบการทำงาน ไม่ครบตามเป้าหมายที่ 20 รอบการทำงานเนื่องจากเกิดอุบัติเหตุระหว่างการเก็บข้อมูล และครั้งที่ 2 ระหว่างวันที่ 4 – 6 กุมภาพันธ์ 2555 รวมทั้งสิ้น 20 รอบการทำงาน ตั้งแต่เป่ารับน้ำเหล็ก

ได้รับการก่อผนังภายในใหม่จนเมื่อครบ 20 รอบการทำงานเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกส่งออกไปซ่อมผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในส่วนถูกแตกกััดกร่อน

โดยข้อมูลในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 นั้น เนื่องจากมีการเก็บข้อมูลจำนวนตำแหน่งวัดอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่น้อยกว่าและข้อมูลไม่ครบถ้วนตลอดการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ในการแสดงผลในบทนี้จึงจะนำเสนอผลการตรวจวัด และการวิเคราะห์ผลเบื้องต้นของข้อมูลที่เก็บได้จากการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 ซึ่งสามารถเก็บได้ตลอดทั้ง 20 รอบการทำงาน ส่วนผลการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 และการวิเคราะห์จะนำเสนอในภาคผนวก [ค] ต่อไป

ในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 นั้น ข้อมูลทั้ง 20 รอบการทำงานที่สามารถเก็บข้อมูลมาได้แสดงค่าดังรูปที่ 5 – 7 และรายละเอียดแต่ละกิจกรรมที่ได้สรุปจากรายงานการปฏิบัติงาน แสดงดังตารางที่ 5 – 5 โดยการเก็บข้อมูลจะเริ่มต้นที่ 4:05 น. รหัสรอบการทำงาน Heat 123651 ของวันที่ 4 กุมภาพันธ์ 2555 โดยในรูปที่ 5 – 7 จะให้เวลาเริ่มต้นดังกล่าวเป็นนาทิตี่ 0 และการเก็บข้อมูลเสร็จสิ้นที่เวลา 4:48 น. รหัสรอบการทำงาน 123689 ของวันที่ 6 กุมภาพันธ์ 2555 ซึ่งในรูปที่ 5 – 7 จะให้เวลาสิ้นสุดดังกล่าวเป็นนาทิตี่ 2938 ส่วนข้อมูลโดยละเอียดจากการสรุปจากรายงานการปฏิบัติงาน แสดงในภาคผนวก [ค] ต่อไป

แต่ข้อมูลในรูปที่ 5 – 7 จะขาดความต่อเนื่องอยู่หลายช่วงได้แก่

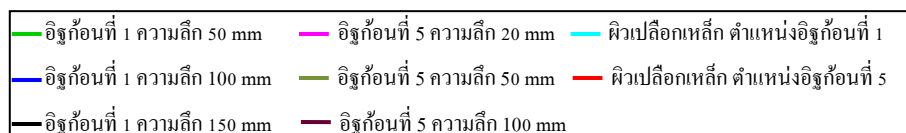
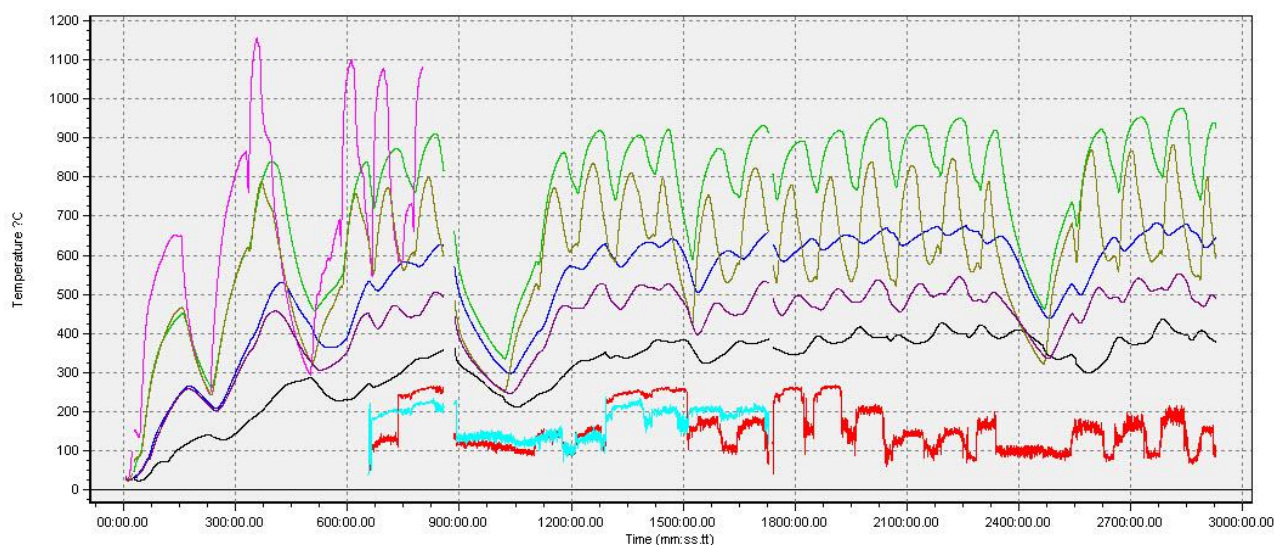
ช่วงที่ 1 ระหว่างนาทิตี่ 23 – 27 ข้อมูลที่ขาดหายไปเป็นผลเนื่องจากผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องตรวจเช็คการทำงานของ Data Logger และ Thermocouple

ช่วงที่ 2 หลังจากนาทิตี่ 800 อุณหภูมิตำแหน่งที่อิฐก้อนที่ 5 ระดับความลึกจากผิวผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กเข้าไป 20 มิลลิเมตร ได้หายไปเนื่องจากสาย Thermocouple ที่ฝังอยู่ภายในที่ตำแหน่งดังกล่าว อาจสัมผัสกับน้ำเหล็กที่ซึมเข้ามายังบริเวณที่ติดตั้ง Thermocouple ทำให้ Thermocouple ได้รับความเสียหายจนไม่สามารถใช้งานได้

ช่วงที่ 3 ระหว่างนาทิตี่ 858 – 887 ข้อมูลจะขาดหายไปเป็นผลเนื่องมาจาก ผู้ปฏิบัติงานนำ Data Logger มาบันทึกค่าข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์เพื่อป้องกันข้อมูลสูญหายหากเกิดความผิดพลาดขึ้นระหว่างการปฏิบัติงาน

ช่วงที่ 4 ระหว่างนาทิตที่ 1728 – 1740 ข้อมูลจะขาดหายไปเนื่องจากข้อมูลของ Thermocouple ตำแหน่งที่ 8 (เส้นสีฟ้า) ได้ขาดหายไป ผู้ปฏิบัติงานจึงทำการตรวจสอบหาสาเหตุ

แต่ถึงแม้ข้อมูลช่วงดังกล่าวจะขาดความต่อเนื่องแต่ลักษณะแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถเห็นได้ถึงความต่อเนื่องในแต่ละช่วง ซึ่งเพียงพอที่จะนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้สอบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป



รูปที่ 5-7 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กตลอด 20 รอบการทำงาน

ตารางที่ 5-5 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก

Heat No.	กิจกรรม	นาทิตที่			อุณหภูมิผนังเหล็ก (°C)	หมายเหตุ
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาทิต)		
123651	รอกการใช้งาน	0	10	10	1690	
	เผาตั้ง	10	149	139		
	ติดตั้งประตูเลื่อน	149	225	76		
	เผาอน	225	324	99		
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	324	330	6		
	รับน้ำเหล็ก	330	332	2		

ตารางที่ 5-5 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานของบ่ารับน้ำเหล็ก (ต่อ)

Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิน้ำเหล็ก (°C)	หมายเหตุ
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)		
123651	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	332	334	2	1655	
	ร่อนน้ำเหล็ก	334	337	3		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	337	391	54		
	เท Slag และล้างรูเท	391	495	104		
						มีแสงลวดตันรูเทน้ำเหล็ก
123655	เผาอน	495	574	79	1686	
	ยกออกไปร่อนน้ำเหล็ก	574	578	4		
	รับน้ำเหล็ก	578	580	2		
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	580	582	2	1652	
	ร่อนน้ำเหล็ก	582	594	12		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	594	641	47		
เท Slag และล้างรูเท	641	662	21			
123656	รับน้ำเหล็ก	662	664	2	1697	รับน้ำเหล็กโดยไม่มีกร้อน
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	664	666	2	1650	
	ร่อนน้ำเหล็ก	666	684	18		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	684	729	45		
	เท Slag และล้างรูเท	729	740	11		
123658	เผาอน	740	767	27	1675	พัก On - Peak
	ยกออกไปร่อนน้ำเหล็ก	767	772	5		
	รับน้ำเหล็ก	772	774	2	1670	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	774	776	2		
	ร่อนน้ำเหล็ก	776	784	8		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	784	830	46		
	เท Slag และล้างรูเท	830	1015	185		
เผาอน	1015	1096	81			
ยกออกไปร่อนน้ำเหล็ก	1096	1104	8			
123660	รับน้ำเหล็ก	1104	1106	2	1688	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1106	1109	3	1657	
	ร่อนน้ำเหล็ก	1109	1127	18		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	1127	1170	43		
	เท Slag และล้างรูเท	1170	1182	12		
123662	เผาอน	1182	1204	22	1692	
	ยกออกไปร่อนน้ำเหล็ก	1204	1209	5		
	รับน้ำเหล็ก	1209	1211	2	1671	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1211	1213	2		
	ร่อนน้ำเหล็ก	1213	1234	21		

ตารางที่ 5-5 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานของบ่ารับน้ำเหล็ก (ต่อ)

Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิน้ำเหล็ก (°C)	หมายเหตุ
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)		
123662	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก เท Slag และล้างรูเท	1234	1275	41		
		1275	1293	18		
123664	เผาอน	1293	1303	10	1677	
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	1303	1308	5		
	รับน้ำเหล็ก	1308	1310	2	1668	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1310	1312	2		
	รอน้ำเหล็ก	1312	1330	18		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	1330	1379	49		
เท Slag และล้างรูเท	1379	1390	11			
123666	เผาอน	1390	1409	19	1670	
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	1409	1414	5		
	รับน้ำเหล็ก	1414	1416	2	1681	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1416	1418	2		
	รอน้ำเหล็ก	1418	1425	7		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	1425	1465	40		
เท Slag และล้างรูเท	1465	1515	50	มีแสงจุดตันรูเทน้ำเหล็ก		
123668	รับน้ำเหล็ก	1515	1517	2	1682	รับน้ำเหล็กโดยไม่มีการอุ่น
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1517	1519	2	1665	
	รอน้ำเหล็ก	1519	1531	12		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	1531	1588	57		
	เท Slag และล้างรูเท	1588	1604	16		
	เผาอน	1604	1635	31		
123670	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	1635	1640	5	1717 1673	
	รับน้ำเหล็ก	1640	1642	2		
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1642	1645	3		
	รอน้ำเหล็ก	1645	1651	6		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	1651	1710	59		
123672	เท Slag และล้างรูเท	1710	1729	19	1665 1639	
	เผาอน	1729	1734	5		
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	1734	1741	7		
	รับน้ำเหล็ก	1741	1743	2		
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1743	1746	3		
	รอน้ำเหล็ก	1746	1761	15		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	1761	1809	48		
เท Slag และล้างรูเท	1809	1826	17			

ตารางที่ 5-5 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานของบ้ำรับน้ำเหล็ก (ต่อ)

Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิน้ำเหล็ก (°C)	หมายเหตุ
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)		
123674	เผาอน	1826	1842	16	1671 1644	
	ยกออกไปรอน้ำเหล็ก	1842	1849	7		
	รับน้ำเหล็ก	1849	1851	2		
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1851	1853	2		
	รอน้ำเหล็ก	1853	1865	12		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	1865	1916	51		
เท Slag และล้างรูเท	1916	1936	20			
123676	เผาอน	1936	1954	18	1688 1677	
	ยกออกไปรอน้ำเหล็ก	1954	1957	3		
	รับน้ำเหล็ก	1957	1959	2		
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1959	1962	3		
	รอน้ำเหล็ก	1962	1978	16		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	1978	2028	50		
เท Slag และล้างรูเท	2028	2043	15			
123678	เผาอน	2043	2053	10	1668 1665	
	ยกออกไปรอน้ำเหล็ก	2053	2061	8		
	รับน้ำเหล็ก	2061	2063	2		
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	2063	2065	2		
	รอน้ำเหล็ก	2065	2084	19		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	2084	2139	55		
เท Slag และล้างรูเท	2139	2147	8			
123680	เผาอน	2147	2173	26	1682 1660	
	ยกออกไปรอน้ำเหล็ก	2173	2181	8		
	รับน้ำเหล็ก	2181	2183	2		
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	2183	2186	3		
	รอน้ำเหล็ก	2186	2194	8		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	2194	2245	51		
เท Slag และล้างรูเท	2245	2257	12			
123682	เผาอน	2257	2279	22	1688 1639	พัก On - Peak
	ยกออกไปรอน้ำเหล็ก	2279	2287	8		
	รับน้ำเหล็ก	2287	2291	4		
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	2291	2292	1		
	รอน้ำเหล็ก	2292	2295	3		
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	2295	2331	36		
เท Slag และล้างรูเท	2331	2454	123			

ตารางที่ 5-5 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานของบ่ารับน้ำเหล็ก (ต่อ)

Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิน้ำเหล็ก (°C)	หมายเหตุ	
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (นาที)			
123683	เผาอน	2454	2532	78	1713		
	ยกออกไปรรับน้ำเหล็ก	2532	2544	12			
	รับน้ำเหล็ก	2544	2546	2			
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	2546	2549	3			1676
	รอเทน้ำเหล็ก	2549	2564	15			
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	2564	2614	50			
	เท Slag และล้างรูเท	2614	2627	13			
123685	เผาอน	2627	2646	19	1691		
	ยกออกไปรรับน้ำเหล็ก	2646	2658	12			
	รับน้ำเหล็ก	2658	2660	2			1640
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	2660	2662	2			
	รอเทน้ำเหล็ก	2662	2673	11			
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	2673	2729	56			
	เท Slag และล้างรูเท	2729	2742	13			
123687	เผาอน	2742	2770	28	1675		
	ยกออกไปรรับน้ำเหล็ก	2770	2775	5			
	รับน้ำเหล็ก	2775	2777	2			1650
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	2777	2779	2			
	รอเทน้ำเหล็ก	2779	2786	7			
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	2786	2837	51			
	เท Slag และล้างรูเท	2837	2850	13			
123689	เผาอน	2850	2872	22	1675		
	ยกออกไปรรับน้ำเหล็ก	2872	2877	5			
	รับน้ำเหล็ก	2877	2879	2			1665
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	2879	2881	2			
	รอเทน้ำเหล็ก	2881	2883	2			
	เทน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	2883	2919	36			
	เท Slag และล้างรูเท	2919	2938	19			

5.3.2 การวิเคราะห์ผลการเก็บข้อมูลเบื้องต้น

การวิเคราะห์ผลการเก็บข้อมูลเบื้องต้นนี้จะอาศัยรายละเอียดของกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นดังแสดงในตารางที่ 5 – 5 เข้ามาตีความลักษณะของแผนภูมิอุณหภูมิต่อเวลาตามรูปที่ 5 – 7 และอธิบาย

สาเหตุการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิตลอดเวลา โดยการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็นส่วนๆ เพื่อให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนแผนภูมิได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยจะมีรายละเอียดตามหัวข้อย่อๆ ต่อไป

5.3.2.1 ช่วงการตั้งรอกการใช้งาน

ช่วงการตั้งรอกการใช้งานเป็นช่วงเริ่มต้นการเก็บข้อมูลจะอยู่ในช่วงตั้งแต่เริ่มต้นการเก็บข้อมูลที่นาที่ที่ 0 - 10 ของการเก็บข้อมูล ข้อมูลในช่วงนี้จะมีลักษณะราบเรียบดังแสดงในรูปที่ 5 - 8 เนื่องจากเป็นอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กหลังก่อสร้างทำงานใหม่เสร็จ และถูกตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องอยู่ตลอดเวลาเพื่อรอจังหวะการสับเปลี่ยนเข้าไปใช้งานภายในสายการผลิต ข้อมูลช่วงนี้อุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กทั้ง 4 ตำแหน่งยังคงมีค่าอยู่ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 30°C ตลอดช่วงการตั้งรอกการใช้งาน

5.3.2.2 ช่วงอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบตั้ง

เริ่มต้นการก่ออิฐในชั้นใช้งาน เบ้ารับน้ำเหล็กต้องมีการอุ่นเบื้องต้นด้วยการไล่ความชื้นออกจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำให้ตัวประสานอิฐก้อนต่างๆบนผนังเบ้ารับน้ำเหล็กแห้งและอยู่ตัวได้เร็วขึ้น โดยการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบตั้ง

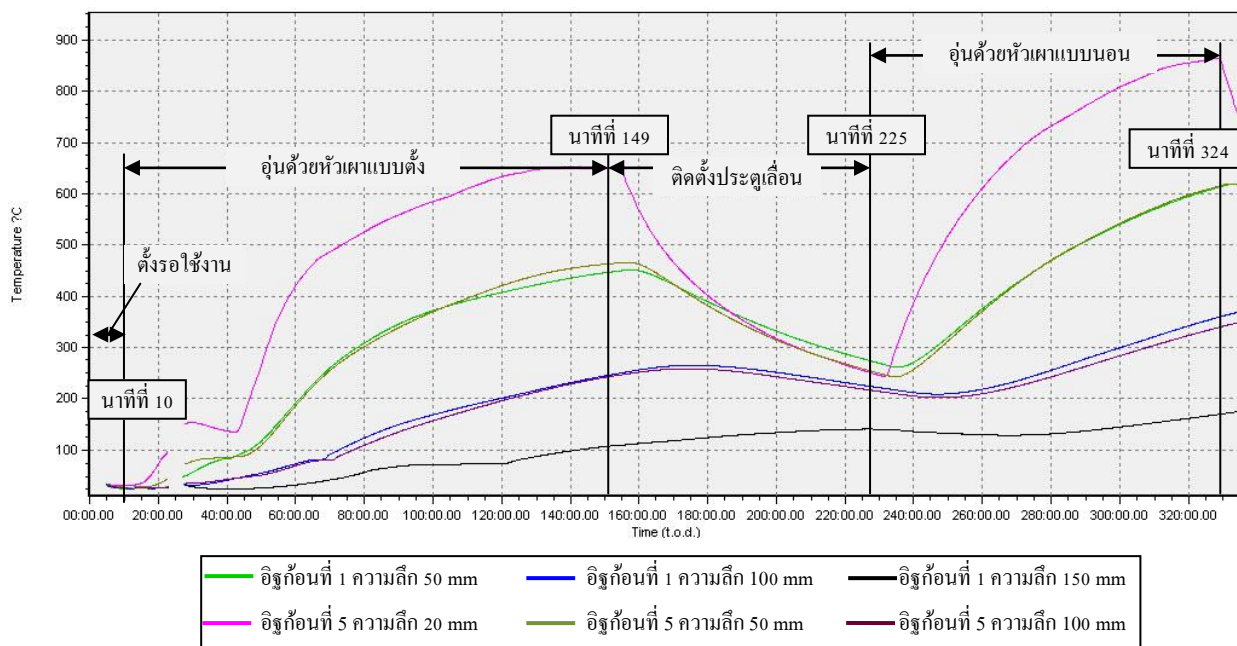
ช่วงเวลาการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กลักษณะนี้อยู่ที่ช่วงนาที่ที่ 10 จนถึงนาที่ที่ 149 ดังแสดงในรูปที่ 5 - 8 ช่วงนี้จะปรากฏชัดว่าอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ต่างก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟเข้ามาสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งในช่วงนี้อุณหภูมิของ Thermocouple ที่ฝังไว้ที่ตำแหน่ง 50 mm จากผิวอิฐ เห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 5 สูงกว่าอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเปลวไฟจากการเผาแบบตั้งลากกับพื้นโลกนั้นไปไม่ถึงกับเบ้ารับน้ำเหล็ก เปลวไฟจากหัวเผาอาจมีการม้วนตัวกลับไปให้ขึ้นตั้งลากกับพื้นผิวโลก

นอกจากนั้นแล้วยังเห็นถึงความไม่ต่อเนื่องของการเผา ซึ่งปรากฏจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงถึงลักษณะการทำงานของหัวเผาไม่มีต่อเนื่องที่ดี

5.3.2.3 ช่วงการติดตั้งประตูเลื่อน (Sliding Gate)

ช่วงการติดตั้งประตูเลื่อนจะต้องหยุดอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กและนำเบ้ารับน้ำเหล็กออกมาวางนอนอยู่กับพื้น เพื่อให้เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานได้ติดตั้งประตูเลื่อนสำหรับเป็นช่องทางให้น้ำเหล็กได้

ไหลผ่านออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก จากรูปที่ 5 – 8 จะอยู่ระหว่างนาทิตี่ 149 – 215 ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่เบ้ารับน้ำเหล็กถ่ายเทความร้อนออกจากสู่บรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเย็นตัวลง



รูปที่ 5-8 แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆต่อเวลา และกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างนาทิตี่ 0 – 330

5.3.2.4 ช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กแบบนอนเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบธรรมดา

การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กแบบนอนเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะมีจุดประสงค์เพื่ออุ่นให้อุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูง เพื่อกำจัดปัญหาที่มาจากาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน (Thermal Shock) เนื่องจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่เพิ่งก่อใหม่นั้นจะยังมีอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำเหล็ก และอิฐที่ใช้สำหรับก่อผนังมีความสามารถในการนำความร้อนที่ต่ำจึงต้องใช้เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนานพอสมควรเบ้ารับน้ำเหล็กจึงจะเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้รับน้ำเหล็ก จากรูปที่ 5 – 8 จะอยู่ในช่วงนาทิตี่ 225 ถึงนาทิตี่ 324

ในช่วงการเผานี้จะเห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 1 จะมีอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดการอุ่นสูงกว่าอุณหภูมิอิฐก้อนที่ 5 ถึงแม้ว่าเมื่อเริ่มต้นการอุ่นนั้นอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 5 จะสูงกว่าอิฐก้อนที่ 1 นั่นแสดงถึงความสามารถของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยวิธีการนอนเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ทำให้เปลวไฟสามารถเข้าถึงส่วนก้นของเบ้ารับน้ำเหล็กได้ดีกว่า การเผาแบบแนวตั้งฉากกับพื้นโลก

ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่กันเบ้ารับน้ำเหล็กจะสูงกว่าที่กลางถังแต่จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของอุณหภูมิมิมีไม่มากนัก การเผาในลักษณะนี้จึงเป็นการเผาที่ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอตามระยะความสูงของเบ้ารับน้ำเหล็ก

5.3.2.5 ช่วงรอการเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก

เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กอุ่นได้เหมาะสมแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กต้องนำไปใช้รับน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่เบ้ารับน้ำเหล็กไม่ได้รับความร้อน แต่จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ จึงมีการถ่ายเทความร้อนจากเบ้ารับน้ำเหล็กออกสู่บรรยากาศทำให้อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กตกลง จากรูปที่ 5 – 9 ช่วงนี้จะอยู่ระหว่างนาทิตี่ 324 และ 330 จะเห็นว่าอุณหภูมิเริ่มคงที่และเริ่มปรากฏแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิ

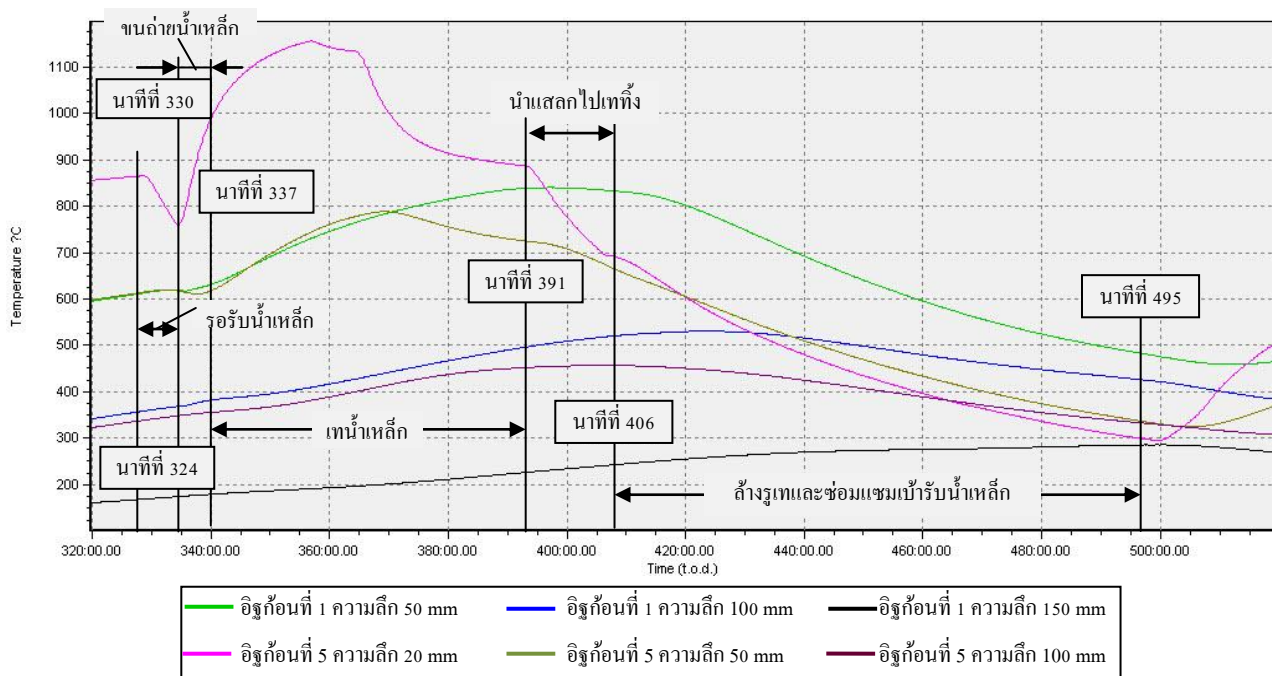
5.3.2.6 ช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็ก

ถึงแม้จะมีการเทน้ำเหล็กมาสู่เบ้ารับน้ำเหล็กตั้งแต่นาทีที่ 330 แล้ว แต่อุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กยังคงมีการลดลงเล็กน้อยเนื่องจากต้องใช้เวลาในการนำความร้อนเข้ามายังตำแหน่งที่ตรวจวัดเล็กน้อย นอกจากนั้นแล้วเนื่องจากเบ้ารับน้ำเหล็กบรรจุน้ำเหล็กอยู่เต็มภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก จึงมีการถ่ายเทความร้อนเข้ามายังผนังเบ้ารับน้ำเหล็กทำให้อุณหภูมิที่จุดต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะเห็นได้จากรูปที่ 5 – 9 ระหว่างนาทิตี่ 330 – 337 ซึ่งจะเห็นชัดเจนว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ระยะ 50 มิลลิเมตร จากผิวอิฐฝั่งที่สัมผัสกับน้ำเหล็ก มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในอิฐก้อนที่ 1 และก้อนที่ 5 ใกล้เคียงกัน

5.3.2.1 ช่วงการเทน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก

จากรูปที่ 5 – 9 ช่วงเวลาในการเทน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กจะอยู่ในช่วงนาทิตี่ 337 – 391 ในขณะที่เริ่มต้นการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กนั้น ระดับของน้ำเหล็กจะค่อยๆ ลดต่ำลงเรื่อยๆ จนเหลือระดับน้ำเหล็กประมาณ 450 มิลลิเมตร หรือระดับตำแหน่งประมาณอิฐก้อนที่ 2 จากกันเบ้ารับน้ำเหล็ก เนื่องจากช่วงระหว่างการเทน้ำเหล็กออกไปนั้น น้ำเหล็กจะยังคงสัมผัสกับอิฐก้อนที่มีการฝัง Thermocouple อยู่จึงทำให้อุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นเพิ่มขึ้นอยู่ตลอดเวลา แต่จากรูปที่ 5 – 9 ที่เวลานาทีที่ 357 จะพบว่าอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่อิฐก้อนที่ 5 ระยะ 20 มิลลิเมตร จากผิวที่สัมผัสกับน้ำเหล็กเริ่มมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากปริมาณระดับน้ำเหล็ก

ได้ลดต่ำกว่าตำแหน่งนั้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนด้วยนำความร้อนจากน้ำเหล็กออกมายังผนัง
 เบ้ารับน้ำเหล็กในแนวรัศมีที่อิฐก้อนที่ 5 ณ ตำแหน่งที่มีการวัดสิ้นสุดลง ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่
 ตำแหน่งนั้นจึงมีการลดอุณหภูมิลง ซึ่งเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่อิฐ
 ก้อนที่ 5 ระยะ 50 มิลลิเมตร แต่จะปรากฏผลช้ากว่าที่ระยะ 20 มิลลิเมตร เนื่องจากความร้อนถูก
 นำเข้ามาซ้ำตามระดับความลึกเข้าไป ในขณะที่อิฐก้อนที่ 1 ระยะ 50 มิลลิเมตร ก็ยังคงการเพิ่มของ
 อุณหภูมิต่อไปจนสิ้นสุดการเทน้ำเหล็กในนาที่ที่ 391 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกในอัตราที่น้อยลง
 เนื่องจากในภายในเบ้ารับน้ำเหล็กยังคงเหลือสแลกและน้ำเหล็กอีกเล็กน้อยอยู่ในเบ้าเพื่อนำไปเททิ้ง
 ต่อไป



รูปที่ 5-9 แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆตลอดเวลา และกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่าง
 นาที่ที่ 320 – 520

แต่หากพิจารณาต่อไปในรูปที่ 5 – 11 ระหว่างนาที่ที่ 684 – 729 ลักษณะการแปรผันของ
 อุณหภูมิระหว่างการเทน้ำเหล็กจะแตกต่างกันที่ ในระหว่างนาที่ที่ 620 – 641 ในรูปที่ 5 – 10 นั้น
 อุณหภูมิที่ระยะ 20 มิลลิเมตรของอิฐก้อนที่ 5 จะมีลักษณะการลู่เข้าของอุณหภูมิเข้าสู่อุณหภูมิต่ำ
 หนึ่ง แต่ในขณะที่การเทน้ำเหล็กระหว่างนาที่ที่ 684 – 729 ไม่ปรากฏลักษณะเช่นนี้ ลักษณะที่
 แตกต่างของการลู่เข้าของอุณหภูมิที่อิฐก้อนที่ 5 นี้ยังปรากฏให้เห็นเล็กน้อยในการแปรผันของ
 อุณหภูมิที่ระดับ 50 มิลลิเมตรด้วยเช่นกัน แต่ที่ระยะ 100 มิลลิเมตรเข้าไปในผนังแทบจะไม่ปรากฏ

การแปรผันของอุณหภูมิอันมีผลมาจากการลู่เข้า ผลของการลู่เข้าของอุณหภูมิที่ปรากฏขึ้นนั้นส่งผลอย่างมากต่อลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิที่ระดับความลึกถัดๆ ไป ซึ่งจะเห็นได้จากการลดลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้นกว่ากระบวนการที่อุณหภูมิภายในผนังไม่มีการลู่เข้า

ผลของการลู่เข้าของอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้นั้นน่าจะเป็นผลมาจากการเปิดปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็ก เพราะลักษณะการลู่เข้าของอุณหภูมิในอิฐก้อนที่ 5 ระดับความลึกที่ 50 มิลลิเมตรจะมีการลู่เข้าในลักษณะเส้นโค้งกำลังสี่ ซึ่งเป็นผลมาจากการแผ่รังสีความร้อนเข้าไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำๆ หนึ่ง เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กได้รับการปิดฝาตลอดกระบวนการ อุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะสูงกว่า และมีค่าประมาณค่าๆ หนึ่ง แต่เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กถูกเปิดออกทำให้ลักษณะการถ่ายเทความร้อนเปลี่ยนแปลงไป การแผ่รังสีที่เกิดขึ้นจะเสมือนแผ่รังสีเข้าสู่วัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ดังนั้นในช่วงระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กนาที่ที่ 684 – 729 นั้นก็ปรากฏการลู่เข้าของอุณหภูมิแต่เป็นอุณหภูมิต่ำกว่าทำให้เห็นเฉพาะช่วงแรกของการลู่เข้าที่อุณหภูมิจะตกลงอย่างรวดเร็วจนมีลักษณะคล้ายกับเส้นตรง ซึ่งในแต่ละกระบวนการมีการเปิดปิดฝาไม่เหมือนกัน เนื่องจากการเปิดปิดฝาเป็นหน้าที่ของปั้นจั่นซึ่งผู้ควบคุมปั้นจั่นจะจัดการการเปิดปิดฝาตามความเหมาะสม และความสะดวกในแต่ละรอบการทำงาน

5.3.2.2 ช่วงการเทเหล็กและล้างรูเทน้ำเหล็กด้วยออกซิเจน

เมื่อสิ้นสุดการเทน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กแล้วจะเหลือเหล็กและน้ำเหล็กบางส่วนในเบ้ารับน้ำเหล็ก ส่วนที่เหลือต้องมีการเคลื่อนย้ายเบ้ารับน้ำเหล็กไปที่ส่วนที่เหลือนั้นลงไปในด้วยรับแอสลค ดังนั้นจึงมีระยะเวลาเล็กน้อยที่อิฐก้อนที่ 1 ยังคงรับความร้อนที่ถ่ายเทออกจากแอสลคที่เหลือนั้นเข้ามาจึงคงทำให้อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กยังคงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย จะเห็นได้จากรูปที่ 5 – 9 ระหว่างนาที่ที่ 391 – 406 แต่เมื่อแอสลคถูกเทออกไปจนหมดแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกเคลื่อนย้ายไปล้างรูเทน้ำเหล็กด้วยการเป่าออกซิเจน ในช่วงนี้เบ้ารับน้ำเหล็กจะถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศในลักษณะเดียวกันกับช่วงรอรับน้ำเหล็กซึ่งจะปรากฏในรูปที่ 5 – 9 ระหว่างนาที่ที่ 406 - 495 ก่อนที่จะเคลื่อนย้ายต่อไปยังแท่นอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ช่วงเวลาที่เบ้ารับน้ำเหล็กเทแอสลคออกไปจนหมดแล้วนั้น ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ยังคงอุณหภูมิสูงอยู่จะเริ่มถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมทำให้อุณหภูมิมผนังเบ้ารับน้ำเหล็กลดลง

ข้อสังเกตที่น่าสนใจของช่วงกระบวนการนี้คือ ช่วงรอยต่อระหว่างการเทแอสกและการนำเบ้ารับน้ำเหล็กไปล้างรูด้วยออกซิเจน จะเห็นว่าในการเทแอสกในช่วงนาทิตีที่ 391 – 406 นั้น ที่นาทิตีที่ 406 – 408 อุณหภูมิที่ระยะ 20 มิลลิเมตรจะมีอุณหภูมิก่อนข้างคงที่ ซึ่งลักษณะเช่นนี้ก็เกิดขึ้นเช่นเดียวกันเมื่อสิ้นสุดการเทแอสกของการเคลื่อนย้ายเบ้ารับน้ำเหล็กไปเทแอสกช่วงนาทิตีที่ 654 – 659 ในรูปที่ 5 – 10 และช่วงนาทิตีที่ 729 – 738 ในรูปที่ 5 – 11 ก่อนที่อุณหภูมิที่ตำแหน่งความลึก 20 มิลลิเมตรของอิฐก้อนที่ 5 นี้จะเปลี่ยนการลดลงของอุณหภูมิกลายเป็นลักษณะการถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศ ที่มีลักษณะของอุณหภูมิในช่วงนี้ค่อนข้างคงที่อันจะมีเหตุจากการเทแอสกที่เหลื่ออยู่ที่นั่น ทั้งน้ำเหล็กและแอสกที่เหลื่ออยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กต้องไหลออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำให้ระยะของน้ำเหล็กและแอสกที่เหลื่อเข้ามาใกล้จุดตรวจวัดมากขึ้น ส่งผลถึงอิฐก้อนที่ 5 น้ำเหล็กและแอสกที่เหลื่อนั้นจะถ่ายเทความร้อนเข้ามายังจุดตรวจวัดทำให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิมิ้อตราการลดลงที่ต่ำมากเป็นเวลาดำเนินๆ หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย(เช่นในกรณีประมาณนาทิตีที่ 736 – 740) ก่อนที่อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้จะลดลงต่อไปในลักษณะที่ถ่ายเทออกสู่บรรยากาศ

เมื่อสังเกตในรูปที่ 5 – 7 นั้น ระยะเวลาการล้างรูเทน้ำเหล็กด้วยออกซิเจนในรอบการทำงานแรก(ระหว่างนาทิตีที่ 0 – 495) จะยาวนานกว่ารอบการทำงานอื่น เนื่องมาจากในระหว่างการเก็บข้อมูลได้เกิดอุบัติเหตุ แอสกบางส่วนได้ลงไปอุดตันอยู่ภายในรูเท ทำให้ไม่สามารถกำจัดออกได้จึงต้องเสียเวลาในการเปลี่ยนรูเทน้ำเหล็กใหม่ ซึ่งสภาพความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนั้นทำให้ผู้ปฏิบัติงานเกิดความไม่สะดวกและใช้เวลายาวนานในการเปลี่ยนรูเทนั้น

5.3.2.3 ช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กล้างรูเทน้ำเหล็กเสร็จแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กต้องถูกอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟจากรูปที่ 5 – 10 จะอยู่ระหว่างนาทิตีที่ 495 – 574 จะเห็นได้ว่าเมื่อเริ่มต้นอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนั้น อุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กยังคงลดลงเล็กน้อยก่อนที่จะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาประมาณนาทิตีที่ 500 โดยจะปรากฏชัดในการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในอิฐก้อนที่ 5 ที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตรก่อนและตามมาด้วยอุณหภูมิต่ำที่ระดับความลึกถัดๆ ไป แต่ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในรูปที่ 5 – 10 นั้นเป็นลักษณะการเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิต่ำเนื่องจากช่วงเวลาก่อนหน้านานาที่ที่ 495 นั้นเบ้ารับน้ำเหล็กถูกทิ้งไว้ให้ถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศเป็นเวลานาน อุณหภูมิภายในผนังเบ้า

รับน้ำเหล็กขณะเริ่มต้นการอุ่นจึงต่ำกว่าการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟในรูปที่ 5 – 11

ในรูปที่ 5 – 11 นั้นเป็นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟระหว่างนาฬิกาที่ 740 – 767 ซึ่งเป็นลักษณะการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีปกติที่การปฏิบัติงานเป็นไปอย่างต่อเนื่องซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเริ่มต้นการอุ่นอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กทุกจุดที่มีการตรวจวัดยังคงลดลงเล็กน้อย แต่ลดลงในอัตราลดที่น้อยลงเรื่อยๆ โดยที่อุณหภูมิอิฐก้อนที่ 5 ที่ระยะ 20 มิลลิเมตรจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วและช่วงลดลงของอุณหภูมิจะปรากฏเป็นเพียงช่วงระยะเวลาสั้นๆเท่านั้น แต่อุณหภูมิในอิฐก้อนที่ 1 ที่ระยะ 50 มิลลิเมตร จากผิวอิฐด้านที่สัมผัสน้ำเหล็กจะลดลงในลักษณะที่เข้าสู่อุณหภูมิกำหนดหนึ่ง ในขณะที่อิฐก้อนที่ 5 ที่ระยะ 50 มิลลิเมตร ที่มีอุณหภูมิในขณะเริ่มต้นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ต่ำกว่าอุณหภูมอิฐก้อนที่ 1 ที่ระยะเดียวกัน จะมีอุณหภูมิลดลงในอัตราลดที่ลดลงเรื่อยๆ จนกลายเป็นอัตราเพิ่มในที่สุด และมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อสิ้นสุดการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งลักษณะการแปรผันของอิฐก้อนที่ 5 ที่ระยะ 50 มิลลิเมตรนี้จะมีผลสำคัญต่อการวิเคราะห์ลักษณะการแปรผันในช่วงหลังจาก Thermocouple ที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตรของอิฐก้อนที่ 5 ขาดไปแล้วเป็นอย่างยิ่ง

เหตุการณ์ลดลงของอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากในขณะเริ่มต้นนั้นผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในส่วนที่ร้อนยังคงถ่ายเทความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมรอบข้างเช่น อิฐก้อนต่างๆบนผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก และอุปกรณ์ชุดหัวเผา แต่เมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเหล่านั้นน้อยลงเนื่องจากสิ่งแวดล้อมต่างๆเหล่านั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนจากเปลวไฟของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่ใช้อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจึงจะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมากขึ้น

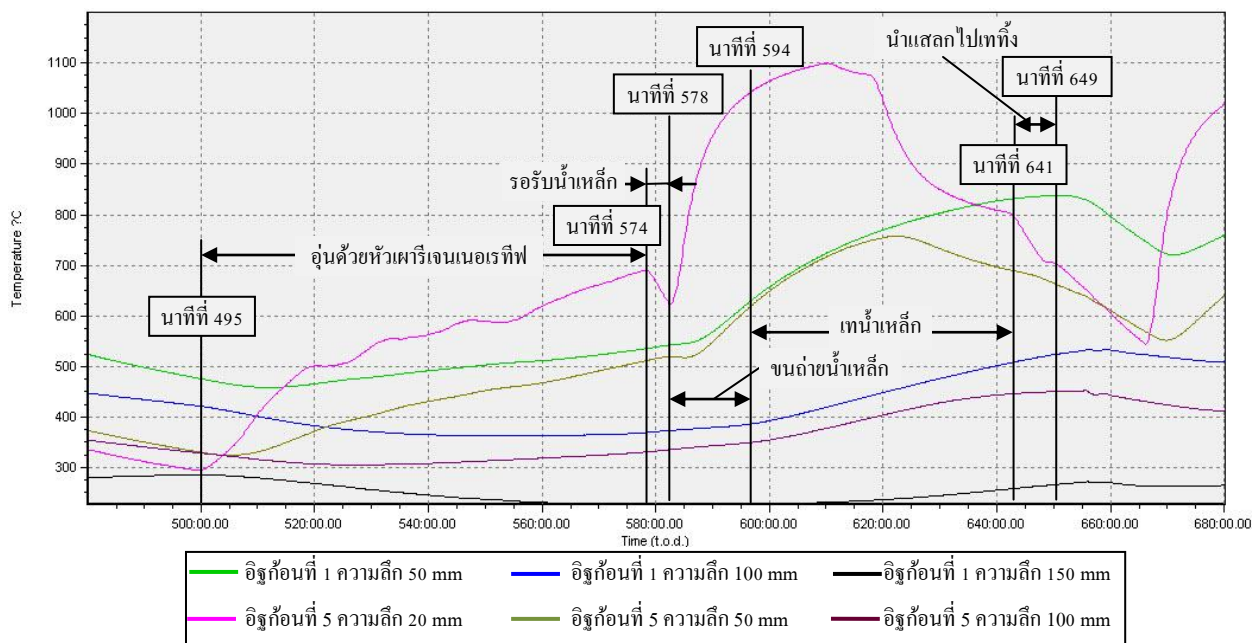
แต่สิ่งที่น่าสังเกตในช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟระหว่างนาฬิกาที่ 495 – 574 คือลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่งความลึกที่ 20 และ 50 มิลลิเมตรของอิฐทั้ง 2 ก้อนที่ตรวจวัด จะปรากฏอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่จะดังกล่าวมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ไม่สม่ำเสมอ ทั้งนี้จะมีผลเนื่องมาจากระบบควบคุมหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟนั้นจะควบคุมผ่านอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ เมื่ออุณหภูมิแก๊สเผาไหม้สูงเกินกว่าอุณหภูมิที่ตั้งไว้หัวเผาจะตัดการทำงานและเริ่มทำงานใหม่เมื่ออุณหภูมิแก๊สในเบ้ารับน้ำเหล็กที่วัดได้ต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนดไว้ ดังนั้น

การทำงานของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟในช่วงนี้จะมีการติดต่อยู่อย่างสม่ำเสมอ ทำให้ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ระยะดังกล่าวขาดการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้การแปลผันอุณหภูมิมีลักษณะการเพิ่มขึ้นที่ไม่ต่อเนื่องตามไปด้วย

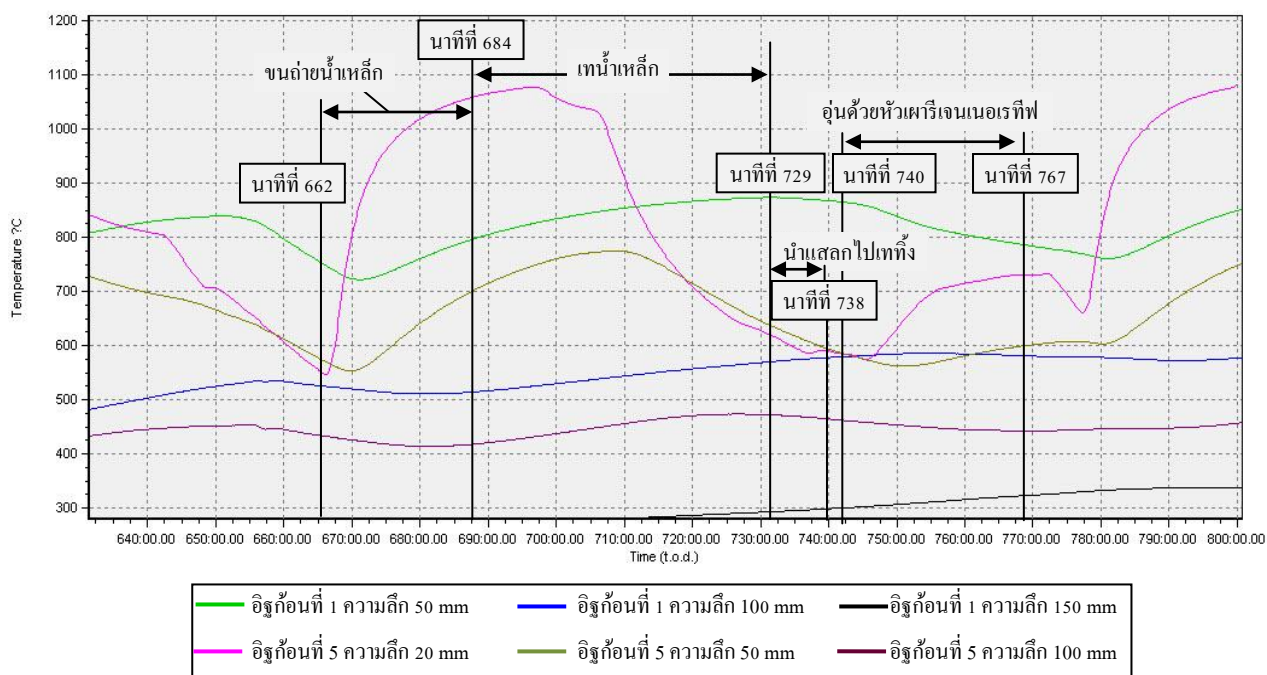
ส่วนการอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟในช่วงนาทิตี่ 740 – 767 นั้นจะปรากฏการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตรของอิฐก้อนที่ 5 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาประมาณนาทิตี่ 745 – 755 และมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ต่ำกว่าในช่วงเวลาถัดไประหว่างนาทิตี่ 755 – 767 ทั้งนี้เนื่องมาจากในการอุ่นในช่วงแรกนั้นอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ในการอุ่นนั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเริ่มต้นการเผา และจะถูกควบคุมให้มีค่าคงที่ ทำให้ลักษณะการเพิ่มขึ้นไม่เพิ่มขึ้นดังเช่นช่วงแรก และไม่ปรากฏความไม่ต่อเนื่องดังเช่นการอุ่นระหว่างนาทิตี่ 495 – 574 เนื่องจากการอุ่นในช่วงนาทิตี่ 740 – 767 นี้ยังมีระยะเวลาในการตอบสนองที่น้อยเกินไป

เนื่องจากพฤติกรรมการแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีลักษณะดังแสดงใน

รูปที่ 5-- รูปที่ 5 – 11 อยู่ทุกรอบการทำงานดังนั้นจึงขอละการวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนต่างๆไว้ ลักษณะการแปรผันดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 5.4.2.5 – 5.4.2.9 สามารถนำไปวิเคราะห์ใช้กับพฤติกรรมการแปรผันอุณหภูมิในรอบการทำงานต่างๆในรูปที่ 5 – 7 และตารางที่ 5 – 5 ได้ แต่จะมีลักษณะการแปรผันเพียงบางส่วนที่มีลักษณะแตกต่างออกไปเนื่องจากการปฏิบัติงานขาดความต่อเนื่อง เช่นการซ่อมบำรุง หรือเกิดเหตุบางประการอุบัติเหตุขึ้น จึงทำให้ลักษณะการแปรผันไม่เป็นไปตามลักษณะใกล้เคียงกับที่วิเคราะห์ในหัวข้อ 5.4.2.5 – 5.4.2.9 ที่ผ่านมา จึงจะมีการอธิบายเพิ่มเติมต่อไป



รูปที่ 5-10 แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆต่อเวลา และกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่าง
นาทีก่อนที่ 480 – 680



รูปที่ 5-11 แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆต่อเวลา และกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่าง
นาทีก่อนที่ 630 – 800

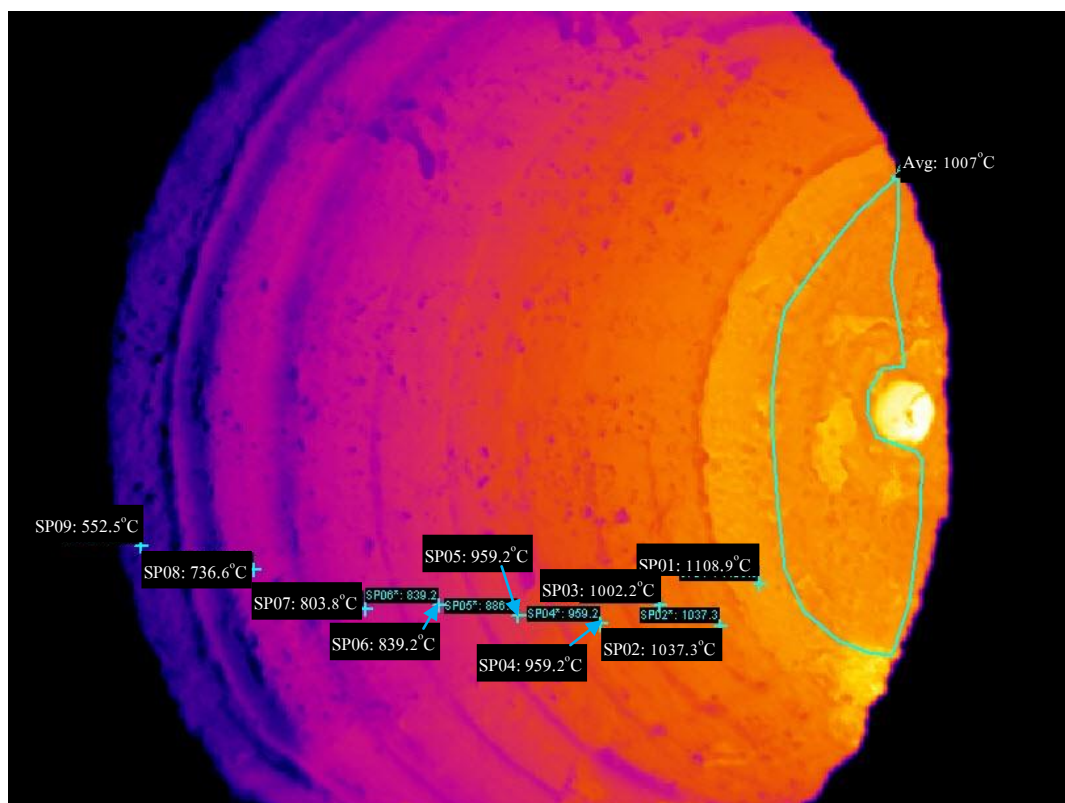
5.3.2.4 ช่วงหยุดปฏิบัติงานระหว่างช่วงเวลาที่มียัตราค่าไฟฟ้าสูง (On-Peak)

เนื่องจากกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้าในปริมาณมาก จึงจำเป็นต้องปฏิบัติงานในช่วงที่อัตราค่าไฟฟ้าต่ำ เพื่อลดค่าพลังงานไฟฟ้าลง และเป็นโอกาสให้มีการซ่อมบำรุงสถานที่และอุปกรณ์ ซึ่งช่วงเวลาที่มียัตราค่าไฟฟ้าสูงของทุกวันจะอยู่ในช่วงที่มีความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงนั้นคือช่วง 18:00 – 21:00 น. ของวัน

เนื่องจากช่วงเวลาที่มียัตราค่าไฟฟ้าสูงจะไม่มีกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ดังนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กจึงไม่ถูกใช้งาน จะถูกวางรอการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กยังแทนอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจากรูปที่ 5 – 7 ระหว่างนาฬิกาที่ 840 – 1020 และ 2330 – 2470 เบ้ารับน้ำเหล็กที่เพิ่งผ่านการใช้งานมาจึงมีอุณหภูมิในผนังเบ้ารับที่สูงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่สิ่งแวดล้อม จะเห็นจากการลดลงของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก จะลดลงอย่างต่อเนื่องแต่มีการลดลงในอัตราที่ลดลงเรื่อยๆ เนื่องมาจากที่อุณหภูมิสูง การถ่ายเทความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่ามากจะเกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง ทำให้เกิดอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่มากกว่าผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่อุณหภูมิต่ำ และจะเห็นว่าอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นที่ระดับความลึกต่างกันเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่งต่างมีความแตกต่างที่น้อยลง

5.3.3 ผลการตรวจวัดจากกล้องถ่ายภาพความร้อน

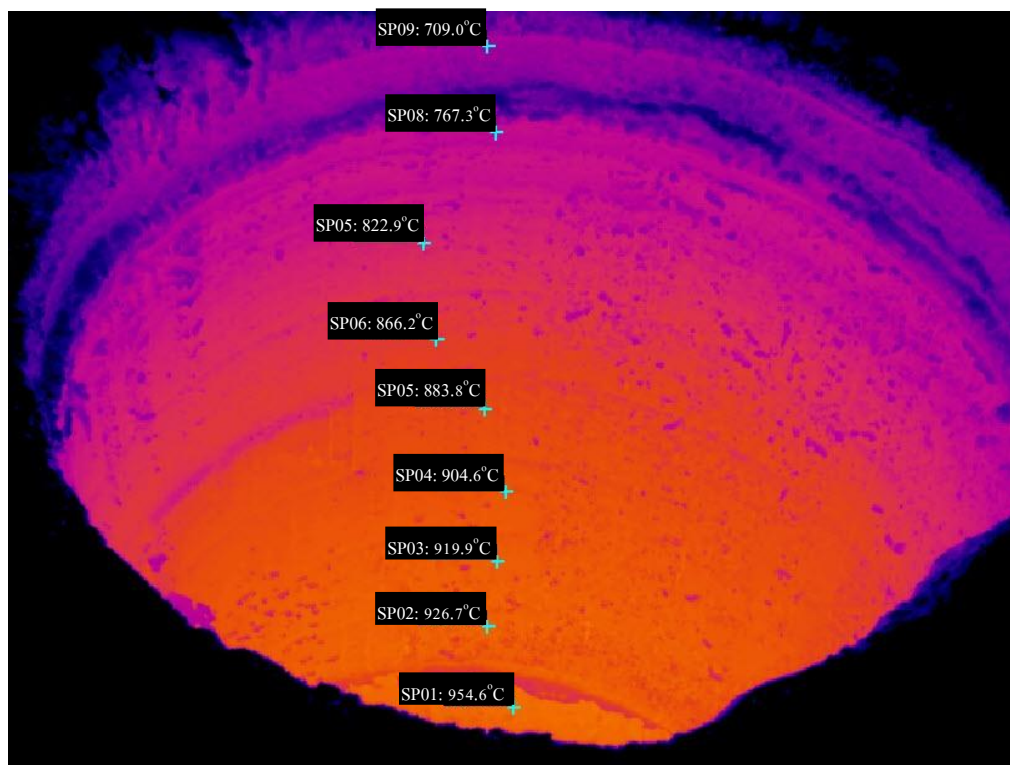
ในการเก็บข้อมูลระหว่างการปฏิบัติงานของเบ้ารับน้ำเหล็กได้มีการเก็บภาพถ่ายความร้อนไว้เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะของอุณหภูมิพื้นผิวต่างๆ กระบวนการซึ่งภาพถ่ายความร้อนได้ถูกถ่ายไว้จะมีได้แก่ภาพพื้นผิวภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างล่างรูเทน้ำเหล็กด้วยออกซิเจน ภาพผนังเบ้ารับน้ำเหล็กภายนอกระหว่างรูเทด้วยออกซิเจน ภาพผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กขณะรอรับน้ำเหล็กหน้าเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ภาพน้ำเหล็กขณะอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กกำลังเคลื่อนตัวไปยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง และภาพพื้นผิวภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็กขณะรอเพื่อเทน้ำเหล็กที่สถานีหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งตัวอย่างภาพถ่ายความร้อนแสดงดังรูปที่ 5 – 12 – รูปที่ 5 – 16 ซึ่งจากการเก็บข้อมูลจะทำให้ได้ข้อสังเกตอันมีประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือ ขอบบนของเบ้ารับน้ำเหล็ก(อิฐก้อนที่ 8 – 9) จะมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดช่วงก่อนรับน้ำเหล็ก ระหว่างรับน้ำเหล็ก และหลังรับน้ำเหล็กประมาณ 850°C และอุณหภูมิผิวแสดกจะมีอุณหภูมิโดยเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $600 - 800^{\circ}\text{C}$ ซึ่งสามารถอนุมานว่าอุณหภูมิของผิวแสดกจะต่ำกว่าน้ำเหล็กประมาณ 900°C



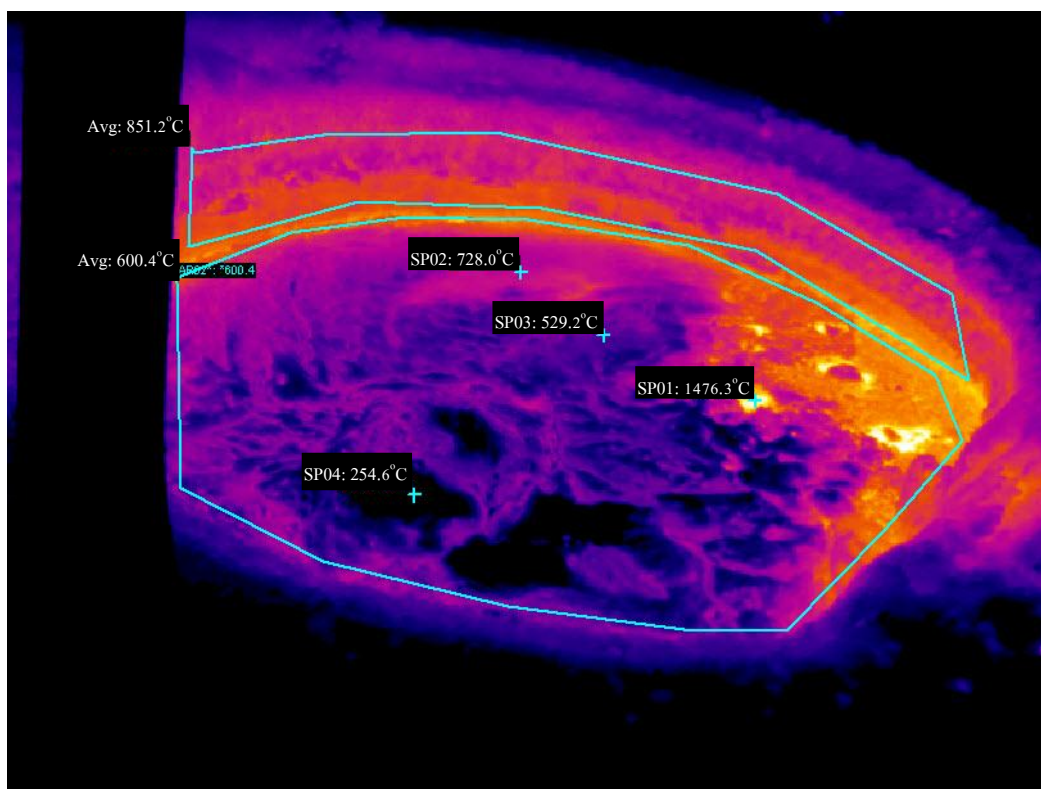
รูปที่ 5-12 ภาพถ่ายความร้อนผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กขณะล้างรูเทด้วยออกซิเจน



รูปที่ 5-13 ภาพถ่ายความร้อนผนังภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็กขณะล้างรูเทด้วยออกซิเจน



รูปที่ 5-14 ภาพถ่ายความร้อนผนังภายในเข้รับน้ำเหล็ก ขณะรอรับน้ำเหล็กหน้าเตาหลอม



รูปที่ 5-15 ภาพถ่ายความร้อนน้ำเหล็กบรรจุในเข้รับน้ำเหล็กขณะขนถ่ายไปยัง
สถานีหล่อแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 5-16 ภาพถ่ายความร้อนผนังภายนอกเข้รับน้ำเหล็กขณะรอเทน้ำเหล็กที่
สถานีหล่อแบบต่อเนื่อง

5.4 การจำแนกลักษณะกระบวนการจากผลการตรวจวัด

เพื่อการออกแบบโปรแกรมควบคุมการหลอม กิจกรรมการทำงานต่างๆที่ได้แสดงและวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 5.3 นั้นต้องถูกนำมาจำแนกเป็นลักษณะต่างๆให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 4 ครอบคลุมลักษณะที่เกิดขึ้น ในหัวข้อนี้จึงจะอธิบายถึงการจำแนกกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นว่าจะอยู่ในขอบข่ายของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ และสรุปการจำแนกกิจกรรมที่เกิดขึ้นทั้งหมด เพื่อความสะดวกในการนำข้อมูลจากการตรวจวัดมาสอบเทียบกับผลการจำลองต่อไปโดยการจำแนกจะจำแนกตามลักษณะกระบวนการซึ่งสอดคล้องกับแบบจำลองอันได้แก่

1. กระบวนการอุ่นเข้รับน้ำเหล็ก
2. การพักเข้รับน้ำเหล็ก
3. กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก

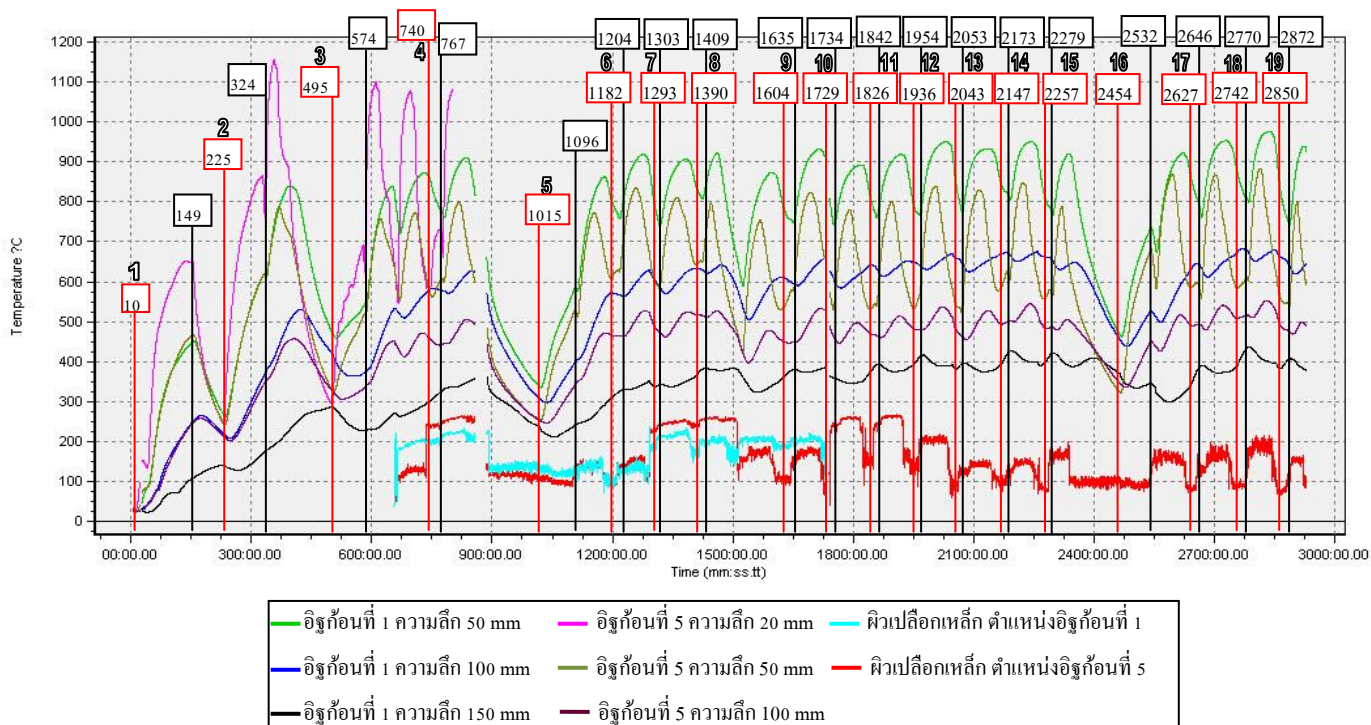
4. กระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก
5. การขนย้ายแอสลคไปเททิ้ง

5.4.1 กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

การจำแนกในกระบวนการนี้ค่อนข้างตรงไปตรงมา เนื่องจากกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นกระบวนการที่จำเพาะ จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 5.3.2.2, 5.3.2.4 และ 5.3.2.3 สามารถใช้ลักษณะการวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกันได้ทำให้สามารถเข้าใจถึงลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิในกระบวนการนี้ในช่วงต่างๆตลอดการเก็บข้อมูล ซึ่งเมื่อใช้การวิเคราะห์ในลักษณะข้างต้น ประกอบกับรูปที่ 5 – 7 และตารางที่ 5 – 5 ทำให้สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 5 – 17 และตารางที่ 5 – 6

โดยที่รูปที่ 5 – 17 จะแสดงเวลาเริ่มต้นและสิ้นสุดกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละรอบการทำงาน รวมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดอายุการใช้งานของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ 20 รอบการทำงานนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เก็บข้อมูลจะมีการอุ่นทั้งหมด 19 ครั้ง โดยแต่ละครั้งมีระยะเวลาไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับสถานการณ์และการจัดการการทำงาน เมื่อไม่พิจารณาการอุ่นครั้งที่ 1, 2, 3, 5 และ 16 ที่เป็นการอุ่นด้วยเบ้ารับน้ำเหล็กก่อใหม่ และอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เย็นตัวลงมากเนื่องจากการติดตั้งประตูเลื่อน ซ่อมแซมรูลูเท และการหยุดเพื่อเลี้ยงค่าไฟแพงแล้ว เวลาที่ใช้ในการอุ่นเฉลี่ยแต่ละรอบอยู่ประมาณ 20 นาทีต่อรอบ

เมื่อวิเคราะห์ลักษณะผลสรุปในรูปที่ 5 – 17 นี้จะพบว่ารอบการอุ่นที่ใช้เวลาน้อยเช่นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กครั้งที่ 7, 10 และ 13 ซึ่งใช้ระยะเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเพียง 5 และ 10 นาทีเท่านั้น ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้จุดตรวจวัดที่อิฐก้อนที่ 5 ระดับความลึก 50 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 5-17 ช่วงการเริ่มต้น (เส้นสีแดง) และสิ้นสุด (เส้นสีดำ) การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก ที่เวลาต่างๆ ตลอดกระบวนการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 5-6 สรุปข้อมูลการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กตลอดการเก็บข้อมูล

ครั้งที่	เวลา (นาทีที่)		เวลาที่ใช้ (นาที)	ชนิดหัวเผา	ครั้งที่	เวลา (นาทีที่)		เวลาที่ใช้ (นาที)	ชนิดหัวเผา
	เริ่มต้น	สิ้นสุด				เริ่มต้น	สิ้นสุด		
1	10	149	139	A	11	1826	1842	16	C
2	225	324	99	B	12	1936	1954	18	C
3	495	574	79	C	13	2043	2053	10	C
4	740	767	27	C	14	2147	2173	26	C
5	1015	1096	81	C	15	2257	2279	22	C
6	1182	1204	22	C	16	2454	2532	78	C
7	1293	1303	10	C	17	2627	2646	19	C
8	1390	1409	19	C	18	2742	2770	28	C
9	1604	1635	31	C	19	2850	2872	22	C
10	1729	1734	5	C					

* A แทนหัวเผาแบบตั้ง, B แทนหัวเผาแบบธรรมดา, C แทนหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

5.4.2 การพักเบ้ารับน้ำเหล็ก

การพักเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นกระบวนการที่มีความหมายค่อนข้างเปิดกว้างต้องอาศัยความการพิจารณาลักษณะของกระบวนการต่างๆที่ได้วิเคราะห์ไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2.3, 5.3.2.5, 5.3.2.2 และ 5.3.2.4

เนื่องจากการจำแนกกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการปฏิบัติงานทั้งหมดต้องจัดให้อยู่ในรูปแบบของแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ โดยการพักเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 4.5 ซึ่งแบบจำลองนี้มีลักษณะที่พื้นผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็กถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศผ่านปากเบ้ารับน้ำเหล็ก ดังนั้นในการพิจารณากระบวนการใดๆ นอกจากพิจารณาจากการแปรผันของอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กแล้ว ภายภาพของกระบวนการนั้นๆต้องถูกนำมาพิจารณาเพื่อจำแนกกระบวนการด้วย

เมื่อกลับไปพิจารณาลักษณะการพักเบ้ารับน้ำเหล็กตามลักษณะการออกแบบแบบจำลองนั้น ลักษณะการถ่ายเทความร้อนตามรูปที่ 4 – 3 ซึ่งลักษณะนี้จะเกิดขึ้นในขณะที่เบ้ารับน้ำเหล็กถูกยกออกไปรอรับน้ำเหล็กบริเวณหน้าเตา ดังนั้นในการจำแนกนั้นช่วงการรอรับน้ำเหล็กทุกช่วงจึงถูกพิจารณาให้มีลักษณะเป็นการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก

ส่วนการติดตั้งประตูเลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างนาที่ที่ 149 – 225 นั้นลักษณะทางกายภาพของเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกวางนอนเอาไว้เพื่อให้ส่วนกันตั้งฉากกับพื้นและติดตั้งประตูเลื่อนได้สะดวก ลักษณะของเบ้ารับน้ำเหล็กลักษณะนี้นั้นจะมีความคล้ายคลึงกับในขณะที่รอรับน้ำเหล็กจากเตาหลอมเพียงแต่เบ้ารับน้ำเหล็กไม่ได้อยู่ในแนวตั้งเหมือนตอนรอรับน้ำเหล็ก แต่ผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กต่างก็มีการถ่ายเทความร้อนออกจากปากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่บรรยากาศเช่นกัน ดังนั้นช่วงนี้จึงถูกพิจารณาให้เป็นการพักเบ้ารับน้ำเหล็กและใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เช่นเดียวกันกับการรอรับน้ำเหล็ก

นอกจากนั้นแล้วกิจกรรมอีกอย่างที่เกิดขึ้นอยู่ทุกรอบการทำงานคือ ช่วงการเคลื่อนย้ายเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่าหลังจากการเทน้ำเหล็กช่วงนี้เบ้ารับน้ำเหล็กจะไม่มีน้ำเหล็กหรือสแลกหลงเหลืออยู่ภายใน ซึ่งระหว่างเคลื่อนย้ายในกระบวนการนี้จะมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนในลักษณะเดียวกันกับช่วงการยกเบ้ารับน้ำเหล็กออกไปรอรับน้ำเหล็กดังนั้นช่วงการเคลื่อนย้ายเบ้ารับน้ำเหล็กกลับมาเพื่อทำความสะอาดก็จะใช้แบบจำลองการพักเบ้ารับน้ำเหล็กพิจารณาด้วยเช่นกัน

อีกช่วงหนึ่งที่ใช้แบบจำลองการพ่นน้ำเหล็กพิจารณาคือช่วงล่างรูเทน้ำเหล็กด้วยออกซิเจน ถึงแม้ว่าช่วงนี้จะมีการนำออกซิเจนมาเป่ารูเททำให้เกิดการออกซิไดซ์กับเหล็กร้อนที่อยู่ในรูเทน้ำเหล็กทำให้เหล็กหลอมละลายและถูกเป่าออกมา จะเกิดสะเก็ดน้ำเหล็กพุ่งพล่านออกจากปากเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่กระบวนการเช่นนี้เกิดขึ้นในระยะเวลาสั้นๆ และปริมาณไม่มากซึ่งเมื่อพิจารณาการแปรผันของอุณหภูมิที่ตำแหน่งตรวจวัดต่างๆ ในระหว่างการล่างรูเทน้ำเหล็กลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิในช่วงนี้จะมีลักษณะคล้ายกับช่วงการติดตั้งประตูลิ้นซึ่งใช้แบบจำลองการพ่นน้ำเหล็กในการจำลอง ดังนั้นช่วงในการล่างรูเทน้ำเหล็กด้วยออกซิเจนนี้ก็จะถูกพิจารณาให้ใช้แบบจำลองการพ่นน้ำเหล็กในการจำลองด้วย

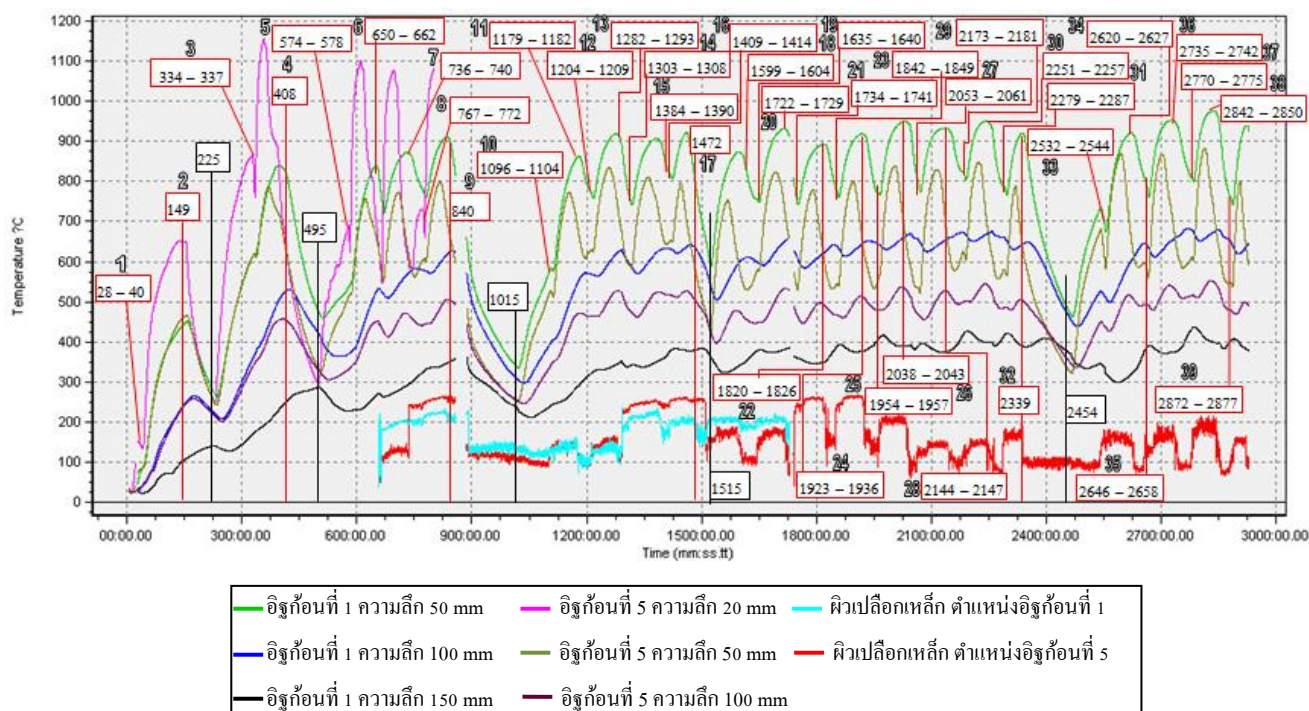
ส่วนกรณีอื่นๆที่เกิดขึ้นเป็นพิเศษเช่นกรณีระหว่างการซ่อมแซมรูเทน้ำเหล็กที่อุดตันที่ปรากฏในหัวข้อที่ 5.3.2.2 ก็จะถูกพิจารณาให้เป็นการล่างรูเทน้ำเหล็กที่จะใช้แบบจำลองเดียวกันในการพิจารณา ซึ่งกรณีพิเศษเช่นนี้ก็เกิดขึ้นกับเบ้ารับน้ำเหล็กอีกครั้งระหว่างนาทิตี่ 1465 – 1515

ดังนั้นช่วงที่ใช้แบบจำลองการพ่นน้ำเหล็กจะได้แก่ช่วงการร่อนน้ำเหล็กจากเตาหลอม การเคลื่อนย้ายเบ้ารับน้ำเหล็กไปล่างรูเทน้ำเหล็ก ระหว่างการล่างรูเทน้ำเหล็ก การติดตั้งประตูลิ้น และการซ่อมแซมรูเทน้ำเหล็กในกรณีที่น้ำเหล็กอุดตันรูเท ซึ่งกรณีต่างๆเหล่านี้ได้สรุปการปรากฏของช่วงๆต่างไว้ในรูปที่ 5 – 18 และตารางที่ 5 – 7

จากข้อมูลต่างๆที่ได้เรียบเรียงสามารถสรุปได้ว่าการร่อนน้ำเหล็กนั้นเฉลี่ยแต่ละรอบใช้เวลาประมาณ 7 นาที ส่วนการล่างรูเทน้ำเหล็กด้วยออกซิเจนนั้นใช้เวลาเฉลี่ยแต่ละรอบประมาณ 6 นาที 30 วินาที และจะเห็นว่าการร่อนน้ำเหล็กในการพ่นน้ำเหล็กครั้งที่ 6, 33 และ 35 จะใช้เวลาในการร่อนมากถึง 12 นาที หากสังเกตลักษณะการลดลงของอุณหภูมิที่ระยะความลึก 50 มิลลิเมตรจะเห็นการลดลงของอุณหภูมิต่างรวดเร็ว ซึ่งชี้ให้เห็นว่าหากมีการร่อนน้ำเหล็กเป็นเวลานาน อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อการประหยัดพลังงานช่วงเวลาในการร่อนน้ำเหล็กนั้นต้องเกิดให้สั้นที่สุด โดยที่การทำงานระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กและเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าต้องมีการทำงานที่สอดคล้องกันซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของการออกแบบระบบควบคุมในการศึกษาวิจัยนี้

ส่วนลักษณะโดยทั่วไปของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัดนั้น แต่ละระดับความลึกของอิฐทั้ง 2 ก่อนที่ติดตั้ง Thermocouple จะมีลักษณะที่

เหมือนกัน นั่นคือในช่วงแรกของการลดลงของอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันสูง แต่เมื่อเวลาผ่านไปการลดลงของอุณหภูมิจะมีอัตราการลดที่ลดลงเรื่อยๆ ทำให้ผลการแปรผันของอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้เริ่มมีลักษณะโค้งงอเข้าสู่ค่าๆหนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้ชัดในกรณีที่เข้ารับน้ำเหล็กถูกพักเป็นเวลายาวนานเช่น การติดตั้งประตูเลื่อน การเลี้ยงการปฏิบัติงานในช่วงค่าไฟฟ้าราคาแพง (On-Peak) และกรณีที่มีการปฏิบัติงานต้องล่าช้า เช่นกรณีที่ต้องซ่อมแซมรูเท้าน้ำเหล็กเป็นต้น ทั้งนี้ลักษณะของการงอเข้าแสดงให้เห็นถึงผลจากการแผ่รังสีความร้อนที่มีการแปรผันตามอุณหภูมิกำลังสี่ เมื่ออุณหภูมิสูงย่อมมีการถ่ายเทความร้อนผ่านการแผ่รังสีมาก แต่เมื่ออุณหภูมิเริ่มลดลง ความร้อนที่สูญเสียผ่านการแผ่รังสีจะลดลงทำให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิในผนังเข้ารับน้ำเหล็กลดลง



รูปที่ 5-18 ช่วงการเริ่มต้น (เส้นสีแดง) และสิ้นสุด (เส้นสีดำ) การพักเข้ารับน้ำเหล็ก ที่เวลาต่างๆ ตลอดกระบวนการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 5-7 สรุปข้อมูลการพักเบียร์รับน้ำเหล็กตลอดการเก็บข้อมูล

ครั้งที่	เวลา (นาที)		เวลาที่ใช้ (นาที)	กิจกรรม	ครั้งที่	เวลา (นาที)		เวลาที่ใช้ (นาที)	กิจกรรม
	เริ่มต้น	สิ้นสุด				เริ่มต้น	สิ้นสุด		
1	28	40	12	หัวเผาดับ	21	1734	1741	7	รอเทน้ำเหล็ก
2	149	225	76	ติดประตูเลื่อน	22	1820	1826	6	ล้างรูเท
3	334	337	3	รอเทน้ำเหล็ก	23	1842	1849	7	รอเทน้ำเหล็ก
4	408	495	87	ซ่อมรูเท	24	1923	1936	13	ล้างรูเท
5	574	578	4	รอเทน้ำเหล็ก	25	1954	1957	3	รอเทน้ำเหล็ก
6	650	662	12	รอเทน้ำเหล็ก	26	2038	2043	5	ล้างรูเท
7	736	740	4	ล้างรูเท	27	2053	2061	8	รอเทน้ำเหล็ก
8	767	772	5	รอเทน้ำเหล็ก	28	2144	2147	3	ล้างรูเท
9	840	1015	175	On-Peak	29	2173	2181	8	รอเทน้ำเหล็ก
10	1096	1104	8	รอเทน้ำเหล็ก	30	2251	2257	6	ล้างรูเท
11	1179	1182	3	ล้างรูเท	31	2279	2287	8	รอเทน้ำเหล็ก
12	1204	1209	5	รอเทน้ำเหล็ก	32	2339	2454	115	On-Peak
13	1282	1293	11	ล้างรูเท	33	2532	2544	12	รอเทน้ำเหล็ก
14	1303	1308	5	รอเทน้ำเหล็ก	34	2620	2627	7	ล้างรูเท
15	1384	1390	6	ล้างรูเท	35	2646	2658	12	รอเทน้ำเหล็ก
16	1409	1414	5	รอเทน้ำเหล็ก	36	2735	2742	7	ล้างรูเท
17	1472	1515	43	ซ่อมรูเท	37	2770	2775	5	รอเทน้ำเหล็ก
18	1599	1604	5	ล้างรูเท	38	2842	2850	8	ล้างรูเท
19	1635	1640	5	รอเทน้ำเหล็ก	39	2872	2877	5	รอเทน้ำเหล็ก
20	1722	1729	7	ล้างรูเท					

5.4.3 กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก

กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กนั้นก็มีลักษณะของกระบวนการที่ง่ายแก่การจำแนก เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของกระบวนการนี้เบียร์รับน้ำเหล็กจะบรรจุน้ำเหล็กโดยไม่มีกรเทน้ำเหล็กในช่วงนี้ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการนี้ได้ถูกออกแบบแสดงถึงความสัมพันธ์ของสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบียร์รับน้ำเหล็กที่มีความสัมพันธ์กันตลอดกระบวนการไว้ในหัวข้อที่ 4.6

ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิผนังเบียร์รับน้ำเหล็กที่ตรวจวัดในระหว่างกระบวนการนี้ได้มีการวิเคราะห์ไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2.6 ซึ่งเป็นการอธิบายลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิในการรับ

น้ำเหล็กระหว่างช่วงนาที่ที่ 330 – 337 ซึ่งหากเปรียบเทียบกิจกรรมที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาดังกล่าวตาม ตารางที่ 5 – 5 จะพบว่าในช่วงนี้จะประกอบไปด้วย การรับน้ำเหล็กจากเตาหลอม การเคลื่อนย้ายเบ้ารับน้ำเหล็กจากเตาหลอมไปยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่องเพื่อวัดอุณหภูมิน้ำเหล็ก และการร่อนน้ำเหล็กที่สถานีหล่อแบบต่อเนื่อง

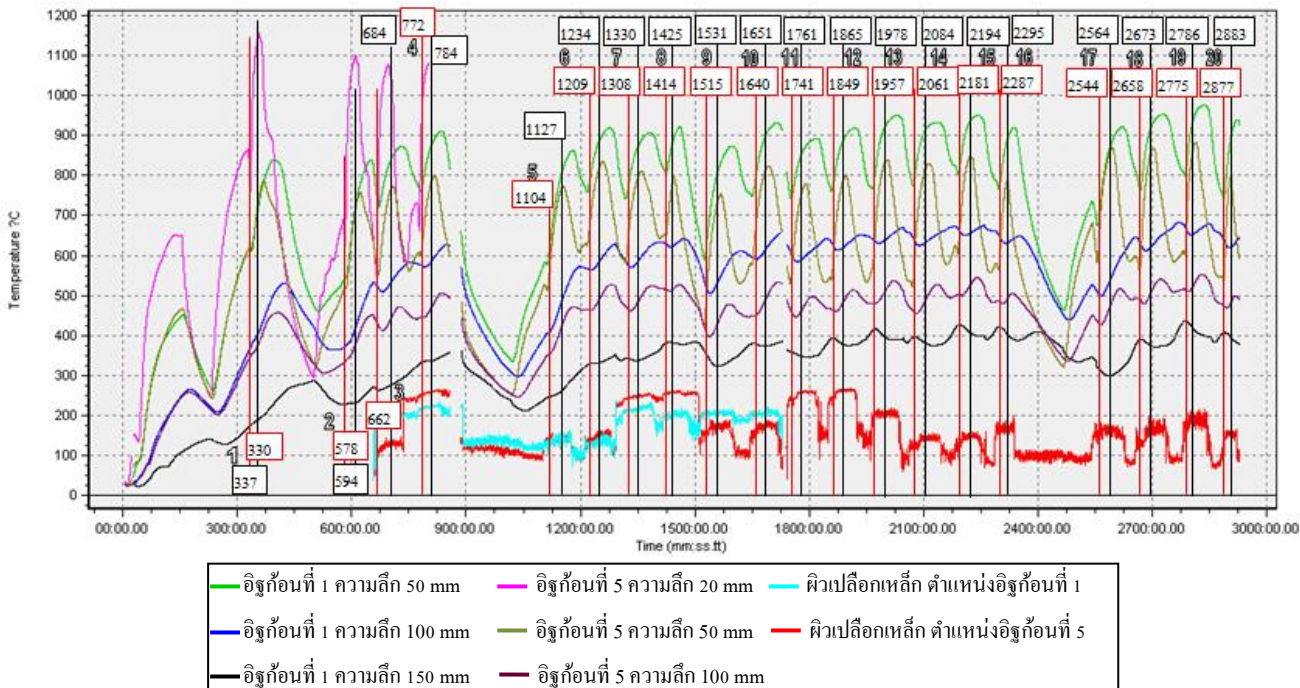
ถึงแม้กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กจาก รายงานการปฏิบัติงานของโรงงานที่ทำการศึกษาระบุอย่างละเอียดถึงกิจกรรมที่เกิดขึ้น แต่ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเหล่านั้นเหมือนกันหมด ทำให้รายละเอียดกระบวนการดังกล่าวถูกจำแนกเป็นกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก

แต่เนื่องจากในกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กนี้จะเป็นกระบวนการที่มีน้ำเหล็กเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งน้ำเหล็กคือส่วนที่ต้องให้ความสำคัญมากเนื่องจากเป็นวัตถุดิบในการผลิต ดังนั้นในการปฏิบัติงานจึงมีการตรวจวัด โดยการตรวจวัดจะตรวจวัดตอนที่น้ำเหล็กอยู่ในเตาหลอมก่อนการเทน้ำเหล็ก และตรวจวัดอีกครั้งที่สถานีหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งผลของการตรวจวัดในกระบวนการนี้สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 5 – 19 ตารางที่ 5 – 8 และตารางที่ 5 – 9

จากผลสรุปจะเห็นว่าระยะเวลาที่ใช้ในการขนถ่ายน้ำเหล็กในแต่ละรอบจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับจังหวะการปฏิบัติงาน ซึ่งหากพิจารณาให้ละเอียดประกอบกับตารางที่ 5 – 5 ระยะเวลาที่ใช้ในการเทน้ำเหล็ก และเคลื่อนย้ายเบ้ารับน้ำเหล็กไปวัดอุณหภูมิที่สถานีหล่อแบบต่อเนื่องในแต่ละรอบ จะใช้เวลาค่อนข้างแน่นอน แต่ในขั้นการเทน้ำเหล็กนั้น ต้องรองจนกว่าเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในรอบก่อนหน้าจะเทน้ำเหล็กจนหมดจึงจะนำเบ้ารับน้ำเหล็กใบใหม่เข้าไปเทน้ำเหล็กได้ แต่โดยเฉลี่ยแล้วการขนถ่ายน้ำเหล็กจะใช้เวลาประมาณ 16 นาที

ในส่วนของน้ำเหล็กนั้นจะเห็นว่าในแต่ละรอบการทำงานน้ำเหล็กเทออกมาอุณหภูมิแตกต่างกัน และอัตราการลดลงของอุณหภูมิแต่ละรอบการทำงานก็แตกต่างกัน โดยในข้อมูลที่ได้รวบรวมอัตราการลดของอุณหภูมิน้ำเหล็กโดยเฉลี่ยเป็น $5.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.9 เมื่อพิจารณาค่าทางสถิติที่ได้นี้ จะพบความผิดปกติของข้อมูลที่อัตราการลดลงของอุณหภูมิในรอบที่ 4 และ 14 อัตราการลดลงของอุณหภูมิทั้งสองรอบการทำงานนี้มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยเกินค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในขณะที่รอบที่ 3, 16 และ 18 ก็มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิสูงกว่าค่าเฉลี่ยเกินค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ส่วนในรอบที่ 8 อุณหภูมิน้ำเหล็กปรากฏอัตราการลดของอุณหภูมิน้ำเหล็กเป็นลบนั่นคือผลจากการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในรอบนี้เมื่อเทออกจากเตาไปประมาณ 4 นาทีแล้ว

อุณหภูมิน้ำเหล็กจะสูงขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง การวิเคราะห์ที่ผ่านมานี้เพื่อนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกใช้ข้อมูลในการเปรียบเทียบผลการจำลองต่อไป



รูปที่ 5-19 ช่วงการเริ่มต้น(เส้นสีแดง) และสิ้นสุด(เส้นสีดำ) การขนถ่ายน้ำเหล็ก ที่เวลาต่างๆตลอดกระบวนการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 5-8 สรุปข้อมูลการขนถ่ายน้ำเหล็กตลอดการเก็บข้อมูล

ครั้งที่	เวลา (นาทิจ)		เวลาที่ใช้ (นาทิจ)	หมายเหตุ	ครั้งที่	เวลา (นาทิจ)		เวลาที่ใช้ (นาทิจ)	หมายเหตุ
	เริ่มต้น	สิ้นสุด				เริ่มต้น	สิ้นสุด		
1	330	337	7		11	1741	1761	20	
2	578	594	16		12	1849	1865	16	
3	662	684	22		13	1957	1978	21	
4	772	784	12		14	2061	2084	23	
5	1104	1127	23		15	2181	2194	13	
6	1209	1234	25		16	2287	2295	8	
7	1308	1330	22		17	2544	2564	20	
8	1414	1425	11		18	2658	2673	15	
9	1515	1531	16		19	2775	2786	11	
10	1640	1651	11		20	2877	2883	6	

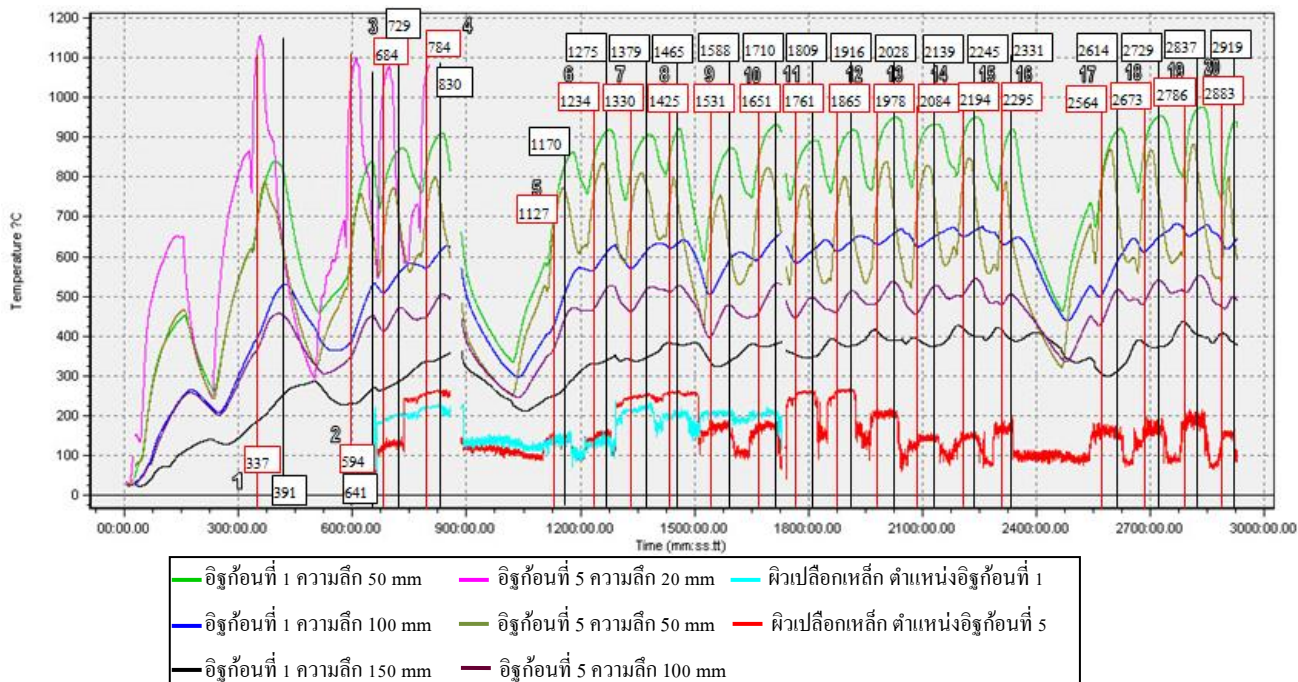
ตารางที่ 5-9 สรุปข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กตลอดการทดลอง

รอบการทำงานที่	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	ผลต่างอุณหภูมิ (°C)	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (°C/min)	รอบการทำงานที่	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	ผลต่างอุณหภูมิ (°C)	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (°C/min)
1	330 334	1690 1655	35	8.75	11	1741 1746	1665 1639	26	5.2
2	578 582	1686 1652	34	8.5	12	1849 1853	1671 1644	27	6.75
3	662 666	1697 1650	47	11.75	13	1957 1962	1688 1677	11	2.2
4	772 776	1675 1670	5	1.25	14	2061 2065	1668 1665	3	0.75
5	1104 1109	1688 1657	31	6.2	15	2181 2186	1682 1660	22	4.4
6	1209 1213	1692 1671	21	5.25	16	2287 2292	1688 1639	49	9.8
7	1308 1312	1677 1668	9	2.25	17	2544 2549	1713 1676	37	7.4
8	1414 1418	1670 1681	-11	-2.75	18	2658 2662	1691 1640	51	12.75
9	1515 1519	1682 1665	17	4.25	19	2775 2779	1675 1650	25	6.25
10	1640 1645	1717 1673	44	8.8	20	2877 2881	1675 1665	10	2.5

5.4.4 กระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก

กระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กเป็นกระบวนการที่สำคัญเนื่องมาจากมีความเกี่ยวข้องกับน้ำเหล็กซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์โดยตรง ซึ่งกระบวนการนี้การจำแนกสามารถจำแนกได้อย่างเด่นชัดเนื่องจากกระบวนการนี้เป็นกระบวนการจำเพาะเช่นเดียวกับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก นอกจากนั้นแล้วข้อมูลการปฏิบัติงานในกระบวนการนี้ยังมีการบันทึกขอบเขตระยะเวลาไว้อย่างชัดเจนในรายงานการปฏิบัติงาน ซึ่งสามารถนำมาสรุปได้ดังรูปที่ 5 – 20 และตารางที่ 5 – 10

กระบวนการนี้จะใช้เวลาโดยเฉลี่ยที่ 48 นาที ลักษณะปรากฏที่สำคัญของกระบวนการนี้ได้ อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2.1 ซึ่งได้ให้ข้อสังเกตและเปรียบเทียบลักษณะต่างๆที่เกิดขึ้นภายใน กระบวนการนี้



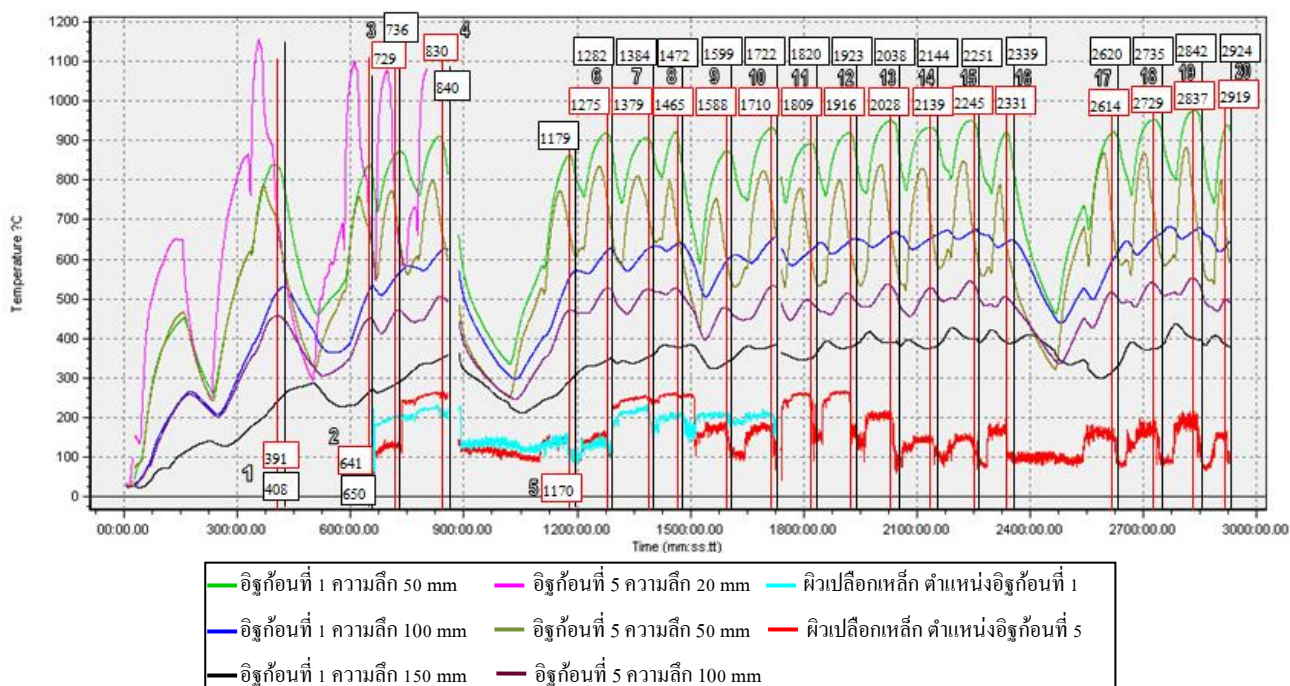
รูปที่ 5-20 ช่วงการเริ่มต้น(เส้นสีแดง) และสิ้นสุด(เส้นสีดำ) การเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่ รางรับน้ำเหล็ก ที่เวลาต่างๆตลอดกระบวนการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 5-10 สรุปข้อมูลการเทน้ำเหล็กตลอดการเก็บข้อมูล

ครั้งที่	เวลา (นาทีที่)		เวลาที่ใช่ (นาที)	หมายเหตุ	ครั้งที่	เวลา (นาทีที่)		เวลาที่ใช่ (นาที)	หมายเหตุ
	เริ่มต้น	สิ้นสุด				เริ่มต้น	สิ้นสุด		
1	337	391	54		11	1761	1809	48	
2	594	641	47		12	1865	1916	51	
3	684	729	45		13	1978	2028	50	
4	784	830	46		14	2084	2139	55	
5	1127	1170	43		15	2194	2245	51	
6	1234	1275	41		16	2295	2331	36	
7	1330	1379	49		17	2564	2614	50	
8	1425	1465	40		18	2673	2729	56	
9	1531	1588	57		19	2786	2837	51	
10	1651	1710	59		20	2883	2919	36	

5.4.5 การขนย้ายแสลคไปเทหึ่ง

ในกระบวนการนี้จะต้องปรากฏอยู่ในทุกระบวนการแต่จะเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้นเมื่อเทียบกับช่วงกระบวนการอื่น แต่ถึงกระนั้นแล้วกระบวนการนี้ก็ให้ลักษณะปรากฏที่น่าสนใจทำให้ไม่สามารถละเลยการพิจารณาไปได้ ลักษณะผลกระทบของกระบวนการนี้ต่อลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ได้ถูกวิเคราะห์ไว้ในหัวข้อที่ 5.3.2.2 แม้ว่าหลังจากนาที่ที่ 800 Thermocouple ในอิฐก้อนที่ 5 ที่ตำแหน่งความลึก 20 มิลลิเมตรจะขาดไปทำให้การสังเกตลักษณะการแปรผันอันมีผลมาจากแสลคนั้นไม่ปรากฏชัด แต่ยังคงสามารถสังเกตลักษณะได้เล็กน้อยในการแปรผันของอุณหภูมิในอิฐก้อนที่ 5 ที่ระดับความลึก 50 มิลลิเมตร แม้ว่าการจำแนกด้วยลักษณะผลการแปรผันของอุณหภูมิในตำแหน่งตรวจวัดทำได้ยาก แต่ก็สามารถพิจารณาจำแนกช่วงการขนย้ายแสลคไปเทหึ่งได้จากรายงานการปฏิบัติงานได้ ซึ่งผลการจำแนกกระบวนการนี้สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 5 – 21 และตารางที่ 5 – 11 ซึ่งจะสรุปได้ว่าขั้นตอนนี้ใช้เวลาในการปฏิบัติกระบวนการนี้เฉลี่ยเพียง 8 นาทีเท่านั้น



รูปที่ 5-21 ช่วงการเริ่มต้น (เส้นสีแดง) และสิ้นสุด (เส้นสีดำ) การขนย้ายแสลคไปเทหึ่งที่เวลาต่างๆ

ตลอดกระบวนการเก็บข้อมูล

ตารางที่ 5-11 สรุปข้อมูลกระบวนการขนย้ายแสลคไปเททิ้งตลอดการเก็บข้อมูล

ครั้งที่	เวลา (นาที)		เวลาที่ใช้ (นาที)	หมายเหตุ	ครั้งที่	เวลา (นาที)		เวลาที่ใช้ (นาที)	หมายเหตุ
	เริ่มต้น	สิ้นสุด				เริ่มต้น	สิ้นสุด		
1	391	408	17		11	1809	1820	11	
2	641	650	9		12	1916	1923	7	
3	729	736	7		13	2028	2038	10	
4	830	840	10		14	2139	2144	5	
5	1170	1179	9		15	2245	2251	6	
6	1275	1282	7		16	2331	2339	8	
7	1379	1384	5		17	2614	2620	6	
8	1465	1472	7		18	2729	2735	6	
9	1588	1599	11		19	2837	2842	5	
10	1710	1722	12		20	2919	2924	5	

จากการจำแนกลักษณะกระบวนการจากผลการตรวจวัดที่ได้สรุปไว้ในหัวข้อต่างๆตั้งแต่หัวข้อที่ 5.4.1 จนถึงหัวข้อที่ 5.4.5 จะสามารถเห็นถึงวัฏจักรทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะอยู่ในลักษณะตาม 5 กระบวนการที่ได้จำแนกมาก โดยลักษณะลำดับการเกิดขึ้นของกระบวนการในรอบการทำงานทั่วไปจะมีลำดับดังนี้

1. กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก
2. การพักเบ้ารับน้ำเหล็กครั้งที่ 1
3. กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก
4. กระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก
5. การขนย้ายแสลคไปเททิ้ง
6. การพักเบ้ารับน้ำเหล็กครั้งที่ 2

จะเห็นจากลำดับทั้ง 6 ขั้นตอนนี้เป็นลักษณะโดยทั่วไปของวัฏจักรทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยการพักเบ้ารับน้ำเหล็กจะเกิดขึ้นถึง 2 ครั้ง โดยครั้งแรกคือช่วงที่เบ้ารับน้ำเหล็กรองรับน้ำเหล็กจากเตาหลอม และครั้งที่ 2 คือหลังจากเบ้ารับน้ำเหล็กเทแสลคทิ้งไปแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะอยู่ในสถานะที่ถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศไม่ว่าจะเกิดการล้างรูเทน้ำเหล็ก ซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็ก หรือหยุดปฏิบัติงาน ตามการวิเคราะห์และจำแนกการพักน้ำเหล็กในหัวข้อที่ 5.4.2

เนื่องจากกระบวนการทั้ง 6 ลำดับขั้นตอนในแต่ละวัฏจักรทำงานนั้นเป็นลักษณะที่เกิดขึ้นในกรณีปกติทั่วไป หากกรณีที่มีการปฏิบัติงานติดขัดหรือต้องเร่งการปฏิบัติงาน วัฏจักรทำงานจะเปลี่ยนแปลงไป อาจไม่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กได้หากเตาหลอมหลอมเหล็กได้รวดเร็วและพร้อมที่จะเทน้ำเหล็กหลังจากที่เบ้ารับน้ำเหล็กได้รับการล้างรูเทน้ำเหล็กในรอบการทำงานแล้วเสร็จพอดี

บทที่ 6

การออกแบบระบบควบคุม

การสร้างระบบควบคุมในการศึกษาวิจัยนี้จะใช้วิธีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อนำไปสู่การจัดการการใช้พลังงานที่ดีขึ้นภายในกระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการทำนายสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กต่างอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ดังที่ได้แสดงในบทที่ 4 ซึ่งยากแก่การแก้สมการเพื่อหาผลเฉลยแม่นยำตรงสำหรับสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยต่างๆ และจะมีความซับซ้อนมากในการแก้สมการทำให้ยากแก่การสร้างเป็นโปรแกรมคำนวณ โดยคอมพิวเตอร์ การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านั้นจึงต้องอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเข้ามาช่วยในการหาผลเฉลยของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านั้น

ในการศึกษาวิจัยและออกแบบระบบควบคุมนี้จึงได้เลือกใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องสำหรับการแก้สมการเชิงอนุพันธ์เพื่อหาผลเฉลย เนื่องจากระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องเป็นระเบียบวิธีที่เรียบง่าย และมีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาทางความร้อนที่มีรูปทรงไม่ซับซ้อนเกินไป ในบทนี้จึงจะอธิบายถึงพื้นฐานของระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องและวิธีการประดิษฐ์สมการผลต่างสี่บเนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้ในการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้บรรจุอยู่ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมกระบวนการการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าต่อไป

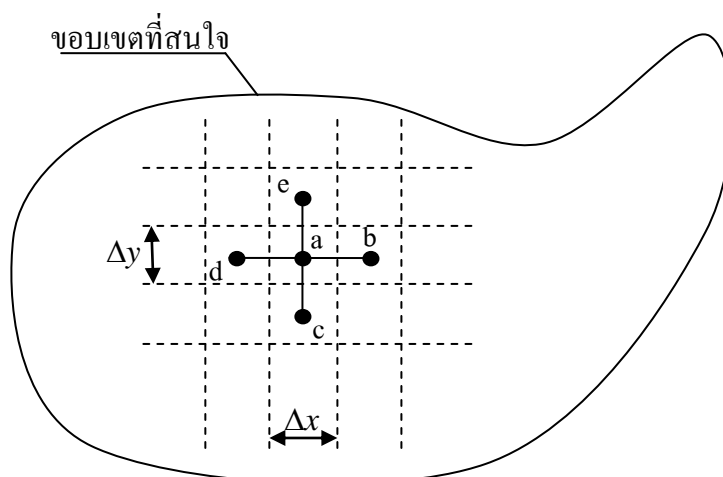
เนื้อหาภายในบทนี้จึงจะแบ่งหัวข้อการอธิบายออกเป็น 3 หัวข้อหลัก อันได้แก่ การอธิบายระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่อง การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องในการแก้ปัญหา และสร้างโปรแกรมระบบควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กพร้อมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

6.1 ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่อง

ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องนั้นเป็นเป็นระเบียบวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาทางความร้อนที่ได้รับความนิยมและมีความแม่นยำในการคำนวณหาผลเฉลย โดยหลักการของการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องนั้นคือการหาผลเฉลยโดยประมาณ ด้วยการแบ่งขอบเขตที่ต้องการหาผลเฉลยออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆในขอบเขตที่สนใจนั้น ทำให้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่มีความต่อเนื่อง

กลายเป็นสมการเชิงเส้น และใช้ความสัมพันธ์ของสมการเชิงเส้นที่ปรับรูปมาจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในปริมาตรควบคุมแต่ละปริมาตรควบคุม แล้วจึงนำผลเฉลยที่ได้ของแต่ละปริมาตรควบคุมมาประกอบกัน

โดยตำแหน่งของปริมาตรควบคุมถูกแทนด้วยจุดต่อ(Node) โดยแต่ละจุดต่อเชื่อมต่อกัน เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดต่อกับจุดต่อ หรือในความหมายทางกายภาพคือการเชื่อมกันของแต่ละจุดต่อจะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ของปริมาตรควบคุมที่จุดต่อนั้นเป็นตำแหน่งตัวแทนของปริมาตรควบคุม จะได้รับอิทธิพลจากปริมาตรควบคุมใดบ้าง ดังแสดงในรูปที่ 6-1 คือหากจุดต่อ a เป็นตำแหน่งตัวแทนของปริมาตรควบคุมที่เราพิจารณา ที่จุดต่อ a นี้จะได้รับอิทธิพลจากจุดต่อ b, c, d และ e ซึ่งเป็นตัวแทนของปริมาตรควบคุมที่อยู่โดยรอบ



รูปที่ 6-1 รูปร่างลักษณะทั่วไปของขอบเขตที่สนใจและลักษณะการแบ่งปริมาตรควบคุมภายใน

เมื่อลักษณะภายในขอบเขตที่สนใจได้ถูกแบ่งออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆและแต่ละปริมาตรมีตัวแทนของปริมาตรควบคุมนั้น(จุดต่อต่างๆ)แล้ว จุดต่อต่างๆก็就会有ความสัมพันธ์กันตามรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งในที่นี้ให้ตัวอย่างความสัมพันธ์ภายในขอบเขตที่สนใจในรูปที่ 6-1 เป็นความสัมพันธ์ตามแบบสมการลาปลาซ

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} + \frac{d^2\phi}{dy^2} = 0 \quad (6.1)$$

เมื่อ ϕ คือสมบัติที่พิจารณาที่จุดต่อ

แต่หากพิจารณาความสัมพันธ์ของสมบัติที่พิจารณาของจุดต่อแต่ละจุดจะสามารถหาผลเฉลยได้ถ้าหากจึงต้องแปลงรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้กลายเป็นสมการพีชคณิตที่ง่ายแก่การคำนวณ โดยจะยกตัวอย่างวิธีการปรับรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในสมการที่ (6.1) ให้กลายเป็นสมการพีชคณิต

ซึ่งหากพิจารณาค่าสมบัติที่เราพิจารณาที่จุดต่ออื่นๆข้างเคียงจุดต่อ a จะสามารถใช้ออนุกรมเทย์เลอร์มาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยสร้างสมการความสัมพันธ์ของจุดต่อ b ได้ดังนี้

$$\phi_b = \phi_a + \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_a \Delta x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_a (\Delta x)^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \Big|_a (\Delta x)^3 + \dots \quad (6.2)$$

ซึ่งในทำนองเดียวกันที่จุดต่อ d จะเขียนรูปสมการได้ดังนี้

$$\phi_d = \phi_a - \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_a \Delta x + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_a (\Delta x)^2 - \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \Big|_a (\Delta x)^3 + \dots \quad (6.3)$$

หากนำสมการที่ (6.2) และ (6.3) มารวมกันจะได้

$$\phi_b + \phi_d = 2\phi_a + \frac{2}{2!} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \Big|_a (\Delta x)^2 + \frac{2}{4!} \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} \Big|_a (\Delta x)^4 + \dots \quad (6.4)$$

เนื่องจากคำตอบที่ต้องการนั้นคือการหาค่าพจน์อนุพันธ์อันดับสอง(พจน์ที่สองทางฝั่งขวาของสมการ) เพื่อนำกลับไปแทนในสมการที่ (6.1) จึงต้องใช้วิธีการประมาณค่าสมการด้วยการตัดพจน์ที่มีอันดับสูงกว่า 2 ในสมการที่ (6.4) ทิ้งไปจะได้

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \cong \frac{\phi_b - 2\phi_a + \phi_d}{(\Delta x)^2} \quad (6.5)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถพิจารณาค่าอนุพันธ์อันดับที่สองตามแนวตั้งได้ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \cong \frac{\phi_c - 2\phi_a + \phi_e}{(\Delta y)^2} \quad (6.6)$$

จากสมการที่ (6.5) และ (6.6) จะเห็นได้ว่าเมื่อแทนค่าสมการทั้งสองลงในสมการที่ (6.1) จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ของแต่ละจุดในลักษณะดังนี้

$$\phi_b + \phi_c + \phi_d + \phi_e - 4\phi_a = 0 \quad (6.7)$$

หากจัดรูปเพื่อหาค่าสมบัติที่จุด a จะจัดรูปสมการที่ (6.7) เป็น

$$\phi_a = \frac{1}{4}(\phi_b + \phi_c + \phi_d + \phi_e) \quad (6.8)$$

จะเห็นได้ชัดเจนในสมการที่ (6.8) ว่าสมบัติที่พิจารณาที่จุด a ต่างก็มีความสัมพันธ์กับค่าสมบัติของสมการที่จุด b, c, d และ e โดยรอบ และการหาค่าสมบัตินั้นไม่ได้ใช้การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเพื่อหาค่าสมบัตินั้นที่จุดต่อ a ด้วย แต่จะเป็นการแทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการพีชคณิตเท่านั้น ทำให้การคำนวณหาสมบัติที่พิจารณาที่จุดต่อ a สามารถทำได้โดยง่าย สมการที่ (6.7) และ (6.8) ที่อยู่ในลักษณะสมการพีชคณิตเช่นนี้จะถูกเรียกว่าสมการผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite Difference Equation) ซึ่งสมการผลต่างสี่เหลี่ยมนี้จะแตกต่างกันไปตามแต่ปัญหาที่ได้มีการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

แต่จุด a ที่พิจารณานั้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของขอบเขตที่สนใจทั้งหมด ดังนั้นจึงต้องสร้างสมการลักษณะเดียวกันกับสมการที่ (6.8) ให้แก่แต่ละจุดต่อจนครบทุกจุดภายในขอบเขตที่สนใจ ซึ่งจะทำให้สมการของแต่ละจุดต่อประกอบกันกลายเป็นระบบสมการ ซึ่งหากสามารถแก้ระบบสมการได้จะสามารถหาค่าผลเฉลยโดยประมาณของสมบัติที่เราพิจารณาที่จุดต่อจุดนั้นได้

จากขั้นตอนต่างๆที่ได้รับการอธิบายโดยย่อ นั้นจะทำให้ได้วาระระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมนั้นจะสามารถสรุปขั้นตอนการใช้ได้ดังนี้

1. แบ่งพื้นที่ภายในขอบเขตที่สนใจออกเป็นปริมาตรควบคุมเล็กๆ ที่มีจุดต่อเป็นตัวแทนของปริมาตรควบคุมนั้นๆ และกำหนดชื่อและสมบัติเริ่มต้นของจุดต่อเหล่านั้น
2. ทำการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของสมบัติที่ต้องการพิจารณาในขอบเขตที่สนใจนั้นให้กลายเป็นสมการผลต่างสี่เหลี่ยม
3. ประยุกต์สมการผลต่างสี่เหลี่ยมเข้ากับจุดต่อแต่ละจุดจนครบและประกอบสมการที่ประยุกต์สมการผลต่างสี่เหลี่ยมเข้ามาประกอบกันให้กลายเป็นระบบสมการ
4. แก้ระบบสมการผลต่างสี่เหลี่ยมเพื่อหาผลเฉลยของจุดต่อทั้งหมด

จากขั้นตอนการใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมนั้นจะเห็นได้ว่า หากสมการผลต่างสี่เหลี่ยมต่างบรรจบตัวไม่ทราบค่าตลอดทุกจุดต่อภายในขอบเขตที่สนใจนั้น ระบบสมการจะไม่สามารถแก้ได้ เช่นในสมการที่ (6.8) จะประกอบไปด้วยตัวไม่ทราบค่าถึง 4 ตัว หากในขอบเขตที่สนใจนั้นประกอบไปด้วยจุดต่อทั้งหมด n จุดต่อ แสดงว่าจะปรากฏตัวแปรไม่ทราบค่าจำนวน $4n$ ตัว ในขณะที่มีสมการเพียง n สมการทำให้ระบบสมการไม่สามารถแก้ได้ ในลักษณะเช่นนี้เงื่อนไขค่าขอบจึง

ต้องถูกใช้เพื่อลดจำนวนตัวไม้ที่ทราบค่าลงจนสามารถแก่ระบบสมการได้ ซึ่งเงื่อนไขค่าขอบก็จะแตกต่างกันไปตามแต่แบบจำลองที่ใช้ในการพิจารณา

ในหัวข้อนี้จะเห็นได้ว่าการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องสามารถเข้าใจได้โดยง่าย มีความตรงไปตรงมาสำหรับการแก้ไขปัญหา ในการศึกษาวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องนี้ในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็กตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ดังแสดงในบทที่ 4 ที่ผ่านมา

6.2 การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องในการแก้ปัญหา

เนื่องจากในหัวข้อที่ผ่านมาได้อธิบายลักษณะของการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องและขั้นตอนการแก้ไขปัญหา โดยมีการแบ่งออกเป็นทั้งหมด 4 ชั้น ในหัวข้อนี้จึงจะแสดงการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีนี้ในการแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบไว้ดังนี้

6.2.1 การแบ่งพื้นที่ภายในขอบเขตที่สนใจ

จากลักษณะสภาวะการทำงานที่แตกต่างกันของผนังและผนังกันภายในเบ้ารับน้ำเหล็กให้การพิจารณาจำเป็นต้องแยกผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กออกจากกัน โดยที่ในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กและผนังกันภายในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะพิจารณาในลักษณะ 1 มิติ และได้ถือว่าชั้นทำงานและชั้นปลอดภัยมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากมีสมบัติทางความร้อนที่เหมือนกัน ก่อจากวัสดุประเภทเดียวกัน และพิจารณาให้การก่อกองระหว่างชั้นทั้ง 2 ทำได้แนบสนิทกันดีจึงมีความต้านทานความร้อนจากผิวสัมผัสต่ำมาก ทำให้สามารถสรุปรายละเอียดการแบ่งพื้นที่และจัดจุดต่อต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 6-1

ตารางที่ 6-1 รายละเอียดการแบ่งพื้นที่พิจารณาในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก
ผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก

รายการ	ค่า
ความหนา (mm)	234
ระยะห่างระหว่างจุดต่อ (mm)	2
จำนวนจุดต่อ (จุด)	118

ผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก

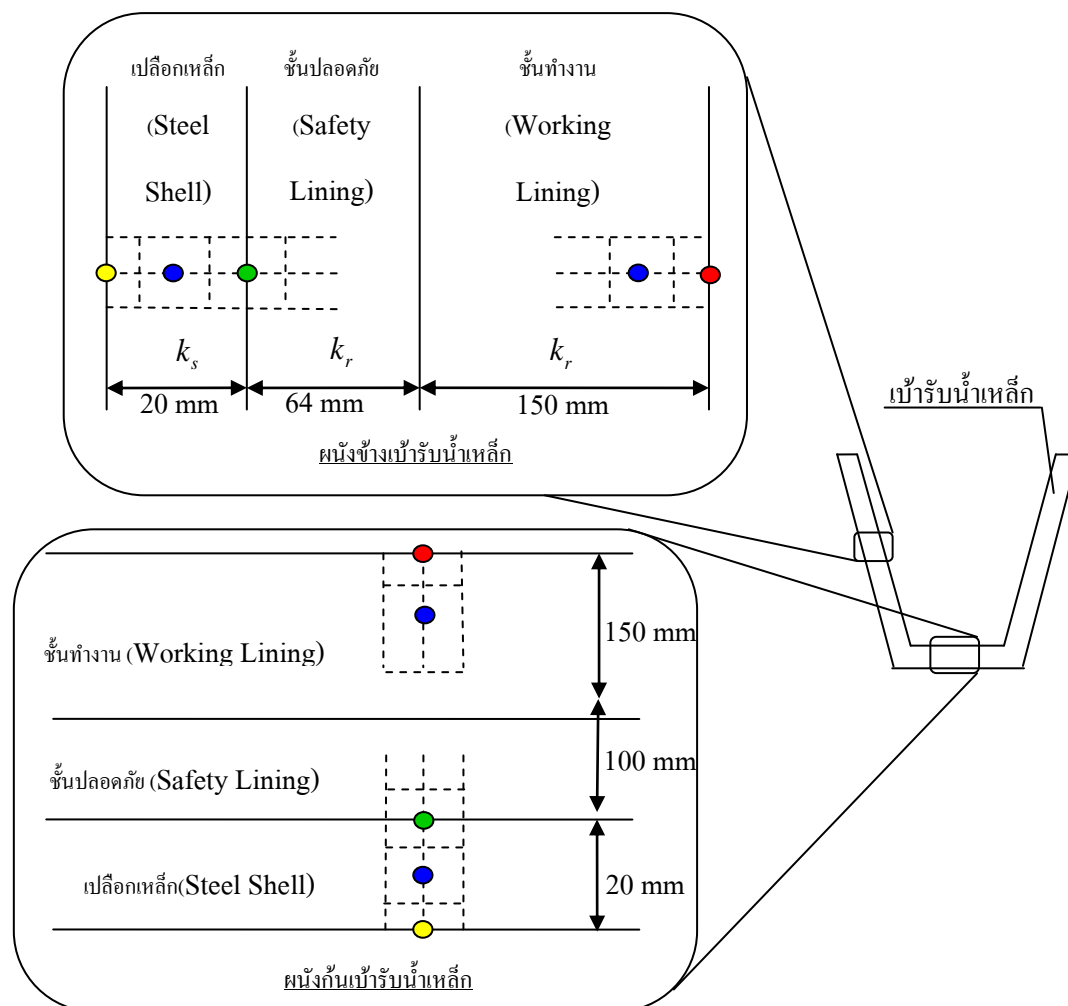
รายการ	ค่า
ความหนา (mm)	270
ระยะห่างระหว่างจุดต่อ (mm)	10
จำนวนจุดต่อ (จุด)	28

ตารางที่ 6-1 รายละเอียดการแบ่งพื้นที่พิจารณาในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก (ต่อ)

รายการ	ค่า	รายการ	ค่า
จุดต่อในผนังอิฐ (จุด)	107	จุดต่อในผนังอิฐ (จุด)	25
จุดต่อระหว่างผนังอิฐและ เปลือกเหล็ก (จุด)	1	จุดต่อระหว่างผนังอิฐและ เปลือกเหล็ก (จุด)	1
จุดต่อในเปลือกเหล็ก (จุด)	10	จุดต่อในเปลือกเหล็ก (จุด)	2

6.2.2 การสร้างสมการผลต่างสืบเนื่อง

ในการสร้างสมการผลต่างสืบเนื่องนั้นจะต้องพิจารณาลักษณะของจุดต่อต่างๆว่ามีลักษณะทางกายภาพเป็นเช่นไร โดยการออกแบบในการศึกษานี้ได้จำแนกจุดต่อออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ จุดต่อที่อยู่บริเวณผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก(จุดสีแดง) จุดต่อที่อยู่ภายในเนื้อของผนัง(จุดสีน้ำเงิน) จุดต่อที่อยู่ระหว่างผนังอิฐและเปลือกเหล็ก(จุดสีเขียว) และจุดต่อที่อยู่บริเวณผิวภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก(จุดสีเหลือง) ซึ่งลักษณะของจุดต่อต่างๆ แสดงรูปที่ 6-2 โดยแต่ละจุดต่อจะถูกล้อมรอบด้วยเส้นประแสดงถึงปริมาตรควบคุมเล็กๆที่มีจุดต่อเป็นดั่งตัวแทนของปริมาตรควบคุมนั้นๆ ส่วนรายละเอียดของการสร้างสมการผลต่างสืบเนื่องจะอธิบายในหัวข้อย่อยต่อไป



รูปที่ 6-2 ลักษณะการจุดต่อต่างๆภายในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก

6.2.2.1 จุดต่อภายในเนื้อของผนัง

ไม่ว่าในผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กหรือผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ทั้งในผนังอิฐและเปลือกเหล็กต่างก็มีจุดต่อที่อยู่ลักษณะนี้เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจุดต่อที่อยู่ภายในเนื้อผนังนั้นแทนด้วยจุดสีน้ำเงินในรูปที่ 6-2 จุดต่อที่อยู่ในเนื้อของผนังลักษณะนี้การถ่ายเทความร้อนจะเกิดเฉพาะการนำความร้อนจากจุดต่อฝั่งหนึ่งผ่านจุดต่อที่พิจารณาไปยังจุดต่ออีกฝั่ง โดยที่สมบัติทั้งทางความร้อนและทางรูปร่างของทั้ง 3 จุดต่อมีค่าเท่ากัน

ในส่วนของหนึ่งซึ่งมีลักษณะการวิเคราะห์ภายในปริมาตรควบคุมดังแสดงในรูปที่ 6-3 เมื่อให้จุดที่เราพิจารณาเป็นจุด i ซึ่งอยู่ระหว่างจุด $i-1$ และ $i+1$ โดยความร้อนจะถ่ายเทจากจุดต่อที่ $i-1$ ผ่านจุดต่อ i ไปยังจุดต่อ $i+1$ ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยเริ่มต้นจากการสมการ

สมดุลพลังงานภายในปริมาตรควบคุมที่มีแต่การนำความร้อนเข้าและออกจากปริมาตรควบคุมที่สนใจจะให้ความสัมพันธ์

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T \quad (4.11)$$

หากพิจารณาการนำความร้อนใน 1 มิติ และประยุกต์ใช้กับลักษณะการนำความร้อนในรูปแบบที่ 6-3 สมการสามารถแสดงรูปเป็น

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (6.9)$$

เมื่อให้การเปลี่ยนแปลงนั้นเกิดในช่วงเวลา Δt ในปริมาตรควบคุมที่มีขนาด Δx และระยะห่างระหว่างจุดต่อแต่ละจุดเป็น Δx โดยที่ปริมาตรควบคุมมีพื้นที่ผิวตามลึก(ตั้งฉากกับหน้ากระดาษ) A จะสามารถเขียนสมการที่ (6.9) ได้เป็น

$$\rho c A \frac{\Delta T_i}{\Delta t} = k A \frac{T_{i-1} - T_i}{(\Delta x)^2} - k A \frac{T_i - T_{i+1}}{(\Delta x)^2} \quad (6.10)$$

$$\text{จัดรูป} \quad T'_i - T_i = \frac{k \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} (T_{i-1} - T_i) - \frac{k \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} (T_i - T_{i+1}) \quad (6.11)$$

$$T'_i - T_i = \frac{k \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2} (T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}) \quad (6.12)$$

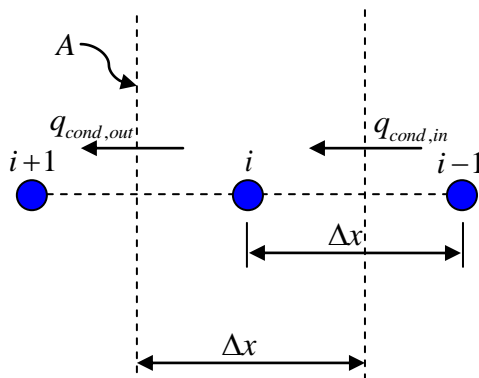
$$T'_i - T_i = Fo (T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}) \quad (6.13)$$

$$T'_i = Fo \left(T_{i-1} + \left(\frac{1}{Fo} - 2 \right) T_i + T_{i+1} \right) \quad (6.14)$$

เมื่อ Fo คือค่าเลขฟูเลียส์มีความสัมพันธ์เป็น $Fo = \frac{k \Delta t}{\rho c (\Delta x)^2}$

T'_i คืออุณหภูมิของจุดต่อที่ i ที่ขึ้นเวลาถัดไป

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (6.14) เป็นการสร้างสมการผลต่างสืบเนื่องโดยจัดให้อยู่ในรูปแบบฟังก์ชันแบบชัดแจ้ง (Explicit Function) จะเห็นว่าหากทราบอุณหภูมิของตำแหน่ง i , $i-1$ และ $i+1$ ในขั้นเวลา (Time Step) นี้จะสามารถนำไปใช้หาอุณหภูมิของตำแหน่ง i ที่ขั้นเวลาถัดไปได้ ส่วนตัวแปรที่มีเป็นสมบัติทางความร้อนและรูปทรงของปริมาตรควบคุมนั้นจะถูกรวบไว้เป็นเลขฟูเลียส์ (Fourier's Number: Fo) ทำให้สมการที่ (6.14) อยู่ในรูปที่สามารถนำไปโปรแกรมได้โดยง่าย ภายในสมการจะปรากฏแต่เพียงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเท่านั้นทำให้พิจารณาการแปรผันของอุณหภูมิได้ง่าย



รูปที่ 6-3 ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อภายในเนื้อของผนัง

6.2.2.2 จุดต่อระหว่างผนังอิฐและเปลือกเหล็ก

จุดต่ออีกลักษณะหนึ่งที่ต้องให้ความสนใจคือจุดต่อระหว่างผนังอิฐและเปลือกเหล็กซึ่งในรูปที่ 6-2 แทนจุดต่อจุดนี้ด้วยจุดต่อสี่เหลี่ยม เนื่องจากปริมาตรควบคุมที่จุดต่อจุดนี้เป็นตัวแทนอยู่นั้นจะอยู่ระหว่างผนังอิฐและเปลือกเหล็กซึ่งมีสมบัติทางรูปทรงและความร้อนที่แตกต่างกันจึงจำเป็นต้องมีการแยกพิจารณาในส่วนที่เป็นผนังอิฐและเปลือกเหล็ก

เนื่องจากปริมาตรควบคุมที่จุดต่อจุดนี้เป็นตัวแทนนั้น ครึ่งหนึ่งของปริมาตรควบคุมจึงมีสมบัติต่างๆเป็นสมบัติของผนังอิฐ และอีกครึ่งหนึ่งมีสมบัติเป็นสมบัติของเหล็กกล้า ดังจะเห็นได้ในรูปที่ 6-4 แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการถ่ายเทความร้อนในส่วนนี้ยังคงมีเพียงการนำความร้อนในลักษณะเดียวกันกับจุดต่อที่อยู่ในเนื้อผนังดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ผ่านมาทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ได้ดังสมการสมดุลพลังงานที่เข้าและออกปริมาตรควบคุมที่มีจุดต่อ i เป็นตัวแทน จะมีความร้อนเข้ามาจากฝั่งที่สัมผัสกับจุดต่อ $i-1$ และถ่ายเทความร้อนออกไปยังฝั่ง $i+1$ ส่วนปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงภายในปริมาตรควบคุมนั้นถือให้ทั้งในผนังอิฐและเปลือกเหล็กมีอุณหภูมิเท่ากันการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเหมือนกันดังนี้

$$\left(m_{st}c_{p,st} + m_{re}c_{p,re}\right) \frac{\Delta T_i}{\Delta t} = k_{re} \frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta x} - k_{st} \frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta x} \quad (6.15)$$

$$\left(\rho_{re}c_{p,re}A \frac{\Delta x}{2} + \rho_{st}c_{p,st}A \frac{\Delta x}{2}\right) \frac{\Delta T_i}{\Delta t} = k_{re}A \frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta x} - k_{st}A \frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta x} \quad (6.16)$$

$$\Delta T_i = \frac{2k_{re}\Delta t}{(\rho_{re}c_{p,re} + \rho_{st}c_{p,st})(\Delta x)^2} (T_{i-1} - T_i) - \frac{2k_{st}\Delta t}{(\rho_{re}c_{p,re} + \rho_{st}c_{p,st})(\Delta x)^2} (T_i - T_{i+1}) \quad (6.17)$$

$$\Delta T_i = \frac{2\Delta t}{(\rho_{re}c_{p,re} + \rho_{st}c_{p,st})(\Delta x)^2} (k_{re}T_{i-1} - (k_{re} + k_{st})T_i + k_{st}T_{i+1}) \quad (6.18)$$

$$T'_i - T_i = \frac{2(k_{re} + k_{st})\Delta t}{(\rho_{re}c_{p,re} + \rho_{st}c_{p,st})(\Delta x)^2} \left(\frac{k_{re}T_{i-1} + k_{st}T_{i+1}}{(k_{re} + k_{st})} - T_i \right) \quad (6.19)$$

$$T'_i - T_i = Fo \left(\frac{k_{re}T_{i-1} + k_{st}T_{i+1}}{(k_{re} + k_{st})} - T_i \right) \quad (6.20)$$

$$T'_i = Fo \left(\frac{k_{re}T_{i-1} + k_{st}T_{i+1}}{(k_{re} + k_{st})} + \left(\frac{1}{Fo} - 1 \right) T_i \right) \quad (6.21)$$

เมื่อ Fo คือค่าเลขฟูเลียส์มีความสัมพันธ์เป็น $Fo = \frac{2(k_{re} + k_{st})\Delta t}{(\rho_{re}c_{p,re} + \rho_{st}c_{p,st})(\Delta x)^2}$

k_{re} คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผนังอิฐ ($W/m \cdot K$)

k_{st} คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของเปลือกเหล็ก ($W/m \cdot K$)

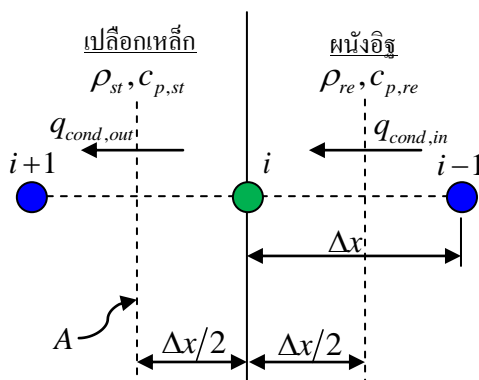
ρ_{re} คือค่าความหนาแน่นของผนังอิฐ (kg/m^3)

ρ_{st} คือค่าความหนาแน่นของเปลือกเหล็ก (kg/m^3)

$c_{p,re}$ คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของผนังอิฐ ($J/kg \cdot K$)

$c_{p,st}$ คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของเปลือกเหล็ก ($J/kg \cdot K$)

จากสมการที่ (6.21) เป็นสมการแมนตรงสำหรับหาค่าอุณหภูมิของจุดต่อที่ขึ้นเวลาถัดไป สิ่งที่สังเกตเห็นได้ชัดในความแตกต่างระหว่างสมการแมนตรงของจุดต่อที่อยู่ในเนื้อผนังและจุดต่อที่อยู่ระหว่างผนังอิฐและเปลือกเหล็กคือค่าเลขฟูเลียส์ที่จะต้องประกอบไปด้วยสมบัติของผนังอิฐและเปลือกเหล็ก นอกจากนั้นแล้วค่าอุณหภูมิของจุดต่อที่ $i-1$ และ $i+1$ นั้นจะมีสัมประสิทธิ์ซึ่งประกอบขึ้นจากค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผนังอิฐและเปลือกเหล็ก เป็นเสมือนการถ่วงน้ำหนักให้กับจุดต่อทั้งสองตามสภาพการนำความร้อนของจุดต่อทั้งสองนั่นเอง



รูปที่ 6-4 ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อระหว่างผนังอิฐและเปลือกเหล็ก

6.2.2.3 จุดต่อบริเวณผิวภายนอก

จุดต่อบริเวณผิวภายนอกนั้นจะตั้งอยู่บริเวณผิวของเปลือกเหล็ก ดังแสดงด้วยจุดต่อสี่เหลี่ยมในรูปที่ 6-2 เนื่องจากเป็นจุดต่อที่สัมผัสกับอากาศภายนอกความร้อนที่ถูกนำความร้อนจากจุดต่อภายในจะถูกส่งออกมายังจุดต่อนี้ และจุดต่อนี้จะถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกด้วยการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนต่อไปดังแสดงในรูปที่ 6-5 โดยที่จุดต่อ n เป็นจุดต่อที่อยู่บริเวณผิวภายนอก ได้รับความร้อนที่ถ่ายเทผ่านการนำความร้อนมาจากจุดต่อ $n-1$

สิ่งที่น่าสังเกตคือปริมาตรควบคุมที่จุดต่อที่ผิวภายนอกนี้เป็นตัวแทนนั้นจะมีความยาวของปริมาตรควบคุมเป็น $\Delta x/2$ ซึ่งสั้นกว่าระยะห่างระหว่างจุดต่อหรือความยาวของปริมาตรควบคุมโดยทั่วไป ทำให้การสร้างสมการสมดุลความร้อนบริเวณจุดต่อนี้มีปริมาตรแตกต่างจากจุดต่ออื่นๆ ที่ฝังอยู่ภายในเล็กน้อย เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานที่จุดต่อนี้จะได้

$$m_{st} c_{p,st} \frac{\Delta T_n}{\Delta t} = k_{st} \frac{T_{n-1} - T_n}{\Delta x} - q_{rad} - q_{conv} \quad (6.22)$$

เมื่อ q_{rad} คือปริมาณการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน (W)

q_{conv} คือปริมาณการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน (W)

หากแจกแจงมวลให้อยู่ในรูปผลคูณระหว่างความหนาแน่นและปริมาตรจะจัดรูปได้เป็น

$$\rho_{st} c_{p,st} A \frac{\Delta x}{2} \frac{\Delta T_n}{\Delta t} = k_{st} A \frac{T_{n-1} - T_n}{\Delta x} - q_{rad} - q_{conv} \quad (6.23)$$

$$\rho_{st} c_{p,st} \frac{\Delta T_n}{\Delta t} = 2k_{st} \frac{T_{n-1} - T_n}{(\Delta x)^2} - 2 \frac{q_{rad}''}{\Delta x} - 2 \frac{q_{conv}''}{\Delta x} \quad (6.24)$$

เมื่อ q_{rad}'' คือฟลักซ์ของการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน (W/m^2)

q''_{conv} คือฟลักซ์การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน (W/m^2)

หาประยุกต์สมการที่ (3.3) และ (3.8) เพื่อให้ค่าฟลักซ์ความร้อนในสมการที่ (6.24) อยู่ในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิที่จุดต่อต่างๆได้

$$\rho_{st} c_{p,st} \frac{\Delta T_n}{\Delta t} = 2k_{st} \frac{T_{n-1} - T_n}{(\Delta x)^2} - \frac{2\varepsilon\sigma}{\Delta x} (T_n^4 - T_a^4) - \frac{2h}{\Delta x} (T_n - T_a) \quad (6.25)$$

$$\Delta T_n = \frac{2k_{st}\Delta t}{\rho_{st}c_{p,st}(\Delta x)^2} (T_{n-1} - T_n) - \frac{2\varepsilon\sigma\Delta t}{\rho_{st}c_{p,st}\Delta x} (T_n^4 - T_a^4) - \frac{2h\Delta t}{\rho_{st}c_{p,st}\Delta x} (T_n - T_a) \quad (6.26)$$

$$\Delta T_n = 2Fo(T_{n-1} - T_n) - 2Fo \cdot R(T_n^4 - T_a^4) - 2Fo \cdot Bi(T_n - T_a) \quad (6.27)$$

$$\Delta T_n = 2Fo(T_{n-1} - T_n - RT_n^4 - BiT_n + RT_a^4 + BiT_a) \quad (6.28)$$

$$T'_n - T_n = 2Fo(T_{n-1} - (1 + RT_n^3 + Bi)T_n + (RT_a^3 + Bi)T_a) \quad (6.29)$$

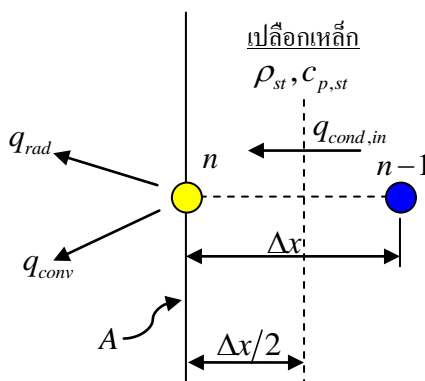
$$T'_n = 2Fo \left(T_{n-1} + \left(\frac{1}{2Fo} - 1 - RT_n^3 - Bi \right) T_n + (RT_a^3 + Bi) T_a \right) \quad (6.30)$$

เมื่อ Fo คือค่าเลขฟูเลียส์มีความสัมพันธ์เป็น $Fo = \frac{k_{st}\Delta t}{\rho_{st}c_{p,st}(\Delta x)^2}$

R คือค่าจากการรวมตัวแปรการแผ่รังสีมีความสัมพันธ์เป็น $R = \frac{\varepsilon\sigma\Delta x}{k_{st}}$

Bi คือค่าเลขบีโอมี่มีความสัมพันธ์เป็น $Bi = \frac{h\Delta x}{k_{st}}$

สุดท้ายแล้วจะได้สมการที่ (6.30) เป็นสมการแม่นยำตรงเพื่อหาอุณหภูมิที่ผิวเข้ารับน้ำเหล็กหรือจุดต่อที่ n ของชั้นเวลาถัดไป ซึ่งสมบัติของค่าต่างๆถูกรวบเป็นตัวแปรไรหน่วยต่างๆโดยค่า Fo แสดงถึงสภาพการนำความร้อนของปริมาตรควบคุมที่จุดต่อที่ n เป็นตัวแทนอยู่ ส่วนตัวแปรไรหน่วย R และ Bi เป็นตัวแปรที่แสดงถึงสภาพการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนที่จุดต่อนั้นเอง การรวมตัวแปรในสมการแม่นยำตรงจะช่วยให้การวิเคราะห์ปริมาณการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆง่ายขึ้น เนื่องจากสมบัติทางความร้อนของการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆได้ถูกรวบไว้ทำให้ในสมการแม่นยำตรงเหลืออยู่เพียงอุณหภูมิของจุดต่อเท่านั้น



รูปที่ 6-5 ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อบริเวณผิวภายนอก

6.2.2.4 จุดต่อบริเวณผิวภายใน

จุดต่อบริเวณผิวภายในเป็นจุดต่อที่อยู่ที่ผิวภายในของเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งแสดงด้วยจุดต่อสีแดงในรูปที่ 6-2 ที่มีความสำคัญมากเนื่องจากผิวภายในเป็นด้านที่ถูกใช้งานซึ่งจะถ่ายเทความร้อนให้จุดต่อภายในจนถึงผิวภายนอกต่อไป นอกจากนั้นแล้วจุดต่อบริเวณผิวภายในนี้ยังมีลักษณะแตกต่างกับจุดต่อจุดอื่นเนื่องจากสมการผลต่างสืบเนื่องที่จุดต่อนี้จะเปลี่ยนแปลงตามเงื่อนไขค่าขอบ ซึ่งเงื่อนไขค่าขอบในแต่ละช่วงการทำงานตลอดวัฏจักรทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปเสมอ ดังที่ได้นำเสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.3 – 4.8 ทำให้สมการผลต่างสืบเนื่องของจุดต่อนี้จะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ในหัวข้อนี้จึงจะอธิบายการสร้างสมการผลต่างสืบเนื่องของจุดต่อในกรณีต่างๆ

ระหว่างกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ในระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นตามเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้นในหัวข้อที่ 4.4 บริเวณผิวภายในจะมีการแผ่รังสีจากแก๊สเผาไหม้เข้ามายังผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก หากพิจารณาตามรูปที่ 6-6 ปริมาตรควบคุมที่ติดอยู่ที่ผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็กแทนด้วยจุดต่อที่ 0 นั้นจะได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีของแก๊สร้อนเข้ามาในปริมาตรควบคุม และส่งความร้อนออกจากปริมาตรควบคุมในรูปของการนำความร้อนไปยังปริมาตรควบคุมต่อไปที่มีจุดต่อที่ 1 เป็นตัวแทน

หากพิจารณาสมดุลพลังงานที่ปริมาตรควบคุมที่จุดต่อ 0 เป็นตัวแทนสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$m_{re} c_{p,re} \frac{\Delta T_0}{\Delta t} = k_{re} A \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + q_{ph} \quad (6.31)$$

$$\rho_{re} c_{p,re} A \frac{\Delta x}{2} \frac{\Delta T_0}{\Delta t} = k_{re} A \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + q_{ph} \quad (6.32)$$

$$\rho_{re} c_{p,re} \frac{\Delta T_0}{\Delta t} = 2k_{re} \frac{T_1 - T_0}{(\Delta x)^2} + \frac{2}{\Delta x} q_{ph}'' \quad (6.33)$$

แทนค่า q_{ph}'' จากสมการที่ (4.14) ลงในสมการที่ (6.33) แล้วจัดรูปจะได้

$$\rho_{re} c_{p,re} \frac{\Delta T_0}{\Delta t} = 2k_{re} \frac{T_1 - T_0}{(\Delta x)^2} + \frac{2F\sigma}{\Delta x} (T_{FL}^4 - T_0^4) \quad (6.34)$$

$$\Delta T_0 = \frac{2k_{re} \Delta t}{\rho_{re} c_{p,re} (\Delta x)^2} (T_1 - T_0) + \frac{2F\sigma \Delta t}{\rho_{re} c_{p,re} \Delta x} (T_{FL}^4 - T_0^4) \quad (6.35)$$

$$\Delta T_0 = 2Fo(T_1 - T_0) + 2Fo \cdot R (T_{FL}^4 - T_0^4) \quad (6.36)$$

$$T_0' - T_0 = 2Fo(T_1 - T_0 + RT_{FL}^4 - RT_0^4) \quad (6.37)$$

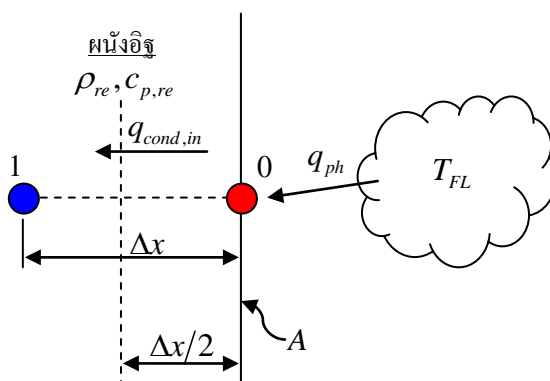
$$T_0' = 2Fo \left(T_1 + \left(\frac{1}{Fo} - 1 - RT_0^3 \right) T_0 + RT_{FL}^4 \right) \quad (6.38)$$

เมื่อ Fo คือค่าเลขฟูเลียส์มีความสัมพันธ์เป็น $Fo = \frac{k_{re} \Delta t}{\rho_{re} c_{p,re} (\Delta x)^2}$

R คือค่าจากการรวมตัวแปรการแผ่รังสีมีความสัมพันธ์เป็น $R = \frac{F\sigma \Delta x}{k_{re}}$

สมการที่ (6.38) จะเป็นสมการแม่นยำตรงของจุดต่อที่ผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็กหรือจุดต่อที่ 0 ในรูปที่ 6-6 เพื่อใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิที่จุดต่อนี้ที่ขึ้นเวลาถัดไป ซึ่งสมการที่ (6.38) นี้จะมีจุดสำคัญอยู่ที่ค่า R ในสมการ ที่จะต่อหาค่า F จากหัวข้อที่ 4.4 ซึ่งเป็นตัวแปรที่ต้องคำนวณจากการเผาไหม้ที่ทำโดยหัวเผา

ข้อสังเกตที่ได้จากจุดต่อบริเวณผิวในนี้จะมีขนาดความก้าวของปริมาตรควบคุมเป็น $\Delta x/2$ ซึ่งจะเหมือนกับจุดต่อบริเวณผิวภายนอกที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมา



รูปที่ 6-6 ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อบริเวณผิวภายนอกระหว่างการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็ก

ระหว่างเป่ารับน้ำเหล็กเปล่าถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศ

การถ่ายเทความร้อนออกจากเป่ารับน้ำเหล็กเปล่านั้น ได้ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.5 ซึ่งจะปรากฏลักษณะของการถ่ายเทความร้อนเช่นนี้ในเป็นประจำในในวัฏจักรทำงาน เช่นระหว่างเป่ารับน้ำเหล็กที่รับน้ำเหล็กจากเตาหลอม ระหว่างเปลี่ยนประตู หรือระหว่างการล้างรูเทน้ำเหล็ก หากพิจารณาปริมาตรควบคุมบริเวณผิวเป่ารับน้ำเหล็กภายในซึ่งมีการถ่ายเทความร้อนผ่านการพาและการแผ่รังสีดังรูปที่ 6-7 เมื่อจุดต่อที่ 0 เป็นตัวแทนของปริมาตรควบคุมที่อยู่ผิว และจุดต่อที่ 1 เป็นตัวแทนของปริมาตรควบคุมที่อยู่ถัดเข้าไปในผนัง ซึ่งจะได้รับความร้อนผ่านการนำความร้อนจากจุดต่อที่ 0 หากพิจารณาสมดุลพลังงานของปริมาตรควบคุมที่มีจุดต่อ 0 เป็นตัวแทนจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$m_{re} c_{p,re} \frac{\Delta T_0}{\Delta t} = k_{re} A \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} - q_{conv} - q_2 \quad (6.39)$$

$$\rho_{re} c_{p,re} A \frac{\Delta x}{2} \frac{\Delta T_0}{\Delta t} = k_{re} A \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} - q_{conv} - q_2 \quad (6.40)$$

$$\Delta T_0 = \frac{2k_{re} \Delta t}{\rho_{re} c_{p,re} (\Delta x)^2} (T_1 - T_0) - \frac{2\Delta t}{\rho_{re} c_{p,re} \Delta x} q_{conv}'' - \frac{2\Delta t}{\rho_{re} c_{p,re} \Delta x} q_2'' \quad (6.41)$$

$$\Delta T_0 = Fo(T_1 - T_0) - \frac{2\Delta t}{\rho_{re} c_{p,re} \Delta x} h(T_0 - T_a) - \frac{2\Delta t}{\rho_{re} c_{p,re} \Delta x} q_2'' \quad (6.42)$$

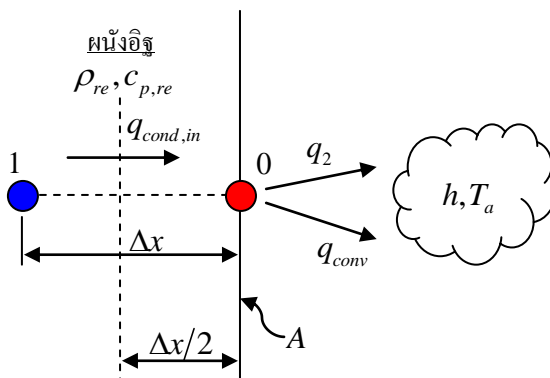
$$T_0' - T_0 = 2Fo(T_1 - T_0) - 2Fo \cdot Bi(T_0 - T_a) - 2Fo \frac{\Delta x}{k_{re}} q_2'' \quad (6.43)$$

$$T_0' = 2Fo \left(T_1 \left(\frac{1}{2Fo} - 1 - Bi \right) T_0 + Bi T_a - \frac{\Delta x}{k_{re}} q_2'' \right) \quad (6.44)$$

เมื่อ Fo คือค่าเลขฟูเลียส์มีความสัมพันธ์เป็น $Fo = \frac{k_{re} \Delta t}{\rho_{re} c_{p,re} (\Delta x)^2}$

Bi คือค่าเลขบีโอมี่มีความสัมพันธ์เป็น $Bi = \frac{h\Delta x}{k_{re}}$

สมการที่ (6.44) ที่ได้นี้เป็นสมการแม่นยำตรงเพื่อหาค่าอุณหภูมิจุดต่อที่ผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในชั้นเวลาถัดไป โดยที่ปริมาณพลักซ์ของรังสีจากการแผ่รังสีความร้อนออกจากพื้นผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก (q_2'') ได้แสดงวิธีคำนวณไว้ดังหัวข้อที่ 4.5 นอกจากนั้นแล้วสมการที่ (6.44) นี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กับการพิจารณาอุณหภูมิในชั้นเวลาถัดไปของผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กได้ด้วยกระบวนการเดียวกัน เพียงแต่ขนาดของปริมาตรควบคุมอาจแตกต่างกัน และปริมาณพลักซ์ของรังสีที่ออกจากผิวใช้เป็นผิวภายในผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก (q_3'') ซึ่งวิธีการคำนวณก็ดำเนินตามกระบวนการเช่นเดียวกับการพิจารณาที่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 6-7 ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อบริเวณผิวภายในระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศ

ระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก

แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กนั้นได้อธิบายได้ในหัวข้อที่ 4.6 นั่นคือน้ำเหล็กที่สัมผัสกับเบ้ารับน้ำเหล็กจะถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กผ่านการพาความร้อน และความร้อนจากจุดต่อที่ 0 ในรูปที่ 6-8 จะถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนไปยังจุดต่อที่ 1 หากพิจารณาสมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุมที่อยู่ติดผิวของผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งมีจุดต่อที่ 0 เป็นตัวแทนปริมาตรควบคุมอยู่นั้นจะให้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$m_{re} c_{p,re} \frac{\Delta T_0}{\Delta t} = k_{re} A \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + q_{conv} \quad (6.45)$$

$$\rho_{re} c_{p,re} A \frac{\Delta x}{2} \frac{\Delta T_0}{\Delta t} = k_{re} A \frac{T_1 - T_0}{\Delta x} + q_{conv} \quad (6.46)$$

$$\Delta T_0 = \frac{2k_{re}\Delta t}{\rho_{re}c_{p,re}(\Delta x)^2}(T_1 - T_0) + \frac{2\Delta t}{\rho_{re}c_{p,re}\Delta x} q_{conv}'' \quad (6.47)$$

$$\Delta T_0 = \frac{2k_{re}\Delta t}{\rho_{re}c_{p,re}(\Delta x)^2}(T_1 - T_0) + \frac{2\Delta t}{\rho_{re}c_{p,re}\Delta x} h(T_{ls} - T_0) \quad (6.48)$$

$$T_0' - T_0 = 2Fo(T_1 - T_0) + 2Fo \cdot Bi(T_{ls} - T_0) \quad (6.49)$$

$$T_0' = 2Fo \left(T_1 + \left(\frac{1}{2Fo} - 1 - Bi \right) T_0 + BiT_{ls} \right) \quad (6.50)$$

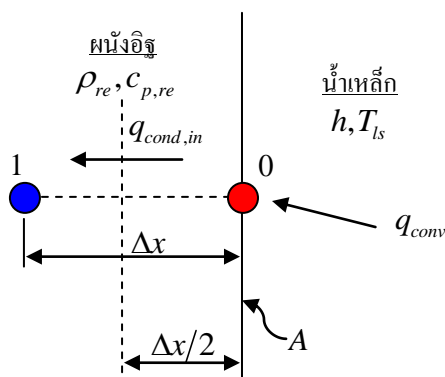
เมื่อ Fo คือค่าเลขฟูเลียส์มีความสัมพันธ์เป็น $Fo = \frac{k_{re}\Delta t}{\rho_{re}c_{p,re}(\Delta x)^2}$

Bi คือค่าเลขบีโอมี่มีความสัมพันธ์เป็น $Bi = \frac{h\Delta x}{k_{re}}$

สมการที่ (6.50) จะเป็นสมการแม่นยำตรงสำหรับการคำนวณหาอุณหภูมิที่จุดต่อ 0 ในกรณีนี้ที่ขึ้นเวลาถัดไป ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผนังเข้ารับน้ำเหล็กในกรณีนี้ ซึ่งอุณหภูมิของน้ำเหล็กจะเปลี่ยนแปลงไปตามขึ้นเวลาซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.30)

ส่วนการพิจารณาสมการผลต่างสี่เหลี่ยมของรูปแบบแม่นยำตรงของผนังกันเข้ารับน้ำเหล็กสามารถทำได้ในลักษณะเดียวกัน เนื่องจากผนังกันเข้ารับน้ำเหล็กก็สัมผัสกับน้ำเหล็กในลักษณะเดียวกันกับผนังเข้ารับน้ำเหล็ก

นอกจากนั้นแล้วสมการที่ (6.49) ยังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าหากอุณหภูมิผิวของผนังภายในเข้ารับน้ำเหล็ก (T_0) เพิ่มขึ้นจะช่วยลดการถ่ายเทความร้อนผ่านการพาความร้อนจากน้ำเหล็กเหลวมายังผนังเข้ารับน้ำเหล็กได้



รูปที่ 6-8 ลักษณะการวิเคราะห์จุดต่อบริเวณผิวภายในระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กขนถ่ายน้ำเหล็ก

ระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

ในกระบวนการนี้จะแตกต่างจากกระบวนการอื่นๆ เนื่องจากระหว่างกระบวนการนี้จะต้องแบ่งช่วงเวลาเพื่อพิจารณาลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ทำให้สมการผลต่างสืบเนื่องสำหรับคำนวณหาอุณหภูมิที่จุดต่อบริเวณผิวภายในต้องแบ่งออกเป็นช่วงเวลา ซึ่งในการออกแบบแบบจำลองนี้นั้นได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.7 โดยได้แบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงเวลาที่ร้อยละ 40 แรกของเวลาในการเทน้ำเหล็กทั้งหมด และช่วงเวลาที่ร้อยละ 60 หลังของเวลาในการเทน้ำเหล็กทั้งหมด ซึ่งสามารถพิจารณาสมดุลพลังงานในปริมาตรควบคุมได้ตามรูปที่ 6-9 เมื่อพิจารณาให้จุดต่อที่ 0 เป็นตัวแทนของปริมาตรควบคุมที่อยู่บริเวณผิวผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กและจะมีความสัมพันธ์ตามเงื่อนไขค่าขอบแบบสมการที่ (4.37) และ (4.39) คือในกรณีช่วงเวลาที่ร้อยละ 40 แรกของเวลาในการเทน้ำเหล็ก ระดับน้ำเหล็กยังคงสูงกว่าระดับกึ่งกลางความสูงของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ปริมาตรควบคุมที่จุดต่อ 0 นั้นได้รับความร้อนจากการพาความร้อนจากน้ำเหล็ก และถ่ายเทความร้อนผ่านการนำความร้อนสู่จุดต่อที่ 1 ส่วนอีกกรณีในช่วงเวลาที่ร้อยละ 60 หลังของเวลาในการเทน้ำเหล็ก ระดับน้ำเหล็กจะอยู่ต่ำกว่าระดับกึ่งกลางความสูงของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กทำให้ต้องพิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านการแผ่รังสีโดยให้ปริมาณความร้อนจากการแผ่รังสีสุทธิที่ออกจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นเป็นปริมาณ ส่วนจุดต่อที่ 1 ภายในก็มีการนำความร้อนมายังจุดต่อที่ 0 ที่จะเริ่มมีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งทั้ง 2 กรณีที่ได้แยกพิจารณานั้นสามารถเขียนสมดุลพลังงานได้ดังนี้

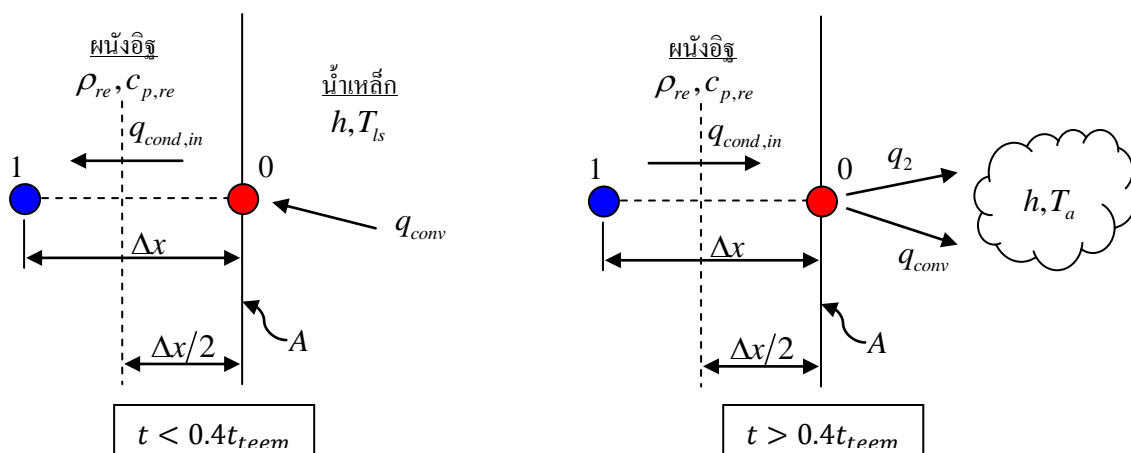
- ช่วงเวลาย่อยละ 40 แรกของเวลาในการเทน้ำเหล็ก

ในช่วงเวลาย่อยละ 40 แรกของเวลาในการเทน้ำเหล็ก ที่ระดับกึ่งกลางความสูงของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะยังสัมผัสกับน้ำเหล็กทำให้มีการถ่ายเทความร้อนกับน้ำเหล็ก โดยที่น้ำเหล็กจะพาความร้อนเข้าสู่ภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ลักษณะสมการผลต่างสืบเนื่องรูปแบบแม่นยำสำหรับผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจึงมีลักษณะเหมือนกันกับสมการที่ (6.50) ส่วนผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นก็สัมผัสกับน้ำเหล็กและมีการถ่ายเทความร้อนผ่านการพาความร้อนจากน้ำเหล็กเข้ามาเช่นเดียวกัน

- ช่วงเวลาย่อยละ 60 หลังของเวลาในการเทน้ำเหล็ก

ในช่วงเวลาย่อยละ 60 หลังของเวลาในการเทน้ำเหล็ก ระดับน้ำเหล็กได้ลดลงต่ำกว่าระดับกึ่งกลางความสูงของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กแล้ว ที่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจึงมีการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีความร้อน และการพาความร้อนออกจากพื้นผิว ซึ่งลักษณะเช่นนี้สามารถสร้างสมการผลต่างสืบเนื่องรูปแบบแม่นยำได้ลักษณะเดียวกันกับสมการที่ (6.44) เพียงแต่ปริมาณฟลักซ์ความร้อนจากการแผ่รังสีที่ออกจากพื้นผิวต้องผ่านการคำนวณการแผ่รังสีตามลักษณะหัวข้อที่ 4.7 ซึ่งค่าตัวประกอบการมองเห็นจะเปลี่ยนแปลงไปเรื่อยๆตลอดการเทน้ำเหล็ก

ส่วนการสร้างสมการผลต่างสืบเนื่องแบบแม่นยำนั้นจะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับสมการที่ (6.50) เนื่องจากผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กยังมีการสัมผัสกับน้ำเหล็กอยู่ตลอดเวลาในกระบวนการนี้ ผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กจึงได้รับการถ่ายเทความร้อนผ่านการพาความร้อนจากน้ำเหล็กเข้าสู่ผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กตลอด



รูปที่ 6-9 ลักษณะการพิจารณาแบบแบ่งช่วงระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

แต่สิ่งที่สำคัญสำหรับกระบวนการเทน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กนี้คือการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำเหล็กที่มีอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กอยู่ตลอดเวลา ซึ่งในการพิจารณานี้จะสมมติให้ว่าการลดระดับความสูงของน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กลดลงคงที่ในแต่ละชั้นเวลา ซึ่งจะส่งผลต่อตัวประกอบการมองเห็นเวลาและมวลของน้ำเหล็กในแต่ละชั้นเวลาดัง

ระหว่างกระบวนการขนย้ายแผลกไปเททิ้ง

ในกระบวนการขนย้ายแผลกไปเททิ้งนั้นจะมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนในลักษณะใกล้เคียงกันกับการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กในช่วงเวลาร้อยละ 60 หลังของการเทน้ำเหล็ก เนื่องจากผนังจะมีการถ่ายเทความร้อนผ่านการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ส่วนผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กก็ยังคงสัมผัสกับน้ำเหล็กที่เหลืออยู่ภายในเบ้าทำให้เกิดการพาความร้อนเข้าสู่ผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่ในกระบวนการนี้จะไม่มีการลดลงของระดับน้ำเหล็กภายในเบ้าดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.8 ซึ่งตามแนวทางเช่นเดียวกับการสร้างสมการผลต่างสืบเนื่องรูปแบบแน่นอนตรงในหัวข้อที่ผ่านมา ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะใช้สมการที่ (6.44) เป็นสมการแน่นอนตรงได้ ส่วนผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กจะสามารถใช้สมการที่ (6.50) เป็นสมการแน่นอนตรงสำหรับการจำลองการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กและผนังได้

จากที่กล่าวมาทั้งหมดที่ผ่านมาสามารถสรุปสมการผลต่างสืบเนื่องที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมาเพื่อใช้ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6-2 สรุปสมการผลต่างสืบเนื่องของตำแหน่งจุดต่อต่างๆ ในกรณีต่าง

ตำแหน่งจุดต่อ	สมการผลต่างสืบเนื่อง	สมการที่
จุดต่อภายในเนื้อของผนัง	$T'_i = Fo \left(T_{i-1} + \left(\frac{1}{Fo} - 2 \right) T_i + T_{i+1} \right)$	(6.14)
จุดต่อระหว่างผนังอิฐและเปลือกเหล็ก	$T'_i = Fo \left(\frac{k_{re} T_{i-1} + k_{st} T_{i+1}}{(k_{re} + k_{st})} + \left(\frac{1}{Fo} - 1 \right) T_i \right)$	(6.21)
จุดต่อบริเวณผิวภายนอก	$T'_n = 2Fo \left(T_{n-1} + \left(\frac{1}{2Fo} - 1 - RT_n^3 - Bi \right) T_n + (RT_a^3 + Bi) T_a \right)$	(6.30)
จุดต่อบริเวณผิวภายใน - ระหว่างกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก	$T'_0 = 2Fo \left(T_1 + \left(\frac{1}{Fo} - 1 - RT_0^3 \right) T_0 + RT_{FL}^4 \right)$	(6.38)

ตารางที่ 6-2 สรุปสมการผลต่างสืบเนื่องของตำแหน่งจุดต่อต่างๆในกรณีต่าง (ต่อ)

ตำแหน่งจุดต่อ	สมการผลต่างสืบเนื่อง	สมการที่
- ระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า ถ่ายเทความร้อนออกสู่ บรรยากาศ	$T'_0 = 2Fo \left(T_1 \left(\frac{1}{2Fo} - 1 - Bi \right) T_0 + BiT_a - \frac{\Delta x}{k_{re}} q_2'' \right)$	(6.44)
- ระหว่างกระบวนการขนถ่าย น้ำเหล็ก	$T'_0 = 2Fo \left(T_1 + \left(\frac{1}{2Fo} - 1 - Bi \right) T_0 + BiT_s \right)$	(6.50)
- ระหว่างกระบวนการเทน้ำ เหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กเทน้ำ เหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก		
ผนังข้างเบ้า เมื่อ $t \leq 0.4t_{teem}$	อ้างอิงสมการที่ (6.50)	
ผนังกันเบ้า เมื่อ $t \leq 0.4t_{teem}$	อ้างอิงสมการที่ (6.50)	
ผนังข้างเบ้า เมื่อ $t > 0.4t_{teem}$	อ้างอิงสมการที่ (6.44)	
ผนังกันเบ้า เมื่อ $t > 0.4t_{teem}$	อ้างอิงสมการที่ (6.50)	
- ระหว่างกระบวนการขนย้าย แอสลไปเททิ้ง		
ผนังเบ้า	อ้างอิงสมการที่ (6.44)	
ผนังกันเบ้า	อ้างอิงสมการที่ (6.50)	

6.3 การออกแบบโปรแกรมควบคุม

เนื่องจากการออกแบบระบบควบคุมต้องอาศัยการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องซึ่งเป็นระเบียบวิธีเชิงเลข ทำให้ในการคำนวณต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ในการทำงาน คำนวณหาผลลัพธ์ จึงต้องมีการออกแบบโปรแกรมเพื่อทำงานแก้ปัญหาต่างๆ โดยใช้รูปแบบสมการที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.2

ในการออกแบบโปรแกรมควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กร่วมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงานให้ได้นั้น หลักการที่สำคัญคือการทำที่ระบบควบคุมต้องสามารถคำนวณอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมสำหรับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่จะนำมารับน้ำเหล็ก โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อการผลิต

ในหัวข้อนี้จึงจะแบ่งการอธิบายการออกแบบจากภาพรวมของโปรแกรมผ่านแผนภูมิสายงานของการปฏิบัติงานทั้งหมด และแสดงรายละเอียดแยกย่อยไปตามลักษณะการปฏิบัติงานของกระบวนการต่างๆ 5 กระบวนการดังที่ได้จำแนกไว้ต่อไป

6.3.1 การออกแบบภาพรวมของโปรแกรม

จากการวิเคราะห์และจำแนกกระบวนการในหัวข้อที่ 5.4 นั้นพบว่าลักษณะวัฏจักรการทำงานจะมีลำดับการใช้งานแบบจำลองโดยทั่วไป โดยเริ่มจากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก การพักเบ้ารับน้ำเหล็กครั้งที่ 1 การขนถ่ายน้ำเหล็ก การเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก การขนย้ายแผลกไปเททิ้ง และการพักเบ้ารับน้ำเหล็กครั้งที่ 2 ตามลำดับ

ในการออกแบบภาพรวมของระบบควบคุมนั้นมีลักษณะดังแผนภูมิสายงานดังรูปที่ 6 – 10 โดยภายในประกอบไปด้วยกระบวนการที่สำคัญ ซึ่งชื่อของกระบวนการจะอยู่ภายในเครื่องหมายอัฒประกาศ อันจะมีความหมายถึงตัวดำเนินการของกระบวนการนั้น โดยประกอบไปด้วย

1. “การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก”
2. “การพักเบ้ารับน้ำเหล็กครั้งที่ 1”
3. “การขนถ่ายน้ำเหล็ก”
4. “การเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก”
5. “การขนย้ายแผลกไปเททิ้ง”
6. “การทำนายอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม”

และมีสัญลักษณ์ตัวแปรทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณที่สำคัญทั้งหมด 6 ตัวได้แก่

1. T_o คือเมตริกซ์การแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก
2. $T_{b,o}$ คือเมตริกซ์การแจกแจงอุณหภูมิในผนังก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก
3. $T_{o,next}$ คือเมตริกซ์การแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กสำหรับรอบการทำงานที่ต้องการคำนวณ
4. $T_{b,o,next}$ คือเมตริกซ์การแจกแจงอุณหภูมิในผนังก้นเบ้ารับน้ำเหล็กสำหรับรอบการทำงานที่ต้องการคำนวณ
5. $T_{o,save}$ คือเมตริกซ์การแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรม

6. $T_{b,o,save}$ คือเมตริกซ์การแจกแจงอุณหภูมิในผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรม

การทำงานของโปรแกรมนี้อาจเริ่มจากการตรวจสอบความถี่ในการจำลองจะต้องใช้กระบวนการใดบ้างในการพิจารณา และกำหนดว่าการจำลองครั้งนี้จะถือเป็นการจำลองรอบการทำงานใหม่หรือไม่ เนื่องจากในการทำงานจริงจะต้องมีการจำลองอยู่หลายครั้งในแต่ละรอบการทำงานเพื่อใช้ในการทำนายและเพื่อการส่งค่าที่ได้จากผลการจำลองที่มีช่วงเวลาจริงไปยังรอบการทำงานต่อไป หลังจากนั้นผู้ใช้งานโปรแกรมควบคุมต้องกำหนดว่าเบ้ารับน้ำเหล็กที่จะนำมาจำลองนั้นผ่านการใช้งานมาแล้วหรือไม่ หากเป็นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่ อุณหภูมิภายในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกตั้งค่าเริ่มต้นที่ 35°C ตลอดระดับความลึกของผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก

แต่หากเป็นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว จะต้องตรวจสอบต่อไปว่าต้องการจำลองซ้ำในรอบการทำงานนี้หรือไม่ หากขึ้นรอบการทำงานใหม่ค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเมื่อสิ้นสุดการทำงานรอบที่แล้วจะถูกเก็บค่าไว้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับการทำงานรอบใหม่ แต่หากไม่ได้ขึ้นรอบการทำงานใหม่ ค่าเริ่มต้นการจำลองของรอบการทำงานนั้นที่ถูกเก็บไว้จะถูกนำมาใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลองใหม่

เมื่อค่าเงื่อนไขเริ่มต้นได้ถูกกำหนดจนหมดแล้ว โปรแกรมควบคุมจะตรวจสอบว่ามีการเรียกให้มีการจำลองในขั้นตอนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กหรือไม่ หากมีการตั้งให้มีการจำลองโปรแกรมจะนำระยะเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผู้ใช้งานป้อนเข้ามา และค่าเริ่มต้นของอุณหภูมิภายในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กเข้ามาคำนวณในตัวดำเนินการ “การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก” และส่งค่าอุณหภูมิผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กออกมา แต่หากไม่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ค่าเริ่มต้นที่ใช้พิจารณาจะข้ามขั้นตอนนี้ไป

ต่อมาโปรแกรมระบบควบคุมจะตรวจสอบว่ามีการเรียกใช้ตัวปฏิบัติการ “การพักเบ้ารับน้ำเหล็กครั้งที่ 1” หรือไม่ หากมีการเรียกใช้โปรแกรมจะส่งค่าระยะเวลาในการพักที่รับจากผู้ปฏิบัติงานและ อุณหภูมิในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการคำนวณในตัวปฏิบัติการก่อนหน้ามาเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นในการจำลองในตัวปฏิบัติการ “การพักเบ้ารับน้ำเหล็ก ครั้งที่ 1” และส่งผลลัพธ์เป็นการแจกแจงอุณหภูมิในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กออกมา แต่หากไม่มีการเรียกใช้ตัวปฏิบัติการนี้ โปรแกรมจะข้ามขั้นตอนนี้ไป

ขั้นตอนต่อมาค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกแบ่งเป็นสองส่วนเพื่อส่งค่าไปเข้าการจำลองในตัวปฏิบัติการ 2 ตัวอันได้แก่ “การทำนายอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม” และ “การขนถ่ายน้ำเหล็ก”

ค่าที่ส่งให้แก่ตัวปฏิบัติการ “การทำนายอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม” จะถูกป้อนเข้าสู่ตัวปฏิบัติการพร้อมกับค่าของอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่ต้องการเพื่อที่ตัวปฏิบัติการนี้จะใช้ในการคำนวณ และส่งค่าอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมออกมา

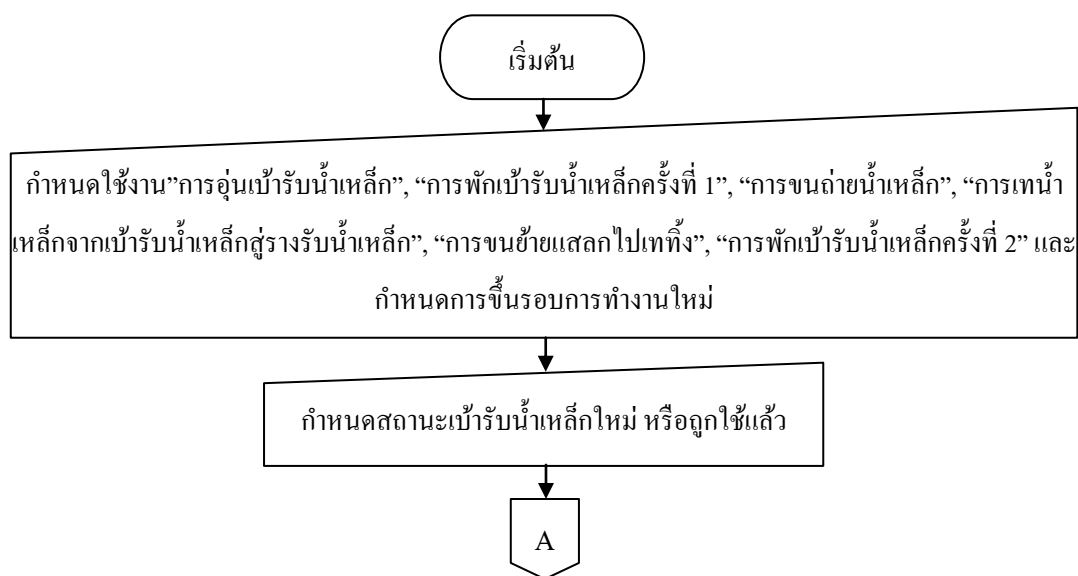
อีกส่วนหนึ่ง โปรแกรมก็จะตรวจสอบว่ามีการเรียกใช้ตัวปฏิบัติการ “การขนถ่ายน้ำเหล็กหรือไม่” หากไม่มี โปรแกรมจะส่งค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กไปบันทึก และแสดงผลการจำลองการแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กผ่านทางจอภาพ แต่หากตัวปฏิบัติการมีการเรียกใช้ โปรแกรมจะต้องมีการรับค่า อุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่ปฏิบัติจริงและระยะเวลาในการขนถ่ายน้ำเหล็กจากผู้ใช้โปรแกรมควบคุมนี้ ค่าที่ได้จะนำมาใช้ในตัวปฏิบัติการ “การขนถ่ายน้ำเหล็ก” และส่งค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กและการแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กออกมา

หลังจากนั้น โปรแกรมจะตรวจสอบว่ามีการเรียกใช้ตัวปฏิบัติการ “การเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กหรือไม่” หากไม่มีการเรียกใช้ค่าการแจกแจงของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกบันทึกเก็บไว้และส่งค่าการแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กไปแสดงผลยังจอภาพ แต่หากมีการเรียกใช้ตัวปฏิบัติการนี้ ค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กและอุณหภูมิน้ำเหล็กที่สิ้นสุดกระบวนการจากกระบวนการก่อนหน้านี้จะถูกส่งเข้าไปจำลองในตัวปฏิบัติการ “การเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก” ร่วมกับระยะเวลาที่ใช้ในการเทน้ำเหล็ก และส่งการแจกแจงอุณหภูมิในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กออกจากตัวปฏิบัติการพร้อมกับอุณหภูมิน้ำเหล็กในขณะสิ้นสุดกระบวนการออกไปด้วย

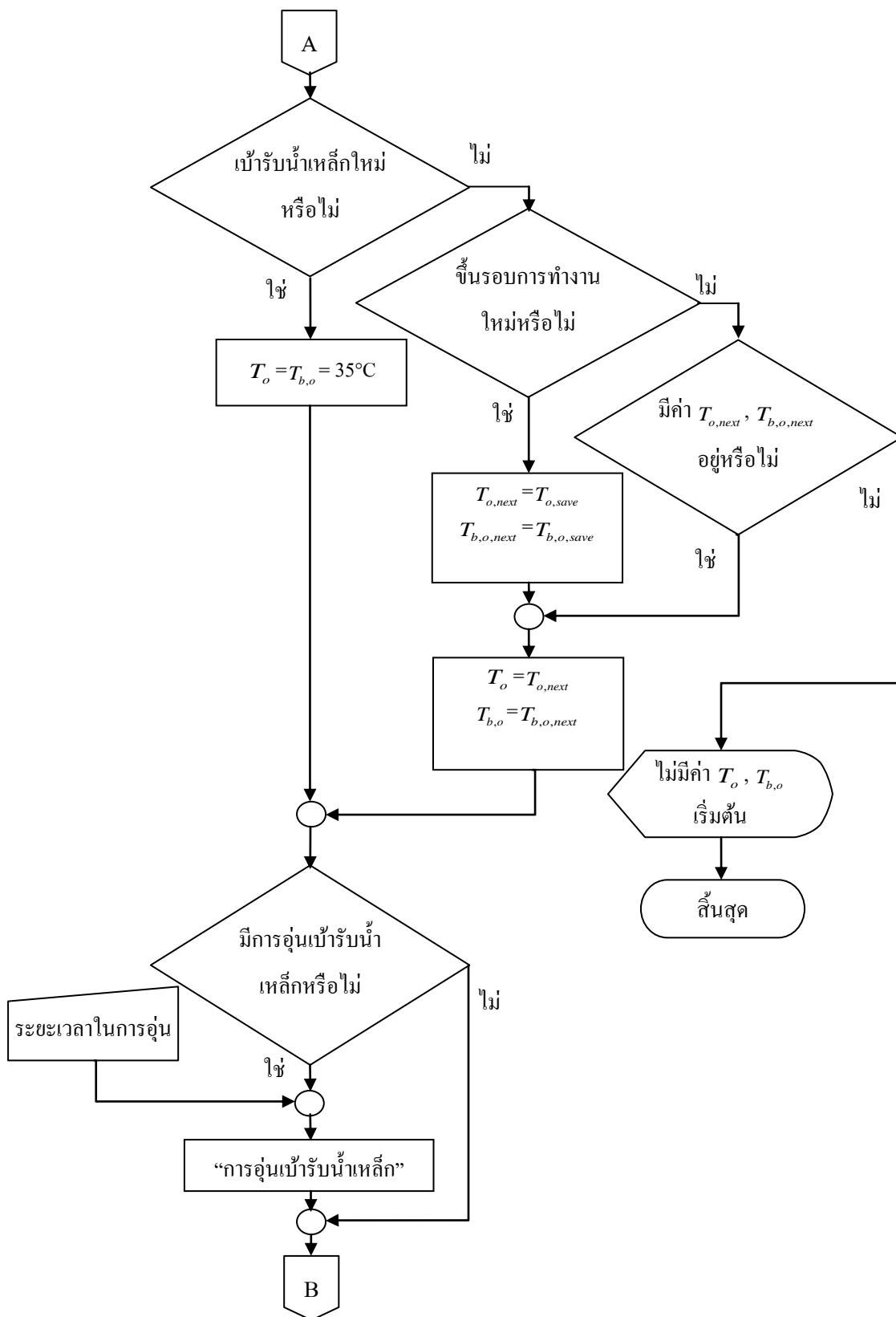
ขั้นตอนต่อมาโปรแกรมจะตรวจสอบว่ามีการเรียกใช้การจำลองในขณะขนย้ายแสลคไปเททิ้งหรือไม่ หากไม่มีค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกบันทึกและนำการแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กที่จำลองได้แสดงผลทางจอภาพ แต่หากมีคำสั่งให้มีการจำลองกระบวนการนี้ โปรแกรมจะนำระยะเวลาในการขนย้ายแสลคไปเททิ้ง การแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจากกระบวนการที่ผ่านมา และอุณหภูมิของน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดกระบวนการ

ที่ผ่านมาเข้าสู่ตัวปฏิบัติการ “การขนย้ายแสลคไปเททิ้ง” แล้วตัวปฏิบัติการจะส่งค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังออกมา

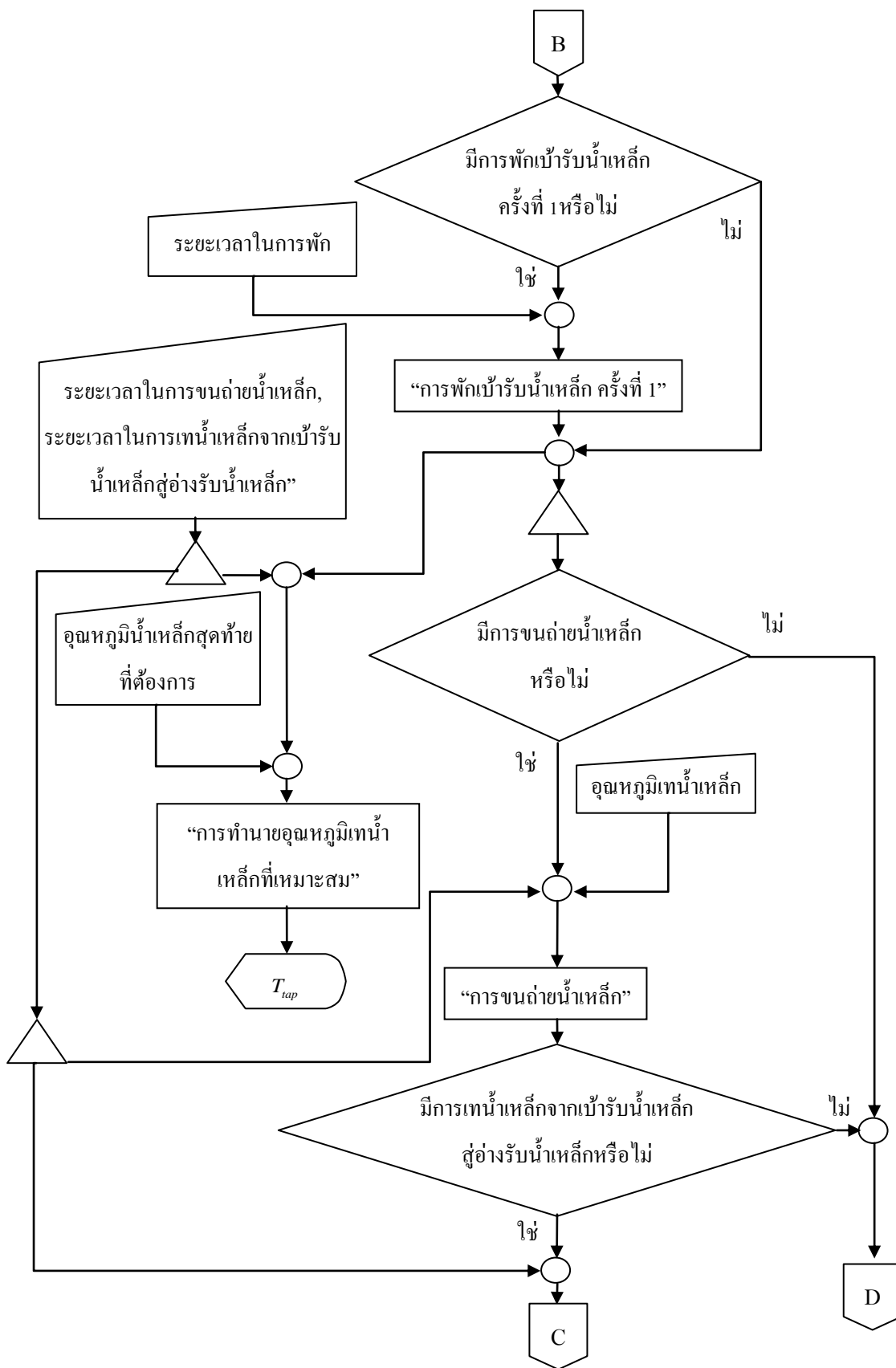
ต่อไปโปรแกรมจะตรวจสอบว่ามีการเรียกใช้ตัวปฏิบัติการ “การพักเบียร์น้ำเหล็ก ครั้งที่ 2” หรือไม่ หากไม่มีการเรียกใช้ค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังเข้าและผนังกันรับน้ำเหล็กจะถูกบันทึกและนำค่าการแปรผันของอุณหภูมิ น้ำเหล็กและเบียร์น้ำเหล็กส่งออกไปแสดงผลยังจอภาพ หากมีการเรียกใช้ลักษณะก็จะเหมือนการใช้งานตัวปฏิบัติการ “การพักเบียร์น้ำเหล็ก ครั้งที่ 1” คือจะมีการรับค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังและผนังกันเบียร์น้ำเหล็ก และระยะเวลาในการพักเข้าสู่ตัวปฏิบัติการ “การพักเบียร์น้ำเหล็ก ครั้งที่ 2” และส่งผลออกมาเป็นการแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบียร์น้ำเหล็ก เนื่องจากกระบวนการนี้จะเป็นกระบวนการสุดท้ายสำหรับการจำลอง ดังนั้น ค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังและผนังกันเบียร์น้ำเหล็กจะถูกบันทึกและนำการแปรผันของอุณหภูมิ น้ำเหล็กและเบียร์น้ำเหล็กส่งออกไปแสดงผลทางจอภาพก่อนสิ้นสุดการปฏิบัติงานของโปรแกรมในรอบการทำงานที่มีการเรียกใช้โปรแกรมควบคุมให้มีการจำลองและหาค่าอุณหภูมิผนังเหล็กที่เหมาะสม



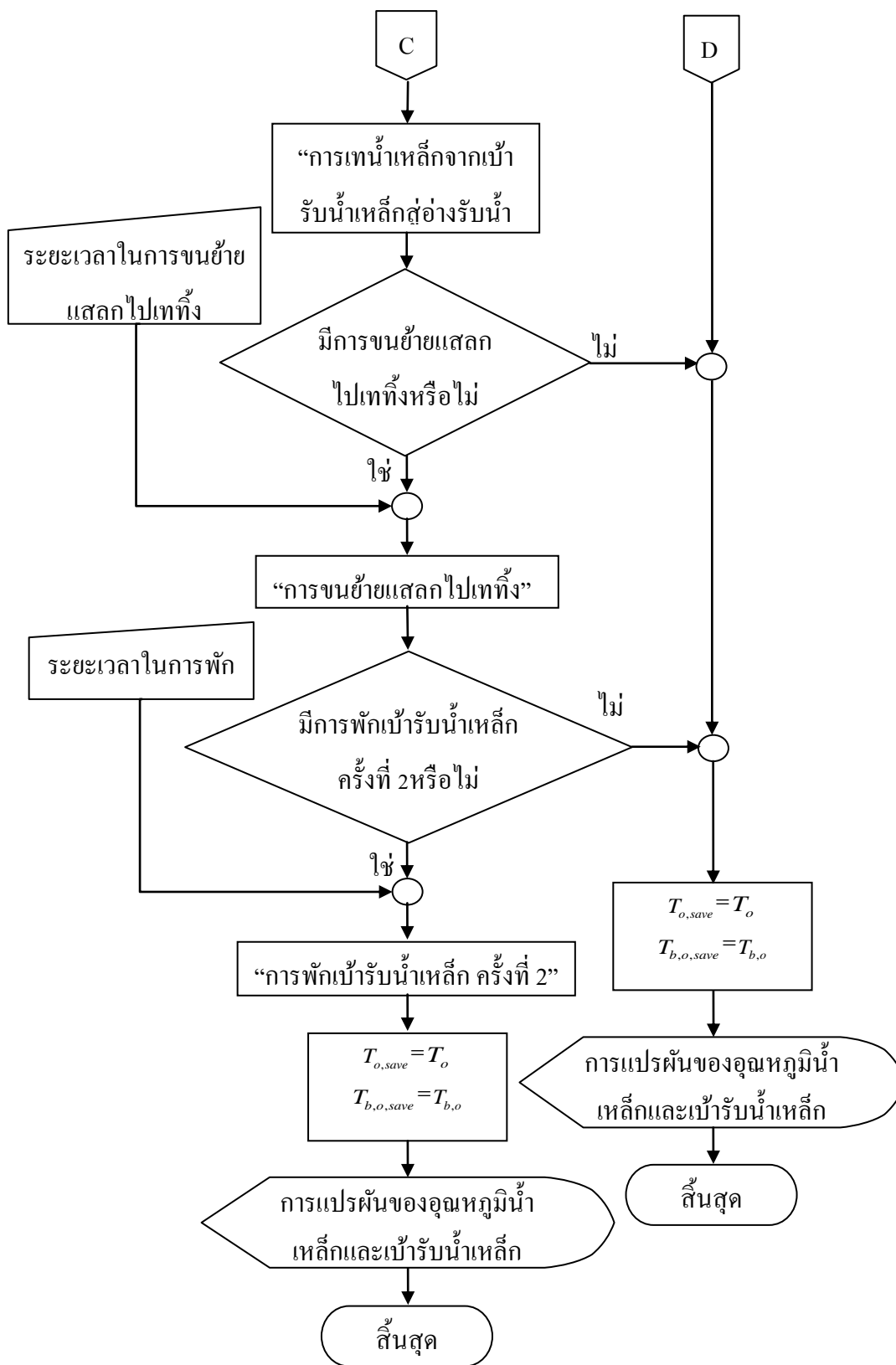
รูปที่ 6-10 แผนภูมิสายงานภาพรวมของ โปรแกรม



รูปที่ 6-10 แผนภูมิสายงานภาพรวมของโปรแกรม (ต่อ)



รูปที่ 6-10 แผนภูมิสายงานภาพรวมของโปรแกรม (ต่อ)



รูปที่ 6-10 แผนภูมิสายงานภาพรวมของโปรแกรม (ต่อ)

6.3.2 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การอุ่นเป่ารับน้ำเหล็ก”

ในหัวข้อที่ 6.3.1 นั้นได้แสดงถึงการใช้งานตัวปฏิบัติการ “การอุ่นเป่ารับน้ำเหล็ก” สำหรับการจำลองการแปรผันของอุณหภูมิภายในผนังเป่ารับน้ำเหล็กระหว่างการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็ก เพื่อที่จะทราบถึงลักษณะการทำงานของตัวปฏิบัติการนี้ แผนภูมิสายงานของตัวปฏิบัติการนี้ได้ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 6 – 11

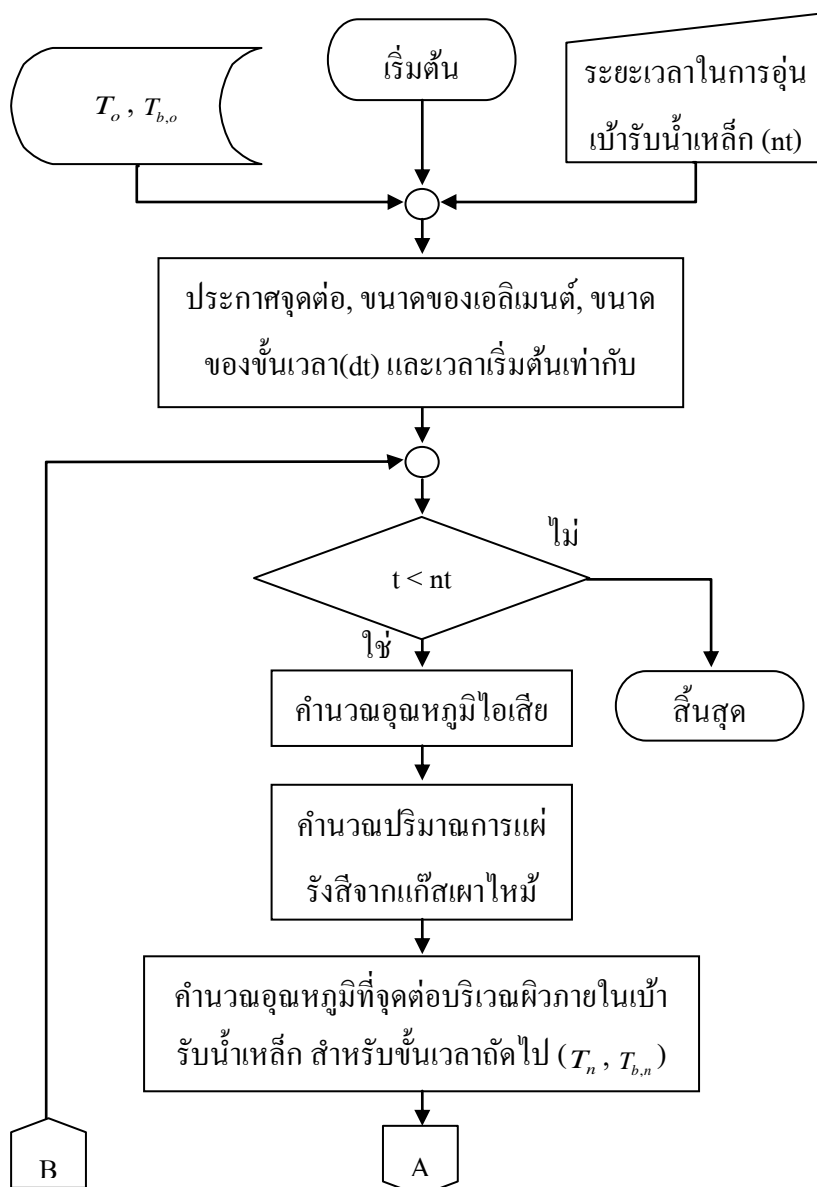
โดยการเริ่มต้นของตัวปฏิบัติการจะรับค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังและผนังกันเป่ารับน้ำเหล็กจากหน่วยความจำที่บันทึกไว้ซึ่งที่มาของการแจกแจงนี้ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.3.1 ที่ผ่านมาแล้ว และรับค่าระยะเวลาในการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กจากผู้ปฏิบัติงาน หลังจากนั้นตัวปฏิบัติการจะประกาศจุดต่อ ขนาดของเอลิเมนต์ ขนาดของชั้นเวลา เวลาเริ่มต้นการปฏิบัติงานที่ศูนย์ และสมบัติต่างๆที่จำเป็นต่อการคำนวณ แล้วกระบวนการจะถูกพิจารณาว่าในการคำนวณขณะนั้นค่าเวลามีค่าน้อยกว่าเวลาสิ้นสุดกระบวนการหรือไม่ หากค่าเวลามีค่ามากกว่าเวลาสิ้นสุดผลการตัดสินใจจะเป็นไม่และสิ้นสุดกระบวนการโดยส่งค่าการแปรผันของอุณหภูมิในผนังเป่ารับน้ำเหล็กออกจากตัวปฏิบัติการ แต่หากเวลาที่พิจารณาต่ำกว่าเวลาสิ้นสุดกระบวนการ ระบบจะเข้าไปคำนวณอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ แล้วนำอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ได้ไปใช้คำนวณหาปริมาณการแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้เพื่อใช้ในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่จุดต่อบริเวณผิวภายในเป่ารับน้ำเหล็ก ทำให้สามารถคำนวณหาอุณหภูมิในชั้นเวลาถัดไปที่จุดต่อนี้ได้

เมื่อทราบถึงอุณหภูมิจุดต่อบริเวณผิวภายในเป่ารับน้ำเหล็กก็สามารถคำนวณการนำความร้อนเข้าไปในผนังเป่ารับน้ำเหล็กเพื่อหาอุณหภูมิที่ชั้นเวลาถัดไปของจุดต่อต่างๆภายในเป่ารับน้ำเหล็กได้จนถึงจุดต่อบริเวณผิวภายนอกเป่ารับน้ำเหล็ก

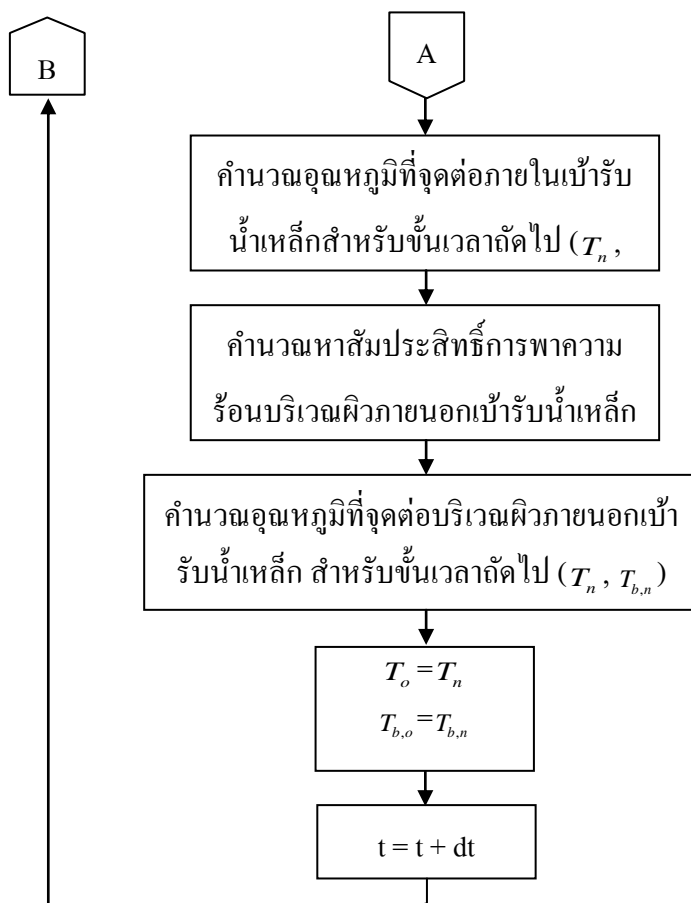
เนื่องจากจุดต่อบริเวณผิวภายนอกนี้สัมผัสกับอากาศภายนอกซึ่งจะมีการถ่ายเทความร้อนผ่านการพาความร้อนแบบธรรมชาติจึงต้องคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนบริเวณผิวภายนอกเป่ารับน้ำเหล็กก่อนคำนวณหาอุณหภูมิที่จุดต่อบริเวณผิวภายนอกเป่ารับน้ำเหล็ก

เมื่อได้อุณหภูมิทุกจุดต่อภายในผนังและผนังกันเป่ารับน้ำเหล็กในชั้นเวลาถัดไป เพื่อการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในชั้นเวลาถัดไป อุณหภูมิที่จุดต่อต่างๆในชั้นเวลาถัดไปจะต้องกลายเป็นอุณหภูมิจุดต่อต่างๆในชั้นเวลาถัดไป เพื่อใช้คำนวณหาอุณหภูมิจุดต่อที่ชั้นเวลาถัดๆไปต่อไป จึงต้องมีการถ่ายค่าอุณหภูมิของจุดต่อในชั้นเวลาถัดไป ให้กลายเป็นอุณหภูมิของจุด

ต่อในขั้นเวลานี้ แล้วเพิ่มเวลาที่พิจารณาไปอีกหนึ่งขั้นเวลา ก่อนที่ตัวปฏิบัติการนี้จะวนกลับไปพิจารณาว่า เวลาที่พิจารณานั้นเลยเกินเวลาที่ใช้ในการอุ่นแล้วหรือไม่ หากเลยเวลาที่ใช้ในการอุ่นออกไปแล้วจะเป็นอันสิ้นสุดกระบวนการทำงานของตัวปฏิบัติการนี้ แต่หากเวลาที่พิจารณายังไม่เลยเวลาในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก ตัวปฏิบัติการก็จะวนรอบการทำงานตามขั้นเวลาไปเรื่อยๆจนครบตามเวลาที่กำหนดไว้



รูปที่ 6-11 แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก”



รูปที่ 6-11 แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก” (ต่อ)

6.3.3 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การพักเข้ารับน้ำเหล็ก”

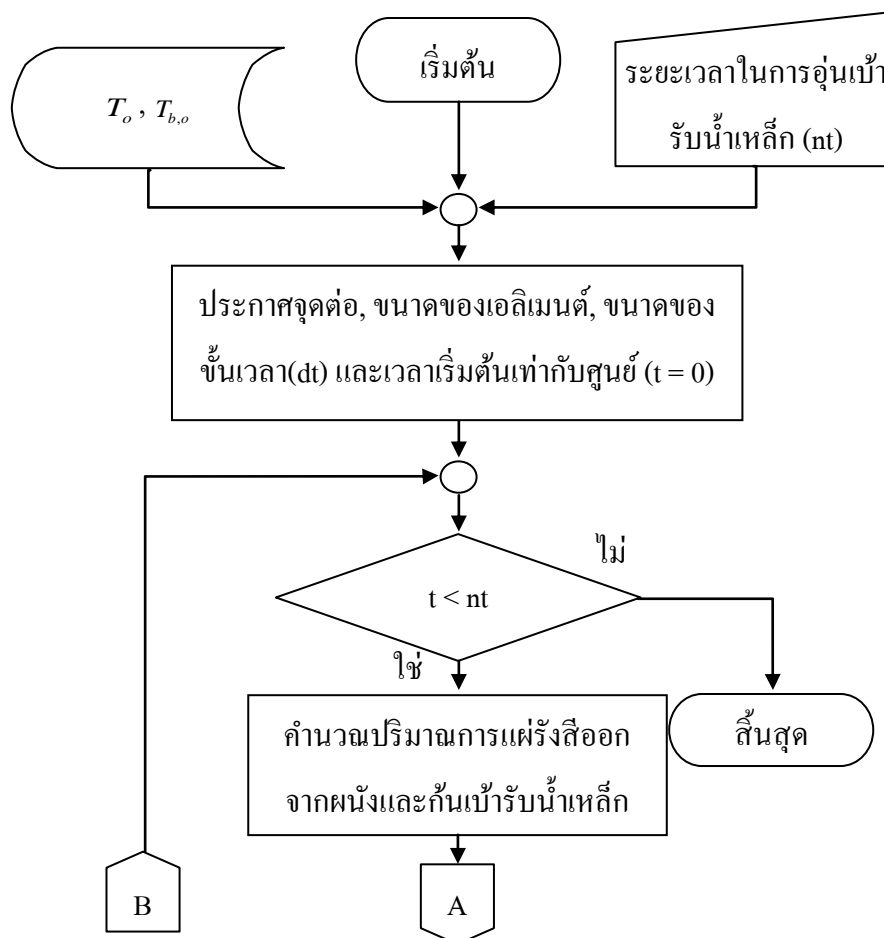
ในหัวข้อที่ 6.3.1 จะเห็นว่าการเรียกใช้ตัวปฏิบัติการ “การพักเข้ารับน้ำเหล็ก” ได้สูงสุดถึงสองครั้งในรอบการจำลอง คือ “การพักเข้ารับน้ำเหล็ก ครั้งที่ 1” และ “การพักเข้ารับน้ำเหล็ก ครั้งที่ 2” ซึ่งการพักเข้ารับน้ำเหล็กทั้ง 2 ครั้งที่กล่าวถึงนั้นมีลักษณะการปฏิบัติการเช่นเดียวกัน ซึ่งการปฏิบัติงานมีลำดับขั้นตอนดังปรากฏในรูปที่ 6 – 12 โดยมีลำดับรายละเอียดขั้นตอนการทำงานของตัวปฏิบัติการนี้ดังอธิบายต่อไป

ตัวปฏิบัติการนี้จะเริ่มต้นลักษณะเช่นเดียวกับตัวปฏิบัติการ “การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก” คือรับค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังและผนังกันเข้ารับน้ำเหล็กจากที่บันทึกไว้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ

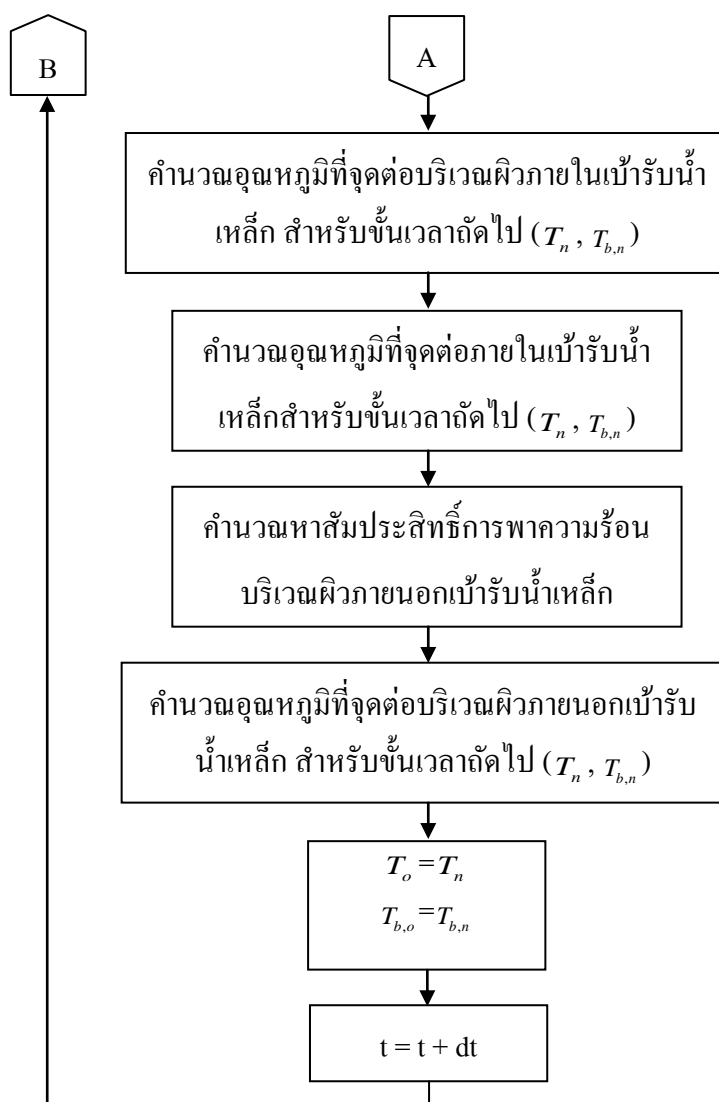
ก่อนหน้า และระยะเวลาในการพักเบียร์น้ำเหล็กจากผู้ใช้งาน แล้วจึงกำหนดตัวแปรต่างๆที่สำคัญ สำหรับการคำนวณก่อนที่จะเข้าสู่ขั้นตอนการทำซ้ำ

โดยเริ่มจากการพิจารณาว่าเวลาในการพิจารณานั้นเลยระยะเวลาในการพักเบียร์น้ำเหล็กแล้วหรือไม่ หากยังไม่เลยระยะเวลาในการพักเบียร์น้ำเหล็กโปรแกรมจะทำการคำนวณเพื่อหาอุณหภูมิในชั้นเวลาถัดไป โดยเริ่มจากการคำนวณหาปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากผนังและผนังกันเบียร์น้ำเหล็กตามแบบจำลองที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อใช้ในการคำนวณอุณหภูมิของชั้นเวลาถัดไปของจุดต่อบริเวณผิวภายในเบียร์น้ำเหล็ก และคำนวณหาอุณหภูมิของชั้นเวลาถัดไปของจุดต่อภายในผนังและที่ผิวภายนอกเบียร์น้ำเหล็กเช่นเดียวกันกับในหัวข้อที่ 6.3.1

เมื่อได้อุณหภูมิทุกจุดต่อในเบียร์น้ำเหล็กแล้วเพื่อข้ามไปทำการคำนวณในชั้นเวลาถัดไป อุณหภูมิในชั้นเวลาถัดไปที่คำนวณได้จะถูกถ่ายค่าเป็นอุณหภูมิในชั้นเวลาที่พิจารณา และเข้าสู่การคำนวณในชั้นเวลาถัดไปต่อไป



รูปที่ 6-12 แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การพักเบียร์น้ำเหล็ก”



รูปที่ 6-12 แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การพักเข้รับน้ำเหล็ก” (ต่อ)

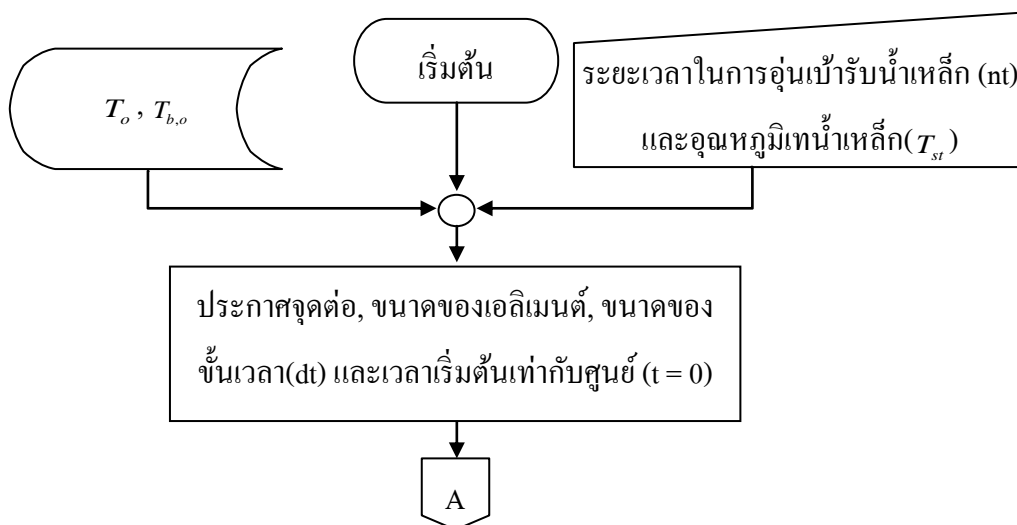
6.3.4 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การขนถ่ายน้ำเหล็ก”

ขั้นตอนการขนถ่ายน้ำเหล็กนั้นจะมีความซับซ้อนขึ้นกว่าขั้นตอนการอุ่นเข้รับน้ำเหล็ก และการพักเข้รับน้ำเหล็กเล็กน้อยเนื่องจากการแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กอยู่ตลอดเวลาที่พิจารณา ซึ่งลำดับขั้นตอนการทำงานของตัวปฏิบัติการ “การขนถ่ายน้ำเหล็ก” ที่ได้ออกแบบนั้นมีลักษณะการทำงานตามแผนภูมิสายงานในรูปที่ 6 – 13 ลักษณะในขณะเริ่มต้นตัวปฏิบัติการนี้จะแตกต่างกับกระบวนการอื่นๆก่อนหน้านี้เล็กน้อยคือ ในการรับข้อมูลเข้ามาทำการคำนวณ จะมีการรับค่าอุณหภูมิที่น้ำเหล็กจากผู้ปฏิบัติงานเข้ามาด้วยแต่ค่าตัวแปรอื่นก่อนหน้านี้ที่อันได้แก่ค่าการแจก

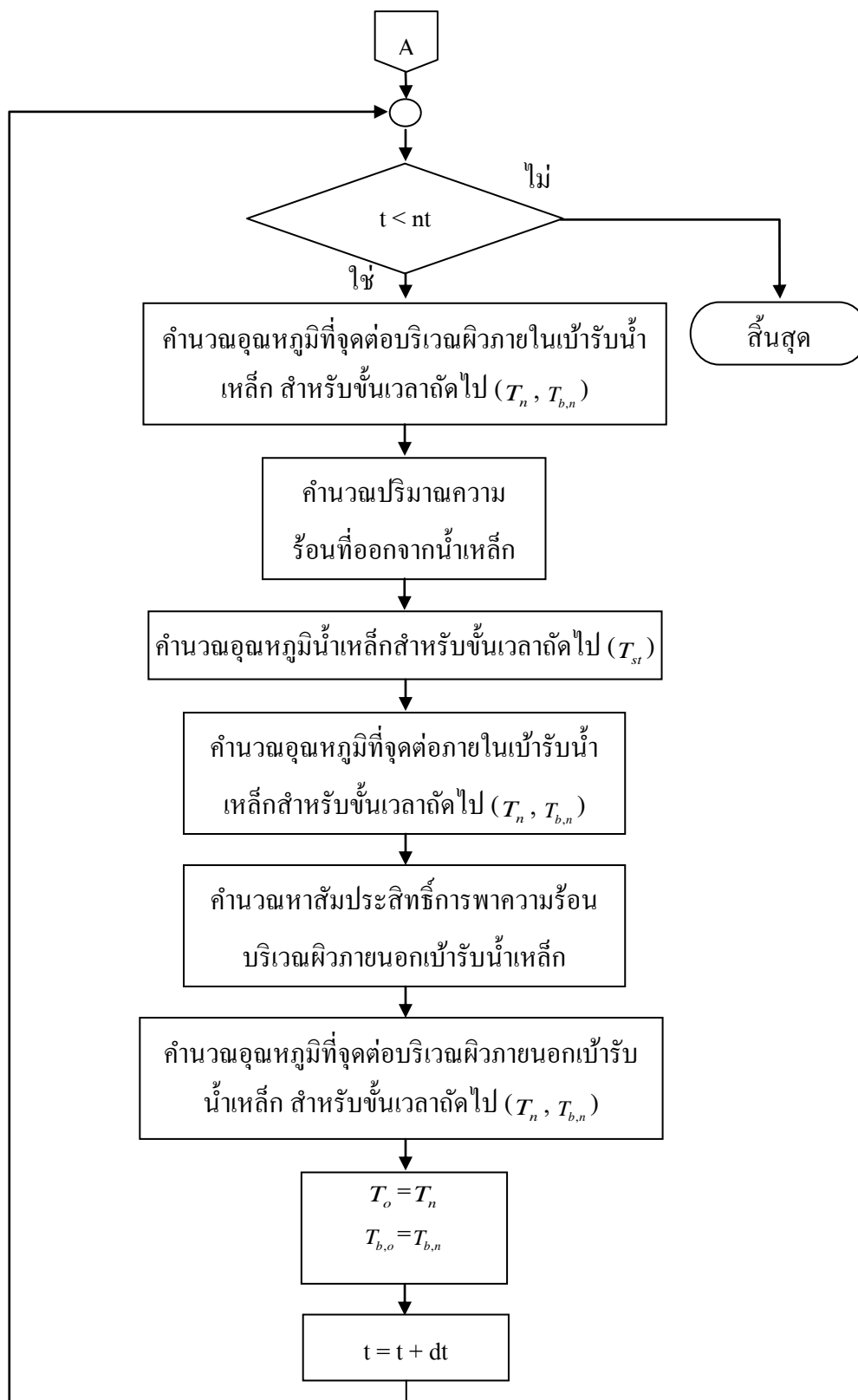
แจ้งอุณหภูมิภายในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะใช้ผลจากการจำลองในกระบวนการก่อนหน้านี้มาใช้ และค่าระยะเวลาในการขนถ่ายน้ำเหล็กจากผู้ใช้งานโปรแกรม แล้วจึงประกาศตัวแปรที่สำคัญสำหรับการคำนวณ และพิจารณาว่าเวลาที่พิจารณานั้นอยู่ในระยะที่มีการขนถ่ายน้ำเหล็กหรือไม่ หากยังอยู่ในระยะที่มีการขนถ่าย อุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่รับมาจะถูกนำมาใช้พิจารณาคำนวณหาอุณหภูมิที่จุดต่อบริเวณผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในชั้นเวลาถัดไปซึ่งจะมีการถ่ายเทความร้อนผ่านการพาความร้อนจากน้ำเหล็กสู่ผิวภายใน เมื่อได้อุณหภูมิจุดต่อที่ผิวเบ้ารับน้ำเหล็กแล้วจะต้องไปคำนวณหาปริมาณความร้อนที่สูญเสียออกจากน้ำเหล็กเพื่อที่จะใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิน้ำเหล็กในชั้นเวลาถัดไป

ต่อไปจึงมีการคำนวณหาอุณหภูมิที่ชั้นเวลาถัดไปของจุดต่ออื่นๆภายในและผิวภายนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กดังโดยลำดับเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 6.3.2 และ 6.3.3 ที่ผ่านมา

เมื่อทราบอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ชั้นเวลาถัดไปครบทุกจุดต่อแล้วก่อนการคำนวณหาอุณหภูมิจุดต่อในชั้นเวลาถัดไปก็ต้องถ่ายค่าจากชั้นเวลาถัดไปให้กลายเป็นอุณหภูมิที่ชั้นเวลาที่พิจารณาเช่นเดิมแล้วเพิ่มเวลาที่พิจารณาขึ้น 1 ชั้นเวลาก่อนวนกลับไปพิจารณาว่าเวลาที่พิจารณายังคงอยู่ในระยะเวลาในการขนถ่ายหรือไม่ หากยังคงอยู่ในระยะเวลานั้นก็เริ่มการคำนวณเช่นเดิมอีกรอบ เป็นเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าเวลาที่พิจารณาจะมากกว่าเวลาในการขนถ่ายน้ำเหล็กตัวปฏิบัติการ จึงจะสิ้นสุดการทำงานและส่งค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อใช้คำนวณในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 6-13 แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การขนถ่ายน้ำเหล็ก”



รูปที่ 6-13 แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การขนถ่ายน้ำเหล็ก” (ต่อ)

6.3.5 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก”

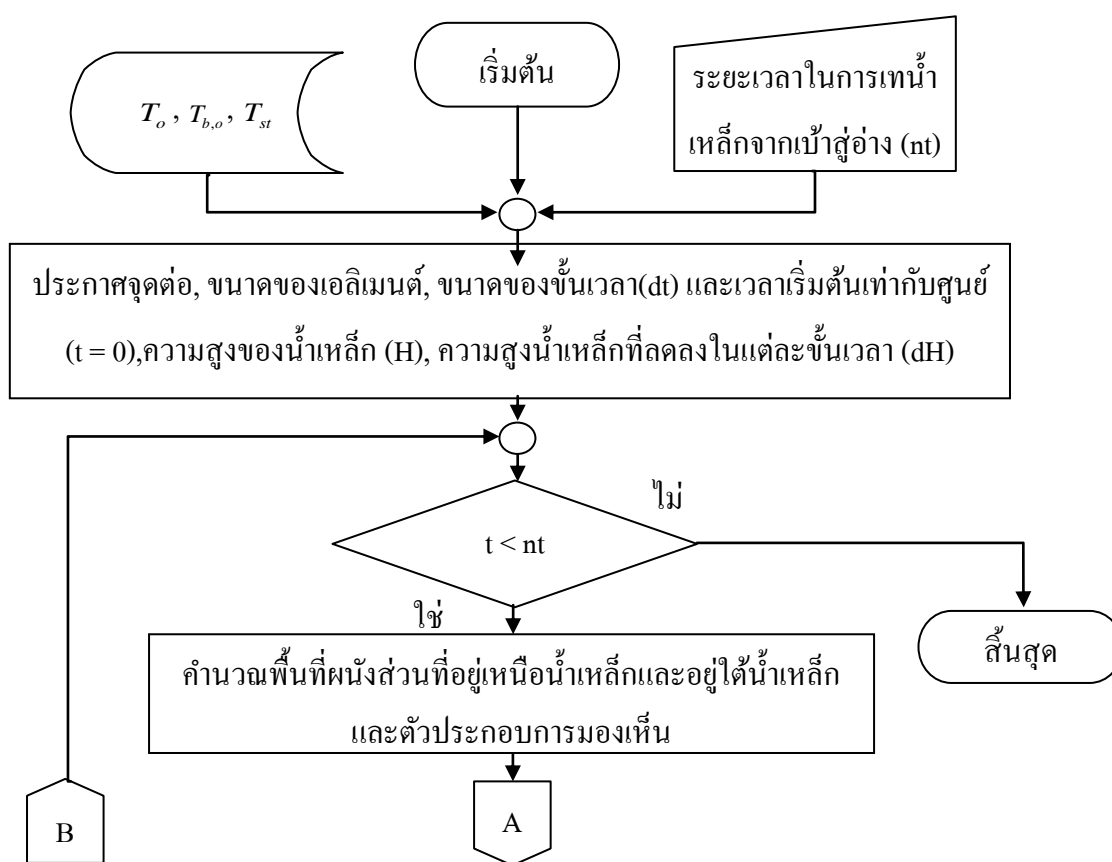
เนื่องจากการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กนั้น โดยพื้นฐานแล้วแบบจำลองที่นำมาใช้อธิบายนั้นมีความซับซ้อนมากกว่าแบบจำลองอื่นๆ เนื่องจากมีการแบ่งช่วงเวลาในการพิจารณาลักษณะการทำงานของตัวปฏิบัติการนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 6 – 14 โดยลำดับการทำงานจะเริ่มจากการรับข้อมูลการแจกแจงอุณหภูมิน้ำเหล็กในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก และอุณหภูมิน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดในกระบวนการขนถ่าย จากหน่วยความจำ และรับค่าระยะเวลาในการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก แล้วประกาศตัวแปรที่สำคัญก่อนเข้าสู่การพิจารณาวนซ้ำ

ตัวปฏิบัติการจะเริ่มพิจารณาว่าเวลาที่ใช้ในการพิจารณาเกินเลขระยะเวลาในการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กหรือไม่ หากยังคงอยู่ในระยะเวลานี้ โปรแกรมจึงจะเริ่มคำนวณพื้นที่ผนังส่วนที่อยู่เหนือน้ำเหล็กและอยู่ใต้น้ำเหล็ก และนำไปใช้ในการคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็นต่อไป

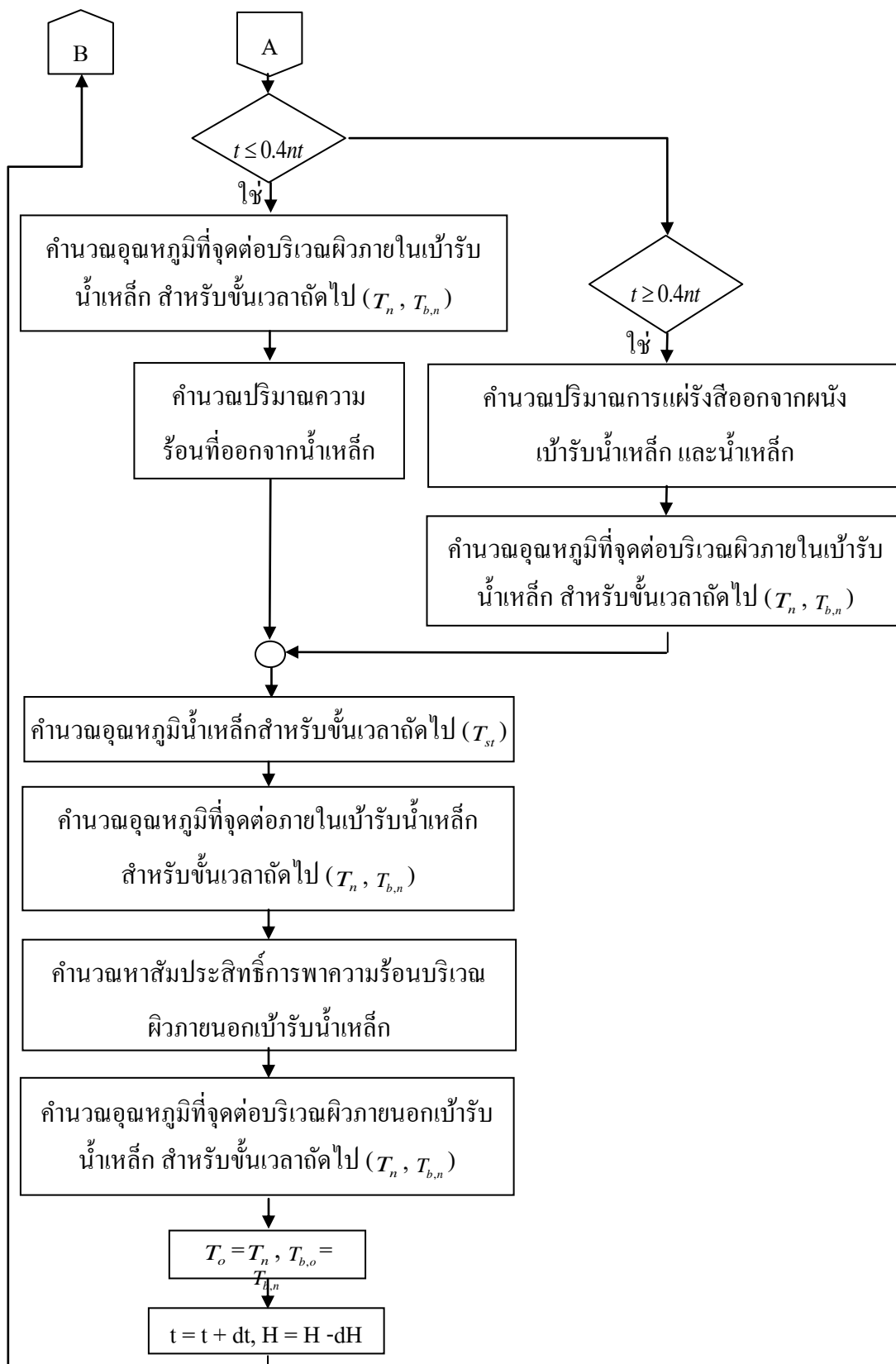
หลังจากนั้นแล้วจึงพิจารณาว่าเวลาที่พิจารณาน้อยกว่าร้อยละ 40 ของเวลาในการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กนี้หรือไม่ หากน้อยกว่าโปรแกรมจะเริ่มคำนวณอุณหภูมิจุดต่อบริเวณผิวภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในลักษณะเช่นเดียวกับการขนถ่ายน้ำเหล็กในหัวข้อ 6.3.4 แล้วจึงคำนวณปริมาณความร้อนที่ออกจากน้ำเหล็กในรูปแบบต่างๆ แต่ในกรณีที่เวลาที่พิจารณา มากกว่าร้อยละ 40 ของเวลาในการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ตามแบบจำลองผนังเบ้ารับน้ำเหล็กต้องได้รับการแผ่รังสีจากผิวแสดก ทำให้ต้องคำนวณปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก และผิวน้ำเหล็ก เมื่อทราบปริมาณรังสีความร้อนที่ถ่ายเทเข้าออกจากผิวภายในของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กทั้ง 2 กรณีแล้ว ปริมาณความร้อนที่เข้าออกจากผิวภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะนำมาใช้ในการคำนวณอุณหภูมิน้ำเหล็กและอุณหภูมิจุดต่อบริเวณผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็กสำหรับขั้นเวลาถัดไป

ส่วนขั้นตอนอื่นๆต่อมาเป็นการคำนวณหาอุณหภูมิจุดต่อภายในและที่ผิวของเบ้ารับน้ำเหล็กในขั้นเวลาถัดไป และถ่ายอุณหภูมิจุดต่อเหล่านั้นจากขั้นเวลาถัดไปให้กลายเป็นขั้นเวลาที่พิจารณา แล้วจึงเพิ่มขั้นเวลาอีกหนึ่งขั้น รายละเอียดของการทำงานส่วนนี้จะเหมือนเช่นกับหัวข้ออื่นก่อนหน้า ในที่นี้จึงจะละการอธิบายส่วนนี้ไว้ แต่จะมีเพียงการปรับลดระดับความสูงของน้ำเหล็กสำหรับขั้นเวลาถัดไปเพิ่มเข้ามา

เมื่อเพิ่มชั้นเวลาแล้วชั้นเวลาที่พิจารณาจะถูกพิจารณาอีกว่าเลยระยะเวลาในการเทน้ำเหล็กจากเขารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กหรือไม่ หากชั้นเวลาที่พิจารณานั้นยังไม่เลยระยะเวลาในการปฏิบัติงานระบบจะทำการคำนวณซ้ำอีกรอบและปรับชั้นเวลาที่พิจารณาขึ้นอีกหนึ่งชั้นเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนเลยระยะเวลาในการเทน้ำเหล็กจากเขารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ตัวปฏิบัติการจึงจะหยุดทำงาน โดยส่งการแจกแจงอุณหภูมิในเขารับน้ำเหล็กและอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหลือออกจากตัวปฏิบัติการเพื่อใช้พิจารณาชั้นต่อไป



รูปที่ 6 – 14 แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การเทน้ำเหล็กจากเขารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก”

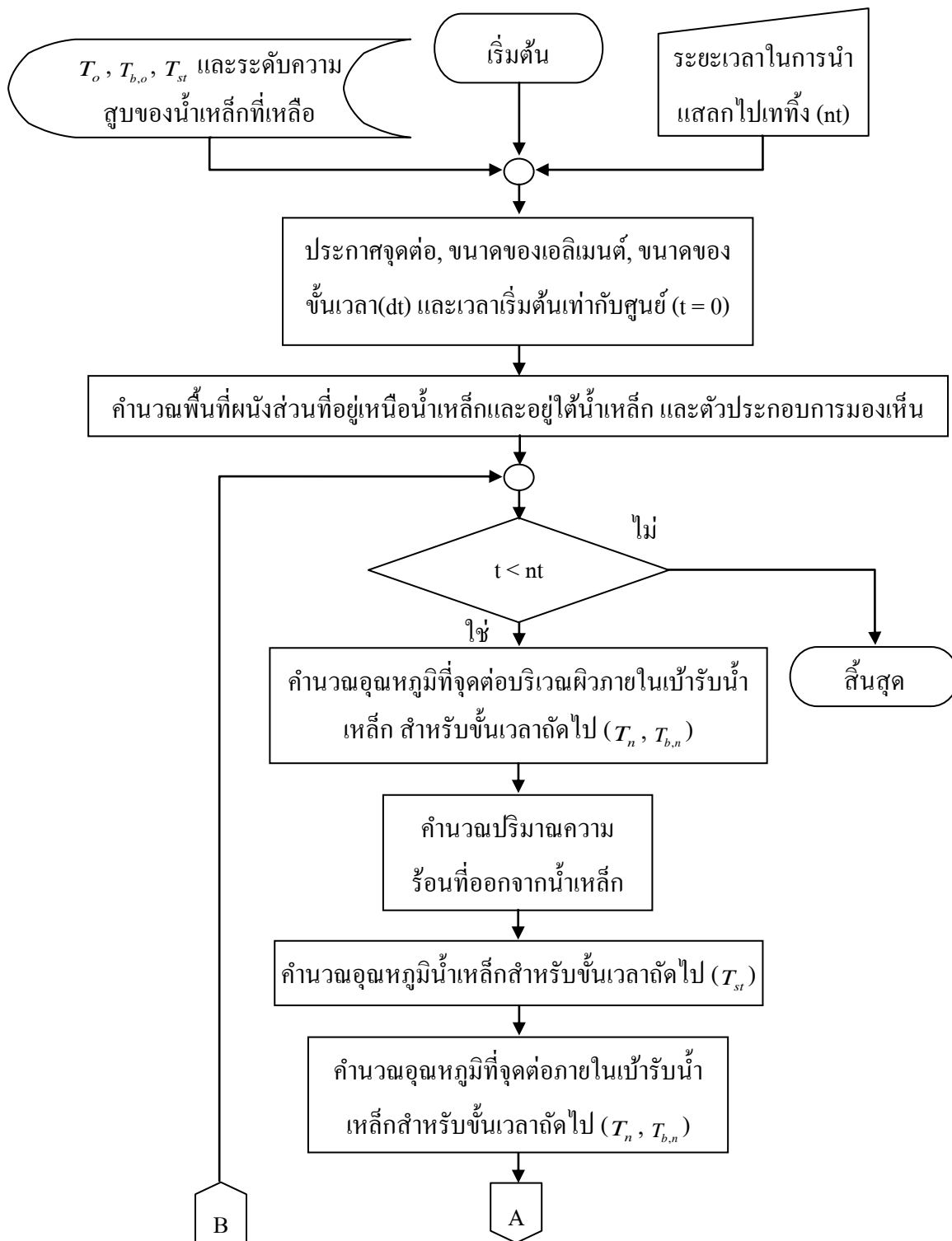


รูปที่ 6 - 14 แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ“การเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก”(ต่อ)

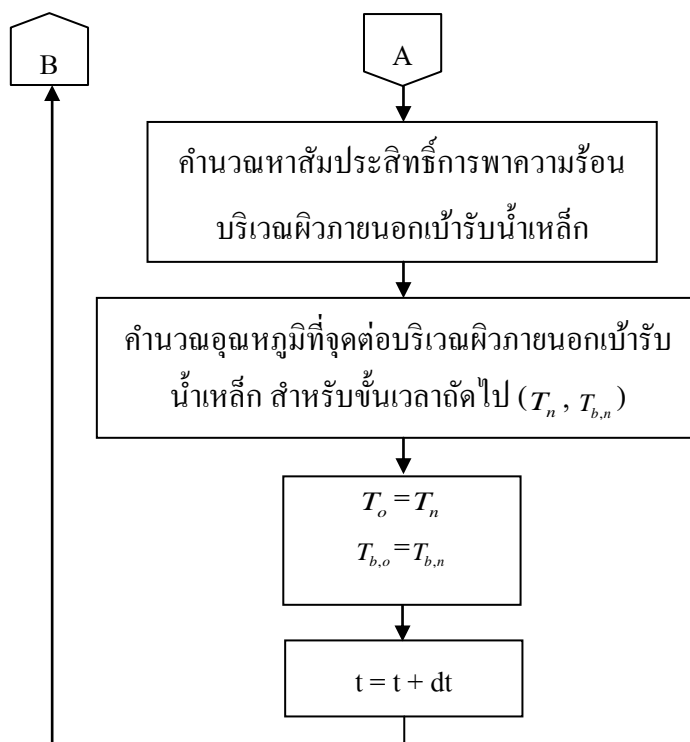
6.3.6 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การขนย้ายแสลกลงไปเททิ้ง”

ช่วงการขนย้ายแสลกลงไปเททิ้งจะมีลักษณะการทำงานของกระบวนการคล้ายกับขั้นตอนการเทน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กในกรณีที่ขึ้นเวลาที่พิจารณามากกว่าร้อยละ 40 ของระยะเวลาในการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก แต่ในขั้นตอนนี้จะไม่มีการลดลงของระดับน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งจะสามารถแสดงลักษณะการทำงานได้ดังแผนภูมิสายงานในรูปที่ 6 – 15

โดยในกระบวนการนี้ตัวปฏิบัติการจะต้องรับค่าที่บันทึกไว้ในหน่วยความจำอัน ได้แก่ การแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก อุณหภูมิน้ำเหล็กและระดับความสูงของน้ำเหล็กที่เหลือจากขั้นตอนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก และรับค่าระยะเวลาในการนำแสลกลงไปเททิ้งจากผู้ปฏิบัติงาน หลังจากนั้นจึงประกาศตัวแปรที่สำคัญดังเช่นกระบวนการอื่นๆ แล้วจึงคำนวณหาพื้นที่ผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กส่วนที่อยู่เหนือน้ำเหล็กและส่วนที่อยู่ใต้น้ำเหล็ก และนำไปคำนวณหาตัวประกอบการมองเห็นต่อไปก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการวนซ้ำ โดยพิจารณาว่าขึ้นเวลาที่พิจารณาอยู่นั้นเลยระยะเวลาในการขนย้ายแสลกลงไปเททิ้งอยู่หรือไม่ หากยังไม่เลย โปรแกรมจะคำนวณหาอุณหภูมิที่จุดต่อบริเวณผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ขึ้นเวลาถัดไป แล้วจึงจะคำนวณปริมาณความร้อนที่ออกจากน้ำเหล็กเพื่อใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหลืออยู่ในชั้นเวลาถัดไป ก่อนที่จะคำนวณหาอุณหภูมิจุดต่อส่วนอื่นๆซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับขั้นตอนอื่นๆ ถ้ายค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจากชั้นเวลาถัดไปให้กลายเป็นชั้นที่พิจารณาแล้วเพิ่มชั้นเวลา เมื่อถึงขั้นตอนนี้ก็จะเข้ามาประเมินชั้นเวลาใหม่ว่าเลยระยะเวลาในการขนถ่ายน้ำเหล็กแล้วหรือไม่ หากยังไม่เลยระยะเวลาดังกล่าวระบบจะทำการคำนวณซ้ำไปเรื่อยๆจนเลยเวลา แล้วส่งค่าการแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังออกจากตัวปฏิบัติการเพื่อใช้ในการคำนวณขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 6-15 แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การย้ายแสลคไปเททิ้ง”



รูปที่ 6-15 แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การย้ายแสดงไปเททิ้ง” (ต่อ)

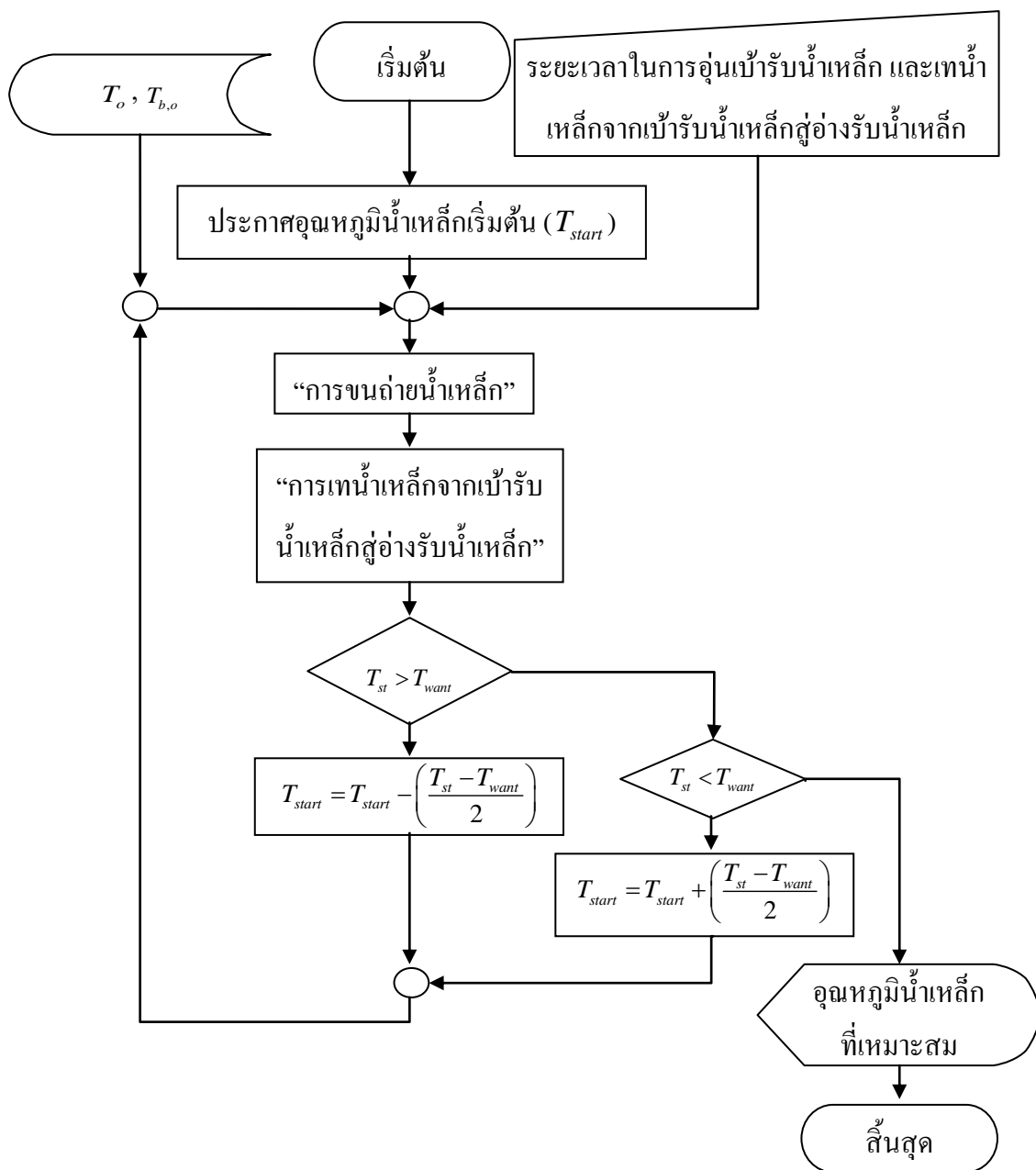
6.3.7 การออกแบบตัวปฏิบัติการ “การทำนายอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม”

จุดมุ่งหมายที่สำคัญของการสร้างระบบควบคุมคือเพื่อใช้หาค่าอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมสำหรับการเท เพื่อให้การใช้พลังงานในการหลอมเป็นไปอย่างเหมาะสม ตัวปฏิบัติการนี้จึงถูกออกแบบเพื่อคำนวณหาอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมนั้น ซึ่งในการออกแบบนี้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทราบได้ถึงการแจกแจงอุณหภูมิในเข้รับน้ำเหล็กซึ่งจะถูกใช้เป็นเงื่อนไขในการพิจารณาอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม ส่วนอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำเหล็กที่ออกจากเข้รับน้ำเหล็กจะใช้เป็นเป้าหมายในการกำหนดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม

ดังนั้นสถานะทางความร้อนของเข้รับน้ำเหล็กก่อนรับน้ำเหล็กจะเป็นตัวแปรที่ทราบค่าและอุณหภูมิสุดท้ายที่ออกจากเข้รับน้ำเหล็กจะถูกกำหนดทำให้เป็นตัวแปรที่ทราบค่าเช่นกัน ดังนั้นจากการวิเคราะห์ในกระบวนการตามสมการที่ (4.1) เมื่อมีระเบียบวิธีการตามกระบวนการตัวปฏิบัติการในหัวข้อที่ 6.3.4 และ 6.3.5 เมื่อแทนค่าอุณหภูมิเทน้ำเหล็กลงไปคำนวณควบคู่กับสถานะทางความร้อนของเข้รับน้ำเหล็กแล้วเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่ต้องการจะสามารถนำมาใช้ปรับเพิ่มหรือลดค่าอุณหภูมิเท

น้ำเหล็กจนได้อุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กตามที่ต้องการได้โดยลักษณะการทำงานสามารถอธิบายได้ตามแผนภูมิสายงานในรูปที่ 6 – 16

โดยเมื่อเริ่มต้นการทำงานของตัวปฏิบัติการนี้ จะประกาศอุณหภูมิเทน้ำเหล็กสำหรับเริ่มต้นการคำนวณ และรับค่าการแจกแจงอุณหภูมิในผนังและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กจากหน่วยความจำที่คำนวณได้จากกระบวนการก่อนหน้า และระยะเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กและเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กมาคำนวณในตัวปฏิบัติการ “การขนถ่ายน้ำเหล็ก” และ “การเทน้ำเหล็กจำเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก” ตามลำดับ แล้วเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการ หากอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายมากกว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ต้องการ อุณหภูมิเทน้ำเหล็กจะถูกลดลงด้วยครึ่งหนึ่งของผลต่างของอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่คำนวณได้กับที่ต้องการ ในทางตรงกันข้ามหากอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายน้อยกว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ต้องการอุณหภูมิเทน้ำเหล็กจะถูกบวกเพิ่มด้วยครึ่งหนึ่งของผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่คำนวณได้กับที่ต้องการ แล้วเริ่มการคำนวณใหม่แล้วปรับแก้อุณหภูมิเทน้ำเหล็กเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนกว่าอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำเหล็กที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กจากการคำนวณและที่ต้องการใกล้เคียงกันมาก ตัวปฏิบัติการจึงจะนำอุณหภูมิเทน้ำเหล็กนั้นแสดงผลออกทางจอภาพให้ผู้ปฏิบัติงานรับทราบอุณหภูมิดังกล่าว และนำไปควบคุมการหลอมในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า



รูปที่ 6-16 แผนภูมิสายงานตัวปฏิบัติการ “การทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสม”

บทที่ 7

ผลการศึกษาวิจัย และการวิเคราะห์ผล

เป้าหมายของการสร้างระบบควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กร่วมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า นั้น สิ่งที่สำคัญที่สุดคือการทำนายสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กในกระบวนการว่ามีความเหมาะสม สำหรับการส่งน้ำเหล็กเหล่านั้นไปยังกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องต่อไปหรือไม่ ดังนั้นเพื่อให้มีความมั่นใจว่าสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กนั้นมีความเหมาะสมเพียงใด สภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กนั้นควรที่จะได้รับการติดตาม แต่ปัญหาของการติดตามสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากน้ำเหล็กจะถูกขนถ่ายไปยังสถานที่ต่างๆ ทำให้ยากแก่การติดตาม นอกจากนั้นแล้วอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่สูงมากทำให้การตรวจวัดโดยตรงกระทำไม่ได้โดยยาก

เพื่อทราบถึงสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็ก ในการศึกษาครั้งนี้จึงพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็ก และเบ้ารับน้ำเหล็ก เนื่องจากทั้งสองส่วนต่างก็สัมผัสกัน ตลอดทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนให้แก่กันอยู่ตลอดเวลา ด้วยความสัมพันธ์ของสภาวะทางความร้อนระหว่างน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กทำให้สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กผ่านสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กได้

การศึกษานี้จึงมีแนวคิดที่จะติดตามสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อใช้ในการทำนายสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็ก โดยการติดตามสภาวะทางความร้อนนั้นจะสามารถติดตามได้ผ่านการคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้การคำนวณตามระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องดังที่ได้กล่าวในบทอื่นๆก่อนหน้านี้ แต่ในการทำนายสภาวะทางความร้อนผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต้องอาศัยการสอบเทียบจากการตรวจวัดเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทำนายและเหมาะสำหรับการนำแบบจำลองและวิธีการคำนวณไปสร้างเป็นระบบควบคุมต่อไป

ในบทนี้จึงจะแสดงผลการการจำลองตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และวิเคราะห์ถึงลักษณะความแตกต่างระหว่างแบบจำลองและผลการตรวจวัด รวมถึงข้อสันนิษฐานต่างๆ สำหรับการประเมินการจำลอง ผลการคาดคะเนความประหยัดที่สามารถเป็นไปได้

ได้ของรอบการทำงานต่างๆที่มีการตรวจวัด และลักษณะส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (Graphic User Interface) ของโปรแกรมควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น

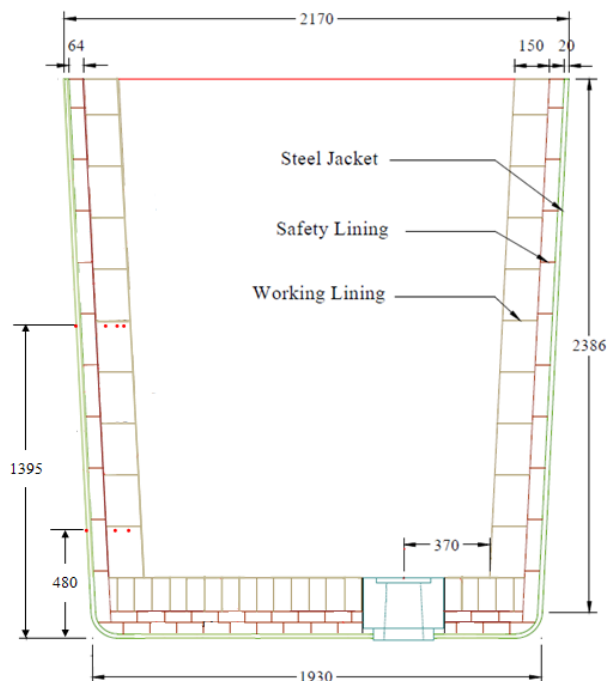
7.1 ผลการจำลองตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นได้แบ่งออกเป็นทั้งหมด 5 แบบจำลองตามกระบวนการทำงาน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะกิจกรรมที่เกิดขึ้นตามการวิเคราะห์และจำแนกในหัวข้อที่ 5.4 อันได้แก่

1. กระบวนการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็ก
2. กระบวนการพักเป่ารับน้ำเหล็กเปล่า
3. กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก
4. กระบวนการเทน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก
5. กระบวนการขนแสลงไปที่ทิ้ง

นอกจากนั้นยังมีการจำลองการแปรผันอุณหภูมิของน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กและกระบวนการเทน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก สภาวะทางความร้อนของเป่ารับน้ำเหล็กจะสัมพันธ์กับสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็ก ทำให้แบบจำลองระหว่างช่วงดังกล่าวต้องมีการจำลองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเหล็กภายในเป่าควบคู่กันไปด้วย ในหัวข้อนี้จึงจะนำเสนอผลการจำลองเปรียบเทียบกับการตรวจวัดและการวิเคราะห์ควบคู่กันไปในแต่ละกระบวนการ

ในการจำลองสภาวะทางความร้อนของเป่ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็กนั้นจะอาศัยขนาดของเป่ารับน้ำเหล็กดังแสดงในรูปที่ 7 – 1 และค่าสมบัติต่างๆดังแสดงในรูปที่ 7 – 1 โดยกำหนดให้อุณหภูมิของบรรยากาศ (T_a) ตลอดการจำลองมีอุณหภูมิคงที่ที่ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 7-1 ขนาดของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ทำการจำลอง

ตารางที่ 7-1 สมบัติต่างๆที่ใช้ในการคำนวณสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็ก

สมบัติ	รูปตัวแปร	ค่า	อ้างอิง
อิฐทนไฟ			
ค่าการนำความร้อน ($W/m \cdot K$)	k_{re}	2.0 – 2.2	[Material data sheet]
ความหนาแน่น (kg/m^3)	ρ_{re}	2750	[Material data sheet]
ค่าความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot K$)	$C_{p,re}$	700 – 1300	Fruehan et al. (1998)
ค่าการเปล่งรังสี	ϵ_{re}	0.9	ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น (2009)
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว ($W/m^2 \cdot K$)	h_{re}	25	ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น (2009)
เปลือกเหล็ก			
ค่าการนำความร้อน ($W/m \cdot K$)	k_{st}	45	ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น (2009)
ความหนาแน่น (kg/m^3)	ρ_{st}	7800	ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น (2009)
ค่าความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot K$)	$C_{p,st}$	784	Liu et al. (2007)
ค่าการเปล่งรังสี	ϵ_{re}	0.8	Fruehan et al. (1998)
ผิวแอสต			
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว ($W/m^2 \cdot K$)	h_{sl}	8	Egerton et al. (1979)
ค่าการเปล่งรังสี	ϵ_{re}	0.8	Fruehan et al. (1998)

สมบัติ	รูปตัวแปร	ค่า	อ้างอิง
น้ำเหล็ก			
ค่าความร้อนจำเพาะ ($J/kg \cdot K$)	$c_{p,ls}$	842	Fredman& Saxen(1997)
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว ($W/m^2 \cdot K$)	h_{ls}	500	ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น (2009)

7.1.1 ผลการจำลองระหว่างกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

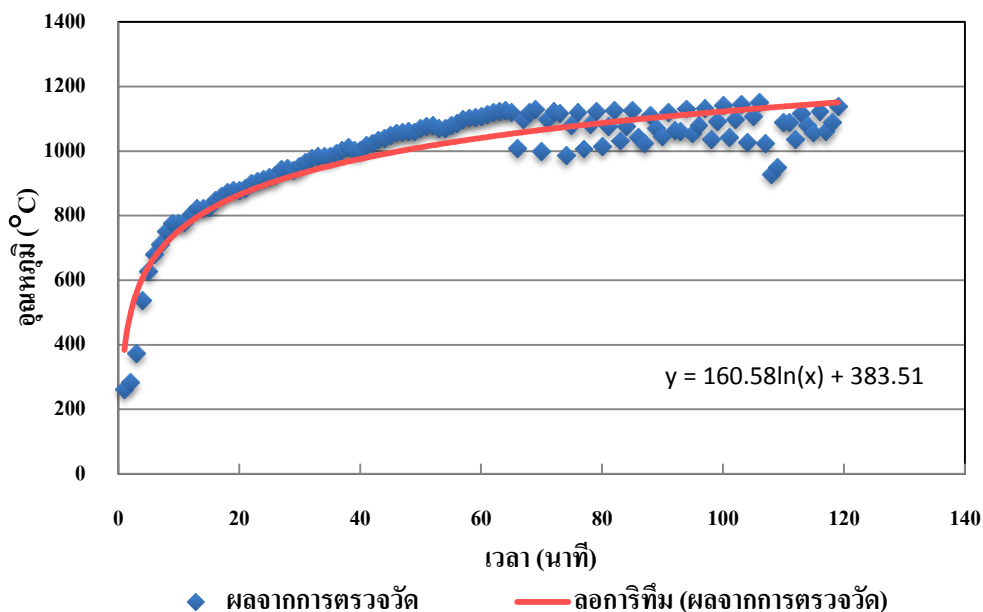
ช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กสามารถแบ่งได้ 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กที่ถูกอุ่นเป็นเบ้ารับน้ำเหล็กก่อใหม่ (Green Ladle) และเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Used Ladle) ซึ่งความแตกต่างระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กทั้ง 2 แบบนั้น คือ เบ้ารับน้ำเหล็กก่อใหม่จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศ (T_a) ตลอดทุกระดับความลึก แต่เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้ว อุณหภูมิเริ่มต้นกระบวนการจะมีลักษณะแปรผันตามแต่กิจกรรมก่อนหน้าการอุ่น ในหัวข้อนี้จะอธิบายเปรียบเทียบถึงลักษณะดังกล่าว

จากสมการที่ (6.38) ที่ใช้ในการอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่จุดต่อที่ผิวในแต่ชั้นเวลาจะต้องอาศัยอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ระหว่างการอุ่นและตัวประกอบการแผ่รังสีซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการประกอบที่ (4.14) ซึ่งค่าที่ใช้ประกอบการคำนวณดังตารางที่ 7 – 2

ส่วนค่าอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ระหว่างการอุ่นนั้นได้จากการทดลองของ จักรวาท จรุงยุทธกุล (2552) ในการทดลองหั่วเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ โดยข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดนั้นได้ถูกนำมาประกอบโค้งเป็นฟังก์ชันแปรผันตามเวลาดังรูปที่ 7 – 2

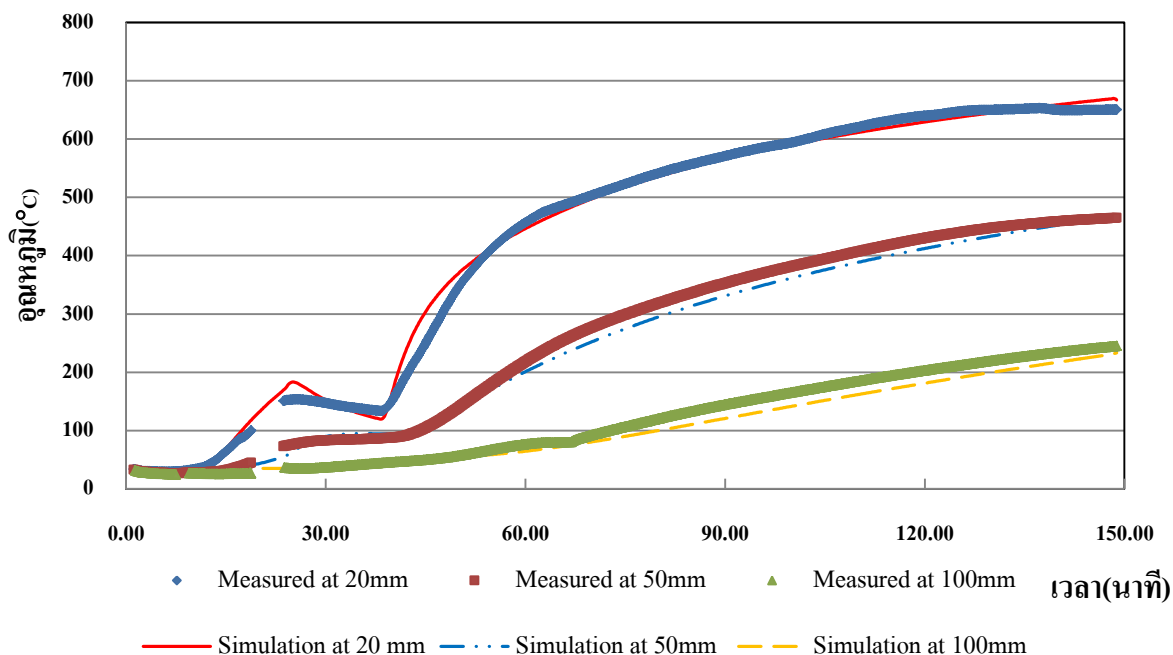
ตารางที่ 7-2 ค่าประกอบการคำนวณต่างๆในกรณีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ตัวแปร	ค่า	อ้างอิง
(A/F)	23	จักรวาท จรุงยุทธกุล (2009)
$(A/F)_{st}$	14.91	จักรวาท จรุงยุทธกุล (2009)



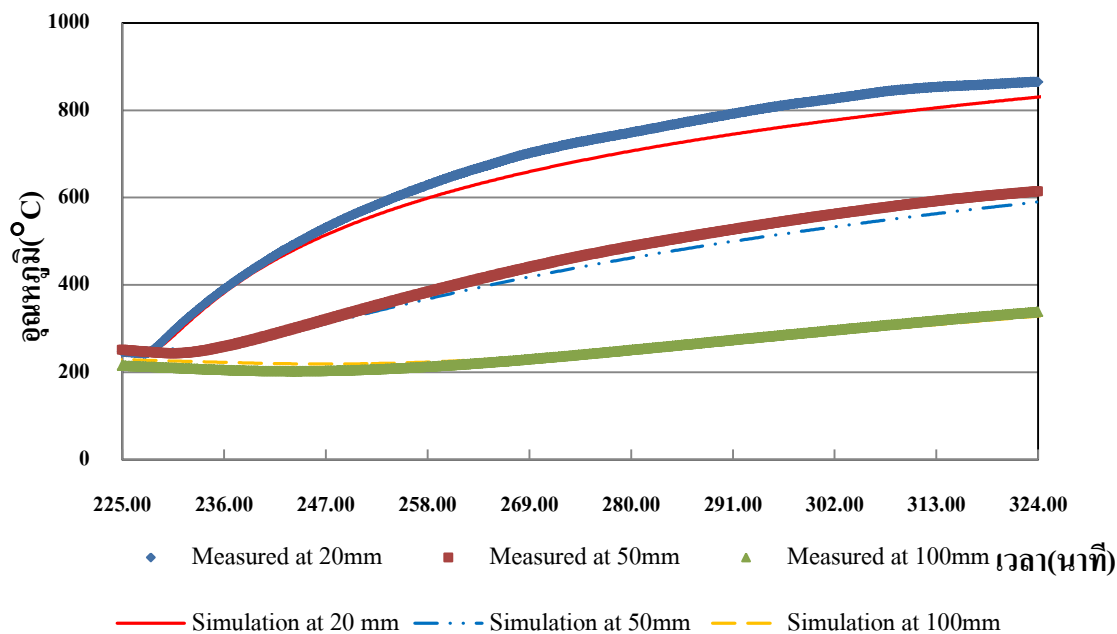
รูปที่ 7-2 ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในการคำนวณ

ผลจากการจำลองการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กก่อใหม่นั้นจะได้ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ระดับความลึกต่างๆ เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดการแปรผันอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 5 แสดงดังรูปที่ 7 – 2 คือช่วงระหว่างเวลานาทีที่ 0 -10 อุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าความเป็นจริง อันเป็นผลเนื่องจากการกำหนดอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่แสดงไว้ในรูปที่ 7 – 2 นั้นเป็นอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ได้จากการอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ ซึ่งผิดกับหัวเผาแบบตั้ง ต่อมาในเวลานาทีที่ 10 ถึงนาทีที่ 149 จากรูปที่ 7 – 3 จะเห็นถึงความไม่สม่ำเสมอของข้อมูลเกิดขึ้นระหว่างช่วงนาทีที่ 30 ถึงนาทีที่ 42 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเผาในหัวเผาดั้งของเบ้ารับน้ำเหล็กก่อใหม่นั้นดับในช่วงระหว่างนาทีที่ 30–42 นั่นเอง ซึ่งช่วงระหว่างที่เบ้ารับน้ำเหล็กดับนั้น ในการคำนวณได้ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในลักษณะที่เบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า และไม่มีการปิดฝาถัง ทำให้ลักษณะการลดลงของอุณหภูมิโดยเฉพาะที่ระยะความลึกที่ 20 มิลลิเมตรมีอุณหภูมิจากการจำลองตกลงด้วยอัตราที่สูงกว่าผลการตรวจวัด แต่เมื่อพิจารณาโดยภาพรวมแล้วลักษณะการแปรผันอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจากการจำลองได้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด



รูปที่ 7-3 การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กก่อใหม่ที่เวลาต่างๆ ระหว่างการอุ่นด้วยหัวเผาแบบเผาตั้ง เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล

ส่วนผลการจำลองในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนั้นมีการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 7-4 ซึ่งลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในรูปที่ 7-4 อยู่ระหว่างเวลานาทีที่ 225 ถึงนาทีที่ 324 จะเห็นถึงลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน แต่ที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตรจากผิวอุณหภูมิที่ได้จากการจำลองจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องมาจากอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ใช้ในการคำนวณนั้นเป็นฟังก์ชันที่ได้จากการตรวจวัดในการอุ่นด้วยหัวเผาแบบปริเจนเนอเรทีฟ แต่ผลการตรวจวัดได้ข้อมูลมาจากการเผาด้วยหัวเผาแบบธรรมดา ซึ่งหากจะได้อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่แตกต่างกัน ทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณเกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในขณะที่ระดับความลึกลงไปผนังจะปรากฏผลความคลาดเคลื่อนนี้ลดลงไปตามระดับความลึก เนื่องมาจากค่าการนำความร้อนของอิฐทนไฟที่ต่ำทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจุดที่ลึกเข้าไปในผนังมีการอุณหภูมิต่ำกว่าและช้ากว่าจุดที่อยู่สูงขึ้นไป

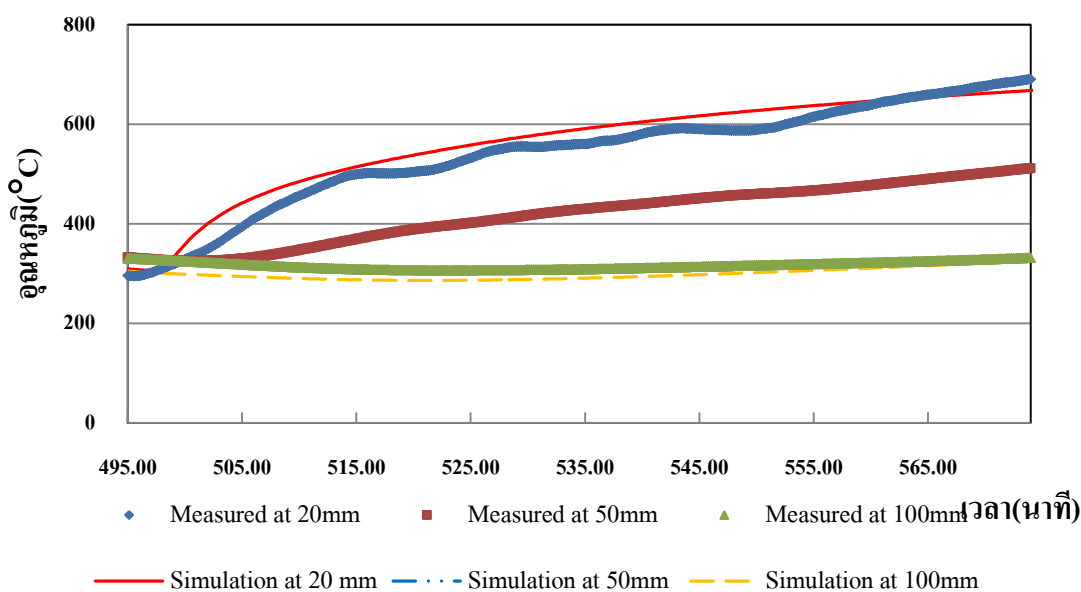


รูปที่ 7-4 การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้แล้วที่เวลาต่างๆ ระหว่างการอุ่นด้วยหัวเผาแบบธรรมดาเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล

โดยรวมแล้วในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้วจะมีค่าเริ่มต้นที่แตกต่างจากผลการทดลองอันเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของการคำนวณในกิจกรรมอื่นๆ ก่อนหน้าการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนี้ ซึ่งอาจส่งผลให้อุณหภูมิสิ้นสุดกระบวนการอุ่นนี้ผิดพลาดไปได้ สุดท้ายแล้วถึงแม้ฟังก์ชันอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ใช้ในการคำนวณจะไม่ใช่ฟังก์ชันที่ได้จากการอุ่นด้วยหัวเผาแบบธรรมดาในรูปที่ 7 – 4 แต่ก็ให้แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับผลที่ระดับความลึกต่างๆ เกือบกับผลการเก็บข้อมูล

นอกจากนั้นแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้ว โดยปกติจะถูกอุ่นด้วยหัวเผาแบบบริเจนเนอเรทีฟลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิจากการอุ่นด้วยหัวเผาแบบบริเจนเนอเรทีฟจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งการเปรียบเทียบการจำลองการอุ่นด้วยหัวเผาแบบบริเจนเนอเรทีฟ และผลที่ได้จากการตรวจวัดระหว่างเวลานาทีที่ 495 ถึงนาทีที่ 574 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 7 – 5 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า ระหว่างการอุ่นหัวเผาแบบบริเจนเนอเรทีฟนั้นการแปรผันอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตรจะมีการปรากฏความไม่สม่ำเสมอของการเพิ่มของอุณหภูมิเมื่ออุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำอุณหภูมิสูงขึ้น โดยลักษณะความไม่สม่ำเสมอจะปรากฏในรูปของอัตราการเพิ่มอุณหภูมิที่ตำแหน่งดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจากการสังเกตจะเห็นถึงลักษณะอัตราการเพิ่มขึ้น

ของอุณหภูมิมีการสั่นเพิ่มขึ้นและลดลงเป็นคาบ คาบละ 12 – 15 นาที ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับการสั่นของอุณหภูมิไอเสียในรูปที่ 7 – 5 อันเป็นลักษณะการควบคุมของหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟที่จะสั่งให้หัวเผาหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ภายในสูงถึง 1100°C และเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงถึงอุณหภูมิประมาณ 1000°C หัวเผาจะเริ่มทำงานอีกครั้งทำให้อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้เพิ่มขึ้นลดลงตลอด ซึ่งตามสมการที่ (4.14) ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ผิวจะขึ้นกับอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ เมื่อปริมาณความร้อนที่เข้าสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไม่มีปริมาณที่สม่ำเสมอ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจึงเพิ่มขึ้นในอัตราที่ไม่คงที่ แต่ผลจากการจำลองจะได้ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่สม่ำเสมอเนื่องจากฟังก์ชันอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่ใช้ในการคำนวณได้มาจากการประกบโค้งให้เข้ากับข้อมูลจึงมีลักษณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ต่อเนื่อง เมื่อนำอุณหภูมิเผาไหม้นั้นไปคำนวณการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจึงได้ลักษณะการเพิ่มขึ้นที่มีความต่อเนื่อง



รูปที่ 7-5 การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้แล้วที่เวลาต่างๆ ระหว่างการอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล

จากรูปที่ 7 – 5 นั้นแสดงผลให้เห็นว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กขณะที่ถูกอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟนั้น ถึงแม้ลักษณะอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้จากฟังก์ชันการแปรผันอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ได้จากการประกบโค้งและอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ของจริง

ในเบ้ารับน้ำเหล็กจะแตกต่างกันบ้าง แต่โดยลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน

สรุปได้ว่าการจำลองการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในแบบต่างๆ หากมีเงื่อนไขเริ่มต้นใกล้เคียงกันกับอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจริง จะให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับการตรวจวัด

7.1.2 ช่วงการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า

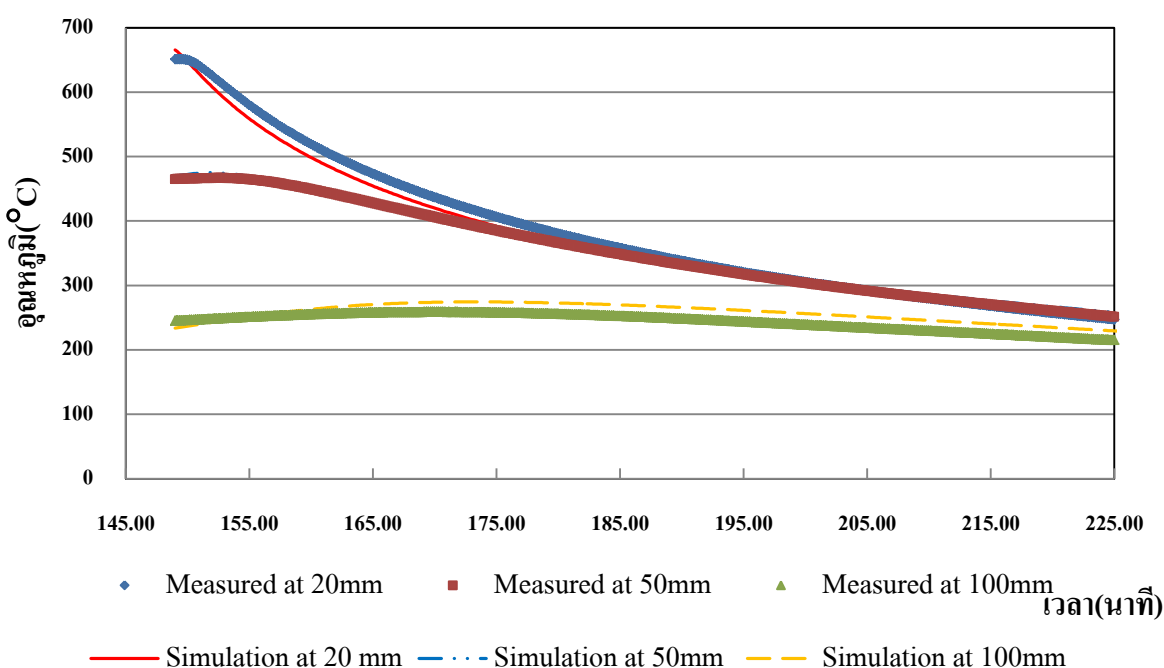
ช่วงการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่านั้นจะเป็นช่วงเวลาที่พักผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศภายนอกผ่านปากเบ้ารับน้ำเหล็กดังที่ได้อธิบายในการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งช่วงการพักเบ้ารับน้ำเหล็กลักษณะนี้จะปรากฏได้ในช่วงการติดตั้งประตูล้อเลื่อน การรอร์รับน้ำเหล็กจากเตาหลอม และระหว่างการล้างรูเทน้ำเหล็กด้วยออกซิเจน

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของการคำนวณคือตัวประกอบการมองเห็น โดยแบบจำลองที่ได้ออกแบบสำหรับคำนวณการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการนี้ได้แบ่งพื้นผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็กออกเป็น 3 พื้นผิวดังรูปที่ 4.3 ลักษณะที่เป็นประโยชน์ต่อการคำนวณในกรณีนี้คือตัวประกอบการมองเห็นนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการพิจารณาในช่วงนี้เนื่องจากการคำนวณจะพิจารณาให้รูปทรงของเบ้ารับน้ำเหล็กไม่มีการเปลี่ยนแปลง ผลการคำนวณตัวประกอบการมองเห็นมีรายละเอียดดังตารางที่ 7 – 3 ส่วนวิธีการคำนวณสามารถทำได้ตามทฤษฎีในหัวข้อที่ 3.3.3.1

ตารางที่ 7-3 ตัวประกอบการมองเห็นในการคำนวณ

$F_{i \rightarrow j}$	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$j = 1$	0	0.907	0.093
$j = 2$	0.167	0.714	0.119
$j = 3$	0.126	0.874	0

ลักษณะการลดลงของอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในกรณีที่ตั้งตั้งประตูลื่นระหว่างนาที่ที่ 149 – 225 มีลักษณะดังรูปที่ 7 – 6 จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการถ่ายเทความร้อนในช่วงนี้ ที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตร มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิสูงและอัตราการลดลงค่อยๆ ลดต่ำลงตามเวลา โดยมีลักษณะอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ คู่เข้าสู่อุณหภูมิกำหนดหนึ่ง ลักษณะการลดแสดงให้เห็นถึงการลดลงเนื่องจากการแผ่รังสีซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิผิวกำล้งสี่ ซึ่งจากการจำลองเห็นได้ว่าผลการจำลองให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด



รูปที่ 7-6 การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้แล้วที่เวลาต่างๆ ระหว่างการติดตั้งประตูลื่น เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล

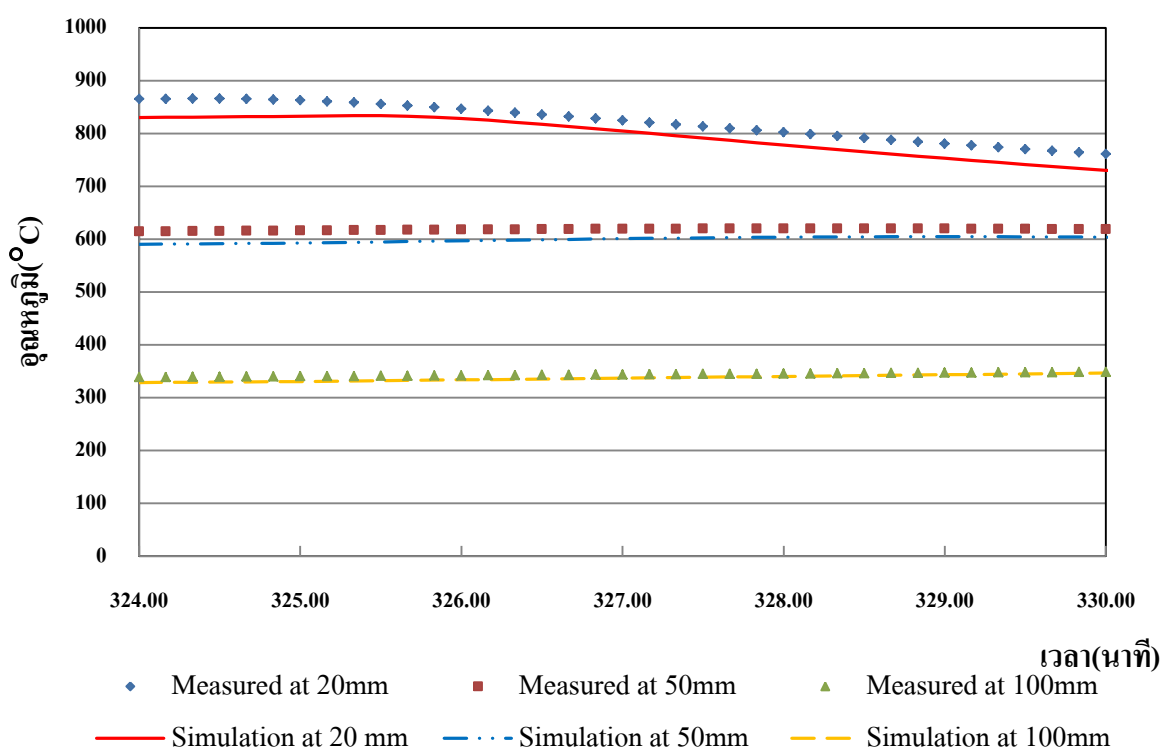
ถึงแม้การเปรียบเทียบแบบจำลองกรณีติดตั้งประตูลื่นจะให้ผลการตรวจวัดให้ผลที่ใกล้เคียงกับการตรวจวัด แต่กรณีการติดตั้งประตูลื่นที่ใช้เวลานานเช่นนี้จะปรากฏเฉพาะช่วงเวลา ที่เริ่มใช้งานเบ้ารับน้ำเหล็กเท่านั้น เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กได้รับการติดตั้งประตูลื่นแล้วจะไม่มี การติดตั้งประตูลื่นอีกจนกว่าเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกใช้งานจนครบอายุทำงาน

อีกกรณีที่ใช้แบบจำลองลักษณะเดียวกันในการคำนวณคือกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กรองรับน้ำ เหล็กจากเตาหลอม ซึ่งช่วงการรองรับน้ำเหล็กนี้จะปรากฏอยู่ทุกรอบการทำงาน แต่ระยะเวลาที่มีการ ถ่ายเทความร้อนในกระบวนการนี้จะสั้นกว่ากระบวนการติดตั้งประตูลื่น ลักษณะการตกลงของ

อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการนี้จะแสดงการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการตรวจวัด ในช่วงระหว่างนาฬิกาที่ 324 – 330 ในรูปที่ 7 – 7

เมื่อนำอัตราการลดลงของอุณหภูมิในรูปที่ 7 – 6 เปรียบเทียบกับรูปที่ 7 – 7 นั้น จะพบว่าการลดลงของอุณหภูมิที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตรในรูปที่ 7 – 7 จะสูงกว่าในรูปที่ 7 – 6 เนื่องจากที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตรในกรณีในรูปที่ 7 – 7 ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าในกรณีที่ 7.6 นั้นสามารถแสดงถึงอุณหภูมิผิวของผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในรูปที่ 7 – 7 สูงกว่ารูปที่ 7 – 6 ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าจึงเป็นเหตุให้การลดลงของอุณหภูมิในรูปที่ 7 – 7 เกิดขึ้นรวดเร็วกว่าที่เกิดในรูปที่ 7 – 6

ส่วนการเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการตรวจวัดในรูปที่ 7 – 7 ถึงแม้ว่าผลการจำลองจะไม่เท่ากับผลของการตรวจวัดเนื่องจากค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการพิจารณามีค่าไม่เท่ากันอันเป็นผลมาจากการจำลองในกระบวนการก่อนหน้านี้มีความคลาดเคลื่อน แต่ลักษณะแนวโน้มการแปรผันของอุณหภูมิจากการจำลองและการตรวจวัดที่ปรากฏในรูปที่ 7 – 7 ก็มีลักษณะคล้ายคลึงกัน



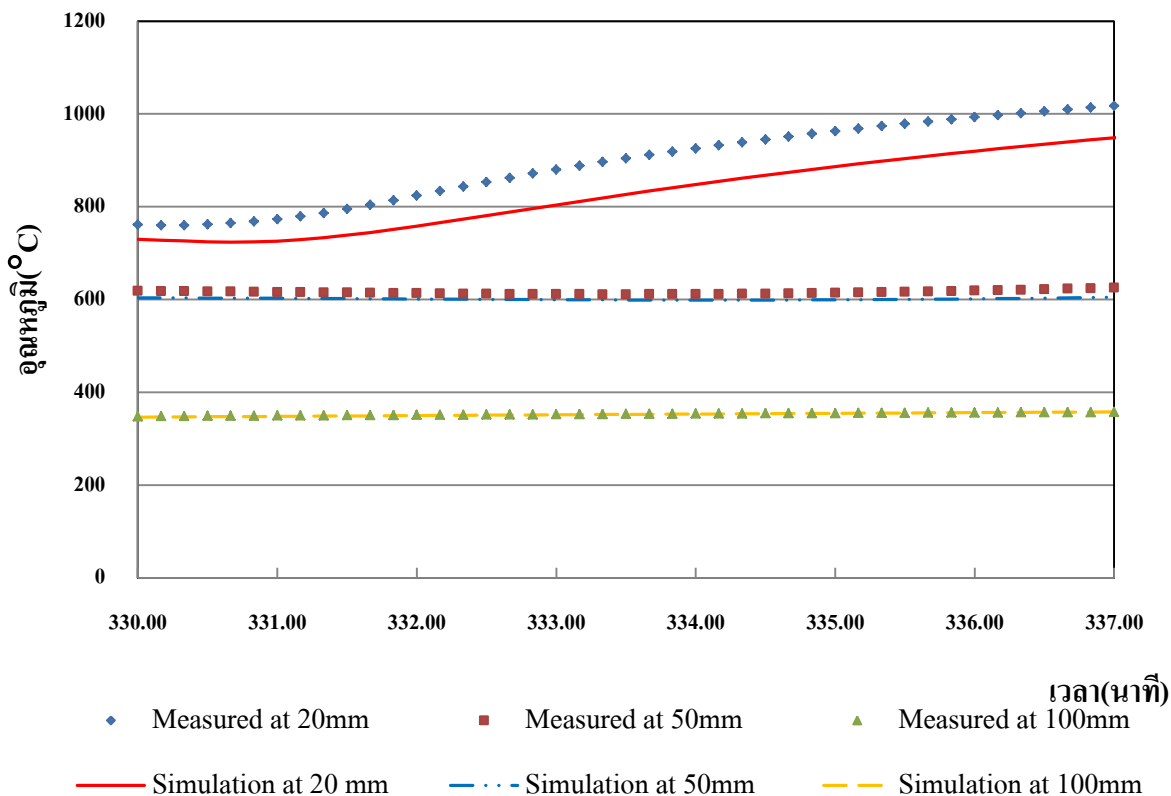
รูปที่ 7-7 การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กใช้แล้วที่เวลาต่างๆ ระหว่างการรอรับน้ำเหล็กจากเตาหลอม เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล

จากรูปที่ 7 – 7 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าที่ในกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กต้องไปรองรับน้ำเหล็กจากเตาหลอมโดยปกติแล้วเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิสูงก่อนจึงจะเคลื่อนย้ายไปรับน้ำเหล็ก ทำให้ระหว่างเคลื่อนย้ายและรองรับน้ำเหล็กนั้นผิวของผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก จะมีอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูงทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียความร้อนในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีการอุ่นมานั้น กระบวนการรองรับน้ำเหล็กควรทำด้วยความรวดเร็วและสร้างจังหวะการทำงานที่สัมพันธ์กันระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กและการหลอมในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อลดเวลาในการรอเทน้ำเหล็ก

7.1.3 ช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็ก

ช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็กเกิดขึ้นระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็กจากเตาหลอมไปยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง ช่วงกระบวนการนี้จะเป็นช่วงที่เบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็กได้สัมผัสกันทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนให้แก่กันและมีสถานะทางความร้อนที่สัมพันธ์กันซึ่งลักษณะความสัมพันธ์นั้นได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.6 ดังนั้นการจำลองต้องจะจำลองการเปลี่ยนแปลงสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กควบคู่ไปกับการเปลี่ยนแปลงสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กไปด้วย โดยในการคำนวณผ่านแบบจำลองในกระบวนการนี้จะสมมติให้อุณหภูมิน้ำเหล็กเริ่มต้นที่เข้ามาอยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นมีอุณหภูมิเป็นอุณหภูมิเทน้ำเหล็ก (T_{tap}) ลักษณะการพิจารณาน้ำเหล็กนั้นพิจารณาให้น้ำเหล็กมีความสม่ำเสมอของอุณหภูมิตลอดทั้งปริมาตรน้ำเหล็กและอุณหภูมิของผิวแอสลักได้จากข้อสรุปของการศึกษาจากภาพถ่ายความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ยบนผิวแอสลักจะต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กประมาณ 900°C

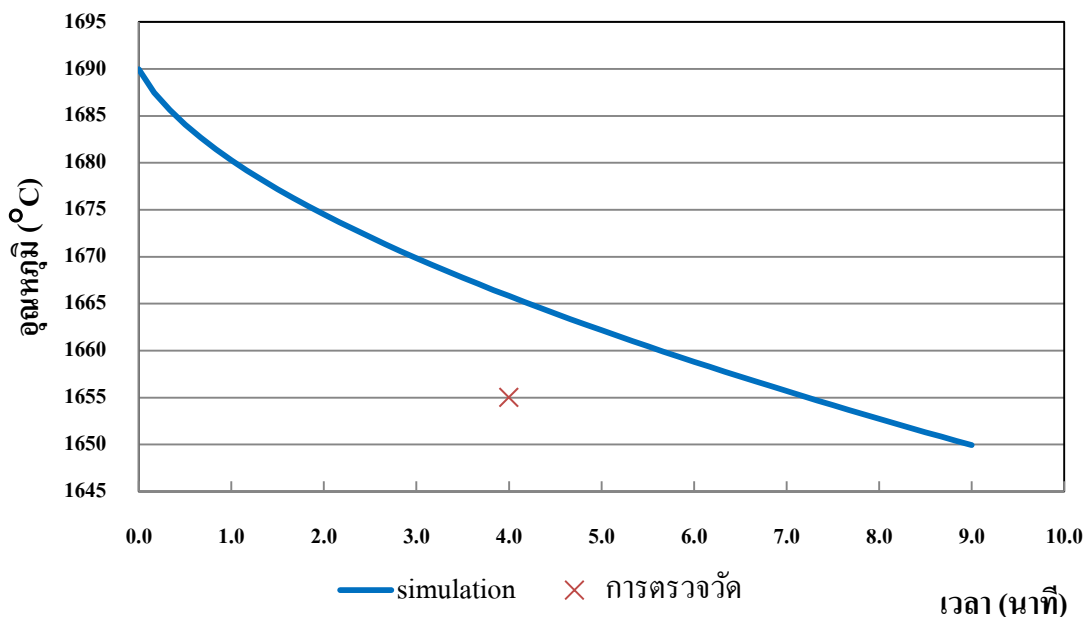
จากการจำลองและการตรวจวัดได้มีการเปรียบเทียบดังรูปที่ 7 – 8 ซึ่งได้นำช่วงระหว่างนาที่ที่ 330 – 337 จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลองอันเป็นผลจากการจำลองในกระบวนการก่อนหน้านั้นคลาดเคลื่อนกับผลการทดลอง ทำให้อุณหภูมิไม่เท่ากับผลการตรวจวัด แต่ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิระหว่างกระบวนการที่ระดับความลึกต่างๆยังมีแนวโน้มที่เหมือนกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด



รูปที่ 7-8 การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเข้รับน้ำเหล็กใช้แล้วที่เวลาต่างๆ ระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็ก เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล

จากลักษณะในรูปที่ 7 – 8 จะเห็นว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโดยเฉพาะที่ระดับความลึกที่ 20 มิลลิเมตรมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในอัตราที่ลดลง ทำให้ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่พิจารณานี้มีลักษณะของอุณหภูมิคู่เข้าสู่อุณหภูมิ อุณหภูมิหนึ่ง

หากพิจารณาผลของน้ำเหล็กในช่วงเวลาเดียวกันจะมีลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิเทียบกับผลการทดลองแสดงรูปที่ 7 – 9



รูปที่ 7-9 การแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก

จากรูปที่ 7 – 9 ในรอบการทำงานนี้จะมีอุณหภูมิเริ่มจากอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่ 1690°C และมี การถ่ายเทความร้อนออกจากน้ำเหล็กทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กลดลงอย่างสม่ำเสมอ จะเห็นว่าในช่วงแรกของการขนถ่ายน้ำเหล็กนั้นอุณหภูมิน้ำเหล็กจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากช่วงแรกที่น้ำเหล็กสัมผัสกับผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก น้ำเหล็กจะมีการถ่ายเทความร้อนออกไปสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำเหล็กมากผ่านการพาความร้อน ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กสูง แต่เมื่ออุณหภูมิจนของผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กเริ่มเข้าใกล้อุณหภูมิน้ำเหล็กมากขึ้น การถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กไปยังผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะน้อยลง ส่งผลให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเวลาต่อไปลดน้อยลงด้วย ซึ่งจากความสัมพันธ์ลักษณะนี้แสดงให้เห็นชัดว่าหากอุณหภูมิจนของผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิที่สูงจะช่วยลดปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กสู่เบ้ารับน้ำเหล็กได้ส่งผลให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กต่ำลงได้ ซึ่งเมื่ออัตราการลดของอุณหภูมิน้ำเหล็กต่ำลงจะนำไปสู่การลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็ก ซึ่งเป็นหลักการของการสร้างระบบควบคุมในการศึกษานี้

7.1.4 ช่วงการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก

ในช่วงนี้เบ้ารับน้ำเหล็กยังคงบรรจุน้ำเหล็กอยู่ภายใน และเทออกทางก้นเบ้ารับน้ำเหล็กทำให้ระดับน้ำเหล็กลดลงอยู่ตลอดเวลาโดยลักษณะการลดลงของน้ำเหล็กในกระบวนการใช้ตามความสัมพันธ์แสดงในตารางที่ 7 – 4 โดยที่อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ใช้เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นสำหรับการคำนวณในกระบวนการนี้จะนำมาจากอุณหภูมิน้ำเหล็กที่คำนวณได้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก เนื่องจากกระบวนการนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำเหล็กทำให้มีความซับซ้อนมากขึ้นในการออกแบบแบบจำลองทำให้ผลการจำลองผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความแตกต่างกับผลการตรวจวัด

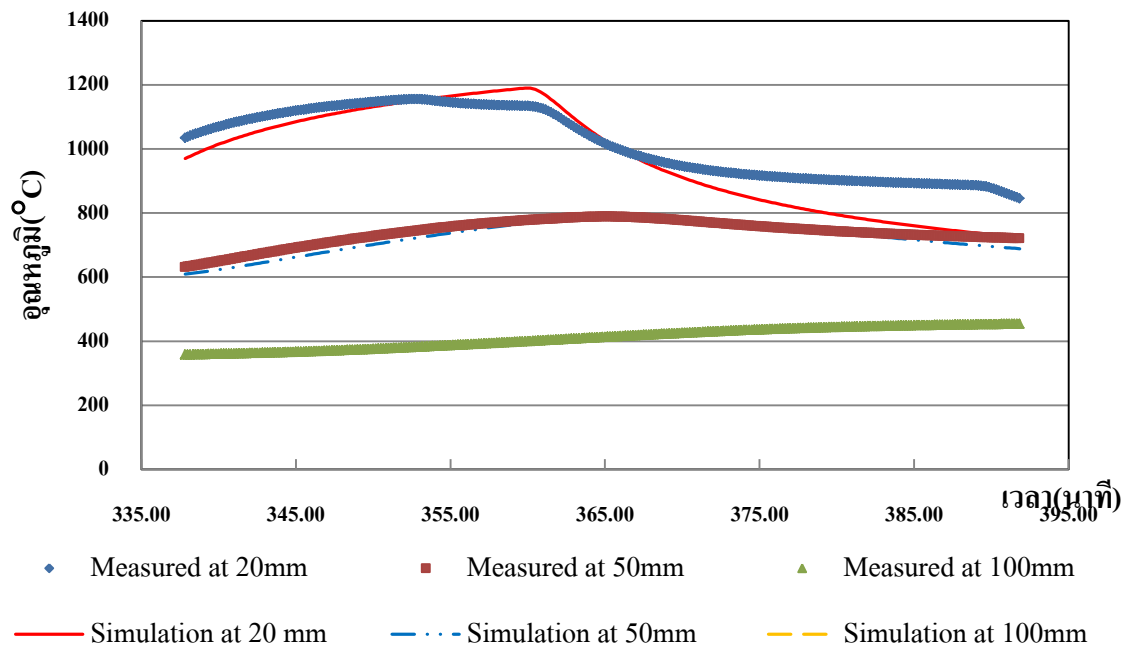
ตารางที่ 7-4 ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงระดับน้ำเหล็กระหว่างการเทน้ำเหล็ก

สมบัติ	ตัวแปร	ค่า
ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเทน้ำเหล็ก (s)	t_{teem}	-
ระยะเวลาในแต่ละขั้นเวลา (s)	Δt	0.1
ระดับความสูงของน้ำเหล็กเริ่มต้น (m)	H_{ls}	1.715
ระดับน้ำเหล็กที่ลดลงในแต่ละขั้นเวลา (m)	ΔH	$(H_{ls}/t_{teem}) \times \Delta t$
รัศมีเฉลี่ยของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)	r_m	0.791
มวลของน้ำเหล็กขณะเริ่มต้น (kg)	m_{ls}	23000
ปริมาณมวลที่ลดลงในแต่ละขั้นเวลา (kg)	Δm_{ls}	$\rho_{ls} \pi r_m^2 \cdot \Delta H$

โดยที่ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการตรวจวัดกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็กระหว่างนาทิตี่ 337 – 391 แสดงดังรูปที่ 7 – 10 จะเห็นว่าในช่วงแรกที่น้ำเหล็กอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นอุณหภูมิทั้งของการจำลองและการตรวจวัดจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเวลาผ่านไประดับน้ำเหล็กลดลงทำให้ส่วนที่สัมผัสกับอิฐก้อนที่ 5 ซึ่งเป็นตำแหน่งตรวจวัดเริ่มสัมผัสกับชั้นแสลคที่ปกคลุมอยู่บนผิวน้ำเหล็กซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนเข้าผนังเบ้ารับน้ำเหล็กน้อยลงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กโดยเฉพาะที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตรจะปรากฏชัดว่ามีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลดลง แต่ในผลการจำลองแบบจำลองยังคงถูกสมมติให้

ว่าผนังเบ้ารับน้ำเหล็กส่วนนี้ยังคงสัมผัสกับน้ำเหล็กอยู่ทำให้อุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้นต่อไป จนกระทั่งครบระยะเวลาร้อยละ 40 แรกของเวลาในการเทน้ำเหล็กทั้งหมด

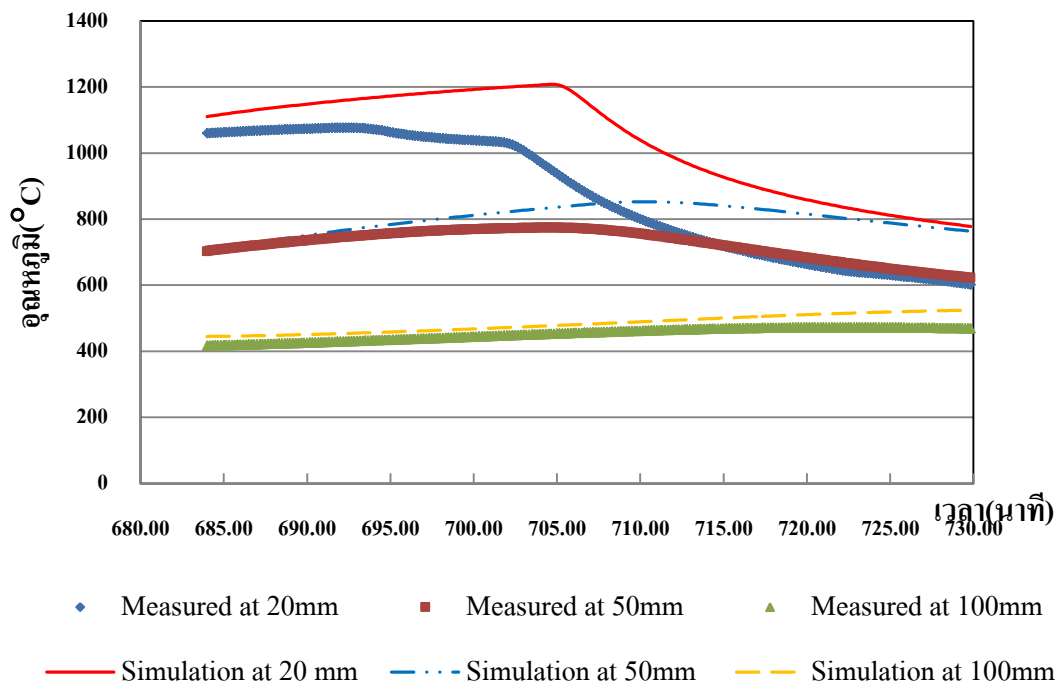
เมื่อครบระยะเวลาร้อยละ 40 แรกของเวลาในการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็กแล้วแบบจำลองจะถูกสมมติให้น้ำเหล็กผ่านไปอย่างสิ้นเชิง และเปลี่ยนการคำนวณเป็นกรณีที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างพื้นผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำให้ผลการจำลองอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีการเปลี่ยนจากการเพิ่มขึ้นกลายเป็นการลดลงโดยทันที โดยลักษณะการลดลงจะมีลักษณะลู่เข้าสู่อุณหภูมิต่ำๆหนึ่ง ส่วนในผลจากการตรวจวัดเมื่ออยู่ในสถานะเช่นนี้ก็มีการลดลงของอุณหภูมิเช่นเดียวกันแต่ลักษณะการลู่เข้าสู่อุณหภูมิต่ำๆหนึ่งนั้นจะแตกต่างจากผลการจำลอง คือ อุณหภูมิที่ผลจากการตรวจวัดลู่เข้าจะสูงกว่าอุณหภูมิลู่เข้าของการจำลอง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างของความเป็นจริงและแบบจำลอง คือในการปฏิบัติงานจริงจะมีฝาปิดปากเบ้ารับน้ำเหล็กอยู่ระหว่างการเทน้ำเหล็ก ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของพื้นผิวภายในจะสูงขึ้นทำให้บรรยากาศภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิต่ำๆหนึ่งที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่ในแบบจำลองนั้นกำหนดให้ฝาที่ปิดปากเบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นเกราะกำบังรังสี ซึ่งภายนอกเกราะกำบังรังสีมีลักษณะเป็นวัตถุดำที่อุณหภูมิบรรยากาศ ลักษณะการลู่ถ่ายเทความร้อนจึงแตกต่างทำให้ให้การลู่เข้าของอุณหภูมิต่างกันด้วย



รูปที่ 7-10 การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเข้รับน้ำเหล็ก ระหว่างการเทน้ำเหล็กจาก เข้รับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กระหว่างช่วงเวลานาทีที่ 337 - 391 เปรียบเทียบระหว่าง ผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล

นอกจากนั้นแล้วยังมีลักษณะที่น่าสังเกตของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นใน กระบวนการเทน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กในช่วงเวลานาทีที่ 684 – 729 ดังรูปที่ 7 – 11 คือลักษณะ การลดลงของอุณหภูมิตั้งช่วงที่น้ำเหล็กลดระดับต่ำกว่าตำแหน่งอิฐก้อนที่ 5 ที่ตรวจวัดแล้ว ลักษณะการลดของรูปที่ 7 – 11 จะมีลักษณะที่แตกต่างจากรูปที่ 7 – 10 ที่ในรูปที่ 7 – 11 จะปรากฏ ลักษณะการลู่เข้าของอุณหภูมิที่ตำแหน่งความลึกที่ 20 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิที่มีค่าสูงกว่าในกรณี ช่วงนาที่ที่ 337 – 391 ในรูปที่ 7 – 10 หากสังเกตจะพบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งความลึก 20 มิลลิเมตร ในรูปที่ 7 – 10 ลู่เข้าจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 900°C แต่ในรูปที่ 7 – 11 ช่วงเวลาการเทระหว่างนาที่ ที่ 684 – 729 นั้นยังไม่ปรากฏอุณหภูมิที่ลู่เข้าอย่างชัดเจนแต่ในขณะที่ผลการจำลองที่ยังคงใช้ แบบจำลองที่จำลองให้ฝาเข้รับน้ำเหล็กเป็นเกราะกำบังรังสีอยู่นั้นอุณหภูมิก็ยังลู่เข้าสู่อุณหภูมิ ประมาณ 800°C เช่นเดิม ลักษณะการลู่เข้าของค่าที่แตกต่างออกไปนี้คาดว่าจะเป็นจากการปิดเปิดฝา เข้รับน้ำเหล็กระหว่างการเทน้ำเหล็ก คือในระหว่างการเทน้ำเหล็กที่ช่วงเวลานาทีที่ 337– 391 และ ช่วงนาที่ที่ 594 – 641 (ดูรูปที่ 5 – 7 ประกอบ) นั้นตลอดการเทน้ำเหล็กมีฝาปิดอยู่ตลอดเวลา แต่ใน

กรณีการเทน้ำเหล็กในช่วงเวลานาทีที่ 684 – 729 นั้นมีการยกฝาปิดปากเบ้ารับน้ำเหล็กออกไปก่อนถึงสุดกระบวนการทำให้มีการถ่ายเทความร้อนกับบรรยากาศภายนอกทำให้ลักษณะการลู่เข้าสู่ค่าอุณหภูมิหนึ่งลดต่ำลงจนสังเกตได้ยากในผลการเก็บข้อมูลในเวลานาทีที่ 684 – 729



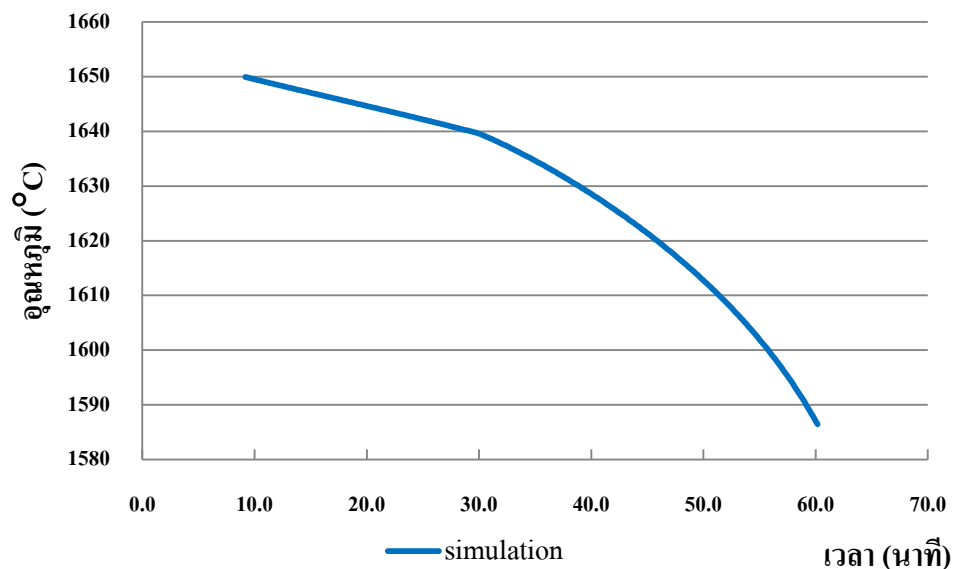
รูปที่ 7-11 การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ระหว่างการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กระหว่างช่วงเวลานาทีที่ 684 - 729 เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล

เนื่องจากรอบการทำงานต่อไปที่เวลาประมาณนาทีที่ 800 Thermocouple ที่ฝังไว้ในอิฐก้อนที่ 5 ที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตร เสียหายจนไม่สามารถทำงานได้ทำให้การสังเกตกระบวนการสังเกตความแตกต่างได้ไม่ชัดเจน เนื่องจาก Thermocouple ที่ตำแหน่ง 50 และ 100 มิลลิเมตรที่ลึกลงไปสามารถสังเกตลักษณะเช่นนี้ได้ยาก ผลของการลู่เข้าสู่ของอุณหภูมิในตำแหน่งที่ 20 มิลลิเมตรนั้นจึงพิจารณาเป็นสมมติฐานเท่านั้น

จากผลการจำลองดังที่ได้แสดงตัวอย่างในรูปที่ 7 – 10 และ รูปที่ 7 – 11 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเนื่องจากการแปลงเปลี่ยนทางกายภาพของกระบวนการนี้มีค่อนข้างมาก การสร้างแบบจำลองให้รองรับการเปลี่ยนแปลงของกิจกรรมต่างๆตลอดจึงทำได้

โดยยาก ในการออกแบบระบบควบคุมนี้จึงยึดแนวทางตามแบบจำลองที่ออกแบบไว้เนื่องจากการประยุกต์ใช้ในภาพรวมแต่ละกระบวนการนั้นแบบจำลองที่ได้ออกแบบให้ผลได้ดีพอสมควร

อีกส่วนที่ต้องพิจารณาควบคู่ไปกับกระบวนการนี้คืออุณหภูมิของน้ำเหล็กซึ่งได้แสดงตัวอย่างผลการจำลองน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กในช่วงเวลานาทีที่ 337 – 391 ไว้ในรูปที่ 7 – 12 จะเห็นลักษณะการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กอยู่ตลอดเวลาโดยที่ในช่วงท้ายของการเทน้ำเหล็กจะสามารถเห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กจะลดลงอย่างรวดเร็ว และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากในแต่ละช่วงเวลาระหว่างการเทน้ำเหล็กนั้นตามแบบจำลองได้ออกแบบให้ปริมาตรของน้ำเหล็กลดลงอย่างสม่ำเสมอตลอดเวลา เมื่อปริมาตรลดลงก็ส่งผลต่อมวลของน้ำเหล็กลดลงตาม เมื่อมวลของน้ำเหล็กน้อยลงแต่อุณหภูมิยังคงสูงปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทออกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กได้รวดเร็วขึ้น ดังสมการความสัมพันธ์ของน้ำเหล็กดังแสดงในสมการที่ (4.41)



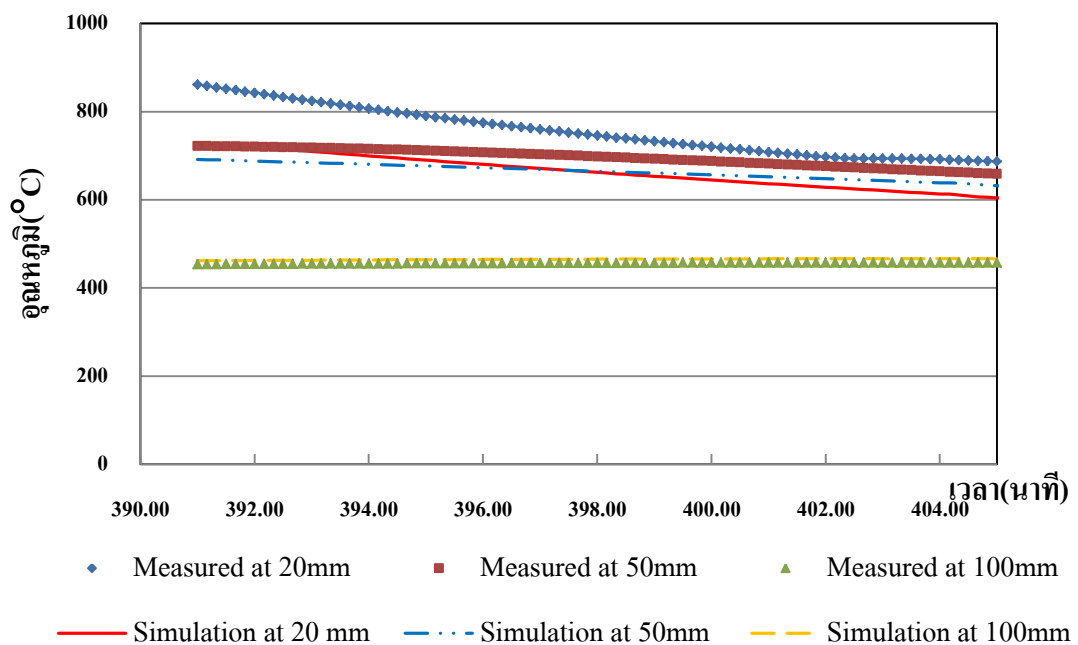
รูปที่ 7-12 การแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็กระหว่างช่วงเวลานาทีที่ 337 – 391

7.1.5 ช่วงการขนย้ายแสลคไปเททิ้ง

ช่วงการขนย้ายแสลคไปเททิ้งนั้น คือการขนย้ายน้ำเหล็กส่วนที่เหลือและแสลคที่ไม่ต้องการนำไปเททิ้งยังถ้วยรับแสลคซึ่งในการคำนวณตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบ

ไว้ในหัวข้อ 4.8 นั้น อุณหภูมิเริ่มต้นของอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหลืออยู่จะใช้เป็นอุณหภูมิสิ้นสุดของกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก

ลักษณะของการแปรผันอุณหภูมิระหว่างช่วงการขนย้ายเหล็กไปที่เทที่ระหว่างเวลาวันที่ 391 – 405 แสดงในรูปที่ 7 – 13 ซึ่งจะเห็นอัตราการลดลงของอุณหภูมิแต่ละจุดจะมีอัตราการลดลงที่ต่ำกว่าอัตราการลดลงในขณะที่ปล่อยให้เบ้ารับน้ำเหล็กเปล่าถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศ เนื่องจากในสภาวะนี้ยังคงมีน้ำเหล็กและเหล็กที่ยังคงอุณหภูมิสูงคอยแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังเบ้ารับน้ำเหล็กอยู่ เสมือนเป็นการอุ่นผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไประหว่างกระบวนการด้วย



รูปที่ 7-13 การแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ระหว่างการขนย้ายเหล็กไปที่เทที่
เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการเก็บข้อมูล

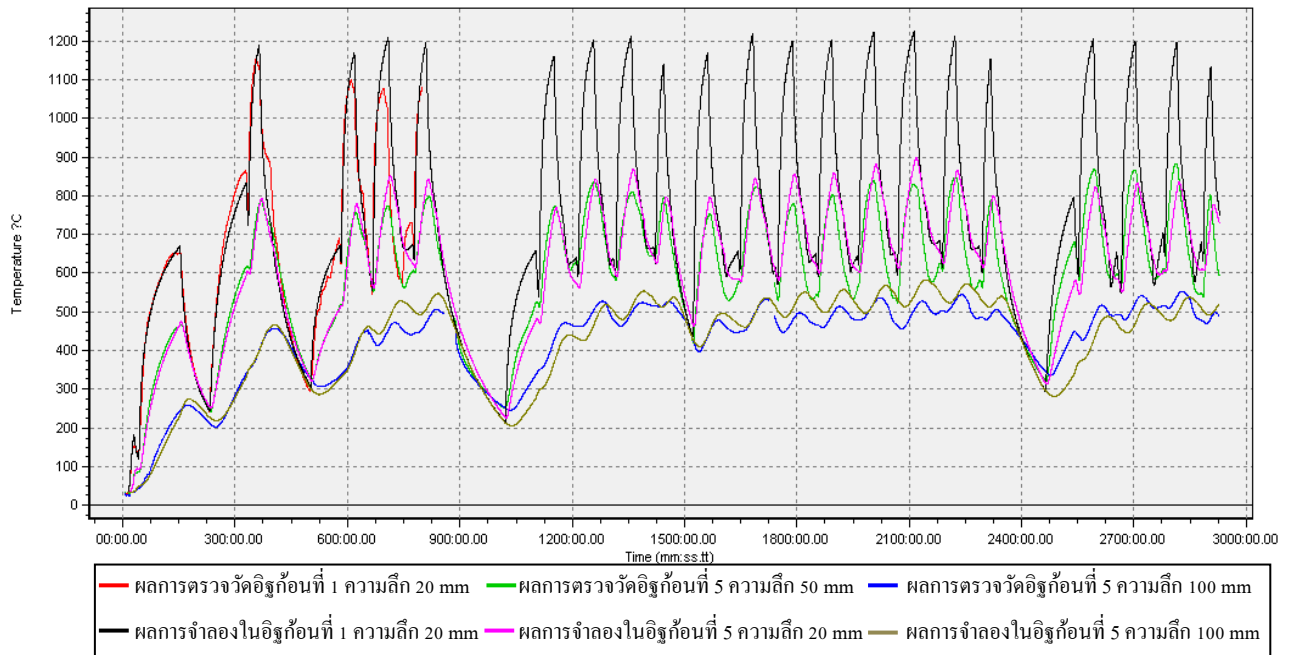
จากรูปที่ 7 – 13 จะเห็นว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่ตำแหน่งต่างๆ มีความคลาดเคลื่อนมาจากผลการจำลองในกระบวนการก่อนหน้า ทำให้ค่าจากการตรวจวัดและการจำลองแตกต่างกันค่อนข้างมาก แต่หากพิจารณาถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแต่ละจุดจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกันกับการทดลอง

7.1.6 ผลการจำลองการแปรผันอุณหภูมิตลอดอายุของผนังเบารับน้ำหลัก

จากการจำลองในการแปรผันอุณหภูมิในแต่ละกระบวนการต่างๆ ตั้งแต่หัวข้อที่ 7.2.1 – 7.2.5 เมื่อรูปแบบและวิธีการจำลองดังกล่าวนี้มาประกอบกันตามแต่ละกระบวนการโดยใช้ช่วงเวลาและเงื่อนไขต่างๆของแต่ละกระบวนการให้ตรงกับผลการตรวจวัดในรูปที่ 5 – 7 และตารางที่ 5 – 5 ได้ผลการจำลองการแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบารับน้ำหลักตลอดอายุใช้งานของผนังเบารับน้ำหลักที่ก่อสร้างมา จำนวน 20 รอบการทำงานมาสอบเทียบกับผลการตรวจวัดแสดงดังรูปที่ 7 - 14 จะเห็นโดยภาพรวมว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาคำนวณให้ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ที่สามารถสะท้อนลักษณะกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตเหล็กกล้าในโรงงานที่ทำการศึกษาก็ได้ แต่ความแม่นยำโดยรายละเอียดจะมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อแบบจำลองผ่านการจำลองมามากขึ้น ส่วนหนึ่งของความคลาดเคลื่อนมาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ยังไม่ได้รองรับรูปแบบและกรณีต่างๆที่เกิดขึ้นจริงได้หมด และความคลาดเคลื่อนที่สะสมจากการคำนวณตามแต่ละขั้นเวลามายาวนานและต่อเนื่อง ในหัวข้อนี้จึงจะนำเสนอการวิเคราะห์ผลการจำลองและลักษณะที่สำคัญที่ได้จากการสอบเทียบผลการจำลองและผลการตรวจวัดโดยการแบ่งการอธิบายผลการวิเคราะห์ออกเป็นช่วงต่างๆ ดังนี้

1. ช่วง 4 รอบการทำงานแรก เป็นช่วงที่เบารับน้ำหลักที่ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดเริ่มทำงาน 4 รอบการทำงานแรก ดังนั้นเริ่มต้นเบารับน้ำหลักจึงจะถู้อนจากจุดที่อุณหภูมิสูงเป็นอุณหภูมิห้อง ซึ่งในช่วงนี้จะไม่มีความไม่ต่อเนื่องของการทำงานทำให้ในช่วงเวลาที่พิจารณาเบารับน้ำหลักมีการทำงานที่ไม่ต่อเนื่อง
2. ช่วง 12 รอบการทำงานถัดไป เป็นช่วงที่อยู่หลังการหยุดปฏิบัติงานเพื่อเลี้ยงช่วงที่ค่าไฟมีราคาแพง (On-Peak Period) ช่วงแรกระหว่างนาฬิกาที่ประมาณ 900 - 1150 และช่วงหยุดปฏิบัติงานเพื่อเลี้ยงค่าไฟราคาแพงช่วงที่สองระหว่างนาฬิกาที่ประมาณ 2400 – 2500 ในช่วงนี้เป็นช่วงที่เบารับน้ำหลักได้ถูกใช้งานอย่างสม่ำเสมอจะเห็นได้ชัดลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิในผนังนั้นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเป็นคาบที่ค่อนข้างคงที่
3. ช่วง 4 รอบการทำงานสุดท้าย เป็นช่วงที่อยู่หลังหยุดปฏิบัติงานเพื่อเลี้ยงค่าไฟราคาแพง ช่วงที่ 2 จนกระทั่งสิ้นสุดการเก็บข้อมูล ในช่วงนี้การทำงานของเบารับน้ำหลักก็มีลักษณะคล้ายช่วง 12 รอบการทำงานก่อนหน้าช่วงนี้ แต่จะปรากฏความคลาดเคลื่อน

ของการจำลองผ่านแบบจำลองและการตรวจวัดอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่รอบการทำงานแรก และปรากฏความคลาดเคลื่อนต่อไปจนกระทั่ง ซึ่งสาเหตุและลักษณะของความคลาดเคลื่อนจะอธิบายต่อไป



รูปที่ 7-14 ผลการจำลองการแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดอายุใช้งานของผนัง เปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและการตรวจวัด

การวิเคราะห์การแปรผันของกระบวนการดังนี้

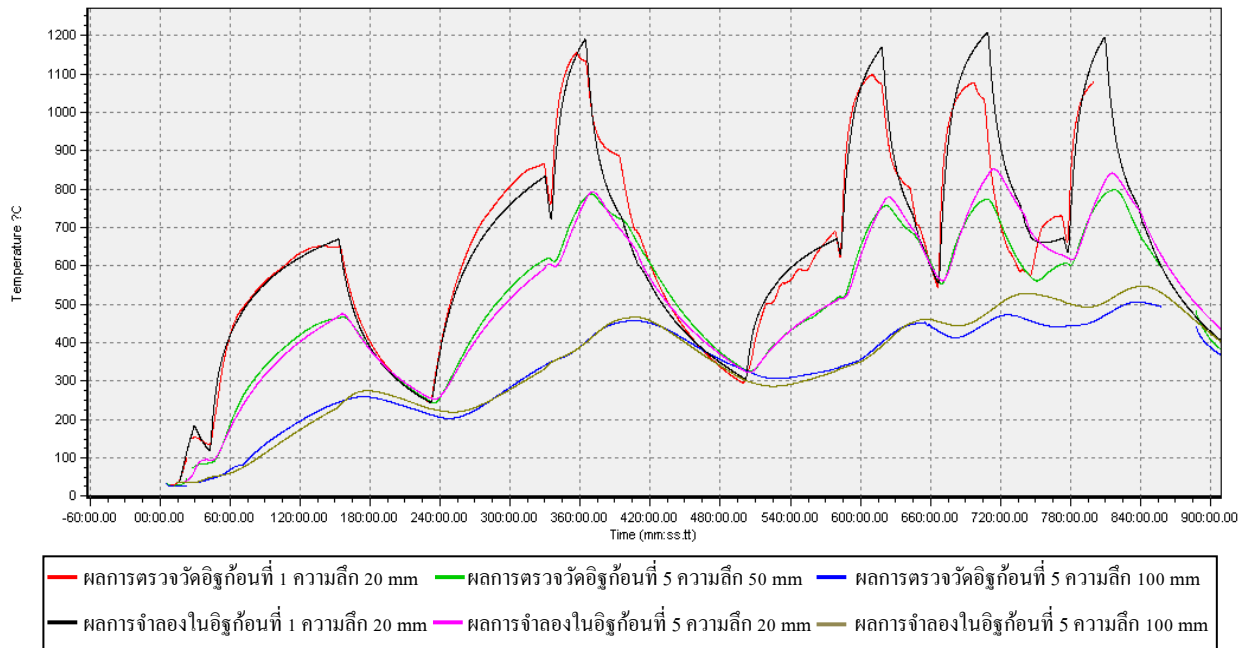
1. ช่วง 4 รอบการทำงานแรก

เมื่อวิเคราะห์จากภาพขยายเฉพาะช่วง 4 รอบการทำงานแรกในรูปที่ 7 – 14 จะเห็นว่าในช่วงแรกนั้นระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจะได้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัด เนื่องจากแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองนั้นได้ใช้ข้อมูลแก๊สเผาไหม้ ทั้งอุณหภูมิและอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงจากงานวิจัยของ จักรวราช จุฬาลงกรณ์ (2552) ซึ่งได้ศึกษาลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิทั้งในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กและแก๊สเผาไหม้ในหัวเผาทั้งแบบรีเจนเนอเรทีฟและหัวเผาแบบธรรมดาตามาระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เริ่มใช้งานอย่างละเอียด ทำให้แบบจำลองทำได้สอดคล้องกับผลการทดลองมาก

ส่วนอื่นๆ ในช่วง 4 รอบการทำงานแรกนี้ส่วนใหญ่ได้ถูกนำมาอธิบายผลการสอบเทียบระหว่างการจำลองและการทดลองดังที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 7.2.1 – 7.2.5 แล้ว ในหัวข้อนี้จึงจะ

นำไปสู่การวิเคราะห์เฉพาะจุดที่น่าสนใจคือช่วงระหว่างรอบการทำงานที่ 3 จะเห็นว่าในรอบการทำงานนี้อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะปรับน้ำเหล็กจากเตาหลอม (ประมาณนาทิตี่ 662) ที่ระยะ 20 และ 50 มิลลิเมตร มีอุณหภูมิจากการจำลองใกล้เคียงกับผลการทดลองมาก ทำให้ในขณะที่ขนถ่ายน้ำเหล็กมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดมาก แต่เนื่องจากแบบจำลองมีรูปแบบการแปรผันระหว่างการเทน้ำเหล็กที่น้อยกว่าความเป็นจริง ในขณะที่ชั้นแสลคที่ปกคลุมผิวหน้าน้ำเหล็กเริ่มลดระดับลงมาสัมผัสกับจุดกึ่งกลางความสูงของเบ้ารับน้ำเหล็ก อุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กจึงเริ่มเพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยลง(ประมาณนาทิตี่ 680) แต่ในเบ้ารับน้ำเหล็กแบบจำลองยังคำนวณด้วยเงื่อนไขที่เบ้ารับน้ำเหล็กสัมผัสกับน้ำเหล็กอยู่ ทำให้ในกระบวนการต่อมาเงื่อนไขเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นมาก ซึ่งโดยปกติแล้วที่ระดับความลึก 20 มิลลิเมตร จะมีช่วงที่อุณหภูมิเข้าสู่ค่าๆหนึ่ง เมื่อปรากฏการณ์ลักษณะนี้ไม่ปรากฏ ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ซึ่งผลในการบวนการนี้ส่งผลให้มีการลดลงของอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่ผลจากแบบจำลองยังคงมีอุณหภูมิสูงอยู่(ประมาณนาทิตี่ 720) และเมื่อเข้าสู่การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ด้วยเงื่อนไขเริ่มต้นตามแบบจำลอง และผลการตรวจวัดต่างกันทำให้ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิจากการคำนวณผ่านแบบจำลองมีลักษณะโค้งขึ้นเพียงเล็กน้อยในขณะที่ผลจากการตรวจวัดที่เริ่มอุ่นที่อุณหภูมิต่ำกว่า มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิลักษณะคล้ายการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กรอบอื่นๆ

แต่ถึงแม้จนเมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กได้มารับน้ำเหล็กอีกหนที่เวลาก่อนเทน้ำเหล็กช่วงที่มีการรอรับน้ำเหล็กก่อนจะเห็นในรูปที่ 7 – 15 ว่าผลของแบบจำลองกลับเข้ามาใกล้เคียงผลการทดลองที่ระยะ 20 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร โดยบังเอิญทำให้ผลการจำลองในรอบการทำงานที่ 4 ยังคงลักษณะการแปรผันอุณหภูมิระหว่างการจำลองและการทดลองคล้ายกัน



รูปที่ 7-15 ผลการจำลองและการตรวจวัดการแปรผันของอุณหภูมิในช่วง 4 รอบการทำงานแรก

2. ช่วง 12 รอบการทำงานถัดมา

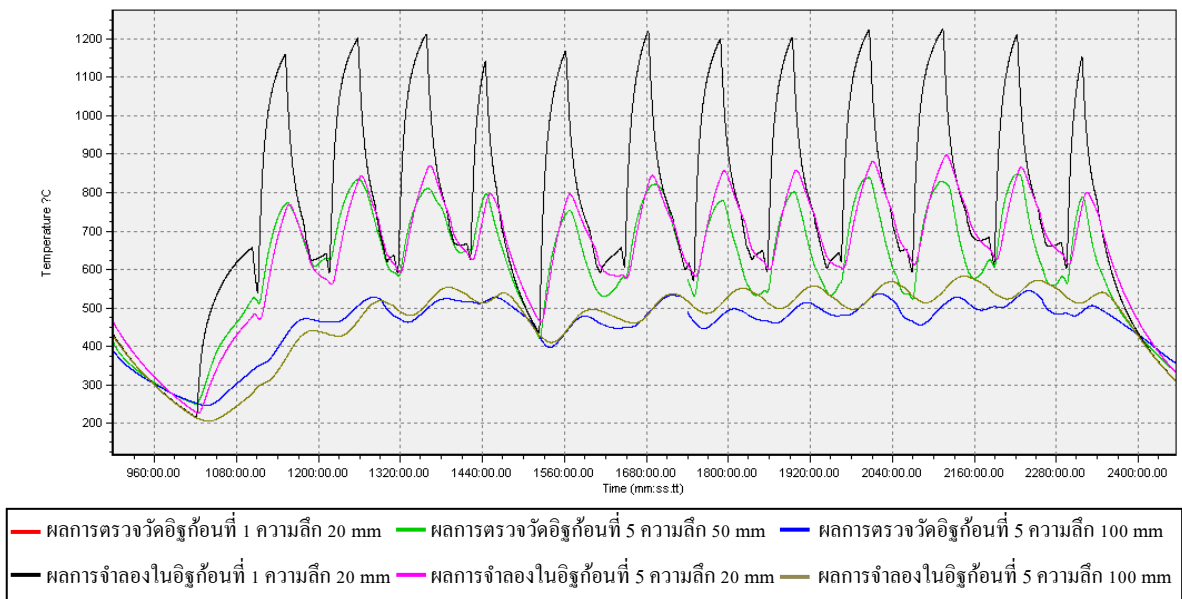
ในช่วงนี้ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิแสดงภาพขยายในรูปที่ 7 – 16 จะเห็นได้ชัดว่า ในช่วงนี้ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิตามเวลามีลักษณะเป็นคาบ เนื่องจากเข้าน้ำเหล็กได้ถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องแต่จะมีที่ช่วงเวลาประมาณนาทิตี่ 1480 – 1520 จะมีแสงเข้าไปอุดต้นในรูปทำให้เสียเวลาในการแก้ไขปัญหาก่อให้เกิดความล่าช้าจนอุณหภูมิภายในผนังเข้าน้ำเหล็กลดลงไปมาก แต่เมื่อแก้ไขปัญหสำเร็จ กระบวนการก็กลับมาทำงานอย่างสม่ำเสมออีก

หากสังเกตลักษณะการจำลองของอุณหภูมิผนังเข้าน้ำเหล็กที่ระดับความลึก 50 มิลลิเมตรกับผลการตรวจวัดที่ระดับเดียวกันจะพบว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นและลดลงของผลจากการจำลองจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละรอบที่ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่ผลการตรวจวัดจะมีบางรอบที่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นและลดลงเหมือนกับผลจากการจำลอง(เช่นรอบการทำงานระหว่างช่วงนาทิตี่ 1200 – 1320 หรือ 1650 – 1750) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการจำลองกำหนดการคำนวณทุกรอบให้มีฝาปิดเข้าน้ำเหล็กอยู่ตลอดเวลาที่เทน้ำเหล็กลงสู่เข้าน้ำเหล็ก แต่ในขณะที่ความเป็นจริงบางรอบการทำงานอาจมีการยกฝาออกก่อนเสร็จสิ้นการเทน้ำเหล็กเป็นเวลานานทำให้ลักษณะการลดลงของอุณหภูมิแตกต่างไปจากผลการจำลอง

นอกจากนั้นแล้วผลจากการแบ่งช่วงการพิจารณาให้น้ำหนักสัมพัทธ์กับผนังเข้ารับน้ำเหล็ก ก่อนและหลังช่วงเวลาร้อยละ 40 ของเวลาในการเททั้งหมด ทำให้ในแบบจำลองมีเวลาในกาถ่ายเท ความร้อนจากน้ำเหล็กสู่ผนังมากกว่าความเป็นจริงจะสังเกตได้จากลักษณะการเพิ่มของอุณหภูมิใน แบบจำลองสูงกว่าผลการตรวจวัด เมื่อความคลาดเคลื่อนประการนี้ปรากฏขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้เกิด ความสะสมความคลาดเคลื่อน จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะการแปรผันของแบบจำลองที่จะมีแนวโน้ม สูงขึ้นทีละเล็กละน้อยในแต่ละรอบการทำงาน

อีกส่วนหนึ่งคือความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิของแบบจำลองที่สูงกว่าผลของการตรวจวัด ทำให้เงื่อนไขเริ่มต้นที่ใช้คำนวณต่างๆเปลี่ยนแปลงไป ลักษณะการตอบสนองทางอุณหภูมิในของ ผลการจำลองจะแตกต่างจากผลการตรวจวัด เช่นในช่วงระหว่างเวลานาทีที่ 1610 – 1640 ผลการ ตรวจวัดจะเห็นผลจากการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กได้อย่างชัดเจนเนื่องจากมีอุณหภูมิเริ่มต้นในการอุ่นที่ ต่ำกว่า แต่ในขณะที่ผลจากการจำลองมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้อยมากเนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ มีการอุ่นนั้นสูงอยู่แล้ว

สุดท้ายเมื่อสังเกตลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็กจะสังเกตได้ ถึงลักษณะของอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากผลการตรวจวัดที่ระดับความลึก 50 มิลลิเมตร ตั้งแต่ช่วงเวลาประมาณนาทีที่ 1860 เป็นต้นไปจะมีเริ่มปรากฏอัตราการเพิ่มขึ้นที่สูงกว่าแบบจำลอง ที่ระยะเดียวกัน โดยอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้ในรอบถัดๆไปจะเห็นมากขึ้นเรื่อยๆ นอกจากนั้นแล้วอัตราการลดลงของอุณหภูมิในรอบการทำงานดังกล่าวก็มีการลดลงที่เร็วขึ้นเรื่อยๆ ทีละน้อยด้วยเช่นกัน แสดงให้เห็นถึงการลึกร้อนของอิฐทนไฟ ทำให้ตำแหน่งตรวจวัดนั้นใกล้เคียง กับน้ำเหล็กมากขึ้นการตอบสนองทางอุณหภูมิจึงเร็วขึ้น ในขณะที่แบบจำลองไม่พิจารณาให้มีการลึกร้อน อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละรอบจึงมีลักษณะไม่ต่างจากเดิมมากนัก

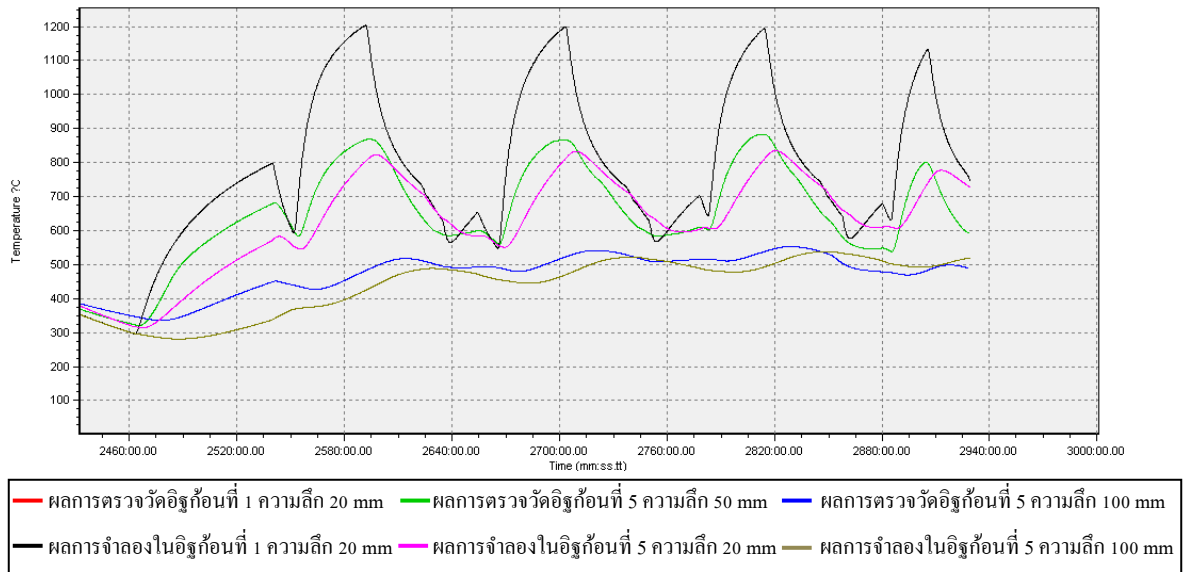


รูปที่ 7-16 ผลการจำลองและการตรวจวัดการแปรผันของอุณหภูมิในช่วง 12 รอบการทำงานต่อมา

3. ช่วง 4 รอบการทำงานสุดท้าย

ในช่วงนี้เป็นช่วงการทำงานช่วงสุดท้ายของอิฐทนไฟในเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีอายุการทำงานก่อนนำไปซ่อมแซมเมื่อใช้งานครบ 20 รอบการทำงาน ช่วงการทำงานนี้สามารถแสดงภาพขยายกระบวนการดังรูปที่ 7 – 17

ในช่วงสุดท้ายนี้จะปรากฏความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองและผลการตรวจวัดมาก เนื่องจากระหว่างกระบวนการต่างๆ ได้สะสมความคลาดเคลื่อนมาโดยตลอด นอกจากนั้นแล้ว ในช่วงนี้จะปรากฏลักษณะการตอบสนองความร้อนได้รวดเร็วมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยดูจากอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ในผลการทดลองจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิตั้งแต่ช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่มีอัตราการลดที่สูงเช่นเดียวกัน ทำให้สันนิษฐานได้ว่าการตอบสนองทางอุณหภูมิที่รวดเร็วนั้นมาจากการสึกกร่อนของอิฐทำให้ ตำแหน่งตรวจวัดใกล้กับผิวอิฐมากขึ้น ทำให้ความร้อนสามารถปรากฏผลจากการเปลี่ยนแปลงความร้อนได้รวดเร็วขึ้นนั่นเอง ซึ่งจากการตรวจสอบสภาพอิฐทนไฟในก้อนที่ฝัง Thermocouple พบว่ามีการสึกของเนื้ออิฐเข้าไปประมาณ 25 มิลลิเมตรเมื่ออิฐผ่านการใช้นานมาทั้งหมด 40 รอบการทำงาน จึงมีความเป็นไปได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่รวดเร็วขึ้นเป็นผลจากการสึกของอิฐทนไฟ

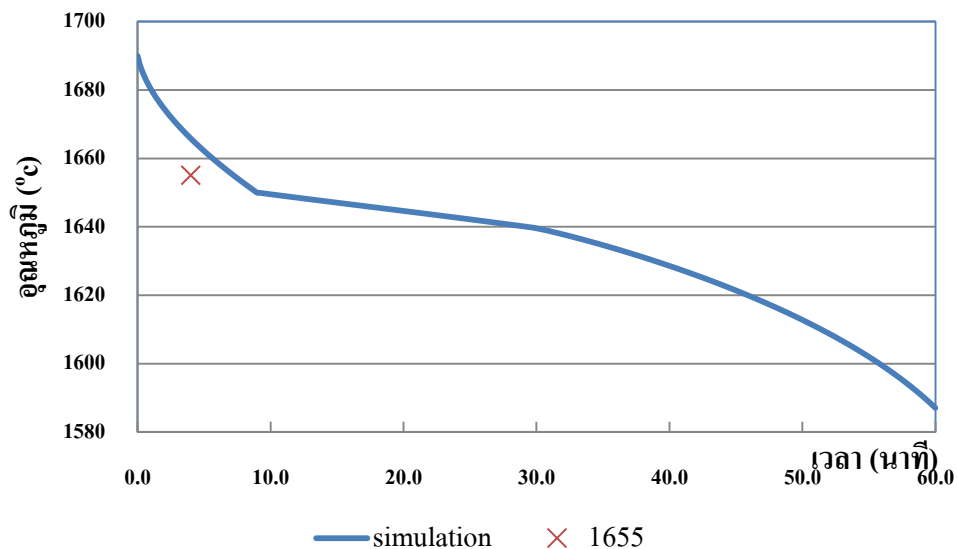


รูปที่ 7-17 ผลการจำลองและการตรวจวัดการแปรผันของอุณหภูมิในช่วง 12 รอบการทำงานต่อมา

7.1.7 ผลการวิเคราะห์การจำลองการแปรผันอุณหภูมิของน้ำเหล็ก

จากหัวข้อที่ 7.1.3 และ 7.1.4 ได้นำเสนอผลการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ได้จากการจำลองซึ่งอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ได้นั้นจะเกิดจากการแก๊สรวมกันกับสมการการเปลี่ยนแปลงความร้อนภายในผนังและกันเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่ในทั้ง 2 หัวข้อนั้นเป็นเพียงลักษณะผลการจำลองการแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กเฉพาะช่วงกระบวนการที่พิจารณาเท่านั้น เมื่อนำผลจากการจำลองที่ได้จากทั้ง 2 กระบวนการมาประกอบรวมเป็นแผนภูมิเดียวจะมีลักษณะปรากฏดังรูปที่ 7 – 18 ซึ่งจะอธิบายลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กในช่วงนาที่ที่ 334 – 391 ของการเก็บข้อมูล รวมทั้งสิ้น 61 นาที่ ซึ่งในช่วง 9 นาที่แรกของการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กจะมีลักษณะการลดลงของอุณหภูมิในอัตราการลดลงของอุณหภูมิมูลค่าลดลงเรื่อยๆ ทำให้เห็นถึงลักษณะโค้งในช่วงนี้ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กน้ำเหล็กจะถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศโดยตรง ลักษณะการแปรผันเลยปรากฏลักษณะการลดลงของอุณหภูมิในรูปกราฟกำลังสี่ แต่เมื่อเลขนาที่ที่ 9 ของการจำลองไปแล้ว น้ำเหล็กจะอยู่ในช่วงการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก ซึ่งระหว่างกระบวนการนี้เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกปิดด้วยฝา ตามแบบจำลองตามกระบวนการนี้ ปริมาณการแผ่รังสีจากน้ำเหล็กสู่บรรยากาศจะถูกลดทอนโดยเกราะกำบังรังสีทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ลดลงในช่วงนี้ไม่ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิที่มาจากกรแผ่รังสีได้ชัดเจน และเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการลดลงของอุณหภูมิของน้ำเหล็กจะมีอัตราลดที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้อุณหภูมิ

ของน้ำเหล็กตกลงอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากที่เวลาผ่านไปน้ำเหล็กจะถูกเทออกทำให้เหลือมวลภายในน้อยลง หากพิจารณาตามสมการที่ 4.41 จะเห็นว่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิจะแปรผกผันกับมวลของน้ำเหล็กนั่นเอง ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิในช่วงการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กจึงมีลักษณะดังปรากฏ แต่ที่รอยต่อระหว่างแบบจำลองทั้ง 2 ที่นาทีที่ 9 ของการจำลองนั้น จะปรากฏความไม่ต่อเนื่องของอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นเนื่องมาจากในการคำนวณผ่านแบบจำลองจะเป็นการเปลี่ยนแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณจากการขนถ่ายน้ำเหล็กกลายเป็นการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กทันที ทำให้ลักษณะอัตราการเปลี่ยนแปลงไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการนำฟามาปิดนั้นจะมีพลังงานที่ดูดซับเก็บสะสมไว้ในฝาด้วยจะทำให้ลักษณะอัตราการลดลงของอุณหภูมิในจากช่วงการขนถ่ายมาเป็นช่วงการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กเสมือนมีการแผ่รังสีให้วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อยๆ จากอุณหภูมิจนบรรยากาศ จึงจะได้ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กของทั้ง 2 กระบวนการที่ต่อเนื่อง



รูปที่ 7-18 ลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กจากการจำลองของน้ำเหล็กในช่วง
นาทีที่ 334 – 391 ของการเก็บข้อมูล

เนื่องจากการสร้างระบบควบคุมนั้นสิ่งที่ต้องการคือการกำหนดอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสมให้แก่ผู้ปฏิบัติงาน โดยที่อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ระบบควบคุมจะแสดงให้แก่ผู้ปฏิบัติงานนั้น ต้องมีความสัมพันธ์กันกับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่จำลองมาได้ เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายจากความไม่สัมพันธ์กันของสถานะทางความร้อนของน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็ก

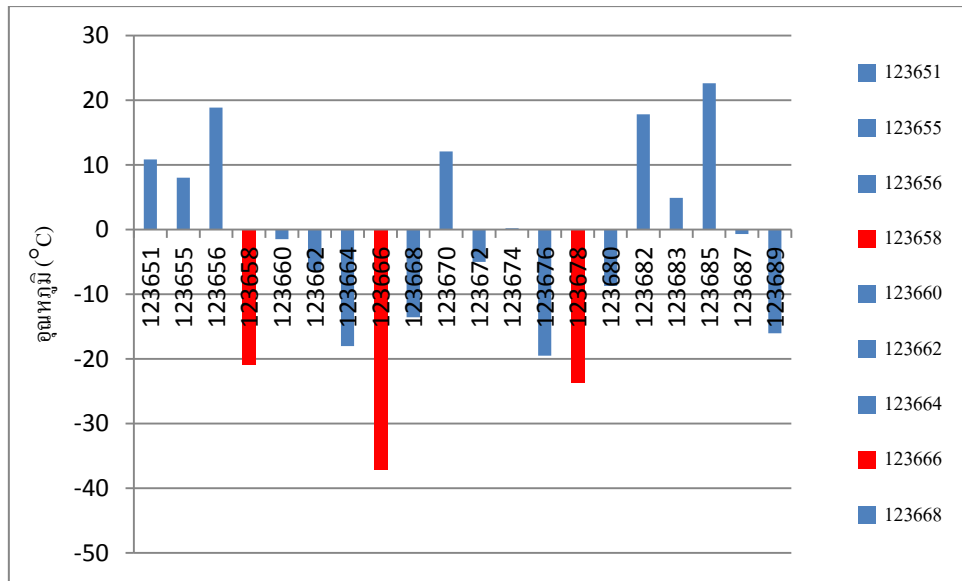
และที่สำคัญคือความแม่นยำของการจำลองว่าจะสามารถทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็กได้แม่นยำเพียงใด เพื่อช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถใช้ระบบควบคุมได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อการปฏิบัติงาน

ผลจากการตรวจวัดและการจำลองจึงต้องวิเคราะห์ความแม่นยำของการทำนายอุณหภูมิ น้ำเหล็ก โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับผลการตรวจวัดที่เวลาเดียวกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7 – 5 ซึ่งในตารางนี้ผลการตรวจวัดจะมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่สุดในรอบการทำงาน Heat No. 123666 ที่ผลการจำลองทำนายอุณหภูมิได้สูงกว่าการตรวจวัดซึ่งสูงกว่าถึง 37°C และทำนายอุณหภูมิได้ใกล้เคียงผลการตรวจวัดมากที่สุดที่รอบการทำงาน Heat No.123674 ที่ทำนายอุณหภูมิ น้ำเหล็กสูงกว่าแบบจำลองเพียง 0.2°C เท่านั้น แต่หากพิจารณาแล้ว Heat No. 123666 มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้เป็นลบนั้นก็คือยิ่งเวลาผ่านไปอุณหภูมิจะยิ่งเพิ่มขึ้นซึ่งไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงจึงไม่นำรอบการทำงานนี้มาพิจารณาวิเคราะห์ความแม่นยำด้วย ส่วนรอบการทำงาน Heat No.123658 และ 123678 มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ดำเนินไปดังที่ได้วิเคราะห์ในหัวข้อที่ 5.4.3 แล้ว รอบการทำงานต่างๆเหล่านั้นจะไม่นำมาพิจารณา(แสดงด้วยเซลล์สีชมพูใน ตารางที่ 7 – 5)

เมื่อไม่พิจารณารอบการทำงานดังกล่าวแล้วจะได้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแม่นยำของข้อมูลเป็น 16.08 และค่าความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ร้อยละ 95 อยู่ที่ 7.23°C

ตารางที่ 7-5 ตารางเปรียบเทียบผลการตรวจวัดและการจำลอง

Heat No.	ผลการตรวจวัด (°C)	ผลการจำลอง (°C)	ผลต่างอุณหภูมิ (°C)	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ต่อเวลา (°C/min)
123651	1655	1665.819	-10.8191	8.75
123655	1652	1659.999	-7.99903	8.5
123656	1650	1668.847	-18.8471	11.75
123658	1670	1649.04	20.95966	1.25
123660	1657	1655.501	1.498538	6.2
123662	1671	1664.629	6.370677	5.25
123664	1668	1649.97	18.03015	2.25
123666	1681	1643.897	37.10343	-2.75
123668	1665	1651.422	13.57789	4.25
123670	1673	1685.087	-12.087	8.8
123672	1639	1633.98	5.019974	5.2
123674	1644	1644.203	-0.20341	6.75
123676	1677	1657.494	19.50601	2.2
123678	1665	1641.306	23.69418	0.75
123680	1660	1651.287	8.713141	4.4
123682	1639	1656.813	-17.8132	9.8
123683	1676	1680.877	-4.87721	7.4
123685	1640	1662.602	-22.6018	12.75
123687	1650	1649.318	0.681968	6.25
123689	1665	1648.976	16.02431	2.5
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		16.08293	
	ค่าความเชื่อมั่นที่ 95%		7.231633	



รูปที่ 7-19 แผนภูมิเปรียบเทียบผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ตรวจวัดได้และจากการจำลอง

7.2 การวิเคราะห์ศักยภาพในการลดอุณหภูมิเทนน้ำเหล็ก

ในการวิเคราะห์การหาศักยภาพในการลดอุณหภูมิเทนน้ำเหล็กนั้นหากได้จากระเบียบวิธีดังแสดงในรูปที่ 7 – 18 นั้นคือเริ่มต้นจากค่าเงื่อนไขเริ่มต้นก่อนรับน้ำเหล็กที่คำนวณได้จากแบบจำลอง แทนค่าลงไปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยกำหนดให้อุณหภูมิน้ำเหล็กเริ่มต้นที่ 1700°C โดยป้อนค่าอุณหภูมิที่ต้องการกำหนดให้เป็นอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำเหล็กที่จะออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยในการวิเคราะห์นี้ได้พิจารณาอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่ควรออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กในทางปฏิบัติในภาคอุตสาหกรรมที่อยู่ที 1550°C โดยที่เพื่อค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นได้จากการคำนวณผ่านระบบควบคุม โดยการบวกอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่ควรออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กเพิ่มอีก 25°C ซึ่งพิจารณาจากค่าประมาณ 3 เท่าของค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ของอุณหภูมิที่โปรแกรมระบบควบคุมจะทำนายได้ ทำให้อุณหภูมิสุดท้ายที่ใช้พิจารณาเป็น 1575°C

เมื่อระบบควบคุมคำนวณอุณหภูมิเทนน้ำเหล็กที่ 1700°C แล้วได้ผลลัพธ์ที่ได้คืออุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กสูงกว่าอุณหภูมิ 1575°C โปรแกรมจะนำค่าผลลัพธ์ที่ได้ลบกับอุณหภูมิเป้าหมายนั่นก็คือ 1575°C ผลต่างที่ได้จะนำมาหารด้วยสองและหักลบออกจากอุณหภูมิเริ่มต้น 1700°C แล้วเริ่มต้นการคำนวณใหม่ ทำจนกระทั่งอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าอุณหภูมิเป้าหมายไม่เกิน 1°C โปรแกรมจึงจะหยุดและแสดงอุณหภูมิเทนน้ำเหล็กที่เหมาะสมของรอบการทำงานนั้น รายละเอียดของลักษณะการพิจารณาของ

โปรแกรมสามารถดูจากแผนภูมิสายงานซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 6.4.7 ส่วนผลซึ่งได้จากการ
 ทำนายอุณหภูมิเทน้ำเหล็กและการวิเคราะห์ศักยภาพของโปรแกรมนี้นี้แสดงได้ดังตารางที่ 7 – 6
 ตารางที่ 7-6 ผลการทำนายอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมและการวิเคราะห์ศักยภาพการประหยัด
 ของโปรแกรมควบคุม

Heat No.	อุณหภูมิเทน้ำเหล็ก จากการตรวจวัด (°C)	อุณหภูมิเทน้ำ เหล็กที่เหมาะสม (°C)	ศักยภาพ ที่ลดได้ (°C)	ศักยภาพความ ประหยัด (kWh)	ศักยภาพความ ประหยัด (฿)
123651	1690	1655	35	563.5	1690.5
123655	1686	1649	37	595.7	1787.1
123656	1697	1644	53	853.3	2559.9
123658	1675	1649	26	418.6	1255.8
123660	1688	1700	-12	-193.2	-579.6
123662	1692	1646	46	740.6	2221.8
123664	1677	1648	29	466.9	1400.7
123666	1670	1631	39	627.9	1883.7
123668	1682	1700	-18	-289.8	-869.4
123670	1717	1665	52	837.2	2511.6
123672	1665	1646	19	305.9	917.7
123674	1671	1650	21	338.1	1014.3
123676	1688	1648	40	644	1932
123678	1668	1649	19	305.9	917.7
123680	1682	1654	28	450.8	1352.4
123682	1688	1648	40	644	1932
123683	1713	1653	60	966	2898
123685	1691	1661	30	483	1449
123687	1675	1656	19	305.9	917.7
123689	1675	1652	23	370.3	1110.9
ค่าเฉลี่ย	1684.5	1655.2	29.3	471.73	1415.19
			ผลรวม	9434.6	28303.8

จากตารางที่ 7 – 6 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่ตรวจวัดได้จะอยู่ที่ 1684.5°C ในขณะที่อุณหภูมิเฉลี่ยของอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมที่หาได้จากการทำนายผ่านแบบจำลองจะอยู่ที่ 1655.2°C ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมที่ได้จากการทำนายนั้นมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิเทน้ำเหล็กเฉลี่ยในการปฏิบัติงานจริง แสดงว่าภาพรวมของการปฏิบัติงานจริงนั้นใช้อุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่สูง จึงทำให้เห็นว่าภาพรวมของการใช้งาน โปรแกรมระบบควบคุมมีศักยภาพในการลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็ก

เมื่อวิเคราะห์ในแต่ละรอบการทำงานศักยภาพของอุณหภูมิที่ลดได้มีค่าเฉลี่ยทุกรอบการทำงานเป็น 29.3°C แต่ในการประเมินนั้นจะมีรอบการทำงานที่ Heat No. 123660 และ 123664 จะมีศักยภาพการลดอุณหภูมิที่มีค่าเป็นลบ นั้นแสดงให้เห็นว่าในกรณีรอบการทำงานดังกล่าวนั้น ในการปฏิบัติงานจริงได้เทน้ำเหล็กต่ำกว่าอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมที่โปรแกรมคำนวณได้ หากใช้เกณฑ์ในการประเมินศักยภาพอุณหภูมิที่ลดได้เช่นเดียวกันกับรอบการทำงานอื่น จะแสดงว่าโปรแกรมควบคุมนี้ได้นะนำให้ผู้ปฏิบัติงานเทน้ำเหล็กสูงกว่าความเป็นจริง ซึ่งจะพิจารณาให้เป็นความสิ้นเปลืองเมื่อเทียบกับผลการตรวจวัดจากการปฏิบัติงานจริง

ส่วนการประเมินศักยภาพความประหยัดพลังงานของการใช้โปรแกรมในการคำนวณหาอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมนั้นจะพิจารณาผ่านสมการที่ (3.53) หรือสมการของ Köhle ซึ่งนำมาแสดงอีกครั้งในสมการที่ (6.1)

$$W_R = 300 \frac{kWh}{t} + 900 \frac{kWh}{t} \left(\frac{G_E}{G_A} - 1 \right) + 1600 \frac{kWh}{t} \frac{G_Z}{G_A} + 0.7 \frac{kWh}{t \cdot K} (T_A - 1600^\circ C) + 0.85 \frac{kWh}{t \cdot \min} t_c \quad (6.1)$$

$$- \left\{ 8 \frac{kWh}{m^3} M_G + 4.3 \frac{kWh}{m^3} M_L + 2.8 \frac{kWh}{m^3} M_N \right\}$$

จะเห็นว่าปริมาณการใช้ไฟฟ้าในเตาหลอมนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยอันได้แก่ มวลของเศษเหล็กที่ใส่ลงไป มวลของน้ำเหล็กที่เทออกมาได้ มวลของสารปรุงแต่งน้ำเหล็ก อุณหภูมิเทน้ำเหล็ก เวลาเทน้ำเหล็กรอบหนึ่งถึงอีกรอบหนึ่ง ปริมาณออกซิเจน เชื้อเพลิงเหลว และผงคาร์บอนที่ใช้ระหว่างการหลอม แต่เนื่องจากในเตาหลอมที่ทำการตรวจวัดนั้นไม่มีการใช้หัวเผาในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จึงไม่มีปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้ในหัวเผา ส่วนปริมาณสารปรุงแต่ง ออกซิเจน และผงคาร์บอนต่างก็ใช้เพื่อการปรับปรุงคุณภาพเหล็กซึ่งปริมาณที่ใส่จะสอดคล้องกับปริมาณและคุณภาพของเศษเหล็กที่ใส่เข้ามายังเตาหลอม และเนื่องจากเป็นการเปรียบเทียบรอบการหลอมเดียวกัน ดังนั้นปริมาณเศษเหล็กที่ใส่ในเตาหลอม ปริมาณน้ำเหล็กที่ได้จากเตาหลอม และเวลาเทน้ำเหล็ก

รอบหนึ่งถึงอีกรอบหนึ่งในรอบที่ทำการเปรียบเทียบนั้นต้องมีค่าเท่ากัน ทำให้ค่าตัวแปรต่างๆในสมการที่ (6.1) ที่จะใช้ในการเปรียบเทียบมีค่าเท่ากันหมด

ดังนั้นในการเปรียบเทียบผลการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในรอบการหลอมเดียวกันโดยที่ปัจจัยอื่นๆเหมือนกันปรับเพียงอุณหภูมิเทน้ำเหล็กจะทำให้เหลือเพียงพจน์อุณหภูมิเทน้ำเหล็กซึ่งมีสัมประสิทธิ์เป็น 0.7 นั่นคือในการเปรียบเทียบปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ลดได้ต่อตันน้ำเหล็ก โดยผลการประเมินศักยภาพความประหยัดพลังงานที่แสดงไว้ดังตารางที่ 7 – 6 นั้นพิจารณาโดยให้ปริมาณน้ำเหล็กที่เทได้นั้นมีมวลโดยเฉลี่ยที่ 23 ตัน ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมมีศักยภาพในการช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานควบคุมงานแล้วก่อให้เกิดความประหยัดโดยเฉลี่ย 471.73 kWh ต่อรอบการหลอม ซึ่งตลอดช่วงการเก็บข้อมูลจะสามารถลดพลังงานในการหลอมโดยรวมตลอด 20 รอบการทำงานได้ 9434.6 kWh หากพิจารณาให้อัตราค่าไฟฟ้ามีราคาที่ 3 บาทต่อkWh จะสามารถใช้ศักยภาพในการประหยัดพลังงานนี้มาพิจารณามูลค่าความประหยัดได้ 1415.19 บาทต่อรอบการทำงานโดยเฉลี่ย และตลอด 20 รอบการทำงานที่เก็บข้อมูลนี้จะมีศักยภาพมูลค่าความประหยัดอยู่ที่ 28,303.8 บาท หากพิจารณาต่อไปว่าเนื่องจากในแต่ละวันนั้นจะมีการปฏิบัติงานได้ 20 รอบการทำงานนั้นหมายความว่าในแต่ละวันที่มีการปฏิบัติงานปกติ โปรแกรมควบคุมมีศักยภาพในการสร้างมูลค่าความประหยัดคิดเป็นเงินจำนวน 28,303.8 บาทต่อวัน

เมื่อพิจารณาว่าในรอบปีมีการปฏิบัติงานจริงทั้งหมด 350 วัน มีรอบวันที่ปฏิบัติงานได้ 20 รอบการทำงานต่อวัน และร้อยละ 80 ของการปฏิบัติงานทั้งหมดเทน้ำเหล็กที่อุณหภูมิสูงกว่าที่โปรแกรมควบคุมจะทำนายได้ จะทำให้ในรอบปีจะศักยภาพที่สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายลงได้ประมาณปีละ 158 ล้านบาทต่อปี

7.3 ลักษณะโปรแกรมควบคุมที่พัฒนาขึ้น

ตามวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัยนี้คือการพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจให้แก่ผู้ปฏิบัติงานจริงได้ หลักการและวิธีการคำนวณทั้งหมดนั้นจะต้องถูกทำด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยแผนภูมิสายงานของการทำงานของโปรแกรมได้ถูกอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 6.4

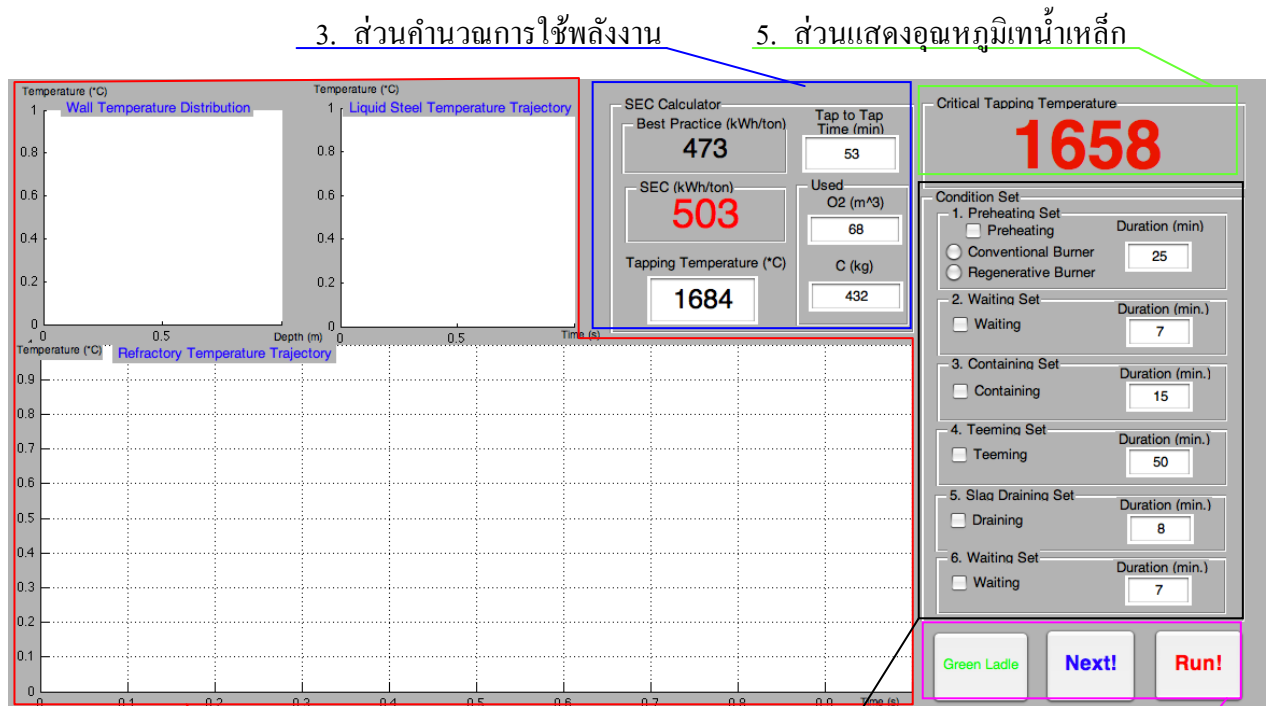
โปรแกรมควบคุมได้ที่ออกแบบมานั้นจะเป็นเพียงเครื่องมือสำหรับประเมินอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมให้แก่ผู้ปฏิบัติงานเพื่อใช้เป็นแนวทางในการควบคุมเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยผู้ปฏิบัติงานต้องป้อนข้อมูลต่างๆสำหรับการจำลองให้แก่โปรแกรมควบคุม เพื่อใช้ในการประเมินอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB R2009b for Mac ในการคำนวณการจำลองในกระบวนการทั้งหมดที่ผ่านมา และใช้ชุดอุปกรณ์ GUIDE ของโปรแกรม MATLAB นี้ ในการออกแบบส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ โดยลักษณะของโปรแกรมควบคุมที่ออกแบบได้ จะมีส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ดังรูปที่ 7 – 20 โดยจะแบ่งส่วนของโปรแกรมออกเป็นทั้งหมด 5 ส่วนได้แก่ 1. ส่วนจอแสดงผล 2. ส่วนตั้งเงื่อนไข 3. ส่วนคำนวณการใช้พลังงาน 4. ส่วนออกคำสั่ง และ 5. ส่วนแสดงอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม

โดยโปรแกรมจะมีลำดับขั้นตอนการใช้งานดังนี้

1. เลือกตัวปฏิบัติการที่ต้องการสั่งให้โปรแกรมทำการจำลองในส่วนตั้งเงื่อนไข โดยกดเลือกกล่องสี่เหลี่ยมหน้าชื่อกระบวนการให้เป็นเครื่องหมาย ✓
2. ตั้งเวลาในการจำลองแต่ละกระบวนการในช่อง Duration (min) ของกระบวนการที่ต้องการจำลอง
3. เพื่อการคำนวณปริมาณพลังงานที่ใช้ในการหลอมรอบนั้น จะต้องใส่เวลาที่ใช้ในแต่ละรอบการเทของเตาหลอมลงไปยังช่อง Tap to Tap Time (min) ปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการหลอมลงในช่อง O₂(m³) ปริมาณถ่านที่ใช้ในการหลอมลงในช่อง C (kg) ในกรอบ Used ของส่วนคำนวณการใช้พลังงาน และใส่อุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่แท้ปฏิบัติจริงลงไป ในช่อง Tapping Temperature (*C)
4. ปรับปุ่มซ้ายสุดของส่วนออกคำสั่งให้เป็นสถานะของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ต้องการ หากปุ่มขึ้นเป็น Green Ladle โปรแกรมจะคำนวณในกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กก่อใหม่ หากต้องการเปลี่ยนให้สถานะของเบ้ารับน้ำเหล็กผ่านการใช้งานมาแล้วให้กดปุ่มปุ่มนี้ ตัวอักษร Green Ladle จะเปลี่ยนเป็น Used Ladle แสดงถึงการตั้งค่าสถานะให้เบ้ารับน้ำเหล็กที่จะมาพิจารณาเป็นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

5. กดปุ่ม Run! ซึ่งอยู่ทางขวาสุดของส่วนออกคำสั่ง เพื่อออกคำสั่งให้โปรแกรมเริ่มต้นการคำนวณ และเมื่อโปรแกรมสิ้นสุดการคำนวณแล้ว การแปรผันของอุณหภูมิภายในผนังข้างของเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกแสดงในจอ Refractory Temperature Trajectory การแจกแจงอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดกระบวนการจะถูกแสดงในจอ Wall Temperature Distribution และการแปรผันของอุณหภูมิน้ำเหล็กจะถูกแสดงในจอ Liquid Steel Temperature Trajectory ในส่วนจอแสดงผล และผลลัพธ์อีกค่าหนึ่งที่ได้จากการคำนวณคืออุณหภูมิเหน้าเหล็กที่เหมาะสมจะถูกแสดงไว้ในช่อง Critical Tapping Temperature ในส่วนแสดงอุณหภูมิเหน้าเหล็กที่เหมาะสม
6. หากต้องการเปลี่ยนเงื่อนไขการจำลองการปฏิบัติงานในรอบการทำงานเดิมซ้ำอีก โดยเปลี่ยนเงื่อนไขต่างๆ สามารถทำได้โดยกระทำตามขั้นตอนที่ 1 – 5 อีกรอบ แต่หากต้องการไปจำลองการปฏิบัติงานในรอบการทำงานต่อไปให้กดปุ่ม Next ซึ่งอยู่ตรงกลางส่วนออกคำสั่ง โปรแกรมจะนำค่าการแจกแจงอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดการทำงานของการจำลองรอบการทำงานที่ผ่านมามาเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของรอบการทำงานนี้



1. ส่วนจอแสดงผล

2. ส่วนตั้งเงื่อนไข

4. ส่วนออกคำสั่ง

รูปที่ 7-20 ลักษณะส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ของต้นแบบระบบควบคุมที่ได้ออกแบบ

ในการศึกษาวิจัย

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผล

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษารูปแบบและวิธีที่เหมาะสมในการควบคุมการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กพร้อมกับการทำงานของเตาหลออาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน และสร้างต้นแบบระบบควบคุมเพื่อเป็นแนวทางให้เจ้าหน้าที่ควบคุมเตาควบคุมการทำงานเพื่อการประหยัดพลังงาน

โดยการศึกษาเริ่มต้นจากการพิจารณาลักษณะของกระบวนการที่ต้องการสร้างระบบควบคุม และพิจารณาลักษณะของพลังงานในกระบวนการ เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการจำลองสถานะทางความร้อนของกระบวนการ แล้วจึงตรวจวัดจากการปฏิบัติงานจริง เพื่อหาค่าที่จำเป็นสำหรับการสอบเทียบตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น เมื่อแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้รับการตรวจสอบจากการสอบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดแล้ว จึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปออกแบบโปรแกรมควบคุม และใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นคำนวณหาศักยภาพการประหยัดที่จะเกิดขึ้นได้ในรอบการทำงานที่มีการเก็บข้อมูล

ผลการศึกษานี้พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ออกแบบได้ให้ผลการแปรผันของอุณหภูมิในเป่ารับน้ำเหล็กจากการจำลองที่ใกล้เคียงกับผลจากการตรวจวัดในแต่ละกระบวนการ และมีแนวโน้มโดยรวมของการจำลองตลอดการปฏิบัติงานของเป่ารับน้ำเหล็กสอดคล้องกับแนวโน้มโดยภาพรวมของการปฏิบัติงานจริง แบบจำลองสถานะทางความร้อนของเป่ารับน้ำเหล็กที่ได้จึงมีความเหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในการสร้างระบบควบคุม

ส่วนผลการจำลองการแปรผันของอุณหภูมิในกระบวนการเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจะมีค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ในการทำนายอุณหภูมิในเหล็กผ่านแบบจำลองนี้อยู่ที่ 7.23°C

เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ออกแบบขึ้นประเมินศักยภาพความประหยัดที่สามารถทำได้ในรอบการทำงานที่มีการเก็บข้อมูลพบว่าในแต่ละรอบการทำงานจะสามารถลดอุณหภูมิในเหล็กได้ถึงร้อยละ 29.3 $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งก่อให้เกิดความประหยัดโดยประมาณ 471.73 kWh ต่อรอบการ

หลอม ซึ่งคิดเป็นมูลค่า 1,415.19 บาทต่อรอบการหลอม หากประเมินผลประหยัดที่สามารถเกิดขึ้นได้ใน 20 รอบการหลอมที่มีการเก็บข้อมูลจะสามารถลดปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมลงได้ 9434.6 kWh คิดเป็นมูลค่า 28,303.8 บาท

8.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากการศึกษาวิจัยสามารถเรียบเรียงเป็นข้อ ได้ดังนี้

1. ในการคำนวณการแปรผันอุณหภูมิได้ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องโดยใช้สมการแบบชัดเจนซึ่งจะมีข้อจำกัดในการคำนวณที่จะเกิดความไม่เสถียรขึ้นในกรณีที่คำนวณอุณหภูมิจุดต่อที่มีผลจากอุณหภูมิสูงมากมากระทำกับจุดต่อ ทำให้หากเงื่อนไขในการจำลองเปลี่ยนแปลงไป เช่นอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้สูงกว่าฟังก์ชันที่ใช้ในการศึกษานี้มาก ระบบจะให้ผลการคำนวณที่ผิดพลาด ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยลดขั้นเวลาให้เล็กลงซึ่งจะทำให้เวลาในการคำนวณนานขึ้น หรือการใช้สมการแบบปริยายที่มีความซับซ้อนมากกว่าแบบชัดเจน
2. ในการคำนวณตามขั้นเวลาจะมีการคำนวณซ้ำกระบวนการเดิมเรื่อยๆจนถึงระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งในแต่ละขั้นเวลาจะมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากลักษณะของแบบจำลองที่ไม่ตรงกับความเป็นจริงทุกประการ และการปัดเศษค่าตัวเลขต่างๆ ความคลาดเคลื่อนเหล่านี้ยิ่งระยะเวลาที่กำหนดให้โปรแกรมคำนวณยิ่งนานความคลาดเคลื่อนจะค่อยๆ สะสมมากขึ้น โดยไม่สามารถลบล้างความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้ได้ แนวทางในการแก้ไขปัญหานี้สามารถทำได้โดยการใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดมาปรับแก้ค่าที่ได้จากการคำนวณ เพื่อใช้ในการคำนวณในแต่ละรอบการทำงาน หรือให้มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสถานะทางความร้อนจริงของเบ้ารับน้ำเหล็กอยู่ตลอดเวลา และใช้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดมาคำนวณหาอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมควบคู่กับข้อมูลที่รับมาได้จากการตรวจวัดตลอดเวลา
3. จากการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการจำลองและการตรวจวัดพบว่า การสีกร่อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กส่งผลต่อสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กด้วย ดังนั้นการสีกร่อนควรถูกนำมาพิจารณาประกอบการคำนวณเพื่อให้ได้ผลการจำลองที่แม่นยำมากขึ้นด้วย ซึ่งหากมีการศึกษาการสีกร่อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่เกิดขึ้นในวัสดุผนังประเภท

ต่างๆจะสามารถนำมาใช้ประกอบการสร้างระบบควบคุมจะทำให้ระบบควบคุมมีความแม่นยำและรองรับเบ้ารับน้ำเหล็กได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น

4. เนื่องจากอุณหภูมิหน้าเหล็กที่ตรวจวัดในเบ้ารับน้ำเหล็กใช้ค่าจากการตรวจวัดที่มีอยู่โดยปกติของการปฏิบัติงานในโรงงาน ซึ่งในแต่ละรอบการทำงานมีเพียง 1 ครั้ง ทำให้ค่าที่ได้นำมาสอบเทียบกับการจำลองในแต่ละรอบการทดลองไม่สามารถอธิบายลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิหน้าเหล็กระหว่างกระบวนการได้ หากมีการตรวจวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กระหว่างกระบวนการต่างๆมากยิ่งขึ้นจะทำให้สามารถปรับปรุงแบบจำลองให้สอดคล้องกับความเป็นจริงได้มากยิ่งขึ้น
5. ระบบควบคุมที่พัฒนาได้พัฒนาขึ้นโดยยึดกระบวนการทำงานของโรงงานที่ทำการศึกษาโปรแกรมจึงไม่รองรับการใช้งานในโรงงานอื่นที่มีกระบวนการการทำงานที่แตกต่างออกไป เช่นกระบวนการผลิตที่มีการใช้เตาหลอมเบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle Furnace) การคนด้วยอาร์กอน (Argon Stirring) และกระบวนการผลิตเหล็กขั้นทุติยภูมิอื่นๆ (Secondary Steelmaking) ดังนั้นการศึกษาเพื่อออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการอื่นๆ จะสามารถทำให้โปรแกรมควบคุมนี้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานกับโรงงานที่มีกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันมากขึ้น
6. สมการที่ใช้ในการคำนวณพลังงานที่ใช้ในกระบวนการหลอมคำนวณจากสมการของ Köhle ซึ่งเป็นสมการที่สร้างจากสถิติในเยอรมนี หากสร้างสมการในลักษณะเช่นเดียวกับของ Köhle แต่ใช้สถิติในโรงงานที่ติดตั้งโปรแกรมจะทำให้การประเมินพลังงานที่ใช้ในกระบวนการใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น โดยวิธีการสร้างสมการของ Köhle ซึ่ง อธิพิพล เตียวณิชย์ และคณะ (2554) ได้แสดงวิธีการสร้างไว้แล้ว
7. เนื่องจากโปรแกรมควบคุมนี้มีความสามารถในการทำนายสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในกระบวนการต่างๆได้ จึงมีศักยภาพในการพัฒนาต่อยอดให้เป็นระบบจัดการเบ้ารับน้ำเหล็กที่จะพิจารณาว่าเบ้ารับน้ำเหล็กสามารถนำไปใช้รับน้ำเหล็กโดยไม่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กได้ ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดค่าเชื้อเพลิงในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก
8. เมื่อโปรแกรมระบบควบคุมสามารถระบุอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมได้ ดังนั้นความประหยัดที่สามารถเกิดขึ้นได้อีกทางหนึ่งนอกจากการลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กให้เป็น

อุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กที่เหมาะสมแล้ว คือการปรับรูปแบบการหลอมอุณหภูมิต่ำให้มีความเหมาะสมก่อนเหนือน้ำเหล็กเท่านั้น เนื่องจากการที่ต้องอุณหภูมิต่ำให้มีความเหมาะสมสูงอยู่เป็นเวลานานจะสิ้นเปลืองมากกว่าการเลี้ยงอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กไว้ที่อุณหภูมิต่ำแล้วค่อยเพิ่มอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กขึ้นเมื่อ

9. เนื่องจากอุณหภูมิที่จำเป็นต้องควบคุม โดยแท้จริงแล้วคืออุณหภูมิภายในแม่พิมพ์ทองแดงในสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง เนื่องจากอุณหภูมิในแม่พิมพ์ที่จุดนี้ต้องสัมพันธ์กับเครื่องจักรที่ใช้ในการหล่อแบบต่อเนื่อง ดังนั้นการสร้างการจำลองอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กจนถึงขั้นตอนการหล่อนี้ จะทำการควบคุมอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กส่งผลต่อภาพรวมของกระบวนการโดยรวมได้ครบกระบวนการที่ต้องควบคุมอุณหภูมิ

รายการอ้างอิง

- [1] Saunders LM. Preheating and controlled thermal cycling of steel handling ladles. In: 66th Steelmaking Conf Proc. vol.66. pp. 69-75., Iron & Steel Society, 1983
- [2] Joyce K.. New techniques to improve the efficiency of ladle preheater and billet reheating furnace. The United Nations Development Programme, NEA, Thailand. 1989, Cited in B.Mohanty and J. Satayayut. Dynamic Model for Ladle Preheater Performance Evaluation. International journal of energy research, 1992
- [3] B. Mohanty and J. Satayayut.. Dynamic Model for Ladle Preheater Performance Evaluation. International journal of energy research 16 (1992): 51 – 60.
- [4] สมศักดิ์ คงโชติ. การศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในการอุ่นถังรับน้ำเหล็กในอุตสาหกรรมหลอมโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2536.
- [5] J. C. Ho and T. T. Chandratilleke. Thermodynamic Analysis of an electric Arc Furnace. Energy Convers. Mgmt 31 no.2 (1990): 179 - 186.
- [6] S. Chirattananon and Z. Gao. A Model for The Performance Evaluation of The Operation of Electric Arc Furnace. Energy convers. Mgmt 37 no.2 (1995): 161 - 166.
- [7] Ünal Çamdalı, Murat Tunç, Ahmet Karakaş. Second Law Analysis of Thermodynamics in The Electric Arc Furnace at A Steel Producing Company. Energy Conversion and Management 44 (2002): 961 - 973.
- [8] S. Köhle. Stahl und Eisen 112, no. 11, (1992): 59 – 67.
- [9] S. Köhle. Proc. 7th Europ. Electric Steelmaking Conf., 26 – 29 May 2002 Venice, Italy.

- [10] H. Pfeifer and M. Kirschen. Thermodynamic Analysis of EAF Energy Efficiency and Comparison with A Statistical Model of Electric Energy Demand. Institute of Industrial Furnaces and Heat Engineering in Metallurgy, RWTH Aachen, Germany.
- [11] T. P. Fredman and H. Saxen. Model for Temperature Profile Estimation in the Refractory of a Metallurgical Ladle. Metallurgical and Materials Transaction 29B (1997): 651 – 659.
- [12] T. P. Fredman, J. Torrkulla and H. Saxen. Two-Dimensional Dynamic Simulation of the Thermal State of Ladles. Metallurgical and Materials Transaction 32B (1998): 323 – 330.
- [13] J.L. Xia and T. Ahokainen. Transient Flow and Heat Transfer in a Steelmaking Ladle during the Holding Period. Metallurgical and Materials Transaction B 32B, (2001): 733 – 741.
- [14] T. P. Fredman. Heat Transfer in Steelmaking Ladle Refractories and Steel Temperature. Heat Scandinavian journal of metallurgy 29 (2000): 232 – 258.
- [15] O. Volkova and D. Janke. Modelling of Temperature Distribution in Refractory Ladle Lining for Steelmaking. ISIJ International 43 no.8 (2003): 1185 - 1190
- [16] A. Zimmer, A. N. C. Lima, R. M. Trommer, S. R. Braganca and C. P. Bergmann. Heat Transfer in Steelmaking Ladle. Journal of iron and steel research, International 15(3) (2008): 11 -14.
- [17] P. Egerton, J. A. Howarth, G. Poots and S. Taylor-Reed.. A Theoretical Investigation of Heat Transfer in A Ladle of Molten Steel During Pouring. International journal of Heat Mass Transfer, vol. 22, (1979): 1525 – 1532.
- [18] J. W. Hlinka. Water Model for The Quantitative Simulation of Heat and Fluid Flow in Liquid Steel Refractory Systems. Homer Research Laboratory, Bethlehem Steel Corporation, USA. 1976

- [19] J. Szlekely and R. G. Lee. The Effect of Slag Thickness on Heat Loss from Ladles Holding Molten Steel. *Trans. A.I.M.E.* 1968
- [20] P. Egerton, J. A. Howarth and G. Poots.. The Effect of Nozzle Erosion on Heat Transfer in A Ladle of Molten Steel During Pouring. *International journal of Heat Mass Transfer* 24 (1980): 557 – 562.
- [21] P. R. Austin, J. M. Camplin, J. Herbertson and I. J. Taggart. Mathematical Modelling of Thermal Stratification and Drainage of Steel Ladles. *ISIJ International* 32 no.2 (1991): 196 – 202.
- [22] C. E. Grip, K. O. Jonsson, S. Eriksson, L. Jonsson, P. Jonsson and Y. Pan. Theoretical and Practical Study of Thermal Stratification and Drainage in Ladles of Different Geometry. *Scandinavian journal of metallurgy* 29, (2000): 30 – 38.
- [23] W. Hoppmann, F. N. Fett, G. Hsu and L. Fiege. *Stahl und Eisen* 109 (23) (1989): 1177 – 1186.
- [24] R. Fachberger and A. Erlacher. Applications of wireless SAW sensing in the steel industry, *Procedia Engineering* 5 (2010): 224 – 227.
- [25] R. J. Fruehan et al. *The Making, Shaping, Treating of Steel*, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, USA. 1998
- [26] Material data sheet, SK38, The Siam Refractory Industry Co., LTD., Bangkok, Thailand
- [27] ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น. การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

- [28] X. F. Liu, J.Y. Zhang, W.D. Du, Q.J. Zhai and Q. Li. Numerical Simulation of Coupled Molten Steel Flow and Temperature Fields in Compact Strip Production Casting. Journal of iron and steel research 14(3) (2007): 20 – 25.
- [28] จักรารุช จรุงสารทูล. การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นถังถ่ายน้ำเหล็กโดยการใช้อุณหภูมิแบบรีเจนเนอเรทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [29] อธิพิณ เตียววณิชย์ และคณะ. คู่มือแนวทางปฏิบัติสู่ความเป็นเลิศ (Best Practice) สำหรับกระบวนการผลิตเหล็กกล้าจากเศษเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า. ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และกรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, 2554.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูล

Data Logger



Tpaq21

8 and 10 channel – high accuracy data logger

130,000 data readings over 10 selectable channels make the Tpaq21 the most powerful, accurate and in-depth analysis tool available.

Variable sampling intervals and multiple event programming provides detailed analysis where heat treatment processes are followed by fast moving sections of the product temperature profile, such as gas or water quenches.

The Tpaq21 is equally at home in ceramics processes, such as brick and sanitaryware firing, where long duration runs at high ambient temperatures call for high memory capacity and rugged electronics. Combined with a built in RF transmitter to see these processes in real time, this is an ideal data logger for all applications.

- Ten thermocouple channels for maximum data collection on each run
- Huge memory capacity: 130,000 data points for detailed process analysis
- Sampling intervals down to 0.1 seconds to collect maximum data in minimum time
- High accuracy: $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.4^{\circ}\text{F}$) for compliance to tight specifications
- Hot data protected by non-volatile memory or software warning, if reset is attempted before download
- USB and RS232 communication for rapid data download to laptops
- Radio Frequency (RF) telemetry or hard wired data acquisition for monitoring in real time with full analysis functions and alarms to alert, if the process is out of specification
- Four status LED's to show the exact logger activity after disconnecting from the computer
- Push start/stop buttons for easy user control
- Two battery types for operation in normal and high ambient temperatures
- Rugged industrial case and electronics allows operation in harsh furnace and kiln environments where dust, pressure or vacuum conditions occur
- 'Multiple events' allows sampling interval change during the run – ideal for water and gas quench processes
- Reset by start button after download for speed and simplicity

Confirm your furnace is in compliance with AMS 2750D NADCAP

The Datapaq® Insight™ Survey Software for Furnace Tracker® confirms compliance to all required specifications, plus additional features to make conformity easy.

AMS 2750D Requirements

- **Wizard-driven Setup Logger Connection Factors** – Set up factors and save them for easy application to future surveys. Prompts direct you to perform this required step.
- **Calculate Stability** – Over-shoot alarm and three selectable alerts tell you when stability is reached.
- **Correction Factors** – Software confirms both data logger and thermocouple corrections have been applied.
- **Complete AMS 2750D documentation** – One-click full report saves time while maintaining consistency.
- **Password Protection** – Meets required security requirement
- **Import from Clipboard** – Easily import control thermocouple data into survey package.
- **Full Audit Trail** – Guaranteed traceability of data

Data Logger

TECHNICAL SPECIFICATIONS



SPECIFIC THERMOCOUPLE TYPES

Measuring Range	Accuracy	Resolution	Socket Color
Type K -100°C* to 1370°C (-148°F to 2498°F)	±0.3°C (±0.5°F)**	0.1°C (0.2°F)	Green ■
Type N -100°C* to 1300°C (-148°F to 2372°F)	±0.4°C (±0.7°F)**	0.1°C (0.2°F)	Pink ■
Type R 0°C to 1760°C (32°F to 3200°F)	±1.0°C (±1.8°F) @ 200°C (392°F) ±0.8°C (±1.4°F) @ 1000°C (1832°F)	0.1°C (0.2°F)	Orange ■
Type S 0°C to 1760°C (32°F to 3200°F)	±1.0°C (±1.8°F) @ 200°C (392°F) ±0.8°C (±1.4°F) @ 1000°C (1832°F)	0.1°C (0.2°F)	Orange ■
Type B 55°C to 1815°C (32°F to 3200°F)	±3.0°C (±5.4°F) @ 400°C (752°F) ±1.0°C (±1.8°F) @ 1500°C (2732 °F)	0.1°C (0.2°F)	Grey ■
Type J 0°C to 800°C (32°F to 1472°F)	±0.2°C (±0.4°F)	0.1°C (0.2°F)	Black ■

*Using sampling interval >0.8 seconds over range shown
** Contact Datapaq for accuracy at -100°C to -190°C (-148°F to -310°F)

SPECIFIC LOGGER TYPES

Operating Temperatures	Normal		High	
	TP2086	TP2016	TP2186	TP2116
Model Number*	TP2086	TP2016	TP2186	TP2116
Number of Channels	8	10	8	10
Memory (data points)	130,000			
Maximum Operating	70°C (158°F)		110°C (230°F)	
Battery Type	NiMH rechargeable		VHT Lithium	
Maximum Battery Life**	340 hours between charges		250 hours	
Sampling Interval:				
No Telemetry	0.1 sec - 50 mins	0.1 sec - 50 mins	0.1 sec - 50 mins	0.1 sec - 50 mins
Hardwired Telemetry	1 sec - 50 mins	1 sec - 50 mins	1 sec - 50 mins	1 sec - 50 mins
RF Telemetry	n/a	2 secs - 50 mins	n/a	3 secs - 50 mins
Maximum Operating Pressure at 20°C (68°F)	20 bar/290 psi			
Minimum Operating Pressure at 20°C (68°F)	10 ⁻⁵ millibar			

*Model number shown is for type K thermocouples only other types have different model numbers.
** Maximum battery life depends on sampling interval, operating temperature and use of RF telemetry.

Case Size (all loggers)

Length: 200 mm (7.8 in)
Width: 98 mm (3.8 in)
Height: 20 mm (0.7 in)

General Information

Logger Start By: Manual (button), temperature (rising or falling) or time
Programmable Events: Up to 8 sampling interval changes possible per run, trigger by rising or falling temperature after first event
Hot Data Protection: By non-volatile memory, and software warning if reset attempted before download
Communication: Via USB or serial port for laptop computers
Logger Reset: Possible after download by start button (uses same run parameters)

The Worldwide Leader in Temperature Profiling



Europe and Asia
DATAPAQ Limited,
Deanland House, 160 Cowley Road,
Cambridge CB4 0GU, UK
Tel: +44 (0)1223 423 141
Fax: +44 (0)1223 423 306
E-mail: sales@datapaq.co.uk
Web: www.datapaq.com

North and South America
DATAPAQ Inc,
187 Ballardvale Street,
Wilmington, MA 01887, USA
Tel: +1 978 988 9000
Fax: +1 978 988 0666
E-mail: sales@datapaq.com
Web: www.datapaq.com

Germany
DATAPAQ GmbH,
Valdorfer Straße 100
D-32602 Vlotho, Deutschland
Tel: +49 5733 9107 0
Fax: +49 5733 9107 27
E-mail: sales@datapaq.de
Web: www.datapaq.de



www.datapaq.com
© 2011 Datapaq (Trade) Ltd. All Rights Reserved.
Datapaq, the Datapaq logo and Datapaq Trade Mark are registered trademarks of Datapaq. Specifications subject to change without notice.

Thermocouple



DATAPAQ®
A Fluke Company

Furnace Tracker® Kiln Tracker®

Thermocouple cables – designed and tested to last longer and provide greater flexibility

- Various thermocouples available for high temperature applications in the heat treatment and ceramic industries
- Specified to ASNI MC96.1 Special Limits of Error $\pm 0.4\%$ or $\pm 1.1^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2^{\circ}\text{F}$) whichever is greater
- Type N can be supplied for Furnace Survey applications

FURNACE THERMOCOUPLE RANGE

Type K 1.5 mm (0.05 in) diameter mineral insulated

For all general furnace profiling applications. Nicrobel sheath protects against electrical 'noise' and furnace atmosphere.

Probe insulation material	Nicrobel 'D'
Maximum operating temperature	1250°C (2282°F)
Termination	Miniature plug
Hot junction	Insulated

Type K 3.0 mm (0.1 in) diameter mineral insulated

For high temperature steel re-heat applications. The larger diameter is less prone to shunt errors, while retaining flexibility for set-up.

Probe insulation material	Nicrobel 'D'
Maximum operating temperature	1300°C (2372°F)
Termination	Miniature plug plus PTFE tails
Hot junction	Insulated

Type K 'Nextel' insulated

Best for low temperature applications or where fast response from open junction is needed (e.g. TV tube 'frit sealing'.) No resistance to furnace atmosphere (e.g. carburizing), or electrical 'noise'.

Probe insulation material	Braided 'Nextel' fiber
Maximum operating temperature	1000°C (1832°F)
Termination	Miniature plug
Hot junction	Open

Type N 2.0 mm (0.07 in) diameter mineral insulated

For furnace survey applications. Type N is less susceptible to oxidation and in some circumstances can be re-used for surveys.

Probe insulation material	Nicrobel 'D'
Maximum operating temperature	1250°C (2282°F)
Termination	Miniature plug
Hot junction	Insulated

Transmitter



TM21 Radio Telemetry System

Live real-time temperature data direct from your thermal process







The Datapaq[®] TM21 radio telemetry system utilizes the latest radio-frequency technology to allow data transmission from the data logger in real time. As the Datapaq system travels through the process, product and process temperature data can be viewed, analyzed and reported instantaneously. This technology can be applied to monitoring key thermal processes in most industrial heating applications.

SYSTEM FEATURES

- System can be tailored to meet your specific process requirements
 - Batch Process(es) - Simple primary receiver kit
 - Demanding Conveyorized Processes - Primary receiver complemented with add-on modular secondary receivers
- Automatic frequency selection from software, minimizing interference and maximizing signal quality
- Intelligent listen-before-transmit feature enables the system to operate with multiple loggers on the same transmitting frequency and data collection with one installation of Datapaq Insight[™] software
- Receivers connected in series with low-loss RS485 digital communications bus, maximizing signal strength
- Comprehensive on screen real time system diagnostics reporting signal status for each transmitting logger and receiver
- Transmission performance optimized for high-temperature operation with internal self-calibration routines
- The radio system has full approval to geographical regulations (In EU, CAN, USA and Japan)
- Ultra low power consumption extends battery life and operating life
- In-logger data storage backs up transmitted data ensuring integrity of data

FEATURES AND BENEFITS

Rapid QA – Know that your product has been thermally processed to specification before the Datapaq system has even exited the process.

Improve the productivity of any batch process – Know when critical product temperature has been achieved and allow the process to be completed or moved on to the next phase. Optimize cycle times with confidence.

Rapid fault-finding – See immediately when process problems are being experienced without having to wait until the completion of the process. Allow corrective action earlier, saving time and reducing possible scrap.

Improve efficiency of process optimization – Use live data to view the effect of any process-parameter changes on the temperature profile instantly.

Transmitter

TECHNICAL SPECIFICATIONS

TM21 Transmitter (TX1401)

Transmitter fitted inside data logger

Tpaq21 logger range	10 Channel Type K, N, R, S, B, 70°C & 110°C (158°F to 230°F) Operation
Multipaq21 logger range	8 Channel Type K & T
Frequency ranges*	Euro 434.065-434.740 MHz USA 463.525-463.975 MHz Japan/China 429.275-429.725 MHz

* Contact Datapaq for frequency ranges for other approved countries

Operating Temperature Range	-20°C to 110°C (-4°F to 230°F)
Transmission Range	200 m (656 ft) "in open field conditions"
Max Number of Transmitters per System	6
Sampling Interval Range	1 sec to 10 min
Interleaving Limits	10
Approvals*	EU-CEPT/ERC/70-03E USA-FCC CFR 47 Part 90 Japan-ARIB STD-T67 China-CMII-2010D5117

TM21 Primary Receiver (Euro RX4200, USA RX4100, Japan RX4000)

Primary Receiver with integral USB comms to PC. Powered by CH0070. Requires TM0160 RS485 terminator if used in isolation. Operates with helical-coil receiver antenna RX1010.

Dimensions (H x W x L)	44 x 139 x 98 mm (1.7 x 5.5 x 3.9 in)
Frequencies - To match transmitter	
Operating Temperature Range	0°C to 50°C (32°F to 122°F)
2-line 16-character status LCD	
On board status LED	

TM21 Secondary Receiver (Euro RX4201, USA RX4101, Japan RX4001)

Secondary receiver connected in series to the TM21 primary receiver with RS485 communication cable (10 to 100 m / 32 to 328 ft).

Employs UGEF unity-gain end-feed antenna (RX1023 / RX1024)	
Dimensions (H x W x L)	44 x 139 x 98 mm (1.7 x 5.5 x 3.9 in)
Operating Specification as TM21 primary receiver (see above)	
Maximum number of secondary receivers in one system	9
On board status LED	
Receiver Antenna Stand RX1020	
Adjustable antenna stand used to support both UGEF antenna and receiver unit	
UGEf Antenna and Receiver Box Mounting Kit RX2502	
Comprises receiver box mounting assembly RX2501 & RX2500 UGEf antenna mount bracket	

Insight[™] Software

- Automatic Intelligent frequency selection and set-up
- Real time tool detailing quality of data transmission for each logger / receiver and system status information
- Live real-time analysis of process data and review against process set-up (zones, temperature set-points, overlays)
- Event markers log events at the precise point they happen on the profile
- Automatic data-saving to PC during run to guarantee data protection

The Worldwide Leader in Temperature Profiling



Europe and Asia
DATAFAQ Limited,
Deenland House, 140 Cowley Road,
Cambridge CB4 0GU, UK
Tel: +44 (0)1223 423 141
Fax: +44 (0)1223 423 206
E-mail: sales@datafaq.com
Web: www.datafaq.com

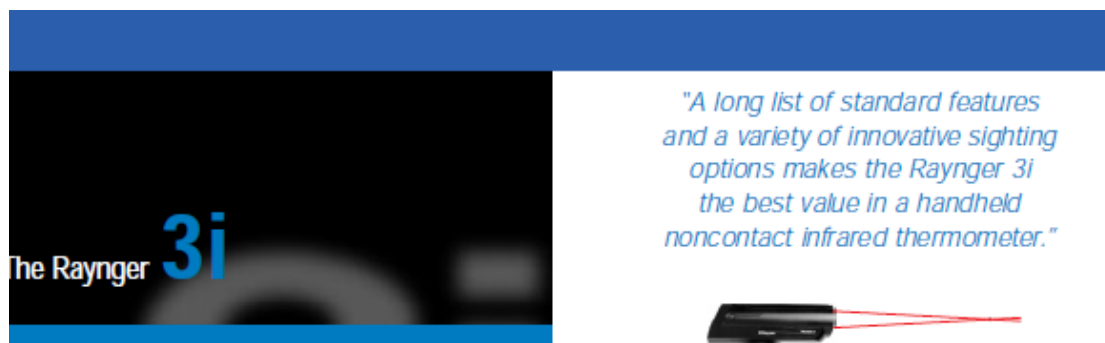
North and South America
DATAFAQ Inc,
187 Ballardvale Street,
Wilmington, MA 01987, USA
Tel: +1 978 960 9000
Fax: +1 978 960 0666
E-mail: sales@datafaq.com
Web: www.datafaq.com

Germany
DATAFAQ GmbH,
Vaidorfer Straße 100
D-20460 Vlotho, Deutschland
Tel: +49 5722 9107 0
Fax: +49 5722 9107 67
E-mail: sales@datafaq.de
Web: www.datafaq.de



www.datafaq.com
© 2011 Datafaq (TM21 Rev C) 6/2011
Datapaq, the Datapaq logo and Insight[™] are registered trademarks of Datapaq.
Insight[™] is a registered design of Datapaq.

Pyrometer



Standard Features

In addition to displaying real-time temperature, the Raynger 3i calculates Maximum, Minimum, Difference and Average temperature values, while the Recall feature allows you to recall the last temperature reading. The 3i also compensates for energy reflected by the background around your target so it doesn't affect your reading. The backlit display makes it easy to read the display under poor lighting conditions. A locking trigger allows unattended operation, while adjustable high and low alarms signal over- and under-range temperature conditions. Each 3i comes with a padded nylon carrying case, shoulder strap and tripod mount.

The 3i can also store up to 100 data points in an on-board datalogger, eliminating the need for clipboards, recording devices, or other peripheral hardware. Data outputs from the 3i provide a direct interface to chart recorders and printers. All models are equipped with an output jack capable of providing analog and digital signals.

Innovative Sighting Options

Because no single sighting system works best for every application, the Raynger 3i offers you a choice of sighting options: single laser, dual laser, crossed laser, scope sighting, or scope with laser sighting.



Single Laser: The single laser is designed for accuracy over distance. Single laser models pinpoint the center of your target area with a bright laser spot.



Dual Laser: The dual laser indicates the diameter of the target area measured with two glowing spots.

"A long list of standard features and a variety of innovative sighting options makes the Raynger 3i the best value in a handheld noncontact infrared thermometer."



Crossed Laser: For precise measurement of smaller targets, choose a 3i with crossed laser sighting. The instrument's minimum measurement spot is indicated at the point the two laser beams meet.



Scope and Scope with Laser: If you measure temperature at a distance in bright daylight, a 3i with scope sighting is your best choice. At the focus point, 3i scopes are parallax-free and provide circular reticles for pinpoint accuracy. To enhance the sighting capabilities of the scope, try a combined scope with laser model.

The 3i gives you a choice of laser output. L2 models meet FDA Class II and IEC Class requirements. L3 models meet the requirements of FDA Class IIIa.

Which 3i model is right for your application?

General purpose Raynger 3i models handle a variety of maintenance and quality control applications. Choose the 3i that matches your temperature range and optical requirements, then pick the sighting option that best meets the needs of your particular application. Your Raytek sales engineer can help you make the right choice.

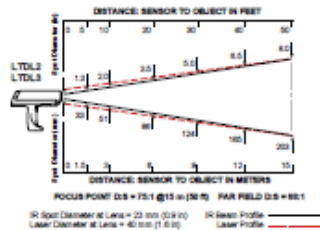
Glass, plastics, and secondary metals processing require specific models to accurately measure temperatures of these materials. Choose from the G5 model designed for glass manufacturing and recycling; the P7 model, used for the production and converting of thin film plastics; or the 1M or 2M models, ideal for metal foundry and processing operations including heat treating, tempering, and forging.

Innovative laser sighting. Full range features. Models for general purpose and special applications. With so many choices, there's a Raynger 3i that is just right for your application.

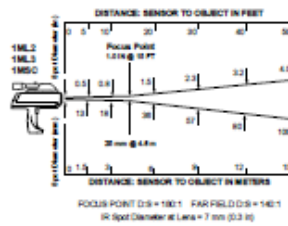
Pyrometer

Raynger 3i Optics

LT AND LR MODELS



1M HIGH TEMPERATURE MODELS

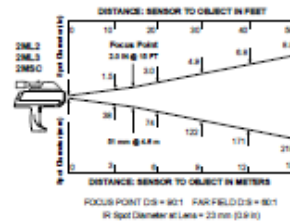
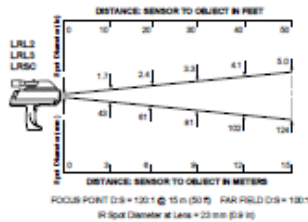


Spectral Response: 1 Micron

Applications: Raynger 3i 1M units are designed for applications that demand high accuracy and optical resolution. These units are especially valuable for temperatures from 600 to 3000° C (1100 to 5400° F).

Applications include iron, steel, and other metals refining, foundry and processing operations, as well as glass, ceramics, semiconductor, chemical, petrochemical, and research.

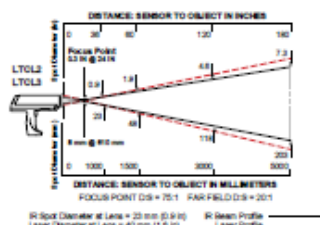
2M HIGH TEMPERATURE MODELS



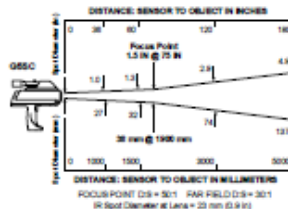
Spectral Response: 1.6 Micron

Applications: Raynger 3i 2M units are designed for applications that demand high accuracy and optical resolution. These units are especially valuable for temperatures from 200 to 1800° C (400 to 3275° F).

Applications include iron, steel, and other metals refining, foundry and processing operations, as well as glass, ceramics, semiconductor, chemical, petrochemical, and research.



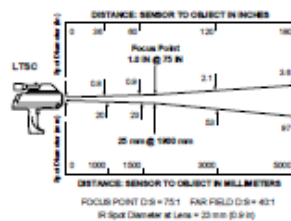
G5SC FOR GLASS



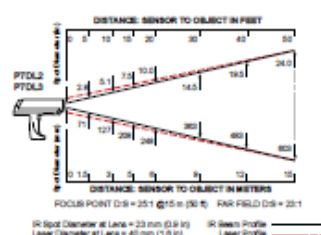
Spectral Response: Nominal 5.0 Microns

Applications: These units are especially valuable for temperatures from 150 to 1800° C (300 to 3275° F).

Applications include glass surface measurement for tempering, annealing, forming, sealing, laminating, and bending.



P7DL FOR THIN FILM PLASTICS



Spectral Response: Nominal 7.9 Microns

Applications: These units are especially valuable for temperatures from 10 to 800° C (50 to 1450° F).

Production and converting of films of polyester (PET), fluoroplastic, Teflon® acrylic, nylon (polyamide), cellulose acetate, polyimide, polyurethane, PVC, polycarbonate.

Applications include lamination, flexo-printing, film orientation, extrusion and extrusion coating. *You may submit a sample of your thin film plastic for evaluation.*

Pyrometer

SPECIFICATIONS

	General Purpose Models	1M & 2M High Temp Models	Glass & Thin Film Models
Laser output:	L2 models are IEC Class 2/FDA Class II (<1mW) L3 models are FDA Class IIIa (<5mW)		
Optical resolution (D:S)	LT models: 75 : 1 LR models: 120 : 1	1M models: 180 : 1 2M models: 90 : 1	G5 models: 50 : 1 P7 models: 25 : 1
Temperature range:	LTA/R models: -30 to 1200°C (-20 to 2200°F)	1M models: 600 to 3000°C (1100 to 5400°F) 2M models: 200 to 1800°C (400 to 3275°F)	G5 models: 150 to 1800°C (300 to 3275°F) P7 models: 10 to 800°C (50 to 1450°F)
Spectral response:	LTA/R models: 8 - 14 µm	1M models: 1.0 µm 2M models: 1.6 µm	G5 models: 5 µm P7 models: 7.9 µm
Display accuracy:	±1% of reading (±0.5% for 1M) or ±1°C (±1.5°F), whichever is greater at 23°C±5°C (73°F±9°F) ambient operating temperature		
Repeatability:	±0.5% of reading or ±1°C (±1°F), whichever is greater		
Temperature display:	°C or °F (selectable), multifunction 4-digit backlit LCD		
Analog output resolution:	1°C or F		
Response time (95%):	LTA/R models: 700 mSec	1M models: 550 mSec 2M models: 550 mSec	G5 models: 700 mSec P7 models: 700 mSec
Emissivity:	Adjustable from 0.10 to 1.00 in 0.01 increments		
Analog output:	LTA/R; 2M, G5 and P7 models: 1mV/°C or 1mV/°F (selectable) 1M models: 1mV/°C or 0.5 mV/°F (selectable)		
Digital output:	RS232 9600 baud, output interval adjustable from 1 to 9999 seconds		
Power requirement:	4 AA alkaline or rechargeable batteries or 6-9 V, 200 mA DC power supply		
Ambient operating range:	0 to 50°C (32 to 120°F)		
Storage temperature:	-20 to 50°C (-4 to 120°F), without batteries		
Relative humidity:	10 to 95%, non-condensing at up to 30°C (86°F)		
Dimensions/Weight:	Laser models: 208 H x 257 L x 71 W mm / 794 g (8.2 H x 10.1 L x 2.8 W in / 1.75 lb) Scope models: 244 H x 257 L x 71 W mm / 1000 g (9.6 H x 10.1 L x 2.8 W in / 2.21 lb)		
Options:	NIST Certification (Must be specified at time of order.)		
Accessories:	Hard shell case, variable brightness filter, DataTemp 2 software, 110V/60Hz or 220V/50Hz voltage adapters, computer cable, analog cable, printer cable, and portable printer.		



Raytek
Portable Products Division



Worldwide Headquarters
Raytek Corporation
1201 Shafter Road
P.O. Box 1820
Santa Cruz, CA 95061-1820
408 458 1110

Portable Products Division
800 866 5478
Fax 408 425 4561

European Headquarters
Raytek GmbH
Arkonastrasse 45-49
D-13189 Berlin, Germany
Phone 49 30 478 0080
Fax 49 30 471 0251

World Wide Web
www.raytek.com

© 1997 Raytek Corporation

Brazil
Raytek do Brasil
Sorocaba, SP Brazil
Phone 55 152 276556

China
Raytek China Company
Beijing, China
Phone 86 10 6437 0284

Japan
Raytek Japan, Inc.
Tokyo, Japan
Phone 81 3 5976 1531

Mexico
Raytek de Mexico
Puebla, Mexico
Phone 52 22 30 4380

United Kingdom
Raytek UK
Milton Keynes, UK
Phone 44 1 908 630800

Thermal Camera



FLIR P Series

FLIR P640

The High Performance infrared inspection system

FLIR P640 is the highest performing infrared inspection system available. With its state of the art technology, including 640x480 detector resolution and unique ergonomic design it is the natural choice for professional thermographers that want the most efficient instrument producing professional results.



- Image resolution 640x480
- Sensitivity 30 mK
- Large high resolution 5.6" flip-out LCD
- Tiltable high resolution viewfinder
- High performance lenses with USM technology
- 1-8 times continuous zoom with pan
- Picture in Picture
- Thermal fusion: above, below interval
- Rotatable handle for convenient operation
- Built-in 3.2 Mpixel digital camera with target illuminator
- Standard temperature range -40 °C to 500 °C
- Real time radiometric storage to built-in RAM
- Periodic storage
- Panorama
- Voice and text annotation
- MPEG-4 streaming to PC using USB or FireWire
- Programmable buttons



GPS technology helps to record location information



Fusion, a function that lets you display a part of digital photo as an infrared image.

FLIR Systems FLIR P640 is an affordable easy-to-operate high-performance infrared camera that delivers accurate temperature measurements at productive and safe distances. This makes the P640 camera an ideal solution for cost-effective and efficient predictive maintenance programs.

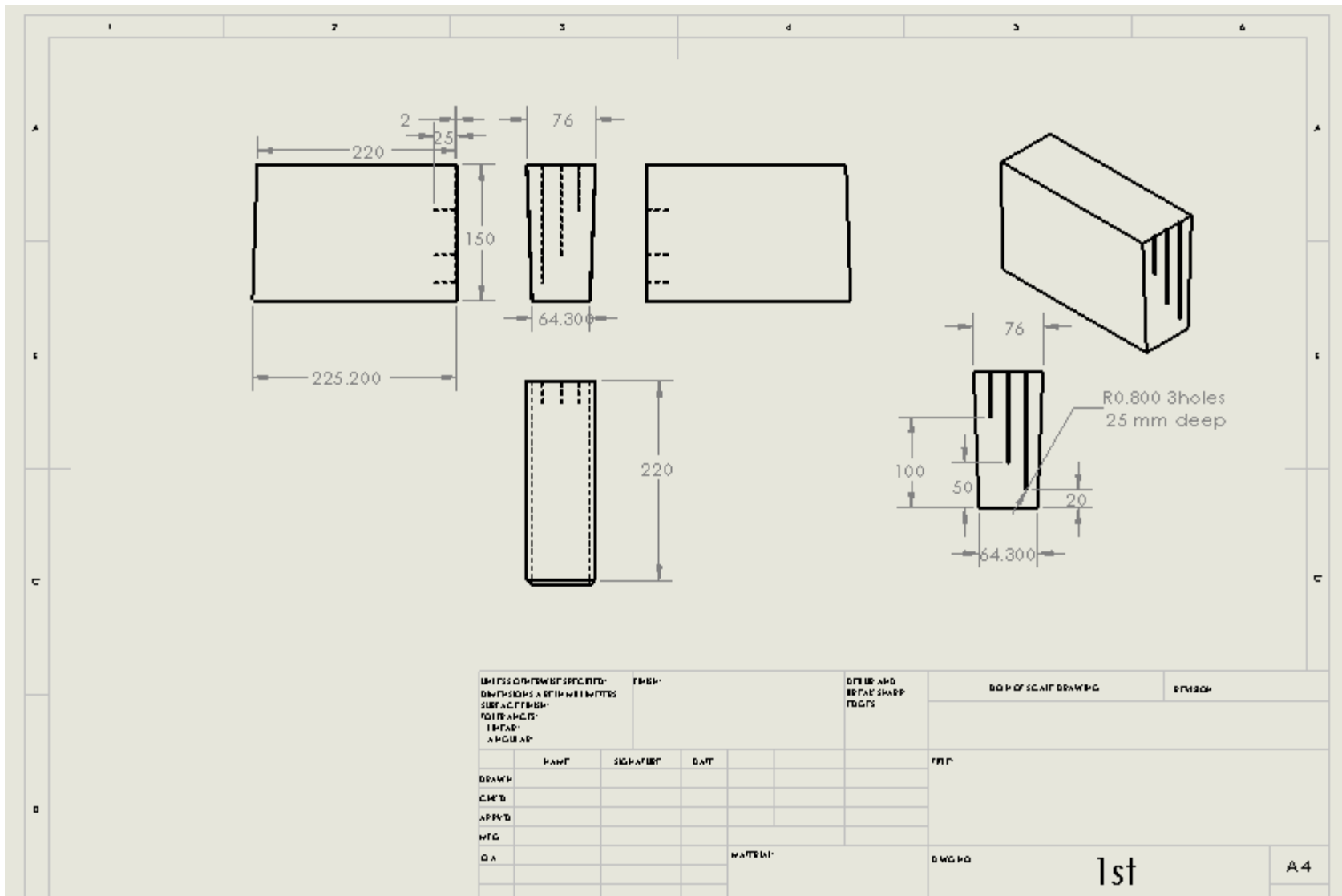
The P640 includes an integrated 3.2 megapixel camera to aid in reporting. Infrared and visual images taken with the P640 can be stored in standard JPEG formats. The P640 visual camera includes matching Field Of View lenses, so IR and visual images are shown at similar long distances using the same Field Of View.

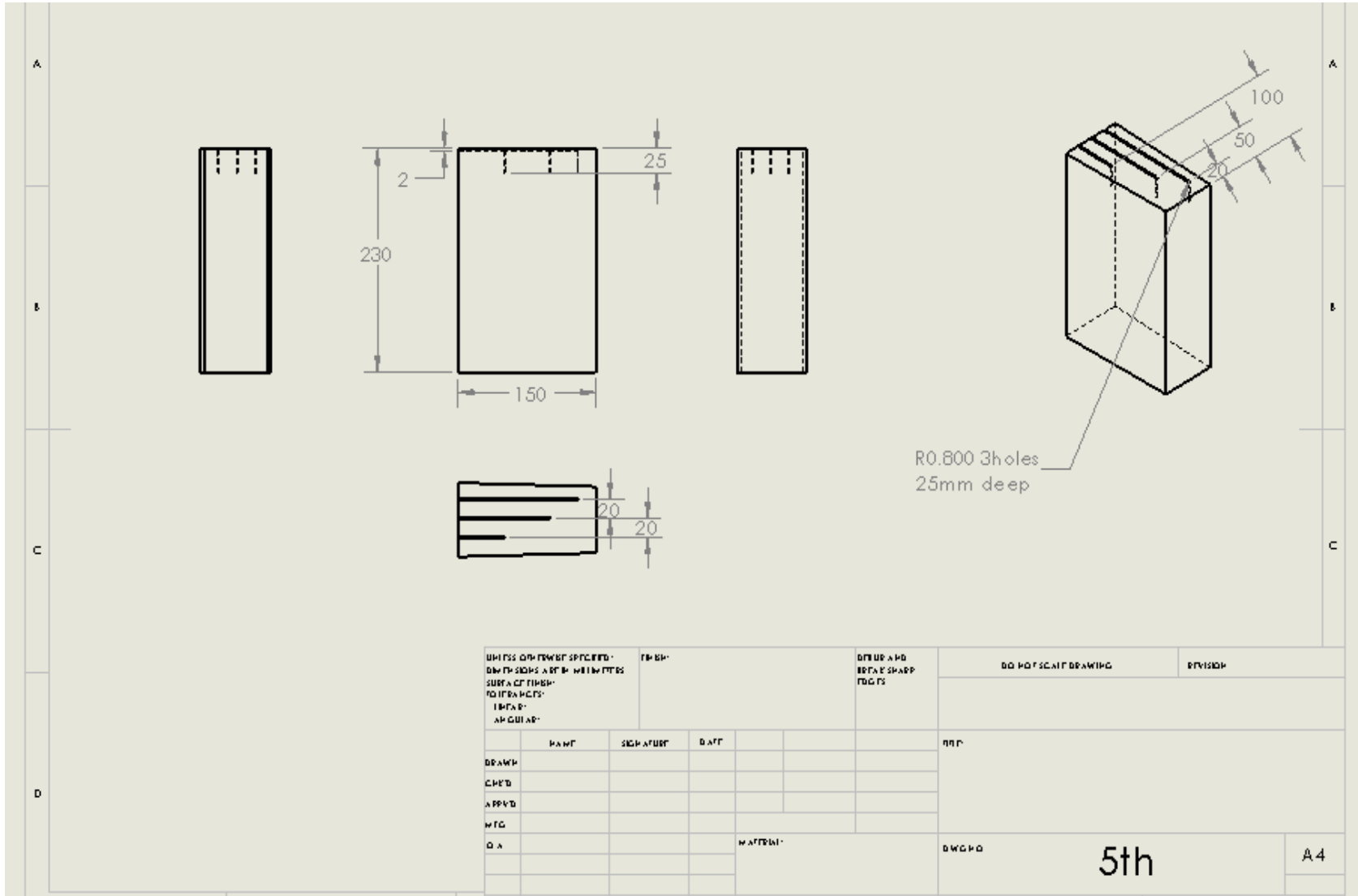


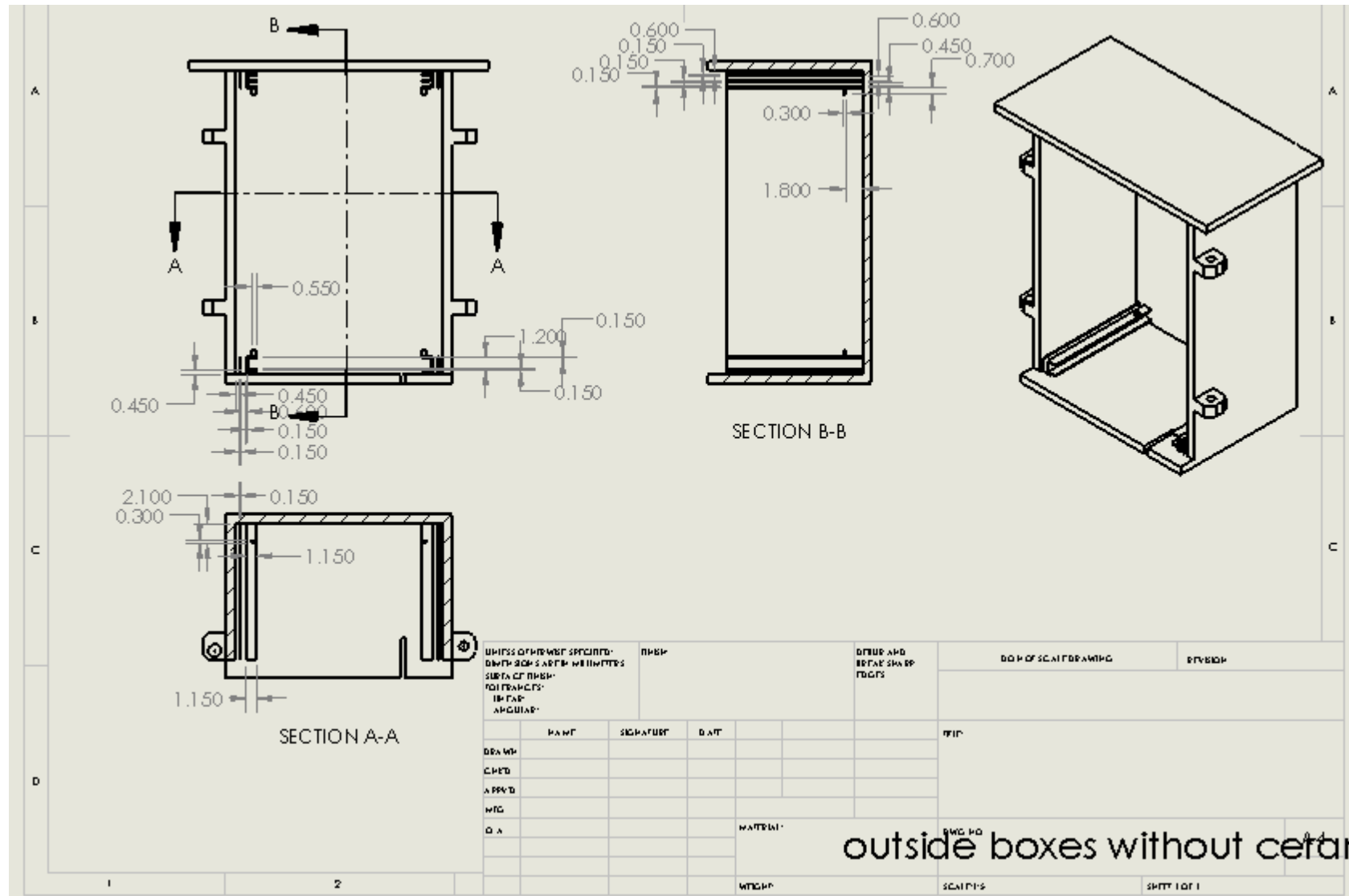
Infrared inspection helps to detect overheating parts, can avoid costly downtime and maintain plant efficiencies.

ภาคผนวก ข

แผนผังลักษณะการเจาะอิฐ และแปลนกล่องป้องกันความร้อนและแรงกระแทก

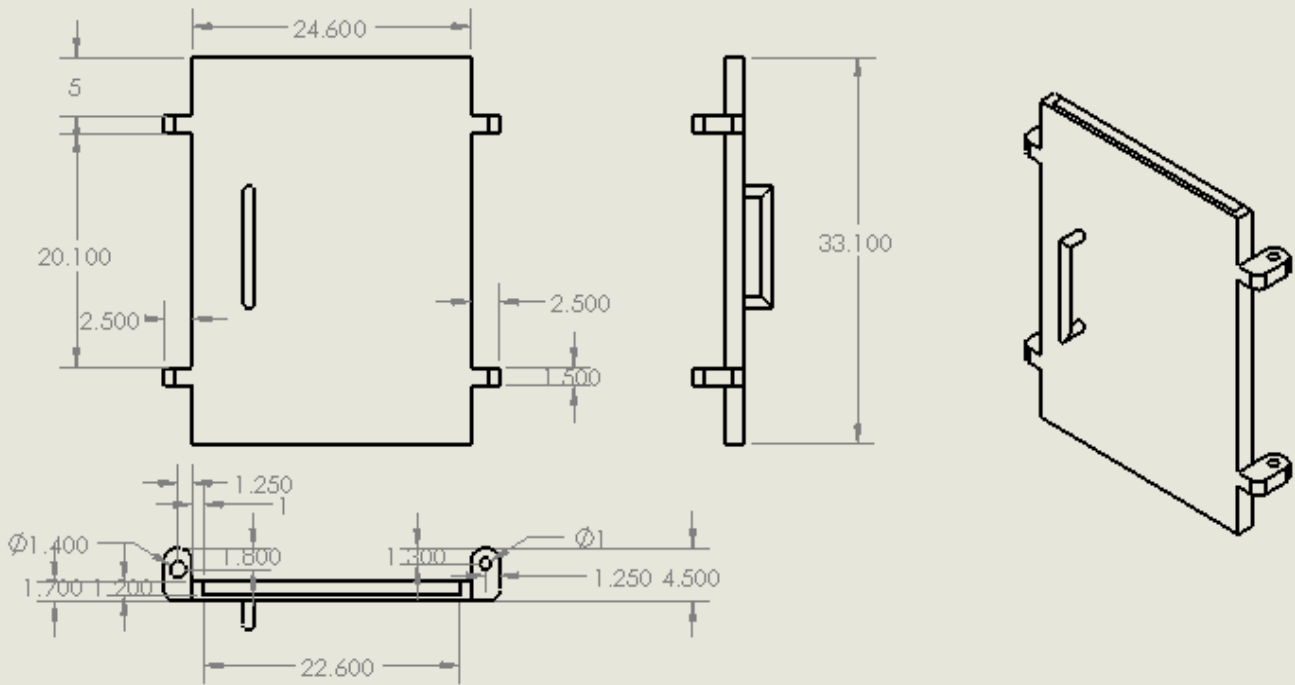






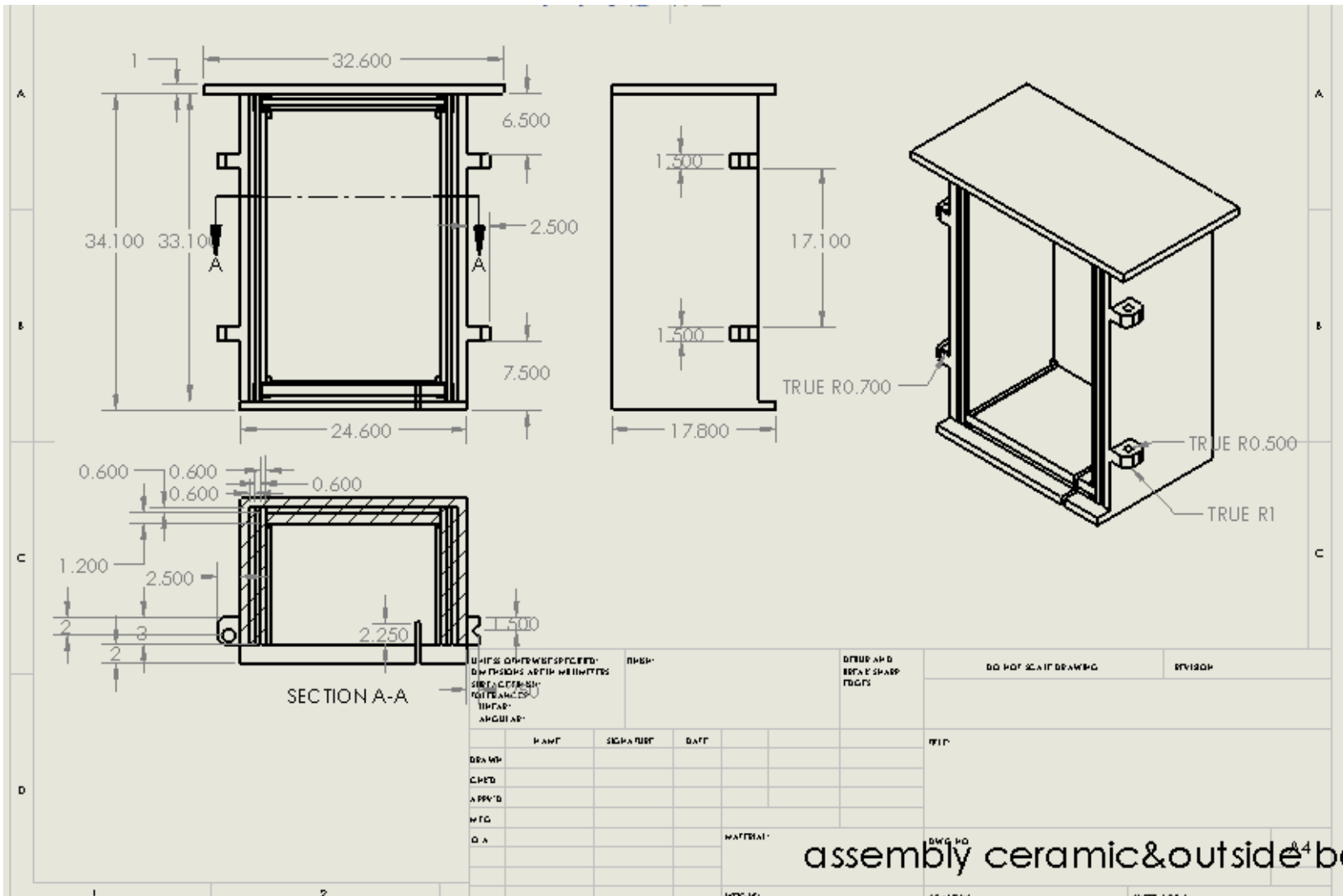
แปลนกล่องป้องกันความร้อนและรังสี (ตัวกล่อง)

แปลนกล่องป้องกันความร้อนและแรงกระแทก (ฝากล่อง)

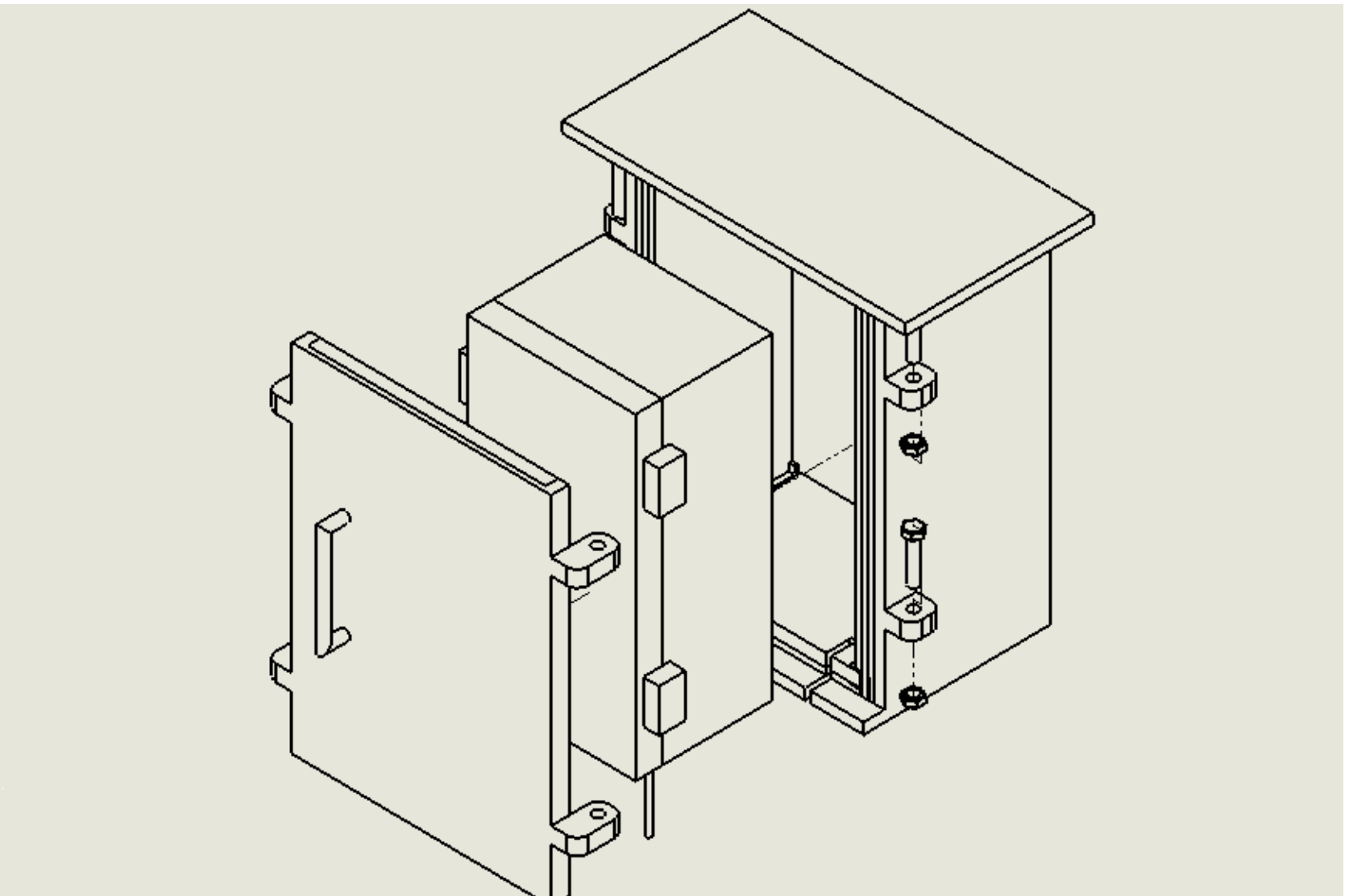


UNITS OF MEASURE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS			FINISH		DIMS AND SURF. SHAPES NOTES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISED	
SURFACE FINISH: POLISHES: TEXTURE: ANGULAR:										
DRAWN			SIGNATURE		DATE		PROJECT			
CHECKED										
APPROVED										
MFG										
Q.A					MATERIAL		DWG NO		A4	
							cover ceramic			

แปลนตู้ตั้งเครื่องปรับอากาศ (ตัวเครื่องที่ประกอบภายนอก)



ลักษณะการประกอบกล่องป้องกันความร้อนและอุณหภูมิ



ภาคผนวก ค

สรุปผลการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 และการวิเคราะห์

ผลการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1

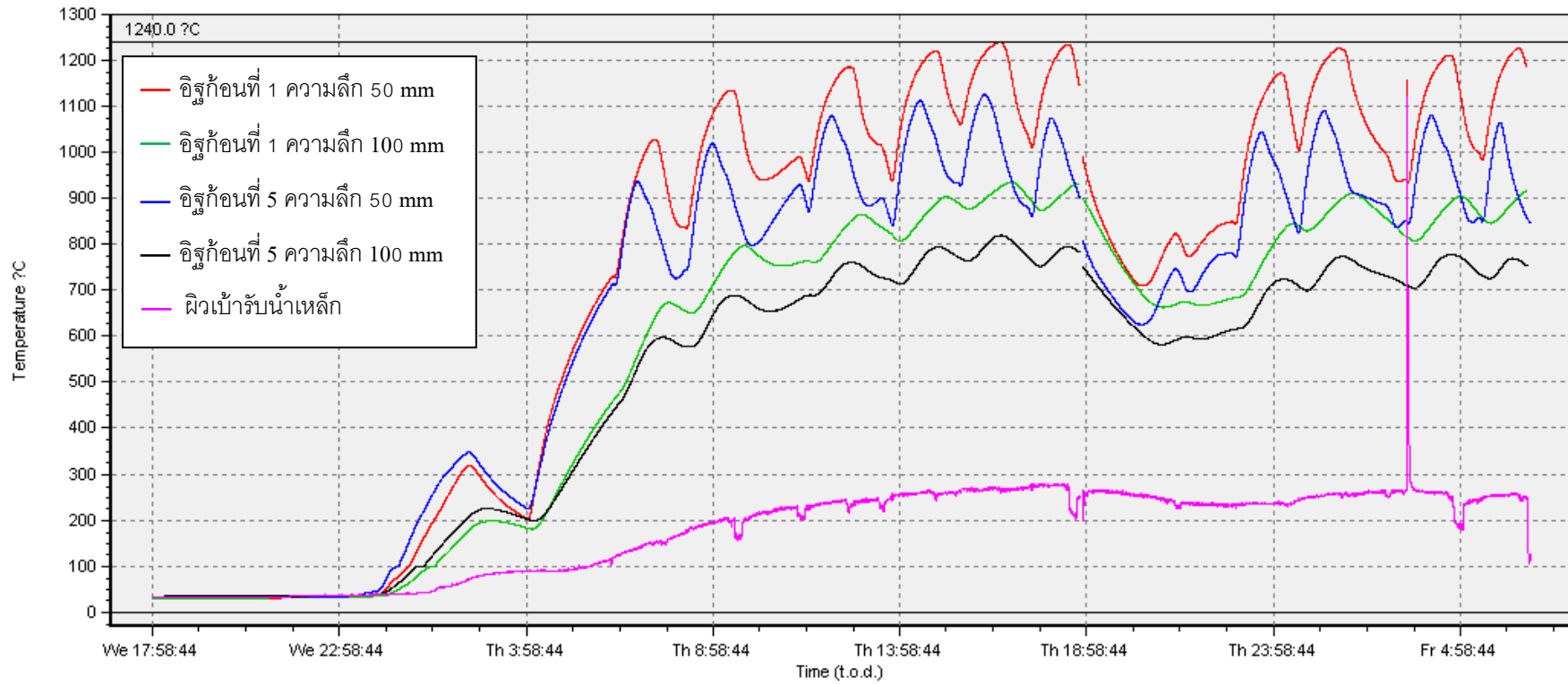
จากการเก็บข้อมูลระหว่างการปฏิบัติงานจริงของโรงงาน ระหว่างวันที่ 7 – 9 ธันวาคม 2554 โดยมีเป้าหมายการเก็บข้อมูลรวมทั้งสิ้น 20 รอบการทำงาน แต่สามารถเก็บข้อมูลได้เพียง 10 รอบการทำงาน เนื่องจากระหว่างการเทน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 8 ระหว่างเวลา 3:33 – 3:36 น. ของวันศุกร์ ที่ 9 ธันวาคม 2554 น้ำเหล็กได้ล้นออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำให้บางส่วนของแอสลคที่มีอุณหภูมิสูงเข้าเคลือบฝาของอุปกรณ์ป้องกันความร้อนและแรงกระแทก และบางส่วนของสาย Thermocouple หลังจากอุปกรณ์ถูกเคลือบด้วยแอสลค อุปกรณ์วัดต่างๆก็ยังคงทำหน้าที่เช่นเดิมต่อไป จนกระทั่งการเปลี่ยนตัวดูดซับความร้อนให้แก่ Data Logger ซึ่งผู้ปฏิบัติงานได้แกะทำลายแอสลคที่ปกปิดฝาเปิดของอุปกรณ์ป้องกันอุณหภูมิและแรงกระแทก ทำให้สาย Thermocouple ที่เปราะเนื่องจากรับความร้อนสูงแตกออกดังแสดงในรูปด้านล่าง จึงไม่สามารถเก็บข้อมูลต่อไปได้

ข้อมูลทั้ง 10 รอบการทำงานที่สามารถเก็บข้อมูลมาได้แสดงค่าดังรูปที่ ก และรายละเอียดแต่ละกิจกรรมที่ได้สรุปจากรายงานการปฏิบัติงาน แสดงดังตารางที่ ก

ซึ่งจากรูปที่ ก จะเห็นถึงความไม่ต่อเนื่องของข้อมูลระหว่างเวลา 18: 47 – 19:13 น. ของวันพฤหัสบดี ที่ 8 ธันวาคม 2554 เนื่องจากมีการถอด Data Logger ออกมาดาวน์โหลดข้อมูลเก็บไว้ยังคอมพิวเตอร์ในขณะที่ทางโรงงานหยุดปฏิบัติงานเพื่อหลบช่วงอัตราค่าไฟฟ้าที่สูง ในช่วงนี้เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกปล่อยทิ้งไว้บนแท่นวางเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อรอการอุ่นต่อไป



ลักษณะความเสียหายของอุปกรณ์จากการสัมผัสน้ำเหล็กที่ล้นออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ ก แผนภูมิอุณหภูมิต่างๆตลอดการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1

ตารางที่ ก สรุปเวลาและกิจกรรมในการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1

Heat No.	Activity	Time				Liquid Steel Temp.
		start	stop	used	used (min)	
122688	เผาอน	12/8/11 3:59	12/8/11 6:12	2:13	133	1672 1663
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	12/8/11 6:12	12/8/11 6:17	0:05	5	
	Tapping	12/8/11 6:17	12/8/11 6:19	0:02	2	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	12/8/11 6:19	12/8/11 6:21	0:02	2	
	รอ Casting	12/8/11 6:21	12/8/11 6:28	0:07	7	
	Casting	12/8/11 6:28	12/8/11 7:27	0:59	59	
	เท Slag และล้างรู	12/8/11 7:27	12/8/11 7:46	0:19	19	
122690	เผาอน	12/8/11 7:46	12/8/11 8:08	0:22	22	1698 1655
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	12/8/11 8:08	12/8/11 8:12	0:04	4	
	Tapping	12/8/11 8:12	12/8/11 8:14	0:02	2	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	12/8/11 8:14	12/8/11 8:16	0:02	2	
	รอ Casting	12/8/11 8:16	12/8/11 8:27	0:11	11	
	Casting	12/8/11 8:27	12/8/11 9:24	0:57	57	
	เท Slag และล้างรู	12/8/11 9:24	12/8/11 9:47	0:23	23	
122693	เผาอน	12/8/11 9:47	12/8/11 11:11	1:24	84	1680 1655
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	12/8/11 11:11	12/8/11 11:27	0:16	16	
	Tapping	12/8/11 11:27	12/8/11 11:29	0:02	2	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	12/8/11 11:29	12/8/11 11:31	0:02	2	
	รอ Casting	12/8/11 11:31	12/8/11 11:39	0:08	8	
	Casting	12/8/11 11:39	12/8/11 12:33	0:54	54	
	เท Slag และล้างรู	12/8/11 12:33	12/8/11 12:51	0:18	18	
122695	เผาอน	12/8/11 12:51	12/8/11 13:23	0:32	32	1680 1667
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	12/8/11 13:23	12/8/11 13:43	0:20	20	
	Tapping	12/8/11 13:43	12/8/11 13:45	0:02	2	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	12/8/11 13:45	12/8/11 13:47	0:02	2	
	รอ Casting	12/8/11 13:47	12/8/11 14:05	0:18	18	
	Casting	12/8/11 14:05	12/8/11 14:53	0:48	48	
	เท Slag และล้างรู	12/8/11 14:53	12/8/11 15:02	0:09	9	
122697	เผาอน	12/8/11 15:02	12/8/11 15:26	0:24	24	1664 1630
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	12/8/11 15:26	12/8/11 15:31	0:05	5	
	Tapping	12/8/11 15:31	12/8/11 15:33	0:02	2	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	12/8/11 15:33	12/8/11 15:35	0:02	2	
	รอ Casting	12/8/11 15:35	12/8/11 15:47	0:12	12	
	Casting	12/8/11 15:47	12/8/11 16:40	0:53	53	
	เท Slag และล้างรู	12/8/11 16:40	12/8/11 16:59	0:19	19	
122699	เผาอน	12/8/11 16:59	12/8/11 17:16	0:17	17	
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	12/8/11 17:16	12/8/11 17:26	0:10	10	

Heat No.	Activity	Time				Liquid Steel Temp.
		start	stop	used	used (min)	
122699	Tapping	12/8/11 17:26	12/8/11 17:28	0:02	2	1695
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	12/8/11 17:28	12/8/11 17:30	0:02	2	1640
	รอ Casting	12/8/11 17:30	12/8/11 17:34	0:04	4	
	Casting	12/8/11 17:34	12/8/11 18:22	0:48	48	
	เท Slag และล้างรู	12/8/11 18:22	12/8/11 18:35	0:13	13	
On Peak	ตั้งถังทิ้งไว้	12/8/11 18:35	12/8/11 20:09	1:34	94	
122702	เผาอน	12/8/11 20:09	12/8/11 21:18	1:09	69	
	เปลี่ยน Heat Sink	12/8/11 21:18	12/8/11 21:34	0:16	16	
	เผาอน	12/8/11 21:34	12/8/11 22:53	1:19	79	
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	12/8/11 22:53	12/8/11 22:55	0:02	2	
	Tapping	12/8/11 22:55	12/8/11 22:57	0:02	2	1697
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	12/8/11 22:57	12/8/11 23:01	0:04	4	1654
	รอ Casting	12/8/11 23:01	12/8/11 23:13	0:12	12	
	Casting	12/8/11 23:13	12/9/11 0:08	0:55	55	
	เท Slag ล้างรู และรอเท	12/9/11 0:08	12/9/11 0:36	0:28	28	
122703	Tapping	12/9/11 0:36	12/9/11 0:38	0:02	2	1703
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	12/9/11 0:38	12/9/11 0:40	0:02	2	1651
	รอ Casting	12/9/11 0:40	12/9/11 0:59	0:19	19	
	Casting	12/9/11 0:59	12/9/11 1:48	0:49	49	
	เท Slag และล้างรู	12/9/11 1:48	12/9/11 2:01	0:13	13	
122705	เผาอน	12/9/11 2:01	12/9/11 2:57	0:56	56	
	เปลี่ยน Heat Sink	12/9/11 2:57	12/9/11 3:13	0:16	16	
	เผาอน	12/9/11 3:13	12/9/11 3:28	0:15	15	
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	12/9/11 3:28	12/9/11 3:33	0:05	5	
	Tapping	12/9/11 3:33	12/9/11 3:36	0:03	3	1702
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	12/9/11 3:36	12/9/11 3:38	0:02	2	1627
	รอ Casting	12/9/11 3:38	12/9/11 3:52	0:14	14	
	Casting	12/9/11 3:52	12/9/11 4:41	0:49	49	
	เท Slag และล้างรู	12/9/11 4:41	12/9/11 5:08	0:27	27	
122707	เผาอน	12/9/11 5:08	12/9/11 5:27	0:19	19	
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	12/9/11 5:27	12/9/11 5:33	0:06	6	
	Tapping	12/9/11 5:33	12/9/11 5:36	0:03	3	1672
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	12/9/11 5:36	12/9/11 5:38	0:02	2	1651
	รอ Casting	12/9/11 5:38	12/9/11 5:40	0:02	2	
	Casting	12/9/11 5:40	12/9/11 6:34	0:54	54	
		เท Slag และล้างรู	12/9/11 6:34	12/9/11 6:45	0:11	11

การวิเคราะห์และบทสรุปเบื้องต้นการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1

จากผลการเก็บข้อมูลในบทที่ผ่านมา เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้น ณ เวลาต่างๆ ในขณะที่ปฏิบัติงานจริง จะทำให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของการแปรผันอุณหภูมิไปในรูปแบบต่างๆ ซึ่งจากรูปที่ ก ปรากฏให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิอยู่ตลอดเวลาในการเก็บข้อมูล เพื่อความเข้าใจที่ชัดเจนจึงต้องมีการวิเคราะห์ลักษณะของกราฟการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ตามเวลาจะมีความสัมพันธ์แบบใดกิจกรรมที่กำลังดำเนินขึ้น และสรุปข้อสังเกตต่างๆที่เกิดขึ้น

บทนี้จึงเป็นการนำเสนอการวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้ และตีความความหมายข้อมูล ตั้งข้อสังเกต และแสดงบทสรุปเบื้องต้นของการเก็บข้อมูล โดยรายละเอียดดังส่วนต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์ผลการเก็บข้อมูลเบื้องต้น

การวิเคราะห์ผลการเก็บข้อมูลเบื้องต้นนี้จะอาศัยรายละเอียดของกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นดังแสดงในตารางที่ ก เข้ามาตีความลักษณะของแผนภูมิอุณหภูมิต่อเวลาตามรูปที่ ก และอธิบายสาเหตุการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิตลอดเวลา โดยการวิเคราะห์จะแบ่งออกเป็นส่วนๆ เพื่อให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนแผนภูมิได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยจะมีรายละเอียดตามหัวข้อย่อๆต่อไปนี้

1.1 ช่วงการตั้งรอกการใช้งาน

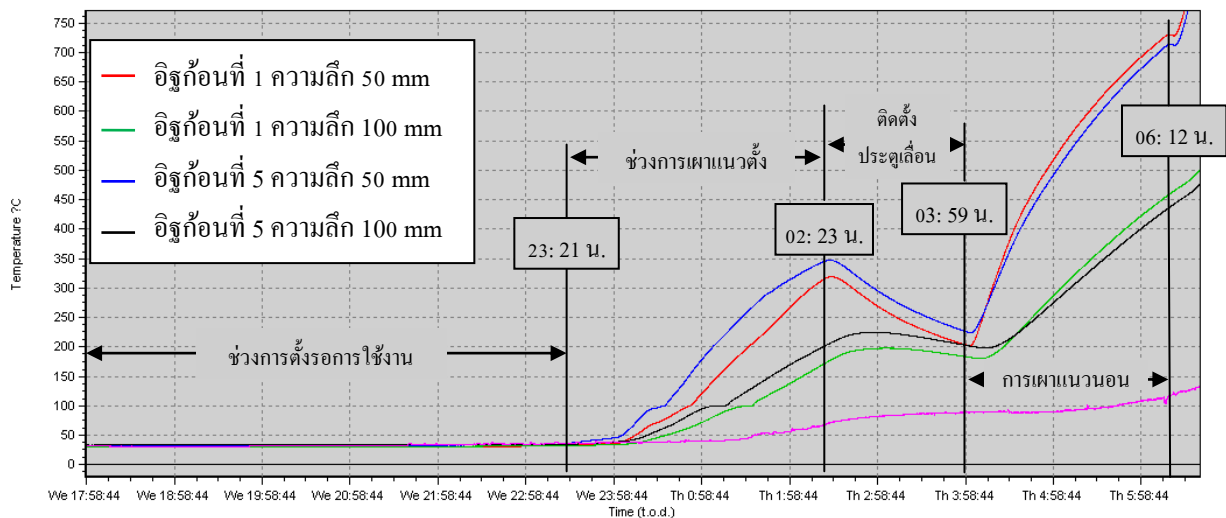
ช่วงการตั้งรอกการใช้งานเป็นช่วงเริ่มต้นการเก็บข้อมูลจะอยู่ในช่วงตั้งแต่เริ่มต้นการเก็บข้อมูลที่เวลา 17: 58 น. ของวัน พุธ ที่ 7 ธันวาคม 2554 จนถึงเวลาประมาณ 23: 21 น. ของวันเดียวกัน ข้อมูลในช่วงนี้จะมีลักษณะราบเรียบดังแสดงในรูปที่ ข เนื่องจากเป็นอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กหลังก่อขึ้นทำงานใหม่เสร็จ และถูกตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องอยู่ตลอดเวลาเพื่อรอจังหวะการสับเปลี่ยนเข้าไปใช้งานภายในสายการผลิต ข้อมูลช่วงนี้อุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กทั้ง 4 ตำแหน่งยังคงมีค่าอยู่ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 30°C ตลอดช่วงการตั้งรอกการใช้งาน

1.2 ช่วงอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบตั้งฉากกับพื้นโลก

เริ่มต้นการก่ออิฐในชั้นใช้งาน เบ้ารับน้ำเหล็กต้องมีการอุ่นเบื้องต้นด้วยการไล่ความชื้นออกจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำให้ตัวประสานอิฐก้อนต่างๆบนผนังเบ้ารับน้ำเหล็กแห้งและอยู่ตัวได้เร็วขึ้น โดยการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบตั้งฉากกับพื้น โลกนั้นมีลักษณะดังรูปที่ ค

ช่วงเวลาก่อนเริ่มเก็บน้ำเหล็กแบบนี้อยู่ที่ช่วงเวลา 23: 21 น. ของวันที่ 7 ธันวาคม 2554 ถึงเวลา 02:23 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ช่วงนี้จะปรากฏชัดว่าอุณหภูมิผนังเก็บน้ำเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ต่างก็เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟเข้ามาสู่ผนังเก็บน้ำเหล็ก ซึ่งในช่วงนี้อุณหภูมิของ Thermocouple ที่ฝังไว้ที่ตำแหน่ง 50 mm จากผิวอิฐเห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 5 สูงกว่าอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 1 แสดงให้เห็นว่าเปลวไฟจากการเผาแบบตั้งฉากกับพื้นโลกนั้นไปไม่ถึงกับเก็บน้ำเหล็ก เปลวไฟจากหัวเผาอาจมีการม้วนตัวกลับไปให้ขึ้นตั้งฉากกับพื้นผิวโลก

นอกจากนั้นแล้วยังเห็นถึงความไม่ต่อเนื่องของการเผา ซึ่งปรากฏจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งแสดงถึงลักษณะการทำงานของหัวเผาไม่มีต่อเนื่องที่ดี



รูปที่ ข แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ต่อเวลา และกิจกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างเวลา 17: 58 น. ของวันที่ 7 ธันวาคม 2554 ถึงเวลา 6: 28 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554

1.3 ช่วงการติดตั้งประตูเลื่อน (Sliding Gate)

ช่วงการติดตั้งประตูเลื่อนจะต้องหยุดอุ่นเก็บน้ำเหล็กและนำเก็บน้ำเหล็กออกมาวางนอนอยู่กับพื้น เพื่อให้เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานได้ติดตั้งประตูเลื่อนสำหรับเป็นช่องทางให้น้ำเหล็กได้ไหลผ่านออกจากเก็บน้ำเหล็ก จากรูปที่ ข จะอยู่ระหว่างเวลา 2: 23 – 3: 59 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่เก็บน้ำเหล็กถ่ายเทความร้อนออกจากสู่บรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิภายในผนังเก็บน้ำเหล็กเย็นตัวลง

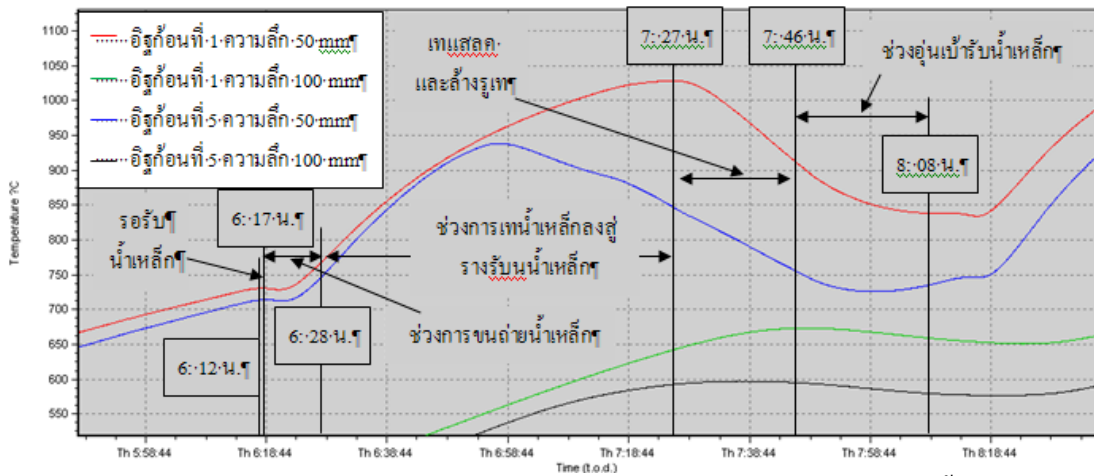
1.4 ช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กแบบนอนเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหุ้มเผาแบบธรรมดา

การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กแบบนอนเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะมีจุดประสงค์เพื่ออุ่นให้อุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูง เพื่อกำจัดปัญหาที่มาจาก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิฉับพลัน (Thermal Shock) เนื่องจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่เพิ่งก่อใหม่นั้นจะยังมีอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำเหล็ก และอิฐที่ใช้สำหรับก่อผนังมีความสามารถในการนำความร้อนที่ต่ำจึงต้องใช้เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กนานพอสมควรเบ้ารับน้ำเหล็กจึงจะเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้รับน้ำเหล็ก จากรูปที่ ข จะอยู่ในช่วงเวลา 3:59 – 6:12 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554

ในช่วงการเผานี้จะเห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 1 จะมีอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดการอุ่นสูงกว่าอุณหภูมิอิฐก้อนที่ 5 ถึงแม้ว่าเมื่อเริ่มต้นการอุ่นนั้นอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 5 จะสูงกว่าอิฐก้อนที่ 1 นั้นแสดงถึงความสามารถของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยวิธีการนอนเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ทำให้เปลวไฟสามารถเข้าถึงส่วนกันของเบ้ารับน้ำเหล็กได้ดีกว่า การเผาแบบแนวตั้งฉากกับพื้นโลก ถึงแม้ว่าอุณหภูมิที่กันเบ้ารับน้ำเหล็กจะสูงกว่าที่กลางถังแต่จากข้อมูลแสดงให้เห็นว่าความแตกต่างของอุณหภูมิมิมีไม่มากนัก การเผาในลักษณะนี้จึงเป็นการเผาที่ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอตามระยะความสูงของเบ้ารับน้ำเหล็ก

1.5 ช่วงรอกการเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก

เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กอุ่นได้เหมาะสมแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กต้องนำไปใช้รับน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์กไฟฟ้า ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่เบ้ารับน้ำเหล็กไม่ได้รับความร้อน แต่จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิบรรยากาศ จึงมีการถ่ายเทความร้อนจากเบ้ารับน้ำเหล็กออกสู่บรรยากาศทำให้อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กตกลง จากรูปที่ ค ช่วงนี้จะอยู่ระหว่างเวลา 6: 12 – 6: 17 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 จะเห็นว่าอุณหภูมิเริ่มคงที่และเริ่มปรากฏแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิ



รูปที่ ค แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆต่อเวลา และกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้น

ระหว่างเวลา 5: 48 - 8: 36 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554

1.6 ช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็ก

ถึงแม้จะมีการเทน้ำเหล็กมาสู่เบ้ารับน้ำเหล็กตั้งแต่วันที่ 6: 17 น. แล้ว แต่อุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กยังคงมีการลดลงเล็กน้อย และเนื่องจากเบ้ารับน้ำเหล็กบรรจุน้ำเหล็กอยู่เต็มภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก จึงมีการถ่ายเทความร้อนเข้ามายังผนังเบ้ารับน้ำเหล็กทำให้อุณหภูมิที่จุดต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยจะเห็นได้จากรูปที่ ค ระหว่างเวลา 6: 17 – 6: 28 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 ซึ่งจะเห็นชัดเจนว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ระยะ 50 mm จากผิวอิฐฝั่งที่สัมผัสกับน้ำเหล็ก มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในอิฐก้อนที่ 1 และก้อนที่ 5 ใกล้เคียงกัน

1.7 ช่วงการเทน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก

จากรูปที่ ค ช่วงเวลาในการเทน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กจะอยู่ในช่วงเวลา 6: 28 – 7: 27 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 ในขณะที่เริ่มต้นการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กนั้น ระดับของน้ำเหล็กจะค่อยๆ ลดต่ำลงเรื่อยๆ จึงเหลือระดับน้ำเหล็กประมาณ 450 mm หรือระดับตำแหน่งประมาณอิฐก้อนที่ 2 จากกันเบ้ารับน้ำเหล็ก เนื่องจากช่วงระหว่างการเทน้ำเหล็กออกไปนั้น น้ำเหล็กจะยังคงสัมผัสกับอิฐก้อนที่มีการฝัง Thermocouple อยู่จึงทำให้อุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นเพิ่มขึ้นอยู่ตลอดเวลา แต่จากรูปที่ ค ที่เวลาประมาณ 6: 56 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 นี้จะพบว่าอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่อิฐก้อนที่ 5 ระยะ 50 mm จากผิวที่สัมผัสกับน้ำเหล็กเริ่มมีอุณหภูมิลดลงเนื่องจากปริมาณระดับน้ำเหล็กได้ลดต่ำกว่าตำแหน่งนั้น ทำให้การถ่ายเทความร้อนด้วยนำความร้อนจากน้ำเหล็กออกมายังผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในแนวรัศมีที่อิฐก้อนที่ 5 ณ ตำแหน่งที่มีการวัดสิ้นสุดลง ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งนั้นจึงมีการลดอุณหภูมิลง ในขณะที่อิฐก้อนที่ 1 ระยะ 50 mm ก็ยังคงการเพิ่มของอุณหภูมิต่อไปจนสิ้นสุดการเทน้ำเหล็กและมีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้นอีกในอัตราที่น้อยลง เนื่องจากในภายในเบ้ารับน้ำเหล็กยังคงเหลือแอสลคและน้ำเหล็กอีกเล็กน้อยอยู่ในเบ้าเพื่อนำไปเททิ้งต่อไป

1.8 ช่วงการเทแอสลคและล้างรูเทน้ำเหล็กด้วยออกซิเจน

เมื่อสิ้นสุดการเทน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กแล้วจะเหลือแอสลคและน้ำเหล็กบางส่วนในเบ้ารับน้ำเหล็ก ส่วนที่เหลือต้องมีการเคลื่อนย้ายเบ้ารับน้ำเหล็กไปเทส่วนที่เหลือนั้นลงไปในถ้วยรับแอสลค ดังนั้นจึงมีระยะเวลาเล็กน้อยที่อิฐก้อนที่ 1 ยังคงรับความร้อนที่ถ่ายเทออกจากแอสลคที่เหลือนั้นเข้ามาจึงคงทำให้อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กยังคงเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย จะเห็นได้จากรูปที่ ค ระหว่างเวลา 7: 27 – 7: 46 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 ในช่วงต้น แต่เมื่อแอสลคถูกเทออกไปจนหมดแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกเคลื่อนย้ายไปล้างรูเทน้ำเหล็กด้วยการเป่าออกซิเจน ก่อนที่จะเคลื่อนย้ายต่อไปยังแท่นอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ช่วงเวลาที่เบ้ารับน้ำเหล็กเทแอสลคออกไปจนหมดแล้วนั้น ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ยังคงอุณหภูมิสูงอยู่จะเริ่มถ่ายเทความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้อุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กลดลงด้วยอัตราที่ค่อนข้างคงที่

1.9 ช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กล้างรูเทน้ำเหล็กเสร็จแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กต้องถูกอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟจากรูปที่ ค จะอยู่ระหว่างเวลา 7: 46 น. – 8: 08 น. จะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อเริ่มต้นการอุ่นอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กยังคงลดลง แต่ลดลงในอัตราที่น้อยลงเรื่อยๆ โดยที่อุณหภูมิอิฐก้อนที่ 1 ที่ระยะ 50 mm จากผิวอิฐด้านที่สัมผัสน้ำเหล็กจะลดลงในลักษณะที่ลู่เข้าสู่อุณหภูมิก่อนหน้า ในขณะที่อิฐก้อนที่ 5 ที่ระยะ 50 mm ที่มีอุณหภูมิในขณะที่เริ่มต้นการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ต่ำกว่าอุณหภูมิอิฐก้อนที่ 1 ที่ระยะเดียวกัน จะมีอุณหภูมิลดลงในอัตราที่ลดลงเรื่อยๆ จนกลายเป็นอัตราเพิ่มในที่สุด และมีอุณหภูมิสูงขึ้นเมื่อสิ้นสุดการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

เหตุการณ์ลดลงของอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากในขณะที่เริ่มต้นนั้นผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในส่วนที่ร้อนยังคงถ่ายเทความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมรอบข้างเช่น อิฐก้อนต่างๆบนผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก และอุปกรณ์ชุดหัวเผา แต่เมื่ออัตราการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเหล่านั้นน้อยลงเนื่องจากสิ่งแวดล้อมต่างๆเหล่านั้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนจากเปลวไฟของหัวเผารีเจนเนอเรทีฟที่ใช้อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจึงจะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมากขึ้น

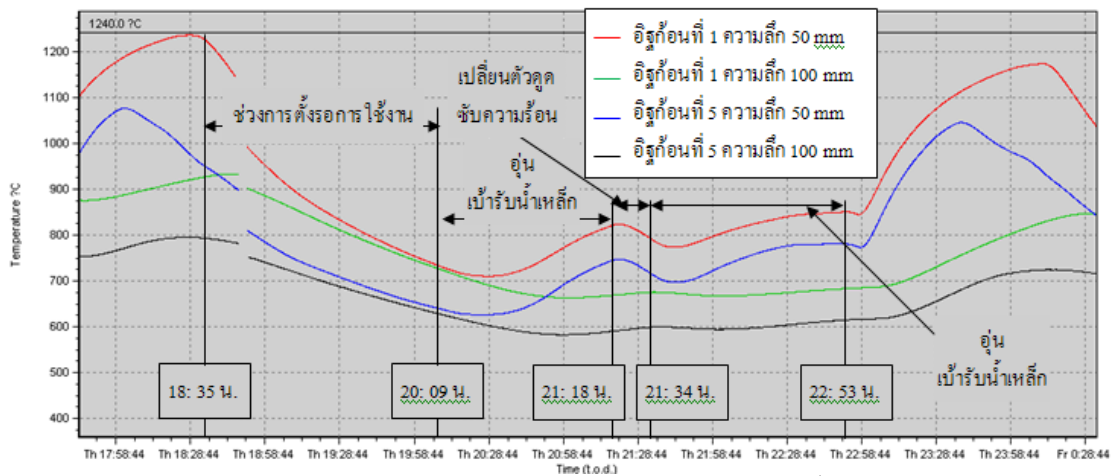
เนื่องจากพฤติกรรมการแปรผันของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ ค อยู่ทุกรอบการทำงานดังนั้นจึงขอวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนต่างๆไว้ ลักษณะการแปรผันดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 1.1 – 1.9 สามารถนำไปวิเคราะห์ใช้กับพฤติกรรมการแปรผันอุณหภูมิในรอบการทำงานต่างๆในรูปที่ ก และตารางที่ ก ได้ แต่จะมีลักษณะการแปรผันเพียงบางส่วนที่มีลักษณะแตกต่างออกไปเนื่องจากการปฏิบัติงานขาดความต่อเนื่อง เช่นการซ่อมบำรุง หรือเกิดเหตุบางประการอุบัติเหตุขึ้น จึงทำให้ลักษณะการแปรผันไม่เป็นไปตามลักษณะใกล้เคียงกับที่วิเคราะห์ในหัวข้อ 1.1 – 1.9 ที่ผ่านมา จึงจะมีการอธิบายเพิ่มเติมดังนี้

1.10 ช่วงหยุดปฏิบัติงานระหว่างช่วงเวลาที่มียอดราคาไฟฟ้าสูง (On-Peak)

เนื่องจากกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้าในปริมาณมาก จึงจำเป็นต้องปฏิบัติงานในช่วงที่อัตราค่าไฟฟ้าต่ำ เพื่อลดค่าพลังงานไฟฟ้าลง และเป็นโอกาสให้มีการซ่อมบำรุงสถานที่และอุปกรณ์ ซึ่งช่วงเวลาที่มียอดราคาไฟฟ้าสูงของทุกวันจะอยู่ในช่วงที่มีความต้องการการใช้ไฟฟ้าสูงนั้นคือช่วง 18:00 – 21:00 น. ของวัน

เนื่องจากช่วงเวลาที่มียอดราคาไฟฟ้าสูงจะ ไม่มีการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ดังนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กจึงไม่ถูกใช้งาน จะถูกวางรอการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กยังแทนอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจากรูปที่ ง ระหว่างเวลา 18:35 – 20:09 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 เบ้ารับน้ำเหล็กที่เพิ่งผ่านการใช้งานมาจึงมีอุณหภูมิในผนังเบ้ารับที่สูงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่สิ่งแวดล้อม จะเห็นจากการลดลงของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก จะลดลงอย่างต่อเนื่องแต่มีการลดลงในอัตราที่ลดลงเรื่อย เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง การถ่ายเทความร้อนไปยังสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิต่ำกว่ามากจะเกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนที่สูง ทำให้เกิดอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่มากกว่าผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่อุณหภูมิต่ำ และจะเห็นว่าอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นที่ระดับความลึกต่างกันเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิทั้ง 2 ตำแหน่งต่างมีความแตกต่างกันน้อยลง

จะสามารถสังเกตจากรูปที่ ง ได้ว่า ช่วงต้นของการหยุดปฏิบัติงาน อุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีลักษณะขาดหายไปต่อเนื่อง เนื่องจากมีการถอด Data Logger ออกมาเพื่อดาวน์โหลดข้อมูล ทำให้ข้อมูลช่วงระหว่างเวลา 18:47 – 18:52 น. ขาดหายไป



รูปที่ ๓ แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆตลอดเวลา และกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างเวลา 17: 45 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 ถึงเวลา 0: 33 น. ของวันที่ 9 ธันวาคม 2554

1.11 ช่วงอุ่นเก็บน้ำเหล็กเพื่อเตรียมการใช้งานด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ

เมื่อเวลาใกล้ 21: 00 น. ได้ซึ่งเป็นเวลาสิ้นสุดอัตราค่าไฟฟ้าที่สูงแล้ว เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า จึงจะกลับมาใช้ไฟฟ้าเพื่อเริ่มต้นการหลอม ดังนั้นก่อนเวลาเริ่มใช้งานเก็บน้ำเหล็ก เก็บน้ำเหล็กที่ต้องรอการใช้งานอยู่เป็นเวลานานจึงมีอุณหภูมิต่ำลงมาก จึงจำเป็นต้องอุ่นเก็บน้ำเหล็ก โดยการอุ่นเก็บน้ำเหล็กต้องอุ่นก่อนที่จะถึงเวลา 21: 00 น. ดังที่จะเห็นได้จากรูปที่ ๓ ที่เวลา 20: 09 – 21: 18 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 เก็บน้ำเหล็กจะถูกอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ จึงทำให้อุณหภูมิของผนังเก็บน้ำเหล็กจะค่อยลดลงในอัตราที่น้อยลง และค่อยๆเพิ่มขึ้นในที่สุด

1.12 ช่วงการเปลี่ยนตัวดูดซับความร้อน

เนื่องจากระหว่างการอุ่นเก็บน้ำเหล็ก อุณหภูมิของ Data Logger เริ่มสูงขึ้นเนื่องมาจาก ตัวดูดซับความร้อนเริ่มถูกดูดซับความร้อนจนเต็มขีดความสามารถ จึงต้องหยุดการอุ่นเก็บน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ แล้วยกเก็บน้ำเหล็กลงจากแท่นอุ่นเพื่อนำตัวดูดซับความร้อนเข้าไปเปลี่ยนจึงทำให้ผนังเก็บน้ำเหล็กเริ่มถ่ายความร้อนออกสู่บรรยากาศ จะสังเกตได้จากรูปที่ ๓ ระหว่างเวลา 21: 18 – 21: 34 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 อุณหภูมิของผนังเก็บน้ำเหล็กแต่ละจุดจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในอัตราที่ลดลงจนอุณหภูมิต่ำลงในเวลาต่อมา ก่อนที่เก็บน้ำเหล็กจะถูกยกกลับไปอุ่นต่อด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟอีกครั้งที่เวลา 21: 34 – 22: 53 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554

1.13 ช่วงการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อรอการซ่อมท่อในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

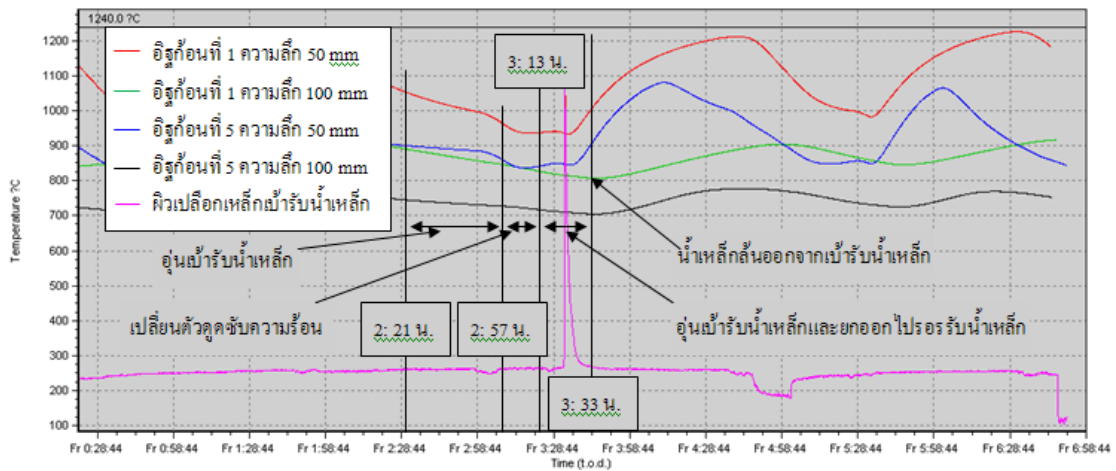
ในช่วงเวลาประมาณ 2: 00 น. ของวันที่ 9 ธันวาคม 2554 ท่อน้ำระบายความร้อนภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเกิดรั่วขึ้น ทำให้ต้องใช้เวลาในการซ่อมแซมท่อ น้ำจึงทำให้เบ้ารับน้ำเหล็กต้องอุ่นรอเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ากลับมาหลอมเหล็กต่อไป ทำให้การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในช่วงระหว่างเวลา 2:21 – 3: 13 น. ของวันที่ 9 ธันวาคม 2554 นั้นมีความยาวนานกว่าการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กครั้งอื่นๆ แต่เนื่องจากระหว่างช่วงเวลาดังกล่าวการเผาเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นไม่ได้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง จะเห็นในรูปที่ จ ระหว่างเวลา 2: 57 – 3: 13 น. ของวันที่ 9 ธันวาคม 2554 อุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะค่อยๆ เริ่มลดลง เนื่องมาจากการเปลี่ยนตัวดูดซับความร้อน แต่ช่วงหลังจากเวลาดังกล่าวเบ้ารับน้ำเหล็กก็ถูกยกกลับไปอุ่นต่ออีกครั้งจะเห็นได้จากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยหลังจากเวลา 3: 13 น. ของวันที่ 9 ธันวาคม 2554 และลดตัวลงเล็กน้อยเมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กหยุดอุ่นแล้วถูกยกออกไปรอรับน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

เนื่องจากการหยุดการทำงานไปเป็นระยะเวลาสั้นๆ เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจึงมีการเตรียมอุณหภูมิน้ำเหล็กให้สูงถึง 1700°C เมื่อน้ำเหล็กที่อุณหภูมิสูงไหลมายังเบ้ารับน้ำเหล็ก น้ำเหล็กก็เกิดล้นออกมาจากเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำให้ที่เวลาประมาณ 3: 13 น. สาย Thermocouple ที่อยู่ภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็กถูกแฉกและน้ำเหล็ก กระเด็นออกมาโดนสร้างความแปรปรวนให้แก่อุณหภูมิที่วัดได้ ดังจะเห็นได้ในรูปที่ จ อุณหภูมิต่างๆ มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และลดกลับไปยังอุณหภูมิช่วงก่อนที่จะถูกน้ำเหล็ก โคนสาย Thermocouple ภายในเวลาประมาณ 21 วินาที แต่หลังจากเวลา 3: 33 น. ของวันที่ 9 ธันวาคม 2554 การเก็บข้อมูลก็ยังคงดำเนินต่อไป Data Logger ยังคงส่งข้อมูลและบันทึกข้อมูล โดยมีลักษณะอุณหภูมิที่คล้ายคลึงกับผลการเก็บข้อมูลก่อนหน้า จะปรากฏความแตกต่างที่เวลาประมาณ 6: 05 – 6: 51 น. ของวันที่ 9 ธันวาคม 2554 อุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 5 ที่ตำแหน่งความลึก 50 mm จากผิวภายในที่สัมผัสกับน้ำเหล็กมีการลดลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว แตกต่างกับรอบการทำงานรอบอื่นๆ

2. ข้อสังเกตของข้อมูล

จากการวิเคราะห์พฤติกรรมแปรผันอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ และกิจกรรมต่างๆ ทำให้ได้ข้อสังเกตอันเป็นประโยชน์ต่อการค้นคว้า และพัฒนากระบวนการทำงานต่อไป โดยข้อสังเกตต่างๆ ที่ได้จากการวิเคราะห์มีดังนี้

- อุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งความลึกจากผิวที่สัมผัสกับน้ำเหล็กลงไป 50 mm จะ

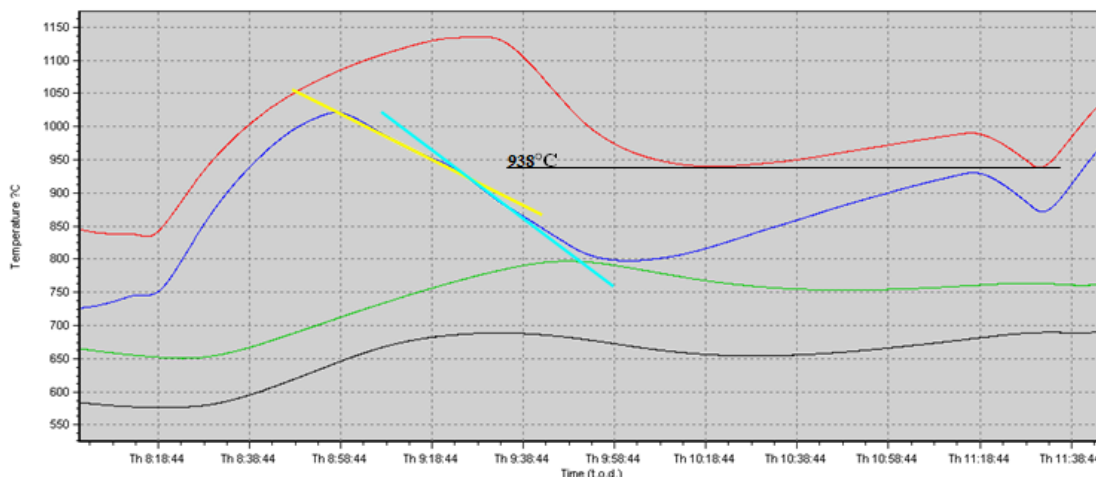


รูปที่ ๖ แผนภูมิอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆตลอดเวลา และกิจกรรมต่างๆที่เกิดขึ้น

ระหว่างเวลา 0: 22 – 6: 51 น. ของวันที่ 9 ธันวาคม 2554

- หากสังเกตลักษณะของอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 1.2 จะพบว่าความร้อนที่ก้นเบ้ารับน้ำเหล็กได้รับนั้นต่ำกว่าความร้อนบริเวณกลางเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยน่าจะมีสาเหตุมาจากเปลวไฟที่พุ่งลงมาทางด้านบนของเบ้ารับน้ำเหล็ก อาจมีการรวบตัวกลับ ทำให้เปลวไฟไปไม่ถึงส่วนก้นของเบ้ารับน้ำเหล็ก
- อุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ระดับความลึกจากผิวที่สัมผัสกับน้ำเหล็กลงไป 50 mm ที่ต่ำที่สุดเมื่อเริ่มสัมผัสกับน้ำเหล็กนั้นมีอุณหภูมิอยู่ที่ 712°C (รอบการรับน้ำเหล็กครั้งแรก) นั้นแสดงให้เห็นว่า ที่ระดับความลึก 50 mm นี้ก็เป็นระดับที่เพียงพอต่อการนำเบ้ารับน้ำเหล็กไปใช้งานเพื่อรับน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ดังนั้นหากเบ้ารับน้ำเหล็กมีการใช้งานที่ต่อเนื่องภายในเวลาที่ไม่ยาวนานเกินไป อุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะยังไม่เย็นตัวจนต่ำกว่าอุณหภูมิ 712°C เบ้ารับน้ำเหล็กสามารถใช้งานต่อเนื่องได้โดยไม่ต้องมีการอุ่น
- อัตราการลดลงของอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 5 ที่ระดับความลึกจากผิวที่สัมผัสกับน้ำเหล็กเป็นระยะ 50 mm จะมีอยู่ 2 อัตรา ได้แก่ช่วงแรกที่น้ำเหล็กภายในเบ้ามีระดับลดต่ำกว่าตำแหน่งที่ฝัง Thermocouple ในอิฐก้อนที่ 5 อุณหภูมิจะลดลงในอัตราเฉลี่ยที่ -3.24°C/min (เส้นสีเหลืองในรูปที่ ๖) และช่วงต่อมาที่สลดและน้ำเหล็กที่เหลืออยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กถูกเทออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กแล้วอุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้จะลดลงในอัตราเฉลี่ย -4.72°C/min (เส้นสีฟ้าในรูปที่ ๖) นั้นเป็นผลเนื่องมาจากในขณะที่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กยังคงมีน้ำเหล็กอยู่ภายในแต่ละระดับน้ำเหล็กต่ำกว่าตำแหน่งที่ตรวจวัดอุณหภูมิในอิฐก้อนที่ 5 น้ำเหล็กจะยังคงมีการถ่ายเทความร้อนสู่อิฐก้อนที่ 5 อยู่ด้วยทั้งในแบบการแผ่รังสีความร้อนและการนำความร้อนจากอิฐก้อน

ที่ต่ำกว่าขึ้นมาจึงทำให้อัตราการลดลงของอุณหภูมิในช่วงนี้ลดลงด้วยอัตราที่ช้ากว่าเมื่อแสลคและน้ำเหล็กที่เหลือถูกเทออกไป แต่ในรอบการทำงานรอบสุดท้ายที่มีการเก็บข้อมูล จะไม่ปรากฏลักษณะอัตราการลดลงที่แตกต่างกันเลย



รูปที่ ๓ อัตราการลดลงของอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่อิฐก้อนที่ 5 ที่ระยะความลึก 50 mm จากผิวอิฐฝั่งรับน้ำเหล็กจะมีอยู่ 2 ลักษณะ และการลดลงอย่างรวดเร็วของอุณหภูมิเมื่อตั้งทิ้งไว้

- การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนั้นจะยังไม่ช่วยให้อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเพิ่มขึ้นได้ทันที โดยในระยะแรกอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กจะยังคงลดลง แต่ลดลงในอัตราต่ำลงเรื่อยๆจนอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเริ่มสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิในอิฐก้อนที่ 1 ที่ระยะความลึก 50 mm จากผิวอิฐฝั่งที่สัมผัสกับน้ำเหล็กจะใช้เวลาประมาณ 32 นาที อุณหภูมิที่ตำแหน่งนี้จึงจะเริ่มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ที่อิฐก้อนที่ 5 ที่ระยะความลึก 50 mm จากผิวอิฐฝั่งที่สัมผัสกับน้ำเหล็กนั้นใช้เวลาเพียง 14 นาที ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอิฐก้อนที่ 1 นั้นถูกเริ่มอุ่นที่ตำแหน่งนี้อุณหภูมิยังคงสูงอยู่ อิฐก้อนนี้จึงถ่ายเทความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมจนกระทั่งสิ่งแวดล้อมรอบข้างเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้นอุณหภูมิในผนังจึงจะสูงขึ้น แต่อิฐก้อนที่ 5 มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจึงถ่ายเทความร้อนออกได้เพียงเล็กน้อยจึงมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อม อิฐก้อนที่ 5 จึงเริ่มมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นก่อนเมื่อได้รับการอุ่นจากหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟเหมือนกัน สิ่งที่สังเกตได้คือหากต้องการเพิ่มอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กต้องใช้เวลาระยะหนึ่งอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจึงจะเพิ่มขึ้น หากใช้เวลาในการอุ่นที่สั้นเกินไปการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจะเป็นแค่การชะลอการลดลงของอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเท่านั้น

- จากรูปที่ ๓ จะเห็นได้ชัดเจนว่าอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 1 ที่ระยะความลึก 50 mm นั้น ต้องใช้เวลาประมาณ 84 นาทีจึงจะสามารถลดอัตราการลดลงของอุณหภูมิให้กลับ เป็นเพิ่มอุณหภูมิภายในอิฐก้อนนี้ให้มีอุณหภูมิถึง 990°C ได้ แต่ใช้เวลาเพียง 15 นาที อุณหภูมิที่อิฐก้อนนี้สามารถกลับตกลงไปยังอุณหภูมิประมาณ 938°C ซึ่งเป็นช่วง อุณหภูมิที่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งดังกล่าวเริ่มมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิได้ ดังนั้นการตั้งทิ้งไว้โดยไม่มีการป้องกันใดๆ จะทำให้อุณหภูมิที่จุดนั้นๆ ตกลงอย่าง รวดเร็ว และต้องใช้เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อให้ผนังเบ้ามีอุณหภูมิ สูงขึ้นตามที่ต้องการ
- ระยะทางมีผลต่อการตอบสนองของอุณหภูมิเป็นอย่างยิ่ง หากพิจารณารูปที่ ๓ นี้จะ พบว่าที่ตำแหน่งตรวจวัดระยะลึกลงไปในตัวอิฐฝั่งที่รับน้ำเหล็กลงไป 50 mm จะมีการตอบสนองทางอุณหภูมิที่เร็วกว่า เช่นอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 5 ที่ระยะความลึก 50 mm (เส้นสีน้ำเงิน) จากตัวอิฐฝั่งที่สัมผัสกับน้ำเหล็กที่เวลาประมาณ 8: 58 น. ของ วันที่ 8 ธันวาคม 2554 จะเริ่มปรากฏการตอบสนองของระดับน้ำเหล็กที่ลดลงผ่าน ระดับความสูงที่ตรวจวัดที่อิฐก้อนดังกล่าว ด้วยการลดลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งนั้น แต่อุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 5 ที่ระยะความลึก 100 mm (เส้นสีดำ) จะมีการตอบสนอง ด้วยการลดลงของอุณหภูมิที่เวลาประมาณ 9: 34 น. ของวันที่ 8 ธันวาคม 2554 ดังนั้น แล้วที่ระดับความลึกจากฝั่งที่สัมผัสกับน้ำเหล็กยิ่งมากผลของอุณหภูมิที่ตอบสนอง ต่อกิจกรรมจะยิ่งรวดเร็วมากยิ่งขึ้น
- เมื่อสังเกตอุณหภูมิของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะพบว่าอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละรอบการทำงานนั้นจะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กได้ใช้งานอย่างต่อเนื่อง โดยการ เพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละรอบการทำงานนั้นจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่ลดลง แสดงให้เห็นว่าในแต่ละรอบการหลอมเมื่ออุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก เพิ่มขึ้น น้ำเหล็กจะมีการสูญเสียความร้อนผ่านการนำความร้อนเข้าไปในผนังเบ้ารับ น้ำเหล็กน้อยลง ดังนั้นหากมีการใช้เบ้ารับน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่อง จะมีแนวโน้มที่จะ สามารถลดอุณหภูมิเทน้ำเหล็กลงได้ เนื่องจากการสูญเสียความร้อนผ่านการนำความร้อนผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเริ่ม เกิดลักษณะการอิมิตัวทางอุณหภูมิเกิดขึ้น
- เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กผ่านการทำงานมาได้ 3 รอบการทำงานอุณหภูมิผิวเปลือกเหล็ก ของเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีอุณหภูมิกว้างอยู่ในช่วงที่ค่อนข้างคงที่ โดยมีค่าเฉลี่ย อุณหภูมิผิวเปลือกเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็กอยู่ที่ 252°C

2.1 บทสรุปเบื้องต้น

จากการวิเคราะห์ข้อมูลและการตั้งข้อสังเกตนั้นนำไปสู่ข้อสรุปเบื้องต้นได้ดังนี้

- การอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กที่พ่นเข้ามีอุณหภูมิสูงต้องใช้เวลาประมาณครึ่งชั่วโมงจึงจะเห็นผลการเพิ่มของอุณหภูมิในพ่นเป่ารับน้ำเหล็กอย่างทั่วถึงตลอดทั้งเป่า หากใช้เวลาดำกว่านั้นจะเป็นการลดอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่พ่นเป่ารับน้ำเหล็กเท่านั้น
- การถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กเข้าสู่พ่นเป่ารับน้ำเหล็กผ่านการนำความร้อนในพ่นเป่ารับน้ำเหล็กนั้นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิในพ่นเป่ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้นสังเกตได้จากแนวโน้มการอ้อมตัวทางอุณหภูมิของพ่นเป่ารับน้ำเหล็กเมื่อผ่านการใช้งานหลายรอบการทำงาน
- อุณหภูมิต่ำสุดในพ่นเป่ารับน้ำเหล็กที่ระยะลึก 50 mm จากผิวพ่นฝั่งที่สัมผัสกับน้ำเหล็กคือ 712°C ที่อุณหภูมิ 5 ในการนำเป่ารับน้ำเหล็กไปใช้รับน้ำเหล็กครั้งแรก
- เนื่องจากอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 5 ระยะลึก 50 mm นั้นมีการตอบสนองทางอุณหภูมิที่รวดเร็วกว่าที่ระยะลึก 100 mm อีกทั้งยังมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิของอิฐก้อนที่ 1 ที่ระยะลึกเดียวกันทำให้ตำแหน่งดังกล่าวมีความเหมาะสมที่จะเป็นตัวแทนของอุณหภูมิเป่ารับน้ำเหล็กเพื่อใช้ในการตัดสินใจการทำการกิจกรรมต่างๆ มากกว่าตำแหน่งอื่นที่ทำการทดลองเก็บข้อมูล
- อิฐก้อนที่ 1 ระยะลึก 50 mm จากผิวอิฐด้านที่สัมผัสกับน้ำเหล็กเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศจะมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ $-7.6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ในขณะที่อิฐก้อนที่ 5 ระยะลึก 50 mm จากผิวอิฐด้านที่สัมผัสกับน้ำเหล็กเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศจะมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ $-3.2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เมื่อยังมีน้ำเหล็กและสแลคเหลืออยู่ภายในเป่ารับน้ำเหล็ก และมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเฉลี่ยที่ $-4.7^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เมื่อน้ำเหล็กและสแลคถูกเทออกจากเป่ารับน้ำเหล็กจนหมดแล้ว
- อุณหภูมิผิวเปลือกเหล็กของเป่ารับน้ำเหล็กนั้นเมื่อผ่านการใช้งานไป 3 รอบการทำงานจะมีอุณหภูมิกวัดแกว่งเฉลี่ยอยู่ที่ 252°C

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชัชวาลย์ วุฒิสิริศาสตร์ เกิดเมื่อวันที่ 8 เดือนธันวาคม ปีพุทธศักราช 2530 ที่กรุงเทพฯ และเติบโตที่จังหวัดแพร่ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 มีผลงานตีพิมพ์ระดับชาติในงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 25 และงานประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8 และมีผลงานตีพิมพ์ในระดับนานาชาติในงาน IASTED Asian Conference on Power and Energy System (AsiaPES2012) ระหว่างการศึกษาได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชาเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์ มีประสบการณ์การทำงานเป็นผู้ช่วยสอนหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และผู้ช่วยนักวิจัยชั่วคราวของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย