

การพัฒนาระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก

นายกิตติศักดิ์ ไร่ไพรงิพงษ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์นี้ถูกจัดเก็บไว้ในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

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

Mr. Kittisak Rumpirujipong

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University



กิตติศักดิ์ ไร่ไพรุจพิงศ์: การพัฒนาระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก (DEVELOPMENT OF CONTROL-ASSISTING SYSTEM FOR ELECTRIC ARC FURNACE BASED ON THERMAL CONDITION OF THE LADLE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร.พงษ์ธร จรรย์ญาณณ์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.ดร.สันหพศ จันทรานุกวัฒน์ 188 หน้า.

การผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่มีการใช้พลังงานที่สูงมาก การลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิตนี้สามารถกระทำได้โดยการสร้างระบบช่วยควบคุมเพื่อทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสมในขณะที่เทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Tapping temperature) วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการลดการใช้พลังงานในการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า โดยการพัฒนา ระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก

หลักการของระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าสามารถกระทำได้โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องเข้ามาใช้ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นเพื่อให้สามารถทำนายสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กให้แม่นยำมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้สามารถทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสมในการเทจากเตาหลอม โดยที่อุณหภูมิของน้ำเหล็กเมื่อไปถึงสถานีหล่ออย่างต่อเนื่องจะยังคงอยู่ในระดับที่สูงพอในเชิงโลหะวิทยาสำหรับการหล่อได้

จากการทดสอบระบบช่วยควบคุมที่พัฒนาขึ้น พบว่าในหนึ่งรอบการทำงานสามารถลดอุณหภูมิน้ำเหล็กได้โดยเฉลี่ย  $25^{\circ}\text{C}$  และประหยัดพลังงานไปได้  $17.5\text{ kWh/ตันน้ำเหล็ก}$  สำหรับในโรงงานที่ศึกษา คิดเป็นพลังงานที่ประหยัดได้  $2.52\text{ GWh}$  ต่อปี และสามารถลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานเท่ากับ  $7.56$  ล้านบาทต่อปี

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2556..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

## 5370204921 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: STEELMAKING PROCESS / LADLE / CONTROLING-ASSISTING SYSTEM

KITTISAK RUMPIRUJIPONG: DEVELOPMENT OF CONTROL-ASSISTING SYSTEM FOR ELECTRIC ARC FURNACE BASED OF THERMAL CONDITION OF THE LADLE. ADVISOR: PONGTORN CHARUNYAKORN, Ph.D., CO-ADVISOR: SUNHAPOS CHATRANUWATHANA, Ph.D., 188pp.

Steelmaking process consumes considerably high energy, especially when the electric arc furnace (EAF) is employed. Reduction of energy consumption in this process can be achieved by incorporating temperature control to predict suitable tapping temperature. The objective of this thesis is to develop a program to assist the control of electric arc furnace operation in according to the thermal condition of the ladle.

The control-assist program receives input data read continuously from the process operation combine input data with mathematical model in order to accurately predict the thermal condition of the ladle. The program then predicts the suitable tapping temperature that ensure sufficient temperature level for proper operation at continuous casting station.

The control-assisting system was tested in the observed factory. It was found that the tapping temperature can be reduced by the average of 25 °C leading to electric energy saving of 22.5 kWh/ton of molten steel. This corresponds to a saving of 2.52 GWh per year or 7.56 Million baht per year.

Department: .....	Mechanical Engineering	Student's Signature.....
Field of Study: .....	Mechanical Engineering	Advisor's Signature.....
Academic Year: .....	2013	Co-advisor's Signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จริญญาภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้โอกาสในการทำงานวิจัยชิ้นนี้ ทำให้ได้รับความรู้มากมายเกี่ยวกับอุตสาหกรรมเหล็ก รวมถึงได้ให้คำแนะนำ คอยชี้แนะแนวทาง และช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยดีตลอดมา และขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันหพนันท์ จันทรานูวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่คอยให้คำแนะนำและความรู้เกี่ยวกับระบบการควบคุมแก่ข้าพเจ้า

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

ขอขอบคุณ บริษัทสยาม สตีล ซินดิเกต จำกัด มหาชน ที่ให้การสนับสนุนการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณคุณบุญล้ำ ศรีพิชัย ผู้อำนวยการ โรงงาน คุณพิชญ เจริญสมศักดิ์ ผู้จัดการ โรงงาน คุณวันชัย มนูญพานิชย์ ผู้จัดการส่วน โรงหลอม และคุณชเนต วงศ์ประยูร รวมไปถึงเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานทุกท่าน ที่กรุณาอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานในครั้งนี้

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร วาสนาเพียรพงศ์ ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิหน้าเหล็ก รวมไปถึงความรู้เกี่ยวกับวัสดุต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณศักดิ์ศิริ พุ่มพฤษย์ จากบริษัท พีพี ซีสเต็ม จำกัด ที่เสียสละเวลาให้คำแนะนำเกี่ยวกับการตรวจวัด การติดตั้งอุปกรณ์ และให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์สำหรับการตรวจวัด

ขอขอบคุณ คุณชัชวัสส์ วุฒิสิริศาสตร์ สำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำ รวมไปถึงคุณรักเกียรติ วารินศิริรักษ์ คุณชนวัฒน์ เก้ากิตติ และคุณยุรพันธ์ ลิมนันทน์ทวี ที่คอยช่วยเหลือในการเก็บข้อมูล ซึ่งทำให้งานนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมไปถึงครอบครัว ที่ให้กำลังใจ และคอยสนับสนุนข้าพเจ้ามาโดยตลอดจนจบการศึกษา ประโยชน์ใดที่ได้รับจากงานวิจัยในชิ้นนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่ผู้มีประคุณทุกท่าน

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญรูป .....	๓
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	4
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	5
1.6 การนำเสนอผลงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 การถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก .....	7
2.2 การถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	10
2.3 การถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก.....	16
2.4 การใช้จุดจากการทดลองมาปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	21
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	23
3.1 อุปกรณ์ในการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า .....	24

3.1.1	เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF) .....	24
3.1.2	เบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle).....	27
3.1.3	การหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting).....	30
3.2	กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า .....	32
3.2.1	วัฏจักรการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า.....	32
3.2.2	วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	33
3.3	การถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการผลิตทั้งหมด.....	35
3.3.1	การนำความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก .....	35
3.3.2	การพาความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก .....	37
3.3.3	การแผ่รังสีความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	39
3.4	การออกแบบตัวประมาณค่าสถานะ (State Estimator Design).....	44
3.4.1	การเปลี่ยนสมการถ่ายเทความร้อนมิติเดียวผ่านผนังให้อยู่ในรูปแบบ ปริภูมิสเตต .....	45
3.4.2	การออกแบบตัวประมาณค่าสถานะ (State Estimator Design) .....	48
<b>บทที่ 4</b>	<b>การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....</b>	<b>50</b>
4.1	บทนำ.....	50
4.2	การนำความร้อนของผนังข้างและผนังกั้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	50
4.3	แบบจำลองทางความร้อนระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก .....	52
4.4	แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนเมื่อมีการร่อนน้ำเหล็กหรือซ่อมแซม.....	54
4.5	แบบจำลองความร้อนระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก .....	59



4.5.1	ส่วนปริมาตรควบคุมที่ 1 (ส่วนน้ำเหล็ก).....	61
4.5.2	ส่วนปริมาตรควบคุมที่ 2 (ส่วนของถังน้ำเหล็ก).....	62
4.6	แบบจำลองทางความร้อนระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่ราง รับน้ำเหล็ก .....	63
4.7	แบบจำลองทางความร้อนระหว่างการนำน้ำเหล็กไปเททิ้ง .....	67
4.8	การออกแบบตัวประมาณค่าสภาวะ (State Observer Design).....	68
4.8.1	การเขียนระบบในรูปปริภูมิสแตต (State-Space).....	68
4.8.2	การออกแบบตัวประมาณค่าสภาวะ (Observer).....	81
4.8.3	ตัวประมาณค่าคาร์ลมาล (Kalman Filter).....	84
<b>บทที่ 5</b>	<b>การออกแบบระบบช่วยควบคุม .....</b>	<b>86</b>
5.1	การออกแบบระบบช่วยควบคุม .....	86
5.1.1	เบ้ารับน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (Green Ladle) .....	86
5.1.2	เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการใช้งานมาแล้ว (Used Ladle) .....	87
5.2	ตัวปฏิบัติการแต่ละกระบวนการ.....	95
5.2.1	ตัวปฏิบัติการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	95
5.2.2	ตัวปฏิบัติการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	97
5.2.3	ตัวปฏิบัติการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	98
5.2.4	ตัวปฏิบัติการถ่ายน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก .....	98
5.2.5	ตัวปฏิบัติการขนย้ายสแลกไปเททิ้ง .....	99
5.3	การทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสม.....	100

<b>บทที่ 6 การตรวจวัดและการบันทึกข้อมูล .....</b>	<b>103</b>
6.1 ข้อมูลเบื้องต้นในการทำงานของระบบการหลอมเหลวและสถานที่เก็บข้อมูล .....	103
6.1.1 ผลิตภัณฑ์ที่ผลิต .....	103
6.1.2 ขั้นตอนปฏิบัติงาน .....	104
6.2 อุปกรณ์การตรวจวัดและวิธีการตรวจวัด .....	105
6.2.1 วิธีการตรวจวัด .....	105
6.2.2 การเก็บข้อมูลจากรายงานการปฏิบัติงาน .....	112
6.3 ผลการตรวจวัด และการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดเบื้องต้น .....	114
6.3.1 ผลการตรวจวัดจากเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ตำแหน่งต่างๆ .....	114
6.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดเบื้องต้น .....	119
6.3.3 ผลการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B .....	125
6.3.4 ผลการตรวจวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน .....	128
6.3.5 การตรวจวัดโดยการจี้วัดอุณหภูมิขณะทำการถ่ายน้ำเหล็กจากเข้าสู่อ่าง รับน้ำเหล็ก .....	131
<b>บทที่ 7 ผลการศึกษาวิจัย.....</b>	<b>133</b>
7.1 ผลการจำลองตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	134
7.1.1 ผลการจำลองระหว่างกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	136
7.1.2 ผลการจำลองระหว่างกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า.....	139
7.1.3 ผลการจำลองช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็กและเทน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก ....	141
7.1.4 ผลการจำลองช่วงการขนสแลกไปเททิ้ง.....	143

7.1.5 ผลการจำลองอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการเก็บข้อมูล.....	144
7.2 ผลการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็ก.....	149
7.3 ลักษณะระบบช่วยควบคุมที่พัฒนาขึ้น.....	154
<b>บทที่ 8 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>156</b>
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	156
8.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	157
<b>รายการอ้างอิง.....</b>	<b>159</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>162</b>
ภาคผนวก ก. รายละเอียดอุปกรณ์ทดลอง แผนผังการเจาะอิฐ แพลนกล่องป้องกันความ ร้อน ลักษณะการก่ออิฐ.....	163
ภาคผนวก ข. การเปลี่ยนอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K เป็นชนิด B.....	177
ภาคผนวก ค. ตัวอย่างโปรแกรมที่เขียนด้วย MATLAB/Simulink.....	185
<b>ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....</b>	<b>188</b>

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ผลการทดลองของ Xia และ Ahokainen [11] .....	12
ตารางที่ 4.1 ค่าตัวต้านทานต่างๆในวงจรต้านทานความร้อน .....	58
ตารางที่ 4.2 ความหนาของก้อนย่อยที่แบ่งเพื่อเขียนระบบให้อยู่ในรูปปริภูมิสเตต .....	71
ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของจุดทำงานใหม่ที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงของ $Tm1, sw$ .....	81
ตารางที่ 6.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กข้ออ้อยเกรด SD30 .....	104
ตารางที่ 6.2 สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อยเกรด SD30 ตาม มอก. ....	104
ตารางที่ 6.3 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดอุณหภูมิ .....	106
ตารางที่ 6.4 ข้อมูลที่ได้จากใบรายงานปฏิบัติงาน .....	113
ตารางที่ 6.5 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก .....	116
ตารางที่ 7.1 แสดงค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็ก [4] .....	135
ตารางที่ 7.2 สมการแสดงอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่เลือกใช้งาน .....	137
ตารางที่ 7.3 ผลการเปรียบเทียบพลังงานที่สะสมในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในช่วงการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก .....	149
ตารางที่ 7.4 ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดที่เวลาสุดท้ายที่สามารถตรวจวัดด้วยการจุ่มวัดในกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กและถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กของรอบการทำงานจริง .....	150
ตารางที่ 7.5 ผลการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่แนะนำให้เทจากระบบช่วยควบคุมที่สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่แท้จริง .....	151

ตารางที่ 7.6	ผลการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เวลาสุดท้ายของการถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นเป็นอุณหภูมิที่เกิดจากการแนะนำอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทออกจาก เตาหลอม .....	152
ตารางที่ 7.7	ศักยภาพในการลดอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า .....	153

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	การใช้ปริมาณเหล็กโลกภัณฑ์ของประเทศไทยและปริมาณเหล็กที่ผลิตจากการหลอมเศษเหล็กในปี 2534 – 2551 โดยข้อมูลปริมาณเหล็กที่ผลิตจากการหลอมเศษเหล็กเริ่มเก็บปี 2546 (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย).....	2
รูปที่ 2.1	ผลการใช้แบบจำลองทางความร้อนของ Saunder กับผลการทดลองจริงกับตำแหน่งต่างๆ ของอิฐทนไฟ [5].....	8
รูปที่ 2.2	ผลการใช้แบบจำลองทางความร้อนของ Mohanty และ Satayayut เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ตำแหน่งต่างๆ [7].....	9
รูปที่ 2.3	ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองของ Fredman และ Saxen เทียบกับผลตรวจวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล [9].....	11
รูปที่ 2.4	ผลการทดลองที่ตำแหน่งทางด้านล่างของผนังข้าง ที่ตำแหน่ง 32, 180 และ 260 มิลลิเมตรจากผิวสัมผัสน้ำเหล็ก จะเห็นว่าการทดลองและการคำนวณตามแบบจำลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดี (เส้นประเกิดจากการตรวจวัด และเส้นทึบเกิดจากการคำนวณ) [10].....	11
รูปที่ 2.5	การคำนวณของ Xia และ Ahokainen ที่แสดงให้เห็นลักษณะการหมุนวนของน้ำเหล็กกับการเกิดขึ้นการกระจายตัวของอุณหภูมิ [11].....	13
รูปที่ 2.6	อุณหภูมิของน้ำเหล็กบริเวณผิวหน้าและผิวด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีการหมุนวนของน้ำเหล็ก [11] .....	13
รูปที่ 2.7	ก. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผนังเมื่อมีอุณหภูมิเริ่มต้นของผนังเบ้าไม่เท่ากันเทียบกับเวลา ข. การสูญเสียพลังงานต่อหน่วยพื้นที่เมื่อมีอุณหภูมิผนังเริ่มต้นไม่เท่ากันเทียบกับเวลา ค. การลดลงของอุณหภูมิหน้าเหล็กเมื่อมีอุณหภูมิของผนังเริ่มต้นไม่เท่ากันเทียบกับเวลา [11] .....	14

รูปที่ 2.8 การแจกแจงอุณหภูมิในเข้รับน้ำเหล็กที่ชั้นต่างๆ ของเข้รับน้ำเหล็ก [14] ..... 16

รูปที่ 2.9 การแจกแจงอุณหภูมิไร้มิติที่เป็นสัดส่วนกับระดับความสูงน้ำเหล็กตามเวลาไร้มิติ  
เมื่อไม่มีการแยกชั้นอุณหภูมิ [15] ..... 17

รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา เมื่อมีความเร็วในการถ่ายน้ำเหล็กออก  
จากเข้รับน้ำเหล็ก [15] ..... 18

รูปที่ 2.11 ขนาดและรูปร่างของเข้รับน้ำเหล็กที่ศึกษา [16] ..... 18

รูปที่ 2.12 การลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กและปริมาณความร้อนที่สูญเสียขณะถ่ายเทน้ำเหล็ก  
ออกจากเข้รับน้ำเหล็ก [16] ..... 19

รูปที่ 2.13 Streamline และการแจกแจงความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำเหล็กและอากาศ  
ภายในเข้รับน้ำเหล็กขณะเทน้ำเหล็ก ก. 1000s ข. 2250s ค. 3500s [17] ..... 20

รูปที่ 2.14 อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ก. 1000s ข. 2250s ค. 3500s [17] ..... 20

รูปที่ 2.15 ผลการทำนายอุณหภูมิของแก้วเมื่อมีการวัดอุณหภูมิของแก๊สไอเสียเข้ามาใช้กับ  
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [18] ..... 21

รูปที่ 2.16 ผลการทำนายอุณหภูมิของแก้วเมื่อมีการวัดอุณหภูมิของแก๊สไอเสีย อุณหภูมิของ  
อิฐทนไฟทางด้านล่างที่สัมผัสกับแก้ว และอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่อยู่ด้านบนของ  
แก้ว เข้ามาใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าสามารถทำนายอุณหภูมิของ  
แก้วได้แม่นยำมากขึ้น [18]..... 22

รูปที่ 3.1 ปริมาณการใช้เตาหลอมชนิดต่างๆ ในการผลิตเหล็กตั้งแต่ปี 1970 - 1955 [ข้อมูล  
จาก : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าสากล (international Iron and Steel Institute)] ..... 24

รูปที่ 3.2 แนวโน้มค่าการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ารวมไปถึงระยะเวลาในการเท  
น้ำเหล็ก..... 24

รูปที่ 3.3 ประเภทของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า..... 25

รูปที่ 3.4	ลักษณะและส่วนประกอบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของโรงงานที่ศึกษา [ข้อมูล จาก : The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA] .....	26
รูปที่ 3.5	ลักษณะของเบ้ารับน้ำเหล็ก [ข้อมูลจาก : The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA] .....	27
รูปที่ 3.6	ลักษณะของเบ้ารับน้ำเหล็กของโรงงานที่ศึกษา.....	29
รูปที่ 3.7	อุปกรณ์และลักษณะโดยทั่วไปในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง [ข้อมูลจาก : <a href="http://www.metsoc.org/virtualtour/processes/steel/Casters.asp">http://www.metsoc.org/virtualtour/processes/steel/Casters.asp</a> ].....	30
รูปที่ 3.8	ความสัมพันธ์ระหว่าง Metallurgical Length ความเร็วในการหล่อและอัตราการ ถ่ายเทความร้อนด้วยละอองน้ำ [ข้อมูลจาก: Continuous Casting User Manual, steeluniversity.org].....	31
รูปที่ 3.9	กระบวนการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า .....	33
รูปที่ 3.10	กระบวนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก [2].....	35
รูปที่ 3.11	รูปตัวอย่างของผิวปิดล้อม.....	41
รูปที่ 3.12	ลักษณะการแผ่รังสีที่พื้นผิววัตถุเทา.....	42
รูปที่ 3.13	วงจрд้านทานความร้อนของพื้นผิว k ในพื้นที่ปิดล้อมด้วยพื้นผิว n ผิว [4] .....	44
รูปที่ 3.14	ตัวอย่างของการเขียนสมการ 3.2 ในรูปแบบปริภูมิสแตต.....	46
รูปที่ 4.1	การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังข้างและผนังก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็กในปริมาตร ควบคุม [4].....	52
รูปที่ 4.2	การแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการอุ่น [4] .....	54
รูปที่ 4.3	การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า [4].....	55
รูปที่ 4.4	วงจрд้านทานความร้อนของการแผ่รังสีภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก [4].....	57
รูปที่ 4.5	การแปลงวงจรเดลตา (Delta, $\Delta$ ) ให้กลายเป็นวงจรวารีย์ (Wye, Y) [4] .....	57



รูปที่ 4.6 การแปลงวงจรต้านทานความร้อนแบบเดลต้า (Delta, $\Delta$ ) เป็นวงจรวาร์ย (Wye, Y) เมื่อเปลี่ยนชื่อความต้านทานใหม่ [4] ..... 58

รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบกฎกระแสของเคอร์ชอร์ฟและสมมูลทางความร้อนที่จุดต่อ [4]..... 59

รูปที่ 4.8 ปริมาตรควบคุมในการออกแบบแบบจำลองและการถ่ายเทความร้อนระหว่างกรชนถ่ายน้ำเหล็ก [4]..... 61

รูปที่ 4.9 การถ่ายเทความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมในผนังข้างและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก [4]..... 63

รูปที่ 4.10 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่มีฝาปิดระหว่างกระบวนการ [4]..... 64

รูปที่ 4.11 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนอย่างง่ายภายในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก [4]..... 66

รูปที่ 4.12 วงจรต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก [4]..... 67

รูปที่ 4.13 สมมติฐานของผนังด้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อสมมติให้ชั้นปลอกค้ำและชั้นทำงานไม่มีความต้านทานทางความร้อน โดยคิดเป็นอิฐก้อนเดียวกันทั้งหมด..... 70

รูปที่ 4.14 สมมติฐานของผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อสมมติให้ชั้นปลอกค้ำและชั้นทำงานไม่มีความต้านทานทางความร้อน โดยคิดเป็นอิฐก้อนเดียวกันทั้งหมด..... 70

รูปที่ 4.15 ความกว้างของก้อนย่อยเมื่อ (ซ้าย) ผนังด้านข้าง (ขวา) ผนังกัน..... 71

รูปที่ 4.16 พลั๊กซ์ความร้อนที่เข้า – ออก ก้อนย่อยก้อนที่ 1 ที่ผิวด้านข้าง (ปริมาตรควบคุมที่ 1)..... 72

รูปที่ 4.17 พลั๊กซ์ความร้อนที่เข้า – ออก ก้อนย่อยก้อนที่ 2 ที่ผิวด้านข้าง (ปริมาตรควบคุมที่ 1)..... 73

รูปที่ 4.18 พลั๊กซ์ความร้อนที่เข้า – ออก ก้อนย่อยก้อนที่ 6 ที่ผิวด้านข้าง (ปริมาตรควบคุมที่ 1)..... 74

รูปที่ 4.19 พลั๊กซ์ความร้อนที่เข้า – ออกผิวเปลือกเหล็กที่ผิวด้านข้าง ..... 75

รูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองในรูปแบบของ Lumped Capacitance Model กับแบบจำลองของชัชวัสส์ที่ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง ..... 75

รูปที่ 4.21	รูปแบบการเขียนวิธี Lumped Capacitance Model ในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK โดยจากรูปจุดสีเดียวกันแสดงรอยต่อของเส้น.....	76
รูปที่ 4.22	ผลการเปรียบเทียบพลังงานที่สะสมในเบ้ารับน้ำเหล็ก ระหว่างแบบจำลองในรูปแบบของ Lumped Capacitance Model กับแบบจำลองของซัฟฟิสต์ที่ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่อง.....	77
รูปที่ 4.23	ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้จากวิธีแบ่งก้อนย่อยและการทำเป็นเชิงเส้นของระบบ.....	80
รูปที่ 4.24	ผลลัพธ์ของการประมาณค่าเมื่อแทนข้อมูลที่สภาวะที่ 4 ที่ไม่มีสัญญาณรบกวน โดยเส้นทึบจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่า และเส้นบางจะเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง (บน) ตำแหน่งพิวด้านข้าง (ล่าง) ตำแหน่งพิวกัน.....	83
รูปที่ 4.25	ผลลัพธ์ของการประมาณค่าเมื่อแทนข้อมูลที่สภาวะที่ 4 ที่มีสัญญาณรบกวน โดยเส้นทึบจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่า และเส้นบางจะเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง (บน) ตำแหน่งพิวด้านข้าง (ล่าง) ตำแหน่งพิวกัน.....	83
รูปที่ 4.26	ผลลัพธ์ของการประมาณค่าโดยใช้ตัวประมาณค่าคาร์ลมาล เมื่อแทนข้อมูลที่สภาวะที่ 4 ที่มีสัญญาณรบกวน โดยเส้นทึบจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่า และเส้นบางจะเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง (บน) ตำแหน่งพิวด้านข้าง (ล่าง) ตำแหน่งพิวกัน.....	85
รูปที่ 5.1	วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำงาน.....	87
รูปที่ 5.2	วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการใช้งานมาแล้ว.....	88
รูปที่ 5.3	สายการทำงานภาพรวมของโปรแกรม.....	92
รูปที่ 5.4	สายงานของตัวปฏิบัติการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	96
รูปที่ 5.5	สายงานของตัวปฏิบัติการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	97
รูปที่ 5.6	สายงานของตัวปฏิบัติการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	98

รูปที่ 5.7	สาขงานของตัวปฏิบัติการถ่ายน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก .....	99
รูปที่ 5.8	สาขงานของตัวปฏิบัติการขนย้ายสแลกไปเททิ้ง .....	99
รูปที่ 5.9	สาขงานการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสม .....	101
รูปที่ 6.1	แผนผังและเส้นทางการเคลื่อนที่ของเบ้ารับน้ำเหล็กในโรงงานที่ทำการศึกษาวิจัย และเก็บข้อมูล [4] .....	105
รูปที่ 6.2	ขนาดของเบ้ารับน้ำเหล็ก และตำแหน่งติดตั้ง เทอร์โมคัปเปิ้ล ในการเก็บข้อมูล.....	109
รูปที่ 6.3	การเจาะอิฐเพื่อฝังเทอร์คัปเปิ้ลชนิด K ลงไปอิฐทนไฟที่ตำแหน่ง 50 และ 100 มิลลิเมตร จากผิวที่สัมผัสน้ำเหล็ก.....	109
รูปที่ 6.4	ก. การเจาะอิฐเพื่อฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B เพื่อวัดอุณหภูมิน้ำเหล็ก .....	110
รูปที่ 6.5	กล่องป้องกันอุณหภูมิ แรงกระแทก และตัวที่ขีต Data Logger ติดกับเบ้ารับน้ำ เหล็กตลอดเวลาการทำงาน .....	111
รูปที่ 6.6	ลักษณะกล่องป้องกันอุณหภูมิ และภาคตัดตามยาวของตัวกล่อง.....	111
รูปที่ 6.7	รายละเอียดของใบรายงาน CCM และใบรายงานเดาหลอม .....	112
รูปที่ 6.8	ผลการตรวจวัดอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดการทำงาน 11 รอบการทำงาน.....	115
รูปที่ 6.9	ผลการตรวจวัดช่วงตำแหน่งการเตรียมเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการอุ่น .....	120
รูปที่ 6.10	ผลการตรวจวัดรอบการทำงานที่ 1 ช่วงหลังจากอุ่นเสร็จแล้ว.....	122
รูปที่ 6.11	ผลการตรวจวัดรอบการทำงานที่ 2 (รอบที่ 134855) ที่ไม่มีการปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก ขณะเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก.....	124
รูปที่ 6.12	ผลของการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B เมื่อเปลี่ยนแปลงข้อมูลจากชนิด K เป็น ชนิด B.....	126
รูปที่ 6.13	ผลการตรวจวัดของอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B ในรอบการทำงานที่ 1 เปรียบเทียบกับผลการจิมวัดทาของทางโรงงาน .....	128
รูปที่ 6.14	ภาพถ่ายความร้อนอุณหภูมิผิวสแลก ช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็ก.....	129

รูปที่ 6.15	ภาพถ่ายความร้อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กขณะรอการเทน้ำเหล็ก.....	129
รูปที่ 6.16	ภาพถ่ายความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กช่วงการซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็ก.....	130
รูปที่ 6.17	ภาพถ่ายความร้อนของอุณหภูมิผิวเบ้ารับน้ำเหล็ก ณ ตำแหน่งที่มีการวัดอุณหภูมิผิว.....	130
รูปที่ 6.18	ความอันตรายจากการจี้วัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กขณะถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ก.ก่อนจี้วัดอุณหภูมิหน้าเหล็ก ข.หลังจากจี้วัดอุณหภูมิหน้าเหล็ก.....	132
รูปที่ 7.1	ผลการจำลองอุณหภูมิอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงของการอุ่นด้วยหัวเผาตั้ง.....	138
รูปที่ 7.2	ผลการจำลองอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีการอุ่นด้วยหัวเผาแบบ นอน.....	138
รูปที่ 7.3	ผลการจำลองระหว่างกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่าในช่วงที่มีการแทน ข้อมูลจากการทดลอง.....	140
รูปที่ 7.4	ผลการจำลองระหว่างกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่าในช่วงที่ไม่มีการแทน ข้อมูลจากการทดลอง.....	140
รูปที่ 7.5	ผลการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็กและถ่ายน้ำ เหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก.....	142
รูปที่ 7.6	ผลการจำลองอุณหภูมิหน้าเหล็กและอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เทียบกับผลการวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กด้วยเทอร์ โมคัปเปิ้ลชนิด B, การจี้วัดและผลการตรวจวัดจริงที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรของ ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 4.....	143
รูปที่ 7.7	ผลการจำลองและผลการตรวจวัดจริงในช่วงขนสแลกไปเททิ้ง.....	144
รูปที่ 7.8	ผลการจำลองอุณหภูมิกายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ของผนังด้านข้าง ตลอดช่วงการเก็บข้อมูล เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด.....	145

รูปที่ 7.9	ผลการจำลองอุณหภูมิกายในเข้รับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ของผนังด้านข้างในช่วงรอบการทำงานที่ 1-4 ของเข้รับน้ำเหล็ก เปรียบเทียบกับผลของการตรวจวัด .....	145
รูปที่ 7.10	ผลการจำลองอุณหภูมิกายในเข้รับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ของผนังด้านข้างในช่วงรอบการทำงานที่ 7-10 ของเข้รับน้ำเหล็ก เปรียบเทียบกับผลของการตรวจวัด .....	146
รูปที่ 7.11	ผลการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กและอุณหภูมิต่ำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เทียบกับผลการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B และผลการตรวจวัดจริงที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรของผนังเข้รับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 5 .....	147
รูปที่ 7.12	ผลการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กและอุณหภูมิต่ำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เทียบกับผลการวัดด้วยการจุ่มวัด และผลการตรวจวัดจริงที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรของผนังเข้รับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 10 .....	148
รูปที่ 7.13	อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กเริ่มต้นเป็นค่าจากการแนะนำ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เกิดจริงในรอบการทำงานที่ 4.....	152
รูปที่ 7.14	Black Block Diagram ของระบบช่วยควบคุม.....	154
รูปที่ 7.15	ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานของระบบช่วยควบคุม.....	155

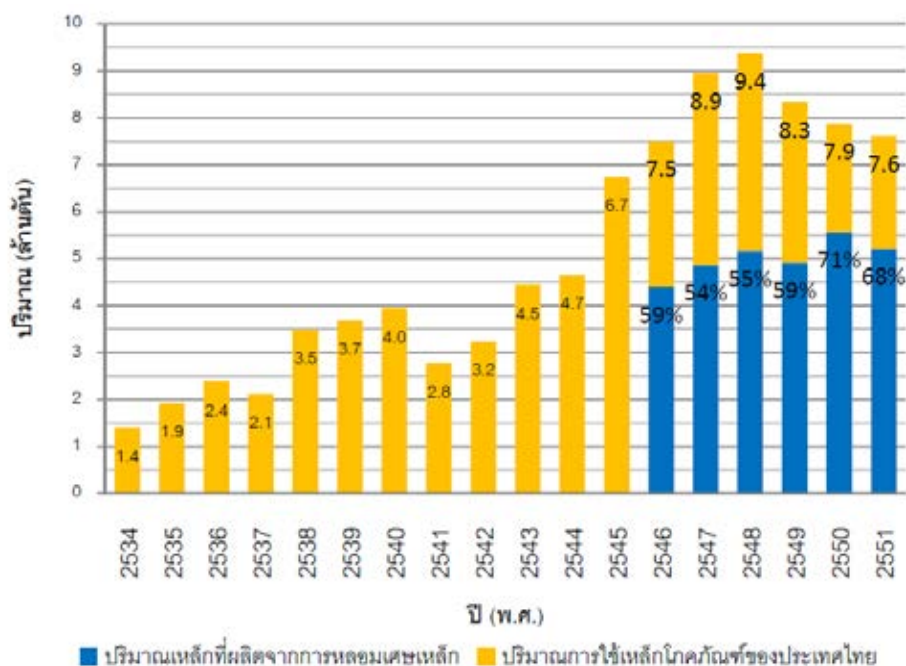
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์

อุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้าในประเทศไทยนับเป็นอุตสาหกรรมขั้นพื้นฐานที่มีความสำคัญต่อโรงงานอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องนำผลิตภัณฑ์จำพวกเหล็กและเหล็กกล้าไปใช้ประโยชน์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ ที่นำเหล็กไปเป็นชิ้นส่วนต่างๆ ของรถ หรือจะเป็นอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ที่นำเหล็กไปเป็นโครงสร้างเพื่อเสริมความแข็งแรง จากตัวอย่างข้างต้นพบว่าอุตสาหกรรมทั้งสองนับวันก็จะยิ่งเติบโตขึ้น นั่นหมายความว่าปริมาณการใช้เหล็กและเหล็กกล้าของประเทศไทยนับวันก็จะยิ่งเติบโตขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้แล้วตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการใช้ปริมาณเหล็กและเหล็กกล้านั้นจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงขึ้นอยู่กับฐานะทางเศรษฐกิจในแต่ละปีด้วย ดังรูปที่ 1.1 จะสังเกตได้ว่า ปริมาณการใช้เหล็กและเหล็กกล้าในประเทศไทยนั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นในปี 2541 – 2548 เนื่องจากเศรษฐกิจในปีเหล่านี้กำลังเจริญเติบโต แต่ต้องมาหยุดชะงักในปี 2549 ทำให้ปริมาณการใช้เหล็กและเหล็กกล้าลดลงตามลำดับ

เหล็กเป็นแร่ธาตุที่สกัดได้จากสินแร่จำพวกที่เรียกว่า Magnetite หรือ Hematite สินแร่พวกนี้ก่อนที่จะออกมาเป็นธาตุเหล็ก ต้องผ่านกระบวนการที่นำไปปลงในเตาที่เรียกว่า Blast Furnace เพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าต่อไป สำหรับประเทศไทยมีแหล่งผลิตสินแร่ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กและเหล็กกล้าแต่ไม่สามารถนำมาถลุงใช้เองภายในประเทศได้ จึงหันไปใช้ทางเลือกในการผลิตเหล็กขึ้นมาใช้เองภายในประเทศจากการนำเหล็กที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ดังรูปที่ 1.1 พบว่าในปีหลังๆ จะมีข้อมูลปริมาณการใช้ปริมาณเหล็กที่ผลิตที่ผลิตเหล็กจากการหลอมเศษเหล็ก ในปี 2547 มีการนำเศษเหล็กกลับมาใช้งานใหม่เป็นปริมาณ 54% คิดเป็น 4.8 ล้านตัน จากปริมาณเหล็กที่ใช้ทั้งหมด 8.9 ล้านตัน



รูปที่ 1.1 การใช้ปริมาณเหล็กโคกกันฑ์ของประเทศไทยและปริมาณเหล็กที่ผลิตจากการหลอมเศษเหล็กในปี 2534 – 2551 โดยข้อมูลปริมาณเหล็กที่ผลิตจากการหลอมเศษเหล็กเริ่มเก็บปี 2546 (สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย)

พบว่าการนำเหล็กกลับมาใช้ใหม่ในประเทศไทยนั้น มีการนำเศษเหล็กมาหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF: Electric Arc Furnace) เป็นปริมาณร้อยละ 84 ของจำนวนโรงงานผลิตเหล็กทั้งหมดภายในประเทศ นอกจากนี้การสำรวจของสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทยในปี 2547 พบว่ามีการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้านั้นอยู่ที่ 545 kW-hr/ตัน คิดเป็น 2,616 MW-hr จึงนับเป็นการใช้พลังงานที่สูงมากอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่น่าจับตามอง จากการศึกษาข้อมูลในปี 2543 – 2546 ของสถาบันพลังงานเพื่ออุตสาหกรรม[1] พบว่ามูลค่าพลังงานที่ใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็กมีมูลค่าเป็นอันดับต้นๆ ของมูลค่าพลังงานที่ใช้ในกลุ่มอุตสาหกรรมทั้งหมด 30 กลุ่มอุตสาหกรรม

สำหรับค่าการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในประเทศเยอรมนีในปี 2547 นั้นจะอยู่ที่ 388 kW-hr/ตัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใช้พลังงานในกลุ่มอุตสาหกรรมเหล็กของประเทศไทยในปี

เดียวกันยังมีความสิ้นเปลืองในกระบวนการต่างๆ ซึ่งจำเป็นต้องลดให้ได้จึงมุ่งเน้นไปยังกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าที่มีจำนวนมากที่สุดในประเทศไทย

กระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้าจะมีการใช้การใช้พลังงานหลักๆ อยู่ 2 ประเภท จาก 2 กระบวนการคือ

1. พลังงานไฟฟ้า สำหรับกระบวนการหลอมเศษเหล็กให้กลายเป็นน้ำเหล็กในเตาอาร์คไฟฟ้า โดยจะจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าสู่แท่งอิเล็กโทรด (electrode) ก่อให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่สูง ในขณะที่เศษเหล็กที่อยู่ในเตาหลอมที่กำลังจะถูกหลอมเหลวจะมีศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ เมื่อเกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าแล้ว ก็จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลจากศักย์ที่สูงกว่ามาศักย์ที่ต่ำกว่าก่อให้เกิดความร้อน เสียง และแสง โดยความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถหลอมเหล็กที่อยู่ในสถานะของแข็งเป็นเหล็กเหลวที่อยู่ในสถานะของเหลวได้ (อุณหภูมิหลอมเหลวของเหล็กอยู่ที่ประมาณ 1550 องศาเซลเซียส) จากนั้นก็นำไปหล่อเป็นเหล็กแท่งต่างๆ ตามที่ต้องการนำไปใช้งาน
2. พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากการขนถ่ายน้ำเหล็กจากเตาหลอมไปยังสถานีหล่อเป็นเหล็กแท่งจะใช้เบ้ารับน้ำเหล็กเป็นตัวขนถ่าย อิฐทนไฟของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะต้องทนอุณหภูมิที่สูงได้ ดังนั้นก่อนนำเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่ออิฐทนไฟเสร็จใหม่ๆ จำเป็นต้องนำมาอุ่นโดยใช้หัวเผาไล่ความชื้นออกเพื่อป้องกันความเสียหายของอิฐทนไฟเหล่านั้น นอกจากนี้การอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กยังสามารถช่วยป้องกันการเกิดความเค้นทางความร้อน (Thermal Stress) ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายจากการเปลี่ยนอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (Thermal Shock) ซึ่งอาจจะก่อผลเสียตามมา

ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น [2] ได้คำนวณปริมาณพลังงานที่จะประหยัดได้ในการหลอมเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้าขนาด 25 ตันของโรงงานแห่งหนึ่ง พบว่าการลดอุณหภูมิการเทน้ำเหล็ก 10 องศาเซลเซียสสามารถประหยัดพลังงานปีละ 840,000 kW-hr ช่วยลดต้นทุนการผลิตทางพลังงานลงปีละ 2.5 ล้านบาท นอกจากนี้ จักรวช จรูลสารทูล [3] พบว่าการใช้หัวเผาประเภทรีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Burner) อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กขนาด 25 ตันมีข้อดีคือมีประสิทธิภาพสูงและเป็นการใช้พลังงานที่มีราคาถูกกว่า



ไฟฟ้า ต่อมาซัววัสส์ วุฒิสิริศาสตร์ [4]และคณะ พบว่าเมื่อมีการลดอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอม เหล็กลงทุกๆ 1 องศาเซลเซียส และเพิ่มพลังงานในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจะสามารถลดการใช้พลังงาน สุทธิภายในกระบวนการลงได้ 1.88 MJ คิดเป็น 0.022% ของพลังงานทั้งหมดภายในกระบวนการ หลอมเหล็กและการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กปกติ หากพิจารณาเป็นมูลค่าคิดเป็น 16.75 บาทต่อเตา ด้วย ระเบียบวิธีเชิงเลขที่เขาได้สร้างขึ้นมาเพื่อทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กให้เหมาะสมกับพลังงานที่ สะสมอยู่ในตัวเบ้ารับน้ำเหล็ก พบว่ามีข้อเสียคือช่วงรอบการใช้เบ้ารับน้ำเหล็กรอบหลังๆ นั้น ผลที่ คำนวณได้กับค่าที่ได้จากการวัดจริงก็มีความคลาดเคลื่อนกันทำให้สามารถทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็ก ที่เทได้คลาดเคลื่อนไปมากเช่นกัน นอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นไม่มีความยืดหยุ่น ต่อลักษณะกิจกรรมเช่นที่ช่วงของการถ่ายน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่เขียนขึ้นนั้นต้องมีฝาปิดบริเวณที่ปากเบ้ารับน้ำเหล็ก ถ้าหากเกิดเหตุให้ไม่ได้ปิดฝา ปิดเบ้ารับน้ำเหล็กในช่วงนี้ผลการคำนวณก็จะมีความผิดพลาดอีกด้วย

นอกจากนี้นักวิจัยหลายท่านเช่น Fredman,Saxen และ Torrkulla [10] ได้พยายามที่จะปรับปรุง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการเพิ่มความซับซ้อนของแบบจำลองขึ้นเช่นปรับเปลี่ยนการถ่ายเท ความร้อนจาก 1 มิติ เป็น 2 มิติ พบว่าจะมีข้อเสียตรงที่ไม่สะดวกแก่การใช้งานและอาจจะเกิดความ ผิดพลาดจากการคิดตัวเลขด้วยเช่นกัน ดังนั้นหากมีการรับข้อมูลที่ี้ได้จากการวัดจริงเข้ามาปรับแก้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำนายแม่นยำมากยิ่งขึ้น ก็สามารถทำนายค่า อุณหภูมิน้ำเหล็กได้อย่างแม่นยำมากขึ้น ทำให้สามารถประหยัดรายจ่ายค่าพลังงานมากขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ให้สัมพันธ์กับสถานะทางความ ร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัดจริงอย่างต่อเนื่องเพื่อลดการใช้พลังงานในกระบวนการ ผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 ติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อใช้ในการประมวลผลสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลในการควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ส่งสัญญาณค่าจากการตรวจวัดอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ค่าดังกล่าวแบบเวลาจริง (Real Time) โดยดำเนินการในโรงงานที่ใช้เบ้ารับน้ำเหล็กขนาด 25 ตัน
- 1.3.2 ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลที่ประมวลจากสถานะการทำงานจริงร่วมกับค่าที่ได้จากการตรวจวัด

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้รูปแบบการควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เพื่อให้คนควบคุมเตาหลอมสามารถควบคุมการทำงานให้ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ได้อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสมสำหรับการหล่ออย่างต่อเนื่อง (Continuous casting)

### 1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาทฤษฎี ข้อมูล และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อช่วยในการวิจัย
- 1.5.3 ติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดเพื่อการวิจัย
- 1.5.4 นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไปตรวจใช้งานเพื่อทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่สามารถเทได้ และประเมินศักยภาพการประหยัด
- 1.5.5 สรุปผลการศึกษาวิจัย และจัดทำเอกสารเพื่อการเผยแพร่

## 1.6 การนำเสนอผลงานวิจัย

1. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26, The 26<sup>th</sup> Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT), 24 – 27 ตุลาคม 2555, ดุสิต ไอส์แลนด์ รีสอร์ท จังหวัดเชียงราย นำเสนอผลงานในหัวข้อเรื่อง การลดใช้พลังงานในกระบวนการผลิตเหล็กกล้าโดยการปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างรอการเทน้ำเหล็ก (Energy Reduction in Steelmaking Process by Covering the Ladle with a Shield During Delay time for the next tapping)
2. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9, The 9th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT), 8 – 10 พฤษภาคม 2556, ชลพฤษ์ รีสอร์ท อ.บ้านนา จ. นครนายก นำเสนอผลงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง การประมาณการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กโดยใช้ตัวประมาณค่าเพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็กของกระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Kalman Filter Estimation in Steelmaking Process for Estimate Steel Temperature before Tapping)
3. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, The 27<sup>th</sup> Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT), 16 – 18 ตุลาคม 2556, โรงแรมดุสิตธานี พัทยา นำเสนอผลงานในหัวข้อเรื่อง การพัฒนาระบบช่วยควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก (Development of Control-Assisting System for Electric Arc Furnace Based on Thermal Condition of the Ladle)

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

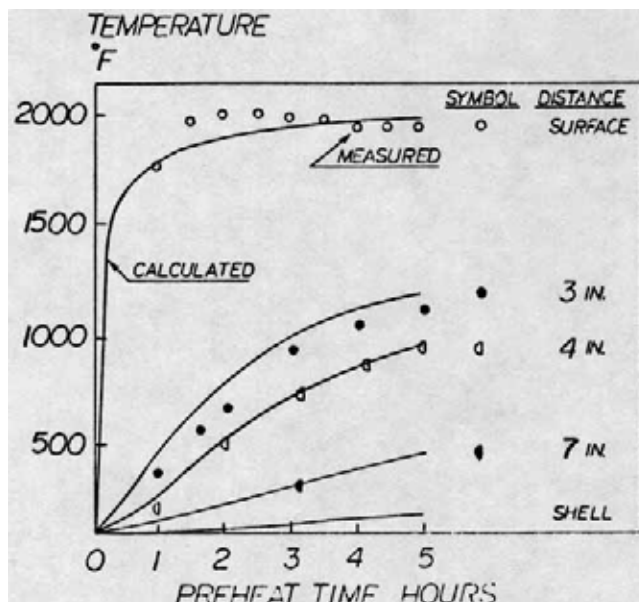
งานวิจัยนี้เป็นการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กให้สอดคล้องกับพลังงานที่สะสมอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กโดยใช้จุดจากการผลการใช้งานมาปรับแก้แบบจำลอง จึงจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลหรือแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องและจุดที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการการทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็ก ดังนั้นจึงแบ่งผลการศึกษาออกเป็นกระบวนการต่างๆ ตามลำดับการใช้งานและวิธีการใช้จุดจากการทดลองมาปรับแก้แบบจำลองที่ได้เขียนขึ้น เพื่อหาวิธีการควบคุมได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

#### 2.1 การถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

เบ้ารับน้ำเหล็กมีหน้าที่ขนถ่ายน้ำเหล็กจากการหลอมที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อที่จะถ่ายน้ำเหล็กไปที่สถานีหล่อแบบต่อเนื่อง ดังนั้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจึงจำเป็นต้องก่ออิฐทนไฟขึ้นมาเพื่อป้องกันน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงทำความเสียหายต่อเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งอาจจะก่อให้เกิดการรั่วไหลของน้ำเหล็กได้ ดังนั้นเมื่อเริ่มต้นใช้งานเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการก่ออิฐมาแล้วจะต้องถูกนำไปเผาเพื่อไล่ความชื้นและเพื่อปรับอุณหภูมิภายในเนื้อผิวของอิฐทนไฟให้รองรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลันเนื่องจากน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูง

Saunders [5] ได้เสนอแบบจำลองทางความร้อนของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยการวิเคราะห์ค่าต่างๆ จากไอเสียในการเผาไหม้ และพบว่าการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีการให้พลังงานแก่อิฐทนไฟคิดเป็น 70% ของพลังงานทั้งหมดเพื่อที่จะทำให้เข้าสู่ภาวะคงตัว (steady state) และจะพบว่าภายใน 5 รอบของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กจะทำให้การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ภาวะคงตัว นอกจากนี้สภาวะเริ่มต้นของอุณหภูมิจะเป็นปัจจัยหลักในการสูญเสียความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดกระบวนการทำงาน สำหรับการงานที่ปกติ การใช้แบบจำลองทางความร้อนของ Saunders กับผลการตรวจวัดจริง

ที่ตำแหน่งต่างๆของอิฐทนไฟในสภาวะการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กและตอนถ่ายน้ำเหล็ก( tap- teem) จะสอดคล้องกัน ดังรูปที่ 2.1

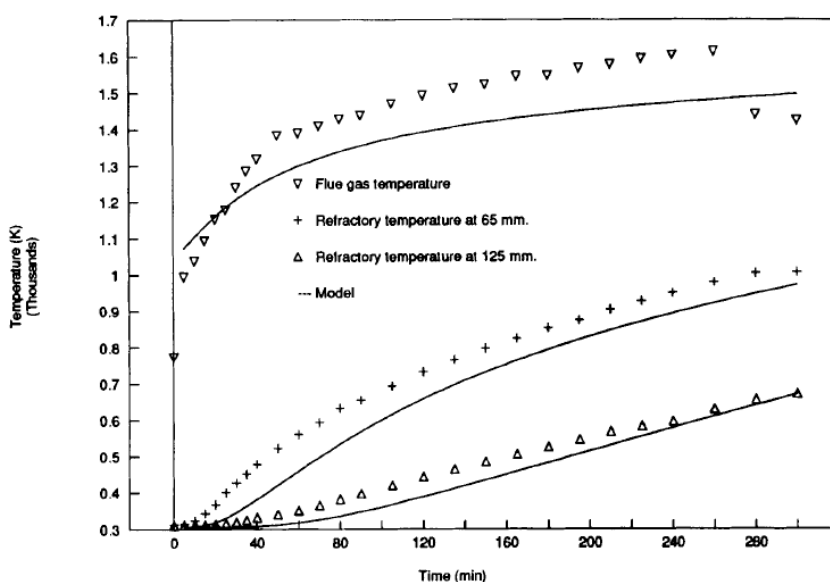


รูปที่ 2.1 ผลการใช้แบบจำลองทางความร้อนของ Saunder กับผลการทดลองจริงกับ ตำแหน่งต่างๆ ของอิฐทนไฟ [5]

ต่อมา Mohanty และ Satayayut [7] ได้ศึกษางานของ Joyce[6] ที่พบว่า การอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจะช่วยลดการถ่ายเทพลังงานจากน้ำเหล็กสู่ตัวเป่ารับน้ำเหล็กได้ ส่งผลต่อการลดพลังงานการใช้ไฟฟ้าในเตาอาร์คไฟฟ้าเพื่อที่จะอุ่นน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าเดิม และยังส่งผลให้เวลาในแต่ละรอบของการหลอมเหล็กลดน้อยลง ดังนั้น Mohanty และ Satayayut จึงมีความต้องการที่จะศึกษาแบบจำลองในการทำนายเวลาที่ใช้ในการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็กแล้วนำมาตรวจสอบกับผลการทดลองที่ได้จากการฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลภายในเนื้อของอิฐทนไฟโดยสมมติให้แบบจำลองมีการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ และเนื่องจากอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่สูงในขณะที่มีการอุ่นเป่ารับน้ำเหล็ก จึงมีการสมมติให้มีการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เป่ารับน้ำเหล็กด้วยการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อนอย่างเดียว และสมมติให้มีพลังงานเข้าสู่เป่ารับน้ำเหล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่มีค่าคงที่ เนื่องจากมีการผสมของเชื้อเพลิงและการมีการไหลแบบปั่นป่วนของแก๊สที่เกิดจากการเผาไหม้ ในแบบจำลองของ

Mohanty และ Satayayut ได้พิจารณาความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงโดยได้ศึกษาค่าต่างๆ จาก Perry และ Green นำมาสร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนจากการเผาไหม้ทั้งหมด และยังมีประเด็นที่น่าสนใจคือเขาทำการปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนในรูปการแผ่รังสีความร้อนจากพื้นผิวแต่ละพื้นผิวให้อยู่ในรูปที่ง่ายต่อการใช้งานมากขึ้นกว่าตามที่ Perry และ Green ได้เสนอมาพบว่าผลที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างดังรูปที่ 2.2 เนื่องจากข้อสมมติที่ตั้งไว้ดังกล่าวข้างต้น

การศึกษาของ Mohanty และ Satayayut ได้พบว่าอัตราการเผาไหม้ ปริมาณออกซิเจนที่สูงขึ้น ทำให้อุณหภูมิของแก๊สเสียเพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ทำจากอิฐทนไฟเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงขึ้นไปด้วย



รูปที่ 2.2 ผลการใช้แบบจำลองทางความร้อนของ Mohanty และ Satayayut เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ตำแหน่งต่างๆ [7]

สมศักดิ์ คงโชติ [8] พยายามสร้างแบบจำลองทางความร้อนระหว่างการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กพบว่าในการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิสูง อิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อนจะมีมากดังนั้นจึงสมมติให้เบ้ารับน้ำเหล็กได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนเพียงอย่างเดียว และในการสร้างแบบจำลองยังสมมติให้เบ้ารับน้ำเหล็กประพฤติตัวเป็นวัตถุดำ พบว่าผลเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองและผลการทดลอง

บริเวณก้นถึงกลางเข่ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน และคลาดเคลื่อน 10% ในบริเวณกลางเข่าถึงปากเข่ารับน้ำเหล็ก

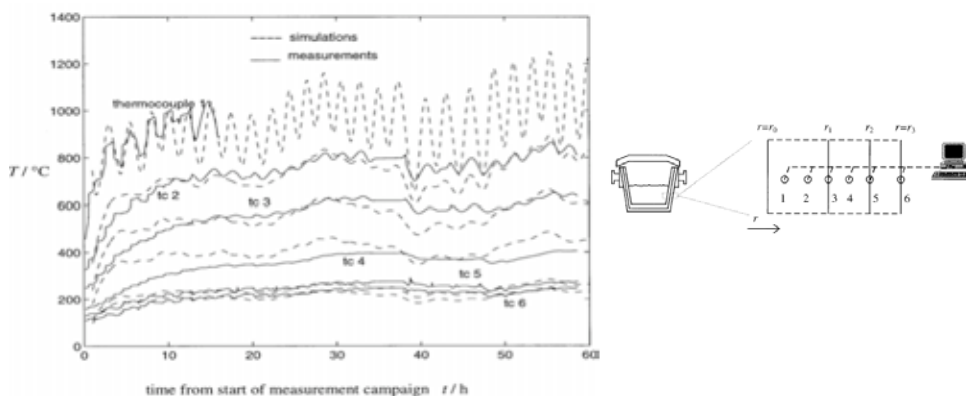
จะเห็นว่าจากการศึกษาของ Mohanty และ Satayayut[7] ร่วมกับ สมศักดิ์ คง โชติ[9] นั้นจะมีประเด็นที่เหมือนกันคือความร้อนที่อิฐทนไฟได้รับเนื่องจากการอุ่นเข่ารับน้ำเหล็กจะเป็นผลเนื่องจากการระบายการถ่ายเทความร้อนที่มีอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนแบบแผ่รังสีความร้อนมากที่สุด เนื่องจากความร้อนของแก๊สที่เกิดระหว่างการอุ่นมีอุณหภูมิสูง ดังนั้น ณ กระบวนการอุ่นเข่ารับน้ำเหล็กหากมีการศึกษาเจาะลึกเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของแก๊สร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้นั้นจะทำให้ทำนายอุณหภูมิภายในเข่ารับน้ำเหล็กแม่นยำมากขึ้น

## 2.2 การถ่ายเทความร้อนในเข่ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก

นอกจากต้องศึกษาการถ่ายเทความร้อนในการอุ่นเข่ารับน้ำเหล็กแล้วต้องศึกษาการถ่ายเทความร้อนขณะขนถ่ายน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าไปสู่สถานีหล่อแบบต่อเนื่องด้วย เนื่องจากเป็นกระบวนการที่มีความสัมพันธ์กัน กล่าวคือ ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิในเข่ารับน้ำเหล็กหลังจากที่มีการอุ่นเข่ารับน้ำเหล็กจะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิน้ำเหล็กที่สามารถเทและนำไปใช้งานได้ เมื่อน้ำเหล็กสัมผัสกับชั้นของอิฐทนไฟในเข่ารับน้ำเหล็กจะเกิดการถ่ายเทความร้อนซึ่งกันและกัน จากนั้นจะนำไปสู่การกระจายตัวของอุณหภูมิในเข่ารับน้ำเหล็กที่ต่างกันออกไปขึ้นกับอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทลงมาสัมผัสกับเข่ารับน้ำเหล็กและสถานะทางความร้อนของตัวเข่ารับน้ำเหล็กเอง และจะเกี่ยวเนื่องต่อไปอย่างนี้ตลอดช่วงระยะเวลาการทำงานของเข่ารับน้ำเหล็ก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ การขนถ่ายน้ำเหล็กที่เกิดขึ้น ว่ามีปัจจัยใดที่เกี่ยวข้องต่อการถ่ายเทความร้อนบ้าง

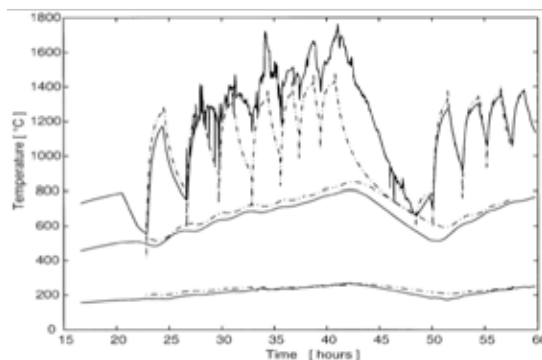
Fredman และ Saxen [9] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขณะขนถ่ายน้ำเหล็กโดยใช้พิกัดทรงกระบอก และสมมติให้มีการนำความร้อนแบบไม่คงตัว (Transient) และเป็นหนึ่งมิติโดยให้ขึ้นกับรัศมีของทรงกระบอกเท่านั้น นอกจากนี้การใช้วิธีหาผลเฉลยของ Fredman และ Saxen นั้นต้องแก้สมการโดยใช้วิธีการแยกตัวแปร (Separation of Variable ) ซึ่งผลที่ได้ที่ตำแหน่งต่างๆ จะใกล้เคียงกับ

ผลการทดลองจริงที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 2.3 แต่เกิดความยุ่งยากในการแก้สมการเหล่านั้น ทำให้การนำไปใช้งานอาจไม่สะดวกนัก



รูปที่ 2.3 ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองของ Fredman และ Saxen เทียบกับผลตรวจวัดที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล [9]

ต่อมาพวกเขาได้ศึกษาเพิ่มเติมร่วมกับ Torrkulla [10] ด้วยการพิจารณาถ่ายเทความร้อนในสองมิติ โดยเพิ่มการแจกแจงอุณหภูมิที่รับความสูงต่างๆตามแนวแกนกลางของเข้รับน้ำเหล็กให้มีค่าไม่คงที่ ทำให้การแก้สมการย่อยเชิงอนุพันธ์แบบ 2 มิติที่เกิดขึ้นเพิ่มความยุ่งยากในการแก้สมการเข้าไปอีก แต่ผลการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงที่ได้จะมีผลใกล้เคียงกับผลจากแบบจำลอง ที่ตำแหน่ง 32, 180 และ 260 มิลลิเมตรจากผิวที่สัมผัสน้ำเหล็กมากขึ้นดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ผลการทดลองที่ตำแหน่งทางด้านล่างของผนังข้าง ที่ตำแหน่ง 32, 180 และ 260 มิลลิเมตรจากผิวสัมผัสน้ำเหล็ก จะเห็นว่าการทดลองและการคำนวณตามแบบจำลองสอดคล้องกันเป็นอย่างดี (เส้นประเกิดจากการตรวจวัด และเส้นทึบเกิดจากการคำนวณ) [10]



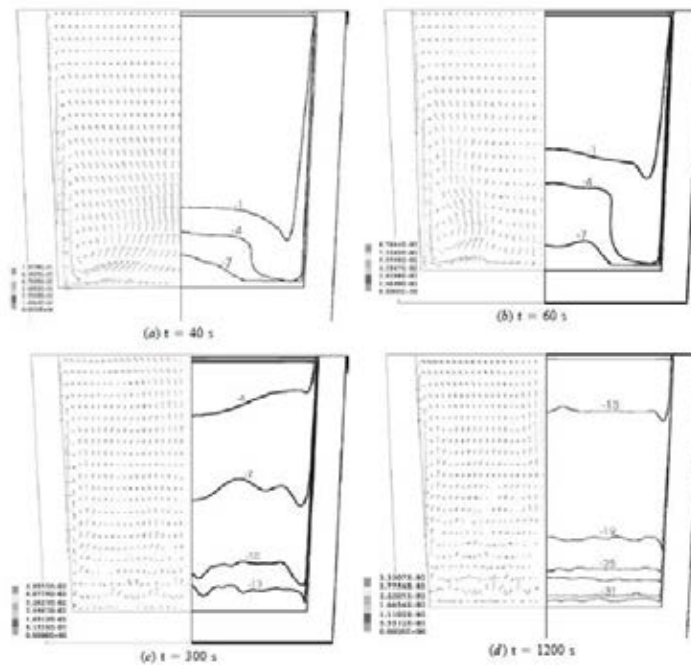
พบว่าการศึกษาเพิ่มเติมของ Fredman, Saxen[9] และ Torrkulla[10] ได้ปรับปรุงการใช้ระเบียบวิธีเชิงเลขเพื่อให้ผลการทำนายแม่นยำขึ้นดังที่เห็นว่าพวกเขาได้ปรับปรุงให้แบบจำลองจาก 1 มิติ เป็น 2 มิติ แต่เป็นการเพิ่มการคำนวณให้มันยุ่งยากซับซ้อนเข้าไปอีก

นอกจากนี้ในปี 2001 Xia และ Ahokainen[11] สร้างแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในลักษณะ 2 มิติ ขณะทำการร่อนถ่ายน้ำเหล็ก โดยทดลองแบ่งการทดลองออกเป็นดังตารางที่ 2.1

พบว่าการกำหนดอัตราการถ่ายเทความร้อนที่กำหนดให้แตกต่างกันในแต่ละบริเวณจะทำให้เกิดปรากฏการณ์หมุนวนของน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่องดังรูปที่ 2.5 ดังจะเห็นได้ว่าตอนเริ่มแรกของการถ่ายเทความร้อนจะเริ่มเกิดการหมุนวนของน้ำเหล็กโดยที่น้ำเหล็กส่วนที่เย็นจะจมสู่ก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก บริเวณผนังเบ้ารับน้ำเหล็กส่วนน้ำเหล็กที่ร้อนกว่าก็จะลอยสู่ผิวน้ำเหล็กบริเวณกึ่งกลางเบ้ารับน้ำเหล็ก หลังจากนั้นเมื่อใช้เวลานานขึ้นก็จะเกิดการหมุนวนของน้ำเหล็กวงใหม่ขึ้นมา แต่ลักษณะการหมุนวนจะค่อยๆ ลดลง

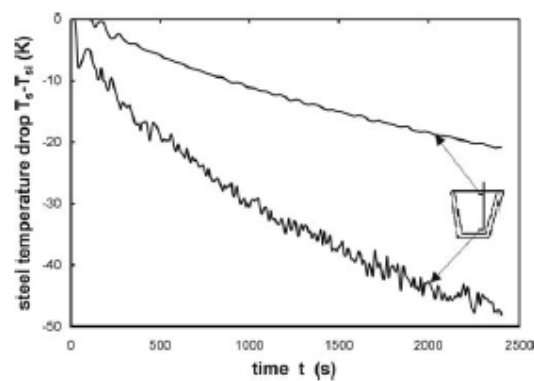
ตารางที่ 2.1 ผลการทดลองของ Xia และ Ahokainen [11]

การทดลอง	ลักษณะการทดลอง
ความร้อนถ่ายเทผ่านผิวสแลก(คงที่)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• สแลกมีความหนา 3000 W/m<sup>2</sup></li> <li>• สแลกมีความหนาน้อย 10<sup>4</sup> W/m<sup>2</sup></li> </ul>
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแต่ละบริเวณในเบ้ารับน้ำเหล็ก	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ที่บริเวณส่วนบน <math>Nu = 0.15Ra^{1/3}</math> <math>Ra = 2.1 \times 10^7</math></li> <li>• ที่บริเวณส่วนกลาง <math>Nu = 0.1Ra^{1/3}</math> <math>Ra = 2.1 \times 10^8</math></li> <li>• ที่บริเวณส่วนก้น <math>Nu = 0.27Ra^{1/4}</math> <math>Ra = 2.0 \times 10^8</math></li> </ul>
อุณหภูมิเริ่มต้นของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กไม่เท่ากัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1423 °C</li> <li>• 1073 °C</li> </ul>



รูปที่ 2.5 การคำนวณของ Xia และ Ahokainen ที่แสดงให้เห็นลักษณะการหมุนวนของน้ำเหล็กกับการเกิดขึ้นการกระจายตัวของอุณหภูมิ [11]

เนื่องจากทางด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็กมีการหมุนวนของน้ำเหล็กเกิดขึ้นทำให้อุณหภูมิที่วัดได้จะไม่คงที่และกวัดแกว่งไปมา ดังรูปที่ 2.6 ที่สังเกตได้ว่าผลการวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กทางด้านล่างเบ้ารับน้ำเหล็กจะแกว่งมากกว่าผลการวัดทางด้านบนของเบ้ารับน้ำเหล็ก

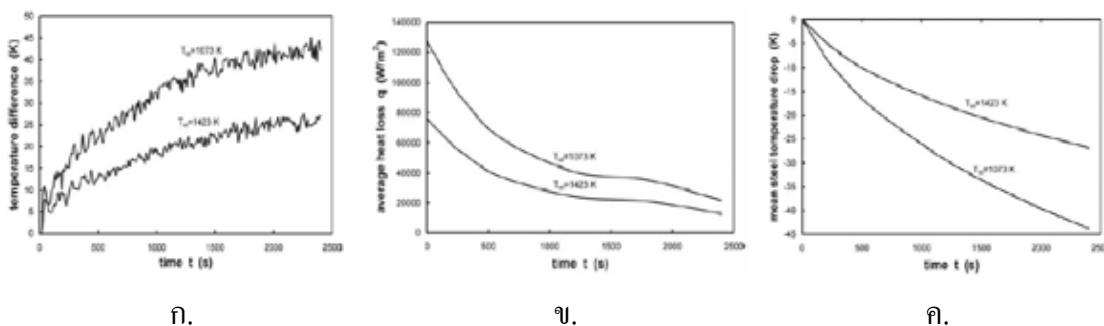


รูปที่ 2.6 อุณหภูมิของน้ำเหล็กบริเวณผิวหน้าและผิวด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีการหมุนวนของน้ำเหล็ก [11]

นอกจากนี้ยังพบว่า การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นให้ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กแตกต่างกันยังทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่แตกต่างกัน โดยที่เมื่อให้ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงจะมีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในอิฐทนไฟที่ต่ำกว่าดังรูปที่ 2.7 (ก) และยังพบอีกว่าผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิที่สูงจะมีการสูญเสียความร้อนจากน้ำเหล็กที่น้อยกว่า (ข) ส่งผลให้น้ำเหล็กมีการลดลงของอุณหภูมิที่ต่ำกว่า (ค)

นอกจากนี้ในบทความของ Xia และ Ahokainen ยังได้ทำการประมาณค่าอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ตามอุณหภูมิเริ่มต้นของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลาและอยู่ในรูปสมการกำลังสี่

จากการศึกษาของ Xia และ Ahokainen พบว่าตรงตามที่ Mohanty และ Satayayut ที่ได้กล่าวไว้ว่าการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กให้มีอุณหภูมิสูงจะลดพลังงานในการถ่ายเทความร้อนได้ นอกจากนี้บทความของ Xia และ Ahokainen เป็นการบ่งบอกว่าแนวความคิดของซัชวัสส์ วุฒิศิริศาสตร์ [4] มีแนวความคิดที่จะเพิ่มการอุ่นอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กให้สูงขึ้นเพื่อที่จะลดการใช้พลังงานในการหลอมเหล็กให้ลดน้อยลงเป็นแนวทางที่ถูกต้อง



รูปที่ 2.7 ก. การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิผนังเมื่อมีอุณหภูมิเริ่มต้นของผนังเบ้าไม่เท่ากันเทียบกับเวลา  
 ข. การสูญเสียพลังงานต่อหน่วยพื้นที่เมื่อมีอุณหภูมิผนังเริ่มต้นไม่เท่ากันเทียบกับเวลา  
 ค. การลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กเมื่อมีอุณหภูมิของผนังเริ่มต้นไม่เท่ากันเทียบกับเวลา [11]

Pan et al [12] ศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลต่ออุณหภูมิน้ำเหล็กขณะรอ (Holding Period) และขณะถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก (Teeming Period) โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 ขั้นตอน

เพื่อจำลองการทำงานตั้งแต่รับน้ำเหล็ก รอเวลาถ่ายน้ำเหล็ก และสุดท้ายคือถ่ายน้ำเหล็ก โดยศึกษาผลของตัวแปรที่ส่งผลถึงอุณหภูมิของน้ำเหล็กขณะถ่ายน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กที่สนใจศึกษาคือ

1. อุณหภูมิด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนรับน้ำเหล็ก
2. ความหนาของสแลกที่อยู่ปกคลุมด้านบนของเบ้ารับน้ำเหล็ก
3. ระยะเวลาที่เบ้ารับน้ำเหล็กบรรจุน้ำเหล็กในระหว่างรอการถ่ายลงอ่างรับน้ำเหล็ก

(Holding Time)

4. อัตราการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก

พบว่า 1. อุณหภูมิด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กส่งผลถึงอุณหภูมิในช่วงต้นขณะถ่ายน้ำเหล็กที่แตกต่างกัน และพบว่าการเพิ่มอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กจาก 600 เป็น 800 จะทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ถ่ายสูงขึ้น 3 องศาเซลเซียส ตลอดช่วงการถ่ายน้ำเหล็ก

2. ความหนาของชั้นสแลกที่ปกคลุมผิวหน้า พบว่าความหนาของชั้นสแลกส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กขณะถ่ายน้ำเหล็ก โดยที่ความหนาสแลกที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กลดลง

3. ระยะเวลาที่เบ้ารับน้ำเหล็กรอเวลาถ่ายน้ำเหล็ก ส่งผลต่ออุณหภูมิจาน้ำเหล็กในช่วงต้น พบว่าเวลาที่รอเพิ่มขึ้น 10 นาที จะทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กที่กำลังถ่ายออกลดลง 4 – 5 องศาเซลเซียส

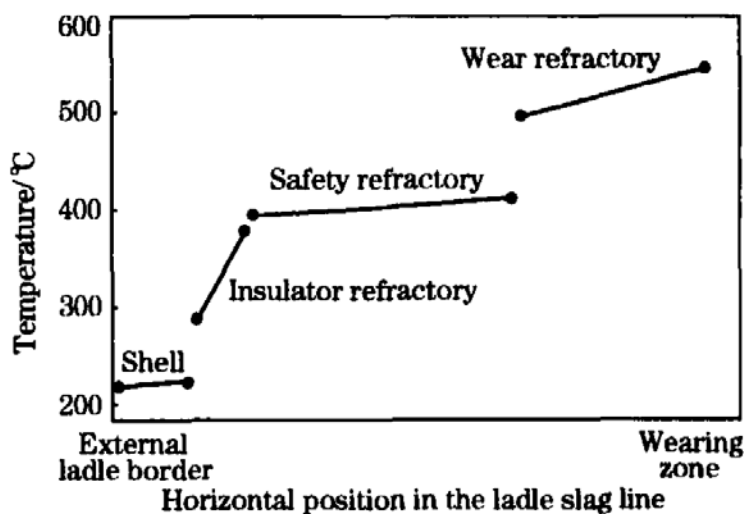
4. อัตราการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก ส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กขณะถ่ายน้ำเหล็กเท่านั้น

จากการศึกษาของ Fredman และ Saxen และ Pen et al พบว่าความหนาของสแลกที่เกิดขึ้นเมื่อน้ำเหล็กอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นก็ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิน้ำเหล็กเช่นกัน

นอกจากนี้จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กเมื่อใช้วัสดุทนไฟต่างชนิดกันที่ศึกษาโดย Volkova และ Jangke[13] พบว่าเมื่อใช้วัสดุทนไฟที่ต่างชนิดกันจะมีการดูดซับความร้อนทำให้การแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กต่างกันด้วย ดังนั้นในการคำนวณการแจก

แรงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กคุณสมบัติต่างๆ ของอิฐทนไฟก็มีความสำคัญต่อการคำนวณเช่นเดียวกัน

สำหรับการจำลองการแจกแจงอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กโดยการใช้อุปกรณ์วัดความร้อนอย่างละเอียดภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก เพื่อดูการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อมีการรับน้ำเหล็กก็มีการศึกษาโดย Zimmer et al.[14] ผลที่ได้คือจะพบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอย่างมากในช่วงรอยต่อของแต่ละชั้นที่ประกอบขึ้นมาเป็นเบ้ารับน้ำเหล็กดังรูปที่ 2.8 โดยจากรูปจะพบว่าอุณหภูมิช่วงรอยต่อของชั้นต่างๆ ที่ได้มีความไม่ต่อเนื่องกัน และเขายังได้พบว่าความร้อนที่สูญเสียภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะสูญเสียความร้อนสูงในกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมเข้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก นอกจากนี้ในกรณีที่มีการปรงน้ำเหล็กในเบ้ารับน้ำเหล็ก การทำให้เป็นสูญญากาศเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กก็จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนที่สูงเช่นกัน



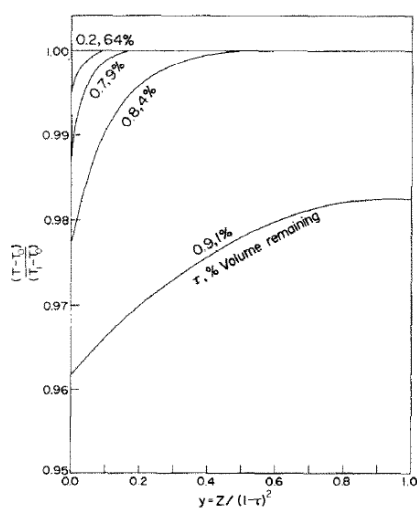
รูปที่ 2.8 การแจกแจงอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ชั้นต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็ก [14]

### 2.3 การถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กขณะทำการถ่ายน้ำเหล็ก

ในกระบวนการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่รางเทน้ำเหล็กนั้นจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่ออกมาไม่ให้มีอุณหภูมิที่ต่ำเกินไปซึ่งจะก่อให้เกิดการแข็งตัวของน้ำเหล็กตามมาทำให้น้ำเหล็กที่อยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นไม่สามารถที่จะนำมาเข้าสู่กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องได้ ผล

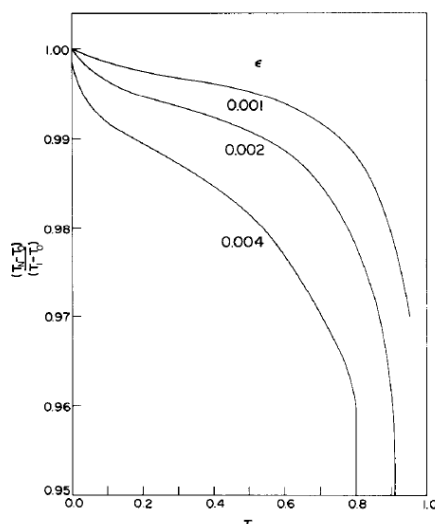
ที่ตามมาคือการสูญเสียทางด้านพลังงานและเวลา รวมไปถึงจำนวนผลผลิตที่สามารถผลิตได้จะลดลงไปด้วย ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมนั้นสุดท้ายแล้วต้องคำนึงถึงอุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่ออกมาให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้งาน

Egerton et al. [15] สร้างแบบจำลองโดยสมมติให้เบ้ารับน้ำเหล็กไม่มีการหมุนวน และอุณหภูมิน้ำเหล็กภายในสม่ำเสมอ โดยศึกษาผลของความเร็วในการถ่ายน้ำเหล็กในรูปของความสูงของน้ำเหล็กต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็ก และพยายามเขียนผลลัพธ์ทั้งหมดให้ออกมาอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ ดังรูปที่ 2.9 เมื่อแทนตั้งเป็นอุณหภูมิไร้มิติแสดงด้วย  $\frac{T-T_0}{T_1-T_0}$  โดยที่  $T$  คืออุณหภูมิขณะใดๆ  $T_0$  คืออุณหภูมิลังแวดล้อม และ  $T_1$  อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเหล็กก่อนเท ส่วนแกนนอนเป็นความสูงของน้ำเหล็กที่ระดับต่างๆ ของเวลานั้น ซึ่งเวลาไร้มิติหน่วย  $\tau$  แสดงการเปรียบเทียบกันระหว่างเวลาที่ขณะใดๆ ต่อเวลาที่ใช้เทน้ำเหล็กทั้งหมดจะพบว่าที่เวลาเริ่มต้นอุณหภูมิไร้มิติจะมีค่าเท่ากับ 1 เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นกับอุณหภูมิขณะใดๆ มีค่าเท่ากัน แต่เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น ( $\tau$  มีค่ามาก) ปริมาตรน้ำเหล็กที่เหลืออยู่จะน้อยลง อุณหภูมิน้ำเหล็กจะค่อยลดลงในแต่ละระดับความสูงของน้ำเหล็ก



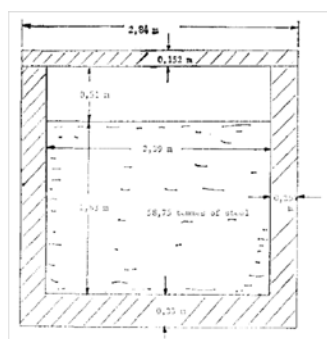
รูปที่ 2.9 การแจกแจงอุณหภูมิไร้มิติที่เป็นสัดส่วนกับระดับความสูงน้ำเหล็กตามเวลาไร้มิติเมื่อไม่มีการแยกชั้นอุณหภูมิ [15]

จากรูปที่ 2.10 พบว่าความเร็วที่ใช้ในการถ่ายน้ำเหล็กเพิ่มมากขึ้นจะใช้เวลาในการถ่ายลดลงแต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มความเร็ว ( $\epsilon$  ที่ใช้ในการถ่ายน้ำเหล็กที่มากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องหาความเหมาะสมให้กับตัวแปรสองตัวนี้



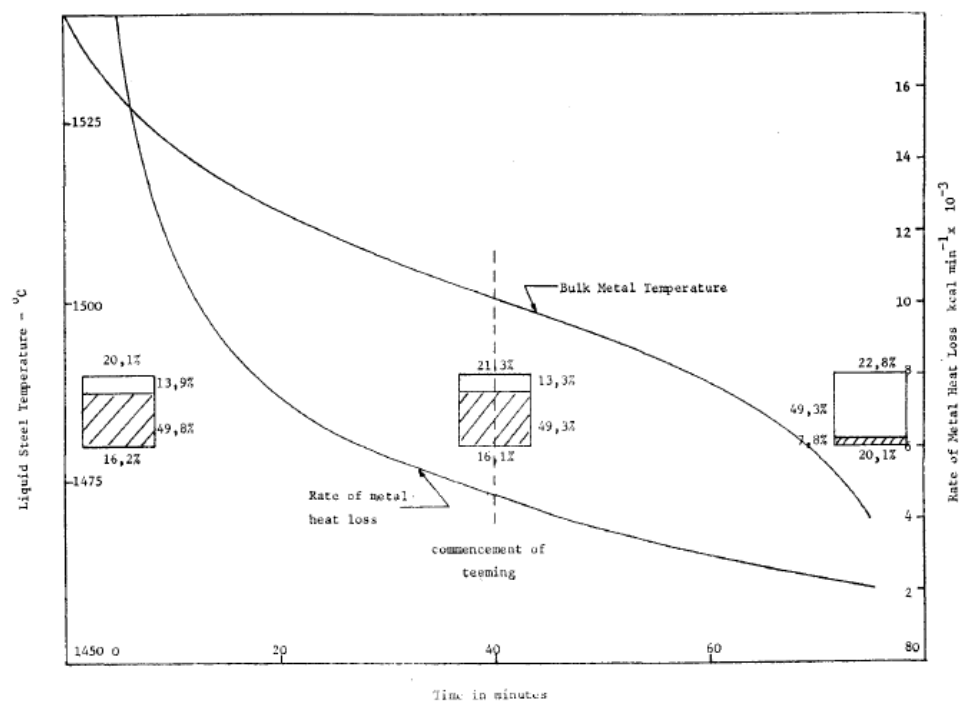
รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเทียบกับเวลา เมื่อมีความเร็วในการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเข้รับน้ำเหล็ก [15]

นอกจากนี้ Urquhart, Guthrie และ Howat [16] ศึกษาความร้อนที่สูญเสียของน้ำเหล็กภายในเข้รับน้ำเหล็กขณะถ่ายน้ำเหล็กออกจากเข้ด้วยการใช้ระเบียบวิธีเชิงเลขเช่นกัน โดยลักษณะการศึกษาจะศึกษากับเข้รับน้ำเหล็กที่มีปิดฝาระหว่างการถ่ายน้ำเหล็กและสมมติให้น้ำเหล็กมีอุณหภูมิเท่ากันทั้งปริมาตรรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ขนาดและรูปร่างของเข้รับน้ำเหล็กที่ศึกษา [16]

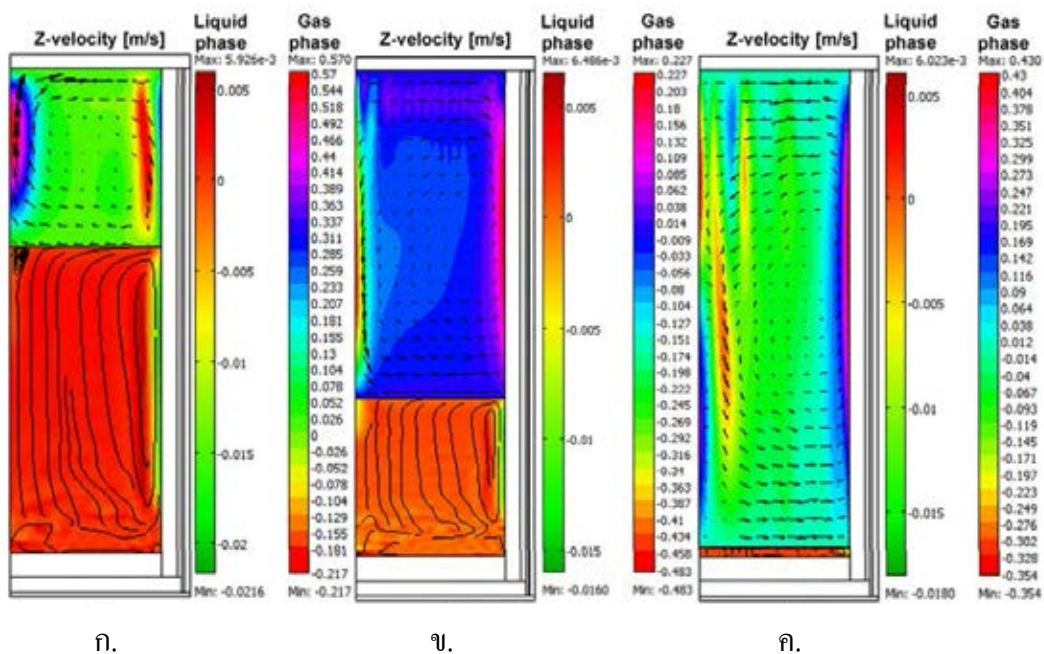
จากผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิน้ำเหล็กตลอดการถ่ายเทน้ำเหล็กและปริมาณความร้อนที่สูญเสียของน้ำเหล็กจะเป็นไปตามรูปที่ 2.12



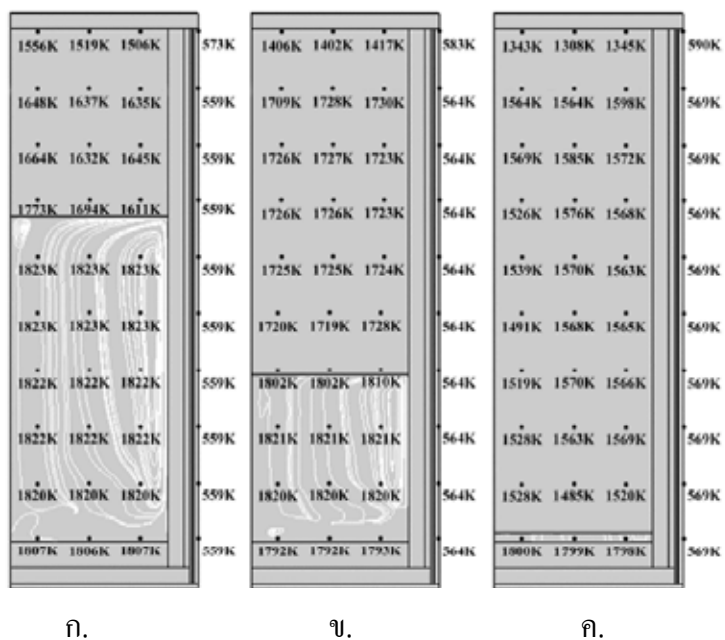
รูปที่ 2.12 การลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กและปริมาณความร้อนที่สูญเสียขณะถ่ายเทน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็ก [16]

นอกจากนี้จากผลการศึกษาอุณหภูมิน้ำเหล็กขณะถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กของ Björn Glaser [17] จะพบว่าน้ำเหล็กมีเคลื่อนที่การหมุนวน ดังรูปที่ 2.13 ทำให้อุณหภูมิใกล้ๆ กับผนังมีอุณหภูมิที่สูงอยู่ตลอดเวลา ดังรูปที่ 2.14 แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเฉลี่ยในน้ำเหล็กเมื่อเวลาผ่านไปนั้นมีแนวโน้มที่ลดลง





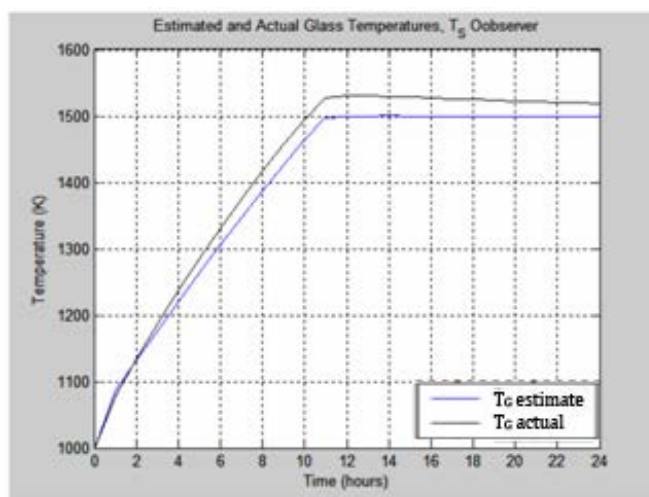
รูปที่ 2.13 Streamline และการแจกแจงความเร็วในการเคลื่อนที่ของน้ำเหล็กและอากาศภายในเบ้ารับน้ำเหล็กขณะเทน้ำเหล็ก ก. 1000s ข. 2250s ค. 3500s [17]



รูปที่ 2.14 อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ก. 1000s ข. 2250s ค. 3500s [17]

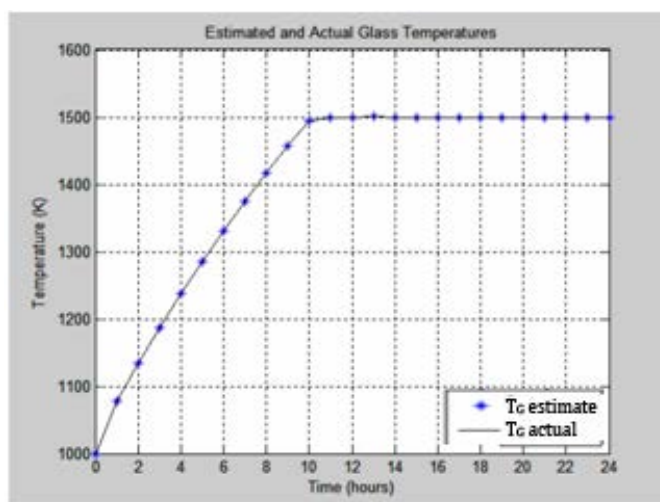
## 2.4 การใช้จุดจากการทดลองมาปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

Holladay[18] พยายามที่จะหาวิธีลดต้นทุนในการหลอมแก้วในเตาหลอมแก้ว โดยวิธีการเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงอุณหภูมิแก๊สไอเสีย ระยะเวลาในการเผา และความเร็วในการใส่แก้วไปในเตา เขาได้พบว่า ระบบควบคุมต่างๆ ที่มีอยู่ภายในโรงงานนั้นเป็นระบบควบคุมแบบ PID แต่ละส่วนทำงานแยกจากกัน กล่าวคือระบบตรวจวัดอุณหภูมิของแก๊สไอเสีย จะทำงานแยกกับระบบควบคุมอุณหภูมิของแก้ว เป็นต้น ดังนั้นเขาจึงปรับปรุงระบบเหล่านั้นให้มาทำงานร่วมกันเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด โดยการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายในเตาหลอมแก้วขึ้นมาแล้วนำผลที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากระบบต่างๆ ที่แยกจากกัน เข้ามาทำงานร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น ซึ่งจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะสนใจอุณหภูมิของแก๊สไอเสีย อุณหภูมิของแก้ว อุณหภูมิของอิฐทนไฟทางด้านล่างที่สัมผัสกับแก้ว และอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่อยู่ด้านบนของแก้ว พบว่าจากการวัดอุณหภูมิของแก๊สไอเสียเพียงจุดเดียวแล้วนำมาทำนายอุณหภูมิของแก้วสามารถทำได้ และได้ผลดังรูปที่ 2.15 ซึ่งผลที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนกับผลที่ได้จากการตรวจวัดพอสมควร



รูปที่ 2.15 ผลการทำนายอุณหภูมิของแก้วเมื่อมีการวัดอุณหภูมิของแก๊สไอเสียเข้ามาใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [18]

แต่เมื่อมีการใช้ผลการวัดที่มากกว่านี้กล่าวคือ หากมีการวัดอุณหภูมิของ แก๊สไอเสีย อุณหภูมิของอิฐทนไฟทางด้านล่างที่สัมผัสกับแก้ว และอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่อยู่ด้านบนของแก้ว มาทำนายอุณหภูมิของแก้วที่เผาได้นั้นจะมีความแม่นยำมากขึ้นดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ผลการทำนายอุณหภูมิของแก้วเมื่อมีการวัดอุณหภูมิของแก๊สไอเสีย อุณหภูมิของอิฐทนไฟทางด้านล่างที่สัมผัสกับแก้ว และอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่อยู่ด้านบนของแก้ว เข้ามาใช้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าสามารถทำนายอุณหภูมิของแก้วได้แม่นยำมากขึ้น [18]

## บทที่ 3

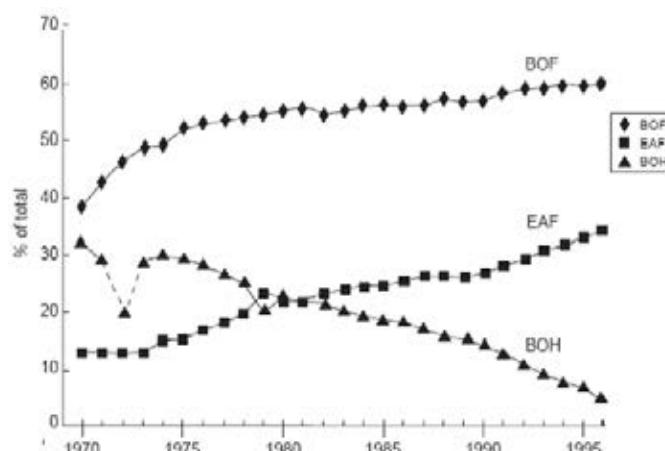
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการนำเหล็กที่ไม่ใช่แล้ว (เศษเหล็ก) มาหลอมด้วยเตาอาร์คไฟฟ้า ถือเป็นอุตสาหกรรมผลิตเหล็กขั้นกลาง โดยการนำเศษเหล็ก (Scrap) มาหลอมให้กลายเป็นน้ำเหล็กแล้วปรับปรุงคุณสมบัติให้ตรงตามความต้องการของการหลอม จากนั้นก็นำมาทำให้น้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการปรับปรุงเหล่านี้นกลับมาเป็นแท่งเหล็กในรูปร่างต่างๆ เพื่อนำกลับไปใช้งานอีกครั้ง โดยผ่านเครื่องหล่อแบบต่อเนื่อง (Continues Casting Machine: CCM) เหล็กที่ผ่านออกมาจากเครื่องหล่อแบบต่อเนื่อง จะมีชื่อเรียกต่างกันไปตามรูปร่างลักษณะของเหล็กที่รีดออกมาได้ เช่น เหล็กทรงยาว (Billet) เหล็กทรงแบน (Slab) เหล็กทรงใหญ่ (Bloom) เหล็กที่รีดออกมาได้เหล่านี้จะถูกนำไปสู่อุตสาหกรรมผลิตเหล็กขั้นปลายอีกครั้งหนึ่ง

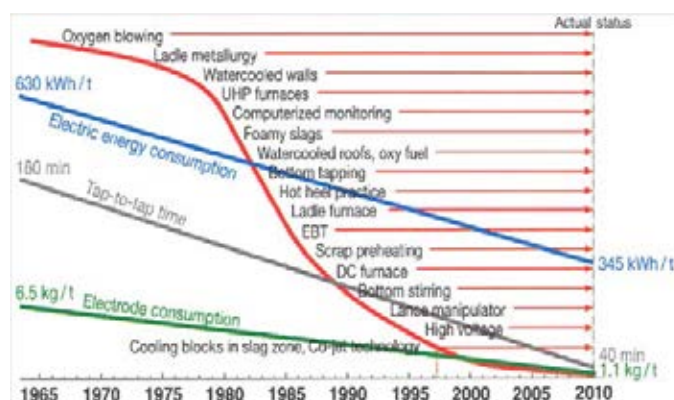
การผลิตเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้านั้นจะใช้เศษเหล็กเป็นวัตถุดิบในการผลิต ซึ่งการผลิตเหล็กแต่ละรอบนั้น เศษเหล็กที่ใส่เข้าไปในเตาอาร์คไฟฟ้านั้นจะมีคุณสมบัติหรือส่วนประกอบทางเคมีที่แตกต่าง จึงเป็นการยากที่จะควบคุมส่วนประกอบทางเคมี หรือ ทางกล ให้เป็นไปตามที่ต้องการอย่างแม่นยำ ดังนั้นสำหรับประเทศไทยการผลิตเหล็กด้วยวิธีนี้จึงผลิตได้กับเกรดของเหล็กที่มีส่วนประกอบของธาตุต่างๆ ค่อนข้างกว้าง และส่วนมากจะเป็นเหล็กที่เกรดต่ำ เช่นเหล็กเส้นที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง หรือไม้ก็เหล็กลวด

กระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (EAF) และหลอมเหล็กด้วย Basic Oxygen Furnace (BOF) ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นทุกปี ในขณะที่เตาหลอมแบบ Basic Open hearth (BOH) มีแนวโน้มลดลง ดังรูปที่ 3.1 สาเหตุที่ EAF ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการนำเศษเหล็กกลับมาใช้ใหม่ จึงมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้ค่าการใช้พลังงานในแต่ละรอบการทำงานลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องจากปี 1965 ที่มีการใช้พลังงาน 630 kWh/ton เป็น 345 kWh/ton ในปี 1995 หรือจะเป็นการ

ปรับปรุงระยะเวลาในแต่ละรอบการทำงานให้มีเวลาที่สั้นลงจาก 160 นาที เป็น 40 นาทีเพื่อเพิ่มผลผลิตให้มากขึ้นดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 ปริมาณการใช้เตาหลอมชนิดต่างๆ ในการผลิตเหล็กตั้งแต่ปี 1970 - 1995  
[ข้อมูลจาก : สถาบันเหล็กและเหล็กกล้าสากล (international Iron and Steel Institute)]



รูปที่ 3.2 แนวโน้มค่าการใช้พลังงานในเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ารวมไปถึงระยะเวลาในการเทน้ำเหล็ก

### 3.1 อุปกรณ์ในการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

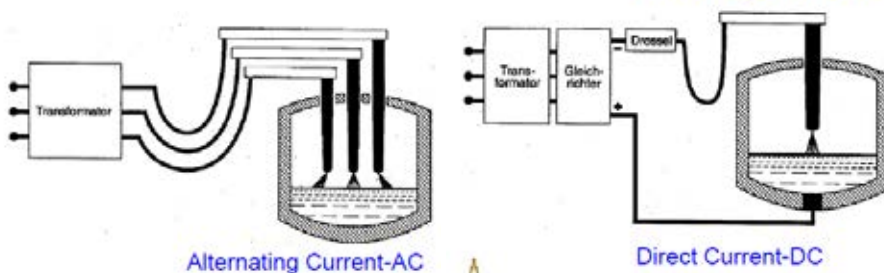
#### 3.1.1 เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace: EAF)

เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ใช้พลังงานไฟฟ้าในการหลอมละลายเศษเหล็กให้กลายเป็นน้ำเหล็ก ลักษณะของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าคือภายนอกของเตาจะทำด้วยเหล็กกล้า ส่วนด้านในนั้นมีการบุด้วยอิฐทนไฟ (Refractory) เพื่อป้องกันอันตรายจากอุณหภูมิที่สูงระหว่างการทำงาน และจะมีแท่ง

อิเล็กโทรด (Electrode) เป็นทางให้กระแสไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปไหลไปยังเศษเหล็ก เพื่อให้เศษเหล็กกลายเป็นน้ำเหล็ก

เมื่อมีการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านแท่งอิเล็กโทรด (Electrode) จะมีขั้วที่มีความต่างศักย์ที่สูงกว่าหรือแรงดันไฟฟ้าที่เป็นบวกเรียกว่า แอโนด (Anode) และจะมีขั้วที่มีแรงดันไฟฟ้าที่ต่ำหรือค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นลบเรียกว่าแคโทด (Cathode) เมื่อเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง จะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจากขั้วที่มีความต่างศักย์สูงไปยังขั้วที่มีความต่างศักย์ต่ำ (Anode ไปยัง Cathode) ให้พลังงานแสง พลังงานเสียง และพลังงานความร้อน โดยความร้อนที่เกิดขึ้นมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เศษเหล็กที่เป็นของแข็งหลอมละลายกลายเป็นน้ำเหล็กที่มีสถานะเป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิประมาณ 1550 องศาเซลเซียส สำหรับ โดยทั่วไปแล้วนอกจากความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหล็กจะมาจากไฟฟ้าที่ใส่เข้าไปแล้ว ส่วนหนึ่งยังมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation Reaction) ระหว่างออกซิเจนกับน้ำเหล็กด้วย

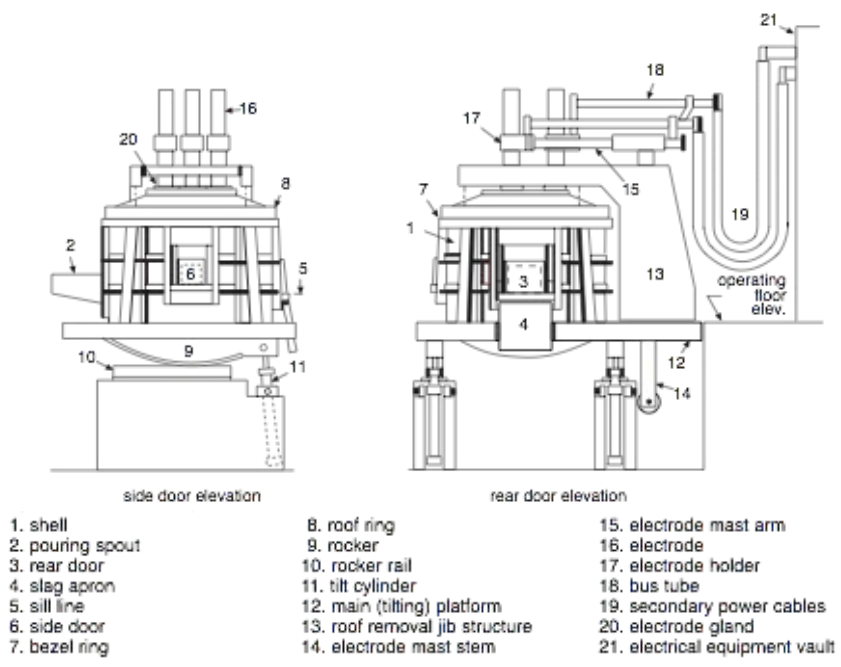
สำหรับเตาอาร์คไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามชนิดของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป คือ เตาลอมอาร์คไฟฟ้าชนิดกระแสตรงและกระแสสลับ แต่หลักการทำงานยังเหมือนเดิมคือปล่อยกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่แอโนดเพื่อสร้างความต่างศักย์ระหว่างขั้วทั้งสอง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ประเภทของเตาลอมอาร์คไฟฟ้า

สำหรับเตาลอมอาร์คไฟฟ้าของโรงงานที่จะทำการศึกษาเป็นเตาลอมขนาด 25 ตัน เป็นชนิดกระแสไฟฟ้าสลับ ดังรูปที่ 3.4 ใช้ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส แต่ละเฟสจะถูกป้อนให้กับแท่งอิเล็กโทรด 3 แท่ง ที่ทำด้วยคาร์บอน (Carbon) โดยด้านบนจะเป็นฝาเลื่อนเปิด - ปิดได้ เพื่อใส่เศษเหล็กลงไปเพื่อทำการหลอม เมื่อใส่เศษเหล็กลงไปแล้วฝาก็จะเลื่อนมาปิด จากนั้นก็จะนำแท่งอิเล็กโทรดลงไปเพื่อหลอม

ละลายเหล็ก เมื่อเศษเหล็กกลายเป็นของเหลวหมดแล้วก็จะใส่เศษเหล็กใหม่ เพื่อทำการหลอมอีกครั้ง และเป็นเช่นนี้ไป 3 รอบ นั่นคือจะใส่เศษเหล็กไปทั้งหมด 3 ครั้ง ก่อนที่น้ำเหล็กทั้งหมดจะถูกเทออกมาเพื่อไปใช้งานต่อ 1 ครั้ง ในระหว่างทำการหลอมเศษเหล็กครั้งที่ 3 จะมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กโดยการใส่แร่ธาตุชนิดต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กให้เป็นไปตามที่ต้องการ ธาตุที่จะมีการปรับได้แก่ คาร์บอน ซิลิกอน แมงกานีส เมื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำเหล็กได้ตามต้องการแล้วก็เป็อันเสร็จสิ้นการหลอม จากนั้นเตาหลอมจะค่อยๆ เอียงเพื่อเทน้ำเหล็กที่หลอมได้ทั้งหมดออกมาทางปากเท (Pouring Spout) ไปยังเบ้ารับน้ำเหล็กทางด้านล่างต่อไป ในกระบวนการหลอมเศษเหล็กนั้นจะใช้พลังงานที่สำคัญในสองรูปแบบ คือพลังงานไฟฟ้าร้อยละ 60 และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดจากการรวมตัวกันของออกซิเจนที่พ่นเข้าไปในน้ำเหล็กกับธาตุคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำเหล็กกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

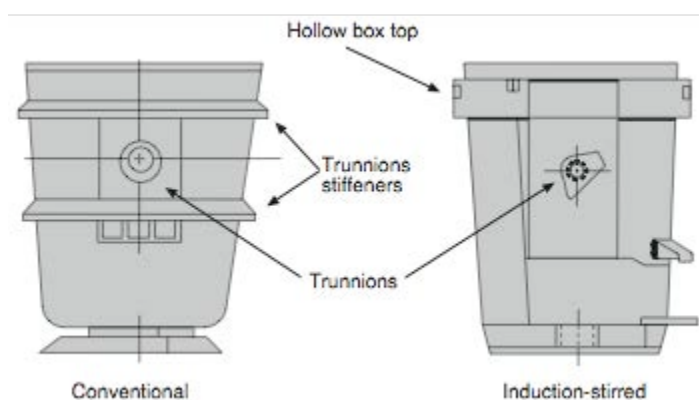


รูปที่ 3.4 ลักษณะและส่วนประกอบของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าของโรงงานที่ศึกษา  
[ข้อมูลจาก : The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, PA]

### 3.1.2 เบ้ารับน้ำเหล็ก (Ladle)

เบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะคล้ายถ้วยทรงกระบอก ทำหน้าที่ในการเคลื่อนย้ายน้ำเหล็กที่หลอมเสร็จแล้วจากเตาอาร์คไฟฟ้า (EAF) ไปสู่การหล่อแบบต่อเนื่อง ขนาดของเบ้ารับน้ำเหล็กจะบ่งบอกตามปริมาณที่รับน้ำเหล็กได้ในแต่ละรอบการทำงานของเตาอาร์คไฟฟ้า โดยจะมีขนาดตั้งแต่ 25 ตัน ถึง 300 ตัน

นอกจากเบ้ารับน้ำเหล็กยังมีหน้าที่ในการขนถ่ายน้ำเหล็กจากเตาอาร์คไฟฟ้าไปสู่การหล่อแบบต่อเนื่องแล้วบางครั้งยังมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อให้เหล็กที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งลักษณะของเบ้ารับน้ำเหล็กที่สามารถปรุงน้ำเหล็กภายในได้หรือไม่ได้นั้นจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกันและจะมีลักษณะโดยทั่วไปดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะของเบ้ารับน้ำเหล็ก

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

ภายในของเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกบุด้วยวัสดุทนไฟเพื่อป้องกันอันตรายจากอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่สูงส่งผลต่อถังภายนอกที่ทำด้วยเหล็กในขณะเดียวกันยังเป็นตัวป้องกันน้ำเหล็กไม่ให้รั่วออกมาภายนอกถัง ดังนั้นจึงต้องมีความประณีตและต้องการการออกแบบการก่อวัสดุทนไฟที่ดี นอกจากนี้แล้ววัสดุทนไฟเหล่านี้ยังเป็นตัวรักษาอุณหภูมิของน้ำเหล็กขณะทำการรอเพื่อที่จะไปต่อที่สถานีการหล่อแบบต่อเนื่องได้ด้วย

สำหรับการบุผนังภายในเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยอิฐทนไฟ จะประกอบด้วย 3 ชั้น เรียงจากด้านในออกมาด้านนอกจะเป็นชั้นทำงาน (Working Line) ที่ต้องสัมผัสกับน้ำเหล็กตลอดเวลา ถัดออกมาคือชั้น

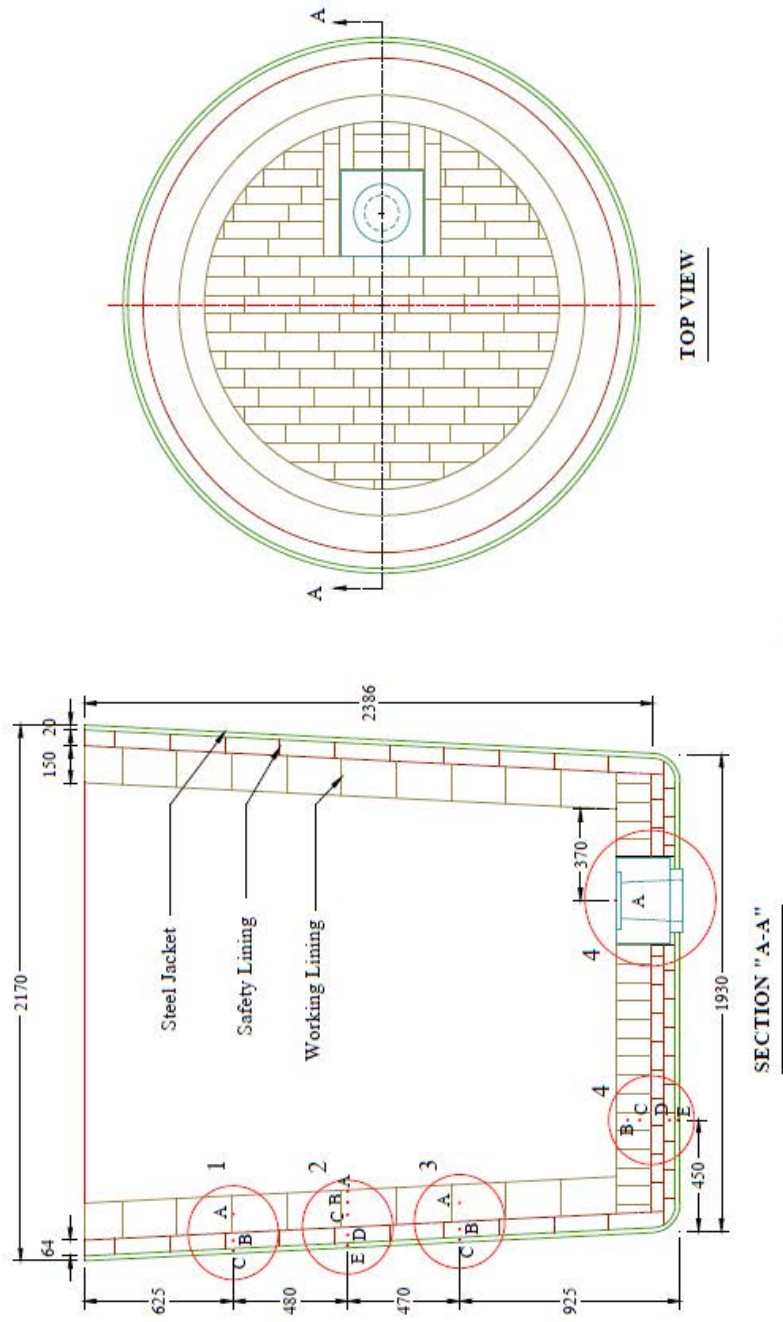


ความปลอดภัย (Safety) และชั้นผนังเหล็ก (Steel Shell) ที่ทำหน้าที่ในการทำให้เบ้ารับน้ำเหล็กเกิดรูปร่างที่แน่นอน ตามลำดับ

สำหรับการหลอมเหล็กจะเกิดออกไซด์ของสารประกอบต่างๆ ที่ไม่ต้องการที่ถูกเรียกว่า “สแลก (Slag)” และเป็นสารประกอบที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำเหล็ก ทำให้สแลกลอยอยู่ที่ผิวหน้าน้ำเหล็กและถูกเทออกมาจากเตาอาร์คไฟฟ้าด้วยพร้อมกับน้ำเหล็กและจะลอยอยู่บริเวณส่วนบนของเบ้ารับน้ำเหล็ก สแลกเหล่านี้กักความร้อนชั้นของอิฐทนไฟทำให้ชั้นของอิฐทนไฟบางลงได้ จึงต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งานตรงช่วงของชั้นสแลก (Slag Line) ด้วย

สำหรับการนำเบ้ารับน้ำเหล็กไปใช้งานในครั้งแรกเนื่องจากอุณหภูมิของอิฐทนไฟมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าน้ำเหล็กมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดความเสียหายต่อวัสดุทนความร้อน (Refractory) ที่ใส่เข้าไป ดังนั้นก่อนการใช้งานจึงต้องมีการอุ่นวัสดุทนความร้อนเหล่านี้เพื่อไว้รับต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน และนอกจากนี้ยังเป็นการไล่ความชื้นที่มีอยู่ภายในวัสดุทนความร้อนซึ่งเมื่อน้ำได้รับความร้อนจะขยายตัวและจากระเบิดออกซึ่งสามารถสร้างความเสียหายต่ออิฐทนไฟได้ นอกจากนี้ข้อดีอีกอย่างสำหรับการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กคือสามารถลดการสูญเสียของพลังงานจากน้ำเหล็กสู่เบ้ารับน้ำเหล็กได้

สำหรับเบ้ารับน้ำเหล็กของโรงงานผลิตเหล็กที่ทำการศึกษา เบ้ารับน้ำเหล็กจะเป็นภาชนะรูปทรงกระบอกตั้งรูปที่ 3.6 เส้นผ่านศูนย์กลางจากขอบนอกด้านปากขนาด 2.17 เมตร และด้านก้นขนาด 1.93 เมตร ความสูงแนวตั้งจากก้นถึงปากถึงสูง 2.5 เมตร อิฐทนไฟในชั้นทำงานทางด้านข้างของเบ้าหนา 150 มิลลิเมตร ด้านก้นเบ้าหนา 180 มิลลิเมตร ถัดออกมาเป็นชั้นปลอดภัยก่อด้วยอิฐทนไฟชนิดเดียวกันกับชั้นทำงานด้านข้างของเบ้าหนา 64 มิลลิเมตร ทางด้านก้นเบ้าหนา 152 มิลลิเมตร ส่วนผนังเหล็กด้านนอกสุดเป็นเหล็กหนา 20 มิลลิเมตร ที่ก้นเบ้าหนา 25 มิลลิเมตร น้ำหนักเบ้าเปล่าประมาณ 15 ตัน รับน้ำเหล็กได้ประมาณ 20 – 25 ตัน ต่อ 1 ครั้ง

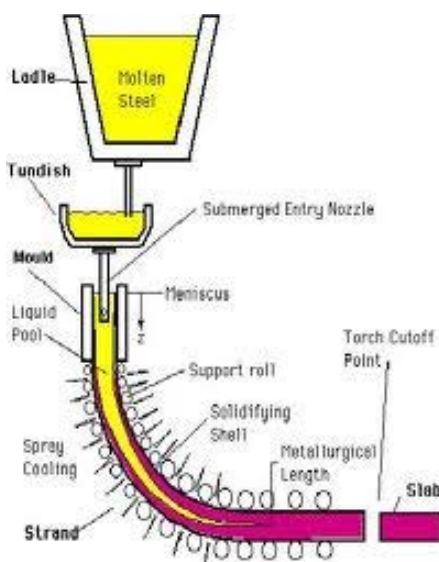


ALL DIMENSIONS IN MILLIMETER

รูปที่ 3.6 ลักษณะของบารับน้ำเหล็กของโรงงานที่ศึกษา

### 3.1.3 การหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting)

การหล่อแบบต่อเนื่องเป็นกระบวนการสุดท้ายในการผลิตเหล็กด้วยวิธีอาร์คไฟฟ้าในกระบวนการนี้จะนำน้ำเหล็กที่อยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กไปขึ้นรูปเป็นเหล็กทรงต่างๆ เพื่อให้สะดวกในการนำไปใช้งานต่อไป เช่น เหล็กทรงยาว (Billet) จะนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กเส้น เหล็กหลอด หรือเหล็กโครงสร้างเหล็กทรงแบบ (Slab) เหล็กทรงใหญ่ (Bloom) จะนำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตเหล็กแผ่นรีดร้อน หรือเหล็กโครงสร้างขนาดใหญ่ การหล่อด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถควบคุมคุณภาพได้ง่าย ผลิตได้มาก และต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์และลักษณะโดยทั่วไปในกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง

[ข้อมูลจาก : <http://www.metsoc.org/virtualtour/processes/steel/Casters.asp>]

จากรูปที่ 3.7 กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องเริ่มต้นจากการปล่อยให้เหล็กค่อๆ ไหลออกมาจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงไปสู่รางรับน้ำเหล็ก (Tundish) น้ำเหล็กที่อยู่ในรางรับน้ำเหล็กก็จะค่อๆ ไหลลงไปสู่แบบหล่อ (Mold) แนวตั้งอย่างต่อเนื่อง โดยที่แบบหล่อนี้จะออกแบบให้สั้นขึ้นลงตลอดเวลาโดยใช้มอเตอร์ร่วมกับลูกเบี้ยวในการทำให้แบบหล่อสั้นตลอดเวลา ณ จุดนี้ยังสามารถควบคุมความเร็วของการหล่อได้ เมื่อน้ำเหล็กไหลออกจากแบบหล่อแล้วน้ำเหล็กจะค่อๆ ลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็วทำให้เหล็กเหลวค่อๆ แข็งตัวด้วยละอองน้ำจากหัวฉีด (Spray Cooling) โดยมีลูกกลิ้ง (Support roll) คอยรับ

น้ำเหล็กต่อจากแบบหล่อ และทำหน้าที่ควบคุมหน้าตัดและรักษาขนาดให้คงที่ ที่จุดนี้ น้ำเหล็กจะค่อยๆ ถูกทำให้เย็นอย่างต่อเนื่องจนน้ำเหล็กจะเริ่มแข็งตามแนวของลูกกลิ้งที่กำหนดไว้ โดยจะเริ่มแข็งจากภายนอกไปยังภายในเหล็กทรงยาว ก่อนจะถูกตัดตามความยาวที่ต้องการนำไปใช้งานต่อไป

ระยะทางที่น้ำเหล็กเริ่มเข้าไปในแบบหล่อจนถึงระยะที่น้ำเหล็กแข็งตัวกลายเป็นเหล็กอย่างสมบูรณ์ถูกเรียกว่า Metallurgical Length และจะมีความสำคัญต่อการหลอมมาก จะเห็นว่า Metallurgical Length ของน้ำเหล็กนั้นจะเป็นตัวกำหนด อัตราการทำให้เย็นตัว และความเร็วในการหล่อแบบต่อเนื่อง ให้สัมพันธ์กับขนาดของแท่งเหล็กตามที่ต้องการ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 3.8

ดังนั้นสำหรับการออกแบบการหล่อแบบต่อเนื่อง จำเป็นต้องทราบสิ่งที่ต้องการที่จะผลิต Metallurgical Length ความเร็วในการหล่อ รวมไปถึงระบบการถ่ายเทความร้อนให้มีความสัมพันธ์กัน เพื่อรักษา Metallurgical Length ไว้ให้ได้

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

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

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

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

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

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

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

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

รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง Metallurgical Length ความเร็วในการหล่อและอัตราการถ่ายเทความร้อนด้วยละอองน้ำ

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

### 3.2 กระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

#### 3.2.1 วัฏจักรการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

การทำงานของเตาอาร์คไฟฟ้าจะมีการทำงานเป็นรอบการทำงานหรือที่เรียกว่า “Heat” โดยในแต่ละรอบการทำงาน จะมีเวลาระหว่างการเทน้ำเหล็กถึงการเทน้ำเหล็กรอบถัดไป เรียกว่าเวลาตรงนี้ว่า “Tap to Tap time : TTT” ระยะเวลานี้เป็นตัวกำหนดเวลาที่อุปกรณ์ต่อเนื้องอื่น ๆ เช่น เครื่องหล่อแบบต่อเนื่อง เบ้ารับน้ำเหล็ก ต้องทำให้ได้ครบ 1 รอบพอดี เพื่อที่จะทำงานรอบต่อไปให้สัมพันธ์กันกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

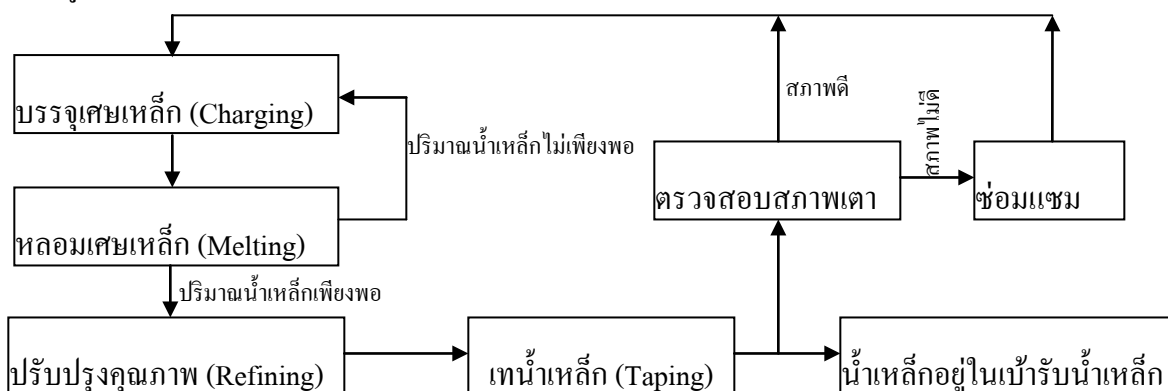
การทำงานของเตาหลอม 1 รอบ จะเริ่มต้นจากการใส่เศษเหล็ก (Charging) ลงไปทำการหลอม (Melting) จนได้ปริมาณน้ำเหล็กตามต้องการไม่ว่าจะเป็นการใส่เศษเหล็กลงไปกี่ครั้งก็ตาม (โดยทั่วไปประมาณ 3 – 4 ครั้ง) เมื่อได้ปริมาณน้ำเหล็กตามต้องการแล้วก็เริ่มนำน้ำเหล็กนั้นมาปรับปรุงคุณภาพ (Refining)

กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเหล็กมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำเหล็กให้ตรงตามกับการใช้งาน ไม่ว่าจะเป็นการควบคุมคุณสมบัติทางเคมี หรือทางกล สำหรับส่วนประกอบทางเคมีจะมีธาตุหลักๆที่เกี่ยวข้องคือ ธาตุคาร์บอน (C) ธาตุซิลิคอน (Si) และธาตุแมงกานีส(Mn) สำหรับธาตุคาร์บอนหากมีปริมาณมากเกินไปควบคุมโดยการพ่นออกซิเจนเข้าไปในน้ำเหล็กเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นการลดปริมาณคาร์บอนให้น้อยลงได้ หากปริมาณคาร์บอนในน้ำเหล็กมีปริมาณน้อยเกินไปจะเพิ่มผงคาร์บอนลงไปในน้ำเหล็กเหลวส่งผลให้ปริมาณธาตุคาร์บอนในน้ำเหล็กเพิ่มขึ้นมา สำหรับธาตุซิลิคอนจะไปปรับปรุงขณะตอนจะเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก เมื่อควบคุมปริมาณธาตุต่างๆ ทางเคมีได้ตามต้องการแล้วคุณสมบัติทางกลก็จะตามมาเอง

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการปรับปรุงน้ำเหล็ก น้ำเหล็กที่ได้ก็จะมีคุณสมบัติตามที่ต้องการไปใช้งานพร้อมที่จะเข้าสู่กระบวนการการเทน้ำเหล็ก (Tapping) ที่กระบวนการนี้จะมีการปรับปรุงปริมาณธาตุซิลิคอน ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว หลังจากเทน้ำเหล็กเสร็จแล้วก็จะมีการตรวจสอบสภาพการทำงานของเตา

เช่นอุณหภูมิความร้อน ระบบระบายความร้อน เป็นต้น ถ้าหากไม่มีปัญหาที่เริ่มพิเศษเหล็กลงเตาเป็นรอบต่อไป ถ้าหากมีสิ่งใดที่ต้องซ่อมแซมก็ซ่อมแซมก่อนจะเริ่มรอบถัดไปซึ่งในกรณีถือว่าระยะเวลาการทำงานครบ 1 รอบจะมีค่ามากหรือกินระยะเวลาที่ยาวนานอาจจะส่งผลต่อผลผลิตของผู้ประกอบการ

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นกระบวนการผลิตเหล็กด้วยเตาอาร์คไฟฟ้าสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กระบวนการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

### 3.2.2 วัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก

เบ้ารับน้ำเหล็กทำหน้าที่ขนถ่ายน้ำเหล็กที่หลอมเสร็จสิ้นแล้วที่เตาอาร์คไฟฟ้าไปสู่การหล่อแบบต่อเนื่อง โดยที่กระบวนการต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็กสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10

สถานีก่อนเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่สถานีนี้จะมีหน้าที่หลักคือรีอเบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่อด้วยอิฐทนไฟ เมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กเบ้าหนึ่งผ่านการใช้งานจนครบอายุของอิฐทนไฟแล้ว หลังจากนั้นก็จะก่อเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยอิฐทนไฟใหม่เพื่อเตรียมที่จะนำไปใช้ในครั้งต่อไป นอกจากนี้ที่สถานีนี้จะมีการซ่อมแซมอิฐทนไฟเมื่อมีการผ่านการใช้งานมาแล้วช่วงหนึ่ง

สถานีอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก สำหรับที่สถานีนี้จะทำหน้าที่นำเบ้ารับน้ำเหล็กที่เพิ่งก่ออิฐขึ้นมาใหม่มาอุ่นให้อิฐมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นหรืออุ่นเพื่อไล่ความชื้นออกไป นอกจากนี้เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้วแต่อิฐทนไฟยังไม่ถึงกำหนดอายุการใช้งาน เบ้าเหล่านี้จะถูกนำมาอุ่นเพื่อรักษาอุณหภูมิให้

คงที่และไม่ให้อุณหภูมิของอิฐทนไฟลดลงมากเกินไปในขณะที่รอการหลอมจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเสร็จสิ้น

สถานีเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ที่สถานีนี้เข้รับน้ำเหล็กที่ผ่านการอุ่นมาแล้วและพร้อมที่จะใช้งาน จะมารอรับน้ำเหล็กที่หลอมเสร็จจากเตาอาร์คไฟฟ้า และเตรียมพร้อมที่จะรับน้ำเหล็กต่อไป

สถานีหล่อแบบต่อเนื่อง ที่สถานีนี้เข้รับน้ำเหล็กก็จะรอการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้าเพื่อลงไปสู่รางรับน้ำเหล็ก (Tundish) หลังจากถ่ายเทน้ำเหล็กเสร็จแล้ว สิ่งที่ยังหลงเหลืออยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะเป็นสแลก และสิ่งที่เหลืออยู่ก็จะถูกนำไปทิ้งในเวลาต่อมา

สำหรับวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก เริ่มจากการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อที่จะป้องกันการเกิดความเสียหายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างฉับพลัน หลังจากอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กตามต้องการแล้วเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะเคลื่อนที่ไปรอและเตรียมพร้อมสำหรับการเทน้ำเหล็กที่หลอมเสร็จแล้วจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ซึ่ง ณ จุดนี้ ระยะเวลาการไปรอกับเวลาที่เทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าต้องใกล้เคียงกัน ถ้าหากไปเป็นเช่นนั้นแล้วอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะลดต่ำลง ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายของอิฐทนไฟได้ หลังจากเทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็กแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กก็จะถูกเคลื่อนย้ายไปสู่สถานีหล่อแบบต่อเนื่อง ซึ่งที่สถานีนี้อาจจะต้องมีการรอสำหรับการถ่ายน้ำเหล็กออก อาจจะเป็นเพราะรอการทำงานก่อนหน้าเสียเวลาและไม่พอดีกัน หลังจากถ่ายน้ำเหล็กเสร็จแล้วสิ่งที่ยังเหลืออยู่ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กก็คือสแลก และสแลกเหล่านี้ก็จะถูกเททิ้งไป หลังจากเทสแลกเสร็จแล้วเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะถูกนำมาตรวจสอบสภาพก่อนนำไปใช้งาน เช่นตรวจสอบสภาพประตู แผ่นเลื่อนเปิดปิด หากมีสภาพเบ้ารับน้ำเหล็กดีก็จะนำเบ้ารับน้ำเหล็กไปอุ่นและเตรียมพร้อมที่จะไปใช้งานอีกครั้งเป็นรอบต่อไป หากสภาพเบ้ารับน้ำเหล็กไม่พร้อมที่จะใช้งานต่อไปก็จะถูกนำส่งกลับไปซ่อมเพื่อเปลี่ยนอิฐทนไฟหรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

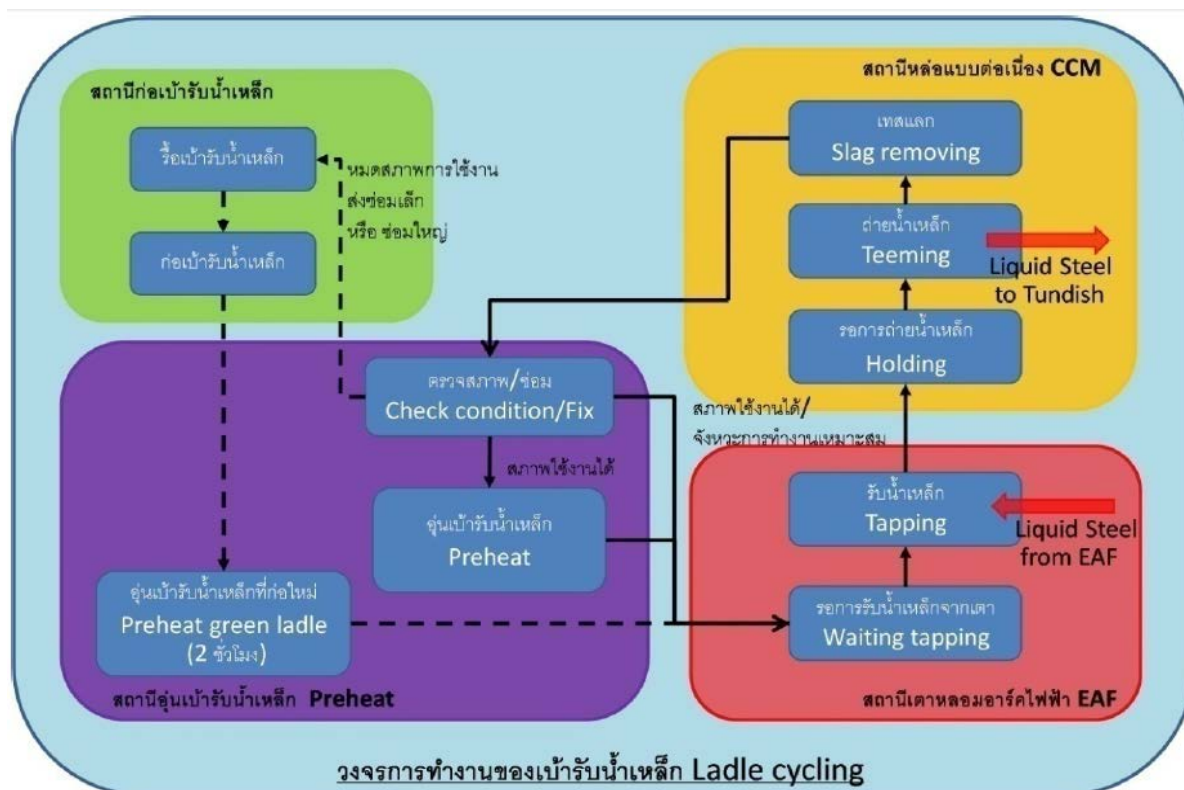
โดยทั่วไปสำหรับการส่งซ่อมจะมีการส่งซ่อมอยู่ 2 ลักษณะคือ

1. ซ่อมเล็ก เป็นการเป็นการซ่อมแซมอิฐทนไฟบางชั้นหรือบางชั้นที่ไม่พร้อมที่จะใช้งาน และจะส่งซ่อมเล็กทุกๆ 20 – 25 รอบของการทำงาน

2. ช่อมใหญ่ เป็นการรื้อชั้นของอิฐทนไฟใหม่ทั้งหมด และก่ออิฐทนไฟขึ้นมาใหม่ โดยปกติจะช่อมใหญ่ทุกๆ 40 – 45 รอบการทำงาน

ทั้งนี้การส่งช่อมชั้นของอิฐทนไฟไม่ว่าจะเป็นการช่อมเล็กหรือช่อมใหญ่นั้นก็จะขึ้นกับลักษณะการทำงานและวัสดุทนไฟของแต่ละโรงงานที่เลือกใช้

สำหรับเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการก่ออิฐทนไฟใหม่ (Green Ladle) จะต้องผ่านกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นระยะเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงเพื่อเตรียมพร้อมให้อิฐทนไฟอยู่ในลักษณะที่พร้อมใช้งานโดยไม่เกิดความเสียหาย



รูปที่ 3.10 กระบวนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก [2]



### 3.3 การถ่ายเทความร้อนระหว่างกระบวนการผลิตทั้งหมด

#### 3.3.1 การนำความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก

การนำความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กจะเกิดบริเวณผนังของอิฐทนความร้อนที่ติดกับน้ำเหล็กแล้วนำความร้อนออกมาสู่ชั้นต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่มีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า เนื่องจากมีผลต่างของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ที่ระหว่างชั้นต่างๆ ดังนี้

น้ำเหล็ก → ชั้นทำงานของอิฐทนความร้อน → ชั้นปลอกคอก → ชั้นผนังเหล็ก

โดยที่หลักการถ่ายเทความร้อนจะเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์ (Fourier Law)

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

โดยที่  $Q_{cond}$  คือปริมาณความร้อนจากการนำความร้อนผ่านตัวกลาง (W)

$k$  คือสภาพการนำความร้อนของตัวกลาง ( $W/m^2 - K$ )

$A_{cond}$  คือพื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่านตัวกลาง ( $m^2$ )

$T$  คือการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)

จากสมการที่ 3.1 จะสังเกตเห็นว่า ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัว นั่นคือ ถ้ามีความแตกต่างของอุณหภูมิสูงเกิดการนำความร้อนที่มากด้วยเช่นกัน แต่ในความเป็นจริงอัตราการถ่ายเทความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กจะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และต้องทำงานร่วมกับเตาหลอมดังนั้นสมการดังกล่าวจึงไม่สามารถนำมาใช้ได้

ดังนั้นจึงพิจารณาสมการสมดุลพลังงานภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจะเป็นดังสมการ 3.2

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

โดยที่  $\rho$  คือความหนาแน่นของวัสดุทนไฟที่ใส่เบ้ารับน้ำเหล็ก ( $kg/m^3$ )

$c$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุทนไฟที่ใส่เบ้ารับน้ำเหล็ก ( $kJ/kg - K$ )

$t$  คือระยะเวลาที่ทำการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (s)

$Q'''_{gen}$  คืออัตราการก่อเกิดพลังงานต่อหน่วยปริมาตรของเบ้ารับน้ำเหล็ก ( $w/m^3$ )

จะสังเกตได้ว่าปริมาณความร้อนที่ไหลผ่านภายในผนังจะมีความสัมพันธ์กับเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) และ เงื่อนไขขอบ (Boundary Condition)

นอกจากการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการนำความร้อนแล้วภายในเบ้ารับน้ำเหล็กยังมีการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องอีก

### 3.3.2 การพาความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็ก

ลักษณะการพาความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานระหว่างผิวของแข็งไปยังของไหลที่สัมผัสกับผิวนั้น เป็นผลที่เกิดต่อเนื่องจากการนำความร้อนและการเคลื่อนที่ของของไหล ดังนั้นการพาความร้อนที่เกิดขึ้นในเบ้ารับน้ำเหล็กส่วนมากจะเป็นในลักษณะการพาความร้อนด้วยธรรมชาติ (Natural Convection) ไม่ว่าจะเป็นทั้งทางด้านที่ผนังเหล็กสัมผัสกับอากาศ หรือด้านที่น้ำเหล็กสัมผัสกับอิฐทนไฟที่ใช้งาน ลักษณะการระบายความร้อนของนิวตัน (Newton's Law of Cooling) จะแสดงดังสมการ

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

โดยที่	$Q_{conv}$	คือปริมาณความร้อนจากการพาความร้อน (w)
	$h$	คือสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $w/m^2 - K$ )
	$A_{conv}$	คือพื้นที่ที่เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อน ( $m^2$ )
	$T_{\infty}$	คืออุณหภูมิของของไหลที่พาความร้อน (K)
	$T_s$	คืออุณหภูมิของผิวที่ของไหลไปสัมผัส (K)

จากสมการที่ 3.3 ข้างต้น ตัวแปรทุกตัวสามารถหาค่าได้จากการวัดยกเว้นค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนซึ่งสามารถหาได้จาก

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

โดยที่	$Nu$	คือ Nussel Number (Dimensionless)
	$L$	คือ ระยะสำคัญของวัตถุ (Characteristic Length)(m)

สำหรับบางกรณีเช่นสำหรับการไหลภายนอก (External flow) ที่มีการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมชาติเฉลี่ย  $\bar{h}$  ซึ่งหาได้จาก

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

โดยที่ค่า C และ n ขึ้นอยู่กับค่า Rayleigh number:  $Ra_L$  และค่านี้สามารถหาได้จาก

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

โดยที่  $Gr_L$  คือ Grashof Number (Dimensionless) ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างแรงลอยตัว (Bouyancy force) กับแรงจากความหนืด (Viscous force) ของของไหล

$Pr$  คือ Prandtl Number (Dimensionless) ซึ่งก็คืออัตราส่วนระหว่างโมเมนตัม

และ Thermal diffusivities

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

$\beta$  คือ coefficient of volume expansion ( $K^{-1}$ )

$\nu$  คือ Kinematics Viscosity ของของไหล ( $m^2/s$ )

$\alpha$  คือ Thermal diffusivities ของของไหล ( $m^2/s$ )

สำหรับการหาค่า  $\overline{Nu}_L$  นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะรูปร่างของพื้นผิวที่ถ่ายเทความร้อน ซึ่งมี

ได้หลายรูปร่างลักษณะ เช่น

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

นอกจากนี้ยังมีกรณีพิเศษอื่นๆ อีกเช่น จากการศึกษาของ Ernst R. G. Eckert พบว่า

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

โดยที่

$$Gr = \frac{L^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\mu^2} \quad (3.8)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.9)$$

โดยที่  $C_p$  คือ ค่าความร้อนจำเพาะของวัสดุที่ความดันคงที่ (kJ/kg – K)

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นเพียงแค่ตัวอย่างในการหาค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ในกรณีที่มีความซับซ้อนมากขึ้นการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนก็ซับซ้อนมากขึ้นเช่นกัน

### 3.3.3 การแผ่รังสีความร้อนในเป่ารับน้ำเหล็ก

การแผ่รังสีความร้อนเป็นการส่งผ่านพลังงานในรูปแบบหนึ่ง ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดความแตกต่างของการถ่ายเทความร้อนกับการนำและพาความร้อนคือ การแผ่รังสีความร้อนไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกลางในการแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากในกระบวนการผลิตเหล็กจะเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่สูง ดังนั้นรูปแบบการถ่ายเทความร้อนส่วนมากจะมาจากรูปแบบการถ่ายเทความร้อนแบบการแผ่รังสีความร้อน

สำหรับวัตถุนิดใดที่มีอุณหภูมิมากกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (0 K) วัตถุนั้นจะมีการแผ่รังสีความร้อน สำหรับพื้นผิวหนึ่งๆ จะมีทั้งการดูดกลืนรังสีความร้อน และ แผ่รังสีความร้อน โดยที่ผลต่างระหว่างการดูดกลืนรังสีความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนคือการแผ่รังสีความร้อนสุทธิของผิวนั้น ถ้ามีอัตราการดูดกลืนน้อยกว่าอัตราการแผ่รังสีจะเป็นการสูญเสียพลังงานจากการแผ่รังสี ในทางกลับกันถ้าอัตราการดูดกลืนมากกว่าอัตราการแผ่รังสีความร้อนจะเป็นการได้รับพลังงานจากการแผ่รังสี

วัตถุดำเป็นวัตถุที่ถูกสมมติขึ้นมีไม่จริงในโลก และมีอัตราการแผ่รังสีสูงสุด ที่มีอุณหภูมิที่ค่าหนึ่งๆ ตามสมการ

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (3.10)$$

โดยที่  $E_b$  คือ อัตราการแผ่รังสีของวัตถุดำ ( $W/m^2$ )

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

$T_s$  คือ อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

หากวัตถุนำไปใช้งานไม่เป็นวัตถุดำ สมการที่ 3.10 ก็จะเปลี่ยนแปลงไป โดยมีค่าเปล่งรังสี (emissivity) ของพื้นผิวเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยค่าเปล่งรังสีมีค่าระหว่าง 0 – 1 ซึ่งเหล็กโดยทั่วไปนั้นมีค่าเปล่งรังสีประมาณ 0.84 และสมการที่ 3.10 ก็จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นสมการที่ 3.11

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4 \quad (3.11)$$

โดยที่  $E$  คือ อัตราการแผ่รังสีของวัตถุ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$\varepsilon$  คือ ค่าเปล่งรังสี (emissivity)

สำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวใดกับสิ่งแวดล้อมจะเป็นไปตามสมการ

$$Q_{rad} = \varepsilon\sigma A(T^4 - T_\infty^4) \quad (3.12)$$

โดยที่  $Q_{rad}$  คือ ปริมาณความร้อนในการแผ่รังสีความร้อน (W)

$A$  คือ พื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนความร้อน ( $\text{m}^2$ )

$T$  คือ อุณหภูมิของพื้นผิวที่แผ่รังสี (K)

$T_\infty$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของสิ่งแวดล้อมโดยรอบพื้นที่ที่แผ่รังสีความร้อน (K)

สมการที่ 3.12 เป็นสมการที่แสดงปริมาณความร้อนของผิวใดผิวหนึ่งไปสู่สิ่งแวดล้อม แต่ในความเป็นจริงการแผ่รังสีความร้อนอาจเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่อยู่ใกล้กัน ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนระหว่างสองพื้นผิวใดๆ จะมีตัวแปรที่เข้ามาเกี่ยวข้องได้แก่ตัวประกอบการมองเห็น (*View factor;  $F_{ij}$* ) ซึ่งจากสัญลักษณ์ที่เขียนขึ้นมานั้นคือสัดส่วนของการแผ่รังสีออกจากพื้นผิว  $i$  กับการรับรังสีที่พื้นผิว  $j$  และสามารถหาได้ดังนี้

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (3.13)$$

สำหรับการถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวที่ 1 ไปยังพื้นผิวที่ 2 นั้นต้องเป็นสัดส่วนกับความร้อนที่พื้นผิวที่ 1 ถ่ายเทออกมาทั้งหมด ดังแสดงได้ดังสมการ 3.14

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

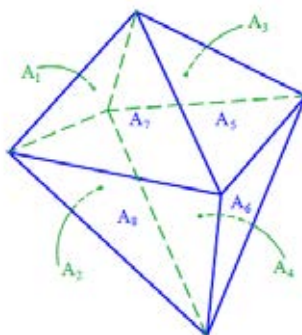
โดยที่  $q_{1 \rightarrow 2}$  คือปริมาณรังสีที่ออกจากพื้นผิวที่ 1 ไปยังพื้นผิวที่ 2

$F_{1 \rightarrow 2}$  คือตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิวที่  $A_1$  มองไปยัง  $A_2$

$q_1''$  คือฟลักซ์ของรังสีที่ออกจากพื้นที่ที่ 1

จากสมการที่ 3.14 จะเห็นว่าเมื่อสามารถหาค่าตัวประกอบการมองเห็นได้จะสามารถหาปริมาณความร้อนที่ออกจากพื้นผิวได้ แต่ในความเป็นจริงพื้นผิวที่ศึกษาไม่ได้มีแค่ 2 พื้นผิวดังนั้นจึงจำเป็นที่

ต้องศึกษาการแผ่รังสีความร้อนภายในพื้นผิวปิดล้อม  $N$  ผิว (enclosure) ดังรูปที่ 3.11 โดยการหาตัวประกอบมุมมองเห็นแต่ละพื้นผิวมาก่อน



รูปที่ 3.11 รูปตัวอย่างของผิวปิดล้อม

สำหรับการแผ่รังสีความร้อนในผิวปิดนั้นผลรวมของตัวประกอบมุมมองเห็นจากผิว  $i$  ไปผิวต่างๆ จะมีค่าเป็น 1 และถูกเรียกว่า Summation Rule สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum_{j=1}^N F_{i \rightarrow j} = 1 \quad (3.15)$$

โดยที่  $N$  คือจำนวนพื้นผิวที่ประกอบขึ้นเป็นเนื้อที่ปิดล้อม

$k$  คือพื้นผิวแต่ละพื้นผิว มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง  $N$

นอกจากนี้สำหรับผิวโค้งนูนและเป็นระนาบนั้นสัดส่วนรังสีที่ออกไปจากผิวประเภทนี้ไม่มีโอกาสที่จะตกกระทบผิวของตัวเองเลยทำให้  $F_{k,k} = 0$

นอกจาก Summation Rule ที่ช่วยหาตัวประกอบมุมมองเห็นแล้วแล้วยังมีความสัมพันธ์อีกหนึ่งความสัมพันธ์ที่เรียกว่า Reciprocity Relation ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i} \quad (3.16)$$

เมื่อ  $A_i$  คือพื้นที่แผ่รังสีของผิว  $i$

$A_j$  คือพื้นที่แผ่รังสีของผิว  $j$

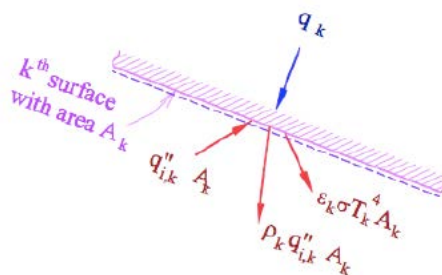
$F_{i \rightarrow j}$  คือตัวประกอบมุมมองเห็นจากผิว  $i$  ไปผิว  $j$

$F_{j \rightarrow i}$  คือตัวประกอบมุมมองเห็นจากผิว  $j$  ไปผิว  $i$

### 3.3.3.1 การแผ่รังสีของวัตถุเทา

การแจกแจงอุณหภูมิภายในของอิฐทนไฟภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก จะมีผลเนื่องจากการแผ่รังสีให้แกกันและกันของผนังต่างๆในเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งการแผ่รังสีชนิดนี้คือการแผ่รังสีในพื้นที่ปิดล้อม จึงต้องทำความเข้าใจในหลักการถ่ายเทความร้อนที่เกี่ยวข้อง

พิจารณาพื้นผิว  $k$  ดังรูปที่ 3.12 ตามกฎอนุรักษ์พลังงานที่พื้นผิว  $k$  เมื่อมีฟลักซ์เข้าสู่พื้นผิว  $k$  ( $q_{i,k}''$ ) ไม่สมดุลกับฟลักซ์ที่ออกจากพื้นผิว จึงต้องมีการให้ความร้อนเข้าหรือออกจากพื้นผิวนั้น ( $q_k$ ) เพื่อให้พลังงานที่เข้าออกในพื้นที่ผิวนั้นสมดุล ความร้อนที่ใส่เข้าไปหรือออกมาจะเป็นตัวแสดงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดกับผิวที่พิจารณา



รูปที่ 3.12 ลักษณะการแผ่รังสีที่พื้นผิววัตถุเทา

จากสมดุลพลังงานจะได้ว่า

$$q_k = (q_{o,k}'' - q_{i,k}'')A_k \quad (3.17)$$

เมื่อ

$$q_{o,k}'' = \rho_k q_{i,k}'' + \epsilon_k \sigma T_k^4 \quad (3.18)$$

โดยที่  $A_k$  คือพื้นที่ผิว  $k$  ใดๆที่พิจารณา ( $m^2$ )

$q_{i,k}''$  คือฟลักซ์ของรังสีที่เข้าพื้นผิว  $k$  ใดๆ ( $W/m^2$ )

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

$\rho_k$  คือค่าสะท้อนของพื้นผิว  $k$  ใดๆ

ส่วนของรังสีที่สะท้อนออกจากพื้นผิว  $k$  เมื่อพิจารณาให้พื้นผิว  $k$  ใดๆ เป็นวัตถุเทา รังสีที่สะท้อนออกจากพื้นผิวจะมีเพียงรังสีสะท้อนและรังสีที่ปลดปล่อยดังสมการที่ 3.18 ดังนั้นผลรวมของ Emissivity และ Reflexivity จะมีความสัมพันธ์กันคือ

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

เมื่อนำสมการที่ 3.19 ไปแทนในสมการที่ 3.18 จะสามารถจัดรูปใหม่ได้ดังนี้

$$q_{i,k}'' = \frac{q_{o,k}'' - \varepsilon_k \sigma T_k^4}{1 - \varepsilon_k} \quad (3.20)$$

แทนสมการที่ 3.19 และ 3.20 ใน 3.17 สามารถจัดรูปได้

$$q_k = \frac{\varepsilon_k}{(1 - \varepsilon_k)} A_k (\sigma T_k^4 - q_{o,k}'') \quad (3.21)$$

หากพิจารณาปริมาณรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิว  $k$  ไปยังพื้นผิว  $j$  ปริมาณรังสีที่ตกกระทบลงบนพื้นผิว  $j$  จะเป็นสัดส่วนตามตัวประกอบการมองเห็นเมื่อพื้นผิว  $k$  มองไปยังผิว  $j$  สามารถเขียนได้เป็น

$$q_{k \rightarrow j} = F_{k \rightarrow j} A_k q_{o,k}'' \quad (3.22)$$

เมื่อ  $q_{k \rightarrow j}$  คือปริมาณรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิว  $k$  ไปยังผิว  $j$  (w)

$F_{k \rightarrow j}$  คือตัวประกอบการมองเห็นจากพื้นผิว  $k$  ไปยังผิว  $j$

ในทางกลับกันรังสีที่ออกจากพื้นผิว  $j$  ไปยังพื้นผิว  $k$  ก็สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการที่ 3.16 และ 3.22 ได้เช่นเดียวกันแสดงดังสมการ 3.23

$$q_{j \rightarrow k} = F_{k \rightarrow j} A_k q_{o,j}'' \quad (3.23)$$

ดังนั้นหาพิจารณาถึงปริมาณการถ่ายเทความร้อนสุทธิระหว่างพื้นผิว  $k$  และ  $j$  จะแสดงได้ดังนี้

$$q_{k \leftrightarrow j} = F_{k \rightarrow j} A_k (q_{o,k}'' - q_{o,j}'') \quad (3.24)$$

เมื่อพิจารณาความร้อนที่เข้าออกพื้น  $k$  โดยพื้นที่อื่นๆ ที่มาปิดล้อม  $n$  ผิว จะแสดงเป็นสมการได้เป็น

$$q_k = \sum_{j=1}^n q_{k \leftrightarrow j} \quad (3.25)$$

แทนสมการที่ 3.24 ลงในสมการที่ 3.25 จะได้



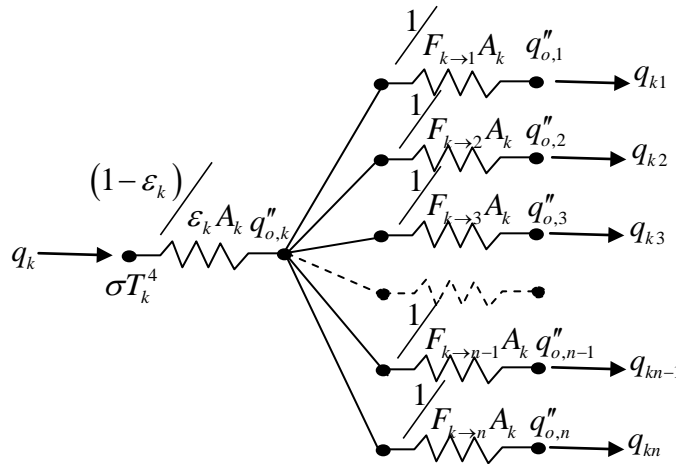
$$q_k = \sum_{j=1}^n F_{k \rightarrow j} A_k (q_{o,k}'' - q_{o,j}'') = \sum_{j=1}^n \frac{(q_{o,k}'' - q_{o,j}'')}{1/F_{k \rightarrow j} A_k} \quad (3.26)$$

จะเห็นว่าสมการที่ 3.21 กับ 3.26 ต่างก็เป็นความร้อนที่เข้าออกพื้นผิว k จึงนำมาเท่ากันจะได้

$$\frac{(\sigma T_k^4 - q_{o,k}'')}{(1 - \varepsilon_k)/\varepsilon_k A_k} = \sum_{j=1}^n \frac{(q_{o,k}'' - q_{o,j}'')}{1/F_{k \rightarrow j} A_k} \quad (3.27)$$

เมื่อนำสมการที่ 3.27 มาเขียนในรูปความต้านทานทางความร้อนจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่

3.13



รูปที่ 3.13 วงจรต้านทานความร้อนของพื้นผิว k ในพื้นที่ปิดล้อมด้วยพื้นผิว n ผิว [4]

### 3.4 การออกแบบตัวประมาณค่าสถานะ (State Estimator Design)

เมื่อพิจารณารูปแบบของสมการที่ 3.2 จะพบว่า สมการดังกล่าวจะอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ ซึ่งสมการในรูปแบบนี้สามารถนำมาเขียนอยู่ในรูปแบบของปริภูมิสแตต (State-space description) ได้ โดยจะมีรูปแบบการเขียน ดังสมการที่ 3.28 สมการในรูปแบบของปริภูมิสแตตนั้นเหมาะสำหรับการวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมสมัยใหม่ [19]

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3.28)$$

เมื่อ  $A$  คือเมทริกซ์ระบบ (System matrix) ( $n \times n$ )

$B$  คือเมทริกซ์สัญญาณอินพุต (Input matrix) ( $n \times r$ )

$C$	คือเมทริกซ์สัญญาณเอาต์พุต (Output matrix) ( $m \times n$ )
$D$	คือเมทริกซ์สัญญาณป้อนไปข้างหน้า (Feedforward matrix) ( $n \times r$ )
$n$	คืออันดับของระบบ (System Order)
$m$	คือจำนวนสัญญาณเอาต์พุต (Number of Output)
$A$	คือจำนวนสัญญาณอินพุต (Number of Input)

### 3.4.1 การเปลี่ยนสมการถ่ายเทความร้อนมิติเดียวผ่านผนังให้อยู่ในรูปแบบปริภูมิสแตต

สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์ที่แสดงการถ่ายเทความร้อนในอิฐทึบไฟสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.2 ซึ่งรูปแบบสมการดังกล่าวสามารถหาคำตอบได้ 2 ลักษณะคือ 1. คำตอบแม่นยำ ซึ่งการหาคำตอบด้วยวิธีการนี้เหมาะสำหรับการหาคำตอบโดยที่รูปแบบสมการมีความซับซ้อนไม่มาก และ 2. การหาคำตอบโดยใช้วิธีการทางตัวเลข ซึ่งวิธีนี้เหมาะสำหรับสัณหาที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น การแก้ปัญหาโดยใช้วิธีการทางตัวเลขสามารถหาได้หลายรูปแบบ เช่น ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง ไฟไนต์อีเลเมนต์ (Finite Element) เป็นต้น

สำหรับวิธีการการเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีลักษณะคล้ายกับสมการที่ 3.2 ให้อยู่ในรูปแบบปริภูมิสแตตเพื่อนำมาใช้วิเคราะห์และออกแบบสมการที่ใช้ในการควบคุม ถูกเรียกว่า Lumped Parameter Model ซึ่งวิธีการนี้จะทำการแบ่งผนังก้อนใหญ่ ออกเป็นก้อนย่อยๆ โดยที่ก้อนย่อยๆ นี้จะถูกสมมติให้มีอุณหภูมิคงที่ตลอดทั้งก้อนย่อย และนอกจากนี้โดยวิธีนี้เราจะสามารถแยก Partial differential equation ไปเป็น Ordinary differential equation

จากการศึกษาพบว่าจำนวนก้อนย่อยที่แบ่งนั้นจะส่งผลต่อความแม่นยำต่อทางการคำนวณ กล่าวคือถ้าแบ่งจำนวนก้อนย่อยที่มากส่งผลให้ความถูกต้องของการคำนวณที่ตำแหน่งต่างๆ มากขึ้น ในทางกลับกันจำนวนก้อนย่อยที่น้อยลงส่งผลให้การคำนวณอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ คลาดเคลื่อน แต่หากพูดถึงในแง่ของพลังงานที่สะสมอยู่ในก้อนต่างๆทั้งระบบแล้วจะมีความถูกต้องเหมือนกัน

สำหรับการใช้วิธี Lumped Parameter Model นั้นจำเป็นต้องอยู่ในเงื่อนไขที่  $Bi < 0.1$  โดยที่  $Bi$  เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานทางความร้อนของการนำความร้อนและความต้านทานทางความร้อนของการนำความร้อนซึ่งสามารถแสดงได้โดยสมการที่ 3.29

$$Bi = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} \tag{3.29}$$

$$R_{cond} = \frac{L}{kA_{cond}} \tag{3.30}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA_{conv}} \tag{3.31}$$

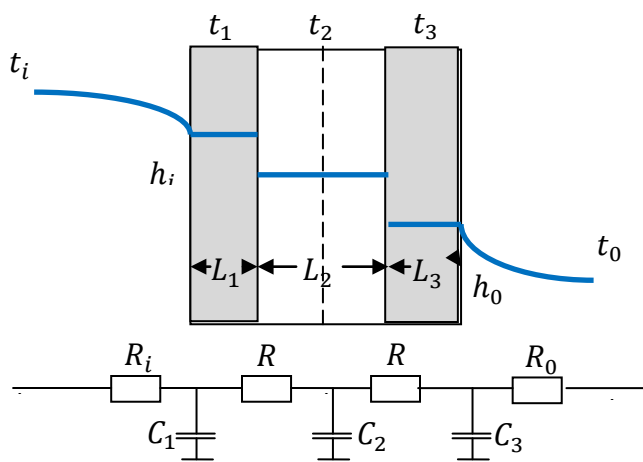
โดยที่  $Bi$  คือ Biot Number

$R_{cond}$  คือ ความต้านทานทางความร้อนของการนำความร้อน

$R_{conv}$  คือ ความต้านทานทางความร้อนของการพาความร้อน

$L$  คือ ความยาวของก้อนย่อยที่แบ่ง

ลองพิจารณารูปที่ 3.14 จะเห็นว่าผนังหนึ่งถูกแบ่งออกเป็นก้อน 3 ก้อนย่อย โดยที่ก้อนย่อยทางด้านข้างของผนังจะสัมผัสกับอากาศโดยที่มีอุณหภูมิ  $t_i$  และ  $t_o$  และมีสัมประสิทธิ์การพาความร้อน  $h_i$  และ  $h_o$  ตามลำดับ ซึ่งเงื่อนไขการแบ่งก้อนย่อยนี้จำเป็นต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่  $Bi < 0.1$



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างของการเขียนสมการ 3.2 ในรูปแบบปริภูมิสแตต

เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานที่ก้อนย่อยที่ 1 (ก้อนทางซ้ายมือ) ซึ่งแสดงได้โดยสมการที่ 3.32

$$\rho c_p L_1 \frac{dt_1}{dt} = h_i(t_i - t_1) - \frac{k}{L_1 + \frac{L_2}{2}}(t_1 - t_2) \quad (3.32)$$

เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานที่ก้อนย่อยที่ 2 (ก้อนตรงกลาง) ซึ่งแสดงได้โดยสมการที่ 3.33

$$\rho c_p L_2 \frac{dt_2}{dt} = \frac{k}{L_1 + \frac{L_2}{2}}(t_1 - t_2) - \frac{k}{L_3 + \frac{L_2}{2}}(t_2 - t_3) \quad (3.33)$$

เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานที่ก้อนย่อยที่ 3 (ก้อนซ้ายมือ) ซึ่งแสดงได้โดยสมการที่ 3.34

$$\rho c_p L_3 \frac{dt_3}{dt} = \frac{k}{\frac{L_2}{2} + L_3}(t_2 - t_3) - h_0(t_3 - t_0) \quad (3.34)$$

จัดรูปสมการที่ 3.32 3.33 และ 3.34 จะได้สมการที่ 3.35 3.36 และ 3.37 ตามลำดับ

$$C_1 \frac{dt_1}{dt} = h_i t_i - \left( h_i + \frac{k}{L_1 + \frac{L_2}{2}} \right) t_1 + \frac{k}{L_1 + \frac{L_2}{2}} t_2 \quad (3.35)$$

$$C_2 \frac{dt_2}{dt} = \frac{k}{L_1 + \frac{L_2}{2}} t_1 - \left( \frac{k}{L_1 + \frac{L_2}{2}} + \frac{k}{L_3 + \frac{L_2}{2}} \right) t_2 + \frac{k}{L_3 + \frac{L_2}{2}} t_3 \quad (3.36)$$

$$C_3 \frac{dt_3}{dt} = \frac{k}{L_3 + \frac{L_2}{2}} t_2 - \left( h_0 + \frac{k}{L_3 + \frac{L_2}{2}} \right) t_3 + h_0 t_0 \quad (3.37)$$

โดยที่  $C_i$  คือ  $\rho c_p L_i$

$i$  คือ จำนวนของก้อนย่อยที่แบ่ง

$L_i$  คือความหนาของก้อนย่อยแต่ละก้อน

จากสมการ 3.35, 3.36 และ 3.37 สามารถนำมาเขียนรูปปริภูมิสแตต เมื่อมีอุณหภูมิ  $t_i$  และ  $t_0$  เป็นอินพุต ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{t}_1 \\ \dot{t}_2 \\ \dot{t}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(h_i + \frac{k}{L_1 + \frac{L_2}{2}})/C_1 & \frac{k}{L_1 + \frac{L_2}{2}}/C_1 & 0 \\ \frac{k}{L_1 + \frac{L_2}{2}}/C_2 & -(\frac{k}{L_1 + \frac{L_2}{2}} + \frac{k}{L_3 + \frac{L_2}{2}})/C_2 & \frac{k}{L_3 + \frac{L_2}{2}}/C_2 \\ 0 & \frac{k}{L_3 + \frac{L_2}{2}}/C_3 & -(h_0 + \frac{k}{L_3 + \frac{L_2}{2}})/C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_i/C_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & h_0/C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_i \\ t_0 \end{bmatrix}$$

โดยที่  $t_i$  ถูกเรียกว่าค่าสถานะที่  $i$  (สแตตที่  $i$ )

### 3.4.2 การออกแบบตัวประมาณค่าสถานะ (State Estimator Design)

การศึกษาการออกแบบตัวประมาณค่าสถานะจำเป็นต้องทราบถึงวิธีการออกแบบตัวประมาณค่าแบบอันดับเต็มและแบบลดอันดับ โดยที่ตัวประมาณค่าแบบเต็มอันดับคือการประมาณค่าสถานะทุกตัวใหม่หมด โดยการนำข้อมูลของสัญญาณของตัวแปรสแตตบางตัวที่สามารถวัดได้กับสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบมาใช้ในการประมาณค่าสถานะ ( $\hat{x}$ ) ตัวใหม่ทุกตัว ส่วนตัวประมาณค่าแบบลดอันดับคือการสร้างตัวประมาณค่าสถานะโดยใช้ข้อมูลของสัญญาณของตัวแปรสแตตที่วัดได้และสัญญาณอินพุตของระบบควบคุมมาใช้ในการประมาณค่าสัญญาณสแตต ( $\hat{x}$ ) เฉพาะสแตตที่ไม่สามารถวัดได้เท่านั้น ตัวประมาณค่าสถานะ บางครั้งอาจจะเรียกว่า ตัวสังเกตตัวแปรสแตต (State Observer)

#### 3.4.2.1 ตัวประมาณค่าสถานะแบบอันดับเต็ม (Full-Order Estimators)

จากที่กล่าวมาแล้วการประมาณค่าสถานะแบบนี้เป็น การประมาณสัญญาณสแตตทุกตัวใหม่หมด โดยใช้ข้อมูลของสัญญาณบางตัวที่วัดได้และสัญญาณอินพุตที่ส่งเข้าไปในระบบ โดยที่ตัวประมาณค่าสถานะของระบบพลศาสตร์หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ต้องการควบคุมจะมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu \quad (3.38)$$

โดยที่  $\hat{x}(t)$  คือตัวแปรสแตตที่เป็นค่าประมาณของตัวแปรสแตต  $x(t)$

จากสมการที่ 3.38 สามารถเป็นสมการของตัวประมาณค่าสถานะ (estimator) ก็ได้ ถ้าเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ของตัวประมาณค่าสถานะ มีค่าเท่ากับตัวแปรสแตตจริง และถ้าเมตริกซ์  $A$  และ  $B$  มีความแม่นยำในการแทนระบบการทำงานของระบบจริง หรือกล่าวได้ว่าถ้าสามารถหาสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้จำลองการทำงานของระบบได้แม่นยำ ตัวประมาณค่าสถานะก็สามารถทำนายได้แม่นยำอีกด้วย แต่ในทางปฏิบัติแล้วเราไม่สามารถทำได้เนื่องจากมีความผิดพลาดในการจำลองการทำงานของระบบที่เราต้องการควบคุม

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรวมค่าความผิดพลาดเข้าไประบบของเราทำให้สมการตัวประมาณค่าสถานะมีรูปเปลี่ยนไปดังสมการที่ 3.39

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x}(t) + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (3.39)$$

โดยที่  $y$  คือข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจริงที่นำมาใส่ในแบบจำลอง

$L$  คืออัตราขยายของตัวประมาณค่าสถานะที่ต้องออกแบบโดยจะมีรูปแบบดังนี้คือ

$$L = [l_1 \quad l_2 \cdots l_{n-1} \quad l_n]' \quad (3.40)$$

จะเห็นว่าการออกแบบตัวประมาณค่าสถานะแบบอันดับเต็มคือการหาค่าอัตราขยาย  $L$  เพื่อให้ประมาณค่าสถานะสามารถประมาณค่าตัวแปรสถานะของระบบได้ในเวลาที่กำหนด หรือพูดกล่าวได้ว่าอัตราความเร็วที่สัญญาณผิดพลาดจะมีค่าเป็นศูนย์

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกค่าอัตราขยาย  $L$  เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและมีความเร็วพอสมควรในการที่สัญญาณความผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์ และพยายามเลือกอัตราขยายให้โพลของตัวประมาณค่าสถานะอยู่บนแกนจริงและอยู่ทางซ้ายมือของโพลของระบบปิดตัวที่เร็วที่สุดหรือน้อยคือตัวที่มีอิทธิพลมากที่สุด

#### 3.4.2.2 ความสังเกตได้ (Observability)

ความสามารถที่ระบบควบคุมสามารถที่จะสังเกตถูกเรียกว่า ความสังเกตได้ (Observability) ซึ่งถ้าตรวจสอบแล้วว่าระบบมีความสังเกตได้นั้นจะสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวัดบางสถานะมาประมาณสถานะที่ไม่สามารถวัดได้ ดังนั้นความสังเกตได้จะพิจารณาเมตริกซ์ความสังเกต คือ

$$observability = [C \quad CA \cdots CA^{n-1} \quad CA^n]' \quad (3.41)$$

ระบบใดๆ จะมีคุณสมบัติสังเกตได้เมื่อ ลำดับชั้นของเมตริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ  $n$  ( $rank[observability] = n$ ) เมื่อ  $C$  คือเมตริกซ์ที่แสดงถึงสถานะที่มีการนำข้อมูลเข้ามาช่วยในการประมาณค่า

## บทที่ 4

### การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

#### 4.1 บทนำ

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับงานวิจัยครั้งนี้คือการสร้างเพื่อการทำนายอุณหภูมิ น้ำเหล็กก่อนการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อนำไปสู่กระบวนการถัดไป ดังนั้น อุณหภูมิ น้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมจำเป็นต้องที่เพียงพอเพื่อรองรับการถ่ายเทความร้อนทั้ง กระบวนการ ดังนั้นเราจำเป็นต้องศึกษากระบวนการถ่ายเทความร้อนในแต่ละกระบวนการที่ เกี่ยวข้องกับน้ำเหล็กและเบ้ารับน้ำเหล็ก

จากการศึกษากระบวนการของเบ้ารับน้ำเหล็กจะพบว่าช่วงก่อนการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมลง สู่เบ้ารับน้ำเหล็กจะมีกระบวนการที่เกี่ยวข้องอยู่ 2 กระบวนการ คือ 1.ช่วงการอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจน เนอเทิฟ และ 2.ช่วงการซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็กหลังจากการถ่ายน้ำเหล็กไปสู่รางรับน้ำเหล็ก ดังนั้นทั้ง สองช่วงนี้จึงมีการนำข้อมูลจากการวัดในรอบการทำงานจริงเข้ามาเพื่อประมาณอุณหภูมิที่สภาวะอื่น ของเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อให้มีความแม่นยำมากกว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างเดียว ก่อนที่จะ นำไปทำนายอุณหภูมิ น้ำเหล็กที่เทออกจากเตาหลอม

#### 4.2 การนำความร้อนของผนังข้างและผนังก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก

การพิจารณาสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิ น้ำเหล็กที่เท ออกจากเตาหลอมจำเป็นต้องต้องทราบถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ ระดับความลึกต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก กล่าวคือ สภาวะทางความ ร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูง น้ำเหล็กที่ทำนายออกมาควรมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่าปกติ แต่ถ้า สภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิที่ต่ำ น้ำเหล็กที่ทำนายออกมาควรมีอุณหภูมิที่สูง

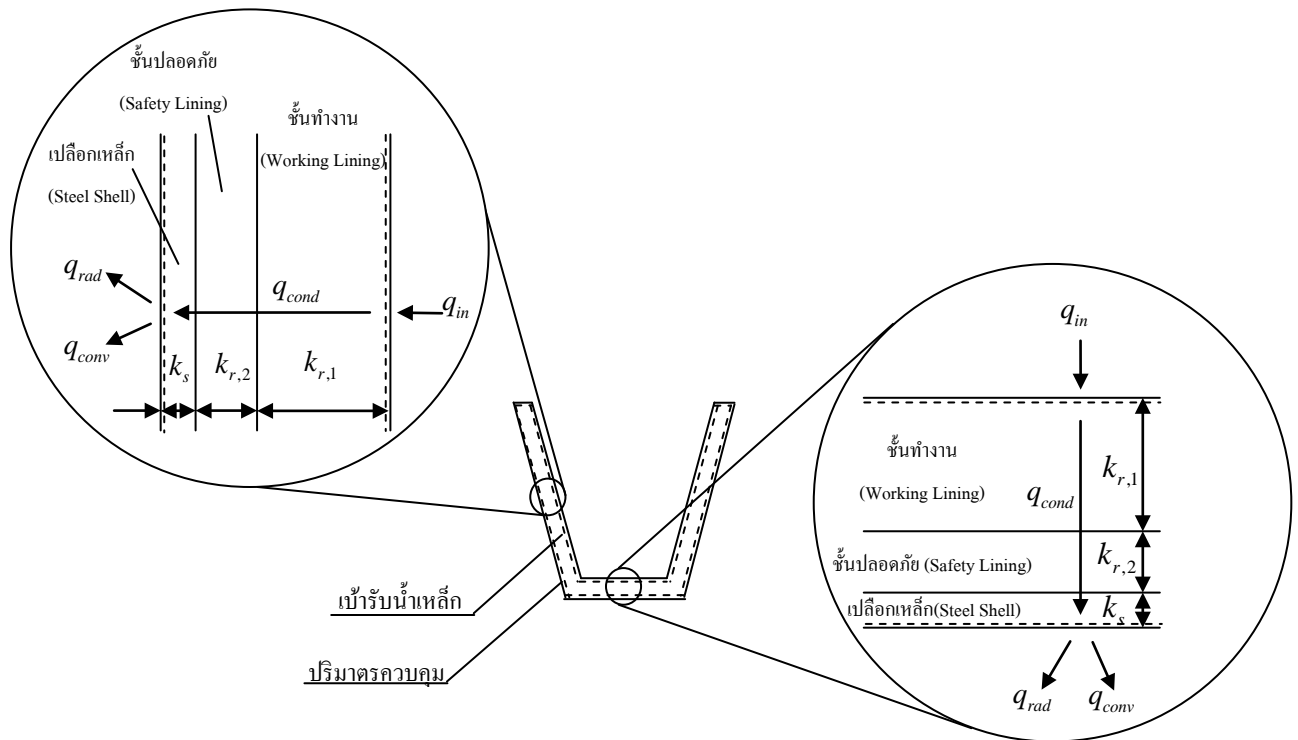
เพื่อให้สอดคล้องกับการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น แต่การแจกแจงอุณหภูมิตามระดับความลึกนั้นจะต้องเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาขึ้นกับสภาพการนำความร้อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก

พิจารณาปริมาตรควบคุมตามรูปที่ 4.1 จากรูปจะพบว่ามีการแบ่งปริมาตรควบคุมออกเป็น 2 ปริมาตรควบคุม โดยที่ปริมาตรควบคุมที่ 1 คือปริมาตรควบคุมที่ตำแหน่งผิวด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก และปริมาตรควบคุมที่ 2 คือปริมาตรควบคุมที่บริเวณก้นของเบ้ารับน้ำเหล็ก หลังจากนั้นพบว่าเมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมใดๆ ในกรณีที่มีการให้ความร้อนแก่เบ้ารับน้ำเหล็ก จะพบว่าความร้อนไหลผ่านผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเข้ามาในปริมาตรควบคุม ( $q_{in}$ ) และความร้อนจะถูกถ่ายเทไปสู่อิฐทนไฟชั้นทำงาน (Working Lining) ไปสู่ชั้นปลอดภัย (Safety Lining) และเข้าไปสู่เปลือกเหล็ก (Steel Shell) ด้วยการนำความร้อน ( $q_{cond}$ ) และถ่ายเทออกจากผิวเปลือกเหล็กด้วยการพาความร้อน ( $q_{conv}$ ) และการแผ่รังสีความร้อน ( $q_{rad}$ ) แต่กรณีที่ไม่มีการให้ความร้อนแก่เบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะพบว่าความร้อนจะถูกถ่ายเทจากบริเวณกึ่งกลางของเบ้ารับน้ำเหล็กออกสู่ด้านข้าง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กเช่นเดียวกัน ซึ่งการนำความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะเป็นไปตามกฎของฟูเรียร์ดังสมการที่ 3.1 สำหรับการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนออกจากเปลือกเหล็กไปสู่บรรยากาศจะเป็นไปตามกฎระบายความร้อนของนิวตันซึ่งแสดงได้ด้วยสมการที่ 3.3 ส่วนการแผ่รังสีความร้อนนั้นที่บริเวณผิวเปลือกเหล็กถือเป็นพื้นที่เปิดโล่งออกสู่บรรยากาศในที่นี้จึงเสมือนให้บรรยากาศโดยรอบประพฤติตัวเหมือนวัตถุดำที่มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิบรรยากาศที่พิจารณาซึ่งในที่นี้คือ 35 °C โดยมีรูปแบบลักษณะของสมการตามสมการที่ 3.12

สำหรับการความร้อนที่ผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุมที่ตำแหน่งด้านในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นขึ้นอยู่กับกิจกรรมของเบ้ารับน้ำเหล็กที่กระบวนการต่างๆ หรือกล่าวได้ว่าเป็นเงื่อนไขขอบของการถ่ายเทความร้อน

ดังนั้นหัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงเงื่อนไขขอบต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็กที่กระบวนการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง





รูปที่ 4.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังข้างและผนังกั้นภายในเข้าน้ำเหล็กในปริมาตรควบคุม [4]

#### 4.3 แบบจำลองทางความร้อนระหว่างการอุ่นเข้าน้ำเหล็ก

สำหรับการอุ่นเข้าน้ำเหล็กนั้น โดยปกติจะใช้การอุ่นโดยการเผาเข้าน้ำเหล็กด้วยหัวเผาต่างๆ ตามรูปที่ 4.2 ดังนั้นจำเป็นต้องอาศัยการเผาไหม้ ซึ่งเป็นการผสมกันระหว่างเชื้อเพลิงและอากาศ ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือไอเสียที่อยู่ในรูปของแก๊สที่มีอุณหภูมิสูง ดังนั้นความร้อนจากการเผาไหม้ที่เข้าสู่เข้าน้ำเหล็กจึงเป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนไปยังผิวเข้าน้ำเหล็ก

จากการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในเข้าน้ำเหล็กในระหว่างกระบวนการอุ่นนั้น ชัชวีสต์ วุฒิสิริศาสตร์ [4] เสนอการใช้แบบจำลองทางความร้อนของ Mohanty และ Satayayut [7] และการศึกษาวิจัยการศึกษาแบบของชัชวีสต์ วุฒิสิริศาสตร์เช่นเดียวกัน โดยแบบจำลองที่ใช้ตั้งอยู่บนสมมติฐานต่อไปนี้

1. ในผนังเข้าน้ำเหล็กจะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนใน 1 มิติ

2. เนื่องจากอัตราส่วนรัศมีทรงกระบอกของเบ้ารับน้ำเหล็กมากกว่าความหนาของผนังเบ้ารับ น้ำเหล็กถึง 10 เท่า จึงให้ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นแผ่นราบเรียบ
3. เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงการถ่ายเทความร้อนจะเกิดจากการแผ่รังสีความร้อนเป็นหลัก การถ่ายเทความร้อนภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะพิจารณาเพียงการแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเท่านั้น ส่วนภายนอกผนังเบ้ารับน้ำเหล็กมีการถ่ายเทความร้อนกับสิ่งแวดล้อมทั้งการแผ่รังสี และการพาความร้อน
4. ให้การแผ่รังสีภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีฟลักซ์ที่คงที่ทั่วถึงเท่ากันทั้งหมดเบ้ารับน้ำเหล็ก อาศัยจากการผสมกันอย่างดีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก

รูปแบบของการถ่ายเทความร้อนคือฟลักซ์ของรังสีที่ออกจากแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้น ทั่วถึงเท่ากันหมดดังข้อสมมติที่ 4 ผนังข้างและผนังก้นภายในของเบ้ารับน้ำเหล็กจะได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ( $q_{ph}''$ ) ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการที่ 4.1[7]

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

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

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

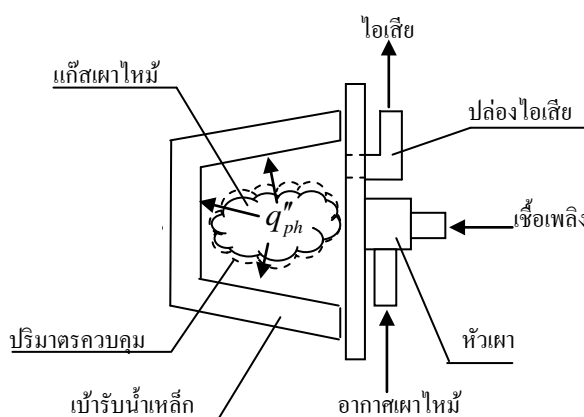
$$P = 0.2780238 - 0.00193EA + (6.7 \times 10^{-5})(EA)^2$$

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

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

เมื่อ	$T_{fl}$	คืออุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ (K)
	$T_{ladle,surf}$	คืออุณหภูมิของผิวภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (K)
	$F$	คือตัวประกอบการแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก
		(Dimensionless)
	$\varepsilon$	คือสภาพการเปล่งรังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก
		(Dimensionless)

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



รูปที่ 4.2 การแผ่รังสีของแก๊สเผาไหม้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการอุ่น [4]

จากสมการที่ 4.1 จะเห็นว่าฟลักซ์ที่ได้จากเชื้อเพลิงเมื่อมีการอุ่นจะเข้าสู่ผนังข้างและก้นของเบ้ารับน้ำเหล็กตามปริมาตรควบคุมที่ได้แบ่งไว้ข้างต้น โดยที่ฟลักซ์ที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก ดังสมการที่ 4.2 และ 4.3[7]

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

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

#### 4.4 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนเมื่อมีการร่อนน้ำเหล็กหรือซ่อมแซม

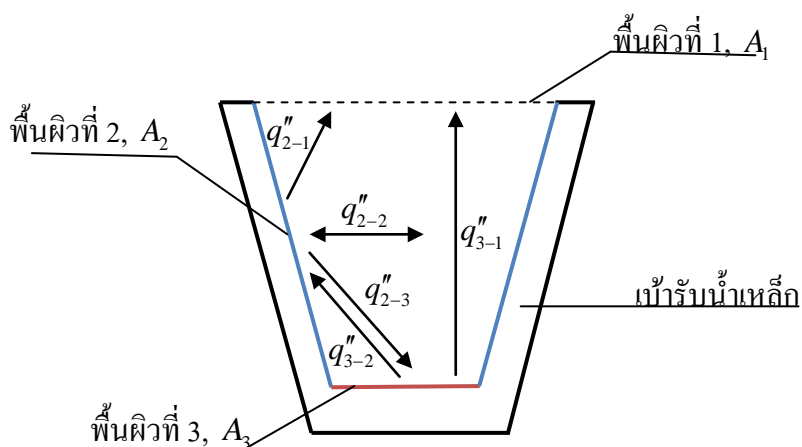
เมื่ออุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นที่เรียบร้อยแล้วหรือเมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิพอดีสำหรับการเทน้ำเหล็กในรอบถัดไปแล้ว เบ้ารับน้ำเหล็กก็จะถูกนำมาרותที่หน้าเตาหลอมเพื่อเตรียมรับน้ำเหล็กที่หลอม

เสร็จแล้ว ที่กระบวนการนี้ภายในเบ้ารับน้ำเหล็กจะว่างเปล่า และเนื่องจากเบ้ารับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิที่สูงทำให้เกิดการแผ่รังสีความร้อนภายในผิวปิดระหว่างพื้นผิว 3 ผิวคือ ผนังทางด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก ผนังก้นของเบ้ารับน้ำเหล็ก และผิวที่เป็นปากเบ้ารับน้ำเหล็ก

สำหรับการซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็กก็เช่นเดียวกันเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการใช้งาน (เทน้ำเหล็กเสร็จสิ้น) เบ้ารับน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงก็จะถูกนำมาวางไว้ โดยที่ภายในไม่มีน้ำเหล็กและบริเวณปากเบ้ารับน้ำเหล็กก็เปิดสู่บรรยากาศเช่นเดียวกัน ดังนั้นลักษณะการสูญเสียความร้อนก็มีลักษณะใกล้เคียงกับกระบวนการรอกการเทน้ำเหล็กหลังการอุ่น

สำหรับการออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจึงพิจารณาการถ่ายเทความร้อนภายในผิวปิด โดยที่แบ่งพื้นผิวปิดล้อม 3 พื้นผิวดังรูปที่ 4.3 พื้นผิว  $A_1$  คือพื้นผิวบริเวณปากเบ้ารับน้ำเหล็ก พื้นผิว  $A_2$  คือผิวด้านข้างภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (ปริมาตรควบคุมที่ 1) และ  $A_3$  คือผิวก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก (ปริมาตรควบคุมที่ 2)

ลักษณะการถ่ายแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อพิจารณาที่พื้นผิว  $A_2$  พื้นผิวนี้จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับผนังด้านที่อยู่ตรงข้าม (ตัวพื้นผิว  $A_2$ ) ในขณะเดียวกันก็มีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับพื้นผิว  $A_3$  ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ ยังมีการสูญเสียความร้อนออกสู่บรรยากาศโดยผ่านผิว  $A_1$  เมื่อพิจารณาพื้นผิว  $A_3$  ก็จะมีรูปแบบการพิจารณาค้างๆ กัน จากลักษณะดังกล่าวการถ่ายเทความร้อนจึงมีความซับซ้อนมากขึ้นตามไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามเป็นไปตามการแผ่รังสีความร้อนในพื้นที่ผิวปิด



รูปที่ 4.3 การถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีความร้อนในเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า [4]

โดยมีสมมติฐาน[4] ดังนี้

1. พื้นผิวในหน้าที่ปิดล้อมดังรูปที่ 4.3 แต่ละพื้นผิวมีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว
2. พื้นผิวที่ 1 ประพฤติตัวเป็นวัตถุดำเนื่องจากเปิดออกสู่บรรยากาศภายนอก
3. พื้นผิวที่ 2 และ 3 ประพฤติตัวเป็นพื้นผิวของวัตถุเทาที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน
4. พื้นผิวที่ 1, 2 และ 3 มีพื้นที่ผิวเป็น  $A_1$ ,  $A_2$  และ  $A_3$  ตามลำดับ

สิ่งที่ต้องการทราบในการออกแบบจำลองคือปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวที่ 2 และ 3 เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากการใช้สมการที่ 3.21 ได้ดังนี้

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

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

จากสมการที่ 4.4 และ 4.5 การหาปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าออกพื้นผิวที่ 2 และ 3 จำเป็นต้องใช้สมการช่วย เนื่องจากตัวแปรที่ไม่ทราบค่าคือ  $q_{0,2}$  และ  $q_{0,3}$

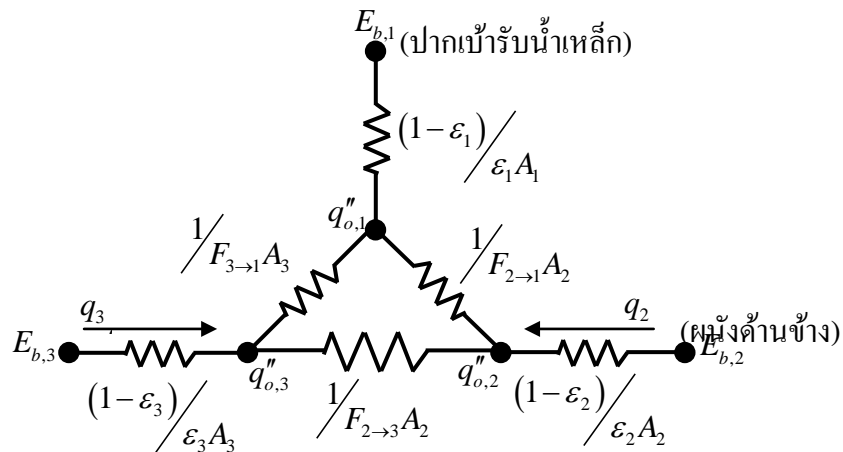
เนื่องจากพื้นผิวที่ปิดล้อมลักษณะในรูปที่ 4.3 สามารถประยุกต์สมการช่วย ตามสมการที่ 3.27 เข้าไปได้ ซึ่งสามารถสร้างเป็นระบบสมการได้ดังนี้

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

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

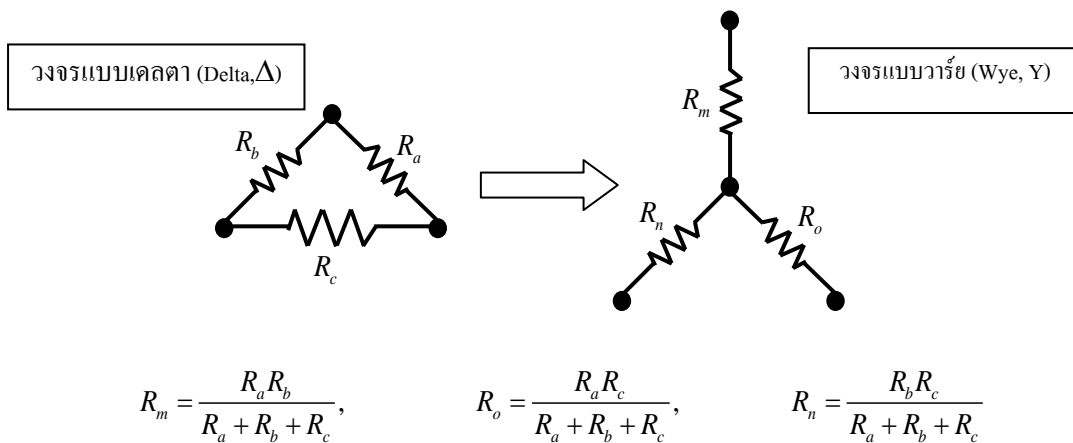
$$\frac{E_{b,3} - q''_{o,3}}{1 - \varepsilon_3 / \varepsilon_3 A_3} = \frac{q''_{o,3} - q''_{o,1}}{1 / F_{3 \rightarrow 1} A_3} + \frac{q''_{o,3} - q''_{o,2}}{1 / F_{3 \rightarrow 2} A_3} + \frac{q''_{o,3} - q''_{o,3}}{1 / F_{3 \rightarrow 3} A_3} \quad (4.8)$$

จากสมการที่ 4.6 – 4.8 สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรต้านทานความร้อนได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 วงจรต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีภายในเข้ารีบน้ำเหล็ก [4]

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าลักษณะการถ่ายเทความร้อนมีลักษณะเป็นวงจรเดลต้า (Delta,  $\Delta$ ) ซึ่งยุ่งยากต่อการแก้ปัญหา จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนเป็นวงจรวาร์ย (Wye, Y) เพื่อให้ง่ายต่อการแก้การแก้ปัญหาโดยที่สามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานที่ได้แสดงในรูปที่ 4.5

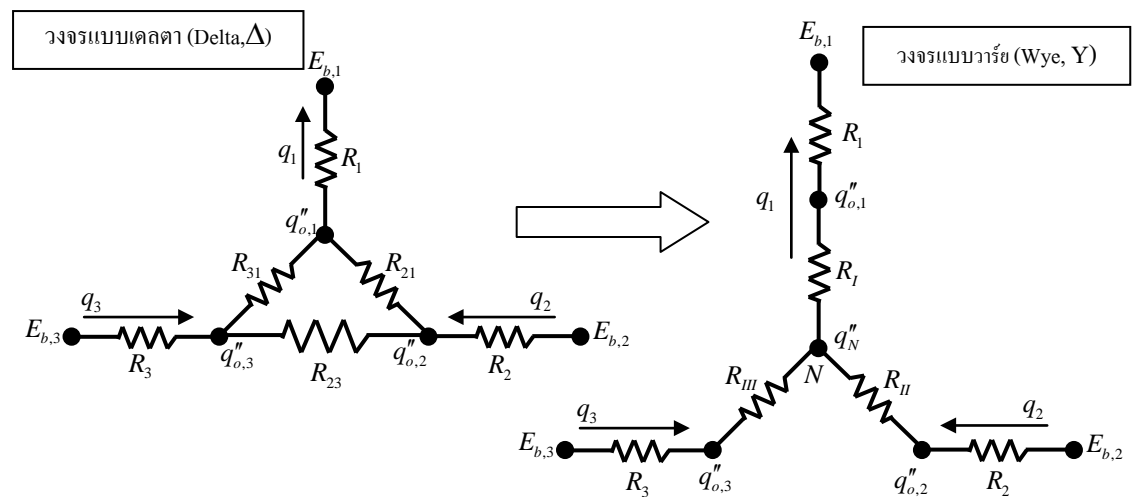


รูปที่ 4.5 การแปลงวงจรเดลตา (Delta,  $\Delta$ ) ให้กลายเป็นวงจรวาร์ย (Wye, Y) [4]

จากลักษณะดังกล่าวจะขอตั้งชื่อความต้านทานทางความร้อนในรูปที่ 4.4 เป็นตัวแปรชื่ออื่นเพื่อลดความสับสนในการแก้ปัญหาและสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และสามารถเขียนแทนรูปที่ 4.4 เป็นรูปที่ 4.6 ได้

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวต้านทานต่างๆในวงจรต้านทานความร้อน

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



รูปที่ 4.6 การแปลงวงจรต้านทานความร้อนแบบเดลต้า (Delta,  $\Delta$ ) เป็นวงจรวาร์รี่ (Wye, Y) เมื่อเปลี่ยนชื่อความต้านทานใหม่ [4]

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

จากรูปที่ 4.6 การเปลี่ยนวงจรจากเดลต้ามาเป็นวาร์รี่นั้นจะมีจุดต่อใหม่เกิดขึ้น 1 จุด (จุดต่อ N) การหาฟลักซ์ที่เข้าหรือออกจากจุดต่อ N ได้นั้นสามารถนำไปคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ออกจากพื้นผิวที่ 2 และ 3 ได้ดังสมการที่ 4.9 และ 4.10

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

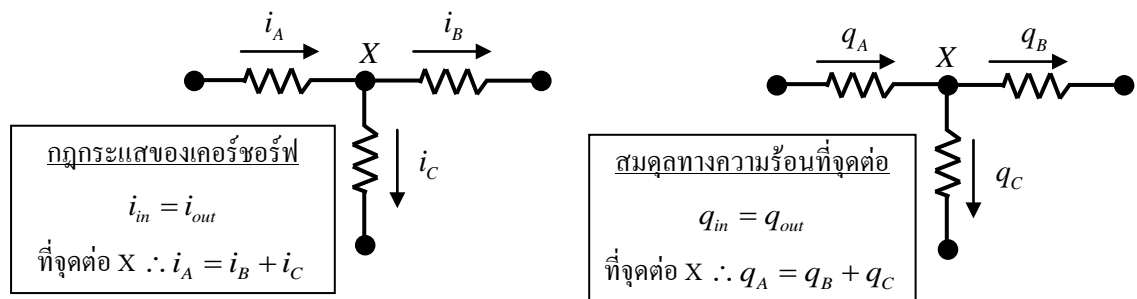
$$q_3 = \frac{(\sigma T_3^4 - q_N'')}{R_3 + R_{III}} \quad (4.10)$$

ส่วนค่าฟลักซ์ที่จุดต่อ N ( $q_N''$ ) สามารถหาได้โดยใช้กฎกระแสของเคอร์ชอร์ฟ (Kirchoff's Current Law: KCL) ที่กล่าวไว้ว่ากระแสที่เข้าและออกจากจากจุดใดๆ ย่อมเท่ากัน ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับวงจรทางความร้อนได้เช่นเดียวกันดังรูปที่ 4.7 และสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.11 และ 4.12

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

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

จากสมการที่ 4.12 นี้สามารถหาฟลักซ์ที่จุดต่อ N ได้ เมื่อทราบถึงสมบัติของพื้นผิวต่างๆ ที่ปิดล้อมและอุณหภูมิของพื้นผิวต่างๆ และเมื่อได้ฟลักซ์ที่จุดต่อ N แทนไปในสมการที่ 4.9 และ 4.10 จะสามารถคำนวณหาปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวที่ 2 และ 3 ( $q_2$  และ  $q_3$ ) ได้



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบกฎกระแสของเคอร์ชอร์ฟและสมดุลทางความร้อนที่จุดต่อ [4]

#### 4.5 แบบจำลองความร้อนระหว่างกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก

สำหรับแบบจำลองความร้อนที่กระบวนการนี้เกิดขึ้นเมื่อภายในเข้รับน้ำเหล็กมีน้ำเหล็กอยู่เต็มถึง ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมที่ 1 และ 2 จะพบว่า พื้นผิวบริเวณนี้จะถูกน้ำเหล็กถ่ายเทความร้อนเข้ามา เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงกว่าผิวถังบริเวณด้านข้างและบริเวณก้น แต่ในเวลา

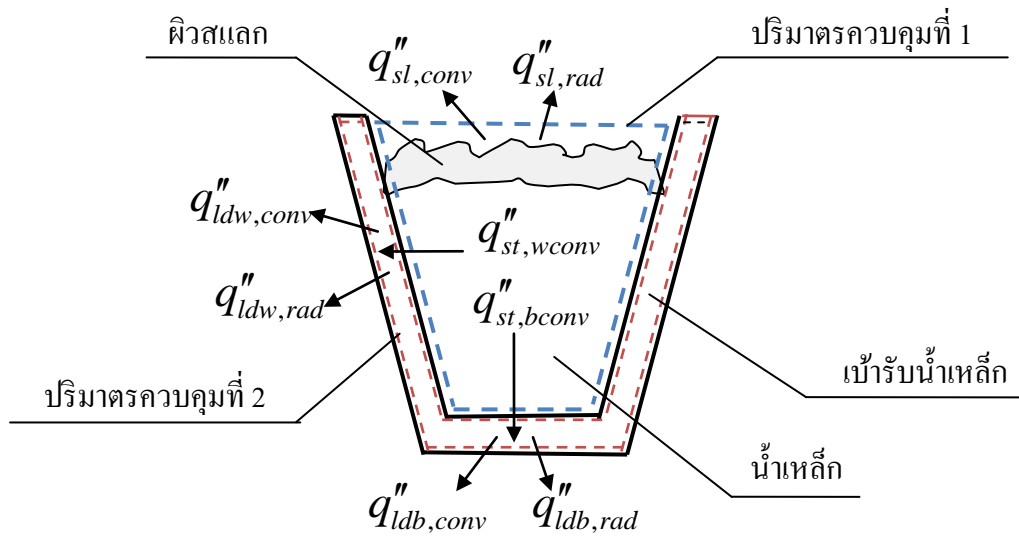


เดียวกันเมื่อพิจารณาที่น้ำเหล็กน้ำเหล็กที่สูญเสียความร้อนให้แก่เบ้ารับน้ำเหล็กจะมีอุณหภูมิลดลง จะเห็นได้ว่าที่แบบจำลองในกระบวนการนี้ อุณหภูมิของน้ำเหล็กจะต้องสัมพันธ์กับอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดเวลา

สำหรับกระบวนการนี้มีความสำคัญต่อการทำงานของเรานี้ เนื่องจากเราต้องการทำนายอุณหภูมิ น้ำเหล็กให้แม่นยำมากที่สุดเพื่อเพียงพอต่อการสูญเสียความร้อนที่กระบวนการอื่นๆ ต่อไป ดังนั้นการ ออกแบบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการนี้จะตั้งข้อสมมติ [4] ดังนี้

1. อุณหภูมิเทน้ำเหล็ก (Tapping Temperature) เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเหล็กที่อยู่ภายในเบ้ารับ น้ำเหล็ก
2. อุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการขนถ่ายมีความสม่ำเสมอทั่วทั้งปริมาณน้ำ เหล็ก
3. ผิวของผนังและก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำเหล็กระหว่างการขนถ่าย ตลอด
4. การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนออกจากน้ำเหล็กจะต้องผ่านผิวสแลกที่ปกคลุม เหนือน้ำเหล็กซึ่งผิวสแลกมีอุณหภูมิที่แตกต่างจากอุณหภูมิน้ำเหล็ก

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะสามารถจำลองรูปได้ดังรูปที่ 4.8 และพบว่า การถ่ายเทความร้อนจะ เกิดขึ้นระหว่างเบ้ารับน้ำเหล็กและอุณหภูมิน้ำเหล็กดังนั้นจึงแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนเพื่อให้ง่ายต่อ ความเข้าใจ



รูปที่ 4.8 ปริมาตรควบคุมในการออกแบบแบบจำลองและการถ่ายเทความร้อนระหว่างการขนถ่ายน้ำเหล็ก [4]

#### 4.5.1 ส่วนปริมาตรควบคุมที่ 1 (ส่วนน้ำเหล็ก)

จากสมดุลพลังงานของน้ำเหล็ก จะพบว่าน้ำเหล็กสูญเสียพลังงานให้กับเบ้ารับน้ำเหล็ก และสูญเสียพลังงานผ่านชั้นสแลก ซึ่งแสดงด้วยสมการที่ 4.13

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

โดยที่  $m_{st}$  คือมวลของน้ำเหล็ก (kg)

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

$\Delta T_{st}$  คือผลต่างของอุณหภูมิน้ำเหล็กในแต่ละสถานะ (K)

$q''_{st,bconv}$  คือฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กด้วยการพาความร้อนจากน้ำ เหล็กไปยังก้นภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ( $w/m^2$ )

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

$q''_{st,wconv}$  คือฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กด้วยการพาความร้อนจากน้ำ เหล็กไปยังผิวข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก ( $w/m^2$ )

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

$q''_{sl,conv}$  คือฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กผ่านทางผิวสแลกด้วยการพาความร้อนจากสแลก ( $w/m^2$ )

$q''_{sl,rad}$  คือฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทออกจากน้ำเหล็กผ่านทางผิวสแลกด้วยการแผ่รังสีความร้อนจากสแลก ( $w/m^2$ )

$A_{sl}$  คือพื้นที่ผิวสแลก ( $w/m^2$ )

จากสมการที่ 4.13 จะสามารถหา  $q''_{st,bconv}$  ,  $q''_{st,wconv}$  ,  $q''_{sl,conv}$  ,  $q''_{sl,rad}$  ได้เมื่อทราบอุณหภูมิของผนังข้าง, อุณหภูมิแก่น, อุณหภูมิของผิวสแลก ตามลำดับ จากฟลักซ์ความร้อนต่างๆ สามารถหาอุณหภูมิของน้ำเหล็กตามสมการที่ 4.13 ได้

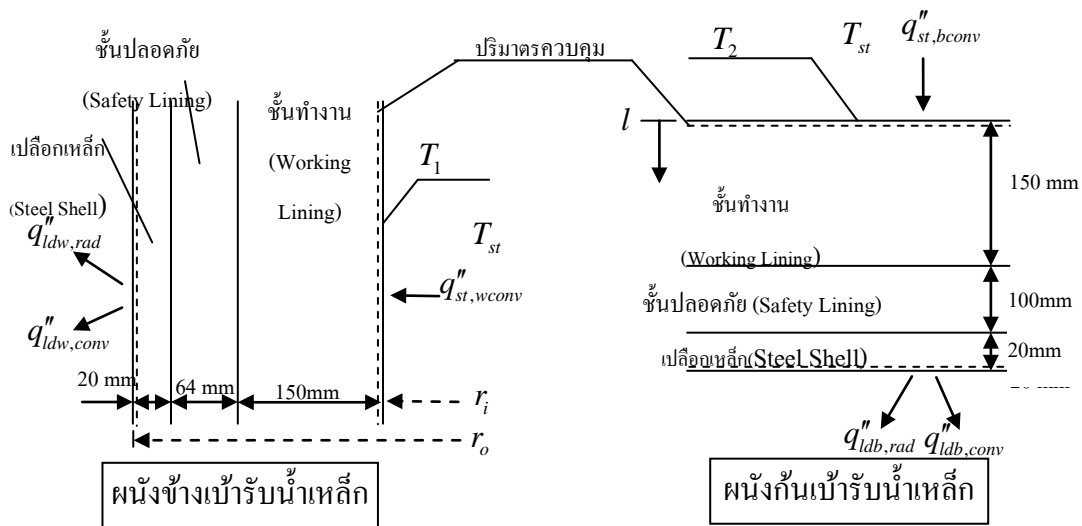
#### 4.5.2 ส่วนปริมาตรควบคุมที่ 2 (ส่วนของถังน้ำเหล็ก)

ส่วนปริมาตรควบคุมที่ 2 จะพบว่ามีส่วนปริมาตรควบคุมย่อยอีก 2 ปริมาตรควบคุมตามที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.3 ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ปริมาตรควบคุมนี้จะเป็นการพาความร้อนจากน้ำเหล็กเข้าสู่ปริมาตรควบคุมที่สนใจ โดยที่แสดงได้ดังสมการ 4.14

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

โดยที่  $i$  แทนปริมาตรควบคุมตามหัวข้อที่ 4.3 (1 แทนผนังข้าง และ 2 แทนแก่นเบ้ารับน้ำเหล็ก)

$h_{st-ld}$  แทนสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากน้ำเหล็กเข้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก ( $w/m^2$ )

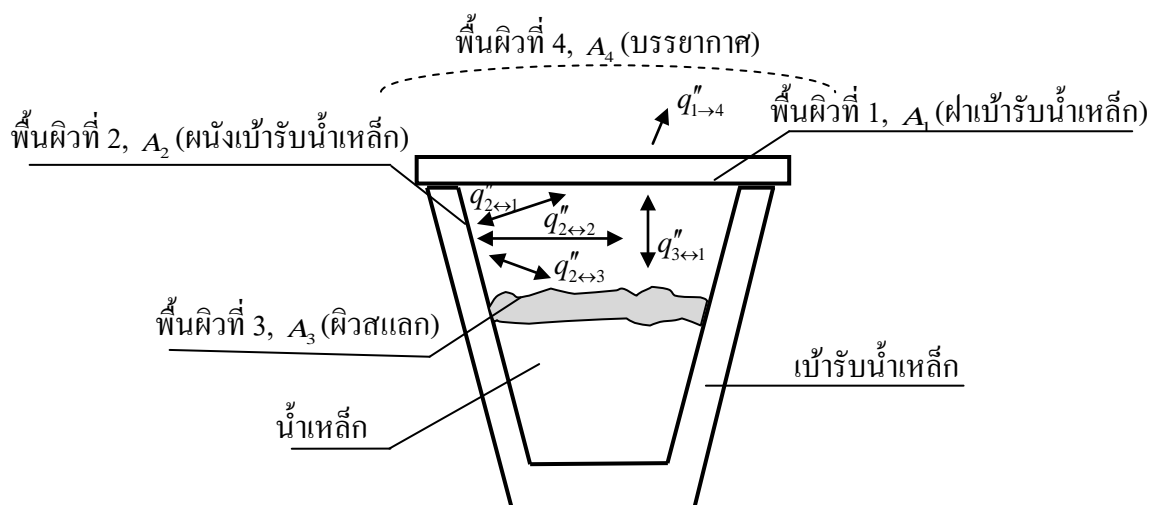


รูปที่ 4.9 การถ่ายเทความร้อนผ่านปริมาตรควบคุมในผนังข้างและผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็ก [4]

#### 4.6 แบบจำลองทางความร้อนระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก

แบบจำลองในกระบวนการนี้จะมีรูปแบบที่ใกล้เคียงกับรูปแบบการจำลองในหัวข้อที่ 4.5 แต่จะแตกต่างจากในหัวข้อที่ 4.5 เนื่องจากที่กระบวนการนี้เป็นการถ่ายน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก (Tundish) ไม่เพียงทำให้มวลน้ำเหล็กในหัวข้อที่ 4.5 มีปริมาณลดลงแล้วยังทำให้ความสูงของน้ำเหล็กลดน้อยลงเรื่อยๆ ซึ่งส่งผลต่อพื้นที่ของผิวสแลกที่ปกคลุมที่หน้าเบ้ารับน้ำเหล็กลดลง เมื่อพื้นที่ของผิวสแลกลดลงก็จะทำให้พื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนของสแลกลดลงเช่นกัน

นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กเข้าสู่เบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะเป็นการถ่ายเทความร้อนภายในผิวปิดที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับหัวข้อที่ 4.4 แต่จะมีข้อแตกต่างจะอยู่ที่พื้นผิวที่ 3 ในหัวข้อที่ 4.4 ที่เดิมเป็นพื้นผิวบริเวณกันเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่สำหรับแบบจำลองในช่วงนี้จะเปลี่ยนเป็นพื้นผิวสแลก นอกจากนี้ในการปฏิบัติงานจริงนั้นทางโรงงานได้มีฝาปิดเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อเป็นการลดการถ่ายเทความร้อนระหว่างการถ่ายน้ำเหล็ก ดังนั้นแบบจำลองที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้จึงมีความซับซ้อนมากกว่าหัวข้อที่ 4.4 ดังรูปที่ 4.10 ที่มีการถ่ายเทความร้อนในผิวปิด โดยที่ผิวที่ 1 จะกลายเป็นเกราะกำบังรังสี



รูปที่ 4.10 ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเก็บน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเทน้ำเหล็กจากเก็บน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กที่มีฝาปิดระหว่างกระบวนการ [4]

สำหรับการออกแบบแบบจำลองในกระบวนการนี้จะอยู่บนสมมติฐาน[4] ดังนี้

1. อุณหภูมิน้ำเหล็กภายในเก็บน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการมีความสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งปริมาตรน้ำเหล็ก
2. ผิวของผนังข้างและผนังก้นภายในเก็บน้ำเหล็กซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสกับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการเกิดการพาความร้อนจากน้ำเหล็กเข้าสู่เก็บน้ำเหล็ก
3. การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนออกจากน้ำเหล็กจะต้องผ่านฉนวนแตกที่ปกคลุมเหนือน้ำเหล็กซึ่งฉนวนแตกมีอุณหภูมิที่แตกต่างจากอุณหภูมิน้ำเหล็ก
4. พื้นผิวในพื้นที่ปิดล้อมดังรูปที่ 4.10 แต่ละพื้นผิวมีอุณหภูมิสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว
5. พื้นผิวในพื้นที่ปิดล้อมดังรูปที่ 4.10 ทั้ง 3 พื้นผิวมีการประพฤติตัวเป็นวัตถุเทา
6. พื้นผิวที่ 1 ในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นฝาเก็บน้ำเหล็กมีลักษณะเป็นดั่งเกราะกำบังรังสี ที่มีค่า Emissivity ในแต่ละด้านของพื้นผิวไม่เท่ากัน
7. พื้นผิวที่ 4 ในรูปที่ 4.10 ซึ่งเป็นบรรยากาศโดยรอบประพฤติตัวเป็นวัตถุดำที่อุณหภูมิบรรยากาศ

จากรูปที่ 4.10 เราจะมีเงื่อนไขในการพิจารณาเป็นสองช่วงเวลา คือช่วงเวลาที่มิอุณหภูมิต่ำกว่าจุดกึ่งกลางผนังด้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก และ ช่วงเวลาที่มิอุณหภูมิต่ำกว่าจุดกึ่งกลางผนังด้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็ก

ในการจำแนกระดับความสูงของน้ำเหล็กนั้นจะใช้เวลาร้อยละ 50 แรกของเวลาในการเทน้ำเหล็กทั้งหมดเป็นช่วงเวลาที่ระดับน้ำเหล็กมีระดับที่สูงกว่าจุดกึ่งกลางผนังด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก และเวลาอีกร้อยละ 50 ที่เหลือเป็นช่วงเวลาที่ระดับน้ำเหล็กมีระดับต่ำกว่าจุดกึ่งกลางถึง ซึ่งระยะเวลาดังกล่าวเป็นตัวกำหนดปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้า – ออก ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 4.15, 4.16, 4.17 และ 4.18

$$q''_{in,w} = h_{st-lt} (T_w(x) - T_{st}) \quad , x = r_i \quad , t \leq 0.5t_{teem} \quad (4.15)$$

$$q''_{in,b} = h_{st-lt} (T_b(l) - T_{st}) \quad , l = 0 \quad , t \leq 0.5t_{teem} \quad (4.16)$$

$$q''_{out,w} = q_2 \quad , x = r_i \quad , t > 0.5t_{teem} \quad (4.17)$$

$$q''_{in,b} = h_{st-lt} (T_b(l) - T_{st}) \quad , l = 0 \quad , t > 0.5t_{teem} \quad (4.18)$$

เมื่อ  $t_{teem}$  คือเวลาที่ใช้ในการเทน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก (นาที)

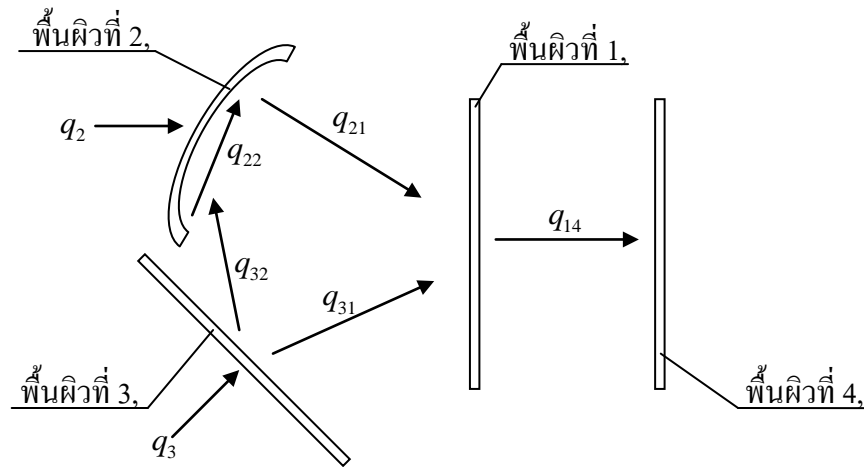
แต่สำหรับการหาอุณหภูมิน้ำเหล็กก็สามารถทำได้ดังสมการที่ 4.13 แต่ลักษณะการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นจะเกิดภายในผิวปิด ดังรูปที่ 4.11 โดยที่พื้นผิวที่ 1 คือปากเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีเกราะบังรังสีปิด ผิวที่ 2 คือผิวด้านข้างภายในของเบ้ารับน้ำเหล็ก ผิวที่ 3 คือผิวสแลก และสุดท้ายผิวที่ 4 คือบรรยากาศภายนอก

จากสมการ 3.27 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับรูปที่ 4.11 สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{E_{b,1} - q''_{o,l1}}{1 - \varepsilon_{1i} / \varepsilon_{1i} A_1} = \frac{q''_{o,l1} - q''_{o,l1}}{1/F_{1i \rightarrow 1i} A_1} + \frac{q''_{o,l1} - q''_{o,2}}{1/F_{1i \rightarrow 2} A_1} + \frac{q''_{o,l1} - q''_{o,3}}{1/F_{1i \rightarrow 3} A_1} \quad (4.19)$$

$$\frac{E_{b,2} - q''_{o,2}}{1 - \varepsilon_2 / \varepsilon_2 A_2} = \frac{q''_{o,2} - q''_{o,l1}}{1/F_{2 \rightarrow 1i} A_2} + \frac{q''_{o,2} - q''_{o,2}}{1/F_{2 \rightarrow 2} A_2} + \frac{q''_{o,2} - q''_{o,3}}{1/F_{2 \rightarrow 3} A_2} \quad (4.20)$$

$$\frac{E_{b,3} - q_{o,3}''}{1 - \varepsilon_3 / \varepsilon_3 A_3} = \frac{q_{o,3}'' - q_{o,l1}''}{1 / F_{3 \rightarrow 1i} A_3} + \frac{q_{o,3}'' - q_{o,2}''}{1 / F_{3 \rightarrow 2} A_3} + \frac{q_{o,3}'' - q_{o,3}''}{1 / F_{3 \rightarrow 3} A_3} \quad (4.21)$$



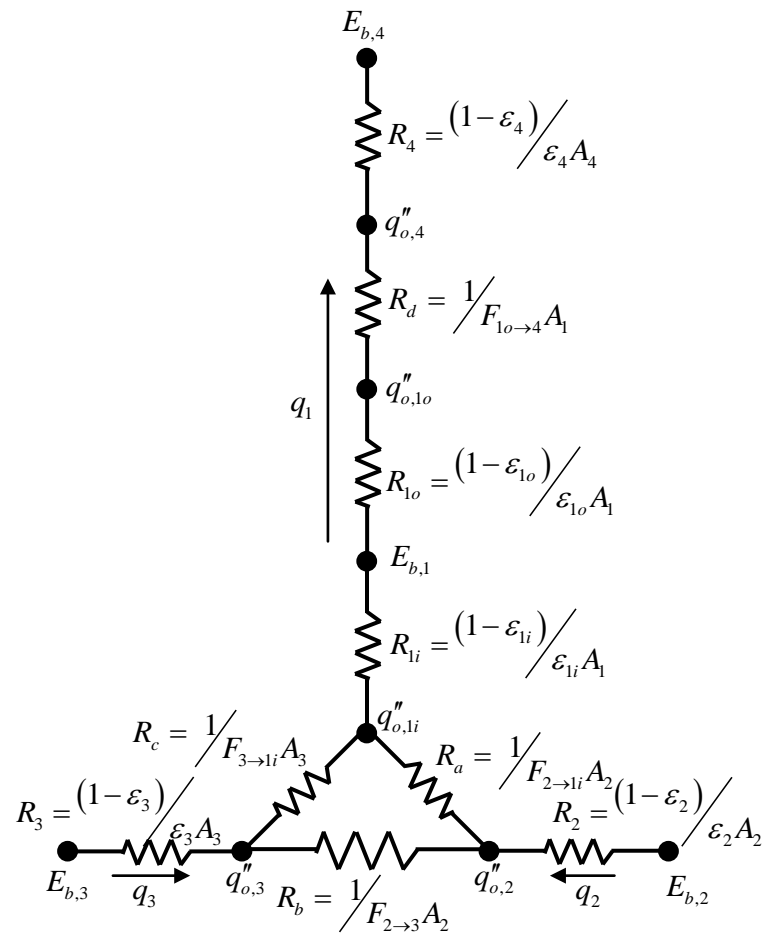
รูปที่ 4.11 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนจากการแผ่รังสีความร้อนอย่างง่ายภายในกระบวนการเหนี่ยวนำเหล็กจากเข้รับน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก [4]

สำหรับผิวที่ 1 ที่หันออกมาด้านนอกเข้รับน้ำเหล็กจะมีการถ่ายเทความร้อนไปสู่บรรยากาศเพียงอย่างเดียว และสามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\frac{(E_{b,1} - q_{o,1o}'')}{(1 - \varepsilon_{1o}) / \varepsilon_{1o} A_1} = \frac{(q_{o,4}'' - E_{b,4})}{(1 - \varepsilon_4) / \varepsilon_4 A_4} = \frac{(q_{o,1o}'' - q_{o,4}'')}{1 / F_{1o \rightarrow 4} A_1} \quad (4.22)$$

เมื่อ  $li$  หมายถึงผิวที่ 1 ด้านที่หันเข้าสู่ภายในเข้รับน้ำเหล็ก และ  $lo$  หมายถึงผิวที่ 1 ด้านที่หันออกสู่ภายนอกเข้รับน้ำเหล็ก

จากสมการที่ 4.19, 4.20, 4.21 และ 4.22 สามารถเขียนวงจรทางความร้อนดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 วงจรต้านทานความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนในกระบวนการเหนี่ยวนำความร้อนที่  
รับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก [4]

จากรูปที่ 4.12 เราสามารถแปลงวงจรทางความร้อนในรูปแบบเซลล์เป็นแบบวาร์ยได้ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.5

#### 4.7 แบบจำลองทางความร้อนระหว่างการนำน้ำเหล็กไปเททิ้ง

สำหรับแบบจำลองในกระบวนการนี้จะมีลักษณะใกล้เคียงกับกระบวนการในหัวข้อที่ 4.5 แต่ในกระบวนการนี้จะมีน้ำเหล็กอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กเล็กน้อย ทำให้การถ่ายเทความร้อนเกิดจากกระบวนการแผ่รังสีความร้อนในฉนวน โดยสามารถแบ่งพื้นผิวที่พิจารณาเป็น 3 พื้นผิว ได้แก่ พื้นผิวที่



1 คือปากเข้ารับน้ำเหล็ก พื้นผิวที่ 2 คือบริเวณผิวด้านข้างเข้ารับน้ำเหล็ก และพื้นผิวที่ 3 คือบริเวณผิวสแลกที่ปกคลุมบนน้ำเหล็กที่พิจารณา ลักษณะการถ่ายเทความร้อนจะเป็นไปตามสมการที่ 4.6, 4.7 และ 4.8 ส่วนทางด้านของน้ำเหล็กจะมีการสูญเสียความร้อนที่เป็นไปตามสมการที่ 4.13

#### 4.8 การออกแบบตัวประมาณค่าสถานะ (State Observer Design)

##### 4.8.1 การเขียนระบบในรูปปริภูมิสแตต (State-Space)

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.4 การออกแบบตัวประมาณค่าสถานะจำเป็นต้องเขียนระบบอยู่ในรูปปริภูมิสแตต ดังนั้นต้องเขียนระบบที่สนใจให้อยู่ในรูปปริภูมิสแตตให้ได้ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เราสนใจสถานะทางความร้อนของเข้ารับน้ำเหล็กเพื่อนำไปทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่สามารถทำได้ ดังนั้นระบบจึงเกี่ยวข้องกับผนังเข้ารับน้ำเหล็ก

หากพิจารณาปริมาณความร้อนที่เข้าและออกเข้ารับน้ำเหล็กพบว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนที่เข้าและออกเข้ารับน้ำเหล็ก บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนมากที่สุดคือบริเวณส่วนที่ติดกับน้ำเหล็กหรือก็คือผนังด้านในของเข้ารับน้ำเหล็ก ดังตัวอย่างเช่นเมื่อมีการรับถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กเข้ามาเข้ารับน้ำเหล็กส่วนบริเวณใกล้น้ำเหล็กจะมีอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากนั้นความร้อนจากส่วนนี้ก็จะถูกถ่ายเทไปสู่บริเวณด้านในของเนื้ออิฐทนไฟที่ประกอบขึ้นเป็นผนังเข้ารับน้ำเหล็กเมื่อเวลามากขึ้น ในทางตรงข้ามเมื่อมีการถ่ายเทความร้อนจากผนังออกสู่บรรยากาศส่วนผนังเข้ารับน้ำเหล็กที่ภายใน(ส่วนที่สัมผัสกับน้ำเหล็ก) ก็จะมีอุณหภูมิลดลงก่อนบริเวณอื่นๆ และความร้อนก็จะถูกถ่ายเทจากผนังด้านในออกมาเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังนั้นอิฐทนไฟที่บริเวณภายใน (บริเวณที่อยู่ติดกับน้ำเหล็ก) จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากที่สุด

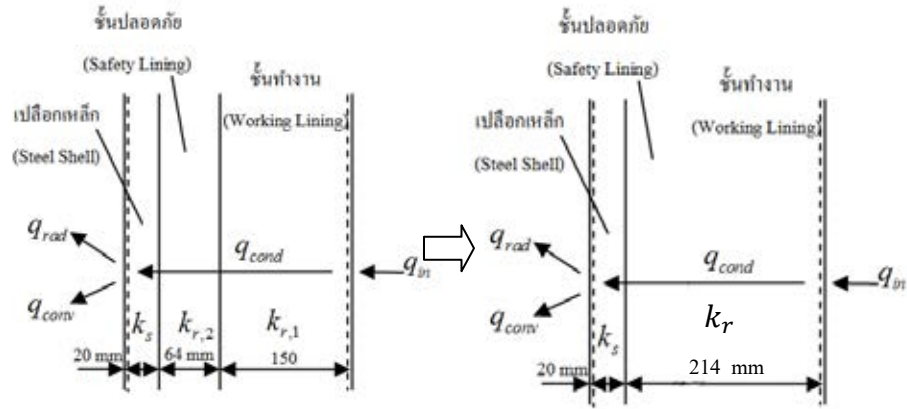
นอกจากนี้จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.4 พบว่าการแบ่งผนังก้อนใหญ่ให้มีจำนวนก้อนย่อยที่มากขึ้นจะส่งผลให้เห็นการแจกแจงอุณหภูมิภายในเข้ารับน้ำเหล็กดีขึ้น ดังนั้นบริเวณที่อิฐทนไฟด้านใน (บริเวณที่อยู่ติดกับน้ำเหล็ก) จะแบ่งให้ก้อนย่อยเหล่านั้นมีขนาดเล็กเพื่อให้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่รวดเร็ว

นอกจากนี้เงื่อนไขสำหรับการทำตัวสังเกตคือ  $rank[obsevability] = n$  ดังนั้นในการแบ่งจำนวนก้อนย่อยทั้งหมดต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องทำตัวสังเกตได้ เพื่อนำข้อมูลจากการวัดเข้ามาประมวลข้อมูลที่สแตตอื่นๆ

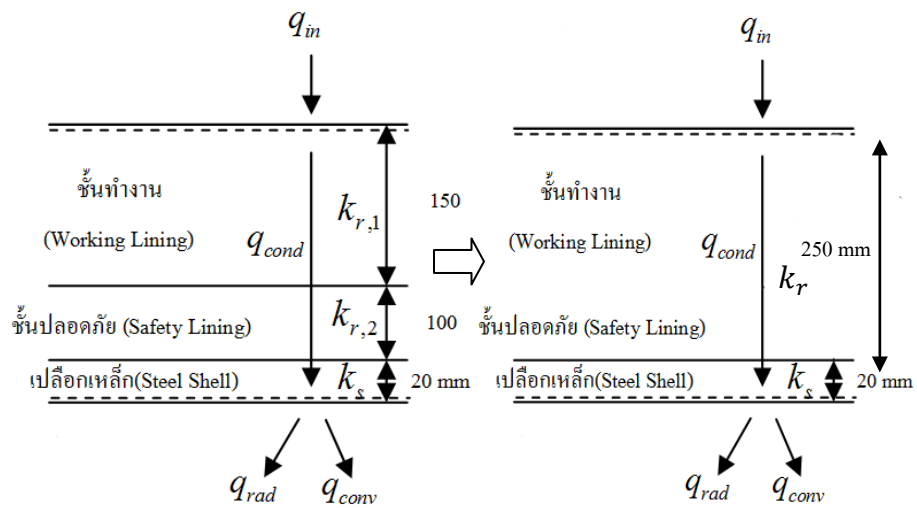
เมื่อพิจารณาผนังของเบ้ารับเหล็กที่บริเวณผนังด้านข้าง(ปริมาตรควบคุมที่ 1) ดังรูปที่ 4.13 เบ้ารับน้ำเหล็กจะมีความความหนาทั้งหมด 0.214 เมตร (ไม่รวมชั้นเปลือกเหล็ก) ส่วนบริเวณก้นเบ้ารับน้ำเหล็ก (ปริมาตรควบคุมที่ 2) ดังรูปที่ 4.14 จะมีความหนาทั้งหมด 0.25 เมตร การแบ่งผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นก้อนย่อยๆ จะตั้งอยู่บนสมมติฐานดังนี้

1. สมมติให้ชั้นทำงานและชั้นปลอดภัยต่อกัน โดยไม่มีความต้านทานทางความร้อนและมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนเท่ากัน โดยเปรียบเสมือนเป็นอิฐก้อนเดียวกันที่ยาวทั้งหมด 0.214 เมตร และ 0.25 เมตร ที่ปริมาตรควบคุมที่ 1 และ 2 ตามลำดับ
2. ที่อุณหภูมิของอิฐทนไฟที่ติดกับชั้นเปลือกเหล็กให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของเปลือกเหล็กเนื่องจากชั้นเปลือกเหล็กมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูง

จากการทดลองแบ่งช่วงความยาวของก้อนย่อยโดยมีเงื่อนไขที่ต้องการดังนี้ ให้หลังจากการแบ่งแล้วสามารถสังเกต(Observer)ได้, จุดที่วัดคือตำแหน่ง 20, 50 มิลลิเมตร อยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของก้อนย่อยก้อนใดก็ได้เพื่อใช้ในการตรวจสอบว่าการทำนายในตรงกับของจริง, ตำแหน่งของผนังอิฐบริเวณด้านที่อยู่ใกล้กับน้ำเหล็ก (ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก) ต้องแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนอย่างชัดเจน และก้อนย่อยก้อนที่ 1 ในแต่ละปริมาตรควบคุมต้องเป็นไปตาม  $B_i < 0.1$  เนื่องจากการนำความร้อนและพาความร้อนพร้อมกัน จากเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อข้างต้นสามารถแบ่งความหนาก้อนย่อยได้ดังตารางที่ 4.2 และสามารถแบ่งผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผิวข้างแลกกันได้ดังรูปที่ 4.14



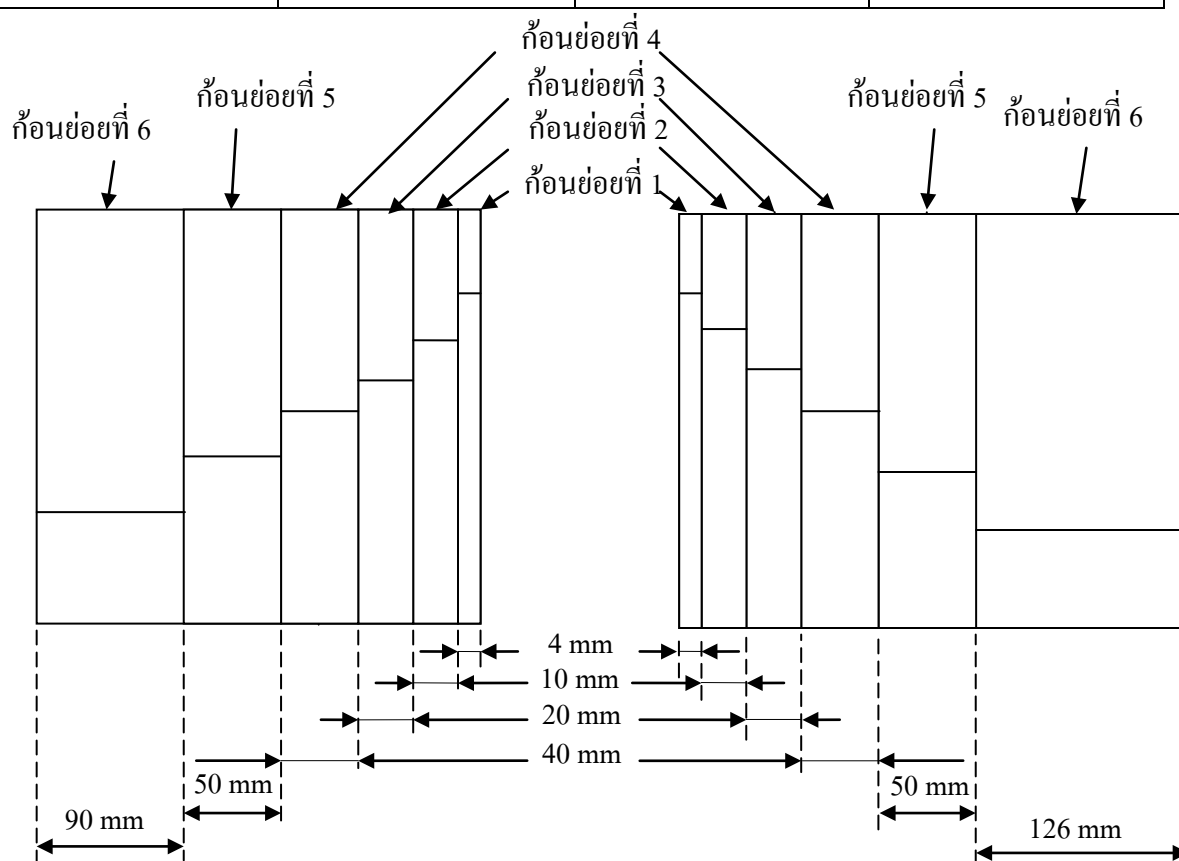
รูปที่ 4.13 สมมติฐานของผนังด้านข้างเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อสมมติให้ชั้นปลอดภัยและชั้นทำงานไม่มีความต้านทานทางความร้อนโดยคิดเป็นอิฐก้อนเดียวกันทั้งหมด



รูปที่ 4.14 สมมติฐานของผนังกันเบ้ารับน้ำเหล็กเมื่อสมมติให้ชั้นปลอดภัยและชั้นทำงานไม่มีความต้านทานทางความร้อนโดยคิดเป็นอิฐก้อนเดียวกันทั้งหมด

ตารางที่ 4.2 ความหนาของก้อนย่อยที่แบ่งเพื่อเขียนระบบให้อยู่ในรูปปริภูมิสเตต

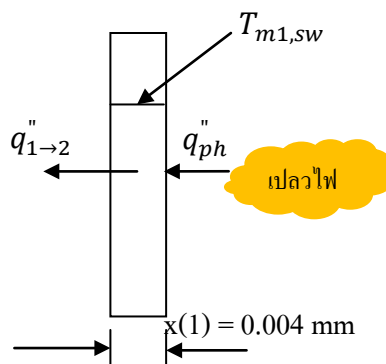
พื้นที่ผิวด้านข้าง (ปริมาตรควบคุมที่ 1)		พื้นที่ผิวก้น (ปริมาตรควบคุมที่ 2)	
ก้อนย่อยที่	ขนาด(มิลลิเมตร)	ก้อนย่อยที่	ขนาด(มิลลิเมตร)
1	4	1	4
2	10	2	10
3	20	3	20
4	40	4	40
5	50	5	50
6	90	6	126
รวม	214	รวม	250



รูปที่ 4.15 ความกว้างของก้อนย่อยเมื่อ (ซ้าย) ผนังด้านข้าง (ขวา) ผนังก้น

การแบ่งก้อนย่อยให้เป็นลักษณะดังกล่าวจำเป็นต้องตรวจสอบให้ผลการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ถูกต้อง โดยทั้งนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เขียนขึ้นนั้นได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองของซัฟฟัส

จากการแบ่งก้อนย่อยต่างๆ ตามตารางที่ 4.2 และตามรูปที่ 4.15 เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานในช่วงของการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก (ตามหัวข้อที่ 4.3) ของอิฐย่อยก้อนที่ 1 ของปริมาตรควบคุมที่ 1 ดังรูปที่ 4.16 จะมีความร้อนจากการเผาไหม้เข้าสู่ก้อนย่อยก้อนที่ 1 และจะมีการถ่ายเทความร้อนจากก้อนย่อยที่ 1 ไปสู่ก้อนย่อยที่ 2 โดยที่จะแสดงได้ดังสมการที่ 4.23



รูปที่ 4.16 ฟลักซ์ความร้อนที่เข้า – ออก ก้อนย่อยก้อนที่ 1 ที่ผิวด้านข้าง (ปริมาตรควบคุมที่ 1)

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

- เมื่อ  $\rho_{re}$  คือความหนาแน่นของอิฐทนไฟ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 $c_{p,re}$  คือความจุความร้อนของอิฐทนไฟ ( $\text{J}/\text{kgK}$ )  
 $x(i)$  คือความหนาของก้อนย่อยแต่ละก้อน (m)  
 $T_{mi,sw}$  คืออุณหภูมิภายในก้อนย่อยแต่ละก้อน (K) ของปริมาตรควบคุมที่ 1  
 $q''_{1-2}$  คือฟลักซ์ความร้อนที่ถ่ายเทจากก้อนย่อยที่ 1 ไป 2 โดยการนำความร้อน

เมื่อแทนสมการที่ 3.1 และ 4.1 ลงไปในสมการที่ 4.23 จะได้

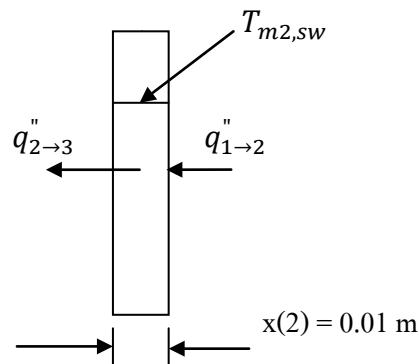
$$\rho_{re} c_{p,re} x(1) \frac{dT_{m1,sw}}{dt} = F\sigma(T_{fl}^4 - T_{m1,sw}^4) - k_{re} \frac{T_{m1,sw} - T_{m2,sw}}{x(1) + x(2)/2} \quad (4.24)$$

เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานของก้อนย่อยที่ 2 ตามรูปที่ 4.17 ที่ก้อนย่อยที่ 2 จะมีการถ่ายเทความร้อนจากก้อนย่อยที่ 1 เข้ามา และถ่ายเทไปให้ก้อนย่อยที่ 3 ด้วยการถ่ายเทความร้อนในลักษณะการนำความร้อน และจะแสดงได้ดังสมการที่ 4.25

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

เมื่อแทนสมการที่ 3.1 ลงไปในสมการที่ 4.25 จะได้สมการที่ 4.26

$$\rho_{re} c_{p,re} x(2) \frac{dT_{m2,sw}}{dt} = k_{re} \frac{T_{m1,sw} - T_{m2,sw}}{x(1) + x(2)/2} - k_{re} \frac{T_{m2,sw} - T_{m3,sw}}{x(2)/2 + x(3)/2} \quad (4.26)$$



รูปที่ 4.17 ฟลักซ์ความร้อนที่เข้า – ออก ก้อนย่อยที่ 2 ที่ผิวด้านข้าง (ปริมาตรควบคุมที่ 1)

เมื่อพิจารณาสมดุลพลังงานที่ก้อนย่อยที่ 3 จะพบว่าความร้อนที่เข้าสู่ก้อนย่อยที่ 3 นั้นจะเกิดจากการนำความร้อนจากก้อนย่อยที่ 2 เข้าสู่ก้อนย่อยที่ 3 และความร้อนที่ออกจากก้อนย่อยที่ 3 จะเกิดจากการนำความร้อนจากก้อนย่อยที่ 3 สู่ก้อนย่อยที่ 4 ในทำนองเดียวกันหากพิจารณาสมดุลพลังงานที่ก้อนย่อยที่ 4 และ 5 จะพบว่ามีความสัมพันธ์กับก้อนย่อยที่ 3 ดังนั้นจึงเขียนสมการแสดงสมดุลพลังงานของก้อนย่อยที่ 3, 4 และ 5 ได้ดังสมการที่ 4.27, 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ

$$\rho_{re} c_{p,re} x(3) \frac{dT_{m3,sw}}{dt} = k_{re} \frac{T_{m2,sw} - T_{m3,sw}}{x(2)/2 + x(3)/2} - k_{re} \frac{T_{m3,sw} - T_{m4,sw}}{x(3)/2 + x(4)/2} \quad (4.27)$$

$$\rho_{re} c_{p,re} x(4) \frac{dT_{m4,sw}}{dt} = k_{re} \frac{T_{m3,sw} - T_{m4,sw}}{x(3)/2 + x(4)/2} - k_{re} \frac{T_{m4,sw} - T_{m5,sw}}{x(4)/2 + x(5)/2} \quad (4.28)$$

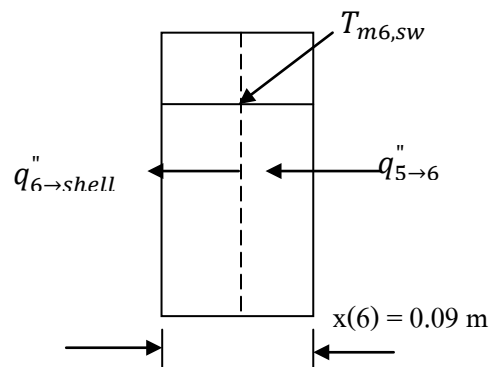
$$\rho_{re} c_{p,re} x(5) \frac{dT_{m5,sw}}{dt} = k_{re} \frac{T_{m4,sw} - T_{m5,sw}}{x(4)/2 + x(5)/2} - k_{re} \frac{T_{m5,sw} - T_{m6,sw}}{x(5)/2 + x(6)/2} \quad (4.29)$$

หากพิจารณาสมดุลพลังงานของก้อนย่อยที่ 6 ดังรูปที่ 4.18 พบว่าความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่ก้อนย่อยที่ 6 นั้นจะมาจากถ่ายเทความร้อนจากก้อนย่อยที่ 5 เข้าสู่ก้อนย่อยที่ 6 และความร้อนที่ถ่ายเทออกจากก้อนย่อยที่ 6 จะถูกถ่ายไปยังผิวเปลือกเหล็ก

ดังนั้นหากเขียนสมดุลพลังงานของก้อนย่อยก้อนที่ 6 จะสามารถเขียนได้ดังสมการที่

4.30

$$\rho_{re} c_{p,re} x(6) \frac{dT_{m6,sw}}{dt} = k_{re} \frac{T_{m5,sw} - T_{m6,sw}}{x(5)/2 + x(6)/2} - \left( \frac{k_{re}}{x(6)/2} \right) (T_{m6,sw} - T_s) \quad (4.30)$$



รูปที่ 4.18 ฟลักซ์ความร้อนที่เข้า – ออก ก้อนย่อยก้อนที่ 6 ที่ผิวด้านข้าง (ปริมาตรควบคุมที่ 1)

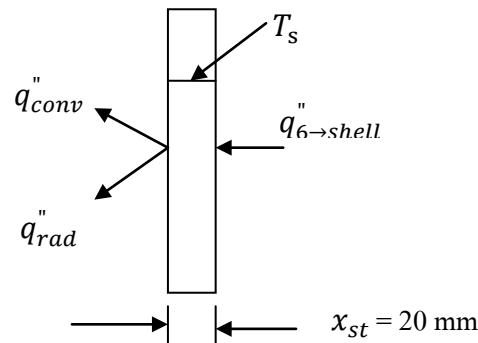
พิจารณาสมดุลพลังงานของชั้นเปลือกเหล็กตามรูปที่ 4.19 พบว่ามีความร้อนจากก้อนย่อยที่ 6 ถ่ายเทเข้าสู่เปลือกเหล็ก และถ่ายเทออกด้วยการพาความร้อนและแผ่รังสีความร้อนผ่านชั้นเปลือกเหล็กและสามารถเขียนเขียนสมดุลพลังงานได้ดังสมการที่ 4.31

$$\rho_{re} c_{p,re} x_{st} \frac{dT_s}{dt} = \left( \frac{k_{re}}{x(6)/2} \right) (T_{m6,sw} - T_s) - h(T_s - T_a) - \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4) \quad (4.31)$$

เมื่อ  $T_s$  คืออุณหภูมิผิวเปลือกเหล็ก (K)

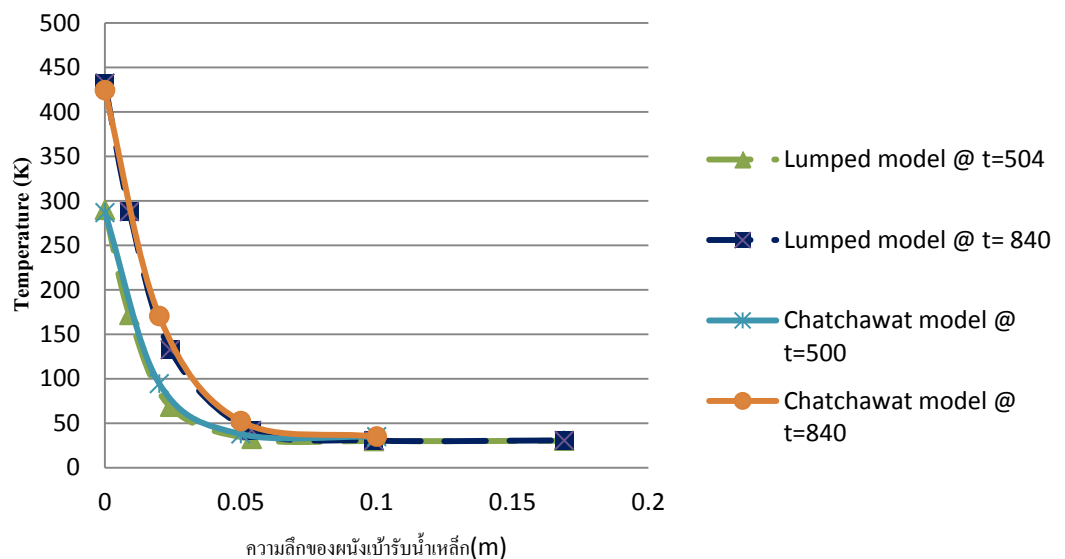
$T_a$  คืออุณหภูมิบรรยากาศ (K)

$x_{st}$  คือความหนาของชั้นเปลือกเหล็ก (m)



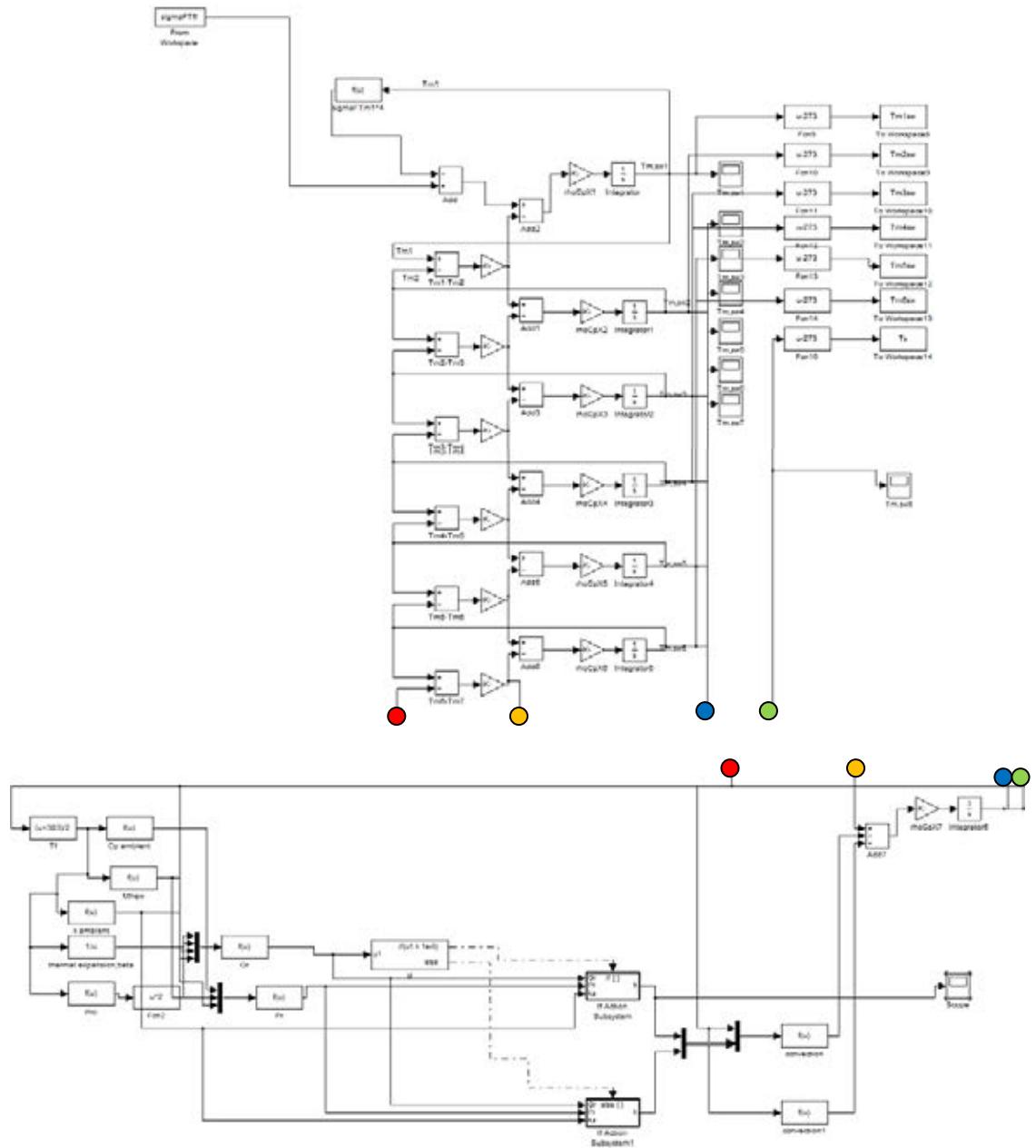
รูปที่ 4.19 พลักซ์ความร้อนที่เข้า – ออกผิวเปลือกเหล็กที่ผิวด้านข้าง

จากสมการดังกล่าวสามารถนำมาโดยใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK หาค่า  $T_{m1,sw}$   $T_{m2,sw}$   $T_{m3,sw}$   $T_{m4,sw}$   $T_{m5,sw}$   $T_{m6,sw}$   $T_s$  แล้วนำไปเปรียบเทียบการแจกแจงอุณหภูมิของอิฐทนไฟตามแบบจำลองของซัซวัตส์ พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยใช้วิธี Lumped Capacitance Model สามารถแทนแบบจำลองของซัซวัตส์ได้ ดังรูปที่ 4.20 จะสังเกตว่าที่เวลาเดียวกันแบบจำลองของซัซวัตส์และแบบจำลองโดยใช้วิธี Lumped Capacitance Model มีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่แบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถเขียนในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ได้ดังรูปที่ 4.21



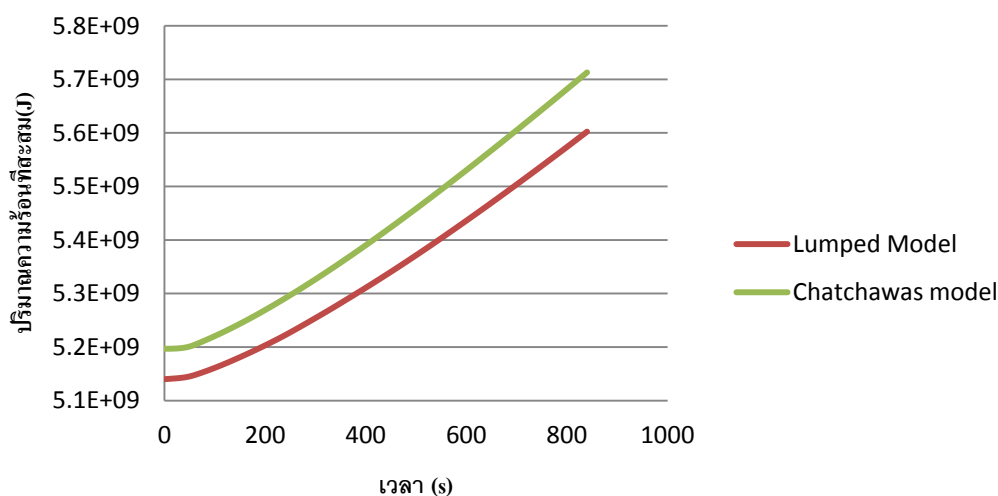
รูปที่ 4.20 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองในรูปแบบของ Lumped Capacitance Model กับแบบจำลองของซัซวัตส์ที่ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื้อง





รูปที่ 4.21 รูปแบบการเขียนวิธี Lumped Capacitance Model ในโปรแกรม MATLAB/ SIMULINK โดยจากรูปจุดสีเดียวกันแสดงรอยต่อของเส้น

นอกจากนี้จากการตรวจสอบความร้อนสะสมในเบ้ารับน้ำเหล็กหลังจากการเผาโดยใช้วิธี Lumped Capacitance Model เทียบกับผลการจำลองของซอฟต์แวร์พบว่ามีความใกล้เคียงกัน ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ผลการเปรียบเทียบพลังงานที่สะสมในเก็บรับน้ำเหล็ก ระหว่างแบบจำลองในรูปแบบของ Lumped Capacitance Model กับแบบจำลองของชัชวาศส์ที่ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

จะเห็นว่าในการจำลองระบบ โดยแบ่งเป็นก้อนย่อยออกเป็น 6 ก้อนย่อยจะสามารถแทนระบบที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นจึงให้แบบจำลองที่เขียนในลักษณะนี้พฤติกรรมเปรียบเสมือนเป็นระบบจริงที่เกิดขึ้น เป็นผลให้เปรียบเทียบว่าเราจะได้ข้อมูลในตำแหน่งบางตำแหน่งจากการวัดมาแล้ว เพื่อนำค่านั้นมาแทนในระบบประมาณค่าสถานะที่ออกแบบ

สำหรับการออกแบบตัวประมาณค่าสถานะนั้น ต้องเขียนแบบจำลองเหล่านี้ในรูปปริภูมิสแตตจำเป็นจะต้องปรับแก้สมการที่กล่าวมาข้างต้นบางสมการ เนื่องจากการเขียนอยู่ในรูปปริภูมิสแตตนั้น ระบบที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องเป็นเชิงเส้น แต่เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.24 จะพบว่าสมการที่เกิดขึ้นนั้นไม่เป็นเชิงเส้นแต่สามารถประมาณด้วยสมการเชิงเส้นตรงได้สำหรับช่วงการทำงานช่วงหนึ่ง เมื่อ  $x_0$  คือจุดทำงานปกติ โดยที่สามารถเขียนเขียนอนุกรมเทเลอร์ (Taylor's series) ได้ตามสมการที่ 4.32 เมื่อ  $y(t) = g(x(t))$

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

เนื่องจากพจน์ที่ 3, 4, 5, ... ของสมการที่ 4.32 มีค่าน้อยมากจึงละทิ้งได้ ดังนั้นจึงลดรูปได้เป็นสมการที่ 4.33

$$y = g(x) = g(x_0) + \frac{dg}{dx} \Big|_{x=x_0} (x - x_0) \quad (4.33)$$

จากสมการ 4.33 และจากการให้  $T_{m1,sw} = T_{m1,sw}^* + \Delta T_{m1,sw}$  เมื่อ  $T_{m1,sw}^*$  เป็นค่าคงที่ที่จุดทำงาน ทำให้สมการ 4.24 กลายเป็นสมการในรูปแบบ 4.34

$$\begin{aligned} \rho_{re} c_{p,re} x(1) \frac{d\Delta T_{m1,sw}}{dt} &= F\sigma(T_{fl}^4) \\ &- \left[ \left( F\sigma T_{m1,sw}^{*4} + \frac{k_{re}}{x(1) + x(2)/2} T_{m1,sw}^* \right) \right. \\ &+ \left. \left( F\sigma T_{m1,sw}^{*3} + \frac{k_{re}}{x(1) + x(2)/2} \right) \Delta T_{m1,sw} \right] \\ &+ \frac{k_{re}}{x(1) + x(2)/2} T_{m2,sw} \end{aligned} \quad (4.34)$$

นอกจากนี้ จะเห็นว่าสมการที่ 4.26 ยังไม่เป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกัน เนื่องจากมีพจน์ที่มีตัวแปร  $T_{m1,sw}$  จึงต้องทำให้เป็นเชิงเส้นด้วยสมการ 4.33 เช่นเดียวกัน ทำให้รูปแบบสมการเปลี่ยนเป็นสมการที่ 4.35

$$\begin{aligned} \rho_{re} c_{p,re} x(2) \frac{dT_{m2,sw}}{dt} &= \frac{k_{re}}{x(1) + x(2)/2} T_{m1,sw}^* + \frac{k_{re}}{x(1) + x(2)/2} \Delta T_{m1,sw} \\ &- \left( \frac{k_{re}}{x(1) + x(2)/2} + \frac{k_{re}}{x(2)/2 + x(3)/2} \right) T_{m2,sw} \\ &+ \frac{k_{re}}{x(2)/2 + x(3)/2} T_{m3,sw} \end{aligned} \quad (4.35)$$

เนื่องจากที่ชั้นเปลือกเหล็กจะมีการถ่ายเทความร้อนในรูปแบบการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งรูปแบบการแผ่รังสีความร้อนนั้นมีสมการไม่เป็นเชิงเส้นร่วมอยู่ด้วย ดังสมการที่ 4.31 ดังนั้นเพื่อลดความยุ่งยากซับซ้อนในการเปลี่ยนสมการในรูปแบบไม่เชิงเส้นเป็นสมการเชิงเส้นโดยใช้สมการที่ 4.33 จึงสมมติให้ชั้นเปลือกเหล็กมีอุณหภูมิเท่ากันทั้งหมดและอิฐทนไฟที่ติดอยู่กับเปลือกเหล็กจะมีอุณหภูมิเท่ากับชั้นเปลือกเหล็ก ทำให้รูปสมการที่เหลือสำหรับการนำไปจำลองระบบจะเป็นสมการที่ 4.24 - 4.30 เท่านั้น เมื่อมี  $T_s$  ที่ได้จากการวัดเป็นอินพุตให้แก่ระบบ และสามารถเขียนรูปสมการ 4.30 ใหม่ได้เป็น

$$\rho_{re} c_{p,re} x(6) \frac{dT_{m6,sw}}{dt} = \quad (4.36)$$

$$k_{re} \frac{T_{m5,sw} - T_{m6,sw}}{x(5)/2 + x(6)/2} - \left( \frac{k_{re}}{x(6)/2} + \frac{k_{st}}{x_{st}} \right) (T_{m6,sw} - T_s)$$

เมื่อ  $k_{st}$  คือสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของชั้นเปลือกเหล็ก ( $w/m^2k$ )

$x_{st}$  คือความหนาของชั้นเปลือกเหล็ก (m)

ดังนั้นถ้าเราจัดรูปสมการ 4.27, 4.28, 4.29, 4.34, 4.35 และ 4.36 ใหม่โดยเขียนอยู่ในรูปปริภูมิ

สแตต จะสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta T_{m1,sw} \\ T_{m2,sw} \\ T_{m3,sw} \\ T_{m4,sw} \\ T_{m5,sw} \\ T_{m6,sw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_{m1,sw} \\ T_{m2,sw} \\ T_{m3,sw} \\ T_{m4,sw} \\ T_{m5,sw} \\ T_{m6,sw} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} \\ B_{51} & B_{52} & B_{53} \\ B_{61} & B_{62} & B_{63} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{11} \\ U_{21} \\ U_{31} \\ U_{41} \\ U_{51} \\ U_{61} \end{bmatrix}$$

โดยที่  $A_{11} = -\left( F\sigma T_{m1,sw}^*{}^3 + \frac{k_{re}}{x(1)+x(2)/2} \right) / C_1$

$$A_{12} = \frac{k_{re}}{x(1)+x(2)/2} / C_1$$

$$A_{21} = \frac{k_{re}}{x(1)+x(2)/2} / C_2$$

$$A_{22} = -\left( \frac{k_{re}}{x(1)+x(2)/2} + \frac{k_{re}}{x(2)/2+x(3)/2} \right) / C_2$$

$$A_{23} = \frac{k_{re}}{x(2)/2+x(3)/2} / C_2$$

$$A_{32} = \frac{k_{re}}{x(2)/2+x(3)/2} / C_3$$

$$A_{33} = -\left( \frac{k_{re}}{x(2)/2+x(3)/2} + \frac{k_{re}}{x(3)/2+x(4)/2} \right) / C_3$$

$$A_{34} = \frac{k_{re}}{x(3)/2+x(4)/2} / C_3$$

$$A_{43} = \frac{k_{re}}{x(3)/2+x(4)/2} / C_4$$

$$A_{44} = -\left( \frac{k_{re}}{x(3)/2+x(4)/2} + \frac{k_{re}}{x(4)/2+x(5)/2} \right) / C_4$$

$$A_{45} = \frac{k_{re}}{x(4)/2+x(5)/2} / C_4$$

$$A_{54} = \frac{k_{re}}{x(4)/2+x(5)/2} / C_5$$

$$A_{55} = -\left( \frac{k_{re}}{x(4)/2+x(5)/2} + \frac{k_{re}}{x(5)/2+x(6)/2} \right) / C_5$$

$$A_{56} = \frac{k_{re}}{x(5)/2+x(6)/2} / C_5$$

$$A_{65} = \frac{k_{re}}{x(5)/2+x(6)/2} / C_6$$

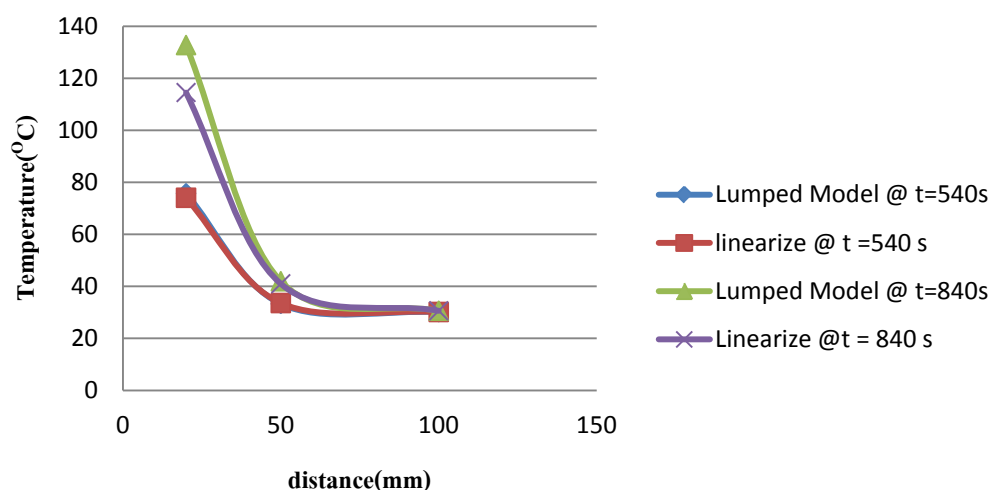
$$A_{66} = -\left( \frac{k_{re}}{x(5)/2+x(6)/2} + \frac{k_{re}}{x(6)/2} + \frac{k_{st}}{x_{st}} \right) / C_6$$

$$\begin{aligned} \text{และ } B_{11} &= 1/C_1 \\ B_{22} &= 1/C_2 \\ B_{63} &= 1/C_6 \\ \text{และ } U_{11} &= F\sigma(T_{fl}^4) - F\sigma T_{m1,sw}^*{}^4 - \frac{k_{re}}{x(1)+x(2)/2} T_{m1,sw}^* \\ U_{21} &= \frac{k_{re}}{x(1)+x(2)/2} T_{m1,sw}^* \\ U_{61} &= \left( \frac{k_{re}}{x(6)/2} + \frac{k_{st}}{x_{st}} \right) T_s \end{aligned}$$

เมื่อ  $C_i = \rho c_p x_i$  โดยที่  $i$  คือจำนวนก้อนย่อยที่แบ่งมีค่าเป็น 1, 2, 3, 4, 5 และ 6

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องหลังจากการทำระบบสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้กลายเป็นเชิงเส้นจะนำมาตรวจสอบกับการการใช้วิธีแบ่งเป็นก้อนย่อย โดยสมมติให้  $T_{m1,sw}^*$  มีค่า 400 K

จากรูปที่ 4.23 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้จากวิธีแบ่งก้อนย่อยและการทำเป็นเชิงเส้นของระบบ เมื่อเวลามากขึ้นพบว่าเมื่อเวลามากขึ้นระบบที่ได้จากการทำเป็นเชิงเส้นมีความผิดพลาดมากขึ้นเนื่องจาก เมื่อระบบจริงมีจุดทำงานอยู่ใกล้เคียงกับค่า  $T_{m1,sw}^*$  ที่ได้สมมติขึ้น ทำให้การทำเป็นเชิงเส้นมีความถูกต้อง แต่ในขณะเดียวกันเมื่อระบบจริงมีอุณหภูมิสูงขึ้นกว่าจุดทำงานที่ได้สมมติขึ้นทำให้การทำเป็นเชิงเส้นมีความผิดพลาดมากขึ้น ดังนั้นการปรับจุดทำงานใหม่ให้เหมาะสมกับระบบจริงจึงมีความจำเป็น



รูปที่ 4.23 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้จากวิธีแบ่งก้อนย่อยและการทำเป็นเชิงเส้นของระบบ

จากการตรวจสอบจุดทำงานและอุณหภูมิของก้อนย่อยแรกที่เกิดขึ้นจริงพบว่า จุดทำงานจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของก้อนย่อย ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิของจุดทำงานใหม่ที่เปลี่ยนแปลงตามช่วงของ  $T_{m1,sw}$

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

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวิธีการเขียนแบบจำลองทางความร้อนให้อยู่ในรูปปริภูมิสแตตสำหรับปริมาตรควบคุมที่ 1 อย่างไรก็ตามสำหรับปริมาตรควบคุมที่ 2 สามารถทำได้ในรูปแบบลักษณะเดียวกัน

#### 4.8.2 การออกแบบตัวประมาณค่าสภาวะ (Observer)

การออกแบบตัวประมาณค่าสภาวะ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ต้องมีสมบัติความเป็น Observability ที่สามารถหาได้จากเมตริกซ์ระบบ กับเมตริกซ์สแตตที่จะเอาข้อมูลไปแทน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่

3

จากการตรวจสอบ Observability ของระบบที่ได้ทำการออกแบบในหัวข้อที่ 4.8.1 พบว่ามีอันดับเท่ากับจำนวนสแตต ( $\text{Rank}(\text{observability}(A,C)) = 6$ ) ดังนั้นระบบที่ออกแบบตามหัวข้อที่ 4.8.1 นั้นสามารถนำมาออกแบบตัวประมาณค่าสภาวะได้

หลังจากการตรวจสอบว่าระบบที่เราจะศึกษานั้นสามารถทำตัวประมาณค่าได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องเลือกอัตราขยาย L โดยการเลือกตำแหน่งโพลหรือรากของสมการลักษณะเฉพาะของตัวประมาณค่าสภาวะให้อยู่บนแกนจริง โดยในการเลือกค่าโพลนั้น หากเลือกให้มีค่ามากจะหมายถึงระบบจะนำ

ข้อมูลสแตตที่ใส่เข้าไปในระบบไปใช้น้อยหรือกล่าวได้ว่าระบบที่ออกแบบจะเชื่อแบบจำลองมากกว่า ข้อมูลจากการตรวจวัด ในทางกลับกันถ้าเลือกโพลที่มีค่าน้อยจะหมายถึงระบบจะนำข้อมูลสแตตที่ใส่เข้าไปในระบบไปใช้ประมาณค่าสถานะที่ตำแหน่งอื่นๆ ได้ดี หรือพูดในอีกแง่หนึ่งว่าระบบจะเชื่อข้อมูลจากการตรวจวัดมากกว่าแบบจำลองที่เขียนขึ้น ดังนั้นในการเลือกตำแหน่งโพลก็ควรที่จะเลือกให้เหมาะสม เพื่อความถูกต้องในการประมาณค่า

จากการเลือกโพลพบว่า โพลจะอยู่ที่  $[-0.01 \ -0.01 \ -0.01 \ -0.01 \ -0.01 \ -0.01]$  และ  $C = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$  นั่นคือ จะสามารถหาค่าอัตราขยาย ( $L$ ) ได้โดยสมการที่ 4.37 ในโปรแกรม MATLAB

$$L = \text{acker}(A', C', p) \quad (4.37)$$

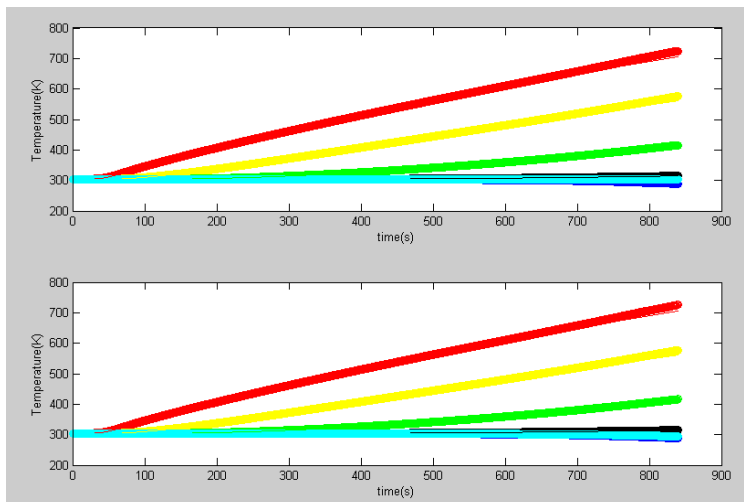
เมื่อ  $L$  คืออัตราขยายของตัวประมาณค่า  
 $A$  คือระบบที่พิจารณาในรูป State-Space  
 $p$  คือโพลของระบบที่เลือก

เป็นที่น่าสังเกตว่าเมื่อ อุณหภูมิ  $T_{m1,sw}^*$  เปลี่ยนแปลงไป เมตริกซ์ระบบ ( $A$ ) ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ทำให้ค่าอัตราขยายของตัวประมาณค่าสถานะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นหากมีการเปลี่ยน ค่า  $T_{m1,sw}^*$  จึงจำเป็นต้องคำนวณอัตราขยายใหม่ทุกครั้ง

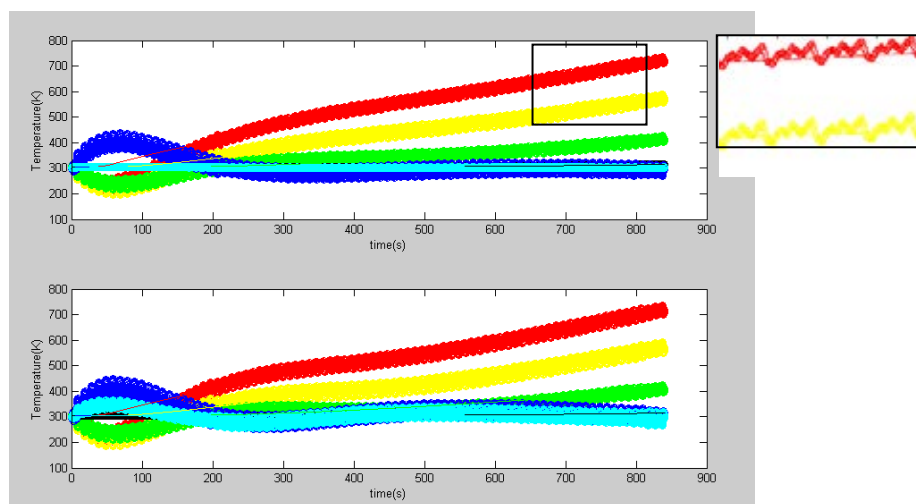
จากการใช้ MATLAB/SIMULINK (ภาคผนวก ค) ทดลองใส่ค่าข้อมูลจริงตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร จากผนังด้านที่คือน้ำเหล็กเข้าไปด้านในหรือข้อมูลสถานะที่ 4 เพื่อประมาณค่าข้อมูลที่สถานะอื่นๆ ผลที่ได้จะเป็นดังรูปที่ 4.24 จะพบว่าข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่าไม่ว่าจะเป็นข้อมูลที่ตำแหน่งผิวด้านข้างหรือผนังกันจะพบว่าข้อมูลมีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองที่สมมติให้เปรียบเสมือนการทำงานจริงหรือกล่าวได้ว่า หากใส่ข้อมูลสถานะที่ 4 ลงไปให้ตัวประมาณค่า จะทำให้สามารถประมาณค่าข้อมูลที่สถานะอื่นๆ ได้แม่นยำ

แต่เนื่องจากการวัดมักจะมีสัญญาณที่มารบกวนการวัดทำให้ผลการวัดมีสิ่งรบกวนเข้ามา ดังนั้นหากมีการใส่สัญญาณเข้าไปรบกวนข้อมูลที่ได้จากการวัด (ในที่นี้ข้อมูลที่สถานะที่ 4) พบว่าจะได้ผลลัพธ์ของการประมาณค่าที่สแตตอื่นๆ เป็นดังรูปที่ 4.25 จะพบว่า การประมาณค่าจะมีความผิดพลาด

ในช่วงต้นและในช่วงหลังข้อมูลจะมีความถูกต้องมากขึ้นแต่จะมีผลของสัญญาณรบกวนที่ใส่เข้ามาในระบบ ดังนั้นการประมาณค่าแบบนี้ระบบจึงไม่ทนต่อสัญญาณรบกวน



รูปที่ 4.24 ผลลัพธ์ของการประมาณค่าเมื่อแทนข้อมูลที่สภาวะที่ 4 ที่ไม่มีสัญญาณรบกวน โดยเส้นที่บจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่า และเส้นบางจะเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง (บน) ตำแหน่งพิกัดด้านข้าง (ล่าง) ตำแหน่งพิกัด



รูปที่ 4.25 ผลลัพธ์ของการประมาณค่าเมื่อแทนข้อมูลที่สภาวะที่ 4 ที่มีสัญญาณรบกวน โดยเส้นที่บจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่า และเส้นบางจะเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง (บน) ตำแหน่งพิกัดด้านข้าง (ล่าง) ตำแหน่งพิกัด



จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการประมาณค่าด้วยการเลือกโพลนั้น ระบบที่เกิดขึ้นจะไม่ทนต่อสิ่งรบกวนที่เข้ามาจากการวัด ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 4.25 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกตัวประมาณค่าแบบใหม่ ซึ่งในที่นี้จะใช้ตัวประมาณค่าคาร์ลมาล (Kalman Filter)

#### 4.8.3 ตัวประมาณค่าคาร์ลมาล (Kalman Filter)

ตัวประมาณค่าคาร์ลมาลนั้นมีหลักการการทำงานที่ใกล้เคียงกับหัวข้อที่แล้ว โดยการเลือกตัวขยายที่เหมาะสมกับระบบที่รวมสัญญาณรบกวนเข้าไปทำการเลือกตัวขยายเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ผลที่ตามมาคือตัวประมาณค่าจะทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดี โดยที่รูปแบบของตัวประมาณค่าคาร์ลมาล [20] จะมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned} K &= PC^T R_c^{-1} \\ \hat{x} &= A\hat{x} + Bu + K(y - C\hat{x}) \\ \dot{P} &= -PC^T R_c^{-1} CP + AP + PA^T + Q_c \end{aligned} \quad (4.38)$$

โดยที่  $Q_c$  คือ White Noise with Process Covariance Matrix

$R_c$  คือ Measurement Covariance Matrix

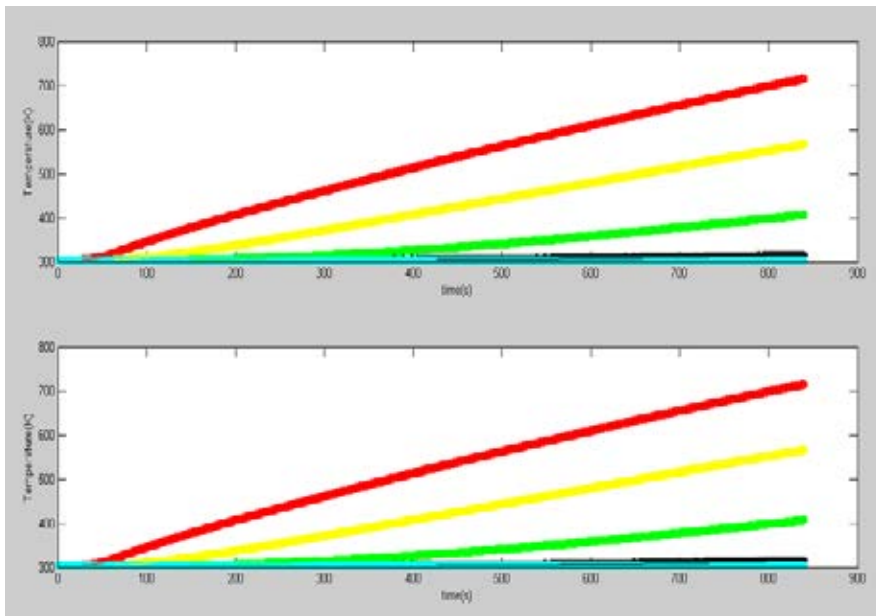
หากเปรียบเทียบสมการที่ 2 ของสมการ 4.38 และ 3.39 พบว่ามีลักษณะที่ใกล้เคียงกันเพียงตัวอัตราขยายของตัวประมาณค่าคาร์ลมาลคือ  $K$

สำหรับสมการสุดท้ายของสมการที่ 4.38 แสดงถึง Riccati Equation ซึ่งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว จะทำให้สมการสุดท้ายของสมการที่ 4.38 กลายเป็น

$$0 = -PC^T R_c^{-1} CP + AP + PA^T + Q_c \quad (4.39)$$

สมการ 4.39 เป็นสมการที่แสดงถึงการหาค่าอัตราขยายของตัวประมาณค่าคาร์ลมาล จะมีข้อดีตรงที่อัตราขยายที่หาได้นั้นเป็นเป็นของระบบที่อยู่ในสภาวะคงตัวแล้วนั่นเอง

จากการใช้ MATLAB/SIMULINK (ภาคผนวก ก) ทดลองใส่ค่าข้อมูลจริงตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร จากผนังด้านที่ติดน้ำเหล็กเข้าไปด้านในหรือข้อมูลสภาวะที่ 4 จากระบบที่เราสมมติให้เสมือนระบบจริงโดยมีการใส่สัญญาณรบกวนเข้าไปด้วย เพื่อประมาณค่าข้อมูลที่สภาวะอื่นๆ โดยใช้ตัวประมาณค่าคาร์ลมาล ได้ผลดังรูปที่ 4.26 จะเห็นว่า การประมาณค่าด้วยตัวประมาณค่าคาร์ลมาลนั้นทนต่อสัญญาณที่เข้ามารบกวนได้ดีเนื่องจากรวมสัญญาณรบกวนเข้ามาใช้ในการเลือกอัตราขยายเป็นที่เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4.26 ผลลัพธ์ของการประมาณค่าโดยใช้ตัวประมาณค่าคาร์ลมาล เมื่อแทนข้อมูลที่สภาวะที่ 4 ที่มีสัญญาณรบกวน โดยเส้นที่บจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่า และเส้นบางจะเป็นข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง (บน) ตำแหน่งผิวด้านข้าง (ล่าง) ตำแหน่งผิวก้น

## บทที่ 5

### การออกแบบระบบช่วยควบคุม

#### 5.1 การออกแบบระบบช่วยควบคุม

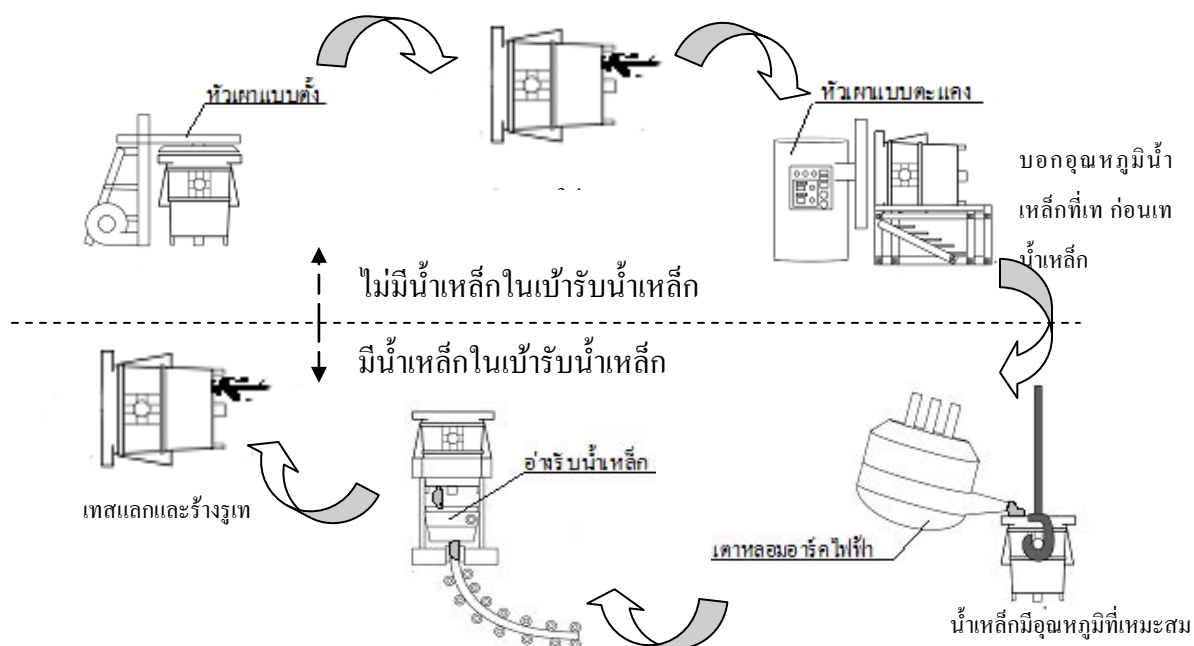
จากกระบวนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กพบว่ากระบวนการของเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะเป็นไปตามกระบวนการของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยแยกเป็นเบ้ารับน้ำเหล็กที่ใช้งานเป็นครั้งแรก (Green Ladle) และ เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว ซึ่งกระบวนการของเบ้ารับน้ำเหล็กทั้งสองประเภทมีความแตกต่างกันเล็กน้อยคือเบ้ารับน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใช้งานจะถูกนำมาอุ่นด้วยหัวเผาตั้ง จากนั้นก็นำไปใส่แผ่นเลื่อนและจะถูกนำมาอุ่นด้วยหัวเผาอนเพื่อรอรับน้ำเหล็กต่อไป ในขณะที่เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว หลังจากซ่อมรูเทน้ำเหล็กเสร็จจะถูกนำไปอุ่นด้วยหัวเผาอนก่อนรับน้ำเหล็ก หรือในกรณีที่ซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็กเสร็จพอดีกับที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้าหลอมเหล็กเสร็จ เบ้ารับน้ำเหล็กอันนั้นจะถูกนำไปรับน้ำเหล็กต่อ โดยไม่ผ่านกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

จากการกระบวนการดังกล่าวของเบ้ารับน้ำเหล็กทำให้สามารถออกแบบระบบควบคุมการทำงานออกเป็น 2 ประเภท คือ

##### 5.1.1 เบ้ารับน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน (Green Ladle)

กระบวนการของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านการใช้งานเริ่มจาก เบ้ารับน้ำเหล็กที่ก่ออิฐทนไฟเสร็จจะถูกนำมาอุ่นด้วยหัวเผาตั้งเพื่อทำให้ตัวเชื่อมต่อระหว่างอิฐทนไฟแข็งตัวและเป็นการไล่ความชื้นที่อยู่ภายในอิฐทนไฟ หลังจากเผาได้ซักระยะเวลาหนึ่งแล้ว (ประมาณ 2 ชั่วโมง) เบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกนำมาวางตะแคงเพื่อใส่แผ่นสไลด์สำหรับเปิด-ปิดรูเทน้ำเหล็ก หลังจากนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกนำมาอุ่นต่อด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ เมื่อสิ้นสุดที่กระบวนการนี้ เบ้ารับน้ำเหล็กก็พร้อมที่จะรับน้ำเหล็ก ในขณะที่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยหัวเผาแบบต่างๆ ทางส่วนของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าก็จะหลอมเศษเหล็กไปพร้อมๆ กัน เมื่อหลอมเหล็กเสร็จเรียบร้อยแล้วเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะถูกยกนำมารอการเทน้ำ

เหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า หลังจากนั้นเข้รับน้ำเหล็กที่มีน้ำเหล็กอยู่ภายในจะถูกเคลื่อนย้ายไปยังสถานีหล่อแบบต่อเนื่องเพื่อถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการถ่ายน้ำเหล็กเข้รับน้ำเหล็กจะนำสแลกและน้ำเหล็กที่เหลือไปเททิ้ง และเข้าสู่กระบวนการซ่อมแซมเข้รับน้ำเหล็กต่อไป หลังจากนั้นก็จะถูกนำไปอุ่นรอการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าในรอบถัดไป โดยที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.1

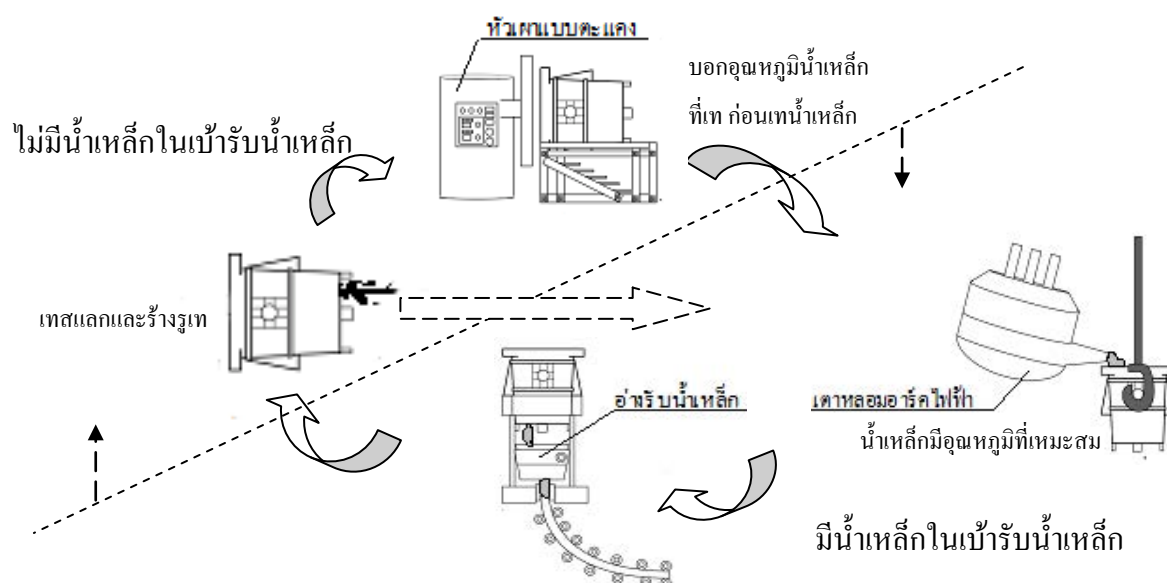


รูปที่ 5.1 วัฏจักรการทำงานของเข้รับน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านกระบวนการทำงาน

### 5.1.2 เข้รับน้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการใช้งานมาแล้ว (Used Ladle)

สำหรับกระบวนการทำงานของเข้รับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้วนั้น จะเริ่มจากการที่เข้รับน้ำเหล็กในกระบวนการก่อนหน้า (อาจจะมาจาก Green Ladle หรือเข้รับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว) ถูกนำมาอุ่นด้วยหัวเผาบนหรือหัวเผาแบบรีเจนเนอร์เรทีฟ เพื่อรักษาสภาวะทางความร้อนของเข้รับน้ำเหล็กในกรณีที่จังหวะของเข้รับน้ำเหล็กกับจังหวะของเตาหลอมไม่พอดีกัน แต่ในกรณีที่จังหวะทั้งสองมีความพอดีกันหรือกล่าวได้ว่า สามารถซ่อมแซมเข้รับน้ำเหล็กเสร็จพอดีกับเวลาที่เตา

หลอมหลอมน้ำเหล็ก ทำให้เข้รับน้ำเหล็กอันนั้นถูกนำไปรับน้ำเหล็กต่อได้เลยโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กเพื่อรักษาภาวะทางความร้อน หลังจากเทน้ำเหล็กลงสู่เข้รับน้ำเหล็กแล้วเข้รับน้ำเหล็กก็จะถูกนำไปรอเพื่อทำการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กเพื่อหล่อแบบต่อเนื่องต่อไป สำหรับกระบวนการของเข้รับน้ำเหล็กในกระบวนการนี้แสดงได้ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 วัฏจักรการทำงานของเข้รับน้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการใช้งานมาแล้ว

จากการทำงานของเข้รับน้ำเหล็กทั้งสองกระบวนการจะพบว่าสามารถแยกออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่มีน้ำเหล็กอยู่ภายในเข้รับน้ำเหล็ก และกรณีที่มีน้ำเหล็กอยู่ภายในเข้รับน้ำเหล็ก ดังนั้นในการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่สามารถเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าทางระบบช่วยควบคุมที่ออกแบบนั้นจะนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดแบบต่อเนื่องในช่วงที่ไม่มีน้ำเหล็กอยู่ภายในเข้รับน้ำเหล็กเข้ามาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำนายค่าอุณหภูมิที่สภาวะต่างๆ ก่อนรับน้ำเหล็ก ให้ผลที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ดังที่ได้นำเสนอแล้วในบทที่ 4

จากการออกแบบระบบช่วยควบคุมนั้นเราจำเป็นต้องประมาณเวลาที่ใช้ในกระบวนการต่างๆ ของเข้รับน้ำเหล็กเข้ามาในระบบช่วยควบคุม โดยที่เวลาที่ใส่เข้ามานั้นต้องเป็นเวลาที่เกิดจากการคาดเดาลักษณะการทำงานของเข้รับน้ำเหล็กในรอบถัดไป(เวลาเฉลี่ยในแต่ละกระบวนการการทำงานของเข้

รับน้ำเหล็กแสดงในบทที่ 6) เพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่สามารถเทจากเตาหลอมได้โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อการทำงานจริง โดยในรอบการทำงานจริงต้องบอกอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่สามารถเทได้ก่อนนำเข้รับน้ำเหล็กไปรับน้ำเหล็ก หรือช่วงปลายของการอุ่นด้วยหัวเผาอน

สำหรับตัวปฏิบัติการโดยรวมของระบบควบคุมจะสามารถแสดงได้ดังสายงานในรูปที่ 5.3 โดยภายในสายงานได้แสดงตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องในกระบวนการคือ

1.  $T_{state,i}$  หมายถึง อุณหภูมิของสภาวะต่างๆ ที่ปริมาตรควบคุมที่ 1 และ 2
2.  $x_{state,i}$  หมายถึง อุณหภูมิเริ่มต้นของสภาวะต่างๆ
3.  $T_{state,his,i}$  หมายถึง อุณหภูมิตลอดทั้งกระบวนการของสภาวะต่างๆ ที่ปริมาตรควบคุมที่ 1 และ 2
4.  $T_{st}$  หมายถึง อุณหภูมิน้ำเหล็ก
5.  $T_{st,his}$  หมายถึง อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เกิดจริงทั้งกระบวนการ
6.  $T_{st,ini}$  หมายถึง อุณหภูมิน้ำเหล็กเริ่มต้น
7.  $T_{st,es}$  หมายถึง อุณหภูมิที่น้ำเหล็กที่ได้จากการประมาณ
8.  $T_{state,es,i}$  หมายถึง อุณหภูมิสแตตต่างๆ เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นสำหรับทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสม

ส่วนกระบวนการที่สำคัญของเข้รับน้ำเหล็กจะถูกเขียนภายในสายงานโดยชื่อของกระบวนการจะเขียนอยู่ในเครื่องหมายอัญประกาศ ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญดังนี้

1. “อุ่นเข้รับน้ำเหล็ก”
2. “พักเข้รับน้ำเหล็ก”
3. “ขนถ่ายน้ำเหล็ก”
4. “เทน้ำเหล็กจากเข้รับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก”
5. “ขนย้ายสแลกไปเททิ้ง”

## 6. “ทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสม”

จากสายงานการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กตามรูปที่ 5.3 พบว่าผู้ใช้ต้องระบุประเภทการใช้งานของเบ้ารับน้ำเหล็ก ถ้ามีการเลือกประเภทเบ้ารับน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใช้งาน เบ้ารับน้ำเหล็กก็จะถูกตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นของสถานะต่างๆของการคำนวณเป็น  $30^{\circ}\text{C}$  และจะเรียงการทำงานโดยผ่านตัวปฏิบัติการดังนี้

1. “อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก” ที่กระบวนการนี้ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการตรวจวัด และเวลาที่ใช้อุ่น เข้ามาช่วยในการทำงานเพื่อประมาณสถานะต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับการทำงานจริงที่เกิดขึ้น
2. “พักเบ้ารับน้ำเหล็ก” ที่กระบวนการนี้ ใช้ข้อมูลจากการตรวจวัด และเวลาที่ใช้พักเบ้ารับน้ำเหล็ก ซึ่งการเรียกใช้ตัวปฏิบัติการนี้คือกระบวนการติดตั้งแผ่นเลื่อนสำหรับเปิดปิดรูปเท
3. “อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก” ที่กระบวนการนี้ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการตรวจวัด และเวลาที่ใช้อุ่น เข้ามาช่วยในการทำงานเพื่อประมาณสถานะต่างๆ ซึ่งการเรียกใช้ตัวปฏิบัติการนี้เปรียบเสมือนการอุ่นด้วยหัวเผาอน
4. “พักเบ้ารับน้ำเหล็ก” ที่กระบวนการนี้จะใช้เพียงแค่ข้อมูลเวลาสำหรับการรอเทน้ำเหล็กเท่านั้น

หากมีการเลือกประเภทของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการใช้งานมาแล้ว ผู้ใช้จะต้องระบุรอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก หลังจากนั้นก็จะทำตามตัวปฏิบัติการดังต่อไปนี้

1. “อุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก” ที่กระบวนการนี้ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการตรวจวัด และเวลาที่ใช้อุ่น เข้ามาช่วยในการทำงานเพื่อประมาณสถานะต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับการทำงานจริงที่เกิดขึ้น และถ้าเวลาที่ใช้เป็น 0 ก็จะเป็นการบอกว่าให้ข้ามตัวปฏิบัติการตัวนี้ไป หรือถ้าในรอบการทำงานจริงก็เปรียบเสมือนการไม่มีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก หรือเป็นกระบวนการที่ซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็กเสร็จพอดีกับการหลอมที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

2. “พักเบียร์น้ำเหล็ก” ที่กระบวนการนี้จะใช้เพียงแค่ข้อมูลเวลาสำหรับการรอน้ำเหล็กเท่านั้น และถ้าเวลาที่ใช้เป็น 0 ก็จะเป็นการบอกว่าให้ข้ามตัวปฏิบัติการตัวนี้ไป หรือถ้าในรอบการทำงานจริงก็เป็นกระบวนการที่ซ่อมแซมเบียร์น้ำเหล็กเสร็จพอดีกับการหลอมที่เตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

เมื่อสิ้นสุดตัวปฏิบัติการที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นทั้งสองประเภทเบียร์น้ำเหล็ก ข้อมูลที่เวลาสุดท้ายจะถูกเก็บไว้ในตัวแปรซึ่งจะนำไปใช้เป็นอุณหภูมิเริ่มต้นในการคำนวณหาอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กด้วยตัวปฏิบัติการ “ทำนายอุณหภูมิการเทน้ำเหล็กที่เหมาะสม”

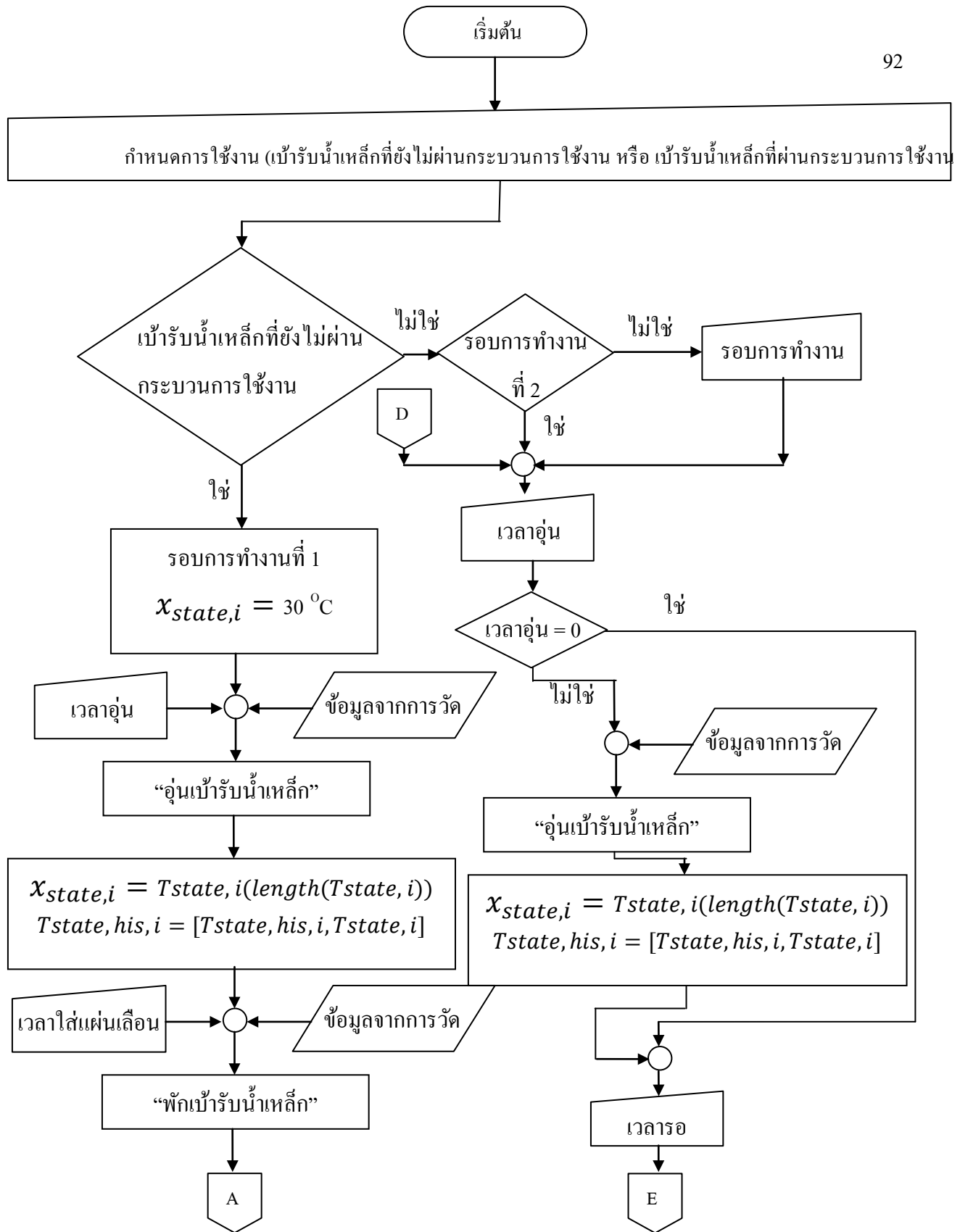
สำหรับหลังจากผ่านแต่ละตัวปฏิบัติการ ระบบจะทำการเก็บค่าสถานะที่ได้จากการคำนวณที่เวลาสุดท้ายของตัวปฏิบัติการนั้นๆ ไปเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นในการคำนวณในตัวปฏิบัติการตัวต่อไป และเก็บข้อมูลที่ได้จากการประมาณค่าสถานะของตัวปฏิบัติการนี้เก็บไว้ในตัวแปรที่แสดงค่าอุณหภูมิการประมาณสถานะทั้งกระบวนการ

หลังจากนั้นถูกนำมาคำนวณต่อด้วยตัวปฏิบัติการดังนี้

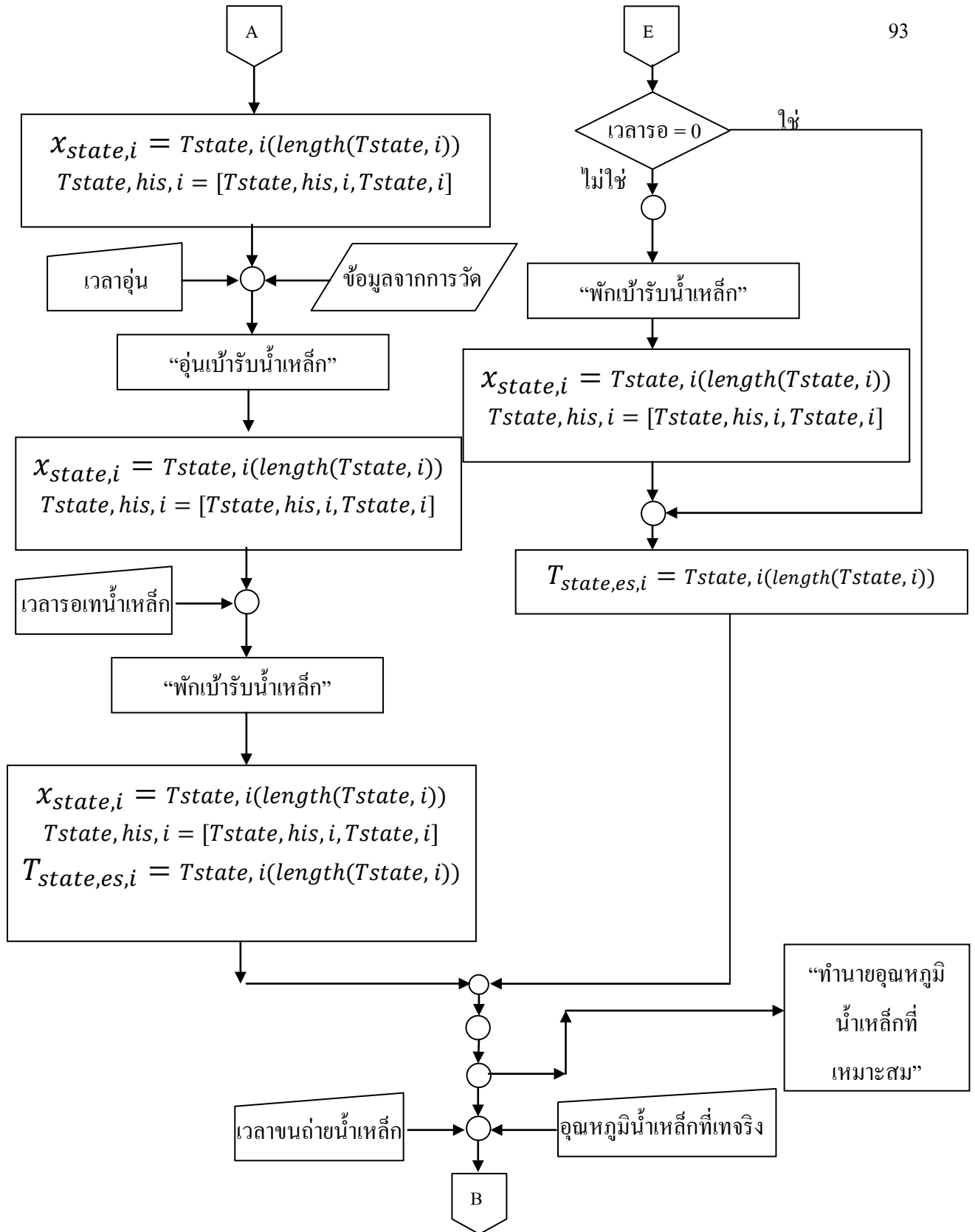
1. “ขนถ่ายน้ำเหล็ก” ที่ตัวปฏิบัติการนี้ ต้องเวลาในการขนถ่าย และอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เกิดจากการคาดเดาเพื่อนำมาคำนวณ
2. “เทน้ำเหล็กจากเบียร์น้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก” ที่ตัวปฏิบัติการนี้ต้องใช้เวลาในการถ่ายน้ำเหล็ก
3. “ขนย้ายสแลกไปเททิ้ง” ที่ตัวปฏิบัติการนี้ต้องใช้เวลาในการขนสแลกไปเททิ้ง
4. “พักเบียร์น้ำเหล็ก” ที่ตัวปฏิบัติการนี้ต้องใช้เวลาในการซ่อมแซมเบียร์น้ำเหล็ก

สำหรับตัวปฏิบัติการ “ขนถ่ายน้ำเหล็ก” และ “เทน้ำเหล็กจากเบียร์น้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก” ระบบก็จะเก็บค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กตลอดการทำงานเช่นเดียวกัน และอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เวลาสุดท้ายของตัวปฏิบัติการ “ขนถ่ายน้ำเหล็ก” จะถูกนำมาเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเหล็กในตัวปฏิบัติการ “เทน้ำเหล็กจากเบียร์น้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก”

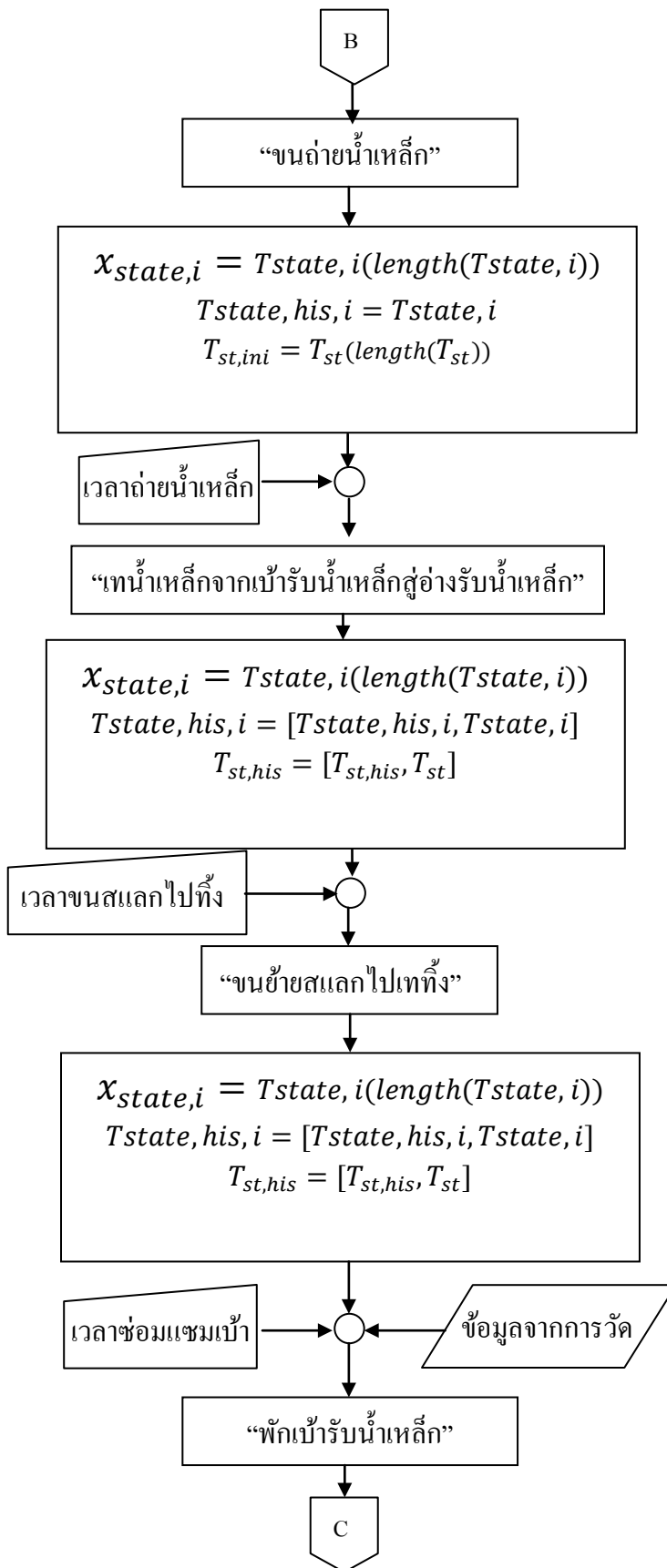




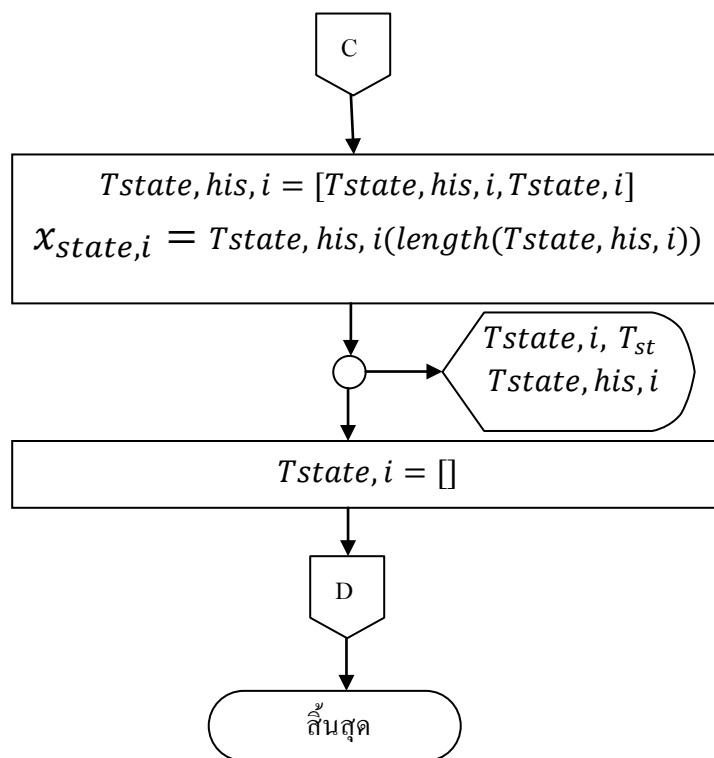
รูปที่ 5.3 สาขาการทำงานภาพรวมของโปรแกรม



รูปที่ 5.3 สายการทำงานภาพรวมของโปรแกรม (ต่อ)



รูปที่ 5.3 สายการทำงานภาพรวมของโปรแกรม (ต่อ)

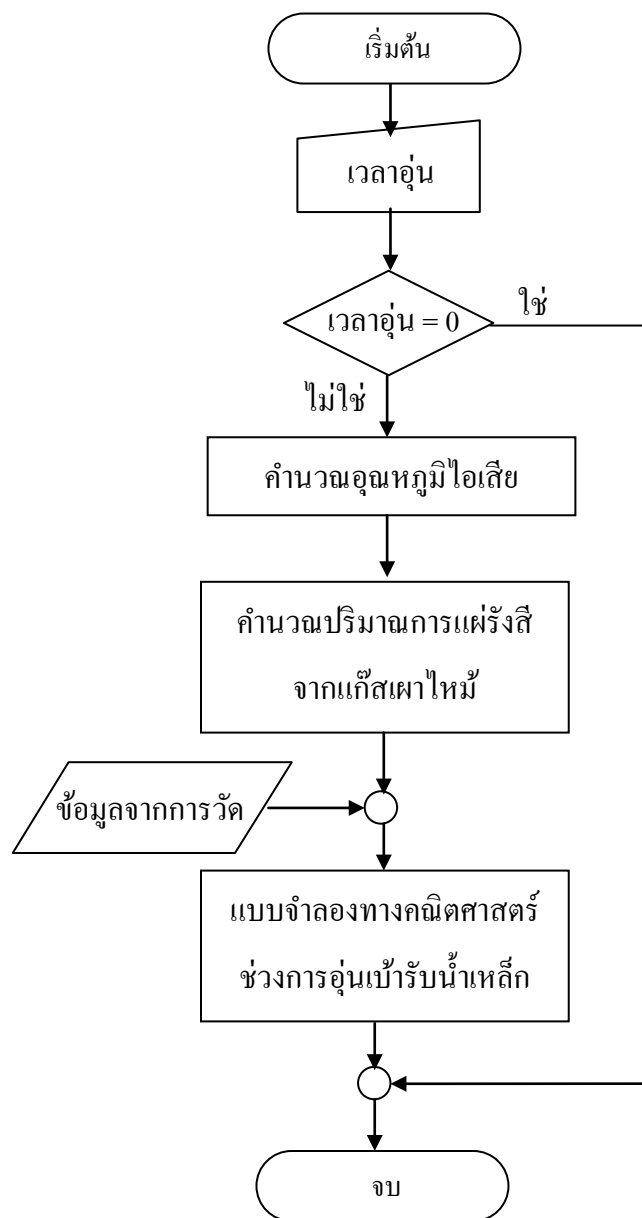


รูปที่ 5.3 สายการทำงานภาพรวมของโปรแกรม (ต่อ)

## 5.2 ตัวปฏิบัติการแต่ละกระบวนการ

### 5.2.1 ตัวปฏิบัติการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

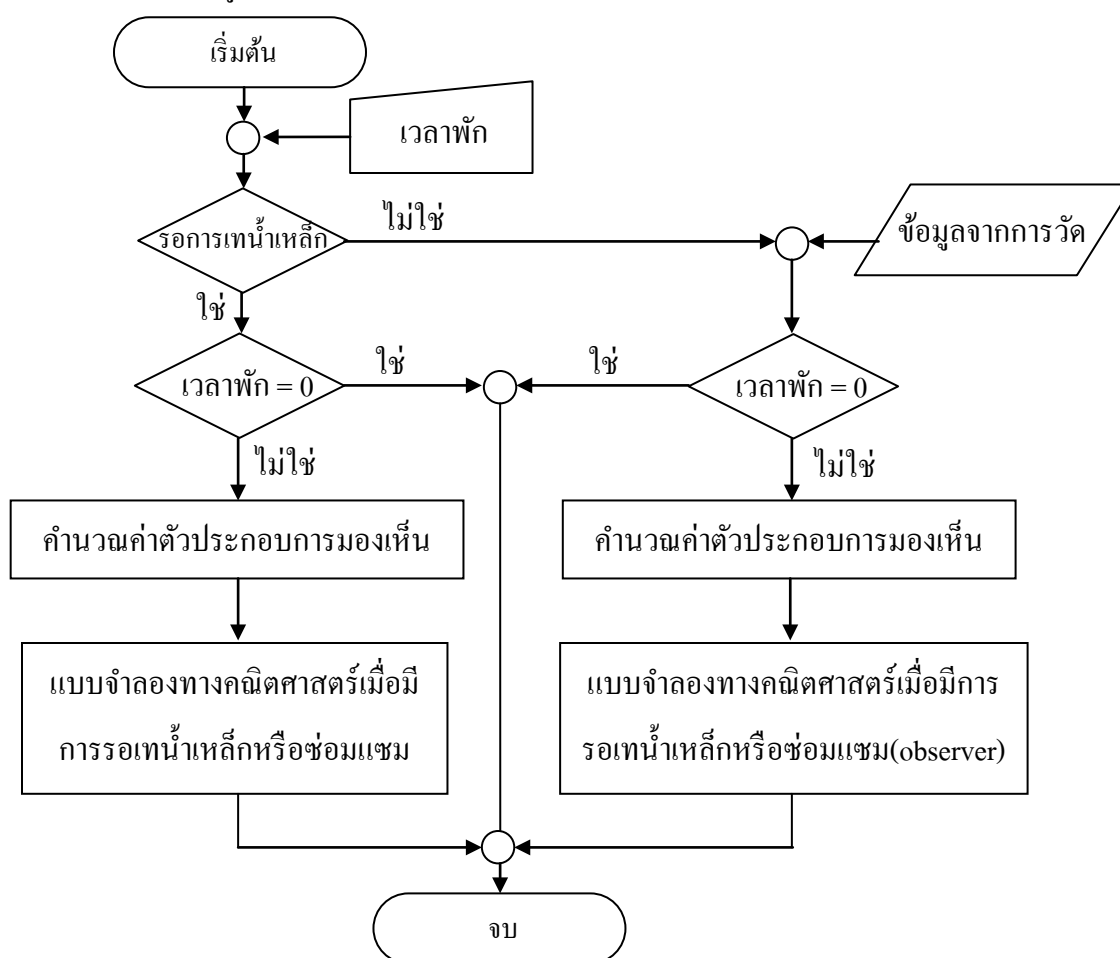
สำหรับสายงานของการปฏิบัติการของการอุ่นน้ำเหล็กได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.4 เริ่มจากการตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการอุ่น หากพบว่าเวลาที่ใส่เข้ามามีค่าเท่ากับศูนย์โปรแกรมจะจบการทำงานแต่ถ้าเวลาที่ป้อนเข้ามาไม่ใช่ศูนย์โปรแกรมจะคำนวณอุณหภูมิไอเสียจากการเผาไหม้และการแผ่รังสีจากแก๊สเผาไหม้ ส่งเป็นอินพุตเข้าไปหาแบบจำลองทางความร้อนที่เขียนขึ้นมาด้วย MATLAB/SIMULINK ภาคผนวก ค. พร้อมทั้งแทนข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดและระยะเวลาในการอุ่นเข้ามาเพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิที่เสตตอื่นๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 5.4 สายงานของตัวปฏิบัติการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

### 5.2.2 ตัวปฏิบัติการพักเบียร์รับน้ำเหล็ก

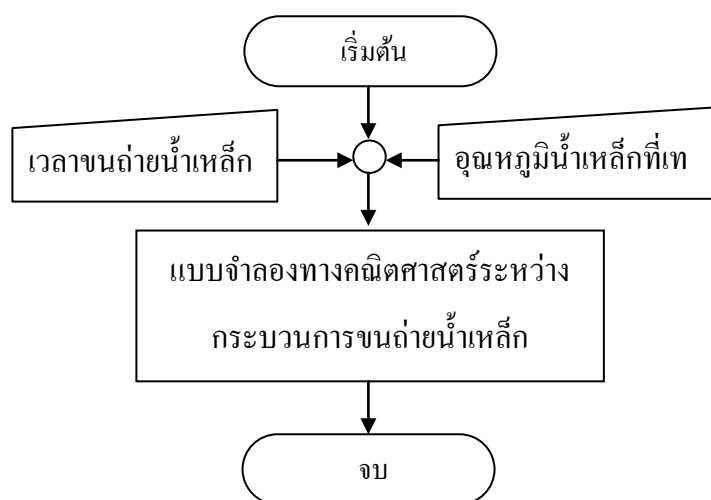
สำหรับตัวปฏิบัติการพักเบียร์รับน้ำเหล็กจะใช้ในหลายกระบวนการของเบียร์รับน้ำเหล็กเช่นการใส่แผ่นเลื่อน การรอกการเทน้ำเหล็ก และการซ่อมแซมเบียร์รับน้ำเหล็ก โดยสายงานของโปรแกรมจะเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบเวลาที่ใช้ในการพักเบียร์รับน้ำเหล็กไม่ว่าจะเป็นกระบวนการไหน หากเวลาที่ใช้เป็นศูนย์แสดงว่าเป็นการจบการทำงานของตัวปฏิบัติการนี้ หากเวลาไม่เป็นศูนย์ โปรแกรมจะเริ่มคำนวณค่าตัวประกอบการมองเห็นของพื้นผิวที่ได้กล่าวมาแล้วในการสร้างแบบจำลอง แล้วป้อนค่าให้แบบจำลองที่เขียนขึ้น เพื่อคำนวณปริมาณความร้อนที่ออกจากปริมาตรควบคุมที่ได้กำหนดขึ้น โดยมีสายงานที่แสดงตามรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 สายงานของตัวปฏิบัติการพักเบียร์รับน้ำเหล็ก

### 5.2.3 ตัวปฏิบัติการขนถ่ายน้ำเหล็ก

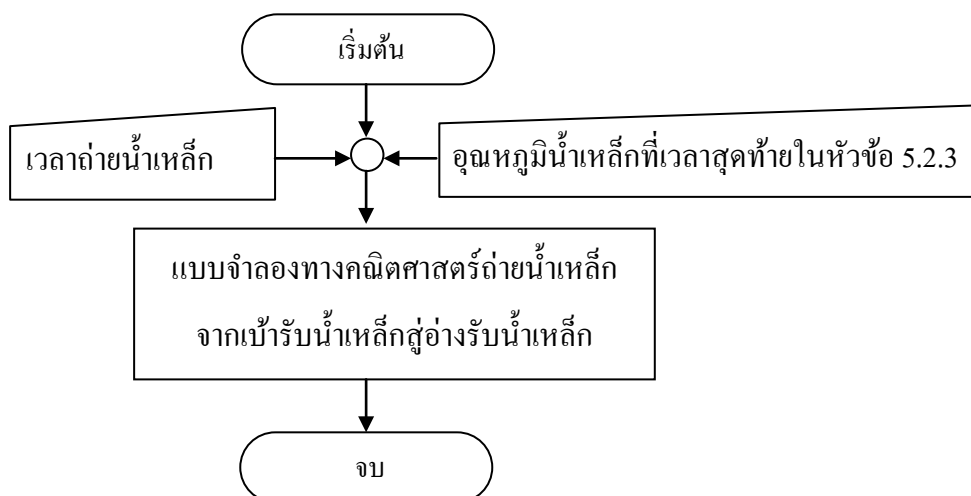
สำหรับการออกแบบตัวปฏิบัติการขนถ่ายน้ำเหล็ก จะมีอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมเข้ามาเกี่ยวข้องและตลอดทั้งกระบวนการอุณหภูมิของน้ำเหล็กก็จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาโดยมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก น้ำเหล็ก และบรรยากาศ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ดังนั้นทางสายงานจึงมีการรับข้อมูลอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทและระยะเวลาการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่กำลังจะเกิดขึ้น โดยมีสายงานที่แสดงตามรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 สายงานของตัวปฏิบัติการขนถ่ายน้ำเหล็ก

### 5.2.4 ตัวปฏิบัติการถ่ายน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

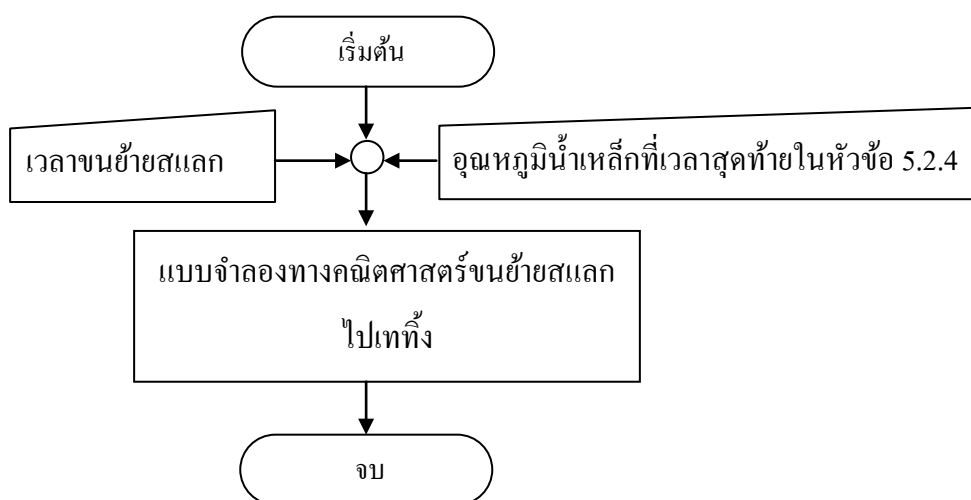
สำหรับการออกแบบตัวปฏิบัติการถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก จะมีลักษณะการทำงานใกล้เคียงกับตัวปฏิบัติการขนถ่ายน้ำเหล็กเพียงแต่ อุณหภูมิน้ำเหล็กเริ่มต้นของกระบวนการนี้จะเกิดจากอุณหภูมิที่เวลาสุดท้ายของกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก และจะมีการรับเวลาช่วงนี้เข้ามาพร้อมกันประมวลผลด้วย โดยที่เวลาช่วงนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 และจะมีสายงานดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 สายงานของตัวปฏิบัติการถ่ายน้ำเหล็กจากเป่ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

#### 5.2.5 ตัวปฏิบัติการขนย้ายสแลกไปเททิ้ง

ที่กระบวนการนี้จะมีรูปแบบการทำงานที่ใกล้เคียงกับสายงานของตัวปฏิบัติการถ่ายน้ำเหล็กจากเป่ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก แต่ที่กระบวนการนี้ น้ำเหล็กจะมีปริมาณคงที่ และต้องรับข้อมูลเวลาของกระบวนการ แลอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เวลาสุดท้ายของกระบวนการถ่ายน้ำเหล็กจากเป่ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก โดยสามารถแสดงสายงานได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 สายงานของตัวปฏิบัติการขนย้ายสแลกไปเททิ้ง



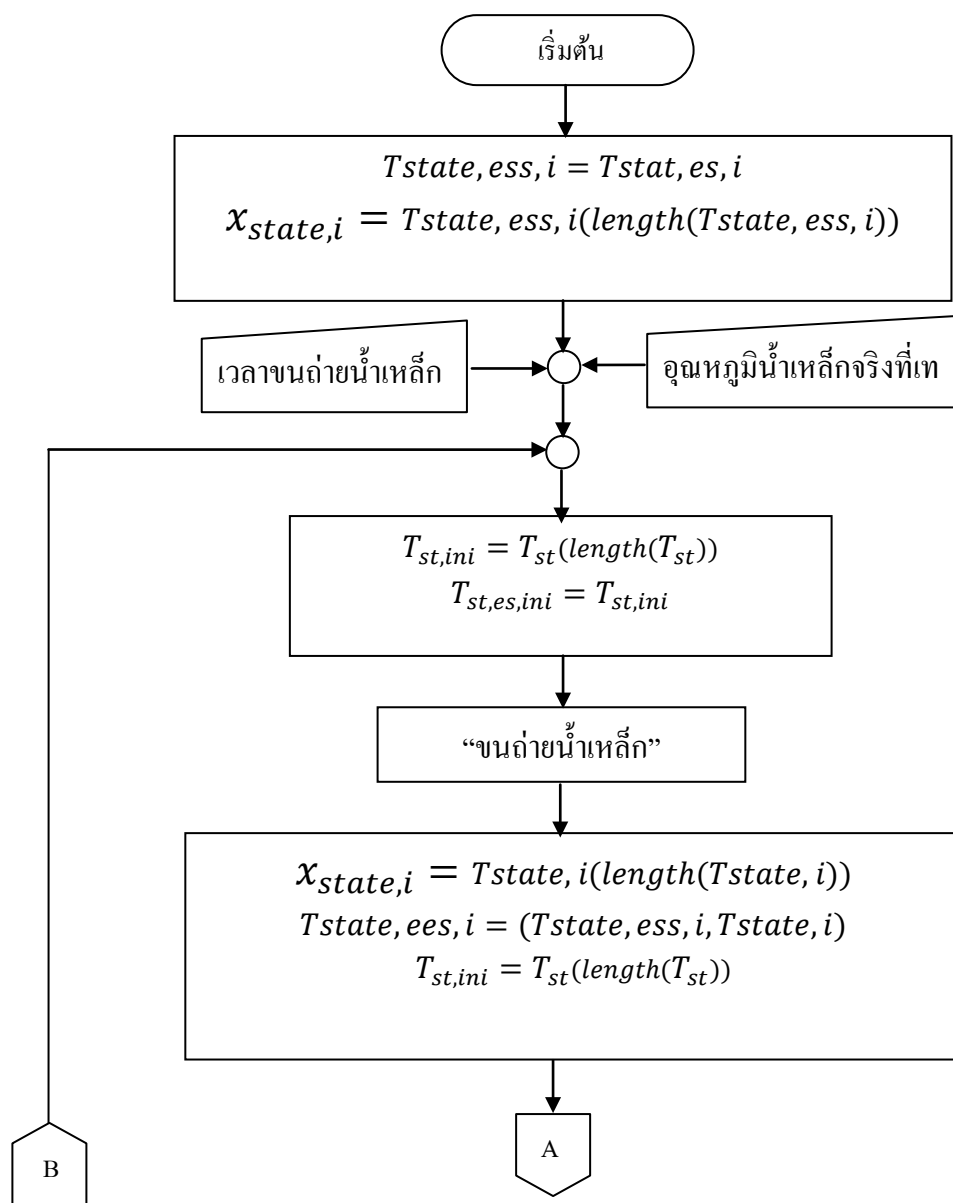
### 5.3 การทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสม

จุดมุ่งหมายของการสร้างระบบควบคุมคือเพื่อให้ค่าอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กที่เหมาะสมสำหรับการเทออกจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า เพื่อให้ใช้พลังงานในการหลอมอย่างเหมาะสมมากที่สุด ตัวปฏิบัติการนี้จึงออกแบบมาเพื่อคำนวณหาอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กที่เหมาะสม ซึ่งในการคำนวณหาอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กที่เหมาะสมนี้จำเป็นต้องทราบการแจกแจงอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในตัวปฏิบัติการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กและตัวปฏิบัติการพักเบ้ารับน้ำเหล็ก เพื่อใช้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นของการทำนายอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กที่เหมาะสม

สำหรับแผนภูมิสายงานแสดงการทำนายอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กที่เหมาะสมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.9 โดยเริ่มต้นการทำงานสภาวะทางความร้อนเริ่มต้นของเบ้ารับน้ำเหล็กจะได้จากสภาวะสุดท้ายของตัวปฏิบัติการ “พักเบ้ารับน้ำเหล็ก” ซึ่งก็คือกระบวนการรอกการเหนือน้ำเหล็กในรอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก จากทางระบบก็รับค่า เวลาขนถ่ายน้ำเหล็ก, เวลาถ่ายน้ำเหล็ก และอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กเริ่มต้น จากนั้น โปรแกรมก็จะเริ่มคำนวณอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กในกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กและถ่ายน้ำเหล็ก และจะได้อุณหภูมิสุดท้ายของการถ่ายน้ำเหล็กมา อุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กหยุดสุดท้ายที่ต้องการให้เป็น หากอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กสุดท้ายมากกว่าอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กที่ต้องการ อุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กเริ่มต้นจะถูกลดลงด้วยครึ่งหนึ่งของผลต่างของอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กสุดท้ายที่คำนวณได้กับที่ต้องการ ในทางตรงข้ามหากอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กสุดท้ายน้อยกว่าอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กที่ต้องการ อุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กเริ่มต้นก็จะถูกบวกเพิ่มด้วยครึ่งหนึ่งของผลต่างของอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กสุดท้ายที่คำนวณได้กับที่ต้องการ จากนั้นก็จะเริ่มคำนวณใหม่ จนกระทั่งอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำเหล็กที่ออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กจากการคำนวณและที่ต้องการมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นจึงแสดงค่าอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กเริ่มต้นตัวนี้ออกมาให้ผู้ใช้งานทราบ เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมอุณหภูมิการหลอมเตาอาร์คไฟฟ้า โดยภายในสายงาน ได้มีตัวแปรเพิ่มเติมที่มาเกี่ยวข้องกับการทำนายอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็กคือ

1.  $T_{state,ess,i}$  หมายถึง อุณหภูมิแตกต่างกันในตัวปฏิบัติการทำนายอุณหภูมิเหนือน้ำเหล็ก

2.  $T_{st,es,ini}$  หมายถึง อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำเหล็กที่สำหรับการทำนายอุณหภูมิ น้ำเหล็กที่เหมาะสม
3.  $T_{want}$  หมายถึง อุณหภูมิ น้ำเหล็กสุดท้ายที่ต้องการ



รูปที่ 5.9 สายงานการทำนายอุณหภูมิ น้ำเหล็กที่เหมาะสม



## บทที่ 6

### การตรวจวัดและการบันทึกข้อมูล

การสร้างระบบช่วยควบคุมเพื่อให้เบ้ารับน้ำเหล็กและเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าสามารถทำงานได้อย่างสัมพันธ์กัน และการทำให้ผลการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกต้องมากยิ่งขึ้น จำเป็นต้องมีสัญญาณจากการวัดเข้ามาช่วยทำนายอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กที่สภาวะต่างๆ ดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และนอกจากนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้นั้นจำเป็นต้องมีการสอบเทียบกับผลการทดลองจริงที่มาจาก การตรวจวัดในรอบการทำงานจริง

ในบทนี้จะนำเสนอผลการตรวจวัด และการวิเคราะห์สภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัด เพื่อเป็นข้อมูลในการสอบเทียบแบบจำลองและนำข้อมูลที่ตรวจวัดบางส่วนเข้ามาช่วยในการประมาณค่าอุณหภูมิที่สภาวะต่างๆ นอกจากนี้ในการตรวจวัดจำเป็นต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ขึ้นเพื่อป้องกันอุปกรณ์การตรวจวัดเนื่องจากสภาวะการทำงานที่เลวร้าย

#### 6.1 ข้อมูลเบื้องต้นในการทำงานของระบบการหลอมเหลวและสถานที่เก็บข้อมูล

##### 6.1.1 ผลิตภัณฑ์ที่ผลิต

ผลิตภัณฑ์ที่ทางโรงงานผลิตได้จะออกจากสถานีหล่อแบบต่อเนื่องในรูปแบบของเหล็กทรงยาว (Billet) ที่มีพื้นที่หน้าตัด  $100 \times 100$  ตารางมิลลิเมตร ยาว 3 เมตร น้ำหนักโดยประมาณ 230 กิโลกรัมต่อแท่ง โดยเหล็กทรงยาวจะนำไปรีดให้กลายเป็นเหล็กข้ออ้อย SD30 ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย (มอก. 24-2548) ซึ่งต้องมีส่วนประกอบทางเคมีและสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 6.1 และตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กข้ออ้อยเกรด SD30

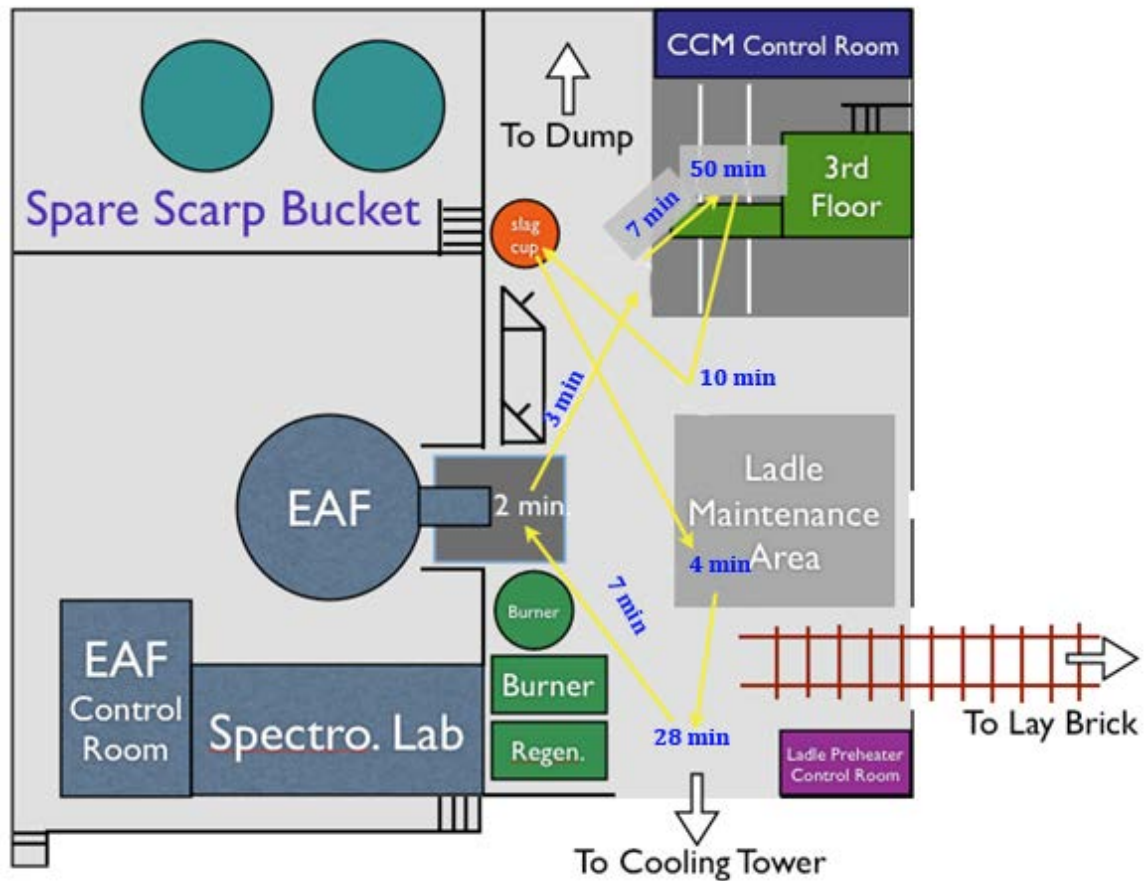
เหล็กเกรด	ส่วนประกอบทางเคมี (ร้อยละ)				
	คาร์บอน สูงสุด	แมงกานีส สูงสุด	ฟอสฟอรัส สูงสุด	กำมะถัน สูงสุด	คาร์บอน + (แมงกานีส/6) สูงสุด
SD 30	0.27	-	0.05	0.05	0.50
ความคลาด เคลื่อนไม่เกิน	± 0.03	± 0.05	± 0.01	± 0.01	-

ตารางที่ 6.2 สมบัติทางกลของเหล็กข้ออ้อยเกรด SD30 ตาม มอก.

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

### 6.1.2 ขั้นตอนปฏิบัติงาน

สำหรับเข้รับน้ำเหล็กที่ศึกษานั้นจะมีลักษณะการทำงานดังกล่าวมาแล้วในบทที่ 5 ที่ได้กล่าวถึงการทำงานของเข้รับน้ำเหล็ก แต่สำหรับสิ่งที่จะกล่าวถึงในส่วนนี้คือแผนผังของโรงงานที่เข้รับน้ำเหล็กจะต้องเคลื่อนที่ไปในกระบวนการต่างๆ รวมถึงเวลาโดยภาพรวมในการเคลื่อนที่[4] ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 โดยที่ลูกศรสีเหลืองแสดงการเส้นทางการทำงานของเข้รับน้ำเหล็ก



รูปที่ 6.1 แผนผังและเส้นทางการเคลื่อนที่ของเบ้ารับน้ำเหล็กในโรงงานที่ทำการศึกษาวิชาลัยและเก็บข้อมูล [4]




## 6.2 อุปกรณ์การตรวจวัดและวิธีการตรวจวัด

### 6.2.1 วิธีการตรวจวัด

เพื่อหาสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างกระบวนการต่างๆ จึงมีความจำเป็นที่ต้องวัดอุณหภูมิภายในผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่ได้จากการฝังเทอร์โมคัปเปิ้ล ลงไปในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่จุดต่างๆ และมีการเก็บข้อมูลจากการตรวจวัดด้วย Data Logger เนื่องจากเบ้ารับน้ำเหล็กมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาและทำงานอยู่ภายใต้อุณหภูมิที่สูง ดังนั้น Data Logger ที่ใช้จึงต้องสามารถส่งสัญญาณที่ตรวจวัดได้มายังผู้ใช้งานให้เห็นสิ่งที่เกิดขึ้นหรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง (Real Time)

นอกจากนี้จากลักษณะการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีบางตำแหน่งที่ไม่สามารถตรวจวัดได้โดยการใช้เทอร์โมคัปเปิล เช่นอุณหภูมิของสแลกที่ปกคลุมอยู่บนผิวน้ำเหล็ก จึงใช้อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิประเภทอื่นเข้ามาช่วยเก็บข้อมูลเช่นกล้องถ่ายภาพความร้อน โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดทั้งหมดแสดงด้วยตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดอุณหภูมิ

ลำดับ	รายการ	ชื่อทางการค้า	รูปภาพ
1.	Thermocouple	Furnace Thermocouple Type K 1.6 mm dia. Mineral Insulated	
2.	Thermocouple	Furnace Thermocouple Type B 0.5 mm dia.	
3.	กล่องป้องกันอุณหภูมิ	Furnace Thermal Barrier	

ตารางที่ 6.3 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดอุณหภูมิ (ต่อ)

ลำดับ	รายการ	ชื่อทางการค้า	รูปภาพ
4.	อุปกรณ์รับสัญญาณ		
5.	Data Logger	Tpad21 TP2016	
6.	กล้องถ่ายภาพความร้อน	FLIR P640	

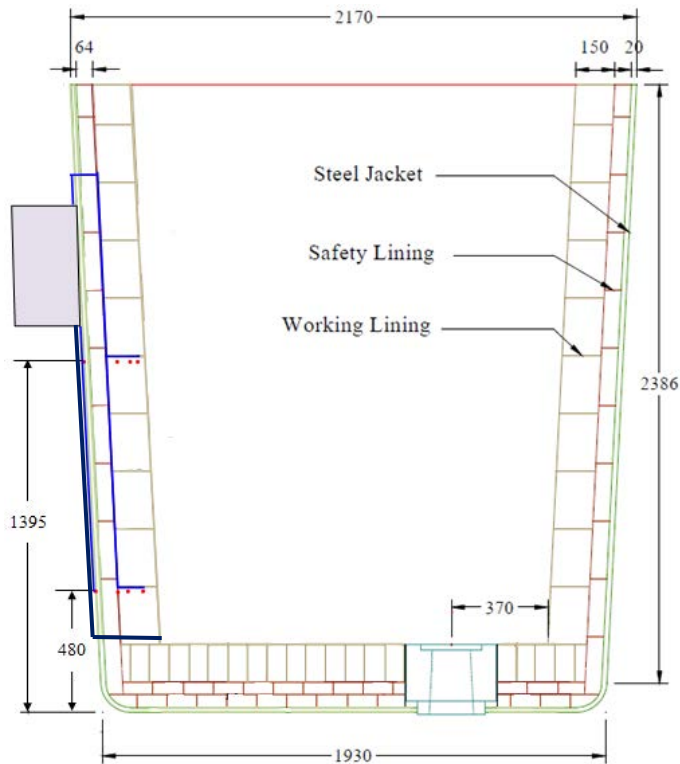


### 6.2.1.1 การเดินสายเทอร์โมคัปเปิ้ล

การตรวจวัดอุณหภูมิในเบ้ารับน้ำเหล็กนี้ จะฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ลงไปภายในบริเวณผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก ที่บริเวณอิฐแถวที่ 1 และ บริเวณอิฐแถวที่ 5 ที่ประกอบขึ้นเป็นผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก บริเวณละ 3 ตำแหน่ง คือที่ตำแหน่ง 20 50 และ 100 มิลลิเมตร จากผิวอิฐทนไฟด้านที่อยู่ติดกับน้ำเหล็ก ตามลำดับ รวมไปถึงมีการวัดอุณหภูมิของผิวเปลือกเหล็กที่ประกอบขึ้นเป็นตัวเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยเช่นกัน ดังรูปที่ 6.2 เส้นสีฟ้า นอกจากนี้ยังมีการใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลอีกชุดหนึ่งชนิด B ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปตลอดช่วงการทำงาน โดยที่การฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิ น้ำเหล็กนี้จะฝังที่บริเวณอิฐแถวที่ 1 เพื่อให้สัมผัสกับน้ำเหล็กตลอดเวลา ดังรูปที่ 6.2 เส้นสีม่วง

สำหรับการเดินสายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ที่วัดอุณหภูมิผนังเบ้ารับน้ำเหล็ก จำเป็นต้องเดินเข้าไปในชั้นของอิฐทนไฟไม่ว่าจะเป็นระหว่างอิฐชั้นปลอตกัยกับชั้นทำงานหรือระหว่างอิฐในชั้นทำงานด้วยตนเอง จึงจำเป็นต้องเดินสายเทอร์โมคัปเปิ้ลระหว่างอิฐทนไฟเหล่านี้มีช่องว่างน้อยที่สุดเพื่อไม่ให้ น้ำเหล็กรั่วออกมาสู่ภายนอกเบ้ารับน้ำเหล็ก วิธีหนึ่งที่ทำได้คือการเจาะร่องบนอิฐดังรูปที่ 6.3 เพื่อเป็นทางเดินของสายเทอร์โมคัปเปิ้ล และใช้มอร์ตาร์เทปิดทับร่องที่เจาะไว้ขณะก่ออิฐ ส่วนทางเดินของสายเทอร์โมคัปเปิ้ลในแนวตั้ง (ตามความสูงของเบ้ารับน้ำเหล็ก) จะไม่มีการเจาะร่องบนอิฐเนื่องจากการก่ออิฐปกตินั้นระหว่างชั้นทำงานกับชั้นปลอตกัยก็มีช่องว่างระหว่างอิฐเกิดขึ้นอยู่แล้วจึงเดินสายเทอร์โมคัปเปิ้ลได้เลย

จากการทดลองครั้งก่อนหน้าพบว่ากร่อนของอิฐทนไฟหลังจากการใช้งานแล้วจะกร่อนไปไม่ถึงตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ดังนั้นสำหรับการเจาะอิฐเพื่อฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ที่ตำแหน่ง 50 และ 100 มิลลิเมตร จะเจาะที่อิฐก้อนเดียวกันเนื่องจากเป็นระยะที่ห่างออกจากรูน้ำเหล็กออกมาแล้ว ดังนั้นจึงมีความมั่นใจได้ในระดับหนึ่งว่าจะไม่ก่อให้เกิดการรั่วของน้ำเหล็กออกมาจากเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่ที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตรนั้นพบว่าเมื่อใช้งานไปแล้วอิฐทนไฟจะกร่อนเข้ามาเลยตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.2 ขนาดของเข้าน้ำเหล็ก และตำแหน่งติดตั้ง เทอร์ โมคัปเปิ้ล ในการเก็บข้อมูล



รูปที่ 6.3 การเจาะอิฐเพื่อฝังเทอร์คัปเปิ้ลชนิด K ลงไปอิฐทนไฟที่ตำแหน่ง 50 และ 100 มิลลิเมตร จากผิวที่สัมผัสน้ำเหล็ก

ดังนั้นเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตรจากน้ำเหล็กเข้ามานั้น จะเป็นการเจาะอิฐที่วางข้างๆ กันแต่จะเจาะตรงกลางตำแหน่งอิฐ

เทอร์โมคัปเปิ้ลอีกชุด ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กนั้นจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B เพื่อวัดอุณหภูมิที่สูงกว่าชนิด K แต่เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B นั้นเมื่อซื้อมาจะเป็นสายเปลือยดังนั้นจึงจำเป็นต้องป้องกันสายเทอร์โมคัปเปิ้ลด้วยปลอกเซรามิกซ์ (Appendix A) ก่อนนำมาใช้งาน โดยการเจาะรูเพื่อติดตั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B นี้จะติดตั้งไปในลักษณะที่แตกต่างจากชนิด K และข้อจำกัดทางด้านราคาจึงทำให้ได้ความยาวของสายที่ไม่เท่ากับชนิด K จึงจำเป็นต้องนำสายออกทางด้านล่างของเบ้ารับน้ำเหล็ก โดยการเจาะอิฐเพื่อฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลดังรูปที่ 6.4 และที่ผนังเบ้ารับน้ำเหล็กจำเป็นต้องเจาะรูข้างเบ้ารับน้ำเหล็กเพิ่มเพื่อเป็นทางเดินสายออกสำหรับสายเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B



ก.



ข.

รูปที่ 6.4 ก. การเจาะอิฐเพื่อฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B เพื่อวัดอุณหภูมิน้ำเหล็ก  
ข. การฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลลงไปในอิฐทนไฟที่เจาะ

#### 6.2.1.2 การติดตั้ง Data Logger

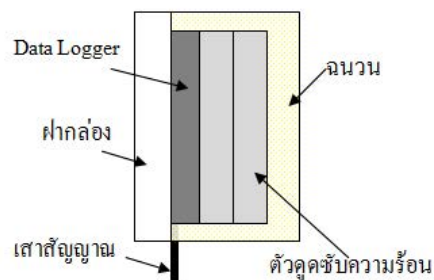
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าลักษณะการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นต้องทำงานภายใต้สภาวะที่เลวร้าย ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิที่สูงหรือบางครั้งอาจจะมีแรงกระแทกจากครนที่มากกระทบ แต่เนื่องจากตัว Data Logger ที่ใช้นั้นสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 70 °C และต้องเคลื่อนที่ไปกับเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดเวลาการทำงาน ดังนั้นจึงต้องทำกล่องติดกับเบ้ารับน้ำเหล็กเพื่อเป็นตัวป้องกันอุณหภูมิ แรง

กระแทก หรือแม้แต่ว่าเป็นตัวที่นำ Data Logger ให้ติดอยู่กับเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดเวลา ซึ่งจะมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 กล่องป้องกันอุณหภูมิ แรงกระแทก และตัวที่ยึด Data Logger ติดกับเบ้ารับน้ำเหล็กตลอดเวลา  
การทำงาน

จากรูปที่ 6.5 จะพบว่าภายในกล่องรับแรงกระแทกนั้นมีการบุด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อเป็นป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเข้าสู่ Data Logger นอกจากนี้จากรูปจะสังเกตว่ามีช่องไว้สำหรับใส่ตัวกล่องป้องกันอุณหภูมิ ซึ่งภายในกล่องป้องกันอุณหภูมิจะมีฉนวนกันความร้อนและตัวตัวดูดซับความร้อนเพื่อป้องกันความร้อนเข้าสู่กล่อง Data Logger ดังรูปที่ 6.6 แต่อย่างไรก็ตามหากมีการทำงานหลายรอบการทำงานตัวดูดซับความร้อนไม่สามารถดูดซับความร้อนได้อีกต่อไปจึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนตัวดูดซับความร้อนเป็นระยะๆ เมื่อตัว Data Logger มีอุณหภูมิที่สูงเกินไป



รูปที่ 6.6 ลักษณะกล่องป้องกันอุณหภูมิ และภาคตัดตามยาวของตัวกล่อง

6.2.2 การเก็บข้อมูลจากรายงานการปฏิบัติงาน

จากรูปที่ 6.1 จะพบว่าห้องที่ควบคุมการทำงานของวัฏจักรการหลอมด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และเบ้ารับเหล็กนั้น จะมีอยู่หลักๆ 3 ห้องด้วยกัน ซึ่งในแต่ละห้องควบคุมจะมีลักษณะของใบปฏิบัติงานในแต่ละกระบวนการที่แตกต่างกัน ในที่นี้จะขอเรียกใบปฏิบัติการในแต่ละห้องการทำงานดังนี้

1. EAF Control Room จะเรียกว่า ใบรายงานเตาหลอม
2. Ladle Preheater Control Room จะเรียกว่า ใบรายงานการใช้ถังน้ำเหล็ก
3. CCM Control Room จะเรียกว่า ใบรายงาน CCM

รูปที่ 6.7 แสดงใบรายงาน CCM และใบรายงานการใช้ถังน้ำเหล็ก ซึ่งในแต่ละใบปฏิบัติงานของแต่ละห้องมิให้ข้อมูลที่แตกต่างกัน เช่นหากอยากทราบธาตุที่เป็นส่วนประกอบในน้ำเหล็กเราจะต้องไปดูใบรายงานเตาหลอมและหากต้องการทราบเวลาในการถ่าน้ำเหล็กก็ต้องไปดูใบรายงานการใช้ถังน้ำเหล็กและใบรายงาน CCM เป็นต้น

บริษัท สยามสตีลอินดิวสทรี จำกัด (มหาชน)  
 ใบรายงาน CCM  
 F-MS-09-005 Rev.0

วันที่ 17.8.26	ส. 9 เวลา 100-14:00	คอนกรีต 1	2	3	Sample	C	G	Mn	P	S
เลขที่ 24247	ชนิดงาน 070	คอนกรีต 2	คอนกรีต 3	คอนกรีต 4	L/D	26	27	77	01	02
คอนกรีต 1	คอนกรีต 2	คอนกรีต 3	คอนกรีต 4	คอนกรีต 5	SEQUENCE	1	2	3	4	5
คอนกรีต 6	คอนกรีต 7	คอนกรีต 8	คอนกรีต 9	คอนกรีต 10	เวลา	เวลา	เวลา	เวลา	เวลา	เวลา

Handwritten notes and signatures are present throughout the form, including a signature at the bottom right for the CCM operator.

รูปที่ 6.7 รายละเอียดของใบรายงาน CCM และใบรายงานเตาหลอม



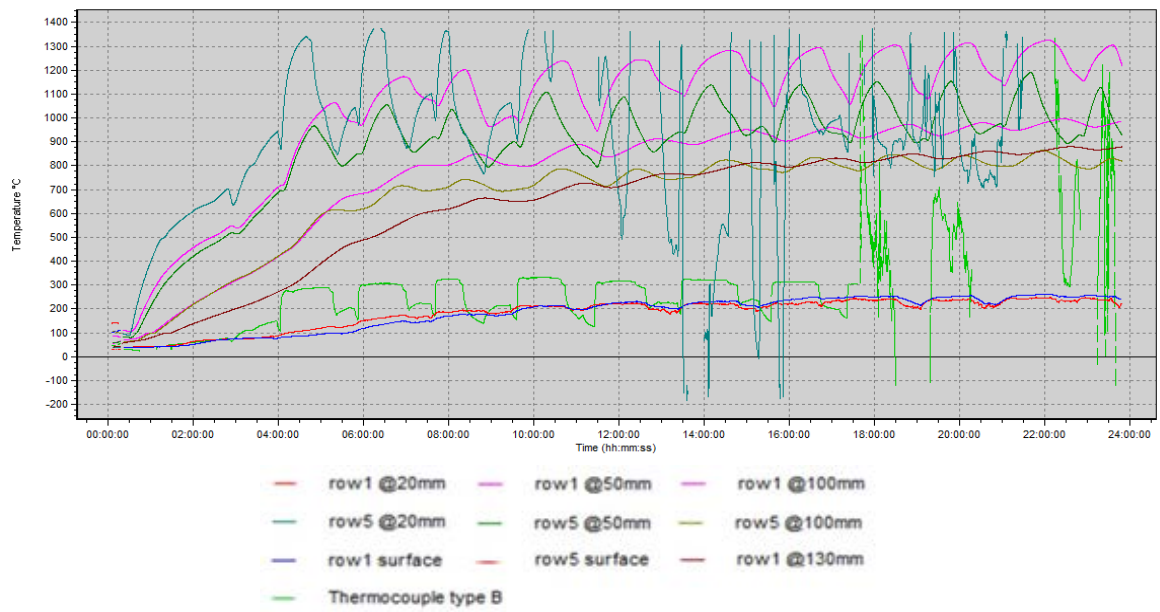
### 6.3 ผลการตรวจวัด และการวิเคราะห์ผลการตรวจวัดเบื้องต้น

#### 6.3.1 ผลการตรวจวัดจากเทอร์โมคัปเปิลที่ตำแหน่งต่างๆ

จากการเก็บข้อมูลของการปฏิบัติงานจริงของโรงงานตัวอย่างจะทำการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง ครั้งแรกภายในวันที่ 2-3 มีนาคม พ.ศ. 2556 ซึ่งข้อมูลที่ต้องการซึ่งก็คืออุณหภูมิ น้ำ เหล็ก นั้นสามารถวัดแบบต่อเนื่องได้ช่วงเวลาสั้น ดังนั้นจึงมีการตรวจวัดใหม่เป็นครั้งที่ 2 คือวันที่ 17 - 18 สิงหาคม พ.ศ. 2556 รวมผลการเก็บข้อมูลทั้งสิ้น 11 รอบการทำงาน ซึ่งข้อมูลจากการเก็บครั้งที่ 2 นั้น สามารถเก็บอุณหภูมิของน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่องได้ข้อมูลทั้งสิ้น 7 รอบการทำงาน และได้ข้อมูลของน้ำเหล็กที่เวลาต่างๆ ขณะถ่ายน้ำเหล็กออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก โดยได้รับความอนุเคราะห์จากทางโรงงานตัวอย่างที่วัดให้ เนื่องจากในรอบการทำงานปกติจะไม่มีการวัดข้อมูลขณะถ่ายน้ำเหล็กเนื่องจากความไม่ปลอดภัยของตัวพนักงานเองตอนทำงาน

สำหรับการเก็บข้อมูลครั้งแรกกับครั้งที่สองนั้น อุณหภูมิที่ได้จากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K นั้นมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน จึงขอนำเสนอข้อมูลจากการตรวจวัดครั้งที่ 2 ซึ่งใช้งานต่อเนื่องกัน โดยไม่มีการพักเลย เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลต่างๆ

สำหรับข้อมูลจากการตรวจวัดในครั้งที่ 2 นั้นจะแสดงดังรูปที่ 6.8 และจะมีเส้นของเทอร์โมคัปเปิลชนิด B อยู่ในกราฟแสดงข้อมูลด้วยเช่นกัน ถ้าอ่านอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลชนิด B มาจากกราฟจะอ่านได้ในค่าที่ต่ำกว่าปกติเนื่องจากเราใช้ตัวแปลงสัญญาณที่ส่งมาเป็น Data Logger ของชนิด K ค่าที่อ่านได้เลยต่ำกว่าปกติ ดังนั้นก่อนนำไปใช้งานต้องแปลงข้อมูลในส่วนนี้เป็นข้อมูลอุณหภูมิของชนิด B ก่อน นอกจากนี้แล้วจากกราฟจะพบว่าอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลบางตำแหน่งนั้นเกิดการแกว่งในช่วงที่กว้างมากซึ่งสามารถอนุมานได้ว่า น้ำเหล็กสามารถซึมไปโดนเทอร์โมคัปเปิล ณ ตำแหน่งที่ฝังเรียบร้อยแล้ว ส่วนรายละเอียดการทำงานสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.5



รูปที่ 6.8 ผลการตรวจวัดอุณหภูมิผนังเข้รับน้ำเหล็กตลอดการทำงาน 11 รอบการทำงาน



ตารางที่ 6.5 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานของเขารับน้ำเหล็ก

Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิน้ำเหล็ก (°C)
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	
134847	ตั้งรอกการใช้งานและอุ่นเบื่องต้น	0	30	0:30	1717 1680
	เผาตั้ง	30	167	2:17	
	ติดตั้งประตูเลื่อน	167	175	0:07	
	เผาอน	175	237	1:02	
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	237	241	0:04	
	Tapping	241	243	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	243	246	0:03	
	รือ Casting	246	259	0:13	
	Casting	259	310	0:51	
	เท Slag	310	315	0:05	
ล้างรู	315	320	0:05		
134849	เผาอน	320	345	0:25	1680 1676
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	345	350	0:05	
	Tapping	350	352	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	352	354	0:02	
	รือ Casting	354	360	0:06	
	Casting	360	411	0:51	
	เท Slag	411	417	0:06	
ล้างรู	417	420	0:03		
134851	เผาอน	420	450	0:30	1692 1678
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	450	455	0:05	
	Tapping	455	457	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	457	459	0:02	
	รือ Casting	459	461	0:02	
	Casting	461	489	0:28	
	เท Slag	489	494	0:05	
ล้างรู	494	523	0:29		

ตารางที่ 6.5 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานของเป่ารับน้ำเหล็ก (ต่อ)

Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิน้ำเหล็ก (°C)
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	
134853	เผาอน	523	560	0:37	
	ชกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	560	569	0:09	
	Tapping	569	571	0:02	1695
	ชกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	571	574	0:03	1689
	รอ Casting	574	583	0:09	
	Casting	583	630	0:47	
	เท Slag	630	636	0:06	
ล้างรู	636	656	0:20		
134855	เผาอน	656	661	0:05	
	ชกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	661	677	0:16	
	Tapping	677	678	0:01	1701
	ชกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	678	681	0:03	1681
	รอ Casting	681	688	0:07	
	Casting	688	733	0:45	
	เท Slag	733	748	0:15	
ล้างรู	748	752	0:04		
134857	เผาอน	752	792	0:40	
	ชกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	792	796	0:04	
	Tapping	796	798	0:02	1687
	ชกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	798	800	0:02	1661
	รอ Casting	800	812	0:12	
	Casting	812	860	0:48	
	เท Slag	860	874	0:14	
ล้างรู	874	878	0:04		

ตารางที่ 6.5 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานของเป่ารับน้ำเหล็ก (ต่อ)

Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิน้ำเหล็ก (°C)
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	
134859	เผาอน	878	903	0:25	1682 1679
	ยกออกไปรรับน้ำเหล็ก	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		
134861	เผาอน	992	1016	0:24	1695 1680
	ยกออกไปรรับน้ำเหล็ก	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		
134863	เผาอน	1115	1130	0:15	1695 1703
	ยกออกไปรรับน้ำเหล็ก	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 6.5 สรุปรายละเอียดกิจกรรมในการปฏิบัติงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก (ต่อ)

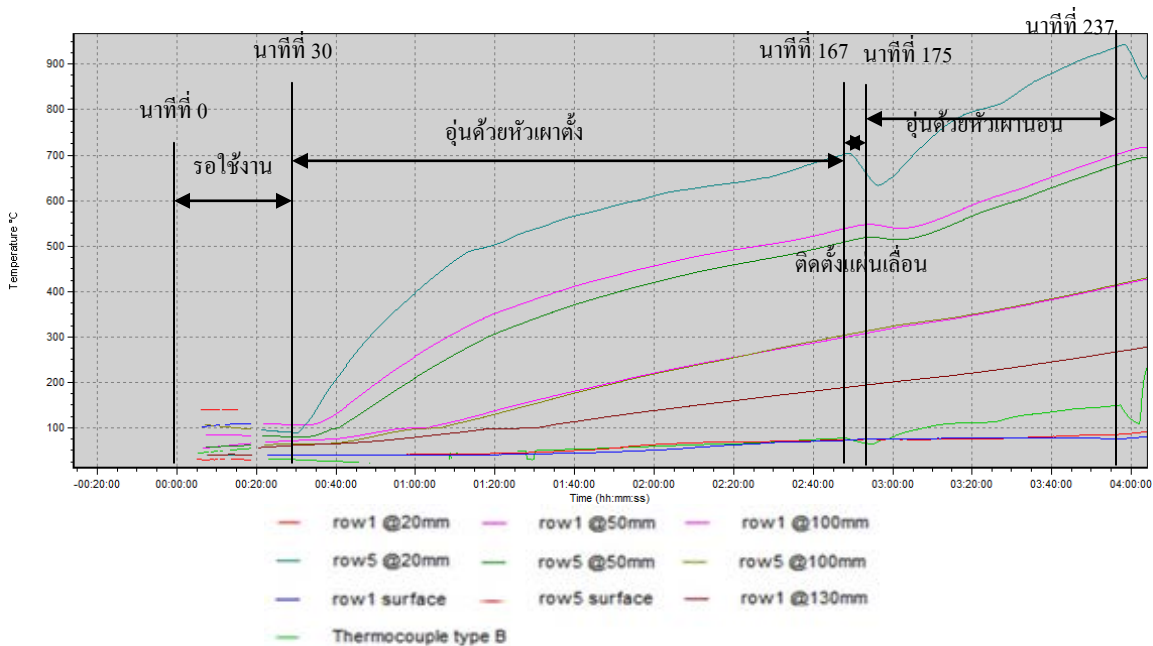
Heat No.	กิจกรรม	นาทีที่			อุณหภูมิน้ำเหล็ก (°C)
		เริ่มต้น	สิ้นสุด	เวลาที่ใช้ (ชั่วโมง)	
134865	เผาอน	1204	1235	0:31	1700 1680
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	1235	1241	0:06	
	Tapping	1241	1243	0:02	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1243	1246	0:03	
	รอ Casting	1246	1256	0:10	
	Casting	1256	1304	0:48	
	เท Slag ล้างรู	1304 1316	1316 1320	0:12 0:04	
134867	เผาอน	1320	1342	0:22	1677 1663
	ยกออกไปรอรับน้ำเหล็ก	1342	1350	0:08	
	Tapping	1350	1353	0:03	
	ยกไปวัดอุณหภูมิที่ CCM	1353	1355	0:02	
	รอ Casting Casting	1355 1357	1357 1395	0:02 0:38	

### 6.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดเบื้องต้น

ในส่วนนี้จะเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 6.5 เข้ามาอธิบายลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลในรอบการทำงานจริงๆ โดยจะแบ่งช่วงของการพิจารณาเป็นกระบวนการแต่ละกระบวนการ

#### 6.3.2.1 ช่วงการตั้งรอการใช้งาน

ช่วงการตั้งรอการใช้งานนับว่าเป็นช่วงเริ่มต้นของการเก็บข้อมูล เป็นช่วงที่เบ้ารับน้ำเหล็กเริ่มต้นที่จะใช้งาน และถูกตั้งทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องตลอดเวลาเพื่อรอเวลาเข้าไปทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ทดลอง แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการเก็บข้อมูลในรอบนี้นั้นไม่มีการเก็บข้อมูลในส่วนตรงนี้ แต่จากการทดลองเก็บข้อมูลในรอบแรกนั้น อุณหภูมิช่วงรอการใช้งานของทุกตำแหน่งจะมีอุณหภูมิ 30 °C



รูปที่ 6.9 ผลการตรวจวัดช่วงตำแหน่งการเตรียมเบ้ารับน้ำเหล็กด้วยการอุ่น

6.3.2.2 ช่วงเผาด้วยหัวเผาตั้ง

หลังจากที่ตั้งรกรการใช้งานเพื่อรอเวลาเข้ามาในสายงานนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กต้องมีการอุ่นเบื้องต้นเพื่อไล่ความชื้นออกจากเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งเป็นเวลาที่ 0 ถึง นาทีที่ 30 ในรูปที่ 6.9 ซึ่งการอุ่นเบื้องต้นเป็นการเผาเศษไม้ เศษกระดาษที่บรรจุอยู่ภายในของเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งเมื่อเผาไปนานๆ เศษไม้เหล่านั้นก็จะมากองอยู่ที่ก้นเบ้า ซึ่งจะใกล้กับอิฐแถวที่ 1 ทำให้อุณหภูมิที่ตำแหน่งเดียวกันของอิฐทนไฟต่างแถวกัน ดังเช่นจากกราฟจะพบว่าหากพิจารณาที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ของอิฐแถวที่ 1 และที่ 5 พบว่าที่ตำแหน่งอิฐแถวที่ 1 มีอุณหภูมิสูงกว่าอิฐแถวที่ 5 จากนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กก็จะถูกนำไปเผาด้วยหัวเผาตั้งตั้งแต่นาทีที่ 30 จนถึงนาทีที่ 167 จะพบว่าผลการวัดอุณหภูมิในช่วงนี้เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร พบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งอิฐแถวที่ 1 จะสูงกว่าตำแหน่งอิฐแถวที่ 5 ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิเริ่มต้นของการเผาไม่เท่ากันดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่เมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอิฐแถวที่ 5 จะมากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของอิฐแถวที่ 1 ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของกราฟที่มีการเข้าใกล้กันมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าเปลวไฟจากการเผาไหม้แบบตั้งฉากกับพื้น

นั้นเปลวไฟจะไปไม่ถึงกันเข้รับน้ำเหล็ก เนื่องจากเปลวไฟจะม้วนตัวขึ้นมาใช้ขึ้นตั้งจากกับผิวโลก เป็นผลทำให้ตำแหน่งอิฐแถวที่ 5 รับความร้อนได้มากกว่าอิฐแถวที่ 1 ซึ่งเป็นบริเวณกันเข้รับน้ำเหล็ก นอกจากนี้แล้วยังพบความไม่สม่ำเสมอในการเผาของเปลวไฟโดยใช้หัวเผาตั้ง ซึ่งชี้ให้เห็นว่าหัวเผาทำงานแบบต่อเนื่องได้ไม่ดี

#### 6.3.2.3 ช่วงการติดตั้งแผ่นเลื่อน (Sliding Gate)

ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่นำเข้รับน้ำเหล็กมาใส่แผ่นเลื่อนเพื่อเป็นตัวบังคับการ เปิด – ปิด ขณะถ่าน้ำเหล็กออกจากเข้รับน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ที่กระบวนการนี้จะต้องหยุดการเผาที่หัวเผาตั้ง โดยทั่วไปที่กระบวนการนี้จะใช้เวลาประมาณ 80 นาที แต่สำหรับการทดลองเก็บข้อมูลครั้งนี้ทางผู้ปฏิบัติงานกล่าวว่าเข้รับน้ำเหล็กจะเสียเวลาในการอุ่นด้วยหัวเผาอน ซึ่งเป็นกระบวนการถัดไป ดังนั้นในช่วงการติดตั้งแผ่นเลื่อนของการเก็บข้อมูลครั้งนี้ นั้น เป็นเพียงแต่การเคลื่อนย้ายเข้รับน้ำเหล็กจากหัวเผาตั้งมาสู่หัวเผาอน ซึ่งใช้เวลาประมาณ 7 นาทีเท่านั้น โดยจะพบว่าอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเข้รับน้ำเหล็กนั้นจะลดลง โดยที่ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับผิวด้านในเข้รับน้ำเหล็ก (ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร) จะมีผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากที่สุด และตำแหน่งที่ถัดเข้ามาจะค่อยๆ มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น

#### 6.3.2.4 ช่วงการอุ่นเข้รับน้ำเหล็กแบบนอนด้วยหัวเผาแบบธรรมดา

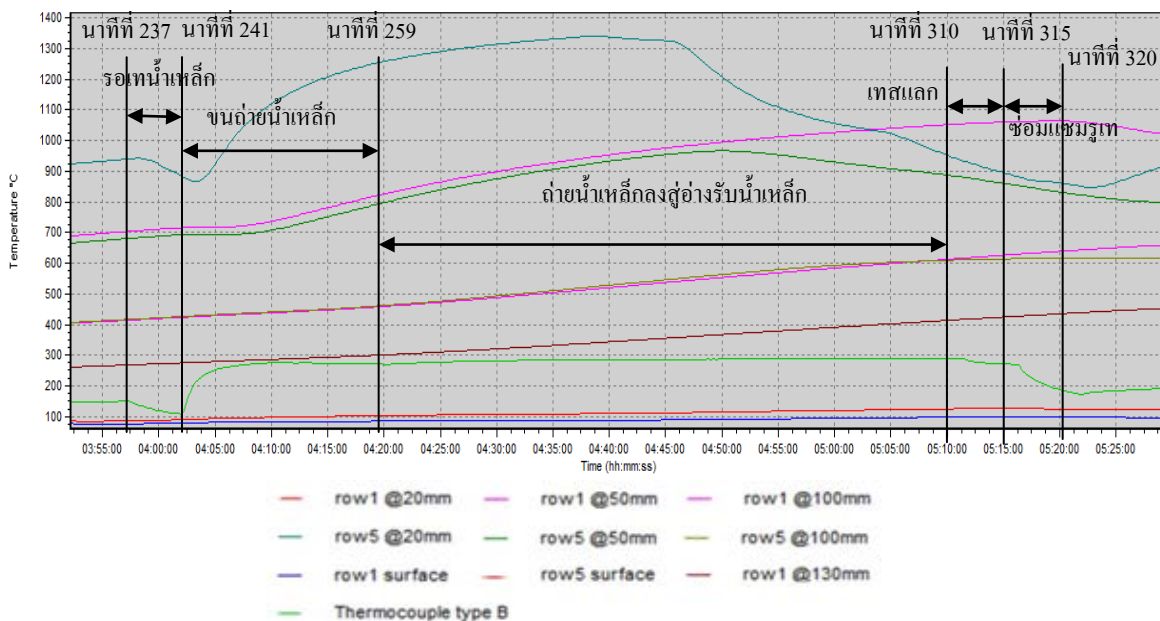
ช่วงนี้เป็นการอุ่นเพื่อให้เข้รับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิพอเหมาะกับการเทน้ำเหล็กเพื่อป้องกันไม่ให้อิฐทนไฟเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เร็วเกินไปจนเกิดความเสียหายจากความเค้นของอุณหภูมิ สำหรับการอุ่นด้วยหัวเผาอนแบบธรรมดานั้นจะอยู่ที่นาที่ที่ 175 – 237 ของรูปที่ 6.9 สำหรับการอุ่นด้วยหัวเผาอนแบบธรรมดาจะเห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในอิฐทนไฟจะมีอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการให้ความร้อนแก่เข้รับน้ำเหล็ก นอกจากนี้หากพิจารณาที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรของอิฐแถวที่ 1 และ แถวที่ 5 จะมีผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการอุ่นด้วยหัวเผาอนแบบธรรมดานั้นเปลวไฟสามารถเข้าถึงส่วนที่เป็นกันของเข้รับน้ำเหล็กได้ดีกว่าการ

อุ่นด้วยหัวเผาตั้ง ดังนั้นการอุ่นด้วยหัวเผาแบบนี้จะเป็นการเผาที่ทำให้การกระจายตัวของอุณหภูมิสม่ำเสมอขึ้นตลอด

6.3.2.5 ช่วงการรอการเทน้ำเหล็กออกจากเตาหลอม

เมื่อเข้รับน้ำเหล็กถูกอุ่นด้วยหัวเผาแบบธรรมดาภายในระยะเวลาหนึ่งแล้ว (ประมาณ 2 ชั่วโมง) เข้รับน้ำเหล็กก็จะถูกนำมาตั้งรอการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า ช่วงนี้เป็นช่วงที่เข้รับน้ำเหล็กไม่ได้รับความร้อนจากหัวเผา แต่จะมีการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศจึงทำให้เข้รับน้ำเหล็กมีอุณหภูมิลดลง ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่อยู่ทีนาที่ที่ 237 – 241 ของรูปที่ 6.10

สำหรับอุณหภูมิที่วัดโดยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B นั้น ช่วงก่อนหน้านี้ทั้งหมดจะเป็นอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่ตำแหน่งผิวด้านในของอิฐทนไฟ ซึ่งช่วงที่ยังไม่สัมผัสกับน้ำเหล็กนั้นเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B ที่ฝังไว้ภายในจะแสดงอุณหภูมิภายในเข้รับน้ำเหล็ก



รูปที่ 6.10 ผลการตรวจวัดรอบการทำงานที่ 1 ช่วงหลังจากอุ่นเสร็จแล้ว

### 6.3.2.6 ช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็ก

ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่น้ำเหล็กจากเตาหลอมจะถูกเทเข้ามาอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นที่เรียบร้อยแล้วจะเป็นที่น่าสังเกตว่าช่วงนี้ถึงแม้ว่าจะมีน้ำเหล็กเต็มเบ้ารับน้ำเหล็กแล้ว แต่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งห่างจากเบ้ารับน้ำเหล็กออกไปจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทันทีทันใด เนื่องจากความร้อนจะค่อยๆ ถูกถ่ายเทจากตำแหน่งที่สัมผัสน้ำเหล็กสู่ตำแหน่งที่อยู่ห่างออกไป แต่สำหรับที่ตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับน้ำเหล็กจะพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ค่อนข้างที่จะรวดเร็ว นอกจากนี้หากสังเกตที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ของอิฐที่แถวที่ 1 และ 5 แล้วพบว่า การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะใกล้เคียงกัน โดยช่วงนี้จะเป็นเวลาที่นาทิตี 241 – 259 ของรูปที่ 6.10

### 6.3.2.7 ช่วงการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

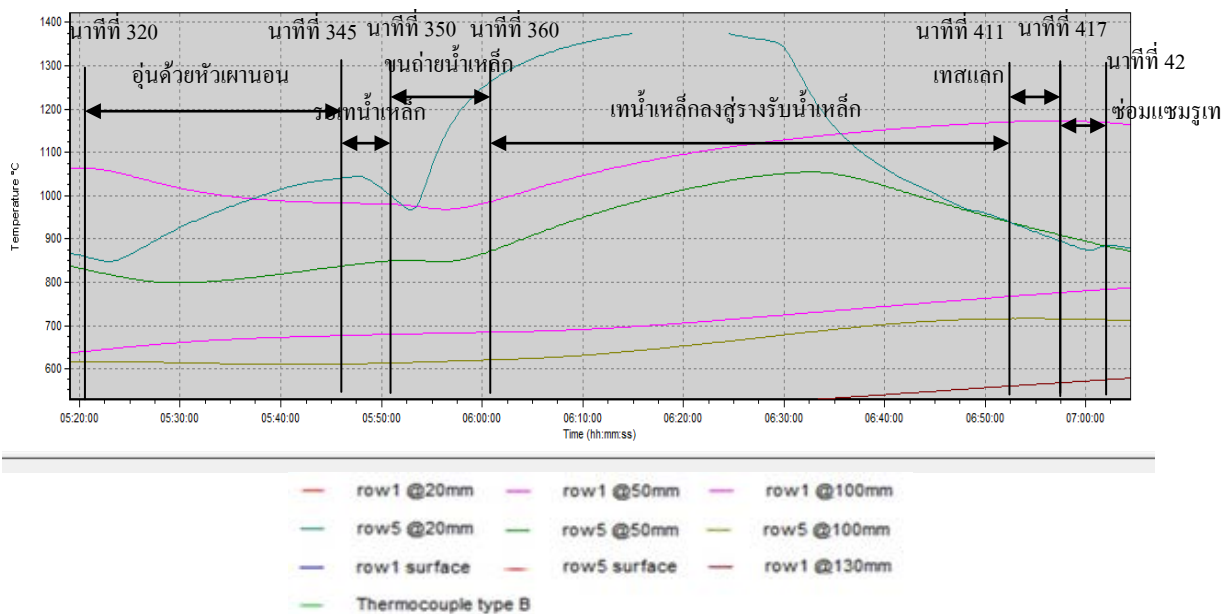
ช่วงนี้จะเป็นช่วงที่มีการถ่ายน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก เพื่อนำเหล็กไปหล่อแบบต่อเนื่อง ที่กระบวนการนี้เมื่อเวลาผ่านไปน้ำเหล็กจะค่อยๆ ลดระดับความสูงลงเรื่อยๆ จนเหลือระดับน้ำเหล็กประมาณ 450 มิลลิเมตร หรือประมาณอิฐแถวที่ 2 [4] จากนั้นเบ้ารับน้ำเหล็กจึงหยุดการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก เป็นผลทำให้อุณหภูมิของอิฐที่ตำแหน่งอิฐแถวที่ 1 นั้นมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนสิ้นสุดกระบวนการนี้ แต่สำหรับอิฐแถวที่ 5 นั้นเมื่อน้ำเหล็กลดระดับต่ำกว่าอิฐแถวที่ 5 แล้วอุณหภูมิของอิฐแถวที่ 5 ที่ตำแหน่งต่างๆ จะลดลงเนื่องจากไม่มีการถ่ายเทความร้อนจากน้ำเหล็กสู่เบ้ารับน้ำเหล็กอีกต่อไป แต่จะเปลี่ยนไปเป็นการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวปิดแทนเป็นผลทำให้อุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตรลดต่ำลง และจะส่งผลต่อการลดลงของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ เช่นเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อสังเกตที่ตำแหน่งอิฐแถวที่ 5 ที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตรของรูปที่ 6.10 พบว่าอุณหภูมิจะลดลง โดยดูเข้าสู่ค่าๆ หนึ่ง ซึ่งเป็นผลเนื่องจากตอนถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กนั้นจะมีการปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก แต่หากมีการเปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็ก (สังเกตจากช่วงปลายของช่วงการทำงานนี้) การตกของอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กจะมีลักษณะดูเข้าไปสู่อุณหภูมิกค่าที่ต่ำกว่าเดิม ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะไม่พบในรอบการ 134855, 134857, 134859 และ 134863 เนื่องจากมีการเปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กขณะถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กเพื่อทำการวัดอุณหภูมิโดยการจุ่มวัดขณะถ่ายน้ำเหล็ก



จาก รูปที่ 6.1 แสดงผลการตรวจวัดในรอบที่ 2 ของการทำงานพบว่าลักษณะการตกของ อุณหภูมิที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตรที่ตำแหน่งอิฐแถวที่ 5 พบว่าจะมีการตกลงไปสู่อุณหภูมิเดียวกันนั้น เนื่องจากไม่มีการปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

6.3.2.8 ช่วงทดสอบ

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.3.2.7 ว่าช่วงการเทน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กจะเทน้ำเหล็กให้เหลือแค่ ประมาณอิฐแถวที่ 2 เพื่อป้องกันสแลกที่ลอยอยู่ที่ผิวด้านบนของน้ำเหล็กปนไปกับเหล็กตอนหล่อ แบบต่อเนื่อง เนื่องจากน้ำเหล็กที่เหลือภายในเบ้ารับน้ำเหล็กมีปริมาณน้อย ดังนั้นในช่วงนี้ที่ตำแหน่งอิฐ แถวที่ 1 ที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร จะยังมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องแต่แนวโน้มค่อนข้างคงที่ ดัง รูปที่ 6.10 ในขณะที่เดียวกันที่อิฐแถวที่ 5 ก็จะลดลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากไม่ได้มีการสัมผัสกับน้ำเหล็ก ช่วงนี้จะใช้เวลาประมาณ 4-5 นาที ต่อ 1 รอบการทำงาน



รูปที่ 6.11 ผลการตรวจวัดรอบการทำงานที่ 2 (รอบที่ 134855) ที่ไม่มีการปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กขณะ เทน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก

### 6.3.2.9 ช่วงซ่อมแซมรูเท้าน้ำเหล็ก

ช่วงนี้จะเป็นช่วงหลังจากทดสอบเรียบร้อยแล้ว นั่นหมายความว่าขณะนี้เข้าน้ำเหล็กจะว่างเปล่า ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในฉนวนที่ตำแหน่งที่ใกล้กับน้ำเหล็กของอิฐแถวที่ 1 จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ของอิฐแถวที่ 1 ยังคงเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากความร้อนจะค่อยๆ ถ่ายเทไปสู่ตำแหน่งที่อยู่ห่างออกไป จากนั้นก็จะค่อยๆ ลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 6.10

ที่กระบวนการนี้ตรงรูถ่ายน้ำเหล็กจะมีน้ำเหล็กที่แข็งตัวมาอุดรูไว้ จึงจำเป็นต้องใช้ออกซิเจนล้างรูเพื่อทำให้น้ำเหล็กที่แข็งตัวเหล่านั้นหลุดออกไป ก่อนจะเคลื่อนย้ายไปสู่การอุ่นในรอบต่อไป

สำหรับการอุ่นเข้าน้ำเหล็กในรอบถัดไปเกิดหลังจากซ่อมแซมรูเท้าน้ำเหล็กเป็นที่เรียบร้อยแล้ว โดยปกติเข้าน้ำเหล็กถูกนำไปอุ่นด้วยหัวเผาแบบรีเจนเนอเรเตอร์ต่อไป เพื่อเป็นการประหยัดพลังงาน แต่สำหรับสำหรับผลการเก็บข้อมูลในครั้งนี้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรเตอร์ของทางโรงงานไม่สามารถใช้ได้เนื่องจากวาล์วการจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงได้รับความเสียหาย แต่อย่างไรก็ตามรอบการทำงานของเข้าน้ำเหล็กก็ต้องดำเนินต่อไป เราจึงไม่สามารถรอเพื่อซ่อมแซมหัวเผาแบบรีเจนเนอเรเตอร์ได้ ดังนั้นรอบการทำงานถัดไปก่อนรับน้ำเหล็ก เข้าน้ำเหล็กก็จะถูกนำมาอุ่นด้วยหัวเผาแบบธรรมดาแทน

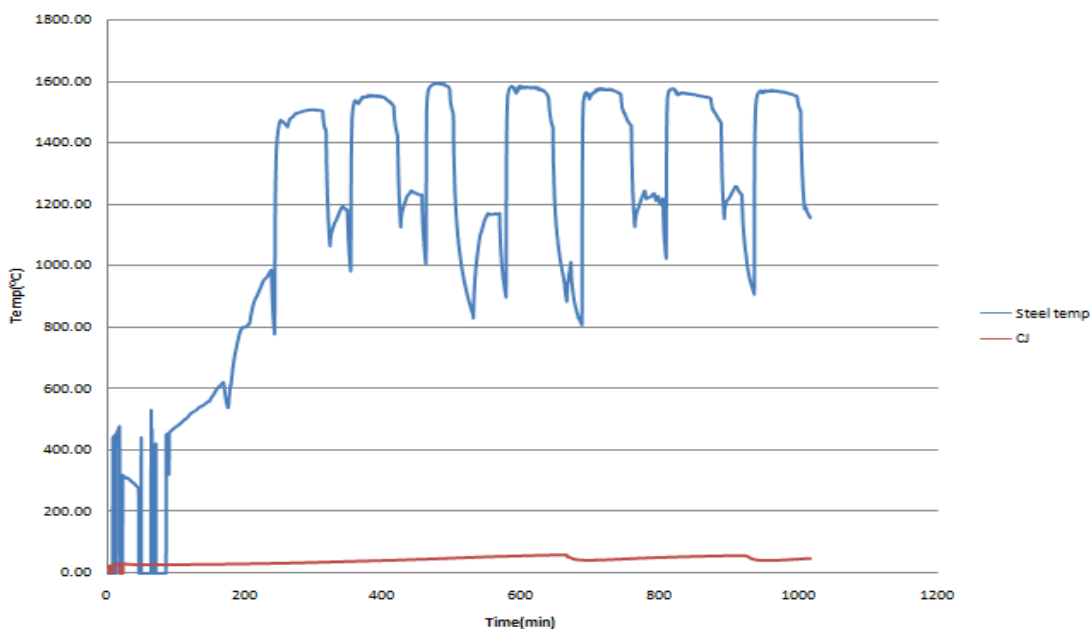
หากพิจารณาในรูปที่ 6.8 พบว่าบางรอบการทำงานเช่นรอบการทำงานที่ 3 จะมีช่วงเวลาในการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่เข้าน้ำเหล็กที่สั้นมากทั้งนี้จะเป็นผลเนื่องจาก ทาง CCM จะต้องเปลี่ยนอ่างรับน้ำเหล็กไปเป็นอันใหม่ ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการเปลี่ยนอ่างรับน้ำเหล็กด้วย จึงจำเป็นที่จะต้องถ่ายน้ำเหล็กโดยใช้เวลาที่สั้น แต่เมื่อพิจารณาเวลาทั้งกระบวนการในรอบการทำงานแล้วพบว่าจะกินเวลาเท่าๆ กัน

### 6.3.3 ผลการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด B

เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์การทดลองทำให้เราต้องใช้ Data Logger ชนิด K มาเก็บข้อมูลจากผลการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด B นั้นทำให้ค่าผลที่ได้จากรูปที่ 6.8 นั้นต่ำกว่าปกติ ดังนั้นจึง

ต้องเปลี่ยนข้อมูลเหล่านั้นให้เป็นผลของข้อมูลชนิด B ก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งเมื่อปรับเปลี่ยนค่าแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ โดยลักษณะการเปลี่ยนข้อมูลจากชนิด K เป็น B แสดงใน Appendix B ซึ่งจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจุดอ้างอิง (CJ) เข้ามาช่วยในการเปลี่ยนเป็นข้อมูลชนิด B

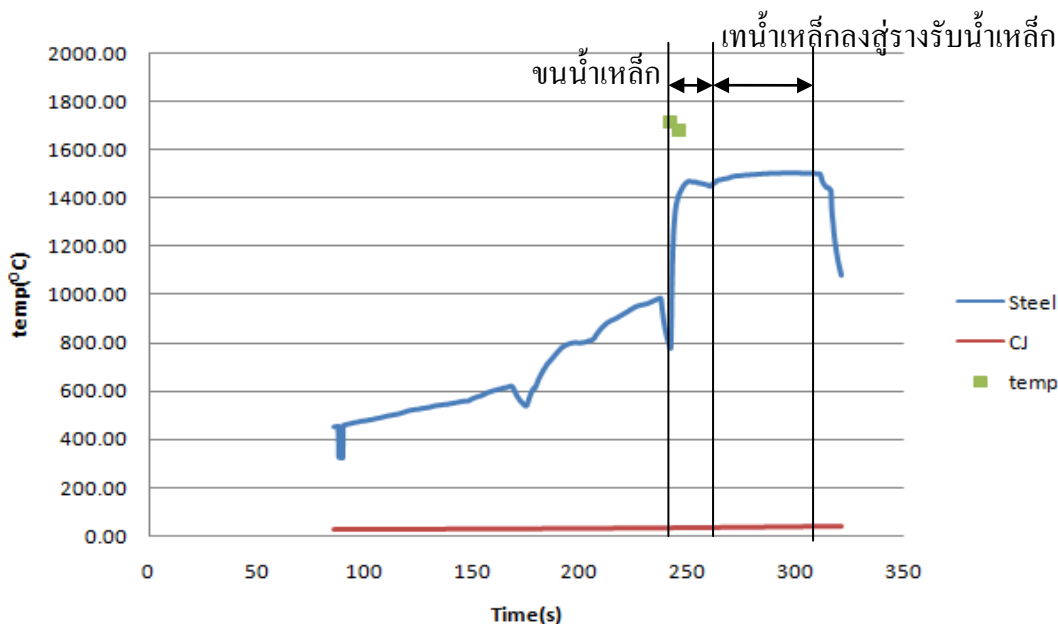
เมื่อสังเกตจากรูปที่ พบว่าช่วงที่ยังไม่มีน้ำเหล็กอยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กซึ่งก็คือช่วงที่ยังไม่มีการบรรจุน้ำเหล็กลงสู่เบ้ารับน้ำเหล็ก ผลการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B จะแสดงผลของอุณหภูมิของหัวเผา หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ผิวอิฐทนไฟตำแหน่งที่สัมผัสกับน้ำเหล็ก แต่เมื่อรับน้ำเหล็กจะแสดงอุณหภูมิของน้ำเหล็กตลอดการทำงานตลอดเวลาการสัมผัสกับน้ำเหล็ก แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าอุณหภูมิที่วัดได้นั้นจะค่อนข้างต่ำกว่าความเป็นจริงอยู่เล็กน้อย เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B ก่อนนำไปใช้งานจะต้องถูกป้องกันด้วยเซรามิกซ์ซึ่งมีความหนา 10, 6, 0.5 มิลลิเมตร แต่เมื่อดูผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแล้วพบว่าผลจากการมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ค่อนข้างเร็วดังนั้นเซรามิกซ์ที่ใช้งานมีผลต่อการวัดน้อย นอกจากนี้ในการฝังต้องฝังเข้าไปในเนื้ออิฐเพื่อป้องกันความเสียหายจากการหมุนวนหรือเคลื่อนที่ของน้ำเหล็กขณะใช้งาน ดังนั้นอุณหภูมิที่วัดได้ในช่วงรอบแรกๆ ของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กจึงน่าจะเป็นอุณหภูมิฟิล์มระหว่างผิวเบ้ารับน้ำเหล็กกับน้ำเหล็ก



รูปที่ 6.12 ผลของการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B เมื่อเปลี่ยนแปลงข้อมูลจากชนิด K เป็นชนิด B

จากรูปที่ พบว่าอุณหภูมิจากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด B ช่วงรับน้ำเหล็กและถ่ายน้ำเหล็ก พบว่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด B และการตรวจวัดจากทางโรงงานมีความแตกต่างกันพอสมควร ทั้งนี้เป็นผลจากอุณหภูมิของเบ้ารับน้ำเหล็กยังต่ำอยู่เมื่อสัมผัสกับน้ำเหล็กและอุณหภูมิที่วัดได้นั้นจะเป็นอุณหภูมิฟิล์มดั่งที่ได้กล่าวมาแล้ว เมื่อพิจารณาในช่วงขนน้ำเหล็กจะพบว่าอุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นแล้วค่อยๆ ลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากช่วงแรกของการเทน้ำเหล็กนั้นน้ำเหล็กยังมีการหมุนวนจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปการหมุนวนของน้ำเหล็กจะค่อยๆ ลดน้อยลง โดยลักษณะการหมุนวนคือ น้ำเหล็กบริเวณกลางเบ้ารับน้ำเหล็กที่มีอุณหภูมิสูงจะถูกเคลื่อนที่เข้าไปถ่ายเทความร้อนให้กับผิวถัง เมื่อเวลาผ่านไปการหมุนวนเช่นนี้จะลดลงตามที่ Xia และ Ahokainen [12] ได้ศึกษาไว้ เมื่อการหมุนวนลดน้อยลงนั้นทำให้อุณหภูมิที่วัดได้จะค่อยๆ ลดน้อยลงเช่นเดียวกัน ต่อมาเมื่อเบ้ารับน้ำเหล็กเริ่มถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก น้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กก็เริ่มที่จะหมุนวนใหม่จึงทำให้อุณหภูมิน้ำเหล็กที่บริเวณกลางถังที่มีอุณหภูมิสูงไปถ่ายเทความร้อนให้แก่เบ้ารับน้ำเหล็ก อุณหภูมิจากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด B ก็จะเริ่มเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเวลาผ่านไปเรื่อยๆ นั้นอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเหล็กจะลดลงเป็นผลทำให้อุณหภูมิที่วัดได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนสิ้นสุดการเทน้ำเหล็ก [17]

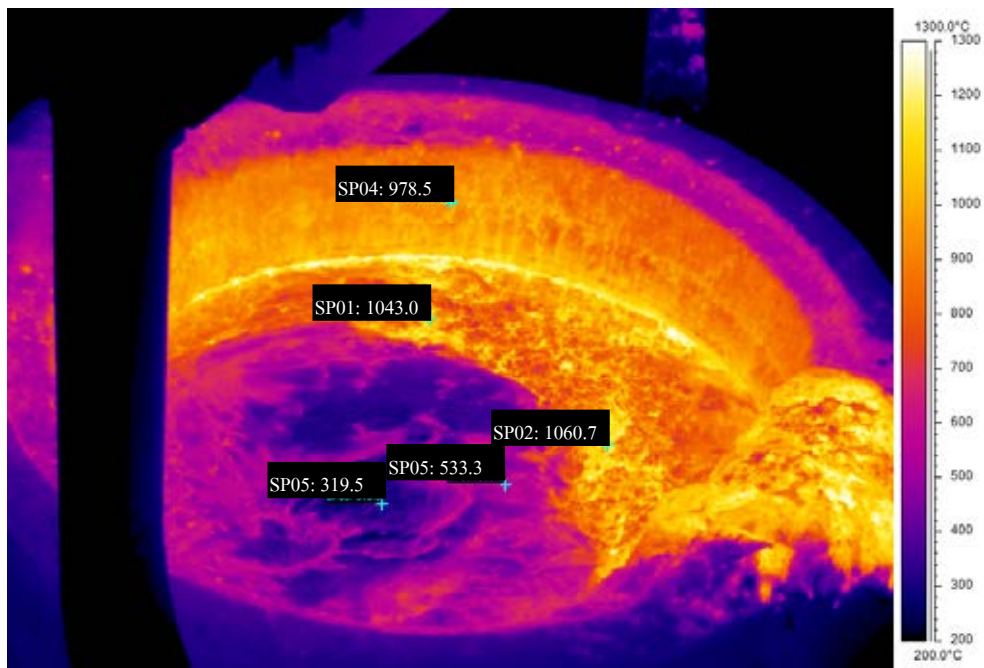
สำหรับรอบการทำงานที่สองจะพบว่าอุณหภูมิที่วัดได้นั้นเพิ่มสูงขึ้นอาจจะเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิของผนังเบ้าเพิ่มสูงขึ้นเลยทำให้อุณหภูมิฟิล์มที่วัดได้เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อใช้งานไประยะหนึ่งแล้วผลของการวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กจะมีความแม่นยำมากขึ้น



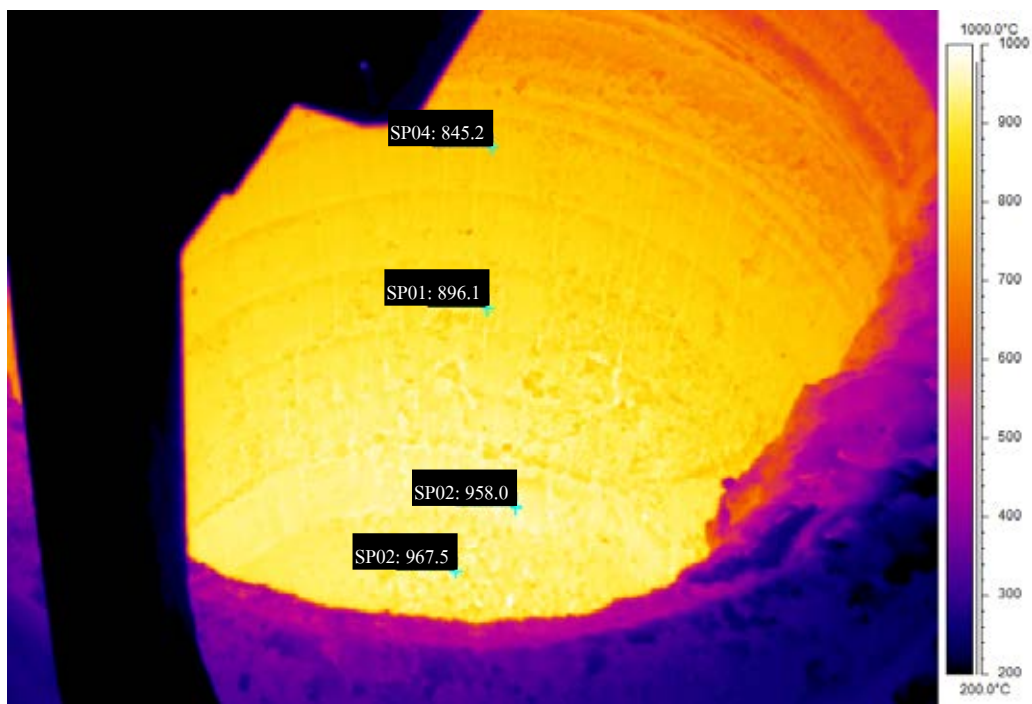
รูปที่ 6.13 ผลการตรวจวัดของอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B ในรอบการทำงานที่ 1 เปรียบเทียบกับผลการจิมวัดทางโรงงาน

#### 6.3.4 ผลการตรวจวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อน

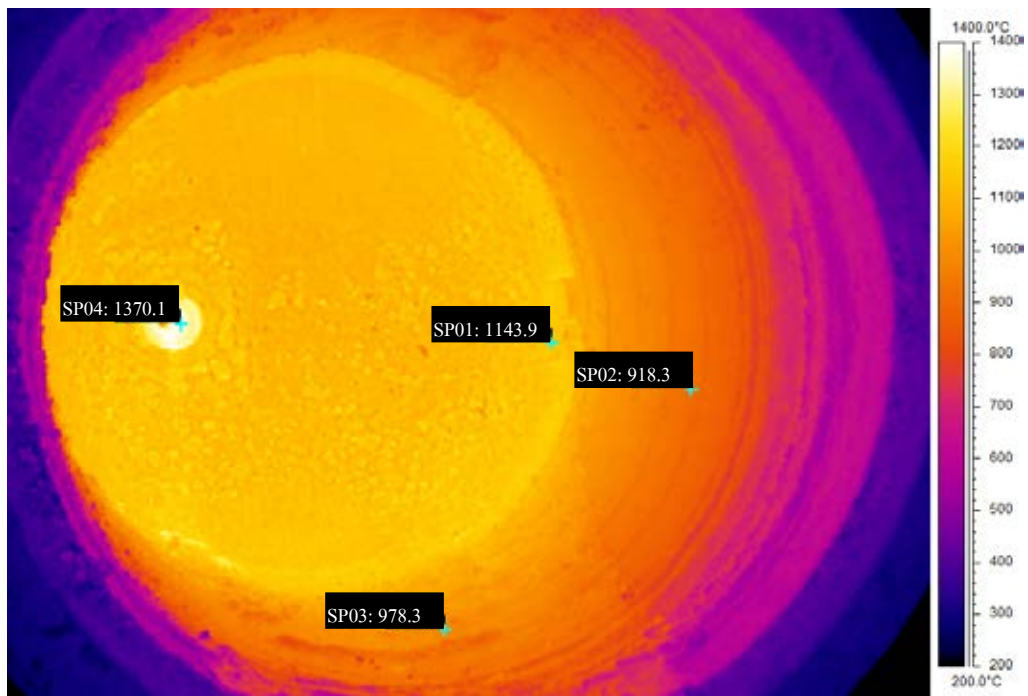
สำหรับผลการตรวจวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนนั้นจะใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะของอุณหภูมิพื้นผิวต่างๆ ที่ต้องนำไปใช้งานและไม่สามารถวัดได้ด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ฝังไว้ในเบ้ารับน้ำเหล็ก ไม่ว่าจะเป็นช่วงก่อนรับน้ำเหล็ก หรือหลังรับน้ำเหล็กแล้ว โดยจากการตรวจวัดด้วยกล้องถ่ายภาพความร้อนสิ่งที่ต้องการคือ อุณหภูมิผิวสแลก อุณหภูมิพื้นผิวที่ตำแหน่งต่างๆ จากแผนภาพความร้อนที่ถ่ายออกมาพบว่า ผิวสแลกนั้นจะมีอุณหภูมิที่ไม่สูงมากนัก และมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กประมาณ  $900^{\circ}\text{C}$  [4] นอกจากนี้สามารถแสดงภาพถ่ายความร้อนดังรูปที่ 6.14 - 6.17



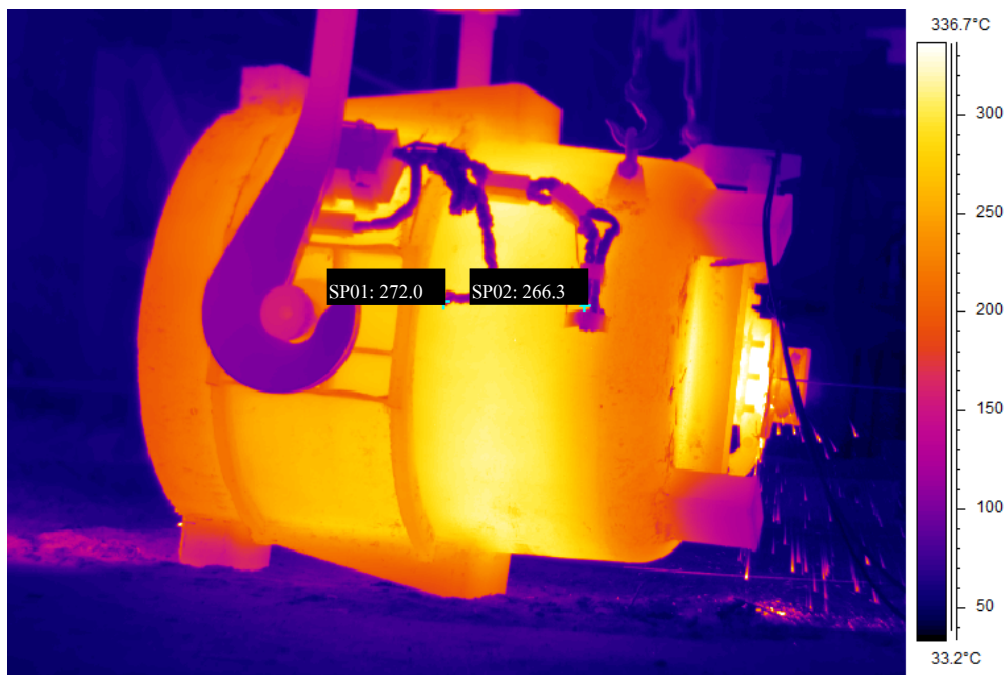
รูปที่ 6.14 ภาพถ่ายความร้อนอุณหภูมิผิวสแลก ช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็ก



รูปที่ 6.15 ภาพถ่ายความร้อนของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กขณะรอการเทน้ำเหล็ก



รูปที่ 6.16 ภาพถ่ายความร้อนของเป้ำรับน้ำเหล็กช่วงการซ่อมแซมเป้ำรับน้ำเหล็ก



รูปที่ 6.17 ภาพถ่ายความร้อนของอุณหภูมิผิวเป้ำรับน้ำเหล็ก ณ ตำแหน่งที่มีการวัดอุณหภูมิผิว

### 6.3.5 การตรวจวัดโดยการจุ่มวัดอุณหภูมิขณะทำการถ่ายน้ำเหล็กจากเข้าสู่อ่างรับน้ำเหล็ก

โดยทั่วไปในการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กของทางโรงงานจะตรวจวัดโดยการจุ่มตัวเทอร์โมคัปเปิ้ลวัดอุณหภูมิก่อนการเทน้ำเหล็กที่เตาหลอม 1 ครั้ง และตรวจวัดด้วยวิธีเดิมอีก 1 ครั้ง เมื่อรอการถ่ายน้ำเหล็ก ดังรูปที่ 7 ที่จุดสีเขียวแสดงอุณหภูมิที่ได้จากการจุ่มวัดทั้ง 2 จุด แต่สำหรับการตรวจวัดในครั้งนี้จำเป็นต้องทราบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กตลอดช่วงการทำงาน (ช่วงการขนน้ำเหล็ก และถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก) เพื่อนำไปเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำเหล็กด้วยการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B แต่สำหรับการเก็บข้อมูลในครั้งก่อนหน้านี้ที่มีการเก็บข้อมูลน้ำเหล็กตลอดช่วงการทำงานพบว่าเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B ที่ฝังลงไปให้อุณหภูมิในนั้นจะสามารถวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กได้เพียงแค่ 7 นาที จากนั้นสัญญาณการตรวจวัดก็หายไป ทำให้สำหรับการเก็บข้อมูลในครั้งนี้จำเป็นต้องมีแผนสำรองสำหรับการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กตลอดทั้งกระบวนการ ซึ่งแผนสำรองที่กล่าวถึงนั้นคือ การจุ่มวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลของทางโรงงานในขณะที่ถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กทุกๆ 5 นาที สำหรับการเก็บข้อมูลในรอบ 134849 โดยสามารถจุ่มวัดอุณหภูมิในช่วงนี้ได้ก็ต่อเมื่อไม่มีการปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กน้ำเหล็กขณะเทน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ซึ่งจะแตกต่างจากการทำงานจริงของทางโรงงานที่มีการปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กในขณะที่ถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 6.3.2.7

เนื่องจากการตรวจวัดในขณะที่มีการถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก ปริมาณน้ำเหล็กที่เหลืออยู่ในเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นจะปริมาณลดลงด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อความสูงของน้ำเหล็กภายในเบ้ารับน้ำเหล็กลดลงด้วยเช่นเดียวกัน นอกจากนี้เมื่อความสูงของน้ำเหล็กต่ำมากทำให้การตรวจวัดด้วยการจุ่มวัดนั้นมีความยุ่งยาก และส่งผลต่อความปลอดภัยของตัวผู้ปฏิบัติงาน จึงทำให้การจุ่มวัดนั้นไม่ได้ตลอดช่วงระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็ก

นอกจากนี้จากการปฏิบัติงานจริงนั้นในขณะที่จุ่มวัดจะมีน้ำเหล็กส่วนหนึ่งปะทุขึ้นมาในขณะที่มีการจุ่มวัด ดังรูปที่ 8. ดังนั้นจึงทำการจุ่มวัดทุก 10 นาที เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน โดยจากการ



เก็บข้อมูลจริงจะเก็บข้อมูลจากการจี้มวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กทุก 10 นาที ที่รอบการทำงาน 134851, 134853, 134863 และ 134865



ก.



ข.

รูปที่ 6.18 ความอันตรายจากการจี้มวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กขณะถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก  
ก.ก่อนจี้มวัดอุณหภูมิน้ำเหล็ก ข.หลังจากจี้มวัดอุณหภูมิน้ำเหล็ก

## บทที่ 7

### ผลการศึกษาวิจัย

สิ่งที่ต้องการในการสร้างระบบควบคุมที่ออกแบบ คือการทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่กำลังพิจารณาให้มีความถูกต้องแม่นยำและมีอุณหภูมิเหมาะสมแก่การส่งน้ำเหล็กไปยังกระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหาย และเพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเราสามารถที่จะทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กได้ถูกต้อง เราจึงต้องเปรียบเทียบผลการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กกับผลการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กจริง

สำหรับการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กนั้นสามารถกระทำได้โดยการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็ก โดยจากวัฏจักรการทำงานจริงนั้น เบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็กมีการถ่ายเทความร้อนให้แก่กันและกันอยู่เกือบตลอดเวลา ดังนั้นเราสามารถทราบสภาวะทางความร้อนของน้ำเหล็กได้ เมื่อทราบสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็ก

สภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กสามารถหาได้จากการตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเบ้ารับน้ำเหล็กของอิฐแถวที่ 1-9 ในวัฏจักรการทำงานจริง แต่ในด้านของการนำไปศึกษาหรือไปใช้งานแล้วการตรวจวัดอุณหภูมิทุกจุดของเบ้ารับน้ำเหล็กแทบจะเป็นไปไม่ได้ เนื่องจากปัญหาด้านอุปกรณ์การตรวจวัดหรือความสะดวกในการทำงานของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นเพื่อให้ทราบสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เกิดขึ้นจริงๆ เราจึงทราบได้แค่บางจุดที่ทำการตรวจวัด ซึ่งในที่นี้ได้แก่ตำแหน่ง 20 50 และ 100 มิลลิเมตร ของอิฐท่อนไฟแถวที่ 1 และ 5 ของเบ้ารับน้ำเหล็กเท่านั้น ตามที่ได้นำเสนอมาแล้วเท่านั้น

นอกจากทราบสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่เกิดขึ้นจริงๆ แล้ว สิ่งที่ต้องการอีกอย่างก็คือการทำนายสิ่งที่ยังไม่ได้เกิดขึ้นจริงๆ เพื่อบอกอุณหภูมิน้ำเหล็กที่สามารถเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าล่วงหน้า แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาทำนายสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กได้โดยการจำลองข้อมูลที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดให้ตรงกับ

ผลการตรวจวัดจริงที่ได้มา จากเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของซัซวิสต์ วุฒิศิริศาสตร์[4] เพื่อทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กนั้นพบว่าเมื่อผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่งแล้วจะมีผลของความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำในการทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็กด้วยเช่นกัน เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทำนายสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กมากขึ้น การนำข้อมูลจากผลการตรวจวัดมาปรับแก้ในแบบจำลองถือเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้เพื่อให้สภาวะเริ่มต้นของการเริ่มทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กมีความแม่นยำมากขึ้น

ดังนั้นในบทนี้จึงเป็นการแสดงผลของการนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรของอิฐแถวที่ 1 และ 5 เพื่อทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เพียงพอสำหรับการถ่ายเทความร้อนทั้งกระบวนการ โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายให้เกิดขึ้นต่อกระบวนการผลิต ด้วยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นำเสนอไปแล้วในหัวข้อก่อนหน้านี้

### 7.1 ผลการจำลองตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากที่ได้กล่าวมาแล้วแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นมาแบ่งออกเป็น 5 กระบวนการคือ

1. กระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก
2. กระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า
3. กระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็ก
4. กระบวนการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก
5. กระบวนการขนสแลกไปเททิ้ง

สำหรับการนำข้อมูลจากการทดลองเข้ามาช่วยปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะใช้ข้อมูลตำแหน่งที่ 50 มิลลิเมตร ของอิฐแถวที่ 1 และอิฐแถวที่ 5 เนื่องจากพิจารณาเห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่ตำแหน่งนี้จะสามารถใช้งานได้ตลอดทั้งวัฏจักรการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็ก และอยู่ไม่ไกลจากน้ำเหล็กจนเกินไปทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรวดเร็วพอสมควร โดยที่ข้อมูลจากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลของอิฐแถวที่ 1 นั้นถือว่าเป็นข้อมูลที่ได้จากการฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ก้นของเบ้า

รับน้ำเหล็ก และข้อมูลที่ได้จากอิฐแถวที่ 5 คือข้อมูลที่ได้จากการฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลที่บริเวณผิวด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็กทั้งหมด

การแทนข้อมูลที่ตำแหน่งที่ 50 มิลลิเมตร จะมีการแทนไปในช่วงของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ช่วงกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กและกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า เนื่องจากเป็นกระบวนการก่อนการรับน้ำเหล็ก สำหรับวัฏจักรการทำงานในช่วงของการทดสอบและซ่อมแซมซึ่งเป็นวัฏจักรในช่วงหลังการถ่ายน้ำเหล็กเสร็จแล้วและเตรียมตัวที่จะนำไปอุ่นต่อไปก็มีการแทนข้อมูลจากการตรวจวัดเช่นเดียวกัน

สำหรับในการจำลองสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กนั้น เบ้ารับน้ำเหล็กจะมีขนาดดังรูปที่ 3.1 และค่าสมบัติต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 7.1 โดยการกำหนดให้อุณหภูมิอากาศภายนอกคงที่ที่ 35 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณสภาวะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็ก [4]

สมบัติ	รูปตัวแปร	ค่า	อ้างอิง
<b>อิฐทนไฟ</b>			
ค่าการนำความร้อน	$k_{re}$	2.0 – 2.2 $W/m \cdot K$	[Material data sheet][23]
ความหนาแน่น	$\rho_{re}$	2750 $kg/m^3$	[Material data sheet][23]
ค่าความร้อนจำเพาะ	$c_{p,re}$	700 – 1300 $J/kg \cdot K$	Fruehan et al. [21]
ค่าการเปล่งรังสี	$\epsilon_{re}$	0.9	ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น [2]
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว	$h_{re}$	25 $W/m^2 \cdot K$	ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น [2]
<b>เปลือกเหล็ก</b>			
ค่าการนำความร้อน	$k_{st}$	45 $W/m \cdot K$	ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น [2]
ความหนาแน่น	$\rho_{st}$	7800 $kg/m^3$	ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น [2]
ค่าความร้อนจำเพาะ	$c_{p,st}$	784 $J/kg \cdot K$	Liu et al. [22]
ค่าการเปล่งรังสี	$\epsilon_{re}$	0.8	Fruehan et al. [21]

ตารางที่ 7.1 แสดงค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กและน้ำเหล็ก [4] (ต่อ)

สมบัติ	รูปตัวแปร	ค่า	อ้างอิง
<u>น้ำเหล็ก</u>			
ค่าความร้อนจำเพาะ	$c_{p,ls}$	$842 J/kg \cdot K$	Fredman& Saxen[9]
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิว	$h_{ls}$	$500 W/m^2 \cdot K$	ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น [2]

สำหรับผลการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะนำเสนอในส่วนต่อไป เป็นการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เวลาในแต่ละกระบวนการเป็นเวลากการทำงานจริงของเบ้ารับน้ำเหล็กในรอบการตรวจวัดนั้นๆ เพื่อสอบเทียบผลการประมาณค่าสถานะจากการใช้แบบจำลองที่สร้างขึ้นกับผลการตรวจวัดจริง โดยจะดูผลของการแจกแจงอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก และอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เกิดขึ้น

#### 7.1.1 ผลการจำลองระหว่างกระบวนการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก

เบ้ารับน้ำเหล็กที่ถูกนำมาอุ่นด้วยหัวเผา นั้น มาจาก 2 ลักษณะคือ 1. เบ้ารับน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใช้งาน โดยถูกนำมาอุ่นก่อนการใช้งาน และ 2. เบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านกระบวนการใช้งานมาแล้วจะถูกนำมาอุ่นเพื่อรอการเทน้ำเหล็กในรอบถัดไป ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการนี้ จะมีการรับข้อมูลจริงจากการวัดที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร จากการทดลองเข้ามาด้วย นอกจากนี้สิ่งที่ต้องใส่เข้าไปในแบบจำลองนี้คืออุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ ซึ่งสามารถอ้างอิงได้จากผลการทดลองของศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น[2] โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาหาความสัมพันธ์ใหม่สำหรับการการอุ่นด้วยหัวเผาแบบนอน สำหรับเบ้ารับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว และเบ้ารับน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านกระบวนการใช้งานมาโดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7.2

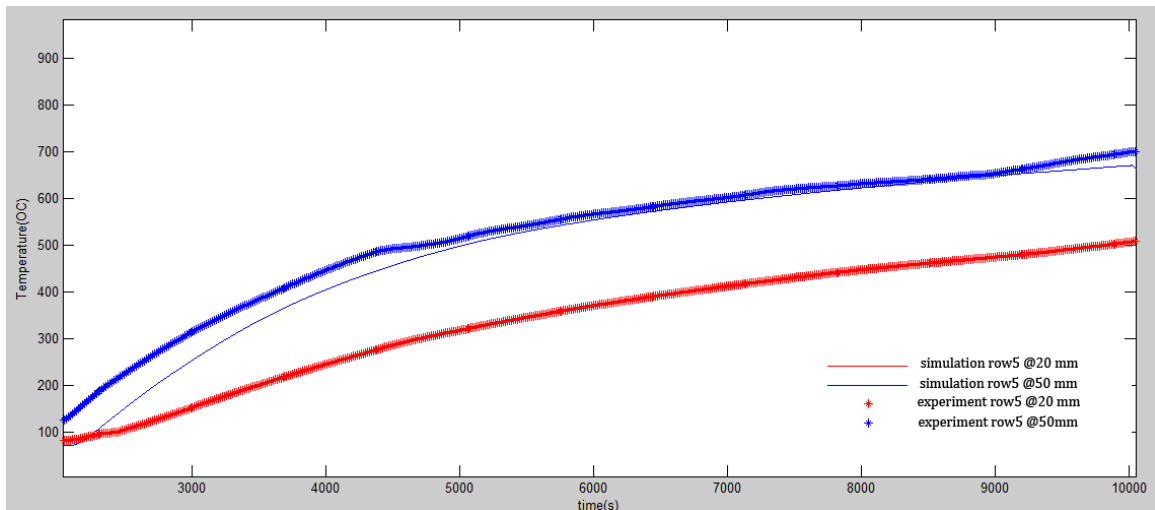
ตารางที่ 7.2 สมการแสดงอุณหภูมิของแก๊สเผาไหม้ที่เลือกใช้งาน

ลักษณะการใช้งาน	สมการอุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ที่ใช้
เข้รับน้ำเหล็กที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน	$T_{fl} = 700 \left( \frac{t}{60} \right) + 473 ; t \leq 60$ $T_{fl} = 60 \ln \left( \frac{t}{60} \right) + 1173 ; t > 60$
เข้รับน้ำเหล็กที่ผ่านการใช้มาแล้ว	$T_{fl} = 927 \left( \frac{t}{60} \right) + 473 ; t \leq 60$ $T_{fl} = 60 \ln \left( \frac{t}{60} \right) + 1350 ; t > 60$

เมื่อ  $t$  คือ เวลาที่อุ่น (s)

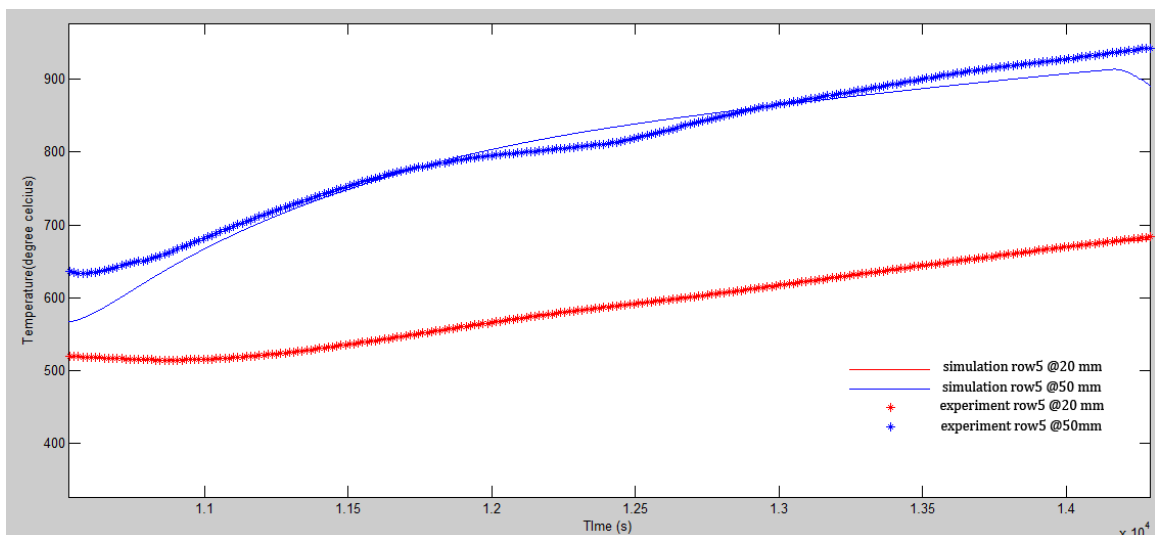
$T_{fl}$  คือ อุณหภูมิแก๊สเผาไหม้ (K)

ผลการจำลองหาอุณหภูมิภายในอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ ด้วยหัวเผาตั้งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.1 ซึ่งการอุ่นด้วยหัวเผาดังนั้น จากการศึกษางานเก่าๆ ที่ผ่านมายังไม่สามารถทราบข้อมูลผลการตรวจวัดอุณหภูมิภายใต้การทำงานจริง ซึ่งรู้เพียงคร่าวๆ ว่ามีการตั้งอุณหภูมิไว้ที่หัวเผา 800 องศาเซลเซียส นอกจากนี้จากการทำงานจริงหัวเผาชนิดนี้มีการใช้งานที่ค่อนข้างยากและมีปัญหา เนื่องจากปัญหาการติดๆ ดับๆ ของเปลวไฟ รวมไปถึงการปรับอัตราการไหลของน้ำมันที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง จึงทำให้ในช่วงนี้ผลการจำลองแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในช่วงต้นๆ ของการจำลอง เนื่องจากอินพุตที่เข้ามาในระบบไม่สามารถจำลองการทำงานจริงที่เกิดขึ้นได้ นอกจากนี้จะพบว่าช่วงปลายของการอุ่นด้วยหัวเผาดังนั้น ผลการตรวจวัดที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตรมีการเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่มีประสิทธิภาพในการทำงานของหัวเผาตั้ง



รูปที่ 7.1 ผลการจำลองอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงของการอุ่นด้วยหัวเผาตั้ง

ผลการจำลองอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ ในช่วงการอุ่นด้วยหัวเผาบน แสดงดังรูปที่ 7.2 จากผลการจำลองพบว่า ที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตรของอิฐแถวที่ 5 มีความคลาดเคลื่อนในช่วงต้นๆ ที่เป็นกระบวนการต่อเนื่องมาจากกระบวนการอื่น เนื่องจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณไม่เท่ากัน จึงทำให้ช่วงตอนเริ่มต้นการคำนวณมีความแตกต่างกัน



รูปที่ 7.2 ผลการจำลองอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่ตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีการอุ่นด้วยหัวเผาแบบบน

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปช่วยปรับแก้แล้ว ระบบจะค่อยๆ ปรับค่าให้ถูกต้องมากขึ้น

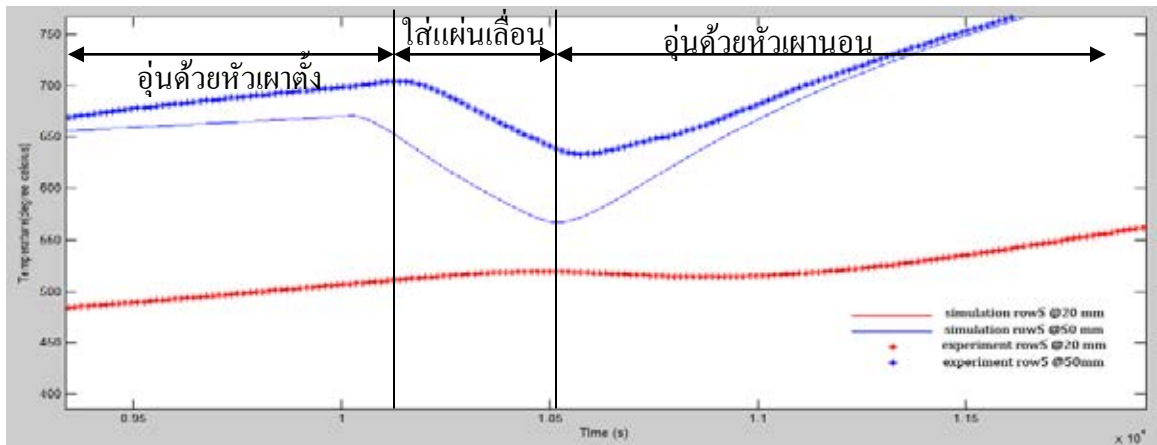
#### 7.1.2 ผลการจำลองระหว่างกระบวนการพักเบียร์รับน้ำเหล็กเปล่า

ช่วงการพักเบียร์รับน้ำเหล็กเปล่าแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ 1. ช่วงที่มีการใส่แผ่นเลื่อนกับช่วงที่มีการซ่อมแซมเบียร์รับน้ำเหล็ก และ 2. ช่วงที่รอการถ่ายน้ำเหล็ก

โดยทั้ง 2 ช่วงนี้จะแตกต่างกันตรงที่ ช่วงที่ 1 นั้นจะมีการแทนข้อมูลจากการวัดเข้ามาในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ช่วงที่ 2 เป็นการจำลองโดยใช้แบบจำลองเท่านั้น

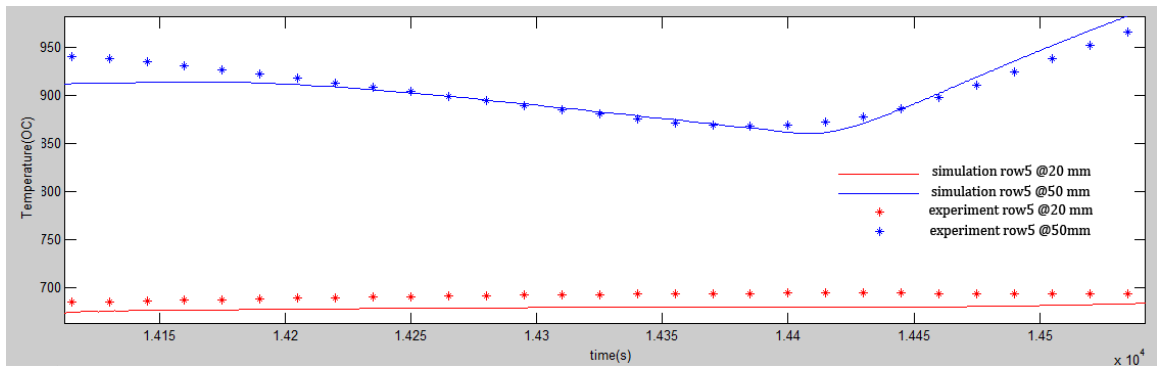
จากรูปที่ 7.3 แสดงผลที่ได้จากการจำลองแบบจำลองโดยการแทนข้อมูลจากการวัดจริงในช่วงที่มีการพักเบียร์รับน้ำเหล็กเปล่าช่วงใส่แผ่นเลื่อน พบว่าข้อมูลที่ได้จากการจำลองนั้นคลาดเคลื่อนจากของจริง เป็นผลจากการอุ่นด้วยหัวเผาตั้งในช่วงหลังๆ มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร ของอิฐแถวที่ 5 จากก่อนหน้าที่มีความคงที่(ดูรูปที่ 7.1) จึงเป็นผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นของของจริง กับอุณหภูมิเริ่มต้นการจำลองไม่เท่ากัน แต่หากพิจารณาแนวโน้มการลดลงของอุณหภูมิจะพบว่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการปรับแก้ของจุดข้อมูลที่แทนเข้าไป แต่สำหรับผลการจำลองที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรของอิฐแถวที่ 5 นั้น ยังคงมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการทดลองเนื่องจากการแทนข้อมูลลงไปนั่นเอง นอกจากนี้อีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของการประมาณค่าสภาวะในช่วงนี้คือข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่นำมาใช้นั้น มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก





รูปที่ 7.3 ผลการจำลองระหว่างกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่าในช่วงที่มีการแทนข้อมูลจากการทดลอง

จากรูปที่ 7.4 แสดงผลการจำลองระหว่างกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่า ในช่วงที่ไม่มี การแทนข้อมูลลงไป จากรูปจะพบว่าที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร จะเริ่มมีความคลาดเคลื่อนให้เห็นเนื่องจากที่ กระบวนการนี้จะไม่มีการแทนผลจากการทดลองเข้ามาช่วยทำนาย และที่ 20 มิลลิเมตร จะมีแนวโน้ม ใกล้เคียงกับผลการทดลอง จึงเป็นที่ยืนยันได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงนี้มีความถูกต้องใน ระดับหนึ่ง



รูปที่ 7.4 ผลการจำลองระหว่างกระบวนการพักเบ้ารับน้ำเหล็กเปล่าในช่วงที่ไม่มี การแทน ข้อมูลจากการทดลอง

### 7.1.3 ผลการจำลองช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็กและเทน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก

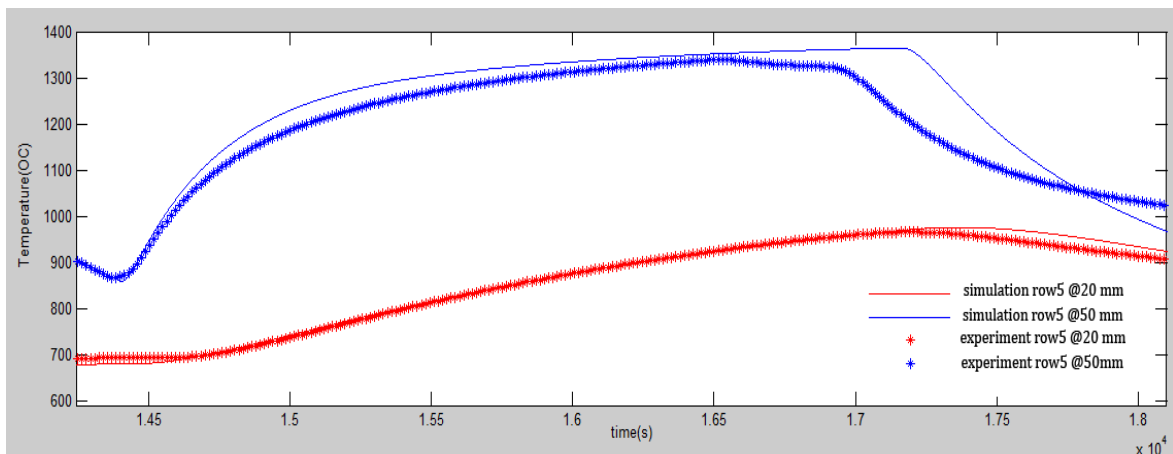
สำหรับผลการจำลองการขนถ่ายน้ำเหล็กและการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กจะขอเสนอพร้อมกัน เพื่อความสะดวกในการอธิบายผลการจำลอง เนื่องจาก 2 กระบวนนี้จะเป็นการจำลองโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียว โดยในการจำลองนั้นจะใช้อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เข้ามาอยู่ในเข้รับน้ำเหล็กนั้นเป็นอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทออกจากเตาหลอม โดยสมมติให้มีปริมาณเท่ากันตลอดทั้งปริมาตรน้ำเหล็ก และนอกจากนั้นอุณหภูมิของผิวสแลกที่ได้จากแผนภาพความร้อนจะต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก  $900^{\circ}\text{C}$

นอกจากนี้สำหรับการจำลองแบบจำลองในช่วงถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กนั้น จะน้ำเหล็กมีความสูงลดลงที่ตลอดช่วงระยะเวลาการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก และมวลของน้ำเหล็กเริ่มต้นเป็น 20000 กิโลกรัม และเมื่อน้ำเหล็กมีความสูงลดลงที่มวลของน้ำเหล็กที่คำนวณจะลดลงที่ด้วยเช่นกัน

จากรูปที่ 7.5 ที่แสดงตำแหน่งผลการตรวจวัดจริงและผลการจำลองของอิฐแถวที่ 5 ที่ตำแหน่ง 20 และ 50 มิลลิเมตร พบว่าช่วงแรกช่วงที่น้ำเหล็กมีความสูงสูงกว่าตำแหน่งอิฐแถวที่ 5 ผลการจำลองกับผลการตรวจวัดมีค่าใกล้เคียงกันทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงขนถ่ายน้ำเหล็กและถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก แต่เมื่อน้ำเหล็กลดลงต่ำกว่าตำแหน่งอิฐแถวที่ 5 แล้วผลการจำลองกับผลการตรวจวัดมีค่าต่างกันเล็กน้อยซึ่งเป็นผลเนื่องจาก เมื่อน้ำเหล็กลดลงต่ำกว่าอิฐแถวที่ 5 แล้ว สิ่งเข้ามาอยู่แทนที่น้ำเหล็กที่อิฐแถวที่ 5 คือสแลกซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำเหล็ก ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นผลจากการตรวจวัดจึงมีค่าลดลงเล็กน้อยแต่ยังคงเพิ่มสูงขึ้น จนเมื่อผิวสแลกลดต่ำกว่าตำแหน่งอิฐแถวที่ 5 ไปแล้วผลที่ได้จากการตรวจวัดจึงมีค่าลดลง ซึ่งสังเกตได้จากผลการทดลองที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร ในขณะที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นนั้นจะให้เวลาที่ 0.5 ของช่วงถ่ายน้ำเหล็ก เป็นระยะเวลาที่น้ำเหล็กลดลงต่ำกว่าอิฐแถวที่ 5 ดังนั้นลักษณะการตกลงของกราฟจากแบบจำลองจึงมีค่าตกลงอย่างทันทีทันใดซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 7.5 ที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร

นอกจากนี้หากสังเกตการตกลงของกราฟของช่วงที่ผ่าน 0.5 ของเวลาช่วงการถ่ายน้ำเหล็กไปแล้วจะพบว่าลักษณะการตกลงของอุณหภูมิจากการตรวจวัดและอุณหภูมิจากการจำลองนั้นมีค่า

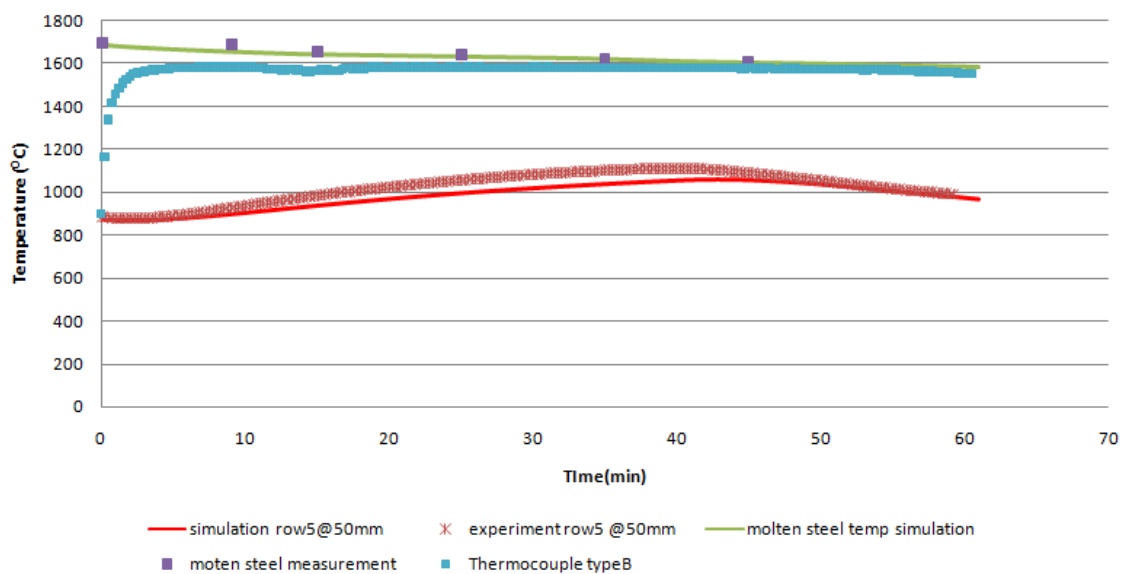
แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากความไม่เหมือนกันระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และของจริงที่เกิดขึ้น โดยจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสมมติให้ช่วงการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก เบ้ารับน้ำเหล็กจะโดนปิดด้วยเกราะกำบังรังสีซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่มีมวล แต่สำหรับของจริงเบ้ารับน้ำเหล็กจะถูกปิดด้วยฝาคอนกรีต จึงทำให้อุณหภูมิจากการจำลองลดลงเร็วกว่าของจริงที่เกิดขึ้น



รูปที่ 7.5 ผลการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็กและถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก

สำหรับอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ได้จากการคำนวณและอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัดในช่วงของการขนถ่ายน้ำเหล็กและถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.6 ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่าผลของการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กเมื่อเทียบกับผลการวัดช่วงการขนถ่ายน้ำเหล็กและช่วงถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กให้ผลที่ใกล้เคียงกัน โดยผลของการวัดที่จุดแรกคืออุณหภูมิที่เตาจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า และจุดที่ 2 คืออุณหภูมิที่วัดก่อนขึ้น CCM ไปถ่ายน้ำเหล็ก และอุณหภูมิจุดที่ 3 เป็นช่วงของการเริ่มทำการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก และจุดถัดๆ ไปนั้นคืออุณหภูมิเมื่อเวลาผ่านไปทุกๆ 10 นาที ขณะทำการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็ก นอกจากนี้หากสังเกตผลของอุณหภูมิที่ได้จากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B ในช่วงแรกๆ นั้นอุณหภูมิที่ได้จะเป็นอุณหภูมิฟิล์มระหว่างน้ำเหล็กกับอุณหภูมิเบ้ารับน้ำเหล็กที่สัมผัสกับน้ำเหล็ก แต่เมื่อเวลาผ่านไปเบ้ารับน้ำเหล็กกับน้ำเหล็กส่วนที่สัมผัสกันจะมีอุณหภูมิใกล้เคียงกันทำให้ผลที่ได้จากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B มีค่าใกล้เคียง

กับอุณหภูมิน้ำเหล็กจริงๆ ที่เกิดขึ้น และเป็นที่น่าสังเกตว่าช่วงท้ายของการถ่ายน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็กนั้นอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัด อุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B อุณหภูมิที่ได้จากการจำลองมีค่าคู่เข้าสู่ค่าเดียวกัน นอกจากนี้จากรูปที่ 7.6 มีการแสดงค่าของอุณหภูมิของอิฐทนไฟที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ของอิฐแถวที่ 5 พบว่าค่าที่ได้จากการจำลองกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าเราสามารถนำแบบจำลองนี้ไปทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าได้

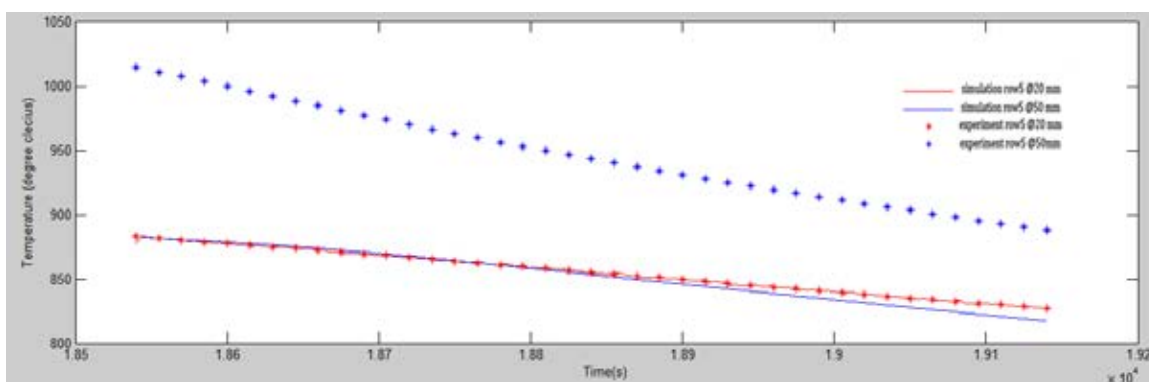


รูปที่ 7.6 ผลการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กและอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เทียบกับผลการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B, การจุ่มวัดและผลการตรวจวัดจริงที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 4

#### 7.1.4 ผลการจำลองช่วงการขนสแลกไปเททิ้ง

ลักษณะการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กในช่วงนี้คือ น้ำเหล็กและสแลกที่เหลือจากการเทนั้นยังสามารถถ่ายเทความร้อนให้กับอิฐในแถวที่ 1 ได้ แต่สำหรับอิฐแถวที่ 5 นั้น ผิวสแลก ผิวด้านข้างของเบ้ารับน้ำเหล็ก และอากาศที่บริเวณปากถังเบ้ารับน้ำเหล็กมีการถ่ายเทความร้อนให้แก่กัน เนื่องจากในช่วงนี้ฝาปิดเบ้ารับน้ำเหล็กได้ถูกยกออกไปแล้ว สำหรับผลการจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 7.7 จากผล

การจำลองในช่วงที่มีผลของการนำข้อมูลที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรแทนเข้ามาช่วยปรับแก้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าในช่วงแรกๆที่เป็นรอยต่อของกระบวนการก่อนหน้ากับกระบวนการนี้ ที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ผลการการจำลองจะมีลักษณะการปรับค่าจากแบบจำลองมาสู่ของจริง และหลังจากนั้นจะมีค่าเท่ากับผลการตรวจวัดจริงที่เกิดขึ้น แต่สำหรับที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตรจะพบว่ามี ความผิดพลาดเกิดขึ้นมา อันเป็นผลเนื่องความผิดพลาดจากการจำลองในกระบวนการก่อนหน้าทำให้ค่าที่จำลองได้และค่าจากการวัดไม่เท่ากันถึงแม้จะมีการปรับแก้แบบจำลองแล้วก็ตาม



รูปที่ 7.7 ผลการจำลองและผลการตรวจวัดจริงในช่วงขนสแลกไปเททิ้ง

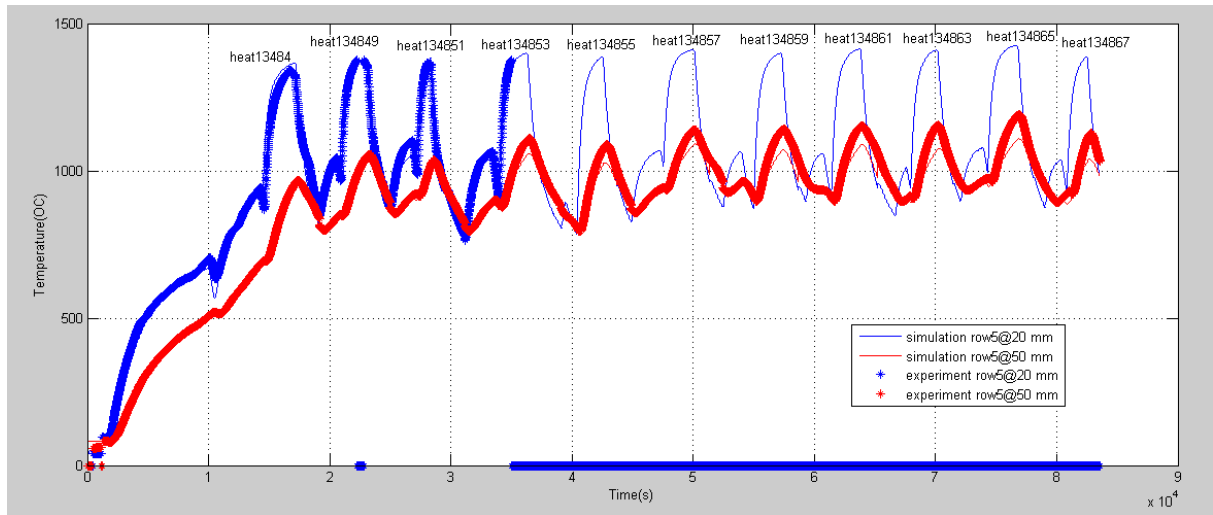
#### 7.1.5 ผลการจำลองอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการเก็บข้อมูล

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 20 และ 50 มิลลิเมตรตลอดช่วงระยะเวลาการเก็บข้อมูลทั้งหมด 11 รอบการทำงาน ซึ่งลักษณะการแปรผันของอุณหภูมิจากกราฟสามารถอธิบายได้เป็นช่วงๆ ของการนำเสนอมาแล้วนั้น ส่วนหนึ่งของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมีผลเนื่องมาจากลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถจำลองผลการทำงานจริงได้ทั้งหมดเช่น การปิดฝาเบ้ารับน้ำเหล็กในช่วงถ่ายถ่ายน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กที่ในรอบการทำงานจริง แต่จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นพิจารณาฝานั้นเป็นเพียงแค่เกราะกำบังรังสีเท่านั้น

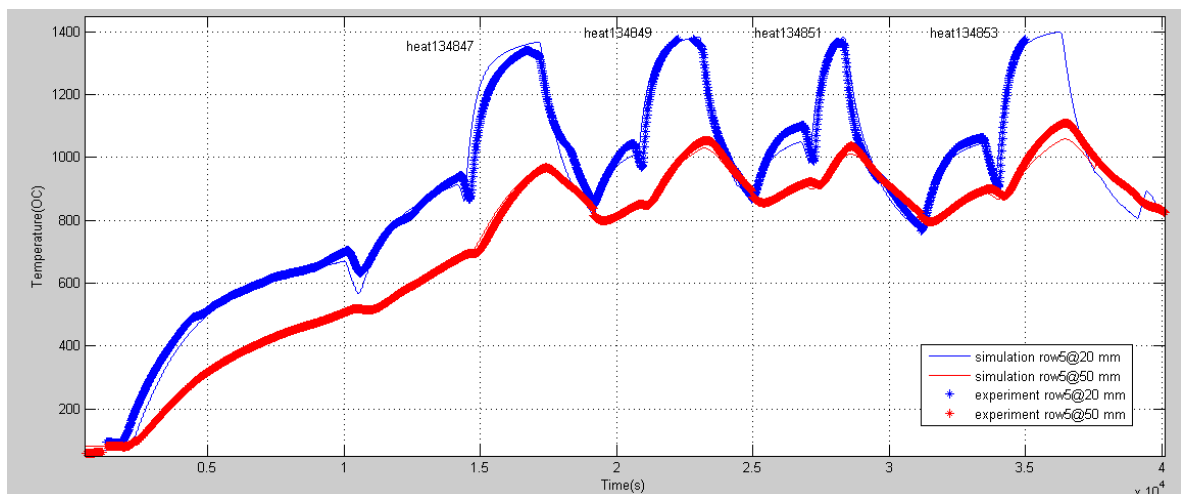
จากรูปที่ 7.8 จะเห็นว่าอุณหภูมิของตำแหน่ง 20 มิลลิเมตรนั้น ไม่สามารถวัดได้ตั้งแต่รอบการทำงานที่ 4 เป็นต้นไป อันเป็นผลเนื่องมาจากการกร่อนของอิฐทนไฟเนื่องจากการใช้งานทำให้น้ำเหล็ก

ไปสัมผัสกับเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ที่ตำแหน่ง 20 มิลลิเมตร หรืออาจจะเป็นเพียงอุณหภูมิของอิฐทนไฟ ที่ตำแหน่งที่ฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลสูงเกินไปจนทำให้เทอร์โมคัปเปิ้ลเสียหาย

สำหรับการจำลองด้วยแบบจำลองในครั้งนี้ได้ถูกสมมติให้ไม่มีกร่อนของอิฐทนไฟเมื่อใช้งาน จะพบว่าสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7.8



รูปที่ 7.8 ผลการจำลองอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ของผนังด้านข้างตลอดช่วงการเก็บข้อมูล เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัด

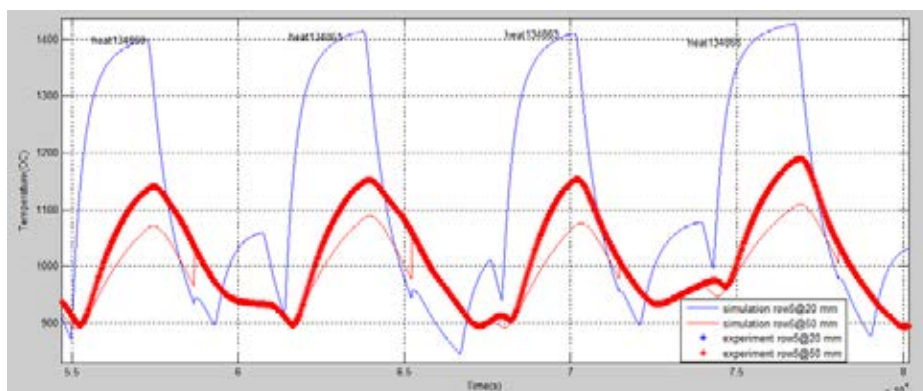


รูปที่ 7.9 ผลการจำลองอุณหภูมิภายในเบ้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ของผนังด้านข้าง ในช่วงรอบการทำงานที่ 1-4 ของเข้รับน้ำเหล็ก เปรียบเทียบกับผลของการตรวจวัด

จากรูปที่ 7.9 เมื่อเราพิจารณาเป็นช่วงรอบการทำงานแรกๆ พบว่าในช่วงต้นของการเปรียบเทียบจะเห็นว่าค่าได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งช่วงที่มีการแทนข้อมูลการทดลองจริง (ช่วงการอุ่นเข้ารับน้ำเหล็ก ช่วงการใส่แผ่นเลื่อน ช่วงการซ่อมแซมเข้ารับน้ำเหล็ก) และช่วงที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (ช่วงขนถ่ายน้ำเหล็ก ถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก) มีความใกล้เคียงกับผลการวัดจากการทดลอง

แต่เมื่อพิจารณาในรอบหลังๆ ดังรูปที่ 7.10 จะพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เช่นที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรของรอบการทำงานที่ 7 (Heat No. 134859) ค่าที่ได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในช่วงที่มีน้ำเหล็กอยู่ในเข้ารับน้ำเหล็ก (ช่วงขนถ่ายน้ำเหล็ก และถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก) จะแสดงความคลาดเคลื่อนให้เห็น ซึ่งเป็นผลเนื่องจากในรอบการทำงานจริงมีผลการกร้อนของอิฐทนไฟเกิดขึ้น แต่จากแบบจำลองเราจะไม่ให้มีการกร้อนของอิฐทนไฟเกิดขึ้น ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะไม่แสดงให้เห็นในช่วงการจำลองโดยที่มีการแทนข้อมูลจากการทดลอง (ช่วงการอุ่นด้วยหัวเผา ช่วงทดสอบ และช่วงซ่อมแซมเข้ารับน้ำเหล็ก)

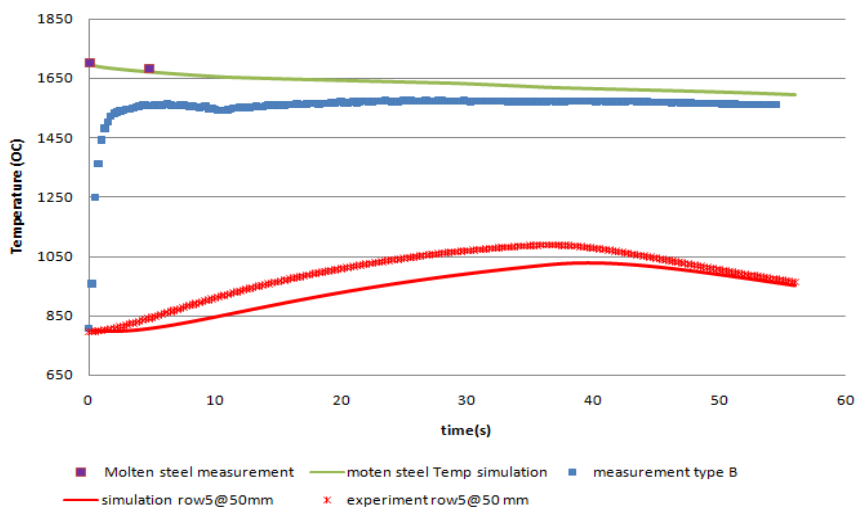
นอกจากนี้หากพิจารณาลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจากการตรวจวัดภายในอิฐทนไฟที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิต่ำกว่าเนื่องจากตำแหน่งนั้นอยู่ห่างจากน้ำเหล็กมากกว่าการตรวจวัดจริงที่เกิดการกร้อนของอิฐขณะใช้งาน จึงทำให้ผลการจำลองที่ตำแหน่งนั้นผิดพลาดไปเช่นเดียวกัน



รูปที่ 7.10 ผลการจำลองอุณหภูมิภายในเข้ารับน้ำเหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ ของผนังด้านข้าง ในช่วงรอบการทำงานที่ 7-10 ของเข้ารับน้ำเหล็ก เปรียบเทียบกับผลของการตรวจวัด

อีกสาเหตุหนึ่งที่เกี่ยวข้องที่ทำให้ผลการจำลองผิดพลาดเมื่อเทียบกับการทดลองจริงคือเวลาในแต่ละกระบวนการของเป่ารับน้ำเหล็ก ที่มีความคลาดเคลื่อน ซึ่งอาจจะคลาดเคลื่อนในแต่ละรอบการทำงานรอบละ 1-2 นาที แต่เมื่อใช้ไปนานๆ อาจจะมีมีความคลาดเคลื่อนที่มากขึ้นได้

สำหรับผลของการจำลองอุณหภูมิในน้ำเหล็กในช่วงรอบการทำงานหลังที่เริ่มมีค่าความผิดพลาดจากการคำนวณอุณหภูมิภายในอิฐที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 7.11 ที่แสดงอุณหภูมิในน้ำเหล็กของรอบการทำงานที่ 5 (Heat no. 134855) จะพบอุณหภูมิที่ได้จากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีค่าใกล้เคียงกับผลการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B และเนื่องจากในรอบการทำงานนี้ไม่มีการจุ่มวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กขณะถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กดังนั้นจึงไม่มีข้อมูลจากการจุ่มวัด แต่จากรูปที่ 7.11 ในช่วงต้นที่มีผลการจุ่มวัดช่วงก่อนเทน้ำเหล็กและช่วงรอการถ่ายน้ำเหล็กพบว่าผลการจำลองอุณหภูมิในน้ำเหล็กจะมีค่าใกล้เคียงกับการตรวจวัดด้วยวิธีการจุ่มวัดของทางโรงงาน

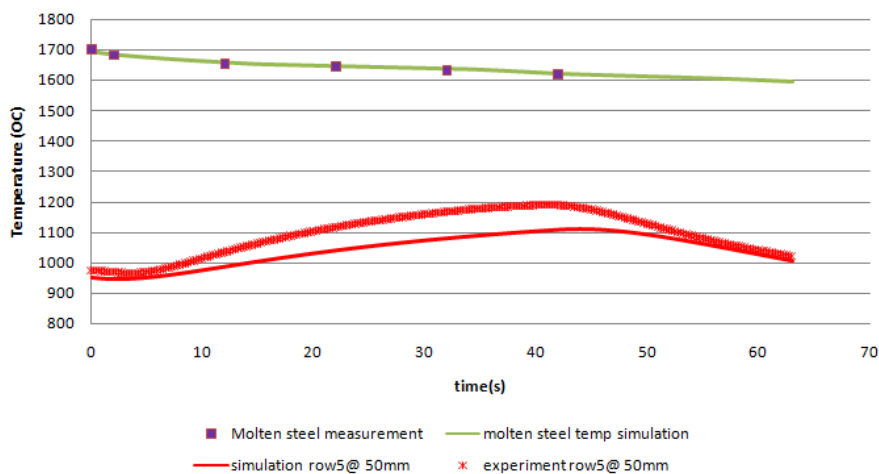


รูปที่ 7.11 ผลการจำลองอุณหภูมิในน้ำเหล็กและอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เทียบกับผลการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B และผลการตรวจวัดจริงที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรของผนังเป่ารับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 5

สำหรับผลการจุ่มวัดในรอบการทำงาน 10 ที่ไม่มีผลการวัดอุณหภูมิในน้ำเหล็กด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B แต่จะมีผลจากการจุ่มวัดในช่วงการถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็ก แสดงดังรูปที่ 7.12



จะพบว่าค่าอุณหภูมิหน้าเหล็กที่จากการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลจี้มวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กของทางโรงงาน



รูปที่ 7.12 ผลการจำลองอุณหภูมิหน้าเหล็กและอุณหภูมิที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เทียบกับผลการวัดด้วยการจี้มวัด และผลการตรวจวัดจริงที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรของผนังเบ้ารับน้ำเหล็กในรอบการทำงานที่ 10

เพื่อเป็นการยืนยันว่าผลที่ได้จากการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการตรวจวัดจริงเมื่อคำนวณปริมาณพลังงานที่สะสมอยู่ในผนังเบ้ารับน้ำเหล็กที่รอบการทำงานต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 7.3 พบว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัดและค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นมีความถูกต้องเนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนจากผลการตรวจวัดและผลการจำลองน้อย

ตารางที่ 7.3 ผลการเปรียบเทียบพลังงานที่สะสมในผนังเข้รับน้ำเหล็กในช่วงการทำงานของเข้รับน้ำเหล็ก

ช่วงการทำงานของเข้รับน้ำเหล็ก	พลังงานที่สะสม(GJ)		ความคลาดเคลื่อน (%)
	ผลการตรวจวัด	ผลการจำลอง	
1.รอบการทำงานที่ 1 เมื่อสิ้นสุดการถ่ายน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	11.4	11	3.51
2.รอบการทำงานที่ 2 เมื่อน้ำเหล็กอยู่บริเวณอิฐแถวที่ 5	13.7	13.5	1.46
3.รอบการทำงานที่ 3 เมื่อสิ้นสุดการถ่ายน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	14.2	13.5	4.59
4.รอบการทำงานที่ 4 เมื่อเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ที่ 20 มิลลิเมตรเสียหาย	11.3	11.9	-5.31
5.รอบการทำงานที่ 6 ช่วงก่อนถ่ายน้ำเหล็กสู่รางรับน้ำเหล็ก	12.3	12.7	-3.25

## 7.2 ผลการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็ก

เนื่องจากการผลการตรวจวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กทั้ง 2 วิธีนั้นพบว่าการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B นั้นสามารถวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กได้ตลอดช่วงการทำงานแต่เป็นการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กที่อยู่ใกล้กับอิฐทนไฟทำให้ผลการตรวจวัดอุณหภูมินั้นจะเป็นอุณหภูมิฟิล์มดั่งที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นผลการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ได้จึงมีค่าต่ำกว่าปกติ สำหรับผลการจี้วัดของทางโรงงานตลอดช่วงการถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กในบางรอบการทำงานของเข้รับน้ำเหล็กนั้นค่าที่ได้จะไม่มีค่าต่อเนื่อง และไม่สามารถวัดค่าได้ตลอดช่วงการทำงานเนื่องจากความสูงของน้ำเหล็กที่ลดลงและมีสแลกปกคลุมที่ผิวหน้าน้ำเหล็ก แต่สามารถวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กที่อยู่ไกลจากผนังเข้รับน้ำเหล็กออกมาทำให้ค่าที่วัดได้จึงมีค่าใกล้เคียงกับสิ่งที่เกิดขึ้นจริงมากกว่า ดังนั้นผลการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กจึงนำมาเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดด้วยการจี้วัดของทางโรงงานของรอบการทำงานที่ 2, 3, 4, 9 และ 10 (Heat No. 134849 134851 134853 134863 134865) โดยจะเปรียบเทียบที่เวลาสุดท้ายที่มีการจี้วัดอุณหภูมิน้ำเหล็กได้ของรอบการทำงานจริงโดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.4

ตารางที่ 7.4 ผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดที่เวลาสุดท้ายที่สามารถตรวจวัดด้วยการจุ่มวัดในกระบวนการขนถ่ายน้ำเหล็กและถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กของรอบการทำงานจริง

Heat No.	อุณหภูมิน้ำเหล็ก ( $^{\circ}\text{C}$ )			ร้อยละ ความผิดพลาด
	ผลการจุ่มวัด	ผลการใช้แบบจำลอง	ค่าความผิดพลาด	
134849	1585	1594	-9	-0.57
134851	1646	1641	5	0.30
134853	1610	1606	4	0.25
134863	1618	1620	-2	-0.12
134865	1617	1623	-6	-0.37
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			5.12	
ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95			4.49	

จากตารางที่ 7.4 พบว่าค่าเปรียบเทียบด้วยผลการตรวจวัดและผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ที่  $4.49^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นแบบจำลองที่เขียนขึ้นสามารถจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กได้ใกล้เคียงกับของจริง

ดังนั้นหากนาระบบช่วยควบคุมการทำงานไปทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็ก โดยที่อุณหภูมิน้ำเหล็กที่ทำนายนั้นจะสามารถรองรับการถ่ายเทความร้อนทั้งกระบวนการทำงานเมื่อมีการทำงานจริง พบว่าสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 7.5 จากการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กจะพบว่าจะมีบางรอบการทำงานที่สามารถลดอุณหภูมิการถ่ายน้ำเหล็กได้มาก ทั้งนี้เนื่องจากรอบการทำงานบางรอบ เช่น รอบการทำงานที่ 3 (Heat No.134851) จะใช้เวลาในการถ่ายน้ำเหล็กที่สั้นเนื่องจากต้องมีการเปลี่ยนรางรับน้ำเหล็กใหม่ ดังนั้นจึงต้องเร็วขึ้นกว่าเดิม ทำให้เวลาในการถ่ายเทความร้อนจากเบ้ารับน้ำเหล็กกับน้ำเหล็กลดน้อยลงไปด้วยดังนั้น จึงไม่จำเป็นต้องถ่ายน้ำเหล็กที่ออกจากเตาอาร์คไฟฟ้าให้มีอุณหภูมิสูงเกินไป โดยการควบคุมเราจะกำหนดให้เมื่อสิ้นสุดการถ่ายน้ำเหล็กลงสู่รางรับน้ำเหล็กแล้วน้ำเหล็กที่ได้ต้องมีอุณหภูมิไม่ต่ำกว่า  $1560^{\circ}\text{C}$  และมีการเผื่อความคลาดเคลื่อนเป็น  $1570^{\circ}\text{C}$

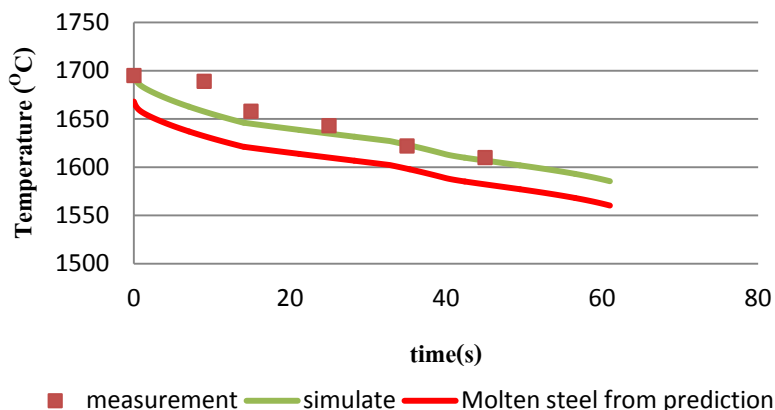
ตารางที่ 7.5 ผลการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่แนะนำให้เทจากระบบช่วยควบคุมที่สร้างขึ้น  
เปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่แท้จริง

Heat No.	อุณหภูมิน้ำเหล็กเทจาก EAF ( $^{\circ}\text{C}$ )		ผลต่าง อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )
	แท้จริง	แนะนำ	
134847	1717	1697	20
134849	1680	1665	15
134851	1692	1635	57
134853	1695	1668	27
134855	1701	1669	32
134857	1687	1672	15
134859	1682	1666	16
134861	1695	1675	20
134863	1695	1664	31
134865	1700	1670	30
134867	1677	1665	12
	เฉลี่ย		25

สำหรับอุณหภูมิเริ่มต้นของการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นอุณหภูมิเทน้ำเหล็กที่เกิดจากการแนะนำ พบว่าเมื่อถ่ายน้ำเหล็กลงสู่อ่างรับน้ำเหล็กเสร็จสิ้นแล้ว ผลการจำลองอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำเหล็กแสดงดังตารางที่ 7.6 โดยจะเห็นว่าอุณหภูมิที่เวลาสุดท้ายของการถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กจะมีค่าสูงกว่า  $1560^{\circ}\text{C}$  แต่ไม่เกิน  $1570^{\circ}\text{C}$  ดังที่กำหนดไว้ และนอกจากนี้พบว่าการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กเมื่อใช้ค่าจากการแนะนำมีค่าน้อยกว่าสิ่งที่เกิดขึ้นจริงดังรูปที่ 7.13

เมื่อนำอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ได้จากรอบการทำงานจริงและผลการทำนายมาหาผลต่างของอุณหภูมิและนำไปหาค่าศักยภาพในการลดการใช้พลังงานในการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า พบว่าทุกๆ

10 °C ลดการใช้พลังงานในการหลอมได้ 7 kWh/ตัน [2] ซึ่งปริมาณน้ำเหล็กที่หลอมคือ 20 ตันต่อรอบ เมื่อนำมาคำนวณศักยภาพในการการใช้พลังงานสามารถแสดงได้ด้วยตารางที่ 7.7



รูปที่ 7.13 อุณหภูมิน้ำเหล็กที่เปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กเริ่มต้นเป็นค่าจากการแนะนำ เปรียบเทียบกับอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เกิดจริงในรอบการทำงานที่ 4 ตารางที่ 7.6 ผลการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เวลาสุดท้ายของการถ่ายน้ำเหล็กสู่อ่างรับน้ำเหล็กเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นเป็นอุณหภูมิที่เกิดจากการแนะนำอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทออกจากเตาหลอม

Heat No.	อุณหภูมิน้ำเหล็ก(°C)	
	อุณหภูมิน้ำเหล็กเริ่มต้นที่แนะนำให้เท	อุณหภูมิน้ำเหล็กสุดท้ายที่เกิดขึ้น
134847	1697	1566.0
134849	1665	1566.5
134851	1635	1569.7
134853	1668	1560.3
134855	1669	1564.1
134857	1672	1566.0
134859	1666	1561.1
134861	1675	1568.7
134863	1664	1565.3
134865	1670	1566.5
134867	1665	1566.5

จากตารางที่ 7.7 การคำนวณศักยภาพความประหยัด (บาท) เมื่อคิดราคาพลังงาน 3 บาทต่อ 1 kWh จะสามารถพิจารณามูลค่าความประหยัดได้เฉลี่ย 1,050 บาท และตลอดการทำงาน 11 รอบการทำงาน สามารถประหยัดได้ 11,550 บาท

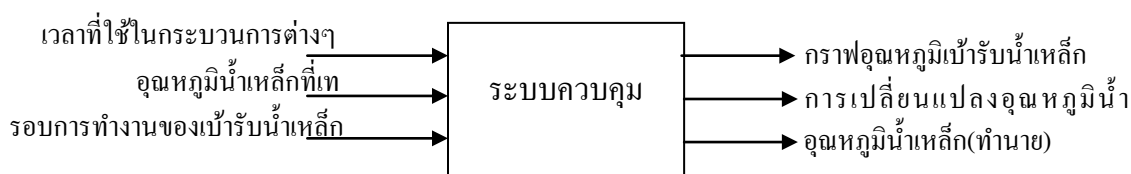
ตารางที่ 7.7 ศักยภาพในการลดอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า

Heat No.	อุณหภูมิน้ำเหล็กเทจาก EAF (°C)		อุณหภูมิที่สามารถลดได้ (°C)	ศักยภาพความประหยัด(kWh)	ศักยภาพความประหยัด(บาท)
	แท้จริง	ผลการแนะนำ			
134847	1717	1697	20	280	840
134849	1680	1665	15	210	630
134851	1692	1635	57	798	2394
134853	1695	1668	27	378	1134
134855	1701	1669	32	448	1344
134857	1687	1672	15	210	630
134859	1682	1666	16	224	672
134861	1695	1675	20	280	840
134863	1695	1664	31	434	1302
134865	1700	1670	30	420	1260
134867	1677	1665	12	168	504
			รวม	3850	11550

เมื่อพิจารณารอบการทำงานที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน ดังนั้นภายใน 1 วันจะสามารถหลอมได้ 20 รอบการทำงานพบว่าสามารถลดการใช้มูลค่าพลังงานได้ 21,000 บาท และจะสามารถประหยัดมูลค่าพลังงาน 7.56 ล้านบาท ต่อ 1 ปี (360 วัน)

### 7.3 ลักษณะระบบช่วยควบคุมที่พัฒนาขึ้น

การพัฒนา ระบบช่วยควบคุม นั้นเป็นเพียงแต่การนำเอาข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดเข้ามาช่วยปรับแก้ค่าตอบที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เขียนขึ้นมาใหม่ โดยต้องครอบคลุมวิธีทางด้านการสังเกตที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ดังนั้น ลักษณะระบบช่วยควบคุมที่สร้างขึ้นนั้นจะสร้างจากสายงานที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 โดยสิ่งที่ต้องป้อนเข้าไปในระบบช่วยควบคุมและสิ่งที่ได้ออกมานั้นนั้นสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 7.14



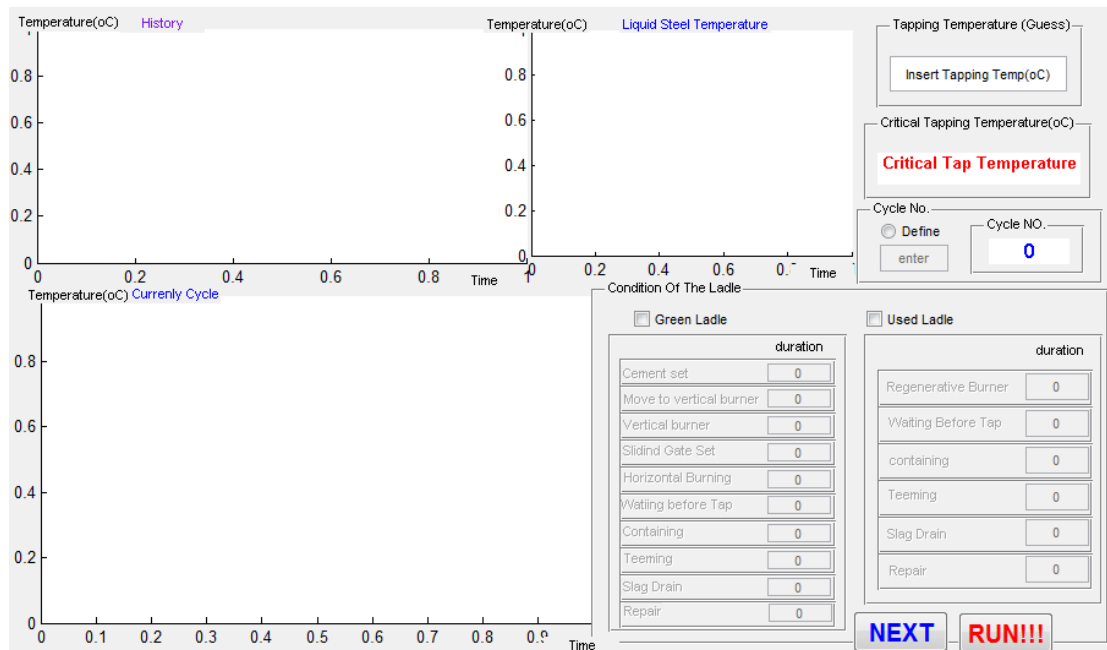
รูปที่ 7.14 Black Block Diagram ของระบบช่วยควบคุม

ในการออกแบบระบบควบคุมในงานวิจัยนี้ จะใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink R2009b และใช้ GUIDE ของโปรแกรมนี้ในการรับข้อมูลจากผู้ใช้งาน และระบบควบคุมที่ได้เขียนขึ้นแสดงได้รูปที่ 7.15 โดยจะมีลักษณะการใช้งานดังนี้

1. เริ่มต้นใช้งานผู้ใช้ต้องเลือกว่าเบ้ารับน้ำเหล็กที่นำมาใช้นั้น ผ่านการใช้งานมาแล้ว(Used Ladle) หรือยังไม่ผ่านการใช้งาน (Green Ladle) หากมีการเลือกการใช้งานประเภท Green Ladle ทางระบบควบคุมจะตั้งจำนวนรอบการทำงานเป็น 1 หากเลือกการใช้งานประเภท Used Ladle ระบบจะตั้งจำนวนรอบการทำงานเป็น 2 แต่อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้สามารถตั้งจำนวนรอบใช้งานของเบ้ารับน้ำเหล็กได้จากการเลือกคำว่า Define ในส่วนของ Cyc No. ทางระบบควบคุมก็จะอนุญาตให้ผู้ใช้ใส่รอบการทำงานได้ เมื่อใส่เสร็จแล้วกด enter

2. เมื่อเลือกประเภทการใช้งานอย่างใดอย่างหนึ่ง (Green Ladle, Used Ladle) ทางระบบควบคุมก็จะให้ผู้ใช้งานประเมินการทำงาน โดยการใส่เวลา (นาที) ในแต่ละกระบวนการของการทำงานที่เกิดขึ้น

และผู้ใช้จะต้องใส่อุณหภูมิการเทน้ำเหล็กจากเตาหลอม ( $^{\circ}\text{C}$ ) ด้วยการคาดเดา (โดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ  $1670^{\circ}\text{C}$ )



รูปที่ 7.15 ส่วนต่อประสานกับผู้ใช้งานของระบบควบคุม

3. กดปุ่ม Run เพื่อสั่งให้ระบบควบคุมทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่สามารถเทได้ หลังจากโปรแกรมใช้เวลาในการคำนวณอุณหภูมิที่สามารถเทน้ำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเสร็จแล้ว ระบบควบคุมก็จะแสดงค่าอุณหภูมิจากการทำนายในส่วนของ Critical Tapping Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) และนอกจากนี้ ระบบจะแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในเบ้ารับน้ำเหล็ก ในส่วนของ Currently cycle สำหรับในส่วน History หากมีการเก็บข้อมูลของผลการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กในรอบการทำงานก่อนหน้าก็จะแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของรอบการทำงานที่ผ่านมาแล้วรวมกับรอบการทำงานในครั้งนี้ และส่วนของ Liquid Steel Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) จะแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำเหล็กในรอบการทำนาย

4. หากต้องการทำนายอุณหภูมิในรอบการทำงานถัดไปให้กดปุ่ม next ทางระบบก็จะทำการบวกรอบการทำงานไปอีก 1 รอบการทำงาน โดยอัตโนมัติ จากนั้นก็ทำซ้ำข้อ 2 และ 3



## บทที่ 8

### สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบควบคุมการทำงานของเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้สัมพันธ์กับสถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กที่ได้จากการตรวจวัดจริง โดยผลการใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดที่ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรที่ตำแหน่งอิฐแถวที่ 1 และอิฐแถวที่ 5 ได้แสดงให้เห็นแล้วว่าสามารถทำให้การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความแม่นยำมากขึ้น อย่างน้อยก็ตำแหน่ง 50 มิลลิเมตร ของอิฐแถวที่ 1 และอิฐแถวที่ 5 นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าตำแหน่ง 50 มิลลิเมตรในรอบหลังๆ ของการทำงานก่อนรับน้ำเหล็กของเบ้ารับน้ำเหล็ก จะมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองเนื่องจากการนำข้อมูลจากการทดลองเข้าไป

นอกจากนี้จากผลการจำลองการลดลงของอุณหภูมิน้ำเหล็กตลอดทั้งกระบวนการกับผลการตรวจวัดของทางโรงงานและผลการตรวจวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B พบว่าให้ผลที่น่าพอใจ และสามารถนำไปทำนายหาอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เทออกจากเตาหลอมเพื่อรองรับการถ่ายเทความร้อนทั้งกระบวนการได้โดยที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายในรอบปฏิบัติงานจริง

จากการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กด้วยระบบช่วยควบคุมที่ออกแบบขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดด้วยการจุ่มวัดในรอบการทำงานจริง พบว่าผลการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กตลอดทั้งกระบวนการมีผลที่ได้ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 เป็น  $4.49^{\circ}\text{C}$  จึงสามารถนำแบบจำลองไปทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กที่สามารถเทจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าได้

ผลการจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กด้วยระบบช่วยควบคุมที่ออกแบบขึ้น พบว่าการประเมินศักยภาพการลดอุณหภูมิน้ำเหล็กในแต่ละรอบการทำงานของการทำงานจริงพบว่าสามารถลดอุณหภูมิได้เฉลี่ย  $25^{\circ}\text{C}$  ซึ่งก่อให้เกิดความประหยัด 350 kWhต่อรอบการทำงาน (17.5 kWhต่อตันน้ำเหล็ก) ซึ่งคิดเป็นราคาพลังงานมูลค่า 11,550 บาท ดังนั้นภายใน 1 วันที่มีรอบการทำงานคล้ายๆ กัน ทางโรงงานจะ

สามารถหลอมเหล็กได้ 20 รอบการทำงาน คิดเป็นพลังงานที่ก่อให้เกิดความประหยัด 7,000 kWh หรือคิดเป็นมูลค่า 21,000 บาท

## 8.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. สำหรับการวิจัยในครั้งนี้พบว่าการนำข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดไปแทนในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น จะมีผลทำให้ความละเอียดในการแบ่งผนังเบ้ารับน้ำเหล็กเป็นก้อนเล็กๆ ถูกจำกัดขึ้น มีผลทำให้ความละเอียดในการแจกแจงอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของแบบจำลองทางมีความไม่ละเอียด ดังนั้นหากต้องการให้ได้การแจกแจงอุณหภูมิที่ชัดเจนมากขึ้น โดยแบ่งก้อนย่อยให้มีจำนวนมากขึ้นจึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดที่มากขึ้นตามไปด้วย

2. จากผลการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้เขียนขึ้นนั้น พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองนั้นมีความผิดพลาดจากผลการตรวจวัดจริง เนื่องจากการกร่อนของอิฐทนไฟขณะใช้งาน ดังนั้นจึงต้องคำนึงผลของการกร่อนของอิฐทนไฟขณะใช้งานด้วย แต่เราไม่สามารถทราบผลการกร่อนของอิฐในแต่ละรอบการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กได้จนกว่าจะมีการรื้ออิฐจากเบ้ารับน้ำเหล็กนั้นแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของการกร่อนของอิฐในแต่ละรอบการทำงาน และนำค่านั้นเข้ามาใช้ในแบบจำลองที่เขียนขึ้น

3. เนื่องจากการลดการใช้พลังงานในกระบวนการหลอมเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามีหลายรูปแบบ ดังนั้นสามารถนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เขียนขึ้นในบางกระบวนการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กไปประยุกต์ใช้ได้

4. ระบบช่วยควบคุมที่เขียนขึ้นนั้นสามารถนำไปใช้ในกรณีที่เบ้ารับน้ำเหล็กมีปัญหาได้บางกรณีเช่น กรณีที่น้ำเหล็กแข็งตัวที่รูเทและต้องเสียเวลาในการซ่อมแซมรูเทเบ้ารับน้ำเหล็ก ผู้ใช้สามารถเพิ่มเวลาในการซ่อมแซมเบ้ารับน้ำเหล็กให้ครอบคลุมเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมรูเทให้ระบบช่วยควบคุม เนื่องจากลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทั้ง 2 นั้นมีลักษณะเหมือนกันคือมีการถ่ายเทความร้อนในผิวปิดเหมือนกัน

5. เนื่องจากการเหนี่ยวนำเหล็กด้วยอุณหภูมิที่สูงจะมีผลทำให้สถานะทางความร้อนของเบ้ารับน้ำเหล็กสูงขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นหากนำระบบช่วยควบคุมที่สร้างขึ้น(หรืออาจจะมีระบบควบคุมระบบใหม่) ไปทำงานขนานกับระบบช่วยควบคุมที่มีอยู่แล้ว จะสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ว่าควรจะมีการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กก่อนการรับน้ำเหล็กในรอบต่อไปหรือไม่ ก็จะเป็นการลดการใช้พลังงานในการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็ก ทำให้การใช้พลังงานในการผลิตเหล็กด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้ามีการใช้พลังงานที่น้อยลงไปได้ อีกเช่นเดียวกัน

6. เนื่องจากอุณหภูมิในระบบการทำงานจริงของน้ำเหล็กที่ต้องควบคุมจริงๆ นั่นคือ อุณหภูมิของเหล็กในแม่พิมพ์ที่กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง ดังนั้นการพิจารณาอุณหภูมิน้ำเหล็กที่รับน้ำเหล็กและที่แม่พิมพ์ขณะหล่อจึงมีความจำเป็นด้วยเช่นกัน เพื่อที่จะควบคุมอุณหภูมิการเหนี่ยวนำเหล็กจากเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าให้ครอบคลุมทั้งกระบวนการ

7. สำหรับการออกแบบระบบช่วยควบคุมที่สร้างขึ้นมานี้มีการทำให้เป็นเชิงเส้นเพื่อช่วยในการประมาณค่าที่สถานะต่างๆ ซึ่งผลที่ได้ก็อาจจะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ดังนั้นหากมีการทำตัวประมาณค่าสถานะแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้ค่าที่ประมาณ ได้มีความถูกต้องมากขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] สถาบันพลังงานเพื่ออุตสาหกรรม. สถิติการใช้พลังงาน. [ออนไลน์]. 2546. แหล่งที่มา:  
<http://www.iie.or.th/iie2003/survey/ratioByIndustrial.aspx>, [10 เมษายน 2555]
- [2] ศิริพงษ์ ชื่นกลิ่น. การจำลองเชิงความร้อนของการทำงานของเบ้ารับน้ำเหล็กระหว่างการผลิตเหล็กกล้าด้วยเตาหลอมอาร์คไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [3] จักรวช จรุงสารทูล. การปรับปรุงประสิทธิภาพของฝาและอุปกรณ์อุ่นถังถายน้ำเหล็กโดยการใช้หัวเผาแบบรีเจนเนอเรทีฟ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [4] ชัชวีสต์ วุฒิศิริศาสตร์. การควบคุมการอุ่นเบ้ารับน้ำเหล็กร่วมกับเตาหลอมอาร์คไฟฟ้าเพื่อการประหยัดพลังงาน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
- [5] Saunders, LM. Preheating and controlled thermal cycling of steel handling ladles. In: 66<sup>th</sup> Steelmaking Conf Proc. vol.66. pp. 69-75., Iron & Steel Society, 1983
- [6] Joyce, K. New techniques to improve the efficiency of ladle preheater and billet reheating furnace. The United Nations Development Programme, NEA, Thailand. 1989, Cited in Mohanty, B and Satayayut, J. Dynamic Model for Ladle Preheater Performance Evaluation. International journal of energy research, 1992
- [7] Mohanty, B. and Satayayut, J. Dynamic Model for Ladle Preheater Performance Evaluation. International journal of energy research 16 (1992): 51 – 60.

- [8] สมศักดิ์ คงโชติ. การศึกษาปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนในการอุ่นถังรับน้ำเหล็กในอุตสาหกรรมหลอมโลหะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, ภาควิชาเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2536.
- [9] Fredman, T. P. and Saxen, H. Model for Temperature Profile Estimation in the Refractory of a Metallurgical Ladle. Metallurgical and Materials Transaction 29B (1997): 651 – 659.
- [10] Fredman, T. P., Torrkulla, J., and Saxen, H. Two-Dimensional Dynamic Simulation of the Thermal State of Ladles. Metallurgical and Materials Transaction 32B (1998): 323 – 330.
- [11] Xia, J.L. and Ahokainen, T. Transient Flow and Heat Transfer in a Steelmaking Ladle during the Holding Period. Metallurgical and Materials Transaction B 32B, (2001): 733 – 741.
- [12] Pan, Y., Grip, C., and Bjorkman, B. Numerical studies on the parameters influencing steel ladle heat loss rate, thermal stratification during holding and steel stream temperature during teeming. Scandinavian Journal of Metallurgy 32 (2003): 71-85.
- [13] Volkova, O., and Janke, D. Modelling of Temperature Distribution in Refractory Ladle Lining for Steelmaking. ISIJ International 43 no.8 (2003): 1185 – 1190
- [14] Zimmer, A., Lima, A. N. C., Trommer, R. M., Braganca, S. R. and Bergmann, C. P. Heat Transfer in Steelmaking Ladle. Journal of iron and steel research, International 15(3) (2008): 11 -14.
- [15] P. Egerton, J. A., Howarth, G., Poots, and Taylor-Reed, S. A Theoretical Investigation of Heat Transfer in A Ladle of Molten Steel During Pouring. International journal of Heat and Mass Transfer, 22, (1979): 1525 – 1532.
- [16] Urquhart R. C., Guthrie R. I. L., and Howat D.D.. Heat Losses from Ladle during Teeming. Journal of the south African institute of mining and metallurgy, (November 1973): 132-139.

- [17] Glaser Björn. A Study on the Thermal State of Steelmaking Ladles. Doctoral dissertation, Micro-modelling, Department of Materials Science and Engineering, Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management, 2012.
- [18] Andrea R. Holladay. Modeling and Control of a Small Glass Furnace. Master's Thesis, Master of Science in Mechanical Engineering, College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, 2005.
- [19] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์(Control of Dynamic Systems), พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [20] Harold Klee and Randal Allen, Simulation of Dynamic Systems, 2<sup>nd</sup> Ed. United State of America: Taylor & Francis Group, 2011.
- [21] Fruehan R.J. et al. The Making, Shaping, Treating of Steel, The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, USA. 1998.
- [22] Lui X.F., Zhang J.Y., Du W.D., Zhai Q.J. and Li Q., Numerical Simulation of Coupled Molten Steel Flow and Temperature Fields in Compact Strip Production Casting. Journal of iron and steel research 14(3) (2007): 20-25.
- [23] Material data sheet, SK38, The Siam Refractory Industry Co., LTD., Bangkok, Thailand

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

รายละเอียดอุปกรณ์ทดลอง แผนผังการเจาะอิฐ แปรนกล่องป้องกันความร้อน  
ลักษณะการก่ออิฐ



## 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 pagfile.
- **Full Audit Trail** – Guaranteed traceability of data

## ชนิดของ Data Logger (ต่อ)



TECHNICAL SPECIFICATIONS

### SPECIFIC THERMOCOUPLE TYPES

Measuring Range	Accuracy	Resolution	Socket Color
<b>Type K</b> -100°C to 1370°C (-148°F to 2498°F)	±0.3°C (±0.5°F)**	0.1°C (0.2°F)	Green
<b>Type N</b> -100°C to 1300°C (-148°F to 2372°F)	±0.4°C (±0.7°F)**	0.1°C (0.2°F)	Pink
<b>Type R</b> 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
<b>Type S</b> 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
<b>Type B</b> 55°C to 1815°C (32°F to 3200°F)	±3.0°C (±5.4°F) @ 400°C (752°F) ±1.0°C (±1.8°F) @ 1500°C (2732°F)	0.1°C (0.2°F)	Grey
<b>Type J</b> 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*	TP2086	TP2016	TP2186	TP2116
Number of Channels	8	10	8	10
Memory (data points)	130,000			
Maximum Operating	70°C (158°F)		110°C (230°F)	
Battery Type	NiMH rechargeable		VHT Lithium	
Maximum Battery Life**	340 hours between charges		250 hours	
Sampling Interval:				
No Telemetry	0.1 sec - 50 mins	0.1 sec - 50 mins	0.1 sec - 50 mins	0.1 sec - 50 mins
Hardwired Telemetry	1 sec - 50 mins	1 sec - 50 mins	1 sec - 50 mins	1 sec - 50 mins
RF Telemetry	n/a	2 secs - 50 mins	n/a	3 secs - 50 mins
Maximum Operating Pressure at 20°C (68°F)	20 bar/290 psi			
Minimum Operating Pressure at 20°C (68°F)	10 <sup>4</sup> 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  
DATAQA Limited,  
Cranland House, 160 Cowley Road,  
Cambridge CB4 0GU, UK.  
Tel: +44 (0)1223 423 141  
Fax: +44 (0)1223 423 306  
E-mail: [asia@dataqa.co.uk](mailto:asia@dataqa.co.uk)  
Web: [www.dataqa.com](http://www.dataqa.com)

North and South America  
DATAQA Inc.  
187 Ballardvale Street,  
Wilmington, MA 01887, USA  
Tel: +1 978 988 9000  
Fax: +1 978 988 0666  
E-mail: [sales@dataqa.com](mailto:sales@dataqa.com)  
Web: [www.dataqa.com](http://www.dataqa.com)

Germany  
DATAQA GmbH,  
Valdorfer Straße 100  
D-32602 Vlotho, Deutschland  
Tel: +49 5733 9107 0  
Fax: +49 5733 9107 27  
E-mail: [asia@dataqa.de](mailto:asia@dataqa.de)  
Web: [www.dataqa.de](http://www.dataqa.de)



[www.dataqa.com](http://www.dataqa.com)  
© 2011 Dataqa (Trade) Rev 01 210011  
Dataqa, the Dataqa logo and Parameter Tracker  
are registered trademarks of Dataqa.  
Specifications subject to change without notice.

## Thermocouple Type K



PA0710 Thermocouple

PA0760 Thermocouple

PA0370 Thermocouple

PA1580 Thermocouple

# 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. Microbel sheath protects against electrical 'noise' and furnace atmosphere.

Probe insulation material	Microbel '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	Microbel '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	Microbel '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

<b>Tpaq21 logger range</b>	10 Channel, Type K, N, R, S, B, 70°C & 110°C (158°F to 230°F) Operation
<b>Multipaq21 logger range</b>	8 Channel Type K & T
<b>Frequency ranges*</b>	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

<b>Operating Temperature Range</b>	-20°C to 110°C (-4°F to 230°F)
<b>Transmission Range</b>	200 m (656 ft) "in open field conditions"
<b>Max Number of Transmitters per System</b>	6
<b>Sampling Interval Range</b>	1 sec to 10 min
<b>Interleaving Limits</b>	10
<b>Approvals*</b>	EU-CEPT/ERC/70-03E USA-FCC CFR 47 Part 90 Japan-ARIB STD-T67 China-CMII-2010DJ5117

#### 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.

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

#### 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).

<b>Employs UGEF unity-gain end-feed antenna (RX1023 / RX1024)</b>	
<b>Dimensions (H x W x L)</b>	44 x 139 x 98 mm (1.7 x 5.5 x 3.9 in)
<b>Operating Specification as TM21 primary receiver (see above)</b>	
<b>Maximum number of secondary receivers in one system</b>	9
<b>On board status LED</b>	

#### Receiver Antenna Stand RX1020

Adjustable antenna stand used to support both UGEF antenna and receiver unit

#### UGEF Antenna and Receiver Box Mounting Kit RX2502

Comprises receiver box mounting assembly RX2501 & RX2500 UGEF antenna mount bracket

#### Insight™ Software

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

#### The Worldwide Leader in Temperature Profiling



Europe and Asia  
DATAFAQ Limited,  
Deanland House, 140 Cowley Road,  
Cambridge CB4 0GU, UK  
Tel: +44 (0) 1223 423 141  
Fax: +44 (0) 1223 423 204  
E-mail: sales@datafaq.com  
Web: www.datafaq.com

North and South America  
DATAFAQ Inc,  
127 Salsarville Street,  
Wilmington, MA 01987, USA  
Tel: +1 978 960 9000  
Fax: +1 978 960 0644  
E-mail: sales@datafaq.com  
Web: www.datafaq.com

Germany  
DATAFAQ GmbH,  
Vaidorfer Straße 100  
D-20400 Vlotho, Deutschland  
Tel: +49 5722 9107 0  
Fax: +49 5722 9107 67  
E-mail: sales@datafaq.de  
Web: www.datafaq.de



www.datafaq.com  
©2011 Datafaq (TM21 Rev C) 6/2011  
Datapaq, the Datapaq logo and Process Tracker  
are registered trademarks of Datapaq.  
Insight is a registered trademark of Datapaq.

## กล้องถ่ายภาพความร้อน



FLIR P Series

### FLIR P640

The High Performance infrared inspection system



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

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

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

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



GPS technology helps to record location information





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



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

## FLIR P640 Technical Specifications

<b>Imaging and optical data</b>		
Field of view (FOV) / Minimum focus distance	24° x 18° / 0.3 m	
Spatial resolution (IFOV)	0.65 mrad	
Thermal sensitivity (NETD)	36 mK @ +30°C	
Image frequency	36 Hz	
Focus	Automatic or manual (electric or on the lens)	
Zoom	1-8x continuous, digital zoom, including panning	
Focal Plane Array (FPA) / Spectral range	Uncooled microbolometer / 7.5-13 µm	
IR resolution	640 x 480 pixels	
<b>Image presentation</b>		
Display	Built-in widescreen, 5.6 in. LCD, 1024 x 800 pixels	
Viewfinder	Built-in, tiltable LCD, 800 x 600 pixels	
Automatic image adjustment	Continuous / manual, linear or histogram based	
Manual image adjustment	Level / pan / max / min	
Image modes	IR image, visual image, thermal fusion, picture in picture, thumbnail gallery	
Thermal fusion	IR image shown above, below or within loop interval on visual image	
Picture in Picture	Resizable and movable IR area on visual image	
Reference image	Shown together with live IR image	
<b>Measurement</b>		
Temperature range	-40°C to +500°C	
Accuracy	+2°C or +2% of reading	
<b>Measurement analysis</b>		
Spotmeter	16	
Area	5 boxes or circles with max. / min. / average	
Automatic hot / cold detection	Max / Min temp. value and position shown within box, circle or on a line	
ISO/Sharp	2 with above / below / interval	
Profile	1 live line (horizontal or vertical)	
Difference temperature	Delta temperature between measurement functions or reference temperature	
Reference temperature	Manually set or captured from any measurement function	
Emissivity correction	Variable from 0.01 to 1.0 or selected from adiabatic materials list	
Measurement corrections	Reflected temperature, optics transmission, atmospheric transmission and optional optics	
Measurement function alarm	Audible/visual alarms (above / below) on any selected measurement function	
<b>Set-up</b>		
Set-up commands	Configurable measurement tools menu; configures information to be shown in image; 2 programmable buttons; user profiles; local adaptation of units, language, date and time formats	
<b>Storage of images</b>		
Image storage	Standard JPEG, including measurement data, on memory card	
Image storage mode	Built-in RAM for burst recording	
Image storage mode	IR / visual images; simultaneous storage of IR and visual images	
Periodic image storage	Visual image is automatically associated with corresponding IR image	
Panorama	Every 10 seconds up to 24 hours	
Panorama	For creating panorama images in FLIR Reporter Building software	
<b>Image annotations</b>		
Voice	60 seconds stored with the image	
Text	Predefined text or free text from PDA (via HDA) stored with the image	
Image marker	4 on IR or visual image	
<b>Video recording and streaming</b>		
Radiometric IR-video recording	Real-time to built-in RAM, transferable to memory card	
Non-radiometric IR-video recording	MPEG-4 to memory card	
Non-radiometric IR-video streaming	MPEG-4 to PC using USB or WLAN (optional)	
<b>Digital camera</b>		
Built-in digital camera	3.2 Mpixel, auto focus, and video lamp	
<b>Laser pointer</b>		
Laser	Activated by dedicated button	
<b>Data communications interfaces</b>		
Interfaces	USB-mini, USB-A, IrDA, composite video, headset connection	
<b>Power system</b>		
Battery	Li Ion, 3 hours operating time	
Charging system	In camera (AC adaptor or 12 V from a vehicle) or 2-bay charger	
Power management	Automatic shutdown and sleep mode (user selectable)	
<b>Environmental data</b>		
Operating temperature range	-15°C to +50°C	
Storage temperature range	-40°C to +70°C	
Humidity (operating and storage)	IEC 68-2-30/24 h 95% relative humidity +25°C to +40°C	
Encapsulation	IP 54 (IEC 60529)	
Bump	25 g (IEC 60068-2-26)	
Vibration	2 g (IEC 60068-2-6)	
<b>Physical data</b>		
Camera weight, incl. lens and battery	1.8 kg	
Camera size, incl. lens (L x W x H)	204 x 144 x 147 mm	
Tripod mounting	UNIC V-30	
<b>Camera include:</b>		
Hard transport case		
Infrared camera with lens		
Battery (2 ea., one inserted in camera, one outside camera)		
Battery charger		
Calibration certificate		
FLIR QuickReport™ PC software CD-ROM		
FireWire cable, 4/E		
FireWire cable, 6/E		
Headset		
Lens cap (mounted on lens)		
Lens cap (2 ea.)		
Macro cable		
Memory card-to-USB adapter		
Memory card with adapter		
Power supply		
Printed Getting Started Guide		
Shoulder strap		
USB cable		
User documentation CD-ROM		
Video cable		
Warranty extension card or Registration card		
<b>Supplies &amp; Accessories</b>		
Close-up IR lens 0.5X, 1 - 75 mm (for 24° IR lens) for ThermoCAM and FLIR 800 series		
IR lens 1 - 75 mm, 12° incl. case for FLIR 800 series		
IR lens 1 - 131 mm, 3° incl. case for FLIR 800 series		
IR lens 1 - 15 mm, 45° incl. case for FLIR 800 series		
IR lens 1 - 38 mm, 24° incl. case for FLIR 800 series		
Macro lens to (25 cm) with case		
Protective window (for 24°) with case		
High temperature option +200°C		
High temperature option +500°C		
Battery		
Battery charger, incl. power supply and cable		
Battery charger, incl. power supply and cable		
Battery charger, incl. power supply and cable		
Battery charger, incl. power supply with multi-plug		
Power supply, incl. multi-plug		
SD memory card, 1 GB		
Adapter, SD memory card to USB		
Memory card micro-SD with adapter		
USB cable Std A-c to Mini-B, 2 m		
FireWire cable 6/E, 2.0 m		
FireWire cable 4/E, 2.0 m		
Video cable, RCA-c to RCA, 2.0 m		
Cigarette lighter adapter kit, 12 VDC, 1.2 m		
Hard transport case for FLIR 800 series		
Shoulder, 2.5 mm plug		
Remote Control Unit		
FLIR Reporter V1e 8.2 Professional (Sec. device)		
FLIR Reporter V1e 8.2 Professional (Sec. device)		
FLIR Reporter V1e 8.2 Standard (Sec. device)		
FLIR Reporter V1e 8.2 Standard		
FLIR Reporter V1e 8.5 Standard		
FLIR Reporter V1e 8.5 Professional		
Cover Visual Camera kit		
		
FLIR Reporter software powered yet easy-to-use tool to generate comprehensive and professional infrared inspection reports.		
		

Asia Pacific Headquarter  
 Hong Kong  
 FLIR Systems Co Ltd.  
 Room 1613 - 15, Tower 2 Grand Central Plaza  
 138 Sha Tin Rural Committee Road, N.T, Hong Kong  
 Tel: +852 2782 8865 Fax: +852 2782 8162  
 Email: flir@flir.com.hk Web: www.flir.com/hk



Specifications and prices subject to change without notice. Copyright © 2006 FLIR Systems. All rights reserved including the right of reproduction in whole or in part in any form.

## Thermocouple ที่โรงงานใช้วัดอุณหภูมิเหล็ก

### 3. THERMOCOUPLE ALLOYS

In 1885, Henri Le Chatelier 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.

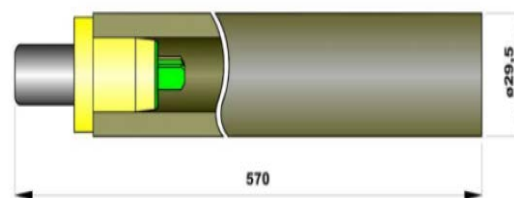
For type S and R thermocouples, compensation wires made of copper (positive leg) and copper-nickel (negative leg) are used. For type B thermocouples, compensation wires made of copper are sufficient.

### 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.



**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 ( $Al_2O_3$ )

**TTZ:** 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



OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
0.050	x 0.020	1.27	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  $\pm 0.007$  (0.076 mm), whichever is greater. Straightness:  $\leq 0.007/1.000'$  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	65659
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



OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
0.063	x 0.016	1.60	x 0.41	65684
0.085	x 0.024	2.13	x 0.60	65692
0.094	x 0.020	2.39	x 0.51	65683
0.109	x 0.020	2.77	x 0.51	65687

OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
0.188	x 0.031	4.78	x 0.79	65685
0.188	x 0.047	4.78	x 1.19	65698
0.219	x 0.050	5.56	x 1.27	65686
0.258	x 0.078	6.55	x 1.98	65689

Diameter tolerance  $\pm 3\%$  or  $\pm 0.007$  (0.076 mm), whichever is greater. Straightness:  $\leq 0.007/1.000'$  cumulative

#### AD-998 Round Double Bore Tubing



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	65678
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  $\pm 0.007$  (0.076 mm), whichever is greater. Straightness:  $\leq 0.007/1.000'$  cumulative

OD Inch	ID Inch	OD mm	ID mm	Part#
0.750	x 0.563	19.05	x 14.20	65680
0.875	x 0.625	22.23	x 15.88	65668
1.000	x 0.750	25.40	x 19.05	65825

#### AD-998 Oval Double Bore Tubing



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

Diameter tolerance  $\pm 3\%$  or  $\pm 0.007$  (0.076 mm), whichever is greater. Straightness:  $\leq 0.007/1.000'$  cumulative

#### 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 14.20	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  $\pm 0.030$  (0.76 mm), whichever is greater. Straightness:  $\leq 0.006/1.000'$  cumulative

\* Available in single reduced end (SRE).  
 † Available on a special order basis.



Open Both Ends (OBE)



Closed One End (OCE)



Single Reduced End (SRE)

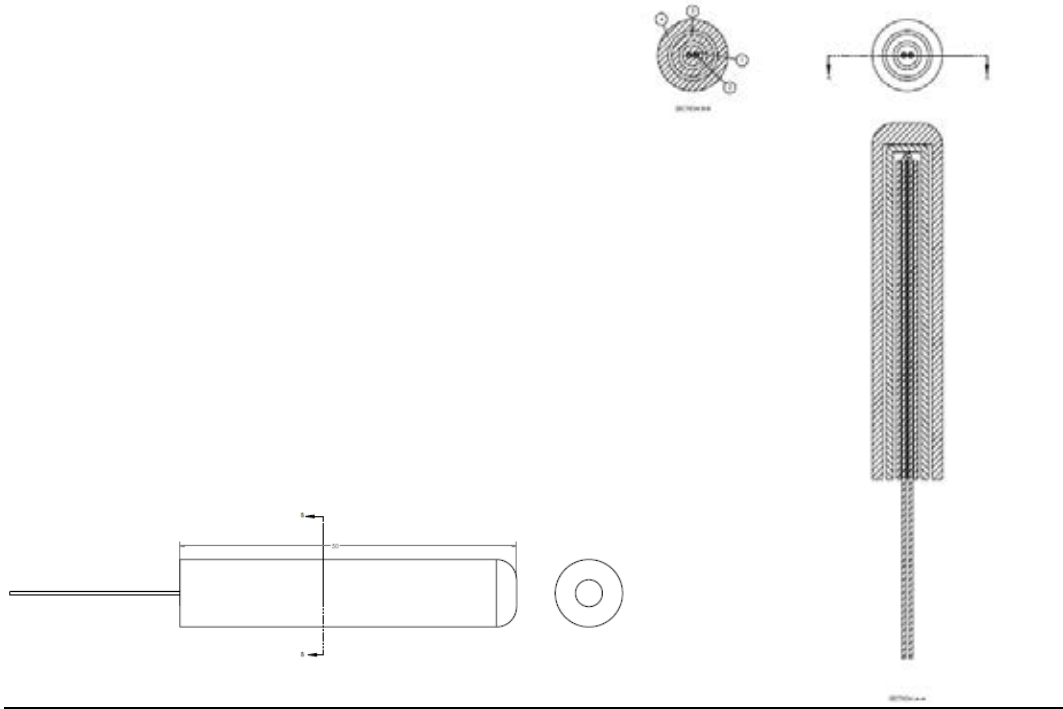


Full Closed One End (FCE)

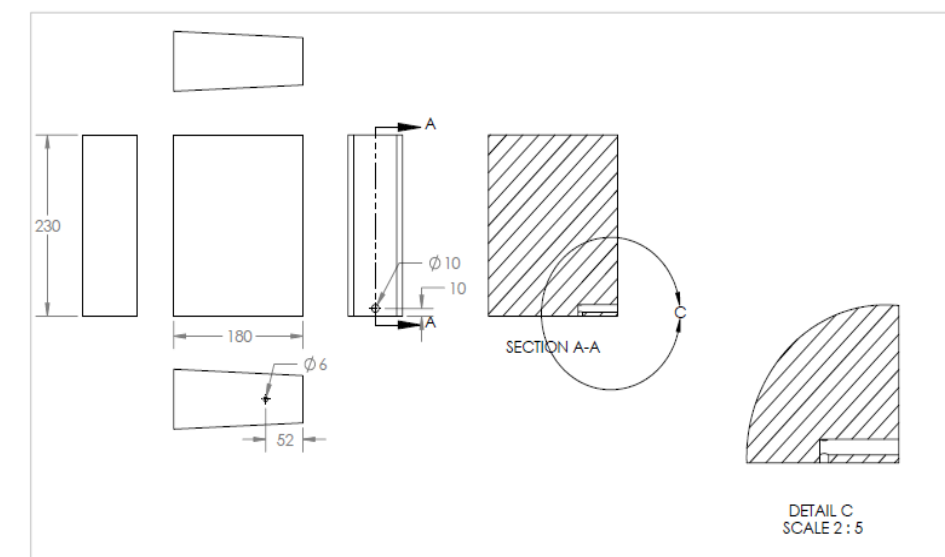


PROPERTIES	UNITS	TEST	Maxlife	Alumina			Zirconia		
			3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·2SiO <sub>2</sub>	AD-94	AD-998	AD-996	TTZ	YTZP	ZBY
<b>Physical Properties</b>									
Density	grams/cc	ASTM C20	2.80	3.70	3.92	3.90	5.72	6.02	5.60
Color			Tan	White	Ivory	Ivory	Ivory	Ivory	Ivory
Permeability			Gas-Tight	Gas-Tight	Gas-Tight	Gas-Tight	Gas-Tight	Gas-Tight	Ionic
<b>Mechanical Properties</b>									
Elastic Modulus Typical 20° C	GPa(ksi·10 <sup>3</sup> )	ASTM C848	150 (22)	303 (44)	370 (54)	370 (54)	200 (29)	210 (30)	173 (25)
Flexural Strength (MOR) Typical 20° C	MPa (kpsi)	C1161-02	170 (25)	352 (51)	375 (54)	379 (55)	620 (90)	900 (130)	207 (30)
Typical 1000° C			151 (22)	138 (20)	210 (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 <sup>1/2</sup>	NOTCHED BEAM	2	4 - 5	4 - 5	4 - 5	11	13	3
Hardness	NEWTONS GPa(kg/mm <sup>2</sup> )	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 —
<b>Thermal Properties</b>									
Thermal Conductivity 20° C	W/m <sup>2</sup> 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 <sup>-6</sup> /°C (10 <sup>-6</sup> /°F)	ASTM C172	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 <sup>2</sup> K (cal/g <sup>2</sup> °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 <sup>2</sup> C/D <sup>2</sup> F	DTc	300 (570)	250 (480)	200 (392)	200 (392)	350 (660)	350 (660)	150 (300)
<b>Electrical Properties</b>									
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 <sup>14</sup> 5 x 10 <sup>12</sup> 3 x 10 <sup>12</sup>	> 10 <sup>14</sup> 4 x 10 <sup>12</sup> 5 x 10 <sup>12</sup>	> 10 <sup>14</sup> 2 x 10 <sup>12</sup> 5 x 10 <sup>12</sup>	> 10 <sup>14</sup> 2 x 10 <sup>12</sup> 2 x 10 <sup>12</sup>	> 10 <sup>14</sup> 2 x 10 <sup>12</sup> < 10 <sup>12</sup>	> 10 <sup>14</sup> 2 x 10 <sup>12</sup> < 10 <sup>12</sup>	— — —
Dielectric Constant	25° C@1MHz		6.0	9.1	9.8	9.7	28.0	29.0	—
<b>General Characteristics</b>			Good thermal shock resistance NOT recommended for high temp. 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	

**Drawing thermocouple ชนิด B**

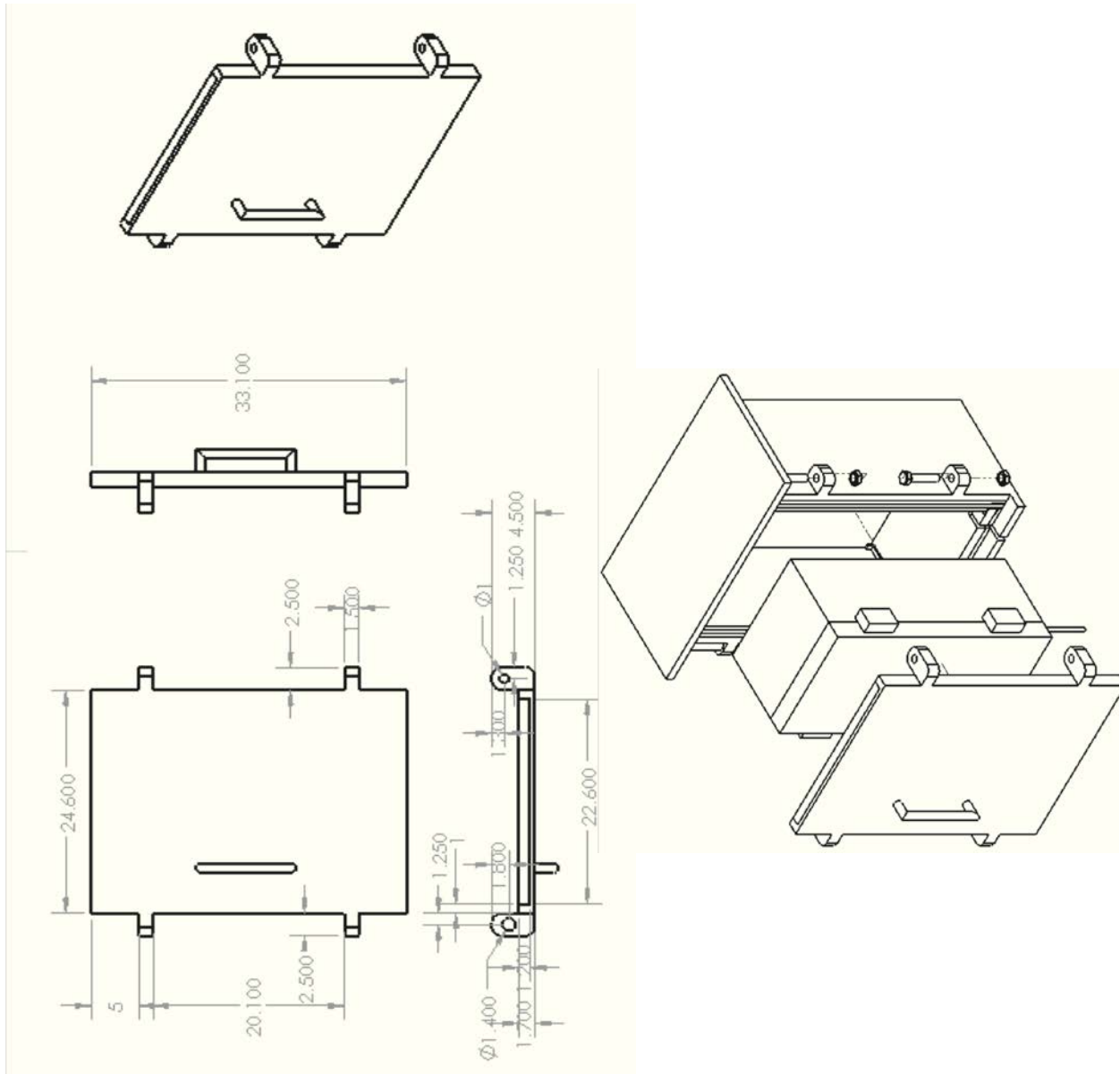


**Drawing เฉาก้อนสำหรับการฝังเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B**









ภาคผนวก ข

การเปลี่ยนอนุกรมจากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K เป็นชนิด B

## เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (EMF) ประกอบด้วยโลหะตัวนำต่างชนิดกัน 2 เส้น ที่มีความแตกต่างกันของโครงสร้างอะตอม นำมาเชื่อมกันที่ปลายข้างหนึ่งที่เรียกว่าจุดที่วัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกข้างเรียกว่าจุดอ้างอิง สำหรับการนำไปใช้งานจะนำจุดที่วัดอุณหภูมิไปสัมผัสกับสิ่งของที่ต้องการวัด ซึ่งทำให้เกิดความแตกต่างกันของอุณหภูมิระหว่างปลายทั้ง 2 ด้าน (จุดวัดอุณหภูมิ และ จุดอ้างอิง) ส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันเมื่อโลหะตัวนำต่างชนิดกัน ส่งผลให้เกิดเป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิดต่างๆ นอกจากนี้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เท่ากันอาจจะก่อให้เกิดอุณหภูมิที่แตกต่างกันได้เมื่อใช้เทอร์โมคัปเปิลต่างชนิดกัน โดยที่แรงเคลื่อนที่เกิดขึ้นจะแปลงเป็นอุณหภูมิต่างๆ ได้ตามชนิดของตัวนำที่นำมาประกอบเป็นเทอร์โมคัปเปิล

สำหรับการทดลองในครั้งนี้ได้ใช้กล่องเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ในการเก็บอุณหภูมิที่ใช้วัดโลหะจากเทอร์โมคัปเปิลชนิด B ดังนั้นอุณหภูมิที่ได้จากการอ่านอุณหภูมิด้วย Data Logger ชนิด K นั้นต้องแปลงกลับเป็น EMF ของเทอร์โมคัปเปิลชนิด B ที่ส่งมาแล้วจึงนำไปแปลงเป็นอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลชนิด B โดยใช้ตารางผลการแปลงเทอร์โมคัปเปิลชนิด K และ B เข้าช่วย โดยที่ตารางแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับ EMF ของเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K และ B แสดงดังรูป ก. และรูป ข. ตามลำดับ

ในทางปฏิบัติ เราใช้เทอร์โมคัปเปิล ชนิด B แล้วใช้ Data Logger ชนิด K เก็บข้อมูล โดยที่ถ้าข้อมูลที่เก็บได้เป็น  $260^{\circ}\text{C}$  ดังนั้น EMF ที่ได้คือ 10.56 millivolts จากรูป ก. ซึ่งค่า EMF ที่เกิดขึ้นต้องนำไปแปลงเป็นอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิลชนิด B ด้วยรูป ข. ซึ่งจะอ่านค่าอุณหภูมิได้ประมาณ  $1540^{\circ}\text{C}$  และเนื่องจากตารางนั้นมีการอ้างอิงที่จุดอ้างอิงคือ  $0^{\circ}\text{C}$  แต่การนำไปใช้งานจริง ไม่ได้ใช้งานที่ Reference Junction ที่  $0^{\circ}\text{C}$  จึงต้องมีการปรับเปลี่ยนอีกเล็กน้อย

## Chromel vs Alumel (0°C to 640°C)

EMF in millivolts - Reference Junction 0°C

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	.000	.039	.079	.119	.158	.198	.238	.277	.317	.357	.397	0
10	.397	.437	.477	.517	.557	.597	.637	.677	.718	.758	.798	10
20	.798	.838	.879	.919	.960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.162	1.203	20
30	1.203	1.244	1.285	1.325	1.366	1.407	1.448	1.489	1.529	1.570	1.611	30
40	1.611	1.652	1.693	1.734	1.776	1.817	1.858	1.899	1.940	1.981	2.022	40
50	2.022	2.064	2.105	2.146	2.188	2.229	2.270	2.312	2.353	2.394	2.436	50
60	2.436	2.477	2.519	2.560	2.601	2.643	2.684	2.726	2.767	2.809	2.850	60
70	2.850	2.892	2.933	2.975	3.016	3.058	3.100	3.141	3.183	3.224	3.266	70
80	3.266	3.307	3.349	3.390	3.432	3.473	3.515	3.556	3.598	3.639	3.681	80
90	3.681	3.722	3.764	3.805	3.847	3.888	3.930	3.971	4.012	4.054	4.095	90
100	4.095	4.137	4.178	4.219	4.261	4.302	4.343	4.384	4.426	4.467	4.508	100
110	4.508	4.549	4.590	4.632	4.673	4.714	4.755	4.796	4.837	4.878	4.919	110
120	4.919	4.960	5.001	5.042	5.083	5.124	5.164	5.205	5.246	5.287	5.327	120
130	5.327	5.368	5.409	5.450	5.490	5.531	5.571	5.612	5.652	5.693	5.733	130
140	5.733	5.774	5.814	5.855	5.895	5.936	5.976	6.016	6.057	6.097	6.137	140
150	6.137	6.177	6.218	6.258	6.298	6.338	6.378	6.419	6.459	6.499	6.539	150
160	6.539	6.579	6.619	6.659	6.699	6.739	6.779	6.819	6.859	6.899	6.939	160
170	6.939	6.979	7.019	7.059	7.099	7.139	7.179	7.219	7.259	7.299	7.338	170
180	7.338	7.378	7.418	7.458	7.498	7.538	7.578	7.618	7.658	7.697	7.737	180
190	7.737	7.777	7.817	7.857	7.897	7.937	7.977	8.017	8.057	8.097	8.137	190
200	8.137	8.177	8.216	8.256	8.296	8.336	8.376	8.416	8.456	8.497	8.537	200
210	8.537	8.577	8.617	8.657	8.697	8.737	8.777	8.817	8.857	8.898	8.938	210
220	8.938	8.978	9.018	9.058	9.098	9.139	9.179	9.220	9.260	9.300	9.341	220
230	9.341	9.381	9.421	9.462	9.502	9.543	9.583	9.624	9.664	9.705	9.745	230
240	9.745	9.786	9.826	9.867	9.907	9.948	9.989	10.029	10.070	10.111	10.151	240
250	10.151	10.192	10.233	10.274	10.315	10.355	10.396	10.437	10.478	10.519	10.560	250
260	10.560	10.600	10.641	10.682	10.723	10.764	10.805	10.846	10.887	10.928	10.969	260
270	10.969	11.010	11.051	11.093	11.134	11.175	11.216	11.257	11.298	11.339	11.381	270
280	11.381	11.422	11.461	11.504	11.546	11.587	11.628	11.669	11.711	11.752	11.793	280
290	11.793	11.835	11.876	11.918	11.959	12.000	12.042	12.083	12.125	12.166	12.207	290
300	12.207	12.249	12.290	12.332	12.373	12.415	12.456	12.498	12.539	12.581	12.623	300
310	12.623	12.664	12.706	12.747	12.789	12.831	12.872	12.914	12.955	12.997	13.039	310
320	13.039	13.080	13.122	13.164	13.205	13.247	13.289	13.331	13.372	13.414	13.456	320
330	13.456	13.497	13.539	13.581	13.623	13.665	13.706	13.748	13.790	13.832	13.874	330
340	13.874	13.915	13.957	13.999	14.041	14.083	14.125	14.167	14.208	14.250	14.292	340
350	14.292	14.334	14.376	14.418	14.460	14.502	14.544	14.586	14.628	14.670	14.712	350
360	14.712	14.754	14.796	14.838	14.880	14.922	14.964	15.006	15.048	15.090	15.132	360
370	15.132	15.174	15.216	15.258	15.300	15.342	15.384	15.426	15.468	15.510	15.552	370
380	15.552	15.594	15.636	15.679	15.721	15.763	15.805	15.847	15.889	15.931	15.974	380
390	15.974	16.016	16.058	16.100	16.142	16.184	16.227	16.269	16.311	16.353	16.395	390
400	16.395	16.438	16.480	16.522	16.564	16.607	16.649	16.691	16.733	16.776	16.818	400
410	16.818	16.860	16.902	16.945	16.987	17.029	17.072	17.114	17.156	17.199	17.241	410
420	17.241	17.283	17.326	17.368	17.410	17.453	17.495	17.537	17.580	17.622	17.664	420
430	17.664	17.707	17.749	17.792	17.834	17.876	17.919	17.961	18.004	18.046	18.088	430
440	18.088	18.131	18.173	18.216	18.258	18.301	18.343	18.385	18.428	18.470	18.513	440
450	18.513	18.555	18.598	18.640	18.683	18.725	18.768	18.810	18.853	18.895	18.938	450
460	18.938	18.980	19.023	19.065	19.108	19.150	19.193	19.235	19.278	19.320	19.363	460
470	19.363	19.405	19.448	19.490	19.533	19.576	19.618	19.661	19.703	19.746	19.788	470
480	19.788	19.831	19.873	19.916	19.959	20.001	20.044	20.086	20.129	20.172	20.214	480
490	20.214	20.257	20.299	20.342	20.385	20.427	20.470	20.512	20.555	20.598	20.640	490
500	20.640	20.683	20.725	20.768	20.811	20.853	20.896	20.938	20.981	21.024	21.066	500
510	21.066	21.109	21.152	21.194	21.237	21.280	21.322	21.365	21.407	21.450	21.493	510
520	21.493	21.535	21.578	21.621	21.663	21.706	21.749	21.791	21.834	21.876	21.919	520
530	21.919	21.962	22.004	22.047	22.090	22.132	22.175	22.218	22.260	22.303	22.346	530
540	22.346	22.388	22.431	22.473	22.516	22.559	22.601	22.644	22.687	22.729	22.772	540
550	22.772	22.815	22.857	22.900	22.942	22.985	23.028	23.070	23.113	23.156	23.198	550
560	23.198	23.241	23.284	23.326	23.369	23.411	23.454	23.497	23.539	23.582	23.624	560

รูป ก แสดงความสัมพันธ์ของ EMF และอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K



°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
570	23.624	23.667	23.710	23.752	23.795	23.837	23.880	23.923	23.965	24.008	24.050	570
580	24.050	24.093	24.136	24.178	24.221	24.263	24.306	24.348	24.391	24.434	24.476	580
590	24.476	24.519	24.561	24.604	24.646	24.689	24.731	24.774	24.817	24.859	24.902	590
600	24.902	24.944	24.987	25.029	25.072	25.114	25.157	25.199	25.242	25.284	25.327	600
610	25.327	25.369	25.412	25.454	25.497	25.539	25.582	25.624	25.666	25.709	25.751	610
620	25.751	25.794	25.836	25.879	25.921	25.964	26.006	26.048	26.091	26.133	26.176	620
630	26.176	26.218	26.260	26.303	26.345	26.387	26.430	26.472	26.515	26.557	26.599	630
640	26.599	26.642	26.684	26.726	26.769	26.811	26.853	26.896	26.938	26.980	27.022	640
650	27.022	27.065	27.107	27.149	27.192	27.234	27.276	27.318	27.361	27.403	27.445	650
660	27.445	27.487	27.529	27.572	27.614	27.656	27.698	27.740	27.783	27.825	27.867	660
670	27.867	27.909	27.951	27.993	28.035	28.078	28.120	28.162	28.204	28.246	28.288	670
680	28.288	28.330	28.372	28.414	28.456	28.498	28.540	28.583	28.625	28.667	28.709	680
690	28.709	28.751	28.793	28.835	28.877	28.919	28.961	29.002	29.044	29.086	29.128	690
700	29.128	29.170	29.212	29.254	29.296	29.338	29.380	29.422	29.464	29.505	29.547	700
710	29.547	29.589	29.631	29.673	29.715	29.756	29.798	29.840	29.882	29.924	29.965	710
720	29.965	30.007	30.049	30.091	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341	30.383	720
730	30.383	30.424	30.466	30.508	30.549	30.591	30.632	30.674	30.716	30.757	30.799	730
740	30.799	30.840	30.882	30.924	30.965	31.007	31.048	31.090	31.131	31.173	31.214	740
750	31.214	31.256	31.297	31.339	31.380	31.422	31.463	31.504	31.546	31.587	31.629	750
760	31.629	31.670	31.712	31.753	31.794	31.836	31.877	31.918	31.960	32.001	32.042	760
770	32.042	32.084	32.125	32.166	32.207	32.249	32.290	32.331	32.372	32.414	32.455	770
780	32.455	32.496	32.537	32.578	32.619	32.661	32.702	32.743	32.784	32.825	32.866	780
790	32.866	32.907	32.948	32.990	33.031	33.072	33.113	33.154	33.195	33.236	33.277	790
800	33.277	33.318	33.359	33.400	33.441	33.482	33.523	33.564	33.604	33.645	33.686	800
810	33.686	33.727	33.768	33.809	33.850	33.891	33.931	33.972	34.013	34.054	34.095	810
820	34.095	34.136	34.176	34.217	34.258	34.299	34.339	34.380	34.421	34.461	34.502	820
830	34.502	34.543	34.583	34.624	34.665	34.705	34.746	34.787	34.827	34.868	34.909	830
840	34.909	34.949	34.990	35.030	35.071	35.111	35.152	35.192	35.233	35.273	35.314	840
850	35.314	35.354	35.395	35.435	35.476	35.516	35.557	35.597	35.637	35.678	35.718	850
860	35.718	35.758	35.799	35.839	35.880	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081	36.121	860
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.483	36.524	870
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.684	36.724	36.764	36.804	36.844	36.885	36.925	880
890	36.925	36.965	37.005	37.045	37.085	37.125	37.165	37.205	37.245	37.285	37.325	890
900	37.325	37.365	37.405	37.445	37.484	37.524	37.564	37.604	37.644	37.684	37.724	900
910	37.724	37.764	37.803	37.843	37.883	37.923	37.963	38.002	38.042	38.082	38.122	910
920	38.122	38.162	38.201	38.241	38.281	38.320	38.360	38.400	38.439	38.479	38.519	920
930	38.519	38.558	38.598	38.638	38.677	38.717	38.756	38.796	38.836	38.875	38.915	930
940	38.915	38.954	38.994	39.033	39.073	39.112	39.152	39.191	39.231	39.270	39.310	940
950	39.310	39.349	39.388	39.428	39.467	39.507	39.546	39.585	39.625	39.664	39.703	950
960	39.703	39.743	39.782	39.821	39.861	39.900	39.939	39.979	40.018	40.057	40.096	960
970	40.096	40.136	40.175	40.214	40.253	40.292	40.332	40.371	40.410	40.449	40.488	970
980	40.488	40.527	40.566	40.605	40.645	40.684	40.723	40.762	40.801	40.840	40.879	980
990	40.879	40.918	40.957	40.996	41.035	41.074	41.113	41.152	41.191	41.230	41.269	990
1000	41.269	41.308	41.347	41.385	41.424	41.463	41.502	41.541	41.580	41.619	41.657	1000
1010	41.657	41.696	41.735	41.774	41.813	41.851	41.890	41.929	41.968	42.006	42.045	1010
1020	42.045	42.084	42.123	42.161	42.200	42.239	42.277	42.316	42.355	42.393	42.432	1020
1030	42.432	42.470	42.509	42.548	42.586	42.625	42.663	42.702	42.740	42.779	42.817	1030
1040	42.817	42.856	42.894	42.933	42.971	43.010	43.048	43.087	43.125	43.164	43.202	1040
1050	43.202	43.240	43.279	43.317	43.356	43.394	43.432	43.471	43.509	43.547	43.585	1050
1060	43.585	43.624	43.662	43.700	43.739	43.777	43.815	43.853	43.891	43.930	43.968	1060
1070	43.968	44.006	44.044	44.082	44.121	44.159	44.197	44.235	44.273	44.311	44.349	1070
1080	44.349	44.387	44.425	44.463	44.501	44.539	44.577	44.615	44.653	44.691	44.729	1080
1090	44.729	44.767	44.805	44.843	44.881	44.919	44.957	44.995	45.033	45.070	45.108	1090

รูป ก แสดงความสัมพันธ์ของ EMF และอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K (ต่อ)

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
1100	45.108	45.146	45.184	45.222	45.260	45.297	45.335	45.373	45.411	45.448	45.486	1100
1110	45.486	45.524	45.561	45.599	45.637	45.675	45.712	45.750	45.787	45.825	45.863	1110
1120	45.863	45.900	45.938	45.975	46.013	46.051	46.088	46.126	46.163	46.201	46.238	1120
1130	46.238	46.275	46.313	46.350	46.388	46.425	46.463	46.500	46.537	46.575	46.612	1130
1140	46.612	46.649	46.687	46.724	46.761	46.799	46.836	46.873	46.910	46.948	46.985	1140
1150	46.985	47.022	47.059	47.096	47.134	47.171	47.208	47.245	47.282	47.319	47.356	1150
1160	47.356	47.393	47.430	47.468	47.505	47.542	47.579	47.616	47.653	47.689	47.726	1160
1170	47.726	47.763	47.800	47.837	47.874	47.911	47.948	47.985	48.021	48.058	48.095	1170
1180	48.095	48.132	48.169	48.205	48.242	48.279	48.316	48.352	48.389	48.426	48.462	1180
1190	48.462	48.499	48.536	48.572	48.609	48.645	48.682	48.718	48.755	48.792	48.828	1190
1200	48.828	48.865	48.901	48.937	48.974	49.010	49.047	49.083	49.120	49.156	49.192	1200
1210	49.192	49.229	49.265	49.301	49.338	49.374	49.410	49.446	49.483	49.519	49.555	1210
1220	49.555	49.591	49.627	49.663	49.700	49.736	49.772	49.808	49.844	49.880	49.916	1220
1230	49.916	49.952	49.988	50.024	50.060	50.096	50.132	50.168	50.204	50.240	50.276	1230
1240	50.276	50.311	50.347	50.383	50.419	50.455	50.491	50.526	50.562	50.598	50.633	1240
1250	50.633	50.669	50.705	50.741	50.776	50.812	50.847	50.883	50.919	50.954	50.990	1250
1260	50.990	51.025	51.061	51.096	51.132	51.167	51.203	51.238	51.274	51.309	51.344	1260
1270	51.344	51.380	51.415	51.450	51.486	51.521	51.556	51.592	51.627	51.662	51.697	1270
1280	51.697	51.733	51.768	51.803	51.838	51.873	51.908	51.943	51.979	52.014	52.049	1280
1290	52.049	52.084	52.119	52.154	52.189	52.224	52.259	52.294	52.329	52.364	52.398	1290
1300	52.398	52.433	52.468	52.503	52.538	52.573	52.608	52.642	52.677	52.712	52.747	1300
1310	52.747	52.781	52.816	52.851	52.886	52.920	52.955	52.989	53.024	53.059	53.093	1310
1320	53.093	53.128	53.162	53.197	53.232	53.266	53.301	53.335	53.370	53.404	53.439	1320
1330	53.439	53.473	53.507	53.542	53.576	53.611	53.645	53.679	53.714	53.748	53.782	1330
1340	53.782	53.817	53.851	53.885	53.920	53.954	53.988	54.022	54.057	54.091	54.125	1340
1350	54.125	54.159	54.193	54.228	54.262	54.296	54.330	54.364	54.398	54.432	54.466	1350
1360	54.466	54.501	54.535	54.569	54.603	54.637	54.671	54.705	54.739	54.773	54.807	1360
1370	54.807	54.841	54.875									1370

รูป ก แสดงความสัมพันธ์ของ EMF และอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K (ต่อ)

Thermoelectric Voltage in Millivolts

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C
0	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002	0
10	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	10
20	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	20
30	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	30
40	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.006	-0.006	-0.006	-0.006	40
50	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006	50
60	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.010	0.010	0.011	0.011	60
70	0.011	0.012	0.012	0.013	0.014	0.014	0.015	0.015	0.016	0.017	0.017	70
80	0.017	0.018	0.019	0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.023	0.024	0.025	80
90	0.025	0.026	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.033	90
100	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043	100
110	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053	110
120	0.053	0.055	0.056	0.057	0.058	0.059	0.060	0.062	0.063	0.064	0.065	120
130	0.066	0.068	0.069	0.070	0.072	0.073	0.074	0.075	0.077	0.078	0.079	130
140	0.078	0.079	0.081	0.082	0.084	0.085	0.086	0.088	0.089	0.091	0.092	140
150	0.092	0.094	0.095	0.096	0.098	0.099	0.101	0.102	0.104	0.105	0.107	150
160	0.107	0.109	0.110	0.112	0.113	0.115	0.117	0.118	0.120	0.122	0.123	160
170	0.123	0.125	0.127	0.128	0.130	0.132	0.134	0.135	0.137	0.139	0.141	170
180	0.141	0.142	0.144	0.146	0.148	0.150	0.151	0.153	0.155	0.157	0.159	180
190	0.159	0.161	0.163	0.165	0.166	0.168	0.170	0.172	0.174	0.176	0.178	190
200	0.178	0.180	0.182	0.184	0.186	0.188	0.190	0.192	0.195	0.197	0.199	200
210	0.199	0.201	0.203	0.205	0.207	0.209	0.212	0.214	0.216	0.218	0.220	210
220	0.220	0.222	0.225	0.227	0.229	0.231	0.234	0.236	0.238	0.241	0.243	220
230	0.243	0.245	0.248	0.250	0.252	0.255	0.257	0.259	0.262	0.264	0.267	230
240	0.267	0.269	0.271	0.274	0.276	0.279	0.281	0.284	0.286	0.289	0.291	240
250	0.291	0.294	0.296	0.299	0.301	0.304	0.307	0.309	0.312	0.314	0.317	250
260	0.317	0.320	0.322	0.325	0.328	0.330	0.333	0.336	0.338	0.341	0.344	260
270	0.344	0.347	0.349	0.352	0.355	0.358	0.360	0.363	0.366	0.369	0.372	270
280	0.372	0.375	0.377	0.380	0.383	0.385	0.388	0.392	0.395	0.398	0.401	280
290	0.401	0.404	0.407	0.410	0.413	0.416	0.419	0.422	0.425	0.428	0.431	290
300	0.431	0.434	0.437	0.440	0.443	0.446	0.449	0.452	0.455	0.458	0.462	300
310	0.462	0.465	0.468	0.471	0.474	0.478	0.481	0.484	0.487	0.490	0.494	310
320	0.494	0.497	0.500	0.503	0.507	0.510	0.513	0.517	0.520	0.523	0.527	320
330	0.527	0.530	0.533	0.537	0.540	0.544	0.547	0.550	0.554	0.557	0.561	330
340	0.561	0.564	0.568	0.571	0.575	0.578	0.582	0.585	0.589	0.592	0.596	340
350	0.596	0.599	0.603	0.606	0.610	0.614	0.618	0.622	0.626	0.630	0.634	350
360	0.634	0.638	0.642	0.646	0.650	0.654	0.658	0.662	0.666	0.670	0.674	360
370	0.674	0.678	0.682	0.686	0.690	0.694	0.698	0.702	0.706	0.710	0.714	370
380	0.714	0.718	0.722	0.726	0.730	0.734	0.738	0.742	0.746	0.750	0.754	380
390	0.754	0.758	0.762	0.766	0.770	0.774	0.778	0.782	0.786	0.790	0.794	390
400	0.794	0.798	0.802	0.806	0.810	0.814	0.818	0.822	0.826	0.830	0.834	400
410	0.834	0.838	0.842	0.846	0.850	0.854	0.858	0.862	0.866	0.870	0.874	410
420	0.874	0.878	0.882	0.886	0.890	0.894	0.898	0.902	0.906	0.910	0.914	420
430	0.914	0.918	0.922	0.926	0.930	0.934	0.938	0.942	0.946	0.950	0.954	430
440	0.954	0.958	0.962	0.966	0.970	0.974	0.978	0.982	0.986	0.990	0.994	440
450	0.994	0.998	1.002	1.006	1.010	1.014	1.018	1.022	1.026	1.030	1.034	450
460	1.034	1.038	1.042	1.046	1.050	1.054	1.058	1.062	1.066	1.070	1.074	460
470	1.074	1.078	1.082	1.086	1.090	1.094	1.098	1.102	1.106	1.110	1.114	470
480	1.114	1.118	1.122	1.126	1.130	1.134	1.138	1.142	1.146	1.150	1.154	480
490	1.154	1.158	1.162	1.166	1.170	1.174	1.178	1.182	1.186	1.190	1.194	490
500	1.194	1.198	1.202	1.206	1.210	1.214	1.218	1.222	1.226	1.230	1.234	500
510	1.234	1.238	1.242	1.246	1.250	1.254	1.258	1.262	1.266	1.270	1.274	510
520	1.274	1.278	1.282	1.286	1.290	1.294	1.298	1.302	1.306	1.310	1.314	520
530	1.314	1.318	1.322	1.326	1.330	1.334	1.338	1.342	1.346	1.350	1.354	530
540	1.354	1.358	1.362	1.366	1.370	1.374	1.378	1.382	1.386	1.390	1.394	540
550	1.394	1.398	1.402	1.406	1.410	1.414	1.418	1.422	1.426	1.430	1.434	550
560	1.434	1.438	1.442	1.446	1.450	1.454	1.458	1.462	1.466	1.470	1.474	560
570	1.474	1.478	1.482	1.486	1.490	1.494	1.498	1.502	1.506	1.510	1.514	570
580	1.514	1.518	1.522	1.526	1.530	1.534	1.538	1.542	1.546	1.550	1.554	580
590	1.554	1.558	1.562	1.566	1.570	1.574	1.578	1.582	1.586	1.590	1.594	590
600	1.594	1.598	1.602	1.606	1.610	1.614	1.618	1.622	1.626	1.630	1.634	600
610	1.63											

350	0.596	0.599	0.603	0.607	0.610	0.614	0.617	0.621	0.625	0.628	0.632	350
360	0.632	0.636	0.639	0.643	0.647	0.650	0.654	0.658	0.662	0.665	0.669	360
370	0.669	0.673	0.677	0.680	0.684	0.688	0.692	0.696	0.700	0.703	0.707	370
380	0.707	0.711	0.715	0.719	0.723	0.727	0.731	0.735	0.738	0.742	0.746	380
390	0.746	0.750	0.754	0.758	0.762	0.766	0.770	0.774	0.778	0.782	0.787	390
400	0.787	0.791	0.795	0.799	0.803	0.807	0.811	0.815	0.819	0.824	0.828	400
410	0.828	0.832	0.836	0.840	0.844	0.849	0.853	0.857	0.861	0.866	0.870	410
420	0.870	0.874	0.878	0.883	0.887	0.891	0.896	0.900	0.904	0.909	0.913	420
430	0.913	0.917	0.922	0.926	0.930	0.935	0.939	0.944	0.948	0.953	0.957	430
440	0.957	0.961	0.966	0.970	0.975	0.979	0.984	0.988	0.993	0.997	1.002	440
450	1.002	1.007	1.011	1.016	1.020	1.025	1.030	1.034	1.039	1.043	1.048	450
460	1.048	1.053	1.057	1.062	1.067	1.071	1.076	1.081	1.086	1.090	1.095	460
470	1.095	1.100	1.105	1.109	1.114	1.119	1.124	1.129	1.133	1.138	1.143	470
480	1.143	1.148	1.153	1.158	1.163	1.167	1.172	1.177	1.182	1.187	1.192	480
490	1.192	1.197	1.202	1.207	1.212	1.217	1.222	1.227	1.232	1.237	1.242	490
500	1.242	1.247	1.252	1.257	1.262	1.267	1.272	1.277	1.282	1.288	1.293	500
510	1.293	1.298	1.303	1.308	1.313	1.318	1.324	1.329	1.334	1.339	1.344	510
520	1.344	1.350	1.355	1.360	1.365	1.371	1.376	1.381	1.387	1.392	1.397	520
530	1.397	1.402	1.408	1.413	1.418	1.424	1.429	1.435	1.440	1.445	1.451	530
540	1.451	1.456	1.462	1.467	1.472	1.478	1.483	1.489	1.494	1.500	1.505	540
550	1.505	1.511	1.516	1.522	1.527	1.533	1.539	1.544	1.550	1.555	1.561	550
560	1.561	1.566	1.572	1.578	1.583	1.589	1.595	1.600	1.606	1.612	1.617	560
570	1.617	1.623	1.629	1.634	1.640	1.646	1.652	1.657	1.663	1.669	1.675	570
580	1.675	1.680	1.686	1.692	1.698	1.704	1.709	1.715	1.721	1.727	1.733	580
590	1.733	1.739	1.745	1.750	1.756	1.762	1.768	1.774	1.780	1.786	1.792	590
600	1.792	1.798	1.804	1.810	1.816	1.822	1.828	1.834	1.840	1.846	1.852	600
610	1.852	1.858	1.864	1.870	1.876	1.882	1.888	1.894	1.900	1.906	1.912	610
620	1.912	1.918	1.924	1.930	1.936	1.942	1.948	1.954	1.960	1.966	1.972	620
630	1.972	1.978	1.984	1.990	1.996	2.002	2.008	2.014	2.020	2.026	2.032	630
640	2.032	2.038	2.044	2.050	2.056	2.062	2.068	2.074	2.080	2.086	2.092	640
650	2.092	2.098	2.104	2.110	2.116	2.122	2.128	2.134	2.140	2.146	2.152	650
660	2.152	2.158	2.164	2.170	2.176	2.182	2.188	2.194	2.200	2.206	2.212	660
670	2.212	2.218	2.224	2.230	2.236	2.242	2.248	2.254	2.260	2.266	2.272	670
680	2.272	2.278	2.284	2.290	2.296	2.302	2.308	2.314	2.320	2.326	2.332	680
690	2.332	2.338	2.344	2.350	2.356	2.362	2.368	2.374	2.380	2.386	2.392	690
700	2.392	2.398	2.404	2.410	2.416	2.422	2.428	2.434	2.440	2.446	2.452	700
710	2.452	2.458	2.464	2.470	2.476	2.482	2.488	2.494	2.500	2.506	2.512	710
720	2.512	2.518	2.524	2.530	2.536	2.542	2.548	2.554	2.560	2.566	2.572	720
730	2.572	2.578	2.584	2.590	2.596	2.602	2.608	2.614	2.620	2.626	2.632	730
740	2.632	2.638	2.644	2.650	2.656	2.662	2.668	2.674	2.680	2.686	2.692	740
750	2.692	2.698	2.704	2.710	2.716	2.722	2.728	2.734	2.740	2.746	2.752	750
760	2.752	2.758	2.764	2.770	2.776	2.782	2.788	2.794	2.800	2.806	2.812	760
770	2.812	2.818	2.824	2.830	2.836	2.842	2.848	2.854	2.860	2.866	2.872	770
780	2.872	2.878	2.884	2.890	2.896	2.902	2.908	2.914	2.920	2.926	2.932	780
790	2.932	2.938	2.944	2.950	2.956	2.962	2.968	2.974	2.980	2.986	2.992	790
800	2.992	2.998	3.004	3.010	3.016	3.022	3.028	3.034	3.040	3.046	3.052	800
810	3.052	3.058	3.064	3.070	3.076	3.082	3.088	3.094	3.100	3.106	3.112	810
820	3.112	3.118	3.124	3.130	3.136	3.142	3.148	3.154	3.160	3.166	3.172	820
830	3.172	3.178	3.184	3.190	3.196	3.202	3.208	3.214	3.220	3.226	3.232	830
840	3.232	3.238	3.244	3.250	3.256	3.262	3.268	3.274	3.280	3.286	3.292	840
850	3.292	3.298	3.304	3.310	3.316	3.322	3.328	3.334	3.340	3.346	3.352	850
860	3.352	3.358	3.364	3.370	3.376	3.382	3.388	3.394	3.400	3.406	3.412	860
870	3.412	3.418	3.424	3.430	3.436	3.442	3.448	3.454	3.460	3.466	3.472	870
880	3.472	3.478	3.484	3.490	3.496	3.502	3.508	3.514	3.520	3.526	3.532	880
890	3.532	3.538	3.544	3.550	3.556	3.562	3.568	3.574	3.580	3.586	3.592	890
900	3.592	3.598	3.604	3.610	3.616	3.622	3.628	3.634	3.640	3.646	3.652	900
910	3.652	3.658	3.664	3.670	3.676	3.682	3.688	3.694	3.700	3.706	3.712	910
920	3.712	3.718	3.724	3.730	3.736	3.742	3.748	3.754	3.760	3.766	3.772	920
930	3.772	3.778	3.784	3.790	3.796	3.802	3.808	3.814	3.820	3.826	3.832	930
940	3.832	3.838	3.844	3.850	3.856	3.862	3.868	3.874	3.880	3.886	3.892	940
950	3.892	3.898	3.904	3.910	3.916	3.922	3.928	3.934	3.940	3.946	3.952	950
960	3.952	3.958	3.964	3.970	3.976	3.982	3.988	3.994	4.000	4.006	4.012	960
970	4.012	4.018	4.024	4.030	4.036	4.042	4.048	4.054	4.060	4.066	4.072	970
980	4.072	4.078	4.084	4.090	4.096	4.102	4.108	4.114	4.120	4.126	4.132	980
990	4.132	4.138	4.144	4.150	4.156	4.162	4.168	4.174	4.180	4.186	4.192	990
1000	4.192	4.198	4.204	4.210	4.216	4.222	4.228	4.234	4.240	4.246	4.252	1000
1010	4.252	4.258	4.264	4.270	4.276	4.282	4.288	4.294	4.300	4.306	4.312	1010
1020	4.312	4.318	4.324	4.330	4.336	4.342	4.348	4.354	4.360	4.366	4.372	1020
1030	4.372	4.378	4.384	4.390	4.396	4.402	4.408	4.414	4.420	4.426	4.432	1030
1040	4.432	4.438	4.444	4.450	4.456	4.462	4.468	4.474	4.480	4.486	4.492	1040
1050	4.492	4.498	4.504	4.510	4.516	4.522	4.528	4.534	4.540	4.546	4.552	1050
1060	4.552	4.558	4.564	4.570	4.576	4.582	4.588	4.594	4.600	4.606	4.612	1060
1070	4.612	4.618	4.624	4.630	4.636	4.642	4.648	4.654	4.660	4.666	4.672	1070
1080	4.672	4.678	4.684	4.690	4.696	4.702	4.708	4.714	4.720	4.726	4.732	1080
1090	4.732	4.738	4.744	4.750	4.756	4.762	4.768	4.774	4.780	4.786	4.792	1090
1100	4.792	4.798	4.804	4.810	4.816	4.822	4.828	4.834	4.840	4.846	4.852	1100
1110	4.852	4.858	4.864	4.870	4.876	4.882	4.888	4.894	4.900	4.906	4.912	1110
1120	4.912	4.918	4.924	4.930	4.936	4.942	4.948	4.954	4.960	4.966	4.972	1120
1130	4.972	4.978	4.984	4.990	4.996	5.002	5.008	5.014	5.020	5.026	5.032	1130
1140	5.032	5.038	5.044	5.050	5.056	5.062	5.068	5.074	5.080	5.086	5.092	1140
1150	5.092	5.098	5.104	5.110	5.116	5.122	5.128	5.134	5.140	5.146	5.152	1150
1160	5.152	5.158	5.164	5.170	5.176	5.182	5.188	5.194	5.200	5.206	5.212	1160
1170	5.212	5.218	5.224	5.230	5.236	5.242	5.248	5.254	5.260	5.266	5.272	1170
1180	5.272	5.278	5.284	5.290	5.296	5.302	5.308	5.314	5.320	5.326	5.332	1180
1190	5.332	5.338	5.344	5.350	5.356	5.362	5.368	5.374	5.380	5.386	5.392	1190
1200	5.392	5.398	5.404	5.410	5.416	5.422	5.428	5.434	5.440	5.446	5.452	1200
1210	5.452	5.458	5.464	5.470	5.476	5.482	5.488	5.494	5.500	5.506	5.512	1210
1220	5.512	5.518	5.524	5.530	5.536	5.542	5.548	5.554	5.560	5.566	5.572	1220
1230	5.572	5.578	5.584	5.590	5.596	5.602	5.608	5.614	5.620	5.626	5.632	1230
1240	5.632	5.638	5.644	5.650	5.656	5.662	5.668	5.674	5.680	5.686	5.692	1240
1250	5.692	5.698	5.704	5.710	5.716	5.722	5.728	5.734	5.740	5.746	5.752	1250
1260	5.752	5.758	5.764	5.770	5.776	5.782	5.788	5.794	5.800	5.806	5.812	1260
1270	5.812	5.818	5.824	5.830	5.836	5.842	5.848	5.854	5.860	5.866	5.872	1270
1280	5.872	5.878	5.884	5.890	5.896	5.902						

ตาราง ก แสดงผลของการใช้ Temperature Simulator ให้กับเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B โดยไม่คำนึงผลของจุดอ้างอิงขณะนั้น

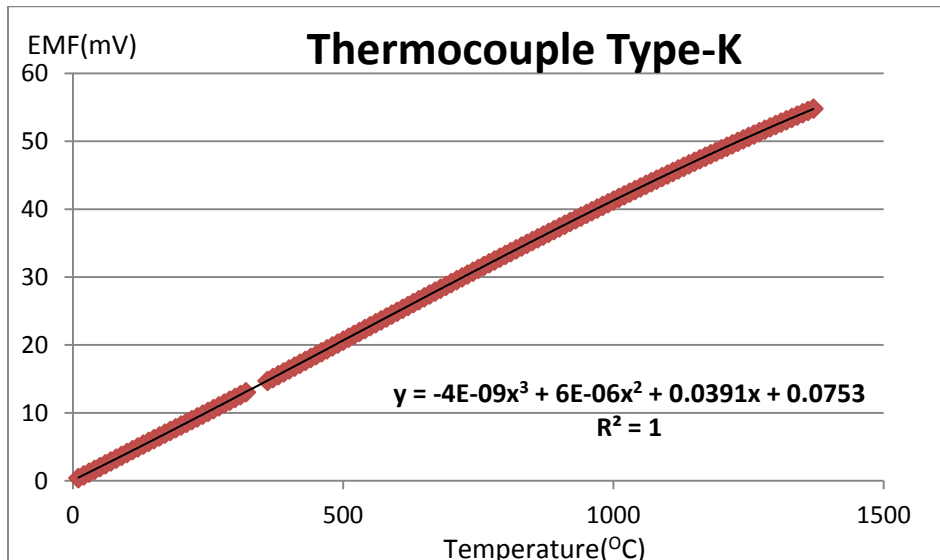
Type-B	mV		Type-K		CJ		Type-K
600	1.792	equal	45	plus	31	equal	76
800	3.154	equal	77.9	plus	31	equal	108.9

จากผลการทดลองพบว่าถ้าจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิเป็น  $0^{\circ}\text{C}$  จะอ่านได้จากกล่อง Data Logger ชนิด K ได้อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เมื่อให้อุณหภูมิชนิด B เป็น  $600^{\circ}\text{C}$  แต่ในทางปฏิบัติอุณหภูมิ CJ ไม่ได้เป็น  $0^{\circ}\text{C}$  ดังนั้นค่าที่อ่านได้จาก Data Logger ชนิด K จึงเป็นอุณหภูมิการแปลง EMF ที่ได้จากชนิด B เป็น K เมื่อ CJ มีค่าเป็น  $0^{\circ}\text{C}$  บวกกับอุณหภูมิของ CJ ขณะนั้น

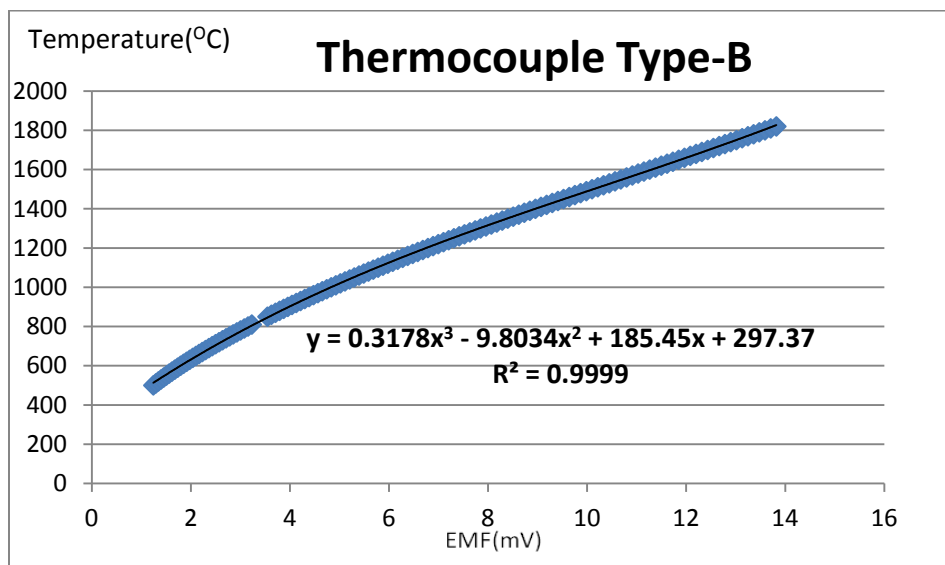
ดังนั้นในการเก็บข้อมูลจริงตัว Data Logger หรือจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทำให้ค่าที่อ่านได้จาก Data Logger ต้องนำไปลบอุณหภูมิที่จุดอ้างอิงก่อน จึงจะนำมาแปลงกลับเป็นข้อมูลอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B

แต่เนื่องจากการอ่านข้อมูลจากรายที่แสดงในภาพ ก. และภาพ ข. นั้นไม่สะดวกที่จะนำไปใช้งาน จึงนำมาเขียนเป็นกราฟเพื่อหาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่าง EMF ที่ได้กับ อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการใช้งาน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป ค. และรูป ง.

จากผลการหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับ EMF ที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B และ K แล้วจะพบว่าสามารถใช้งานได้สะดวกขึ้น เช่น จาก Data Logger ชนิด K อ่านอุณหภูมิได้  $200^{\circ}\text{C}$  นำไปลบกับอุณหภูมิของจุดอ้างอิง (ในที่นี้คืออุณหภูมิของ Data Logger) ทำให้สามารถหาค่า EMF ได้จากสมการความสัมพันธ์ในรูป ค จากนั้นก็ค่าที่ได้มาใส่ในความสัมพันธ์ของรูป ง จะได้อุณหภูมิที่เกิดจากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B



รูป ค แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ EMF ที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K เมื่อจุดอ้างอิงเป็น 0 °C

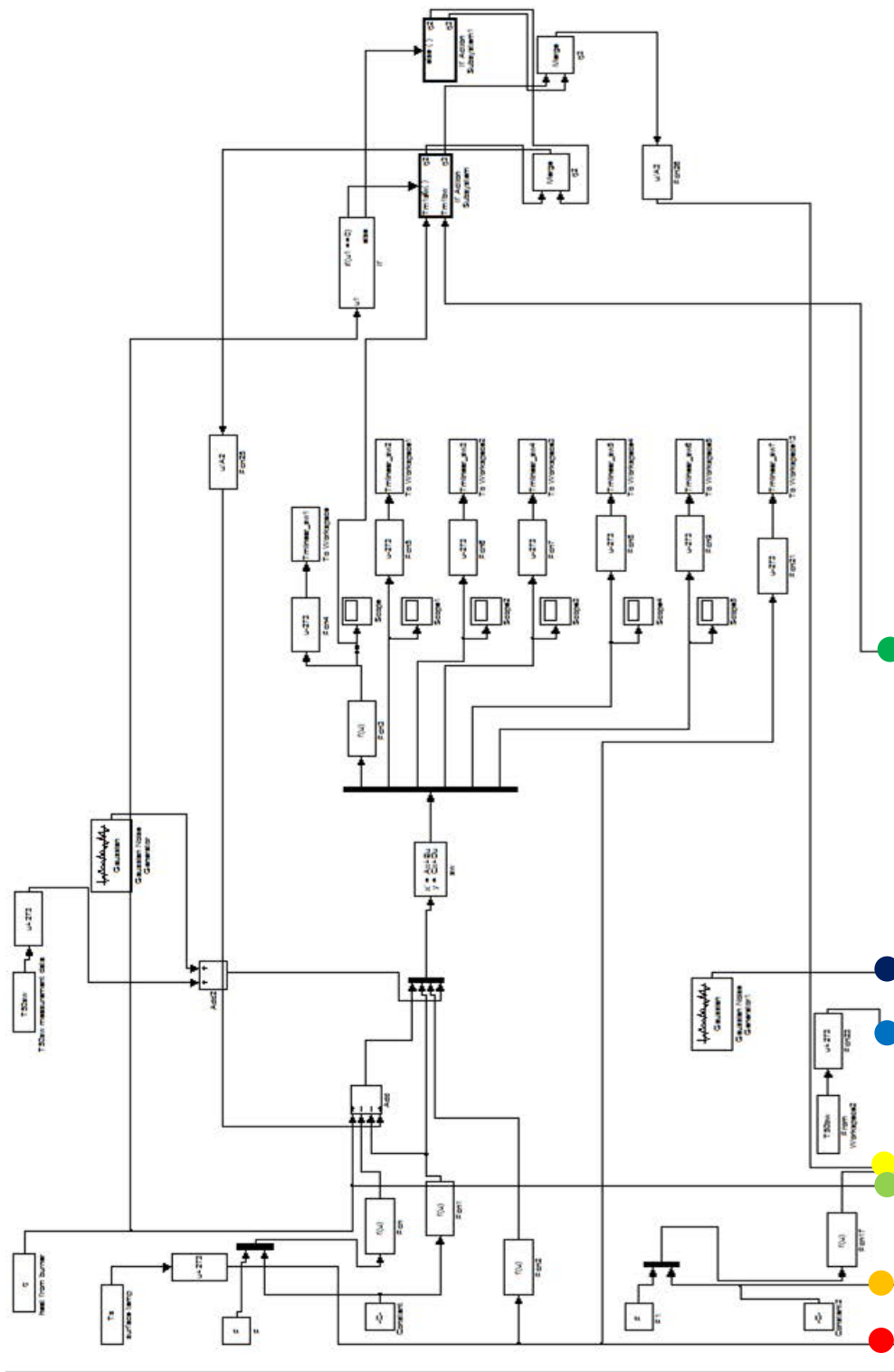


รูป ง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ EMF ที่อ่านได้จากเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด B เมื่อจุดอ้างอิงเป็น 0 °C

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างโปรแกรมที่เขียนด้วย MATLAB/SIMULINK

**ตัวอย่าง** ของระบบช่วยควบคุม (ในช่วงอ่อนเบ้ารับน้ำเหล็กและพักเบ้ารับน้ำเหล็ก เมื่อมีการนำข้อมูลจากการตรวจวัดเข้ามาใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์)







## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายกิตติศักดิ์ ไร่ไพรุจพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 18 เดือน ธันวาคม พุทธศักราช 2530 มีภูมิลำเนาอยู่ที่ จังหวัดตรัง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล จากภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร เมื่อปี 2552 และ เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ที่ภาควิชา วิศวกรรมศาสตร์เครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2553 ระหว่าง การศึกษาได้รับทุนการศึกษาจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาคเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีผลงานการตีพิมพ์ระดับชาติในงานประชุมวิชาการ เครื่องข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 และ 27 และมีงานตีพิมพ์ในงานประชุมเชิง วิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9