

การปรับปรุงระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า
ให้สัมพันธ์กับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก

นายรักเกียรติ วารินศิริรักษ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

IMPROVEMENT OF ASSISTING-CONTROL SYSTEM FOR ELECTRIC ARC FURNACE
BASED ON THERMAL CONDITION OF THE LADLE

Mr. Rakkiet Warinsirux



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก
โดย	นายรักเกียรติ วารินศิริรักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันหยศ จันทรานูวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันหยศ จันทรานูวัฒน์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรรานนท์)

รักเกียรติ วารินศิริรักษ์ : การปรับปรุงระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก (IMPROVEMENT OF ASSISTING-CONTROL SYSTEM FOR ELECTRIC ARC FURNACEBASED ON THERMAL CONDITION OF THE LADLE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.พงษ์ธร จรรย์ญาณกรณ, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร.สันหพศ จันทรานูวัฒน์, 147 หน้า.

กระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่มีการใช้พลังงานสูงมาก ซึ่งใช้ทั้งพลังงานไฟฟ้าในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และ ใช้เชื้อเพลิงในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้พลังงานทั้งสองส่วนไม่สัมพันธ์กัน วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้พลังงานโดยรวมของกระบวนการดังกล่าว โดยการสร้างระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าและเบ้ารับน้ำเหล็กให้สอดคล้องกัน และสามารถทำนายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเหล็กได้แม่นยำขึ้นจึงไม่ต้องเผื่ออุณหภูมิการเทน้ำเหล็กให้สูงเกินไป จำลองการทำงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยจำลองสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กตามเวลาของกิจกรรมต่างๆที่ปฏิบัติงานในโรงงาน ตัวอย่าง และปรับแก้สถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนนำเบ้ารับน้ำเหล็กไปรับน้ำเหล็กด้วยการรับข้อมูลซึ่งเป็นตัวแทนอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กเข้ามาปรับแก้ให้สถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กแม่นยำขึ้น จากนั้นระบบจะให้ค่าอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และ เวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริง

ผลการศึกษาระบบช่วยควบคุมการทำงานที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลการทำงานจริงของโรงงานตัวอย่างที่กำลังผลิตน้ำเหล็กเท่ากับ 144,000 ตันต่อปี พบว่าสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้า 20.3 kWh/ตันน้ำเหล็ก เมื่อพิจารณาการทำงานตลอดทั้งปี พบว่าสามารถประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าคิดเป็นมูลค่า 8.76 ล้านบาท

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5570344221 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: TAPPING TEMPERATURE / LADLE / ASSISTING-CONTROL SYSTEM /
ELECTRIC ARC FURNACE

RAKKIET WARINSIRIRUX: IMPROVEMENT OF ASSISTING-CONTROL SYSTEM FOR
ELECTRIC ARC FURNACEBASED ON THERMAL CONDITION OF THE LADLE.

ADVISOR: ASSOC. PROF.PONGTORN CHARUNYAKORN, Ph.D., CO-ADVISOR:
ASST. PROF.SUNHAPOS CHANTRANUWATHANA, Ph.D., 147 pp.

Energy consumption in steel making process with electric arc furnace is intensely high. The process involves both electricity consumption in electric arc furnace and fuel consumption in ladle preheating. They are not well-coordinated in term of energy usage. This thesis aims to reduce overall energy consumption of the process by creating an assisting-control system for electric arc furnace based on thermal condition of ladle. The system employs a mathematics model that can help control the electric arc furnace and ladle operation consistently. In addition it can predict temperature change of the molten steel more accurately, therefore, tapping temperature can be reduced significantly. The system simulates the steelmaking process by simulating thermal condition of the ladle according to time of activities in a selected factory. The thermal condition of ladle is adjusted before steel tapping based on representative temperature measurement of the ladle. Finally the system outputs recommended tapping temperature and suitable time of ladle preheating so as to be adopted by furnace operator.

The test results of the assisting-control system by comparing with the actual operation data of the selected factory, 144,000ton/year capacity, show that electric energy consumption reduction of about 20.3 kWh/ton could be realized. This leads to annual saving of 8.76 Million baht.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2015 Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญาณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านอุสาหกรรมการหลอมเหล็กให้อย่างมากมาย อีกทั้งคอยช่วยเหลือ และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทำวิทยานิพนธ์ซึ่งบ่อยครั้งได้พบเจอกับอุปสรรคขวากหนาม ก็ได้รับการชี้แนะให้ก้าวเดินต่อไปได้สำเร็จ และขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์ จันทรานูวัฒน์ ที่คอยให้คำปรึกษาเกี่ยวกับงานในส่วนของระบบควบคุม อีกทั้งยังชี้ให้เห็นถึงแนวทางการแก้ปัญหาที่ถูกต้องแก่ข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ ที่ให้เกียรติเป็นประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติน แดงเที่ยง และรองศาสตราจารย์ ดร.ไชยณรงค์ จักรธรานนท์ ที่สละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ บริษัท สยามสตีล ซินดิเกต จำกัด มหาชน ที่ให้การสนับสนุนการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ และ ขอขอบคุณคุณบุญล้ำ ศรีพิชัย ผู้อำนวยการโรงงาน, คุณพิษณุ เจริญสมศักดิ์ ผู้จัดการโรงงาน, คุณวันชัย มนูญพานิชย์ ผู้จัดการส่วนโรงหลอม และ คุณธเนศ วงศ์ประยูร ที่คอยให้คำปรึกษาการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ อีกทั้งเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงานทุกท่านที่อำนวยความสะดวกให้กับการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณคุณศุภศักดิ์ศิริ พุ่มพฤษ จากบริษัท พีพี ซีสเต็ม จำกัด ที่เสียสละเวลาให้คำแนะนำเกี่ยวกับการตรวจวัด การติดตั้งอุปกรณ์ และให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัด

ขอขอบคุณคุณกฤติศักดิ์ ไร่ไพรุจพิงค์ ที่ให้คำปรึกษาเรื่องข้อมูลการทำงานวิจัย และการเขียนโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่คอยเลี้ยงดู และเป็นกำลังใจให้ตลอดเวลา รวมถึงผู้ที่คอยสนับสนุนที่ไม่ได้กล่าวมา ณ ที่นี้ด้วย และประโยชน์ที่ได้รับของการศึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ขอให้กลับเป็นคุณงามความดีของทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 การนำเสนอผลงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 การถ่ายเทความร้อนของกระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก.....	6
2.2 การถ่ายเทความร้อนในระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	9
2.3 การถ่ายเทความร้อนของกระบวนการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก.....	16
2.4 งานวิจัยเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตา หลอมอาร์คไฟฟ้า.....	20
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	23
3.1 อุปกรณ์ในการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	23
3.1.1 เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF).....	23
3.1.2 เข้ารับน้ำเหล็ก (Ladle).....	24
3.1.3 สถานีการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine).....	26

3.2	กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	29
3.2.1	วัฏจักรการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	29
3.2.2	วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก	31
3.3	การถ่ายเทความร้อนระหว่างระหว่างกระบวนการผลิตทั้งหมด.....	34
3.3.1	การนำความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก	34
3.3.2	การพาความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก	35
3.3.3	การแผ่รังสีความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก	38
3.3.3.1	ตัวประกอบการมองเห็น (View-Factor).....	39
3.3.3.2	การแผ่รังสีในพื้นที่ปิดล้อม.....	41
3.4	ปริมาณพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมด	47
3.5	การออกแบบระบบช่วยควบคุมด้วยวิธีการปริภูมิสเตต (State-space design)	47
3.5.1.1	การออกแบบตัวประมาณค่าสเตตแบบอันดับเต็ม (Full-order state estimator).....	48
3.5.1.2	ความสังเกตได้ (Observability).....	49
3.5.2	การประยุกต์ใช้สมการสมดุลพลังงานของเบ้ารับน้ำเหล็กเข้ากับสมการตัวประมาณค่าสเตต.....	50
บทที่ 4	การเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	53
4.1	การวิเคราะห์พลังงานในแต่ละกระบวนการของสถานีการทำงานต่างๆ.....	53
4.2	การนำความร้อนเข้าสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก	54
4.3	การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แต่ละกระบวนการ	56
4.3.1	การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	56
4.3.2	การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	58
4.3.3	การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	63

4.3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเหนี่ยวนำเหล็กจากเข้รับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก	66
4.3.5 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการนำสแลกไปเททิ้ง และการซ่อมแซมเข้รับน้ำเหล็กเหล็ก	70
4.4 การออกแบบตัวประมาณค่าสถานะ	71
4.4.1 การเขียนระบบในรูปปริภูมิสเตรต.....	71
4.4.2 ตัวประมาณค่า.....	79
4.4.2.1 สูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ackermann's Formular).....	79
4.4.2.2 ตัวกรองคาร์ลมาล (Kalman's Filter)	81
4.5 สรุปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละกระบวนการ.....	82
4.5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอุ่นเข้รับน้ำเหล็ก (Model-A)	84
4.5.1.1 กระบวนการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กทั่วไป (Model-A1).....	85
4.5.1.2 กระบวนการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กพิจารณาค่าอุณหภูมิการตรวจวัด (Model-A2)	86
4.5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการนำสแลกไปเททิ้ง และซ่อมแซมเข้รับน้ำเหล็ก (Model-A3)	87
4.5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการพักเข้รับน้ำเหล็ก (Model-B).....	88
4.5.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก (Model-C).....	88
4.5.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเหนี่ยวนำเหล็กจากเข้รับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก (Model-D).....	89
4.5.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Model-F).....	90
บทที่ 5 การประยุกต์ใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	93
5.1 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิเข้รับน้ำเหล็กตลอดระยะเวลาการปฏิบัติงานจริง.....	93

5.1.1 วิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัด.....	99
5.2 ลำดับการใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบช่วยควบคุมการทำงาน	100
5.2.1 โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับการปฏิบัติงานจริง	100
5.2.2 โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเหนี่ยวนำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก	105
5.3 การเปรียบเทียบลำดับชั้นการทำงานของระบบช่วยควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น.....	109
บทที่ 6 ผลการศึกษาวิจัย	111
6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	111
6.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเปรียบเทียบข้อมูลกับบันทึกการทำงานจริง	111
6.1.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเหนี่ยวนำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	112
6.1.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า	114
6.1.4 การตรวจสอบการประมาณเวลาของกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก	115
6.1.5 การตรวจสอบการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ	116
6.2 การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงาน.....	117
6.2.1 ผลจากการใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานในการทำนายอุณหภูมิการเหนี่ยวนำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เหมาะสม	117
6.2.2 ผลลัพธ์การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานทำนายอุณหภูมิการเหนี่ยวนำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กโดยใช้เวลาที่เกิดขึ้นจริงของกระบวนการต่างๆ.....	121
6.3 รูปแบบการทำงานของระบบช่วยควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น	125
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	128
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	128

7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	129
รายการอ้างอิง	131
ภาคผนวก ก รายละเอียดอุปกรณ์ทดลอง แผนผังการเจาะอิฐฝั่งเทอร์โมคัปเปิล แพลนกล่อง ป้องกันอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งสัญญาณการตรวจวัดอุณหภูมิ และลักษณะการก่ออิฐของ ผนังเบารับน้ำเหล็ก	135
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	147



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขการทดลองของ J.L. Xia และ T. Ahokainen [12]	12
ตารางที่ 3.1 แสดงรูปแบบสมการการหาค่า Nu_L ในลักษณะต่างๆ	37
ตารางที่ 4.1 ค่าตัวต้านทานทางความร้อนที่ถูกกำหนดขึ้นมาใหม่ [5]	62
ตารางที่ 4.2 ความหนาของก้อนย่อยที่แบ่งเพื่อเขียนระบบให้อยู่ในรูปปริภูมิสเตรต [5].....	73
ตารางที่ 4.3 สมการแสดงอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ของก๊าซไอเสียที่เลือกใช้งาน	84
ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิของจุดทำงานใหม่ที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงของ $T_{m1,i}^*(K)$	85
ตารางที่ 5.1 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานทั้งสิ้น 11 รอบการทำงาน [5].....	95
ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆของเบ้ารับน้ำเหล็ก	100
ตารางที่ 5.3 ตารางเปรียบเทียบการทำงานของระบบช่วยควบคุม.....	110
ตารางที่ 6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าจากการตรวจวัด	115
ตารางที่ 6.2 ผลการทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่รอบการทำงานต่างๆเมื่อใช้เวลาเฉลี่ยของแต่ละกระบวนการ	118
ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เหมาะสมที่รอบการทำงานต่างๆโดยใช้เวลาที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานจริงของแต่ละกระบวนการ.....	122
ตารางที่ 6.4 ผลการใช้งานของระบบช่วยควบคุมการทำงาน	123

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 การใช้ปริมาณเหล็กโคคกัณฑ์ของประเทศไทยและปริมาณเหล็กที่ผลิตจากการหลอม เศษเหล็กในปี 2534 – 2551 โดยข้อมูลปริมาณเหล็กที่ผลิตจากการหลอมเศษเหล็กเริ่มเก็บปี 2546 (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย [2]).....	2
รูปที่ 2.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการตรวจวัด และการคำนวณของการแจกแจงของ อุณหภูมิภายในเข้รับน้ำเหล็กที่กระบวนการอุ่นเข้รับน้ำเหล็ก [6].....	7
รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้แบบจำลองการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กและ ผลการตรวจวัดค่าจริง [8].....	8
รูปที่ 2.3 แบบจำลองในการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กของ สมศักดิ์ คงโชติ [9].....	9
รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบผลการแจกแจงของอุณหภูมิภายในเข้รับน้ำเหล็กจากแบบจำลอง และการทดลองจริง [10]	10
รูปที่ 2.5 ผลการทดลองของการแจกแจงของอุณหภูมิผนังเข้รับน้ำเหล็กด้านบนเปรียบเทียบ ระหว่างการใช่แบบจำลอง กับผลการทดลอง [8].....	11
รูปที่ 2.6 การคำนวณจากแบบจำลองให้เห็นลักษณะการหมุนวนของน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ และชั้น การแจกแจงอุณหภูมิน้ำเหล็ก [12]	12
รูปที่ 2.7 แสดงการแจกแจงของอุณหภูมิ ที่ไม่คงที่ของน้ำเหล็กภายในผนังด้านล่าง และ ด้านของ เข้รับน้ำเหล็กเมื่อเกิดการหมุนวนน้ำเหล็ก [12]	13
รูปที่ 2.8 แสดงส่วนต่างที่เพิ่มขึ้นของการแจกแจงของอุณหภูมิผนังเข้รับน้ำเหล็ก ที่อุณหภูมิผนัง เข้รับน้ำเหล็กเริ่มต้นไม่เท่ากัน [12]	14
รูปที่ 2.9 แสดงส่วนต่างที่ลดลงของการแจกแจงของอุณหภูมิน้ำเหล็ก ที่อุณหภูมิผนังเข้รับน้ำ เหล็กเริ่มต้นไม่เท่ากัน [12]	14
รูปที่ 2.10 แสดงการสูญเสียพลังงานในเข้รับน้ำเหล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ที่อุณหภูมิผนังเข้รับน้ำ เหล็กเริ่มต้นไม่เท่ากัน [12].....	15
รูปที่ 2.11 การแจกแจงอุณหภูมิที่เป็นรอยต่อของแต่ละชั้นของผนังเข้รับน้ำเหล็ก [15].....	16

รูปที่ 2.12 แสดงการแจกแจงอุณหภูมิในรูปของตัวแปรไร้มิติที่เป็นสัดส่วนกับปริมาตรน้ำเหล็ก และเวลาไร้มิติ [16].....	17
รูปที่ 2.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาเมื่อมีความเร็วในการถ่ายน้ำเหล็ก ออกจากเข้าน้ำเหล็ก [16].....	18
รูปที่ 2.14 ขนาดและรูปร่างของภาชนะใส่น้ำเหล็ก [17].....	19
รูปที่ 2.15 ผลการจำลองการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็ก และปริมาณความร้อนที่สูญเสียขณะ ถ่ายเทน้ำเหล็กออกจากภาชนะ [17]	19
รูปที่ 2.16 Streamline และการแจกแจงความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำเหล็กและอากาศภายใน เข้าน้ำเหล็กขณะเทน้ำเหล็ก ก. 1000s ข. 2250s ค. 3500s [18].....	20
รูปที่ 2.17 อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ก. 1000s ข. 2250s ค. 3500s [18]	20
รูปที่ 3.1 ลักษณะและส่วนประกอบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า	25
รูปที่ 3.2 ลักษณะของเข้าน้ำเหล็ก	26
รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์และลักษณะโดยทั่วไปในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (ข้อมูลจาก: http://ietd.iipnetwork.org/content/continuous-casting)	27
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะเข้าน้ำเหล็กของโรงงานตัวอย่าง	28
รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงวัฏจักรการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า [5]	30
รูปที่ 3.6 แสดงกระบวนการทำงานของเข้าน้ำเหล็ก [4].....	32
รูปที่ 3.7 ลักษณะการแผ่รังสีจากพื้นผิว.....	40
รูปที่ 3.8 ลักษณะการแผ่รังสีภายในเข้าน้ำเหล็กเป็นการแผ่รังสีในพื้นที่ปิดล้อม [5].....	42
รูปที่ 3.9 ลักษณะการแผ่รังสีบนพื้นผิว k ใดๆ	43
รูปที่ 3.10 วงจรต้านทานความร้อนของพื้นผิว k ในพื้นที่ปิดล้อมด้วยพื้นผิว n ผิว.....	47
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการเขียนสมดุลพลังงานของวัตถุที่ถูกแบ่งเป็นก่อนย่อยให้อยู่ในรูปปริภูมิสเตต..	51
รูปที่ 4.1 วัฏจักรการทำงานของเข้าน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำงานโดยแสดงค่าความร้อนที่เข้าออกระบบรวมทั้งหมด [5]	54
รูปที่ 4.2 การถ่ายเทความร้อนของผนังเข้าน้ำเหล็กแบ่งตามปริมาตรควบคุม	55

รูปที่ 4.3	กระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กที่มีก๊าซไอเสียถ่ายเทความร้อนให้กับผนังเข้ารับน้ำเหล็ก...	57
รูปที่ 4.4	การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า	59
รูปที่ 4.5	วงจรต้านทานการแผ่รังสีความร้อนของผนังเข้ารับน้ำเหล็ก	61
รูปที่ 4.6	การเปลี่ยนรูปแบบวงจรเดลตาเป็นวงจรวาร์ย.....	61
รูปที่ 4.7	การเปลี่ยนวงจรต้านทานทางการแผ่รังสีความร้อนจากวงจรแบบเดลตาเป็นวงจรแบบวาร์ย โดยกำหนดรูปแบบตัวแปรใหม่	62
รูปที่ 4.8	เปรียบเทียบกฎกระแสของเคอร์ชอร์ฟและสมดุลทางความร้อนที่จุดรอยต่อ	63
รูปที่ 4.9	ปริมาตรควบคุมของการออกแบบแบบจำลองและการถ่ายเทความร้อน ระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็ก [5]	64
รูปที่ 4.10	การถ่ายเทความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมในผนังข้างและผนังกันเข้ารับน้ำเหล็ก	66
รูปที่ 4.11	ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเข้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเข้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่มีฝาปิดระหว่างกระบวนการ [5]	67
รูปที่ 4.12	แผนภาพการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนอย่างง่ายภายในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเข้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก [5]	69
รูปที่ 4.13	วงจรต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเข้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก	70
รูปที่ 4.14	การนำความร้อนภายในผนังเข้ารับน้ำเหล็กด้านข้างที่กำหนดให้ชั้นทำงาน และชั้นปลดปล่อยเป็นชั้นเดียวกัน [5]	72
รูปที่ 4.15	การนำความร้อนภายในผนังเข้ารับน้ำเหล็กด้านล่างที่กำหนดให้ชั้นทำงาน และชั้นปลดปล่อยเป็นชั้นเดียวกัน [5]	72
รูปที่ 4.16	ความกว้างของก้อนย่อยเมื่อ (ซ้าย) ผนังด้านข้าง (ขวา) ผนังกัน [5]	73
รูปที่ 4.17	ฟลักซ์ความร้อนที่เข้า-ออก ก้อนย่อยก้อนที่ 1 ที่ผิวด้านข้างเข้ารับน้ำเหล็ก [5].....	74
รูปที่ 4.18	ฟลักซ์ความร้อนที่เข้า-ออก ก้อนย่อยก้อนที่ 2 ที่ผิวด้านข้างเข้ารับน้ำเหล็ก [5].....	75
รูปที่ 4.19	ฟลักซ์ความร้อนที่เข้า-ออก ก้อนย่อยก้อนที่ 6 ที่ผิวด้านข้างเข้ารับน้ำเหล็ก [5].....	76
รูปที่ 4.20	ฟลักซ์ความร้อนที่เข้า-ออก เปลือกเหล็กด้านข้างเข้ารับน้ำเหล็ก [5]	76

รูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองในรูปแบบของ Lumped Capacitance Model ของกึ่งตัวนำกับแบบจำลองของซิวส์ที่ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม [5].....	77
รูปที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบพลังงานสะสมในกระบวนการอุ่นน้ำเหล็ก ระหว่างแบบจำลองในรูปแบบของกึ่งตัวนำที่ใช้ Lumped Capacitance Model กับแบบจำลองของซิวส์ที่ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม [5]	77
รูปที่ 4.23 ผลลัพธ์ของการประมาณค่าเมื่อแทนข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่มีสัญญาณรบกวน T_{m4} โดยเส้นทึบจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่า และเส้นบางจะเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง (บน) ตำแหน่งผิวด้านข้าง (ล่าง) ตำแหน่งผิวกัน [5]	80
รูปที่ 4.24 ผลลัพธ์ของการประมาณค่าโดยใช้ตัวประมาณค่าคาร์ลมาลเมื่อแทนข้อมูลอุณหภูมิจากการตรวจวัดลงใน T_{m4} ที่มีสัญญาณรบกวน โดยเส้นทึบจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่า และเส้นบางจะเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง (บน) ตำแหน่งผิวด้านข้าง (ล่าง) ตำแหน่งผิวล่าง [5].....	82
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในน้ำเหล็ก กับเวลา โดยได้จากการพล็อตค่าอุณหภูมิในน้ำเหล็กจากการตรวจวัด.....	91
รูปที่ 4.26 กราฟตัวแทนอุณหภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เทียบกับเวลา	92
รูปที่ 5.1 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิภายในผนังน้ำเหล็กตลอดการทำงาน 11 รอบการทำงาน [5].....	94
รูปที่ 5.2 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิในน้ำเหล็กช่วงตำแหน่งการเตรียมน้ำเหล็กจนถึงสิ้นสุดกระบวนการอุ่นน้ำเหล็ก [5]	99
รูปที่ 5.3 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิในน้ำเหล็กช่วงตำแหน่งน้ำเหล็กหรือการเทน้ำเหล็กจนถึงสิ้นสุดกระบวนการการทำงาน [5].....	99
รูปที่ 5.4 เส้นเวลาการทำงานของน้ำเหล็กในหนึ่งรอบการทำงาน.....	101
รูปที่ 5.5 แผนภาพสายงานของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับ การปฏิบัติงานจริง	102
รูปที่ 5.6 เส้นเวลาการทำงานของน้ำเหล็กของการทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นน้ำเหล็ก	105

รูปที่ 5.7 แผนภาพสายของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเหนี่ยวนำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	107
รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตรวจวัดของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าพร้อมกับการปฏิบัติงานจริงที่ตำแหน่งการวัด 20mm, 50mm และ 100mm ตามลำดับ	112
รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างผลการตรวจวัดกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่ทำนายอุณหภูมิการเหนี่ยวนำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก สำหรับการวัดอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 20mm, 50mm และ 100mm ตามลำดับ.....	113
รูปที่ 6.3 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการขยายเวลาของกระบวนการเหนี่ยวนำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่เวลาเดิม 45 นาที.....	116
รูปที่ 6.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการขยายเวลาของกระบวนการเหนี่ยวนำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่เวลาเดิม 53 นาที.....	117
รูปที่ 6.5 ผลลัพธ์การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานของกรณีที่ 1 จำลองอุณหภูมิน้ำเหล็ก T_{st} และอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก T_{m4} ตลอดทั้งกระบวนการของรอบการทำงานที่ 4.....	119
รูปที่ 6.6 ผลลัพธ์การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานของกรณีที่ 2 จำลองอุณหภูมิน้ำเหล็ก T_{st} และอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก T_{m4} ตลอดทั้งกระบวนการของรอบการทำงานที่ 10.....	119
รูปที่ 6.7 ผลลัพธ์การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานของกรณีที่ 3 จำลองอุณหภูมิน้ำเหล็ก T_{st} และอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก T_{m4} ตลอดทั้งกระบวนการของรอบการทำงานที่ 9.....	120
รูปที่ 6.8 ผลลัพธ์การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานของกรณีที่ 3 จำลองอุณหภูมิน้ำเหล็ก T_{st} และอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก T_{m4} ตลอดทั้งกระบวนการของรอบการทำงานที่ 9 โดยยกเลิกการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	121
รูปที่ 6.9 โปรแกรมประสานงานกับผู้ใช้งานของระบบช่วยควบคุม	127

บทที่ 1

บทนำ

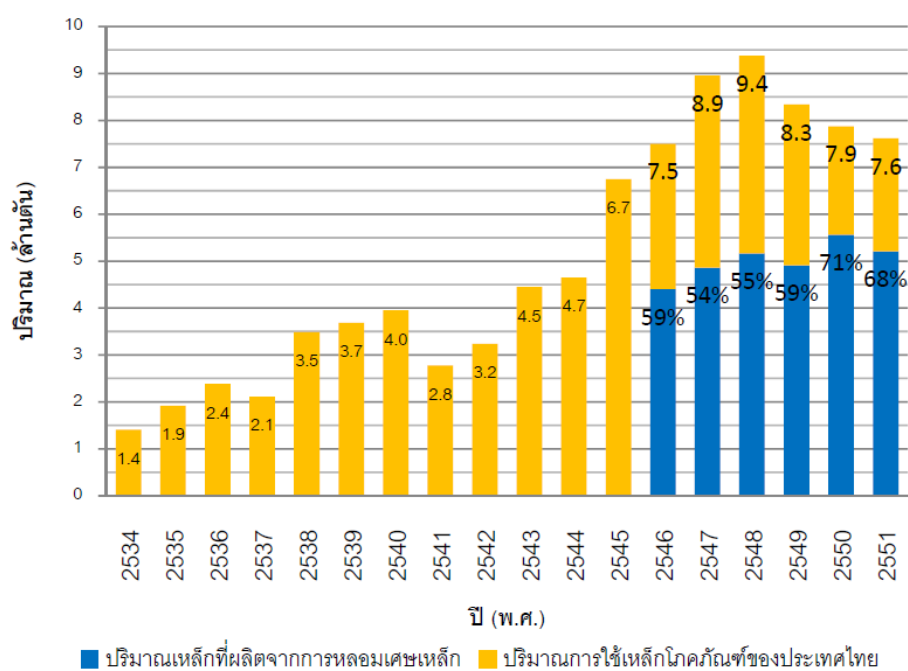
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

ประเทศไทยมีอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าซึ่งจัดว่าเป็นอุตสาหกรรมหลักที่สำคัญต่อภาคอุตสาหกรรมที่มีความจำเป็นต้องใช้ผลิตภัณฑ์ตั้งต้นเป็นเหล็กและเหล็กกล้าไปใช้ในกระบวนการผลิตต่างๆ ข้อมูลจากกรมอุตสาหกรรมและการเหมืองแร่ กล่าวไว้ว่า อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าในปี 2551 มีกำลังผลิตขยายมากขึ้นร้อยละ 8 ปริมาณความต้องการใช้เหล็กอยู่ที่ 10.13 ล้านตัน ขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 8 เป็นผลมาจากการขยายตัวของโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ของภาครัฐและภาคเอกชนที่มีมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี 2555 ถึง ปัจจุบัน อีกทั้งยังมีอุตสาหกรรมรถยนต์ที่เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องตามความต้องการของผู้บริโภค รวมถึงการสร้างสิ่งก่อสร้างขึ้นตามเส้นทางรถไฟฟ้ า หรือ ถนนสายใหม่ที่ตัดผ่านอีกด้วย ทั้งหมดส่งผลให้มีการเพิ่มการบริโภคเหล็กและเหล็กกล้าสูงมากยิ่งขึ้น [1]

ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีอุตสาหกรรมผลิตเหล็กในขั้นการถลุงแร่เหล็ก โดยอุตสาหกรรมที่ผลิตจะมีเพียงการผลิตขั้นกลางหรืออุตสาหกรรมการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF) ผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตได้คือ ผลิตภัณฑ์เหล็กกึ่งสำเร็จรูป (Semi-Finished Products) และผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูป (Finished Products) ในประเทศไทยมีผลิตภัณฑ์เหล็กทรงยาวได้แก่ เหล็กเส้น, เหล็กหลอด, เหล็กโครงสร้างรูปพรรณ, เหล็กแผ่นรีดร้อน ที่ใช้กระบวนการผลิตเหล็กเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามียกกำลังผลิต 3.4, 1.0, 1.5 และ 3.0 ล้านตันต่อปีตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการผลิตเหล็กกล้าภายในประเทศไทยสูง รวมไปถึงปริมาณการใช้เหล็กภายในประเทศในแต่ละปีสูงขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 1.1 พบว่าตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 เป็นต้นมาประเทศไทยเริ่มมีการนำเข้าเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้วนำกลับมาหลอมใหม่และเพิ่มปริมาณการนำเข้าเหล็กกลับมาใช้ใหม่มากยิ่งขึ้นอีกด้วย ซึ่งตั้งแต่ปี 2546-2551 สามารถเพิ่มการนำเข้าเหล็กกลับมาหลอมใหม่ได้จาก 4.4-5.2 ตันต่อปีและสามารถลดปริมาณการนำเข้าเหล็กได้ 0.7 ตันต่อปี [2]

กระบวนการผลิตเหล็กและเหล็กกล้ามีขั้นตอนดังต่อไปนี้ เตรียมวัตถุดิบ, การถลุงเหล็ก, การผลิตเหล็กกล้า การหล่อ รวมถึงการแปรรูปอื่นๆ อีกด้วย ขั้นตอนหลักของการผลิตเหล็กกล้าสามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ การผลิตเหล็กขั้นต้น, การผลิตเหล็กขั้นกลาง และการผลิตเหล็กขั้นปลาย การผลิตเหล็กขั้นต้นได้จากการนำสินแร่เหล็กจากเหมืองมาถลุง จะได้เหล็กถลุงและเหล็กพูน มาใช้ในการผลิตเหล็กกล้า การผลิตเหล็กขั้นกลางนำเหล็กถลุง, เหล็กพูน หรือ เศษเหล็กที่ผ่านกระบวนการ

ใช้งานมาแล้วกลับมาหลอมเหล็กใหม่ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ เหล็กแท่งกลม, เหล็กแท่งแบน และเหล็กแท่งใหญ่ การผลิตเหล็กชั้นปลายคือ การนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการผลิตเหล็กชั้นกลางมาผ่านกระบวนการแปรรูป ด้วยวิธีการแปรรูปร้อนและการแปรรูปเย็น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ เหล็กแท่งยาว (Billet), เหล็กแท่งแบน (Slab) และเหล็กแท่งใหญ่ (Beam)



รูปที่ 1.1 การใช้ปริมาณเหล็กโคคกัมภ์ของประเทศไทยและปริมาณเหล็กที่ผลิตจากการหลอมเศษเหล็กในปี 2534 – 2551 โดยข้อมูลปริมาณเหล็กที่ผลิตจากการหลอมเศษเหล็กเริ่มเก็บปี 2546 (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย [2])

การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจะใช้น้ำเศษเหล็กที่ใช้แล้วกลับมาหลอมใหม่โดย EAF ทำหน้าที่หลอมเศษเหล็กที่เป็นของแข็งเปลี่ยนเป็นน้ำเหล็ก (Molten Steel) และกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่จำเป็นเป็นออกไซด์ พลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าคือพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการการเกิดฟ้าผ่า แท่งอิเล็กโทรดทั้งหมด 3 แท่งของเตาหลอมจะสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแท่งอิเล็กโทรด และเศษเหล็กจนทำให้เกิดการอาร์คทางไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยมีอุณหภูมิสูงถึง $2,000^{\circ}\text{C}$ ทำให้เกิดความร้อนจนเศษเหล็กหลอมละลาย อีกทั้งยังมีการใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ก็คือการขนย้ายน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เบ้ารับน้ำเหล็กที่มีคุณสมบัติในการทนความร้อนแบบพิเศษเพื่อลดการสูญเสียความร้อนจากภายในเบ้ารับน้ำเหล็กออกสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลให้เบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องมีวัสดุทนไฟที่ดีเยี่ยม โดยก่อนที่จะนำเบ้ารับน้ำเหล็กมาใช้รับน้ำเหล็กจะต้องมีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนเพื่อที่จะลดความ

แตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กที่อุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับเบ้ารับน้ำเหล็กอุณหภูมิสูง นอกจากนี้การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนจะเป็นการไล่ความชื้นและยังสมานเนื้อปูนที่ฉาบเอาไว้ให้แห้งและแข็งแรงขึ้น แล้วยังสามารถช่วยป้องกันการเกิดความเค้นทางความร้อนขึ้น (Thermal Stress) ที่จะทำให้เกิดความเสียหายจากการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (Thermal Shock) ซึ่งอาจจะก่อผลเสียตามมา

ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น [3] คำนวณปริมาณพลังงานที่สามารถประหยัดได้จากการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยวิธีการลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก ซึ่งพบว่าการลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก 10°C จะสามารถประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 5.83 kWh/Ton

ชัชวาลส์ วุฒิศิริศาสตร์ [4] เขียนโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ประเมินศักยภาพความประหยัดของการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า พบว่าสามารถประหยัดการใช้พลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าลงด้วยวิธีการลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กลง 29.3°C ซึ่งจะสามารถประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 20.51 kWh/Ton

กิจดิศักดิ์ ราไพรุจิจงศ์ [5] ศึกษาการลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยการพัฒนากระบวนการช่วยควบคุมเพื่อแนะนำอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก พร้อมกับนำข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดของอย่างต่อเนื่องของเบ้ารับน้ำเหล็กเข้ามาใช้ร่วมกับระบบช่วยควบคุม ผลการศึกษาวิจัยพบว่า ระบบช่วยควบคุมที่พัฒนาขึ้นสามารถแนะนำการลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กให้กับการปฏิบัติงานจริงได้ถึง 25°C ซึ่งจะสามารถประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 17.5 kWh/Ton ที่กำลังผลิต $144,000$ ตันต่อปี

การทำงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามีการให้พลังงานหลักเข้าสู่กระบวนการผลิต 2 ประเภท

1. พลังงานไฟฟ้า คือการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างแท่งอิเล็กโทรดกับเศษเหล็ก จนทำให้เกิดลอาร์คที่มีอุณหภูมิสูงมากกว่า $2,000^{\circ}\text{C}$ ซึ่งทำให้เศษเหล็กหลอมเหลวได้ ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นได้จากการฟั่นออกซิเจนเพื่อลดระดับของอะลูมิเนียม, ซิลิกอน, แมงกานีส และคาร์บอนจนได้ระดับขององค์ประกอบธาตุที่สำคัญเหมาะสมตามการนำไปใช้ โดยที่เศษเหล็กจะถูกหลอมเหลวจนมีอุณหภูมิสูงถึง $1,700^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้นน้ำเหล็กจะถูกเคลื่อนย้ายโดยเบ้ารับน้ำเหล็ก เพื่อไปยังสถานีการหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง โดยที่สถานีนี้มีข้อกำหนดว่า อุณหภูมิน้ำเหล็กหยดสุดท้ายจะต้องมีค่าสูงกว่า $1,550^{\circ}\text{C}$ เป็นการป้องกันไม่ให้น้ำเหล็กแข็งตัวระหว่างกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง

2. พลังงานความร้อนที่ได้จากน้ำมันเชื้อเพลิง ใช้สำหรับการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กเพื่อลดการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กให้กับเข้ารับน้ำเหล็ก เข้ารับน้ำเหล็กจำเป็นต้องมีความแข็งแรงและทนทานต่อสภาพการใช้งาน โดยการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กถือเป็นการลดสถานะการเกิดความเค้นทางความร้อน และ ความเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กถือเป็นขั้นตอนสำคัญของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กมีทั้งหมด 2 กรณี คือ การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กครั้งแรกหลังการซ่อมแซม หรือ ก่ออิฐทนไฟภายในเข้ารับน้ำเหล็กใหม่ และ การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กทุกครั้งก่อนที่จะไปรับน้ำเหล็ก สำหรับในกรณีหลังนี้ จะมีการควบคุมการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก ด้วยการกำหนดเวลาที่จะใช้ในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก จากอุณหภูมิภายในเข้ารับน้ำเหล็กที่ได้กำหนดไว้

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ซึ่งสามารถควบคุมการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กควบคุมกัน โดยมีเวลาของแต่ละขั้นตอนในการทำงานเป็นปัจจัยสำคัญในการวิจัย และปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นได้ขณะทำงาน จะถูกนำมาพิจารณาในแบบจำลองด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อพัฒนาระบบช่วยควบคุมของการทำงานเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สอดคล้องกับสถานะทางความร้อนของเข้ารับน้ำเหล็กตลอดทั้งกระบวนการมากยิ่งขึ้น และเพิ่มการตัดสินใจในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กในแต่ละรอบการทำงาน

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ตรวจสอบและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิในเข้ารับน้ำเหล็กเพื่อใช้ในการประมวลผลสถานะทางความร้อนของเข้ารับน้ำเหล็กซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ส่งสัญญาณค่าจากการตรวจวัดอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ค่าดังกล่าวแบบเวลาจริง (Real Time) โดยดำเนินการในโรงงานที่ใช้เข้ารับน้ำเหล็กขนาด 25 ตัน
2. ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลที่ประมวลจากสถานะการทำงานจริงร่วมกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด
3. เพิ่มการตัดสินใจในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กในแต่ละกระบวนการเข้ากับแบบจำลอง

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎี ข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. ตรวจสอบวัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กในระหว่างการทำงานจริงในโรงงานที่ร่วมโครงการวิจัย
3. ปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการวิจัย
4. นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปใช้ค่าจริงที่ได้จากการตรวจวัด เพื่อจำลองทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่สามารถเทได้ และ เพิ่มการตัดสินใจในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละกระบวนการ
5. สรุปผลการศึกษาวิจัย และจัดทำเอกสารเพื่อการเผยแพร่

1.5 การนำเสนอผลงานวิจัย

1. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, The 27th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT), 16 – 18 ตุลาคม 2556, พัทยา จังหวัดชลบุรี นำเสนอผลงานในหัวข้อเรื่อง การยืดอายุการใช้งานของเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการเพิ่มความหนาของอิฐทนไฟด้านรับการเทน้ำเหล็ก (Extension of ladle service life by increasing the thickness of refractory bricks in direct impact with the molten steel during tapping)
2. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29, The 29th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT), 1-3 กรกฎาคม 2558, จังหวัดนครราชสีมา นำเสนอผลงานในหัวข้อเรื่อง การปรับปรุงระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก (Improvement of Assisting-Control System for Electric Arc Furnace Based on Thermal Condition of the Ladle)

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

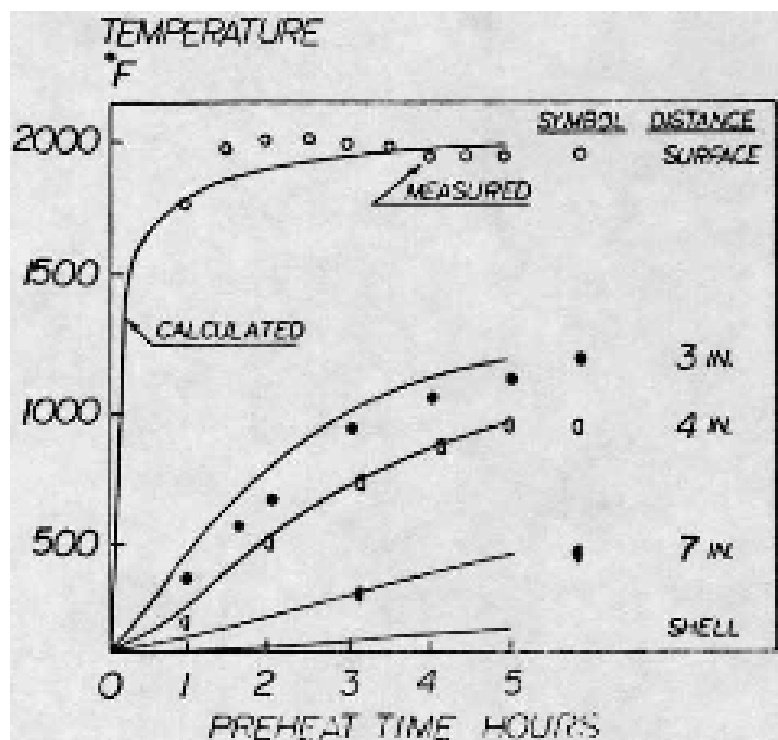
งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์การทำงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ด้วยการพิจารณาสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการต่างๆ พลังงานความร้อนที่เบ้ารับน้ำเหล็กได้รับมีแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง คือ น้ำเหล็กถ่ายเทความร้อนให้กับเบ้ารับน้ำเหล็ก และการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนนำเบ้ารับน้ำเหล็กไปรับน้ำเหล็ก ดังนั้นถ้าสามารถกำหนดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สามารถหล่อเหล็กที่กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องได้ตลอดการทำงาน ส่งผลให้เกิดความประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ซึ่งวิธีดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องทราบความเป็นไปของ สภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ด้วยการใช้ตำแหน่งของอุณหภูมิจากการตรวจวัดมาปรับแก้แบบจำลองให้อุณหภูมิจากการตรวจวัดและอุณหภูมิจากแบบจำลองที่ได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น รวมถึงจะพัฒนาแบบจำลองให้สามารถระบุขั้นตอนของกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละรอบการทำงานโดยสามารถตัดสินใจได้ว่า จะอุ่นหรือไม่ ด้วยเหตุนี้ต้องมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการทำแบบจำลองและวิเคราะห์ขั้นตอนของกระบวนการต่างเพื่อที่จะใช้ในการทำนายอุณหภูมิ และ กำหนดการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละรอบ

2.1 การถ่ายเทความร้อนของกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

การหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าผลิตผลิตภัณฑ์ได้จากเตาหลอมคือ น้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงถึง $1,700^{\circ}\text{C}$ และจะถูกส่งต่อไปยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่อง โดยเบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องสามารถกักเก็บความร้อนไม่ให้ถูกถ่ายเทความร้อนจากด้านในออกไปสู่ด้านนอกมากที่สุด ดังนั้นภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กประกอบด้วยอิฐทนไฟในแต่ละชั้น และจะเสริมความหนามากขึ้นในด้านที่รับการเทน้ำเหล็ก แต่ก่อนที่จะนำเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่มาใช้ จะต้องนำมาอุ่นเสียก่อนเพื่อไล่ความชื้นและเป็นการช่วยการขึ้นรูปของอิฐทนไฟในแต่ละชั้นด้วย อีกทั้งยังช่วยในการลดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างผิวเบ้ารับน้ำเหล็กด้านใน กับน้ำเหล็กให้มีความแตกต่างลดลงด้วย

Saunders [6] เสนอแบบจำลองทางความร้อนที่ใช้เป็นต้นแบบในการสร้างสมการเพื่อหาการแจกแจงของอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กในกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการทำงานพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกส่งผ่านไปเหนืออิฐทนไฟถึงร้อยละ 70 และจะเข้าสู่สภาวะการทำงานแบบคงตัว (Steady State) เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กถูกใช้งานไปแล้ว 5 รอบการทำงาน ในช่วงแรกของการใช้งาน น้ำเหล็กจะมีการสูญเสียพลังงานอย่างมาก เนื่องจากเบ้ารับน้ำเหล็กยังไม่มี การสะสมความร้อนภายในเพียงพอ Saunders ได้เปรียบเทียบผลการทดลองและ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งของอิฐทนไฟระยะต่างๆ รวมผนังเหล็กด้านนอกอีกด้วย แสดงดังรูปที่ 2.1

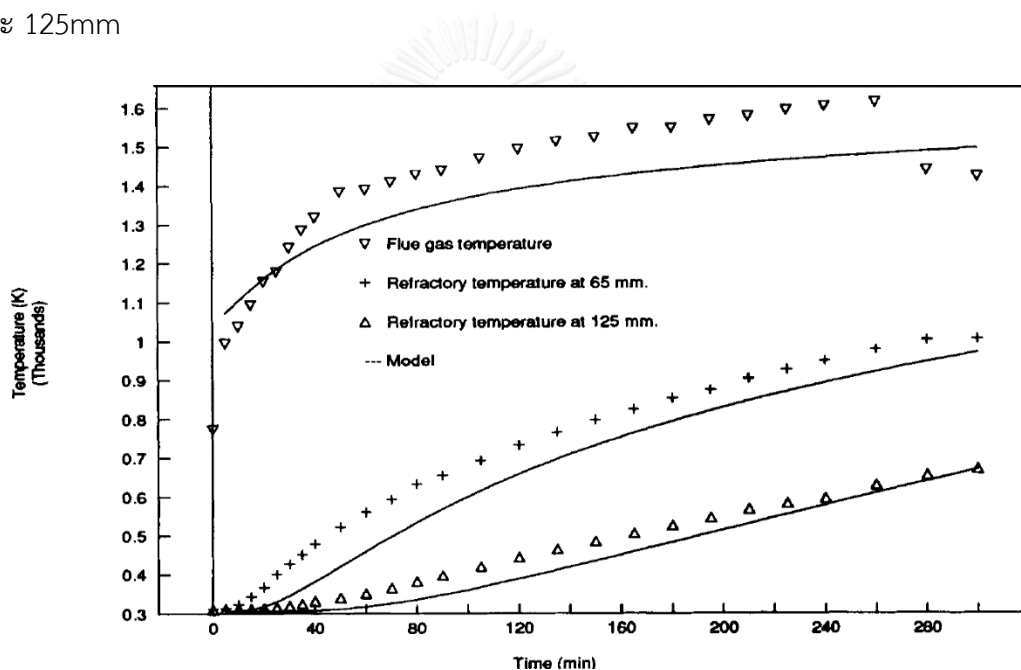


รูปที่ 2.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างผลการตรวจวัด และการคำนวณของการแจกแจงของอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก [6]

Joyce [7] อ้างถึงประโยชน์ของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก คือการที่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงกว่าปกติ จะเป็นการลดการสูญเสียพลังงานความร้อนจากน้ำเหล็กไปสู่เบ้ารับน้ำเหล็กได้มาก ดังนั้นความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็กจะถือเป็นปัจจัยสำคัญ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหล็กให้ละลายจะสามารถลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กลงได้ การสูญเสียพลังงานก็จะลดลงเช่นกัน เมื่อเปรียบระหว่างการลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กลงกับการเพิ่มอุณหภูมิการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กแล้ว ถือว่าการลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กลงประหยัดพลังงานมากกว่า อีกทั้งถ้าสามารถลดอุณหภูมิน้ำเหล็กลงได้แล้ว ก็ไม่จำเป็นที่จะต้องเพิ่มอุณหภูมิการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กอีกด้วย กำลังผลิตที่จะสามารถทำได้จะมากขึ้นเนื่องจากการทำงานของแต่ละกระบวนการลดลง

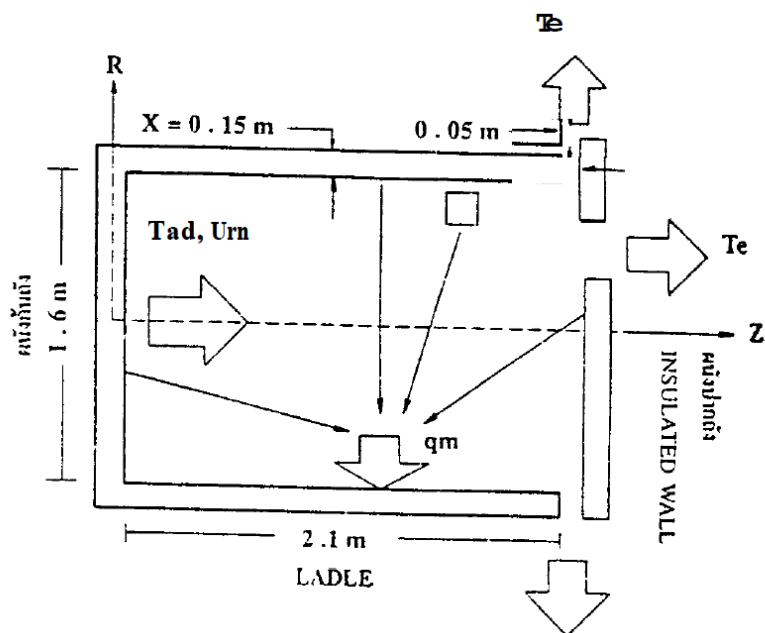
Mohanty และ Satayayut [8] ได้ศึกษาการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะใช้ในการจำลองอุณหภูมิการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และเปรียบเทียบผลการจำลองอุณหภูมิการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กกับการตรวจวัดอุณหภูมิในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 65mm. และ 125mm อีกทั้งศึกษา

แบบจำลองอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ทำให้ความร้อนกับเบ้ารับน้ำเหล็ก การศึกษาการแจกแจงของอุณหภูมิในเนื้ออิฐทนไฟด้วยการคิดการถ่ายความร้อนด้วยการนำความร้อนใน 1 มิติ การนำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในพื้นผิวผนังทรงกระบอกจะถูกพิจารณาเป็นการวิเคราะห์แผ่นบางๆ (Flat Plate) และใช้อัตราส่วนระหว่างรัศมีกับความหนาของทรงกระบอกมากกว่า 10 ส่วนอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก มีอุณหภูมิสูงมาก ผลของการเกิดการพาความร้อนจะเกิดขึ้นน้อยมากจึงไม่นำมาคิด เมื่อเทียบกับการแผ่รังสีความร้อน ส่วนผนังภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็กจะคิดการแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อนตามปกติ ผลการวิจัยแสดงดังรูปที่ 2.2 เป็นการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ อุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัด โดยจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนของอุณหภูมิก๊าซไอเสีย, อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 65mm. และ 125mm



รูปที่ 2.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อใช้แบบจำลองการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กและผลการตรวจวัดค่าจริง [8]

สมศักดิ์ คงโชติ [9] สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก และนำมาเปรียบเทียบการทดลอง การออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้กำหนดให้มีการไหลของก๊าซไอเสียร้อนโดยไม่คิดการไหลย้อนกลับดังรูปที่ 2.3 โดยจะเน้นศึกษาเรื่องการแผ่รังสีความร้อน และดูคลื่นความร้อน จะไม่พิจารณาถึงการกระเจิงรังสีความร้อน ผลการทดลองอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจะพบว่าในช่วงแรก อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นในตำแหน่งขึ้นอย่างรวดเร็ว อุณหภูมิที่ผิวของผนังด้านในใกล้กับกันเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณปากเบ้ารับน้ำเหล็ก ความแตกต่างอุณหภูมิอยู่ที่ ร้อยละ 10



รูปที่ 2.3 แบบจำลองในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กของ สมศักดิ์ คงโชติ [9]

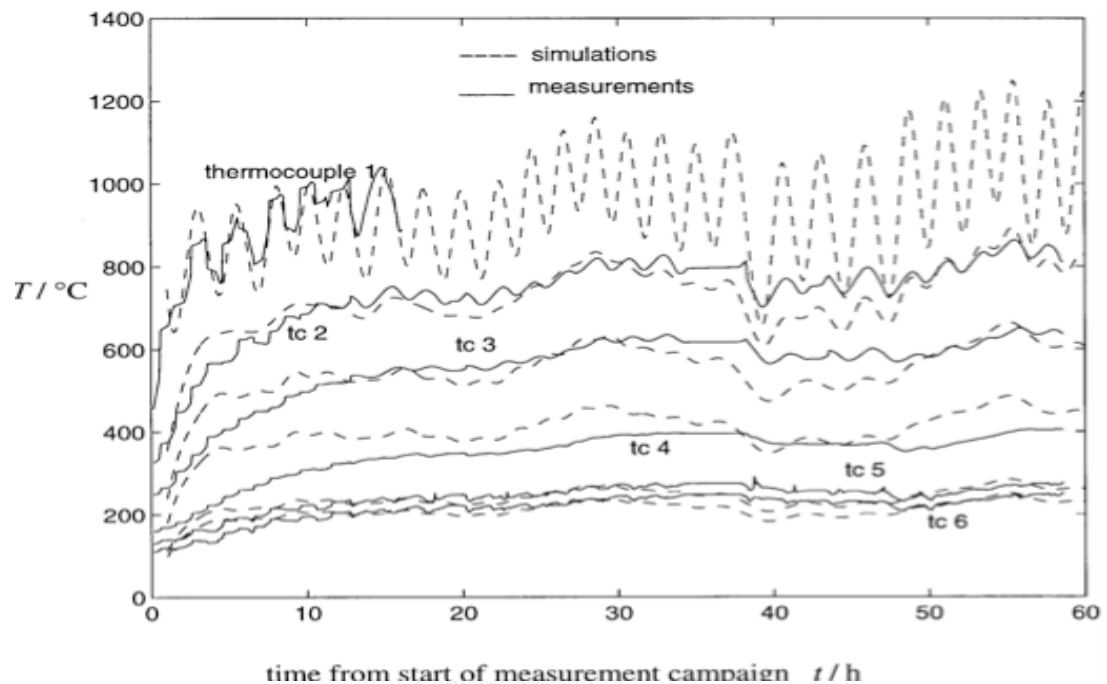
สิ่งที่ สมศักดิ์ คงโชติ Mohanty และ Satayayut สรุปเหมือนกันก็คือ อิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อนในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กมีผลต่อการเพิ่มอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กมากที่สุด

2.2 การถ่ายเทความร้อนในระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็ก

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก เป็นกระบวนการที่สำคัญที่ทำหน้าที่โดยตรงของเบ้ารับน้ำเหล็ก กล่าวคือเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนที่จะไปรับน้ำเหล็ก การแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะเกิดจากการแลกเปลี่ยนรังสีความร้อนของก๊าซไอเสียร้อนภายในเบ้าเท่านั้น แต่สำหรับกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กนั้นจะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการนำความร้อนมาเกี่ยวข้อง การกระจายของอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะสูงขึ้นอย่างทันทีทันใด เมื่อน้ำเหล็กสัมผัสกับเบ้ารับน้ำเหล็ก จึงมีความสำคัญที่จะต้องศึกษาการทำงานและรูปแบบการแลกเปลี่ยนความร้อน รวมถึงการแจกแจงของอุณหภูมิหลังจากเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็กและขนย้ายไปสู่รางน้ำเหล็กที่สถานีการหล่อแบบต่อเนื่องด้วย

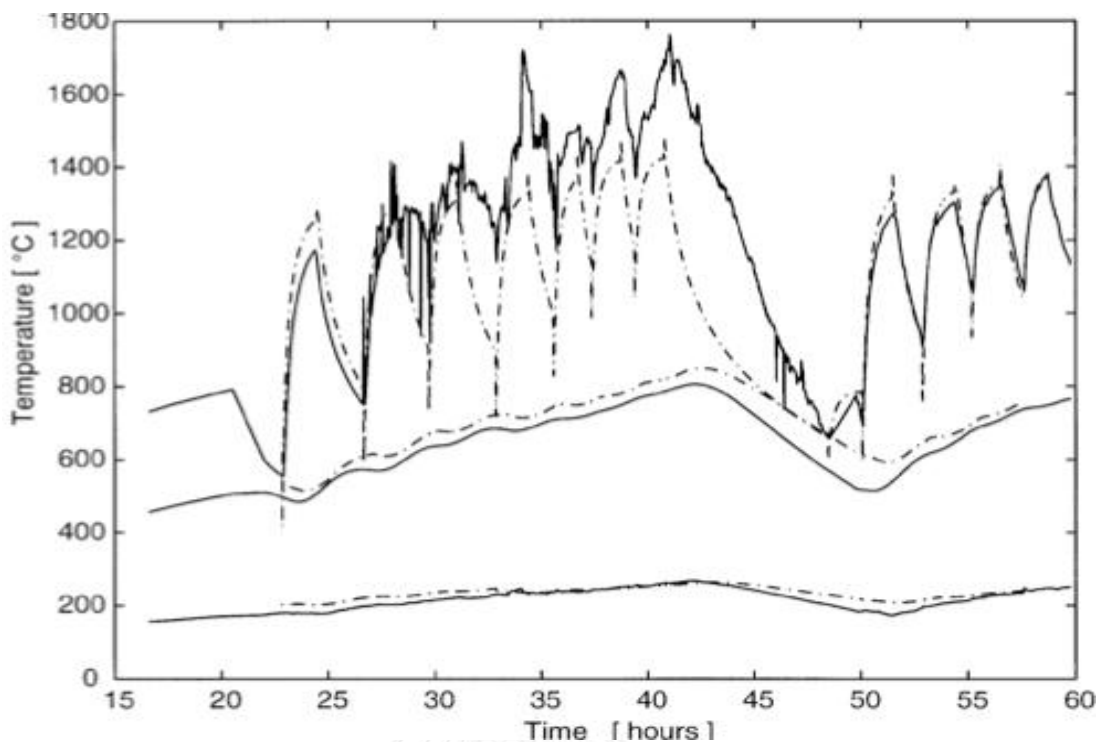
Fredman T.P. และ Saxén H. [10] ได้นำเสนอบทความการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ปัญหาของการนำความร้อน 1 มิติ ในรูปแบบสถานะที่ไม่คงตัว(Transient) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาสถานะทางความร้อนในกระบวนการขนถ่ายเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ในการรวมกันกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลข(Numerical Method) และได้

เปรียบเทียบแบบจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ากับผลการตรวจวัดจริงจากจำนวนรอบการทำงานของเข้รับน้ำเหล็กทั้งหมด 26 รอบการทำงาน ดังรูปที่ 2.4 ผลการคำนวณและการทดลองจริงมีความใกล้เคียงกันมากแต่มีความยุ่งยากในการแก้สมการสูง



รูปที่ 2.4 การเปรียบเทียบผลการแจกแจงของอุณหภูมิภายในเข้รับน้ำเหล็กจากแบบจำลองและการทดลองจริง [10]

Fredman T.P., Torrkulla J. และ Saxén H. [11] ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบการนำความร้อนใน 2 มิติ ทำให้มีค่าตัวแปรอีกมากมายที่จำเป็นจะต้องเรียนรู้เพิ่มจากการศึกษาอุณหภูมิของน้ำเหล็กในแต่ละกระบวนการ อีกทั้งรูปแบบจำลองที่ทำการคิดค้นขึ้นสามารถที่จะตัดสินใจสนับสนุนรวมกับการทำงาน และสามารถเป็นแบบการควบคุมอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ การคำนวณทางคณิตศาสตร์มีความยุ่งยากและซับซ้อน แต่การผลเปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองมีความใกล้เคียงกัน เส้นกราฟบางช่วงมีการซ้อนทับกันหรือทิศทางของกราฟดำเนินไปในทางเดียวกัน ดังรูปที่ 2.5

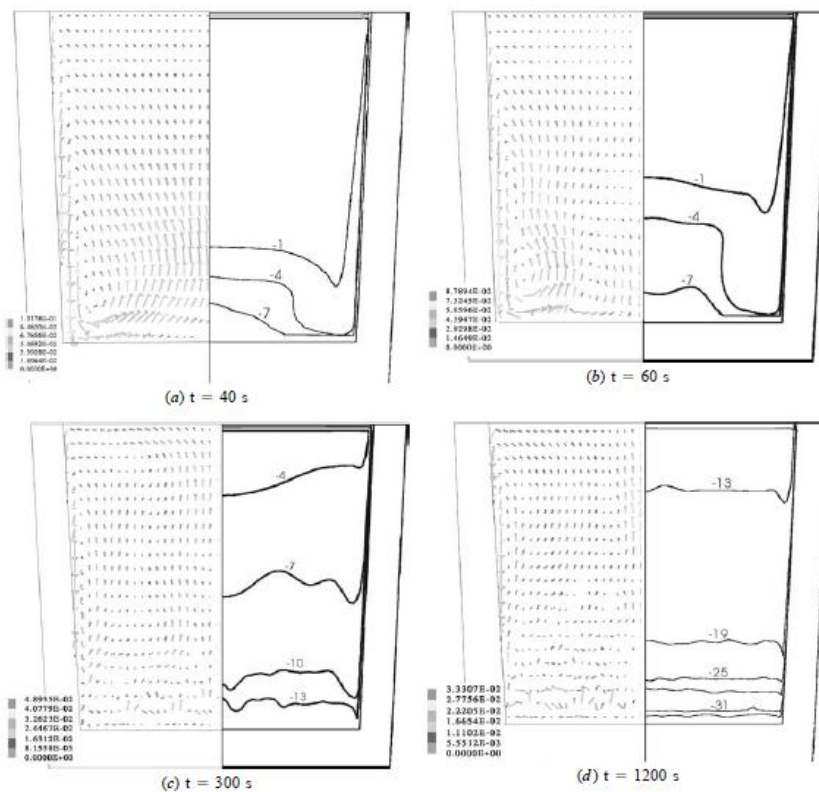


รูปที่ 2.5 ผลการทดลองของการแจกแจงของอุณหภูมิผนังเข้ารับน้ำเหล็กด้านบนเปรียบเทียบระหว่างการ
การใช้แบบจำลอง กับผลการทดลอง [8]

J.L. Xia และ T. Ahokainen [12] ออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระหว่างกระบวนการ
ร่อนน้ำเหล็กจะใช้รูปแบบจำลองแบบในการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ การทดลองถูกแบ่งออกดัง
ตารางที่ 2.1 ผลการทดลองของ J.L. Xia และ T. Ahokainen พบว่าช่วงแรกของการถ่ายเทความ
ร้อนภายในเข้ารับน้ำเหล็ก น้ำเหล็กที่อยู่ภายในเข้ารับน้ำเหล็กจะแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งกันและกัน
โดยที่ว่าน้ำเหล็กร้อนที่มีอุณหภูมิสูงกว่าที่อยู่ด้านล่างจะเคลื่อนตัวขึ้นสู่ด้านบน ส่วนน้ำเหล็กร้อนที่มี
อุณหภูมิต่ำกว่าที่อยู่ด้านบน จะเคลื่อนตัวลงมาอยู่ด้านล่าง ซึ่งในลักษณะแบบนี้จะส่งผลให้เกิดการ
หมุนวนของน้ำเหล็กภายในเข้ารับน้ำเหล็ก นอกจากนั้นการหมุนวนเข้ารับน้ำเหล็กขณะที่กำลังขนย้าย
น้ำเหล็กไปสู่อ่างรับน้ำเหล็กนั้น ช่วงระยะเวลาในการรอก็เป็นสิ่งสำคัญ กล่าวคือในช่วงระยะเวลา
ความแตกต่างของชั้นอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่อยู่ใกล้กันจะก่อให้เกิดการหมุนวนก่อน และหลังจากที่
ระยะเวลาผ่านไปมากขึ้นการหมุนวนของน้ำเหล็กก็จะกว้างมากยิ่งขึ้นตาม

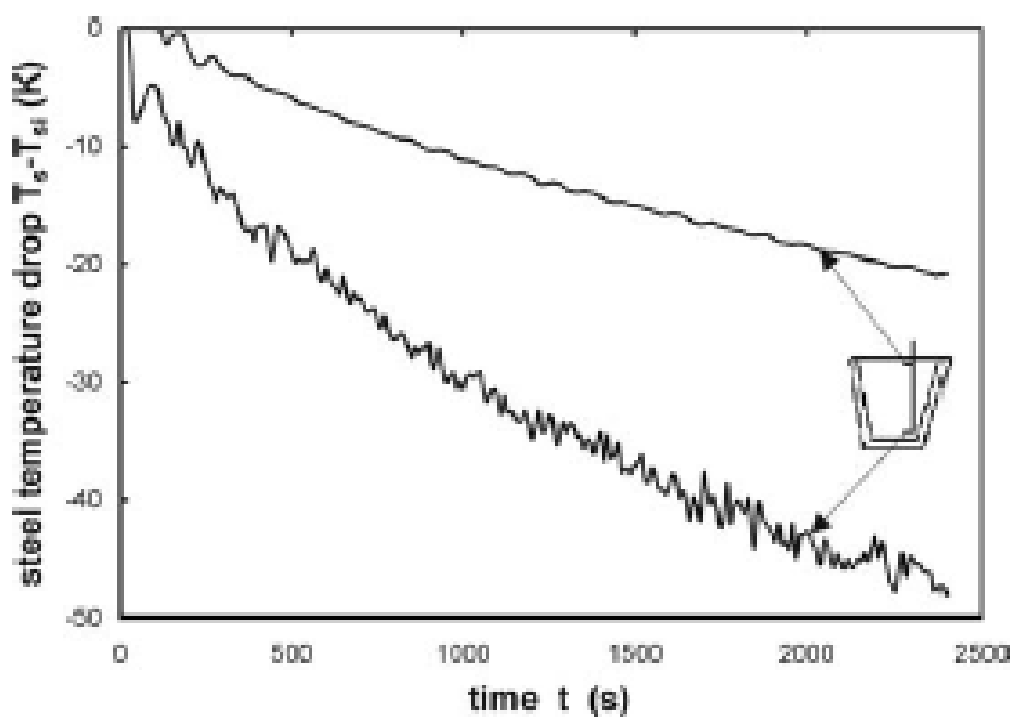
ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขการทดลองของ J.L. Xia และ T. Ahokainen [12]

ประเภทเงื่อนไขการทดลอง	รายละเอียด
ความร้อนถ่ายเทผ่านผิวสแลก(คงที่)	-สแลกมีความหนา 3000 W/m ² -สแลกมีความหนาน้อย 10 ⁴ W/m ²
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแต่ละบริเวณในเข้าน้ำเหล็ก	-ที่บริเวณส่วนบน $Nu = 0.15Ra^{1/3}$ $Ra = 2.1 \times 10^7$ -ที่บริเวณส่วนกลาง $Nu = 0.1Ra^{1/3}$ $Ra = 2.1 \times 10^8$ -ที่บริเวณส่วนก้น $Nu = 0.27Ra^{1/4}$ $Ra = 2.0 \times 10^8$
อุณหภูมิเริ่มต้นของผนังเข้าน้ำเหล็กไม่เท่ากัน	-1423 °C -1073 °C



รูปที่ 2.6 การคำนวณจากแบบจำลองให้เห็นลักษณะการหมุนวนของน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ และชั้นการแตกแข็งอุณหภูมิน้ำเหล็ก [12]

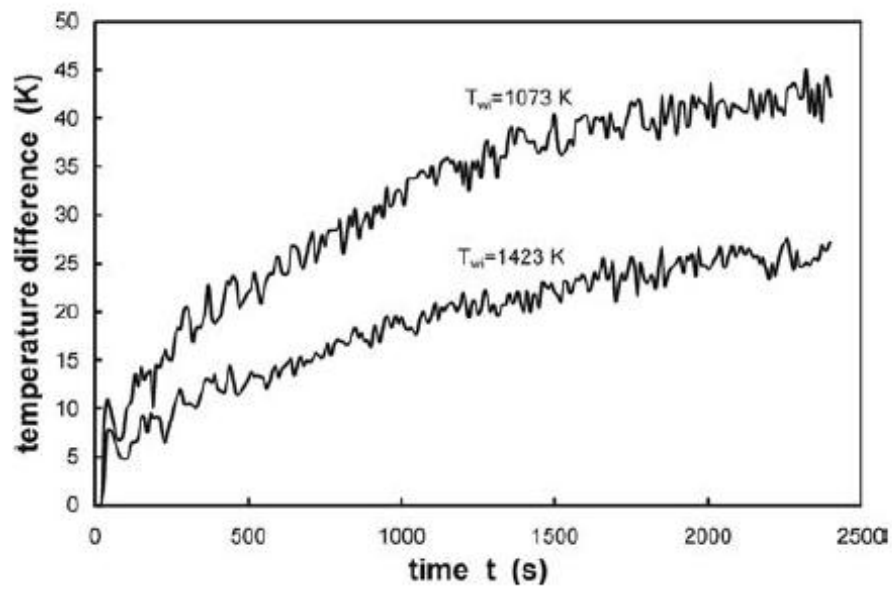
จากแบบจำลองของ J.L. Xia และ T.Ahokainen ยังพบอีกว่า อุณหภูมิน้ำเหล็กที่อยู่ผนังด้านล่าง และ ผนังข้างของเบ้ารับน้ำเหล็กไม่คงที่ เพราะว่าเกิดจากสาเหตุการหมุนวนของน้ำเหล็กในแต่ละชั้นดังรูปที่ 2.7



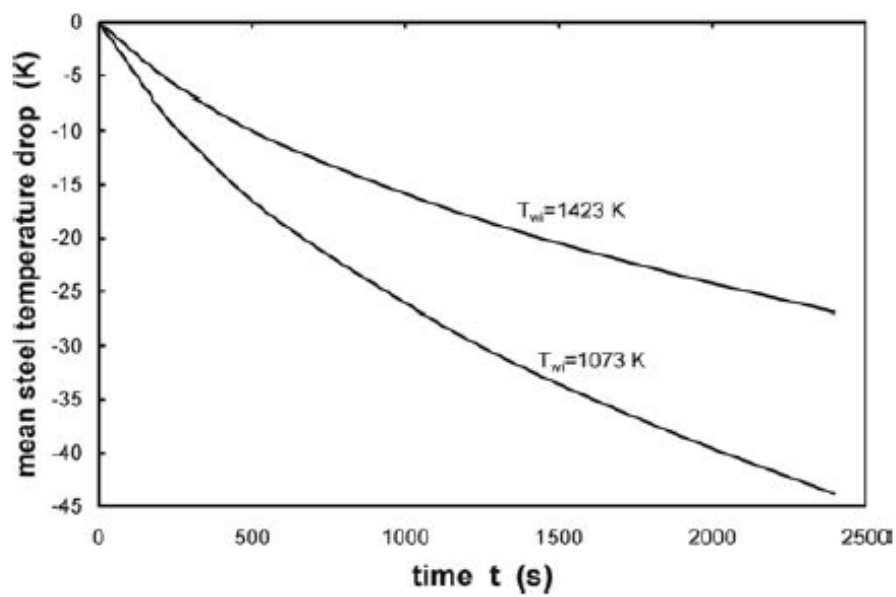
รูปที่ 2.7 แสดงการแจกแจงของอุณหภูมิ ที่ไม่คงที่ของน้ำเหล็กภายในผนังด้านล่าง และ ด้านของเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อเกิดการหมุนวนน้ำเหล็ก [12]

นอกจากนี้พบว่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่ถูกกำหนดเอาไว้ให้กับผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่แตกต่างกัน จะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กขึ้นลงตามไปด้วย โดยอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่สูงจะทำให้การลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กลดลงไม่มาก แต่ที่อุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กต่ำจะทำให้การลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กลดลงมาก ส่วนเรื่องการสูญเสียพลังงานอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กที่น้อยจะสูญเสียพลังงานมากกว่า อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กที่มาก ดังรูปที่ 2.8, รูปที่ 2.9 และรูปที่ 2.10

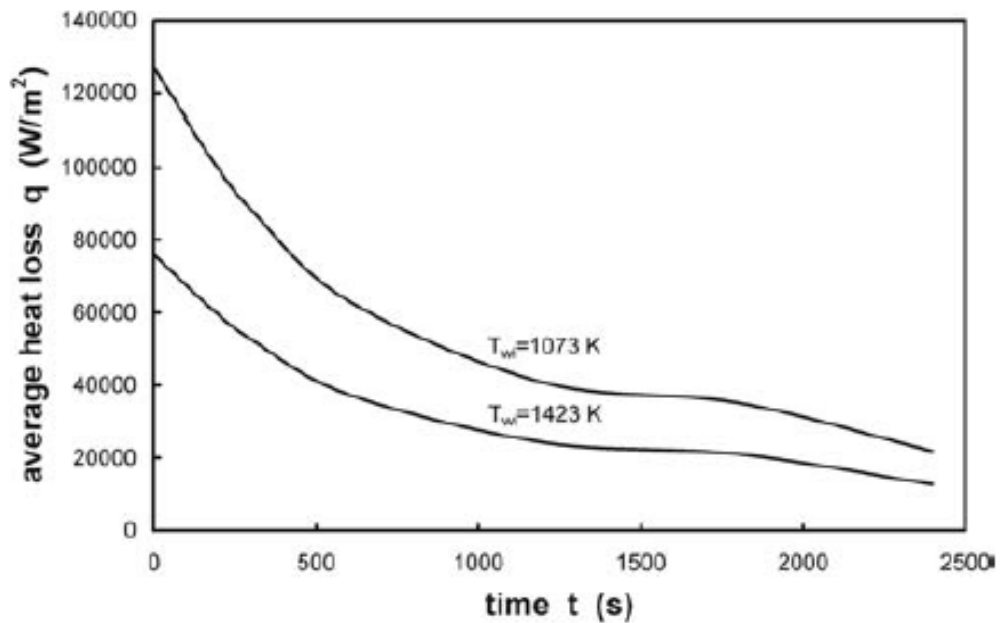
สรุปการศึกษาวิจัยของ J.L. Xia และ T. Ahokainen สอดคล้องกับงานวิจัยของ Mohanty และ Satayayut ที่ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กให้สูงขึ้นสอดคล้องกับอุณหภูมิในการเทน้ำเหล็ก จะสามารถลดการสูญเสียพลังงานความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กกับน้ำเหล็กลงได้ ส่งผลให้งานวิทยานิพนธ์ของ ชัชวีร์ สวีตศิริศาสตร์ ได้สังเกตเห็นแนวคิดเรื่องกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าแต่ก่อน เพื่อตอบโจทย์การประหยัดพลังงานการหลอมเศษเหล็กตามงานวิจัย



รูปที่ 2.8 แสดงส่วนต่างที่เพิ่มขึ้นของการแจกแจงของอุณหภูมิผนังเข้ารับน้ำเหล็ก ที่อุณหภูมิผนังเข้ารับน้ำเหล็กเริ่มต้นไม่เท่ากัน [12]



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนต่างที่ลดลงของการแจกแจงของอุณหภูมิผนังน้ำเหล็ก ที่อุณหภูมิผนังเข้ารับน้ำเหล็กเริ่มต้นไม่เท่ากัน [12]



รูปที่ 2.10 แสดงการสูญเสียพลังงานในเข้รับน้ำเหล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
ที่อุณหภูมิผนังเข้รับน้ำเหล็กเริ่มต้นไม่เท่ากัน [12]

Pan et al [13] การศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับอุณหภูมิน้ำเหล็กขณะรอเทน้ำเหล็กลงสู่อ่าง
รับน้ำเหล็ก ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์พิจารณาขั้นตอนการทำงานตั้งแต่กระบวนการรับน้ำเหล็ก
กระบวนการขนย้ายน้ำเหล็ก และกระบวนการเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ตัวแปรที่จะใช้ในการ
เขียนแบบจำลองมีดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิด้านในเข้รับน้ำเหล็กก่อนรับน้ำเหล็ก

พบว่า : อุณหภูมิภายในเข้รับน้ำเหล็กที่เพิ่มสูงขึ้นจาก 600 °C เป็น 800 °C จะทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็ก
สุดท้ายหลังถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กสูงขึ้น 3 °C

2. ความหนาของสแลกที่ปกคลุมด้านบนของเข้รับน้ำเหล็ก

พบว่า : ถ้าชั้นของสแลกที่อยู่ด้านบนน้ำเหล็กมีความหนามาก จะส่งผลต่ออุณหภูมิขณะถ่ายเทน้ำเหล็ก
การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กจะลดลง

3. ระยะเวลาที่เข้รับน้ำเหล็กบรรจุน้ำเหล็กในระหว่างรอการถ่ายลงอ่างรับน้ำเหล็ก

พบว่า : เข้รับน้ำเหล็กที่มีน้ำเหล็กอยู่ด้านใน จะมีการลดลงของอุณหภูมิขณะถ่ายน้ำเหล็กออกจากเข้
4-5 °C ทุกๆ 10 นาที

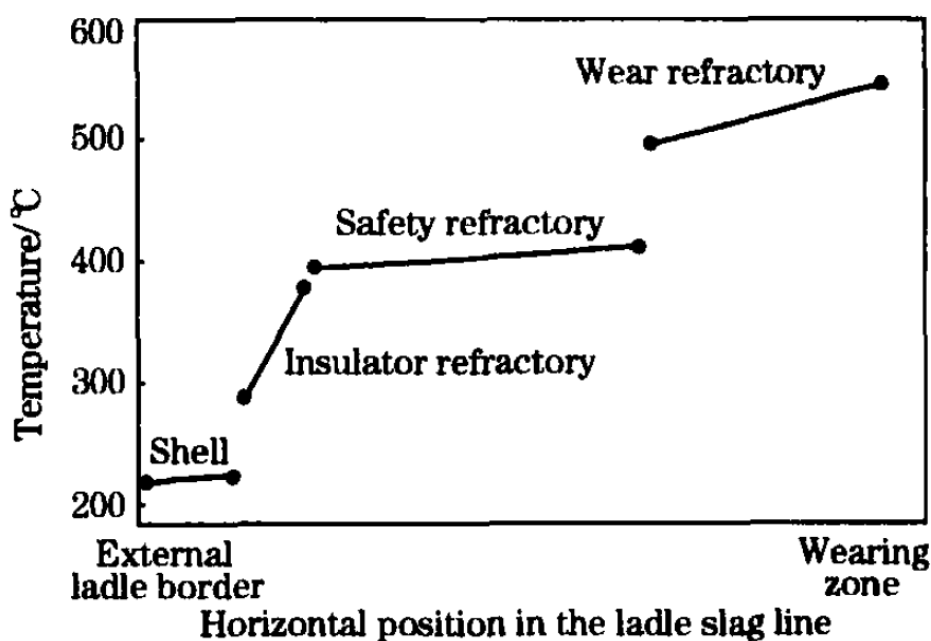
4. อัตราการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเข้รับน้ำเหล็ก

พบว่า : ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิน้ำเหล็กขณะถ่ายน้ำเหล็กเท่านั้น

การศึกษาของ Fredman T.P., Saxén H. และ Pan et al บ่งบอกให้รู้ว่าผลของความหนาของสแลกบนน้ำเหล็กมีผลกระทบต่ออุณหภูมิน้ำเหล็กเช่นเดียวกัน

O. Volkova และ D. Jangke [14] ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้วัสดุทนไฟคนละชนิดกัน การดูดซับพลังงานความร้อนเข้าสู่ผนังจะมีความแตกต่างกัน และจะส่งผลต่อการแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กด้วย

Zimmer et al. [15] ได้ศึกษาการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก เพื่อที่จะดูการแจกแจงของเมื่อได้รับความร้อนจากน้ำเหล็ก โดยภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุปกรณ์ตรวจวัดความร้อนอย่างละเอียด พบว่ารอยต่อของแต่ละชั้นของเนื้อวัสดุทนไฟมีการเพิ่มอุณหภูมิอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.11



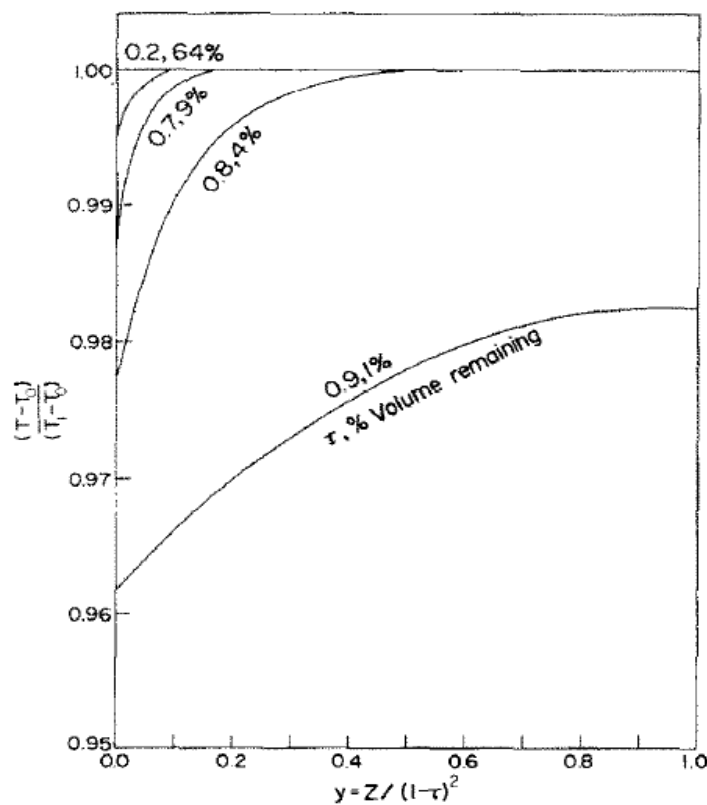
รูปที่ 2.11 การแจกแจงอุณหภูมิที่เป็นรอยต่อของแต่ละชั้นของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก [15]

2.3 การถ่ายเทความร้อนของกระบวนการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และทำการรับน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามานี้แล้วจะถูกขนย้ายขึ้นมาบนสถานีการหล่อแบบต่อเนื่อง เพื่อที่จะเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก สิ่งสำคัญในการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กคือ จะต้องไม่ปล่อยให้เนื้อสแลกไหลลงมาสู่อ่างรับน้ำเหล็ก และที่สำคัญคือเวลาที่ใช้ตั้งแต่กระบวนการขนย้ายเบ้ารับน้ำเหล็ก จนถึงเสร็จสิ้น

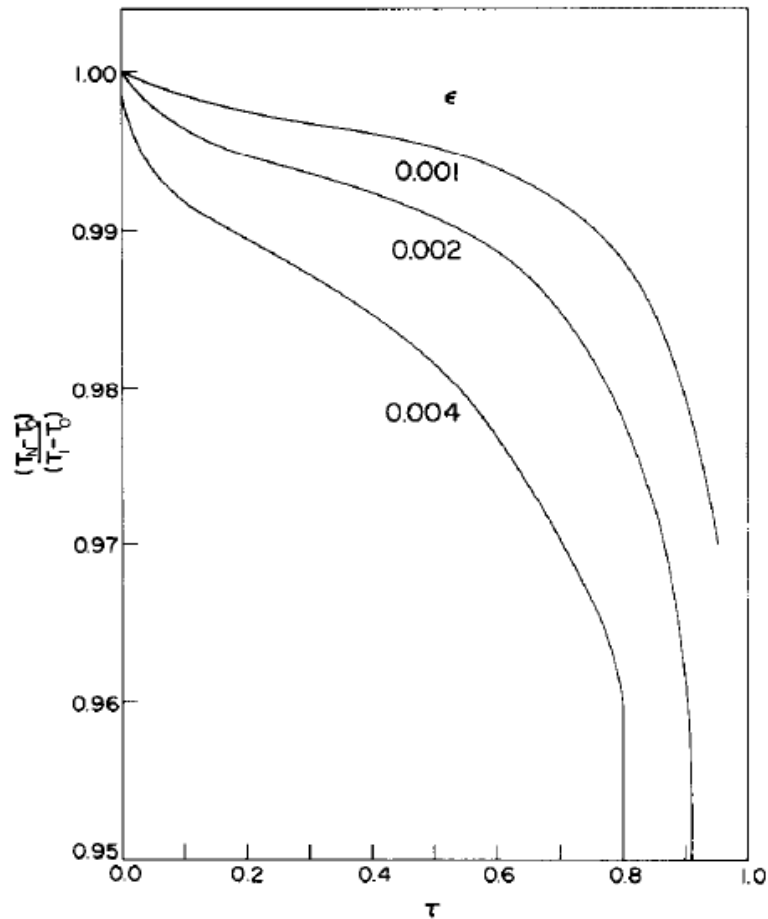
กระบวนการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช่ไป และอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำเหล็กก่อนเสร็จสิ้นกระบวนการต้องมีค่ามากกว่า $1,550^{\circ}\text{C}$ เพราะว่าถ้าอุณหภูมิน้ำเหล็กต่ำกว่าค่าที่กำหนดจะก่อให้เกิดน้ำเหล็กบนสถานีการหล่อแบบต่อเนื่องเกิดการแข็งตัวเสียก่อน

ดังนั้นปัจจัยสำคัญของกระบวนการนี้คือการออกแบบระบบควบคุมต้องคำนึงถึงเวลาที่สิ้นสุดกระบวนการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก Egerton, J. A. Howarth, G. Poots และ S. Taylor-Reed [16] ได้เขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยสมมติให้อุณหภูมิน้ำเหล็กที่อยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กมีความสม่ำเสมอ ดังนั้นน้ำเหล็กที่อยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะไม่มีกรหมุนวนเกิดขึ้น การศึกษามีวัตถุประสงค์ที่จะมุ่งเน้นไปที่ความเร็วในการลำเลียงน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กที่ระดับความสูงของน้ำเหล็กต่างๆกัน โดยผลลัพธ์ของงานวิจัยจะอยู่ในรูปของตัวแปรไร้มิติ เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นความสูงจะลดน้อยลงและอุณหภูมิของน้ำเหล็กจะลดลงมากด้วยเช่นกันดังรูปที่ 2.12



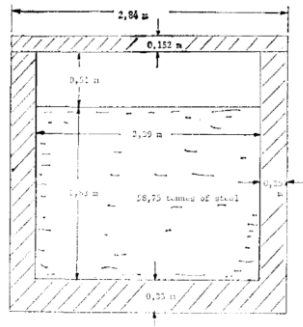
รูปที่ 2.12 แสดงการแจกแจงอุณหภูมิในรูปของตัวแปรไร้มิติที่เป็นสัดส่วนกับปริมาตรน้ำเหล็กและเวลาไร้มิติ [16]

จากรูปที่ 2.13 พบว่าการเพิ่มความเร็วในการไหลน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก จะส่งผลให้อุณหภูมิน้ำเหล็กลดลงเร็วเช่นเดียวกัน

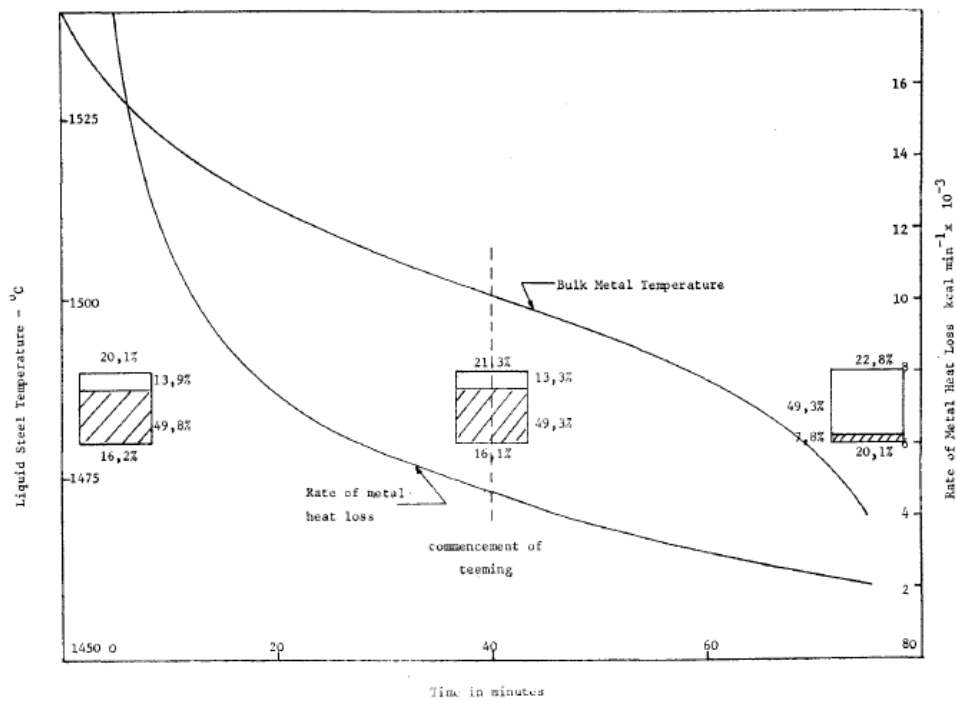


รูปที่ 2.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลาเมื่อมีความเร็วในการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเข้าน้ำเหล็ก [16]

Urquhart, Guthrie และ Howat [17] ศึกษาการจำลองการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กในภาวะปิดขณะถ่ายน้ำเหล็กออกจากภาชนะด้วยวิธีเชิงตัวเลขดังรูปที่ 2.14 โดยผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำเหล็กลดลงตลอดระยะเวลาในการถ่ายน้ำเหล็กออกจากภาชนะดังรูปที่ 2.15

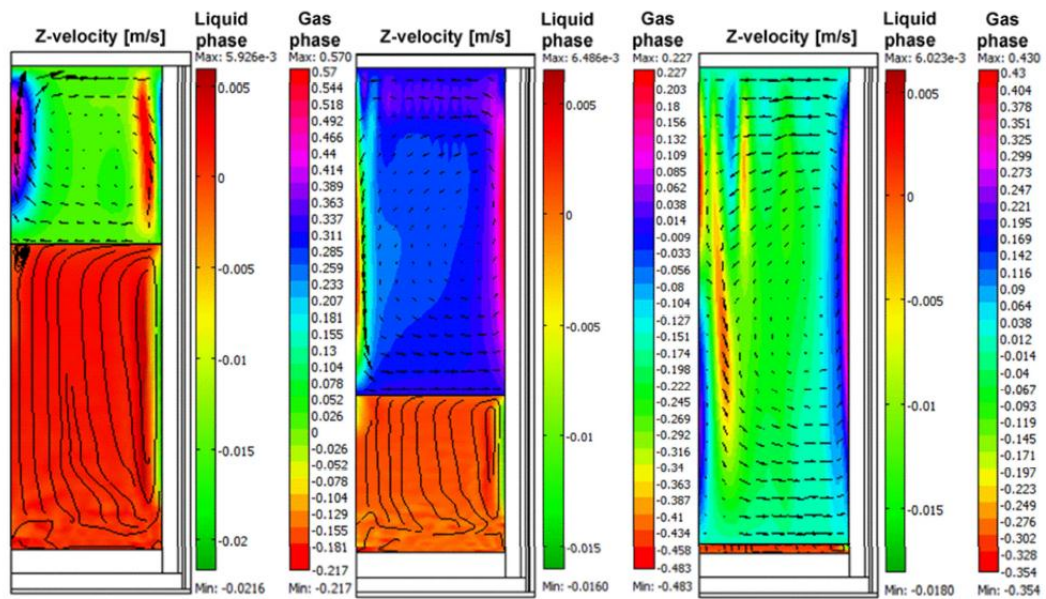


รูปที่ 2.14 ขนาดและรูปร่างของภาชนะใส่น้ำเหล็ก [17]

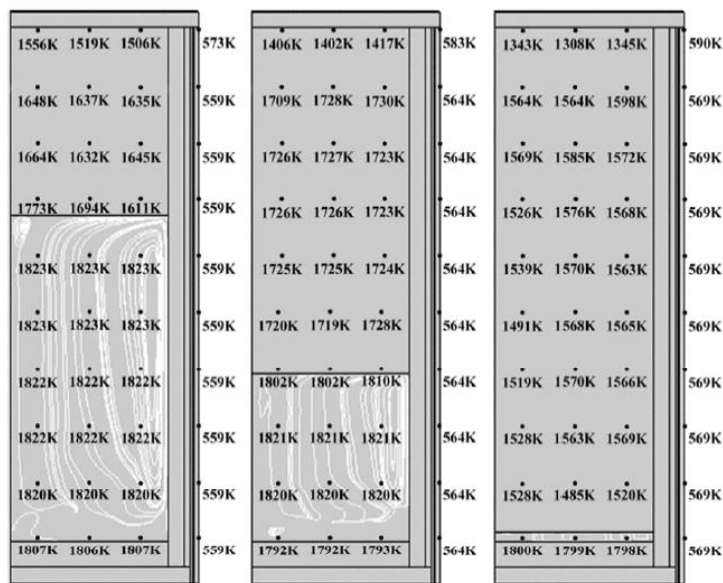


รูปที่ 2.15 ผลการจำลองการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็ก และปริมาณความร้อนที่สูญเสียขณะถ่ายเท น้ำเหล็กออกจากภาชนะ [17]

นอกจากนี้ Björn Glaser [18] ศึกษาอุณหภูมิน้ำเหล็กขณะเทน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กพบว่า การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กส่งผลให้น้ำเหล็กเกิดการหมุนวนดังรูปที่ 2.16 ทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กคงที่ตลอดระยะเวลาดังรูปที่ 2.17 แต่การสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กจะเป็นการนำความร้อนและพาความร้อนเข้าสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของน้ำเหล็กลดลง



รูปที่ 2.16 Streamline และการแจกแจงความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำเหล็กและอากาศภายในบ้ำรับน้ำเหล็กขณะเทน้ำเหล็ก ก. 1000s ข. 2250s ค. 3500s [18]



รูปที่ 2.17 อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ก. 1000s ข. 2250s ค. 3500s [18]

2.4 งานวิจัยเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

โครงการวิจัยเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทำงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าที่มีการใช้

พลังงานสูงมาก จึงมีแนวความคิดออกแบบระบบควบคุมเพื่อจำลองสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก และกำหนดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิต โดยมีนักวิจัย 2 ท่าน คือ ชัชวาลล์ วุฒิสิริศาสตร์ และ กิจติศักดิ์ รำไพโรจน์พงศ์ ศึกษาการทำงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจากการเก็บค่าตรวจวัดอุณหภูมิการทำงานจากโรงงานที่ร่วมโครงการของการปฏิบัติงานจริง และออกแบบระบบควบคุมการทำงาน เพื่อใช้เขียนและสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในแต่ละกระบวนการผลิต และนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทุกกระบวนการผลิตมาประดิษฐ์เป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการประมวลผลอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กที่เหมาะสมต่อไป

กิจติศักดิ์ ศึกษาวิธีการควบคุมและออกแบบต้นแบบระบบช่วยควบคุมการทำงานเพื่อให้เกิดการประหยัดพลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ด้วยการประเมินสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในระบบควบคุมและทำการคำนวณเพื่อกำหนดอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสม สภาวะความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ระบบควบคุมจำลองขึ้นผ่านการตรวจสอบร่วมกับข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดจากโรงงานตัวอย่าง

แบบจำลองทางความร้อนของกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

แบบจำลองทางความร้อนของกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Mohanty และ Satayayut ด้วยการหาผลเฉลยจาก Lumped Capacitance Parameter โดยการแบ่งวัตถุที่สนใจออกเป็นก้อนย่อยๆ โดยสมมติฐานขั้นต้นของวิธีนี้ อุณหภูมิภายในก้อนย่อยคงที่ตลอดทั้งก้อนย่อย เพื่อนำมาวิเคราะห์หาสภาวะทางความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการรับค่าตัวแทนอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัดจริงมาปรับแก้ หาค่าอุณหภูมิของอิฐก้อนย่อยที่ถูกแบ่งไว้ใหม่ ซึ่งวิธีการปรับแก้อุณหภูมินี้ส่งผลให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าแม่นยำมากยิ่งขึ้น

แบบจำลองทางความร้อนของกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก

แบบจำลองทางความร้อนของกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก คือการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการถ่ายเทความร้อนในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีผนังเบ้ารับน้ำเหล็กด้านข้างและด้านล่าง การถ่ายเทความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะเกิดขึ้นทั้งหมด 3 พื้นผิวคือ พื้นผิวปากเบ้า, พื้นผิวด้านข้าง และ พื้นผิวด้านล่างเบ้ารับน้ำเหล็ก

แบบจำลองทางความร้อนของกระบวนการขนย้ายเข้ารับน้ำเหล็กและเทน้ำเหล็กจาก เข้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

การเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการถ่ายเทความร้อนของน้ำเหล็กและ
เข้ารับน้ำเหล็ก คือ การจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กที่อยู่ภายในเข้ารับน้ำเหล็ก และจำลองการสูญเสีย
ความร้อนของน้ำเหล็กให้กับผนังเข้ารับน้ำเหล็ก อุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเข้ารับน้ำเหล็กจะต้อง
สามารถผ่านรูเทน้ำเหล็กที่ผนังเข้ารับน้ำเหล็กด้านล่างตลอดสิ้นสุดกระบวนการได้ ซึ่งอุณหภูมิน้ำ
เหล็กเมื่อสิ้นสุดกระบวนการกำหนดให้มีค่ามากกว่า $1,550^{\circ}\text{C}$

แบบจำลองทางความร้อนของกระบวนการขนส่งแลกเปลี่ยนเททิ้ง

การแบบจำลองทางความร้อนของกระบวนการขนส่งแลกเปลี่ยนเททิ้ง คือ การเขียน
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการถ่ายเทความร้อนเข้ารับน้ำเหล็ก โดยจะรับข้อมูลที่ได้จาก
การตรวจวัดเข้ามาปรับแก้อุณหภูมิของอิฐก้อนย่อยในเข้ารับน้ำเหล็กใหม่ ให้มีค่าอุณหภูมิเท่ากัน
ระหว่างแบบจำลองและค่าที่ได้จากการตรวจวัดเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนสะสมที่เกิดขึ้นภายในเข้า
รับน้ำเหล็ก

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เป็นกระบวนการผลิตที่เกิดขึ้นในประเทศไทยอันเนื่องมาจากการผลิตเหล็กดังก้าว เป็นการนำเศษเหล็กที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมานำกลับมาหลอมใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยอุปกรณ์ทั้งหมดของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าจะประกอบไปด้วย เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า, เบ้ารับน้ำเหล็ก และระบบการหล่อแบบต่อเนื่อง

3.1 อุปกรณ์ในการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

3.1.1 เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF)

เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ขนาดใหญ่ที่ใช้หลักการทำงานของการให้ความร้อนด้วยการอาร์คไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องมีพลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตด้วย โดยใช้เศษเหล็กที่ผ่านกระบวนการใช้งานมาแล้วนำมาเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยโครงสร้างโลหะเหล็กขนาดใหญ่ที่อยู่ภายนอก และด้านในจะประกอบไปด้วยชั้นของอิฐทนไฟเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อนและความเสียหายจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยแบ่งเป็นชั้นความปลอดภัยในแต่ละชั้นและด้านข้างจะมีรางเทน้ำเหล็ก (Pouring spout) เมื่อน้ำเหล็กในเตาหลอมมีอุณหภูมิได้ตามต้องการแล้วเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจะถูกยกให้เอียงลง เพื่อให้น้ำเหล็กที่หลอมเหลวเสร็จสิ้นไหลลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก แหล่งที่มาของความร้อนได้มากจากการอาร์คไฟฟ้าของแท่งอิเล็กโทรดกับเศษเหล็ก ปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมเหล็กสูงถึง 800,000 โวลต์ พลังงานความร้อนปริมาณมากจะเกิดขึ้นจากอาร์คไฟฟ้า อีกทั้งปรากฏการณ์ดังกล่าวยังก่อให้เกิดลำแสงสว่าง และเกิดเสียงดังทั่วบริเวณ ซึ่งทั้งหมดนี้จะทำให้เศษเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กหลอมเหลวได้อุณหภูมิตามต้องการ นอกจากนี้ยังมีการพ่นออกซิเจนเข้าไปในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยตรงเพื่อช่วยเพิ่มความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกระบวนการด้วย

เตาหลอมเหล็กของโรงงานที่ร่วมงานวิจัยเป็นขนาด 25 ตัน แบบไฟฟ้ากระแสสลับดังรูปที่ 3.1 มีแท่งอิเล็กโทรดทั้งหมด 3 แท่ง ในแต่ละแท่งจะมีกระแสไฟฟ้าสลับไหลผ่านรวมทั้งหมด 3 เฟส และวางตัวอยู่บนฝาปิดด้านบนเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ฝาปิดของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านบนจะทำหน้าที่เปิด และปิด เพื่อที่จะเทเศษเหล็กลงไปในเตาหลอม หลังจากเทเศษเหล็กลงสู่เตาหลอมแล้ว ฝาปิดด้านบนจะเลื่อนมาปิด และแท่งอิเล็กโทรดทั้ง 3 แท่ง จะเคลื่อนที่ลงมาสัมผัสกับผิวเศษเหล็กที่อยู่ภายในเตาหลอม การเพิ่มความร้อนในการหลอมเหล็กเพื่อให้อุณหภูมิ น้ำเหล็กสูงตามต้องการทำได้โดยการเพิ่มผิวหน้าสัมผัสของอิเล็กโทรดกับน้ำเหล็ก การใส่เหล็กของโรงงานอุตสาหกรรมนี้ จะใส่เศษ

เหล็กทั้งหมด 3 รอบ โดยแต่ละรอบเศษเหล็กที่อยู่ภายในเตาหลอมจะต้องถูกหลอมให้ละลายก่อน และช่วงขั้นตอนการใส่เศษเหล็กครั้งที่ 3 จะใส่แร่ธาตุบางชนิดลงไปในเตาหลอมเพิ่มதாகหากด้วย เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กให้ดียิ่งขึ้น แร่ธาตุที่ใส่เข้าไปปรับปรุงคุณภาพได้แก่ คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส ถึงจะได้น้ำเหล็กที่มีคุณสมบัติทางกลตามต้องการ จากนั้นแทนตัวหลอมอาร์คไฟฟ้าจะเอียงตัวลงด้านข้างเพื่อเทน้ำเหล็กออกทางตำแหน่งปากเท โดยมีเบ้ารับน้ำเหล็กรองรับในหลุมใส่เบ้ารับน้ำเหล็ก พลังงานที่ใช้ในกระบวนการหลอมเศษเหล็กมีอยู่ 2 ประเภท คือ พลังงานที่ได้จากการอาร์คไฟฟ้า และ พลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นของออกซิเจนที่รวมกับธาตุคาร์บอนภายในเนื้อเหล็กจนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.1.2 เบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle)

เบ้ารับน้ำเหล็กเป็นอุปกรณ์สำคัญในกระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เบ้ารับน้ำเหล็กทำหน้าที่ขนย้ายน้ำเหล็กที่ถูกหลอมเหลวและมีอุณหภูมิที่สูงไปยังแท่นการหล่อแบบต่อเนื่อง ดังรูปที่ 3.2 แสดงลักษณะทั่วไปของเบ้ารับน้ำเหล็ก เบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีขนาดตั้งแต่ 25 ตัน ถึง 300 ตัน ในการขนย้ายน้ำเหล็กไปยังยังสถานีต่างๆ จำเป็นต้องอาศัยเบ้ารับน้ำเหล็กที่ต้องสามารถทนทานต่อความร้อนที่ได้รับจากน้ำเหล็กที่อุณหภูมิสูงได้ ดังนั้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีโครงสร้างที่หนาและมีวัสดุทนทานไฟเพื่อดำเนินการถ่ายเทพลังงานความร้อนออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก คือ อิฐทนไฟ การก่ออิฐทนไฟภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกแบ่งออกเป็นชั้นการทำงาน 3 ชั้น คือ ชั้นด้านในสุดที่สัมผัสกับน้ำเหล็กโดยตรง ซึ่งจะเกิดการกระแทกของน้ำเหล็กที่ชั้นนี้ และ เกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างน้ำเหล็กกับอิฐทนไฟที่ชั้นนี้ด้วยจะเรียกชั้นนี้ว่า ชั้นทำงาน (Working Lining) ชั้นถัดไป คือ ชั้นความปลอดภัย (Safety Lining) จะเป็นชั้นที่ไม่สัมผัสกับน้ำเหล็กโดยตรง แต่จะได้รับความร้อนของน้ำเหล็กจากกระบวนการถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน ในแต่ละรอบการทำงานทั้งหมดของเบ้ารับน้ำเหล็ก 1 เบ้าจะหลีกเลี่ยงการเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้าจนถึงชั้นที่น้ำเหล็กกัดเซาะเข้าไปถึงชั้นความปลอดภัย ชั้นสุดท้าย คือ ชั้นผนังเหล็ก (Steel Shell) คือชั้นของเบ้ารับน้ำเหล็กด้านหนึ่งจะสัมผัสกับอิฐทนไฟชั้นความปลอดภัยส่วนอีกด้านหนึ่งจะสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมภายนอก

เบ้ารับน้ำเหล็กที่ถูกซ่อมบำรุงครั้งใหญ่หรือเปลี่ยนอิฐทนไฟใหม่ทั้งหมดจะต้องผ่านขั้นตอนการอุ่นด้วยเตาเผาก่อนนำมาใช้งาน เนื่องจากโครงสร้างของอิฐทนไฟยังไม่แข็งตัวจึงเผาเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อทำให้โครงสร้างแข็งแรงขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นการไล่ความชื้นภายในอิฐทนไฟออกไปด้วย เพราะหาเมื่อน้ำที่อยู่ในที่แคบระหว่างอิฐทนไฟเมื่อได้รับความร้อนที่มีอุณหภูมิสูงจากน้ำเหล็กโดยตรง จะทำให้น้ำขยายตัวอย่างรุนแรง และอาจจะระเบิดสร้างความเสียหายได้ อีกทั้งถ้าสามารถอุ่นเบ้ารับ

น้ำเหล็กทุกครั้งก่อนที่จะนำเข้าน้ำเหล็กไปปรับน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจะช่วยลดความแตกต่างของอุณหภูมิที่สูงมากด้วย ส่งผลให้การสีกรของอิฐทนไฟลดลงด้วย

ในการหลอมโลหะใดก็ตาม จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเสมอ ก็คือ ออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับโลหะนั้นจนเกิดโลหะออกไซด์ขึ้น จะถูกเรียกว่า แสกก (Slag) สิ่งนี้จะไม่สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นเหล็กใหม่ตามคุณสมบัติทางกลที่ต้องการได้ เนื่องจากแอสกเป็นโลหะออกไซด์ และ มีความหนาแน่นของเนื้อสารน้อยกว่าน้ำเหล็ก จึงทำให้ลอยตัวแยกชั้นขึ้นไปด้านบนสุด เมื่อเสร็จสิ้นการหล่อแบบต่อเนื่องแล้วจะเหลือน้ำเหล็กอีกเล็กน้อย และ เศษแอสก เพื่อที่จะนำเข้าน้ำเหล็กไปปรับน้ำเหล็กในครั้งถัดไปจึงจำเป็นต้องเทน้ำเหล็ก และเศษแอสกภายในทิ้งออกไปก่อน และเข้าสู่สถานีซ่อมแซม เข้าน้ำเหล็กจะถูกวางตะแกรงลง และผู้ปฏิบัติงานจะฉีดอากาศอัดสวนกลับเข้าไปยังรูเทน้ำเหล็กด้านล่าง เพื่อล้างรูเทอันเนื่องมาจากโลหะที่แข็งตัว และส่งผลให้เกิดการขัดขวางการไหลของน้ำเหล็ก

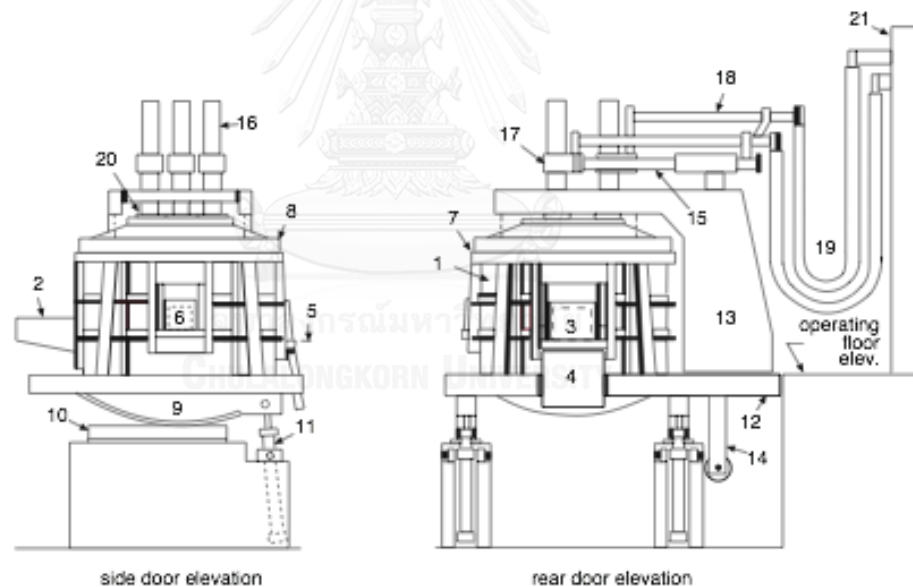
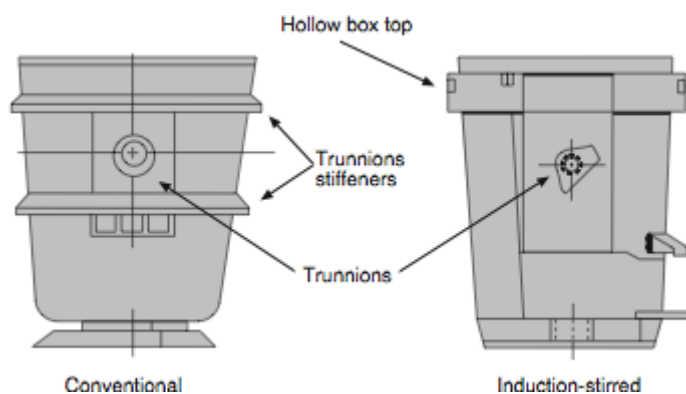


Fig. 1.5 Schematic of a typical AC electric arc furnace. Elements are identified as follows:

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
(ข้อมูลจาก : The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA)



รูปที่ 3.2 ลักษณะของเบ้ารับน้ำเหล็ก

[ข้อมูลจาก : The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA)

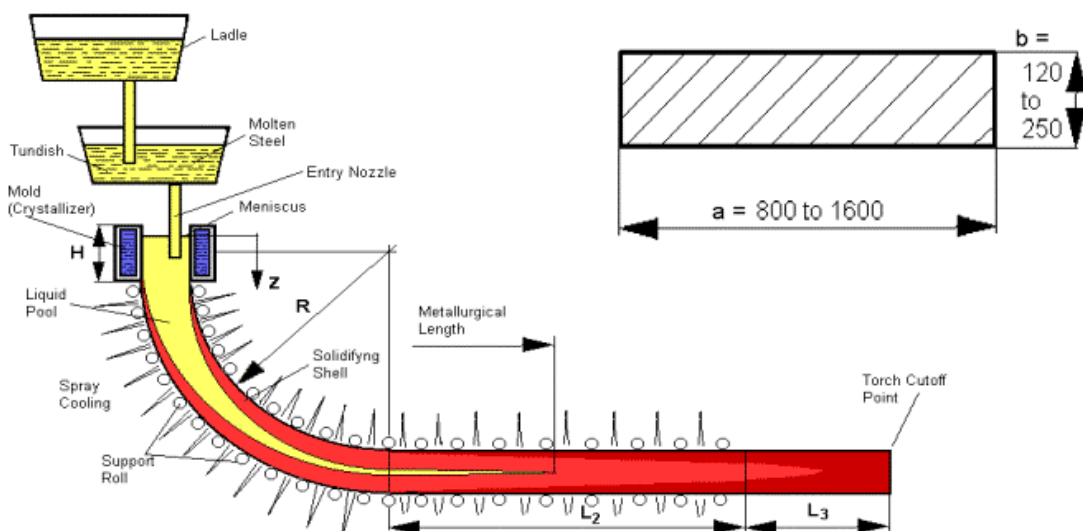
เบ้ารับน้ำเหล็กของโรงงานอุตสาหกรรมที่ได้ศึกษาวิจัย เป็นเบ้ารับน้ำเหล็กขนาด 25 ตัน ภาชนะรองรับน้ำเหล็กรูปทรงกระบอกดังรูปที่ 3.4 เส้นผ่านศูนย์กลางขอบนอกด้านบนขนาด 2.17 เมตร และด้านล่างขนาด 1.93 เมตร ความสูงของเบ้ารับน้ำเหล็ก 2.5 เมตร อิฐทนไฟในชั้นทำงานทางด้านข้างของเบ้าหน้าจะถูกแบ่งออกเป็นพื้นที่ที่รับการสัมผัสน้ำเหล็กด้วยการกระแทกโดยตรง (Impact Zone) และด้านทั่วไปข้างละ 180 มิลลิเมตร 180 มิลลิเมตร ตามลำดับ และด้านล่างเบ้าหน้า 150 มิลลิเมตร ในส่วนของอิฐทนไฟชั้นความปลอดภัยมีค่าความหนาด้านข้าง 64 มิลลิเมตร และด้านล่าง 50 มิลลิเมตร ผนังเหล็กด้านข้างหน้า 20 มิลลิเมตร ด้านล่างหน้า 25 มิลลิเมตร น้ำหนักเบ้ารับน้ำเหล็กโดยรวมมีขนาด 15 ตัน รองรับปริมาณน้ำเหล็กได้ 20-25 ตันน้ำเหล็ก

3.1.3 สถานีการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine)

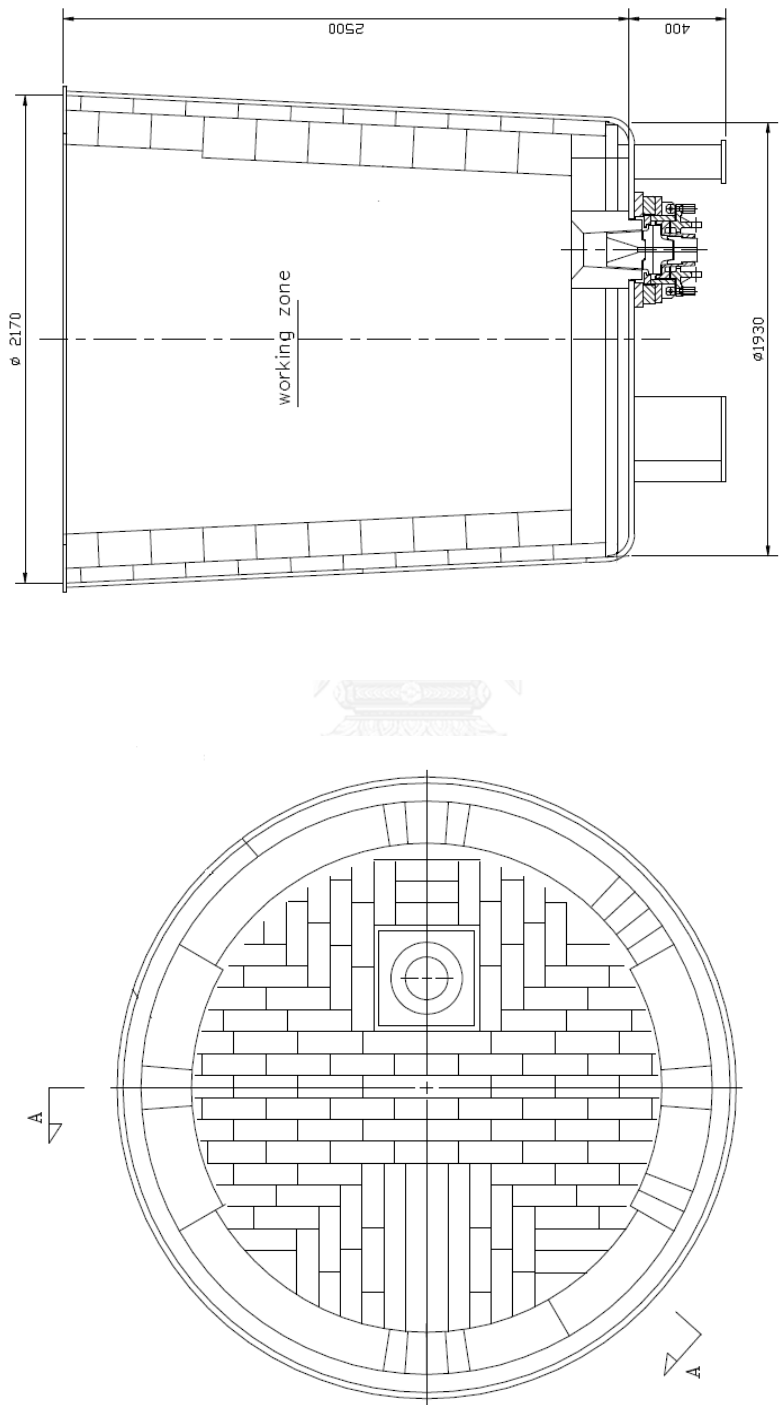
การหล่อแบบต่อเนื่องเป็นกระบวนการสำคัญที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เหล็กสำเร็จรูป เมื่อเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าหลอมเศษเหล็กได้อุณหภูมิสูงจนสามารถเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็กได้แล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะนำหน้าที่ยื่นยื่นน้ำเหล็กไปยังกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง เงื่อนไขการหล่อของกระบวนการนี้คือ อุณหภูมิน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดการหล่อจะต้องไม่ต่ำกว่า $1,550^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องสนใจอุณหภูมิน้ำเหล็กช่วงการก่อนเทที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และอุณหภูมิน้ำเหล็กที่สิ้นสุดของการหล่อแบบต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญ เพราะว่าถ้าหากอุณหภูมิน้ำเหล็กลดต่ำลงเกินกว่าที่กำหนดจะส่งผลกระทบต่อระบบการหล่อแบบต่อเนื่องเพราะผลิตภัณฑ์เหล็กที่ขึ้นรูปจะแข็งตัวผิดขั้นตอน ผลิตภัณฑ์เหล็กที่สามารถผลิตได้จากกระบวนการนี้ ประกอบด้วย เหล็กแท่งยาว (Billet, Bloom) และ เหล็กแท่งแบน (Slab) การหล่อแบบต่อเนื่องสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ง่าย จึงเป็นที่นิยมนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย

ขั้นตอนกรรมวิธีของกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 3.3 เบ้ารับน้ำเหล็กที่รับน้ำเหล็กมาแล้ว จะถูกลำเลียงขึ้นไปด้านบนของการหล่อแบบต่อเนื่อง โครงสร้างของระบบการหล่อแบบต่อเนื่องจะประกอบไปด้วยโครงสร้างหลักๆ ดังนี้ อ่างรับน้ำเหล็ก (Tundish) ทำหน้าที่รองรับน้ำเหล็กที่ไหลผ่านรูเทต่าแห่งด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่อ่างรับน้ำเหล็กจะมีรูปถ่ายน้ำเหล็กลงไปแบบหล่อ (Mold) เนื่องจากปริมาณน้ำเหล็กที่อ่างรับน้ำเหล็กที่ได้รับมีมากกว่าปริมาณน้ำเหล็กที่เหล็กถูกปล่อยออกไปรวมถึงการหล่อที่เกิดขึ้นในแนวตั้งได้อาศัยหลักการของพลังงานศักย์โน้มถ่วงที่ขึ้นอยู่กับมวล และ ความสูงของน้ำเหล็กที่จะทำให้ น้ำเหล็กไหลลงมาสู่แบบอย่างต่อเนื่อง สำหรับแบบหล่อถูกออกแบบให้สั้นตลอดเวลาขณะที่กำลังปฏิบัติงาน เพื่อป้องกันการแข็งตัวของน้ำเหล็ก หลังจากที่น้ำเหล็กไหลผ่านแบบหล่อจำเป็นที่จะต้องลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วเพื่อให้ น้ำเหล็กได้รูปทรงตามต้องการ โดยใช้ละอองน้ำที่ถูกฉีดออกมาจากหัวฉีดเพื่อที่จะระบายความร้อนน้ำเหล็กเองให้มีรูปทรงและมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น และตลอดการเคลื่อนที่ของแท่งเหล็กที่เริ่มแข็งตัวแล้วจะถูกขนานสองข้างด้วยลูกกลิ้งเพื่อที่จะทำให้การลำเลียงของเหล็กอยู่ในสภาพที่คงที่ และได้รูปตามต้องการ หลังจากนั้นจะถูกตัดตามขนาดมาตรฐานเพื่อนำไปใช้งานต่อไป

เงื่อนไขของการหล่อแบบนี้ คือ ความต่อเนื่องของการปฏิบัติงาน เมื่อเริ่มการทำงานอ่างรับน้ำเหล็กจะต้องมีน้ำเหล็กตลอดเวลา ดังนั้น ปริมาณน้ำเหล็กที่ถูกลำเลียงมากับเบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม เพราะว่าน้ำเหล็กที่อยู่ภายในรางน้ำเหล็กจะขาดไม่ได้ โดยจะส่งผลต่อคุณภาพเหล็ก และกำลังผลิตที่จะลดลง



รูปที่ 3.3 แสดงอุปกรณ์และลักษณะโดยทั่วไปในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง
(ข้อมูลจาก: <http://ietd.iipnetwork.org/content/continuous-casting>)



TOP VIEW

SECTION "A-A"

รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะเข็รรับน้ำเหล็กของโรงงานตัวอย่าง

อีกหนึ่งปัจจัยสำคัญของการหล่อแบบแบบนี้ คือ กำลังผลิตเหล็กกล้าที่มีความต่อเนื่อง และมีความคงที่ของจำนวนการผลิตในแต่ละครั้งมากที่สุด จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องออกแบบระบบควบคุมระยะแบบหล่อเมื่อน้ำเหล็กเคลื่อนที่ผ่านเพื่อขึ้นรูปถึงจุดที่น้ำเหล็กเคลื่อนที่จนภายในเนื้อเหล็กที่ตำแหน่งแกนกลางเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งทั้งหมด ระยะนี้จะเรียกว่า Metallurgical Length ใช้ในการกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำเหล็กที่ไหลผ่านแบบหล่อไปถึงรางรองรับน้ำเหล็ก รวมถึงเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านอีกด้วย เนื่องจากว่าถ้าอุณหภูมิของน้ำเหล็กลดลงเร็วเกินไปจะส่งผลให้เหล็กที่ติดค้างอยู่ด้านใน เกิดการขึ้นรูปตัวเองผิดตำแหน่งทำให้ส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตได้ ดังนั้นตัวแปรที่สำคัญก็คือ ความยาวของรางน้ำเหล็ก กับความเร็วที่น้ำเหล็กเคลื่อนที่อยู่บนรางน้ำเหล็ก

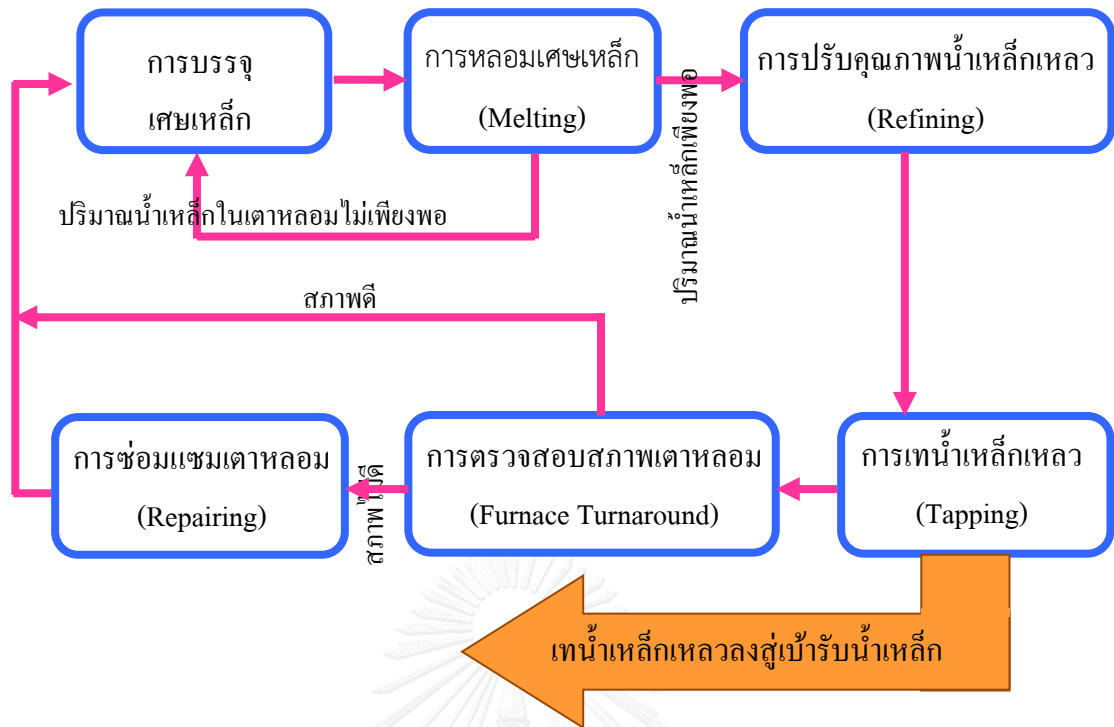
3.2 กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

ระบบควบคุมเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เป็นระบบที่มีขนาดใหญ่มีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจวัฏจักรการทำงานของเครื่องจักรกลของกระบวนการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อที่จะสามารถกำหนดขั้นตอนการทำงานผ่านระบบช่วยควบคุมอัตโนมัติได้

3.2.1 วัฏจักรการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

การทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าใน 1 รอบการทำงานจะแบ่งเป็นขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้ คือ นำเศษเหล็กที่ช่างน้ำหนักแล้วใส่ลงไปในเตาหลอม หลังจากนั้นเลื่อนอิเล็กโทรดลงไปสัมผัสเศษเหล็กด้านล่าง เพื่อให้ไฟฟ้าที่ส่งผ่านแท่งอิเล็กโทรดไหลครบวงจรจนหลอมเศษเหล็กเป็นน้ำเหล็ก หลังจากนั้นเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก ครบขั้นตอนการทำงานของการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า แสดงอยู่ในแผนภาพดังรูปที่ 3.5 ระยะเวลาการทำงานในแต่ละรอบของเตาหลอมจะเริ่มที่การเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็กจนถึงรอบการเทน้ำเหล็กถัดไป (Tap to Tap Time: TTT) จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์การใช้พลังงานร่วมกับกำลังผลิตที่ใช้ให้มีความสอดคล้องและเกิดประโยชน์สูงสุดได้มากยิ่งขึ้น

แผนภาพขั้นตอนกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่แสดงดังรูปที่ 3.5 ประกอบด้วย การบรรจุเศษเหล็ก (Charging), การหลอมเศษเหล็ก (Melting), การปรับคุณภาพน้ำเหล็กเหลว (Refining), การเทน้ำเหล็กเหลว (Tapping), การตรวจสอบสภาพเตาหลอม (Furnace Turnaround) และ การซ่อมแซมเตาหลอม (Repairing)



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงวัฏจักรการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า [5]

ขั้นตอนการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า อันดับแรกเตรียมเศษเหล็กที่จะใช้หลอมเหลว โดยคร่าว ตามศักยภาพเตาหลอม และทำการบรรจุเศษเหล็กทั้งหมดลงสู่เตาหลอม (Charging) ต่อจากนั้นเริ่มหลอมเหล็ก (Melting) ด้วยการเคลื่อนแท่งอิเล็กโทรดด้านบนลงมาสู่ด้านล่าง จะเกิดการอาร์คที่รุนแรงทำให้เกิดความร้อน และใช้เปลวไฟจากหัวเผา กับ พลังงานที่เกิดจากการออกซิไดซ์ ช่วยเพิ่มความรุนแรงของความร้อนที่ใช้หลอมเหลวด้วย เศษเหล็กจะโดนความร้อนทั้งหมดหลอมละลายให้เป็นน้ำเหล็ก โดยที่ถ้าหากปริมาณน้ำเหล็กที่อยู่ในเตาหลอมมีน้อยเกินไปผู้ปฏิบัติงานจะป้อนเศษเหล็กเพิ่มที่หลังได้ เมื่อได้น้ำเหล็กในปริมาณตามต้องการแล้วจะต้องการปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก (Refining)

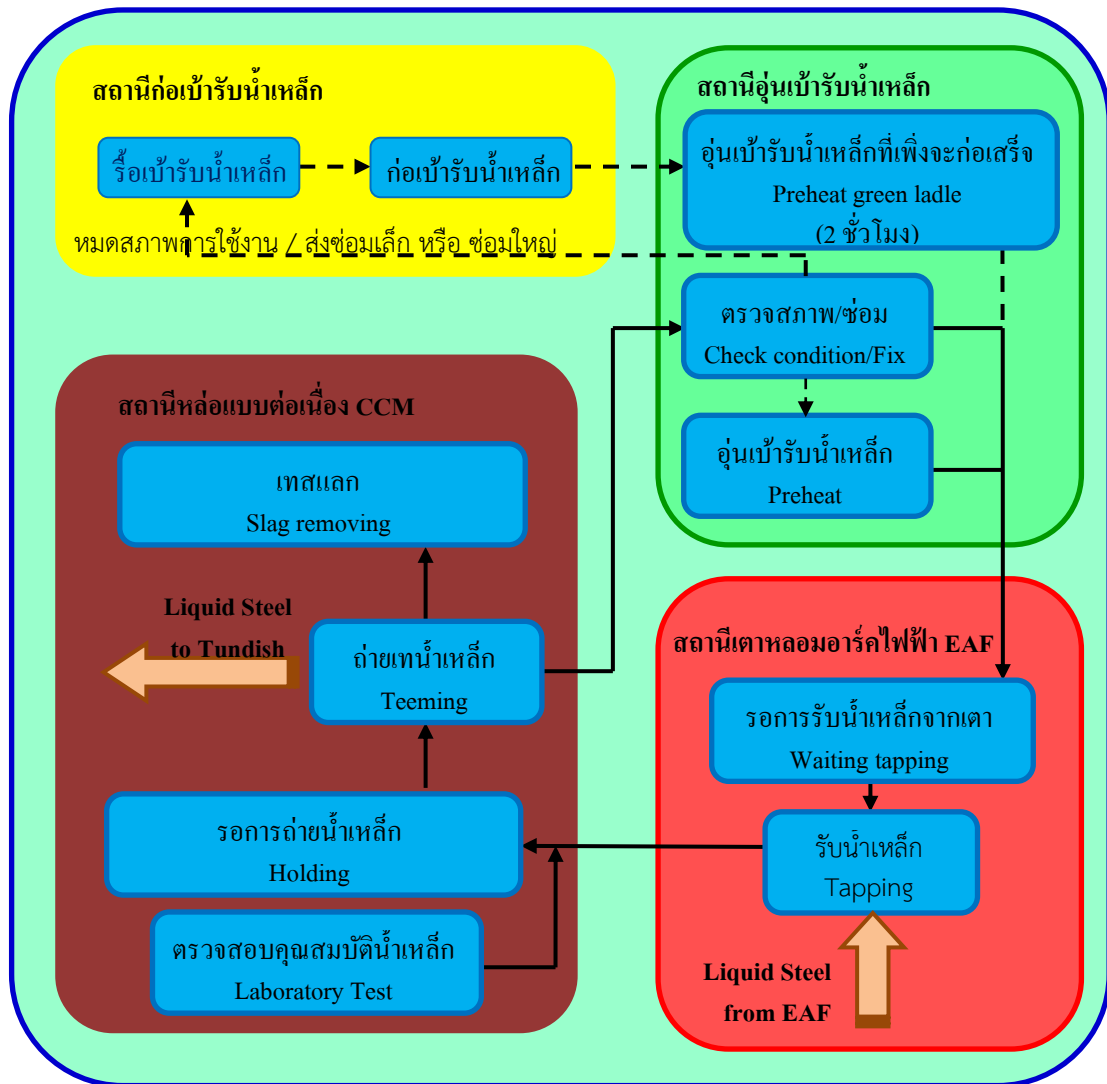
เทคนิคที่ใช้ในการลดพลังงานและเวลาในการหลอมก็คือ โดยแรกการใส่เศษเหล็กในบ่ารับน้ำเหล็กจะใส่ในปริมาณที่น้อยก่อน หรือ ใส่เศษเหล็กชิ้นเล็กๆมากๆ เพื่อเพิ่มผิวสัมผัสในการรับความร้อน จะทำให้เศษเหล็กหลอมเหลวง่ายและเร็วยิ่งขึ้น ต่อจากนั้นจะเพิ่มเศษเหล็กเข้าไปในบ่่าที่หลัง และจึงหลอมต่อ วิธีนี้เป็นการกระตุ้นการหลอมเหลวของเศษเหล็กด้วยน้ำเหล็กที่มีอยู่ด้านใน ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลในการเทน้ำเหล็กถัดๆไปในแต่ละครั้ง จะไม่เทน้ำเหล็กลงสู่บ่ารับน้ำเหล็กจนหมด แต่จะเหลือน้ำเหล็กไว้ภายในเตาหลอมเหล็กเพื่อใช้ในการหลอมเหล็กรอบถัดไป

วัตถุประสงค์หลักของการปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็ก คือ เพื่อลดปริมาณสารเจือปนที่อยู่ในน้ำเหล็กประกอบไปด้วย ฟอสฟอรัส, ซิลิกา, ซิลิกอน, อะลูมิเนียม, แมงกานีส และคาร์บอน การกำจัดสารเจือปนดังกล่าวทำได้โดยเปลี่ยนจากโลหะหนักให้สาประกอบโลหะออกไซด์ด้วยวิธีการพ่นออกซิเจนเข้าไปทำปฏิกิริยาและจับตัวกับธาตุต่างๆ ซึ่งจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำเหล็กทำให้โลหะออกไซด์เป็นแผลลลอยตัวอยู่ที่ชั้นผิวหน้าของน้ำเหล็ก ในการปฏิบัติงานจริงสามารถแยกแยะเศษเหล็กคุณภาพดีและไม่ดีเพื่อนำมาใช้ผลิตเหล็กได้ แต่ถ้าหากว่ามีการพ่นปริมาณออกซิเจนมากเกินไปน้ำเหล็กเองจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและกลายเป็นเหล็กออกไซด์หรือสนิมเหล็ก ซึ่งในทางอุตสาหกรรมไม่ต้องการให้เกิดขึ้น จึงได้มีการเติมคาร์บอนเพิ่มเข้าไปบริเวณเนื้อแผลลที่ผิวด้านบน คาร์บอนจะเข้าไปทำปฏิกิริยาเคมีกับเหล็กออกไซด์ และเปลี่ยนให้คาร์บอนมอนอกไซด์ กับน้ำเหล็กกลับคืนมา

การตรวจสอบสภาพความพร้อมในการใช้งานของเตาหลอมเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นอย่างมาก เพราะอันตรายที่เกิดจากการผิดปกติของเตาหลอมจะนำไปสู่ความอันตรายอย่างยิ่ง โดยขั้นตอนในการตรวจสอบสภาพนั้นจะเกิดขึ้นหลังจากที่น้ำเหล็กที่ถูกปรับปรุงคุณภาพเรียบร้อยแล้วจะถูกเทลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก โดยจะเหลือน้ำเหล็กภายในเตาหลอมเล็กน้อย ผู้ปฏิบัติงานจะต้องตรวจสอบความเรียบร้อยโดยรอบของหลอม (Furnace Turnaround) เพื่อความพร้อมในการหลอมโลหะในรอบถัดไป ในกรณีที่เกิดปัญหาขึ้นจะต้องหยุดการทำงานชั่วคราวและแก้ปัญหาให้เรียบร้อยให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานจริงก่อน

3.2.2 วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก

เบ้ารับน้ำเหล็กเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ขนย้ายน้ำเหล็กที่ถูกหลอมเหลวเคลื่อนที่ไปยังกระบวนการผลิตต่างๆ ปัจจัยที่สำคัญที่สุดคือน้ำเหล็กที่ถูกเคลื่อนที่ไปยังกระบวนการต่างๆ จนถึงที่สุดที่กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง อุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายก่อนถูกนำไปขึ้นรูปเป็นเหล็กแท่งจะต้องมีอุณหภูมิสูงกว่า $1,550^{\circ}\text{C}$ เพื่อให้ได้กำลังผลิตเหล็กที่มีความต่อเนื่องดังนั้นเมื่อปฏิบัติงานจริงจะมีการใช้เบ้ารับน้ำเหล็ก 2-3 เบ้า เพราะว่าการทำงานของแต่ละสถานีจะใช้เวลาพอสมควร และเพื่อให้เกิดความต่อเนื่องของเบ้ารับน้ำเหล็กที่อยู่ในแต่ละสถานีต่างๆ ถูกต้อง และไม่เสียเวลารอนาน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาช่วงระยะเวลาในการทำงานแต่ละสถานีด้วย เพราะฉะนั้นความเข้าใจอย่างถ่องแท้ของวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการควบคุมระบบการทำงานทั้งหมดของกระบวนการผลิตเหล็กกล้า



รูปที่ 3.6 แสดงกระบวนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก [4]

จากรูปที่ 3.6 คือการแสดงกระบวนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยแบ่งกระบวนการทำงานเป็นสถานีต่างๆ ดังต่อไปนี้ สถานีก่อนเบ้ารับน้ำเหล็ก, สถานีอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก, สถานีเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และ สถานีหล่อแบบต่อเนื่อง

1. สถานีก่อนเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำหน้าที่รื้อและเปลี่ยนอิฐทนไฟทั้งหมดจะเรียกการซ่อมแบบนี้ว่า การซ่อมใหญ่ ส่วนในกรณีเสริมความหนาด้วยมอร์ต้าที่มีลักษณะคล้ายปูนซีเมนต์แบบพิเศษที่อิฐทนไฟที่สึกกร่อนไปแล้ว จะเรียกการซ่อมแซมแบบนี้ว่า การซ่อมเล็ก เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กถูกนำไปใช้งานจนมีอายุครบรอบการทำงานที่จะต้องได้รับการซ่อมเล็ก หรือ การซ่อมใหญ่ ตัวเบ้ารับน้ำเหล็กจะ

ถูกยกออกสายพานการผลิตเหล็ก เพื่อที่จะไปทำการซ่อมแซมต่อไป นอกจากนี้อิฐทนไฟที่ตำแหน่งชั้นสูงสุด คือ ชั้น 8-9 จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่อีกด้วยเพื่อเป็นการลดต้นทุนค่าใช้จ่าย

2. สถานีอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก การรับเข้ารับน้ำเหล็กเข้าสู่สถานีนี้มีอยู่ 2 กรณี คือ กรณีที่ผ่านสถานีก่อนเข้ารับน้ำเหล็ก เข้ารับน้ำเหล็กขณะนี้จะมีอุณหภูมิเดียวกันกับสิ่งแวดล้อมจะใช้ช่วงระยะเวลาในการอุ่นที่ยาวนานกว่า เพื่อลดความแตกต่างของอุณหภูมิของเข้ารับน้ำเหล็ก อีกกรณีหนึ่งคือเข้ารับน้ำเหล็กที่ถูกใช้งานอย่างต่อเนื่อง เมื่อผ่านการตรวจสอบสภาพแล้วจะถูกนำไปอุ่นเพื่อเลี้ยงอุณหภูมิภายในเข้ารับน้ำเหล็กให้สูงคงที่ให้มากที่สุด และ รอรับน้ำเหล็กในรอบการทำงานถัดไป

3. สถานีเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ทำหน้าที่หลอมเศษเหล็กภายในเตาหลอม แล้วเทน้ำเหล็กที่มีคุณภาพดีแล้ว ลงไปยังเข้ารับน้ำเหล็ก โดยสถานีนี้จะมีช่องใส่เข้ารับน้ำเหล็กเป็นพิเศษให้ด้วย และเมื่อเข้ารับน้ำเหล็กได้รับน้ำเหล็กเรียบร้อยแล้ว จะถูกยกขึ้นไปรอที่สถานีต่อไป ส่วนเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจะรับเศษเหล็กมาหลอมเหลวใหม่เพื่อที่จะนำไปใช้งานในรอบการทำงานถัดไป

4. สถานีการหล่อแบบต่อเนื่องทำหน้าที่รองรับน้ำเหล็กจากเข้ารับน้ำเหล็กเพื่อที่จะส่งผ่านน้ำเหล็ก ไปขึ้นรูป โดยจะใช้อ่างน้ำเหล็ก (Tundish) รองรับปริมาณน้ำเหล็กอยู่ด้านบนสถานี เพื่อที่จะทำให้กระบวนการผลิตดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง

วัฏจักรการทำงานของเข้ารับน้ำเหล็กโดยทั่วไปจะต้องผ่านสถานีอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กก่อนทุกครั้ง เพราะว่า น้ำเหล็กในกระบวนการทำงานจะมีอุณหภูมิสูงถึง $1,700^{\circ}\text{C}$ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งยวดที่จะต้องนำเข้ารับน้ำเหล็กมาอุ่นให้อุณหภูมิในเข้าสูงขึ้นก่อนเข้าไปรับน้ำเหล็ก เพื่อที่จะลดความแตกต่างของอุณหภูมิภายในเข้ารับน้ำเหล็กเองจนก่อให้เกิดความเสียหายอย่างฉับพลัน เมื่อเข้ารับน้ำเหล็กถูกอุ่นจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น จะถูกยกไปยังสถานีเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ในช่วงนี้เข้ารับน้ำเหล็กจะสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมพอสมควร ดังนั้นจะต้องคำนวณอุณหภูมิที่ใช้ในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กให้สูงเกินมาเล็กน้อยเพื่อที่จะไปรอรับการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอม ต่อจากนั้นเตาหลอมจะเอียงเทน้ำเหล็กลงมาสู่เข้ารับน้ำเหล็กในช่วงนี้จะมีการทดสอบคุณภาพน้ำเหล็กเข้าสู่ห้องปฏิบัติการ หลังจากนั้นเข้ารับน้ำเหล็กจะถูกเคลื่อนย้ายไปยังสถานีการหล่อแบบต่อเนื่อง เข้ารับน้ำเหล็กจะถูกวางบนแท่นหล่อ แล้วจะถูกดึงแผ่นเลื่อน (Sliding Gate) ให้เปิดออก เพื่อที่น้ำเหล็กจะได้ไหลลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ที่สถานีนี้ น้ำเหล็กจะไม่ถูกปล่อยลงสู่อ่างน้ำเหล็กจนหมดเบ้า แต่จะเหลือเศษน้ำเหล็กเล็กน้อยพร้อมกับเศษแอสล็กที่ไม่ต้องการ ต่อจากนั้นเข้ารับน้ำเหล็กจะถูกเคลื่อนย้ายไปทำความสะอาด เเทน้ำเหล็กที่เหลือ และเศษแอสล็กออกจากเบ้า แล้วจึงนำมาวางตะแคงลงเพื่อตรวจสอบสภาพความพร้อม ในส่วนนี้เข้ารับน้ำเหล็กอาจจะมีการเปลี่ยนแผ่นเลื่อนเปิด-ปิด (Sliding Gate) หรือมีการ

ล้างรูเทน้ำเหล็กที่อยู่ด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการพ่นออกซิเจนอัดสวนเข้าไปจากด้านหลัง หลังจากตรวจสอบสภาพทั้งภายใน และภายนอกของเบ้ารับน้ำเหล็กที่อยู่ในสภาพสมบูรณ์พร้อมใช้งานแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกเคลื่อนไปยังสถานีอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กอีกครั้ง สำหรับในกรณีเบ้ารับน้ำเหล็กถูกนำมาใช้งานจนครบรอบการทำงานที่จะต้องนำเบ้ารับน้ำเหล็กไปซ่อมใหญ่ หรือ ซ่อมเล็ก

การส่งเบ้ารับน้ำเหล็กเข้าไปยังสถานีการก่อเบ้ารับน้ำเหล็กแบ่งได้เป็น 2 แบบ

1. ซ่อมเล็กเป็นการซ่อมเบ้ารับน้ำเหล็กหลังจากผ่านกระบวนการใช้งานมาแล้ว 20 - 25 รอบการทำงาน โดยมีลักษณะการซ่อมแบบระบุตำแหน่งของอิฐทนไฟ หรือ บางส่วนของอิฐทนไฟเท่านั้น

2. ซ่อมใหญ่เป็นการซ่อมเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว 40 - 45 รอบการทำงาน โดยลักษณะการซ่อมคือจะรื้ออิฐทนไฟภายในเบ้ารับน้ำเหล็กทั้งหมดออกมาใหม่ แล้วจึงก่ออิฐทนไฟของใหม่กลับเข้าไปแทนที่ สำหรับเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้ผ่านกระบวนการซ่อมใหญ่จะต้องผ่านการอุ่นเป็นพิเศษ ก็คือต้องใช้ระยะเวลาในการอุ่นยาวนานขึ้น โดยการปรับอุณหภูมิตามความเหมาะสมในที่นี้ใช้เวลาถึง 2 ชั่วโมง

3.3 การถ่ายเทความร้อนระหว่างระหว่างกระบวนการผลิตทั้งหมด

3.3.1 การนำความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก

การนำความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กเกิดขึ้นภายในชั้นผนังอิฐทนไฟ ชั้นผนังอิฐทนไฟชั้นด้านในสุดที่สัมผัสกับน้ำเหล็กโดยตรงจะได้รับความร้อนจากน้ำเหล็ก และจะส่งผ่านความร้อนออกมาโดยการนำความร้อนสู่ผนังอิฐทนไฟในชั้นถัดๆไป ดังนั้นจึงสามารถเขียนรูปแบบการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กออกไปสู่บรรยากาศภายนอกตามแนวรัศมีของเบ้ารับน้ำเหล็กได้ดังต่อไปนี้

น้ำเหล็ก \longrightarrow อิฐทนไฟชั้นทำงาน \longrightarrow อิฐทนไฟชั้นปลดลดย \longrightarrow ชั้นผนังเหล็ก

การแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กทั้งหมดจะใช้การนำความร้อนของฟูเรียร์มาอธิบายบนสมการที่ (3.1)

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

เมื่อ Q_{cond} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนของตัวกลาง (W)

k คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของตัวกลาง (W/m^2K)

A_{cond} คือ พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่านตัวกลาง (m^2)

∇T คือ การแจกแจงอุณหภูมิภายในตัวกลาง (K)

เมื่อทำการพิจารณาสมการที่ (3.1) จะพบว่าอัตราการถ่ายเทด้วยการนำความร้อนขึ้นอยู่กับ การแจกแจงของอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กอย่างเดียว เพราะว่า ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน และพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นค่าคงที่ทั้งคู่ แต่ความเป็นจริงในการออกแบบเพื่อใช้งานใน อุตสาหกรรม เบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องถูกพิจารณาร่วมกับสถานะการทำงานของแต่ละสถานีที่อยู่ใน กระบวนการผลิต ดังนั้นเวลาที่ใช้ในแต่ละสถานีจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่จะต้องนำมาคำนวณร่วมกันด้วย เพราะฉะนั้นการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องอยู่ฟังก์ชันอุณหภูมิ และ เวลาด้วย

สมดุลพลังงานภายในเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ตั้งสมการที่ (3.2)

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q_b''' \quad (3.2)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของวัสดุทนไฟ (kg/m^3)

c คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุทนไฟ (kJ/kgK)

t คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการพิจารณาอุณหภูมิ (s)

Q_b''' คือ อัตราการก่อเกิดพลังงานต่อปริมาตรผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก (W/m^3)

สมการหลักที่ใช้ในการคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก และ ความร้อนที่ผ่านเข้าไปภายในผนังแต่ละชั้นคือ สมการที่ (3.1) และ (3.2) โดยเงื่อนไขการคำนวณจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) และ เงื่อนไขที่ขอบ (Boundary Condition) ของปัญหา

3.3.2 การพาความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก

การถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน (Convection Heat Transfer) คือ การถ่ายเท ความร้อนโดยที่ตัวกลางจะเคลื่อนที่ หรือไหลไปกับความร้อนด้วย จึงทำให้เกิดขึ้นกับของเหลวหรือ ก๊าซเท่านั้น ประเภทของการพาความร้อนถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การพาความร้อนโดย ธรรมชาติ (Natural Convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) การพา ความร้อนแบบธรรมชาติเกิดจากความแตกต่างทางด้านอุณหภูมิของตัวกลาง การที่ตัวกลางเคลื่อน สัมผัสกับผิวของวัตถุจะส่งผลให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ตัวอย่างการพาความร้อนแบบธรรมชาติ คือการพา ความร้อนที่เกิดขึ้นกับเบ้ารับน้ำเหล็กในขณะที่มีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ส่วนการพาความ ร้อนแบบบังคับเกิดขึ้นโดยอาศัยแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิววัตถุที่ร้อน หรือ

เย็นกว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ของการพาความร้อนแบบบังคับจะสูงกว่าแบบธรรมชาติ เพราะฉะนั้นถ้าในกรณีที่ความแตกต่างของอุณหภูมิเท่ากันการพาความร้อนแบบบังคับจะมีประสิทธิภาพสูงกว่า สมการอัตราการถ่ายเทความร้อนของการพาความร้อนอยู่ในรูปของ กฎการเย็นตัวของนิวตัน(Newton's Law of Cooling) ดังสมการที่ (3.3)

$$Q_{conv} = hA_{conv}(T_{\infty} - T_s) \quad (3.3)$$

เมื่อ Q_{conv} คือ ปริมาณความร้อนจากการพาความร้อน (W)

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวกลางกับวัตถุ (W/m^2K)

A_{conv} คือ พื้นที่ที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

T_{∞} คือ อุณหภูมิของของตัวกลางที่พาความร้อน (K)

T_s คือ อุณหภูมิของผิวที่ตัวกลางไปสัมผัส (K)

สำหรับการหาปริมาณความร้อนจากการพาความร้อนในสมการที่ (3.3) นั้นจะต้องถูกพิจารณาถึงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิที่จุดต่าง หรือพื้นที่ที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถวัดหาได้โดยง่าย แต่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน(Heat Transfer Coefficient) ไม่สามารถหาได้ด้วยการตรวจวัด แต่สามารถหาได้ด้วยวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์จากการหาค่า Nusselt Number ดังสมการที่ (3.4)

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

เมื่อ Nu คือ Nusselt Number (Dimensionless)

L คือ ระยะความยาวของการถ่ายเทความร้อน (m)

กรณีการไหลแบบภายนอก(External Flow) ที่ลักษณะของการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะต้องหาจาก Nusselt Number ที่มีรูปแบบของสมการเฉพาะเพื่อหาความถูกต้องแม่นยำมากขึ้นดังสมการที่ (3.5)

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} = CRa_L^n \quad (3.5)$$

ค่า C และ n หาได้จากค่า Rayleigh number (Ra_L) และหาได้จาก

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (3.6)$$

เมื่อ Gr_L คือ Grashof Number (Dimensionless) ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัว (Buoyancy force) กับแรงจากความหนืด (Viscous force) ของของไหล

Pr คือ Prandtl Number (Dimensionless) ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมและ Thermal diffusivities

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (Specific Gravity) (m/s^2)

β คือ coefficient of volume expansion (K^{-1})

ν คือ Kinematics Viscosity ของของไหล (m^2/s)

α คือ Thermal diffusivities ของของไหล (m^2/s)

นอกจากการพิจารณาการหาค่า Nusselt Number ที่ต้องคำนึงถึงรูปแบบการไหลของตัวกลางแล้ว ลักษณะรูปร่างของพื้นผิวสัมผัสก็เป็นอีกปัจจัยที่จะสามารถนำมาพิจารณาได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงรูปแบบสมการการหาค่า \overline{Nu}_L ในลักษณะต่างๆ

กรณี	เงื่อนไข	สมการ
แผ่นเรียบวางตั้ง	การไหลแบบปั่นป่วน	$Nu_L = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left\{ 1 + (0.492)^{9/16} \right\}^{4/9}} \right]^2$
แผ่นเรียบวางเอียง	แทนค่า g ในสมการ Ra_L ด้วย $g \cos \theta$ โดย θ เป็นมุมเอียงของแผ่น มีค่าระหว่าง $0 \leq \theta \leq 60^\circ$	$Nu_L = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left\{ 1 + (0.492)^{9/16} \right\}^{4/9}} \right]^2$

จากการศึกษาของ Ernst R. G. Eckert พบว่า

$$Nu = 0.68 \left(\frac{Pr}{0.952 + Pr} \right)^{0.25} Gr^{0.25} Pr^{0.25} \quad (3.7)$$

$$\text{เมื่อ } Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (3.9)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.10)$$

เมื่อ c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของของไหลที่ความดันคงที่ ($\frac{kJ}{kg K}$)

จากที่ได้กล่าวมาไว้ข้างต้นเป็นเพียงส่วนหนึ่งของการหาค่า Nusselt Number ซึ่งนำไปสู่การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน หากเงื่อนไขของการนำไปใช้งานมีความซับซ้อนมาก สมการที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์จะยากขึ้นตามไปด้วย

3.3.3 การแผ่รังสีความร้อนในเข้รับน้ำเหล็ก

การถ่ายเทความร้อนในรูปแบบของการแผ่รังสีความร้อน ลักษณะของพลังงานจะถูกส่งออกมาสู่ภายนอกในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถถ่ายเทความร้อนออกรอบตัวได้ในทุกทิศทาง โดยไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางที่ใช้เป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน การแผ่รังสีความร้อนจะส่งผลกระทบต่ออย่างมากหากความแตกต่างของอุณหภูมิมีค่อนข้างมาก แต่เนื่องจากการกระบวนการผลิตเหล็กกล้าจะส่งผลให้เข้รับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงตลอดช่วงระยะเวลาการทำงานเมื่อเทียบกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม รูปแบบการทำงานของการทำงานของการแผ่รังสีความร้อนจะส่งผลโดยตรงต่อเข้รับน้ำเหล็กมากกว่าการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบอื่นๆ

วัตถุดำ (Black Body) คือ วัตถุหรือพื้นผิวที่ใช้แบบจำลองในการศึกษาการแผ่รังสีความร้อนแบบอุดมคติ มีความสามารถในการดูดกลืนรังสีตกกระทบได้ทั้งหมด การแผ่รังสีที่เกิดขึ้นในทุกๆ ความยาวคลื่นและทุกทิศทางจะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของอุณหภูมิเพียงเท่านั้นดังสมการที่ (3.11)

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (3.11)$$

เมื่อ E_b คือ อัตราการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำ (W/m^2)

σ คือ ค่าคงที่ Stefan-Boltzmann constant
($5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^4)$)

T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิววัตถุ (K)

เนื่องจากวัตถุดำเป็นวัตถุที่ถูกสมมติขึ้นมาในอุดมคติและมีความสามารถในการแผ่รังสีได้มากที่สุด จึงได้นำสมการการหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำมาปรับปรุงเพื่อใช้ร่วมกับวัตถุทั่วไปบนพื้นโลก พื้นผิวของวัตถุทั่วไปจะมีความสามารถในการดูดกลืนรังสีตกกระทบที่น้อยกว่าพื้นผิววัตถุดำ ตัวแปรสำคัญที่จะนำมาใช้บอกความสามารถในการดูดกลืนรังสีตกกระทบคือ ค่าเปล่งรังสี

(Emissivity) ของพื้นผิว ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 สำหรับในงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าค่าเปล่งรังสีของเหล็กมีค่าประมาณ 0.84 สมการที่ (3.12) แสดงการหาอัตราการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุทั่วไป

$$E = \sigma \epsilon T_s^4 \quad (3.12)$$

เมื่อ E คือ อัตราการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุทั่วไป (W)

ϵ คือ ค่าเปล่งรังสี(emissivity)

ในการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวใดๆ ไปสู่สิ่งแวดล้อมจะเป็นไปตามสมการที่ (3.13)

$$Q_{rad} = \sigma \epsilon A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3.13)$$

เมื่อ Q_{rad} คือ ปริมาณความร้อนที่แผ่รังสีสู่ภายนอก (W)

A คือ พื้นผิวของวัตถุที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

T_∞ คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของสิ่งแวดล้อมโดยรอบวัตถุ (K)

ในการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนของสมการที่(3.13) เป็นการแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิววัตถุกับสิ่งแวดล้อม แต่ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีกระบวนการแผ่รังสีความร้อนในพื้นที่ปิดมีการแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดระหว่างพื้นผิวใดๆ การถ่ายเทความร้อนระหว่าง 2 พื้นผิวที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ดังนั้นการศึกษาเรื่องตัวประกอบการมองเห็น (View-Factor)

3.3.3.1 ตัวประกอบการมองเห็น (View-Factor)

ใช้ในการศึกษาการแผ่รังสีความร้อนนอกเหนือจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิววัตถุกับสิ่งแวดล้อม แต่สามารถช่วยอธิบายการแผ่รังสีความร้อนระหว่างพื้นผิววัตถุใดๆ ตัวอย่างการแผ่รังสีความร้อนในแต่ละพื้นผิวก็คือ ผนังเข้ารับน้ำเหล็กมีการรับ-ส่งผ่านรังสีความร้อนให้กับผนังด้านอื่นๆ รวมถึงกันภายในเข้ารับน้ำเหล็ก และฝาปิดเข้ารับน้ำเหล็กด้านบนด้วย การคำนวณการแผ่รังสีความร้อนของผนังในแต่ละด้านจะต้องพิจารณาถึงอัตราส่วนการรับและส่งผ่านรังสีความร้อนด้วยโดยพิจารณาเรื่องตัวประกอบการมองเห็นจากรูปที่ 3.7 การแผ่รังสีความร้อนของพื้นผิวภายในพื้นที่ปิดสัดส่วนการปลดปล่อยพลังงานจากพื้นผิว A_1 ไปยังอีกพื้นผิว A_2 และพื้นผิวครึ่งทรงกลมปิดล้อม

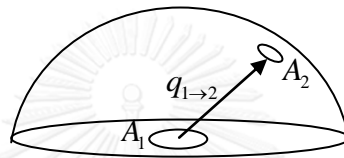
สำหรับพลังงานที่พื้นผิว A_1 ปลดปล่อยให้กับพื้นผิว A_2 มีค่าเท่ากับสัดส่วนปริมาณรังสีความร้อนที่ออกจากพื้นผิว A_1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการได้ดังสมการที่ (3.14)

$$q_{1 \rightarrow 2} = F_{1 \rightarrow 2} A_1 q_1'' \quad (3.14)$$

เมื่อ $q_{1 \rightarrow 2}$ คือ การแผ่รังสีความร้อนออกจากพื้นผิว A_1 ไปสู่พื้นผิว A_2 (W)

$F_{1 \rightarrow 2}$ คือ ตัวประกอบการมองเห็นโดยพื้นผิว A_1 มองเห็นพื้นผิว A_2

q_1'' คือ ปริมาณรังสีความร้อนที่ออกจากพื้นที่ของพื้นผิว A_1 (W/m^2)



รูปที่ 3.7 ลักษณะการแผ่รังสีจากพื้นผิว

สำหรับค่าตัวประกอบการมองเห็นจะมีอยู่ในช่วง (0-1) ในกรณีที่ตัวประกอบการมองเห็นมีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ผิว A_1 จะสามารถปลดปล่อยออกมาด้วยการแผ่รังสีความร้อนได้

$$q_1 = A_1 q_1'' \quad (3.15)$$

เมื่อ q_1 คือ ปริมาณพลังงานทั้งหมดที่ผิว A_1 จะสามารถปลดปล่อยออกมาด้วยการแผ่รังสีความร้อนได้

เนื่องจากรูปที่ 3.7 พิจารณาพื้นผิว A_1 ที่ปล่อยพลังงานการแผ่รังสีความร้อนให้พื้นผิว A_2 เป็นเป็นแค่พลังงานเพียงบางส่วนเท่านั้นที่พื้นผิว A_2 จะได้รับ พลังงานการแผ่รังสีความร้อนในส่วนที่เหลือจะถูกปลดปล่อยออกไปให้กับพื้นผิวอื่นๆโดยรอบพื้นผิว A_2 ดังนั้นหากพิจารณาจำนวนพื้นผิวที่มีทั้งหมด n พื้นผิว ผลรวมของพลังงานการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิว A_1 จะถูกปลดปล่อยออกไปยังพื้นผิว n พื้นผิว จะมีค่าเท่ากับปริมาณการปลดปล่อยพลังงานการแผ่รังสีความร้อนที่ออกจากพื้นผิว A_1 ทั้งหมดดังสมการที่ (3.16)

$$q_1 = \sum_{i=1}^n F_{1 \rightarrow i} A_1 q_1'' \quad (3.16)$$

เมื่อ $F_{1 \rightarrow i}$ คือ ตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิว A_1 ที่มองเห็นพื้นผิว A_i ทั้งหมด

n พื้นผิวในพื้นที่ปิดล้อม (Dimensionless)

พิจารณาสมการที่ (3.15) และ(3.16) จะพบความสัมพันธ์ว่าเมื่อแทนสมการที่ (3.15) ลงไปในสมการที่ (3.16) จะสามารถแก้สมการได้

$$\sum_{i=1}^n F_{1 \rightarrow i} = 1 \quad (3.17)$$

ดังนั้นผลรวมของตัวประกอบการมองเห็นของทุกๆพื้นผิวทั้งหมด(Summation Rule)ในพื้นที่ปิดล้อมโดยรอบมีค่าเท่ากับ 1

การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนใช้ตัวประกอบการมองเห็นมาช่วยแก้ปัญหาได้อีกวิธีนอกจากสมการที่ 3.17 ซึ่งเราเรียกความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ว่า ความสัมพันธ์แบบเห็นซึ่งกันและกัน หมายความว่าตามรูปที่ 3.7 คือ ตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิว A_1 มองเห็นพื้นผิว A_2 มีค่าเท่ากับ ตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิว A_2 มองเห็นพื้นผิว A_1 หรือพิจารณาการแผ่รังสีความร้อนที่มีพื้นผิวจำนวนมาก แสดงในสมการที่ (3.18) เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า Reciprocity Relation

$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i} \quad (3.18)$$

เมื่อ A_i คือ พื้นที่การแผ่รังสีบนพื้นผิว i (m^2)

A_j คือ พื้นที่การแผ่รังสีบนพื้นผิว j (m^2)

$F_{i \rightarrow j}$ คือ ตัวประกอบการมองเห็นโดยมองจากพื้นผิว i ไปยังพื้นผิว j

$F_{j \rightarrow i}$ คือ ตัวประกอบการมองเห็นโดยมองจากพื้นผิว j ไปยังพื้นผิว i

(Dimensionless)

สำหรับในกรณีที่พื้นผิววัตถุที่แผ่รังสีออกมามีลักษณะเป็นผิวโค้งนูน รังสีที่พุ่งออกจากพื้นผิวนั้นจะไม่มาตกกระทบสู่พื้นผิวเดิมอีก $F_{k \rightarrow k} = 0$ แต่สำหรับพื้นผิวโค้งเว้านั้นเมื่อปล่อยรังสีออกจากตัวเองจะสามารถตกกระทบกลับที่ผิวเดิมได้ทำให้ $F_{k \rightarrow k} \neq 0$

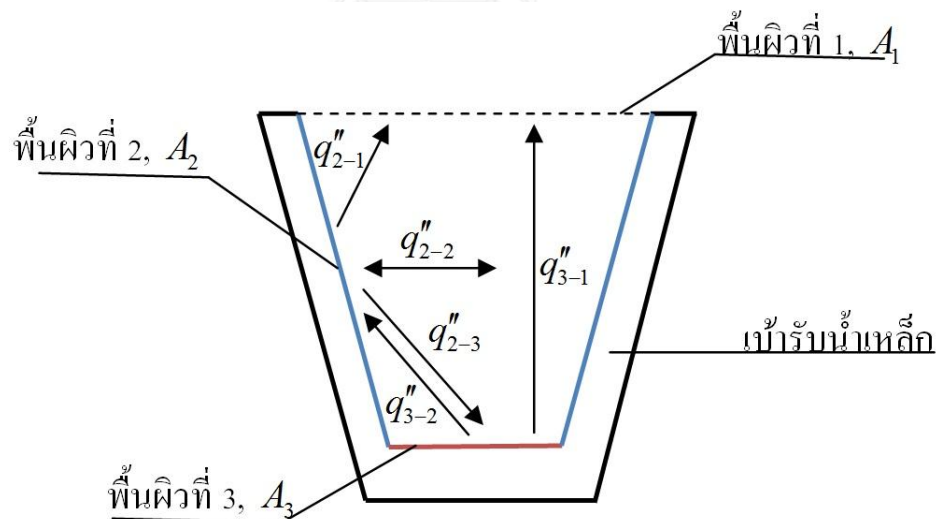
3.3.3.2 การแผ่รังสีในพื้นที่ปิดล้อม

การทำงานของแอร์รับน้ำเหล็กที่ผ่านสถานีการทำงานต่างๆ จะได้รับความร้อนและสูญเสียความร้อนออกสู่ภายในและภายนอกที่ไม่เท่ากัน สาเหตุเกิดมาจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิด

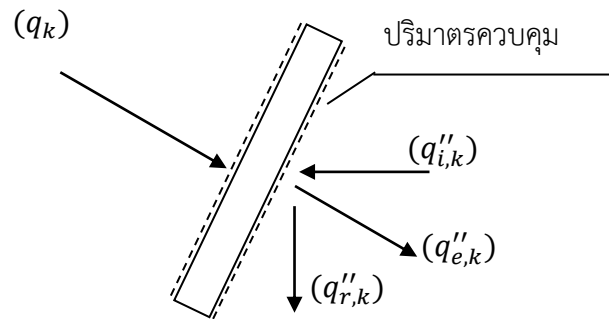
ภายในบ้ำรับน้ำเหล็กจะเกิดขึ้นและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปค่อนข้างสูงมาก ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนจะส่งผลกระทบต่อเป็นอย่างมากทั้งภายในและภายนอกของบ้ำรับน้ำเหล็ก โดยการแผ่รังสีภายในบ้ำรับน้ำเหล็ก จะเกิดการแผ่รังสีของผนังด้านต่างดังรูปที่ 3.8

- 1.) ผนังบ้ำรับน้ำเหล็กที่เป็นพื้นที่ผิวโค้งจะแผ่รังสีความร้อนให้แก่กันในด้านที่อยู่ตรงข้าม
- 2.) ผนังด้านล่างของบ้ำรับน้ำเหล็กแผ่รังสีความร้อนให้กับผนังบ้ำรับน้ำเหล็กด้านข้างและแผ่รังสีออกสู่บรรยากาศภายนอก

ตามกฎอนุรักษ์พลังงานของการพิจารณาพื้นผิว k ใดๆ ดังรูปที่ 3.9 จะต้องมีการสมดุลพลังงานของการแผ่รังสีทั้งเข้าและออก โดยการสมดุลนั้นจะสมดุลพลังงานภายใต้ปริมาตรควบคุมนั้นๆ ด้วย การแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดรังสีตกกระทบ ($q''_{i,k}$) รังสีสะท้อน ($q''_{r,k}$) และรังสีที่แผ่ออกพื้นผิว ($q''_{e,k}$) แต่ในหลักความเป็นจริงในงานอุตสาหกรรมจะเป็นไปได้ยากที่จะทำการสมดุลทางพลังงานเพียงแค่ 3 รังสีนี้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องใส่ปริมาณความร้อนเพิ่มเข้า หรือ เอาออกจากพื้นผิว (q_k) เพื่อให้พื้นผิว k สามารถที่จะวิเคราะห์แบบสมดุลพลังงานได้



รูปที่ 3.8 ลักษณะการแผ่รังสีภายในบ้ำรับน้ำเหล็กเป็นการแผ่รังสีในพื้นที่ปิดล้อม [5]



รูปที่ 3.9 ลักษณะการแผ่รังสีบนพื้นผิว k ใดๆ

สมดุลพลังงานบนพื้นผิว k ใดๆ จัดรูปแบบสมการตามทิศทางของรังสีเข้า และออกจากพื้นผิว k

$$q_k = (q''_{o,k} - q''_{i,k})A_k \quad (3.19)$$

เมื่อ $q''_{o,k} = q''_{e,k} + q''_{r,k}$ (3.20)

A_k คือ พื้นผิว k ใดๆ (m^2)

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

โดยฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนที่ออกจากพื้นผิวสามารถหาได้จากสมการที่ (3.12)

$$q''_{e,k} = \sigma \varepsilon_k T_k^4 \quad (3.21)$$

เมื่อ ε_k คือ ค่า Emissivity ของพื้นผิว k ใดๆ (Dimensionless)

T_k คือ อุณหภูมิที่แผ่รังสีออกจากพื้นผิว k (K)

ภายในเข้รับน้ำเหล็กจะถูกพิจารณาให้มีลักษณะคล้ายวัตถุเทา จะส่งผลให้พื้นผิว k ใดๆ ที่ถูกพิจารณา จะมีการแผ่รังสีที่ออกจากพื้นผิวเพียงแค่รังสีสะท้อน และรังสีที่ปลดปล่อยออกจากพื้นผิวเพียงแค่นั้น เพราะฉะนั้นผลรวมของความสัมพันธ์ระหว่างค่า Emissivity และ Reflexivity มีค่าเท่ากับ 1 ตามสมการที่ (3.22)

$$\varepsilon_k + \rho_k = 1 \quad (3.22)$$

เมื่อ ρ_k คือ ค่า Reflexivity ของพื้นผิว k ใดๆ (Dimensionless)

จากสมการที่ (3.22) จะสามารถจัดรูปแบบของสมการใหม่ให้อยู่ในรูปแบบของสมการที่มีแต่ค่า Emissivity ได้ เพื่อเป็นการลดค่าตัวแปรไม่ทราบค่า

$$\rho_k = 1 - \varepsilon_k \quad (3.23)$$

รังสีสะท้อนที่ออกจากพื้นผิว k มีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$q''_{r,k} = \rho_k q''_{i,k} \quad (3.24)$$

จัดรูปแบบสมการใหม่โดยแทนค่าสมการที่ (3.23) ลงสมการที่ (3.24) จะได้

$$q''_{r,k} = (1 - \varepsilon_k) q''_{i,k} \quad (3.25)$$

ดังนั้นเมื่อแทนสมการที่ (3.21) และ สมการที่ (3.25) ลงไปในสมการที่ (3.20) จะได้ว่า

$$q''_{o,k} = \sigma \varepsilon_k T_k^4 + (1 - \varepsilon_k) q''_{i,k} \quad (3.26)$$

จัดรูปแบบสมการที่ (3.26) ใหม่ให้อยู่ในสมการที่อยู่ในฟังก์ชันของการแผ่รังสีออกจากพื้นผิว k ใดๆ เนื่องจากว่าลำดับขั้นตอนในการตรวจเข้ารับการแผ่รังสีที่ออกจากเข้ารับน้ำเหล็กมีความง่ายมากกว่าจะได้ว่า

$$q''_{i,k} = \frac{q''_{o,k} - \sigma \varepsilon_k T_k^4}{1 - \varepsilon_k} \quad (3.27)$$

แทนสมการที่ (3.27) ลงไปในสมการที่ (3.19) จะได้ว่า

$$q_k = \left(\frac{\varepsilon_k}{1 - \varepsilon_k} \right) (\sigma T_k^4 - q''_{o,k}) A_k \quad (3.28)$$

จากสมการที่ (3.28) จะเห็นได้ว่าการหาค่าปริมาณความร้อนเข้าและออกของผนังเข้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งพื้นผิว k ใดๆนั้นสามารถหาได้โดยง่าย ไม่ว่าจะเป็นค่า Stefan-Boltzmann constant หรือค่าคงที่ที่เป็นคุณสมบัติของพื้นผิว ค่า Effective emissivity รวมไปถึงค่าจากการทดลองที่สามารถตรวจวัดได้คือค่าอุณหภูมิพื้นผิว k และ ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนออกจากพื้นผิว k แต่ว่าการคำนวณหาความร้อนเข้าและออกจากผนังเข้ารับน้ำเหล็กทั้งเข้านั้นจะต้องคำนวณพื้นผิวมากกว่าหนึ่งพื้นผิวขึ้นไป จึงจำเป็นต้องนำหลักการของตัวประกอบการมองเห็นมาช่วยวิเคราะห์หาปริมาณความร้อนดังกล่าวเพิ่มเติมด้วย

การวิเคราะห์หาค่าปริมาณความร้อนที่เข้าและออกจากผนังเก็บรับน้ำเหล็กทุกๆด้าน จะใช้การคำนวณแบบการแผ่รังสีจากพื้นผิว k ไปยังพื้นผิว j ใดๆ โดยตัวประกอบการมองเห็นจะสามารถอธิบายคำตอบของสัดส่วนการมองเห็นเพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่เข้าและออกจากผนังเก็บรับน้ำเหล็กได้ สมการใหม่ที่แสดงความสัมพันธ์คือ

$$q_{k \rightarrow j} = F_{k \rightarrow j} A_k q''_{o,k} \quad (3.29)$$

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

- เมื่อ $q_{k \rightarrow j}$ คือ ปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากพื้นผิว k ไปยังพื้นผิว j (W)
- $q_{j \rightarrow k}$ คือ ปริมาณการแผ่รังสีที่ออกจากพื้นผิว j ไปยังพื้นผิว k (W)
- $F_{k \rightarrow j}$ คือ ตัวประกอบการมองเห็นโดยมองจากพื้นผิว k ไปยังพื้นผิว j
- $F_{j \rightarrow k}$ คือ ตัวประกอบการมองเห็นโดยมองจากพื้นผิว j ไปยังพื้นผิว k
- A_j คือ พื้นที่ของพื้นผิว j ใดๆ (m^2)
- $q''_{o,j}$ คือ พลั๊กซ์ของการแผ่รังสีความร้อนที่ออกจากพื้นผิว j ใดๆ (W/m^2)

ตัวประกอบการมองเห็นมีความสัมพันธ์แบบพื้นที่ของพื้นผิวแต่ผิวมองเห็นมองเห็นซึ่งกันและกัน Reciprocity Relation หรือก็คือพื้นผิวที่หนึ่งมองเห็นพื้นผิวที่สอง มีค่าเดียวกันกับพื้นผิวที่สองมองเห็นพื้นผิวที่หนึ่ง

$$A_1 = F_{2 \rightarrow 1} A_2 \quad (3.31)$$

หรือก็คือ $F_{k \rightarrow j} A_k = F_{j \rightarrow k} A_j \quad (3.32)$

สมการที่ (3.32) จะถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาร่วมกันกับสมการที่ (3.30)

$$q_{j \rightarrow k} = F_{k \rightarrow j} A_k q''_{o,j} \quad (3.33)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงการแลกเปลี่ยนรังสีสุทธิของผนังเก็บรับน้ำเหล็กในแต่ละพื้นผิวจะสามารถคำนวณหาผลต่างของพื้นผิว k และพื้นผิว j ใดๆได้จาก

$$q_{k \leftrightarrow j} = q_{k \rightarrow j} - q_{j \rightarrow k} \quad (3.34)$$

$$\text{เมื่อ} \quad q_{k \rightarrow j} = F_{k \rightarrow j} A_k q''_{o,k}$$

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

เพราะฉะนั้น

$$q_{k \leftrightarrow j} = F_{k \rightarrow j} A_k q''_{o,k} - F_{k \rightarrow j} A_k q''_{o,j} \quad (3.35)$$

จะสามารถหาปริมาณความร้อนที่ได้เกิดจากการแผ่รังสีบนพื้นผิว k และพื้นผิว j ใดๆในพื้นที่ปิดล้อมได้ คือ ผลรวมของการแลกเปลี่ยนความร้อนสุทธิที่เกิดขึ้นภายในพื้นที่ปิดล้อมทั้งหมดเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้

$$q_k = \sum_{j=1}^N q_{k \leftrightarrow j} \quad (3.36)$$

แทนค่าสมการ (3.35) ลงไปในสมการที่ (3.36) จะได้ว่า

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

จากสมการที่ (3.28) และสมการที่ (3.36) ล้วนแล้วแต่เป็นการหาค่าปริมาณความร้อนเข้าและออกของผนังแบร์รับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งพื้นผิว k ใดๆทั้งสิ้น เมื่อนำทั้งสองสมการจับเท่ากันจะได้ว่า

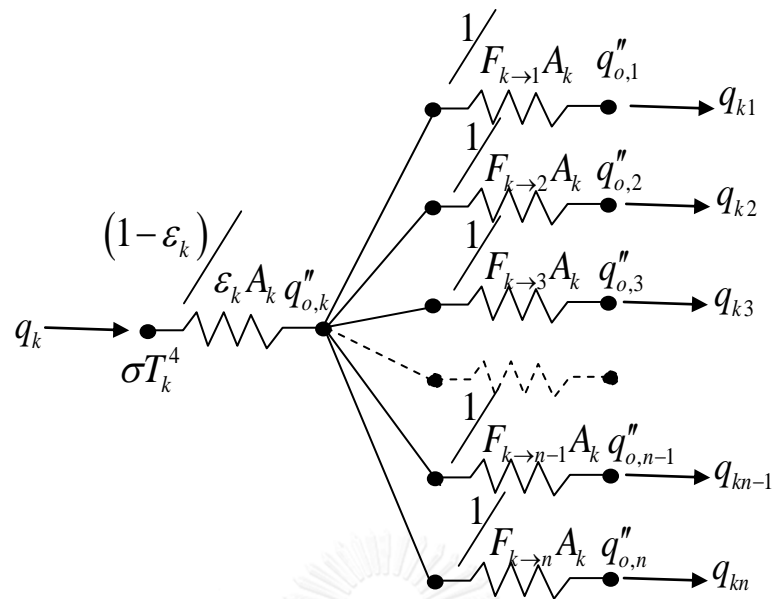
$$\left(\frac{\varepsilon_k}{1 - \varepsilon_k} \right) (\sigma T_k^4 - q''_{o,k}) A_k = \sum_{j=1}^N F_{k \rightarrow j} A_k (q''_{o,k} - q''_{o,j}) \quad (3.37)$$

จัดรูปแบบให้สอดคล้องและแทนค่าสมการ (3.11) ซึ่งก็คือสมการการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำลงไปในสมการที่ (3.37)

$$\frac{(E_{b,k} - q''_{o,k})}{(1 - \varepsilon_k) / \varepsilon_k A_k} = \sum_{j=1}^N \frac{(q''_{o,k} - q''_{o,j})}{1 / F_{k \rightarrow j} A_k} \quad (3.38)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (3.38) คือการหาค่าปริมาณการแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าและออกของพื้นผิว k ใดๆ หาได้จาก ผลต่างของการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำ กับฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนที่ออกจากพื้นผิว k ใดๆ มีค่าเท่ากับ ผลรวมของฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อนสุทธิที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิว k กับพื้นผิว j ใดๆ ภายใต้พื้นที่ปิดล้อม

เมื่อนำสมการที่ (3.38) มาเรียงใหม่และเขียนให้อยู่ในรูปของวงจรการต้านทานทางความร้อน จะได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรต้านทานความร้อนของพื้นผิว k ในพื้นที่ปิดล้อมด้วยพื้นผิว n ผิว

3.4 ปริมาณพลังงานที่ได้จากการเผาไหม้ทั้งหมด

การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้าของงานวิจัยนี้ จะได้รับความร้อนจากเผาไหม้ของน้ำมันเตาทั้งหมด โดยหัวเผาจะมีทั้งแบบหัวเผาตั้ง และหัวเผานอน ซึ่งจะหน้าที่การใช้งานที่แตกต่างกันไป หัวเผาตั้งจะใช้อุ่นเข้ารับน้ำเหล็กใหม่ที่ได้รับการเปลี่ยนอิฐทนไฟมาใหม่ทั้งหมด การอุ่นลักษณะนี้จะช่วยให้อิฐทนไฟที่ยังไม่ได้ประสานกันใหม่มีความแน่นและแข็งแรงมากขึ้น ส่วนการใช้หัวเผาแบบหัวเผานอนจะเป็นการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กเพื่อรักษาอุณหภูมิให้มากเพียงพอเพื่อที่จะสามารถนำเข้ารับน้ำเหล็กไปปรับน้ำเหล็กที่สถานีหัวเผาได้อย่างปลอดภัยโดยที่เข้ารับน้ำเหล็กไม่ได้รับความเสียหายอย่างรุนแรงจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้หาได้จากสมการที่ (3.14)

$$E_{fuel} = V_{fuel} \times LHV \quad (3.39)$$

เมื่อ V_{fuel} คือ ปริมาตรของเชื้อเพลิงที่ใช้ในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก (m^3)

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/m^3)

3.5 การออกแบบระบบช่วยควบคุมด้วยวิธีการปริภูมิสเตต (State-space design)

การออกแบบระบบช่วยควบคุมด้วยวิธีการปริภูมิสเตต คือ การแก้กลุ่มสมการอนุพันธ์เพื่อให้ได้คำตอบที่อยู่แกนปริภูมิสเตต โดยในที่นี้ ปริภูมิสเตตจะหมายถึงการแจกแจงอุณหภูมิภายในผนังเข้า

รับน้ำเหล็ก ซึ่งเมื่อพิจารณาสมการที่ (3.2) ที่เป็นสมการสมดุลพลังงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้เป็นสมการหลักในการคำนวณการแจกแจงอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็ก พบว่าสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปของสมการปริภูมิสเตตได้ดังสมการที่ (3.40) [19]

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.40)$$

$$y = Cx + Du \quad (3.41)$$

เมื่อ A	คือ เมทริกซ์ระบบ (System Matrix) ($n \times n$)
B	คือ เมทริกซ์สัญญาณอินพุต (Input Matrix) ($n \times r$)
C	คือ เมทริกซ์สัญญาณเอาต์พุต (Output Matrix) ($m \times n$)
D	คือ เมทริกซ์สัญญาณป้อนไปข้างหน้า (Feed forward Matrix)
m	คือ จำนวนสัญญาณเอาต์พุต (Number of Output)
n	คือ อันดับของระบบ (System Order)
r	คือ จำนวนสัญญาณอินพุต (Number of Input)

3.5.1 การออกแบบตัวประมาณค่าตัวแปรสเตต (State Estimator Design)

การออกแบบตัวประมาณค่าตัวแปรสเตต คือ การประมาณค่าสเตตต่างๆที่ต้องการทราบค่า แต่จำเป็นที่จะต้องมีความรู้ของแต่ละสเตตเข้ามาในระบบเพื่อใช้ในการประมาณ โดยที่ความเป็นจริงของสภาพการทำงานปัจจุบันมีระดับความซับซ้อน และยากต่อการเก็บข้อมูล จึงมีแนวความคิดวิธีที่จะใช้เพียงแค่สัญญาณข้อมูลบางสเตตที่วัดได้ ร่วมกับข้อมูลอินพุตที่ใส่เข้าไปในระบบ มาประมาณค่าทุกๆ สเตตในปริภูมิใหม่ทั้งหมด (\hat{x}) ซึ่งวิธีนี้เรียกว่าการออกแบบตัวประมาณค่าสเตตแบบอันดับเต็ม (Full-order state estimator) [19]

3.5.1.1 การออกแบบตัวประมาณค่าสเตตแบบอันดับเต็ม (Full-order state estimator)

จากที่ได้กล่าวในท้ายหัวข้อที่ 3.5.1 ว่าการออกแบบตัวประมาณค่าสเตตแบบอันดับเต็มจะใช้สัญญาณจากข้อมูลในปริภูมิสเตตที่สามารถตรวจวัดได้ ร่วมกับข้อมูลอินพุตที่ใส่เข้าไปในระบบปริภูมิก็

จะสามารถประมาณค่าสแตตที่เหลือภายในปริภูมิสแตตได้ใหม่ทั้งหมด (\hat{x}) ซึ่งสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ใหม่ดังสมการที่ (3.42) [19]

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu \quad (3.42)$$

เปรียบเทียบสมการที่ (3.40) และ สมการที่ (3.42) จะพบว่ามีลักษณะคล้ายกัน ซึ่งสามารถใช้งานแทนกันได้ในกรณีดังนี้

1. เมทริกซ์ของ $[A]$ และ $[B]$ เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานของระบบได้เสมือนว่า เป็นระบบการทำงานจริงอย่างจริง

2. เงื่อนไขเริ่มต้นของตัวประมาณค่าตัวแปรสแตต, (\hat{x}) จะต้องเท่ากับ เงื่อนไขเริ่มต้นของตัวแปรสแตต, (x) เช่นเดียวกัน

แต่ในความเป็นจริง การปฏิบัติงานแทบจะเป็นไปไม่ได้ที่จะสามารถจำลองระบบควบคุมได้แม่นยำ เพราะฉะนั้นจำเป็นที่จะต้องใช้ตัวประมาณค่าสแตตที่มีส่วนปรับแก้เข้ามาในสมการ โดยจะเพิ่มในส่วนของความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตระบบสแตต, (y) และเอาต์พุตตัวประมาณค่าสแตต, ($\hat{y} = c\hat{x}$) ดังสมการที่ (3.43)

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu + L(y - c\hat{x}) \quad (3.43)$$

เมื่อ c คือ เมทริกซ์ตำแหน่งของอันดับของปริภูมิสแตตที่ได้จากการตรวจวัด

y คือ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่นำมาใส่ในแบบจำลอง

L คือ อัตราการขยายตัวประมาณค่าสแตต

$$\text{เมื่อ } L = [l_1 \quad l_2 \quad \dots \quad l_n]^T$$

การเลือกอัตราการขยาย L ที่ดี จะส่งผลให้ตัวประมาณค่าตัวแปรสแตต, (\hat{x}) มีค่าเท่ากับ ตัวแปรสแตต, (x) ได้รวดเร็วและมีความเสถียรภาพ

3.5.1.2 ความสังเกตได้ (Observability)

การออกแบบจำนวนของสแตตในปริภูมิจะขึ้นอยู่กับจำนวนสัญญาณข้อมูลบางสแตตที่วัดได้ และ ความสังเกตได้ของระบบ (Observability) หมายความว่า ถ้าจำนวนสัญญาณข้อมูลบางสแตตที่วัดได้มีจำนวนน้อย ก็จะไม่สามารถประมาณค่าในปริภูมิสแตตได้ทั้งหมด เพราะฉะนั้นการแบ่งสแตตในปริภูมิสแตตให้สอดคล้องกับจำนวนสัญญาณข้อมูลบางสแตตที่วัดได้ถือเป็นสิ่งสำคัญ การตรวจสอบคุณสมบัติความสังเกตได้สามารถพิจารณาได้จากเมทริกซ์ดังนี้ [19]

$$\text{Observability matrix} = O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

จากสมการที่ (3.42) กล่าวคือ ระบบปริภูมิสแตตจะมีความสังเกตได้เมื่อมีค่าลำดับชั้น (Rank) ของเมทริกซ์เท่ากับ $n(\text{rank}[O] = n)$ เมื่อ n คืออันดับของระบบปริภูมิสแตต $[A]$

3.5.2 การประยุกต์ใช้สมการสมดุลพลังงานของเข้รับน้ำเหล็กเข้ากับสมการตัวประมาณค่าสแตต

การแก้ปัญหสมการอนุพันธ์สามารถแก้ปัญหได้ด้วยวิธีหลักๆ คือ วิธีการหาผลเฉลยแม่นยำ (Exact Solution) ซึ่งวิธีนี้จะใช้สำหรับการแก้ปัญหที่มีลักษณะอย่างง่ายไม่ซับซ้อน ส่วนอีกวิธีหนึ่งก็คือ วิธีระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ใช้ในการแก้ปัญหที่มีระดับความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยใช้หลักการทางตัวเลข ที่สามารถหาคำตอบได้หลากหลายรูปแบบ เช่น ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference) หรือ ไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element) แต่ในการหาคำตอบของสมการสมดุลพลังงานของเข้รับน้ำเหล็กนี้ จะใช้วิธีที่ชื่อว่า Lump Parameter Model เป็นวิธีที่แบ่งวัตถุที่สนใจออกเป็นก้อนย่อยๆ โดยสมมติฐานขั้นต้นของวิธีนี้ อุณหภูมิภายในก้อนย่อยคงที่ตลอดทั้งก้อนย่อย ซึ่งแต่ละก้อนย่อยสามารถปรับให้อยู่ในรูปแบบปริภูมิสแตต เพื่อนำมาวิเคราะห์หาสภาวะทางความร้อนภายในเข้รับน้ำเหล็ก การแบ่งจำนวนก้อนย่อย หรือ การแบ่งขนาดของก้อนย่อยนั้นจะส่งผลต่อความแม่นยำของการคำนวณ เพราะว่าด้านของวัตถุที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว และรุนแรงควรมีขนาดก้อนย่อยที่เล็ก และ ความถี่ในการแบ่งสูงกว่า ด้านที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อย แต่ถ้าพิจารณาตามภาพรวมของพลังงานที่สะสมภายในวัตถุทั้งก้อนย่อยต่างๆนั้น จะมีค่าถูกต้องเหมือนกัน

การใช้ Lump Parameter Model จะต้องอยู่ในเงื่อนไขที่ว่า ค่า $Bi < 0.1$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ความต้านทานการนำความร้อนเป็นสัดส่วนกับความต้านทานการพาความร้อนแสดงดังสมการที่ (3.44)

$$Bi = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} \quad (3.44)$$

$$\text{โดยที่} \quad R_{cond} = \frac{L}{kA_{cond}} \quad (3.45)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_{conv}} \quad (3.46)$$

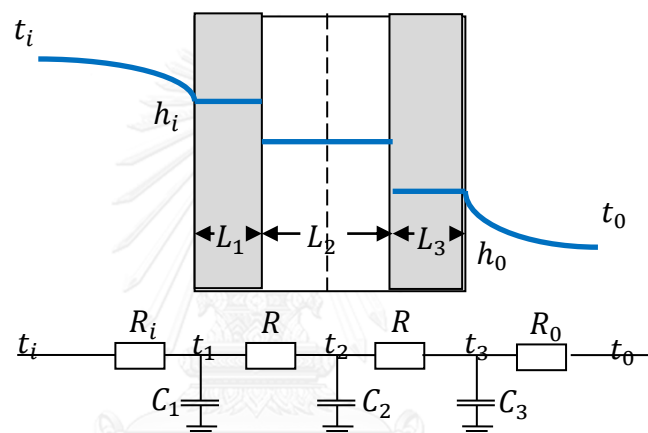
เมื่อ Bi คือ Biot Number

R_{cond} คือ ค่าความต้านทานการนำความร้อน

R_{conv} คือ ค่าความต้านทานการพาความร้อน

L คือ ความยาวของก้อนย่อยที่แบ่ง

จากรูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างการถ่ายเทความร้อนไหลผ่านของวัตถุที่ถูกแบ่งเป็น 3 ก้อนย่อย ด้านซ้ายมือมีค่าอุณหภูมิสูง t_i และด้านขวามือมีค่าอุณหภูมิต่ำกว่า t_o และมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเท่ากับ h_i และ h_o ตามลำดับ โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้กำหนดขึ้นจะต้องมีค่า $Bi < 0.1$ จะสามารถใช้ LUMP Parameter Model ได้



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างการเขียนสมดุลพลังงานของวัตถุที่ถูกแบ่งเป็นก้อนย่อยให้อยู่ในรูปปริภูมิสแตต

ในการพิจารณาสมดุลพลังงานของวัตถุตัวอย่างในรูปที่ 3.11 จะพิจารณาสมดุลพลังงานในด้านที่มีค่าอุณหภูมิสูงกว่าก่อน ตามหลักของพื้นผิวที่มีอุณหภูมิสูงถ่ายเทความร้อนให้กับพื้นผิวที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยสมดุลพลังงานวัตถุก้อนย่อยที่ 1 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.47)

$$\rho c_p L_1 \frac{dt_1}{dt} = h_i(t_i - t_1) - \frac{k}{L_1 + L_2/2} (t_1 - t_2) \quad (3.47)$$

สมดุลพลังงานวัตถุก้อนย่อยที่ 2 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.48)

$$\rho c_p L_2 \frac{dt_2}{dt} = \frac{k}{L_1 + L_2/2} (t_1 - t_2) - \frac{k}{L_2/2 + L_3} (t_2 - t_3) \quad (3.48)$$

สมดุลพลังงานวัตถุก้อนย่อยที่ 3 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3.49)

$$\rho c_p L_3 \frac{dt_3}{dt} = \frac{k}{L_2/2 + L_3} (t_2 - t_3) - h_o(t_3 - t_o) \quad (3.49)$$

จัดรูปแบบสมการที่ (3.47), (3.48) และ (3.49) โดยให้จัดแยกพจน์ของอุณหภูมิให้ชัดเจนดังสมการที่ (3.50), (3.51) และ (3.52)

$$C_1 \frac{dt_1}{dt} = (h_i)t_i - \left(h_i + \frac{k}{L_1+L_2/2}\right)t_1 + \left(\frac{k}{L_1+L_2/2}\right)t_2 \quad (3.50)$$

$$C_2 \frac{dt_2}{dt} = \left(\frac{k}{L_1+L_2/2}\right)t_1 - \left(\frac{k}{L_1+L_2/2} + \frac{k}{L_2/2+L_3}\right)t_2 + \left(\frac{k}{L_2/2+L_3}\right)t_3 \quad (3.51)$$

$$C_3 \frac{dt_3}{dt} = \left(\frac{k}{L_2/2+L_3}\right)t_2 - \left(\frac{k}{L_2/2+L_3} + h_o\right)t_3 + (h_o)t_0 \quad (3.52)$$

เมื่อ $C_1 = \rho c_p L_1$, $C_2 = \rho c_p L_2$ และ $C_3 = \rho c_p L_3$

เมื่อจัดรูปแบบสมการสมดุลพลังงานการถ่ายความร้อนของวัตถุใดๆ ในรูปที่ 3.11 โดยจัดแยกของอุณหภูมิหรือสแตตต่างเรียบริ้อยตามสมการที่ (3.50), (3.51) และ (3.52) จะนำมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบปริภูมิสแตต โดยมีค่าอินพุตเข้าระบบเป็น t_i และ t_o ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{t}_1 \\ \dot{t}_2 \\ \dot{t}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(h_i + \frac{k}{L_1+L_2/2}\right)/C_1 & \left(\frac{k}{L_1+L_2/2}\right)/C_2 & 0 \\ \left(\frac{k}{L_1+L_2/2}\right)/C_1 & -\left(\frac{k}{L_1+L_2/2} + \frac{k}{L_2/2+L_3}\right)/C_2 & \left(\frac{k}{L_2/2+L_3}\right)/C_3 \\ 0 & \left(\frac{k}{L_2/2+L_3}\right)/C_2 & -\left(\frac{k}{L_2/2+L_3} + h_o\right)/C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_i/C_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & h_o/C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_i \\ t_o \end{bmatrix}$$

เมื่อ t_i ถูกเรียกว่า ค่าสภาวะที่ i (สแตตที่ i) เป็นการแทนค่าอุณหภูมิในแต่ละก้อนย่อย

บทที่ 4

การเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อจำลองเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงในงานทางวิศวกรรม ให้สามารถอธิบายให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้ความรู้ทางวิทยาศาสตร์มาประยุกต์ใช้งานร่วมกัน ระดับความยากง่ายของการกำหนดสมการสำหรับการจำลองให้เสมือนการทำงานจริงนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น เงื่อนไขการทำงาน สภาวะแวดล้อมต่างๆ ยุคสมัย ปัจจุบันการทำงานทางวิศวกรรมมีการแข่งขันกันมากยิ่งขึ้น ทำให้การลดต้นทุนกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมเป็นปัจจัยสำคัญ

กระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ก็เป็นอีกหนึ่งอุตสาหกรรมที่มีความต้องการประหยัดต้นทุนการผลิตในเรื่องของการประหยัดพลังงาน ซึ่งการประหยัดพลังงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้นทำได้วิธีการกำหนดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กด้วยการควบคุมพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเตาหลอมหลอมอาร์คไฟฟ้า และการกำหนดอุณหภูมิผิวน้ำเหล็ก ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กจะสอดคล้องกับสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก การเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถจำลองสภาวะทางความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อที่จะกำหนดได้ว่าควรจะเทน้ำเหล็กที่อุณหภูมิเท่าไรถึงจะเหมาะสม

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงโปรแกรมของกัจติศักดิ์ โดยเพิ่มการทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และ เวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ให้สามารถเป็นแนวทางการนำไปปฏิบัติงานจริงได้ เพราะฉะนั้นระบบช่วยควบคุมจะแบ่งโปรแกรมการทำงานออกเป็น 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับการปฏิบัติงานจริง และ โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

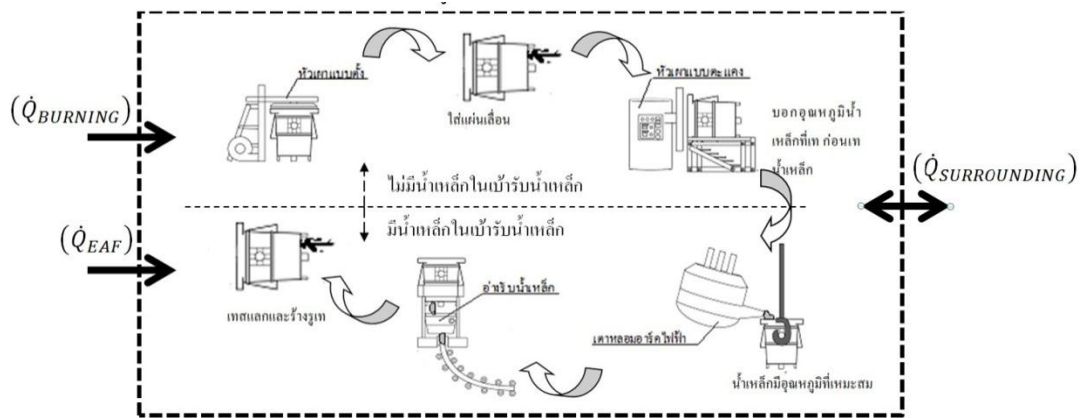
4.1 การวิเคราะห์พลังงานในแต่ละกระบวนการของสถานีการทำงานต่างๆ

กระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เป็นการหลอมเศษเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ได้ผลิตภัณฑ์เป็นเหล็กแท่งยาว(Billet) การทำงานจะต้องผ่านขั้นตอนการผลิตทั้งหมด 5 กระบวนการ กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก, กระบวนการร่อนน้ำเหล็ก หรือช่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็ก, กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก, กระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก และ กระบวนการนำน้ำเหล็กไปเททิ้ง โดยจะมีแหล่งที่พลังงานเข้า-ออกให้กับระบบ 3 ทาง คือ

1. แหล่งพลังงานไฟฟ้าที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนให้กับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (\dot{Q}_{EAF})
2. แหล่งพลังงานความร้อนจากน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ($\dot{Q}_{BURNING}$)

3. พลังงานความร้อนเข้า-ออกระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม ($\dot{Q}_{SURROUNDING}$)

โดยที่ขอบเขตของปริมาตรควบคุมรวมคือ CV. ดังรูปที่ 4.1

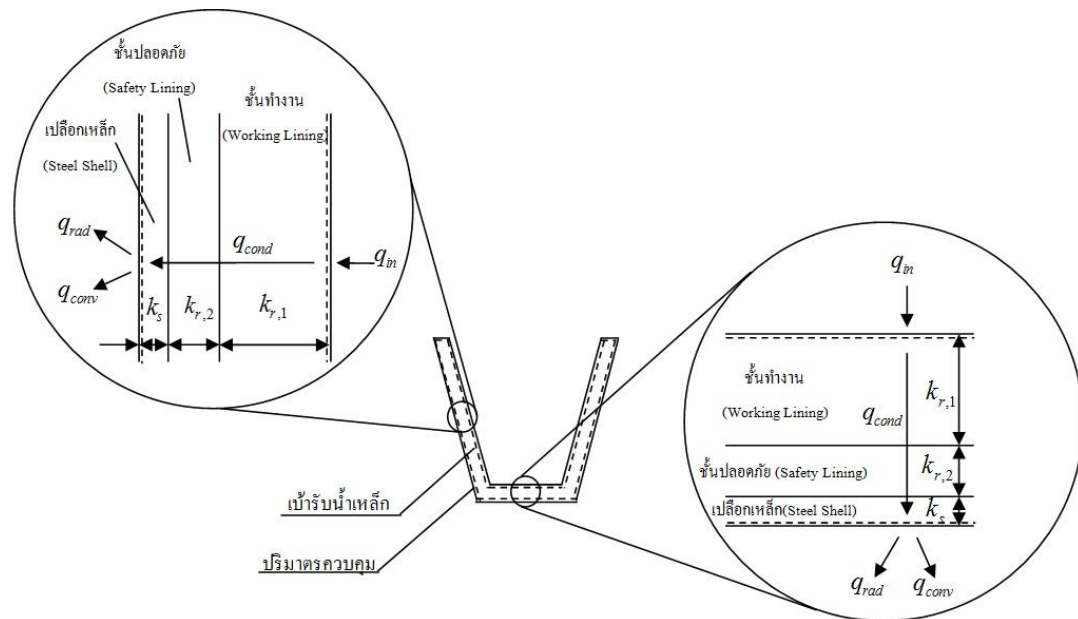


รูปที่ 4.1 วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำงานโดยแสดงค่าความร้อนที่เข้าออกระบบรวมทั้งหมด [5]

การศึกษาวิจัยมุ่งเป้าไปที่การทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กให้เหมาะสมกับสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดกระบวนการผลิต และสามารถนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงได้ วิธีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น จะสามารถลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟาลงได้ โดยมีเงื่อนไขสำคัญที่ว่าน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องมากกว่าเท่ากับ $1,550^{\circ}\text{C}$ จึงจะสามารถผ่านกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องได้

4.2 การนำความร้อนเข้าสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก

เบ้ารับน้ำเหล็กเป็นภาชนะในการรองรับน้ำเหล็กและเคลื่อนย้ายไปยังสถานีการหล่อแบบต่อเนื่อง การนำความร้อนเข้าสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีหลักการพิจารณาดังนี้ 1. เบ้ารับน้ำเหล็กขนย้ายน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิสูง จำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กเสียก่อน เพื่อเป็นการลดความเค้นทางความร้อน และความเสียหายที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก 2. การเพิ่มอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กสูงขึ้น ส่งผลให้สามารถลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กลงได้ หรือ การลดอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กลง จะต้องเพิ่มอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กขึ้นด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุผลทั้ง 2 ข้อที่กล่าวมาข้างต้น จำเป็นจะต้องพิจารณาสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยที่ความร้อนที่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กด้านในได้รับ จะถูกถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนเข้าไปยังตามแนวของชั้นผนังด้านข้าง และด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็กที่สามารถแบ่งการนำความร้อนเข้าผนังได้ 2 ปริมาตรควบคุม ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การถ่ายเทความร้อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กแบ่งตามปริมาตรควบคุม

จากรูปที่ 4.2 พบว่าเบ้ารับน้ำเหล็กถูกแบ่งออกเป็น 2 ปริมาตรควบคุม คือ ปริมาตรควบคุมที่ 1 ตำแหน่งผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก และ ปริมาตรควบคุมที่ 2 ตำแหน่งผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยจะพบว่าถ้ามีการให้ความร้อนแก่เบ้ารับน้ำเหล็ก ความร้อนที่เบ้ารับน้ำเหล็กได้รับจะถ่ายเทความร้อนไปที่ ปริมาตรควบคุมผนังชั้นด้านในสุดของเบ้ารับน้ำเหล็กตรงตำแหน่งผนังด้านข้าง และผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก (q_{in}) ความร้อนที่ผิวผนังเบ้ารับน้ำเหล็กทั้ง 2 ปริมาตรควบคุม จะถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนให้กับอิฐทนไฟ (q_{cond}) ผนังชั้นทำงาน (Working Lining) และความร้อนที่ถูกสะสมไว้ในชั้นทำงาน จะถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อนสู่ผนังชั้นปอดคีย์ (Safety lining) และถ่ายเทการนำความร้อนไปยังผนังเปลือกเหล็ก (Steel shell) ซึ่งเปลือกเหล็กจะถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อน (q_{conv}) และการแผ่รังสีความร้อน (q_{rad}) สำหรับกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กไม่ได้รับความร้อนจากแหล่งงานภายนอกปริมาตรควบคุม พบว่าความร้อนที่ถูกสะสมไว้ที่ผนังจะถูกถ่ายเทความร้อนกลับมายังใจกลางช่องว่างของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยที่สมการที่ใช้ในการแก้ปัญหของการนำความร้อนภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะเป็นไปตามกฎฟูเรียร์ตามสมการที่ (3.1) สำหรับการพาความร้อนจากเปลือกเหล็กออกสู่สิ่งแวดล้อมจะเป็นไปตามกฎการระบายความร้อนของนิวตันตามสมการที่ (3.3) และการแผ่รังสีความร้อนที่ถ่ายเทให้กับสิ่งแวดล้อมเปิดโล่งสู่บรรยากาศ จึงให้พิจารณาบรรยากาศโดยรอบประพุดิตัวเสมอเหมือนเป็นวัตถุดำ หรือก็คือมีค่าอุณหภูมิที่ 35°C ตามสมการที่ (3.13)

ส่วนประเภทของความร้อนที่ผ่านเข้า-ออกปริมาตรควบคุมนั้นจะขึ้นอยู่กับว่าเข้ารับน้ำเหล็กกำลังผ่านไปที่กระบวนการใดของการผลิต โดยที่แต่ละกระบวนการจะมีเงื่อนไขการแลกเปลี่ยนความร้อนที่แตกต่างซึ่งจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แต่ละกระบวนการ

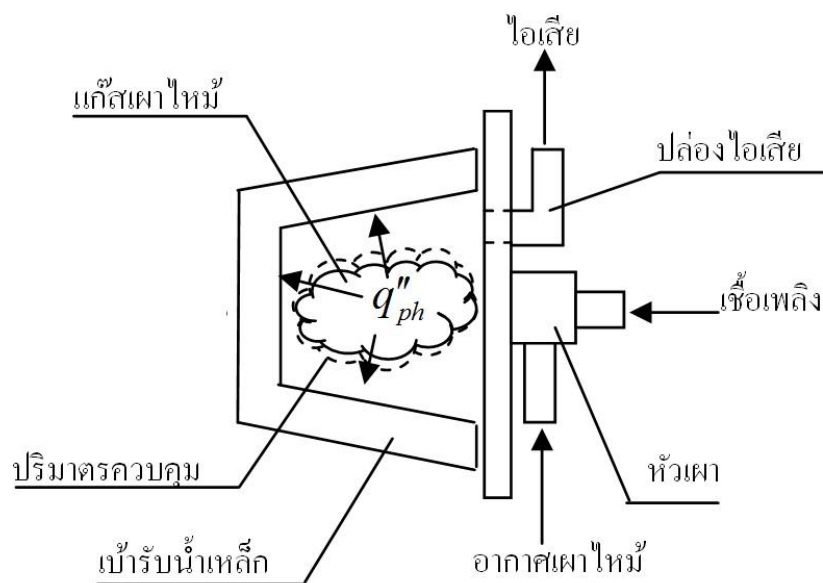
การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาวิเคราะห์หาสภาวะทางความร้อนของเข้ารับน้ำเหล็กตลอดทั้งกระบวนการ คือ การออกแบบแบบจำลองอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กให้ได้ค่าผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการทำงานจริงมากที่สุด เพื่อที่จะสามารถนำแบบจำลองนี้ไปใช้งานได้เสมือนจริง จากการศึกษาของชัชวีสส์ [4] พบว่า โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ชัชวีสส์พัฒนาขึ้น เกิดค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของสภาวะทางความร้อนของเข้ารับน้ำเหล็ก ต่อมากิจติศักดิ์ [5] จึงมีแนวความคิดที่ว่า ควรที่จะปรับลดค่าความคลาดเคลื่อนสะสมของอุณหภูมิภายในเข้ารับน้ำเหล็กที่เกิดขึ้นในโปรแกรมแบบจำลองของชัชวีสส์ ด้วยการนำชุดข้อมูลอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัดจริงมาปรับแก้อุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กใหม่ เนื่องจากวัฏจักรการทำงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า 2 กระบวนการ ที่ไม่มีน้ำเหล็กภายในเข้ารับน้ำเหล็ก และเข้ารับน้ำเหล็กอยู่กับที่ ก็คือ กระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก และกระบวนการช่อมแซมเข้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งเป็นสภาพที่สามารถตรวจวัดอุณหภูมิของเข้ารับน้ำเหล็กได้ค่อนข้างสะดวก จึงได้สังเกตเห็นว่าควรที่จะนำข้อมูลที่ 2 กระบวนการนี้มาใช้ในการปรับปรุงค่าจากการจำลอง เพื่อให้โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตนเองมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น

4.3.1 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก

การอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก คือ การนำเข้ารับน้ำเหล็กเข้าไปประกบเข้ากับชุดอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก ดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าความร้อนที่เข้ารับน้ำเหล็กได้รับจากกระบวนการนี้ คือ ความร้อนจากแก๊สเผาไหม้ที่เกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศ ก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงจะถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังเข้ารับน้ำเหล็กทั้งด้านข้าง และด้านล่างเข้ารับน้ำเหล็ก โดยจากศึกษาการใช้แบบจำลองของ Mohanty และ Satayayut และพบว่าสมมติฐานของแบบจำลองที่ใช้ สามารถนำไปใช้เป็นสมมติฐานได้ คือ

1. รัศมีทรงกระบอกของเข้ารับน้ำเหล็ก มีค่ามากกว่า ความหนาของชั้นผนังเข้ารับน้ำเหล็กถึง 10 เท่า จึงพิจารณาผนังเข้ารับน้ำเหล็กเป็นลักษณะแผ่นราบเรียบ และ การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังเป็นการถ่ายความร้อนใน 1 มิติ

2. การถ่ายเทความร้อนจากก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิสูงมาก จะคิดเฉพาะการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนเท่านั้น ส่วนการถ่ายความร้อนที่ตำแหน่งเปลือกเหล็กด้านนอกที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจะคิดการถ่ายเทความร้อนทั้งการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน
3. กำหนดให้การแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าฟลักซ์การแผ่รังสีที่คงตัวตลอดเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยอนุมานว่าก๊าซไอเสียภายในเบ้ารับน้ำเหล็กผสมเข้ากันอย่างดี



รูปที่ 4.3 กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีก๊าซไอเสียถ่ายเทความร้อนให้กับผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก

จากสมมติฐานข้อที่ 4 พบว่าการแผ่รังสีความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าฟลักซ์ความร้อนของก๊าซไอเสียที่คงที่ (q''_{ph}) สามารถแสดงอยู่ในรูปของสมการที่ (4.1) [5]

$$q''_{ph} = F\sigma(T_{fl}^4 - T_{ladle,inside}^4) \quad (4.1)$$

$$\text{โดย } F = -0.00404 + 1.06182\varepsilon - 0.1839\varepsilon^2$$

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 0.362 - (2.92 \times 10^{-4})T_{fl} + (6.77 \times 10^{-8})T_{fl}^2 \\ & + [0.34 + (2.05 \times 10^{-4})T_{fl} - (1.21 \times 10^{-7})T_{fl}^2]PL \\ & + [(-8.09 \times 10^{-2}) + (5.91 \times 10^{-5})T_{fl} \\ & + (3.84 \times 10^{-7})T_{fl}^2](PL)^2 \end{aligned}$$

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

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

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

เมื่อ T_{fl} คือ อุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ (K)

$T_{ladle,inside}$ คือ อุณหภูมิของผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)

F คือ ตัวประกอบการแผ่รังสีของก๊าซเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (Dimensionless)

ε คือ สภาพการเปล่งรังสีความร้อนของก๊าซเผาไหม้ภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก (Dimensionless)

P คือ แรงดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ (atm)

EA คือ ร้อยละของอากาศส่วนเกินจากการเผาไหม้ (%)

L คือ ระยะรังสีความร้อนเฉลี่ยของก๊าซเผาไหม้ในเบ้ารับน้ำเหล็ก (m)

$V_{T,in}$ คือ ปริมาตรภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^3)

$A_{T,in}$ คือ พื้นที่ผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^2)

จากสมการที่ (4.1) และ รูปภาพประกอบตั้งรูปที่ 4.3 การแผ่รังสีของฟลักซ์ความร้อนที่ได้จากก๊าซไอเสียเผาไหม้ (q''_{ph}) จะถูกถ่ายเทความร้อนเข้ากับผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (q''_{in}) ผ่านปริมาตรควบคุมที่ 1 และที่ 2 เป็นไปตามสมการที่ (4.2) และสมการที่ (4.3)

$$q''_{in} = q''_{ph} \quad (4.2)$$

$$q''_{in} = F\sigma(T_{fl}^4 - T_{ladle,inside}^4) \quad (4.3)$$

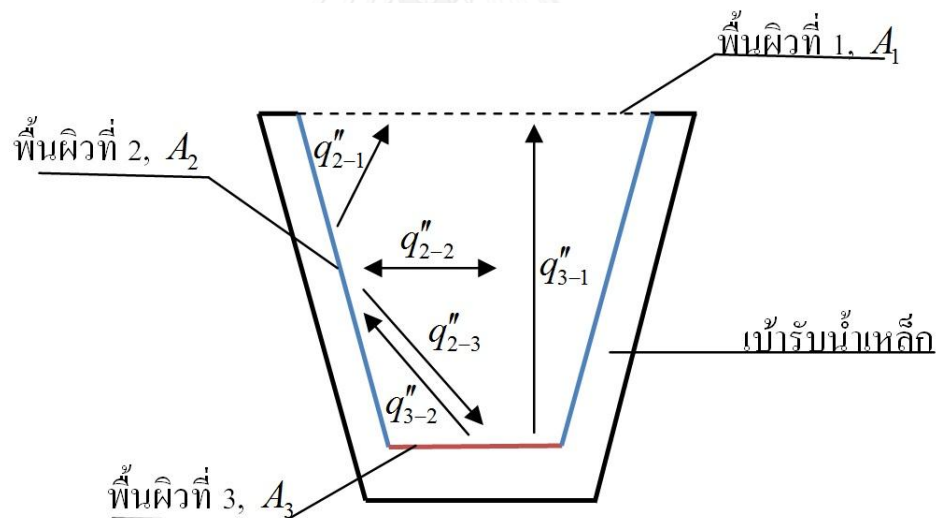
4.3.2 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก

เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเรียบร้อยแล้ว จะมีอุณหภูมิที่ผนังเบ้าสูงเพียงพอที่จะนำเข้าไปรับน้ำเหล็ก โดยเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกเคลื่อนย้ายมายังหลุมเพื่อรอการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ในขณะที่รอการเทน้ำเหล็กอยู่นั้น เบ้ารับน้ำเหล็กที่วางเปล่าและมีอุณหภูมิสูงนั้นจะถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กทั้งด้านในและด้านนอกสู่ชั้นบรรยากาศ การ

แผ่รังสีความร้อนที่เกิดภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก จะเกิดขึ้นระหว่าง 3 พื้นผิวปิด คือผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ด้านข้าง, ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กด้านล่าง และ พื้นผิวที่ปากผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก

ในส่วนของกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กครั้งถัดไป จัดทำขึ้นเพื่อให้เป็นไปตามลักษณะการทำงานที่เกิดขึ้นจริงภายในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งหลายครั้งที่กระบวนการผลิตไม่สามารถดำเนินไปอย่างต่อเนื่องด้วยเหตุผลปัจจัยใดๆก็ตาม พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก เกิดจากการสะสมความร้อนตามชั้นอิฐทนไฟที่จะถ่ายเทความร้อนภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก และปากเบ้ารับน้ำเหล็ก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองสถานะทางความร้อนของกระบวนการรอกาทเทน้ำเหล็ก หรือการซ่อมแซมนั้น จะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนพื้นที่ผิวปิดล้อม 3 ด้านดังรูปที่ 4.4 เบ้ารับน้ำเหล็กที่มีพื้นที่ผิวที่ 1, A_1 คือ พื้นผิวดำแหน่งปากเบ้ารับน้ำเหล็ก, พื้นที่ผิวที่ 2, A_2 คือ พื้นผิวดำแหน่งผนังข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก และพื้นที่ผิวที่ 3, A_3 คือ พื้นผิวดำแหน่งผนังก้นของเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 4.4 การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า

รูปแบบการแผ่รังสีความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก พิจารณาพื้นที่ผิวที่ 2, A_2 พบว่าผนังเบ้ารับน้ำเหล็กแผ่รังสีความร้อนให้กับพื้นที่ผิวที่ 1 ออกสู่ชั้นบรรยากาศ, พื้นที่ผิวที่ 2 เป็นแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนให้กับผนังข้างฝั่งตรงกันข้าม และ พื้นที่ผิวที่ 3 ตามลำดับ เช่นเดียวกันกับการพิจารณาพื้นที่ผิวที่ 3 พบว่าผนังเบ้ารับน้ำเหล็กแผ่รังสีความร้อนออกสู่ชั้นบรรยากาศที่ตำแหน่งพื้นที่ผิวที่ 1, และแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งกันและกันกับพื้นที่ผิวที่ 3 ซึ่งใช้สมมติฐานดังต่อไปนี้ [5]

1. อุณหภูมิของแต่ละพื้นที่ปิดล้อม มีค่าสม่ำเสมอตลอดพื้นที่
2. พื้นผิวที่ 1 กระทบติตัวเป็นวัตถุดำเนื่องจากเปิดออกสู่อวกาศ
3. พื้นผิวที่ 2 และ พื้นผิวที่ 3 กระทบติตัวเป็นพื้นผิววัตถุเทาที่มีอุณหภูมิต่างกัน
4. พื้นผิวที่ 1, พื้นผิวที่ 2 และ พื้นผิวที่ 3 มีพื้นที่เป็น A_1, A_2 และ A_3 ตามลำดับ

ปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปของพื้นผิวที่ 2 และพื้นผิวที่ 3 ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวทั้งสอง ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากการใช้สมการที่ (3.28) ดังต่อไปนี้

$$q_k = \frac{(\sigma T_k^4 - q_{0,k})}{1 - \varepsilon_k / A_k \varepsilon_k} \quad (3.38)$$

สมการความร้อนสำหรับพื้นผิวที่ 2 และพื้นผิวที่ 3 ตามลำดับ

$$q_2 = \frac{(\sigma T_2^4 - q_{0,2})}{1 - \varepsilon_2 / A_2 \varepsilon_2} \quad (4.4)$$

$$q_3 = \frac{(\sigma T_3^4 - q_{0,3})}{1 - \varepsilon_3 / A_3 \varepsilon_3} \quad (4.5)$$

จากสมการที่ (4.4) และสมการที่ (4.5) จะพบว่า $q_{0,2}$ และ $q_{0,3}$ คือตัวแปรที่ไม่ทราบค่า โดยสามารถใช้สมการตัวช่วยจากสมการที่ (3.38) ได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{(E_{b,k} - q_{0,k})}{(1 - \varepsilon_k) / \varepsilon_k A_k} = \sum_{j=1}^N \frac{(q_{0,k} - q_{0,j})}{1 / F_{k \rightarrow j} A_k} \quad (3.38)$$

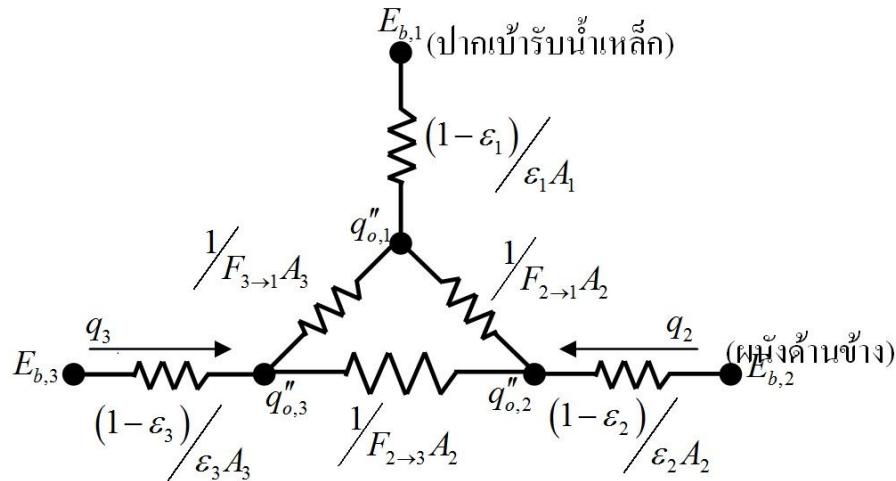
สมการช่วยที่ใช้สำหรับการหา $q_{0,2}'$ และ $q_{0,3}'$

$$\frac{E_{b,1} - q_{0,1}}{1 - \varepsilon_1 / A_1 \varepsilon_1} = \frac{q_{0,1} - q_{0,1}}{1 / F_{1 \rightarrow 1} A_1} + \frac{q_{0,1} - q_{0,2}}{1 / F_{1 \rightarrow 2} A_1} + \frac{q_{0,1} - q_{0,3}}{1 / F_{1 \rightarrow 3} A_1} \quad (4.6)$$

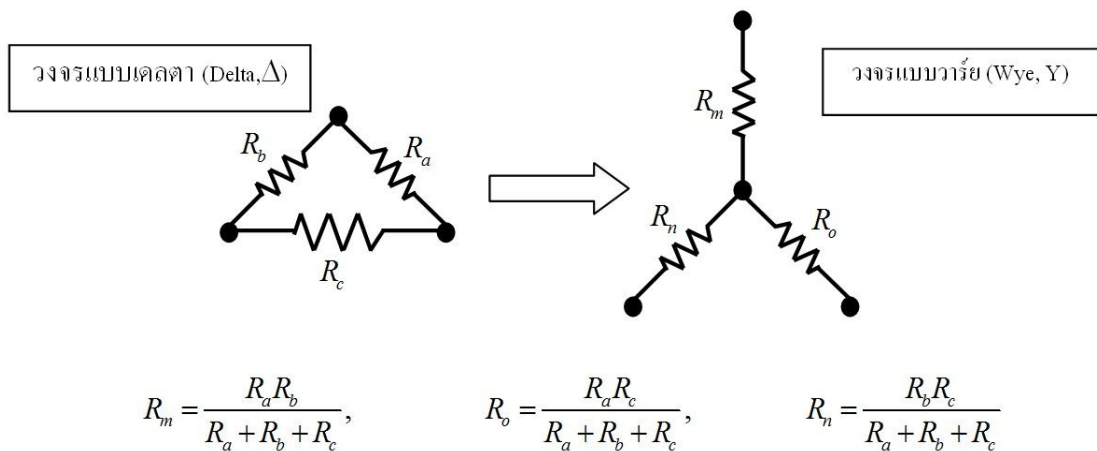
$$\frac{E_{b,2} - q_{0,2}}{1 - \varepsilon_2 / A_2 \varepsilon_2} = \frac{q_{0,2} - q_{0,1}}{1 / F_{2 \rightarrow 1} A_2} + \frac{q_{0,2} - q_{0,2}}{1 / F_{2 \rightarrow 2} A_2} + \frac{q_{0,2} - q_{0,3}}{1 / F_{2 \rightarrow 3} A_2} \quad (4.7)$$

$$\frac{E_{b,3} - q_{0,3}}{1 - \varepsilon_3 / A_3 \varepsilon_3} = \frac{q_{0,3} - q_{0,1}}{1 / F_{3 \rightarrow 1} A_3} + \frac{q_{0,3} - q_{0,2}}{1 / F_{3 \rightarrow 2} A_3} + \frac{q_{0,3} - q_{0,3}}{1 / F_{3 \rightarrow 3} A_3} \quad (4.8)$$

สามารถเขียนสมการที่ (4.6-4.8) ใหม่ให้อยู่ในรูปของวงจรต้านทานความร้อนของผนังเข้ารับน้ำเหล็กดังรูปที่ 4.5 เป็นลักษณะวงจรเดลตา (Delta, Δ) แต่เพื่อให้สามารถคำนวณได้สะดวกมากขึ้น จึงเปลี่ยนเป็นวงจรแบบวาร์ย (Wye, Y) ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.5 วงจรต้านทานการแผ่รังสีความร้อนของผนังเข้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนรูปแบบวงจรเดลตาเป็นวงจรวาร์ย

เพื่อให้สะดวกในการคำนวณจึงกำหนดตัวแปรจากลักษณะของวงจรดังรูปที่ 4.5 ใหม่ตามตารางที่ 4.1 และ สามารถเขียนวงจรต้านทานรังสีความร้อนใหม่ได้ดังรูปที่ 4.7

โดยที่ $R_I = \frac{R_{31}R_{21}}{R_{31}+R_{21}+R_{23}}$ $R_{II} = \frac{R_{21}R_{23}}{R_{31}+R_{21}+R_{23}}$ และ $R_{III} = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{31}+R_{21}+R_{23}}$

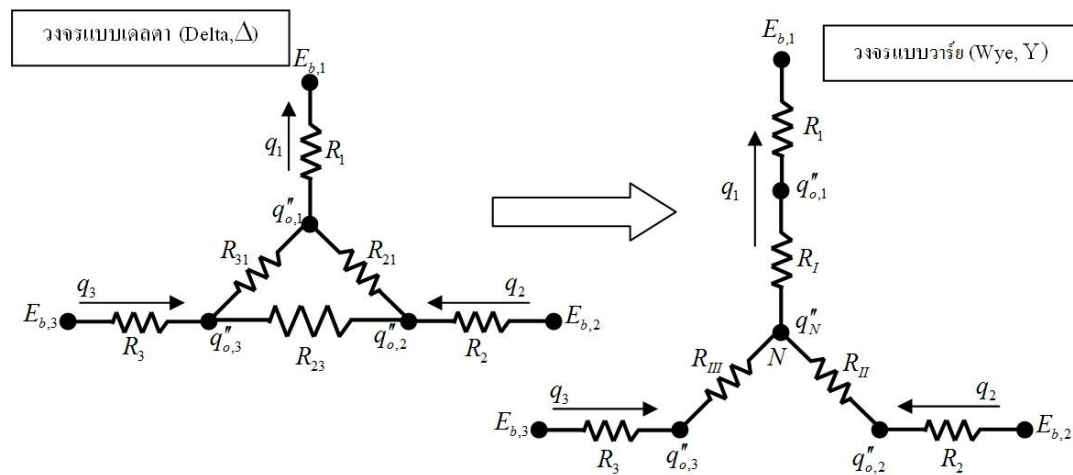
พิจารณารูปที่ 4.7 จะพบว่า ลักษณะวงจรแบบวาร์ยมีจุดเชื่อมต่อใหม่ก็คือจุดต่อ N การคำนวณค่ารังสีฟลักซ์ความร้อนที่ผ่านเข้าออกจุดต่อ N นั้น จะสามารถคำนวณปริมาณความร้อนที่ออกจากพื้นผิวที่ 2 และ พื้นผิวที่ 3 ตามสมการที่ (4.9) และ (4.10)

$$q_2 = \frac{(\sigma T_2^4 - q_N'')}{R_2 + R_{II}} \quad (4.9)$$

$$q_3 = \frac{(\sigma T_3^4 - q_N'')}{R_3 + R_{III}} \quad (4.10)$$

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวต้านทานทางความร้อนที่ถูกกำหนดขึ้นมาใหม่ [5]

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}	$1 / F_{3 \rightarrow 1} A_3$



รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนวงจรต้านทานการแผ่รังสีความร้อนจากวงจรแบบเดลตาเป็นวงจรแบบวาร์ยโดยกำหนดรูปแบบตัวแปรใหม่

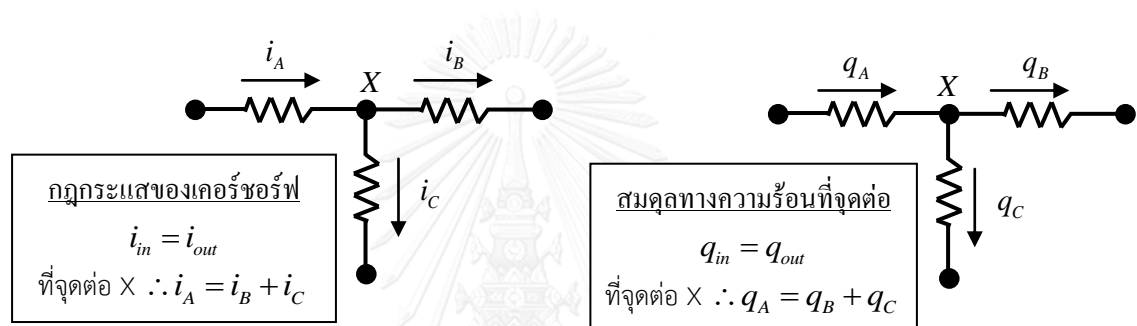
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าจุดรวม N เป็นจุดที่มีค่ารังสีฟลักซ์ความร้อนเข้าออก ซึ่งจะสามารถคำนวณค่าฟลักซ์ความร้อนดังกล่าวได้จากกฎกระแสของเคอร์ชอร์ฟ (Kirchhoff's Current Law: KCL) กล่าวคือกระแสที่ผ่านเข้าและออกที่ตำแหน่งใดๆ จะมีค่าเท่ากัน จึงสามารถนำกฎนี้มา

ประยุกต์ใช้ร่วมกับวงจรต้านทานรังสีความร้อนของรูปที่ 4.8 กฎกระแสของเคอร์ชอร์ฟและการประยุกต์ใช้งานแสดงอยู่ในสมการที่ (4.11) และ (4.12)

$$q_1 = q_2 + q_3 \quad (4.11)$$

$$\frac{(\sigma T_1^4 - q_N'')}{R_1 + R_I} = \frac{(\sigma T_2^4 - q_N'')}{R_2 + R_{II}} + \frac{(\sigma T_3^4 - q_N'')}{R_3 + R_{III}} \quad (4.12)$$

การทราบคุณสมบัติทางความร้อนของพื้นผิวผนังเข้ารับน้ำเหล็ก และอุณหภูมิของพื้นผิวต่างๆ จะสามารถคำนวณหาฟลักซ์ที่จุด N โดยการคำนวณจากสมการที่ (4.12) และคำนวณหาพลังงานความร้อนที่เข้า-ออก พื้นผิวที่ 2 และ พื้นผิวที่ 3 ได้



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบกฎกระแสของเคอร์ชอร์ฟและสมดุลทางความร้อนที่จุดรอยต่อ

4.3.3 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก

แบบจำลองความร้อนในกระบวนการนี้ จะประกอบไปด้วยเข้ารับน้ำเหล็กที่มีน้ำเหล็กที่ขนย้ายน้ำเหล็กมาเติมถึงเข้ารับน้ำเหล็ก ส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้า-ออก ผนังเข้ารับน้ำเหล็กได้จากการถ่ายของความร้อนของน้ำเหล็กที่อุณหภูมิสูง โดยจะแบ่งการพิจารณาตามปริมาตรควบคุม

พิจารณาตามปริมาตรควบคุมที่ 1

น้ำเหล็กมีการสูญเสียความร้อนให้กับผนังเข้ารับน้ำเหล็ก และสูญเสียความร้อนให้กับสแลกที่ปกคลุมอยู่ด้านบน และสแลกจะถ่ายเทความร้อนให้กับบรรยากาศอีกทีหนึ่ง

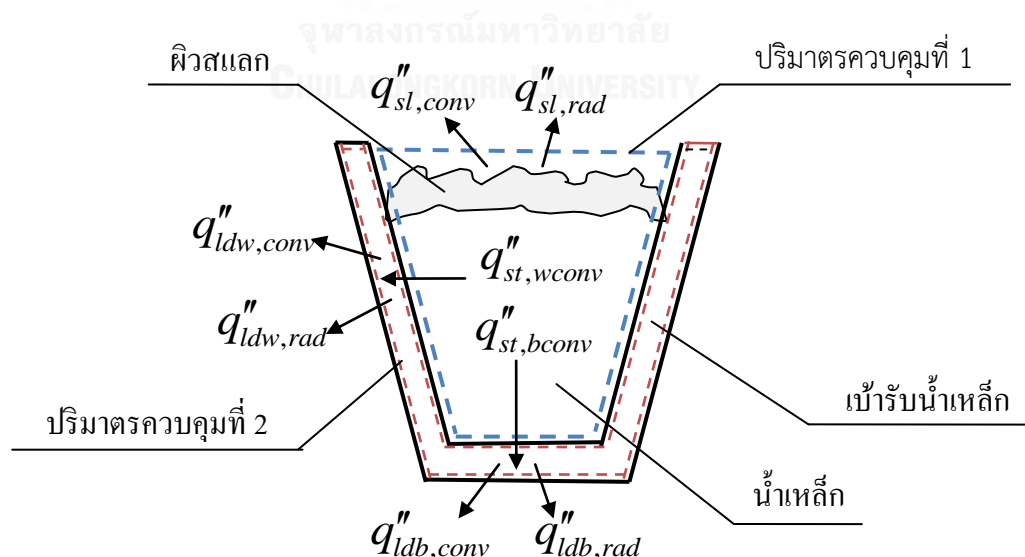
พิจารณาตามปริมาตรควบคุมที่ 2

เข้ารับน้ำเหล็กได้รับความร้อนจากการถ่ายเทความร้อนของน้ำเหล็กทั้งด้านข้างและด้านล่างเข้าผนังเข้ารับน้ำเหล็ก แต่ในขณะที่ผนังเข้ารับน้ำเหล็กด้านในได้รับความร้อนอยู่นั้น ก็จะมีการนำความร้อนจากผนังเข้ารับน้ำเหล็กด้านในออกไปสู่ผนังเข้ารับน้ำเหล็กด้านนอกด้วย และจะสูญเสียความร้อนความร้อนให้กับบรรยากาศ

จากการพิจารณาตามปริมาณควบคุม จะสังเกตเห็นได้ว่า อุณหภูมิของน้ำเหล็กจะสอดคล้องกับอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดการคำนวณ ดังนั้นการการทำนายอุณหภูมิในการเทน้ำเหล็กให้พอดี และเหมาะสมกับความร้อนที่จะต้องสูญเสียไปกับเบ้ารับน้ำเหล็ก จะทำให้ระบบสามารถประหยัดพลังงานความร้อนสูญเสียได้ เพราะฉะนั้นจึงเป็นต้องกำหนดสมมติฐานของแบบจำลอง [5] ให้เหมาะกับกระบวนการดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิเทน้ำเหล็ก (Tapping Temperature) เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเหล็กที่อยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็ก
2. อุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการขนถ่ายมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาณน้ำเหล็ก
3. ผิวของผนังและก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำเหล็กระหว่างการขนถ่ายตลอด
4. การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนออกจากน้ำเหล็กจะต้องผ่านผิวสแลกที่ปกคลุมเหนือหน้าเหล็กซึ่งผิวสแลกมีอุณหภูมิที่แตกต่างจากอุณหภูมิน้ำเหล็ก

แบบจำลองความร้อนระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนรูปแบบการถ่ายเทความร้อนของทั้ง 2 ปริมาตรควบคุมได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ปริมาตรควบคุมของการออกแบบแบบจำลองและการถ่ายเทความร้อนระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็ก [5]

จากรูปที่ 4.9 จะสามารถเขียนสมดุลพลังงานความร้อนที่เข้า-ออกของปริมาตรควบคุมที่ 1 และ ปริมาตรควบคุมที่ 2 ได้ดังต่อไปนี้

ส่วนปริมาตรควบคุมที่ 1 คือ ส่วนของน้ำเหล็ก และ สแลกภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะแสดงอยู่ในรูปการสูญเสียความร้อนออกจากปริมาตรควบคุมที่ 1 ได้ดังสมการที่ (4.13) [5]

$$m_{st}c_{p,st} \frac{dT_{st}}{dt} = -(q_{st,bconv}''A_{ld,b} + q_{st,wconv}''A_{ld,w} + q_{sl,conv}''A_{sl} + q_{sl,rad}''A_{sl}) \quad (4.13)$$

เมื่อ m_{st} คือ มวลของน้ำเหล็ก (kg)

$c_{p,st}$ คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำเหล็ก (J/kgK)

ΔT_{st} คือ ผลต่างของอุณหภูมิน้ำเหล็กในแต่ละสถานะ (K)

$q_{st,bconv}''$ คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กด้วยการพาความร้อนจากน้ำเหล็กไปยังก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (W/m^2)

$A_{ld,b}$ คือ พื้นที่ก้นของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^2)

$q_{st,wconv}''$ คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กด้วยการพาความร้อนจากน้ำเหล็กไปยังผิวข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก (W/m^2)

$A_{ld,w}$ คือ พื้นที่ผิวข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก (m^2)

$q_{sl,conv}''$ คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กผ่านทางผิวสแลกด้วยการพาความร้อนจากสแลก (W/m^2)

$q_{sl,rad}''$ คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กผ่านทางผิวสแลกด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากสแลก (W/m^2)

A_{sl} คือ พื้นที่ผิวสแลก (m^2)

ส่วนปริมาตรควบคุมที่ 2 คือ ส่วนของเบ้ารับน้ำเหล็ก จะแสดงอยู่ในรูปการรับความร้อนมาจากการถ่ายเทความร้อนของน้ำเหล็ก และ การสูญเสียความร้อนออกจากปริมาตรควบคุมที่ 2 สู่บรรยากาศได้ดังสมการที่ (4.14) [5]

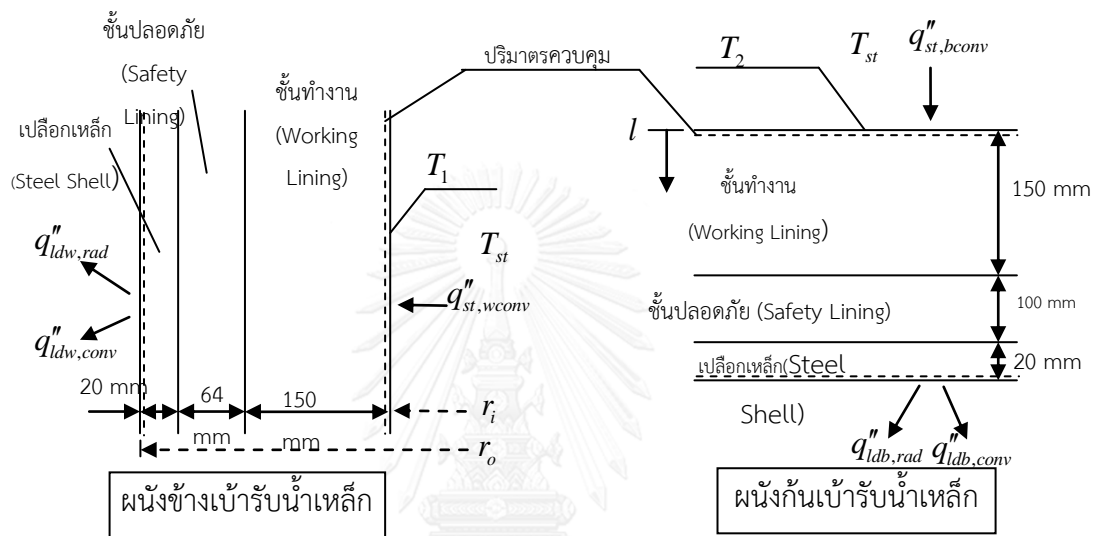
$$q_{st,iconv}'' = h_{st-ld}(T_i - T_{st}) \quad (4.14)$$

เมื่อ i คือ ดัชนีแทนปริมาตรควบคุมที่ 2 ของผนังข้าง และ ผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก

$$h_{st-lb} \text{ คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากน้ำเหล็กเข้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก}$$

$$W/m^2K$$

การถ่ายเทความร้อนผ่านเข้า-ออกปริมาตรควบคุมที่ 2 (ผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก) โดยการผ่านแต่ระดับชั้นของผนังอิฐทนไฟสามารถแสดงดังรูปที่ 4.10



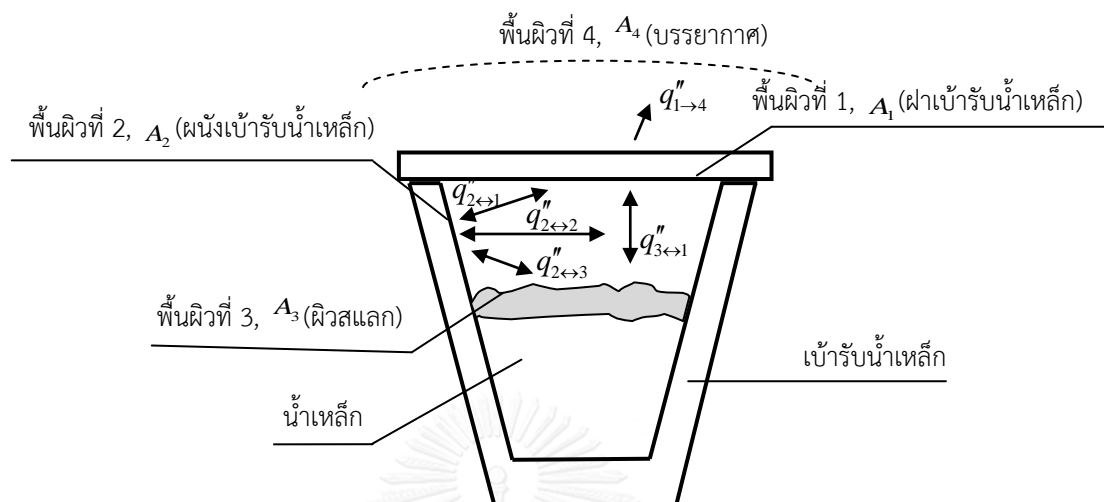
รูปที่ 4.10 การถ่ายเทความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมในผนังข้างและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก

4.3.4 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

การทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่กระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก จะมีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับกระบวนการที่กล่าวมาในหัวข้อย่อยที่ 4.4.3 แต่จะมีความแตกต่างตรงที่ กระบวนการนี้ จำเป็นที่จะต้องคิดมวลน้ำหนักที่ลดระดับลงตลอดระยะเวลาการเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก (Tundish) ซึ่งการที่ระดับน้ำเหล็กลดลงจะส่งผลต่อการถ่ายความร้อนเข้าสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในลำดับชั้นเบ้ารับน้ำเหล็กต่างๆ และจะส่งผลต่อการสูญเสียความร้อนชั้นผิวสแลกเช่นกัน กล่าวคือ เมื่อระดับน้ำเหล็กลดลงจะส่งผลให้พื้นที่ผิวการแลกเปลี่ยนความร้อนของชั้นสแลกลดลงไปด้วย

สำหรับส่วนของการถ่ายเทความร้อนในพื้นที่ผิวปิดที่อยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก จะมีลักษณะการคล้ายคลึงกับหัวข้อย่อยที่ 4.3.2 แต่มีความต่างกันตรงที่พื้นที่ผิวที่ 3 ของกระบวนการนี้มีชั้นของสแลกปกคลุมอยู่ และในการทำงานจริงเพื่อลดการสูญเสียความร้อนออกสู่ชั้นบรรยากาศทาง

โรงงานผลิตจะนำแผ่นกันความร้อนมาปิดที่ตำแหน่งปากเข้ารับน้ำเหล็ก เพราะฉะนั้นการเขียนแบบจำลองจะพิจารณาพื้นผิวที่ 1 ใหม่เป็นเกาะกำบังรังสี แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเข้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเข้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่มีฝาปิดระหว่างกระบวนการ [5]

สมมติฐานที่ใช้ในการเขียนแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการมีดังต่อไปนี้ [5]

1. อุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเข้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งปริมาตรน้ำเหล็ก
2. ผิวของผนังข้างและผนังก้นภายในเข้ารับน้ำเหล็กซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเกิดการพาความร้อนจากน้ำเหล็กเข้าสู่เข้ารับน้ำเหล็ก
3. การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนออกจากน้ำเหล็กจะต้องผ่านผิวสแลกที่ปกคลุมเหนือน้ำเหล็กซึ่งผิวสแลกมีอุณหภูมิที่แตกต่างจากอุณหภูมิน้ำเหล็ก
4. พื้นผิวในพื้นที่ปิดล้อมดังรูปที่ 4.11 แต่ละพื้นผิวมีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว
5. พื้นผิวในพื้นที่ปิดล้อมดังรูปที่ 4.11 ทั้ง 3 พื้นผิวมีการประพฤติตัวเป็นวัตถุเทา
6. พื้นผิวที่ 1 ใน ซึ่ง เป็นฝาเข้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นดั่งเกราะกำบังรังสี ที่มีค่า Emissivity ในแต่ละด้านของพื้นผิวไม่เท่ากัน

7. พื้นผิวที่ 4 ในรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นบรรยากาศโดยรอบประพุดตัวเป็นวัตถุดำที่อุณหภูมิบรรยากาศ

ในขณะที่น้ำเหล็กในเข้รับน้ำเหล็กเทลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กนั้น ระดับน้ำเหล็กภายในเข้รับน้ำเหล็กจะลดลงด้วย จึงเลือกใช้การจำแนกระดับความสูงน้ำเหล็กตามกิจตศักดิ์ รำไพรุจิพงษ์ [5] คือที่ระยะเวลาร้อยละ 50 ช่วยแรกของเวลาในกระบวนการนี้ทั้งหมด จะมีระดับน้ำเหล็กสูงกว่ากึ่งกลางของเข้รับน้ำเหล็ก ส่วนเวลาที่เหลือจะเป็นการคำนวณของน้ำเหล็กที่อยู่ต่ำกว่าระดับกึ่งกลางเข้รับน้ำเหล็กลงไป ซึ่งจะสามารถกำหนดการเขียนแบบจำลองความร้อนที่สูญเสียออกจากน้ำเหล็ก เพื่อถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เข้รับน้ำเหล็กได้ตามสมการที่ (4.15), (4.16), (4.17) และ (4.18)

$$q''_{in,w} = h_{st-l_d}(T_w(x) - T_{st}) \quad , x = r_i \quad , t \leq 50\% t_{teem} \quad (4.15)$$

$$q''_{in,b} = h_{st-l_d}(T_b(x) - T_{st}) \quad , l = 0 \quad , t \leq 50\% t_{teem} \quad (4.16)$$

$$q''_{out,w} = q_2 \quad , x = r_i \quad , t > 50\% t_{teem} \quad (4.17)$$

$$q''_{in,b} = h_{st-l_d}(T_b(l) - T_{st}) \quad , l = 0 \quad , t > 50\% t_{teem} \quad (4.18)$$

เมื่อ t_{teem} คือ เวลาในกระบวนการเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก (min)

การเขียนแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน-นอกที่เกิดขึ้นภายในพื้นผิวปิดแสดงดังรูปที่ 4.12 พื้นผิวที่ 1 คือ ปากเข้รับน้ำเหล็กที่มีเกาะกำบังรังสีมาปิดกัน, พื้นผิวที่ 2 คือ ผนังด้านในผิวเข้รับน้ำเหล็ก, พื้นผิวที่ 3 คือ ชั้นผิวสแลก และ พื้นผิวที่ 4 บรรยากาศภายในนอกประพุดตัวเป็นวัตถุดำ ซึ่งสามารถเขียนสมการการคำนวณได้โดยการประยุกต์สมการที่ (3.38) เป็นสมการดังต่อไปนี้

พื้นผิวที่ 1 ด้านในเข้รับน้ำเหล็ก

$$\frac{(E_{b,k} - q''_{o,k})}{(1-\varepsilon_k)/\varepsilon_k A_k} = \sum_{j=1}^N \frac{(q''_{o,k} - q''_{o,j})}{1/F_{k \rightarrow j} A_k} \quad (3.38)$$

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

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

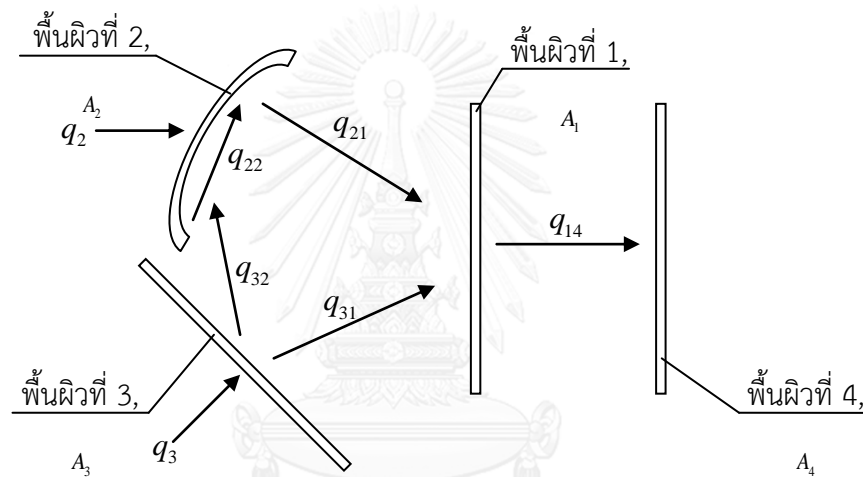
$$\frac{E_{b,3}-q_{0,3}}{1-\varepsilon_3/A_3\varepsilon_3} = \frac{q_{0,3}-q_{0,1}}{1/F_{3\rightarrow 1}A_3} + \frac{q_{0,3}-q_{0,2}}{1/F_{3\rightarrow 2}A_3} + \frac{q_{0,3}-q_{0,3}}{1/F_{3\rightarrow 3}A_3} \quad (4.21)$$

พื้นผิวที่ 1 ด้านนอกเข้ารับน้ำเหล็ก

$$\frac{(E_{b,1}-q_{o,1o})}{(1-\varepsilon_{1o})/\varepsilon_{1o}A_1} = \frac{(q_{o,4}-E_{b,4})}{(1-\varepsilon_4)/\varepsilon_4A_4} = \frac{(q_{o,1o}-q_{o,4})}{1/F_{1o\rightarrow 4}A_1} \quad (4.22)$$

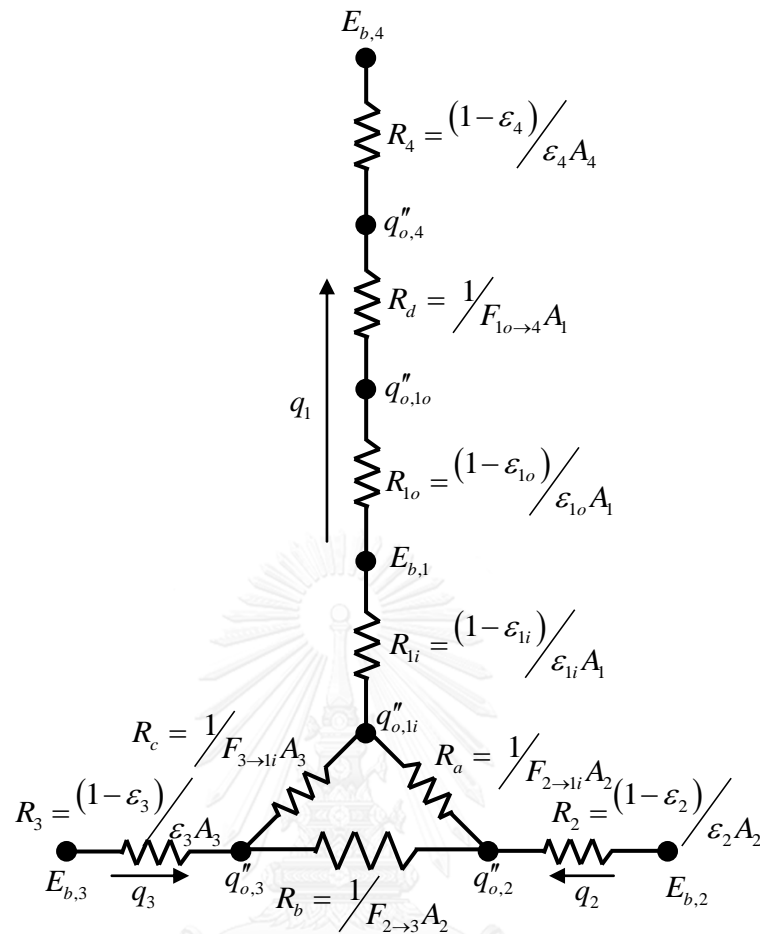
เมื่อ li คือ พื้นผิวที่ 1 ด้านที่หันเข้าหาเข้ารับน้ำเหล็ก

lo คือ พื้นผิวที่ 1 ด้านที่หันออกสู่บรรยากาศภายนอก



รูปที่ 4.12 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนอย่างง่ายภายในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเข้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก [5]

เมื่อนำสมการที่ (4.19), (4.20), (4.21) และ (4.22) มาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปแผนภาพวงจรความต้านทานความร้อนได้ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นวงจรความต้านทานความร้อนรูปแบบเดลต้า เพื่อให้คำนวณสะดวกขึ้นจะสามารถเปลี่ยนเป็นวงจรแบบวาร์ยตามหัวข้อย่อย 4.4.2 ได้



รูปที่ 4.13 วงจรต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเข้ารับน้ำเหล็ก
เหล็กหล่อสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

4.3.5 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการนำสแลกไปเททิ้ง และการซ่อมแซมเข้ารับน้ำเหล็กเหล็ก

เข้ารับน้ำเหล็กที่เสร็จสิ้นจากกระบวนการเทน้ำเหล็กหล่อสู่อ่างรับน้ำเหล็กแล้ว ภายในบ่้าจะเหลือเศษน้ำเหล็กเหล็กน้อย และสแลก ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนที่มีอยู่ในน้ำเหล็ก และ สแลก ได้ จะพิจารณาเป็นการถ่ายเทความร้อนในผิวปิดที่มีสแลกปกคลุมอยู่ จะถูกแบ่งออกเป็น 3 พื้นผิว ดังนี้ พื้นผิวที่ 1 เป็นปากเข้ารับน้ำเหล็ก, พื้นผิวที่ 2 เป็น ผนังภายในเข้ารับน้ำเหล็กทั้ง 2 ด้าน และ พื้นผิวที่ 3 คือพื้นผิวที่มีสแลกปกคลุม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สามารถใช้ได้ตามสมการที่ (4.6), (4.7) และ (4.8) ในส่วนของการสูญเสียความร้อนของน้ำเหล็กนั้นใช้สมการที่ (4.13) และ เพื่อให้สะดวกแก่การทำงาน จึงจะรวมกระบวนการซ่อมแซมเข้ารับน้ำเหล็กเข้าไปด้วย

4.4 การออกแบบตัวประมาณค่าสภาวะ

4.4.1 การเขียนระบบในรูปปริภูมิสแตต

จากการศึกษาเรื่องการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกิจตศักดิ์ รำไพโรจน์พงศ์ [5] การทำนายอุณหภูมิในการเทน้ำเหล็กให้มีความถูกต้อง และแม่นยำ จำเป็นต้องทราบข้อมูลสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก ด้วยการเขียนสมการสมดุลพลังงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เป็นสมการอนุพันธ์, สมการที่(3.2), ให้อยู่ในรูปแบบของปริภูมิสแตต โดยพบว่าการแบ่งอิฐทนไฟออกเป็นก้อนย่อยจะช่วยให้สามารถประมาณค่าสภาวะทางความร้อนได้แม่นยำมากขึ้น

1. หลักในการพิจารณาการแบ่งขนาดก้อนย่อยของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่อิฐทนไฟที่มีผลกระทบกับความร้อนมากที่สุด ยกตัวอย่างเช่น ผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กที่สัมผัสกับน้ำเหล็กโดยตรงจะได้รับปริมาณการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กมากที่สุด และเมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กอยู่ในกระบวนการที่ไม่มีน้ำเหล็กภายในเบ้า ก็จะมีแนวโน้มในการแลกเปลี่ยนความร้อนเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุผลนี้กิจตศักดิ์ รำไพโรจน์พงศ์ [5] จึงแบ่งก้อนย่อยของอิฐทนไฟด้านสัมผัสน้ำเหล็กโดยตรงให้มีขนาดเล็กกว่าด้านอื่น เพราะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่สูงกว่า ในส่วนของผนังอิฐทนไฟด้านที่สัมผัสกับถังเบ้ารับน้ำเหล็กด้านนอกนั้นจะถูกแบ่งก้อนให้มีขนาดใหญ่ เพราะมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับบรรยากาศภายนอก

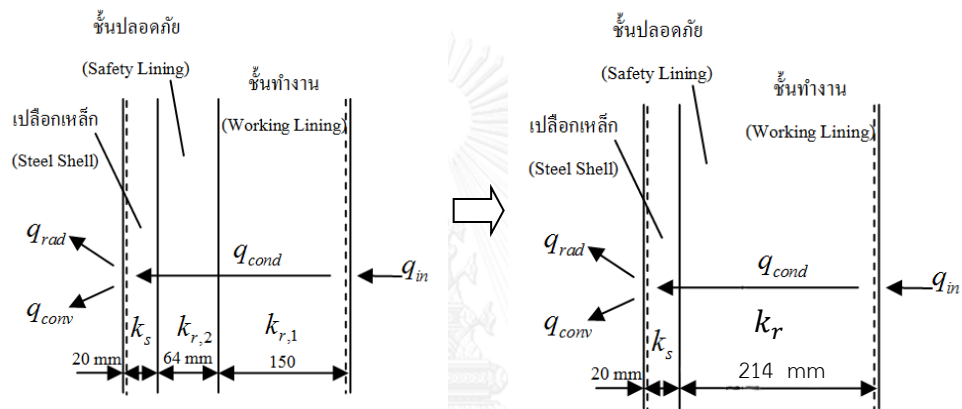
2. หลักในการพิจารณาการแบ่งจำนวนก้อนย่อยของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก จะขึ้นอยู่กับเรื่องของ ความสังเกตได้ (Observability) (หรือ $rank[observability] = n$) ด้วยวิธีการกำหนดค่าสภาวะใดๆเข้าไปในระบบในรูปปริภูมิสแตต (อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัด) และระบบสามารถสังเกตสภาวะอื่นๆภายในระบบได้ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องพิจารณาเรื่องของการแบ่งก้อนย่อยของเบ้ารับน้ำเหล็ก และ ความสังเกตได้ไปพร้อมกัน

3. กำหนดขนาดก้อนย่อยของเบ้ารับน้ำเหล็ก จากรูปที่ 4.14 คือแบบสมมติฐานของผนังด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็กมีความหนา 0.214 เมตร ไม่รวมผนังเปลือกเหล็กชั้นนอก ส่วนรูปที่ 4.15 คือผนังด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีความหนา 0.25 เมตร โดยการแบ่งก้อนย่อยของเบ้ารับน้ำเหล็กตามตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.16 จะมีสมมติฐานและเงื่อนไขตามกิจตศักดิ์ดังต่อไปนี้

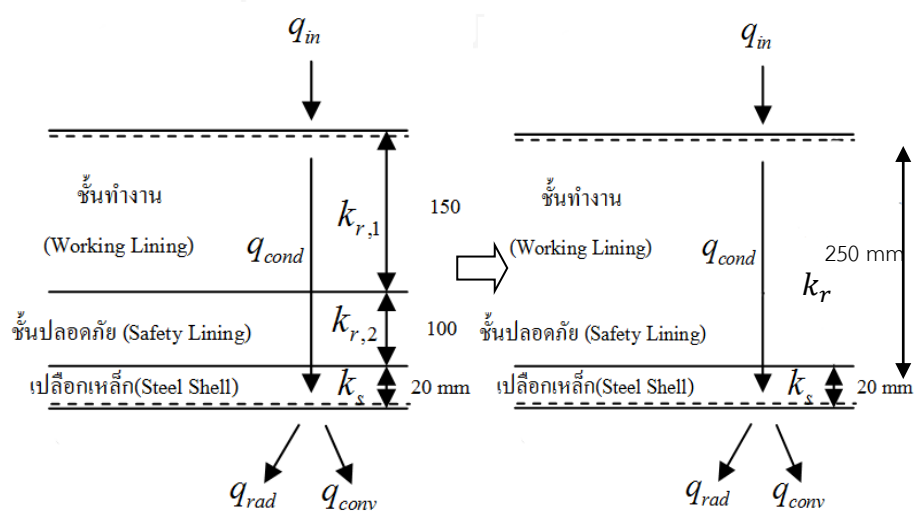
สมมติฐานการแบ่งก้อนย่อย

- 1.) ระหว่างชั้นทำงาน และชั้นความปลอดภัยของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กถือเป็นชั้นเดียวกัน ไม่มีการต้านทานทางความร้อน และมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนตลอดความยาวเท่ากันตามลำดับ

- 2.) อุณหภูมิผนังเข้ารับน้ำเหล็ก และอุณหภูมิชั้นเปลือกเหล็กทั้งด้านในและด้านนอกมีค่าเท่ากัน เนื่องจากเปลือกเหล็กมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูง เงื่อนไขความยาวของก้อนย่อย
- 1.) ระบบในรูปแบบปฏิภูมิสมเตตมีความสังเกตได้ (Observability)
 - 2.) ค่าอุณหภูมิจากการตรวจวัด ที่ตำแหน่งผนังด้านในเข้ารับน้ำเหล็ก 20, 50 มิลลิเมตร อยู่ที่ตำแหน่งใดๆ เพื่อใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำของโปรแกรม
 - 3.) ก้อนย่อยที่ 1 ที่ตำแหน่งผนังอิฐทนไฟด้านติดกับน้ำเหล็ก ต้องเป็นไปตาม $Bi < 0.1$ เนื่องจากมีทั้งการนำความร้อนและการพาความร้อนเกิดขึ้นพร้อมกัน



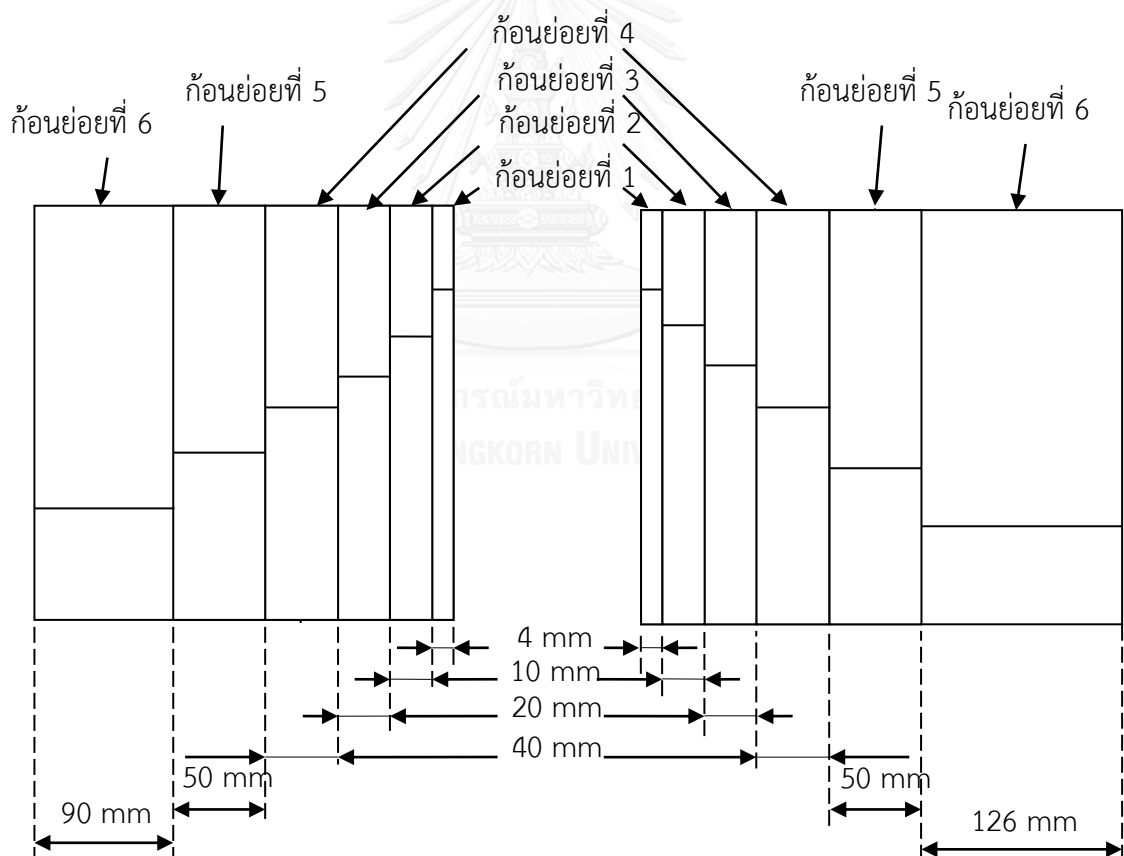
รูปที่ 4.14 การนำความร้อนภายในผนังเข้ารับน้ำเหล็กด้านข้างที่กำหนดให้ชั้นทำงาน และชั้นปลอดภัยเป็นชั้นเดียวกัน [5]



รูปที่ 4.15 การนำความร้อนภายในผนังเข้ารับน้ำเหล็กด้านล่างที่กำหนดให้ชั้นทำงาน และชั้นปลอดภัยเป็นชั้นเดียวกัน [5]

ตารางที่ 4.2 ความหนาของก๊อนย่อยที่แบ่งเพื่อเขียนระบบให้อยู่ในรูปปริภูมิสเตต [5]

พื้นที่ผิวด้านข้างดังรูปที่ 4.14		พื้นที่ผิวล่างดังรูปที่ 4.15	
ก๊อนย่อยที่	ขนาด(มิลลิเมตร)	ก๊อนย่อยที่	ขนาด(มิลลิเมตร)
1	4	1	4
2	10	2	10
3	20	3	20
4	40	4	40
5	50	5	50
6	90	6	126
รวม	214	รวม	250



รูปที่ 4.16 ความกว้างของก๊อนย่อยเมื่อ (ซ้าย) พับด้านข้าง (ขวา) พับกัน [5]

ก่อนย่อยของผนังเข้ารับน้ำเหล็กที่ถูกกำหนดจากตารางที่ 4.2 และ รูปที่ 4.16 สามารถเขียน ภาพความร้อนที่เข้า-ออก และสมดุลพลังงานของอิฐทนไฟก้อนที่ 1 ได้ดังรูปที่ 4.17 และสมการที่ (4.23) ตามลำดับ

$$\rho_{re} c_{p,re} x_1 \frac{dT_{m1,sw}}{dt} = q_{ph}'' - q_{1 \rightarrow 2}'' \quad (4.23)$$

เมื่อ ρ_{re} คือ ความหนาแน่นของอิฐทนไฟ (kg/m^3)

$c_{p,re}$ คือ ความจุความร้อนของอิฐทนไฟ (J/kgK)

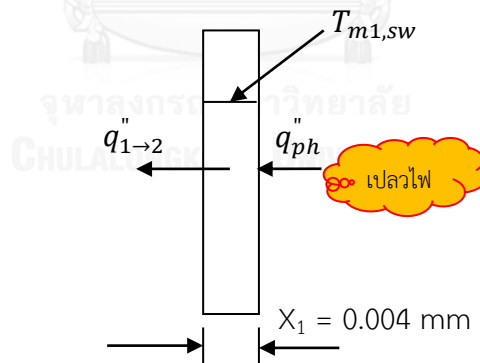
x_i คือ ความหนาของก้อนย่อยแต่ละก้อน (m)

$T_{mi,sw}$ คือ อุณหภูมิภายในก้อนย่อยแต่ละก้อน (K) ของปริมาตรควบคุมที่ 1

$q_{1 \rightarrow 2}''$ คือ ฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากก้อนย่อยที่ 1 ไป 2 โดยการนำความร้อน

แทนสมการที่ (3.1) และ (4.1) ลงไปในสมการที่ 4.23 จะได้ว่า

$$\rho_{re} c_{p,re} x_1 \frac{dT_{m1,sw}}{dt} = F\sigma(T_{fl}^4 - T_{m1,sw}^4) - k_{re} \frac{T_{m1,sw} - T_{m2,sw}}{x_1 + x_2/2} \quad (4.24)$$

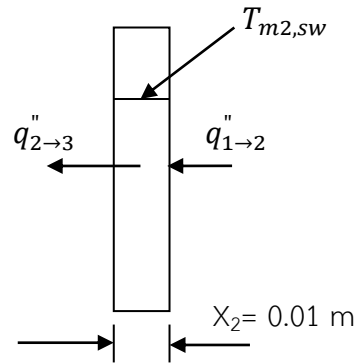


รูปที่ 4.17 ฟลักซ์ความร้อนที่เข้า-ออก ก้อนย่อยก้อนที่ 1 ที่ผิวด้านข้างเข้ารับน้ำเหล็ก [5]

ภาพความร้อนที่เข้า-ออก และสมดุลพลังงานของอิฐทนไฟก้อนที่ 2 ได้รับการถ่ายเทความร้อนจากอิฐก้อนย่อยก้อนที่ 1 และส่งผ่านความร้อนไปยังอิฐก้อนย่อยที่ 3 ดังรูปที่ 4.18 และสมการที่ (4.26) ตามลำดับ

$$\rho_{re} c_{p,re} x_2 \frac{dT_{m2,sw}}{dt} = q_{1 \rightarrow 2}'' - q_{2 \rightarrow 3}'' \quad (4.25)$$

$$\rho_{re} c_{p,re} x_2 \frac{dT_{m2,sw}}{dt} = k_{re} \frac{T_{m1,sw} - T_{m2,sw}}{x_1 + x_2/2} - k_{re} \frac{T_{m2,sw} - T_{m3,sw}}{x_2/2 + x_3/2} \quad (4.26)$$



รูปที่ 4.18 ฟลักซ์ความร้อนที่เข้า-ออก ก้อนย่อยก้อนที่ 2 ที่ผิวด้านข้างเข้ารับน้ำเหล็ก [5]

ในส่วนของสมดุลพลังงานก้อนย่อยที่ 3 ถึง 5 นั้น มีความคล้ายคลึงกับสมดุลสมการก้อนย่อยที่ 2 กล่าวคือ มีความร้อนเข้า-ออกของแต่ละก้อนย่อยที่เหมือนกัน แสดงดังสมการที่

$$\rho_{re} c_{p,re} x_3 \frac{dT_{m3,sw}}{dt} = k_{re} \frac{T_{m2,sw} - T_{m3,sw}}{x_2/2 + x_3/2} - k_{re} \frac{T_{m3,sw} - T_{m4,sw}}{x_3/2 + x_4/2} \quad (4.27)$$

$$\rho_{re} c_{p,re} x_4 \frac{dT_{m4,sw}}{dt} = k_{re} \frac{T_{m3,sw} - T_{m4,sw}}{x_3/2 + x_4/2} - k_{re} \frac{T_{m4,sw} - T_{m5,sw}}{x_4/2 + x_5/2} \quad (4.28)$$

$$\rho_{re} c_{p,re} x_5 \frac{dT_{m5,sw}}{dt} = k_{re} \frac{T_{m4,sw} - T_{m5,sw}}{x_4/2 + x_5/2} - k_{re} \frac{T_{m5,sw} - T_{m6,sw}}{x_5/2 + x_6/2} \quad (4.29)$$

ในส่วนของสมดุลพลังงานก้อนย่อยที่ 6 ดังรูปที่ 4.19 ตามสมการที่ (4.30) เมื่อได้รับความร้อนจากอิฐก้อนย่อยที่ 5 จะถูกส่งผ่านความร้อนไปยังอิฐก้อนย่อยที่ 6 โดยจะถ่ายเทความร้อนต่อไปยังเปลือกเหล็ก

$$\rho_{re} c_{p,re} x_6 \frac{dT_{m6,sw}}{dt} = k_{re} \frac{T_{m5,sw} - T_{m6,sw}}{x_5/2 + x_6/2} - \frac{k_{re}}{x_6/2} (T_{m6,sw} - T_s) \quad (4.30)$$

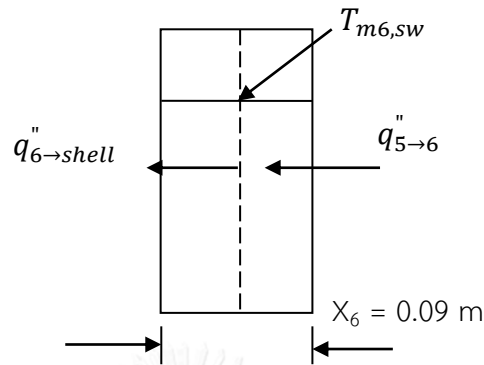
ในส่วนของสมดุลพลังงานชั้นเปลือกเหล็ก ดังรูปที่ 4.20 ตามสมการที่ (4.31) เมื่อได้รับความร้อนจากอิฐก้อนย่อยที่ 6 จะถูกส่งผ่านความร้อนไปยังเปลือกเหล็ก โดยจะถ่ายเทความร้อนต่อไปยังเปลือกเหล็กและบรรยากาศโดยรอบต่อไปด้วยการพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

$$\rho_{re} c_{p,re} x_{st} \frac{dT_s}{dt} = \left(\frac{k_{re}}{x_6/2} \right) (T_{m6,sw} - T_s) - h(T_s - T_a) - \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) \quad (4.31)$$

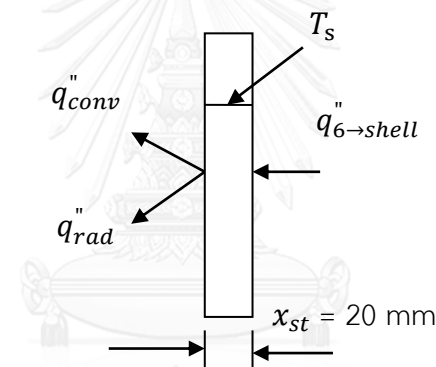
เมื่อ T_s คือ อุณหภูมิผิวเปลือกเหล็ก (K)

T_a คือ อุณหภูมิบรรยากาศ (K)

x_{st} คือ ความหนาของชั้นเปลือกเหล็ก (m)



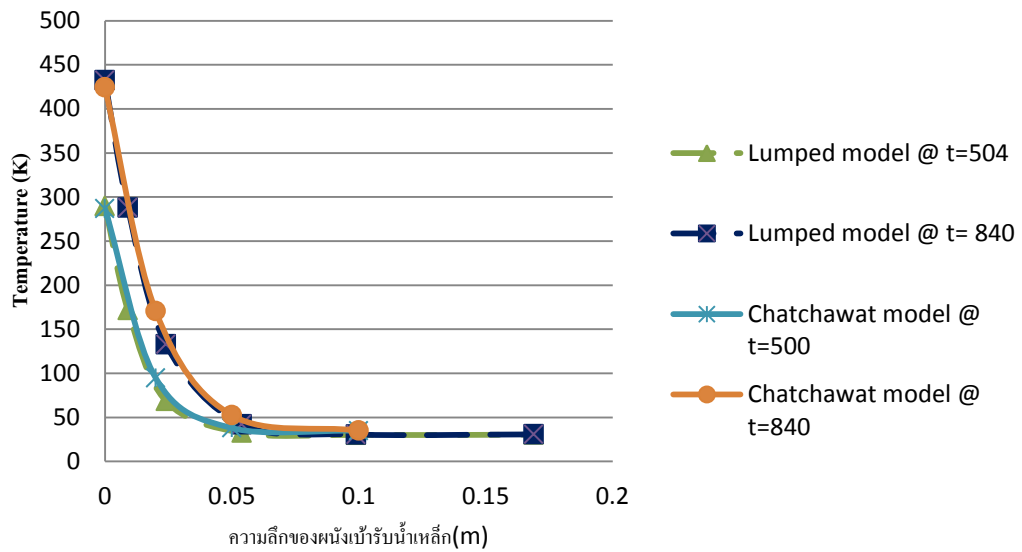
รูปที่ 4.19 ฟลักซ์ความร้อนที่เข้า-ออก ก้อนย่อยก้อนที่ 6 ที่ผิวด้านข้างเข้ารับน้ำเหล็ก [5]



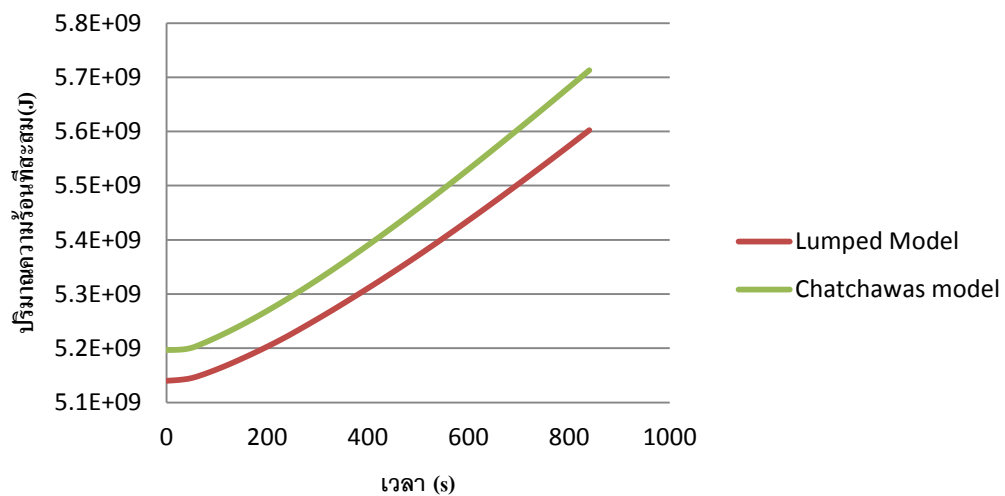
รูปที่ 4.20 ฟลักซ์ความร้อนที่เข้า-ออก เปลือกเหล็กด้านข้างเข้ารับน้ำเหล็ก [5]

กิจติศักดิ์ [5] ได้พิสูจน์ว่าผลลัพธ์ของอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากวิธี Lumped Capacitance Model มีค่าใกล้เคียงกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เชิงเส้นของซ็วส์ [4] โดยค่าผลลัพธ์อุณหภูมิของผนังป้รับน้ำเหล็กมีค่าเท่ากันที่เวลาเดียวกันแสดงดังรูปที่ 4.21 อีกทั้งความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในป้รับน้ำเหล็กเมื่อได้รับความร้อนมีค่าใกล้เคียงกันแสดงดังรูปที่ 4.22

จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แต่ละกระบวนการของกิจติศักดิ์ และซ็วส์นั้นทำให้สามารถสรุปได้ว่า ก้อนย่อยที่ถูกแบ่งเป็น 6 ก้อน สามารถนำมาใช้งานกับระบบได้จริง เนื่องจากค่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ เวลาเดียวกัน และความร้อนสะสมภายในป้รับน้ำเหล็ก มีค่าเท่ากัน ดังนั้นจึงจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เขียนขึ้นด้วยวิธี Lumped Capacitance Model มาใช้เป็นตัวแทนของสภาวะทางความร้อนของป้รับน้ำเหล็ก



รูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองในรูปแบบของ Lumped Capacitance Model ของกัจติศก์ดี กับแบบจำลองของชัชวาศส์ที่ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม [5]



รูปที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบพลังงานสะสมในกระบวนการอุ่นน้ำรับน้ำเหล็ก ระหว่างแบบจำลองในรูปแบบของกัจติศก์ดีที่ใช้ Lumped Capacitance Model กับแบบจำลองของชัชวาศส์ที่ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม [5]

การนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เขียนขึ้นด้วยวิธี Lumped Capacitance Model มาใช้ในระบบปริภูมิสแตต จะใช้เป็นสมการอนุพันธ์ที่เป็นสมการเชิงเส้น แต่เมื่อพิจารณาสมการสมดุลพลังงานของแต่ละอิฐก่อนย่อย (สมการที่ (4.26-4.30)) พบว่าสมการสมดุลพลังงานของอิฐก่อนย่อยที่

1 ยังไม่เป็นสมการเชิงเส้น แต่สามารถประมาณให้เป็นสมการเชิงเส้นด้วยการเขียนอนุกรมเทลเลอร์ (Taylor's Series) ได้ตามสมการที่ (4.32)

$$y = g(x) = g(x_0) + \frac{dg}{dx} \Big|_{x=x_0} (x - x_0) + \frac{d^2g}{dx^2} \Big|_{x=x_0} \frac{(x-x_0)^2}{2!} + \dots \quad (4.32)$$

$$\text{เมื่อ } y(t) = g(x(t))$$

จากอนุกรมเทลเลอร์ (Taylor's Series) ในสมการที่ (4.32) พบว่าตั้งแต่พจน์ที่ 3 มีค่าอันดับอนุพันธ์ที่สูง ส่งผลให้ค่าที่ได้น้อยมาก จึงลดรูปให้เหลือเฉพาะ 2 พจน์แรกดังสมการที่ (4.33)

$$y = g(x) = g(x_0) + \frac{dg}{dx} \Big|_{x=x_0} (x - x_0) \quad (4.32)$$

จากสมการที่ (4.32) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบปริภูมิสแตตใหม่ได้ดังสมการที่ (4.33)

$$T_{m1,sw} = T_{m1sw}^* + \Delta T_{m1sw} \quad (4.33)$$

นำสมการที่ (4.33) มาเขียนในรูปแบบสมการสมดุลพลังงานที่อิฐก้อนย่อยที่ 1 สมการที่ (4.24) จะได้ดังสมการที่ (4.34) [5]

$$\begin{aligned} \rho_{re} c_{p,re} x_1 \frac{d\Delta T_{m1,sw}}{dt} &= F\sigma(T_{fl}^4) \\ &- \left[\left(F\sigma T_{m1,sw}^{*4} + \frac{k_{re}}{x_1 + x_2/2} T_{m1,sw}^* \right) \right. \\ &+ \left. \left(F\sigma T_{m1,sw}^3 + \frac{k_{re}}{x_1 + x_2/2} \right) \Delta T_{m1,sw} \right] \\ &+ \frac{k_{re}}{x_1 + x_2/2} T_{m2,sw} \end{aligned} \quad (4.34)$$

เขียนสมดุลพลังงานอิฐก้อนย่อยที่ 2 สมการที่ (4.26) ใหม่โดยใช้สมการที่ (4.33) ปรับแก้ได้ดังสมการที่ (4.35) [5]

$$\begin{aligned}
\rho_{re} c_{p,re} x_2 \frac{dT_{m2,sw}}{dt} &= \frac{k_{re}}{x_1 + x_2/2} T_{m1,sw}^* + \frac{k_{re}}{x_1 + x_2/2} \Delta T_{m1,sw} \\
&- \left(\frac{k_{re}}{x_1 + x_2/2} + \frac{k_{re}}{x_2/2 + x_3/2} \right) T_{m2,sw} \\
&+ \frac{k_{re}}{x_2/2 + x_3/2} T_{m3,sw}
\end{aligned} \tag{4.35}$$

จากสมการที่ (4.31) ที่เป็นสมการสมดุลพลังงานของอิฐก้อนที่ 6 ถ่ายเทความร้อนให้กับชั้นเปลือกเหล็ก จะพบว่าเป็นสมการไม่เชิงเส้น ดังนั้นวิธีการลดความยุ่งยากลงในการคำนวณจะตั้งสมมติฐานให้ชั้นเปลือกเหล็กมีอุณหภูมิเท่ากันตลอดความหนา และให้อุณหภูมิที่ชั้นเปลือกเหล็กที่ติดกับตำแหน่งอิฐก้อนย่อยที่ 6 มีค่าเท่ากัน จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (4.36) [5]

$$\rho_{re} c_{p,re} x_6 \frac{dT_{m6,sw}}{dt} = k_{re} \frac{T_{m5,sw} - T_{m6,sw}}{x_5/2 + x_6/2} - \left(\frac{k_{re}}{x_6/2} + \frac{k_{st}}{x_{st}} \right) (T_{m6,sw} - T_s) \tag{4.36}$$

เมื่อ k_{st} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชั้นเปลือกเหล็ก (W/m^2K)

x_{st} คือ ค่าความหนาของชั้นเปลือกเหล็ก (m)

4.4.2 ตัวประมาณค่า

ในการออกแบบตัวประมาณค่าให้กับระบบปริภูมิสแตตนั้น จะต้องให้ระบบมีความสังเกตได้ Observability เสียก่อน ซึ่งพบว่า $Rank(observability(A, C))$ ของระบบ มีค่าเท่ากับ 6 หมายความว่า การกำหนดระบบปริภูมิสแตต มีค่าสเตตทั้งสิ้น 6 ค่า

$(\Delta T_{m1,sw}, T_{m2,sw}, T_{m3,sw}, T_{m4,sw}, T_{m5,sw}, T_{m6,sw})$ จะสามารถออกแบบระบบในหัวข้อที่

4.4.1 และออกแบบตัวประมาณค่าได้

4.4.2.1 สูตรของแอกเคอร์มันน์ (Ackermann's Formular)

ตัวประมาณค่าจากสูตรของแอกเคอร์มันน์ ทำโดยเลือกอัตราการขยายของตัวประมาณค่า (L) จากการกำหนดตำแหน่งของโพล หรือรากของสมการลักษณะเฉพาะของตัวประมาณค่า

โดยมีค่าโพล $[-0.01 \ -0.01 \ -0.01 \ -0.01 \ -0.01 \ -0.01]$ และค่า $c = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$ คือค่าที่กำหนดตำแหน่งของสเตตที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิผนังเข้ารับน้ำเหล็ก และนำไปหาอัตราขยายตัวประมาณค่าดังสมการที่ (4.38)

$$L = acker(A^T, c^T, p)^T \quad (4.38)$$

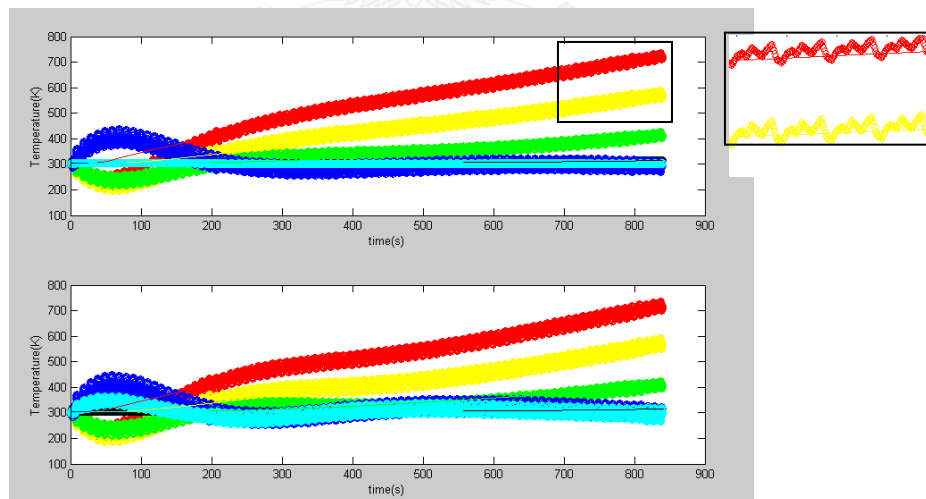
เมื่อ L คือ อัตราขยายของตัวประมาณค่า

A คือ ระบบที่พิจารณาในรูป State-Space

p คือ โพลของระบบที่เลือก

จากการทดลองใช้ค่าโพลที่ได้กำหนดเพื่อหาอัตราการขยายของกิจติดดีพบว่าสามารถประมาณค่าอุณหภูมิผิวด้านข้างและด้านล่างของเข้ารับน้ำเหล็กได้แม่นยำ แต่อัตราการขยายไม่ทนต่อสัญญาณรบกวนที่เข้ามาพร้อมกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด (c) ดังรูปที่ 4.23

จากรูปที่ 4.23 ทำให้เห็นว่าอัตราการขยายที่นำมาใช้ปรับแก้ตัวประมาณค่าสเตตนั้น มีความไม่แน่นอนต่อสัญญาณรบกวนที่ได้จากอุณหภูมิการตรวจวัด (สภาวะที่ 4, สเตตที่ 4) จึงต้องเลือกอัตราการขยายใหม่ที่ทนทานต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าเดิมคือ ตัวกรองคาร์ลมาล



รูปที่ 4.23 ผลลัพธ์ของการประมาณค่าเมื่อแทนข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่มีสัญญาณรบกวน (T_{m4}) โดยเส้นทึบจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่า และเส้นบางจะเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง (บน)

ตำแหน่งผิวด้านข้าง (ล่าง) ตำแหน่งผิวก้น [5]

4.4.2.2 ตัวกรองคาร์ลมาล (Kalman's Filter)

ตัวกรองคาร์ลมาล มีลักษณะการทำงานคล้ายกับหัวข้อย่อยที่ 4.4.2.1 ก็คือการเลือกตัวขยายให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยที่ตัวกรองคาร์ลมาลสามารถใช้งานร่วมกับสัญญาณขาเข้าที่ถูกรบกวนเข้ามาในระบบได้ โดยรูปแบบของตัวกรองคาร์ลมาลแสดงในสมการที่ (4.39) [20]

$$\hat{x} = A\hat{x} + Bu + K(y - c\hat{x}) \quad (4.39)$$

$$\dot{P} = -Pc^T R_c^{-1} cP + AP + PA^T + Q_c$$

เมื่อ Q_c คือ White Noise with Process Covariance Matrix

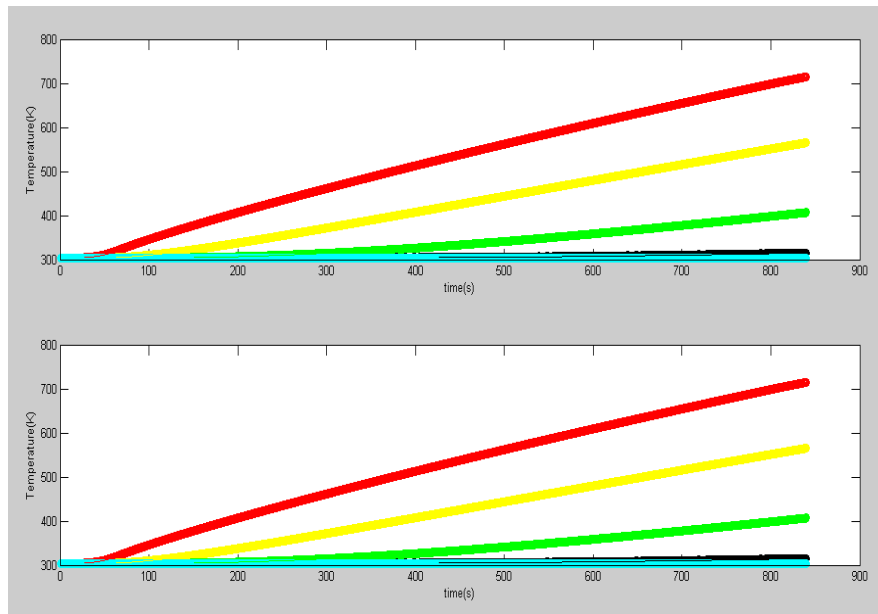
R_c คือ Measurement Covariance Matrix

สมการสุดท้ายของสมการที่ (4.39) เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว จะทำให้ผลลัพธ์ของการประมาณไม่มีผลต่อสัญญาณรบกวน จะทำให้สมการถูกเปลี่ยนเป็นสมการที่ (4.40)

$$0 = -Pc^T R_c^{-1} cP + AP + PA^T + Q_c \quad (4.40)$$

เมื่อนำตัวกรองคาร์ลมาลไปใช้ทดสอบการทำงานกับระบบโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัด ที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ($T_{m4,sw}$ และ $T_{m4,bw}$) โดยกิจตักก็ได้ใส่สัญญาณรบกวนเข้าไปในระบบ เพื่ออนุมานว่าระบบที่กำลังทดสอบคือระบบจริง พบว่า ตัวกรองคาร์ลมาลทนต่อสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 4.24 และจะนำไปใช้เป็นตัวประมาณค่าสเตตอื่นๆต่อไป

การตัดสินใจใช้ตัวกรองคาร์ลมาลสำหรับการทดลองในโปรแกรมที่ระบบออฟไลน์ทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่าอัตราขยาย (L) ที่ถูกแทนค่าด้วยตัวแปร (K) ในสมการที่ (4.39) แสดงอยู่ในภาคผนวก โดยตัวห้อย bw, sw คือประเภทปริมาตรควบคุมของเบ้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 4.24 ผลลัพธ์ของการประมาณค่าโดยใช้ตัวประมาณค่าคาร์ลมาลเมื่อแทนข้อมูลอุณหภูมิจากการตรวจวัดลงใน T_{m4} ที่มีสัญญาณรบกวน โดยเส้นที่บนจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่า และเส้นล่างจะเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง (บน) ตำแหน่งผิวด้านข้าง (ล่าง) ตำแหน่งผิวด้านล่าง [5]

4.5 สรุปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละกระบวนการ

สมดุลพลังงานความร้อนภายในเข้รับน้ำเหล็กจากสมการที่ (3.2) สามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่งทั่วไปได้ดังสมการที่ (4.41)

$$\dot{T}_{j,i}(t) = A_{j,i}T_{j,i}(t) + B_{j,i}U_{j,i} \quad (4.41)$$

นำสมการที่ (4.41) มาเขียนในรูปแบบปริภูมิสแตตในรูปของเมทริกซ์ดังต่อไปนี้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} T_{m1,i} \\ T_{m2,i} \\ T_{m3,i} \\ T_{m4,i} \\ T_{m5,i} \\ T_{m6,i} \end{bmatrix} = [A_{j,i}]_{6 \times 6} \begin{bmatrix} T_{m1,i} \\ T_{m2,i} \\ T_{m3,i} \\ T_{m4,i} \\ T_{m5,i} \\ T_{m6,i} \end{bmatrix}_{6 \times 1} + [B_{j,i}]_{6 \times 6} [U_{j,i}]_{6 \times 1} \quad (4.42)$$

เมื่อ $i = sw$ สำหรับผนังด้านข้างเข้รับน้ำเหล็ก

$i = bw$ สำหรับผนังด้านล่างเข้รับน้ำเหล็ก

j คือ จำนวนอิฐก้อนย่อยที่ถูกแบ่งภายในผนังเข้รับน้ำเหล็ก 6 ก้อน

เอลิเมนต์ของเมทริกซ์ A, B และ u แสดงได้ดังต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } a_{11,i} = -\left(\frac{k_{re}}{x_{1,i}+x_{2,i}/2}\right)/C_1$$

$$a_{12,i} = \frac{k_{re}}{x_{1,i}+x_{2,i}/2} /C_1$$

$$a_{21,i} = \frac{k_{re}}{x_{1,i}+x_{2,i}/2} /C_2$$

$$a_{22,i} = -\left(\frac{k_{re}}{x_{1,i}+x_{2,i}/2} + \frac{k_{re}}{x_{2,i}/2+x_{3,i}/2}\right)/C_2$$

$$a_{23,i} = \frac{k_{re}}{x_{2,i}/2+x_{3,i}/2} /C_2$$

$$a_{32,i} = \frac{k_{re}}{x_{2,i}/2+x_{3,i}/2} /C_3$$

$$a_{33,i} = -\left(\frac{k_{re}}{x_{2,i}/2+x_{3,i}/2} + \frac{k_{re}}{x_{3,i}/2+x_{4,i}/2}\right)/C_3$$

$$a_{34,i} = \frac{k_{re}}{x_{3,i}/2+x_{4,i}/2} /C_3$$

$$a_{43,i} = \frac{k_{re}}{x_{3,i}/2+x_{4,i}/2} /C_4$$

$$a_{44,i} = -\left(\frac{k_{re}}{x_{3,i}/2+x_{4,i}/2} + \frac{k_{re}}{x_{4,i}/2+x_{5,i}/2}\right)/C_4$$

$$a_{45,i} = \frac{k_{re}}{x_{4,i}/2+x_{5,i}/2} /C_4$$

$$a_{54,i} = \frac{k_{re}}{x_{4,i}/2+x_{5,i}/2} /C_5$$

$$a_{55,i} = -\left(\frac{k_{re}}{x_{4,i}/2+x_{5,i}/2} + \frac{k_{re}}{x_{5,i}/2+x_{6,i}/2}\right)/C_5$$

$$a_{56,i} = \frac{k_{re}}{x_{5,i}/2+x_{6,i}/2} /C_5$$

$$a_{65,i} = \frac{k_{re}}{x_{5,i}/2+x_{6,i}/2} /C_6$$

$$a_{66,i} = -\left(\frac{k_{re}}{x_{5,i}/2+x_{6,i}/2} + \frac{k_{re}}{x_{6,i}/2} + \frac{k_{st}}{x_{st}}\right)/C_6$$

$$b_{11,i} = 1/C_1$$

$$b_{66,i} = 1/C_6$$

$$u_{11,i} = \dot{Q}_b'''$$

$$u_{61,i} = \left(\frac{k_{re}}{x_{6,i}/2} + \frac{k_{st}}{x_{st}} \right) T_s$$

เมื่อ $C_j = \rho c_p x_{j,i}$ โดยที่ j คือจำนวนก้อนย่อยที่แบ่งมีค่าเป็น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6

เอลิเมนต์ของเมทริกซ์ A, B และ u ในตำแหน่งที่เหลือนี้อาจเท่ากับ 0

4.5.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอุ่นน้ำรับน้ำเหล็ก (Model-A)

การอุ่นน้ำรับน้ำเหล็ก คือ การให้พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของก๊าซไอเสียกับน้ำรับน้ำเหล็ก ซึ่งสามารถพิจารณาอุณหภูมิของก๊าซเผาไหม้ได้ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมการแสดงอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ของก๊าซไอเสียที่เลือกใช้งาน

ลักษณะการใช้งาน	สมการอุณหภูมิก๊าซเผาไหม้ (K)
1. ใช้น้ำรับน้ำเหล็กใหม่	$T_{fl} = 700(t/60) + 473 ; t \leq 60$ $T_{fl} = 60 \ln(t/60) + 1173 ; t > 60$
2. ใช้น้ำรับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว	$T_{fl} = 927(t/60) + 473 ; t \leq 60$ $T_{fl} = 60 \ln(t/60) + 1350 ; t > 60$

จากการตรวจสอบจุดทำงานและอุณหภูมิก้อนย่อยที่ 1 ของก๊อติคค์ดี ไร่ไฟรุจิจงศ์พบว่จุดทำงานมีค่าเปล่ยนไปดั่งตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิของจุดทำงานใหม่ที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงของ $T_{m1,i}^*(K)$

ช่วง $T_{m1,i}(K)$	$T_{m1,i}^*(K)$
$303 \leq T_{m1,i} \leq 400$	350
$400 \leq T_{m1,i} \leq 700$	600
$700 \leq T_{m1,i} \leq 900$	800
$900 \leq T_{m1,i} \leq 1000$	950
$1000 \leq T_{m1,i} \leq 1200$	1100
$T_{m1,i} \geq 1200$	1300

4.5.1.1 กระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กทั่วไป (Model-A1)

กระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กทั่วไป จะจำลองอุณหภูมิการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กเพื่อที่จะทำนายเวลาในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก สมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นสมการไม่เชิงเส้นจึงจำเป็นต้องทำให้เป็นสมการเชิงเส้นก่อนตั้งสมการที่ (4.43) โดยสามารถดูวิธีการแปลงเป็นสมการเชิงเส้นได้จากสมการที่ (4.32)-(4.35)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta T_{m1,i} \\ T_{m2,i} \\ T_{m3,i} \\ T_{m4,i} \\ T_{m5,i} \\ T_{m6,i} \end{bmatrix} = [A_{j,i}]_{6 \times 6} \begin{bmatrix} \Delta T_{m1,i} \\ T_{m2,i} \\ T_{m3,i} \\ T_{m4,i} \\ T_{m5,i} \\ T_{m6,i} \end{bmatrix} + [B_{j,i}]_{6 \times 6} [U_{j,i}]_{6 \times 1} \quad (4.43)$$

$$\text{เมื่อ } a_{11,i} = -(F\sigma T_{m1,i}^3 + \frac{k_{re}}{x_{1,i}+x_{2,i}/2})/(\rho c_p x_{1,i})$$

$$u_{11,i} = F\sigma T_{fl}^4 - F\sigma T_{m1,i}^4 - \frac{k_{re}}{x_{1,i}+x_{2,i}/2} T_{m1,i}^*$$

$$u_{21,i} = \frac{k_{re}}{x_{1,i}+x_{2,i}/2} T_{m1,i}^*$$

$$b_{11,i} = 1/C_1$$

$$b_{22,i} = 1/C_2$$

เอลิเมนต์ของเมทริกซ์ A, B และ U ในตำแหน่งที่เหลี่ยมมีค่าตามเอลิเมนต์ของสมการที่ (4.42)

หมายเหตุ อุณหภูมิเริ่มต้นของแต่ละสแตตในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หาได้จากอุณหภูมิสุดท้ายของแต่ละสแตตที่กระบวนการก่อนหน้า

4.5.1.2 กระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กพิจารณาค่าอุณหภูมิการตรวจวัด (Model-A2)

กระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กพิจารณาค่าอุณหภูมิการตรวจวัด จะจำลองอุณหภูมิการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กร่วมกับการปฏิบัติงานจริง โดยใช้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 50mm. ($T_{50,i}$) เข้าไปประมาณค่าหาอุณหภูมิภายในเข้ารับน้ำเหล็กใหม่ โดยสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกพัฒนาขึ้นจากสมการที่ (4.43) ให้อยู่ในรูปของการประมาณค่าสแตตตั้งสมการที่ (3.43)

$$\dot{T}_{j,i}(t) = A_{j,i}T_{j,i}(t) + B_{j,i}U_{j,i} + L(y - cT_{j,i}) \quad (3.43)$$

$$\text{เมื่อ } L = [l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4 \quad l_5 \quad l_6]$$

$$c = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$

$$y = T_{50,i}$$

$$a_{11,i} = -\left(F\sigma T_{m1,i}^3 + \frac{k_{re}}{x_{1,i} + x_{2,i}/2}\right) / (\rho c_p x_{1,i})$$

$$u_{11,i} = F\sigma T_{fl}^4 - F\sigma T_{m1,i}^4 - \frac{k_{re}}{x_{1,i} + x_{2,i}/2} T_{m1,i}^*$$

$$u_{21,i} = \frac{k_{re}}{x_{1,i} + x_{2,i}/2} T_{m1,i}^*$$

$$b_{11,i} = 1/C_1$$

$$b_{22,i} = 1/C_2$$

หมายเหตุ อุณหภูมิเริ่มต้นของแต่ละสแตตในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หาได้จากอุณหภูมิสุดท้ายของแต่ละสแตตที่กระบวนการก่อนหน้า ส่วนของเข้ารับน้ำเหล็กใหม่จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 30°C

4.5.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการนำสแลกไปเทหึ่ง และซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็ก (Model-A3)

กระบวนการนำสแลกไปเทหึ่ง และซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็กจะพิจารณาค่าอุณหภูมิการตรวจวัด จะจำลองอุณหภูมิของกระบวนการร่วมกับการปฏิบัติงานจริง โดยใช้ค่าที่ได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 50mm. ($T_{50,i}$) เข้าไปประมาณค่าหาอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ โดยสมการของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกพัฒนาขึ้นจากสมการที่ (4.43) ให้อยู่ในรูปของการประมาณค่าเสถียรดังสมการที่ (3.43) การแลกเปลี่ยนความร้อนของผิวเบ้ารับน้ำเหล็กเกิดจากการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมภายนอก

$$\dot{T}_{j,i}(t) = A_{j,i}T_{j,i}(t) + B_{j,i}U_{j,i} + L(y - cT_{j,i}) \quad (3.43)$$

$$\text{เมื่อ } L = [l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4 \quad l_5 \quad l_6]$$

$$c = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$$

$$y = T_{50,i}$$

$$\text{โดย } u_{11,i} = \frac{q_i}{A_i}$$

$$\text{ซึ่ง } q_i = \left[\frac{\frac{\sigma T_{\infty}^4}{R_i} + \frac{\sigma T_{m1,sw}^4}{R_{ii}} + \frac{\sigma T_{m1,bw}^4}{R_{iii}} - \sigma T_{m1,i}^4}{R_{total}} \right] \quad (4.44)$$

(R_{ii} or R_{iii})

$$R_i = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b + R_c} ; R_{ii} = \frac{R_a R_c}{R_a + R_b + R_c} + \frac{1-0.9}{0.9A_2} ; R_{iii} = \frac{R_b R_c}{R_a + R_b + R_c} + \frac{1-0.9}{0.9A_3}$$

$$R_{total} = \frac{R_i R_{ii} R_{iii}}{R_i + R_{ii} + R_{iii}} ; R_a = \frac{1}{F_{21} A_2} ; R_b = \frac{1}{F_{31} A_3} ; R_c = \frac{1}{F_{23} A_2}$$

$$A_2 = 11.097m^2, A_3 = 1.679m^2, F_{21} = 0.1873, F_{23} = 0.1336, F_{31} = 0.1169$$

การจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหลือจากกระบวนการก่อนหน้าสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.45) โดยพิจารณาจากสมการที่ (4.13)

$$\dot{T}_{st} = Bu \quad (4.45)$$

$$\text{โดย } B = - \left(\frac{1}{m_{st} c_{p,st}} \right)$$

$$u = q_{st,bconv}'' A_{ld,b} + q_{st,wconv}'' A_{ld,w} + q_{sl,conv}'' A_{sl} + q_{sl,rad}'' A_{sl}$$

$$\dot{m}_{st} = \rho_{st} \dot{V} = \rho_{st} \pi r_{bw}^2 \dot{H} = \rho_{st} \pi r_{bw}^2 \left[H_{ls} - \left(\frac{H_{ls} t}{t_{teem} \times 60} \right) + 0.133 \right]$$

$$q_{st,i,conv} = h_{st-ld} A_i (T_{st} - T_{m1,i})$$

$$q_{sl,conv} = h_{sl} A_1 (T_{sl} - T_{\infty}) \quad ; \quad T_{sl} = T_{st} - 900$$

$$q_{sl,rad} = 0.9 \sigma A_1 (T_{sl}^4 - T_{\infty}^4)$$

- หมายเหตุ 1. อุณหภูมิเริ่มต้นของแต่ละสแตตในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หาได้จากอุณหภูมิสุดท้ายของแต่ละสแตตที่กระบวนการก่อนหน้า
2. อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเหล็ก หาได้จาก อุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายของกระบวนการก่อนหน้า

4.5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการพักเก็บรับน้ำเหล็ก (Model-B)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการพักเก็บรับน้ำเหล็ก จะจำลองอุณหภูมิการพักเก็บรับน้ำเหล็ก โดยสมการการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะเป็นไปตามสมการที่ (4.42)

เมื่อ $u_{11,i} = \frac{q_i}{A_i}$ ซึ่งพิจารณา q_i คำนวณได้จากสมการที่ (4.44)

$$b_{11,i} = 1/C_1$$

หมายเหตุ อุณหภูมิเริ่มต้นของแต่ละสแตตในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หาได้จากอุณหภูมิสุดท้ายของแต่ละสแตตที่กระบวนการก่อนหน้า

4.5.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก (Model-C)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก จะจำลองอุณหภูมิเก็บรับน้ำเหล็กด้วยสมการที่ (4.42)

$$\text{โดย } a_{11,i} = -\left(h_{st-ld} + \frac{k_{re}}{x_{1,i} + x_{2,i}/2} \right) / C_1$$

$$u_{11,i} = h_{st-ld} T_{st}$$

$$b_{11,i} = 1/C_1$$

การจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหลือจากกระบวนการก่อนหน้าสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.45) โดยพิจารณาจากสมการที่ (4.13)

$$\dot{T}_{st} = Bu \quad (4.45)$$

$$\text{โดย } B = -\left(\frac{1}{m_{st}c_{p,st}}\right)$$

$$u = q_{st,bconv}''A_{ld,b} + q_{st,wconv}''A_{ld,w} + q_{sl,conv}''A_{sl} + q_{sl,rad}''A_{sl}$$

$$\dot{m}_{st} = \text{constant}$$

$$q_{st,i,conv} = h_{st-ld}A_i(T_{st} - T_{m1,i})$$

$$q_{sl,conv} = h_{sl}A_1(T_{sl} - T_{\infty}) \quad ; \quad T_{sl} = T_{st} - 900$$

$$q_{sl,rad} = 0.9\sigma A_1(T_{sl}^4 - T_{\infty}^4)$$

- หมายเหตุ
1. อุณหภูมิเริ่มต้นของแต่ละสเตตในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หาได้จากอุณหภูมิสุดท้ายของแต่ละสเตตที่กระบวนการก่อนหน้า
 2. อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเหล็ก หาได้จาก อุณหภูมิการเหนี่ยวน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัด

4.5.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเหนี่ยวน้ำเหล็กจากเข้รับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก (Model-D)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเหนี่ยวน้ำเหล็กจากเข้รับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก จะจำลองอุณหภูมิเข้รับน้ำเหล็กด้วยสมการที่ (4.42) อุณหภูมิสูงของน้ำเหล็กจะถ่ายเทความร้อนให้กับผนังเข้รับน้ำเหล็ก ซึ่งสามารถจำแนกการถ่ายเทความร้อนได้ตามระยะเวลาที่น้ำเหล็กภายในเข้ลดลง

@ $t \leq 50\%$ ของ t_{Teem}

$$u_{11,i} = h_{st-ld}T_{st}$$

$$a_{11,i} = (h_{st-ld})/\rho c_p x_{1,i}$$

@ $t > 50\%$ ของ t_{Teem}

$$u_{11,sw} = q_{sw}/A_{sw} \text{ ซึ่ง } q_{sw} \text{ สามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4.44)}$$

$$a_{11,sw} = -\left(\frac{k_{re}}{x_{1,i}+x_{2,i}/2}\right)/\rho c_p x_1$$

$$u_{11,bw} = h_{st-ld} T_{st}$$

$$a_{11,bw} = -\left(h_{st-ld} + \frac{k_{re}}{x_{1,i}+x_{2,i}/2}\right)/\rho c_p x_{1,i}$$

การจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหลือจากกระบวนการก่อนหน้าสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.45) โดยพิจารณาจากสมการที่ (4.13)

$$\dot{T}_{st} = Bu \quad (4.45)$$

โดย $B = -\left(\frac{1}{m_{st}c_{p,st}}\right)$

$$u = q_{st,bconv}'' A_{ld,b} + q_{st,wconv}'' A_{ld,w} + q_{sl,conv}'' A_{sl} + q_{sl,rad}'' A_{sl}$$

$$\dot{m}_{st} = \rho_{st} \dot{V} = \rho_{st} \pi r_{bw}^2 \dot{H} = \rho_{st} \pi r_{bw}^2 \left[H_{ls} - \left(\frac{H_{ls} t}{t_{teem} \times 60}\right) + 0.133 \right]$$

$$q_{st,i,conv} = h_{st-ld} A_i (T_{st} - T_{m1,i})$$

$$q_{sl,conv} = h_{sl} A_1 (T_{sl} - T_{\infty}) \quad ; \quad T_{sl} = T_{st} - 900$$

$$q_{sl,rad} = 0.9 \sigma A_1 (T_{sl}^4 - T_{\infty}^4)$$

และใช้สมการที่ (4.44) ในการจำลองการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างด้านใน และด้านนอกของฝาปิดเก็บรับน้ำเหล็กดังรูปที่ (4.11), (4.12) และ (4.13)

- หมายเหตุ**
1. อุณหภูมิเริ่มต้นของแต่ละสเตตในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หาได้จากอุณหภูมิสุดท้ายของแต่ละสเตตที่กระบวนการก่อนหน้า
 2. อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเหล็ก หาได้จาก อุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายของกระบวนการก่อนหน้า

4.5.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Model-F)

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตน้ำเหล็ก จะใช้ค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ได้จากการเก็บวัดค่าภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของโรงงานตัวอย่าง โดยนำข้อมูลดิบของอุณหภูมิ

น้ำเหล็กแต่ละรอบการทำงาน (1รอบการทำงาน มีจุดวัดอุณหภูมิ 3-4 จุด) ซึ่งผลการการแสดงผลตารางเวลาการตรวจวัดอุณหภูมิ น้ำเหล็กอยู่ในหัวข้อบทที่ 5 และเริ่มวัดจุดแรกเวลาที่ 40 นาที มาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาดังรูปที่ 4.25 ได้ดังสมการที่ (4.44) ด้วยวิธี Optimization in Nonlinear Least Square (Curve Fitting)

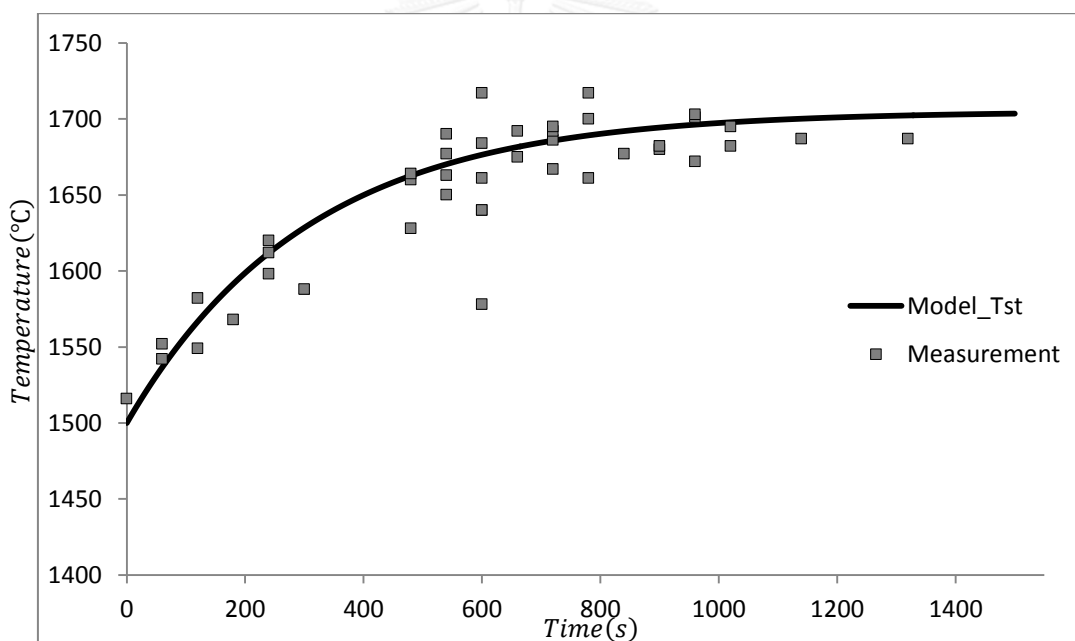
$$T_{st}(t) = 1500e^{-at} + b(1 - e^{-at}) \quad ; (t \geq 2400s) \quad (4.4)$$

$$a = 0.003286246411, \quad b = 1705.044820837208$$

เมื่อ T_{st} คือ อุณหภูมิของน้ำเหล็กที่จำลองขึ้นตามเวลาโดยเริ่มต้นอุณหภูมิที่

$$T_{st}(t=0) = 1500^{\circ}\text{C}$$

t คือ เวลาของการหลอมเหล็ก (sec.)



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำเหล็ก กับเวลา โดยได้จากการพล็อตค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กจากการตรวจวัด

แต่ในการนำแบบจำลองไปใช้ในการทำงานจริงนั้นจะมีขั้นตอนการทำงานคือ เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการทดสอบแลก และผ่านการซ่อมแซมเรียบร้อยแล้วจะถือว่า เบ้ารับน้ำเหล็กรอบนี้เสร็จสิ้นการทำงาน เมื่อนำเบ้ารับน้ำเหล็กไปขึ้นรอบการทำงานรอบถัดไป จำเป็นที่จะต้องตรวจสอบว่าเบ้ารับน้ำเหล็กมีความพร้อมในการรับน้ำเหล็กหรือไม่ หรือ เต้าหลอมอาร์คไฟฟ้าพร้อมที่จะเทน้ำเหล็กแล้วหรือไม่ ณ ช่วงเวลานี้จึงถือว่าเป็นการรอบการทำงานใหม่ของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยที่จะใช้กราฟดังรูปที่ 4.26 พิจารณา เป้าหมายอุณหภูมิก่อนเทน้ำเหล็กและเวลาที่ใช้น้ำเหล็ก

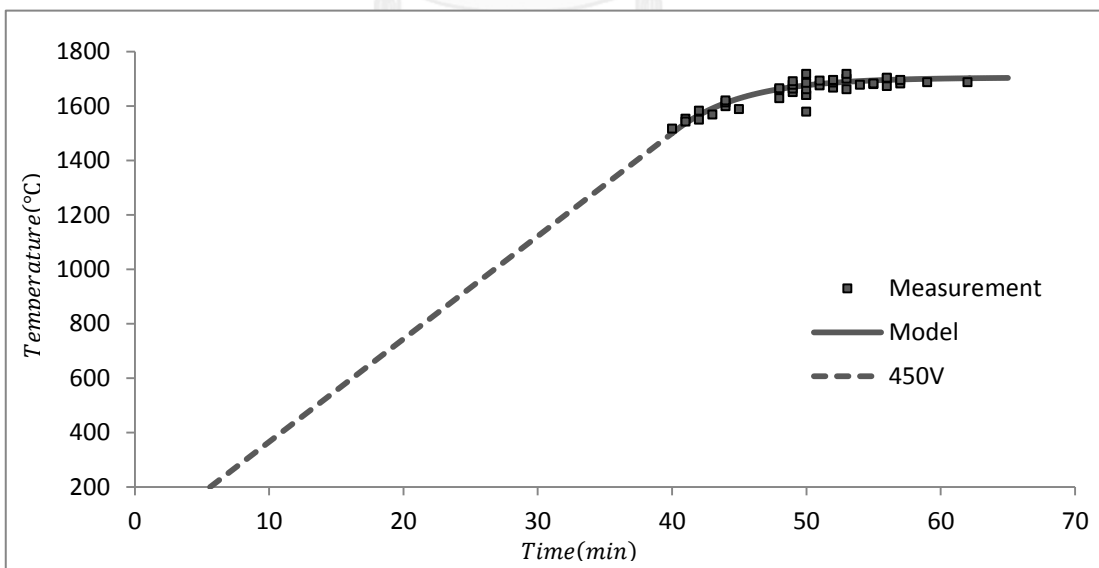
จากรูปที่ 4.25 จะแสดงแบบจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่เวลาหลังการหลอมผ่านไป 40 นาที ตามค่าที่ได้จากการตรวจวัด แต่ในความเป็นจริงเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจะเริ่มหลอมน้ำเหล็กเรียบร้อยแล้ว เพราะฉะนั้นวิธีการประเมินอุณหภูมิน้ำเหล็กเริ่มต้น ได้จากการหาค่ากราฟย้อนกลับโดยวิเคราะห์ที่ความชัน ณ เวลาที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าทำงานที่เวลา 40 นาทีเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าจะแบ่งการใส่เศษเหล็กเพื่อนำมาหลอมทั้งสิ้น 3 ครั้ง เฉลี่ยครั้งละ 8 ตันเศษเหล็ก ซึ่งเมื่อใส่เศษเหล็กครั้งที่ 1 ผู้ปฏิบัติงานจะส่งไฟฟ้าความต่างศักย์ 450 โวลต์ให้กับเตา ใช้เวลาหลอมประมาณ 10 นาที จึงดับไฟประมาณ 1 นาที เพื่อใส่เศษเหล็กครั้งที่ 2 และจะทำการส่งไฟฟ้าความต่างศักย์ 450 โวลต์อีกครั้งประมาณ 10 นาที ซึ่งลักษณะการปฏิบัติงานจะใช้เศษเหล็กเช่นนี้ทั้งหมด 3-4 ครั้ง แล้วแต่รอบการทำงาน ดังนั้นเมื่อพิจารณาอุณหภูมิน้ำเหล็ก 782°C ที่เวลาหลอม 20 นาที จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสมเหตุสมผล สมการแบบจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าหาได้จากความชันของจุดอุณหภูมิเริ่มต้นสมการที่ (4.44) มาลากตัดเส้นแกนเวลา และจำลองสมการใหม่ได้ดังนี้

$$T_{st}(t) = \left[\left(\frac{4500}{119} \right) (t - 13.5) \right] + 489; \quad (t < 40 \text{ min or } (2400\text{s})) \quad (4.45)$$

เมื่อ T_{st} คือ อุณหภูมิของน้ำเหล็กที่จำลองขึ้นตามเวลาโดยเริ่มต้นอุณหภูมิที่

$$T_{st(t=40\text{m.})} = 1499^{\circ}\text{C}$$

t คือ เวลาของการหลอมเหล็ก (min.)



รูปที่ 4.26 กราฟตัวแทนอุณหภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเทียบกับเวลา

บทที่ 5

การประยุกต์ใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ระบบช่วยควบคุมการทำงานของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าสร้างขึ้นเพื่อประหยัดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต ด้วยการทำนายอุณหภูมิการเหน้าเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กให้เหมาะสมกับสภาวะทางความร้อนของรอบการทำงานถัดไป การจำลองสภาวะทางความร้อนของเข้ารับน้ำเหล็กที่ถูกต้องแม่นยำจะทำให้สามารถควบคุมการใช้พลังงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าลงได้

5.1 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กตลอดระยะเวลาการปฏิบัติงานจริง

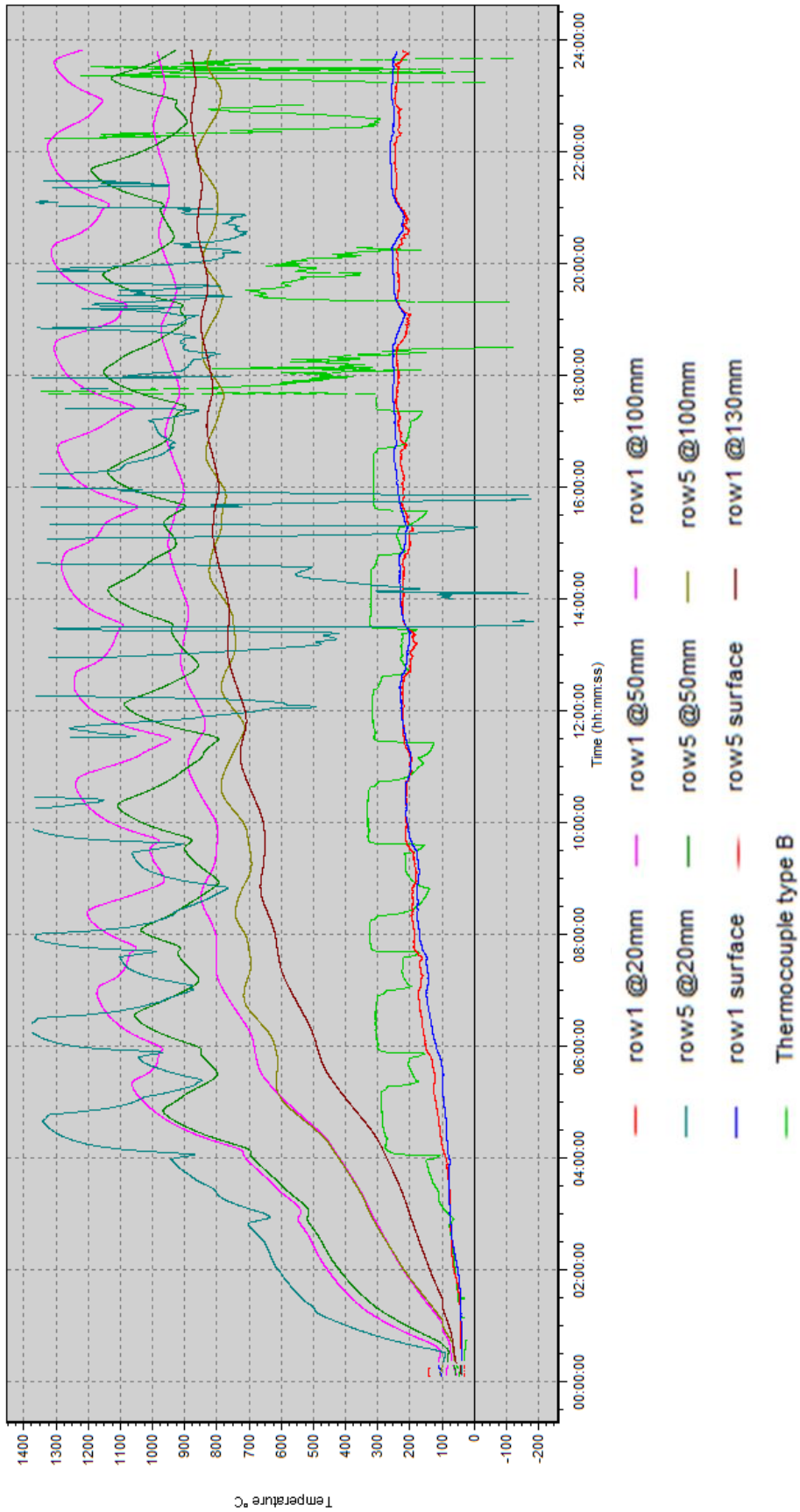
จากการเก็บบันทึกข้อมูลการปฏิบัติงานจริงของโรงงานที่ร่วมโครงการ โดยสามารถเก็บข้อมูลได้ทั้งสิ้น 11 รอบการทำงาน โดยการปฏิบัติงานใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการตรวจวัดอุณหภูมิภายในผนังเข้ารับน้ำเหล็ก ข้อมูลจากการตรวจวัดได้แสดงในรูปที่ 5.1 และตารางที่ 5.1 แสดงรายละเอียดของกิจกรรมต่างๆในการปฏิบัติงาน อีกทั้งยังตรวจวัดข้อมูลอุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าแสดงดังตารางที่ 5.1

ตัวแปรอุณหภูมิที่ใช้แทนข้อมูลอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดมีดังต่อไปนี้

$$row1@20mm = T_{20,bw} (= T_{m3,bw}) \quad row5@20mm = T_{20,sw} (= T_{m3,sw})$$

$$row1@50mm = T_{50,bw} (= T_{m4,bw}) \quad row5@50mm = T_{50,sw} (= T_{m4,sw})$$

$$row1@100mm = T_{100,bw} (= T_{m5,bw}) \quad row5@100mm = T_{100,sw} (= T_{m5,sw})$$



รูปที่ 5.1 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดการทำงาน 11 รอบการทำงาน [5]

ตารางที่ 5.1 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานทั้งสิ้น 11 รอบการทำงาน [5]

Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิน้ำเหล็ก (°C)
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	
Heat 1	เข้าก่อใหม่ตั้งรอการใช้งาน	0	30	0:30	1717(t=243min.) 1680(t=246min.)
	อุ่นเข้าในแนวตั้ง	30	167	2:17	
	ติดตั้งประตูเลื่อน	167	175	0:07	
	อุ่นเข้าในแนวนอน	175	237	1:02	
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	237	241	0:04	
	เทน้ำเหล็ก(tapping)	241	243	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	243	246	0:03	
	รอปถ่ายน้ำเหล็ก(teeming)	246	259	0:13	
	ปล่อยน้ำเหล็กลงอ่างรับน้ำเหล็ก	259	310	0:51	
	เท Slag	310	315	0:05	
ล้างรูปถ่ายน้ำเหล็ก	315	320	0:05		
Heat 2	เผาจน	320	345	0:25	1680(t=352min.) 1676(t=354min.)
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	345	350	0:05	
	Tapping	350	352	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	352	354	0:02	
	รอ Casting	354	360	0:06	
	Casting	360	411	0:51	
	เท Slag	411	417	0:06	
	ล้างรู	417	420	0:03	
Heat 3	เผาจน	420	450	0:30	1692(t=457min.) 1678(t=459min.)
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	450	455	0:05	
	Tapping	455	457	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	457	459	0:02	
	รอ Casting	459	461	0:02	
	Casting	461	489	0:28	
	เท Slag	489	494	0:05	
	ล้างรู	494	523	0:29	

ตารางที่ 5.1 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานทั้งสิ้น 11 รอบการทำงาน [5] (ต่อ)

Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิหน้าเหล็ก (°C)
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	
Heat 4	เผาจน	523	560	0:37	1695(t=571min.) 1689(t=574min.)
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	560	569	0:09	
	Tapping	569	571	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	571	574	0:03	
	รอ Casting	574	583	0:09	
	Casting	583	630	0:47	
	เท Slag	630	636	0:06	
	ล้างรู	636	656	0:20	
Heat 5	เผาจน	656	661	0:05	1701(t=678min.) 1681(t=681min.)
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	661	677	0:16	
	Tapping	677	678	0:01	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	678	681	0:03	
	รอ Casting	681	688	0:07	
	Casting	688	733	0:45	
	เท Slag	733	748	0:15	
	ล้างรู	748	752	0:04	
Heat 6	เผาจน	752	792	0:40	1687(t=798min.) 1661(t=800min.)
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	792	796	0:04	
	Tapping	796	798	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	798	800	0:02	
	รอ Casting	800	812	0:12	
	Casting	812	860	0:48	
	เท Slag	860	874	0:14	
	ล้างรู	874	878	0:04	

ตารางที่ 5.1 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานทั้งสิ้น 11 รอบการทำงาน [5] (ต่อ)

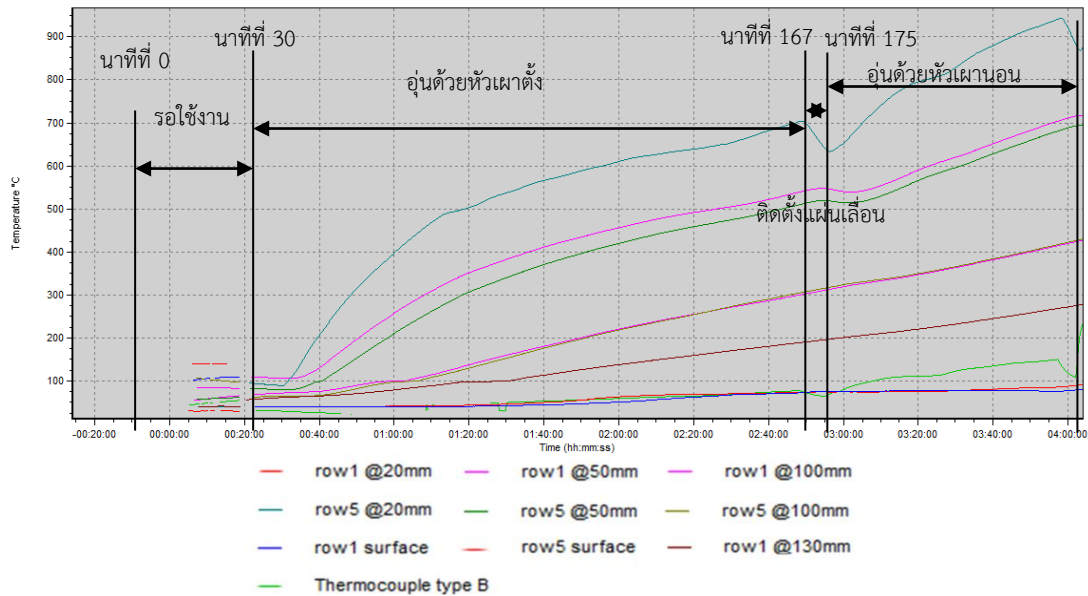
Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิหน้าเหล็ก (°C)
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	
Heat 7	เผาจน	878	903	0:25	1682(t=923min.) 1679(t=925min.)
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	903	920	0:17	
	Tapping	920	923	0:03	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	923	925	0:02	
	รอ Casting	925	930	0:05	
	Casting	930	982	0:52	
	เท Slag	982	987	0:05	
	ล้างรู	987	992	0:05	
Heat 8	เผาจน	992	1016	0:24	1695(t=1029min.) 1680(t=1031min.)
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	1016	1027	0:11	
	Tapping	1027	1029	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1029	1031	0:02	
	รอ Casting	1031	1038	0:07	
	Casting	1038	1091	0:53	
	เท Slag	1091	1098	0:07	
	ล้างรู	1098	1115	0:17	
Heat 9	เผาจน	1115	1130	0:15	1695(t=1138min.) 1703(t=1140min.)
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	1130	1136	0:06	
	Tapping	1136	1138	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1138	1140	0:02	
	รอ Casting	1140	1145	0:06	
	Casting	1145	1194	0:49	
	เท Slag	1194	1200	0:06	
	ล้างรู	1200	1204	0:04	

ตารางที่ 5.1 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานทั้งสิ้น 11 รอบการทำงาน [5] (ต่อ)

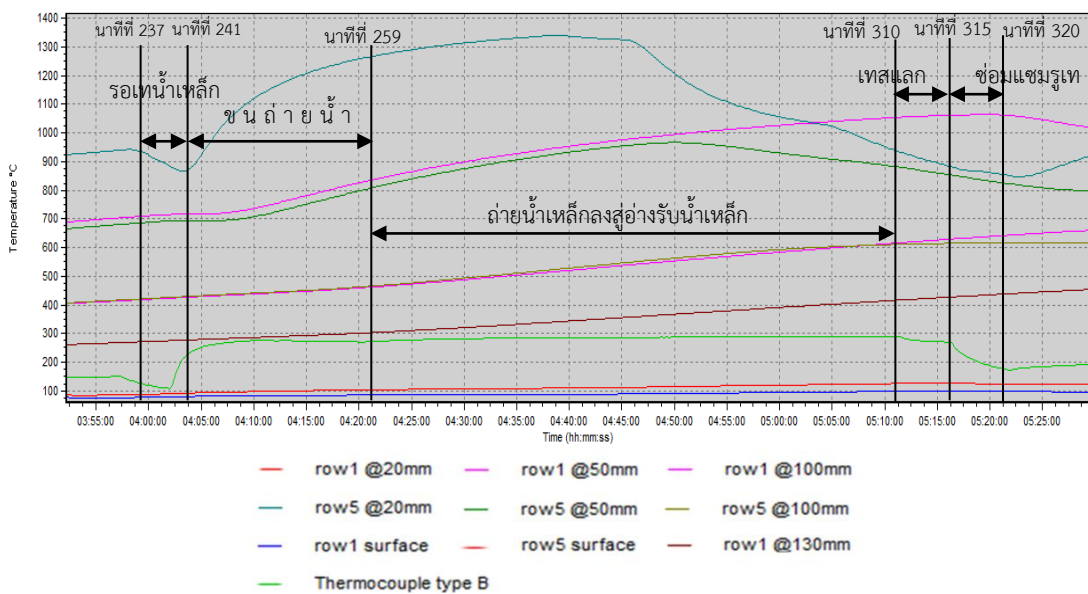
Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิหน้าเหล็ก ($^{\circ}\text{C}$)
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	
Heat 10	เผาจน	1204	1235	0:31	1700(t=1243min.) 1680(t=1246min.)
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	1235	1241	0:06	
	Tapping	1241	1243	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1243	1246	0:03	
	รอ Casting	1246	1256	0:10	
	Casting	1256	1304	0:48	
	เท Slag	1304	1316	0:12	
	ล้างรู	1316	1320	0:04	
Heat 11	เผาจน	1320	1342	0:22	1677(t=1353min.) 1663(t=1355min.)
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	1342	1350	0:08	
	Tapping	1350	1353	0:03	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1353	1355	0:02	
	รอ Casting	1355	1357	0:02	
	Casting	1357	1395	0:38	

5.1.1 วิเคราะห์ข้อมูลจากการตรวจวัด

ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจะเป็นลักษณะของการเก็บข้อมูลอุณหภูมิตลอดเวลาการทำงาน ทั้งสิ้น 11 รอบการทำงาน และสามารถยกตัวอย่างอธิบายรายละเอียดของรูปที่ 5.1 โดยแบ่งตามขั้นตอนการปฏิบัติงานได้ดังรูปที่ 5.2 และ รูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิเข้าน้ำเหล็กช่วงตำแหน่งการเตรียมเข้าน้ำเหล็กจนถึงสิ้นสุดกระบวนการอุ่นเข้าน้ำเหล็ก [5]



รูปที่ 5.3 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิเข้าน้ำเหล็กช่วงตำแหน่งเข้าน้ำเหล็กการเทน้ำเหล็กจนถึงสิ้นสุดกระบวนการการทำงาน [5]

ค่าคุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆของเบ้ารับน้ำเหล็กแสดงอยู่ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติและพารามิเตอร์ต่างๆของเบ้ารับน้ำเหล็ก

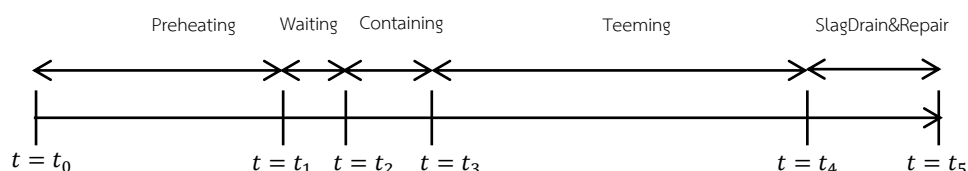
สมบัติ	รูปตัวแปร	ค่า	อ้างอิง
อิฐทนไฟ			
สภาพนำความร้อน	k_{re}	2.0 – 2.2 $W/m \cdot K$	[21]
ความหนาแน่น	ρ_{re}	2750 kg/m^3	[21]
ค่าความร้อนจำเพาะ	$c_{p,re}$	700 – 1300 $J/kg \cdot K$	[22]
ค่าการเปล่งรังสี	ϵ_{re}	0.9	[3]
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว	h_{re}	25 $W/m^2 \cdot K$	[3]
เปลือกเหล็ก			
ค่าการนำความร้อน	k_{st}	45 $W/m \cdot K$	[3]
ความหนาแน่น	ρ_{st}	7800 kg/m^3	[3]
ค่าความร้อนจำเพาะ	$c_{p,st}$	784 $J/kg \cdot K$	[23]
ค่าการเปล่งรังสี	ϵ_{re}	0.8	[22]
น้ำเหล็ก			
ค่าความร้อนจำเพาะ	$C_{p,ls}$	842 J/kgK	[10]
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว	h_{ls}	700 W/m^2K	[3]

5.2 ลำดับการใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบช่วยควบคุมการทำงาน

5.2.1 โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับการปฏิบัติงานจริง

โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับการปฏิบัติงานจริง ทำหน้าที่จำลองอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก และน้ำเหล็กที่อยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดทั้งกระบวนการ ให้มีค่าสถานะทางความร้อนเป็นไปตามกระบวนการผลิตจริงด้วยการสั่งการทำงานของโปรแกรมจำลองไปพร้อมกับการปฏิบัติงานจริง โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีลักษณะการทำงานที่คล้ายคลึงกับโปรแกรมแบบจำลองที่กิตติศักดิ์พัฒนาขึ้น งานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาจากโปรแกรมแบบจำลองเดิมให้สามารถใช้ตามเงื่อนไขจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมมากขึ้น โดยโปรแกรมแบบจำลองจะถูกแบ่งประเภทออกตามสถานะการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กเป็น 2 ประเภท คือ โปรแกรมแบบจำลองสำหรับเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่ (Green Ladle) และ โปรแกรมแบบจำลองสำหรับเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการรับน้ำเหล็กมาแล้ว (Used Ladle) โดยเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อใหม่จะมีกิจกรรมในแต่ละกระบวนการปฏิบัติงานที่คล้ายกัน จะแตกต่างกันตรงที่กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก นอกนั้นจะ

มีลำดับขั้นตอนการทำงานของกระบวนการที่เหมือนกันซึ่งสามารถแสดงได้ตามเส้นเวลาการทำงานดังรูปที่ 5.4 โดยเริ่มต้นที่กระบวนการอุ่น, การพัก, การขนย้ายเข้ารับน้ำเหล็ก, การเทน้ำเหล็กจากเข้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก และ สิ้นสุดที่กระบวนการนำสแลกไปเททิ้งและซ่อมแซมเข้ารับน้ำเหล็ก



รูปที่ 5.4 เส้นเวลาการทำงานของเข้ารับน้ำเหล็กในหนึ่งรอบการทำงาน

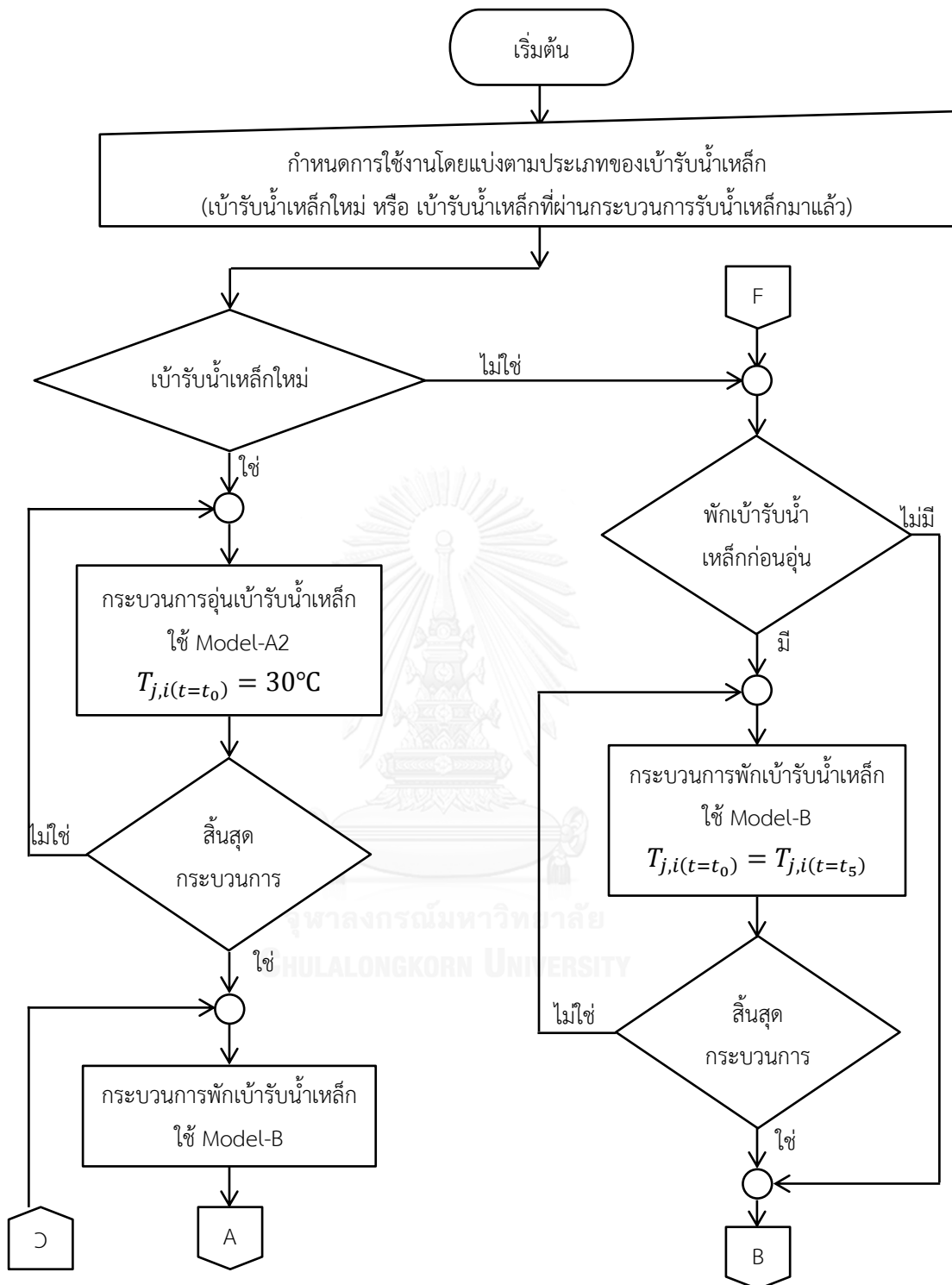
การสรุปลำดับการใช้งานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละกระบวนการของการจำลองกับการทำงานจริงสามารถแสดงด้วยแผนภาพสายงานดังรูปที่ 5.5 โดยมีตัวแปรสำคัญ และ รายละเอียดการใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

$T_{j,i}$ คือ อุณหภูมิภายในผนังเข้ารับน้ำเหล็ก

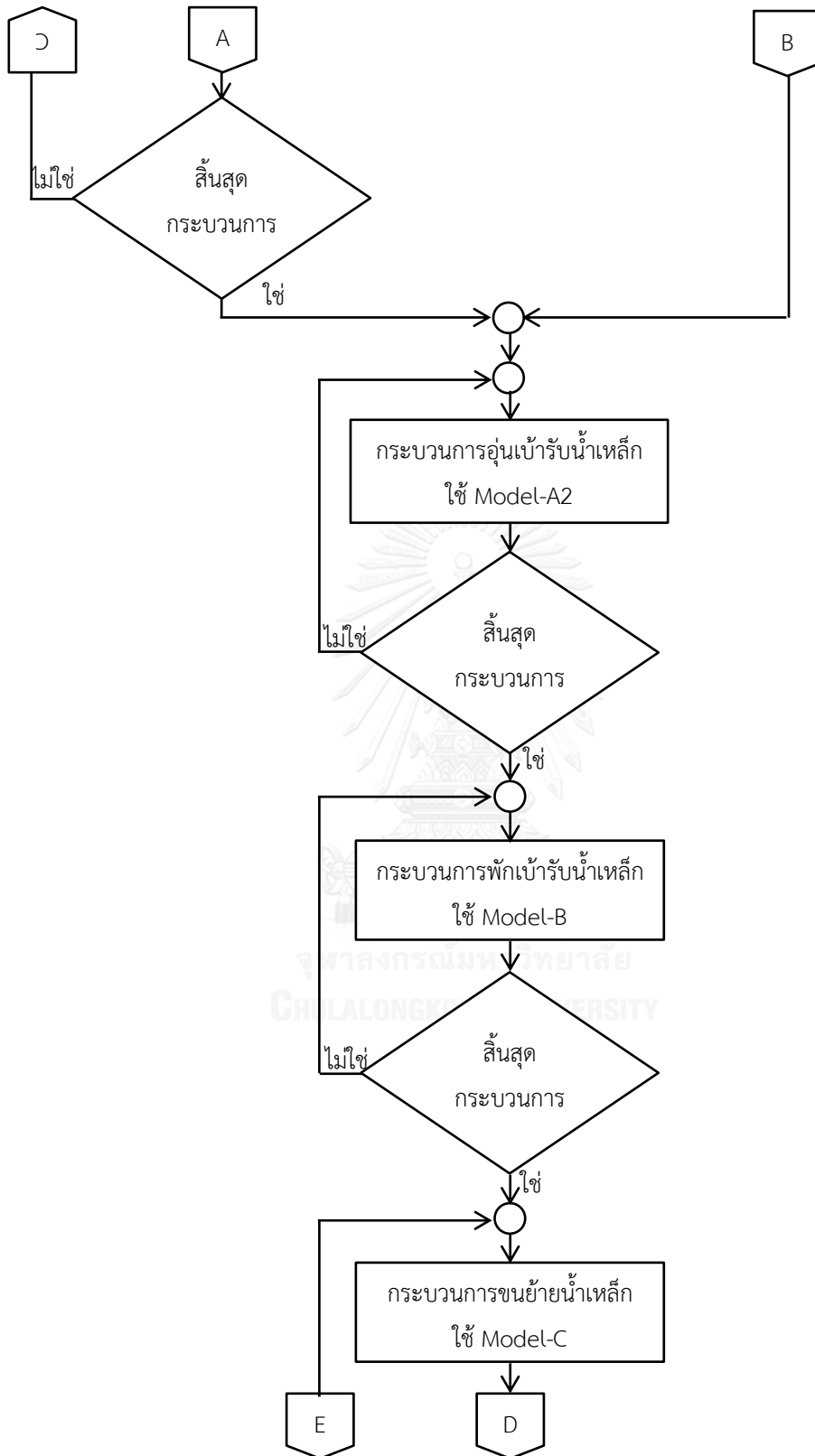
โดย " i " คือ ผนังด้านในเข้ารับน้ำเหล็ก sw =ผนังด้านข้าง, bw =ผนังด้านล่าง

" j " คือ จำนวนอิฐก้อนย่อยภายในผนังเข้ารับน้ำเหล็กที่ถูกแบ่งเป็น 6 ก้อน

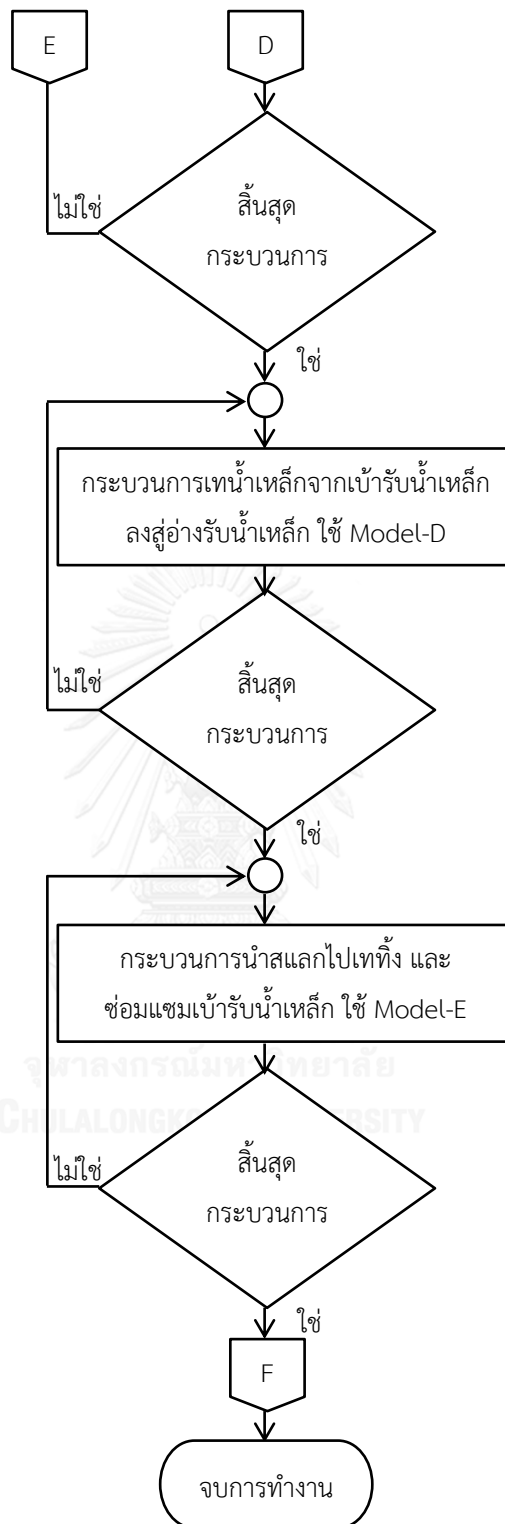
T_{st} คือ อุณหภูมิน้ำเหล็ก



รูปที่ 5.5 แผนภาพสายงานของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับการปฏิบัติงานจริง



รูปที่ 5.5 แผนภาพสายงานของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับการปฏิบัติงานจริง (ต่อ)



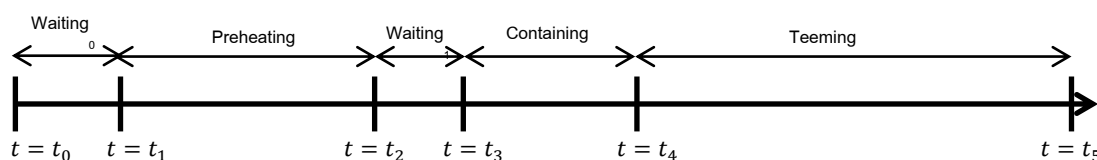
รูปที่ 5.5 แผนภาพสายงานของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับการปฏิบัติงานจริง (ต่อ)

จากรูปที่ 5.5 เป็นการแผนภาพสายงานของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับการปฏิบัติงานจริง โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแต่ละกระบวนการสามารถสรุปรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1. กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ใช้ Model-A2 ในหัวข้อย่อยที่ 4.5.1.1
2. กระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก ใช้ Model-B ในหัวข้อย่อยที่ 4.5.2
3. กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก ใช้ Model-C ในหัวข้อย่อยที่ 4.5.3
4. กระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ใช้ Model-D ในหัวข้อย่อยที่ 4.5.4
5. กระบวนการนำสแลกไปเททิ้งและซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็ก ใช้ Model-E ในหัวข้อย่อยที่ 4.5.5

5.2.2 โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำหน้าที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก จากการจำลองอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กของกระบวนการอุ่น, พัก, ขนย้ายเบ้ารับน้ำเหล็ก และเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก โปรแกรมแบบจำลองนี้จะทำงานก่อนที่จะเริ่มการปฏิบัติงานจริง นอกจากนี้เงื่อนไขเริ่มต้นของโปรแกรมแบบจำลองที่ใช้ คือ อุณหภูมิสุดท้ายของแต่ละสแตตที่กระบวนการก่อนหน้า และอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในเวลาปัจจุบัน โดยอาศัยข้อมูลเวลาการปฏิบัติงานของกระบวนการพัก, ขนย้าย และเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กของกระบวนการในอดีตมาจำลองสถานการณ์ ซึ่งสามารถลำดับชิ้นการทำงานของกระบวนการตามเส้นเวลาการทำงานได้ดังรูปที่ 5.6 โดยเริ่มต้นที่กระบวนการรอก่อนอุ่น, การอุ่น, การพัก, การขนย้ายเบ้ารับน้ำเหล็ก และการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก



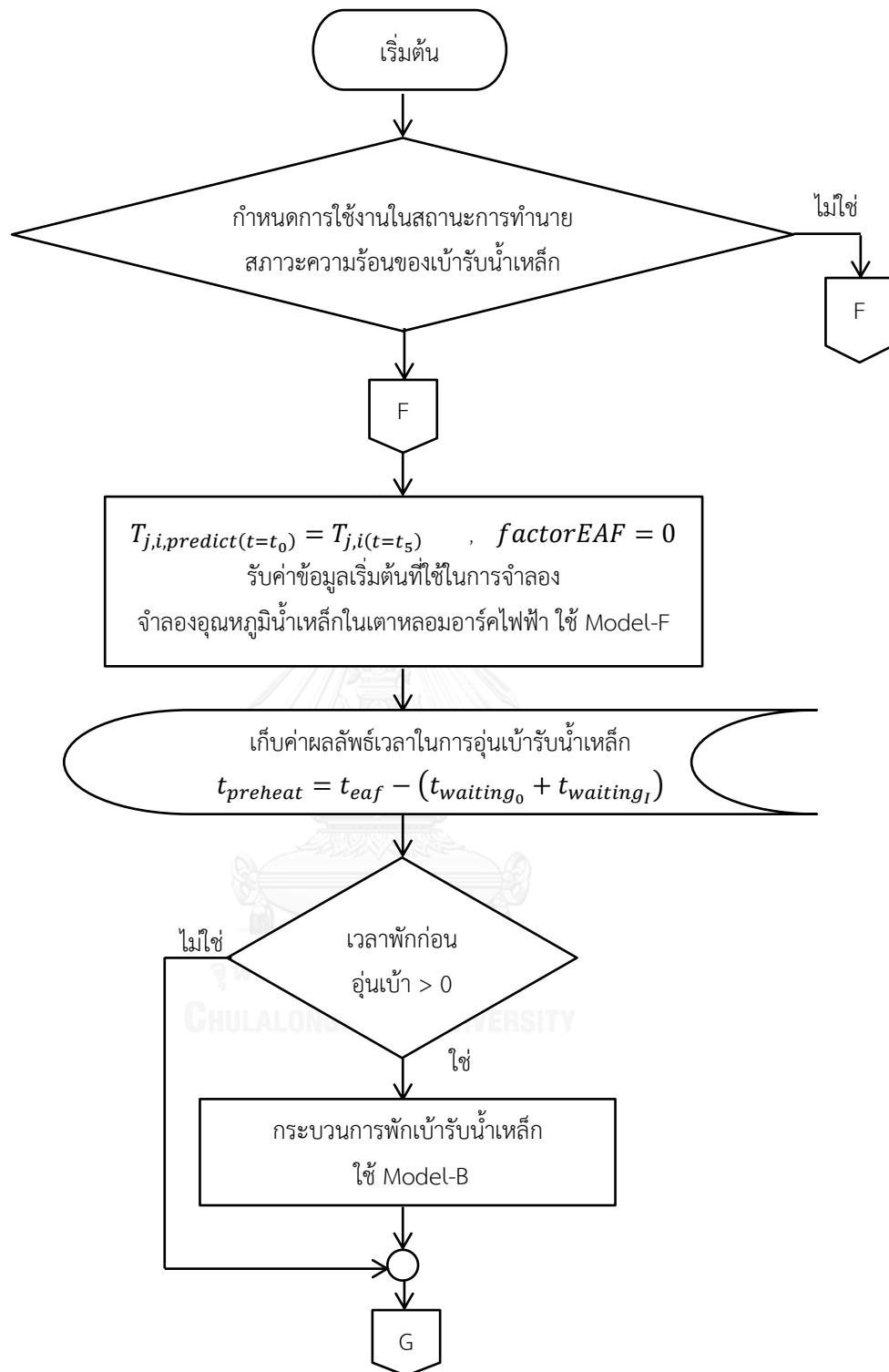
รูปที่ 5.6 เส้นเวลาการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กของการทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ข้อมูลเริ่มต้นที่ใช้ในการจำลองมีดังต่อไปนี้

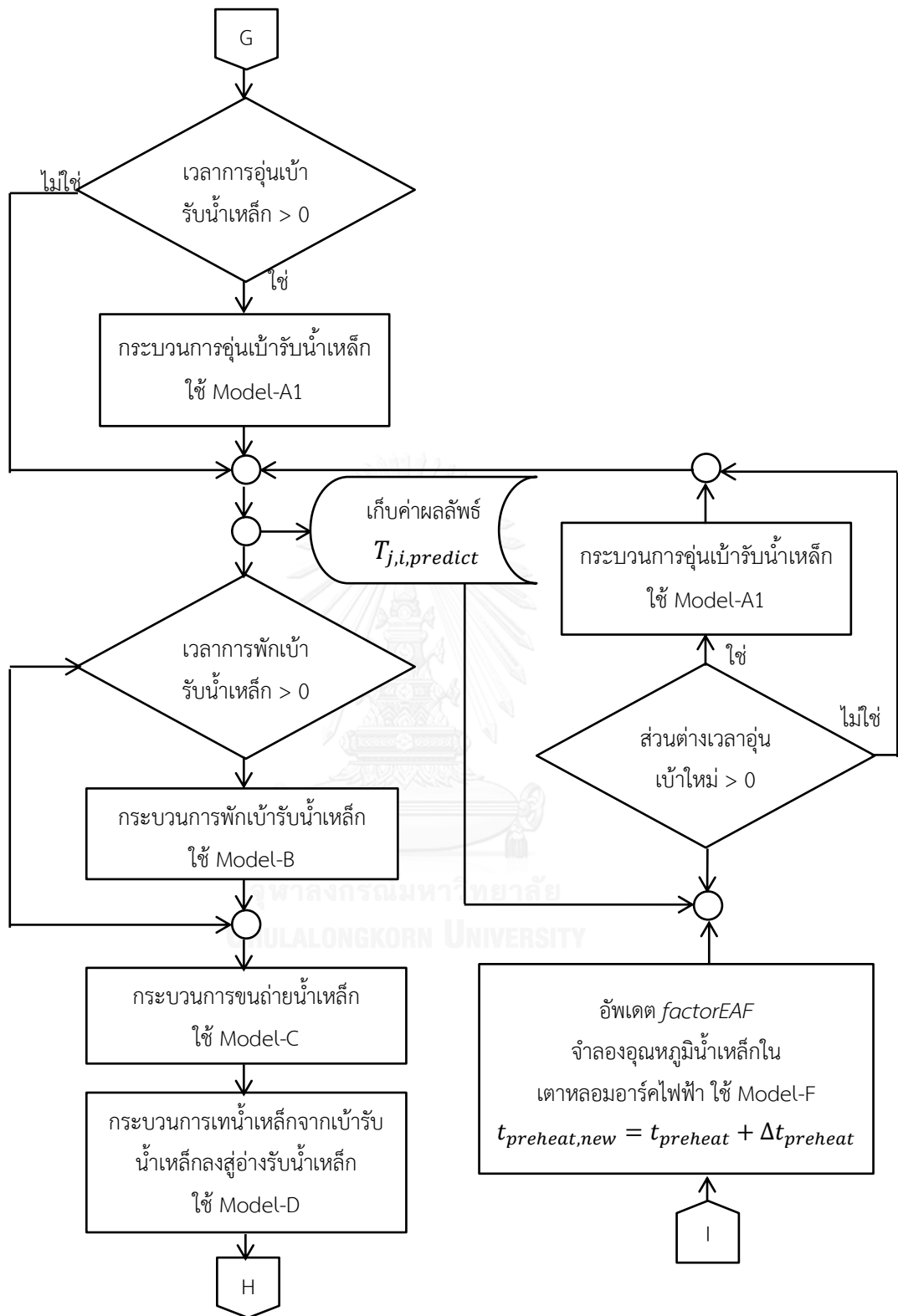
1. อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ณ เวลาปัจจุบัน
2. ประมาณเวลาพักเบ้ารับน้ำเหล็ก
3. ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กครั้งที่ 1
4. การประมาณเวลาของกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก 4 นาที, กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก 10 นาที และ กระบวนการเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก 52 นาที

การสรุปลำดับการใช้งานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในแต่ละกระบวนการของการจำลองกับการทำงานจริงสามารถแสดงด้วยแผนภาพสายงานดังรูปที่ 5.7 โดยมีตัวแปรสำคัญ และรายละเอียดการใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

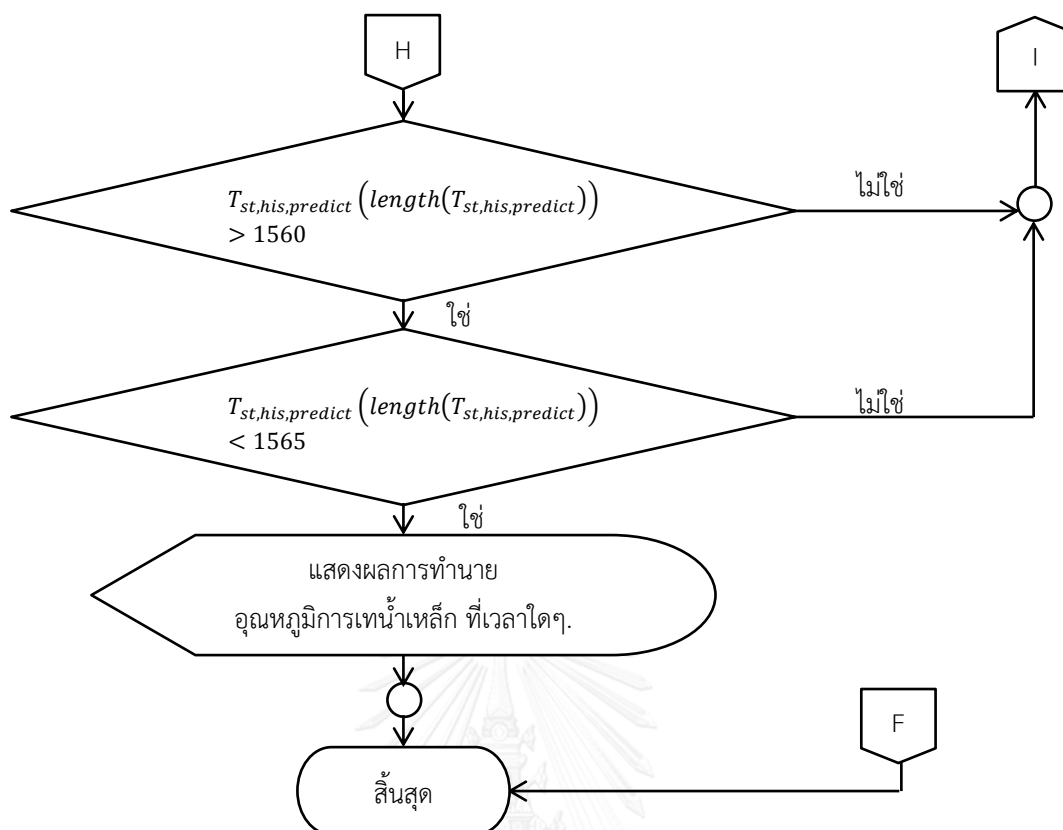
- $T_{j,i,predict}$ คือ อุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กสำหรับการทำนาย
 โดย " i " คือ ผนังด้านในเบ้ารับน้ำเหล็ก sw =ผนังด้านข้าง, bw =ผนังด้านล่าง
 " j " คือ จำนวนอิฐก้อนย่อยภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ถูกแบ่งเป็น 6 ก้อน
- $T_{st,predict}$ คือ อุณหภูมิน้ำเหล็ก



รูปที่ 5.7 แผนภาพสายของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเข้รับน้ำเหล็ก



รูปที่ 5.7 แผนภาพสายของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก (ต่อ)



รูปที่ 5.7 แผนภาพสายของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (ต่อ)

5.3 การเปรียบเทียบลำดับขั้นการทำงานของระบบช่วยควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น

ระบบช่วยควบคุมการทำงานของกิจตศักดิ์ และ ระบบช่วยควบคุมการทำงานที่งานวิจัยนี้ได้พัฒนาขึ้น มีลักษณะการทำงานเหมือนกันในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พร้อมกับการปฏิบัติการจริงของเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ แต่สำหรับเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการรับน้ำเหล็กมาแล้วจะถูกพัฒนาแบบจำลองขึ้น ทำให้สามารถจำลองอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก และน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กได้แม่นยำมากยิ่งขึ้นดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ตารางเปรียบเทียบการทำงานของระบบช่วยควบคุม

ระบบช่วยควบคุมการทำงานของกิจจติคักดี	ระบบช่วยควบคุมการทำงานที่พัฒนาขึ้น
<p><u>ขั้นการทำงาน</u></p> <p>1.) จำลองสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กตามเวลาของกระบวนการที่กำหนดไว้ทั้งสิ้น 6 กระบวนการ (ยกตัวอย่างรอบการทำงานที่ 2) กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (25 นาที) กระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก (5 นาที) กระบวนการขนย้ายน้ำเหล็ก (10 นาที) กระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก (51 นาที) กระบวนการนำสแลกไปเททิ้ง (5 นาที) กระบวนการซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็ก (5 นาที)</p> <p>2.) รับค่าอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่ใช้ในการปฏิบัติงานจริง มาจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็ก และเมื่อสิ้นสุดการจำลองการทำงานของกระบวนการซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็ก ระบบช่วยควบคุมจะแนะนำอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสมสำหรับรอบการทำงานนี้</p>	<p><u>ขั้นการทำงาน</u></p> <p>1.) จำลองสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กตามเวลาการปฏิบัติงานจริงที่จะเกิดขึ้น ด้วยการ ทำงานของแบบจำลองควบคู่กับการปฏิบัติงานจริง ส่วนที่เพิ่มที่ได้พัฒนาขึ้นมีหน้าที่ปรับปรุงสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กในแบบจำลองให้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้นดังต่อไปนี้</p> <p>1.1) การเพิ่มกระบวนการพักก่อนอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก $Waiting_0$</p> <p>1.2) ปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กระบวนการขนย้ายน้ำเหล็ก ให้สามารถอัปเดตอุณหภูมิน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กได้ 2 ครั้ง ตามลักษณะการทำงาน</p> <p>1.3) การทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กจะย้ายไปอยู่ในแบบจำลองขั้นการทำงาน</p> <p><u>ขั้นการทำงาน</u></p> <p>1.) จำลองสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กตามการประมาณค่าเวลาในอดีตของแต่ละกระบวนการ</p> <p>2.) รับค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กที่วัดจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้ในการคาดเดาอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก โดยที่จะอัปเดตวนรอบการคำนวณอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กที่คาดเดา และมีเงื่อนไขในการคาดเดาที่ว่า เมื่อสิ้นสุดกระบวนการเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก อุณหภูมิน้ำเหล็กต้องมีค่ามากกว่า $1,560^{\circ}\text{C}$</p> <p>3.) $t_{preheat}$ ได้จากการประมาณเวลา t_{eaf}</p>

บทที่ 6

ผลการศึกษาวิจัย

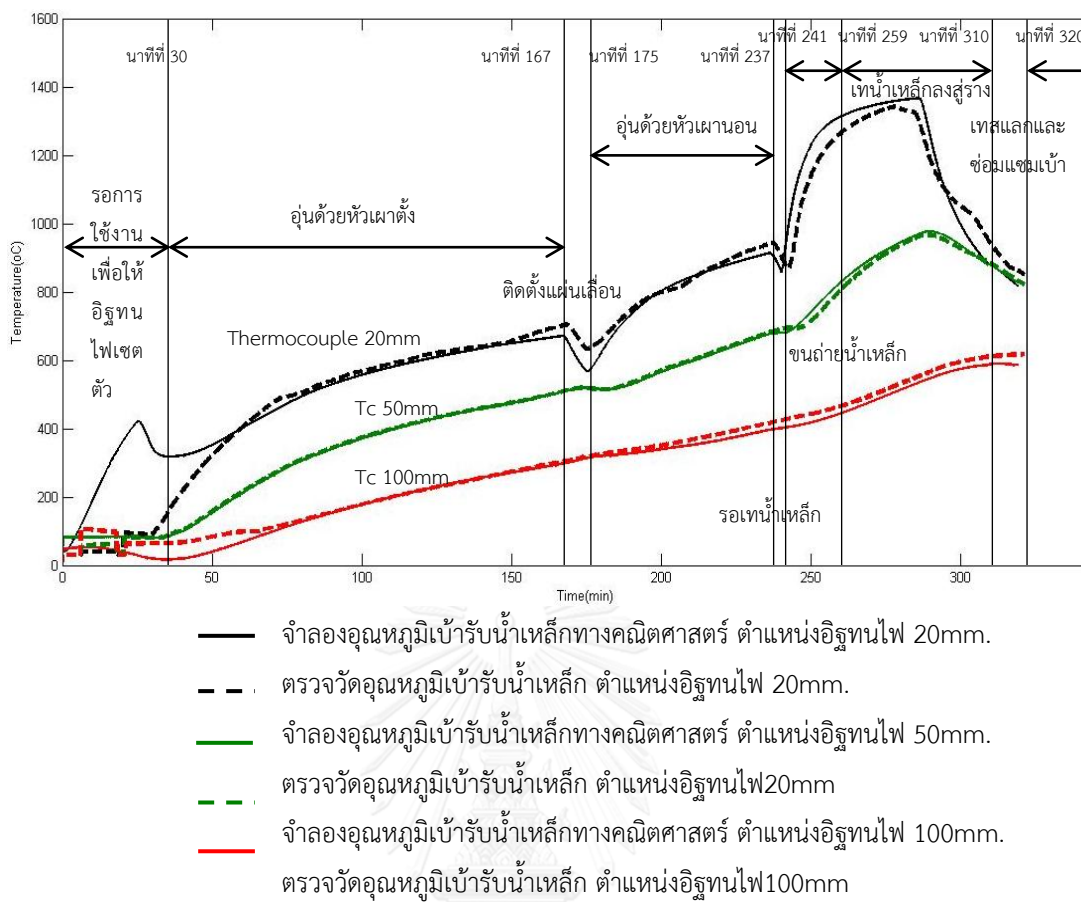
วัตถุประสงค์หลักของการพัฒนาระบบช่วยควบคุมการทำงานที่ออกแบบขึ้น คือ ต้องการประหยัดพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ด้วยการทำนายอุณหภูมิการเหน้าเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กให้เหมาะสมกับสภาวะทางความร้อนของเข้ารับน้ำเหล็ก ดังนั้นการทำนายค่าอุณหภูมิการเหน้าเหล็กให้สามารถนำไปใช้ปฏิบัติงานได้จริงเป็นการชี้วัดผลความแม่นยำของระบบช่วยควบคุมการทำงาน

6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

6.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่บันทึกการทำงานจริง

โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับการปฏิบัติงานจริงทำหน้าที่จำลองอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กจากเวลา และอุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเข้ารับน้ำเหล็กที่ใช้เวลาในการปฏิบัติงานจริง ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะเป็นตัวชี้วัดว่าสามารถนำแบบจำลองชิ้นการทำงานมาใช้ปฏิบัติงานจริงได้ดังรูปที่ 6.1

จากรูปที่ 6.1 คือการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตรวจวัดของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่ตำแหน่งการวัด 20mm, 50mm และ 100mm ตามลำดับ (ชิ้นการทำงาน) ซึ่งผลลัพธ์อุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กของแบบจำลองได้จากการนำผลการตรวจวัดที่ตำแหน่ง 50mm. เข้ามาประมาณค่าอุณหภูมิผั่งเข้ารับน้ำเหล็กที่กระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก, เทสแลกและซ่อมแซมเข้ารับน้ำเหล็ก ดังนั้นผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิของทั้ง 2 กระบวน จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไปในทิศทางเดียวกัน แต่สำหรับผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิตำแหน่ง 20mm. จะเกิดความคลาดเคลื่อนของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพราะมีการติดตั้งแผ่นเลื่อน ทำให้ต้องหยุดการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแบบจำลองลดลงมากกว่าผลการตรวจวัด นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตรวจวัดของเข้ารับน้ำเหล็กที่กระบวนการรอเหน้าเหล็ก ขนถ่ายน้ำเหล็ก และ เหน้าเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กจะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นผลการจำลองอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ผลการตรวจวัดตำแหน่ง 50mm สามารถนำมาใช้ประมาณค่าอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งอื่นได้เพื่อประเมินศักยภาพความประหยัดได้



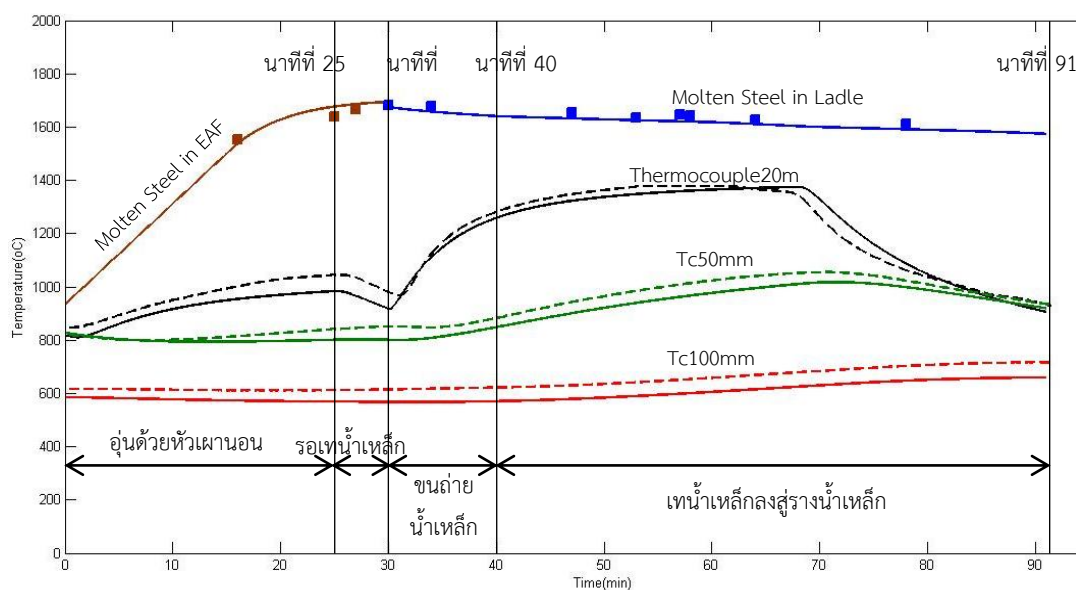
รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตรวจวัดของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าพร้อมกับการปฏิบัติงานจริงที่ตำแหน่งการวัด 20mm, 50mm และ 100mm ตามลำดับ

6.1.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กทำหน้าที่ทำนายค่าอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กให้เหมาะสมกับสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนเริ่มรอบการทำงานใหม่อีกครั้ง ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองจะเป็นตัวชี้วัดว่าสามารถนำแบบจำลองขึ้นการทำนายมาใช้งานได้จริงดังรูปที่ 6.2

จากรูปที่ 6.2 คือการเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตรวจวัดของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่ตำแหน่งการวัดเบ้ารับน้ำเหล็ก

20mm, 50mm และ 100mm ตามลำดับ (ชั้นการทำนาย) ซึ่งจะใช้ตำแหน่ง 50mm เป็นค่าตัวแทน เริ่มต้นของอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กตลอดทั้งกระบวนการทำนาย วิธีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง คือการเปรียบเทียบกันระหว่างอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็ก อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และอุณหภูมิน้ำเหล็กในเข้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัด และผลการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการหาผลลัพธ์ของการทำนายของอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในกระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กต่อไป



- จำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า
- ตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า
- จำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กในเข้ารับน้ำเหล็ก
- ตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเข้ารับน้ำเหล็ก
- จำลองอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กทางคณิตศาสตร์ ตำแหน่งอิฐทนไฟ 20mm.
- - - ตรวจวัดอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็ก ตำแหน่งอิฐทนไฟ 20mm
- จำลองอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กทางคณิตศาสตร์ ตำแหน่งอิฐทนไฟ 50mm.
- - - ตรวจวัดอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็ก ตำแหน่งอิฐทนไฟ 50mm
- จำลองอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กทางคณิตศาสตร์ ตำแหน่งอิฐทนไฟ 100mm.
- - - ตรวจวัดอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็ก ตำแหน่งอิฐทนไฟ 100mm

รูปที่ 6.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างผลการตรวจวัดกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก สำหรับการวัดอุณหภูมิเข้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 20mm, 50mm และ 100mm ตามลำดับ

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของเบ้ารับน้ำเหล็กสามารถจำแนกได้ตามกระบวนการ พบว่า ช่วง 5-10 นาทีแรกของกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 50mm และ 100mm มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กไปในทิศทางเดียวกัน และเกิดความคลาดเคลื่อนสะสมเล็กน้อยในช่วงหลัง สำหรับที่กระบวนการอื่น ๆ มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กเล็กน้อยเช่นเดียวกันเพราะค่าอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กสิ้นสุดกระบวนการไม่เท่ากัน แต่สำหรับตำแหน่ง 20mm มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กช่วงที่มีน้ำเหล็กอยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กสูงมาก เพราะเป็นตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับน้ำเหล็กมากที่สุด และเวลาของการเริ่มต้นตรวจวัด ก็กับการจำลองมีความล่าช้าไม่เท่ากัน

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของอุณหภูมิในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า พบว่า ผลการคำนวณอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทิศทางเดียวกัน

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็ก พบว่า แบบจำลองอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็ก มีค่าอุณหภูมิต่ำกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดที่เวลาเดียวกันเล็กน้อยเพราะป้อนข้อมูลการตรวจวัดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กแค่จุดเดียว นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิไปในทิศทางเดียวกัน จึงมีความเห็นว่า สามารถพัฒนาแบบจำลองได้ด้วยวิธีการเพิ่มอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัดช่วงก่อนเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กเข้าไปในแบบจำลองชิ้นการทำงาน ส่งผลให้การจำลองอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กมีความใกล้เคียงกับการปฏิบัติงานมากขึ้น

6.1.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

การตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า คือ การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในเวลาใดเวลาหนึ่ง เวลาที่จะใช้ในการตรวจสอบความถูกต้อง คือ เวลาในการปฏิบัติงานจริงของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่เวลาเริ่มต้นของรอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กครั้งใหม่ หรือ เวลาที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าพร้อมเทน้ำเหล็ก ซึ่งผลลัพธ์ของการตรวจสอบความถูกต้องจะนำมาเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กจากการปฏิบัติงานจริง และอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เวลาเดียวกันแสดงดังตารางที่ 6.1 นอกจากนี้ปริมาณค่าความผิดพลาดของการจำลองอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีค่าน้อยจะถือได้ว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ จากการผลการตรวจสอบสามารถจำลองค่าอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก ได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กที่เวลาปฏิบัติงานเหมือนกัน โดยมีค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ของการจำลองอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กที่คาดเคลื่อน พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะจำลองอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กคาดเคลื่อนจากความเป็นจริงเท่ากับ

$(2.56 \pm 1.77)^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นแบบจำลองที่เขียนขึ้นสามารถจำลองอุณหภูมิการเหนี่ยวนำเหล็กในชั้นทำนายได้จริง

ตารางที่ 6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการผลิตน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าจากการตรวจวัด

Heat No.	อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอม ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาที่เตาหลอมใช้เพิ่ม (min)	อุณหภูมิเหนี่ยวนำเหล็กจริง ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิเหนี่ยวนำเหล็กที่จำลองได้ ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าความผิดพลาด ($^{\circ}\text{C}$)	ร้อยละความผิดพลาด
Heat 2	950	30	1,680	1,682	2	0.12
Heat 3	784	35	1,692	1,696	4	0.24
Heat 4	368	46	1,695	1,696	1	0.06
Heat 5	1,389	21	1,701	1,700	-1	-0.06
Heat 6	443	44	1,687	1,696	9	0.53
Heat 7	368	42	1,682	1,686	4	0.24
Heat 8	784	35	1,695	1,696	1	0.06
Heat 9	1,313	21	1,695	1,696	1	0.06
Heat 10	708	37	1,700	1,702	2	0.12
ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาด					2.56	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน					2.71	
ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95					$2.56 \pm 1.77^{\circ}\text{C}$	

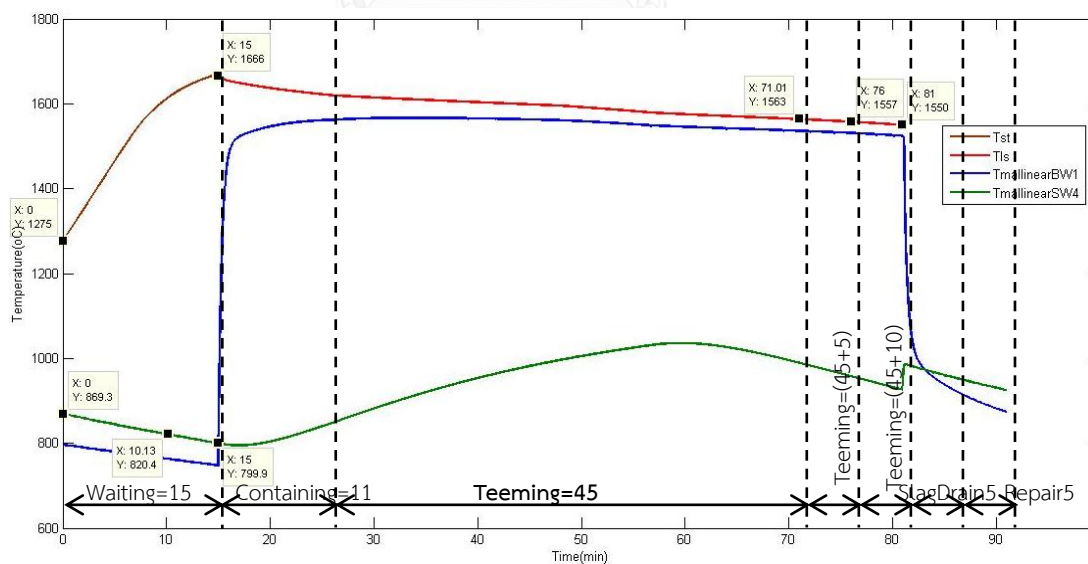
6.1.4 การตรวจสอบการประมาณเวลาของกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก

การตรวจสอบการประมาณค่าเวลาของกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก ใช้ในการพิสูจน์ผลของความคลาดเคลื่อนของการประมาณเวลากระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กที่น้อยเกินไป จะส่งผลให้สถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กลดลง โดยชี้วัดได้จากการลดลงของค่าตัวแทนอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยจะแบ่งอุณหภูมิสิ้นสุดกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 ($850 - 900$) $^{\circ}\text{C}$ และ ช่วงที่ 2 901°C ขึ้นไป พบว่าอัตราการลดลงของอุณหภูมิตัวแทนเบ้ารับน้ำเหล็กในช่วงที่ 1 คือ $2.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และช่วงที่ 2 มีค่าเท่ากับ $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ เบ้ารับน้ำเหล็กที่อยู่ในกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกวางทิ้งไว้ โดยไม่มีฝาปิดที่ปากเบ้ารับน้ำเหล็กส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อน และการพาความร้อน

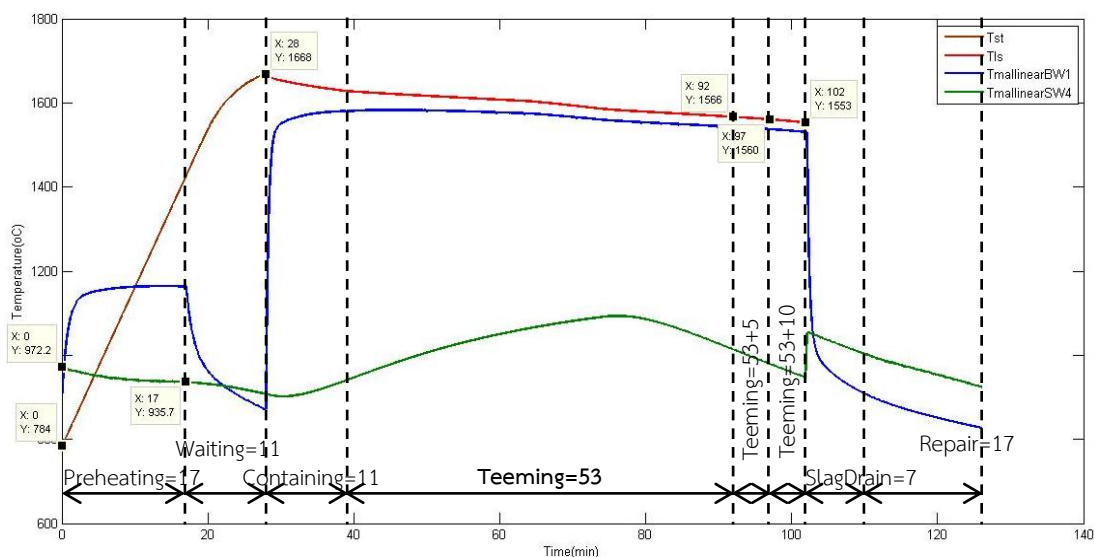
ที่ผิวผนังเบ้ารับน้ำเหล็กสู่บรรยากาศภายนอก ยิ่งผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีค่าอุณหภูมิที่สูง จะส่งผลให้อัตราการลดลงของค่าอุณหภูมิค่าตัวแทนเบ้ารับน้ำเหล็กมากขึ้นด้วย

6.1.5 การตรวจสอบการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ

การตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กพิจารณาที่ใช้ข้อมูลภูมิการเทน้ำเหล็กที่แบบจำลองขั้นการทำนายแนะนำจะสามารถนำไปใช้ในแบบจำลองขั้นทำงานด้วยการเพิ่มระยะเวลาของกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กเดิม 45 นาที เปลี่ยนเป็น 55 นาที (เพิ่มจากเวลาเดิม 10 นาที และก็เพิ่มจากเวลาเฉลี่ย 5 นาที) เพื่อจะพิสูจน์ให้ได้ว่าถ้าใช้ข้อมูลภูมิการเทน้ำเหล็กที่แบบจำลองขั้นการทำนายแนะนำ จะสามารถนำอุณหภูมิดังกล่าวไปใช้งานได้มากน้อยเพียงใดดังรูปที่ 6.3 และ รูปที่ 6.4 ผลการตรวจสอบคือ เมื่อเพิ่มเวลาการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กเป็น 50 และ 55 นาที จะส่งผลให้การจำลองน้ำเหล็กที่สิ้นสุดกระบวนการเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กมีค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กเท่ากับ $1,557^{\circ}\text{C}$ และ $1,550^{\circ}\text{C}$ ตามลำดับ การประมาณเวลาของกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่เวลา 45 นาทีสามารถเพื่อเวลาการประมาณได้สูงสุด 10 นาที มิฉะนั้นจะทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดกระบวนการมีค่าน้อยกว่า $1,550^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะเกิดการแข็งตัวของน้ำเหล็กที่บริเวณประตูเลื่อน



รูปที่ 6.3 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการขยายเวลาของกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่เวลาเดิม 45 นาที



รูปที่ 6.4 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการขยายเวลาของกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่เวลาเดิม 53 นาที

6.2 การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงาน

6.2.1 ผลจากการใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานในการทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เหมาะสม

เป้าหมายของการใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงาน คือ การทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เหมาะสมซึ่งเมื่อนำไปใช้แล้วจะทำให้อุณหภูมิที่ปล่อยลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กในขั้นสุดท้ายไม่ต่ำกว่าค่าที่กำหนดให้ การทำงานของโปรแกรมแบบจำลองจะต้องกำหนดค่าเริ่มต้น ซึ่งเป็นค่า ณ เวลาเริ่มต้นรอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ได้แก่ ค่าอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก และค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ณ ขณะนั้น นอกจากนี้จำเป็นต้องประมาณเวลาของแต่ละขั้นตอนหรือกระบวนการ ซึ่งในที่นี้จะใช้ค่าเวลาเฉลี่ยจากข้อมูลการทำงานจริง คือ กระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก 4 นาที, กระบวนการขนย้ายน้ำเหล็ก 10 นาที และกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก 52 นาที ดังนั้นผลการทดลองระบบช่วยควบคุมจะแสดงผลคือ ผลการทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก, เวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และอุณหภูมิน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดกระบวนการปล่อยน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ดังแสดงในตารางที่ 6.2

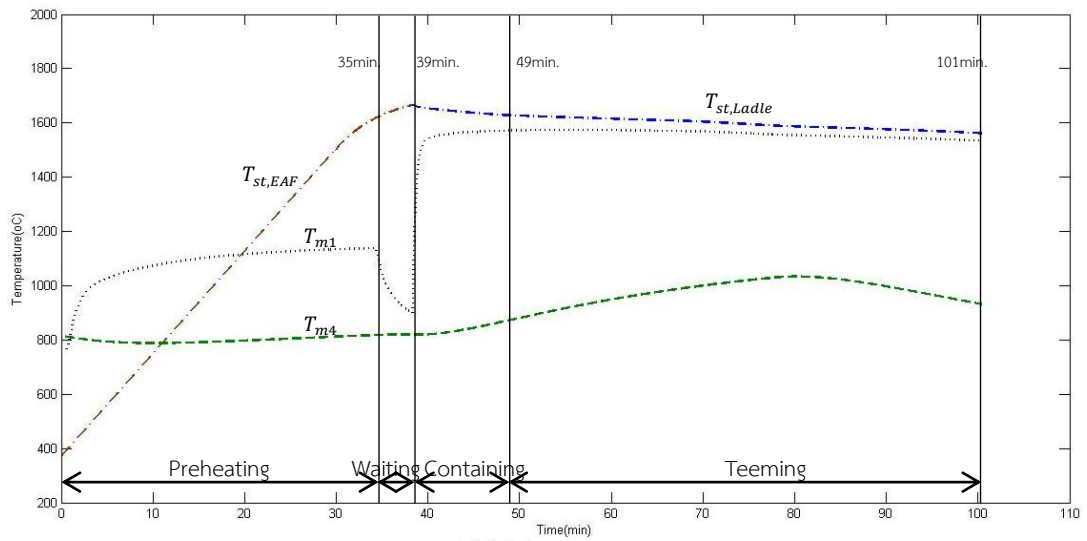
ตารางที่ 6.2 ผลการทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่รอบการทำงานต่างๆเมื่อใช้เวลาเฉลี่ยของแต่ละกระบวนการ

Heat No.	อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กเริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมเริ่มต้น (°C)	ผลการทำนาย		
			อุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก (°C)	เวลาอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (min.)	อุณหภูมิน้ำเหล็กสิ้นสุดกระบวนการ (°C)
Heat 2	827	950	1,669	20	1,562
Heat 3	880	784	1,639	21	1,561
Heat 4	816	368	1,667	35	1,562
Heat 5	870	1,389	1,667	8	1,561
Heat 6	878	443	1,663	32	1,561
Heat 7	955	368	1,661	34	1,561
Heat 8	972	784	1,660	23	1,561
Heat 9	926	1,313	1,665	10	1,562
Heat 10	955	708	1,660	25	1,561

จากตารางที่ 6.2 สามารถจำแนกผลลัพธ์การตัดสินใจของการทำนายออกเป็น 3 กรณี

1. กรณีที่ 1 ทำการตัดสินใจอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

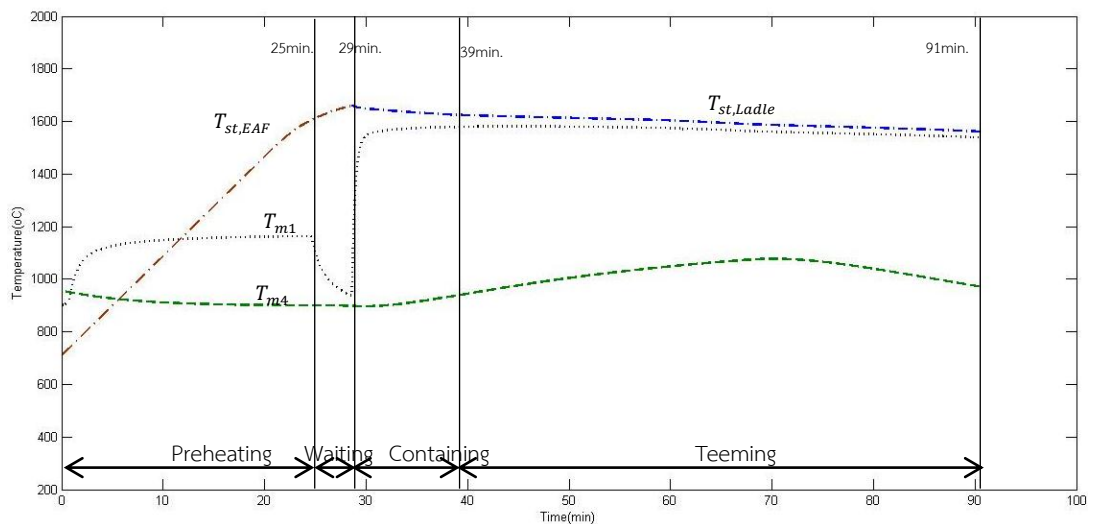
กรณีที่ 1 ทำการตัดสินใจอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจากเงื่อนไขอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กเริ่มต้น $T_{m4,sw} < 850^{\circ}\text{C}$ เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 6.2 พบว่ารอบการทำงานที่ 2 และ 4 มีค่าตามเงื่อนไข และแสดงตัวอย่างรอบการทำงานที่ 4 ได้ดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ผลลัพธ์การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานของกรณีที่ 1 จำลองอุณหภูมิน้ำเหล็ก T_{st} และ อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก T_{m4} ตลอดทั้งกระบวนการของรอบการทำงานที่ 4

2. กรณีที่ 2 ทำการตัดสลิ้งใจอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

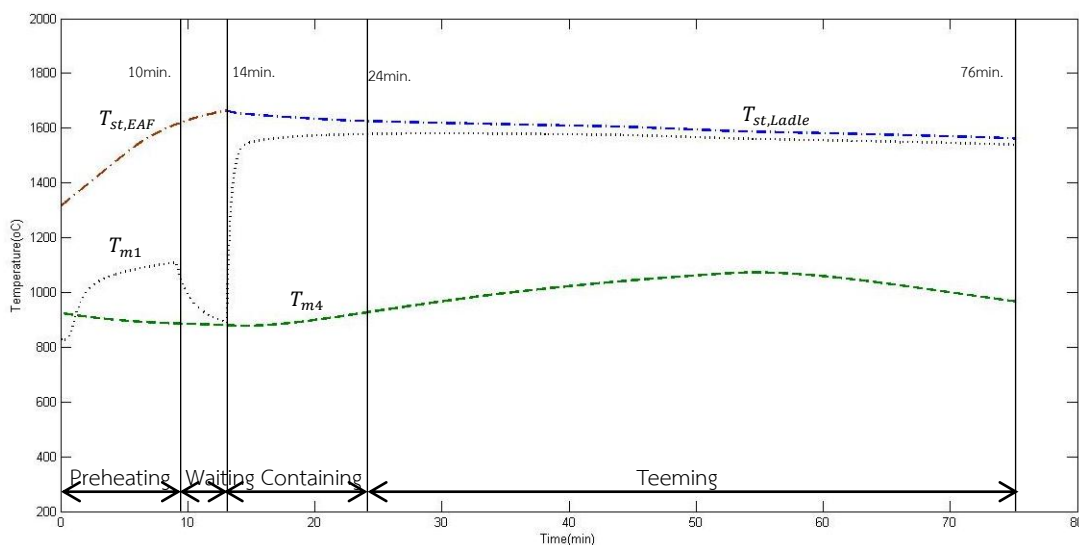
กรณีที่ 2 ทำการตัดสลิ้งใจอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจากเงื่อนไขอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กเริ่มต้น $T_{m4,sw} > 850^{\circ}\text{C}$ และเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าไม่พร้อมเทน้ำเหล็ก เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 6.2 พบว่ารอบการทำงานที่ 3, 6, 7, 8 และ 10 มีค่าตามเงื่อนไข และแสดงตัวอย่างรอบการทำงานที่ 10 ได้ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 ผลลัพธ์การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานของกรณีที่ 2 จำลองอุณหภูมิน้ำเหล็ก T_{st} และ อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก T_{m4} ตลอดทั้งกระบวนการของรอบการทำงานที่ 10

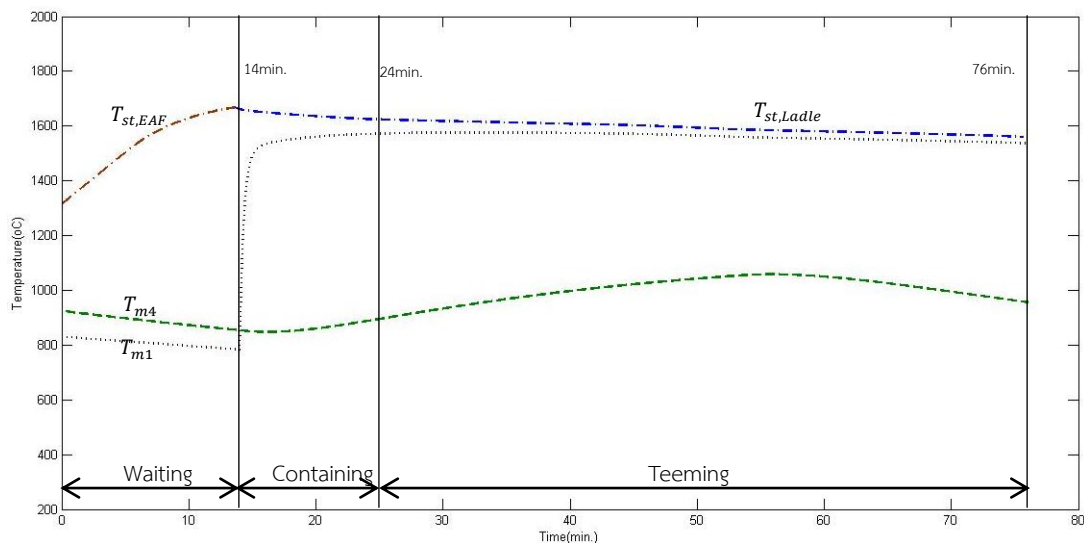
3. กรณีที่ 3 ทำการตัดสืนใจไม่อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

กรณีที่ 3 ทำการตัดสืนใจอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจากเงื่อนไขอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กเริ่มต้น $T_{m4,sw} > 850^{\circ}\text{C}$ แต่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าพร้อมเหน้าเหล็กภายในเวลา 10 นาที เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 6.2 พบว่ารอบการทำงานที่ 5 และ 9 มีค่าตามเงื่อนไข และแสดงตัวอย่างรอบการทำงานที่ 9 ได้ดังรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 ผลลัพธ์การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานของกรณีที่ 3 จำลองอุณหภูมิเหน้าเหล็ก T_{st} และอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก T_{m4} ตลอดทั้งกระบวนการของรอบการทำงานที่ 9

นอกจากนี้รอบการทำงานที่ 5 และ 9 ได้รับการทำนายเวลาการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กไม่เกิน 10 นาที ซึ่งสามารถยกเลิกการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กลงได้ ด้วยการเปลี่ยนเวลาการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเป็น 12 นาที และ 14 นาที ตามลำดับ โดยจะแสดงตัวอย่างรอบการทำงานที่ 10 ได้ดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 ผลลัพธ์การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานของกรณีที่ 3 จำลองอุณหภูมิน้ำเหล็ก T_{st} และอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก T_{m4} ตลอดทั้งกระบวนการของรอบการทำงานที่ 9 โดยยกเลิกการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

6.2.2 ผลลัพธ์การใช้ระบบช่วยควบคุมการทำงานทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กโดยใช้เวลาที่เกิดขึ้นจริงของกระบวนการต่างๆ

ระบบช่วยควบคุมการทำงานจากการใช้เวลาของกระบวนการต่างๆที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานจริง คือการทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเสมือนจริง หมายความว่าระบบช่วยควบคุมสามารถคาดการณ์เวลาล่วงหน้าของแต่ละกระบวนการได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงสูงมาก การทำงานของโปรแกรมแบบจำลองจะต้องกำหนดค่าเริ่มต้น คือ อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กเริ่มต้น และอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ณ เวลาเริ่มต้นรอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก นอกจากนี้จำเป็นที่จะต้องทราบเวลาของการกระบวนการต่างๆ คือ กระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก, กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก และ กระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ซึ่งจะใช้เวลาของแต่ละกระบวนการจากการปฏิบัติงานที่เกิดขึ้นจริงดังตารางที่ 5.1 ดังนั้นผลการทดลองระบบช่วยควบคุมจะแสดงค่าผลลัพธ์ คือ ผลการทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก, เวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และอุณหภูมิน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดกระบวนการดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เหมาะสมที่รอบการทำงานต่างๆโดยใช้เวลาที่เกิดขึ้นจากการปฏิบัติงานจริงของแต่ละกระบวนการ

Heat No.	อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก เริ่มต้น (°C)	อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอม เริ่มต้น (°C)	เวลาของกระบวนการที่เกิดขึ้น			ผลการทำนาย	
			รอการเทน้ำเหล็ก (min.)	ขนย้ายน้ำเหล็ก (min.)	เทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก (min.)	อุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก (°C)	เวลาที่ใช้ในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (min.)
Heat 2	827	950	5	10	51	1,666	18
Heat 3	880	784	5	6	28	1,628	19
Heat 4	816	368	9	14	47	1,672	31
Heat 5	870	1,389	16	11	45	1,666	0
Heat 6	878	443	4	16	48	1,670	33
Heat 7	955	368	17	10	52	1,668	22
Heat 8	972	784	11	11	53	1,668	17
Heat 9	926	1,313	6	10	49	1,662	7
Heat 10	955	708	6	15	48	1,666	24

โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กที่เหมาะสมทำหน้าที่จำลองสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก และ น้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กควบคู่ไปกับการปฏิบัติงาน โดยที่ถ้ามีการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายไปใช้ในการปฏิบัติงานจริงจะสามารถประหยัดพลังงานของกระบวนการผลิตดังแสดงในตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ผลการใช้งานของระบบช่วยควบคุมการทำงาน

Heat No.	เวลาที่ได้มา การขุดเข้ากับน้ำแข็ง			อุณหภูมิการเผาไหม้เหล็ก				อุณหภูมิน้ำเหล็กที่มีลิ้นชุด กระบวนการกำจัดของเสีย การเผาไหม้เหล็ก (°C)		สัมประสิทธิ์ ความปลอดภัย (BOLD)	
	ขุดจริง (min)	แนะนำ (min)	ส่วน ต่าง (min)	เฉลี่ย/ เวลาที่ได้ (°C/min)	แนะนำ/ เวลาที่ได้ (°C/min)	ส่วนต่าง อุณหภูมิ (°C)	ส่วนต่าง เวลา (min)	จริง	แนะนำ		
											สัมประสิทธิ์ ความปลอดภัย (kWh/Ton)
Heat 2	23	18	5	1,680/30	1,667/27	13	3	1,593	1,563	182	546
Heat 3	30	19	11	1,692/35	1,628/24	64	11	1,632	1,562	89.6	2683
Heat 4	37	31	6	1,695/46	1,672/40	23	6	1,606	1,564	322	966
Heat 5	5	0	5	1,701/21	1,688/12	33	9	1,600	1,561	462	1,386
Heat 6	40	33	7	1,687/44	1,670/37	17	7	1,574	1,565	238	714
Heat 7	25	22	3	1,682/42	1,688/25	14	17	1,600	1,562	19.6	588
Heat 8	24	17	7	1,695/35	1,688/28	27	7	1,696	1,563	378	1,134
Heat 9	15	7	8	1,695/21	1,663/13	32	8	1,625	1,562	448	1,344
Heat 10	31	24	7	1,700/37	1,666/30	34	7	1,599	1,563	476	1,428
						รวม	75			3,598	10,794

ตารางที่ 6.4 แสดงการจำลองเหตุการณ์การปฏิบัติงานของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยอาศัยข้อมูลจากผลการตรวจวัดตามตารางที่ 5.1 และ รูปที่ 5.1 โดยเริ่มต้นการจำลองรอบการทำงานที่ 2 จนถึง รอบการทำงานที่ 10 รวมทั้งหมด 9 รอบการทำงาน การอธิบายผลการทดลองใช้งานของระบบช่วยควบคุมการทำงานที่แบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชั้นการทำงาน และ ชั้นทำนาย โดยที่ผลลัพธ์ของโปรแกรมแบบจำลองชั้นทำนาย คือ การแนะนำเวลาที่ใช้ในกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และการแนะนำอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก ซึ่งจะนำมาใช้เป็นแนวทางการตัดสินใจของรอบการทำงานถัดไปของผู้ปฏิบัติงาน สำหรับเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำงานพักเบ้ารับน้ำเหล็ก, กระบวนการขนย้ายน้ำเหล็ก, กระบวนการปล่อยน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก, การนำสแลกไปเททิ้ง และการซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็ก จะใช้เวลาที่เกิดขึ้นจริงจากการปฏิบัติงานมาจำลองสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก

รอบการทำงานที่ 7 ในตารางที่ 6.4 พบว่าเดิมที่ผู้ปฏิบัติงานจะทำการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กโดยใช้เวลาในกระบวนการอุ่นเท่ากับ 25 นาที และ เหน้เหล็กที่อุณหภูมิ $1,682^{\circ}\text{C}$ แต่โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชั้นการทำงานแนะนำว่า เวลาที่ใช้ในกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเท่ากับ 8 นาที และ เหน้เหล็กที่อุณหภูมิเท่ากับ $1,668^{\circ}\text{C}$ ก็เพียงพอแล้ว ซึ่งจะทำให้สามารถประหยัดเวลาของกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กลงได้ทั้งสิ้น 17 นาที และ ลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กลงได้ 14°C เมื่อพิจารณาอุณหภูมิน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดกระบวนการเทปล่อยน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่กำหนดให้มีค่าอุณหภูมิมากกว่า $1,560^{\circ}\text{C}$ พบว่าถ้าเหน้เหล็กที่อุณหภูมิ $1,682^{\circ}\text{C}$ จะทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดกระบวนการปล่อยน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ $1,600^{\circ}\text{C}$ แต่ถ้าเหน้เหล็กที่อุณหภูมิ $1,668^{\circ}\text{C}$ จะทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กเมื่อสิ้นสุดกระบวนการปล่อยน้ำเหล็กมีค่าเท่ากับ $1,562^{\circ}\text{C}$ ดังนั้นโปรแกรมแบบจำลองจะแนะนำให้ผู้ปฏิบัติการ(ผู้คุมเตาหลอม)เทน้ำเหล็กที่อุณหภูมิเท่ากับ $1,668^{\circ}\text{C}$ เมื่อพิจารณาศักยภาพความประหยัดของการลดพลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าพบว่าทุกๆการลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กลง 10°C จะสามารถลดการใช้พลังงานที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าลงได้ 7 kWh/Ton [3] ดังนั้นการลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กของรอบการทำงานที่ 7 ลงได้ 14°C จะทำให้สามารถลดการใช้พลังงานลง 196 kWh ต่อรอบ(น้ำเหล็ก 20 ตัน) ถ้าคิดค่าไฟฟ้าที่ 3บาท ต่อ 1 kWh คิดเป็นมูลค่าต้นทุนที่สามารถลดลงได้ 588 บาทต่อรอบ

เมื่อพิจารณารอบการทำงานทั้งหมด 9 รอบการทำงานจะสามารถลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กลงเฉลี่ยเท่ากับ 29°C มีศักยภาพความประหยัดเท่ากับ 10,962 บาท โดย 1 วันจะสามารถทำงานได้ทั้งสิ้น 20 รอบการทำงาน และ 1 ปีทำงานทั้งหมด 360 วัน ดังนั้นจะสามารถประหยัดพลังงานได้เท่ากับ 8.77 ล้านบาทต่อปี

ในกรณีที่สามารถนำผลการแนะนำของระบบช่วยควบคุมไปใช้งานได้จริงจะพบว่าการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าทั้งหมด 9 รอบการทำงาน ทำให้มีเวลาในการทำงานหลอมเพิ่มขึ้นอีก 160 นาที ซึ่งมีเวลาเพียงพอที่เตาหลอมจะเริ่มทำการหลอมเหล็กใหม่ โดย 1 วัน สามารถหลอมเหล็กเพิ่มขึ้นได้ 2.7 ครั้ง ในกรณีที่ปฏิบัติงานตามระบบช่วยควบคุมการทำงานได้ตลอดทั้งปีจะสามารถเพิ่มกำลังผลิตด้วยการเทน้ำเหล็กเพิ่มขึ้นอีก 972 ครั้ง

6.3 รูปแบบการทำงานของระบบช่วยควบคุมที่พัฒนาขึ้น

การแบ่งลักษณะการทำงานของระบบช่วยควบคุมการทำงานออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้

ส่วนของระบบควบคุมขั้นการให้นาย

- 1.1) ประมาณเวลาที่ใช้ในกระบวนการต่างๆ
- 1.2) ป้อนค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า
- 2.1) แนะนำอุณหภูมิเทน้ำเหล็ก และเวลาทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าสำหรับรอบการทำงานใหม่
- 2.2) แนะนำอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

ส่วนของระบบควบคุมขั้นการทำงาน

- 3.1) เวลาที่ใช้ในกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก
- 4.1) กราฟแสดงผลการจำลองอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก
- 3.2) อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เท และ เวลาในกระบวนการขนย้ายที่ 1
- 3.3) อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ตรวจวัดได้, เวลาในกระบวนการขนย้ายที่ 2 และ เวลาในการเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก
- 4.2) กราฟแสดงผลการจำลองอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก
- 4.3) กราฟแสดงผลการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็ก
- 3.4) เวลาในกระบวนการทิ้งสแลก และ เวลาในกระบวนการซ่อมเบ้ารับน้ำเหล็ก
- 4.4) กราฟแสดงผลการจำลองอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็ก

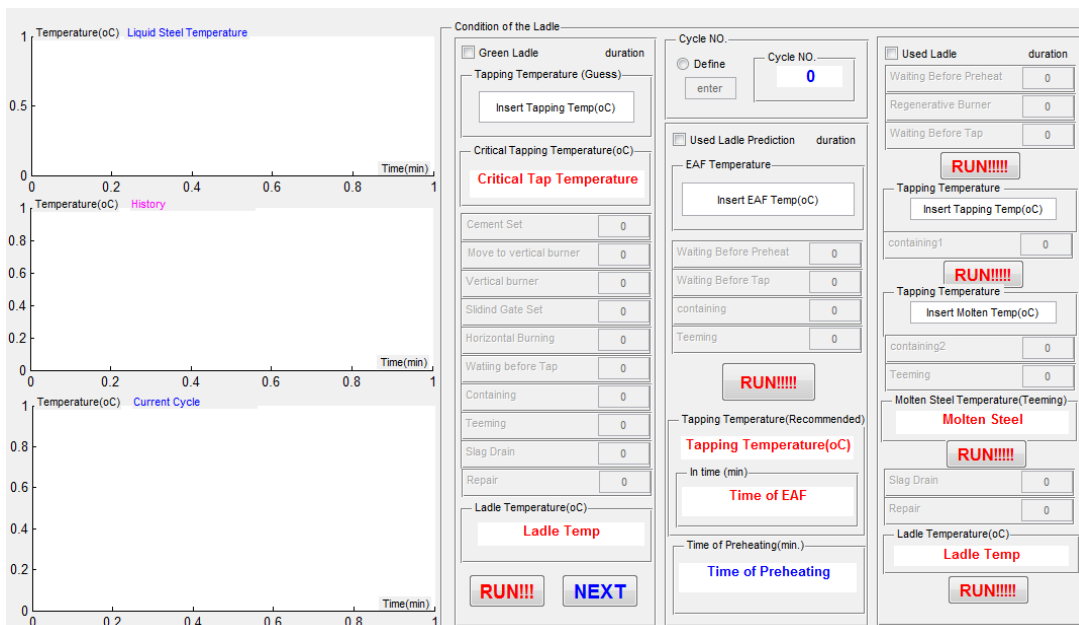
สำหรับการออกแบบระบบช่วยควบคุมการทำงานของงานวิจัยนี้ จะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink R2011b โดยที่ใช้ GUIDE ทำหน้าที่เป็นตัวประสานงานระหว่างระบบช่วยควบคุม กับ ผู้ปฏิบัติงาน การทำงานของ GUIDE ดังรูปที่ 6.9 และสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

1. เริ่มต้นจะต้องเลือกชนิดของเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนว่าเป็นลักษณะใด ด้วยการเลือก “Green Ladle” สำหรับเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ ตำแหน่ง Cyc No. จะแสดงผล “1” และ “Used Ladle” สำหรับเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ตำแหน่ง Cyc No. จะแสดงผล “2” ในกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้วจะสามารถเลือกลำดับของรอบการทำงานได้ 2 วิธี คือ เลือก Define เพื่อกำหนดรอบการทำงาน และ ค่า Cyc No. จะแสดงตามที่กำหนด หรือ เลือกเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ แล้วจึงกดปุ่ม Next ไปหารอบการทำงานที่ต้องการ ซึ่งก่อนการขึ้นรอบการทำงานถัดไปของเบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องผ่านจะต้องผ่านการทำงานขั้นทำนายก่อนทุกครั้ง สำหรับกรณีที่ไม่ต้องการทำนาย สามารถกด Next ข้ามต่อไปได้

2. การจำลองทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ คือ การคาดเดาอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก และประมาณเวลาในกระบวนการต่างๆ ผลลัพธ์ที่ได้คือ เมื่อสิ้นสุดการจำลองรอบการทำงานจะบอกได้ว่าควรเทน้ำเหล็กที่อุณหภูมิเท่าใด

3. เมื่อสิ้นสุดการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กใหม่ระบบช่วยควบคุมการทำงานจะแสดงผลของอุณหภูมิค่าตัวแทนเบ้ารับน้ำเหล็ก เพื่อใช้ในการพิจารณาการตัดสินใจอุณหภูมิของระบบช่วยควบคุมขั้นการทำนาย เริ่มต้นที่ กด Next เพื่อย้ายจาก Green Ladle Block มา ยัง Used Ladle Prediction Block ต่อจากนั้นจะใส่ค่าอุณหภูมิในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ณ เวลาปัจจุบัน และ เวลาในกิจกรรมต่างๆของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการประมาณ ผลลัพธ์ที่ได้คือ อุณหภูมิการเทน้ำเหล็กที่แนะนำพร้อมกับเวลาที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่ใช้ในรอบการทำงานใหม่นี้ และ เวลาที่ใช้ในกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

4. ผลลัพธ์ของระบบช่วยควบคุมขั้นทำนายจะใช้เป็นแนวทางในระบบช่วยควบคุมขั้นการทำงานโดยที่การทำงานของระบบช่วยควบคุมขั้นการทำงานนั้น จะทำงานไปพร้อมกันกับการปฏิบัติงานจริง โดยที่เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กอยู่ที่กระบวนการใด ก็จะสามารถจำลองอุณหภูมิ ณ เวลานั้นได้ด้วยการใส่เวลาของแต่ละกระบวนการที่เกิดขึ้นจริง และ ปุ่ม Run เพื่อจำลองกระบวนการนั้น เมื่อเสร็จสิ้นการทำงานระบบช่วยควบคุมการทำงานจะย้อนกลับไปยังระบบช่วยควบคุมการทำนายในข้อ 3.) ใหม่อีกครั้ง



รูปที่ 6.9 โปรแกรมประสานงานกับผู้ใช้งานของระบบช่วยควบคุม

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบช่วยควบคุมของการทำงานเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สอดคล้องกับสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดทั้งกระบวนการ และเพิ่มการตัดสินใจในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กในแต่ละกระบวนการ ซึ่งระบบช่วยควบคุมแบ่งขั้นตอนการทำงานได้ 2 ขั้นตอนออกเป็น 2 โปรแกรม คือ โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก และโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับการปฏิบัติงานจริง ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กและเวลาในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

การแบ่งกรณีของระบบช่วยควบคุมขั้นการทำงาน สามารถแบ่งได้ทั้งสิ้น 3 กรณี คือ

- 1.) กรณีที่ 1 ตัดสินใจอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก เพราะอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กต่ำเกินไปจึงทำให้ไม่สามารถประหยัดพลังงานจากกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กได้ แต่จะประหยัดพลังงานไฟฟ้าของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยวิธีการเทน้ำเหล็กในอุณหภูมิที่เหมาะสม
- 2.) กรณีที่ 2 ตัดสินใจอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ถึงแม้ว่าเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีอุณหภูมิสูง แต่ว่าเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าไม่พร้อมเทน้ำเหล็ก โดยที่กรณีนี้จะสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยวิธีการเทน้ำเหล็กในอุณหภูมิที่เหมาะสมเพียงเท่านั้น ส่วนการใช้พลังงานของกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจะสิ้นเปลืองเท่ากับระยะเวลาการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าหลอมเหล็ก
- 3.) กรณีที่ 3 ตัดสินใจไม่อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยเปลี่ยนไปเป็นกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กแทน มีเงื่อนไขว่า อุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กน้ำเหล็กเริ่มต้นต้องสูงกว่าที่กำหนด และผลการทำนายเวลาการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กแรกเริ่มต้องไม่เกิน 10 นาที โดยที่กรณีนี้จะสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าด้วยวิธีการเทน้ำเหล็กในอุณหภูมิที่เหมาะสม และยังสามารถประหยัดการใช้พลังงานของกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กได้อีกด้วย

จากการจำลองอุณหภูมิค่าตัวแทนเข้ารับน้ำเหล็กที่กระบวนการพักเข้ารับน้ำเหล็ก พบว่า ความคลาดของการประมาณเวลาพักเข้ารับน้ำเหล็กจะส่งผลให้อุณหภูมิค่าตัวแทนเข้ารับน้ำเหล็ก โดยแบ่งเป็นช่วงอุณหภูมิเมื่อสิ้นสุดกระบวนการอุ่นได้ดังต่อไปนี้ ช่วงที่ 1 (850 – 900)°C มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 2.5 °C/min และ ช่วงที่ 2 901°C ขึ้นไป มีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 4 °C/min

โปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ทำงานพร้อมกับการปฏิบัติงานจริง

ตัวแปรควบคุมหลักของกระบวนการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า คือ อุณหภูมิ น้ำเหล็กขณะสิ้นสุดกระบวนการปล่อยน้ำเหล็กจากเข้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก จะต้องได้รับการคำนวณที่มีความแม่นยำสูง กล่าวคือ จะต้องมียุณหภูมิที่จุดนี้ไม่น้อยกว่า 1,560°C น้ำเหล็กที่อยู่ในเข้ารับน้ำเหล็กจะไม่แข็งตัวระหว่างกระบวนการ แต่ถ้าเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในอุณหภูมิที่สูงจนเกินไป จะส่งผลให้มีการใช้พลังงานไฟฟ้ามากเกินความจำเป็น จึงควรที่จะเทน้ำเหล็กให้อุณหภูมิที่สิ้นสุดกระบวนการมีค่าไม่ต่ำกว่าที่กำหนดไว้

ผลการใช้งานของระบบช่วยควบคุมขั้นการทำงานที่ใช้คำแนะนำของระบบช่วยควบคุมขั้นการทำงาน พบว่าสามารถลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กลงเฉลี่ย 29°C ซึ่งสามารถประหยัดการใช้พลังงานไฟฟ้าลงได้ 20.3 kWh/Ton ดังนั้น ที่กำลังผลิต 144,000 ตันต่อปี จะสามารถประหยัดต้นทุนการใช้พลังงานได้ 8.77 ล้านบาทต่อปี

การปฏิบัติตามคำแนะนำของระบบช่วยควบคุมขั้นการทำงานสามารถประหยัดการใช้พลังงานที่กระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก และ ยังสามารถเพิ่มรอบการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าได้อีกวันละ 2.7 รอบการทำงาน หรือคิดเป็น 972 รอบการทำงานต่อปี

7.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากระบบช่วยควบคุมการการทำงานถูกออกแบบมาให้ทำงานไปพร้อมๆกับการปฏิบัติงานจริง โดยที่ระบบช่วยควบคุมการทำงานจะทำงานตามหลังกระบวนการที่เพิ่งจบไป ยกตัวอย่างเช่น ในการปฏิบัติงานจริงของกระบวนการพักเข้ารับน้ำเหล็ก ใช้เวลาพักทั้งหมด 10 นาที จำเป็นที่จะต้องจบกระบวนการพักเข้ารับน้ำเหล็กก่อน ถึงจะรู้เวลาที่ใช้ในกระบวนการนั้น ที่สามารถทำได้เพราะเวลาของการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เร็วกว่าเวลาในการปฏิบัติงานจริง

2. การรับค่าตัวแทนอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร จากผนังด้านข้าง และ ผนังด้านล่างของเข้ารับน้ำเหล็ก ควรที่จะเป็นการรับค่าเวลาและอุณหภูมิผนังเข้ารับน้ำเหล็กแบบต่อเนื่อง (Real

Time) ด้วยการรับสัญญาณเข้ามาในระบบช่วยควบคุม และแปลงสัญญาณเป็นค่าอุณหภูมิเพื่อใช้ในการประมาณค่าต่อไป

3. แนวความคิดของกระบวนการพักเข้ารับน้ำเหล็กก่อนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กเป็นแนวความคิดการลดการใช้พลังงานของกระบวนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็กที่ดี เพราะกรณีที่เข้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิค่าตัวแทนที่สูงมาก สามารถที่จะให้บังรับน้ำเหล็กค้อยก่อน และเมื่อถึงเวลาที่เหมาะสมค่อยเริ่มกระบวนการอุ่น แต่ในการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นไม่ได้ใช้เกาะกำบังรังสีที่ปากเข้ารับน้ำเหล็ก ส่งผลให้เข้ารับน้ำเหล็กสูญเสียความร้อนที่บริเวณปากเข้ารับน้ำเหล็กปริมาณมาก จึงควรทำวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับการแผ่รังสีความร้อนในพื้นที่ปิดของกระบวนการพักเข้ารับน้ำเหล็กก่อนการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก

4. การกำหนดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้มีความถูกต้อง ถือเป็นสิ่งสำคัญลำดับแรกของระบบช่วยควบคุมการทำงานขั้นการทำงาน เพราะจำเป็นที่จะต้องประมาณอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กให้เหมาะสมกับกระบวนการ ถ้าอุณหภูมิเริ่มต้นคาดเคลื่อนจะส่งผลต่อการทำงานด้วยเช่นเดียวกัน

5. อุณหภูมิการเทน้ำเหล็กที่ได้จากระบบช่วยควบคุมการทำงานขั้นการทำงานนั้น สามารถใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจได้ว่า รอบการทำงานใหม่ที่กำลังจะเกิดขึ้นควจที่จะเทน้ำเหล็กที่อุณหภูมิเท่าใด แต่ในบางครั้งความล่าช้าระหว่างกระบวนการอื่นๆ อุณหภูมิการเทน้ำเหล็กที่ทำนายนั้นเกิดความผิดพลาดได้

รายการอ้างอิง

1. ศูนย์การเรียนรู้อุตสาหกรรมเหมืองแร่. อุตสาหกรรมเหล็กของประเทศไทย. 2014 [cited 2014; Available from: <http://lc.dpim.go.th/kb/1089>.
2. สถาบันพลังงานเพื่ออุตสาหกรรม. สถิติการใช้พลังงาน. 2003; Available from: <http://www.iie.or.th/iie2003/survey/ratioByIndustrial.aspx>.
3. ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น, การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า, in ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2009, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: ประเทศไทย.
4. ชัชวีสส์ วุฒิศิริศาสตร์, การควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กร่วมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2011, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: ประเทศไทย.
5. กิจดิศักดิ์ ไร่ไพฑูริพงษ์, การพัฒนาระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2013, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: ประเทศไทย.
6. Saunder, L. *Preheating and controlled thermal cycling of steel handling ladles.* in *Steelmaking Conf Proc.* 1983.
7. Joyce, K., *New techniques to improve the efficiency of ladle preheater and billet reheating furnace.* 1992, The United Nations Development Programme, NEA: Thailand.
8. Mohanty, B. and J. Satayayut, *Dynamic Model for Ladle Preheater Performance Evaluation.* , in *International journal of energy research* 16. 1992. p. 51-60.
9. สมศักดิ์ คงโชติ, การศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในการอุ่นถังรับน้ำเหล็กในอุตสาหกรรมหลอมโลหะ, in ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์. 1993, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี: ประเทศไทย.
10. Fredman, T.P. and Saxen. H., *Model for Temperature Profile Estimation in the Refractory of a Metallurgical Ladle.pdf.* Metallurgical and Material Transaction B, 1997. **29B**: p. 9.

11. Tom P. Fredman, J. Torrkulla, and Saxén. H., <*Two-Dimensional Dynamic Simulation of the Thermal State of Ladles.pdf*>. Metallurgical and Materials Transactions B, 1998. **30**(2): p. 8.
12. Xia, J.L. and T. Ahokainen, <*Transient Flow and Heat Transfer in a Steelmaking Ladle during the Holding Period.pdf*>. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000. **32**(4): p. 9.
13. Yuhua Pan, Carl-Erik Grip, and Bo Björkman, <*NUMERICAL STUDIES ON THE PARAMETERS INFLUENCING STEEL LADLE HEAT LOSS RATE.pdf*>. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2003. **32**(2): p. 15.
14. Olena Volkova and Dieter Janke, <*Modelling of Temperature Distribution in Refractory Ladle Lining for Steelmaking.pdf*>. ISIJ International, 2003. **43**(8): p. 6.
15. André Zimmer, et al., *Heat Transfer in Steelmaking Ladle*. Journal of Iron and Steel Research, International, 2008. **15**(3): p. 11-60.
16. Egerton, P., et al., <*A theoretical investigation of heat transfer in a ladle of molten steel during pouring.pdf*>. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1979. **22**(11): p. 1525-1532.
17. Urquhart R. C., Guthrie R. I. L., and Howat D. D., *Heat loss from Ladle during Teeming*. Journal of the South Africa Institution of Mining and Metallurgy: p. 8.
18. Glaser Björn, *A Study on the Thermal State of Steelmaking Ladles*, in *Department of Materials Science and Engineering*. 2012, Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management.
19. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, การควบคุมระบบพลศาสตร์(*Control of Dynamic Systems*), พ. 2. 2548, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
20. Harold Klee. and Randal Allen., *Simulation of Dynamic Systems.*, ed. n. Ed. 2011: United State of America: Taylor & Francis Group.
21. The Siam Refractory Industry Co., L., *Material data sheet, SK38*, Editor. 2012: Samut prakarn, Thailand.
22. al., F.R.J.e., *The Making, Shaping, Treating of Steel*. The AISE Steel Foundation. 1998, Pittsburgh, USA.

23. Lui X.F., et al., *Numerical Simulation of Coupled Molten Steel Flow and Temperature Fields in Compact Strip Production Casting*. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2007. **14**(3): p. 6.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



ภาคผนวก ก

รายละเอียดอุปกรณ์ทดลอง แผนผังการเจาะอิฐฝังเทอร์โมคัปเปิล แพลนกล่องป้องกันอุปกรณ์
ตรวจวัดและส่งสัญญาณการตรวจวัดอุณหภูมิ และลักษณะการก่ออิฐของผนังเข้ารับน้ำเหล็ก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ชนิดของ 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

ชนิดของ Data Logger (ต่อ)



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 3300°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 Dataq 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 ^a	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 ^b	340 hours between charges		250 hours	
Sampling Interval:	0.1 sec - 50 mins	0.1 sec - 50 mins	0.1 sec - 50 mins	0.1 sec - 50 mins
No Telemetry	1 sec - 50 mins	1 sec - 50 mins	1 sec - 50 mins	1 sec - 50 mins
Hardwired Telemetry	n/a	2 secs - 50 mins	n/a	3 secs - 50 mins
RF Telemetry				
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
DATAQAQ 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@dataqaq.co.uk
Web: www.dataqaq.com

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

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



www.dataqaq.com
© 2011 Dataqaq (Tosco) Rev B1 2/0511
Dataqaq, the Dataqaq logo and Formula Tracker
are registered trademarks of Dataqaq.
Specifications subject to change without notice.

Thermocouple Type K



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. Nichobel sheath protects against electrical 'noise' and furnace atmosphere.

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

Data 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
DATAPAQ Limited,
Deanland House, 140 Cowley Road,
Cambridge CB4 0GU, UK
Tel: +44 (0) 1223 452 141
Fax: +44 (0) 1223 452 206
E-mail: sales@datapaq.co.uk
Web: www.datapaq.com

North and South America Germany
DATAPAQ Inc. DATAPAQ GmbH,
187 Ballardvale Street, Veldorfer Straße 100
Wilmington, MA 01987, USA D-20400 Vlotho, Deutschland
Tel: +1 978 960 9000 Tel: +49 3722 9107 0
Fax: +1 978 960 0666 Fax: +49 3722 9107 57
E-mail: sales@datapaq.com E-mail: sales@datapaq.de
Web: www.datapaq.com Web: www.datapaq.de



www.datapaq.com

© 2011 Datapaq (TM21 Rev C) 4/2011
Datapaq (the Datapaq logo and Patent Number) are registered trademarks of Datapaq. Specifications subject to change without notice.

Thermocouple ที่โรงงานใช้วัดอุณหภูมิน้ำเหล็ก

3. THERMOCOUPLE ALLOYS

In 1885, Henri Le Chatellier introduced the platinum / platinum-rhodium thermocouple in the steel industry. The positive wire consisted of 90 % platinum and 10 % rhodium, and the negative wire consisted of pure platinum. This composition is still used on a very large scale.

Later, different other thermocouple combinations have been introduced and normalized.

Following thermocouples are commonly used for bath temperature measurement in foundries and steel plants:

Positive leg	Negative leg	ANSI-type	Temp. range
PtRh10%	Pt	S	- 50 to 1767 °C
PtRh13%	Pt	R	- 50 to 1767 °C
PtRh30%	PtRh6%	B	0 to 1820 °C

The choice amongst these depends on the temperature to be measured, the calibration of the measuring instrument and the available compensating wires.

The chemical composition of compensating wires is such that at temperatures below 200 °C the same thermoelectric voltage is generated as the related thermocouple. Compensating wires are used to reduce the length of expensive noble metal thermocouples to the strict minimum. For type S and R thermocouples, compensation wires made of copper (positive leg) and copper-nickel (negative leg) are used. For type B thermocouples, compensation wires made of copper are sufficient.

4. POSITHERM EXPENDABLE THERMOCOUPLES

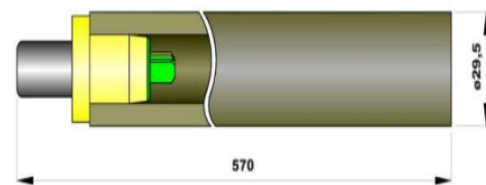
Fig.5 shows a cut-away view of a standard Positherm immersion thermocouple.

It consists of:

- thermocouple wires, which are rigorously selected in order to guarantee an accuracy of 0 to + 3 °C at 1554 °C (Pd melting point). Positherm thermocouples are available in type S, R or B calibrations.
- a quartz tube, protecting and positioning the thermocouple wires.
- a compensated connector, assuring good contact between the thermocouple and the contact block mounted on the immersion lance.
- a ceramic housing, protecting the thermocouple assembly.
- refractory cement, insulating the thermocouple wires and the cold junction so that its temperature remains below 200 °C during the measurement.
- a metal cap, which protects the quartz tube during transport and avoids that slag may adhere to the quartz tube when passing through the possible slag layer on top of the molten metal. This cap is made of steel for application in steel melts. For application in low temperature steel, cast iron and aluminium alloys, it is made of aluminium. A copper cap is used for measurements in copper alloys.
- a cardboard tube, protecting the contact block, probe holder and compensated inner cable during the measurement. Cardboard tubes are available in different lengths to suit different applications.



Heraeus
Electro-Nite



Positherm thermocouple

เซรามิกซ์ที่ป้องกันเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B

COORSTEK MATERIAL DESIGNATION

Mullite: $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$

AD-998: 99.8% Dense Alumina (Al_2O_3)

AD-995: 99.5% Dense Alumina (Al_2O_3)

AD-94: 94.0% Dense Alumina (Al_2O_3)

MTZ: Magnesia partially stabilized Zirconia (ZrO_2)

YTZP: Yttria partially stabilized Zirconia (ZrO_2)

ZDY: Yttria fully stabilized Zirconia (ZrO_2)

AD-998 Round Single Bore Tubing (RSB)

OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
0.50	x 0.020	12.7	x 0.51	65650
0.063	x 0.031	1.60	x 0.79	65651
0.094	x 0.040	2.39	x 1.02	65652
0.094	x 0.063	2.39	x 1.60	65682
0.100	x 0.050	2.54	x 1.27	65653
0.125	x 0.063	3.18	x 1.60	65654
0.156	x 0.094	3.96	x 2.39	65655
0.188	x 0.094	4.78	x 2.39	65665
0.188	x 0.125	4.78	x 3.18	65656
0.219	x 0.156	5.56	x 3.96	65657
0.250	x 0.125	6.35	x 3.18	65663

Diameter tolerance $\pm 3\%$ or ± 0.002 (0.076 mm), whichever is greater. Straightness ≤ 0.002 /1.000" cumulative

OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
0.625	x 0.500	15.88	x 12.70	65677
0.688	x 0.500	17.48	x 12.70	65679
0.750	x 0.500	19.05	x 12.70	65662

Diameter tolerance $\pm 5\%$. Straightness ≤ 0.002 /1.000" cumulative

OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
0.250	x 0.156	6.35	x 3.96	65666
0.250	x 0.188	6.35	x 4.78	65668
0.313	x 0.188	7.95	x 4.78	65667
0.313	x 0.219	7.95	x 5.56	65669
0.375	x 0.250	9.53	x 6.35	65660
0.438	x 0.313	11.13	x 7.95	65661
0.500	x 0.250	12.70	x 6.35	65669
0.500	x 0.375	12.70	x 9.53	65664
0.590	x 0.394	14.98	x 10.00	65810
0.590	x 0.433	14.98	x 11.00	65811

AD-998 Round Four Bore Tubing (R4B)

OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#	OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
0.063	x 0.016	1.60	x 0.41	65684	0.188	x 0.031	4.78	x 0.79	65685
0.085	x 0.024	2.13	x 0.60	65692	0.188	x 0.047	4.75	x 1.19	65698
0.094	x 0.020	2.39	x 0.51	65683	0.219	x 0.020	5.56	x 1.27	65686
0.109	x 0.020	2.77	x 0.51	65687	0.258	x 0.076	6.55	x 1.98	65689

Diameter tolerance $\pm 3\%$ or ± 0.002 (0.076 mm), whichever is greater. Straightness ≤ 0.002 /1.000" cumulative

AD-998 Oval Double Bore Tubing (ODOB)

OD Inch (H90)	OD Inch (H90)	ID Inch (H90)	OD mm (H90)	ID mm (H90)	Part#	
0.077	x 0.051	x 0.014	1.96	x 1.30	x 0.36	65695
0.125	x 0.070	x 0.031	3.05	x 1.78	x 0.79	65697
0.163	x 0.112	x 0.040	4.14	x 2.84	x 1.02	65696

Diameter tolerance $\pm 3\%$ or ± 0.002 (0.076 mm), whichever is greater. Straightness ≤ 0.002 /1.000" cumulative

AD-998 Round Double Bore Tubing (ROB)

OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
0.063	x 0.016	1.60	x 0.41	65670
0.094	x 0.025	2.39	x 0.64	65671
0.109	x 0.031	2.77	x 0.79	65672
0.125	x 0.031	3.18	x 0.79	65676
0.125	x 0.040	3.18	x 1.02	65673
0.156	x 0.052	3.96	x 1.32	65674

Diameter tolerance $\pm 3\%$ or ± 0.002 (0.076 mm), whichever is greater. Straightness ≤ 0.002 /1.000" cumulative

OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
0.188	x 0.040	4.78	x 1.02	65835
0.188	x 0.047	4.78	x 1.19	65836
0.188	x 0.063	4.78	x 1.60	65675
0.200	x 0.052	5.08	x 1.32	65676
0.240	x 0.076	6.10	x 1.98	65693
0.250	x 0.063	6.35	x 1.60	65690

AD-998 Cast Tubing

OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
0.250	x 0.156	6.35	x 3.96	66440
0.313	x 0.188	7.95	x 4.78	66441
0.375	x 0.250	9.53	x 6.35	66442
0.394	x 0.236	10.00	x 6.00	66420
0.394	x 0.276	10.00	x 7.00	66421
0.438	x 0.313	11.13	x 7.95	66443
0.500	x 0.250	12.70	x 6.35	66444
0.500	x 0.375	12.70	x 9.53	66445
0.688	x 0.438	17.48	x 11.13	66448
0.688	x 0.500	17.48	x 12.70	66449
0.750	x 0.500	19.05	x 12.70	66450
0.750	x 0.563	19.05	x 14.30	66451
0.875	x 0.625	22.23	x 15.88	66453
0.938	x 0.688	23.83	x 17.48	66454
*1.000	x 0.750	25.40	x 19.05	66455
1.125	x 0.875	28.58	x 22.23	66456
1.250	x 1.000	31.75	x 25.40	66457
1.375	x 1.125	34.93	x 28.58	66458
1.500	x 1.250	38.10	x 31.75	66459
*1.625	x 1.375	41.28	x 34.93	66460
*1.750	x 1.500	44.45	x 38.10	66461
*1.875	x 1.625	47.63	x 41.28	66462
2.000	x 1.750	50.80	x 44.45	66463
*2.125	x 1.875	53.98	x 47.63	66464

OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
2.250	x 2.000	57.15	x 50.80	66465
*2.375	x 2.125	60.33	x 53.98	66466
2.500	x 2.250	63.50	x 57.15	66467
2.750	x 2.375	69.85	x 60.33	66468
2.750	x 2.500	69.85	x 63.50	66469
*3.000	x 2.750	76.20	x 69.85	66471
*3.250	x 2.875	82.55	x 73.03	66473
*3.500	x 3.125	88.90	x 79.38	66476
*3.500	x 3.250	88.90	x 82.55	66477
*3.750	x 3.375	95.25	x 85.73	66479
4.000	x 3.625	101.60	x 92.08	66481
4.250	x 3.875	107.95	x 98.43	66482
4.500	x 4.125	114.30	x 104.78	66483
4.750	x 4.375	120.65	x 111.13	66484
5.000	x 4.625	127.00	x 117.48	66485
5.250	x 4.875	133.35	x 123.86	66486
5.500	x 5.125	139.70	x 130.18	66489
6.000	x 5.625	152.40	x 142.88	66491
6.500	x 6.125	165.10	x 155.58	66492
7.000	x 6.625	177.80	x 168.28	66493
7.500	x 7.125	190.50	x 180.98	66494
*7.875	x 7.500	200.03	x 190.50	66495
*8.250	x 7.875	209.55	x 200.03	66496

Diameter tolerance $\pm 5\%$ or ± 0.030 (0.76 mm), whichever is greater. Straightness ≤ 0.006 /1.000" cumulative

* Available in single reduced end (SRE).

† Available on a special order basis.



Open Both Ends (OBE)



Ground One End (GOE)



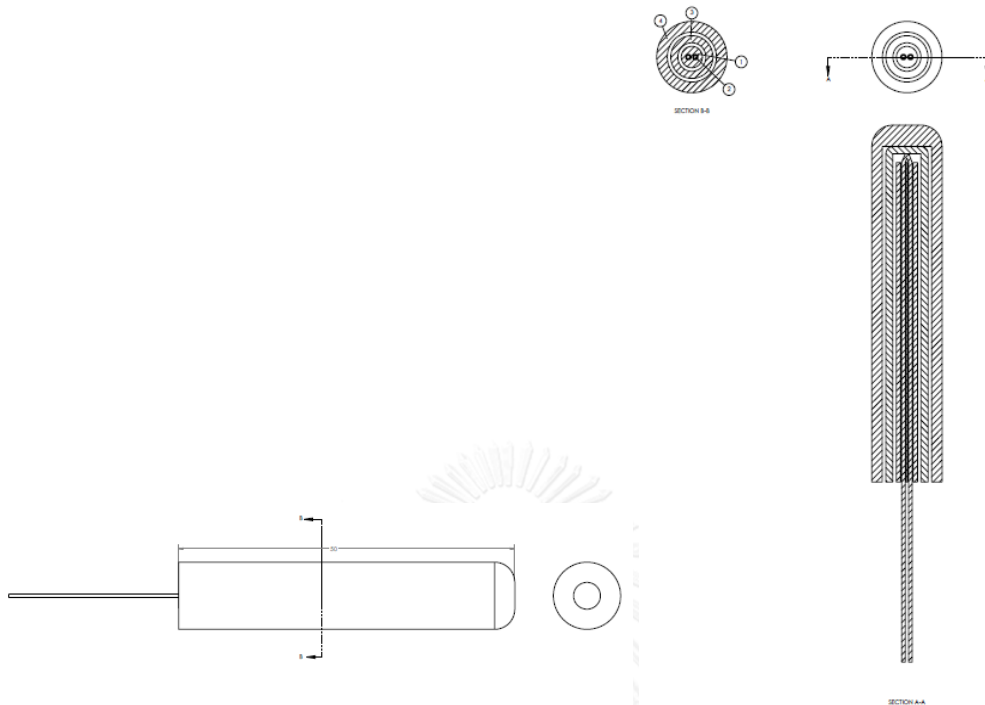
Single Reduced End (SRE)



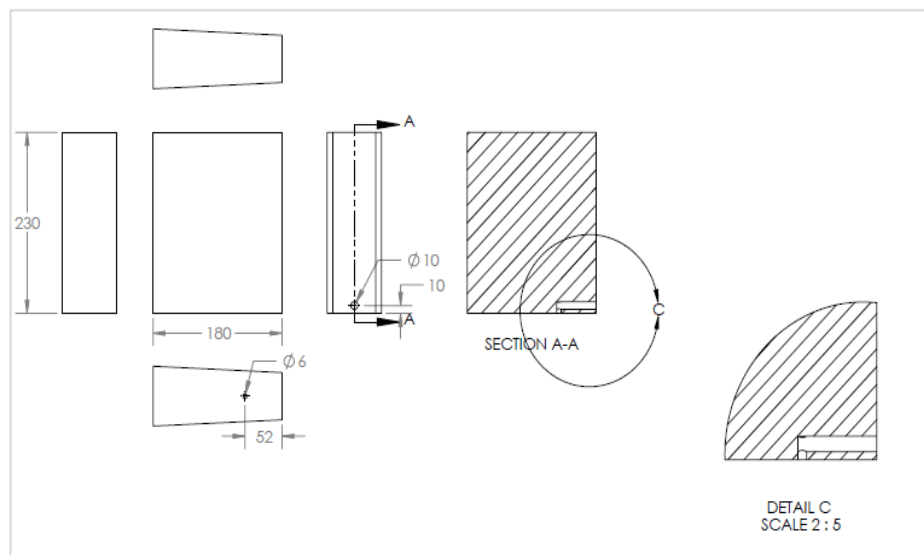
Full Closed One End (FCOE)

PROPERTIES	UNITS	TEST	Multi	Alumina			Zirconia		
			3Al ₂ O ₃ -2SiO ₂	AD-94	AD-998	AD-995	TTZ	YTZP	ZBY
Physical Properties									
Density	grams/cc	ASTM C20	2.80	3.70	3.92	3.90	5.72	6.02	5.60
Color			Tan	White	Ivory	Ivory	Ivory	Ivory	Ivory
Permeability			Gas-Tight	Gas-Tight	Gas-Tight	Gas-Tight	Gas-Tight	Gas-Tight	Ionic
Mechanical Properties									
Elastic Modulus Typical 20° C	GPa(ksi·10 ⁹)	ASTM C848	150 (22)	303 (44)	370 (54)	370 (54)	200 (29)	210 (30)	173 (25)
Flexural Strength (MOR) Typical 20° C Typical 1000° C	MPa (kpsi)	C1161-02	170 (25) 151 (22)	352 (51) 138 (20)	375 (54) 210 (30)	379 (55) -	620 (90) -	900 (130) -	207 (30) -
Compressive Strength Typical 20° C	MPa (kpsi)	ASTM C773	550 (80)	2103 (305)	2500 (363)	2600 (377)	1750 (254)	2500 (363)	- -
Fracture Toughness Range	MPa·m ^{1/2}	NOTCHED BEAM	2	4 - 5	4 - 5	4 - 5	11	13	3
Hardness	NEWTONS GPa(kg/mm ²)	ROCKWELL 45N KNOOP 1000g	70 7.4 (750)	78 11.5 (1175)	83 14.1 (1440)	83 14.1 (1440)	77 11.8 (1200)	81 12.7 (1300)	75 -
Thermal Properties									
Thermal Conductivity 20° C	W/m ² K	ASTM C408	3.5	22.4	30.0	30.0	2.2	2.2	2.2
Coefficient of Thermal Expansion 25 to 1000° C	10 ⁻⁶ /°C (10 ⁻⁶ /°F)	ASTM C372	5.3 (2.9)	8.2 (4.6)	8.2 (4.6)	8.2 (4.6)	10.1 (5.6)	10.3 (5.7)	10.5 (5.8)
Specific Heat at 100° C	J/kg ² K (cal/g/°C)	ASTM E1269	950 (0.23)	880 (0.21)	880 (0.21)	880 (0.21)	400 (0.14)	400 (0.10)	- -
Thermal Shock (Note 1)	D°C/D°F	DTc	300 (570)	250 (480)	200 (392)	200 (392)	350 (660)	350 (660)	150 (300)
Electrical Properties									
Dielectric Strength 6.25 mm Thickness	AC-kv/mm (AC-volts/mil)	ASTM D116	9.8 (248)	8.3 (210)	8.7 (220)	8.7 (220)	9.4 (240)	9.0 (228)	- -
Dielectric Loss	25°C@1MHz 25°C@5GHz	ASTM D2520	0.002 -	0.0004 0.0095	< 0.0001 < 0.0001	< 0.0001 < 0.0001	0.001 -	0.001 -	- -
Volume Resistivity 25° C 500° C 1000° C	ohm-cm	ASTM D1829	> 10 ¹⁴ 5 x 10 ⁹ 3 x 10 ⁹	> 10 ¹⁴ 4 x 10 ⁹ 5 x 10 ⁹	> 10 ¹⁴ 2 x 10 ⁹ 5 x 10 ⁹	> 10 ¹⁴ 2 x 10 ⁹ 2 x 10 ⁹	> 10 ¹⁴ 2 x 10 ⁹ < 10 ⁹	> 10 ¹⁴ 2 x 10 ⁹ < 10 ⁹	- - -
Dielectric Constant	25° C@1MHz		6.0	9.1	9.8	9.7	28.0	29.0	-
General Characteristics			Good thermal shock resistance NOT recommended for high lamp vacuum application (low cost)	Easily metallized with good electrical properties	Hard, corrosive resistant, capable of withstanding use at high temperature, low dielectric loss at microwave frequencies	Impact resistant, very tough, corrosion resistant	Impact resistant, high strength, polishes easily	Oxygen ionic conductive, extreme temperature resistant	

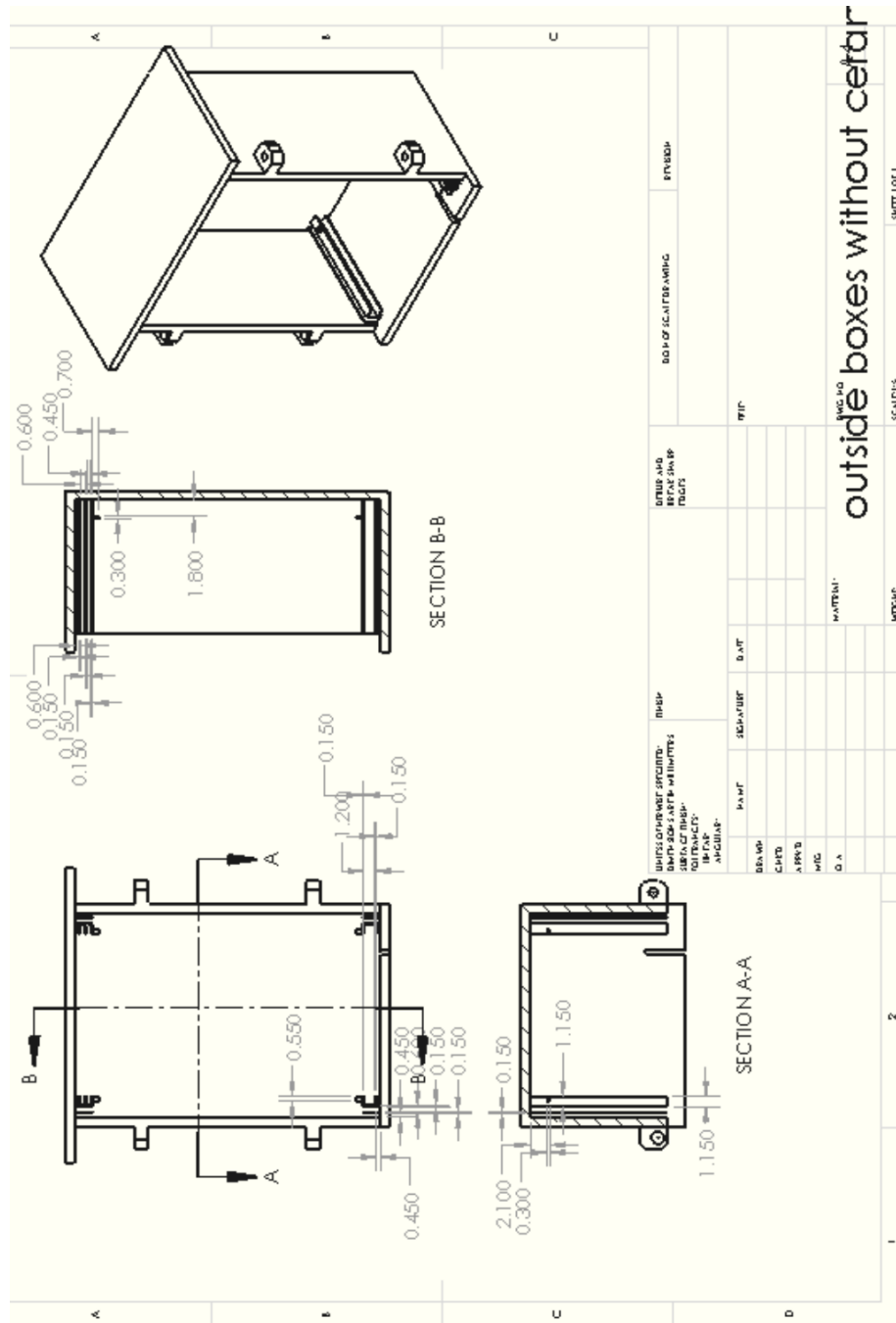
ภาพตัดแสดง thermocouple ชนิด B

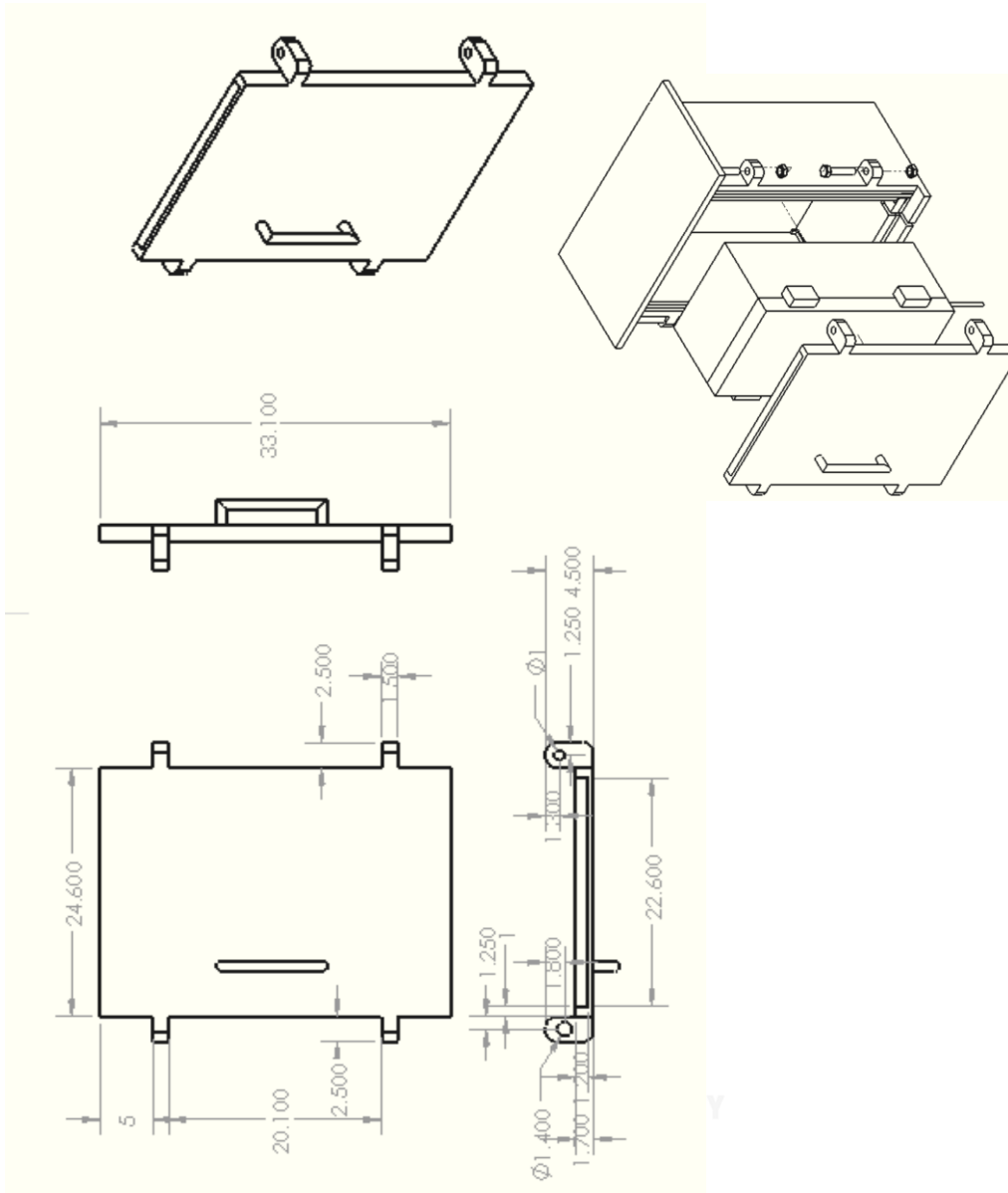


ภาพแสดงการเจาะอิฐสำหรับการฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B



กล่องป้องกันอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งสัญญาณการตรวจวัดอุณหภูมิ





ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรักเกียรติ วารินศิริรักษ์ เกิดวันที่ 4 เดือน มกราคม ปีพุทธศักราช 2533 ภูมิลำเนา อยู่ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย ศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม เมื่อปีพุทธศักราช 2554 และเข้ารับ การศึกษาต่อในปีเดียวกันหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดกรุงเทพมหานคร ระหว่างการศึกษา ได้รับทุนผู้ช่วยวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย มีผลงานตีพิมพ์ระดับชาติในงานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่ง ประเทศไทย ครั้งที่ 27 และครั้งที่ 29

