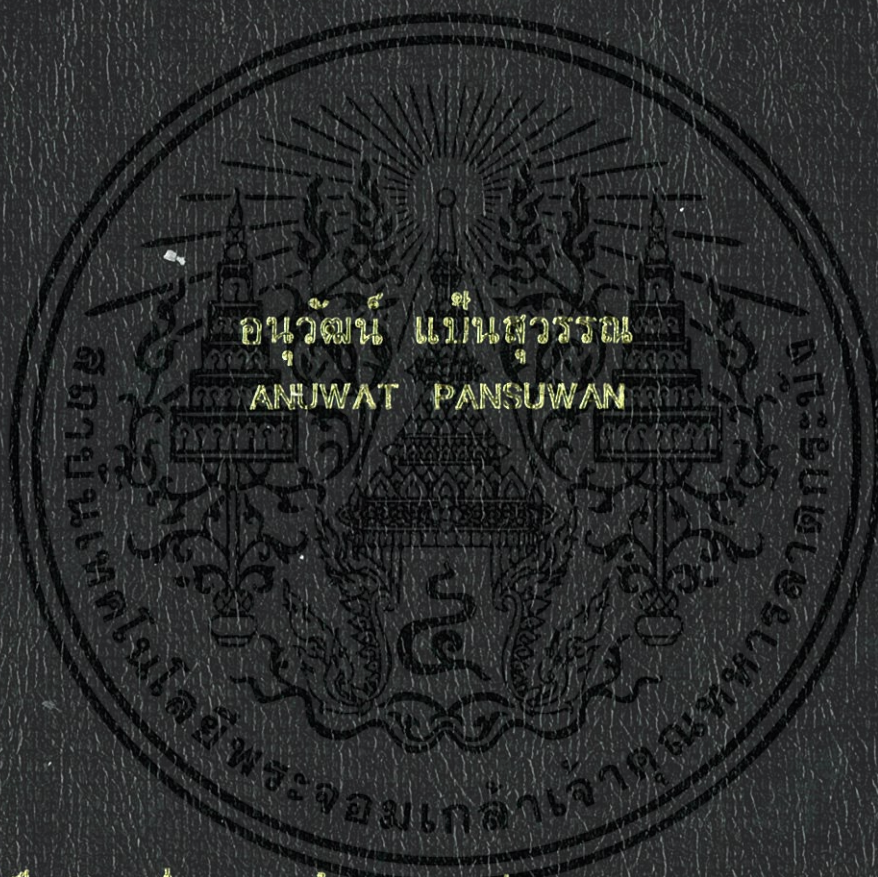


การประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอม
แบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

TEMPERATURE ESTIMATION OF LIQUID STEEL IN
INDUCTION FURNACE



วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาเขตนนทบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

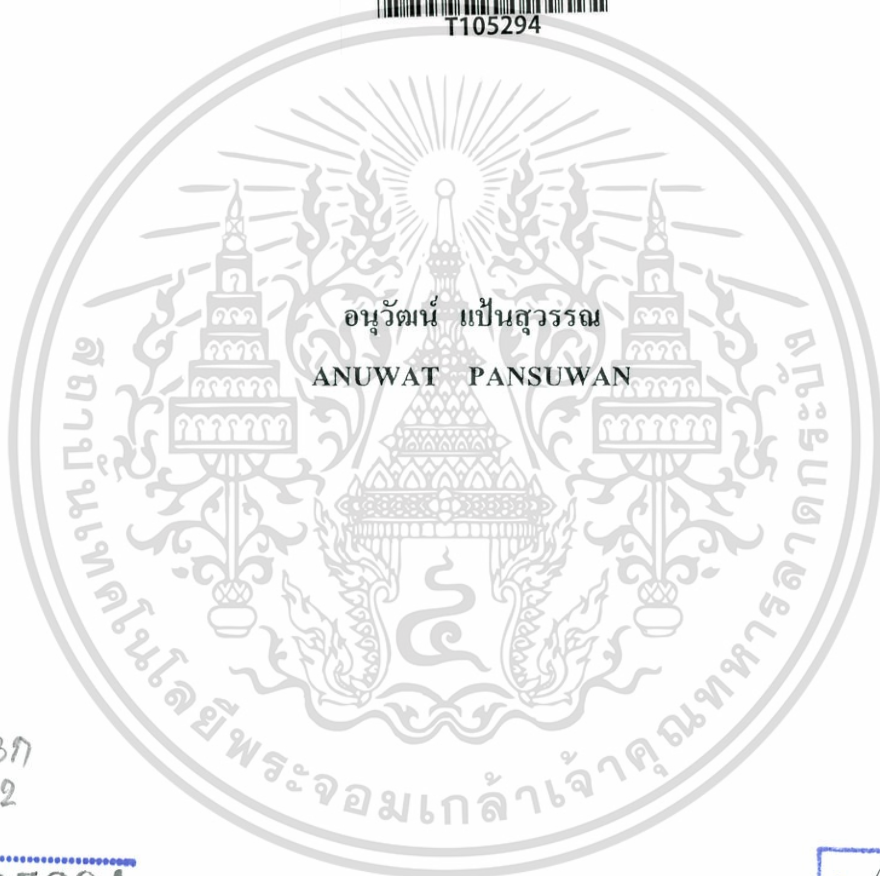
KMITL-2009-EN-M-060-071

การประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอม
แบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

TEMPERATURE ESTIMATION OF LIQUID STEEL IN
INDUCTION FURNACE



T105294



ทพ.
0223ก
2552

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....105294
วัน,เดือน,ปี.....1.8 พ.ย. 2552

.b. 1216852X
.i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2552

KMITL-2009-EN-M-060-071

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TEMPERATURE ESTIMATION OF LIQUID STEEL IN
INDUCTION FURNACE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2009-EN-M-060-071



COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า
Thesis Title Temperature Estimation of Liquid Steel in Induction Furnace
นักศึกษา นายอนุวัฒน์ เป็นสุวรรณ
รหัสประจำตัว 48060858
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ประภาส อุคคึกิมาพันธุ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-060-071

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.วิริยะ	กองรัตน์	
รศ.ไสว	พงศ์สวัสดิ์	
รศ.จิระศักดิ์	ชาญวิจิตรธรรม	
รศ.ประสิทธิ์	กุลเสรีวงศ์	
รศ.ประภาส	อุคคึกิมาพันธุ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมแบบเหนียวนำไฟฟ้า
นักศึกษา	นายอนุวัฒน์ เป็นสุวรรณ
รหัสนักศึกษา	48060858
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2552
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ประภาส อุดคคิมพันธ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการวัดอุณหภูมิทางอ้อม โดยการวัดกำลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าเตาหลอมและค่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นทั้งเข้าและออกรวมถึงอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอม โดยเทคนิคการประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กอาศัยการพิจารณาสมการสมดุลความร้อนของเตาหลอมและใช้การวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเตาหลอมในระหว่างกระบวนการหลอม เพื่อประมาณหาค่าความสูญเสียความร้อนของเตาหลอมเพื่อประกอบการคำนวณสมการสมดุลความร้อน เป็นผลทำให้สามารถประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมได้อย่างแม่นยำ

Thesis Title	Temperature Estimation of Liquid Steel in Induction Furnace
Student	Mr. Anuwat Pansuwan
Student ID.	48060858
Degree	Master of Engineering
Programme	Instrumentation Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Prapart Ukakimaparn

ABSTRACT

This thesis presents the indirect measurement by measuring the energy put into the furnace, temperature and flow rate of cooling water and temperature at the outer wall lining of the induction furnace in order to estimate the temperature of the liquid steel in the furnace. The technique for estimating the temperature relies on the consideration of the heat balance equation of the furnace and the use of several parameters for the furnace during the processes in order to estimate the losses of heat from the furnace in order to calculate the heat balance equation. From this method, we can estimate the temperature of liquid steel in the induction furnace accurately.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดีด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ประภาส อุคคกิตมา พันธุ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบริษัท ออโตโต จังก์เกอร์ (OTTO JUNKER) ประเทศเยอรมันที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ ตลอดจนข้อมูล และหนังสือต่างๆ ที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อนุวัฒน์ เป็นสุวรรณ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.4 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 เตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า.....	7
2.2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเตาหลอม.....	7
2.2.2 เตาหลอมที่ใช้ในงานวิจัย.....	12
2.3 สมการสมดุลความร้อน.....	15
บทที่ 3 การออกแบบการทดลองประมาณค่าอุณหภูมิ.....	18
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	18
3.2 ลักษณะกระบวนการให้ความร้อน.....	19
3.3 แบบจำลองทางความร้อนของเตาหลอม.....	22
3.4 การหาค่าพารามิเตอร์ของสมการ.....	25
บทที่ 4 การประมาณค่าอุณหภูมิ.....	33

4.1 วิธีประมาณค่าอุณหภูมิ.....33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2	สรุปการประมาณค่าอุณหภูมิ.....	38
บทที่ 5	การประหยัดพลังงาน.....	40
5.1	การควบคุมเตาหลอมให้ประหยัดพลังงาน.....	40
5.2	ผลการประหยัดพลังงานที่เกิดจากการใช้งานจริง.....	43
5.3	ผลการประหยัดการใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	50
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	51
	บรรณานุกรม.....	53
	ภาคผนวก.....	54
	ภาคผนวก ก. เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple).....	55
	ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	62
	ประวัติผู้เขียน.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมดุลความร้อนของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	6
2.2 ประเภทและลักษณะการทำงานของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	8
2.3 ส่วนประกอบของเตาหลอมที่สำคัญและหน้าที่การใช้งาน.....	9
2.4 ตารางสรุปสมดุลความร้อนของเตาหลอม.....	16
3.1 ข้อมูลจากการตรวจวัดของแต่ละช่วงการให้ความร้อน.....	20
3.2 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 1.....	28
3.3 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 2.....	28
3.4 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 3.....	28
3.5 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 4.....	29
3.6 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 5.....	29
3.7 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 6.....	29
4.1 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 1.....	33
4.2 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 2.....	33
4.3 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 3.....	34
4.4 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 4.....	34
4.5 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 5.....	34
4.6 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 6.....	34
4.7 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 1.....	37
4.8 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 2.....	37
4.9 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 3.....	37
4.10 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 4.....	37
4.11 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 5.....	37
4.12 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 6.....	37
5.1 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมเหล็กเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายทั้ง 3 วิธี.....	42
5.2 ข้อมูลการหลอมก่อนการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิในเดือนสิงหาคม 2551.....	44
5.3 ข้อมูลการหลอมก่อนการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิในเดือนกันยายน 2551.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.4 ข้อมูลการหลอมหลังการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิในเดือนตุลาคม 2551.....	47
5.5 ข้อมูลการหลอมหลังการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิในเดือนพฤศจิกายน 2551.....	48
5.6 สรุปข้อมูลทั้งก่อนและหลังการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิ.....	49
5.7 ข้อมูลเปรียบเทียบผลการประหยัดการใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	50



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะการให้ความร้อนของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	8
2.2 โครงสร้างของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	8
2.3 ไดอะแกรมระบบไฟฟ้าของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า.....	10
2.4 เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ทดลอง.....	13
2.5 การวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตาหลอม.....	13
2.6 ตู้ควบคุมของเตาหลอมขนาด 4 ตัน.....	14
2.7 ไดอะแกรมระบบน้ำหล่อเย็นของเตาหลอม.....	15
2.8 ไดอะแกรมสมดุลความร้อนของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบ Crucible ความถี่สูง.....	15
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	18
3.2 กราฟแสดงกระบวนการหลอมเหล็ก.....	19
3.3 แชนจ์ไดอะแกรมในช่วงให้ความร้อนกับเหล็ก.....	22
3.4 แบบจำลองทางความร้อนของระบบเตาหลอม.....	25
3.5 ไดอะแกรมการหาค่าพารามิเตอร์ $A1, A2, A3$	27
3.6 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 1.....	30
3.7 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 2.....	30
3.8 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 3.....	30
3.9 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 4.....	31
3.10 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 5.....	31
3.11 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 6.....	31
4.1 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 1.....	35
4.2 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 2.....	35
4.3 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 3.....	35
4.4 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 4.....	36
4.5 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 5.....	36
4.6 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 6.....	36
5.1 การควบคุมเตาหลอมวิธีที่ 1.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา **viii** ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 การควบคุมเตาหลอมวิธีที่ 2.....	41
5.3 การควบคุมเตาหลอมวิธีที่ 3.....	42
5.4 กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ากับยอดการหลอมในเดือนสิงหาคมปี 2551.....	46
5.5 กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ากับยอดการหลอมในเดือนกันยายนปี 2551.....	46
5.6 กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ากับยอดการหลอมในเดือนตุลาคมปี 2551.....	49
5.7 กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ากับยอดการหลอมในเดือนพฤศจิกายนปี 2551.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการควบคุมเตาหลอมเพื่อหลอมโลหะในโรงงานอุตสาหกรรมจะอาศัยความชำนาญของพนักงานผู้ควบคุมเตาหลอม และมีขั้นตอนที่สำคัญที่สุดขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการคือการวัดอุณหภูมิซึ่งจะทำหลังจากโลหะหรือเหล็กได้ละลายเป็นของเหลวแล้ว โดยการวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลจุ่มลงไปใต้น้ำเหล็กอุณหภูมิสูงซึ่งอุณหภูมิขณะนั้นประมาณ 1500 องศาเซลเซียส และการวัดด้วยวิธีนี้ไม่สามารถที่จะให้หัววัดอุณหภูมิจุ่มอยู่ในน้ำเหล็กอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานได้เนื่องจากจะทำให้อายุการใช้งานสั้นและในน้ำเหล็กจะมีสิ่งเจือปน (Slag) ทำให้เกิดความเสียหายกับหัววัดเทอร์โมคัปเปิ้ลได้ ทำให้พนักงานผู้ควบคุมเตาหลอมใช้หัววัดอุณหภูมิเพียงบางครั้งในกระบวนการหลอมเท่านั้น และจากนั้นจะใช้ประสบการณ์ในการประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็ก และจากการใช้ประสบการณ์ในการประมาณค่านี้จะทำให้ค่าอุณหภูมิเกินจากค่าที่ต้องการเป็นผลให้สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์และกำลังการผลิตไม่ได้ตามที่ต้องการ และเมื่ออุณหภูมิในน้ำเหล็กเกินค่าที่ต้องการก็จะต้องลดอุณหภูมิในน้ำเหล็กในเตาหลอมลง โดยทิ้งใต้น้ำเหล็กระบายความร้อนไปเองและจะสูญเสียเวลาในการผลิตไปด้วย ซึ่งการวัดอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่องจะสามารถแก้ปัญหาในส่วนนี้ได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาแนวทางและหลักการในทฤษฎีสมการสมดุลทางความร้อนเพื่อใช้ประยุกต์ในการประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Furnace) และเพื่อพัฒนากระบวนการหลอมโลหะให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นทั้งในเรื่องกำลังการผลิตและลดเวลาการสูญเสียจากการรอใต้น้ำเหล็กเย็นตัว , การประหยัดพลังงานและคุณภาพของน้ำเหล็ก จึงจำเป็นที่จะต้องทราบอุณหภูมิของน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่อง และจากข้อจำกัดในการวัดอุณหภูมิทางตรงโดยเทอร์โมคัปเปิ้ล

ด้วยเหตุนี้วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ออกแบบวิธีการวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กขึ้น วิธีการวัดที่นำเสนอนี้จะเป็นการวัดอุณหภูมิในน้ำเหล็กทางอ้อมโดยจะอาศัยการประมาณอุณหภูมิของน้ำเหล็กจากการวัดพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในเตาหลอม , ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็นของเตาหลอม และค่าความร้อนสูญเสีย โดยได้ทำการทดลองเพื่อประมาณความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการ จากนั้นจึงนำค่าต่างๆเหล่านี้มาประมาณอุณหภูมิของน้ำเหล็กโดยใช้สมการสมดุลทางความร้อน

1.3 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากกฎอนุรักษ์พลังงานที่ ในกระบวนการใดๆ พลังงานอาจเปลี่ยนรูปได้หรือถ่ายเทจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ แต่ไม่สามารถสร้างขึ้นมาจากหรือทำให้สูญหายได้ เช่นเดียวกันกับพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับเตาหลอม สามารถที่จะแปรเปลี่ยนเป็นพลังงานสูญเสียในลักษณะต่างๆกัน เช่น พลังงานสูญเสียในระบบน้ำหล่อเย็น, พลังงานสูญเสียที่ผนังเตาหลอม, พลังงานสูญเสียในคอยล์ของเตาหลอม

หลังจากนั้นนำค่าพลังงานสูญเสียต่างๆ มาจัดรูปในสมการสมดุลพลังงานและทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าในสมการ เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์และแทนค่าในสมการแล้วหลังจากนั้นทำการประมาณค่าอุณหภูมิเทียบกับค่าอุณหภูมิที่วัดจากเทอร์โมคัปเปิล

1.4 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

วิธีการประมาณค่าอุณหภูมิทางอ้อม โดยการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอม เทคนิคการประมาณอุณหภูมิอาศัยการพิจารณาสมการสมดุลความร้อนของเตาหลอมและการใช้การวัดพารามิเตอร์ต่างๆของเตาหลอมในระหว่างกระบวนการ เพื่อประมาณหาการสูญเสียความร้อนของเตาหลอมประกอบการคำนวณด้วยสมการสมดุลความร้อน เป็นผลทำให้สามารถประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมได้อย่างแม่นยำ เมื่อเทียบกับหลักการในแบบพื้นฐานที่ใช้วิธีการวัดค่าอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิลแล้ว สามารถที่จะให้ความต่อเนื่องในการวัดที่ดีกว่าโดยสูญเสียพลังงานไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการหลอมน้อยกว่า

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ออกแบบและทดลองวิธีการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กที่หลอมละลายในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้วยวิธีทางอ้อมให้สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องเปรียบเทียบกับวิธีการวัดแบบพื้นฐานซึ่งใช้เทอร์โมคัปเปิล โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองระบบด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ผลที่ได้ได้แสดงค่าที่ประมาณได้และอัตราความผิดพลาดของการประมาณค่าอุณหภูมิเปรียบเทียบกับวิธีการแบบพื้นฐาน โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็นชุดๆ ซึ่งแต่ละชุดจะมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกัน

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ แนวคิดและทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย และพื้นฐานของเตาหลอมไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งรวมถึงส่วนประกอบและการทำงานของเตาหลอม พื้นฐานของสมการสมดุลความร้อน

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบการทดลอง การแสดงลักษณะกระบวนการให้ความร้อน รวมถึงการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางความร้อนของเตาหลอม

บทที่ 4 กล่าวถึงทดลองการประมาณหาค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอม และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 5 กล่าวถึงวิธีการควบคุมเตาหลอมให้ประหยัดพลังงาน

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย และพื้นฐานของระบบเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง คุณลักษณะของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า และพื้นฐานของสมการสมดุลความร้อน ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษา และการประมาณอุณหภูมินำเหล็กในเตาหลอม

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Drzewiecki T. M. et al. ได้ทำการศึกษาการวัดและแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องในกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง เช่นในโรงงานและอุตสาหกรรมเหล็ก พบว่าถ้ามีการวัดและแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง จะช่วยประหยัดพลังงานลงได้ประมาณ 10% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด

The Utilization of The Electric Heating Installation Efficiency of The Energy จาก Induction Heating ของประเทศ ญี่ปุ่น ได้กล่าวถึงการประหยัดพลังงานในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Furnace) ดังนี้

เนื่องจากเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นเตาหลอมที่ทำงานอุณหภูมิสูง และมีประสิทธิภาพสูงอยู่แล้ว และมีพลังงานที่สูญเสียค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับเตาหลอมชนิดอื่น ดังนั้นการประหยัดพลังงานของเตาหลอมชนิดนี้จะเน้นไปที่วิธีการทำงานโดยทั่วๆ ไปจะมีวิธีการประหยัดพลังงานดังนี้

1. พยายามใช้กำลังไฟฟ้าในการหลอมให้มากที่สุดเพื่อลดเวลาในการหลอมให้น้อยที่สุดทั้งนี้เพื่อลดความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเตาดีขึ้นด้วย
2. ควรมีการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม หมายถึง อุณหภูมิในเตาไม่ควรเพิ่มมากกว่าความต้องการ รวมทั้งเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ควรมีความแม่นยำที่ดี
3. ปรับปรุงสภาวะการทำงาน (Load Factor) ของเตา หมายถึงเตาที่ใช้ควรใช้กำลังไฟที่ค่าสูงสุดตลอด และวัสดุที่ต้องการหลอมควรมีขนาดที่ง่ายต่อการหลอม
4. ควรทำการหลอมอย่างต่อเนื่อง หมายถึง เตาควรทำงานอย่างต่อเนื่องเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อที่จะลด พลังงานความร้อนสูญเสีย เนื่องจากโครงสร้างเตา
5. ควรเลือกวัสดุที่จะใช้ในการหลอมให้เหมาะสม หมายถึง ควรเลือกวัสดุที่ไม่มีสิ่งสกปรกพวก ผุ่ย ทราย มาผสมเนื่องจากถ้ามีเยอะต้องใช้กำลังไฟฟ้าในการหลอมมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ปรับปรุงการควบคุมการทำงานให้เป็นแบบอัตโนมัติเพื่อที่จะสามารถควบคุมอุณหภูมิในเตาหลอมได้แม่นยำมากขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้ากับเตาหลอมประเภทอื่น พบว่าเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า มีข้อดีกว่าเตาหลอมประเภทอื่นดังต่อไปนี้

1. ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะมีค่าสูง เนื่องจากความร้อนเกิดขึ้นเฉพาะในตำแหน่งที่ต้องการ คือ ในตัวของชิ้นงานโดยตรง

2. การควบคุมอุณหภูมิทำได้ง่าย

3. เป็นเตาหลอมที่สะอาด ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้เกิดขึ้นน้อย เพราะใช้ไฟฟ้า

4. เหมาะสำหรับการหลอมที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงๆ เพราะว่าพลังงานจ่ายเข้าชิ้นงานโดยตรง และใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเตาประเภทอื่น

Sun Y. G. et al. ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับระบบการควบคุมของ Ladle Furnace โดยใช้สมการสมดุลความร้อนในการคำนวณเพื่อทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็ก ปริมาณพลังงานป้อนเข้าและการควบคุมที่เหมาะสม

จากการวิจัยค้นพบว่า อุณหภูมิหน้าเหล็กในเตามีความสัมพันธ์กับพลังงานป้อนเข้า (Power Input) และได้สรุปว่า การทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตาโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหน้าเหล็ก กับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) นั้นไม่สามารถทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็กได้อย่างแม่นยำนัก เนื่องจากความซับซ้อนระหว่างอุณหภูมิหน้าเหล็ก พลังงานไฟฟ้าเข้า เหล็กที่หลอมละลาย และเวลา ดังนั้นจึงได้พัฒนาระบบ Intelligent Ladle Furnace (ILF) มาใช้ในการทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็ก พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ซึ่งจะแม่นยำกว่าวิธีแรก และวิธีนี้จะช่วยลดพลังงานไฟฟ้าต่อตันเหล็กลงถึง 14 %

Elliott R. จาก Cast Iron Technology ได้กล่าวถึงประสิทธิภาพโดยทั่วไปไว้ดังนี้ กล่าวคือเตาหลอมเหนี่ยวนำโดยทั่วไปจะใช้พลังงานไฟฟ้า 430 kWh ในการทำให้เหล็ก 1 ตัน อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 1538 องศาเซลเซียส คิดเป็น 75% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนพลังงานที่เหลือจะสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น และการแผ่รังสีความร้อน

บริษัท ออตโต จุงเคอร์ (OTTO JUNKER) ผู้ผลิตและพัฒนาเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าของเยอรมัน ได้คิดค้นชุดการทำงานของเตาโดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม (Computer Monitoring and Control for Charging, Melting and Holding Operations) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ากับอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตา ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตาได้แม่นยำขึ้น ทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ลงได้

The Energy Conservation Center, Japan (ECC) จาก SEMINAR ON ENERGY CONSERVATION IN IRON CASTING INDUSTRY 1998 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลความร้อนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเมื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของเตา Induction Furnace แบบ Crucible ชนิดความถี่สูง (ดังแสดงในตารางที่ 2.1) ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 สมดุลความร้อนของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

รายการ	พลังงานที่ใช้ (%)
กำลังงานเข้า	100
พลังงานออก	
1. พลังงานที่จ่ายให้กับชิ้นงาน	69
2. พลังงานที่สูญเสียกับคอยล์	16
3. พลังงานที่สูญเสียในอินเวอร์เตอร์	4
4. พลังงานที่สูญเสียกับการพาความร้อน	3
5. พลังงานที่สูญเสียกับการแผ่รังสีความร้อน	2
6. พลังงานที่สูญเสียในสายไฟ	1.5
7. พลังงานที่สูญเสียกับหม้อแปลง	1
8. พลังงานที่สูญเสียอื่นๆ	3.5
รวม	100

JOHN DAVIES & PETER SIMPSON จาก Induction Heating Handbook ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความร้อนสูญเสียของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าในรูปแบบของการแผ่รังสีและการพาความร้อน พบว่า การสูญเสียโดยการแผ่รังสีจะเป็นการสูญเสียที่สำคัญ โดยจะขึ้นกับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงก็จะยิ่งสูญเสียมากโดยจะสูญเสียไปที่บริเวณผนังเตา

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่าเทคโนโลยีการวัดอุณหภูมิโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงๆ ของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ยังไม่มีอุปกรณ์ชนิดใดที่สามารถวัดอุณหภูมิสูงๆ โดยตรงได้อย่างต่อเนื่อง การควบคุมอุณหภูมิของโลหะที่หลอมเหลวจะใช้วิธีการวัดทางอ้อม โดยการวัดตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา เช่น กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น เป็นต้น และใช้สมการสมดุลความร้อนของเตาในการคำนวณหาอุณหภูมิของโลหะในเตา และผลของการวัดอุณหภูมิโลหะในเตาได้อย่างต่อเนื่องทำให้สามารถประหยัดพลังงานลงได้ประมาณ 10%

แม้ว่าจะมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่าอุณหภูมิของโลหะหลอมละลายในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าและการควบคุมเตาหลอมจำนวนหนึ่ง แต่รายละเอียดของวิธีการยังไม่มี的开เผยมากนัก ประกอบกับระบบควบคุมรุ่นใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงจะติดตั้งมากับเตาหลอมรุ่นใหม่ งานวิจัยนี้เน้นออกแบบระบบประมาณค่าอุณหภูมิและระบบควบคุมเตาหลอมสำหรับเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เป็นระบบเก่า

2.2 เตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า

จากการศึกษาลักษณะการทำงานของเตาหลอมแบบเหนียวนำไฟฟ้า พบว่าการให้ความร้อนแก่เหล็กที่อยู่ในเตาจะเป็นการให้ความร้อนที่เรียกว่า การให้ความร้อนแบบเหนียวนำซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลวนในเหล็กและทำให้เหล็กเกิดความร้อน

เมื่อแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดเหนียวนำ ขดลวดนี้จะทำหน้าที่คล้ายขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูง เมื่อวางชิ้นงานลงในสนามแม่เหล็กนี้ก็จะเกิดกระแสไหลวนในชิ้นงานในทิศทางที่จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มาด้านสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแหล่งจ่ายพลังงาน ชิ้นงานจึงทำหน้าที่คล้ายขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ถูกัดวงจร อันที่จริงปรากฏการณ์แบบนี้ก็เกิดขึ้นในแกนหม้อแปลงหรือของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสไหลวนในแกนดังกล่าวทำให้เกิดการสูญเสียเป็นความร้อนซึ่งในกรณีของหม้อแปลงหรือมอเตอร์เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ ดังนั้นจึงพยายามเพิ่มความต้านทานให้แก่แกนและใช้แผ่นเหล็กบางๆเป็นแกนเพื่อลดกระแสไหลวน ในกรณีการให้ความร้อนแบบเหนียวนำเป็นการนำปรากฏการณ์ที่เป็นปัญหาสำหรับหม้อแปลงหรือมอเตอร์มาใช้ให้เป็นประโยชน์

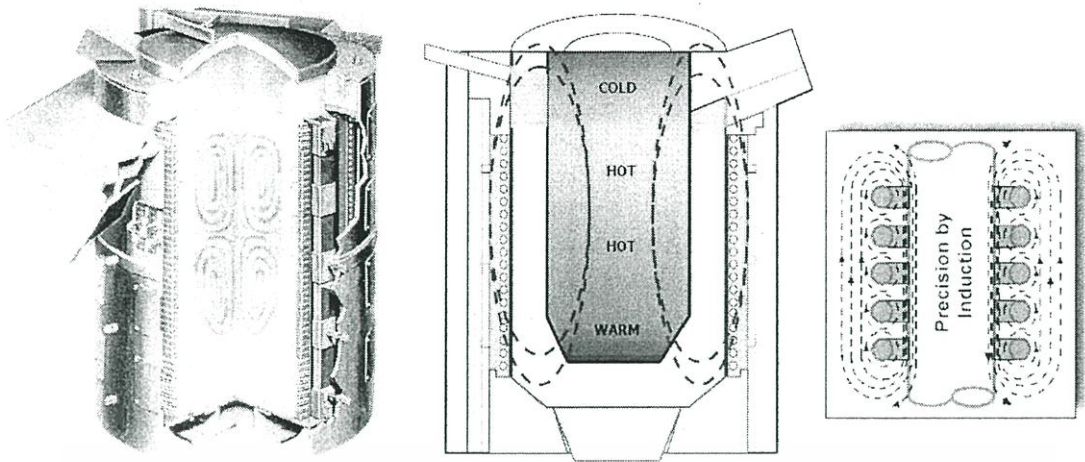
การให้ความร้อนแบบเหนียวนำเป็นทั้งปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าคือ การเหนียวนำของเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า, การนำกระแสที่ผิว และปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดเหนียวนำที่มีชิ้นงานอยู่ภายใน ก็จะเกิดสนามแม่เหล็กเคลื่อนผ่านชิ้นงานทำให้เกิดความร้อนที่ผิวของชิ้นงานและความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปบริเวณอื่น โดยการนำความร้อน, การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน

2.2.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเตาหลอม

ส่วนประกอบของเตาหลอมที่สำคัญแบ่งเป็น 3 ระบบคือ ระบบโครงสร้าง, ระบบไฟฟ้า, ระบบน้ำหล่อเย็น ในการออกแบบจะมีระบบป้องกันอย่างดีเช่น ระบบไฟฟ้า จะมีระบบป้องกันกระแสไฟฟ้าไม่ให้ไหลออกมานอกระบบควบคุม ในระบบน้ำหล่อเย็นจะมีระบบป้องกันการรั่วไหลของน้ำเหล็กที่แทรกผ่านผนังเตา (Lining) และมีระบบการทำงานที่มีรายละเอียดชัดเจน เช่น เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่ขดลวด ถ้าไม่มีน้ำไหลในระบบก็จะจ่ายกระแสไฟไม่ได้ เป็นต้น

ในระบบโครงสร้างของเตา โดยทั่วไปได้แบ่งชนิดของเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้าออกเป็น 3 ชนิด ตามชนิดโครงสร้างและความถี่ของกำลังงานที่ใช้ คือ แบบ Crucible มีทั้งความถี่สูงและต่ำ และแบบ Channel ความถี่ต่ำ (ดังแสดงในตารางที่ 2.2) นอกจากนี้ใน โครงสร้างเตาจะประกอบไปด้วยชุด คอลย์ ชันท์ (Shunt) ซึ่งจะจับตัวเก็บเส้นแรงแม่เหล็ก ไม่ให้เกิดการเหนียวนำไปยัง โครงสร้างของตัวเตาที่เป็นเหล็ก ระบบไฮดรอลิก ซึ่งใช้สำหรับยกเตา ตัวโครงสร้างเหล็ก

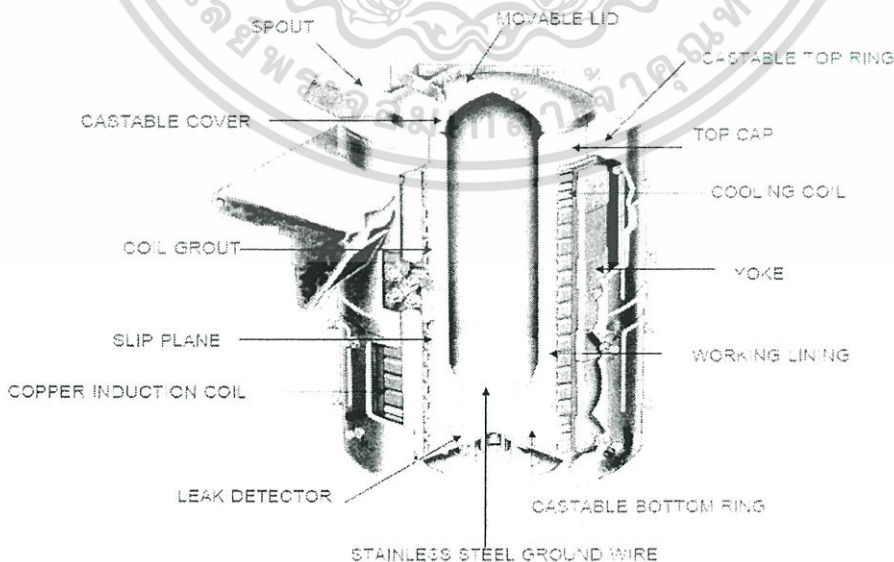
ฉนวน เช่น ไมกา ซิลิกอน เทปลอน และสายน้ำ โดยมีซีเมนต์คอลลอยด์เป็นตัวหุ้มคอลลอยด์เพื่อป้องกันการแทรกของน้ำไหลผ่านชั้น ฉนวนนี้มาถูกคอลลอยด์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ลักษณะการให้ความร้อนของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ตารางที่ 2.2 ประเภทและลักษณะการทำงานของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ประเภทของเตาหลอม	ความถี่ (Hz)	การทำงาน	ความเร็วในการหลอม	ปริมาณในการหลอม	อุณหภูมิในการหลอม
ความถี่สูง(Crucible)	150-10,000	ไม่ต่อเนื่อง	เร็ว	ปานกลาง/น้อย	สูง
ความถี่ต่ำ(Crucible)	50-60	ต่อเนื่อง/ ไม่ต่อเนื่อง	ช้า	ปานกลาง/น้อย	สูง
ความถี่ต่ำ(Channel)	50-60	ไม่ต่อเนื่อง	ช้า	ปานกลาง/น้อย	ต่ำ



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า

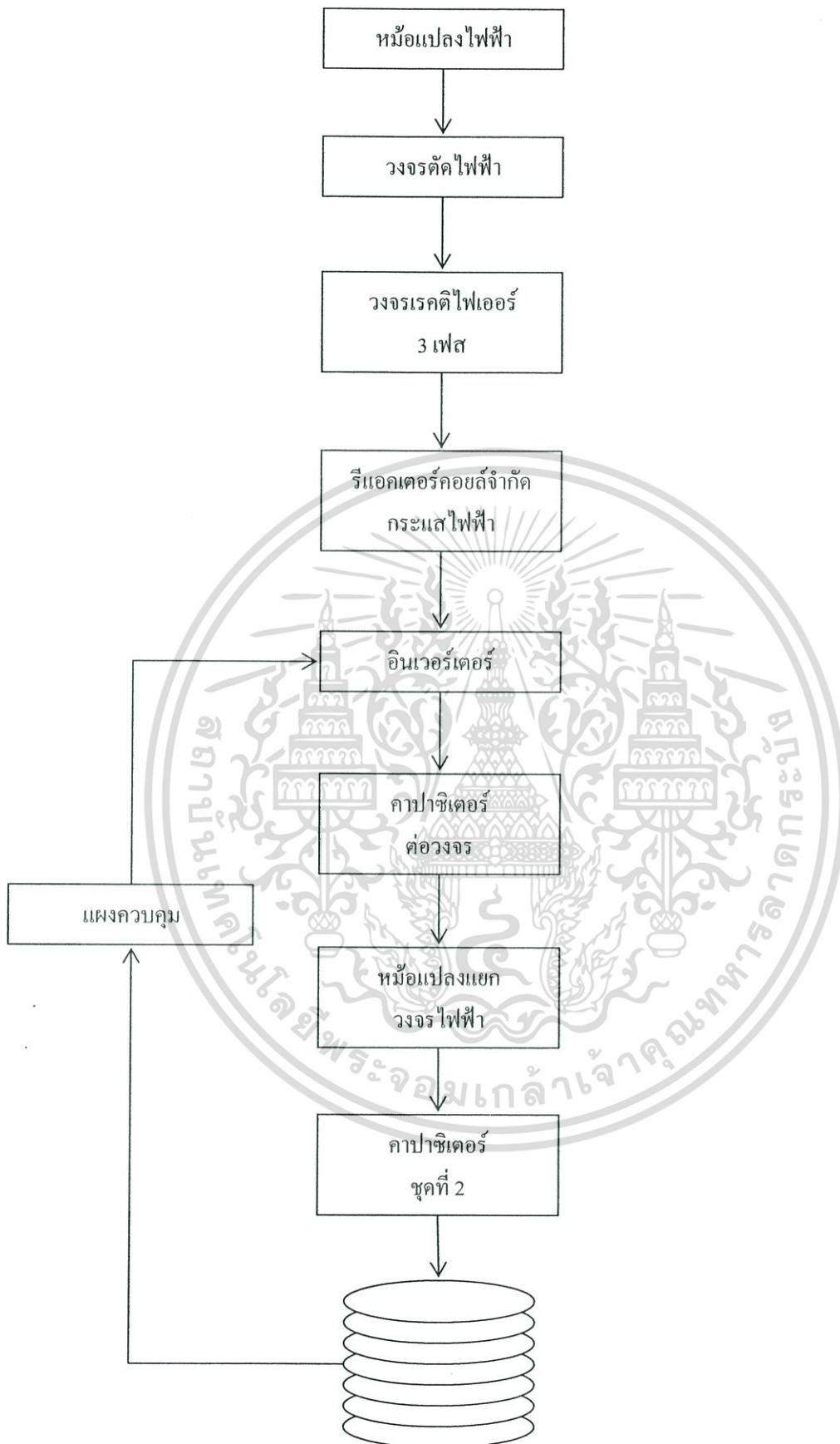
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของเตาหลอมที่สำคัญและหน้าที่การใช้งาน

ส่วนประกอบของเตา	หน้าที่ / การใช้งาน
CASTABLE COVER	เก็บความร้อนของน้ำเหล็ก
SPOUT	ทางผ่านของน้ำเหล็กเมื่อเทน้ำเหล็กออกจากเตา
COIL GROUT	ป้องกัน Coil จากการเสียดสีของ Working Lining หดหรือขยายตัว , ป้องกันน้ำเหล็กที่แทรกผ่าน Lining
TOP / BOTTOM RING	ยึดโครงสร้าง Coil เข้าไว้กับตัวเตา
SLIP PLANE	ลดแรงเสียดทานระหว่าง Lining กับ Coil Cement เมื่อ Lining ขยายตัวและหดตัว
WORKING LINING	ทนการกระแทกจากการใส่โลหะ , ทางผ่านเส้นเหนียวนำแม่เหล็กไฟฟ้า , ต้านทานความร้อนและสภาพกรด-ด่าง
TOP CAP	ป้องกัน Working Lining



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 โค้ดอะแกรมระบบไฟฟ้าของเตาหลอมเหนียวนาไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบไฟฟ้าของเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) ดังต่อไปนี้

1. หม้อแปลงจากสายเมน จะใช้เป็นตัวแยกวงจรอิสระระหว่าง 3 เฟส อาจใช้สำหรับแปลงไฟฟ้าขึ้นหรือลงตามความต้องการของเตา
2. วงจรตัดไฟฟ้าเป็นชุดตัดไฟที่ทำงานไวเป็นพิเศษที่ใช้กับเครื่องมือที่มีบริดจ์เรกติไฟเออร์เป็นไฟ 3 เฟสธรรมดา หรือเป็นชุดตัดไฟธรรมดา เมื่อใช้กับเครื่องที่มี เอซีโอ
3. เรกติไฟเออร์ 3 เฟส อาจจะเป็น 3 เฟส ไดโอด บริดจ์เรกติไฟเออร์ หรือเอซีโอชุดตัดไฟใช้ระบบเอสซีอาร์แทนไดโอด
4. รีแอกเตอร์จำกัดกระแสไฟฟ้า เป็นส่วนหนึ่งของวงจรกรองไฟกระแสตรง และยังมีหน้าที่หยุดการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าอย่างกะทันหัน อันเนื่องมาจากวงจรเกิดขัดข้อง
5. คาปาซิเตอร์กรองกระแสไฟฟ้า ใช้กรองไฟฟ้าที่ออกจากเรกติไฟเออร์ และจ่ายกระแสให้แก่อินเวอร์เตอร์อย่างสม่ำเสมอ
6. อินเวอร์เตอร์ ใช้เปลี่ยนไฟกระแสตรง เป็นกระแสลับที่ขนาดความถี่ต่างๆกัน
7. คาปาซิเตอร์ต่อวงจร ชุดคาปาซิเตอร์นี้ใช้ต่อไฟกระแสลับ เข้ากับหม้อแปลงความถี่สูงเมื่อใช้กับระบบหม้อแปลงความถี่สูง สำหรับเครื่องที่ใช้กับหม้อแปลงด้านเมนด้านเดียว คาปาซิเตอร์ชุดนี้ จะใช้เป็นชุดเพื่อปรับค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ ซึ่งจะส่งตรงไปยังขดลวดโดยตรง
8. หม้อแปลงแยกวงจรไฟฟ้า (ความถี่สูง) ใช้สำหรับแยกวงจรอินเวอร์เตอร์กับวงจรแทงค์และใช้สำหรับลดแรงดันไฟฟ้าหรือเพิ่มกระแสในขดลวด
9. คาปาซิเตอร์ชุดที่ 2 เมื่อเชื่อมวงจรถัดขดลวดเตา และเป็นชุดปรับวงจรแทงค์ให้มีเพาเวอร์สูงสุดในขณะที่เตาหลอมอยู่ในสภาพต่างๆกัน
10. ขดลวดเตา ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาเหนียวนำทำให้โลหะในเตาเกิดความร้อน
11. แผงควบคุม แผงนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจากส่วนต่างๆ ของระบบและใช้ในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์

ระบบน้ำหล่อเย็นของเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้านั้น น้ำที่ใช้ในเตาหลอมนั้นนับว่าเป็นสิ่งสำคัญอันดับสองรองจากระบบไฟฟ้า เพราะว่าในระบบไฟฟ้าจะมีความร้อนเกิดขึ้นขณะหลอม ถ้าไม่มีน้ำเป็นตัวระบายความร้อนจะทำให้ระบบทั้งหลายไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นน้ำที่ใช้จึงต้องมีคุณภาพตามที่กำหนด ก็จะต้องสะอาด และป้องกันการอุดตัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วระบบที่ใช้น้ำจะมีอยู่ 2 ระบบคือ ระบบเปิดกับระบบปิดระบบเปิด ปกติแล้วระบบเปิดเป็นระบบที่เสียค่าใช้จ่ายถูกที่สุด เพราะว่าอุปกรณ์ที่ใช้น้ำจะน้อยกว่าระบบปิดมาก แต่ว่าเมื่อใช้ไปแล้วปัญหาจะเกิดตามมามากมายคือ น้ำที่ผ่านการระบายความร้อนจากหอหล่อเย็น (Cooling Tower) เมื่อตกลงยังบ่อเก็บน้ำจะผ่านบรรยากาศซึ่งจะมีพวกออกซิเจนทำให้เกิดการกัดกร่อนง่าย เมื่อน้ำใช้ไปเรื่อยๆ น้ำจะแห้งซึ่งจะมีการเติมน้ำเข้า เอดสารก็เป็นเอดสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ป้อนญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้ามากก็จะเป็นการเพิ่มความกระด้าง เมื่อมีความกระด้างเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดตะกอนครีตตามผนังท่อทำให้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

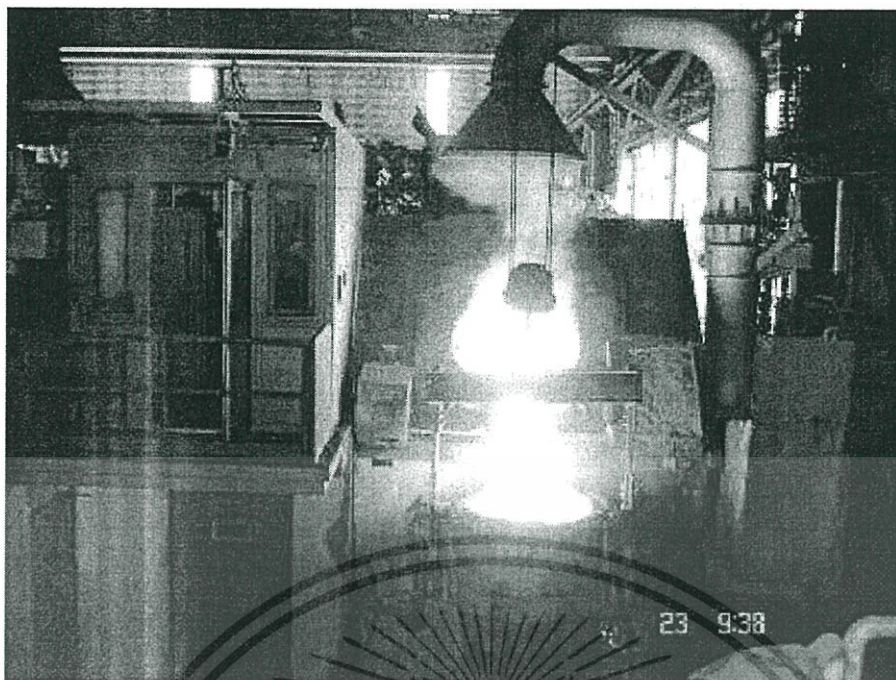
ระบายความร้อนไม่ดี ทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ร้อนมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลงระบบปิด น้ำที่ใช้หล่อเย็น จะไม่สัมผัสกับอากาศ ทำให้คุณภาพน้ำไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้จะมีการเติมน้ำเข้าไปในระบบบ้าง แต่ก็ยังเป็นน้ำที่มีคุณภาพดี ปัญหาต่างๆ ที่ตามมาจะไม่เกิดเหมือนระบบเปิด แต่การลงทุนครั้งแรกจะสูงกว่าระบบเปิดมาก แต่เมื่อเทียบกับราคาเตาและอายุการใช้งานของเตาแล้วจะคุ้มทุนกว่า

2.2.2 เตาหลอมที่ใช้ในงานวิจัย

ลักษณะเตาที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ เป็นเตาหลอมแบบเหนียวนำไฟฟ้าแบบ Crucible ชนิดความถี่สูง (500 Hz) ขนาดกำลังผลิต 4 ตัน (ดังแสดงในรูปที่ 2.4) ทำการหลอมเหล็กที่อุณหภูมิ 1560 องศาเซลเซียส ใช้เวลาโดยประมาณ 50-60 นาที ขนาดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาสูงสุดอยู่ที่ 2,500 กิโลวัตต์ โดยมีขั้นตอนการหลอมดังต่อไปนี้

1. เตรียมวัตถุดิบที่ใช้ในการหลอมบรรดเตรียมวัตถุดิบซึ่งประกอบไปด้วย เศษเหล็ก, แมงกานีส, ซิลิกอน, เฟอร์โรโครเมียม ในปริมาณที่กำหนดซึ่งน้ำหนักรวมประมาณ 4 ตัน
2. เปิดไฟเข้าเตาหลอมที่ระดับกำลังงาน 2,500 kW
3. ใช้รเตรียมวัตถุดิบเขย่าวัตถุดิบลงเตาหลอมซึ่งจะใช้เวลาในการเขย่าลงเตาหลอมประมาณ 30-40 นาที ในขณะที่เขย่าวัตถุดิบลงเตาก็จะทำการหลอมไปด้วย
4. หลอมให้เหล็กและส่วนผสมทางเคมีในเตาละลาย โดยใช้เวลาในการหลอมประมาณ 50-60 นาที
5. เมื่อเหล็กและส่วนผสมทางเคมีละลายหมดแล้วให้ปิดไฟเข้าเตา
6. ทำการตักสิ่งสกปรกในน้ำเหล็ก โดยโรยผง Slag Top ลงบนผิวน้ำเหล็กให้ทั่วเตา หลังจากนั้นรอประมาณ 10-20 วินาที เพื่อให้สิ่งสกปรกจับตัวกันเป็นก้อน หลังจากนั้นใช้อุปกรณ์เครื่องมือตักสิ่งสกปรกออกจากเตา
7. ทำการวัดอุณหภูมิในเตาด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล ซึ่งอุณหภูมิขณะนี้จะอยู่ประมาณ 1480-1520 องศาเซลเซียส
8. ทำการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีในน้ำเหล็ก โดยทำการตักน้ำเหล็กในเตาทดลองในแบบ (Test Piece) เพื่อนำไปตรวจค่าเคมีตามข้อกำหนด ซึ่งถ้าผลเป็นไปตามข้อกำหนด ให้เปิดไฟเข้าเตาหลอมต่อโดยให้ได้อุณหภูมิ 1560 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลามากประมาณ 2-5 นาที
9. ทำการวัดอุณหภูมิในเตาอีกครั้งด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล ถ้าหากอุณหภูมิเกิน 1560 องศาเซลเซียส ต้องทำการปิดไฟเข้าเตาหลอมเพื่อลดอุณหภูมิให้เหลือ 1510-1500 องศาเซลเซียส เพื่อร่อนน้ำเหล็กไปยังขั้นตอนถัดไป
10. ในขณะที่ร่อนเตาเกิดข้อผิดพลาดในกระบวนการผลิต ทำให้ต้องร่อนน้ำให้เปิดไฟเข้าเตาหลอมอีกครั้ง เพื่อทำการรักษาอุณหภูมิในเตาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ทดลอง

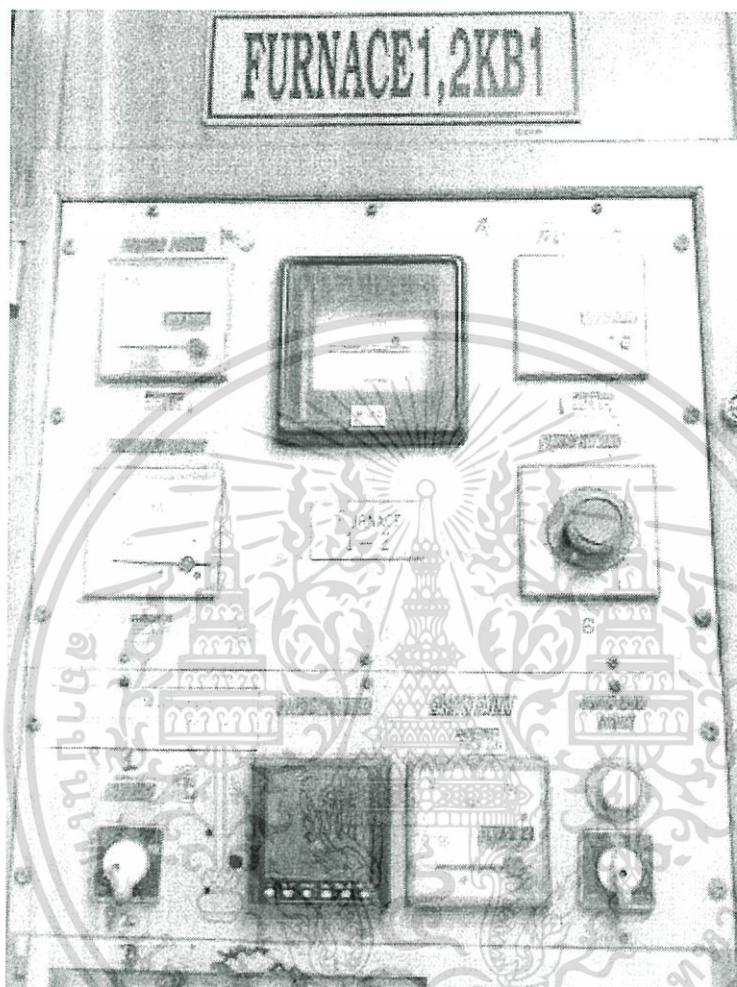
ระบบการควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าในปัจจุบัน จะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลจุ่มลงไปในเตาเพื่อวัดอุณหภูมิเป็นครั้งๆ ไป (ดังแสดงในรูปที่ 2.5) และอาศัยการปรับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาเพื่อควบคุมอุณหภูมิอีกที ซึ่งในการควบคุมอุณหภูมินี้จะอาศัยความชำนาญของผู้ดูแลเตาเป็นสำคัญ โดยดูจากสีของน้ำเหล็กและเวลาในการหลอมโดยประมาณ



รูปที่ 2.5 การวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

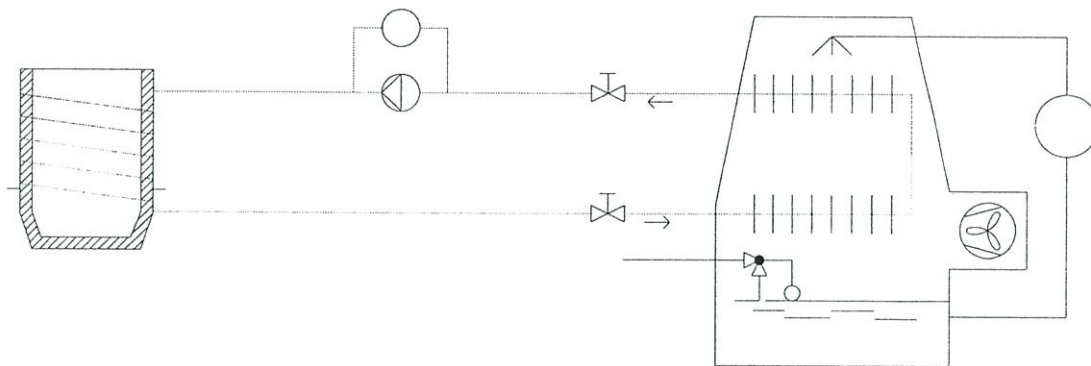
ระบบจ่ายไฟเข้าเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า 4 ตัน จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 5000 kVA โดยรับไฟจากการไฟฟ้านครหลวง ในระบบ 22 กิโลโวลต์ จ่ายเข้าสู่เตาหลอมโดยมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 2500 kW (ดังแสดงในรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 ตู้ควบคุมของเตาหลอมขนาด 4 ตัน

ระบบน้ำหล่อเย็นของเตาหลอมที่ใช้จะเป็นระบบปิด โดยระบบน้ำหล่อเย็นของเตาจะประกอบไปด้วยท่อน้ำเข้าเตาหลอมซึ่งจะเป็นน้ำเย็นและท่อน้ำออกจากเตาหลอมจะเป็นน้ำร้อน โดยวิ่งวนอยู่รอบๆ เตาด้วยอัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่ง โดยจะควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกเตาหลอมไว้ไม่ให้เกิน 60 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าอุณหภูมิเกินระบบไฟจะตัดไฟเข้าเตาทันที เพื่อป้องกันคอลล์ของเตาร้อนเกินและอาจทำให้คอลล์ของเตาเสียหายได้ โดยระบบน้ำหล่อเย็นหลังจากผ่านการหล่อเย็นจากหอหล่อเย็นแล้วน้ำจะมีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยจะมีปั้มน้ำสองตัวทำงานสลับกันเพื่อปั้มน้ำจากหอน้ำหล่อเย็นไปยังเตาหลอมและเมื่อน้ำหล่อเย็นออกจากเตาหลอมก็จะเข้ามายังหอน้ำหล่อเย็นเพื่อลดอุณหภูมิและทำวนไปเรื่อยๆ(ดังแสดงในรูปที่ 2.7)

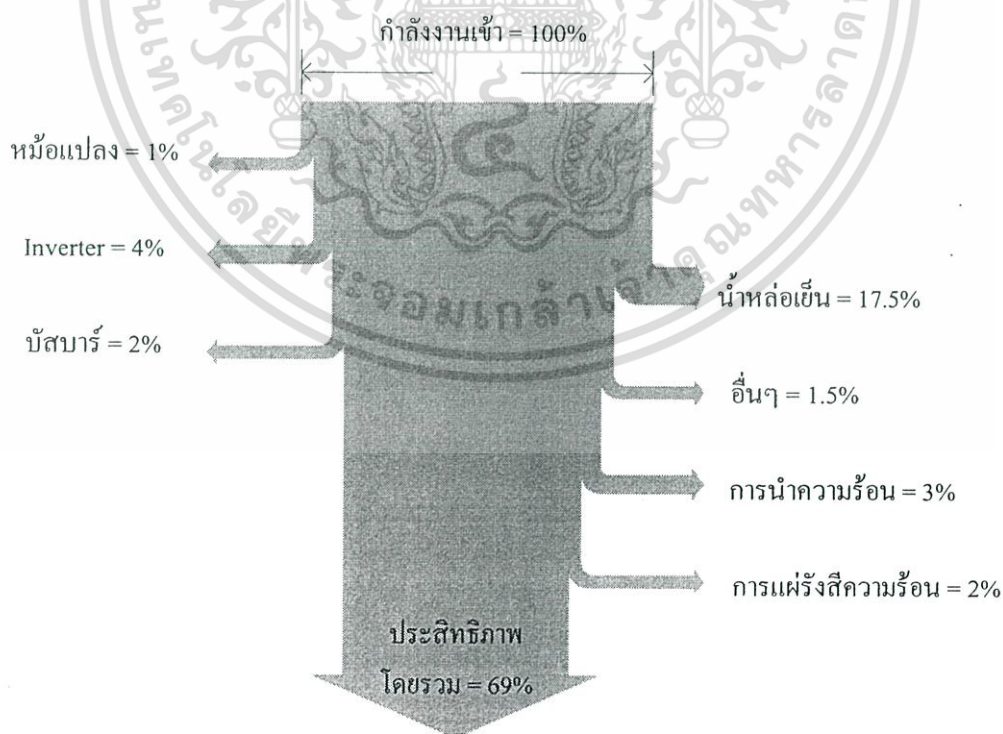
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 โคอะแกรมระบบน้ำหล่อเย็นของเตาหลอม

2.3 สมการสมดุลความร้อน

การที่จะวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาโดยทางอ้อมนั้นจำเป็นต้องรู้ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับอุณหภูมิน้ำเหล็กซึ่งจำเป็นต้องรู้ว่าความร้อนที่เข้าสู่เตานั้นนอกจากไปทำให้เหล็กในเตาอุณหภูมิสูงขึ้นแล้ว ความร้อนในส่วนของที่เหลือนั้นไปที่ไหนบ้าง ซึ่งในการพิจารณาปัญหานี้จะใช้สมการสมดุลความร้อน (Heat Balance) ของเตาในการพิจารณา ซึ่งเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบ Crucible ชนิดความถี่สูง พบว่าแซงก็โคอะแกรมสมดุลความร้อนของเตาหลอมชนิดนี้โดยทั่วไปจะมีรูปแบบสมการสมดุลความร้อนดังนี้



รูปที่ 2.8 โคอะแกรมสมดุลความร้อนของเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้าแบบ Crucible ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการสมดุลความร้อน (Heat Balance)

$$\text{กำลังงานเข้า} = \text{ความร้อนออก} + \text{ความร้อนสูญเสีย} \quad (2.1)$$

ตารางที่ 2.4 ตารางสรุปสมดุลความร้อนของเตาหลอม

ความร้อน	สมการ
กำลังงานเข้า	P_{in}
ความร้อนที่ให้เหล็ก	$Q_s = \frac{m_s \cdot L}{\Delta t} + \frac{m_s \cdot C_{ps} \cdot \Delta T_s}{\Delta t}$ (2.2)
ความร้อนสูญเสียทางด้านไฟฟ้า	$Q_t = 4 \cdot I_{INV}^2 \cdot R_{cu}$ (2.3)
ความร้อนสูญเสียกับระบบน้ำหล่อเย็น	$Q_w = M_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T_w$ (2.4)
ความร้อนสูญเสียจากการนำความร้อนผนังเตา	$Q_c = \frac{T_s - T_w}{R} \cdot 10^{-3}$ (2.5)
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	Q_{th}

โดยที่ m_s = มวลของเหล็ก (kg)
 L = ค่าความร้อนแฝงของเหล็กของการกลายเป็นไอ (kJ/kg)
 C_{ps} = ค่าความจุความร้อนของเหล็ก (kJ/kg°C)
 M_w = อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/sec)
 C_{pw} = ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg°C)
 T_s = อุณหภูมิของเหล็ก (K)
 T_w = อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (K)
 Δt = เวลาที่ใช้หลอม (sec)
 R = ค่าความต้านทานความร้อนของผนังเตา (kW/K)
 R_{cu} = ความต้านทานของลวดตัวนำในหม้อแปลง (Ω)
 I_{INV} = กระแสอินเวอร์เตอร์ (A)

กำลังงานเข้าคือ กำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ในส่วนของความร้อนออกก็คือความร้อนที่ให้แก่เหล็กในเตา โดยแบ่งเป็นช่วงที่ความร้อนทำให้เหล็กอุณหภูมิสูงขึ้นและความร้อนแฝงของเหล็กเมื่อพิจารณาถึงความร้อนสูญเสียของเตาหลอม พบว่าจะประกอบไปด้วยลักษณะการสูญเสียความร้อนใน 2 ลักษณะคือ ความร้อนสูญเสียทางด้านไฟฟ้า และความร้อนสูญเสียทางด้านการแผ่รังสีความร้อนเมื่อพิจารณาความร้อนสูญเสียทางด้านไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย ความร้อนสูญเสียในหม้อแปลง (Transformer Loss) ซึ่งเกิดขึ้นจากการผ่านกระแสไปบนตัวนำไฟฟ้าที่มีการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานความร้อนสูญเสียในส่วนนี้จะขึ้นกับปริมาณกระแสไฟฟ้าและค่าความต้านทานของขดลวดหม้อแปลง ความร้อนสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ (Inverter Loss) ความร้อนสูญเสียในสายไฟ (Wiring Loss) ความร้อนสูญเสียในคอยล์ (Coil Loss) และความร้อนสูญเสียอื่นๆ (Other Loss) กลไกของการสูญเสียทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าและค่าความต้านทาน

ความร้อนสูญเสียทางด้านการแผ่รังสีความร้อน จะประกอบไปด้วย ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนจากผนังเตาไปสู่คอยล์ (Conduction Loss) เนื่องจากผนังเป็นฉนวนทางความร้อนในระดับหนึ่ง ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการแผ่รังสีบริเวณปากเตา (Radiation Loss) เนื่องจากน้ำเหล็กจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศรอบนอกมาก ความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อนของระบบน้ำหล่อเย็น เนื่องจากว่าขดลวดเหนี่ยวนำจะสามารถทนอุณหภูมิได้ปริมาณหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องมีการระบายความร้อนที่ขดลวดนี้ตลอดเวลาเพื่อไม่ให้อุณหภูมิที่ขดลวดมีค่าเกินที่กำหนดและสร้างความเสียหายให้กับขดลวด และความร้อนสูญเสียอื่นๆ (Other Loss)

ดังนั้นสมการสมดุลความร้อนจะเขียนได้ดังนี้

$$Q = Pt$$

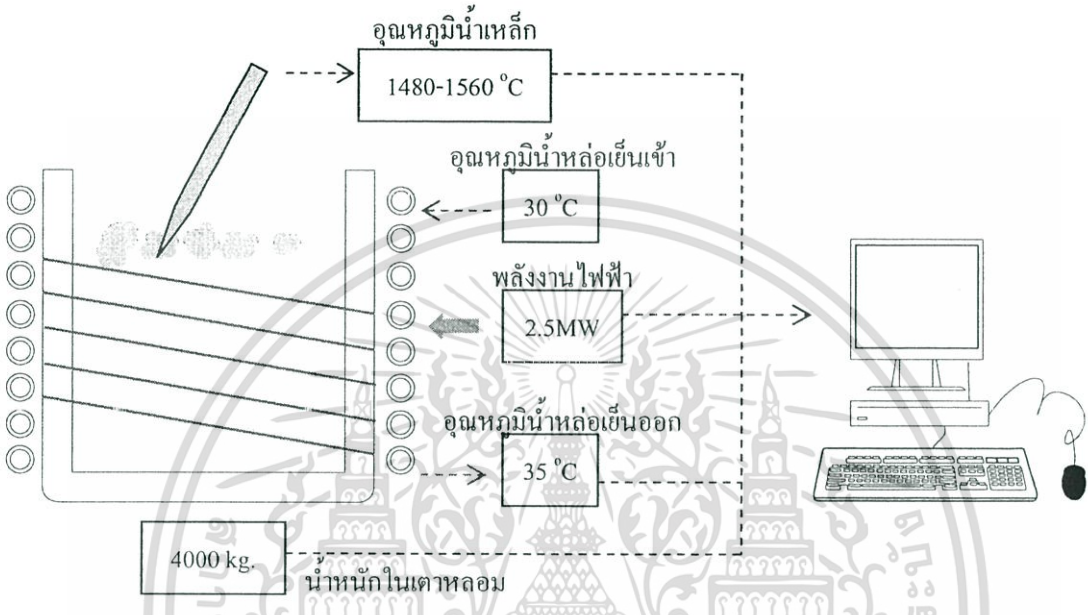
(2.6)



บทที่ 3

การออกแบบการทดลองประมาณค่าอุณหภูมิ

3.1 การออกแบบการทดลอง



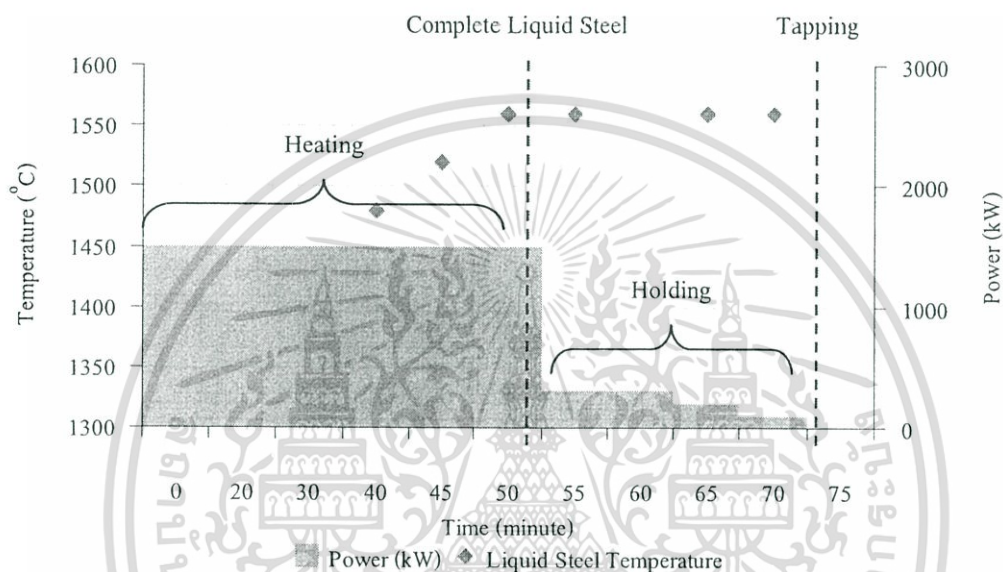
รูปที่ 3.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองนี้จะเสนอการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้าด้วยวิธีทางอ้อม ซึ่งการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กโดยทางอ้อมนั้นจะวัดจากจากปัจจัยต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของน้ำเหล็ก การวัดโดยวิธีนี้จะวัดปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่สามารถวัดได้ง่าย อุปกรณ์ราคาไม่แพง และสามารถวัดได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ เนื่องจากการวัดกระทำที่จุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะหลอมละลาย เช่น การวัดอุณหภูมิของโครงสร้าง (ผนังเตาและหรือฝาเตา) ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ หรือ วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้า เช่น แรงดันกระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้ประมาณหาอุณหภูมิน้ำโลหะที่อยู่ในเตาหลอม ซึ่งวิธีนี้ราคาอุปกรณ์จะมีราคาถูกกว่าแบบวัดโดยตรงสัมผัสกับโลหะหลอมเหลว แต่การวัดในลักษณะดังกล่าวเกี่ยวข้องกับตัวแปรมากมาย ตัวอย่างเช่น การวัดอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอกจะเกี่ยวข้องกับความสามารถในการเก็บความร้อนของเตา ความสามารถในการสะสมความร้อนทำให้อุณหภูมิด้านนอกและด้านในมีความสัมพันธ์กันในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ดังนั้นแนวคิดในการออกแบบการทดลองจะใช้การวัดอุณหภูมิทางอ้อม เพื่อให้ได้วิธีการวัดที่มีความแม่นยำและราคาไม่แพงนัก โดยจะทำการหาแบบจำลองของเตาหลอมเพื่อใช้ประกอบในการประมาณหาอุณหภูมิ

เอกของโลหะหลอมละลายผ่านทางสมการสมดุลความร้อนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.1 เป็นการออกแบบการทดลองการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กโดยทางอ้อม ซึ่งการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กโดยทางอ้อมนี้ จะพยายามหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา ซึ่งจากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา ได้แก่ กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า น้ำหนักวัตถุดิบในเตา อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และความร้อนสูญเสียรอบๆเตา

3.2 ลักษณะกระบวนการให้ความร้อน



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงกระบวนการหลอมเหล็ก

จากรูป 3.2 ลักษณะการทำงานของเตาโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 3 ลักษณะ กล่าวคือเริ่มต้นในช่วงที่เหล็กยังเป็นของแข็ง ช่วงนี้เตาจะเปิดกำลังไฟเต็มที่ (ประมาณ 2500 kW) เรียกว่าช่วงให้ความร้อน (Heating Phase) เพื่อหลอมเหล็กให้หลอมเหลวอย่างรวดเร็วจนมีอุณหภูมิถึง 1560 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาประมาณ 50 นาที เมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการแล้ว จะลดกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงรักษาความร้อน (Holding Phase) (ประมาณ 300 kW) เพื่อให้อุณหภูมิน้ำเหล็กคงที่เพื่อรอเทน้ำเหล็ก (ขึ้นอยู่กับว่ากระบวนการผลิตพร้อมจะเทน้ำเหล็กแล้วหรือไม่) แต่ถ้าในช่วงให้ความร้อน เกิดมีข้อผิดพลาดทำให้อุณหภูมิของน้ำเหล็กเกิน 1560 องศาเซลเซียส จะต้องปรับกำลังไฟฟ้า ให้ต่ำกว่าช่วงรักษาความร้อน (ต่ำกว่า 300kW) หรือหยุดให้ความร้อนแก่เตา (Stop) เพื่อให้อุณหภูมิน้ำเหล็กลดลงมาเหลือ 1560 องศาเซลเซียส ซึ่งในการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้านี้จะขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ควบคุมเตา จากลักษณะการควบคุมเตาในปัจจุบันจะเห็นว่า ถ้าไม่มีการควบคุมอุณหภูมิในเตาที่ดีพอจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์เป็นจำนวนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาค่าความร้อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบในช่วงที่เหล็กหลอมละลายหมดแล้ว โดยใช้สมการสมดุลความร้อนดังนี้

$$\begin{aligned} \text{กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า} &= \text{ความร้อนให้กับเหล็ก} + \text{ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น} \\ &+ \text{ความร้อนสูญเสียอื่นๆ} \end{aligned} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลจากการตรวจวัดของแต่ละช่วงการให้ความร้อน

รายการ	หน่วย	ช่วงให้ความร้อน	ช่วงความร้อนคงที่
P_{in}	kW	1,500	300
m_s	kg	4,000	4,000
C_{pw}	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$	4.2	4.2
M_w	kg/sec	8.2	8.2
ΔT_s	$^\circ\text{C}$	22	0
C_{ps}	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$	0.5	0.5
ΔT_w	$^\circ\text{C}$	16	5
Δt	sec	60	-

โดยที่ P_{in} = พลังงานไฟฟ้า (kW)
 m_s = มวลของเหล็ก (kg)
 C_{pw} = ค่าความจุความร้อนของน้ำ ($\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$)
 M_w = อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/sec)
 ΔT_s = ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา ($^\circ\text{C}$)
 C_{ps} = ค่าความจุความร้อนของเหล็ก ($\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$)
 ΔT_w = ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น ($^\circ\text{C}$)
 Δt = ช่วงเวลา (sec)

เมื่อทำการวัดค่าต่างๆ ที่ต้องใช้ในสมการสมดุลความร้อน โดยจะทำการวัดค่าต่างๆ 2 ช่วง คือช่วงให้ความร้อน กับช่วงรักษาความร้อนให้คงที่ และเมื่อคำนวณจากสมการสมดุลความร้อน พบว่าพลังงานที่ใส่เข้าไปในเตาจะไปทำให้เหล็กในเตาหลอมเหลว และพลังงานที่เหลือจะสูญเสียออกไปกับน้ำหล่อเย็น และสูญเสียไปกับการพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อนรอบๆเตาหลอม เมื่อนำค่าในตารางที่ 3.1 มาแทนค่าลงในสมการสมดุลความร้อนจะได้ดังนี้

ช่วงให้ความร้อน (Heating Phase)

กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า = ความร้อนให้กับเหล็ก + ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น
+ ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

$$P_{in} = \frac{m_s \cdot C_{ps} \cdot \Delta T_s}{\Delta t} + M_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T_w + \text{heatloss}$$

$$1500 = 733.33 + 551.04 + \text{heatloss}$$

$$\text{heatloss} = 215.63 \text{ kW}$$

ช่วงรักษาความร้อน (Holding Phase)

กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า = ความร้อนให้กับเหล็ก + ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น
+ ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

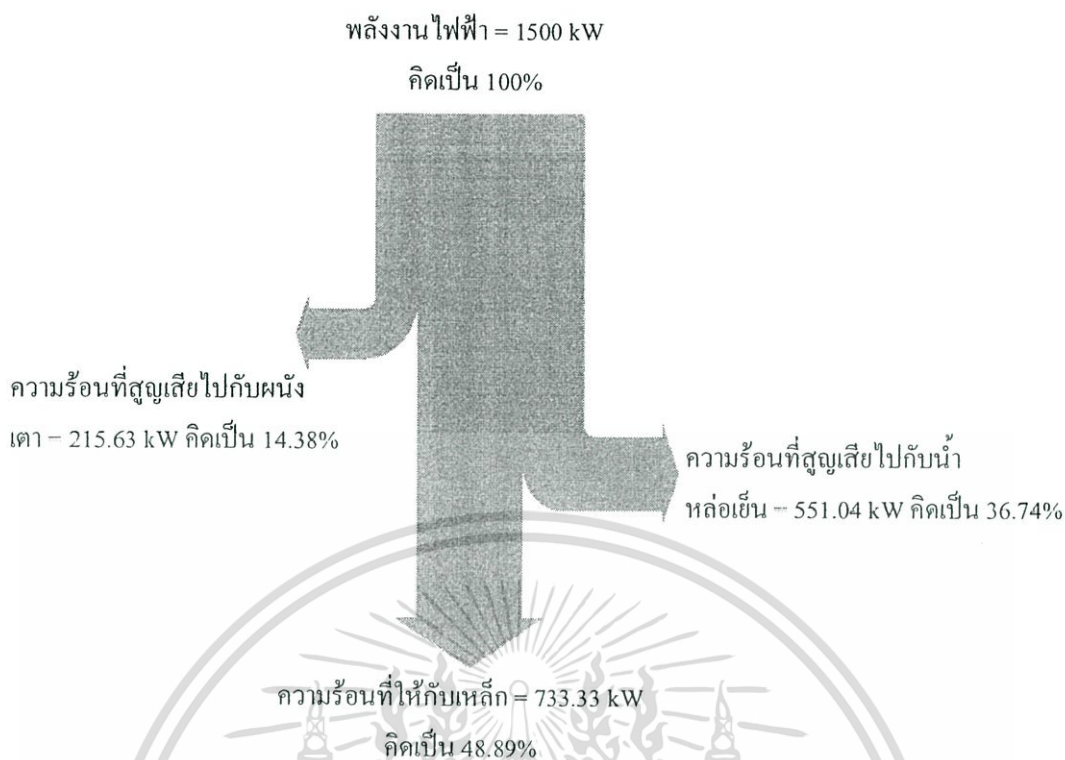
$$P_{in} = \frac{m_s \cdot C_{ps} \cdot \Delta T_s}{\Delta t} + M_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T_w + \text{heatloss}$$

$$300 = 0 + 172.2 + \text{heatloss}$$

$$\text{heatloss} = 127.8 \text{ kW}$$

จากการคำนวณพบว่าค่าความร้อนสูญเสียจากทั้งสองช่วงมีค่าต่างกันค่อนข้างมาก ทั้งนี้เพราะค่ากำลังงานป้อนเข้าในระหว่าง ช่วงให้ความร้อน กับ ช่วงรักษาความร้อนนั้นมีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยที่ค่าความร้อนสูญเสียในคอลล์จะมีความสัมพันธ์กับค่ากำลังงานป้อนเข้านี้ และอาจเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้ค่าความร้อนสูญเสียจากทั้งสองช่วงมีค่าต่างกัน

เมื่อพิจารณาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการหลอมเหล็กของช่วงให้ความร้อน และนำมาเขียนแผนภาพแซงก์ไดอะแกรม (ดังแสดงในรูปที่ 3.3) จะพบว่าความร้อนที่เข้าสู่เตาหลอมจะเข้าสู่เหล็ก 48.89% หรือจะพูดได้ว่าประสิทธิภาพของเตาเท่ากับ 48.89% และความร้อนส่วนมากจะสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น ซึ่งคิดเป็น 36.74% ส่วนความร้อนที่เหลือจะสูญเสียไปตามฝาเตาและผนังเตาคิดเป็น 14.38%



รูปที่ 3.3 แชนจ์ไดอะแกรมในช่วงให้ความร้อนกับเหล็ก

จากลักษณะกระบวนการให้ความร้อนตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้สามารถวิเคราะห์การใช้พลังงานของเตาหลอมได้ โดยการให้พลังงานของเตาหลอมจะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ช่วงให้ความร้อน ช่วงความร้อนคงที่ และช่วงหยุดให้ความร้อน โดยทั้ง 3 ช่วงนั้นเป็นช่วงที่เหล็กหลอมเหลวหมดแล้ว และเป็นช่วงที่สามารถวัดอุณหภูมิในเตาหลอมได้ซึ่งก็เพื่อจะศึกษาการวัดอุณหภูมิในเตาอย่างต่อเนื่อง

3.3 แบบจำลองทางความร้อนของเตาหลอม

การหาแบบจำลองทางความร้อนจะพยายามนำค่าความร้อนต่างๆที่เกิดขึ้นของเตาหลอมมาอยู่ในรูปของตัวแปรที่สามารถตรวจวัดได้ เพื่อให้หาค่าอุณหภูมิที่ประมาณได้นี้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิในเตาจริงที่สุด โดยที่เมื่อพิจารณาจากสมการทางความร้อนต่างๆ (ดังแสดงในตารางที่ 3.1) พบว่า ความร้อนที่ให้กับเหล็กในขั้นตอนการวัดอุณหภูมิในเหล็กนั้น เป็นขั้นตอนที่เหล็กในเตาหลอมกลายเป็นของเหลวหมดแล้ว เพราะฉะนั้นความร้อนในส่วนความร้อนแฝง (Latent Heat) จึงไม่มี จะมีเฉพาะในส่วนความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Sensible Heat) ดังนั้นจึงสามารถตัดความร้อนส่วนนี้ทิ้งไปได้ และพบว่าในส่วนของการความร้อนทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นนี้ จะเป็นฟังก์ชันของผลต่างของอุณหภูมิในเตา $f(\Delta t)$ เมื่อพิจารณาความร้อนที่สูญเสียในหม้อแปลงพบว่าจะเป็นฟังก์ชันของค่าความต้านทานและกระแส ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับค่ากำลัง

เอกงานไฟฟ้าป้อนเข้า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความร้อนที่สูญเสียในหม้อแปลงจะเป็นฟังก์ชันของค่าการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า $f(P_{in})$ ในส่วนของค่าความร้อนสูญเสียกับระบบหล่อเย็น ค่าความร้อนในส่วนนี้คือความร้อนที่ใช้จ่ายเพื่อให้ความร้อนให้กับระบบคอลล์ของเขา ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นและค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น $f(M_w, T_w)$ ในส่วนของความร้อนสูญเสียจากการนำความร้อนนั้นก็คือความร้อนจากน้ำเหล็กในเตาผ่านผนังเตาออกมาซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่เหล็กในเตา $f(\Delta T)$ และในส่วนของความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีพบว่าจะจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่เหล็กในเตาที่ค่ากำลังที่ซึ่งจากการศึกษาจากสมการความร้อนของเตาชนิดเดียวกันนี้พบว่ามีค่าน้อย จึงให้รวมกับค่าความร้อนสูญเสียอื่นๆ และประมาณให้มีค่าคงที่ (Heat Loss) ทำให้เมื่อแทนค่าตัวแปรที่วัดค่าได้กับตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันของสมการทางความร้อนจะได้รูปแบบสมการดังนี้

$$P_{in} = \frac{m_s \cdot C_{ps} \cdot \Delta T_s}{\Delta t} + M_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T_w + f(P_{in}) + f(\Delta T_s) + \text{heatloss} \quad (3.2)$$

แทนค่าคงที่ X1 ลงในความร้อนสูญเสียทางไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของกำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าและแทนค่าคงที่ X2 ลงในความร้อนสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนผนังเตาที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิที่เหล็กในเตา

$$P_{in} = \frac{m_s \cdot C_{ps} \cdot \Delta T_s}{\Delta t} + M_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T_w + X1 \cdot P_{in} + X2 \cdot \Delta T_s + \text{heatloss} \quad (3.3)$$

จากสมการข้างบนพบว่าค่ามวลของเหล็กที่ใส่เข้าไปในเตาในแต่ละครั้งที่ทำการหลอมจะมีค่าคงที่อยู่ที่ 4,000 กิโลกรัม ส่วนค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กนั้น ถึงแม้แต่ละครั้งที่ทำการหลอม จะมีส่วนผสมที่ใส่ลงไปไม่เหมือนกันและคุณภาพเหล็กที่ใส่แต่ละครั้งจะไม่เท่ากันแต่ก็ไม่ทำให้ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กเปลี่ยนไปมากนักจึงประมาณให้ค่าความร้อนจำเพาะของเหล็กมีค่าคงที่ ต่อมาเมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นจากการตรวจพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละครั้งที่ทำการหลอม ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงานเป็นระบบที่รวมศูนย์กลาง กล่าวคือน้ำหล่อเย็นที่หล่อเย็นแล้วจะไหลผ่านหอหล่อเย็น (Cooling Tower) มารวมกันที่แท็งก์ แล้วสูบกลับไปใช้ใหม่ทำให้บางครั้งปริมาณน้ำที่ใช้ไม่เพียงพอและบางครั้งก็เกิดการอุดตันภายในท่อคอลล์ทำให้อัตราการไหลของน้ำไม่คงที่ ส่วนค่าความร้อนจำเพาะของน้ำนั้นมีค่าคงที่ทุกครั้งที่ทำกรหลอม ส่วนค่าความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีรวมกับความร้อนสูญเสียอื่นๆ ที่ประมาณให้มีค่าคงที่นั้นจะรวมอยู่ในค่า heat loss โดยช่วงเวลาที่ทำการวัดจะมีค่าคงที่เช่นเดียวกันซึ่งในการทดลองจะทำการวัดค่าตัวแปรทุกๆ หนึ่งวินาที ดังนั้นเมื่อจัดสมการใหม่จะได้ดังนี้ (จากสมการที่ (3.3) จัดตัวแปรให้อยู่ข้างเดียวกัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(1 - X1)P_{in} = \left(\frac{m_s \cdot C_{ps}}{\Delta t} + X2 \right) \cdot \Delta T_s + M_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T_w + \text{heatloss}$$

หลังจากนั้นทำการย้ายข้างและนำค่าคงที่มารวมกัน

$$P_{in} = \frac{\left(\frac{m_s \cdot C_{ps}}{\Delta t} + X2 \right)}{(1 - X1)} \cdot \Delta T_s + \left(\frac{C_{pw}}{1 - X1} \right) \cdot M_w \cdot \Delta T_w + \left(\frac{\text{heatloss}}{1 - X1} \right)$$

แทนที่ค่าคงที่ที่นำมารวมกันด้วย A1, A2 และ A3 จะได้สมการดังนี้

$$P_{in} = A1 \cdot \Delta T_s + A2 \cdot M_w \cdot \Delta T_w + A3 \quad (3.4)$$

โดยที่

$$A1 = \frac{\left(\frac{m_s \cdot C_{ps}}{\Delta t} + X2 \right)}{(1 - X1)}$$

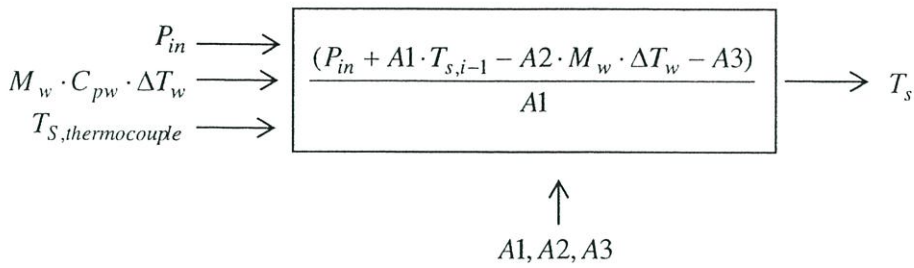
$$A2 = \left(\frac{C_{pw}}{1 - X1} \right)$$

$$A3 = \left(\frac{\text{heatloss}}{1 - X1} \right)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$T_s = \frac{(P_{in} + A1 \cdot T_{s,i-1} - A2 \cdot M_w \cdot \Delta T_w - A3)}{A1} \quad (3.5)$$

โดยที่ T_s เป็นอุณหภูมิน้ำเหล็กในเวลาที่ประมาณและ $T_{s,i-1}$ เป็นอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ประมาณในครั้งที่ผ่านมา ซึ่งในการที่จะประมาณอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาจากแบบจำลองทางความร้อนที่หามาได้จำเป็นต้องวัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาจริงอย่างน้อยหนึ่งครั้ง โดยรูปแบบของแบบจำลองทางความร้อนจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แบบจำลองทางความร้อนของระบบเตาหลอม

ในการประมาณค่าอุณหภูมิในเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากแบบจำลองทางความร้อนที่หามาได้นี้ เมื่อทำการทดลองและทำการคำนวณหาค่าคงที่ $A1, A2, A3$ แล้วนำกลับไปแทนในแบบจำลองทางความร้อนของเตาก็จะสามารถประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาได้ (ต้องทำการวัดอุณหภูมิจริงอย่างน้อยหนึ่งครั้ง) ซึ่งเมื่อสังเกตแบบจำลองที่หามาได้พบว่าค่าอุณหภูมิที่ประมาณได้ จะคำนึงถึงผลกระทบของตัวแปรที่มีผลกับอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาทั้งหมดตามสมการสมดุลความร้อน ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการหลอมเหล็กเกิดขึ้นหรือมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เช่น มีการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อุณหภูมิที่ประมาณได้นี้ก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากอุณหภูมิในเตาจริงมากนัก

3.4 การหาค่าพารามิเตอร์ของสมการ

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ไม่รู้ค่า นั้นจะใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method) ซึ่งวิธีนี้จะเป็นวิธีที่ทำให้เกิดผลรวมของค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดซึ่งจะมีหลักการดังนี้ ถ้ามีชุดข้อมูล $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ โดยที่ x เป็นตัวแปรต้น และ y เป็นตัวแปรตาม โดยที่ $f(x)$ มีค่าความผิดพลาดของแต่ละจุดของชุดข้อมูลเท่ากับ d_i ยกตัวอย่างเช่น $d_1 = y_1 - f(x_1), d_2 = y_2 - f(x_2), \dots, d_n = y_n - f(x_n)$ โดยที่วิธีกำลังสองน้อยที่สุดนี้จะมีคุณสมบัติดังนี้

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n d_i^2 = d_1^2 + d_2^2 + \dots + d_n^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2$$

จากสมการทางความร้อนของเตาในสมการที่ (3.5) และจากวิธีการที่ได้กล่าวมาสามารถนำมาหาค่าพารามิเตอร์ $A1, A2, A3$ ได้โดยการทดลองวัดค่าจริงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการประกอบด้วยค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ป้อนเข้าเตาหลอมเป็นกิโลวัตต์ ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็นเป็นองศาเซลเซียสและกิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับมาทุกๆ 1 วินาที และทำการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมระหว่างขบวนการเท่าที่สามารถกระทำได้

การทดลองเพื่อประมาณค่า $A1, A2, A3$ นี้กระทำโดยเก็บข้อมูลต่างๆจากกระบวนการทั้งหมด 6 รอบการทำงาน โดยในแต่ละรอบการทำงานนี้จะปรับให้ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ามีค่าต่าง ๆ กัน และรายละเอียดของแต่ละรอบการทำงานแสดงอยู่ในตารางที่ 3.2 ถึงตารางที่ 3.7

จากนั้นจึงได้นำข้อมูลทั้งหมดมาประมาณหาค่าพารามิเตอร์ $A1, A2, A3$ พร้อมกัน โดยมีจำนวนจุดทดลองโดยรวมทั้งหมด 2,200 จุดและจำนวนจุดที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก 24 จุด โดยที่ข้อมูลที่ทดลองนี้มีค่าพลังงานป้อนเข้าต่าง ๆ กัน ตั้งแต่ 1,500 ถึง 2,500 กิโลวัตต์ การที่เลือกค่าพลังงานป้อนเข้าต่าง ๆ กันจะทำให้แบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์ $A1, A2, A3$ ที่หาออกมาได้มีเสถียรภาพสูง ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นมากสำหรับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ เมื่อนำข้อมูลตามที่ได้กล่าวมานี้มาหาค่าพารามิเตอร์ $A1, A2, A3$ ที่ทำให้แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์จริงหรือค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมทั้ง 24 จุดมากที่สุด

ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณมีดังต่อไปนี้ เริ่มแรกหลังจากวัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาจุดแรกแล้ว หลังจากนั้นจะทำการคำนวณอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาในจุดที่ 2 โดยการแทนค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิเข้า-ออก ของน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาที่ทำการวัดครั้งแรก พร้อมทั้งสมมติค่าคงที่ $A1, A2, A3$ แทนลงในสมการที่ (3.5) หลังจากนั้นนำค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาจุดที่ 2 ที่คำนวณได้แทนค่ากลับลงในสมการที่ (3.5) พร้อมทั้งแทนค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็นที่ได้จากการวัดในจุดต่อมา และค่าคงที่ $A1, A2, A3$ ที่สมมติขึ้น เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิน้ำเหล็กในจุดที่ 3 หลังจากนั้นทำการคำนวณวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนได้อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาครบ 2,200 จุดตามที่ได้ทำการทดลองมาตามรูปแบบสมการนี้

$$T_{s,2} = \frac{(P_{in,2} + A1 \cdot T_{s,1} - A2 \cdot M_{w,2} \cdot \Delta T_{w,2} - A3)}{A1}$$

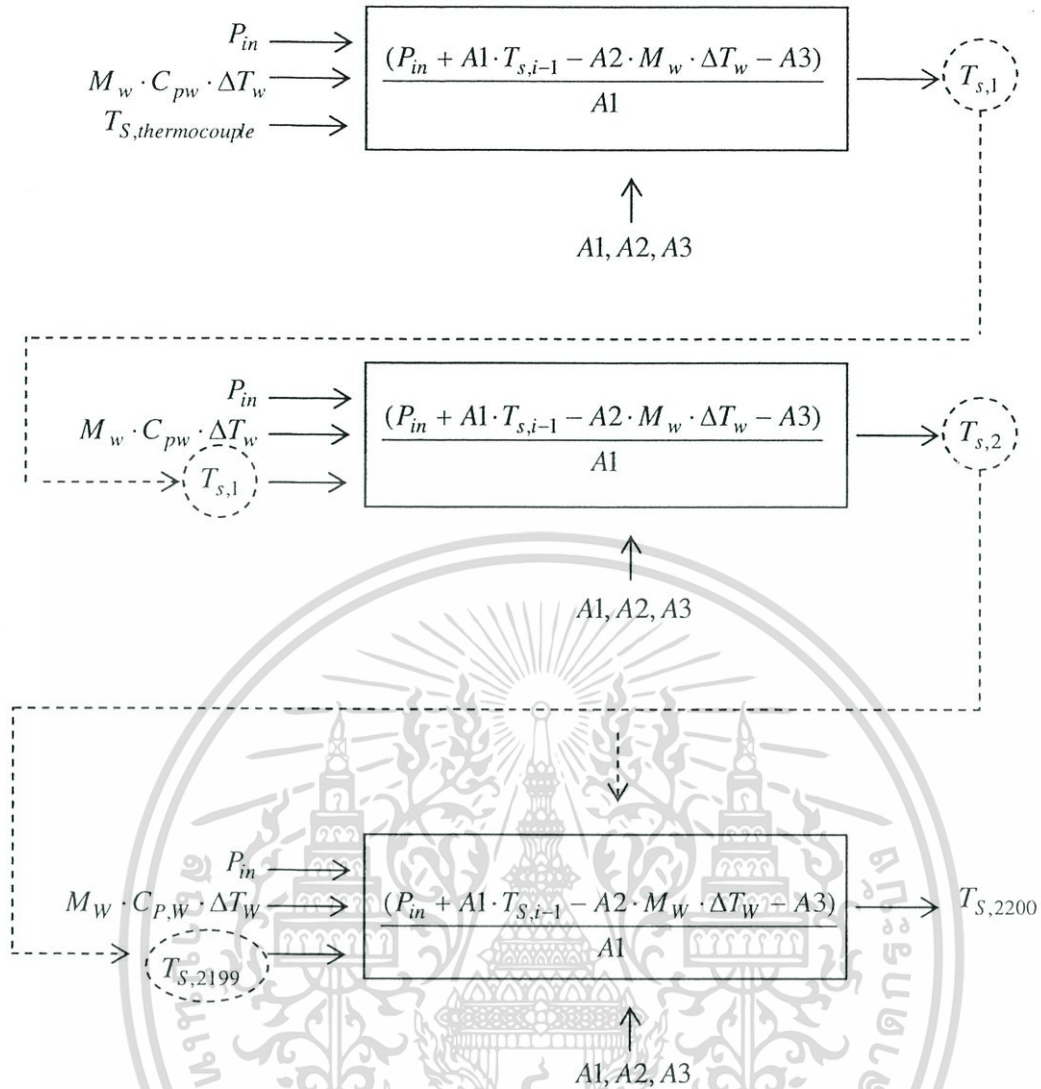
$$T_{s,3} = \frac{(P_{in,3} + A1 \cdot T_{s,2} - A2 \cdot M_{w,3} \cdot \Delta T_{w,3} - A3)}{A1}$$

... =

... =

$$T_{s,2200} = \frac{(P_{in,2200} + A1 \cdot T_{s,2199} - A2 \cdot M_{w,2200} \cdot \Delta T_{w,2200} - A3)}{A1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 โค้ดโปรแกรมการหาค่าพารามิเตอร์ A_1, A_2, A_3

เมื่อได้อุณหภูมิในเตาครบตามจุดที่ได้ทำการทดลองมาแล้วนั้น ก็นำค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาทั้ง 2,200 จุด มาทำการประมาณค่าคงที่ A_1, A_2, A_3 ซึ่งเมื่อทำการคำนวณแล้วถ้าค่าคงที่ A_1, A_2, A_3 ที่ประมาณค่าได้นี้ทำนายค่าอุณหภูมิลาดเคลื่อนจากการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลก็ให้ทำการสมมติค่าคงที่ A_1, A_2, A_3 ขึ้นมาใหม่แล้วทำการคำนวณหาค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาในจุดถัดๆ ไปเพื่อนำมาประมาณหาค่าคงที่ A_1, A_2, A_3 ใหม่อีกรอบ โดยจะคำนวณซ้ำแบบนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าคงที่นั้นจะลู่เข้าซึ่งเมื่อทำการคำนวณตามวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่าค่าคงที่ A_1, A_2, A_3 มีค่าดังนี้

$$A_1 = 659, \quad A_2 = 18.4, \quad A_3 = 100$$

ดังนั้นแบบจำลองทางความร้อนของเตาจะแสดงได้ดังสมการที่ (3.6) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_s = \frac{(P_{in} + 659 \cdot T_{s-1} - 18.4 \cdot M_w \cdot \Delta T_w - 100)}{659} \quad (3.6)$$

โดยเมื่อเปรียบเทียบการประมาณอุณหภูมิโดยแบบจำลองทางความร้อนที่หามาได้กับชุดข้อมูลที่นำมาหาค่าพารามิเตอร์ A_1, A_2, A_3 จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ถึงรูปที่ 3.11

ตารางที่ 3.2 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 1

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	1,500	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	10	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	1,980	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	90	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

ตารางที่ 3.3 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 2

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	1,800	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	10	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	1,980	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	100	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

ตารางที่ 3.4 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 3

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	2,000	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	10	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	1,980	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	100	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 4

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	2,200	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	20	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	1,980	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	100	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

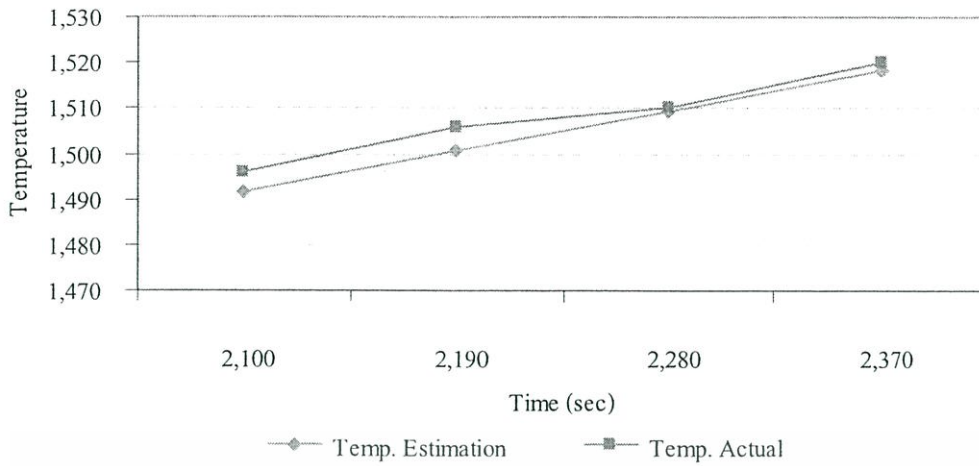
ตารางที่ 3.6 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 5

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	2,200	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	20	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	1,980	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	120	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

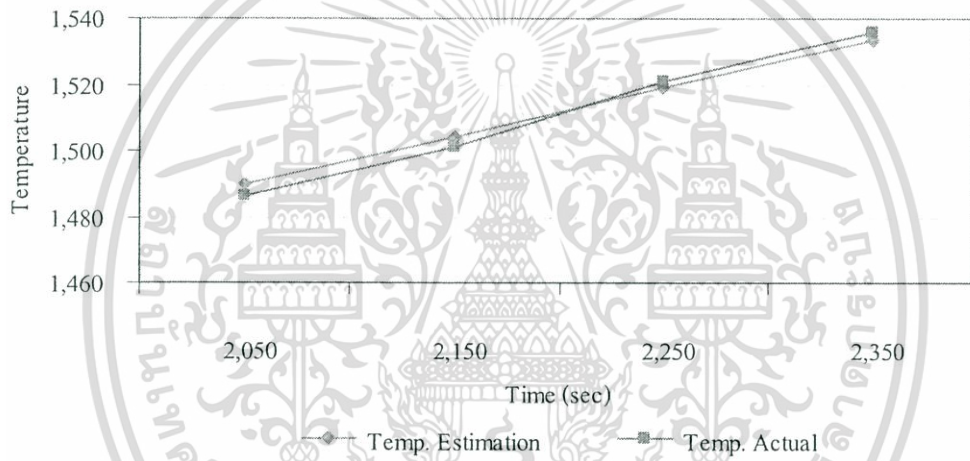
ตารางที่ 3.7 ชุดข้อมูลรอบการทำงานที่ 6

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	2,500	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	10	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	1,980	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	90	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

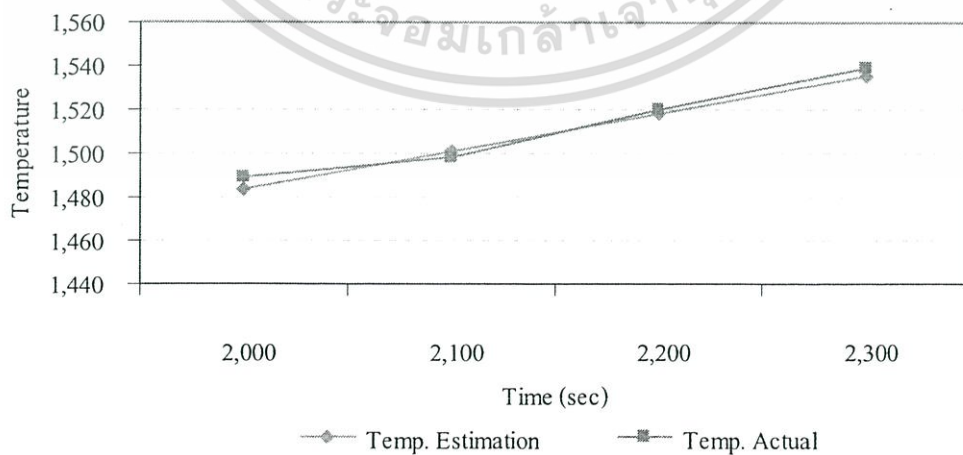
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 1

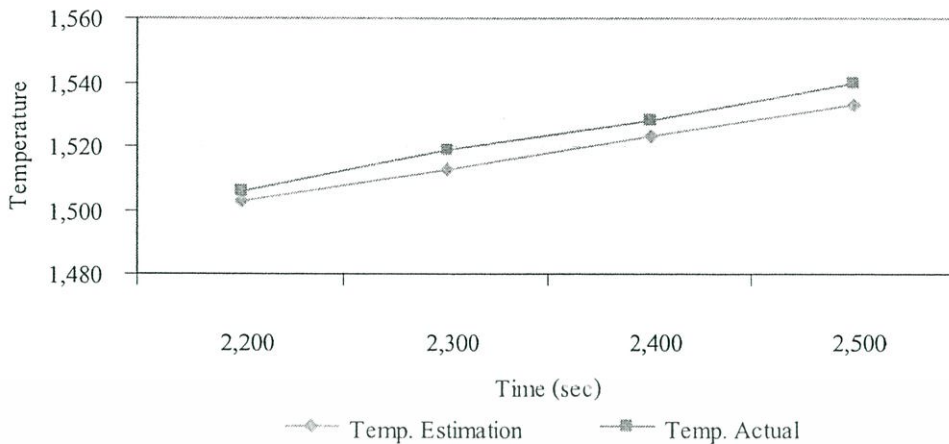


รูปที่ 3.7 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 2

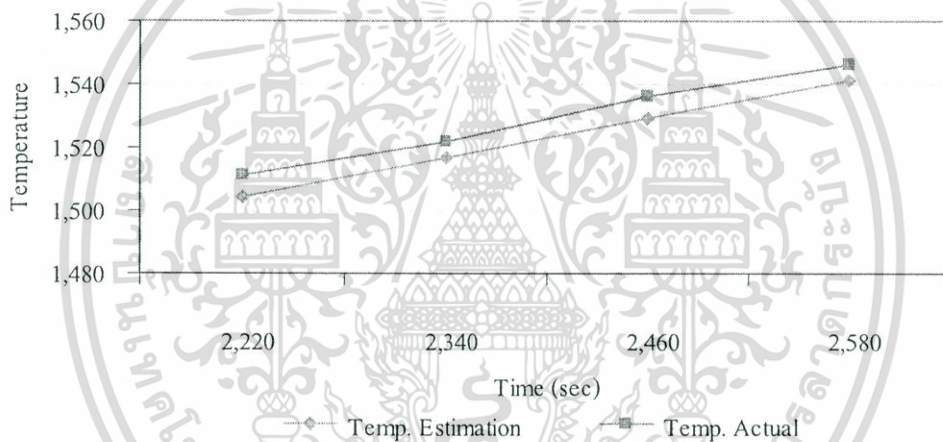


รูปที่ 3.8 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 3

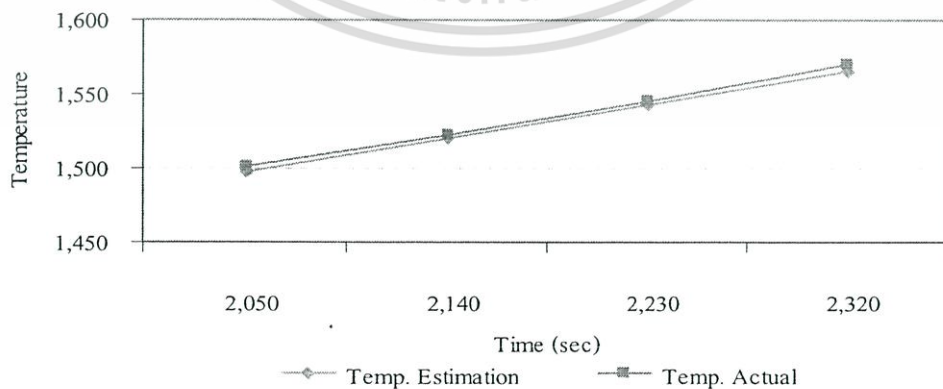
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 4



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 5



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงผลรอบการทำงานที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาแบบจำลองทางความร้อนของเตานี้ได้ทำการทดลองมาทั้งหมด 6 การทดลอง มีจำนวนจุดการทดลองทั้งหมด 2,200 จุด ทำการทดลองที่กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าต่างๆ กันและทำการวัดอุณหภูมิในเตาทั้งหมด 24 ครั้ง พบว่าหลังจากหาพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าได้แล้วและทำการคำนวณกลับมาทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กเพื่อทำการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จริง พบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันเป็นส่วนมาก โดยที่มีค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่บวกลบ 7 องศาเซลเซียส คิดเป็นค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 3.2 องศาเซลเซียส ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 3.02 องศาเซลเซียส การที่อุณหภูมิที่ทำนายกับที่วัดได้จริงยังมีความผิดพลาดอยู่นั้นอาจจะเป็นเพราะว่าค่าคงที่ AI ที่กำหนดขึ้นมาคือ ค่ามวลของเหล็กคูณด้วยค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก นั้นในแต่ละครั้งที่ทำการหลอมมีการใส่ส่วนผสมของน้ำเหล็กที่ไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับว่าต้องการหลอมเหล็กไปใช้ทำผลิตภัณฑ์อะไร และนอกจากนี้ในบางครั้งยังมีการเอาน้ำเหล็กที่เหลือจากการเทลงแบบในรอบการหลอมครั้งที่แล้วหรือจากเตาอื่นๆ กลับมาผสมลงในเตาที่กำลังทำการหลอมอีก ทำให้ค่า AI นี้มีค่าไม่แน่นอนในแต่ละรอบที่ทำการหลอม และนอกจากนี้ความชื้นของโครงสร้างเตาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงกำลังงานไฟฟ้าไปเป็นสนามแม่เหล็กและเหนี่ยวนำทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้น ทำให้เกิดปัญหาสัญญาณรบกวนขึ้นอันเนื่องจากการเหนี่ยวนำในบริเวณเตาหลอมนั่นเอง ซึ่งค่าสัญญาณรบกวนนี้จะมีผลกับเครื่องมือวัดที่ใช้งาน ทำให้การทำนายค่าอุณหภูมิในเตาหลอมยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง

บทที่ 4

การประมาณค่าอุณหภูมิ

4.1 วิธีประมาณค่าอุณหภูมิ

การประมาณค่าอุณหภูมิทำได้โดยใช้แบบจำลองทางความร้อนของเตาที่หาออกมาได้ ในบทก่อนหน้านี้ รูปแบบของสมการสมดุลความร้อน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_s = \frac{(P_{in} + 659 \cdot T_{s-1} - 18.4 \cdot M_w \cdot \Delta T_w - 100)}{659} \quad (4.1)$$

จากรูปแบบสมการสมดุลความร้อนข้างต้นเมื่อเราสามารถวัดค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าเป็นกิโลวัตต์, ค่าปริมาณน้ำหล่อเย็นและค่าอุณหภูมิเข้าและออกของน้ำหล่อเย็นเป็นกิโลวัตต์ต่อวินาทีและองศาเซลเซียสตามลำดับ และทราบอุณหภูมิจุดแรก ก็จะสามารถทำการประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กจุดถัดไปได้ การสุ่มค่าวัดในการทดลองใช้เวลา 10 วินาที การทดสอบความแม่นยำในการประมาณค่าอุณหภูมิโดยการทดสอบ 6 ชุดซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 1

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	1,500	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	10	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	1,980	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	120	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

ตารางที่ 4.2 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 2

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	1,800	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	10	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	2,220	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	120	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

ตารางที่ 4.3 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 3

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	2,000	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	10	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	2,220	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	90	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

ตารางที่ 4.4 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 4

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	2,200	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	10	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	2,220	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	90	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

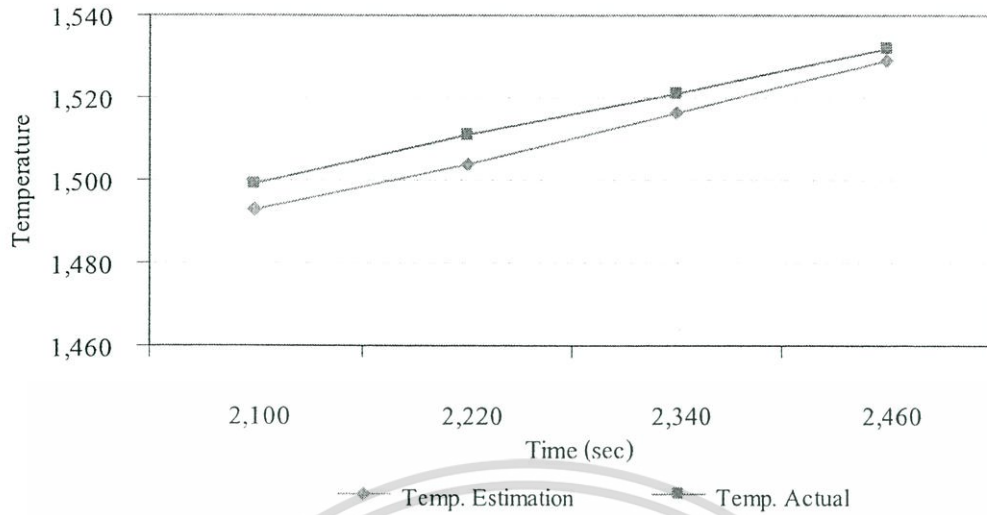
ตารางที่ 4.5 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 5

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	2,400	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	10	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	2,220	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	60	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

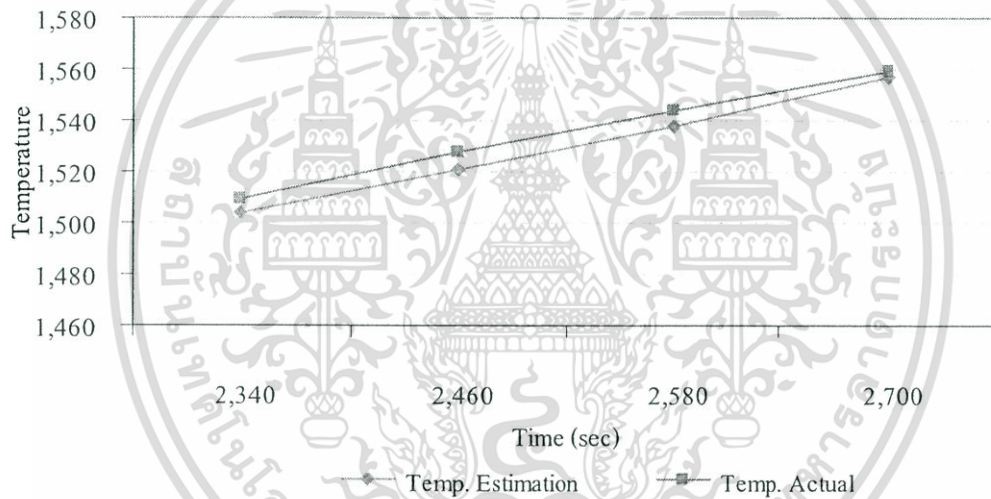
ตารางที่ 4.6 ชุดข้อมูลการทดลองที่ 6

ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า	2,500	kW
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น	8.2	kg/sec
ระยะห่างแต่ละจุดทดลอง	10	sec
จุดวินาทีที่เริ่ม	2,400	sec
ช่วงเวลาในการวัดอุณหภูมิ	60	sec
จำนวนครั้งที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4	times

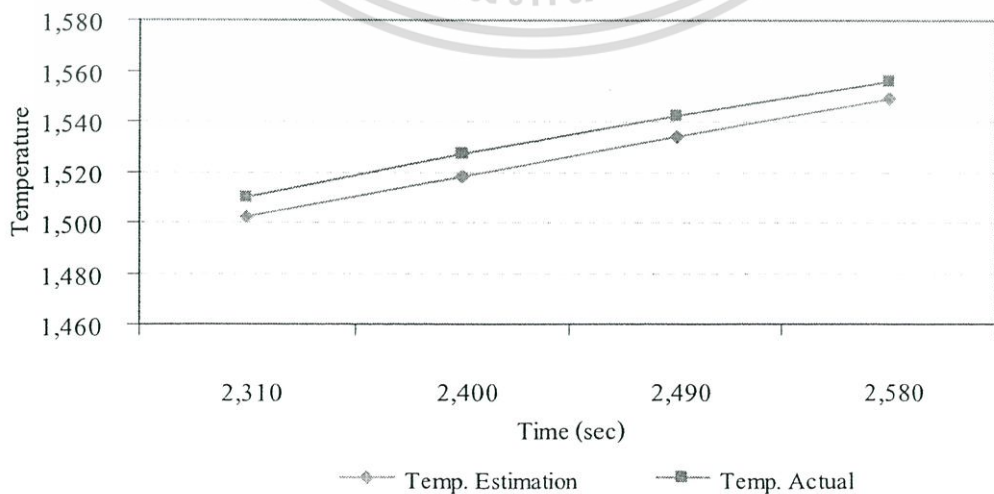
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



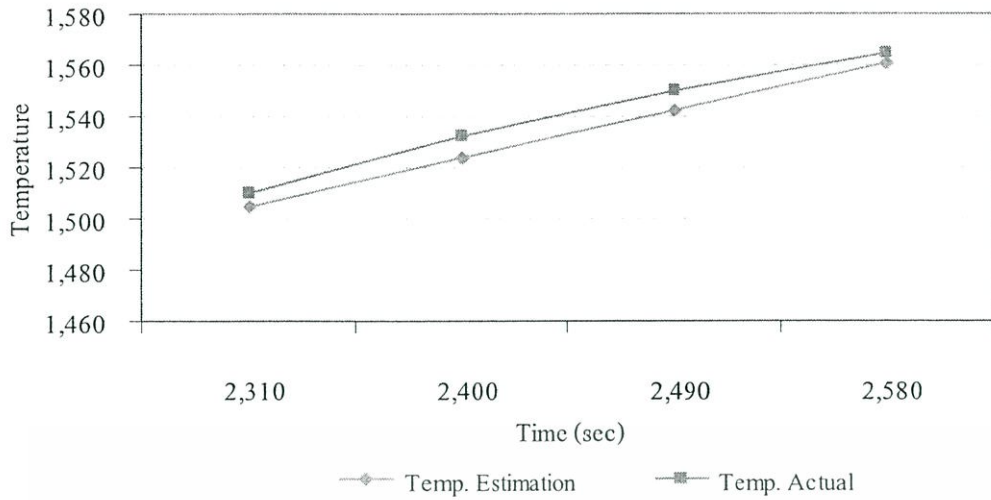
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 1



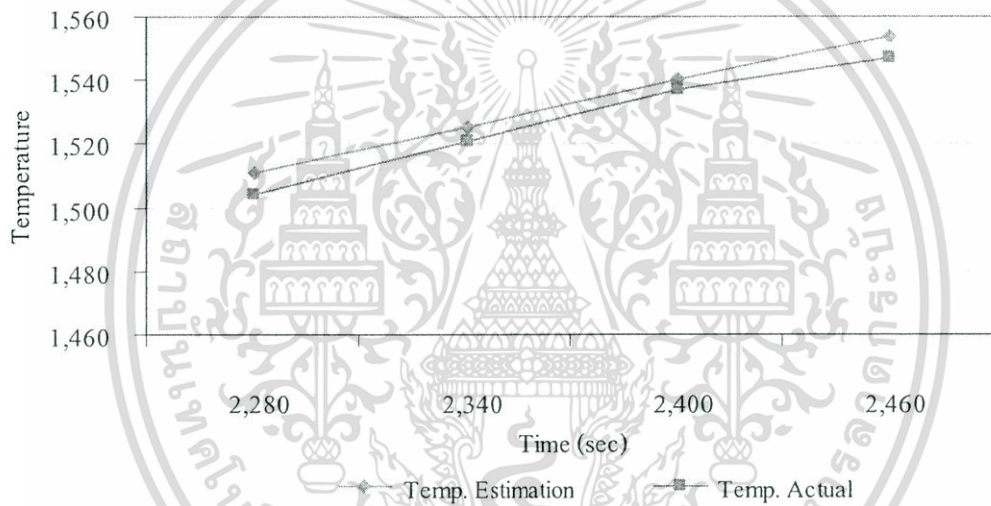
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 2



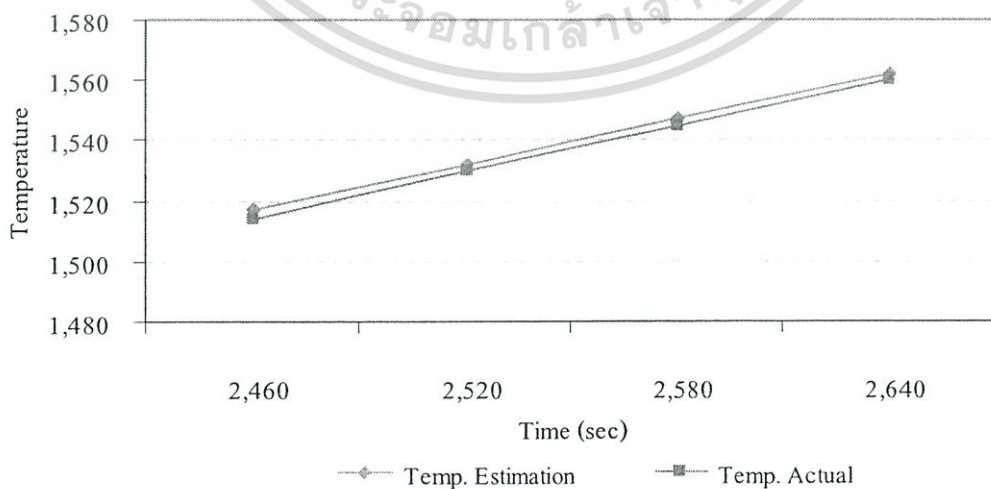
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 3 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 4



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 5



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการทดลองที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 1

จุดทดลองที่	1	2	3	4
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการประมาณ (°C)	1,493	1,504	1,516	1,529
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการวัด (°C)	1,499	1,511	1,521	1,532
ค่าผิดพลาด (°C)	-6	-7	-5	-3
ค่าผิดพลาด (%)	0.40	0.46	0.32	0.19

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 2

จุดทดลองที่	1	2	3	4
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการประมาณ (°C)	1,504	1,521	1,538	1,557
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการวัด (°C)	1,509	1,528	1,544	1,559
ค่าผิดพลาด (°C)	-5	-7	-6	-2
ค่าผิดพลาด (%)	0.33	0.46	0.38	0.12

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 3

จุดทดลองที่	1	2	3	4
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการประมาณ (°C)	1,502	1,518	1,534	1,549
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการวัด (°C)	1,510	1,527	1,542	1,556
ค่าผิดพลาด (°C)	-8	-9	-8	-7
ค่าผิดพลาด (%)	0.53	0.59	0.51	0.45

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 4

จุดทดลองที่	1	2	3	4
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการประมาณ (°C)	1,505	1,524	1,542	1,561
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการวัด (°C)	1,510	1,532	1,550	1,565
ค่าผิดพลาด (°C)	-5	-8	-8	-4
ค่าผิดพลาด (%)	0.33	0.52	0.51	0.25

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 5

จุดทดลองที่	1	2	3	4
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการประมาณ (°C)	1,511	1,525	1,540	1,554
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการวัด (°C)	1,504	1,521	1,537	1,547
ค่าผิดพลาด (°C)	+7	+4	+3	+7
ค่าผิดพลาด (%)	0.46	0.26	0.19	0.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองชุดข้อมูลที่ 6

จุดทดลองที่	1	2	3	4
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการประมาณ (°C)	1,517	1,532	1,547	1,562
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการวัด (°C)	1,514	1,530	1,545	1,560
ค่าผิดพลาด (°C)	+3	+2	+2	+2
ค่าผิดพลาด (%)	0.19	0.13	0.13	0.13

จุดแรกที่วัดค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในรอบการทำงานจะใช้เป็นจุดในการเริ่มประมาณค่า ซึ่งเมื่อพิจารณาทั้ง 6 รอบการทำงาน หรือมีจุดที่เปรียบเทียบความแม่นยำในการวัดทั้งหมด 24 จุด ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะในจุดแรกๆ ที่เริ่มประมาณค่า และในบางรอบการทำงานพบว่าค่าอุณหภูมิที่ทำนายกับค่าที่วัดได้จริง มีค่าใกล้เคียงกันมากในเงื่อนไขของการทำงานจริง (ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ถึงตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.6) พบว่าระบบที่ออกแบบนี้สามารถทำนายอุณหภูมิในเตาหลอมได้ แม่นยำในระดับ บวกลบ 9 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 2.83 องศาเซลเซียส ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 5.15 องศาเซลเซียส และค่าผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่บวกลบ 9 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นไปได้หลายสาเหตุ เช่นค่าอุณหภูมิที่วัดมานั้น จะต้องอาศัยพนักงานในการวัด ซึ่งในการวัดจะต้องจุ่มหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลให้สัมผัสกับน้ำเหล็กโดยตรงซึ่งในการจุ่มวัดอุณหภูมิ บางครั้งหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลอาจจะไปสัมผัสกับสิ่งสกปรก (Slag) ในเตาทำให้ค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กบางค่าอาจผิดพลาดไป และนอกจากนี้สภาพของเตาหลอมของโรงงานซึ่งมีอายุมากแล้ว ประกอบกับสภาพการทำงานของเตาหลอมที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาในรอบของการทำงานทำให้เป็นไปได้ยากที่จะควบคุมสภาวะการทำงานของเตาหลอมให้เหมือนกันทุกๆ รอบของการทำงานได้

4.2 สรุปการประมาณค่าอุณหภูมิ

ในการประมาณค่าอุณหภูมิในเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า นี้ จะเริ่มขึ้นจากการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลกับอุณหภูมิในเตาหลอม ค่าพารามิเตอร์ที่เก็บค่านี้ได้แก่ ค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า-ออก อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้นี้มาคำนวณในสมการสมดุลความร้อนและทำการทดสอบหาแบบจำลองทางความร้อนของเตาที่เหมาะสม และเมื่อได้แบบจำลองทางความร้อนของเตาเรียบร้อยแล้วก็นำแบบจำลองที่ได้นี้มาลองทดสอบแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการประมาณค่าอุณหภูมิในเตาเมื่อมีการใช้งานจริงๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการหาแบบจำลองทางความร้อนของเตานั้น ได้มีการลองนำการทดลองที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์มาประมาณหาค่าอุณหภูมิในเตาอีกที พบว่าค่าอุณหภูมิที่ประมาณได้มีความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.83 องศาเซลเซียส ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 5.15 องศาเซลเซียส โดยมีค่าผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่บวกลบ 9 องศาเซลเซียส

จากการที่ค่าอุณหภูมิที่ประมาณได้กับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จริงมีความผิดพลาดเป็นบางค่าในแต่ละการทดลองนั้น อาจจะพอสรุปได้ดังนี้

1. ค่าคงที่ A1 ที่กำหนดขึ้นมานั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปในบางการทดลองทำให้แบบจำลองทางความร้อนที่ได้มานั้นผิดพลาดไปบ้าง
2. วิธีการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่า นั้น ยังเป็นการใช้วิธีที่ง่ายอยู่ทำให้เมื่อนำมาใช้งานจริงกับเตาหลอมซึ่งมีลักษณะ โครงสร้างและการทำงานที่ซับซ้อน จึงทำให้แบบจำลองที่หามาได้ยังไม่ถูกต้องมากนัก ดังนั้นค่าอุณหภูมิที่ประมาณจึงมีความผิดพลาดอยู่
3. เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด R ที่ใช้วัดอุณหภูมิในเตานั้นอาจเกิดการผิดพลาดขึ้นในระหว่างการวัดอุณหภูมิ ซึ่งอาจจะเป็นเพราะตัวอุปกรณ์หรือผู้ทำการตรวจวัดดังนั้นอาจจะทำให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ผิดพลาดไปและทำให้เมื่อนำค่าที่ได้มาประมาณอุณหภูมิจึงทำให้ค่าที่ได้ผิดพลาดไป

บทที่ 5

การประหยัดพลังงาน

เมื่อรู้วิธีการติดตั้งและใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้แล้วในบทนี้จะกล่าวถึงการนำระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ไปใช้ในการควบคุมการไหลของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้ประหยัดพลังงาน โดยได้แสดงวิธีการควบคุมการหลอมมาทั้งหมด 3 วิธีด้วยกันและเปรียบเทียบกับวิธีการหลอมปัจจุบัน และกล่าวถึงผลจากการนำระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ไปใช้งานจริง โดยจะแสดงอยู่ในรูปค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยผลผลิตซึ่งในการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ นอกจากจะช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าลงแล้วยังช่วยประหยัดจำนวนหัวเทอร์โมคัปเปิลที่หัววัดอุณหภูมิในเตาหลอมของโรงงานลงได้โดยได้ทำการคำนวณเปรียบเทียบกับการใช้งานปัจจุบัน และในหัวข้อสุดท้ายกล่าวถึง ประโยชน์ทางอ้อมของการมีระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ซึ่งจะทำให้สามารถรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเตาซึ่งสามารถนำไปใช้งานและพัฒนาต่อไปได้อีก

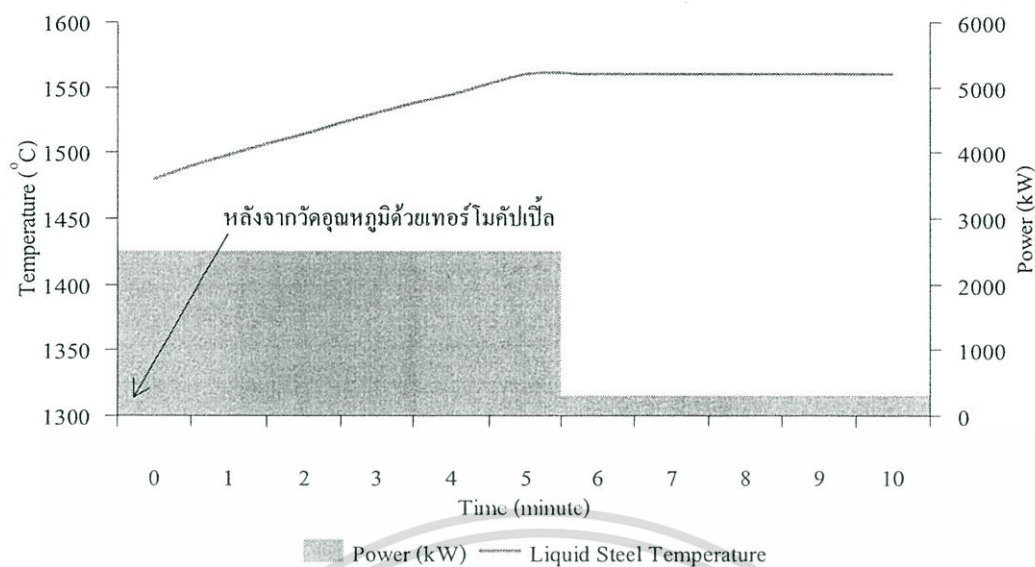
5.1 การควบคุมเตาหลอมให้ประหยัดพลังงาน

จากกระบวนการหลอมเหล็ก โดยใช้เตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าของโรงงานนั้น พบว่าถ้าโรงงานมีเตาหลอมทั้งหมด 3 เตา โดยแต่ละเตาจะหลอมเหล็กให้ได้อุณหภูมิประมาณ 1560 องศาเซลเซียส เมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วก็จะเทน้ำเหล็กใส่ที่เบ้าน้ำเหล็กเพื่อไปเทลงในแบบอีกที แต่เนื่องจากเตาหลอมมีถึง 3 เตา ทำให้บางครั้งเมื่อหลอมได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วยังเทน้ำเหล็กไม่ได้ ต้องรอเตาหลอมอื่นเทน้ำเหล็กให้เสร็จก่อนหรือไม่ก็ส่วนผสมของน้ำเหล็กในเตายังไม่ได้ตามต้องการต้องทำการผสมใหม่ ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมการหลอมให้พอดีกับการเทน้ำเหล็กไปใช้งานได้โดยไม่ต้องเสียเวลารอได้นั้น ก็จะเป็นแนวทางหนึ่งในการควบคุมเตาหลอมให้ประหยัดพลังงาน

การควบคุมเตาหลอมเบื้องต้นที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอวิธีการหลอมมาทั้งหมด 3 วิธีด้วยกัน โดยทั้ง 3 วิธีจะกำหนดให้สภาวะการทำงานและระยะเวลาที่ใช้ในการหลอมเท่ากันหมด แต่วิธีในการควบคุมการหลอมนั้นจะต่างกันและจะเริ่มควบคุมเมื่อเหล็กหลอมเหลวแล้ว และทำการวัดอุณหภูมิโดยหัววัดเทอร์โมคัปเปิล

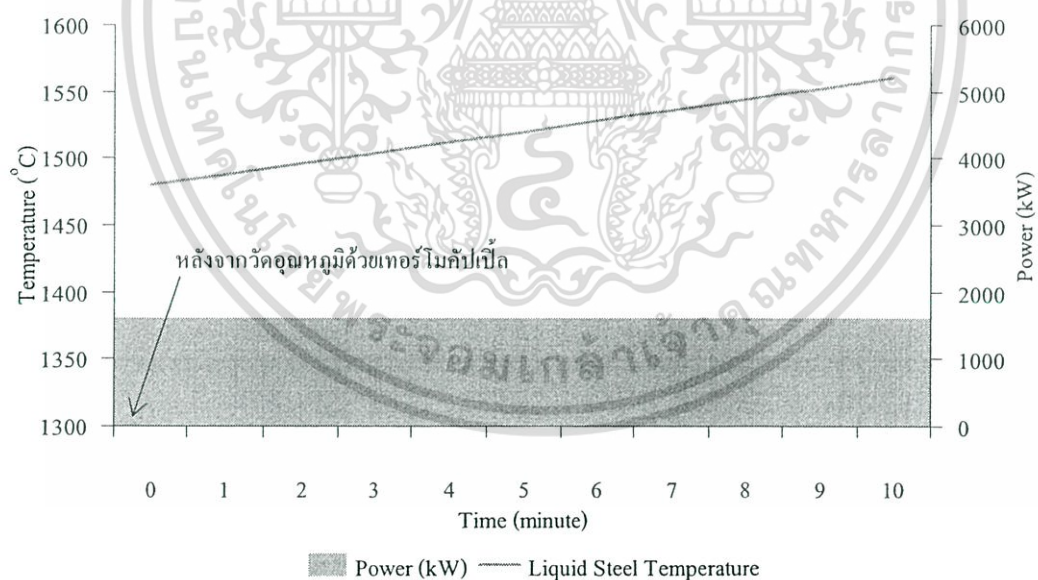
วิธีที่หนึ่ง เมื่อเหล็กหลอมละลายหมดแล้ว ก็ทำการเร่งกำลังไฟฟ้าให้อุณหภูมิขึ้นถึง 1560 องศาเซลเซียสโดยเร็วที่สุด เมื่อได้อุณหภูมิตามที่ต้องการแล้วก็ปรับลดกำลังไฟฟ้าเข้าเตาโดยรักษาให้อุณหภูมิคงที่ไว้ 1560 องศาเซลเซียส (ประมาณ 300 kW) ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเทน้ำเหล็ก (ดังแสดงในรูปที่ 5.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



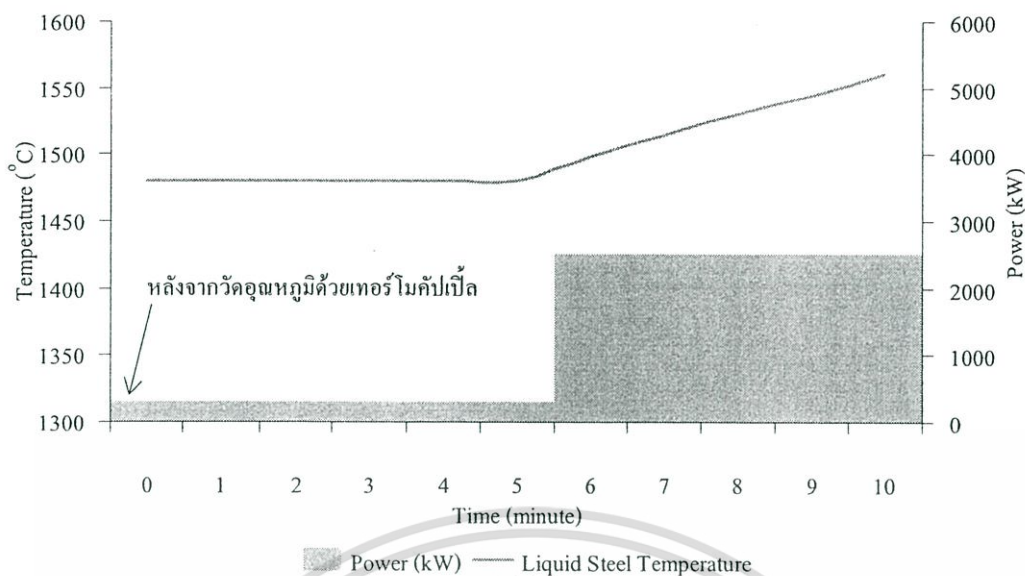
รูปที่ 5.1 การควบคุมเตาหลอมวิธีที่ 1

วิธีที่สอง เมื่อเหล็กหลอมละลายหมดแล้ว ก็ทำการปรับกำลังไฟฟ้าเข้าเตาให้เหล็กในเตาอุณหภูมิเพิ่มถึง 1560 องศาเซลเซียสให้พอดีกับช่วงเวลาที่ใช้ในการหลอม ซึ่งเมื่อหลอมเหล็กจนได้อุณหภูมิ 1560 องศาเซลเซียส ก็จะเป็นช่วงเวลาที่จะเทน้ำเหล็กได้พอดี (ดังแสดงในรูปที่ 5.2)



รูปที่ 5.2 การควบคุมเตาหลอมวิธีที่ 2

วิธีที่สาม เมื่อเหล็กหลอมละลายหมดแล้ว ก็ให้ปรับกำลังไฟฟ้าเข้าเตาให้อุณหภูมิในเตาที่ประมาณ 1480 องศาเซลเซียส (ประมาณ 300 kW) ไปเรื่อยๆ เสร็จแล้วให้เร่งกำลังไฟฟ้าเข้าเตาให้อุณหภูมิในเตาหลอมได้ 1560 องศาเซลเซียส ซึ่งจะพอดีกับช่วงเวลาที่เหลือซึ่งจะทำให้พอดีกับการเทน้ำเหล็กพอดี (ดังแสดงในรูปที่ 5.3) การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 การควบคุมเตาหลอมวิธีที่ 3

จากวิธีการควบคุมเตาหลอมทั้ง 3 วิธี พบว่าในปัจจุบันวิธีการหลอมที่โรงงานใช้อยู่ได้แก่ วิธีที่หนึ่ง ซึ่งถ้าสามารถหลอมเหล็กได้อุณหภูมิ 1560 องศาเซลเซียสตามต้องการแล้วสามารถเท น้ำเหล็กได้ทันที ก็จะเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด แต่ในการทำงานจริงมักไม่เป็นเช่นนั้น เพราะเมื่อหลอมเหล็กได้อุณหภูมิ 1560 องศาเซลเซียสแล้ว ก็ยังต้องรอกระบวนการผลิตให้พร้อม ก่อนหรือไม่ก็ต้องรอให้น้ำเหล็กในเตาอื่นเทให้หมดก่อนหรือถ้าส่วนผสมในเตายังไม่ถูกต้องก็ จำเป็นต้องทำการผสมใหม่ ทำให้ต้องรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 1560 องศาเซลเซียสไปเรื่อยๆ จนกว่าจะ พร้อมเทน้ำเหล็ก

เมื่อเป็นเช่นนี้แล้วจึงต้องหาวิธีที่เหมาะสมมาใช้ในการควบคุมเตาหลอม ซึ่งเมื่อดูกราฟ ทั้งสามกราฟพบว่า พื้นที่ในส่วนที่แรงเงาซึ่งก็คือพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้านั้น ในส่วนของกราฟรูป ที่สามใช้พลังงานน้อยสุด (ดังแสดงในตารางที่ 5.1) และเหมาะสมกับการใช้งานในสภาพการ ทำงานจริงมากที่สุด

ตารางที่ 5.1 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมเหล็กเปรียบเทียบกับค่าใช้จ่ายทั้ง 3 วิธี

วิธีที่ใช้	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kwh)	ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดเมื่อเทียบกับวิธีที่ 1 (บาท)
1	290	-
2	286	+ 10.44
3	272	+ 46.98

ค่าไฟฟ้าคิดที่ 2.61 บาท/kWh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือถ้าสามารถรู้เวลาที่จะเหนื้เหล็กได้แน่นอนแล้วนั้น ก็ให้ปรับแรงกำลังไฟฟ้าให้ หลอมเหล็กให้ได้อุณหภูมิ 1560 องศาเซลเซียสพอดีกับการเหนื้เหล็ก โดยไม่ต้องมาเสียเวลาเปิด ปิดระบบไฟฟ้าเพื่อรักษาอุณหภูมิเหนื้เหล็กที่อุณหภูมิ 1560 องศาเซลเซียส ให้ทำการปรับไฟฟ้า เพื่อรักษาอุณหภูมิที่อุณหภูมิประมาณ 1480 องศาเซลเซียส เพื่อให้รู้เวลาที่เหนื้เหล็กที่แน่นอนซึ่ง จะเสียพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าวิธีที่ 1 เมื่อคิดเป็นเงินเท่ากับ 46.98 บาทและในช่วงนี้ที่รอนี้ก็ สามารถปรับส่วนผสมน้ำเหล็กภายในเตาหลอมให้ถูกต้องได้โดยไม่ต้องมาเสียเวลามาปรับใน ภายหลัง

5.2 ผลการประหยัดพลังงานที่เกิดจากการใช้งานจริง

หลังจากที่ได้ทดลองและทดสอบการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ ซึ่งพบว่า สามารถประมาณค่าอุณหภูมิในเตาหลอมได้แม่นยำ โดยค่าความผิดพลาดอยู่ที่ประมาณบวกลบ 9 องศาเซลเซียสและมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 2.83 องศาเซลเซียส ต่อมาจึงได้นำมาใช้งานกับ การทำงานจริงๆ ของเตาหลอมขนาด 4 ตัน 2,500 กิโลวัตต์ เป็นระยะเวลา 2 เดือน ในช่วงเดือน ตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2551 (รายละเอียดแสดงอยู่ในตารางที่ 5.4 และตารางที่ 5.5) ซึ่ง ผลการประหยัดนี้จะคิดออกมาอยู่ในหน่วยของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อยอดการหลอมที่ทำการ หลอมในเดือนนั้นๆ (kWh/ตันน้ำเหล็ก) และค่าที่ได้นี้จะเปรียบเทียบกับการใช้งานเมื่อเดือน สิงหาคมและเดือนกันยายน พ.ศ.2551 (รายละเอียดแสดงอยู่ในตารางที่ 5.2 และตารางที่ 5.3)

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลการหลอมก่อนการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิในเดือนสิงหาคม 2551

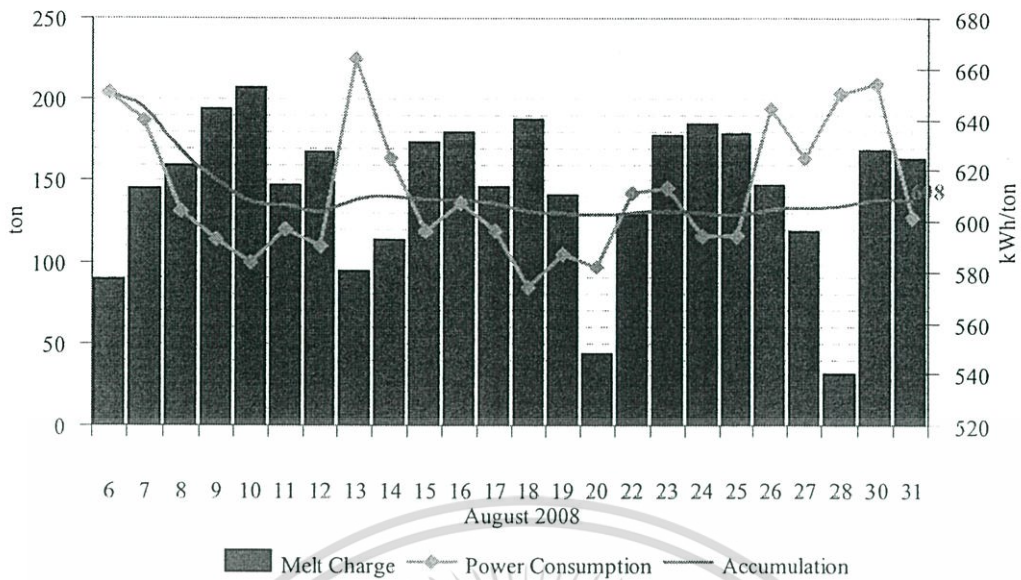
วันที่	ยอดการหลอมน้ำเหล็ก (ตัน)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kwh)	kwh/ตันน้ำเหล็ก
6	89.5	58,264	651
7	145.0	92,800	640
8	159.2	96,157	604
9	194.5	115,339	593
10	206.9	120,830	584
11	147.6	88,117	597
12	167.9	99,061	590
13	94.7	62,881	664
14	113.7	71,063	625
15	173.7	103,525	596
16	180.2	109,381	607
17	146.1	87,076	596
18	187.6	107,682	574
19	140.9	82,708	587
20	43.6	25,375	582
22	129.5	79,125	611
23	178.1	109,175	613
24	185.3	110,068	594
25	179.0	106,326	594
26	147.0	94,668	644
27	119.4	74,625	625
28	31.0	20,150	650
30	169.0	110,526	654
31	164.0	98,564	601
รวม	3,493.4	2,123,486	608

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

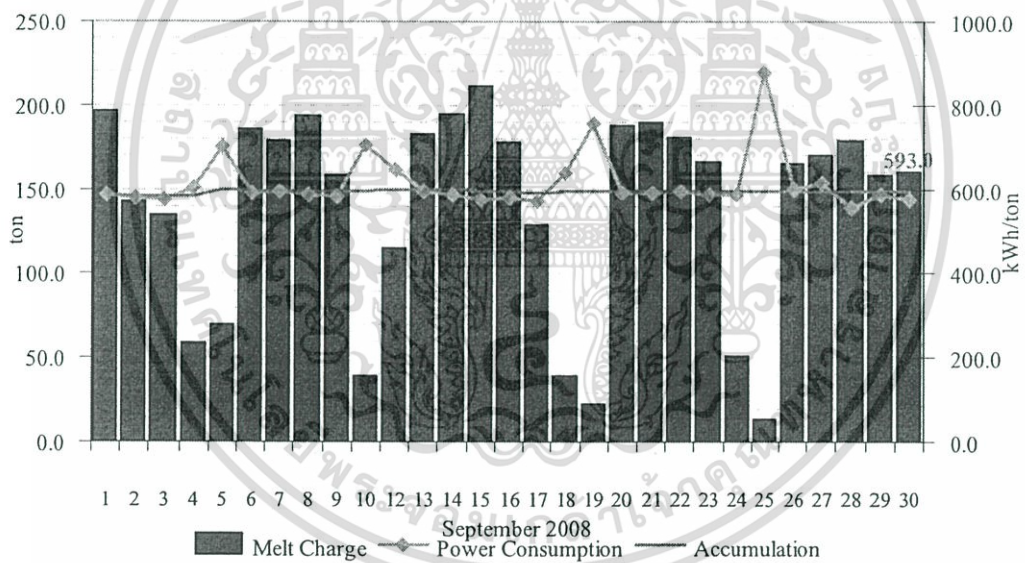
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลการหลอมก่อนการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิในเดือนกันยายน 2551

วันที่	ยอดการหลอมน้ำเหล็ก (ตัน)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kwh)	kWh/ตันน้ำเหล็ก
1	197.3	115,988	587.8
2	142.3	82,356	578.8
3	135.1	77,561	574.0
4	59.0	35,580	602.9
5	69.4	48,504	699.0
6	186.1	110,175	592.0
7	179.3	106,480	593.8
8	193.8	114,010	588.2
9	158.4	92,180	581.9
10	39.2	27,566	703.1
12	114.8	73,983	644.4
13	182.7	108,679	594.8
14	194.4	113,747	585.0
15	212.1	121,902	574.7
16	177.9	102,614	576.8
17	129.1	73,579	569.8
18	39.1	24,989	639.1
19	23.0	17,379	756.6
20	188.2	111,205	590.9
21	189.5	112,259	592.5
22	181.5	107,991	594.8
23	166.7	97,718	586.0
24	50.8	29,830	586.7
25	13.6	11,914	877.4
26	165.2	98,730	597.6
27	170.2	104,382	613.3
28	179.1	99,368	554.9
29	158.3	92,674	585.3
30	160.9	92,651	575.8
รวม	4,057	2,405,994	593.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
 ไม่สามารถแก้ไขที่อื่น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ากับยอดการหลอมในเดือนสิงหาคมปี 2551



รูปที่ 5.5 กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ากับยอดการหลอมในเดือนกันยายนปี 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลการหลอมหลังการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิในเดือนตุลาคม 2551

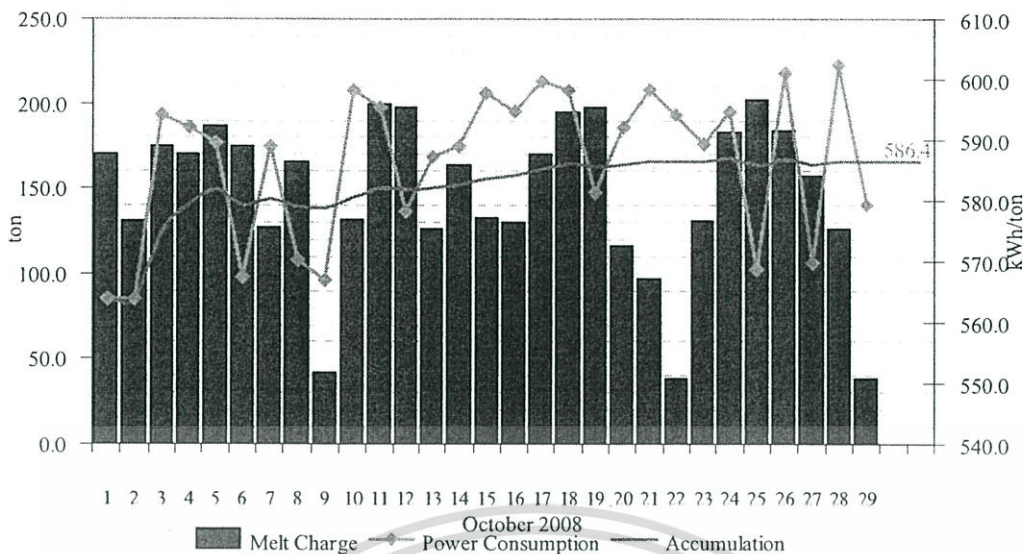
วันที่	ยอดการหลอมน้ำเหล็ก (ตัน)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kwh)	kwh/ตันน้ำเหล็ก
1	170.7	96,228	563.8
2	130.8	73,730	563.7
3	174.8	103,836	594.2
4	170.4	100,912	592.1
5	186.6	109,990	589.4
6	175.0	99,279	567.4
7	127.2	74,952	589.1
8	165.5	94,395	570.2
9	41.9	23,743	566.8
10	131.5	78,641	598.1
11	199.3	118,650	595.4
12	198.1	114,571	578.3
13	126.5	74,273	587.2
14	163.6	96,362	589.0
15	132.9	79,473	597.8
16	130.5	77,588	594.6
17	170.3	102,112	599.7
18	195.2	116,804	598.3
19	198.2	115,199	581.3
20	115.9	68,629	592.1
21	97.2	58,172	598.2
22	38.3	22,753	594.0
23	131.2	77,278	589.2
24	183.5	109,110	594.5
25	202.1	114,906	568.7
26	183.6	110,371	601.0
27	157.2	89,538	569.8
28	126.5	76,225	602.4
29	38.6	22,368	579.3
รวม	4,263	2,500,087	586.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำมาใช้

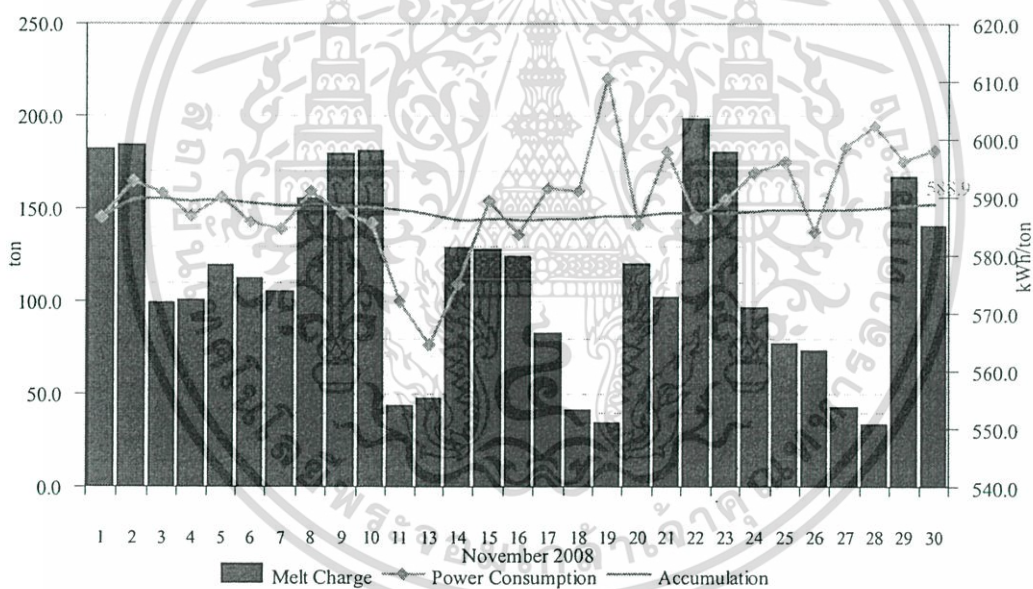
ตารางที่ 5.5 ข้อมูลการหลอมเหล็กการใช้ระบบประมาณค่าอุณหภูมิในเดือนพฤศจิกายน 2551

วันที่	ยอดการหลอมน้ำเหล็ก (ตัน)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	kWh/ตันน้ำเหล็ก
1	181.8	106,626	586.5
2	184.5	109,369	592.7
3	99.5	58,785	590.7
4	100.9	59,170	586.7
5	119.8	70,711	590.1
6	112.4	65,814	585.7
7	105.8	61,850	584.6
8	155.5	91,883	591.0
9	179.8	105,557	587.2
10	181.0	105,980	585.4
11	43.5	24,907	572.0
13	47.7	26,943	564.5
14	129.2	74,314	575.0
15	128.4	75,640	589.2
16	124.6	72,710	583.5
17	82.7	48,912	591.4
18	41.3	24,396	591.1
19	34.6	21,143	610.6
20	120.4	70,465	585.3
21	102.1	61,052	597.8
22	198.5	116,415	586.6
23	180.8	106,585	589.5
24	96.7	57,435	594.2
25	77.3	46,064	596.0
26	73.3	42,810	584.0
27	42.8	25,622	598.6
28	33.8	20,336	602.2
29	167.0	99,553	596.2
30	140.6	84,100	598.0
รวม	3,286	1,935,146	588.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่สามารถได้ๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ากับยอดการหลอมในเดือนตุลาคมปี 2551



รูปที่ 5.7 กราฟเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ากับยอดการหลอมในเดือนพฤศจิกายนปี 2551

ตารางที่ 5.6 สรุปข้อมูลทั้งก่อนและหลังการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิ

เดือน	ยอดการหลอมน้ำเหล็ก (ตัน)	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kwh)	kWh/ตันน้ำเหล็ก
ส.ค-ก.ย	7,550	4,529,480	600.0
ต.ค-พย	7,549	4,435,233	587.5

จากตารางที่ 5.6 ข้อมูลการใช้พลังงานในช่วงที่ทำการหลอมโดยมิใช่การประมาณค่าอุณหภูมิเข้าไปเป็นระยะเวลา 2 เดือนนั้นพบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อยอดการหลอมเท่ากับไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

587.5 kWh/ตัน ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเดือนสิงหาคมถึงเดือนกันยายนปี 2551 จะเห็นว่า ค่าที่ได้นี้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยทั้งสองเดือนนั้นอยู่ที่ 600 kWh/ตัน พบว่ามีค่าลดลง 12.5 kWh/ตัน เมื่อคิดค่าไฟฟ้าที่ 2.61 บาท/kWh จะประหยัดพลังงานลงเท่ากับ 32.625 บาท/ตัน เมื่อคิดยอดการหลอมทั้งสองเดือนคือ 7,549 ตัน พบว่าจะประหยัดพลังงานไฟฟ้าลงเท่ากับ 94,362 kWh คิดเป็นเงิน 246,286 บาท

5.3 ผลการประหยัดการใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิล

จากการทดลองใช้งานจริงที่โรงงานนอกจากจะดูผลของการประหยัดพลังงานแล้ว ยังได้ทำการตรวจสอบการใช้งานของหัววัดเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้วัดอุณหภูมิในเตาด้วย จากเมื่อก่อนใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิลตรวจสอบอุณหภูมิในเตาทั้งหมด 2 ครั้งต่อหนึ่งการหลอม คือครั้งแรกก่อนเริ่มเช็คสภาพเคมีในเตา ครั้งที่สองก่อนเทน้ำเหล็ก โดยที่ 1 เตาสามารถใช้ได้ 1 หัว เมื่อนำวิธีการประมาณค่าอุณหภูมินี้ทำให้ใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิลตรวจสอบอุณหภูมิในเตาแค่ 1 ครั้งต่อหนึ่งการหลอมจะวัดตอนที่ก่อนเริ่มเช็คสภาพเคมีในเตา ซึ่งเป็นการประหยัดหัววัดเทอร์โมคัปเปิลลง 2 เท่า โดยที่หัววัดเทอร์โมคัปเปิล 1 หัว วัดได้ 2 เตา

ตารางที่ 5.7 ข้อมูลเปรียบเทียบผลการประหยัดการใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิล

เดือน	จำนวนครั้งในการหลอม	จำนวนเทอร์โมคัปเปิล (หัว)	ค่าใช้จ่ายในการซื้อเทอร์โมคัปเปิล (บาท)
ส.ค-ก.ย	1,772	1,772	60,248
ต.ค-พ.ย	1,778	889	30,226

จากตารางที่ 5.7 ข้อมูลการหลอมของเตาหลอมขนาด 4 ตัน ในเดือนสิงหาคมถึงเดือนกันยายน ซึ่งเป็นช่วงก่อนการใช้วิธีการประมาณค่าอุณหภูมิขุดในการหลอมทั้งหมด 1,772 ครั้ง ต้องใช้หัววัดเทอร์โมคัปเปิลทั้งหมด 1,772 หัว หัววัดเทอร์โมคัปเปิล 1 หัว ราคาหัวละ 34 บาท โดยมีค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 60,248 บาท

แต่เมื่อนำวิธีการประมาณค่าอุณหภูมิทดลองไปใช้ในเดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน ซึ่งทั้งสองเดือนมีขุดในการหลอมทั้งหมด 1,778 ครั้ง ถ้าเป็นวิธีการวัดแบบเก่าจะต้องใช้หัววัดถึง 1,778 หัว คิดเป็นเงิน 60,452 บาท แต่เมื่อใช้วิธีการประมาณค่าอุณหภูมิสามารถที่จะประหยัดหัววัดเหลือแค่ 889 หัว คิดเป็นเงิน 30,226 บาท โดยที่สามารถประหยัดเงินได้ถึง 30,226 บาท คิดเป็น 50%

เมื่อนำผลการประหยัดจากการควบคุมอุณหภูมิในเตาหลอมและค่าหัววัดเทอร์โมคัปเปิลที่ประหยัดได้มารวมกันพบว่าจะประหยัดเงินได้ทั้งหมดรวม 276,512 บาท ในช่วงสองเดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทฯ ซึ่งสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทฯ หากฝ่าฝืนจะดำเนินการตามกฎหมายที่เกี่ยวข้องต่อไป

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยทางอ้อม โดยประมาณค่าอุณหภูมิจากค่ากำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเข้า-ออก และอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และทำการหาแบบจำลองความร้อนสูญเสียของเตาจากสมการสมดุลความร้อน จากการออกแบบวิธีการสำหรับทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่องนั้น พบว่าวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะในเตาหลอมได้อย่างต่อเนื่องและมีความผิดพลาด อยู่ที่บวกลบ 9 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 2.83 องศาเซลเซียส และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 5.15 องศาเซลเซียส ซึ่งประโยชน์ของการที่สามารถทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่องนี้ทำให้สามารถควบคุมกำลังงานไฟฟ้าเข้าเตาหลอมไม่ให้หลอมเกินอุณหภูมิ 1560 องศาเซลเซียส ตามที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้สูญเสียพลังงาน โดยเปล่าประโยชน์ และผลของการประมาณค่าอุณหภูมินี้ทำให้สามารถออกแบบวิธีควบคุมเตาหลอมเพื่อให้ประหยัดพลังงานที่สุด ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายลง 32.635 บาทต่อหนึ่งรอบของการหลอม เมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการหลอมของโรงงานในปัจจุบัน นอกจากนี้ค่าที่วัดต่าง ๆ นี้ วัดได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับน้ำเหล็กอุณหภูมิสูงทำให้ระบบการวัดมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และสามารถประหยัดการใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด R ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาได้ ซึ่งในระบบควบคุมนี้ในแต่ละการหลอมจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลนี้วัดอุณหภูมิน้ำเหล็กเพียงครั้งเดียว หลังจากนั้นระบบจะทำการคำนวณและแสดงค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กออกมา ซึ่งเมื่อทดลองใช้งานจริงจะลดการใช้หัวเทอร์โมคัปเปิ้ลลง 2 เท่า คิดเป็นเงินประมาณ 30,226 บาท ในรอบสองเดือน

เมื่อมีการนำระบบประมาณค่าอุณหภูมิไปใช้งานจริง พบว่าการใช้พลังงานในช่วงที่ทำการหลอมระยะเวลา 2 เดือนนั้นพบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อยอดการหลอมเท่ากับ 587.5 kWh/ตัน ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเดือนสิงหาคมถึงเดือนกันยายนปี 2551 จะเห็นว่า ค่าที่ได้นี้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยทั้งสองเดือนนั้นอยู่ที่ 600 kWh/ตัน พบว่ามีค่าลดลง 12.5 kWh/ตัน เมื่อคิดค่าไฟฟ้าที่ 2.61 บาท/kWh จะประหยัดพลังงานลงเท่ากับ 32.625 บาท/ตัน เมื่อคิดยอดการหลอมทั้งสองเดือนคือ 7,549 ตัน พบว่าจะประหยัดพลังงานไฟฟ้าลงเท่ากับ 94,362 kWh คิดเป็นเงิน 246,286 บาท

วิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เป็นเทคนิคหนึ่งเท่านั้นที่ช่วยในการประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมซึ่งมีการศึกษาการหาแบบจำลองทางความร้อน โดยใช้วิธีอื่นๆเพื่อที่จะสามารถทำนายอุณหภูมิในเตาหลอมได้แม่นยำกว่านี้

เนื่องจากการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิที่ออกแบบนี้ยังเป็นการใช้งานแบบที่ไม่อัตโนมัติ ดังนั้นควรทำการพัฒนาและออกแบบการใช้งานให้เป็นแบบอัตโนมัติต่อไปในอนาคต เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Drzewiecki T.M., Phillippi R.M. and Paras C.E. Fluidics, "A New Potential for Energy Conservation by Continuous High Temperature Monitoring and Control", Heat Transfer in Energy Conservation Nov, 1977, pp.127-134.
- [2] Elliott R., "Induction melting", Cast Iron Technology, 1998, pp.58-63.
- [3] "The Utilization of The Electric Heating Installation Efficiency of The Energy Japan Induction Heating", The Energy Conservation Center Japan, 1990, pp.1-33.
- [4] Sun Y.G., Wang D.X., Tao B.S., Yan T., Shi Y., Fang S.B. and Wang Y.H., "An Intelligent Ladle Furnace Control System", Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation, 2000, pp.330-334.
- [5] Edward Wilson, Michael Kan, Anjan Mirle, "Intelligent Technologies for Electric Arc Furnace Optimization", Neural Applications Corporation, 2000, pp.1-6.
- [6] "Induction Heating System Topology Review", Fairchild Semiconductor, July 2000, pp.1-28.
- [7] K.C.Bala, "Design Analysis of an Electric Induction Furnace for Melting Aluminum Scrap", Mechanical Engineering Department, Federal University of Technology Minna, Niger State, Nigeria, Oct 2005, pp.1-7.
- [8] Natasha GUPTA, Sanjay CHANDRA, "Temperature Prediction Model for Controlling Casting Superheat Temperature", ISIJ International, Vol. 44 (2004), No. 9, pp. 1517-1526
- [9] C.K.Jotshi, D.Y .Goswami, J.F.Klausner, C.K.Hsieh, M.Leung, H.Li', S.Malaka and F.Colacino, "Heat Transfer Characteristics of a High Temperature Sensible Heat Storage Water Heater Using Cast Iron as a Storage Material", Department of Mechanical Engineering, University of Florida, Gainesville, FL, 1996, pp. 2099-2103
- [10] Huixin Tian, Zhizhong Mao, Shu Wang and Kun Li, "Application of Genetic Algorithm Combined with BP Neural Network in Soft Sensor of Molten Steel Temperature", Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, June 21 - 23, 2006, Dalian, China, pp. 7742-7745
- [11] Cheng Man, Yuan Hongbo, Shao limin and Gao Liai, "Design of Temperature Measurement System Based On Intelligent Technology", The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI'2007, pp. 853-856
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

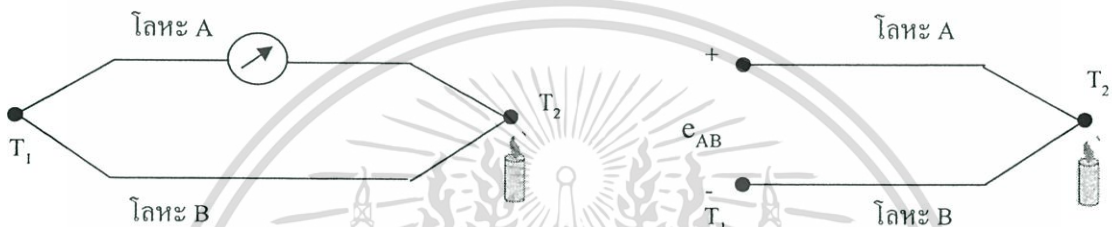


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

1. หลักการของเทอร์โมคัปเปิล

ในปี ค.ศ. 1821 โทมัส ซีเบ็ค (Thomus Seebeck) นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันได้ทำการทดลองและพบว่าเมื่อทำการเชื่อมปลายโลหะ 2 เส้นที่เป็นโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกัน ถ้าอุณหภูมิที่ปลายทั้งสองด้านไม่เท่ากันจะเกิดกระแสไหลในโลหะทั้ง 2 เส้น นั้นแสดงว่าถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออกแล้วนำโวลต์มิเตอร์ไปวัด จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างโลหะ 2 เส้นค่าหนึ่ง (ค่านี้มีปริมาณน้อยหน่วยเป็น mV) เรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ว่า Seebeck Voltage



รูปที่ 1 แสดง Seebeck Voltage

ปริมาณของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะแปรผัน โดยตรงกับผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดต่อทั้งสองโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$e_{AB} = a\Delta T$$

e_{AB} : Seebeck Voltage

a : ค่าสัมประสิทธิ์ของ Seebeck มีหน่วยเป็น Volt/K

ΔT : ผลต่างอุณหภูมิของปลายจุดต่อทั้งสอง

2. เทอร์โมคัปเปิล แบบมาตรฐาน

เทอร์โมคัปเปิลมีหลาย Type ให้เลือก แล้วแต่ย่านอุณหภูมิและลักษณะการใช้งาน โดยความแตกต่างของแต่ละ Type นี้ เกิดจากการเลือกใช้คู่ของวัสดุ (Element) ของโลหะ ที่นำโลหะชนิดต่าง ๆ กันมาจับคู่เชื่อมเข้าด้วยกัน จะทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลที่ได้แตกต่างกันไป นอกจากนี้ ได้มีการทดลองผสมโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกัน เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของโลหะเดิมให้ดีขึ้น หรือเพื่อใช้แทนโลหะบางชนิดที่ใช้ทำอยู่เดิม เช่น แพลตินัม เนื่องจากมีราคาสูง ตัวอย่างโลหะผสมที่เกิดขึ้น เช่น โครเมล (Cromel) คือ โลหะผสมของ นิกเกิล 90% และ โครเมียม 10% , อลูเมล (Alumel) คือ โลหะผสมของ นิกเกิล 95% อลูมิเนียม 2% แมงกานีส 2% และ ซิลิคอน 1% ,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
คอนสแตนแตน (Constantan) คือ โลหะผสมของ ทองแดง 60% และ นิกเกิล 40% เป็นต้น
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานเทอร์โมคัปเปิ้ล ควรเลือกใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับงานนั้น ๆ โดยสิ่งที่ควรพิจารณามีหลายข้อ เช่น ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน, ราคา, ความกักร้อนของสารที่เทอร์โมคัปเปิ้ลสัมผัส, ต้องใช้ Thermowell หรือไม่, ลักษณะบรรยากาศที่เป็น Oxidizing, Reducing, Inert หรือ Vacuum เป็นต้น

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบมาตรฐาน Type ต่าง ๆ

Type	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ (mV)
		°C	°F	
B	แพลทินัม -30% โรเดียม แพลทินัม - 6% โรเดียม	0 ถึง 1820	32 ถึง 3310	0 ถึง 13.814
R	แพลทินัม -13% โรเดียม แพลทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.226 ถึง 21.108
S	แพลทินัม -10% โรเดียม แพลทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.236 ถึง 18.698
J	เหล็ก/คอนสแตนแตน	-210 ถึง 760	-350 ถึง 1400	-8.096 ถึง 42.922
K	โครเมล/อะลูเมล	-270 ถึง 1372	-450 ถึง 2500	-6.458 ถึง 54.875
T	ทองแดง/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 400	-450 ถึง 750	-6.258 ถึง 20.869
E	โครเมล/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 1000	-450 ถึง 1830	-9.835 ถึง 76.358

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 แสดงสภาวะแวดล้อมในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลโดยไม่ต้องใช้ Protecting Tube

ความเหมาะสมในการใช้งาน							
Type	บรรยากาศ Oxidizing	บรรยากาศ Reducing	บรรยากาศ Inert	Vacuum	บรรยากาศ Sulferous	อุณหภูมิ < 0°C	มีไอ โลหะ
B	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
R	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
S	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ไม่ได้
J	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้
K	ได้*	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
T#	ได้	ได้	ได้	ได้	ไม่ได้	ได้	ได้
E	ได้	ไม่ได้	ได้	ไม่ได้	ไม่ได้	ได้	ได้

* ใช้งานได้ดีกว่าแบบ E, J และ T เมื่ออุณหภูมิ > 550 °C

โดยเฉพาะกับอุณหภูมิ < 0 °C

Oxidizing : กระบวนการทางเคมีที่ดึงออกซิเจนจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารนั้น

Reducing : กระบวนการทางเคมีที่ออกซิเจนถูกดึงออกจากสารนั้นเพื่อ去做ปฏิกิริยากับสาร
ภายนอก

Vacuum : ค่าความดันที่ต่ำกว่าบรรยากาศจนถึงสภาวะสุญญากาศ

Inert : สภาวะเฉื่อยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาเคมี

3. ส่วนประกอบของเทอร์โมคัปเปิล

3.1 ตัวเทอร์โมคัปเปิล

การเชื่อมหัวเทอร์โมคัปเปิล ที่ด้าน T₁ มีความสำคัญมาก ต้องเชื่อมให้ถูกต้องตามหลักการ เพื่อให้ได้การวัดแม่นยำ และมีอายุการใช้งานยาว การเชื่อมหัวเทอร์โมคัปเปิล มีการแบ่งตามขนาดของลวดดังนี้

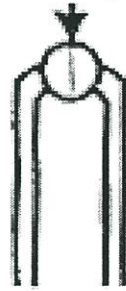
1. ลวดโคที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดตั้งแต่ประมาณ 2 Sq.mm. ขึ้น ไป ใช้เครื่องเชื่อมแบบใช้มือธรรมดาโดยมีก๊าซอาร์กอนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อยไม่ทำ ปฏิกิริยาเคมีกับสารโคชนิดปกคลุมบริเวณเชื่อมเพื่อไม่ให้เกิด Oxide ขึ้นตรงรอยต่อของลวด เรียกว่า การเชื่อมแบบ Butt ซึ่งง่ายกว่าการเชื่อมลวดขนาดเล็ก ดังรูปข้างล่าง
- เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันฯ ใช้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยเชื่อมไม่เกิดลูกบอล



Butt Welding

รอยเชื่อมเกิดลูกบอล



Bead Welding

รูปที่ 2 รอยเชื่อมแบบ Butt และ Bead

2. ลวดที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่า 2 Sq.mm. การเชื่อมด้วยมือจะมี Human Error (ความผิดพลาดจากคนทำ) ได้มาก เพราะขึ้นอยู่กับทักษะและสมาธิ ซึ่งต้องผ่านการฝึกฝนมาอย่างดี จึงควรใช้เครื่องจักรอัตโนมัติเชื่อม เพื่อให้เกิดรอยต่อที่สนิท, สมมาตร และ ไม่มีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นได้ การเชื่อมลวดขนาดเล็ก เรียกว่า การเชื่อมแบบ Bead Welding ซึ่งเครื่องจักรอัตโนมัติจะเชื่อมให้เกิดรอยต่อที่เป็นลูกบอลครึ่งลูก 2 ชิ้น เชื่อมต่อกันสนิทตลอดรอยต่อ ดังรูปข้างล่าง



รอยเชื่อมโดยใช้เครื่องจักร



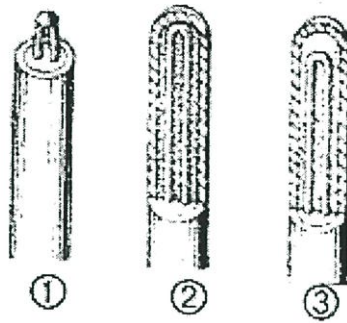
รอยเชื่อมโดยใช้มือ

รูปที่ 3 รอยเชื่อมที่เกิดจากการเชื่อมที่ต่างกัน

3.2 Metal Sheath

เพื่อให้เทอร์โมคัปเปิ้ลมีความเรียบร้อยแข็งแรง พร้อมในการใช้งาน คู่สายของเทอร์โมคัปเปิ้ลจะประกอบอยู่ใน Metal Sheath โดยลักษณะการประกอบตัวเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับ Metal Sheath มี 3 วิธี ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 ลักษณะการประกอบตัวเทอร์โมคัปเปิ้ลเข้ากับ Metal Sheath

1. แบบเปลือย (Exposed Junction) ให้ผลการวัดที่ไวที่สุด (Minimum Response Time) จุดต่อสำหรับวัดสัมผัสกับของเหลว (Fluid) ที่ต้องการวัดโดยตรง ผลเสียของแบบเปลือยคือ ชำรุดเสียหายง่ายและอายุการใช้งานสั้น ไม่เหมาะสำหรับงานความดันสูงหรือ Fluid ที่มีการกลั่นตัว

2. แบบ Grounded Junction สายทั้งคู่ของเทอร์โมคัปเปิ้ลที่เชื่อมติดกัน จะถูกเชื่อมต่อกับส่วนปลายท่อโลหะของ Metal Sheath อีกที่หนึ่ง สามารถใช้ร่วมกับ Fluid ที่เป็นสารกัดกร่อน ให้ผลการตอบสนองต่ออุณหภูมิไวกว่าแบบ Ungrounded Junction แต่มีข้อเสียคือ ถ้ามีกระแสไฟรั่วจากอุปกรณ์อื่นมาที่ Metal Sheath จะทำให้ค่าวัดอุณหภูมิผิดพลาดได้

3. แบบ Ungrounded Junction ใช้ร่วมกับ Fluid ที่เป็นสารกัดกร่อน มีอายุการใช้งานยืนยาวที่สุด แต่มีข้อเสียคือ ให้ผลการวัดช้า เหมาะกับงานที่อุณหภูมิไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง ในอุตสาหกรรมใช้แบบนี้เกือบทั้งหมด

สำหรับ Metal Sheath ที่เป็น Ceramic นั้นมักจะใช้ในกรณีที่อุณหภูมิใช้งานสูง เช่น 800 °C ขึ้นไป หรือในบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนสูง ซีทเทอร์โมคัปเปิ้ล (Sheath Thermocouple) คือ เทอร์โมคัปเปิ้ลที่ตัว Metal Sheath ผลิตสำเร็จรูปมาพร้อมกับตัวสายเทอร์โมคัปเปิ้ลเลย จึงทนอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบธรรมดา มาก เพราะฉนวนไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างลวดเทอร์โมคัปเปิ้ลกับ Metal Sheath จะถูกบีบอัดแน่นกว่าปกติหลายเท่า ท่อ Metal Sheath มักทำจากโลหะเหนียวและยืดหยุ่น สามารถดัดท่อองได้ตามความเหมาะสมกับงาน

3.3 ฉนวนของเทอร์โมคัปเปิ้ล

เป็นฉนวนที่ใช้กั้นระหว่างตัวเทอร์โมคัปเปิ้ล กับ Metal Sheath ส่วนใหญ่จะเป็นสารประเภทแมกนีเซียมออกไซด์, อะลูมิเนียมออกไซด์ หรือเบอริลเลียมออกไซด์

Thermowell

เป็นอุปกรณ์เสริม (Accessory) ใช้ป้องกันไม่ให้เทอร์โมคัปเปิ้ลสัมผัสกับสารที่ต้องการวัดอุณหภูมิโดยตรง เช่น สารที่กัดกร่อน, มีความดันสูง หรือในบางกรณีที่ต้องการลดตัวเทอร์โมคัปเปิ้ล ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมคัมป์เปิดเพื่อซ่อมบำรุง โดยไม่รบกวนการทำงานของระบบ จำเป็นต้องใช้ Thermowell เป็นตัวกลางด้วยเช่นกัน

Extension Wire

คือ สายที่ใช้ในการเชื่อมต่อ หรือต่อเพิ่มจากตัวเทอร์โมคัมป์เปิดที่มีอยู่แล้ว ในกรณีจุดที่วัดอุณหภูมิและจุดที่ต้องการรับสัญญาณจากเทอร์โมคัมป์เปิดอยู่ห่างกัน มี 2 แบบ คือ แบบที่ทำจากสารประเภทเดียวกับเทอร์โมคัมป์เปิด (เช่น Type E, J, K, T) และแบบที่ทำจากโลหะต่างชนิดกับเทอร์โมคัมป์เปิด (เช่น Type R, S, B) เนื่องจาก วัสดุที่ใช้ทำสาย คือ Platinum มีราคาแพง

4. การเลือกเทอร์โมคัมป์เปิด

เทอร์โมคัมป์เปิด คือ โลหะ 2 ชนิดต่างกันที่นำมาเชื่อมปลายเข้าด้วยกัน ที่ด้านหนึ่งซึ่งเป็นด้านที่ใช้วัดอุณหภูมิ ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์ใช้งานเช่น เครื่องควบคุมอุณหภูมิ, เครื่องบันทึกอุณหภูมิ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งานได้ นอกจากขึ้นอยู่กับชนิดของเทอร์โมคัมป์เปิดแล้วยังขึ้นอยู่กับชนิดของปลอก (Protecting Tube) และขนาดของลวดเทอร์โมคัมป์เปิดที่ใช้ด้วย

ตารางที่ 3 ชนิดของปลอก (Protecting Tube)

ชนิดของปลอก	คุณสมบัติ	อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (°C)
SUS304 เส้นผ่านศูนย์กลาง 5,6 มม.	ใช้งานทั่วไปกับอากาศ, ของเหลวหรือของแข็ง	600
SUS304 เส้นผ่านศูนย์กลาง 9.5,12.7 มม.		800
SUS304 เส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มม.		1000
SUS316	ใช้งานทั่วไปกับอากาศ, ของเหลวที่กัดกร่อน	เหมือน SUS304
เซรามิค Pythagoras	ใช้ในเตาหลอม	1400
เซรามิค Alsint 99.7		1700
Sheath Thermocouple	งานทั่วไป, สารกัดกร่อน	1200
Inconel 600	เตาเผาขยะ, ทนการกระแทก	1200
กราไฟต์	ใช้ในเตาหลอม	1000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. Anuwat Pansuwan, Krit Smerpitak, Prapart Ukakimaparn, "Temperature Estimation of Liquid Steel in Induction Furnace," International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009 (IMECS'2009), pp. 1326-1330, Kowloon, Hong Kong, March 18-20, 2009.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lecture Notes in Engineering and Computer Science

IMECS 2009

International MultiConference of
**Engineers and Computer
 Scientists 2009**

Volume II

Hong Kong
 18-20 March, 2009

S. I. Ao
 Oscar Castillo
 Craig Douglas
 David Dagan Feng
 Jeong-A Lee (Eds.)

IA ENG

International Association of Engineers

ISBN 978-988-17012-7-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Temperature Estimation of Liquid Steel in Induction Furnace

Anuwat Pansuwan, Krit Smerpitak and Prapart Ukakimapan

Abstract—This article presents the indirect measures of temperature by measuring the energy put into the furnace, temperature and flow rate of cooling water and temperature at the outer wall lining of the induction furnace in order to estimate the temperature of the liquid steel in the furnace. The technique for estimating the temperature relies on the consideration of the heat balance equation of the furnace and the use of several parameters for the furnace during the processes in order to estimate the losses of heat from the furnace in order to calculate the heat balance equation. From this method, we can estimate the temperature of liquid steel in the induction furnace accurately.

Index Terms—Induction Furnace, Heat Balance, Heat Loss, Latent heat, Heat Model.

I. INTRODUCTION

This research relates to the measure of the liquid steel temperature in the indirect electric induction furnace and the design of heat balance equation with the objective to increase the efficiency for energy saving and quality of liquid steel by consistently controlling the melting process. The important problem of the melting process is that we cannot measure the temperature of the liquid steel temperature continuously since the direct measure of temperature by thermocouple has some restrictions in that the measure of temperature cannot be performed continuously since the liquid steel has high temperature of 1560 degree Celsius and there are some mixed substances in the liquid steel. The life span of the temperature meter is short if putting it in the liquid steel for a long time. The inability to continuously measure the temperature leads to the inefficiency of the control of temperature of liquid steel during the melting process so the energy and the quality of liquid steel are loss.

In order to develop the melting process, it is necessary to realize the temperature of liquid steel and from the restrictions of the direct measure of temperature, we design the methods for measuring the temperature of liquid steel. This methods presented depend on the estimation of the liquid steel temperature from the measure of energy put into the furnace, the temperature, and flow rate of the cooling

water system and the temperature at the outer wall lining of the furnace, and we conduct the experiment to estimate the loss heat during processes. Then, such values are used to estimate the temperature of liquid steel by using the heat balance equation.

II. HEAT MODEL

In order to find the heat model of the furnace, we use the heat balance equation of the furnace for consideration. The pattern of heat balance equation is as follows.

$$\text{Heat input} = \text{Heat output} + \text{Heat loss} \quad (1)$$

Energy	Equation
Heat Input	P_m
Heat Given to Steel	$Q_s = \frac{m_s \cdot L}{\Delta t} + \frac{m_s \cdot C_{ps} \cdot \Delta T_s}{\Delta t}$ (2)
Heat Loss From Electricity	$Q_T = 4 \cdot I_{\Delta T}^2 \cdot R_{EL}$ (3)
Heat Loss during the Cooling Water Process	$Q_w = M_w \cdot C_{pw} \cdot \Delta T_w$ (4)
Heat Loss from the Heat Induction of the Furnace Wall	$Q_C = \frac{T_s - T_w}{R} \cdot 10^{-3}$ (5)
Other Heat Losses	Q_{th}

Where

m_s = Mass of Steel (Kg)

L = Latent heat of steel (kJ/kg)

C_{ps} = Volume of the Heat of Steel (kJ/kg °C)

M_w = Flow rate of cooling water (kg/sec)

C_{pw} = Volume of the Heat of water (kJ/kg °C)

T_s = Temperature of liquid steel (K)

T_w = Temperature of cooling water (K)

Δt = Melting time (sec)

R = Heat resistance of the furnace lining (kW/K)

Manuscript received December 16, 2008.

Anuwat Pansuwan is with the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand (e-mail: some_anuwat@hotmail.com, s8060858@kmitl.ac.th)

Krit Smerpitak is with the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand (e-mail: kskrit@kmitl.ac.th).

Prapart Ukakimapan is with the Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, Bangkok, 10520 Thailand (e-mail: kuprapart@kmitl.ac.th)

R_{CV} = Resistance of the coil in the converter (Ω)

I_{INV} = Current of Inverter (A)

The heat input is the electricity energy input. The heat output is the heat directly given to the steel consisting of the heat for increasing the temperature of steel and latent heat of the steel. Upon considering the loss heat of the furnace, we have found 2 natures of the heat losses, namely, heat losses (heat) and heat losses (electricity).

Upon considering the heat losses (heat), they consist of the heat losses from transferring the heat from furnace wall to the coil, the heat losses from radiation at the furnace, heat losses from the heat induction of the cooling water system, and other heat losses. The mechanism for the heat losses depends on the temperature and upon considering the heat losses (electricity), they consist of the heat losses in the converter, the heat losses in the inverter, heat losses in coil, and other heat losses. The characteristics of the losses depend on the volume of electricity and resistance.

Several variables related to the equation and that can be measured consist of the electricity power put into the furnace, the temperature of liquid steel in the furnace, the temperature of input and output cooling water, flow rate of cooling water, and mass of steel to find the heat model of the furnace system designed. We attempt to get the variables from the heat incurred in the furnace so we can measure and the estimated temperature is closest to the temperature in the actual furnace as much as possible. We have found that the heat given to the steel in the process of measuring the liquid steel temperature is the processes that the steel in the furnace becomes the liquid so there is no latent heat. We have found only the heat that increases the temperature. Hence, we can cut this part of heat from the study. We have also found that the heat that increases the temperature is the function of the liquid steel temperature in the furnace $f(\Delta T_s)$. Upon considering the heat loss in the converter, we have found that it is the function of the resistance and flow. Both the resistance and flow depend on the electricity power input. Thus, we can summarize that the heat loss in the converter is the function of electricity power input $f(P_m)$ regarding the heat loss in the cooling system. This part of heat is the heat used for transferring the heat to the coil system of the furnace, which is the function of the flow rate of the heat induction, namely, the heat from liquid steel in the furnace that passing out of the furnace wall, which is the function of the liquid steel temperature in the furnace $f(\Delta T_s)$ and other heat losses and we also assume them to be constant so when replacing the variables measured with the variables that are functions of the heat equation, we also get the following equation.

$$P_m = \frac{m_s \cdot C_{PS} \cdot \Delta T_s}{\Delta t} + M_w \cdot C_{PW} \cdot \Delta T_w + f(P_m) + f(\Delta T_s) + heatloss \quad (6)$$

Replacing $X1$ inn the heat losses from electricity, that are the functions of energy input and replacing $X2$ in the heat losses due to the heat induction on the furnace wall, which is

The function of the liquid steel temperature in the furnace.

$$P_m = \frac{m_s \cdot C_{PS} \cdot \Delta T_s}{\Delta t} + M_w \cdot C_{PW} \cdot \Delta T_w + X1 \cdot P_m + X2 \cdot \Delta T_s + heatloss \quad (7)$$

Putting the constants together.

$$P_m = \left(\frac{m_s \cdot C_{PS} + X2}{\Delta t} \right) \cdot \Delta T_s + \left(\frac{C_{PW}}{1 - X1} \right) \cdot M_w \cdot \Delta T_w + \left(\frac{heatloss}{1 - X1} \right) \quad (8)$$

Replacing the constant with $A1$, $A2$, and $A3$ so we get the following equation.

$$P_m = A1 \cdot \Delta T_s + A2 \cdot M_w \cdot \Delta T_w + A3 \quad (9)$$

Where

$$A1 = \frac{\left(\frac{m_s \cdot C_{PS}}{\Delta t} + X2 \right)}{(1 - X1)}$$

$$A2 = \left(\frac{C_{PW}}{1 - X1} \right)$$

$$A3 = \left(\frac{heatloss}{1 - X1} \right)$$

We rearrange the equation as follows.

$$T_s = \frac{(P_m + A1 \cdot T_{s,j-1} - A2 \cdot M_w \cdot \Delta T_w - A3)}{A1} \quad (10)$$

Where T_s is the liquid steel temperature during the period of estimation, and $T_{s,j-1}$ is the estimated liquid steel temperature in the past time. In order to estimate the liquid steel temperature in the furnace from the heat model, it is necessary to measure the liquid steel temperature in the actual furnace for at least 1 time.

The experiment to estimate $A1, A2, A3$ is conducted by gathering the information from total processes for 4 times. During each time, we shall adjust the different energy input according to the details of each time.

The details of the calculation start from the measure of the liquid steel temperature in the furnace at the first point, and we calculate the liquid steel temperature in the furnace at the second point by replacing the electricity energy input, flow rate and temperature of cooling water and liquid steel temperature in the furnace measured during the first time, and we also assume the constant $A1$, $A2$, and $A3$ in equation (10). Afterwards, we calculate again and again until we get the

liquid steel temperature in the furnace according to the points required in the experiment with the pattern of equation as follows.

$$T_{s,2} = \frac{(P_{m,2} + A1 \cdot T_{s,1} - A2 \cdot M_{W,2} \cdot \Delta T_{W,2} - A3)}{A1}$$

$$T_{s,3} = \frac{(P_{m,3} + A1 \cdot T_{s,2} - A2 \cdot M_{W,3} \cdot \Delta T_{W,3} - A3)}{A1}$$

... =

... =

$$T_{s,2200} = \frac{(P_{m,2200} + A1 \cdot T_{s,2159} - A2 \cdot M_{W,2200} \cdot \Delta T_{W,2200} - A3)}{A1}$$

Upon calculating according to the above mentioned method, we have found that the constant A1, A2, and A3 are as follows.

$$A1 = 659, A2 = 18.4, A3 = 100$$

Therefore, the heat model of the induction furnace shall be demonstrated in equation (11).

$$T_s = \frac{(P_{in} + 659 \cdot T_{s-1} - 18.4 \cdot M_{W,2} \cdot \Delta T_{W,2} - 100)}{659} \quad (11)$$

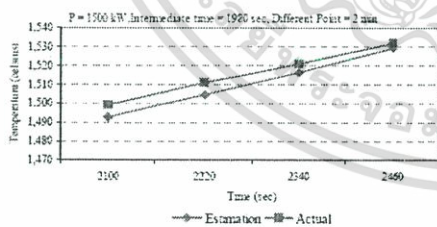
III. EXPERIMENT FOR THE ESTIMATION OF TEMPERATURE

From the pattern of equation (11), the abovementioned heat balance equation when we realize the liquid steel temperature at the first point, we can estimate the liquid steel temperature at the next point. The sampling in the experiment takes 10 minutes and the accuracy test in the estimation of the temperature by 6 sets of tests has the details in Table 3.1.

Table 3.1: The operations of 6 sets of experiments.

Experiment 1

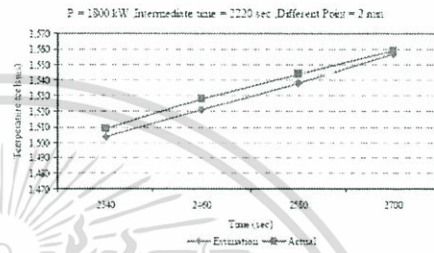
Electricity Power Input	1500	kW
Flow Rate of Cooling Water	8.2	Kg/s
Point of First Measuring	1980	sec
Number of Times Measuring the Liquid Steel Temperature	4	Times



Point of Measuring the Temperature	1	2	3	4
Liquid Steel Temperature from Estimation	1493	1504	1516	1529
Liquid Steel Temperature from Measuring via Thermocouple	1499	1511	1521	1532

Experiment 2

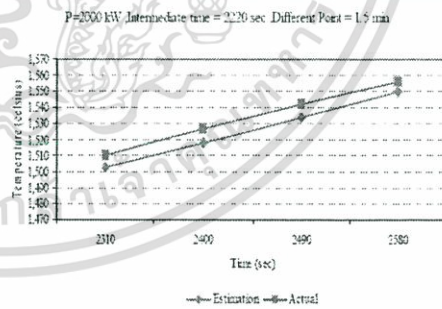
Electricity Power Input	1800	kW
Flow Rate of Cooling Water	8.2	Kg/s
Point of First Measuring	2220	sec
Number of Times Measuring the Liquid Steel Temperature	4	Times



Point of Measuring the Temperature	1	2	3	4
Liquid Steel Temperature from Estimation	1504	1521	1538	1557
Liquid Steel Temperature from Measuring via Thermocouple	1509	1528	1544	1559

Experiment 3

Electricity Power Input	2000	kW
Flow Rate of Cooling Water	8.2	Kg/s
Point of First Measuring	2220	sec
Number of Times Measuring the Liquid Steel Temperature	4	Times



Point of Measuring the Temperature	1	2	3	4
Liquid Steel Temperature from Estimation	1502	1518	1534	1549
Liquid Steel Temperature from Measuring via Thermocouple	1510	1527	1542	1556

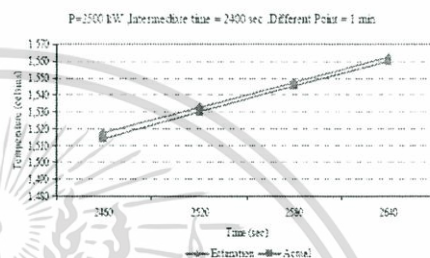
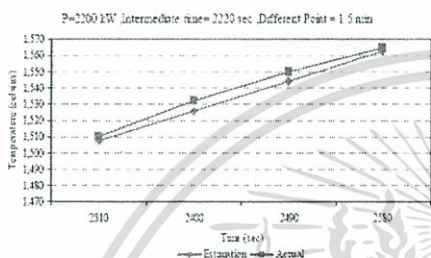
Point of Measuring the Temperature	1	2	3	4
Liquid Steel Temperature from Estimation	1511	1525	1540	1554
Liquid Steel Temperature from Measuring via Thermocouple	1504	1521	1537	1547

Experiment 4

Electricity Power Input	2200	kW
Flow Rate of Cooling Water	8.2	Kg/s
Point of First Measuring	2220	sec
Number of Times Measuring the Liquid Steel Temperature	4	Times

Experiment 6

Electricity Power Input	2500	kW
Flow Rate of Cooling Water	8.2	Kg/s
Point of First Measuring	2400	sec
Number of Times Measuring the Liquid Steel Temperature	4	Times

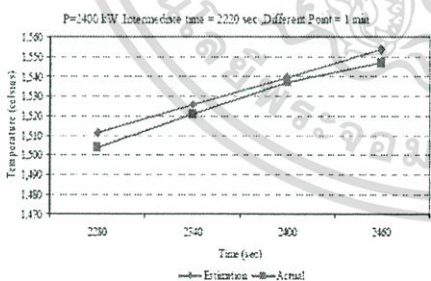


Point of Measuring the Temperature	1	2	3	4
Liquid Steel Temperature from Estimation	1505	1524	1542	1561
Liquid Steel Temperature from Measuring via Thermocouple	1510	1532	1550	1565

Point of Measuring the Temperature	1	2	3	4
Liquid Steel Temperature from Estimation	1517	1532	1547	1562
Liquid Steel Temperature from Measuring via Thermocouple	1514	1530	1545	1560

Experiment 5

Electricity Power Input	2400	kW
Flow Rate of Cooling Water	8.2	Kg/s
Point of First Measuring	2220	sec
Number of Times Measuring the Liquid Steel Temperature	4	Times



IV. ANALYSIS OF EXPERIMENTAL OUTCOME

From the 6 experiments, we conduct the experiments at different electricity power and measure the temperature in the furnace for 24 times and we have found that after finding the unrealized parameters and calculating back to predict the liquid steel temperature in order to compare with the actual temperature. We have found that both are closet to each other from the conditions of the actual operations. The maximum error is at ± 9 degree Celsius so the average is at 5.08 degree Celsius. The error of the temperature is due to the fact that $A1$ is the mass of steel multiplied by the specific heat capacity of each melting and each melting has different mixtures and the conditions of the furnace change all the time. Thus, it is difficult to control and standardize the operations of furnace in every time of operations.

V. SUMMARY OF EXPERIMENT

The experiment starts from gathering the parameters affecting the temperature in the furnace, namely, electricity power input, temperature of cooling water input – output, flow rate of cooling water. The parameter measured is

calculated in the heat balance equation and tested to find the proper heat model of the furnace. Upon obtaining the heat model of the furnace, such model shall be tested to compare the accuracy of the estimation when it is actually functioned.

In the all experiment, we have found that the estimated temperature has the average error of 5.08 Degree Celsius with the maximum error of no more than ± 9 Degree Celsius.

Upon considering the error from estimated temperature and the actual temperature, we can summarize as follows.

- (1) A has been changed in some experiments so the heat model has some errors.
- (2) The methods used to find the unrealized parameters are simple methods so when actually applying to the furnace with complex structure and operations, the model obtained is not accurate. Thus, the estimated temperatures have some errors.
- (3) The Thermocouple type R used to measure the liquid steel temperature may have some errors during the measurement. This may due to the equipment or the persons who conduct the experiments. Hence, the temperature measured may have some errors and upon estimating the temperature, the constant has some mistakes.

REFERENCES

- [1] Drzewiecki T.M., Philipp R.M. and Paras C.E. Fluidics, "A New Potential for Energy Conservation by Continuous High Temperature Monitoring and Control". *Heat Transfer in Energy Conservation*, Nov, 1977, pp.127-134.
- [2] Elliott R., "Induction melting". *Cast Iron Technology*, 1998, pp.58-63.
- [3] "The Utilization of The Electric Heating Installation Efficiency of The Energy Japan Induction Heating". *The Energy Conservation Center Japan*, 1990, pp.1-33.
- [4] Sui Y.G., Wang D.X., Tao B.S., Yan T., Shi Y., Fang S.B. and Wang Y.H., "An Intelligent Ladle Furnace Control System". *Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2000, pp.330-334.
- [5] Edward Wilson, Michael Kan, Anjan Mirla, "Intelligent Technologies for Electric Arc Furnace Optimization". *Normal Applications Corporation*, 2000, pp.1-6.
- [6] "Induction Heating System Topology Review". *Fairchild Semiconductor*, July, 2000, pp.1-28.
- [7] K.C.Bala, "Design Analysis of an Electric Induction Furnace for Melting Aluminum Scrap". Mechanical Engineering Department, Federal University of Technology Minna, Niger State, Nigeria, Oct 2005, pp.1-7.
- [8] Natasha GUPTA, Sanjay CHANDRA, "Temperature Prediction Model for Controlling Casting Superheat Temperature". *ISIJ International*, Vol. 44 (2004), No. 9, pp. 1517-1526.
- [9] C.K.Joshi, D.Y. Goswami, J.F.Klausner, C.K. Hsieh, M.Leung, H.Li, S.Malaka and F.Colacino, "Heat Transfer Characteristics of a High Temperature Sensible Heat Storage Water Heater Using Cast Iron as a Storage Material". *Department of Mechanical Engineering, University of Florida, Gainesville, FL*, 1996, pp. 2099-2103.
- [10] Huixin Tan, Zhizhong Mao, Shu Wang and Kun Li, "Application of Genetic Algorithm Combined with BP Neural Network in Soft Sensor of Molten Steel Temperature". *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, June 21 - 23, 2006, Dalian, China, pp. 7742-7745.
- [11] Cheng Man, Yuan Hongbo, Shao limin and Gao Liat, "Design of Temperature Measurement System Based On Intelligent Technology". *The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI 2007*, pp. 853-856.

ประวัติผู้เขียน

นายอนุวัฒน์ เป็นสุวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ.2524 ที่จังหวัดภูเก็ต สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม จากภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2548 โดยในปัจจุบันทำงานในตำแหน่งวิศวกรฝ่ายผลิตและระบบอัตโนมัติ บริษัท มากอตโต จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้