

การประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

นาย ประพันธ์ พิกุลทอง

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-0865-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TEMPERATURE ESTIMATION OF MOLTEN STEEL IN INDUCTION FURNACE



Mr. Praphun Pikultong

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic Year 2002

ISBN 974-17-0865-3

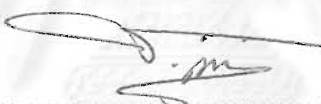
หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า  
โดย                                              นาย ประพันธ์ พิกุลทอง  
สาขาวิชา                                      วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา                            ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม                      ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล


---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)

ประพันธ์ พิกุลทอง : การประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า.  
(TEMPERATURE ESTIMATION OF MOLTEN STEEL IN INDUCTION FURNACE)  
อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.รัชทิน จันทรเจริญ, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล, 123 หน้า.  
ISBN 974-17-0865-3.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการประมาณค่าอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องของโลหะหลอมละลายอุณหภูมิสูงในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า การวัดอุณหภูมิทางตรงด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่อง เพราะน้ำเหล็กในกระบวนการหลอมอาจมีอุณหภูมิสูงถึงกว่า 1500 องศาเซลเซียส ประกอบกับน้ำเหล็กมักมีสิ่งสกปรกเจือปน หัววัดจะมีอายุการใช้งานสั้นหากแช่อยู่ในน้ำเหล็กอุณหภูมิสูงนานเกินไป วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กทางอ้อม โดยการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมเทคนิคการประมาณอาศัยการพิจารณาสมการสมดุลความร้อนของเตา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แสดงเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิจริงกับค่าที่ประมาณด้วยวิธีการที่นำเสนอซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของวิธีการ โดยค่าที่ประมาณได้กับค่าที่วัดได้จริงมีค่าความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่บวกลบ 8 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเท่ากับ 2.42 องศาเซลเซียส และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.44 องศาเซลเซียส

เมื่อนำระบบประมาณค่าอุณหภูมิที่ออกแบบนี้ไปใช้งานจริงที่ บริษัทสมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด โดยได้ทำการทดลองใช้งานจริงเป็นเวลา 1 เดือน พบว่าสามารถประหยัดพลังงานในส่วนของการควบคุมเตาหลอมและค่าหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลมารวมกันได้ทั้งหมด 583,279.07 บาท/ปี เมื่อคิดเงินลงทุนทั้งหมด 137,042.80 บาท/ปี ดังนั้นจะมีเวลาดูคืนทุนเท่ากับ 0.23 ปี

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## 4370378121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEER

KEY WORD : INDUCTION FURNACE / TEMPERATURE ESTIMATION / HEAT BALANCE /  
INDIRECT MEASUREMENT / HIGH TEMPERATURE

PRAPHUN PIKULTONG : TEMPERATURE ESTIMATION OF MOLTEN STEEL IN  
INDUCTION FURNACE. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. RATCHATIN  
CHANCHAROEN, Ph.D. THESIS COADVISOR : ASST.PROF. MINGSAK  
TANGTAKUL, 123 pp. ISBN 974-17-0865-3.

This thesis aims to develop a temperature estimation system for induction furnace that can monitor the molten steel temperature continuously. Direct measurement using thermocouple cannot measure the temperature continuously since the temperature of the molten steel may exceed 1500 °C. In addition, there is impurity. The life of the thermocouple probe is short if submerses in the molten steel for too long. The proposed technique estimates the molten steel temperature from the power input, temperature and flow rate of the coolant, and the temperature at the wall based on the heat balance equation.

The estimated temperature is compared with the temperature measured using thermocouple to demonstrate the accuracy of the technique. The maximum estimation error is about +/- 8 °C. The mean and standard deviation of error are 2.42 °C and 3.44 °C respectively.

Temperature measurement system has been installed at the Somboon Malleable Iron Industrial Co., Ltd. The one-month test indicates that the system could reduce the cost of energy and thermocouple probe by 583,279.07 baht/year. The expenditure is 137,042.80 baht which results in the investment return of 0.23 year.

Department Mechanical Engineering

Field of study Engineering

Academic year 2002

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-advisor's signature.....

*Praphun Pikultong*

*R. Chancharoen*

*Mingsak Tangtakul*

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ดร.รัชทิน จันทรเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัยมาตลอดระยะเวลาในการทำวิจัยครั้งนี้ จนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการและอำนวยความสะดวกในการทดลอง ขอขอบคุณ สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ ผู้ประสานงานโครงการทำให้โครงการดำเนินไปได้อย่างราบรื่น และขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ผู้ให้ทุนสนับสนุนโครงการและกำกับดูแลให้โครงการสำเร็จผล

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณ สิทธินาถ คุณ นุชสรินทร์ ที่ให้การช่วยเหลือดูแลการเบิกจ่ายเงินของโครงการ ทำให้ผู้วิจัยมีเวลาในการทำงานวิจัยจนสำเร็จไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณ พี่ ประทวน พี่ ปรีชา ตลอดจนเจ้าหน้าที่ทุกคนในบริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ที่คอยดูแลช่วยเหลือ ตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ พี่ประสิทธิ์ และพี่ๆ ทุกคนในบริษัท พี่พัลลวดี จำกัด ที่ให้การช่วยเหลือ ตลอดจนคำแนะนำในการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์วัดต่างๆ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้ความสนับสนุนด้านการศึกษา และเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
รายการสัญลักษณ์.....	ฐ

### บทที่

1	บทนำ.....	1
	1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์.....	2
	1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
	1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	3
	1.6 บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด.....	3
	1.7 โครงการ IRAS.....	5
2	งานวิจัยที่ผ่านมา.....	7
3	เตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า.....	11
	3.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเตาหลอม.....	11
	3.2 เตาหลอมที่ใช้ในงานวิจัย.....	15
4	การทดลองและเครื่องมือที่ใช้ทดลอง.....	18
	4.1 การออกแบบการทดลอง.....	18
	4.2 ภาษาที่ใช้สื่อสารกับเครื่องมือวัด.....	24
	4.2.1 โปรโตคอล Modbus.....	24
	4.2.1.1 RTU (Remote Terminal Unit) Mode.....	25
	4.2.2 485 โปรโตคอล.....	28

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3 โปรแกรม LabVIEW.....	32
4.4 ลักษณะกระบวนการให้ความร้อน.....	38
5 แบบจำลองทางความร้อนของเตาหลอม.....	42
5.1 สมการสมดุลความร้อน.....	42
5.2 แบบจำลองทางความร้อนของเตา.....	44
5.3 การหาพารามิเตอร์ของสมการ.....	47
6 การประมาณค่าอุณหภูมิ.....	53
6.1 วิธีการประมาณค่าอุณหภูมิ.....	53
6.2 การสุ่มวัดค่า.....	57
6.3 สรุปการประมาณค่าอุณหภูมิ.....	59
7 วิธีการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิ.....	61
8 การประหยัดพลังงานในเตาหลอม.....	67
8.1 การควบคุมเตาหลอมให้ประหยัดพลังงาน.....	67
8.2 ผลการประหยัดที่เกิดจากการใช้งานจริง.....	71
8.3 ประโยชน์และการประหยัดทางอ้อม.....	74
9 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	77
9.1 สรุปผลการวิจัย.....	77
9.2 ข้อเสนอแนะ.....	78
รายการอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. รายละเอียดงบประมาณที่ใช้ในงานวิจัย.....	81
ภาคผนวก ข. รูปแบบและตัวอย่างการส่งผ่านข้อมูล และตัวอย่างโปรแกรม.....	82
ภาคผนวก ค. รายละเอียดเครื่องมือและโครงสร้างเตา.....	85
ภาคผนวก ง. รายละเอียดข้อมูลการทดลอง.....	93
ภาคผนวก จ. ความคิดเห็นทางโรงงาน.....	109
ภาคผนวก ฉ. บทความทางวิชาการ.....	110
ภาคผนวก ช. เบื้องหลังการทดลอง.....	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	123

## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	สมมูลความร้อนของเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า.....	9
3.1	ประเภทและลักษณะการทำงานของเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า.....	12
4.1	ชนิดและช่วงอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	20
4.2	ข้อแตกต่างระหว่างการสื่อสารแบบต่างๆ.....	28
4.3	เปรียบเทียบระหว่างมาตรฐาน RS-232 และ RS-485/RS-422.....	29
4.4	การเปรียบเทียบระหว่าง LabVIEW กับโปรแกรมพื้นฐาน.....	34
4.5	ข้อมูลการตรวจวัด.....	39
5.1	สรุปสมมูลความร้อนของเตา.....	43
5.2	การทำงานของชุดการทดลองทั้ง 5.....	50
6.1	ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบการประมาณค่าอุณหภูมิ.....	53
6.2	การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ประมาณได้กับค่าอุณหภูมิที่วัดจริงของทั้ง 10 ชุดการทดลอง.....	56
7.1	ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ต้องตั้งให้กับเครื่อง ACM 3300.....	62
8.1	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมทั้ง 4 วิธี.....	71
8.2	รายละเอียดการหลอมของเตา 2 ตัน 1 ในปี 2544.....	72
8.3	ข้อมูลการหลอมหลังติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมิ.....	74
8.4	การทดลองเปรียบเทียบระหว่าง เปิด-ปิด ฝาเตา.....	76
ก.1	รายละเอียดงบประมาณที่ใช้ในโครงการ.....	80
ก.2	รายละเอียดงบประมาณที่ใช้ติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมิ.....	80
ข.1	รูปแบบการขอข้อมูล (Master to ACM 3300).....	82
ข.2	รูปแบบการตอบกลับข้อมูล (ACM 3300 to Master).....	82
ข.3	รูปแบบการขอข้อมูลตัว NuDAM – 6018.....	83
ข.4	รูปแบบการตอบกลับของตัว NuDAM – 6018.....	84

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า	
1.1	ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยบริษัทสมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียว.....	4
1.2	เตาหลอมทั้ง 3 ของบริษัทสมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียว.....	5
3.1	ลักษณะการให้ความร้อนของเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า.....	11
3.2	โครงสร้างของเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า.....	13
3.3	ไดอะแกรมระบบไฟฟ้า.....	13
3.4	เตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้าที่ใช้ทดลอง.....	16
3.5	การวัดอุณหภูมิในเตา.....	16
3.6	ตู้ควบคุมเตา 2 ตัน 1.....	17
3.7	ไดอะแกรมระบบน้ำหล่อเย็นของบริษัทสมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียว.....	17
4.1	การออกแบบการทดลอง.....	18
4.2	เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดต่างๆ.....	19
4.3	ACM 3300 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า.....	21
4.4	485/232 คอนเวอร์เตอร์ รุ่น ND-6520.....	21
4.5	NuDAM รุ่น ND-6018.....	22
4.6	เครื่องวัดอัตราการไหล (Ultrasonic flow meter).....	22
4.7	แผงวงจรควบคุมโดยที่โปรโตคอลจะเสียบอยู่ในสล็อต.....	31
4.8	แผงวงจรควบคุมโดยที่โปรโตคอลแยกออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์.....	31
4.9	แสดงหน้าจอที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LabVIEW.....	38
4.10	กราฟแสดงกระบวนการหลอมเหล็ก.....	38
4.11	เซงก์ไดอะแกรมในช่วงให้ความร้อน.....	41
5.1	ไดอะแกรมสมดุลความร้อนของเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้าแบบ Crucible ชนิดความถี่สูง.....	42
5.2	แบบจำลองทางความร้อนของระบบเตาหลอม.....	47
5.3	การเปรียบเทียบการประมาณค่าอุณหภูมิกับชุดข้อมูลที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 5 ชุดการทดลอง.....	51
6.1	การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จริงกับอุณหภูมิที่ทำนายของทั้ง 10 ชุดการทดลอง.....	55

## สารบัญภาพ (ต่อ)

บทที่		หน้า
6.2	วิธี Zero-Order-Hold.....	58
7.1	การติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์.....	63
7.2	หน้าจอโปรแกรม LabVIEW ที่ต้องตั้งค่าก่อนลงมือเก็บค่า.....	64
7.3	การทดลองที่ปรับเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปที่ระดับต่างๆ.....	64
7.4	การทดลองที่พลังงานไฟฟ้าคงที่ที่ 1000 kW.....	65
7.5	อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาที่วัดได้จริงกับที่ทำนาย.....	65
8.1	การควบคุมวิธีที่ 1.....	69
8.2	การควบคุมวิธีที่ 2.....	69
8.3	การควบคุมวิธีที่ 3.....	70
8.4	การควบคุมวิธีที่ 4.....	70
8.5	การเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ากับยอดการหลอมในรอบปี 2544.....	73
ค.1	Single line diagram ของเตาหลอม.....	84
ค.2	รายละเอียดเครื่อง ACM 3300.....	85
ค.3	รายละเอียดเครื่อง NuDAM-6520.....	87
ค.4	รายละเอียดเครื่อง NuDAM-6018.....	90
ง.1	ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ C1, C2, และ C3 ของแบบจำลอง ทางความร้อนชุดที่ 1.....	94
ง.2	ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ C1, C2, และ C3 ของแบบจำลอง ทางความร้อนชุดที่ 2.....	95
ง.3	ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ C1, C2, และ C3 ของแบบจำลอง ทางความร้อนชุดที่ 3.....	96
ง.4	ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ C1, C2, และ C3 ของแบบจำลอง ทางความร้อนชุดที่ 4.....	97
ง.5	ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ C1, C2, และ C3 ของแบบจำลอง ทางความร้อนชุดที่ 5.....	98
ง.6	ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 1.....	99
ง.7	ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 2.....	100
ง.8	ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 3.....	101
ง.9	ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 4.....	102

สารบัญภาพ (ต่อ)

บทที่		หน้า
ง.10	ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 5.....	103
ง.11	ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 6.....	104
ง.12	ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 7.....	105
ง.13	ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 8.....	106
ง.14	ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 9.....	107
ง.15	ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 10.....	108
ข.1	ค่าการตรวจวัดที่เกิดจากสัญญาณรบกวน.....	122



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่ผิวของการแผ่รังสี
$C_{p,s}$	ค่าความจุความร้อนของเหล็ก
$C_{p,w}$	ค่าความจุความร้อนของน้ำ
$I_{inv}$	กระแสอินเวอร์เตอร์
$L$	ค่าความร้อนแฝงของเหล็ก
$m_s$	มวลของเหล็ก
$\dot{M}_w$	อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น
$R$	ความต้านทานความร้อนของผนังเตา
$R_{CU}$	ความต้านทานของลวดตัวนำในหม้อแปลง
$T_A$	อุณหภูมิบรรยากาศ
$T_s$	อุณหภูมิของเหล็ก
$T_w$	อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น
$\Delta t$	เวลาที่ใช้หลอมเหล็ก
$\varepsilon$	Emissivity
$\Delta\theta$	ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิเตากับบรรยากาศ

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกี่ยวข้องกับการประมาณค่าอุณหภูมิในเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำไฟฟ้าเพื่อนำผลที่ได้มาปรับปรุงสมรรถนะในการหลอมโลหะของเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำไฟฟ้าที่บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ระบบประมาณค่าอุณหภูมิที่ออกแบบขึ้นมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหลอมเหล็กและเพิ่มคุณภาพของน้ำเหล็กโดยควบคุมให้ขบวนการหลอมมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ปัญหาสำคัญของขบวนการหลอมเหล็กที่ใช้อยู่ในปัจจุบันก็คือไม่สามารถวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กระหว่างขบวนการอย่างต่อเนื่องได้ ปัจจุบันบริษัทฯ ใช้การวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กทางตรงด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลซึ่งไม่สามารถวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กอย่างต่อเนื่องได้เนื่องจากน้ำเหล็กจะได้รับการหลอมจนมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ประกอบกับน้ำเหล็กมีสิ่งเจือปน เช่นสนิม เป็นต้น การวัดอุณหภูมิด้วยวิธีนี้อย่างต่อเนื่องจะทำให้หัววัดเทอร์โมคัปเปิ้ลเสียหาย อีกทางเลือกหนึ่งในการวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กก็คือการวัดการแผ่รังสี การวัดแบบนี้ทำให้หัววัดไม่ต้องสัมผัสกับโลหะหลอมละลายอุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม วิธีการวัดการแผ่รังสีจะมีความคลาดเคลื่อนในกรณีที่มีควัน หรือสิ่งสกปรก บังวิสัยทัศน์ของหัววัด และเตาอาจต้องมีช่องเปิดเพื่อให้รังสีผ่านออกมาที่หัววัดได้ตลอดเวลา ช่องเปิดนี้อาจทำให้ความร้อนสูญเสียของเตามากขึ้น

เพื่อพัฒนาขบวนการหลอมโลหะให้มีสมรรถนะสูงขึ้น ทั้งในเรื่องของการประหยัดพลังงาน กำลังการผลิต และคุณภาพของโลหะหลอมละลาย จำเป็นที่จะต้องทราบอุณหภูมิของน้ำโลหะอย่างต่อเนื่อง และจากข้อจำกัดในการวัดอุณหภูมิทางตรงด้วยวิธีการต่างๆ ในตอนต้น ด้วยเหตุนี้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ออกแบบวิธีการวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะขึ้น วิธีการวัดที่น่าเสนอนี้จะเป็นการวัดทางอ้อมโดยจะอาศัยการประมาณอุณหภูมิหน้าโลหะจากการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก และทำการทดลองเพื่อประมาณความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างขบวนการ จากนั้น จึงนำค่าต่างๆ เหล่านี้มาประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะโดยใช้สมการสมดุลความร้อน

จากการที่สามารถประมาณค่าอุณหภูมิหน้าเหล็กได้นี้ ทำให้สามารถนำผลที่ได้มาปรับปรุงขบวนการหลอมเหล็ก เพื่อให้ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการพัฒนาเทคโนโลยีในการ

ประมาณค่าอุณหภูมิขึ้นภายในประเทศ โครงการนี้นอกจากจะทำให้บริษัทลดภาระค่าประกอบการจากการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพขึ้น ยังจะเป็นการส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีในการหลอมเหล็กเพื่อให้สามารถแข่งขันกับต่างประเทศได้ การพัฒนาระบบที่ใช้งานกับเตาหลอมเดิมที่ใช้งานอยู่จะช่วยลดการลงทุนเพื่อซื้อเตาหลอมใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง และทำให้สามารถพัฒนาเตาหลอมได้อย่างต่อเนื่อง โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษาเพียงเตาเดียวเพื่อเป็นโครงการนำร่อง และอาจนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ต่อกับเตาที่เหลือในอนาคต ด้วยเหตุนี้ทางบริษัทจึงได้ร่วมมือกับสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในการทำการวิจัยและพัฒนาเตาหลอมของโรงงาน

## 1.2 วัตถุประสงค์

- (1) เพื่อศึกษาหาแนวทางในการประมาณค่าอุณหภูมิในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งจะ เป็นรากฐานสำคัญในการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้อย่างเหมาะสม
- (2) เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมการใช้ไฟฟ้าของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยการนำผลที่ได้จากการประมาณค่าอุณหภูมิในเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาปรับปรุงวิธีการหลอมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- (1) ออกแบบ และทดลองวิธีการวัดอุณหภูมิโลหะหลอมละลายในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้วยวิธีทางอ้อมให้สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่อง
- (2) นำวิธีการวัดอุณหภูมิโลหะหลอมละลายในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าด้วยวิธีทางอ้อมตามที่ได้ออกแบบไว้มาใช้งานจริงที่เตา 2 ต้นตัวที่ 1 ของบริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) สามารถสรุปเกี่ยวกับความร้อนสูญเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาต่อไป
- (2) สามารถวัดอุณหภูมิโลหะหลอมละลายได้อย่างต่อเนื่อง

- (3) สามารถลดการใช้พลังงานไฟฟ้าของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า เมื่อนำระบบประมาณค่าอุณหภูมิที่ออกแบบได้ไปใช้งานจริง
- (4) สามารถนำผลที่ได้จากการออกแบบระบบประมาณค่าอุณหภูมิไปใช้ในการพัฒนาวิธีการหลอมเหล็กให้มีประสิทธิภาพต่อไป

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินการ

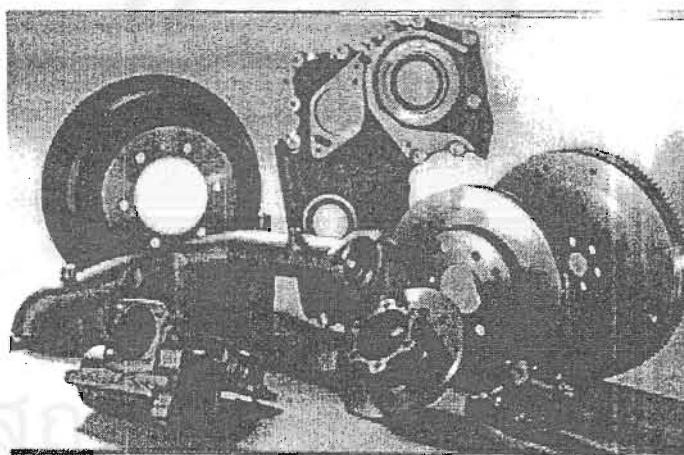
เดือนที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ศึกษาถึงงานวิจัยที่ผ่านมา												
ศึกษาการทำงาน และความร้อนสูญเสียของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า												
ออกแบบ และทดลองวิธีวัดอุณหภูมิโลหะหลอมละลายอย่างต่อเนื่อง												
ติดตั้ง และใช้งานระบบวัดอุณหภูมิตามที่ได้ออกแบบไว้												
วิเคราะห์ผล การนำระบบวัดอุณหภูมิไปใช้งานจริง												
สรุปผลงานวิจัย												

### 1.6 บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด

บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด หรือ SBM ก่อตั้งเมื่อปี พ.ศ. 2518 ด้วยเงินลงทุน 34 ล้านบาท ดำเนินงานหล่อเหล็กเหนียว งานหล่อเหล็กกล้าสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนต่างๆ โดยได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากบริษัท อาซาฮิเทค คอปอเรชั่น ประเทศ ญี่ปุ่น ต่อมาในปี 2538 บริษัทได้ขยายงานระบบการควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ CNC ด้วยเงินทุนอีก 40 ล้านบาท สำหรับการก่ตั้งขึ้นรูปชิ้นส่วน ผลิตภัณฑ์หลักของบริษัท คือ ดรัมเบรค ดิสก์เบรค ฟลายวีว เอ็กซอท ฮับ เกียร์บ็อกซ์ และทามมิ่งคัพเวอร์ (ดังแสดงในรูปที่ 1.1) โรงงานมีพนักงาน ทั้งหมด 410 คน โดยมีกำลังผลิตติดตั้ง ดังต่อไปนี้

ดรัมเบรค	30,000	ชิ้น/เดือน
ดิสก์เบรค	30,000	ชิ้น/เดือน
เกียร์บ็อกซ์	8,000	ชิ้น/เดือน
ฮับ	15,000	ชิ้น/เดือน
ฟลายวีว	10,000	ชิ้น/เดือน
เอ็กซอท	20,000	ชิ้น/เดือน
ทามมิ่งคัพเวอร์	1,200	ชิ้น/เดือน

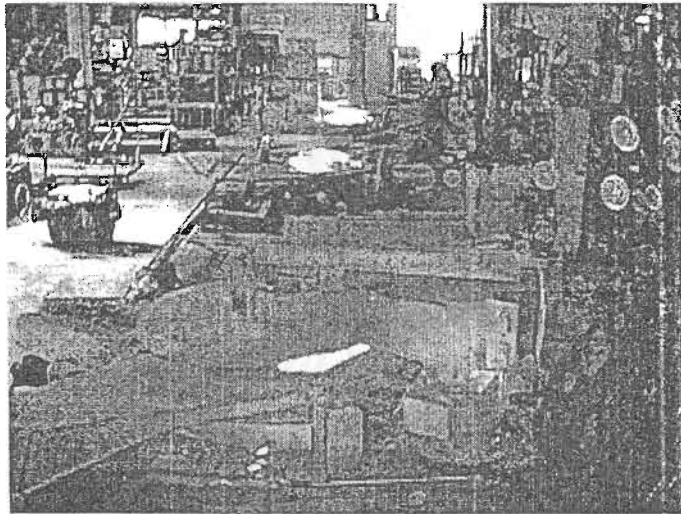
ในส่วนของ การหล่อเหล็กเหนียวภายในโรงงาน ปัจจุบันบริษัทมีเตาหลอมโลหะแบบใช้ไฟฟ้า (Induction furnace) ทั้งหมด 3 เตา ประกอบด้วยเตาขนาด 2 ตัน จำนวน 2 เตา และเตาขนาด 5 ตัน จำนวน 1 เตา (ดังแสดงในรูปที่ 1.2) ใช้กำลังไฟฟ้ารวม 3,600 กิโลวัตต์ และมีกำลังการผลิต 11,400 ตันต่อปี จากการสำรวจการใช้พลังงานเบื้องต้นของบริษัท พบว่าเตาหลอมไฟฟ้าใช้กำลังงานคิดเป็นสัดส่วนถึงเกือบ 60 เปอร์เซ็นต์ของการใช้ไฟฟ้าทั้งหมดหรือใช้ไฟฟ้าถึง 10,935,000 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี หรือคิดเป็นเงินกว่า 20 ล้านบาท ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก



รูปที่ 1.1 ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยบริษัทสมบูรณหล่อเหล็กเหนียว

การควบคุมเตาหลอมของโรงงานในปัจจุบันอาศัยความชำนาญของผู้ควบคุมเตา โดยการวัดอุณหภูมิของเหล็กในเตาจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลจุ่มลงไปใต้น้ำเหล็กอุณหภูมิสูง การวัดด้วยวิธีนี้ไม่สามารถให้หัววัดจุ่มอยู่ในน้ำเหล็กอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานได้เนื่องจากจะทำให้อายุการใช้งานสั้น ทำให้ผู้ควบคุมเตาใช้การวัดเพียงบางตำแหน่งของขบวนการ และใช้ประสบการณ์ในการประมาณอุณหภูมิของน้ำเหล็กจากการสังเกตการวัด 10 ครั้งพบว่าอุณหภูมิเกินค่าที่ต้องการถึง 8 ครั้ง เป็นผลทำให้สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์และกำลังการผลิตไม่ได้ตามที่ต้องการ และเมื่ออุณหภูมิน้ำเหล็กเกินค่าที่ต้องการก็จะต้องลดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาลงโดยทิ้งให้น้ำเหล็กระบาย

ความร้อนโดยธรรมชาติสู่สิ่งแวดล้อม เป็นผลให้เพิ่มมลพิษโดยไม่จำเป็น ซึ่งการวัดอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่องจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้



รูปที่ 1.2 เตาหลอมทั้ง 3 เตาของบริษัทสมบูรณหล่อเหล็กเหนียว

## 1.6 โครงการ IRAS

โครงการ IRAS นี้เริ่มต้นมาจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายสนับสนุนการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม (ฝ่าย 5) โดยการสนับสนุนงบประมาณจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายพลังงานแห่งชาติ (สพช.) ได้เชิญชวนให้นักวิจัยในหน่วยงานทั้งจากภาครัฐบาลและเอกชน เสนอโครงการเพื่อขอรับการสนับสนุนในโปรแกรมการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม สาขาพลังงานเพื่อเสริมสร้างและพัฒนาการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม ที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานและการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดการรักษาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากปัญหาสำคัญที่ภาคอุตสาหกรรมประสบอยู่ในขณะนี้คือการขาดนักวิจัยที่มีความรู้ความสามารถในหน่วยงานที่ทำหน้าที่วิจัยและพัฒนาของบริษัท บวกกับการขาดที่ปรึกษาที่มีประสบการณ์ในการพัฒนาโครงการวิจัย เพื่อให้ได้แนวทางการวิจัยที่ตอบสนองต่อความต้องการงานวิจัยทั้งระยะสั้นและระยะยาวของโรงงาน นอกจากนี้ผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์ในแต่ละสาขายังกระจัดกระจายอยู่ในหน่วยงานต่างๆ ทั้งภาครัฐและเอกชน ถึงแม้จะมีสมาคมวิชาชีพทำหน้าที่ประสานงานอยู่ ก็ยังไม่มีความเข้มแข็งเพียงพอ ขาดความเป็นเอกภาพ ความร่วมมือ และทรัพยากร ที่จะดำเนินการให้การวิจัยเป็นผลอย่างเป็นรูปธรรมหลังจากที่ได้ประชุมร่วมกับภาคเอกชน มหาวิทยาลัยและหน่วยงานต่างๆ แล้ว สกว. จึงได้จัดโปรแกรมการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรม (Industrial Research Associate Support

Program, IRAS) สาขาพลังงาน โดยอาศัยความร่วมมือทางด้านการวิจัยระหว่างสถาบัน การศึกษา สถาบันวิจัยต่างๆ และโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งในที่นี้เรียกว่า "ผู้ปฏิบัติการวิจัย หรือ Research Associate" ซึ่งเป็นนักวิจัยที่จบปริญญาตรีในสาขาวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยี หรือสาขาที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรม เพื่อสนับสนุนให้ไปทำงานวิจัยในภาค อุตสาหกรรมเป็นเวลา 1-2 ปี สำหรับการแก้ไขปัญหาของภาคอุตสาหกรรมทางเทคนิคที่เกี่ยวข้อง กับกระบวนการผลิตหรือพัฒนาวิธีการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการประหยัดพลังงานและการรักษา สิ่งแวดล้อม ผลงานการวิจัยนักวิจัยสามารถเสนอเป็นวิทยานิพนธ์เพื่อขอรับปริญญาโทได้โดยไม่มี การผูกมัดใดๆ และนักวิจัยจะได้รับค่าจ้างในอัตราเดียวกันกับค่าจ้างของพนักงานระดับเดียวกันใน ภาคอุตสาหกรรม จำนวนโรงงานที่เข้าร่วมในโครงการรวมทั้งหมด 25 โรงงานๆ ละ 1 ทุน ระยะเวลาในการดำเนินงานแต่ละโครงการ 1-2 ปี กระจายครอบคลุมทั่วประเทศ ทุกกลุ่มอุตสาหกรรม และทุกสถาบันการศึกษา สถาบันวิจัยและหน่วยงานต่างๆ ทั้งภาครัฐบาลและภาคเอกชน

สำหรับโรงงานสมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวนี้ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ได้ออมัติทุนให้กับโครงการ "การปรับปรุงการใช้ไฟฟ้าในเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้าโดยวิธีควบคุม ความร้อน" เป็นจำนวนเงิน 566,000 บาท ระยะเวลา 12 เดือน เมื่อวันที่ 7 มิถุนายน 2543 โดยมีงบประมาณจากโรงงานสมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียว เข้าร่วมเป็นจำนวน 468,000 บาท รวมเป็นเงิน ทั้งหมด 1,034,000 บาท

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### งานวิจัยที่ผ่านมา

The Utilization of The Electric Heating Installation Efficiency of The Energy [1] จาก Induction Heating ของประเทศ ญี่ปุ่น ได้กล่าวถึงการประหยัดพลังงานในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Furnace) ดังนี้

เนื่องจากเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าเป็นเตาหลอมที่ทำงานที่อุณหภูมิสูง และมีประสิทธิภาพสูงอยู่แล้ว และมีพลังงานที่สูญเสียค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับเตาหลอมชนิดอื่น ดังนั้นการประหยัดพลังงานของเตาหลอมชนิดนี้จะเน้นไปที่วิธีการทำงานโดยทั่วๆ ไปจะมีวิธีการประหยัดพลังงานดังนี้

- (1) ปรับปรุงสภาวะการทำงาน (Load Factor) ของเตา หมายถึงเตาที่ใช้ควรใช้กำลังไฟฟ้าที่ค่าสูงสุดตลอด และวัสดุที่ต้องการหลอม ควรมีขนาดที่ง่ายต่อการหลอม
- (2) ควรมีการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม หมายถึง อุณหภูมิในเตาไม่ควรเพิ่มมากกว่าความต้องการ รวมทั้งเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้ควรมีความแม่นยำที่ดี
- (3) ควรทำการหลอมอย่างต่อเนื่อง หมายถึง เตาควรทำงานอย่างต่อเนื่องเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อที่จะลด พลังงานความร้อนสูญเสีย เนื่องจากโครงสร้างเตา
- (4) ควรเลือกวัสดุที่จะใช้ในการหลอมให้เหมาะสม หมายถึง ควรเลือกวัสดุที่ไม่มีสิ่งสกปรกพวก ผุ่น ทราาย มาผสม เนื่องจากถ้ามีเยอะต้องใช้กำลังไฟฟ้าในการหลอมมาก
- (5) พยายามใช้กำลังไฟฟ้าในการหลอมให้มากที่สุดเพื่อลดเวลาในการหลอมให้น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อลดความร้อนสูญเสียที่เกิดจากการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพโดยรวมของเตาดีขึ้นด้วย
- (6) ปรับปรุงการควบคุมการทำงานให้เป็นแบบอัตโนมัติ เพื่อที่จะสามารถควบคุมอุณหภูมิในเตาหลอมได้แม่นยำมากขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้ากับเตาหลอมประเภทอื่น พบว่าเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า มีข้อดีกว่าเตาหลอมประเภทอื่นดังต่อไปนี้

- (1) ประสิทธิภาพทางความร้อนของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะมีค่าสูง เนื่องจากความร้อนจะเกิดขึ้นเฉพาะในตำแหน่งที่ต้องการ คือ ในตัวของชิ้นงานโดยตรง
- (2) ไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และเขม่าที่เกิดจากการเผาไหม้เกิดขึ้น เพราะใช้ไฟฟ้า
- (3) การควบคุมอุณหภูมิทำได้ง่าย



(4) เหมาะสำหรับการหลอมที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงๆ เพราะว่ามันจ่ายเข้าชิ้นงานโดยตรง และใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเตาประเภทอื่น

Sun Y.G. et al. [2] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบการควบคุมของ Ladle Furnace โดยใช้สมการสมดุลความร้อนในการคำนวณเพื่อทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็ก ปริมาณพลังงานป้อนเข้า และการควบคุมที่เหมาะสม

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%

Drzewiecki T.M. et al. [3] ได้ทำการศึกษาการวัดและแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องในกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง เช่น ในโรงงานและอุตสาหกรรมเหล็ก พบว่าถ้ามีการวัดและแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้จะช่วยประหยัดพลังงานลงได้ประมาณ 10% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด

บริษัท อินดักโทเทอม (INDUCTOTHERM) [4] ผู้ผลิตและพัฒนาเตาหลอมแบบเหนียวนำไฟฟ้าได้คิดค้นชุดการทำงานของเตาโดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม (Computer Monitoring and Control for Charging, Melting and Holding Operations) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้ากับอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตา ซึ่งผลที่ได้ทำให้การทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตาได้แม่นยำขึ้น ทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ลงได้

Elliott R. จาก Cast Iron Technology [5] ได้กล่าวถึงประสิทธิภาพโดยทั่วไปไว้ดังนี้ กล่าวคือ เตาหลอมเหนียวนำโดยทั่วไปจะใช้พลังงานไฟฟ้า 430 kWh ในการทำให้เหล็ก 1 ตัน อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 1538 องศาเซลเซียส คิดเป็น 75% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนพลังงานที่เหลือจะสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น และการแผ่รังสีความร้อน

บริษัท เรดายน์ (RADYNE) [6] บริษัทซึ่งดำเนินงานเกี่ยวกับการออกแบบและผลิตเตาหลอมแบบเหนียวนำ มาเป็นเวลากว่า 30 ปี ได้ทดลองและสร้างกราฟสมรรถนะ (Performance Curve) ของเตาในการหลอมโลหะต่างๆ จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิที่ใช้งาน

จากกราฟสมรรถนะ ที่ทำการทดลองทำให้สรุปได้ว่า เหล็กน้ำหนัก 1000 กิโลกรัม ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการหลอมประมาณ 470 kWh ในการหลอมเหล็กจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส

จากกราฟสมรรถนะ ที่ทำการทดลองทำให้สรุปได้ว่า เหล็กน้ำหนัก 1000 กิโลกรัม ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการหลอมประมาณ 470 kWh ในการหลอมเหล็กจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 1450 องศาเซลเซียส

The Energy Conservation Center, Japan (ECC) [7] จาก SEMINAR ON ENERGY CONSERVATION IN IRON CASTING INDUSTRY 1998 ได้ทำการวิเคราะห์สมดุลความร้อนของเตา Induction Furnace แบบ Crucible ชนิดความถี่สูง (ดังแสดงในรูปที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 สมดุลความร้อนของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

รายการ	พลังงานที่ใช้ (%)
พลังงานเข้า	
พลังงานไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป	100
รวม	100
พลังงานออก	
พลังงานที่ให้ผลิตภัณฑ์	69
พลังงานที่สูญเสียกับหม้อแปลง	1
พลังงานสูญเสียในสายไฟ	1.5
พลังงานที่สูญเสียกับคอยล์	16
พลังงานที่สูญเสียในอินเวอร์เตอร์	4
พลังงานที่สูญเสียกับการพาความร้อน	3
พลังงานที่สูญเสียกับการแผ่รังสีความร้อน	2
พลังงานสูญเสียอื่นๆ	3.5
รวม	100

JOHN DAVIES & PETER SIMPSON [8] จาก Induction Heating Handbook ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับความร้อนสูญเสียของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าในรูปแบบของการแผ่รังสีและการพาความร้อน พบว่า การสูญเสียโดยการแผ่รังสีจะเป็นการสูญเสียที่สำคัญโดยจะขึ้นกับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงก็จะยิ่งสูญเสียมากโดยจะสูญเสียไปที่บริเวณผนังเตา

พบว่าสมการการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีจะเป็นไปตามสมการนี้

$$P = 37\varepsilon[T_s^4 - T_a^4]10^{-12} \quad \text{วัตต์/ตารางนิ้ว}$$

โดยที่  $\varepsilon$  คือ ค่า emissivity ของพื้นผิว

$T_s$  คือ อุณหภูมิของพื้นผิว, K

$T_A$  คือ อุณหภูมิบรรยากาศ, K

ในส่วนของ การสูญเสียโดยการพาความร้อน ซึ่งเป็นการสูญเสียในส่วน้อย โดยจะเกิดขึ้น เนื่องจากการพาความร้อนของอากาศที่พัดผ่านไป

พบว่าสมการการสูญเสียความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนจะเป็นไปตามสมการนี้

$$P = 1.54(\Delta\theta)^{4/3} \quad \text{วัตต์/ตารางนิ้ว}$$

โดยที่  $\Delta\theta$  คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของพื้นผิวเทียบกับบรรยากาศ, K

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่าเทคโนโลยีการวัดอุณหภูมิโลหะ หลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงๆ ของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ยังไม่มีอุปกรณ์ชนิดใดที่สามารถวัด อุณหภูมิสูงๆ โดยตรงได้อย่างต่อเนื่อง การควบคุมอุณหภูมิของโลหะที่หลอมเหลวจะใช้วิธีการวัด ทางอ้อม โดยการวัดตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา เช่น พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อุณหภูมิ น้ำหล่อเย็น เป็นต้น และใช้สมการสมดุลความร้อนของเตาในการคำนวณหาอุณหภูมิของ โลหะในเตา และผลของการวัดอุณหภูมิโลหะในเตาได้อย่างต่อเนื่องทำให้สามารถประหยัด พลังงานลงได้ประมาณ 10%

แม้ว่าจะมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่าอุณหภูมิของโลหะหลอมละลายใน เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าและการควบคุมเตาหลอมจำนวนหนึ่ง แต่รายละเอียดของวิธี การยังไม่มีมีการเปิดเผยมากนัก ประกอบกับระบบควบคุมรุ่นใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงจะติดตั้งมากับ เตาหลอมรุ่นใหม่ งานวิจัยนี้เน้นออกแบบระบบประมาณค่าอุณหภูมิและระบบควบคุมเตาหลอม สำหรับเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ติดตั้งใช้งานในบริษัทฯ ซึ่งมีอยู่เดิม

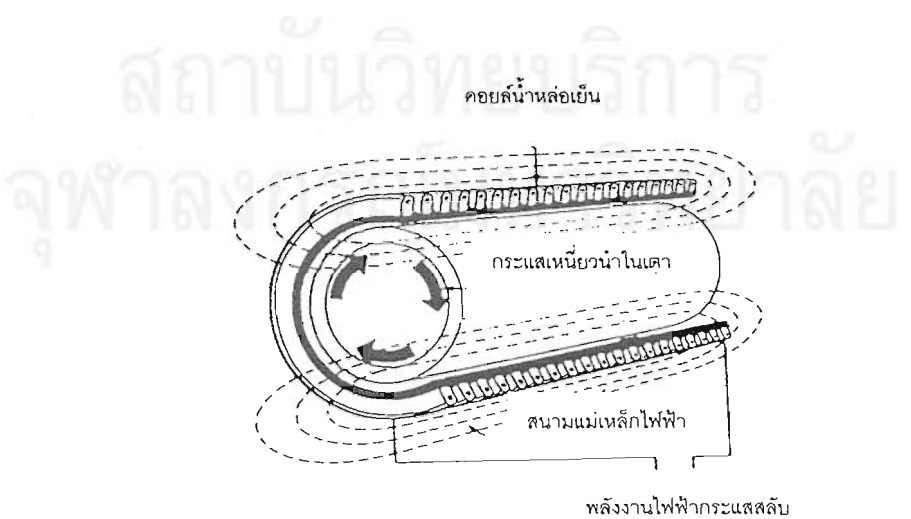
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เดาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า

3.1 ส่วนประกอบและการทำงานของเดาหลอม

จากการศึกษาลักษณะการทำงานของเดาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า พบว่าการให้ความร้อนแก่เหล็กที่อยู่ในเดา จะเป็นการให้ความร้อนที่เรียกว่า การให้ความร้อนแบบเหนียวนำ ซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลวนในเหล็ก และทำให้เหล็กร้อน

เครื่องให้ความร้อนแบบเหนียวนำจะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดเหนียวนำ ขดลวดนี้จะทำหน้าที่คล้ายขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กความถี่สูง เมื่อวางชิ้นงานในสนามแม่เหล็กนี้ ก็เกิดกระแสไหลวนในชิ้นงานในทิศทางที่จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มาจากด้านสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแหล่งจ่ายพลังงาน ชิ้นงานจึงทำหน้าที่คล้ายขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงที่ถูกลัดวงจร อันที่จริงปรากฏการณ์ทำนองนี้ก็เกิดขึ้นในแกนหม้อแปลงหรือขอมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสไหลวนในแกนดังกล่าวทำให้เกิดการสูญเสียเป็นความร้อนซึ่งในกรณีของหม้อแปลงหรือมอเตอร์เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ ดังนั้นจึงพยายามเพิ่มความต้านทานให้แก่แกนและใช้แผ่นเหล็กบางๆ เป็นแกน เพื่อลดกระแสไหลวน ในกรณีการให้ความร้อนแบบเหนียวนำเป็นการนำปรากฏการณ์ที่เป็นปัญหาสำหรับหม้อแปลงและมอเตอร์มาใช้ให้เป็นประโยชน์



รูปที่ 3.1 ลักษณะการให้ความร้อนของเดาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า

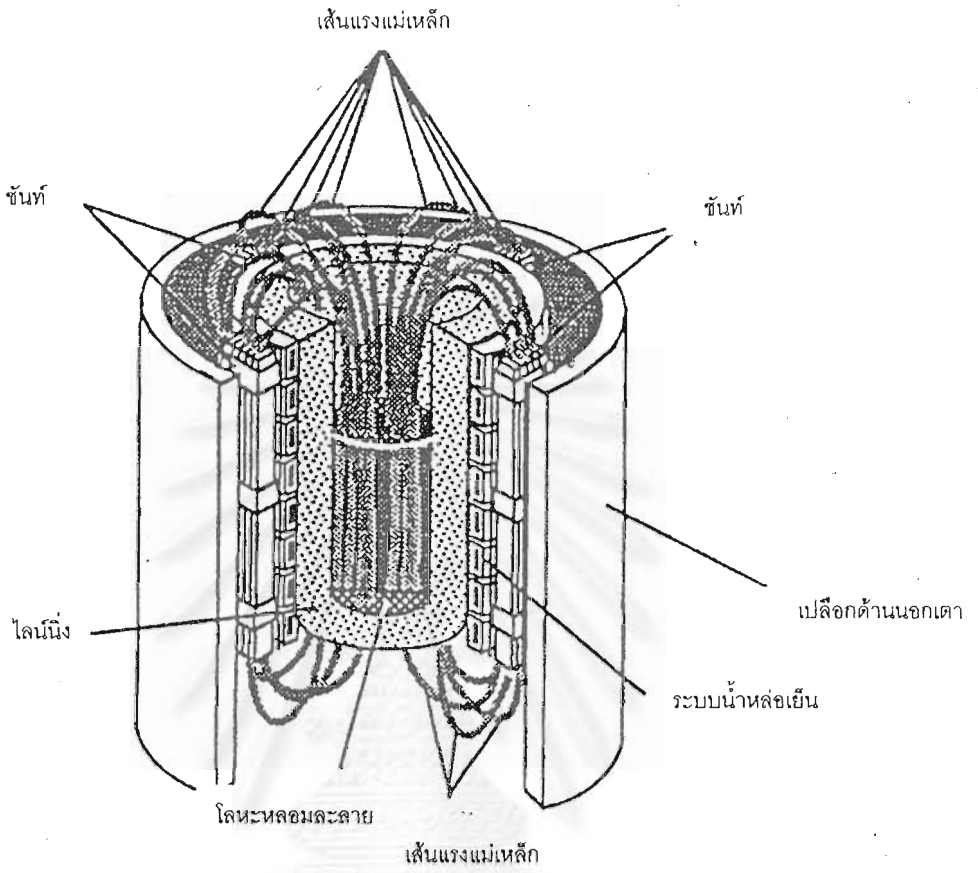
กล่าวคือการให้ความร้อนแบบเหนี่ยวนำ เป็นทั้งปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าคือ การเหนี่ยวนำของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การนำกระแสที่ผิว และปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อน เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านขดลวดเหนี่ยวนำที่มีชิ้นงานอยู่ภายใน ก็เกิดสนามแม่เหล็กคล้องผ่านชิ้นงานในระดับความลึกผิวทำให้เกิดความร้อนที่ผิวของชิ้นงานและความร้อนที่เกิดขึ้นจะถ่ายเทไปบริเวณอื่นโดยการนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน (ดังแสดงในรูปที่ 3.1)

ส่วนประกอบของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า ที่สำคัญแบ่งเป็น 3 ระบบ คือ ระบบโครงสร้างระบบไฟฟ้า และระบบน้ำหล่อเย็น ในการออกแบบระบบแต่ละระบบนั้นจะมีระบบป้องกันอย่างดี เช่น ในระบบไฟฟ้า จะมีระบบป้องกันกระแสไม่ไหลออกมานอกระบบควบคุม ในระบบน้ำหล่อเย็น จะมีระบบป้องกันการรั่วไหลของน้ำโลหะที่แทรกผ่านชั้นไลนิง (Lining) และมีระบบการทำงานที่มีรายละเอียดชัดเจน เช่น เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่ขดคอยล์ ถ้าไม่มีน้ำไหลในระบบก็จะจ่ายกระแสไฟไม่ได้ เป็นต้น

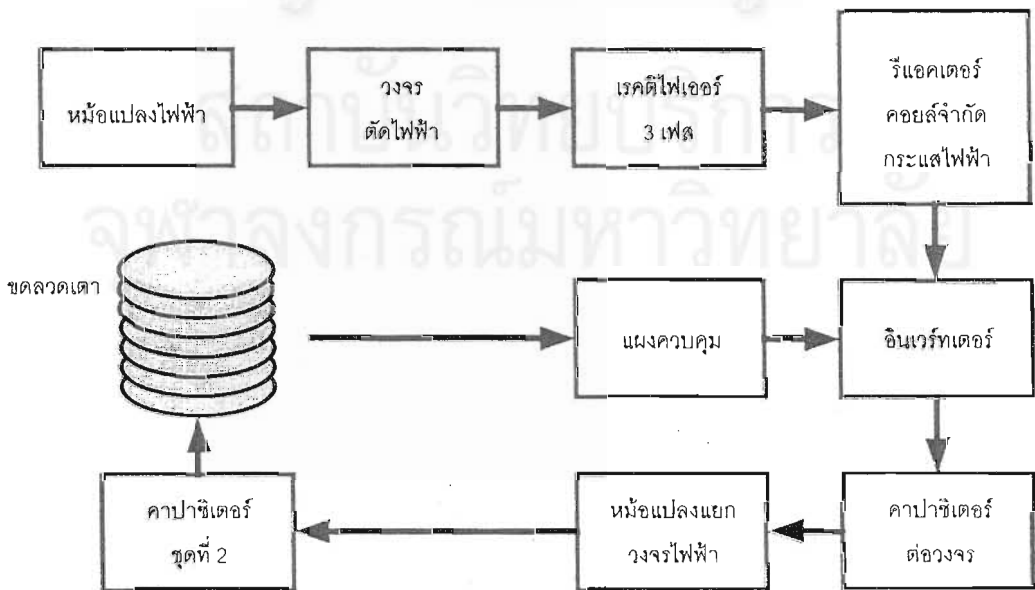
ในระบบโครงสร้างของเตา โดยทั่วไปได้แบ่งชนิดของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า ออกเป็น 3 ชนิด ตามชนิดโครงสร้างและความถี่ของกำลังงานที่ใช้ คือ แบบ Crucible มีทั้งความถี่สูงและต่ำ และแบบ Channel ความถี่ต่ำ (ดังแสดงในตารางที่ 3.1) นอกจากนี้ในโครงสร้างเตาจะประกอบไปด้วยชุด คอยล์ ชันท์ (Shunt) ซึ่งจะเป็นตัวเก็บเส้นแรงแม่เหล็ก ไม่ให้เกิดการเหนี่ยวนำไปยังโครงสร้างของตัวเตาที่เป็นเหล็ก ระบบไฮดรอลิก ซึ่งใช้สำหรับยกเตา ตัวโครงสร้างเหล็ก ฉนวน เช่น โม่กา ซิลิกอน เทปลอน และสายน้ำ โดยมีซีเมนต์คอยล์เป็นตัวหุ้มคอยล์เพื่อป้องกันการแทรกของน้ำโลหะผ่านชั้นไลนิงมาถูกคอยล์ (ดังแสดงในรูปที่ 3.2)

ตารางที่ 3.1 ประเภทและลักษณะการทำงานของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ประเภทของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า	ความถี่ (Hz)	การทำงาน	ความเร็วในการหลอม	ปริมาณการหลอม	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 3.2 โครงสร้างของเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 โคอะแกรมระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า จะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญ (ดังแสดงในรูปที่ 3.3) ดังต่อไปนี้

- (1) หม้อแปลงจากสายเมน จะใช้เป็นตัวแยกวงจรอิสระระหว่าง 3 เฟส อาจใช้สำหรับแปลงไฟฟ้าขึ้นหรือลงตามความต้องการของเตา
- (2) วงจรตัดไฟฟ้า เป็นชุดตัดไฟที่ทำงานไวเป็นพิเศษที่ใช้กับเครื่องมือที่มีบริดจ์เรกติไฟเออร์ เป็นไฟ 3 เฟสธรรมดา หรือเป็นชุดตัดไฟธรรมดา เมื่อใช้กับเครื่องที่มี เอชไอ
- (3) เรกติไฟเออร์ 3 เฟส อาจจะเป็น 3 เฟส ไดโอด บริดจ์เรกติไฟเออร์ หรือเอชไอ ชุดตัดไฟใช้ระบบเอสซีอาร์แทนไดโอด
- (4) รีแอกเตอร์จำกัดกระแสไฟฟ้า เป็นส่วนหนึ่งของวงจรรองไฟกระแสตรง และยังมีหน้าที่หยุดการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าอย่างกะทันหัน อันเนื่องมาจากวงจรเกิดขัดข้อง
- (5) คาปาซิเตอร์กรองกระแสไฟฟ้า ใช้กรองไฟฟ้าที่ออกจากเรกติไฟเออร์ และจ่ายกระแสให้แก่อินเวอร์เตอร์อย่างสม่ำเสมอ
- (6) อินเวอร์เตอร์ ใช้เปลี่ยนไฟกระแสตรง เป็นกระแสสลับ ที่ขนาดความถี่ต่างๆ กัน
- (7) คาปาซิเตอร์ต่อวงจร ชุดคาปาซิเตอร์นี้ใช้ต่อไฟกระแสสลับ เข้ากับหม้อแปลงความถี่สูง เมื่อใช้กับระบบหม้อแปลงความถี่สูง สำหรับเครื่องที่ใช้กับหม้อแปลงด้านเมนด้านเดียว คาปาซิเตอร์ชุดนี้ จะใช้เป็นชุดเพื่อปรับค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ ซึ่งจะส่งตรงไปยังขดลวดโดยตรง
- (8) หม้อแปลงแยกวงจรไฟฟ้า (ความถี่สูง) ใช้สำหรับแยกวงจรอินเวอร์เตอร์กับวงจรแหล่ง และใช้สำหรับลดแรงดันไฟฟ้าหรือเพิ่มกระแสในขดลวด
- (9) คาปาซิเตอร์ชุดที่ 2 เมื่อเชื่อมวงจรกับขดลวดเตา และเป็นชุดปรับวงจรแหล่งให้มีความถี่สูงสุดในขณะที่เตาหลอมอยู่ในสภาพต่างๆ กัน
- (10) ขดลวดเตา ใช้ทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามาเหนี่ยวนำทำให้โลหะในเตาเกิดความร้อน
- (11) แผงควบคุม แผงนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณจากส่วนต่างๆ ของระบบและใช้ในการควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์

ระบบน้ำหล่อเย็นของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้านั้น น้ำที่ใช้ในเตาหลอมนั้นนับว่าเป็นสิ่งสำคัญอันดับสองรองจากระบบไฟฟ้า เพราะว่าในระบบไฟฟ้าจะมีความร้อนเกิดขึ้นขณะหลอม ถ้าไม่มีน้ำเป็นตัวระบายความร้อนจะทำให้ระบบทั้งหลายไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นน้ำที่ใช้จึงต้องมีคุณภาพตามที่กำหนด คือจะต้องสะอาดและป้องกันการอุดตัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วระบบที่ใช้จะมีอยู่ 2 ระบบ คือ ระบบเปิดกับระบบปิด



ระบบเปิด ปกติแล้วระบบเปิดเป็นระบบที่เสียค่าใช้จ่ายถูกที่สุดเพราะว่าอุปกรณ์ที่ใช้จะน้อยกว่าระบบปิดมาก แต่ว่าเมื่อใช้ไปแล้วปัญหาจะเกิดตามมามากมายคือ น้ำที่ผ่านการระบายความร้อนจากหอหล่อเย็น (Cooling Tower) เมื่อตกลงยังบ่อเก็บน้ำจะผ่านบรรยากาศซึ่งจะมีพวกออกซิเจนทำให้เกิดการกัดกร่อนง่าย เมื่อน้ำใช้ไปเรื่อยๆ น้ำจะแห้งซึ่งจะมีการเติมน้ำเข้ามาก็จะเป็นการเพิ่มความกระด้าง เมื่อมีความกระด้างเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดตะกอนติดตามผนังท่อทำให้ระบายความร้อนไม่ดี ทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ร้อนมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง

ระบบปิด น้ำที่ใช้หล่อเย็น จะไม่สัมผัสกับอากาศ ทำให้คุณภาพน้ำไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้จะมีการเติมน้ำเข้าไปในระบบบ้าง แต่ก็ยังเป็นน้ำที่มีคุณภาพดี ปัญหาต่างๆที่ตามมาจะไม่เกิดเหมือนระบบเปิด แต่การลงทุนครั้งแรกจะสูงกว่าระบบเปิดมาก แต่เมื่อเทียบกับราคาเตาและอายุการใช้งานของเตาแล้วจะคุ้มทุนกว่า

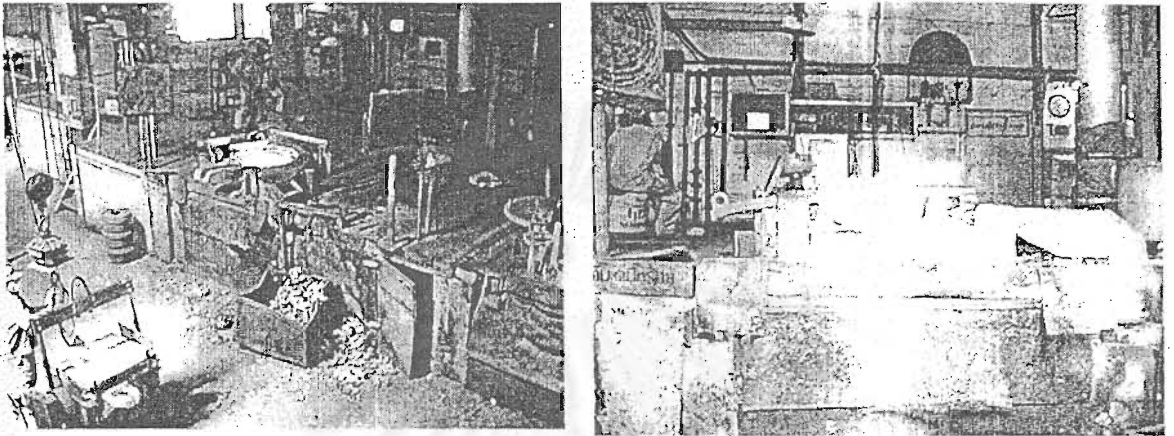
### 3.2 เตาหลอมที่ใช้ในงานวิจัย

ลักษณะเตาที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ เป็นเตาหลอมแบบเหนียวนำไฟฟ้าแบบ Crucible ชนิด ความถี่สูง (500 Hz) ขนาดกำลังผลิต (capacity) 2 ตัน (ตัวที่ 1) ตั้งอยู่ที่โรงงาน สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด บริษัทในเครือกลุ่มบริษัทสมบูรณ์ (ดังแสดงในรูปที่ 3.4) ทำการหลอมเหล็กจากอุณหภูมิห้องให้ได้อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ใช้เวลาโดยประมาณ 45 นาที ขนาดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาสูงสุดอยู่ที่ 1200 กิโลวัตต์ โดยมีขั้นตอนการหลอมดังต่อไปนี้

- (1) นำสารเคมี (Chemical) ใส่ลงในเตาที่ทำงาน เต็ม C ใส่ในเตา 10-15 kg, เต็ม Si ใส่ในเตา 0-3 kg, เต็ม Mn ใส่ในเตา 4-6 kg
- (2) เปิดไฟเข้าเตาโดยเปิดสวิตช์ NO. 10 (kW = 900-1200)
- (3) หลอมให้เหล็กและเคมีในเตาจนกระทั่งละลาย ใช้เวลาประมาณ 35-40 นาที
- (4) เมื่อเหล็กและเคมีละลายหมดแล้วให้ปิดไฟเข้าเตาโดยปิดสวิตช์มาที่ NO. 1 (kW=0)
- (5) ดัก Slag hold โรยลงบนน้ำเหล็กให้ทั่วเตา 2 กระบวย เสร็จแล้วเอาเหล็กเขี่ย Slag คู้ยให้ทั่ว เพื่อให้ Slag hold จับสิ่งสกปรกในเตา และเมื่อ Slag จับสิ่งสกปรกในเตาแล้วให้นำออกจากเตาให้หมด
- (6) ตรวจอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตาให้ได้ 1450-1480 องศาเซลเซียส
- (7) ตักน้ำเหล็กในเตาเทลงในแบบ (Test Piece) เพื่อนำไปตรวจค่าเคมีตามข้อกำหนด ซึ่งถ้าผลเป็นไปตามข้อกำหนด ให้เปิดไฟเข้าเตาหลอมต่อให้ได้อุณหภูมิ 1520 องศาเซลเซียส
- (8) ปิดไฟเข้าเตาหลอมเพื่อลดอุณหภูมิให้เหลือ 1510-1500 องศาเซลเซียส เพื่อรอเทต่อไป

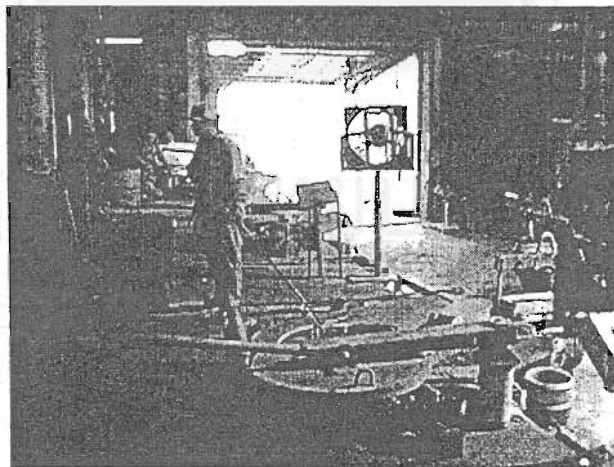


(9) ในขณะที่ร่อเท้าเกิดข้อผิดพลาดในกระบวนการผลิต ทำให้ต้องรอนาน ให้ปรับสวิตช์ไปที่ NO. 2 (kW = 250) เพื่อทำการรักษาอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาได้



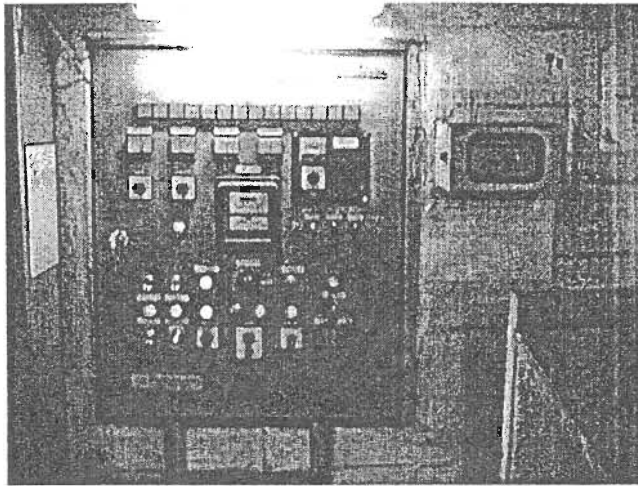
รูปที่ 3.4 เตาหลอมแบบเหนียวนำไฟฟ้าที่ใช้ทดลอง

ระบบการควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้าในปัจจุบัน จะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลจุ่มลงไปในเตาเพื่อวัดอุณหภูมิเป็นครั้งๆ ไป (ดังแสดงในรูปที่ 3.5) และอาศัยการปรับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาเพื่อควบคุมอุณหภูมิอีกที ซึ่งในการควบคุมอุณหภูมินี้จะอาศัยความชำนาญของผู้ดูแลเตาเป็นสำคัญ โดยดูจากสีของน้ำเหล็กและเวลาในการหลอมโดยประมาณ



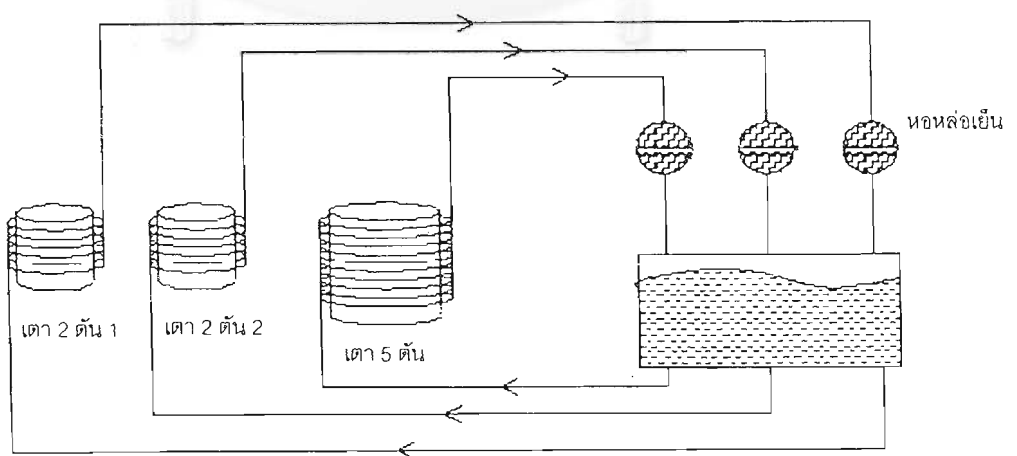
รูปที่ 3.5 การวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา

ระบบจ่ายไฟเข้าเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้า 2 ตัน 1 จะใช้หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 1560 kVA โดยรับไฟจากการไฟฟ้านครหลวง ในระบบ 24 กิโลโวลต์ จ่ายเข้าสู่เตา โดยมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 1200 kW และกระแสไฟ 33 แอมป์ (ดังแสดงในรูปที่ 3.6)



รูปที่ 3.6 ตู้ควบคุมของเตา 2 ตัน เตานหมายเลข 1

ระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงานที่ใช้จะใช้เป็นระบบเปิดโดยจะมีน้ำบางส่วนสัมผัสกับบรรยากาศ ซึ่งระบบท่อน้ำหล่อเย็นของแต่ละเตาจะประกอบไปด้วยท่อน้ำเข้าและท่อน้ำออกวิ่งวนอยู่รอบๆ เตาด้วยอัตราการไหลคงที่ค่าหนึ่ง และจะควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ทางออกไว้ไม่เกิน 70 องศาเซลเซียส ซึ่งถ้าอุณหภูมิเกินระบบไฟจะตัดไฟเข้าเตาทันที เพื่อป้องกันคอลล์ของเตาร้อนเกินและอาจทำให้คอลล์ของเตาเสียหายได้ โดยระบบน้ำหล่อเย็นของแต่ละเตาจะวิ่งแยกออกจากกันแล้วผ่านหอหล่อเย็น (Cooling Tower) ของแต่ละตัวลงสู่แทงค์น้ำ เสร็จแล้วจะมีปั๊มน้ำของแต่ละเตาปั๊มน้ำไปใช้ที่เตาอีกทีวนไปเรื่อยๆ (ดังแสดงในรูปที่ 3.7)

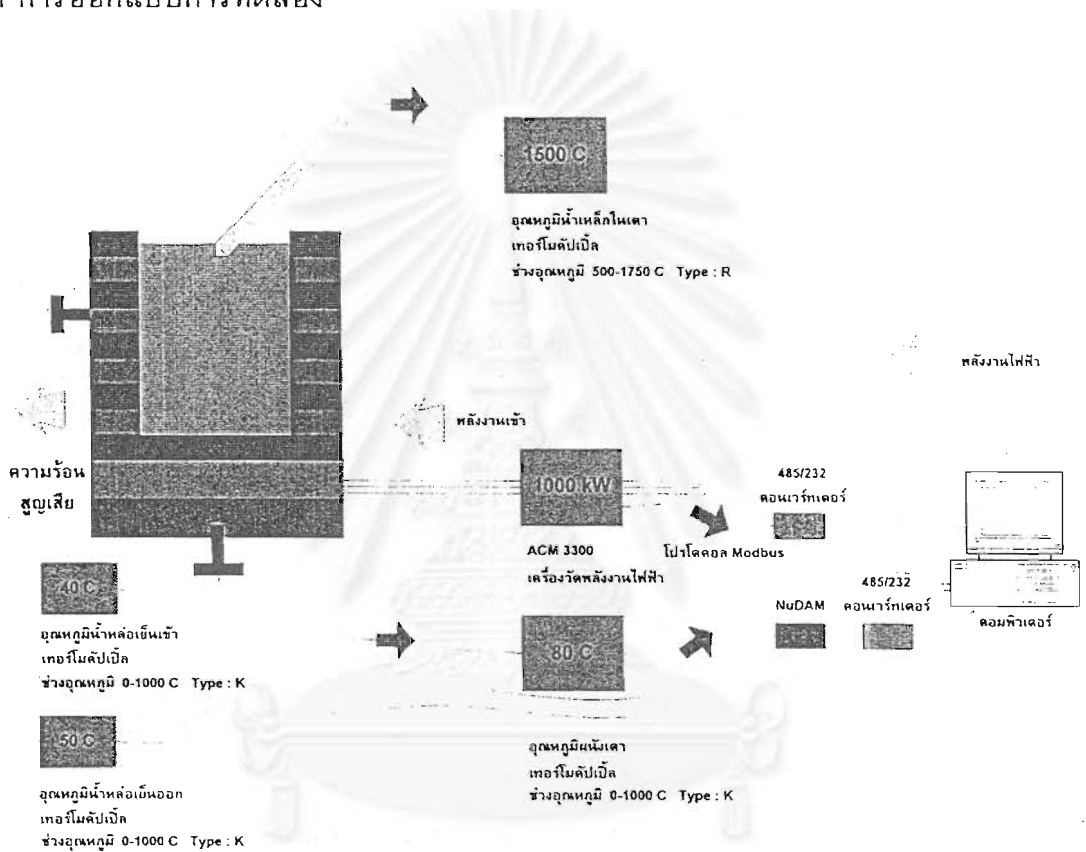


รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงานสมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียว

## บทที่ 4

### การทดลองและเครื่องมือที่ใช้ทดลอง

#### 4.1 การออกแบบการทดลอง



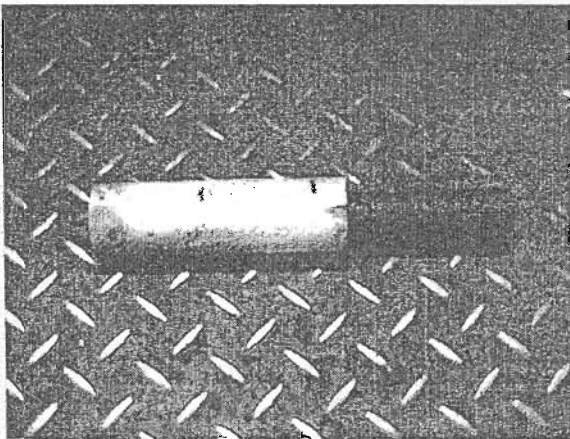
รูปที่ 4.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองนี้จะเสนอการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมเหนียวไฟฟ้าด้วยวิธีทางอ้อม ซึ่งการวัดอุณหภูมิโลหะโดยทางอ้อมนั้นจะวัดจากจากปัจจัยอื่นๆ ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของน้ำเหล็ก การวัดโดยวิธีนี้จะวัดปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่สามารถวัดได้ง่าย อุปกรณ์ราคาไม่แพง และสามารถวัดได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ เนื่องจากการวัดกระทำที่จุดที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะหลอมละลาย เช่น การวัดอุณหภูมิของโครงสร้าง (ผนังเตาและหรือฝาเตา) ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำ หรือ วัดปริมาณการใช้ไฟฟ้า เช่น แรงดัน กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า เพื่อให้ประมาณหาอุณหภูมิน้ำโลหะที่อยู่ในเตาหลอม ซึ่งวิธีนี้ราคาอุปกรณ์จะมีราคาถูกกว่าแบบวัดโดยตรงสัมผัสกับโลหะหลอมเหลว แต่การวัดในลักษณะดังกล่าวเกี่ยวข้องกับตัวแปรมากมาย ตัวอย่างเช่น การวัดอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอกจะเกี่ยวข้องกับความสามารถ

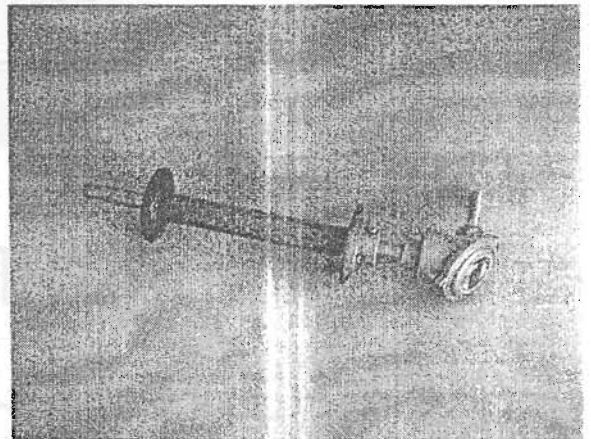
ในการเก็บความร้อนของเตา ความสามารถในการสะสมความร้อนทำให้อุณหภูมิด้านนอกและด้านในมีความสัมพันธ์กันในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ ดังนั้นแนวคิดในการออกแบบการทดลอง จะใช้การวัดอุณหภูมิทางอ้อม เพื่อให้ได้วิธีการวัดที่มีความแม่นยำและราคาไม่แพงนัก โดยจะทำการหาแบบจำลองของเตาหลอมเพื่อให้ประกอบในการประมาณหาอุณหภูมิของโลหะหลอมละลายผ่านทางสมการสมดุลความร้อน

จากรูปที่ 4.1 เป็นการออกแบบการทดลองการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กโดยทางอ้อม ซึ่งการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กโดยทางอ้อมนี้ จะพยายามหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา ซึ่งจากการศึกษาพบว่าตัวแปรที่มีผลต่ออุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา ได้แก่ พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และความร้อนสูญเสียรอบๆเตา การวัดค่าต่างๆ ตามที่ได้กล่าวมาจะใช้อุปกรณ์วัดของโรงงานที่ติดตั้งอยู่เดิม และติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมเฉพาะที่จำเป็นเท่านั้น ซึ่งรายการอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดมีดังนี้

- (1) เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด : R ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 500-1750 องศาเซลเซียส (อุปกรณ์ของโรงงาน) ใช้วัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา (ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ก.)
- (2) เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด : K ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0-1000 องศาเซลเซียส ใช้วัดอุณหภูมิที่ผิวด้านล่างของเตาและอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น เข้า-ออก (ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ข.)



ก) เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด R



ข) เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K

รูปที่ 4.2 เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิดต่างๆ

เทอร์โมคัปเปิ้ลเป็นอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิซึ่งจะประกอบด้วยโลหะสองชนิดที่แตกต่างกันเชื่อมติดกัน และเมื่อทำการวัดอุณหภูมิจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างโลหะทั้งสองขึ้นมา โดยความต่างศักย์ที่ว่านี้ จะมีความสัมพันธ์กับความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่จุดวัดกับอุณหภูมิที่อ้างอิง การเลือกใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลที่เหมาะสมกับงานนั้นจะต้องดูว่าชนิดของเทอร์โมคัปเปิ้ล

ที่เลือกนั้นเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ต้องการวัดหรือไม่ และช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิที่ต้องการวัดอยู่ในช่วงเดียวกับเทอร์โมคัปเปิ้ลหรือไม่ (ดังแสดงในตารางที่ 4.1)

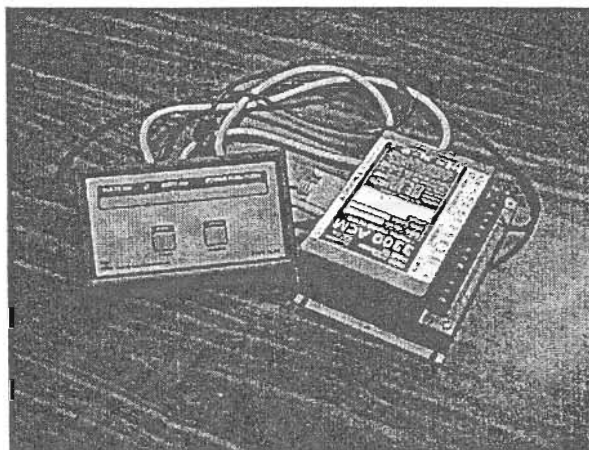
ตารางที่ 4.1 ชนิดและช่วงอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิ้ล

ชนิด	วัสดุ	ช่วงอุณหภูมิที่วัดได้
B	แพทตินัม 30% โรเดียม (+)	2500-3100 F
	แพทตินัม 6% โรเดียม (-)	1370-1700 C
C	ทังสเตน 5% ฮรีเนียม (+)	3000-4200 F
	ทังสเตน 26% ฮรีเนียม (-)	1650-2315 C
E	โครเมียม (+)	200-1650 F
	คอนสแตนแทน (-)	95-900 C
J	เหล็ก (+)	200-1400 F
	คอนสแตนแทน (-)	95-760 C
K	โครเมียม (+)	30-1830 F
	อลูมิเนียม (-)	0-1000 C
N	นิโครซิล (+)	200-2300 F
	นิซิล (-)	95-1260 C
R	แพทตินัม 13% โรเดียม (+)	930-3180 F
	แพทตินัม (-)	500-1750 C
S	แพทตินัม 10% โรเดียม (+)	1800-2640 F
	แพทตินัม (-)	980-1450 C
T	ทองแดง (+)	-330-660 F
	คอนสแตนแทน (-)	-200-350 C

(3) ACM 3300 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (อุปกรณ์ของโรงงาน)

เครื่อง ACM 3300 เป็นเครื่องที่ผลิตโดยบริษัท Power Measurement Ltd. ในประเทศแคนาดา โดยเครื่องที่ใช้จะเป็นรุ่น Model: 3300 ACM (ดังแสดงในรูปที่ 4.3) มีความสามารถในการวัดค่าพลังงานไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า ค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า สำหรับไฟฟ้า 3 เฟส มีจอแสดงผลแบบตัวเลข และมีระบบสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus (รายละเอียดแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.)

อุปกรณ์ ACM 3300 นี้จะใช้วัดค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าเตาหลอมโลหะค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าที่วัดได้จะส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลด้วยโปรโตคอล Modbus ในโหมด RTU ผ่านตัวแปลง 485/232 คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4.3 ACM 3300 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า

#### (4) 485/232 คอนเวอร์เตอร์

อุปกรณ์ 485/232 คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้เรียกว่า NuDAM ผลิตขึ้นโดยบริษัท ADLink Technology Inc. รุ่น ND-6520 (ดังแสดงในรูปที่ 4.4) ใช้สำหรับแปลงสัญญาณจากระบบเครือข่าย RS-485 ไปเป็น RS-232 เพื่อนำข้อมูลเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์การสื่อสารกับ เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า ACM 3300 และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ NuDAM รุ่น ND-6018 จะกระทำผ่านตัวแปลงนี้ (รายละเอียดแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.)



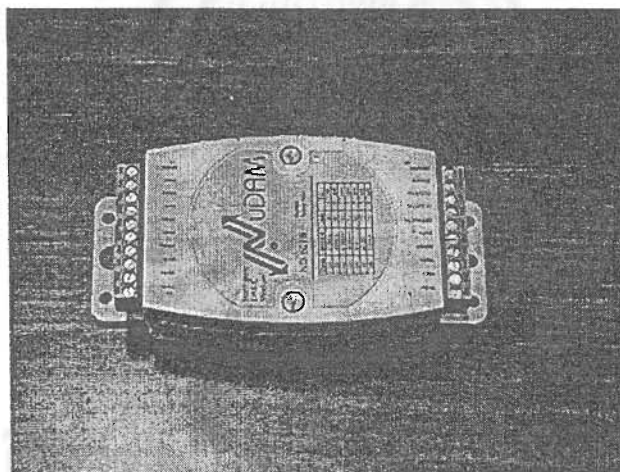
รูปที่ 4.4 485/232 คอนเวอร์เตอร์ รุ่น ND-6520



#### (5) เครื่องรับส่งสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ล (NuDAM)

เครื่องรับส่งสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้ ผลิตโดย บริษัท ADLink Technology Inc. เป็นอุปกรณ์ NuDAM รุ่น ND-6018 (ดังแสดงในรูปที่ 4.5) ใช้รับส่งค่าจากตัวเทอร์โมคัปเปิ้ล โดยตัว NuDAM รุ่น ND-6018 หนึ่งตัวสามารถรับค่าสัญญาณได้ 8 ช่องสัญญาณ ในตัว NuDAM แต่ละตัวนี้จะมี Address ID อยู่เพื่อใช้สำหรับติดต่อบนเครือข่าย RS-485 โดยใช้ โปรโตคอล 485 ซึ่งในตัว NuDAM นั้นนอกจากวัดอุณหภูมิแล้วยังสามารถวัด ความดัน โวลต์ กระแส และรับสัญญาณดิจิตอลได้อีกด้วย อุปกรณ์จะสุ่มค่าวัดที่อัตราประมาณ 10 ค่าต่อวินาที และสามารถปรับค่าสัญญาณเข้าได้หลายค่าประกอบด้วย  $\pm 15\text{mV}$ ,  $\pm 50\text{mV}$ ,  $\pm 100\text{mV}$ ,  $\pm 500\text{mV}$ ,  $\pm 1\text{V}$ ,  $\pm 2.5\text{V}$  (รายละเอียดแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.)

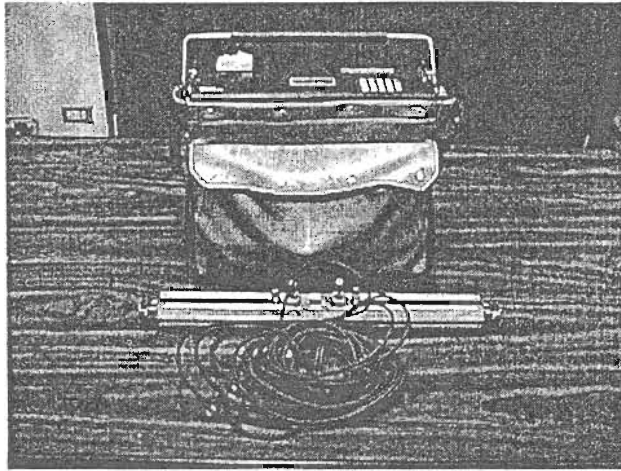
อุปกรณ์นี้ จะใช้ในการรับค่าศักย์ไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิ้ลต่างๆ โดยจะรับค่าอุณหภูมิของผนังเตาด้านนอก ค่าอุณหภูมิเข้าและออกของน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิของอากาศรอบเตาหลอม



รูปที่ 4.5 NuDAM รุ่น ND-6018

#### (6) เครื่องวัดอัตราการไหล (Ultrasonic flow meter)

เครื่องวัดอัตราการไหล เป็นเครื่องที่ผลิตโดยบริษัท Fuji Electric รุ่น FLB20004 (ดังแสดงในรูปที่ 4.6) ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น ซึ่งจะทำให้หลักการของการสะท้อนของแสงอุตราสไนกไปกระทบที่ผิวท่อแล้วกับมาที่เครื่องอีกทีหนึ่ง ซึ่งความสะอาดของผิวท่อทั้งด้านในและด้านนอก จะมีผลกับค่าที่วัดได้ ดังนั้นจึงจะต้องทำความสะอาดให้ดีก่อนทำการวัด



รูปที่ 4.6 เครื่องวัดอัตราการไหล (Ultrasonic flow meter)

จากอุปกรณ์ที่ใช้ทำการตรวจวัดตามรายการอุปกรณ์ จะทำให้สามารถวัดค่าของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาได้ดังนี้ ในส่วนของพลังงานที่ใส่ให้กับเตาหลอม พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าจะสามารถวัดออกมาเป็นค่าพลังงานไฟฟ้าโดยการแปลงสัญญาณจากเครื่อง ACM 3300 เครื่องวัดพลังงานไฟฟ้า (อุปกรณ์ของโรงงาน) ผ่านตัว 485/232 คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้โปรโตคอล Modbus ในการติดต่อสื่อสารผ่านเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ ในส่วนของความร้อนสูญเสียรอบเตาจะอาศัยการวัดอุณหภูมิผิวได้ผิวเตาซึ่งจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K ติดเข้าไปในผิวได้เตาชั้นอิฐทนไฟ และในส่วนของความร้อนสูญเสียที่คอลล์จะอาศัยการวัดอุณหภูมิน้ำเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็นและอัตราการไหลของน้ำ โดยในส่วนของอุณหภูมิจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K เช่นเดียวกัน แต่ว่าค่าความร้อนสูญเสียนี้ยังไม่ใช่ค่าทั้งหมดยังมีความร้อนสูญเสียที่อื่นอีก เช่น บริเวณปากเตาและในหม้อแปลง เป็นต้น โดยที่ค่าอุณหภูมิที่วัดได้นี้จะผ่านเข้าตัว NuDAM ซึ่งเป็นเครื่องที่รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ล และผ่านเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยใช้ โปรโตคอล 485 ในการติดต่อสื่อสาร ในส่วนของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นนั้น จะวัดอัตราการไหลโดยเครื่อง Ultrasonic Flowmeter โดยอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาจะวัดโดยใช้ เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด R (อุปกรณ์ของโรงงาน) จุ่มวัดเป็นครั้งๆ ไป ซึ่งจะทำการวัดได้ก็ต่อเมื่อน้ำเหล็กในเตากลายเป็นของเหลวหมดแล้วเท่านั้น (อุณหภูมิประมาณ 1300 องศาเซลเซียส)

ในการออกแบบการทดลองนี้ จะมีปัญหาสำคัญที่ต้องคำนึงถึง กล่าวคือค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ที่วัดได้นั้นจะมีค่าที่แกว่งไปมา เนื่องจากสัญญาณรบกวนเข้ามาตามสายเทอร์โมคัปเปิ้ล ทำให้ค่าที่วัดได้ไม่สามารถนำมาใช้คำนวณได้ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้ ก็เนื่องมาจากสนามแม่เหล็กอื่นเนื่องมาจากกระแสไหลวนของเตาหลอมนั่นเอง จึงต้องระวังและป้องกันโดยจะต้อง



ซิลด์สายสัญญาณไม่ให้สนามแม่เหล็กเข้ามาสู่เครื่องมือวัดตามสายได้ ซึ่งวิธีการซิลด์นี้ก็ทำได้โดยใช้สายสัญญาณที่เป็นสายซิลด์และต้องใส่ไว้ในท่อเหล็กอีกทีเพราะว่าสัญญาณรบกวนของเดาหลอมมีค่าแรงมาก (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข.)

#### 4.2 ภาษาที่ใช้สื่อสารกับเครื่องมือวัด

เนื่องจากการประมาณค่าอุณหภูมิทางอ้อมที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้จะนำค่าสภาพแวดล้อมต่างๆ ของเดาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาประมวลผล และประมาณค่าอุณหภูมิของโลหะหลอมละลายในเดา การประมวลผลจะกระทำบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลซึ่งมีศักยภาพสูงมากพอสำหรับการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความสลับซับซ้อน ในส่วนนี้ของวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงภาษาและวิธีการสื่อสารที่เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลแลกเปลี่ยนข้อมูลจากเครื่องมือวัด โดยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลจะสื่อสารกับเครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้า ACM 3300 ด้วย โปรโตคอล Modbus โดยผ่านตัวแปลง 485/232 คอนเวอร์เตอร์ และสื่อสารกับเครื่องรับส่งสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ล NuDAM ด้วยภาษาที่ ADLink Technology Inc พัฒนาขึ้น รูปแบบการสื่อสารเป็นแบบ ASCII TEXT บนระบบเครือข่าย RS-485 ทั้งนี้ รายละเอียดของภาษาที่ใช้ในการสื่อสารกับเครื่องมือวัดจะได้กล่าวถึงต่อไป

##### 4.2.1 โปรโตคอล Modbus

โปรแกรมควบคุม Modicon สามารถใช้ติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ต่างๆ ภายใต้อุปกรณ์เครือข่ายหลายๆ แบบ เช่น Modicon Modbus, Modbus Plus, MAP, Ethernet โดยสามารถติดต่อเข้ากับเครือข่ายทาง port ของตัวควบคุม ภาษาที่ใช้ในตัวควบคุม Modicon จะเรียกว่าโปรโตคอล Modbus โปรโตคอลตัวนี้จะใช้ติดต่อตอบโต้กับอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งจะสามารถป้องกัน error ที่เกิดขึ้นและจะรายงานให้ผู้ใช้ทราบ โดยในการสื่อสารนั้นจะมีรูปแบบในการติดต่อที่แน่นอน

โปรโตคอล Modbus จะมีมาตรฐานในการส่งผ่านข้อมูลที่แน่นอนซึ่งในระหว่างการสื่อสารแต่ละครั้งจะต้องกำหนด address ของอุปกรณ์ที่ติดต่อ กำหนดรูปแบบการสื่อสาร ซึ่งเมื่อกำหนดรูปแบบถูกแล้ว เวลาติดต่อไปที่อุปกรณ์ตัวนั้น อุปกรณ์ตัวนั้นจะติดต่อกลับมาโดยใช้โปรโตคอล Modbus ซึ่งโปรโตคอล Modbus นี้จะมีระบบป้องกันความผิดพลาดในระหว่างการติดต่อข้อมูลเรียกว่า Error-checking

การติดต่อบนเครือข่าย Modbus จะใช้สาย RS-485 ต่อเข้ากับ serial interface โดยต้องกำหนด ระดับสัญญาณ baud rate และ parity ซึ่งตัวควบคุมจะสามารถติดต่อได้โดยตรงหรือติดต่อผ่านทางโมเด็ม ตัวควบคุมจะใช้เทคนิคในการติดต่อที่เรียกว่า master-slave technique ซึ่งตัวอุปกรณ์ที่เป็นตัวถามข้อมูลเริ่มแรกจะเรียกว่าตัว master และอุปกรณ์ที่โต้ตอบกลับไปโดยใช้ข้อมูลของ master หรือทำตามข้อมูลของ master เรียกว่า slave ตัว master หนึ่งตัวสามารถมี address ของ slave แต่ละตัว หรือสามารถติดต่อกับ slave ทั้งหมด ซึ่งตัว slave แต่ละตัวจะใช้ address ตัวมันเองโต้ตอบกลับมา โดยใช้โปรโตคอล Modbus ในการสื่อสาร ซึ่งเมื่อมี error เกิดขึ้นขณะรับส่งข้อมูล หรือตัว slave ไม่สามารถส่งข้อมูลกลับมาได้ ตัว slave จะสร้าง error message ได้ตอบกลับมา

ตัวควบคุมสามารถเลือกวิธีการติดต่อสื่อสารบน เครือข่าย Modbus โดยเลือกจาก 2 mode คือ ASCII หรือ RTU โดยผู้ใช้งานสามารถเลือก mode ไหนก็ได้เพียงแต่ตั้งพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ต่างๆ ให้ตรงกันทั้งหมดในเครือข่าย Modbus ซึ่งการเลือกใช้ mode ASCII หรือ RTU นี้ จะใช้ได้บนเครือข่าย Modbus เท่านั้น ซึ่งในการติดต่อกับตัว ACM 3300 ของโรงงานนั้นจะเลือกใช้ RTU mode

#### 4.2.1.1 RTU (Remote Terminal Unit) Mode

เมื่อตัวควบคุมเปลี่ยนระบบการสื่อสารบนเครือข่าย Modbus เป็น RTU mode แล้ว ใน 1 ไบท์ของข้อความจะถูกส่งออกมา 2 ครั้ง ครั้งละ 4 บิต ประโยชน์ของระบบนี้ก็คือ ใน baud rate เดียวกันจะส่งข้อมูลได้จำนวนมากกว่าเมื่อเทียบกับ ASCII mode

รหัสที่ใช้ (Coding System) จะใช้ระบบเลขฐานสิบหก ใช้ตัวเลข 0-9 ใช้อักษร A-F ใน 1 ไบท์ที่ส่งออกมา จะประกอบด้วยเลขฐานสิบหก 2 ชุด จำนวนบิตต่อ 1 ไบท์ เริ่มต้นจะเว้นไป 1 บิตโดย 8 บิต ต่อไปเป็นข้อมูล 1 บิต ต่อไปสำหรับ even/odd parity และใช้อีก 1 บิต สำหรับการหยุด ถ้า parity ถูกใช้ ถ้า parity ไม่ถูกใช้จะใช้ 2 บิต สำหรับการหยุด การเช็ค error จะใช้ระบบ Cyclical Redundancy Check (CRC)

รูปแบบการสื่อสารของ RTU mode การสื่อสารจะเริ่มต้นจากการเจ็บบอย่างน้อย 3.5 ตัวอักษร เสร็จแล้วต้องใส่ address ของอุปกรณ์ที่จะติดต่อ โดยข้อมูลที่จะติดต่อจะอยู่ในรูปเลขฐานสิบหกทั้งหมด เมื่ออุปกรณ์ได้รับการติดต่อมา อุปกรณ์จะทำการถอดรหัสว่าตรงกับ address ของตัวเองหรือไม่ เมื่อการติดต่อข้อมูลเสร็จสิ้นแล้วจะเว้นช่วงโดยเจ็บบอย่างน้อย 3.5 ตัวอักษร ข้อมูลที่ติดต่อกันจะต้องติดต่อย่างต่อเนื่อง ถ้าเว้นช่วงเจ็บบมากกว่า 1.5 ตัวอักษร ข้อมูลที่ได้รับ

จะไม่สมบูรณ์ และถ้าไบท์ถัดไปจะส่ง address ของข้อมูลใหม่เข้ามาถ้าเริ่มต้นเร็วกว่า 3.5 ตัวอักษร อุปกรณ์นั้นจะถือว่าเป็น error ที่ค่าสุดท้าย ซึ่งรูปแบบของการติดต่อแสดงดังรูปข้างล่าง

START	ADDRESS	FUNCTION	DATA	CRC CHECK	END
T1-T2-T3-T4	8 BITS	8 BITS	8 BITS	16 BITS	T1-T2-T3-T4

รูปแบบของ address ใน RTU mode จะเป็น 8 บิต โดย address ของตัว slave จะอยู่ในช่วงระหว่าง 0-247 (เลขฐานสิบ) แต่ slave แต่ละตัวจะถูกกำหนด address ในช่วง 1-247 เมื่อ master ติดต่อกับ slave จะส่ง address ของ slave ไปด้วย เมื่อ slave ตัวนั้นตอบรับ มันจะส่ง address ของตัวเองกลับมาด้วยทำให้ master รู้ว่าข้อมูลเป็นของ slave ตัวใดที่ตอบกลับมา ส่วน address ที่ 0 (broadcast) จะถูกใช้สำหรับติดต่อกับ slave ทุกตัว ซึ่ง slave ทุกตัวจะเข้าใจตามนี้ แต่เมื่อโปรโตคอล Modbus ถูกใช้ในเครือข่ายระดับสูงขึ้น broadcast อาจจะไม่จำเป็น

รูปแบบของ Function ใน RTU mode จะเป็น 8 บิต โดยรหัสของมันจะอยู่ในช่วง 1-255 (เลขฐานสิบ) เมื่อข้อมูลถูกส่งจาก master ไปหา slave รหัสของ function จะบอก slave เกี่ยวกับรูปแบบของการกระทำ ยกตัวอย่างเช่น อ่าน ON/OFF, READ/WRITE ข้อมูล, loading ข้อมูล เป็นต้น

รหัส function ที่ slave ใช้ตอบรับ master จะมีอยู่ 2 แบบ กล่าวคือ แบบไม่มี error (normal response) และแบบมี error (exception response) ในแบบไม่มี error เกิดขึ้น slave จะตอบรับกลับมาเหมือนกับ รหัส function ที่ส่งไป แต่ถ้ามี error เกิดขึ้น slave จะตอบรับกลับเหมือนกับรหัส function ที่ส่งไปเหมือนกัน แต่ที่สำคัญที่สุดคือจะเซทบิตตัวแรกเป็น 1 (exception code)

ยกตัวอย่างเช่นข้อมูลจาก master สั่งให้ slave เก็บค่าบางค่าเอาไว้ ซึ่งจะมีรหัส function ดังนี้ 0000 0011 (Hexadecimal 03) ถ้าเครื่องมือที่ slave ไม่มี error เกิดขึ้น slave ก็จะตอบรับรหัสเดิมกลับไป แต่ถ้ามี error เกิดขึ้น ก็จะส่งกลับเป็น 1000 0011 (Hexadecimal 83) เป็นต้น

ลักษณะของข้อมูลที่รับส่ง (Data Field) ข้อมูลที่รับส่งจะใช้เลขฐานสิบหก 2 ชุดในการรับส่ง ซึ่งชุดเลขฐานสิบหกจะอยู่ในช่วง 00-FF ถ้าเป็น RTU mode จะส่งเป็น 1 ตัวอักษร ข้อมูลที่ส่งจาก master ไปหา slave จะบรรจุข้อมูลที่่จะต้องใช้กระทำตามรหัส function ซึ่งจะรวมถึงตำแหน่งที่อ่าน จำนวนที่อ่านได้ และ จำนวนไบท์ที่ใช้ไป

ยกตัวอย่างเช่น ถ้า master สั่งให้ slave อ่านค่าๆ หนึ่ง (function code 03) ข้อมูลที่ส่งไป จะเริ่มต้นด้วยบิตกและนับจำนวนที่อ่านไป ถ้า master สั่งให้ slave เขียนค่าๆ หนึ่ง (function

code 10) ข้อมูลที่ส่งไปจะเริ่มบันทึก แล้วนับจำนวนที่จะเขียน และจำนวนไบต์ที่จะเขียน เสร็จแล้วจึงเริ่มเขียนลงไปถ้าไม่มี error เกิดขึ้นข้อมูลจะส่งคืนจาก slave ไป master ครบถ้วนตามที่ขอไป แต่ถ้ามี error เกิดขึ้น ก็จะทำให้ข้อมูลเป็น exception code

ลักษณะของการเช็ค error (Error Checking Field) มาตรฐานวิธีการเช็ค error ของเครือข่าย Modbus จะมีอยู่ 2 แบบ คือ ASCII และ RTU ซึ่งวิธีการเช็คจะขึ้นอยู่กับว่าใช้แบบไหน เมื่อระบบเปลี่ยนเป็น RTU mode แล้ว การเช็ค error จะประกอบด้วย 16 บิต หรือ 2 ไบต์ ซึ่งเป็นผลจากการคำนวณแบบ Cyclical Redundancy Check (CRC) ซึ่งการคำนวณแบบ CRC จะอยู่เป็นตัวสุดท้ายที่ส่งไปในข้อมูล โดยเมื่อส่งเสร็จแล้ว ตัว low-order จะขึ้นมาอยู่เป็นตัวแรก และตามมาด้วย ตัว high-order ซึ่งจะอยู่เป็นตัวสุดท้ายของข้อมูลที่ส่งไป

ลำดับการสื่อสารใน 1 ตัวอักษร เมื่อมีการติดต่อข้อมูลบนเครือข่าย Modbus ในแต่ละตัวอักษรหรือในแต่ละไบต์ จะถูกส่งจากซ้ายไปขวาตามนี้

เมื่อเป็น RTU mode

มี Parity Checking

START	1	2	3	4	5	6	7	Parity	STOP
-------	---	---	---	---	---	---	---	--------	------

ไม่มี Parity Checking

START	1	2	3	4	5	6	7	STOP	STOP
-------	---	---	---	---	---	---	---	------	------

วิธีตรวจสอบ error ตามมาตรฐานของเครือข่าย Modbus จะมีวิธีการเช็คอยู่ 2 ชนิด คือ การตรวจสอบ parity ในแต่ละตัวอักษร และการตรวจสอบรูปแบบของข้อมูล (LRC, CRC) การตรวจสอบทั้ง 2 ชนิดนี้จะถูกสร้างขึ้นมาในตัว master และรวมเข้ากับเครื่องมือก่อนที่จะมีการส่งข้อมูลออกไป เมื่อส่งออกไปแล้ว slave จะตรวจสอบแต่ละตัวอักษรและรูปแบบข้อมูลทั้งหมดก่อนที่จะรับค่า

ตัว master ผู้ใช้สามารถกำหนดช่วงเวลาที่จะให้ตัว master คอยข้อมูลที่ส่งกลับมา ซึ่งช่วงเวลานี้จะเพียงพอให้ตัว slave ส่งข้อมูลกลับมา ถ้า slave ตรวจเจอ error ข้อมูลจะไม่ถูกทำตามและ slave จะไม่ตอบกลับมาที่ตัว master ดังนั้นเวลาที่กำหนดไว้ก็จะเกินและ master ก็ จะแสดง error ออกมา

Parity Checking ผู้ใช้สามารถกำหนด Parity Checking เป็น Odd, Even, No ก็ได้ ซึ่งจะได้รับการตรวจสอบในแต่ละตัวอักษร ถ้ากำหนดเป็น Odd, Even Parity ในรูปแบบข้อมูลจะถูกใช้ไป 1 บิต ในแต่ละตัวอักษรสำหรับกำหนด Parity โดยที่ 0 จะแทน Even และ 1 จะแทน Odd

ยกตัวอย่างเช่น ใน RTU mode รูปแบบข้อมูลได้รับการกำหนดเป็น 1100 0101 จำนวนบิตที่เป็น 1 ทั้งหมดจะเป็น 4 ถ้าเซ็ทเป็น Even parity บิตของ parity จะถูกเซ็ทเป็น 0 ทำให้จำนวนบิตที่เป็น 1 ทั้งหมดยังเท่าเดิม ถ้าเซ็ทเป็น Odd parity บิตของ parity จะถูกเซ็ทเป็น 1 ทำให้จำนวนบิตที่เป็น 1 เป็น จำนวนคี่

CRC/LRC Checking ใน ASCII mode นั้น การตรวจสอบ error นั้นจะใช้วิธี LRC method ใน RTU mode นั้น การตรวจสอบ error จะใช้วิธี CRC method ซึ่งค่า CRC นี้จะอยู่สุดท้ายของข้อมูลที่ส่งไป ซึ่งการตรวจสอบวิธีนี้จะไม่เกี่ยวข้องกับวิธี parity checking เช่นเดียวกัน ขนาดของ CRC จะมี 2 ไบรท์ ประกอบด้วยเลขฐานสอง 16 บิต ค่า CRC นี้ จะนำมาคำนวณโดยอุปกรณ์ที่กำลังติดต่ออยู่ ซึ่งเมื่อบรรจุค่า CRC เข้าไปในข้อมูล อุปกรณ์ที่ได้รับจะคำนวณค่า CRC ในระหว่างที่รับข้อมูล แล้วนำค่าที่คำนวณได้มาเปรียบเทียบกับค่าจริงที่ส่งไป ซึ่งถ้าค่าสองค่าไม่เท่ากันก็จะทำให้เกิด error ขึ้น

#### 4.2.2 485 Protocol

ตามมาตรฐานอีไอเอ (EIA: Electronic Industries Association) RS-485 มีการส่งผ่านสัญญาณแบบสมดุล (Balanced Transmission) คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีสายสัญญาณเป็นอิสระกันระหว่าง อุปกรณ์ทางไฟฟ้ากับอุปกรณ์ทางการสื่อสาร สามารถติดต่อสื่อสารได้ในระยะทางที่ไกลมาก เมื่อเทียบกับ RS-232 ที่อัตราเร็วในการส่งผ่านข้อมูลเดียวกัน การเกิดสัญญาณรบกวนจะต่ำมาก เพราะสัญญาณรบกวนที่เกิดบนสายสัญญาณจะเท่ากับที่เกิดขึ้นบนสายสัญญาณขากลับ ซึ่งจะไม่มีผลต่อแรงดันที่แตกต่างระหว่างวงจรของสายสัญญาณทั้งสอง ซึ่งลักษณะการต่อของวงจรจะเป็นแบบเครือข่ายหลายจุด (Multi-Drop Network) โดย RS-485 นี้พัฒนามาจาก RS-422 ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกัน แต่การต่อวงจรจะเป็นแบบจุดต่อจุด (Point-to-point) เท่านั้น

ตารางที่ 4.2 ข้อแตกต่างระหว่างการสื่อสารแบบต่างๆ

Standard EIA	RS-232	RS-422	RS-485
Mode of Operation	Single-Ended	Differential	Differential
Transmission Mode	Unbalanced	Balanced	Balanced
Logic 0	+3v to +15v	less than -0.2v	less than -0.2v
Logic 1	-3v to -15v	more than +0.2v	more than +0.2v
Speed at Distance	20Kbps at 15m	100Kbps at 1200m	100Kbps at 1200m
Transmission Point	Point-to-Point	Point-to-Multipoint	Multipoint

เมื่อมาพิจารณาข้อแตกต่างระหว่างการติดต่อสื่อสารแบบ RS-232, RS-485 และ RS-422 สรุปข้อแตกต่างที่สำคัญๆ ได้ (ดังแสดงในตารางที่ 4.2) และเมื่อเปรียบเทียบการติดต่อสื่อสารแบบ RS-485 กับ RS-232 (ดังแสดงในตารางที่ 4.3) แล้วสามารถสรุปได้ว่า สมรรถนะและความน่าเชื่อถือของการติดต่อสื่อสารแบบ RS-485 ย่อมดีกว่าแบบ RS-232

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบระหว่างมาตรฐาน RS-232 และ RS-485/RS-422

มาตรฐาน RS-232	มาตรฐาน RS-485/RS-422
การป้องกันสัญญาณรบกวนต่ำ	การป้องกันสัญญาณรบกวนสูง
ระยะทางในการส่งผ่านใกล้	ระยะทางในการส่งผ่านไกล
อัตราเร็วในการส่งผ่านต่ำ	อัตราเร็วในการส่งผ่านสูง

ระบบเก็บข้อมูลและความคุมระยะไกลตามมาตรฐาน RS-485 เมื่อพิจารณาถึงลักษณะการติดต่อสื่อสารสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ สถานีควบคุม (Master Station) และ โมดูลระยะไกล (Remote Module) โดยระบบนี้มีการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีควบคุมกับโมดูลระยะไกลผ่านทางสายสัญญาณ 2 เส้นมีฉนวนหุ้ม (Twisted Pair Wire) อ้างอิงตามมาตรฐาน EIA RS-485 กล่าวคือสถานีควบคุมสามารถควบคุมโมดูลระยะไกล ที่อยู่ห่างออกไปเป็นระยะไกลสุดได้ถึง 1,320 เมตร มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุด 7,200 บิตต่อวินาที

การติดต่อสื่อสารข้อมูลระหว่างสถานีควบคุมกับโมดูลระยะไกลนั้น เป็นการติดต่อแบบ ครึ่งดูเพลกซ์ (Half-duplex) โดยสถานีควบคุมมีหน้าที่ควบคุมแต่ละโมดูลระยะไกล

และมีหน้าที่สร้างคำสั่งในระบบรวมทั้งหมด เพื่อให้ระบบมีกระบวนการทำงานตามที่ต้องการ การส่งผ่านข้อมูลประกอบด้วยเฟรมข้อมูล 1 เฟรม เมื่อสถานีควบคุมต้องการติดต่อกับโมดูลระยะไกล โมดูลจะคอยรับคำสั่งจากสถานีควบคุม หรือทำงานตามคำสั่งที่ได้รับ เมื่อทำงานเสร็จ สมบูรณ์ก็จะส่งเฟรมตอบสนองกลับไปยังสถานีควบคุม

การกำหนดฟังก์ชันติดต่อสื่อสารข้อมูลในระบบนี้ เน้นการจัดการเรื่องการเก็บข้อมูลและควบคุมโมดูลต่างๆ จึงกำหนดให้มีฟังก์ชันหลักสองฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชันขอข้อมูล (Request Function) และฟังก์ชันควบคุม (Control Function) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

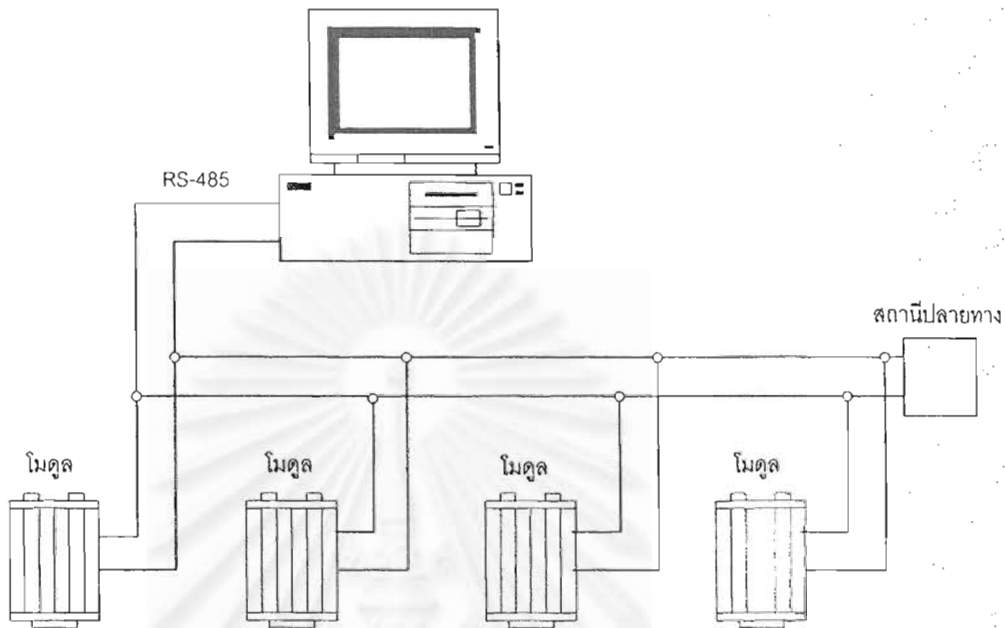
ฟังก์ชันขอข้อมูล ฟังก์ชันนี้จัดเป็นฟังก์ชันการทำงานเบื้องหลัง (Background Operation Function) ของสถานีควบคุมโดยสถานีควบคุมจะพิจารณาส่งเฟรมคำสั่งเพื่อข้อมูลเฉพาะโมดูลที่ต่อในระบบ (Online) เท่านั้นและจัดลำดับในการขอข้อมูลของแต่ละโมดูลระยะไกล โดยใช้การกำหนดเวลาที่ตั้งไว้เป็นเกณฑ์

สถานีควบคุมจะทำการส่งเฟรมคำสั่งเพื่อขอข้อมูลไปยังโมดูลระยะไกลตามเวลาที่มาถึง (Scan Time) ของแต่ละโมดูล การกำหนดเวลาที่มาถึงของแต่ละโมดูลจะต้องถูกตั้งค่าไว้แล้วในขั้นตอนกำหนดรูปลักษณ์ของระบบ (System Configuration) เมื่อโมดูลระยะไกลได้รับเฟรมคำสั่งเพื่อขอข้อมูลแล้วก็จะส่งเฟรมตอบสนองที่มีข้อมูลตามที่สถานีควบคุมต้องการกลับไป เพื่อให้สถานีควบคุมนำข้อมูลเหล่านั้นไปใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์หรือควบคุมระบบต่อไป

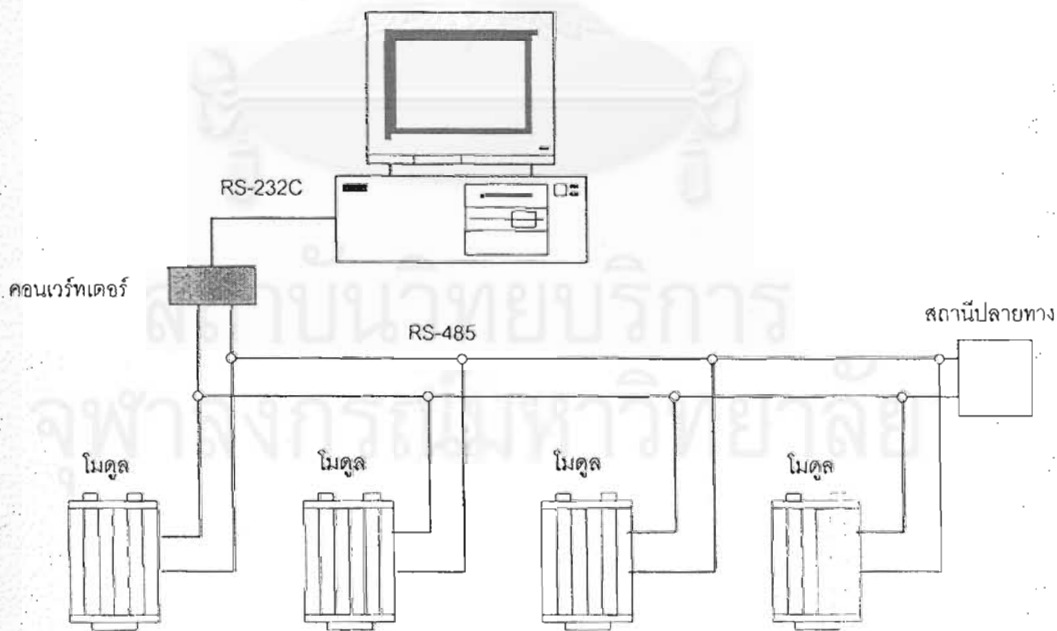
ข้อกำหนดอีกประการหนึ่งของระบบก็คือ เมื่อสถานีควบคุม ต้องการข้อมูลจากตัวโมดูลระยะไกลใดๆ ก็ส่งเฟรมคำสั่งไปที่ตัวโมดูลนั้น และจะมีเพียงโมดูลเดียวเท่านั้นที่ต้องส่งเฟรมตอบสนองมายังสถานีควบคุม หากสถานีควบคุมไม่ได้รับเฟรมตอบสนองภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง จะยกเลิกการรับข้อมูลจากโมดูลนั้น พร้อมทั้งแสดงข้อผิดพลาดในการขอข้อมูลแล้วส่งเฟรมคำสั่งไปยังโมดูลที่อยู่ในลำดับถัดไป

ลักษณะของวงจรควบคุมในระบบสื่อสารแบบ RS-485 โดยทั่วไปจะมี 2 ลักษณะ กล่าวคือ ลักษณะที่ 1 แผงวงจรควบคุมโปรโตคอล จะเสียบอยู่ในสล็อต (Slot) ของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยมีลักษณะการติดต่อสื่อสารกับโมดูลต่างๆ (ดังแสดงในรูปที่ 4.7)

ลักษณะที่ 2 โมดูลควบคุมโปรโตคอล จะแยกออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์ เรียกว่าตัวคอนเวอร์ทเตอร์ (converter) เมื่อสถานีควบคุมจะติดต่อกับโมดูลจะมี 2 ขั้นตอนในการติดต่อ กล่าวคือ ขั้นที่ 1 สถานีควบคุมจะต้องติดต่อกับตัวคอนเวอร์ทเตอร์ ผ่านทางสายสัญญาณ RS-232 ขั้นที่ 2 เป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างตัวคอนเวอร์ทเตอร์ กับ โมดูลต่างๆ ผ่านทางสายสัญญาณ RS-485 โดยมีลักษณะการติดต่อสื่อสารกับโมดูลต่างๆ (ดังแสดงในรูปที่ 4.8)



รูปที่ 4.7 แผงวงจรควบคุมโดยที่โปรโตคอลจะเสียบอยู่ในสลอต



รูปที่ 4.8 แผงวงจรควบคุมโดยที่โปรโตคอลแยกออกจากเครื่องคอมพิวเตอร์



### 4.3 โปรแกรม LabVIEW

LabVIEW ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากบริษัท National Instrument ซึ่งแรกเริ่มเป็นบริษัทที่ผลิตอุปกรณ์ที่ใช้กับการวัดทางวิศวกรรมไม่ใช่บริษัทที่ผลิตโปรแกรมเป็นหลัก ต่อมาบริษัทได้พัฒนาโปรแกรมที่จะนำมาใช้กับเครื่องมือวัดที่มีความง่ายในการเขียนโปรแกรมและมีฟังก์ชันเพื่อช่วยในการวัดทางวิศวกรรมให้มากที่สุดซึ่งก็ได้พัฒนาโปรแกรม LabVIEW นี้ขึ้นมา

LabVIEW คือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในด้านการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับงานทางด้านวิศวกรรม โดย LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench ซึ่งมีความหมายว่า เป็นโปรแกรมที่สร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม ดังนั้นจุดประสงค์หลักของการทำงานของโปรแกรมนี้ก็คือการจัดการในด้านการวัดและเครื่องมือวัดอย่างมีประสิทธิภาพ และในตัวของโปรแกรมจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันที่ช่วยในการวัดมากมาย ดังนั้นโปรแกรมนี้อาจมีประโยชน์อย่างสูงเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมต่างๆ

สิ่งที่โปรแกรมนั้นแตกต่างจากโปรแกรมอื่นก็คือ โปรแกรม LabVIEW นี้จะเป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) โดยสมบูรณ์ กล่าวคือเราไม่จำเป็นต้องเขียน code หรือคำสั่งใดๆทั้งสิ้น และที่สำคัญลักษณะทางภาษาที่ใช้ในโปรแกรมนี้อาจจะเรียกว่า ภาษารูปภาพ หรือเรียกอีกอย่างว่าภาษา G (Graphic Language) ซึ่งจะแทนการเขียนโปรแกรมเป็นบรรทัด เช่น ภาษา C, Basic, Fortran ซึ่งโปรแกรมนี้อาจจะเขียนแทนด้วยรูปภาพหรือสัญลักษณ์ทั้งหมด ซึ่งตอนแรกที่ใช้งานอาจมีความสับสนในการเขียนโปรแกรมอยู่บ้าง แต่เมื่อมีความคุ้นเคยแล้วการใช้โปรแกรม LabVIEW นี้จะมีความสะดวกและสามารถลดเวลาในการเขียนลงได้มาก โดยเฉพาะงานเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อใช้ในการวัดและควบคุม นอกจากนี้สำหรับผู้ที่เคยใช้โปรแกรมที่เรียกว่า Text Base ทั้งหมด คงจะทราบถึงความยุ่งยากในการจัดการกับตำแหน่งการส่งผ่านข้อมูลตามอุปกรณ์เชื่อมต่อ เช่น Port, Card ต่างๆ รวมถึงการจัดวางตำแหน่งในหน่วยความจำเพื่อที่จะสามารถรวบรวมข้อมูลมาใช้ในการคำนวณและเก็บข้อมูลให้ได้ประโยชน์สูงสุด ปัญหาเหล่านี้ได้รับการแก้ไขใน LabVIEW โดยได้บรรจุโปรแกรมจำนวนมากหรือเรียกว่า Libraries ไว้สำหรับแก้ไขปัญหานั้น ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์การเชื่อมต่อจะเป็น DAQ (Data Acquisition), GPIB (General Purpose Interface Bus), Serial Port รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีต่างๆ นอกจากนี้ใน Libraries นี้ยังได้บรรจุฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญอีกหลายประการ เช่น signal generation, signal processing สถิติ พีชคณิต และคณิตศาสตร์อื่นๆ

LabVIEW จึงทำให้การวัดและการใช้เครื่องมือวัดกลายเป็นเรื่องง่าย และทำให้คอมพิวเตอร์กลายเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดหลายชนิดแต่อยู่ในเครื่องเดียว

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าโปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้รูปภาพหรือสัญลักษณ์แทนการเขียนด้วยตัวอักษรเหมือนโปรแกรมปกติโดยทั่วไป ซึ่งข้อดีข้อแรกก็คือลดความผิดพลาดด้านการสะกดผิดหรือพิมพ์ผิดออกไป ข้อแตกต่างที่สำคัญอีกประการหนึ่งของการเขียนโปรแกรม LabVIEW กับการเขียนด้วยตัวหนังสือก็คือ การเขียนด้วยภาษา G ในโปรแกรม LabVIEW เป็นการเขียนโดยใช้หลักการของ Data Flow ซึ่งเมื่อเริ่มส่งข้อมูลเข้าสู่โปรแกรมจะต้องกำหนดทิศทางการไหลของข้อมูลว่าไปที่ส่วนใด ผ่านการประเมินผลและคำนวณในส่วนใดบ้าง และจะแสดงผลอย่างไร ซึ่งลักษณะของ Data Flow นี้จะมีลักษณะเหมือนกับการเขียน Block Diagram ซึ่งทำให้ผู้เขียนโปรแกรมสามารถให้ความสนใจกับการเคลื่อนที่และเปลี่ยนแปลงข้อมูลได้โดยไม่ต้องจดจำรูปแบบคำสั่งที่ยุ่งยาก

เนื่องจากโปรแกรม LabVIEW ใช้ลักษณะการเขียนแบบ Block Diagram ซึ่งวิศวกรส่วนใหญ่มีความคุ้นเคยดีอยู่แล้ว จึงเป็นการง่ายที่จะทำความเข้าใจและนำไปพัฒนาใช้ต่อไปได้ ซึ่งในขั้นตอนการเขียนโปรแกรมโดยทั่วๆ ไป จะต้องเขียน Flow Chart ก่อน แล้วจึงนำไปเขียนโปรแกรม แต่ในโปรแกรม LabVIEW จะลดขั้นตอนการเขียน Flow Chart ลงไปเพราะการเขียน Flow Chart ก็คือการเขียนโปรแกรมนั่นเอง ซึ่งทำให้ลดขั้นตอนการทำงานลงได้มาก

แม้ว่าการเขียนโปรแกรมใน LabVIEW ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ด้านการเขียนโปรแกรมใดๆ มาก่อนเลยแต่การมีความรู้ด้านการเขียนโปรแกรมมาก่อนสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดี

โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาโดย LabVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) เพราะลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพเมื่อผู้ใช้ใช้งานจะเหมือนกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางวิศวกรรม ในขณะที่เดียวกันหลังจากของอุปกรณ์เสมือนจริงเหล่านั้นจะเป็นการทำงานของ ฟังก์ชัน Subroutines และโปรแกรมหลักเหมือนกับภาษาทั่วไป

สำหรับ Virtual Instrument (VI) หนึ่งๆ จะประกอบด้วยส่วนสำคัญสามส่วน คือ

- (1) Front Panel
- (2) Block Diagram
- (3) Icon และ Connector

ทั้งสามส่วนนี้ประกอบขึ้นมาเป็นอุปกรณ์เสมือนจริง ลักษณะและหน้าที่ของส่วนประกอบทั้งสามมีดังต่อไปนี้

Front Panel หรือหน้าปัทม์ จะเป็นส่วนที่ใช้สื่อสารกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัทม์ของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัดทั่วๆ ไป เช่น

เทอร์โมมิเตอร์ เป็นต้น โดยทั่วไป Front Panel นี้จะประกอบไปด้วย สวิตช์ปิดเปิด ปุ่มบิด ปุ่มกด จอแสดงผล

Block Diagram เพื่อให้เกิดความเข้าใจง่ายขึ้นอาจมอง Block Diagram นี้เป็นเสมือน Source Code ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปภาษา G ซึ่ง Block Diagram นี้ถือว่าเป็นโปรแกรมที่สามารถทำงานได้ทันที (Executable Program) และข้อดีอีกประการหนึ่งก็คือ LabVIEW จะมีการตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรมตลอดเวลา ทำให้โปรแกรมสามารถทำงานได้ก็ต่อเมื่อไม่มีข้อผิดพลาดในโปรแกรมเท่านั้น โดยที่ผู้ใช้สามารถที่จะดูรายละเอียดของความผิดพลาด ซึ่งจะแสดงให้เห็นได้ตลอดเวลา ทำให้การเขียนโปรแกรมนั้นง่ายขึ้นมาก

ส่วนประกอบภายใน Block Diagram นี้จะประกอบไปด้วย ฟังก์ชัน ค่าคงที่ โปรแกรมควบคุมการทำงานหรือโครงสร้าง จากนั้นในแต่ละส่วนเหล่านี้จะปรากฏในรูปของ Block ซึ่งผู้ใช้จะต้องต่อสาย (wire) สำหรับ Block ที่เหมาะสมเข้าด้วยกัน เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง Block เหล่านั้น ทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามต้องการและแสดงผลออกมา

Icon และ Connector จะเปรียบเสมือนโปรแกรมย่อย Subroutine ในโปรแกรมปกติทั่วไป โดยที่ icon จะหมายถึง block diagram ตัวหนึ่งที่มีการส่งข้อมูลเข้าและออกผ่านทาง connector ซึ่งในโปรแกรม LabVIEW เราจะเรียก Subroutine นี้ว่า subVI ข้อดีของการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา G นี้ก็คือเราสามารถสร้าง VI ที่ละส่วนขึ้นมาให้ทำงานด้วยตัวเองอย่างอิสระ จากนั้นในภายหลังหากเราต้องการเราก็สามารถเขียนโปรแกรมอื่นขึ้นมาเพื่อเรียกใช้งาน VI ที่เคยสร้างขึ้นมาก่อนหน้านี้ทีละตัว ซึ่งทำให้ VI ที่เราเขียนขึ้นมาก่อนหน้านี้กลายเป็น subVI ไป ซึ่งการเขียนในลักษณะนี้จะเรียกว่าการเขียนแบบ module

เนื่องจากคำศัพท์ที่ใช้ในโปรแกรม LabVIEW จะแตกต่างจากภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมทั่วไป ดังนั้นจึงขอเปรียบเทียบศัพท์ที่ใช้ใน LabVIEW กับโปรแกรมพื้นฐานทั่วไป (ดังแสดงในตารางที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบระหว่าง LabVIEW กับ โปรแกรมพื้นฐาน

LabVIEW	โปรแกรมพื้นฐาน	หน้าที่
VI	Program	ตัวโปรแกรมหลัก
SubVI	Subroutine	โปรแกรมย่อยที่ถูกเรียกใช้ในโปรแกรมหลัก
Front Panel	User interface	ส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้
Block Diagram	Program code	การเขียนตามขั้นตอนที่แต่ละโปรแกรมกำหนด

โปรแกรม LabVIEW นี้โดยจุดประสงค์หลักแล้วบริษัทที่เริ่มพัฒนาคือ บริษัท National Instrument ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อนำมาใช้กับระบบเครื่องมือวัดที่มีความง่ายในการเขียนโปรแกรม และมีฟังก์ชันเพื่อที่จะช่วยในการวัดทางวิศวกรรมมากที่สุด เพราะด้วยความเป็นมาของบริษัท National Instrument เริ่มจากการผลิตอุปกรณ์ที่ใช้กับการวัดทางวิศวกรรม ไม่ใช่บริษัทที่เริ่มต้นจากการผลิต Software เป็นหลัก ดังนั้นผู้ที่จะได้ประโยชน์สูงสุดจากโปรแกรมนี้ก็คือ ผู้ที่ต้องการจะนำข้อมูลจากภายนอกเครื่องคอมพิวเตอร์เข้ามาในเครื่องเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล ประมวลผลค่า แสดงผล และใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติ

ข้อได้เปรียบสูงสุดของโปรแกรม LabVIEW ก็คือการพยายามทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์เมื่อรวมกับ LabVIEW และอุปกรณ์เชื่อมต่อเพื่อการเก็บข้อมูล (Data Acquisition Card) แล้วสามารถเปลี่ยนเครื่องคอมพิวเตอร์เราให้กลายเป็นเครื่องมือวัดในหลายรูปแบบ เช่น Oscilloscope, Multi-meter, Function Generator, Strain Meter Thermometer หรือเครื่องมือวัดอื่นๆตามที่เราต้องการ ทำให้สามารถใช้คอมพิวเตอร์ในการทำการวัดได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งจุดนี้เองที่เป็นที่มาของชื่อ Virtual Instrument หรือเครื่องมือวัดเสมือนจริง และข้อได้เปรียบอีกอย่างหนึ่งก็คือเราสามารถปรับเปลี่ยน Virtual Instrument ให้เหมาะสมกับการใช้งานของผู้ใช้แต่ละกลุ่มได้ โดยการเปลี่ยน VI ให้เป็นไปตามต้องการเป็นสิ่งที่ไม่ยุ่งยากมากนัก

ข้อดีอีกประการหนึ่งของการใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือวัดก็คือ สามารถใช้ทำเป็น Data Logger และ PLC (Programmable Logical Controlled) ได้พร้อมกัน ซึ่งโดยปกติแล้วระบบควบคุมมักจะไม่มีในเครื่องมือวัดขั้นพื้นฐาน หรือ Data Logger แม้จะเก็บข้อมูลได้ แต่การสั่งการทำงานกับอุปกรณ์ตัวอื่น จะมีความยุ่งยากในการสั่งงานมาก

กล่าวโดยสรุปก็คือหาเรามีโปรแกรม LabVIEW, Computer, DAQ Card หรือระบบการสื่อสารอื่นๆ เช่น GPIB หรือ Serial Port เราสามารถสร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงได้มากมาย ซึ่งจุดนี้เองคือข้อดีของโปรแกรมนี้

ในงานด้านการวัดและเครื่องมือวัดทางวิศวกรรม จะประกอบด้วยขั้นตอนหรือกระบวนการวัดหลักๆ ตามลำดับดังนี้

- (1) Sensor-Transducer ทำหน้าที่เปลี่ยนปรากฏการณ์ทางธรรมชาติหรือปริมาณต่างๆ ทางฟิสิกส์ให้เป็นปริมาณทางไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดได้ ไม่ว่าจะเป็น กระแส ความต่างศักย์ แรงเคลื่อนไฟฟ้า หรือความต้านทานไฟฟ้า
- (2) Signal Conditioner ทำหน้าที่ปรับแต่งปริมาณสัญญาณที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ให้มีขนาดปริมาณหรือลักษณะที่เหมาะสม เพราะสัญญาณที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 นั้นอาจมีขนาดไม่เหมาะสมหรือมีสัญญาณรบกวนมากเกินไปที่จะนำไปวิเคราะห์ได้

(3) Data Acquisition ทำหน้าที่ประมวลผลความหมายหรือเปลี่ยนสัญญาณในลักษณะ Analog ให้มาอยู่ในรูปของ Digital signal เพื่อประโยชน์ในการตีความหมายและใช้ในการควบคุมหน้าที่ของ DAQ boards อาจจะเป็นการอ่านสัญญาณ analog การสร้างสัญญาณอนาล็อกเพื่อเชื่อมต่อกับ Transducer

การติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์และ transducer โดยปกติแล้วสามารถที่จะติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกได้โดยผ่าน Input/Output Board (I/O Board) ซึ่งจะมีหลายแบบแต่แบบที่สำคัญและสามารถเชื่อมต่อโดยผ่านคำสั่งของ LabVIEW ได้ทันทีจะประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

- (1) DAQ Board
- (2) GPIB
- (3) Serial Communication

DAQ Board โดยปกติแล้ว DAQ Board เป็นอุปกรณ์พิเศษ คือไม่ได้เป็นมาตรฐานที่ติดตั้งมากับเครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับบอร์ดประเภทนี้จะมีผู้ผลิตหลายบริษัท ซึ่งลักษณะการทำงานก็จะแตกต่างกันบ้างตามแต่ผู้ผลิตจะออกแบบมา ข้อสำคัญที่ต้องเข้าใจในเบื้องต้นก็คือไม่ว่า DAQ Board ทุกแบบจะเหมาะสมกับการทำงานร่วมกับ LabVIEW ทั้งหมด

สำหรับ DAQ Board ที่ผลิตโดยผู้ผลิตไม่ว่าจะไม่สามารถทำงานร่วมกับ LabVIEW ได้เลย แต่ต้องมี Driver ของอุปกรณ์นั้นเพื่อให้ทำงานร่วมกับ LabVIEW ได้ ดังนั้นหากผู้ผลิตไม่มี Driver มาให้ ผู้ใช้จำเป็นต้องเขียน Driver ขึ้นมาเอง ซึ่งวิธีการนี้ค่อนข้างยุ่งยากและเสียเวลามาก การเลือกใช้ DAQ Board ที่เหมาะสมจึงถือว่าเป็นเรื่องที่สำคัญมาก

หน้าที่ของ DAQ Board นี้จะทำการติดต่อโดยตรงกับ Transducer ซึ่งอาจจะผ่านอุปกรณ์ Signal Conditioner หรือไม่ได้ตามความจำเป็น นอกเหนือจากนั้นแล้วไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์อื่นเข้ามาร่วมในการสร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงซึ่งจุดนี้เป็นข้อได้เปรียบของ DAQ Board นั่นคือแม้ว่าจะมีราคาแพง แต่สามารถจะทดแทนการซื้อเครื่องมือวัดอื่นๆได้มากมาย

GPIB ย่อมาจาก General Purpose Interface Bus เป็นการขนถ่ายข้อมูลระบบใหม่ที่เพิ่งได้รับความนิยม จุดประสงค์แรกของ GPIB คือใช้ในการควบคุมเครื่องมือวัดโดยคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตามจุดประสงค์ได้เปลี่ยนแปลงไปบ้างแล้ว ได้มีการนำ GPIB มาใช้ควบคุมและติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ด้วยกันหรือระหว่างคอมพิวเตอร์กับ scanner หรือเครื่องมือวัดอื่นๆ ซึ่งจะพบว่าในปีหลังๆ คอมพิวเตอร์บางรุ่นเริ่มมี GPIB ติดมาเป็นอุปกรณ์มาตรฐานของเครื่องแล้ว

GPIB เป็นการติดต่อแบบใหม่ที่สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์หลายชิ้นเข้ากับ GPIB Port ตัวเดียวได้ โดยสามารถต่อเข้ากับอุปกรณ์ได้สูงถึง 15 ชิ้น โดยใช้ bus เพียงตัวเดียว ทำให้ประหยัด และป้องกันปัญหาในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ ส่วนข้อดีข้ออื่น ๆ มีดังนี้

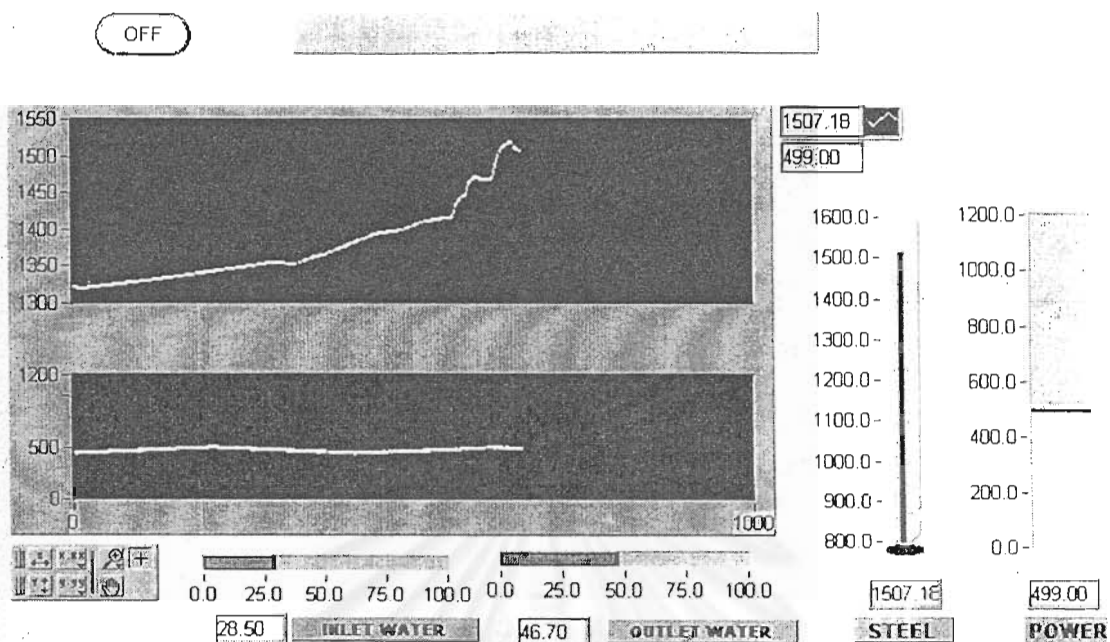
- (1) ส่งผ่านข้อมูลด้วยวิธีแบบขนาน ครั้งละ 1 byte (8 bites)
- (2) Hardware จะเป็นผู้จัดการเรื่อง Handshaking, timing และอื่น ๆ
- (3) อัตราการส่งผ่านข้อมูล 800 Kbyte/sec หรือมากกว่า ซึ่งนับว่าเร็วมาก
- (4) ใช้คำสั่ง ASCII ในการติดต่อ

โดยทั่วไป GPIB Port ใช้ติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ที่มี GPIB Port เท่านั้น ไม่สามารถติดต่อได้โดยตรงกับ Transducer ต้องมี DAQ Card ก่อนถึงจะติดต่อได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่มี GPIB Port อยู่แล้วส่วนมากได้แก่เครื่องมือวัดเช่น Oscilloscope, Multimeter ซึ่งเป็น Actual Instrument อยู่แล้ว ดังนั้นการส่งผ่านข้อมูลจึงเป็นข้อมูลที่อ่านค่าได้เรียบร้อยแล้ว เพราะบนเครื่องมือเหล่านั้นจะมีระบบ Signal Processing อยู่ในตัวเรียบร้อยแล้ว

อย่างไรก็ตามการที่โปรแกรม LabVIEW ติดต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ ผ่านทาง GPIB Port ได้สามารถทำให้เราเพิ่มศักยภาพของเครื่องมือจริง และสามารถนำค่าที่วัดได้ไปใช้ควบคุมอุปกรณ์อื่นๆ ด้วยคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย

Serial Communication ลักษณะการทำงานของพอร์ตจะคล้ายกับ GPIB Port เพียงแต่การส่งผ่านข้อมูลจะเป็นแบบอนุกรม และมีอัตราการส่งข้อมูลที่ช้ากว่า ซึ่งพอร์ตนี้จะใช้มาตรฐาน RS-232 หรือ RS-485 ซึ่งการติดต่อข้อมูลจะต้องทำระหว่างคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ที่มีพอร์ตนี้อยู่ด้วย ข้อดีของ Serial Communication ผ่านทาง Serial Port หรือพอร์ตอนุกรมก็คือ ราคาถูก และเครื่องมือมากมายได้ใช้อุปกรณ์นี้เป็นมาตรฐาน

กล่าวโดยสรุป การทำงานของโปรแกรม LabVIEW นี้จะได้ประโยชน์สูงสุด หากว่าใช้เพื่อติดต่อกับเครื่องมือวัดโดยตรง นอกจากนี้ LabVIEW จะมี subVI ที่ใช้ในการติดต่อระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ กับคอมพิวเตอร์ ที่สามารถเรียกออกมาใช้งานได้ทันทีและการติดตั้งเครื่องมือจะมีความยุ่งยากน้อยกว่าอุปกรณ์แบบอื่นๆ ซึ่งในที่นี่ได้แสดงตัวอย่างหน้าจอที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LabVIEW ดังแสดงในรูปที่ 4.9



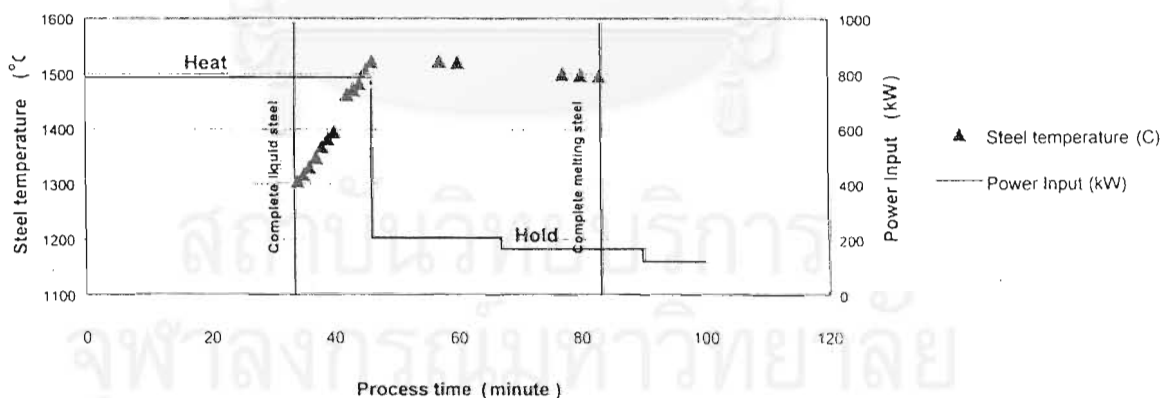
รูปที่ 4.9 หน้าจอที่ออกแบบด้วยโปรแกรม LabVIEW

#### 4.4 ลักษณะกระบวนการให้ความร้อน

Temperature rise in induction furnace during the heating process

# Material : Steel

# Experiment data : Jan 5, 2001 : Afternoon



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงกระบวนการหลอมเหล็ก

เมื่อได้ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ตามที่ได้กล่าวมา และเขียนโปรแกรมสื่อสารบน LabVIEW ก็จะทำให้สามารถเก็บค่าต่างๆ ประกอบด้วยค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ค่าอุณหภูมิที่ผนังเตา ค่าอุณหภูมิเข้าและออกของน้ำหล่อเย็น ค่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิของ



น้ำเหล็กที่สามารถวัดได้เป็นครั้งๆ อย่างไม่ต่อเนื่อง ค่าต่างๆ ที่บันทึกได้ระหว่างขบวนการหลอมเหล็กจะแสดงอยู่ในรูปที่ 4.10

จากรูป 4.10 ลักษณะการทำงานของเตาโดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 3 ลักษณะ กล่าวคือเริ่มต้นในช่วงที่เหล็กยังเป็นของแข็ง ช่วงนี้เตาจะเปิดกำลังไฟฟ้าเต็มที่ (ประมาณ 1200 kW) เรียกว่าช่วงให้ความร้อน (Heating Phase) เพื่อหลอมเหล็กให้หลอมเหลวอย่างรวดเร็วจนมีอุณหภูมิถึง 1500 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาประมาณ 45 นาที เมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วจะปรับกำลังไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงรักษาความร้อน (Holding Phase) (ประมาณ 250 kW) เพื่อให้อุณหภูมิหน้าเหล็กคงที่เพื่อรอเทน้ำเหล็ก (ขึ้นอยู่กับว่ากระบวนการผลิตพร้อมจะเทน้ำเหล็กแล้วหรือไม่) แต่ถ้าในช่วงให้ความร้อน เกิดมีข้อผิดพลาดทำให้อุณหภูมิของน้ำเหล็กเกิน 1500 องศาเซลเซียส จะต้องปรับกำลังไฟฟ้า ให้ต่ำกว่าช่วงรักษาความร้อน (ต่ำกว่า 250 kW) หรือหยุดให้ความร้อนแก่เตา (Stop) เพื่อให้อุณหภูมิน้ำเหล็กลดลงมาเหลือ 1500 องศาเซลเซียส ซึ่งในการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า นี้จะขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ควบคุมเตา จากลักษณะการควบคุมเตาในปัจจุบันจะเห็นว่า ถ้าไม่มีการควบคุมอุณหภูมิในเตาที่ดีพอจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์เป็นจำนวนมาก

เมื่อพิจารณาค่าความร้อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระบบในช่วงที่เหล็กหลอมละลายหมดแล้วโดยใช้สมการสมดุลความร้อนดังนี้

$$\begin{aligned} \text{พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า} = & \text{ความร้อนให้กับเหล็ก} + \text{ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น} \\ & + \text{ความร้อนสูญเสียอื่นๆ} \end{aligned} \quad (1)$$

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการจากการตรวจวัด

รายการ	หน่วย	ช่วงให้ความร้อน	ช่วงความร้อนคงที่
Power Input	kW	1000	150
$m_s$	kg	2000	2000
$C_{p,s}$	kJ/kg K	0.447	0.447
$\Delta T_s$	K	91	0
$\Delta t$	s	352	-
$\dot{m}_w$	kg/hr	23000	23000
$C_{p,w}$	kJ/kg K	4.18	4.18
$\Delta T_w$	K	25	4



โดยที่

Power Input	=	พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า (kW)
$m_s$	=	มวลของเหล็ก (kg)
$C_{p,s}$	=	ความจุความร้อนจำเพาะของเหล็ก (kJ/kg K)
$\Delta T_s$	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา (K)
$\Delta t$	=	ช่วงเวลา (s)
$\dot{m}_w$	=	อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/hr)
$C_{p,w}$	=	ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg K)
$\Delta T_w$	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (K)

เมื่อทำการวัดค่าต่างๆ ที่ต้องใช้ในสมการสมดุลความร้อนโดยจะทำการวัดค่าต่างๆ 2 ช่วง คือช่วงให้ความร้อน กับช่วงความร้อนคงที่ และเมื่อคำนวณจากสมการสมดุลความร้อน พบว่า พลังงานที่ใส่เข้าไปในเตาจะไปทำให้เหล็กในเตาหลอมเหลว และพลังงานที่เหลือจะสูญเสียออกไปกับน้ำหล่อเย็น และสูญเสียไปกับการพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อนรอบๆ เตาหลอม

เมื่อนำค่าในตารางที่ 4.5 มาแทนค่าลงในสมการสมดุลความร้อนจะได้ดังนี้

ช่วงให้ความร้อน (Heating Phase)

พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า = ความร้อนให้กับเหล็ก + ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น + ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

$$\text{Power Input} = \frac{m_s \cdot C_{p,s} \cdot \Delta T_s}{\Delta t} + \dot{m}_w \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_w + \dot{H}_L$$

$$1000 = 231.12 + 667.64 + \dot{H}_L$$

$$\dot{H}_L = 101.24 \text{ kW}$$

ช่วงรักษาความร้อน (Holding Phase)

พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า = ความร้อนให้กับเหล็ก + ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น + ความร้อนสูญเสียอื่นๆ

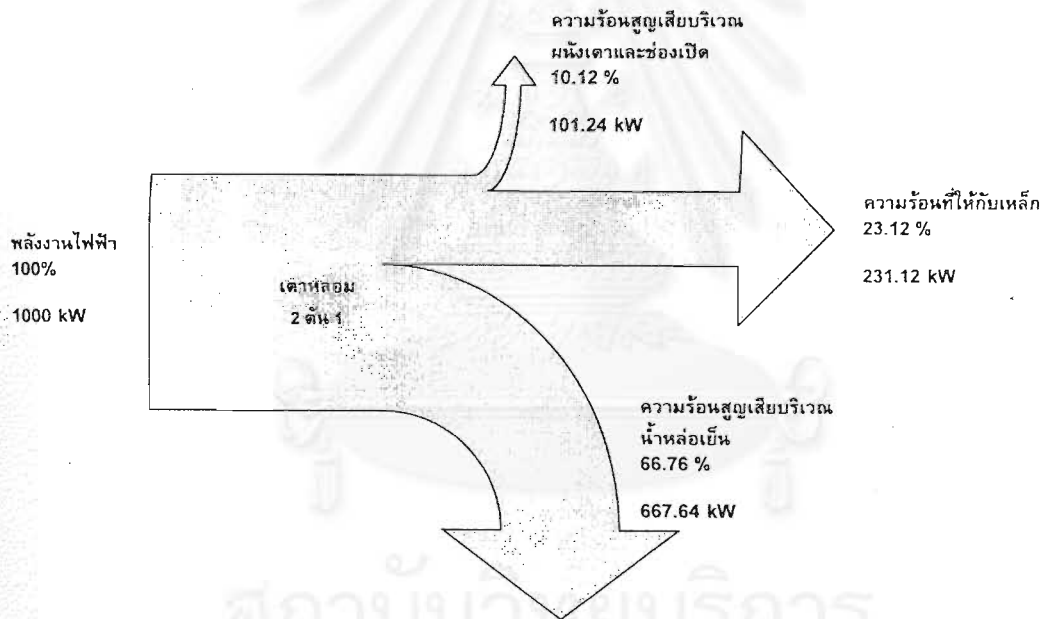
$$\text{Power Input} = \frac{m_s \cdot C_{p,s} \cdot \Delta T_s}{\Delta t} + \dot{m}_w \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_w + \dot{H}_L$$

$$150 = 0 + 106.82 + \dot{H}_L$$

$$\dot{H}_L = 43.18 \text{ kW}$$

จากการคำนวณพบว่าค่าความร้อนสูญเสียจากทั้งสองช่วงมีค่าต่างกันค่อนข้างมาก ทั้งนี้ค่าพลังงานป้อนเข้าในระหว่าง ช่วงให้ความร้อน กับ ช่วงรักษาความร้อน นั้นพบว่ามีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก ค่าความร้อนสูญเสียในคอยล์จะมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานป้อนเข้านี้ และอาจเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้ค่าความร้อนสูญเสียจากทั้งสองช่วงมีค่าต่างกัน

เมื่อพิจารณาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการหลอมเหล็กของช่วงให้ความร้อน และนำมาเขียนแผนภาพแรงก๊ไดอะแกรม (ดังแสดงในรูปที่ 4.11) จะพบว่าความร้อนที่เข้าสู่เตาจะเข้าสู่เหล็กเพียงแค่ 23.12% หรือจะพูดได้ว่าประสิทธิภาพของเตาเท่ากับ 23.12% โดยที่ความร้อนส่วนมากจะสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น ซึ่งคิดเป็นปริมาณถึง 66.76% ส่วนความร้อนที่เหลือจะสูญเสียไปตามช่องเปิดและผนังเตาคิดเป็น 10.12%



รูปที่ 4.11 แรงก๊ไดอะแกรมในช่วงให้ความร้อน

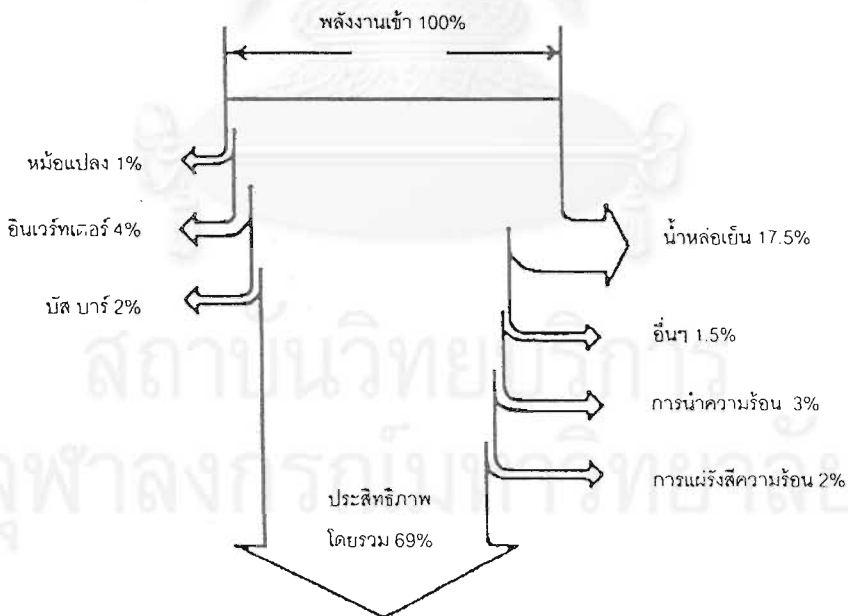
จากลักษณะกระบวนการให้ความร้อนตามที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้สามารถวิเคราะห์การใช้พลังงานของเตาหลอมได้ โดยการให้พลังงานของเตาหลอมจะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ช่วงให้ความร้อน ช่วงความร้อนคงที่ และช่วงหยุดให้ความร้อน โดยทั้ง 3 ช่วงนั้นเป็นช่วงที่เหล็กหลอมเหลวหมดแล้ว และเป็นช่วงที่สามารถวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตาได้ซึ่งก็เพื่อจะศึกษาการวัดอุณหภูมิในเตาอย่างต่อเนื่องนั่นเ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

## บทที่ 5

### แบบจำลองทางความร้อนของเตาหลอม

#### 5.1 สมการสมดุลความร้อน

การที่จะวัดอุณหภูมิเหล็กในเตาโดยทางอ้อมนั้นจำเป็นต้องรู้ตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับอุณหภูมิเหล็กซึ่งในการหาตัวแปรที่มีผลกับอุณหภูมิเหล็กในเตานั้นจำเป็นต้องรู้ว่าความร้อนที่เข้าสู่เตานั้นนอกจากไปทำให้เหล็กในเตาอุณหภูมิสูงขึ้นแล้ว ความร้อนในส่วนของเหล็กลูกที่ไหลออกไปที่ไหนบ้าง ซึ่งในการพิจารณาถึงปัญหานี้ จะใช้สมการสมดุลความร้อน (Heat Balance) ของเตาในการพิจารณา ซึ่งเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่โรงงานใช้นั้นเป็นแบบ Crucible ชนิดความถี่สูง พบว่าแรงกักไดอะแกรมของสมดุลความร้อนของเตาหลอมชนิดนี้โดยทั่วๆ ไปจะเป็นไป ดังแสดงในรูปที่ 5.1 [7] และจะมีรูปแบบสมการสมดุลความร้อนดังนี้



รูปที่ 5.1 ไดอะแกรมสมดุลความร้อนของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบ Crucible ชนิดความถี่สูง

สมการสมดุลความร้อน (Heat Balance)

$$\text{ความร้อนเข้า} = \text{ความร้อนออก} + \text{ความร้อนสูญเสีย}$$

(2)

ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปสมดุลความร้อนของเตา

ความร้อน (kW)	สัญลักษณ์และสมการ
ความร้อนเข้า	$P_m$
ความร้อนที่ให้กับเหล็ก	$\dot{Q}_S = \frac{m_S \cdot L}{\Delta t} + \frac{m_S \cdot C_{p,S} \cdot \Delta T_S}{\Delta t}$ (3)
ความร้อนสูญเสียในหม้อแปลง	$\dot{Q}_T = 4 \cdot I_{INV}^2 \cdot R_{CU}$ (4)
ความร้อนสูญเสียกับระบบหล่อเย็น	$\dot{Q}_W = \dot{M}_W \cdot C_{p,W} \cdot \Delta T_W$ (5)
ความร้อนสูญเสียจากการนำความร้อน	$\dot{Q}_C = \frac{T_S - T_W}{R} \cdot 10^{-3}$ (6)
ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี	$\dot{Q}_R = 5.67 \cdot 10^{-3} \cdot A \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{T_S}{100}\right)^4$ (7)
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	$\dot{Q}_H$

โดยที่  $m_S$  = มวลของเหล็ก (kg)

$\dot{M}_W$  = อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/s)

$C_{p,S}$  = ค่าความจุความร้อนของเหล็ก (kJ/kg °C)

$C_{p,W}$  = ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg °C)

$L$  = ค่าความร้อนแฝงของเหล็ก (kJ/kg)

$T_S$  = อุณหภูมิของเหล็ก (K)

$T_W$  = อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (K)

$\Delta t$  = เวลาที่ใช้หลอม (s)

$R$  = ค่าความต้านทานความร้อนของผนังเตา (kW/K)

$\varepsilon$  = ค่า Emissivity

$A$  = พื้นที่ผิวของการแผ่รังสี (m<sup>2</sup>)

$R_{CU}$  = ความต้านทานของลวดตัวนำในหม้อแปลง (โอห์ม)

$I_{INV}$  = กระแสอินเวอร์เตอร์ (Amp)

ความร้อนเข้า ความร้อนที่ใส่เข้าไปในเตาในที่นี้ก็คือ พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้านั่นเอง ในส่วนของความร้อนออก ก็คือความร้อนที่ให้แก่เหล็กในเตา โดยจะแบ่งเป็น ความร้อนที่ทำให้เหล็กอุณหภูมิสูงขึ้น (Sensible Heat) กับ ความร้อนแฝงของเหล็ก (Latent Heat)

เมื่อพิจารณาถึง ความร้อนสูญเสียของเตา พบว่าจะประกอบด้วยลักษณะการสูญเสีย ความร้อน 2 ลักษณะ คือ ความร้อนสูญเสียทางด้านไฟฟ้า (Electrical Loss) และ ความร้อนสูญเสียทางด้านความร้อน (Heat Loss)

เมื่อพิจารณา ความร้อนสูญเสียทางด้านไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย ความร้อนสูญเสียใน หม้อแปลง (Transformer Loss) ซึ่งเกิดขึ้นจากการผ่านกระแสไปบนตัวนำไฟฟ้าที่มีความต้านทาน ความร้อนสูญเสียในส่วนนี้จะขึ้นกับปริมาณกระแสไฟฟ้าและค่าความต้านทานของขดลวด หม้อแปลง ความร้อนสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ (Inverter Loss) ความร้อนสูญเสียในสายไฟ (Wiring Loss) ความร้อนสูญเสียในคอยล์ (Coil Loss) และความร้อนสูญเสียอื่นๆ (Other Loss) กลไกของการสูญเสียทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าและค่าความต้านทาน

ความร้อนสูญเสียทางด้านความร้อน จะประกอบไปด้วย ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการ นำความร้อนจากผนังเตาไปสู่คอยล์ (Conduction Loss) เนื่องจากผนังเป็นฉนวนทางความร้อนในระดับหนึ่ง ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการแผ่รังสีบริเวณปากเตา (Radiation Loss) เนื่องจาก น้ำเหล็กจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบรรยากาศรอบนอกมาก ความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อนของ ระบบน้ำหล่อเย็น เนื่องจากว่าขดลวดเหนี่ยวนำจะสามารถทนอุณหภูมิได้ปริมาณหนึ่ง ดังนั้นจึง ต้องมีการระบายความร้อนที่ขดลวดนี้ตลอดเวลาเพื่อไม่ให้อุณหภูมิที่ขดลวดมีค่าเกินที่กำหนดและ สร้างความเสียหายให้กับขดลวด และความร้อนสูญเสียอื่นๆ (Other Loss) โดยที่กลไกการสูญเสีย ทางความร้อนจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิ

ดังนั้นสมการสมดุลความร้อนจะเขียนได้ดังนี้

$$P_{in} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_r + \dot{Q}_w + \dot{Q}_c + \dot{Q}_R + \dot{Q}_{in} \quad (8)$$

## 5.2 แบบจำลองทางความร้อนของเตา

จากการทดลองที่ออกแบบในหัวข้อ 4.1 และสมการสมดุลความร้อนในหัวข้อ 5.1 พบว่า ตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสมการและสามารถตรวจวัดได้ ประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ เตาล้อม อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น เข้า-ออก อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และมวลของเหล็ก ในการหาแบบจำลองทางความร้อนของระบบเตาล้อมที่ออกแบบนี้จะ พยายามนำค่าความร้อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นของเตาล้อมมาอยู่ในรูปของตัวแปรที่สามารถตรวจวัดได้ เพื่อให้ค่าอุณหภูมิที่ประมาณได้นี้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิในเตาจริงที่สุด โดยที่เมื่อพิจารณาจาก สมการทางความร้อนต่างๆ (ดังแสดงในตารางที่ 5.1) พบว่า ความร้อนที่ให้กับเหล็กในขั้นตอนการ

วัตถุอุณหภูมิน้ำเหล็กนั้น เป็นขั้นตอนที่เหล็กในเตาหลอมกลายเป็นของเหลวหมดแล้ว เพราะฉะนั้น ความร้อนในส่วนความร้อนแฝง (Latent Heat) จึงไม่มี จะมีเฉพาะในส่วนความร้อนที่ทำให้ อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (Sensible Heat) ดังนั้นจึงสามารถตัดความร้อนส่วนนี้ทิ้งไปได้ และพบว่าในส่วน ของความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นนี้ จะเป็นฟังก์ชันของผลต่างของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา  $f(\Delta T_S)$  เมื่อพิจารณาความร้อนที่สูญเสียในหม้อแปลงพบว่าจะเป็นฟังก์ชันของค่าความต้านทาน และกระแส ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความร้อนที่ สูญเสียในหม้อแปลงจะเป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า  $f(P_m)$  ในส่วนของค่าความ ร้อนสูญเสียกับระบบหล่อเย็น ค่าความร้อนในส่วนนี้คือความร้อนที่ใช้จ่ายเพื่อความร้อนให้กับระบบ คอลล์ของเตา ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นและค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น  $f(\dot{M}_w, T_w)$  ในส่วนของความร้อนสูญเสียจากการนำความร้อนนั้นก็คือน้ำร้อนจากน้ำเหล็กใน เตาผ่านผนังเตาออกมาซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา  $f(\Delta T_S)$  และในส่วนของ ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีพบว่าจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตายกกำลังสี่ซึ่งจาก การศึกษาจากสมดุลความร้อนของเตาชนิดเดียวกันนี้พบว่ามีค่าน้อย จึงให้รวมกับค่าความร้อน สูญเสียอื่นๆ และประมาณให้มีค่าคงที่ (heatloss) ทำให้เมื่อแทนค่าตัวแปรที่วัดค่าได้กับตัวแปรที่ เป็นฟังก์ชันของสมการทางความร้อนจะได้รูปแบบสมการดังนี้

$$P_m = \frac{m_s \cdot C_{p,s} \cdot \Delta T_S}{\Delta t} + \dot{M}_w \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_w + f(P_m) + f(\Delta T_S) + \text{heatloss} \quad (9)$$

แทนค่าคงที่ a ลงในความร้อนสูญเสียในหม้อแปลงที่เป็นฟังก์ชันของพลังงานป้อนเข้าและ แทนค่าคงที่ b ลงในความร้อนสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ น้ำเหล็กในเตา

$$P_m = \frac{m_s \cdot C_{p,s} \cdot \Delta T_S}{\Delta t} + \dot{M}_w \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_w + a \cdot P_m + b \cdot \Delta T_S + \text{heatloss} \quad (10)$$

จากสมการข้างบนพบว่าค่ามวลของเหล็กที่ใส่เข้าไปในเตาในแต่ละครั้งที่ทำการหลอมจะ มีค่าคงที่อยู่ที่ 2,000 กิโลกรัม ส่วนค่าความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กนั้นถึงแม้แต่ละครั้งที่ทำ การหลอม จะมีส่วนผสมที่ใส่ลงไปไม่เหมือนกันและคุณภาพเหล็กที่ใส่แต่ละครั้งจะไม่เท่ากันแต่ก็ ไม่ทำให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเหล็กเปลี่ยนแปลงไปมากนักจึงประมาณให้ค่าความ จุความร้อนจำเพาะของเหล็กมีค่าคงที่ ต่อมาเมื่อพิจารณาอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นจากการ

ตรวจวัดพบว่ามีค่าเปลี่ยนแปลงไปในแต่ละครั้งที่ทำการหลอม ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากระบบน้ำหล่อเย็นของโรงงานเป็นระบบที่รวมศูนย์ กล่าวคือน้ำหล่อเย็นที่หล่อเย็นแล้วจะไหลผ่านหอหล่อเย็น (Cooling Tower) มารวมกันที่แท็งก์ แล้วสูบกลับไปใช้ใหม่ทำให้บางครั้งปริมาณน้ำที่ใช้ไม่เพียงพอ และบางครั้งก็เกิดการอุดตันภายในท่อคอยล์ทำให้อัตราการไหลของน้ำไม่คงที่ ส่วนค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำนั้นมีค่าคงที่ทุกครั้งที่ทำการหลอม ส่วนค่าความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีรวมกับความร้อนสูญเสียอื่นๆ ที่ประมาณให้มีค่าคงที่นั้นจะรวมอยู่ในค่า heatloss โดยช่วงเวลาที่ทำกรวัดจะมีค่าคงที่เช่นเดียวกันซึ่งในการทดลองจะทำการวัดค่าตัวแปรทุกๆ หนึ่งวินาที ดังนั้นเมื่อจัดสมการใหม่จะได้ดังนี้

จากสมการที่ (10) จัดตัวแปรให้อยู่ข้างเดียวกัน

$$(1-a)P_m = \left( \frac{m_s \cdot C_{p,s}}{\Delta t} + b \right) \cdot \Delta T_s + \dot{M}_w \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_w + \text{heatloss}$$

หลังจากนั้นทำการย้ายข้างนำค่าคงที่มารวมกัน

$$P_m = \frac{\left( \frac{m_s \cdot C_{p,s}}{\Delta t} + b \right)}{(1-a)} \cdot \Delta T_s + \left( \frac{C_{p,w}}{1-a} \right) \cdot \dot{M}_w \cdot \Delta T_w + \left( \frac{\text{heatloss}}{1-a} \right)$$

แทนค่าคงที่ที่นำมารวมกันด้วย C1, C2 และ C3 จะได้สมการดังนี้

$$P_m = C1 \cdot \Delta T_s + C2 \cdot \dot{M}_w \cdot \Delta T_w + C3 \quad (11)$$

โดยที่

$$C1 = \frac{\left( \frac{m_s \cdot C_{p,s}}{\Delta t} + b \right)}{(1-a)}$$

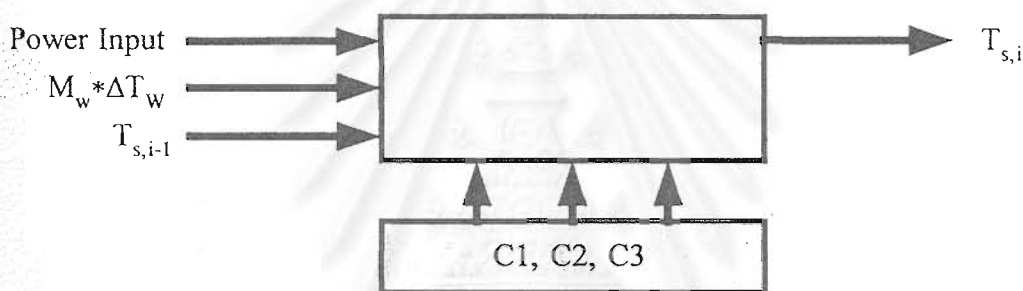
$$C2 = \left( \frac{C_{p,w}}{1-a} \right)$$

$$C3 = \left( \frac{\text{heatloss}}{1-a} \right)$$

จัดรูปสมการเพื่อหาค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา

$$T_{s,i} = \frac{(P_m + C1 \cdot T_{s,i-1} - C2 \cdot \dot{M}_w \cdot \Delta T_w - C3)}{C1} \quad (12)$$

โดยที่  $T_{s,i}$  เป็นอุณหภูมิน้ำเหล็กในเวลาทีประมาณ และ  $T_{s,i-1}$  เป็นอุณหภูมิน้ำเหล็กทีประมาณในครั้งที่ผ่านมา ซึ่งในการทีจะประมาณอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาจากแบบจำลองทางความร้อนทีหามาได้นี้จำเป็นต้องวัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาจริงอย่างน้อยหนึ่งครั้ง โดยรูปแบบของแบบจำลองทางความร้อนจะมีลักษณะดังรูปที 5.2



รูปที 5.2 แบบจำลองทางความร้อนของระบบเตาหลอม

ในการประมาณค่าอุณหภูมิในเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากแบบจำลองทางความร้อนทีหามาได้นี้ เมื่อทำการทดลองและทำการคำนวณหาค่าคงที  $C1, C2, C3$  แล้วนำกลับไปแทนในแบบจำลองทางความร้อนของเตาก็จะสามารถประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาได้ (ต้องทำการวัดอุณหภูมิจริงอย่างน้อยหนึ่งครั้ง) ซึ่งเมื่อสังเกตแบบจำลองทีหามาได้พบว่าค่าอุณหภูมิทีประมาณได้ จะคำนึงถึงผลกระทบของตัวแปรทีมีผลกับอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาทั้งหมดตามสมการสมดุลความร้อน ดังนั้นเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการหลอมเหล็กเกิดขึ้นหรือมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ เช่น มีการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อุณหภูมิทีประมาณได้นี้ก็จะไม่เปลี่ยนเปลี่ยงไปจากอุณหภูมิในเตาจริงมากนัก

### 5.3 การหาพารามิเตอร์ของสมการ

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทีไม่รู้ค่านั้นจะใช้วิธีการกำลังสองน้อยทีสุด (Least-Squares Method) ซึ่งวิธีนี้จะเป็นวิธีทีทำให้เกิดผลรวมของค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยทีสุด ซึ่งจะมีหลักการดังนี้ ถ้ามีชุดข้อมูล  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  โดยที  $x$  เป็นตัวแปรต้น และ



$y$  เป็นตัวแปรตาม โดยที่  $f(x)$  มีค่าความผิดพลาดของแต่ละจุดของชุดข้อมูลเท่ากับ  $d$ , ยกตัวอย่างเช่น  $d_1 = y_1 - f(x_1)$ ,  $d_2 = y_2 - f(x_2)$ , ...,  $d_n = y_n - f(x_n)$  โดยที่วิธีกำลังสองน้อยที่สุดนี้จะมีคุณสมบัติดังนี้

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

จากสมการทางความร้อนของเขาในสมการที่ 12 และจากวิธีการที่ได้กล่าวมาสามารถนำมาหาค่าพารามิเตอร์  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  ได้โดยการทดลองวัดค่าจริงที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการประกอบด้วยค่าพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอมเป็นกิโลวัตต์ ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็นเป็นองศาเซลเซียสและกิโลกรัมต่อวินาทีตามลำดับมาทุกๆ 1 วินาที และทำการวัดค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมระหว่างขบวนการเท่าที่สามารถกระทำได้

การทดลองเพื่อประมาณค่า  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  นี้ กระทำโดยเก็บข้อมูลต่างๆ จากกระบวนการทั้งหมด 5 รอบการทำงาน โดยในแต่ละรอบการทำงานนี้จะปรับให้ค่าพลังงานป้อนเข้ามีค่าต่างๆ กัน และรายละเอียดของแต่ละรอบการทำงานแสดงอยู่ในตารางที่ 5.2

จากนั้นจึงได้นำข้อมูลทั้งหมดมาประมาณหาค่าพารามิเตอร์  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  พร้อมกัน โดยมีจำนวนจุดทดลองโดยรวมทั้งหมด 2,407 จุด และ จำนวนจุดที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก 24 จุด โดยที่ข้อมูลที่ทดลองนี้มีค่าพลังงานป้อนเข้าต่างๆ กัน ตั้งแต่ 700 ถึง 1,000 กิโลวัตต์ การที่เลือกค่าพลังงานป้อนเข้าต่างๆ กันจะทำให้แบบจำลองหรือค่าพารามิเตอร์  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  ที่หาออกมาได้มีเสถียรภาพสูง ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นมากสำหรับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ เมื่อนำข้อมูลตามที่ได้กล่าวมานี้มาหาค่าพารามิเตอร์  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  ที่ทำให้แบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกับผลลัพธ์จริงหรือค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมทั้ง 24 จุดมากที่สุด

ซึ่งรายละเอียดในการคำนวณมีดังต่อไปนี้ เริ่มแรกหลังจากวัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาจุดแรกแล้ว หลังจากนั้นจะทำการคำนวณอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาในจุดที่ 2 โดยการแทนค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาที่ทำการวัดครั้งแรก พร้อมทั้งสมมติค่าคงที่  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  แทนลงในสมการที่ 12

หลังจากนั้นนำค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาจุดที่ 2 ที่คำนวณได้แทนค่ากลับลงในสมการที่ 12 พร้อมทั้งแทนค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็นที่ได้จากการวัดในจุดต่อมา และค่าคงที่  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  ที่สมมติขึ้น เพื่อคำนวณหาอุณหภูมิน้ำเหล็กในจุดที่ 3

หลังจากนั้นทำการคำนวณวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนได้อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาครบ 2,407 จุดตามที่ได้ทำการทดลองมา ตามรูปแบบสมการนี้

$$\begin{aligned}
 T_{S,2} &= \frac{(P_{in,2} + C1 \cdot T_{S,1} - C2 \cdot \dot{M}_{W,2} \cdot \Delta T_{W,2} - C3)}{C1} \\
 T_{S,3} &= \frac{(P_{in,3} + C1 \cdot T_{S,2} - C2 \cdot \dot{M}_{W,3} \cdot \Delta T_{W,3} - C3)}{C1} \\
 \dots &= \dots \\
 \dots &= \dots \\
 T_{S,2407} &= \frac{(P_{in,2407} + C1 \cdot T_{S,2406} - C2 \cdot \dot{M}_{W,2407} \cdot \Delta T_{W,2407} - C3)}{C1}
 \end{aligned}$$

เมื่อได้อุณหภูมิในเตาครบตามจุดที่ได้ทำการทดลองมาแล้วนั้น ก็นำค่าพลังงานไฟฟ้า บ้อนเข้า อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น อุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในเตาทั้ง 2,407 จุด มาทำการประมาณค่าคงที่  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  โดยใช้วิธี Levenberg Marguardt ซึ่งเมื่อทำการคำนวณแล้วพบว่าค่าคงที่  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  ที่ประมาณค่าได้นั้นมีค่าลู่ออกจากค่าที่สมมติไว้ตั้งแต่ครั้งแรกก็ให้ทำการสมมติค่าคงที่  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  ขึ้นมาใหม่แล้วทำการ คำนวณหาค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาในจุดถัดๆ ไปเพื่อนำมาประมาณหาค่าคงที่  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  ใหม่อีกรอบ โดยจะคำนวณซ้ำอย่างนี้ไปเรื่อยๆ จนกว่าค่าคงที่นั้นจะลู่เข้า

ซึ่งเมื่อทำการคำนวณตามวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นพบว่า ค่าคงที่  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  มีค่าดังนี้

$$C1 = 3810, C2 = 7.60, C3 = 417$$

ดังนั้นแบบจำลองทางความร้อนของเตาจะแสดงได้ดังสมการที่ 13

$$T_{S,i} = \frac{(P + 3810 \cdot T_{S,i-1} - 7.60 \cdot \dot{M}_W \cdot \Delta T_W - 417)}{3810} \quad (13)$$

โดยเมื่อเปรียบเทียบการประมาณอุณหภูมิโดยแบบจำลองทางความร้อนที่หามาได้กับชุด ข้อมูลที่นำมาหาค่าพารามิเตอร์  $C1$ ,  $C2$ ,  $C3$  จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 5.3

## ตารางที่ 5.2 การทำงานของชุดการทดลองทั้ง 5

## รอบการทำงานที่ 1

ค่าพลังงานป้อนเข้า	950 กิโลวัตต์
อัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น	7.80 กิโลกรัมต่อวินาที
จำนวนจุดทดลอง	2677 จุด
จำนวนจุดทดลองช่วงวัดอุณหภูมิ	402 จุด
จำนวนจุดที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4 จุด

## รอบการทำงานที่ 2

ค่าพลังงานป้อนเข้า	900 กิโลวัตต์
อัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น	7.50 กิโลกรัมต่อวินาที
จำนวนจุดทดลอง	2156 จุด
จำนวนจุดทดลองช่วงวัดอุณหภูมิ	450 จุด
จำนวนจุดที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	6 จุด

## รอบการทำงานที่ 3

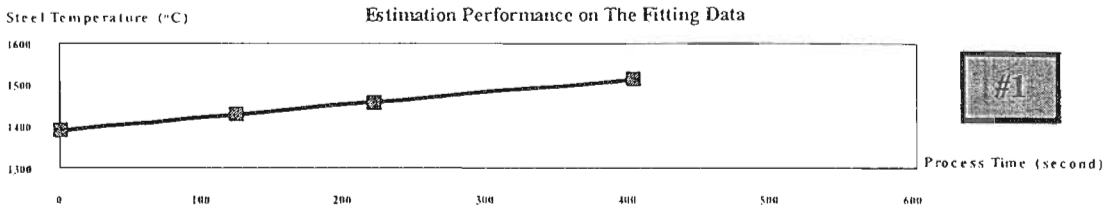
ค่าพลังงานป้อนเข้า	700 กิโลวัตต์
อัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น	7.40 กิโลกรัมต่อวินาที
จำนวนจุดทดลอง	2512 จุด
จำนวนจุดทดลองช่วงวัดอุณหภูมิ	546 จุด
จำนวนจุดที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4 จุด

## รอบการทำงานที่ 4

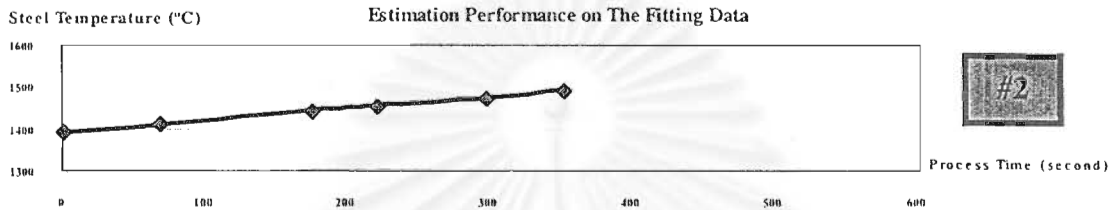
ค่าพลังงานป้อนเข้า	850 กิโลวัตต์
อัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น	7.80 กิโลกรัมต่อวินาที
จำนวนจุดทดลอง	2604 จุด
จำนวนจุดทดลองช่วงวัดอุณหภูมิ	508 จุด
จำนวนจุดที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	4 จุด

## รอบการทำงานที่ 5

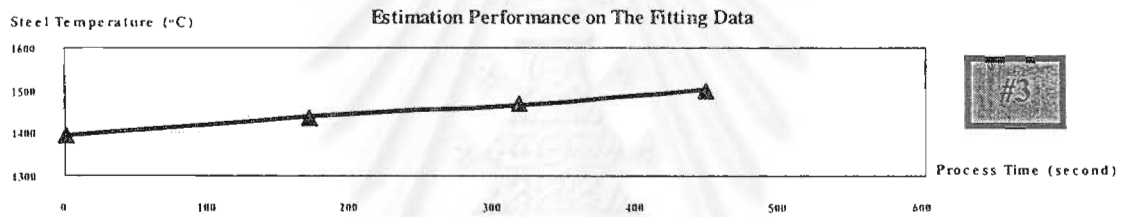
ค่าพลังงานป้อนเข้า	1000 กิโลวัตต์
อัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น	7.50 กิโลกรัมต่อวินาที
จำนวนจุดทดลอง	2789 จุด
จำนวนจุดทดลองช่วงวัดอุณหภูมิ	501 จุด
จำนวนจุดที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	6 จุด



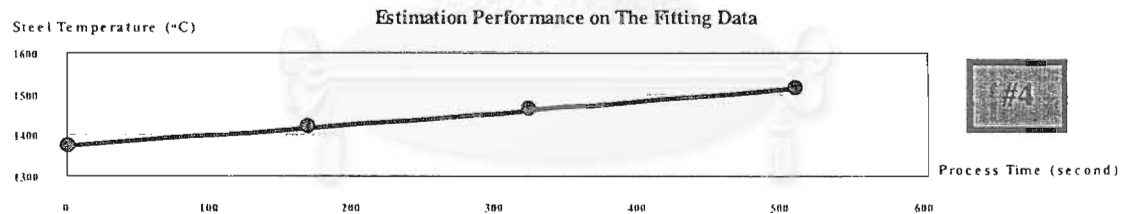
ก) ชุดทดลองที่ 1



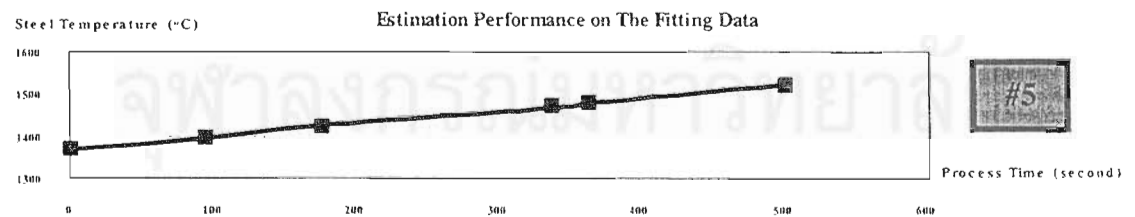
ข) ชุดทดลองที่ 2



ค) ชุดทดลองที่ 3



ง) ชุดทดลองที่ 4



จ) ชุดทดลองที่ 5

รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบการประมาณค่าอุณหภูมิกับชุดข้อมูลที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 5 ชุดการทดลอง

ในการหาแบบจำลองทางความร้อนของเตานี้ได้ทำการทดลองมาทั้งหมด 5 การทดลอง มีจำนวนจุดการทดลองทั้งหมด 2,407 จุด ทำการทดลองที่พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าต่างๆกันและทำการวัดอุณหภูมิในเตามาทั้งหมด 24 ครั้ง พบว่าหลังจากหาพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าได้แล้วและทำการคำนวณกลับมาทำนายหาอุณหภูมิน้ำเหล็กเพื่อทำการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จริง พบว่าค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันเป็นส่วนมาก โดยที่มีค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่บวกลบ 6 องศาเซลเซียส คิดเป็นค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 2.3 องศาเซลเซียส ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 3.10 องศาเซลเซียส การที่อุณหภูมิที่ทำนายกับที่วัดได้จริงยังมีความผิดพลาดอยู่นั้นอาจเป็นเพราะว่า ค่าคงที่  $C$  ที่กำหนดขึ้นมาคือ ค่ามวลของเหล็กคูณด้วยค่าความร้อนจำเพาะของเหล็ก ( $C1$ ) นั้นในแต่ละครั้งที่ทำการหลอมมีการใส่ส่วนผสมของน้ำเหล็กที่ไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับความต้องการหลอมเหล็กไปใช้ทำผลิตภัณฑ์อะไร และนอกจากนี้ในบางครั้งยังมีการเอาน้ำเหล็กที่เหลือจากการเทลงแบบในรอบการหลอมครั้งที่แล้วหรือจากเตาอื่นๆ กลับมาผสมลงในเตาที่กำลังทำการหลอมอีก ทำให้ค่า  $C1$  นี้มีค่าไม่แน่นอนในแต่ละรอบที่ทำการหลอม และนอกจากนี้ความซับซ้อนของโครงสร้างเตาที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นสนามแม่เหล็กและเหนี่ยวนำทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้น ทำให้เกิดปัญหาสัญญาณรบกวนขึ้นอันเนื่องจากการเหนี่ยวนำในบริเวณเตาหลอมนั่นเอง ซึ่งค่าสัญญาณรบกวนนี้จะมีผลกับเครื่องมือวัดที่ใช้งานรวมทั้งระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผล ทำให้การทำนายหาค่าอุณหภูมิในเตาหลอมยังมีความผิดพลาดอยู่บ้าง

วิธีการที่น่าเสนอและออกแบบขึ้นนี้สามารถทำงานได้ดีภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัดเหล่านี้ ซึ่งได้เลือกแบบจำลองแบบกำลังถดถอยแบบน้อยสุดซึ่งมีโครงสร้างที่ง่ายและมีเสถียรภาพสูงมาใช้งาน และเมื่อคำนึงถึงแบบจำลองอย่างอื่น เช่น แบบนิวโร-ฟัซซี และแบบ ARX [9] พบว่าแบบจำลองเหล่านี้มีเสถียรภาพน้อย จึงได้เลือกใช้แบบจำลองแบบกำลังถดถอยแบบน้อยสุดสำหรับงานวิจัยนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การประมาณค่าอุณหภูมิ

6.1 วิธีการประมาณค่าอุณหภูมิ

การประมาณค่าอุณหภูมิทำได้โดยใช้แบบจำลองทางความร้อนของเตาที่หาออกมาได้ในบทความก่อนหน้านี้ รูปแบบของสมการสมดุลความร้อน สามารถเขียนได้ดังนี้

$$T_{S,i} = \frac{(P + 3810 \cdot T_{S,i-1} - 7.60 \cdot \dot{M}_w \cdot \Delta T_w - 417)}{3810} \quad (14)$$

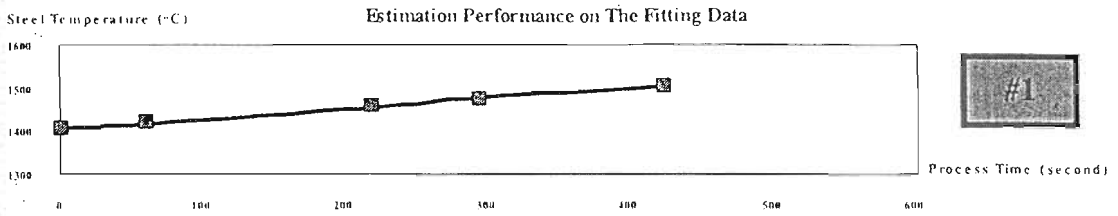
จากรูปแบบสมการข้างบน เมื่อเราสามารถวัดค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าเป็นกิโลวัตต์ ค่าปริมาณน้ำหล่อเย็นและค่าอุณหภูมิเข้าและออกของน้ำหล่อเย็น เป็นกิโลกรัมต่อวินาทีและ องศาเซลเซียสตามลำดับ และทราบค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กจุดแรก ก็จะทำให้สามารถประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในจุดถัดๆ ไปได้ การสุ่มค่าวัดในการทดลองใช้เวลา 10 วินาที และใช้วิธีการ Sample & Hold แบบ Zero-Order-Hold จากนั้น จึงนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วัดได้นี้มาประมาณค่าผ่านทางแบบจำลองทางความร้อนของเตาหลอม การทดสอบความแม่นยำในการประมาณค่าอุณหภูมิกระทำโดยทดสอบกับ 10 ชุดการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบการประมาณค่าอุณหภูมิ

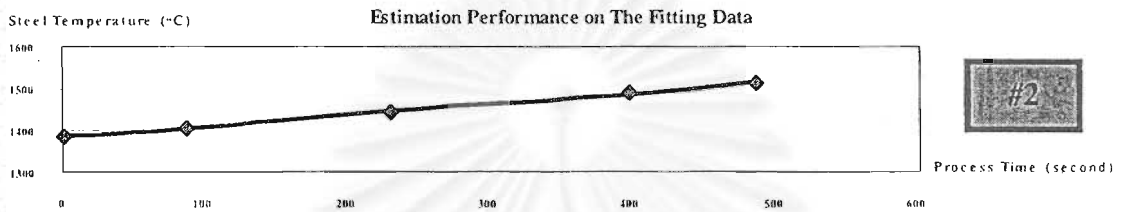
ชุดทดลองที่	1	2	3	4	5
ค่าพลังงานป้อนเข้า (กิโลวัตต์)	700	800	900	1150	1150
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (กิโลกรัม/วินาที)	7.8	8.2	7.9	7.9	7.6
จำนวนจุดทดลอง	3173	2589	2473	2426	2581
จำนวนจุดทดลองช่วงวัดอุณหภูมิ	423	485	602	487	294
จำนวนจุดที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	5	5	5	5	4

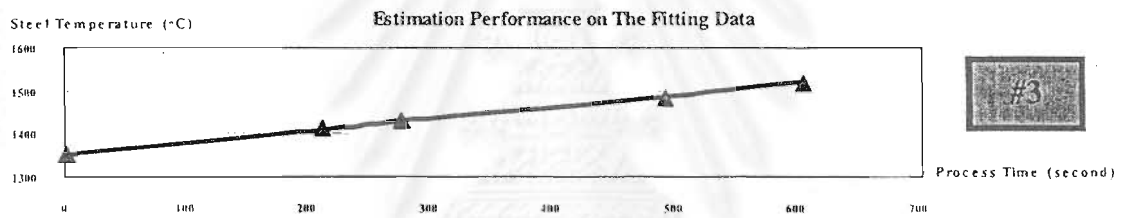
ชุดทดลองที่	6	7	8	9	10
ค่าพลังงานป้อนเข้า (กิโลวัตต์)	1100	1100	750	1100	1000
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (กิโลกรัม/วินาที)	8.2	7.8	7.5	8.2	7.7
จำนวนจุดทดลอง	2581	2591	2952	2670	2845
จำนวนจุดทดลองช่วงวัดอุณหภูมิ	435	394	469	474	414
จำนวนจุดที่วัดค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	5	5	5	6	5



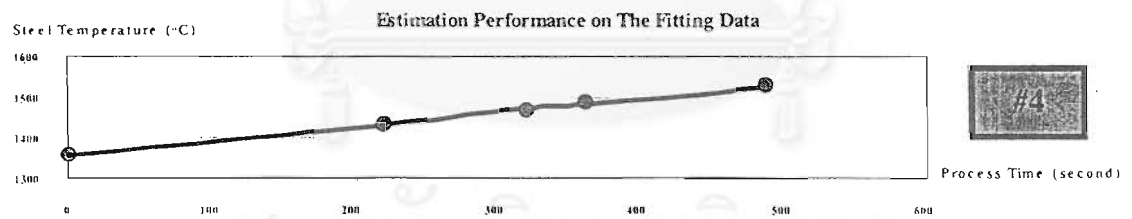
ก) ชุดทดลองที่ 1



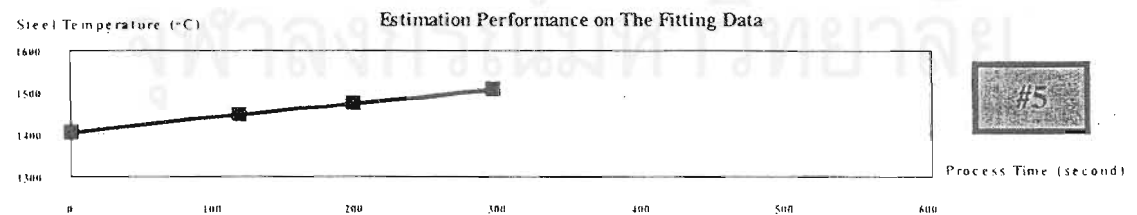
ข) ชุดทดลองที่ 2



ค) ชุดทดลองที่ 3

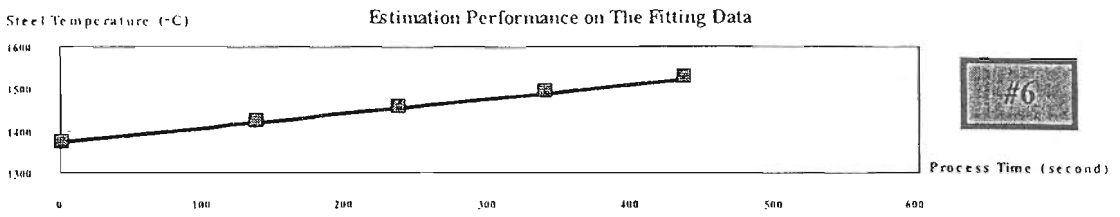


ง) ชุดทดลองที่ 4

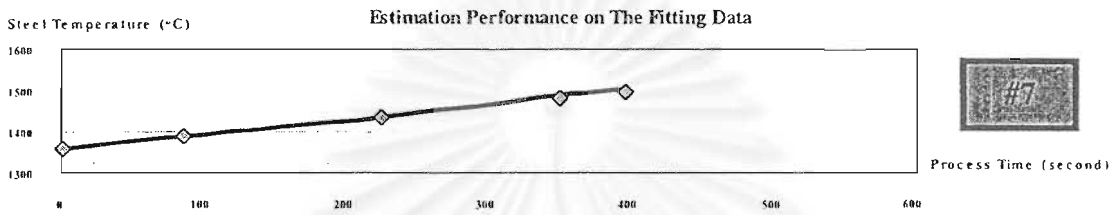


จ) ชุดทดลองที่ 5

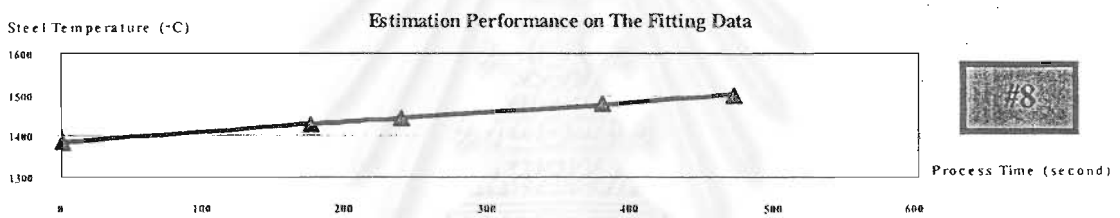
รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จริงกับอุณหภูมิที่ทำนายของทั้ง 10 ชุดการทดลอง



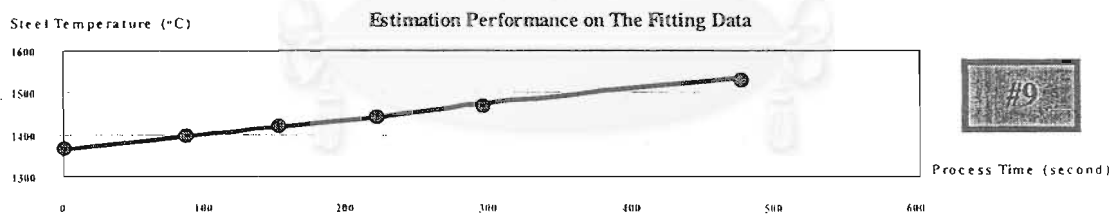
ฉ) ชุดทดลองที่ 6



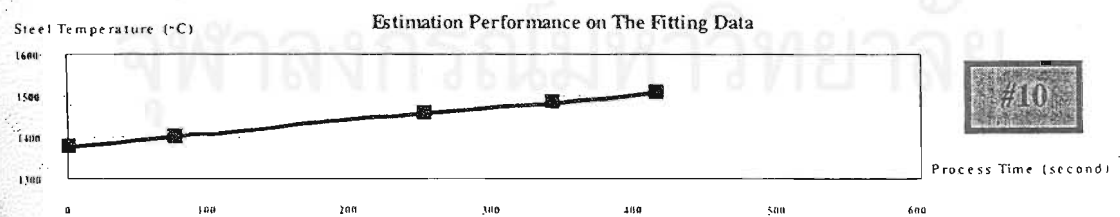
ช) ชุดทดลองที่ 7



ซ) ชุดทดลองที่ 8



ฅ) ชุดทดลองที่ 9



ฉ) ชุดทดลองที่ 10

รูปที่ 6.1 การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จริงกับอุณหภูมิที่ทำนายของทั้ง 10 ชุดการทดลอง (ต่อ)



ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิที่ประมาณได้กับค่าอุณหภูมิที่วัดจริงของถัง 10 ชุดการทดลอง

ก) ชุดทดลองที่ 1

จุดทดลองที่	1	2	3	4	5
อุณหภูมินำเหล็กจากการประมาณ	1404	1419	1457	1473	1504
อุณหภูมินำเหล็กจากการวัด	1404	1418	1455	1477	1502

ข) ชุดทดลองที่ 2

จุดทดลองที่	1	2	3	4	5
อุณหภูมินำเหล็กจากการประมาณ	1383	1405	1443	1487	1510
อุณหภูมินำเหล็กจากการวัด	1383	1405	1445	1483	1517

ค) ชุดทดลองที่ 3

จุดทดลองที่	1	2	3	4	5
อุณหภูมินำเหล็กจากการประมาณ	1354	1413	1431	1484	1519
อุณหภูมินำเหล็กจากการวัด	1354	1410	1432	1488	1523

ง) ชุดทดลองที่ 4

จุดทดลองที่	1	2	3	4	5
อุณหภูมินำเหล็กจากการประมาณ	1356	1434	1470	1487	1529
อุณหภูมินำเหล็กจากการวัด	1356	1433	1475	1483	1523

จ) ชุดทดลองที่ 5

จุดทดลองที่	1	2	3	4	
อุณหภูมินำเหล็กจากการประมาณ	1404	1445	1473	1509	
อุณหภูมินำเหล็กจากการวัด	1404	1445	1472	1506	

ฉ) ชุดทดลองที่ 6

จุดทดลองที่	1	2	3	4	5
อุณหภูมินำเหล็กจากการประมาณ	1374	1422	1457	1493	1528
อุณหภูมินำเหล็กจากการวัด	1374	1419	1453	1487	1521

ช) ชุดทดลองที่ 7

จุดทดลองที่	1	2	3	4	5
อุณหภูมินำเหล็กจากการประมาณ	1358	1387	1435	1479	1495
อุณหภูมินำเหล็กจากการวัด	1358	1387	1435	1487	1502

## ข) ชุดทดลองที่ 8

ชุดทดลองที่	1	2	3	4	5
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการประมาณ	1384	1428	1444	1478	1500
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการวัด	1384	1427	1443	1475	1503

## ค) ชุดทดลองที่ 9

ชุดทดลองที่	1	2	3	4	5	6
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการประมาณ	1366	1394	1416	1441	1466	1529
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการวัด	1366	1395	1418	1440	1473	1535

## ง) ชุดทดลองที่ 10

ชุดทดลองที่	1	2	3	4	5
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการประมาณ	1377	1401	1456	1484	1507
อุณหภูมิน้ำเหล็กจากการวัด	1377	1401	1458	1481	1509

จุดแรกที่วัดค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในรอบการทำงานจะใช้เป็นจุดในการเริ่มประมาณค่า ซึ่งเมื่อพิจารณาทั้ง 10 รอบการทำงาน หรือมีจุดที่เปรียบเทียบความแม่นยำในการวัดทั้งหมด 50 จุด ผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำในระดับหนึ่ง โดยเฉพาะในจุดแรกๆ ที่เริ่มประมาณค่า และในบางรอบการทำงานพบว่าค่าอุณหภูมิที่ทำนายกับค่าที่วัดได้จริง มีค่าใกล้เคียงกันมากในเงื่อนไขของการทำงานจริง (ดังแสดงในตารางที่ 6.2 และรูปที่ 6.1) พบว่าระบบที่ออกแบบนี้สามารถทำนายอุณหภูมิในเตาหลอมได้ แม่นยำในระดับ บวกลบ 8 องศาเซลเซียส มีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 2.42 องศาเซลเซียส ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 3.44 องศาเซลเซียส และค่าผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่บวกลบ 8 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นไปได้หลายสาเหตุ เช่นค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กที่วัดมานั้น จะต้องอาศัยพนักงานในโรงงานช่วยวัด ซึ่งในการวัดจะต้องจุ่มหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลให้สัมผัสกับ น้ำเหล็กโดยตรงซึ่งในการจุ่มวัดอุณหภูมิบางครั้งหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลอาจไปสัมผัสวัสดุสแลก (Slag) ในเตาทำให้ค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กบางค่าอาจผิดพลาดไป และนอกจากนี้สภาพของเตาหลอมของโรงงานซึ่งมีอายุมากแล้วประกอบกับสภาพการทำงานของเตาหลอมที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดในทุกๆ รอบของการทำงานทำให้เป็นไปได้ยากที่จะควบคุมสภาวะการทำงานของเตาหลอมให้เหมือนกันทุกๆ รอบของการทำงานได้

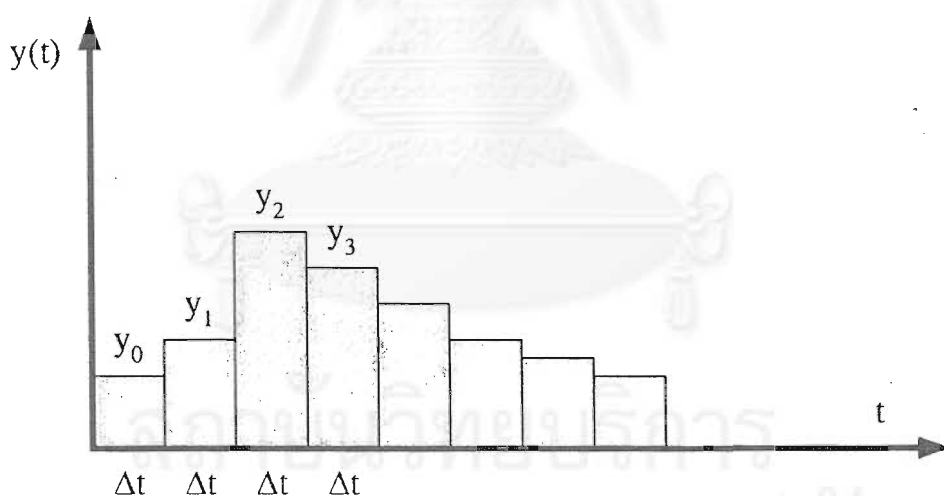
ซึ่งจากการสังเกตกราฟการทดลองประมาณค่าอุณหภูมิกับค่าที่วัดได้จริงนั้นค่าทั้งสองจะใกล้เคียงกันมากในช่วงแรกๆ ของการทำนาย ซึ่งถ้าต้องการให้มีความแม่นยำมากกว่านี้อาจจะต้องจุ่มเทอร์โมคัปเปิ้ลวัดค่าน้ำเหล็กในเตาเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งเพื่อให้คอมพิวเตอร์ทำการ

ประมวลผลอีกที หรือไม่ก็เริ่มวัดอุณหภูมิครั้งแรกที่อุณหภูมิประมาณ 1400 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ 1500 องศาเซลเซียสที่แม่นยำยิ่งขึ้น

## 6.2 การสุ่มวัดค่า

การประมาณค่าอุณหภูมินำหลักในเตา ตัวแปรที่จำเป็นต้องเก็บค่าผ่านตัวคอนเวอร์เตอร์มาได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า และค่าอุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็น ซึ่งสัญญาณขาออกที่เป็นสัญญาณดิจิทัลที่ออกมาจากตัวคอนเวอร์เตอร์นั้นจะผ่านเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยมีค่า Sample & Hold ที่ใช้สำหรับสุ่มวัดสัญญาณทั้งสองมีค่าเท่ากับ 10 วินาที

ตัวคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้แปลงสัญญาณ จะใช้แปลงสัญญาณจากสัญญาณอนาลอกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (เลขฐานสอง) ซึ่งช่วงเวลาระหว่างค่าสัญญาณที่มาจะถูกประมาณค่าโดยวิธี Interpolate เรียกว่ากระบวนการ Signal Reconstruction ซึ่งมีหลายวิธี ในการใช้วิธี Interpolate ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีที่เรียกว่า Zero-Order-Hold



รูปที่ 6.2 รูปแสดงวิธี Zero-Order-Hold

วิธี Zero-Order-Hold วิธีนี้จะรักษาค่าสัญญาณที่มาตอนแรกให้คงที่ในช่วงระยะเวลา Sampling จนกระทั่งค่าสัญญาณต่อไปมาถึง (ดังแสดงในรูปที่ 6.2) โดยที่ค่า Sampling Rate นี้คือ ช่วงเวลาระหว่างสัญญาณขาออกที่ออกมา ในระบบควบคุมนี้จะรับค่าสัญญาณต่างๆ มาทุกๆ 1 วินาที ซึ่งสัญญาณในระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ก็คือ สัญญาณค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า และสัญญาณค่าอุณหภูมิเข้า-ออก ของน้ำหล่อเย็น ในการกำหนดค่า Sampling Rate นี้มีความสำคัญมาก เพราะเป็นสิ่งที่กำหนดว่าสัญญาณดิจิทัล ที่เปลี่ยนแปลงมาจากสัญญาณอนาลอกนั้นจะมี

ความคล้ายกับค่าที่วัดอยู่เล็กน้อยเพียงไร หากค่า Sampling Rate ที่กำหนดมีค่าไม่สูงพอจะเกิดการวิเคราะห์สัญญาณที่ผิดพลาดขึ้นได้ ซึ่งจะเรียกว่า Aliasing

### 6.3 สรุปการประมาณค่าอุณหภูมิ

ในการประมาณค่าอุณหภูมิในเตาหลอมเหนียวนาไฟฟ้านี้ จะเริ่มต้นจากการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลกับอุณหภูมิในเตา ด้วยอุปกรณ์และระบบการสื่อสารที่ได้ออกแบบไว้ (บทที่ 4) ค่าพารามิเตอร์ที่เก็บค่านี้ได้แก่ ค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า-ออก อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้นี้มาคำนวณในสมการสมดุลความร้อนและทำการทดสอบหาแบบจำลองทางความร้อนของเตาที่เหมาะสม (บทที่ 5) และเมื่อได้แบบจำลองทางความร้อนของเตาเรียบร้อยแล้วก็นำแบบจำลองที่ได้นี้มาลองทดสอบกับการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำในการประมาณค่าอุณหภูมิในเตา (บทที่ 6) เมื่อมีการใช้งานจริงๆ

ในการหาแบบจำลองทางความร้อนของเตานั้นได้มีการลองนำการทดลองที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์มาประมาณหาอุณหภูมิในเตาอีกที พบว่าค่าอุณหภูมิที่ประมาณได้มีความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 2.3 องศาเซลเซียส ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 3.10 องศาเซลเซียส โดยมีค่าผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่บวกลบ 6 องศาเซลเซียส

การทดสอบความแม่นยำในการประมาณค่าอุณหภูมินี้พบว่าค่าที่ประมาณได้ในช่วงแรกๆ ของแต่ละการทดลอง (มีทั้งหมด 10 การทดลอง) จะมีความแม่นยำสูง แต่พอค่าอุณหภูมิเริ่มเกิน 1450 องศาเซลเซียส ค่าที่ประมาณได้เริ่มผิดพลาดมากขึ้นในบางการทดลอง โดยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เปรียบเทียบอยู่ที่ 2.42 องศาเซลเซียส มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.44 องศาเซลเซียส โดยค่าผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่บวกลบ 8 องศาเซลเซียส

จากการที่ค่าอุณหภูมิที่ประมาณได้กับค่าอุณหภูมิที่วัดได้จริงมีความผิดพลาดเป็นบางค่าในแต่ละการทดลองนั้น อาจจะมีสาเหตุได้ดังนี้

- (1) ค่าคงที่  $C$  ที่กำหนดขึ้นมานั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปในบางการทดลองทำให้แบบจำลองทางความร้อนที่หามาได้นั้นผิดเพี้ยนไปบ้าง
- (2) เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด  $R$  ที่ใช้วัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตานั้นอาจเกิดการผิดพลาดขึ้นในระหว่างทำการวัด ซึ่งอาจเป็นเพราะตัวอุปกรณ์หรือผู้ทำการตรวจวัด ทำให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้ผิดเพี้ยนไปทำให้เมื่อมาประมาณค่าอุณหภูมิจึงมีความผิดพลาดเกิดขึ้น

- (3) ปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในบริเวณเตาทำให้ค่าสัญญาณที่รับส่งกันระหว่างเครื่องมือวัดกับคอมพิวเตอร์มีปัญหาเป็นบางครั้ง กล่าวคือค่าที่วัดได้บางครั้งอาจแกว่งไปมาบ้าง ซึ่งเมื่อคอมพิวเตอร์นำค่านี้ไปคำนวณทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้
- (4) วิธีการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่า นั้น พบว่ายังเป็นการใช้วิธีที่ง่ายที่สุดอยู่ คือเป็นการประมาณค่าเชิงเส้นตรง ทำให้เมื่อนำมาใช้งานจริงกับเตาหลอมซึ่งมีลักษณะโครงสร้างและการทำงานที่ซับซ้อน จึงทำให้แบบจำลองที่หามาได้ยังไม่ถูกต้องมากนัก ค่าอนุภูมิที่ประมาณจึงมีความผิดพลาดอยู่



## วิธีการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะด้วยวิธีเหนี่ยวนำ ความร้อนทางอ้อม การวัดอุณหภูมิทางอ้อมทำได้โดยการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิเข้าออกและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก และทดลองเพื่อหาแบบจำลองของการสูญเสียความร้อนของเตา การทดลองแบ่งออกเป็นสองตอน ตอนแรกเป็นการวัดการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิเข้าออกและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก และค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะ จากนั้น นำค่าต่างๆ เหล่านี้มาประมาณหาแบบจำลองการสูญเสียความร้อนของเตาผ่านทางสมการสมดุลความร้อน ตอนที่สองจะใช้แบบจำลองการสูญเสียความร้อนของเตา พลังงานที่ป้อนเข้า ค่าอุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็น อัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก เพื่อมาประมาณหาอุณหภูมิของน้ำโลหะผ่านทางสมการสมดุลความร้อน

วิธีการที่นำเสนอนี้พยายามที่จะใช้อุปกรณ์เดิมที่บริษัท ได้ติดตั้งไว้เพื่อควบคุมเตา และติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเท่าที่จำเป็นเท่านั้น โดยค่าพลังงานป้อนเข้าจะวัดผ่านเครื่อง ACM 3300 Power Measurement ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่เดิม และใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus กับเครื่องวัดฯ ผ่านตัวแปลง RS485/232 การวัดอุณหภูมิด้านนอกจะวัดอุณหภูมิที่ด้านล่างของเตาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ติดเข้าไปในผิวได้เตาชั้นอิฐทนไฟ และนำค่าสัญญาณอุณหภูมิเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางอุปกรณ์ NuDAM ซึ่งมีโปรโตคอล แบบ RS485 ในส่วนของอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นนั้น จะวัดด้วยเครื่อง Ultrasonic Flowmeter และจะวัดอุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็นด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K และนำค่าสัญญาณอุณหภูมิเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางอุปกรณ์ NuDAM อุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาจะวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด R ของบริษัทซึ่งไม่สามารถวัดได้อย่างต่อเนื่อง และวัดโดยผ่านอุปกรณ์ของโรงงานที่ติดตั้งอยู่เดิม

จากนั้น จะนำค่าต่างๆ ที่วัดได้นี้มาประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นบน LabVIEW โปรแกรมที่เขียนขึ้นจะทำการสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus กับเครื่อง ACM 3300 และสื่อสารด้วยโปรโตคอล RS485 กับอุปกรณ์ NuDAM และประมวลข้อมูลต่างๆ เพื่อประมาณหาอุณหภูมิของน้ำโลหะโดยใช้สมการสมดุลความร้อน

### ขั้นตอนในการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิ

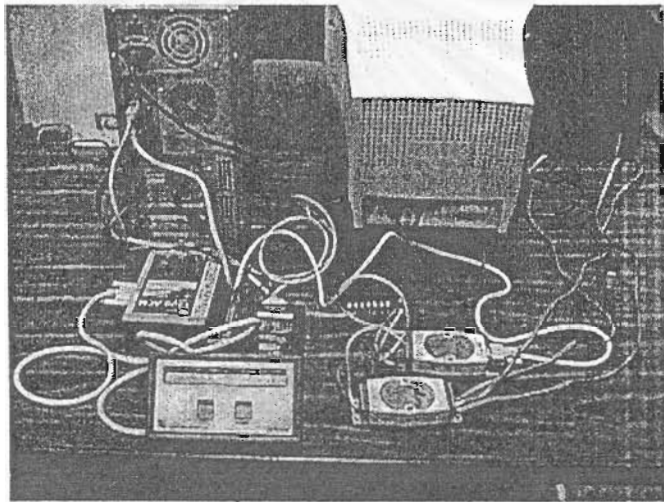
- (1) ติดต่อสื่อสารกับตัววัดพลังงานไฟฟ้าของโรงงาน (ACM 3300) ในการที่จะรับค่าของเครื่องนี้ได้ ก่อนอื่นต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเครื่องให้เป็นดังแสดงในตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ต้องตั้งให้กับเครื่อง ACM 3300

PARAMETER	RANGE
PASSWORD	***
USING PTS	YES
PT PRIMARY	6600
PT SECONDARY	110
CT PRIMARY	200
U MODE	3-WIRE DELTA
UNIT ID	8487
COM PORT	RS-485
BAUD RATE	9600
PROTOCOL	MODBUS
CLEAR ALL HOURS	NO
RESET MIN/MAX	NO
DEMAND PERIOD	15
#OF DMD PERIODS	1
FORMAT	.RST
SHOWDECIMALS	YES
CONTRAST/ANGEL	__04
DIAGNOICS MODE	NO

เมื่อตั้งพารามิเตอร์ตามตารางที่ 7.1 เสร็จเรียบร้อยแล้ว ซึ่งเมื่อสังเกตตรงโปรโตคอลที่ให้เลือกได้จัดการตั้งให้เป็น Modbus แล้ว ดังนั้นจึงสามารถเลือกรูปแบบการติดต่อแบบ Modbus ตามรายละเอียดที่เขียนไว้ในหัวข้อที่ 4.2 ขั้นตอนต่อไปคือนำตัว ACM 3300 มาต่อเข้ากับตัวคอนเวอร์เตอร์

- (2) นำค่าอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ที่ต่อไว้ได้แก่ อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้าและออก และ อุณหภูมิใต้เตา โดยนำมาต่อเข้ากับ NuDAM รุ่น 6018 ที่เตรียมไว้ และต่อเข้ากับ ตัวคอนเวอร์เตอร์ อีกตัวหนึ่ง
- (3) เมื่อต่อตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 เสร็จแล้วให้นำสาย Lab Link แบบ 9 พิน ตัวเมียข้างตัวผู้ ข้าง มาต่อจากตัวคอนเวอร์เตอร์ ทั้งสองเข้ากับคอมพิวเตอร์ โดยที่เครื่อง ACM 3300 จะต่อเข้าคอมพิวเตอร์ที่ COM PORT 1 ส่วนตัว NuDAM รุ่น 6018 จะต่อเข้าคอมพิวเตอร์ที่ COM PORT 2 ซึ่งเมื่อทำตามขั้นที่ 1-3 แล้วจะได้ดังแสดงในรูปที่ 7.1



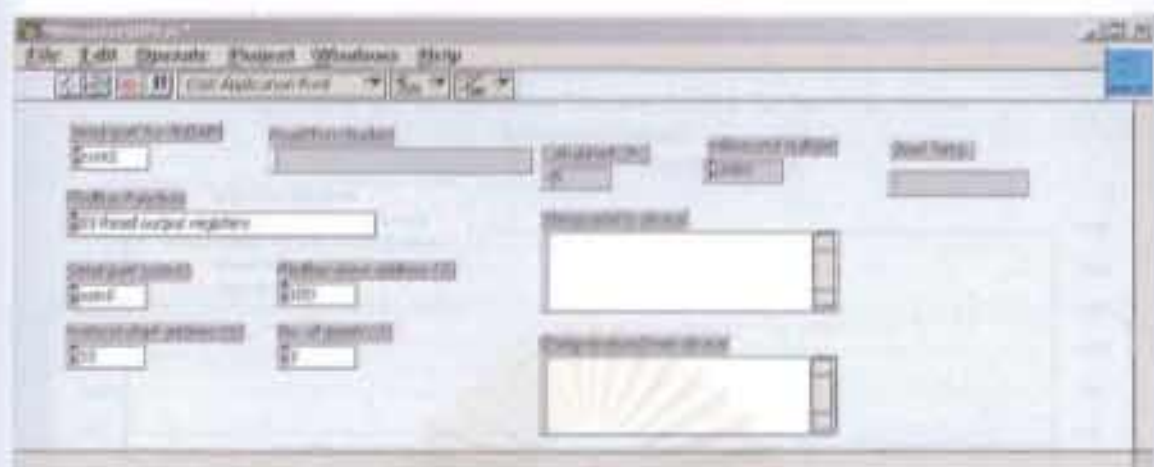
รูปที่ 7.1 การติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์

- (4) นำเครื่องวัดอัตราการไหลไปติดตั้งที่ท่อน้ำหล่อเย็นเพื่อวัดอัตราการของน้ำ
- (5) ตั้งค่า COM PORT 1 และ COM PORT 2 ของคอมพิวเตอร์ไว้ดังต่อไปนี้

Bit per second	9600
Data bits	8
Parity	None
Stop bits	1
Flow control	Xon/Xoff

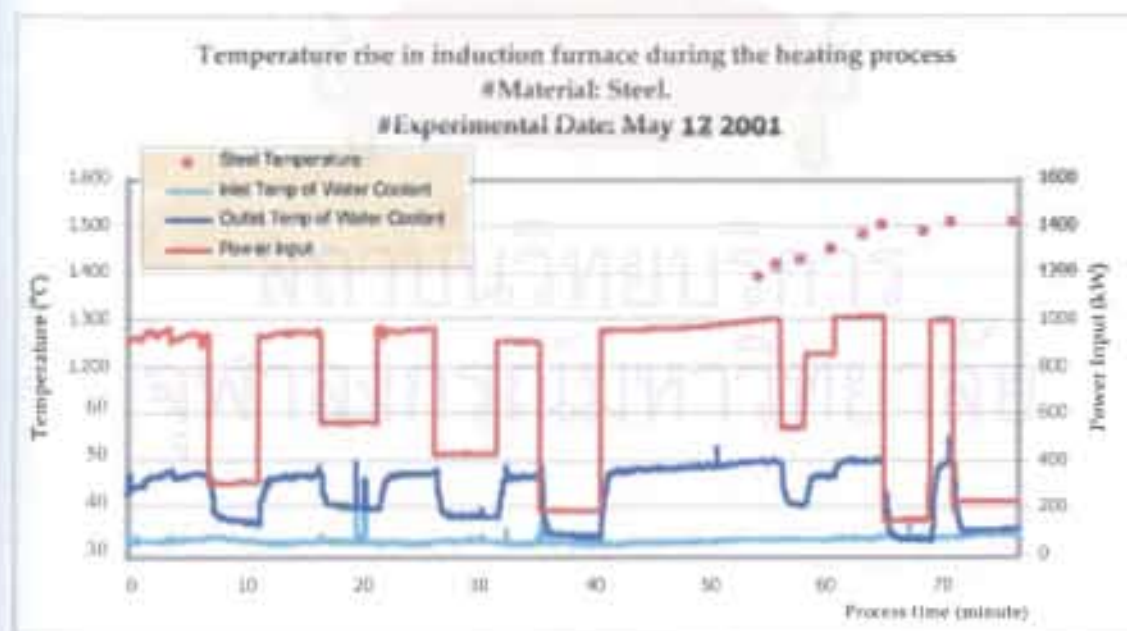
หลังจากนั้นเปิดโปรแกรม LabVIEW และตั้งค่าต่างๆ ที่หน้าจอแสดงในรูปที่ 7.2



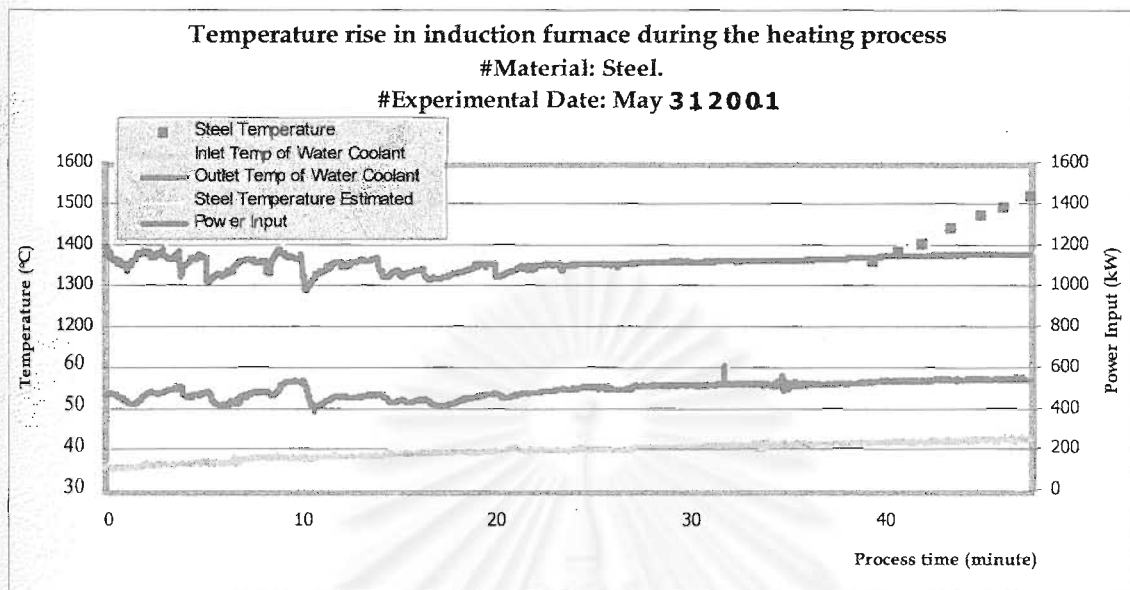


รูปที่ 7.2 หน้าจอโปรแกรม LabVIEW ที่ต้องพึ่งสาขาก่อนลงมือเก็บค่า

- (6) เมื่อต่ออุปกรณ์และตั้งค่าต่างๆ ครบตามขั้นตอนข้างต้นแล้ว ระบบก็พร้อมที่จะทำงานแล้ว ซึ่งเมื่อกดปุ่มให้ระบบทำงานค่าต่างๆ ที่วัดก็จะมาแสดงที่หน้าจอ ซึ่งเมื่อโลหะในเตาหลอมละลายหมดแล้ว ก็ให้ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด R จุ่มวัดเป็นครั้งๆ ไป (อย่างน้อยหนึ่งครั้ง) ซึ่งในการทดลองนั้นมีการปรับค่ากำลังไฟฟ้าไปที่ระดับต่างๆ กัน เพื่อดูความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต่างๆ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้ตามรูปที่ 7.3 และได้มีการทดลองปรับค่ากำลังไฟฟ้าคงที่ตามรูปที่ 7.4

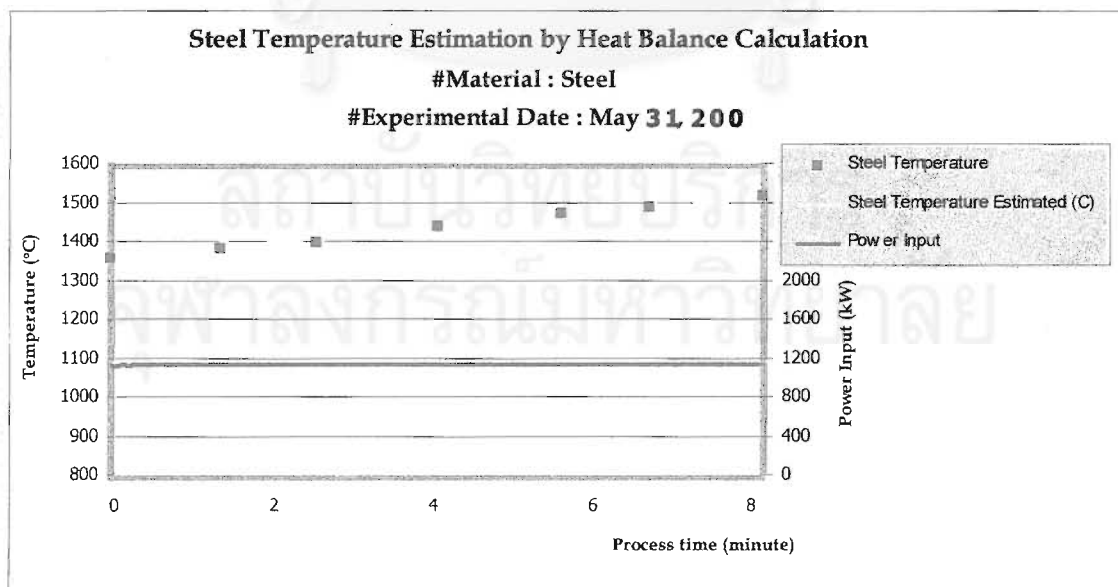


รูปที่ 7.3 การทดลองที่ปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าเข้าที่ระดับต่างๆ



รูปที่ 7.4 การทดลองที่ กำลังไฟฟ้าคงที่ ที่ 1000 kW

- (7) หลังจากนั้นค่าตัวแปรต่างๆ ที่วัดได้จะถูกคำนวณโดยสมการทางความร้อนภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กและแสดงอุณหภูมินั้นผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยในรูปที่ 7.5 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาที่วัดได้จริงกับที่ทำนาย



รูปที่ 7.5 อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาที่วัดได้จริงกับที่ทำนาย

วิธีการใช้งานระบบประมาณอุณหภูมิในเตาหลอมที่อธิบายมาข้างต้นนี้ เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อนมากนัก ผู้ควบคุมเตาหลอมสามารถใช้งานได้โดยง่าย โดยการจุ่มวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาตามหนึ่งครั้งหลังจากเหล็กในเตาหลอมละลายหมดแล้ว แล้วระบบจะทำการประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กไปเรื่อยๆ และแสดงผลออกมาทางจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งเมื่อผู้ควบคุมสามารถรู้ อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาตลอดเวลาจากหน้าจอคอมพิวเตอร์เช่นนี้ ก็เป็นการง่ายในการควบคุมการทำงานของเตาหลอมให้มีประสิทธิภาพต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
าลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การประหยัดพลังงานในเตาหลอม

เมื่อรู้วิธีการติดตั้งและใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้แล้วในบทนี้จะกล่าวถึงการนำระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ไปใช้ในการควบคุมการหลอมของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้ประหยัดพลังงาน โดยได้แสดงวิธีการควบคุมการหลอมมาทั้งหมด 4 วิธีด้วยกันและเปรียบเทียบกับวิธีการหลอมปัจจุบัน และกล่าวถึงผลจากการนำระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ไปใช้งานจริงที่โรงงานสมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรมจำกัด โดยจะแสดงอยู่ในรูปค่าพลังงานไฟฟ้าต่อหน่วยผลผลิตและทำการเปรียบเทียบกับค่านี้เมื่อปี 2544 ซึ่งในการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ นอกจากจะช่วยในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าลงแล้วยังช่วยประหยัดจำนวนหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้วัดอุณหภูมิในเตาหลอมของโรงงานลงได้โดยได้ทำการคำนวณเปรียบเทียบกับการใช้งานปัจจุบัน และในหัวข้อสุดท้ายกล่าวถึง ประโยชน์ทางอ้อมของการมีระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ซึ่งจะทำให้สามารถรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเตาซึ่งสามารถนำไปใช้งานและพัฒนาต่อไปได้อีก เช่น เมื่อสามารถทำการติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ที่เตาหลอมของโรงงานได้ครบทั้งหมดทำให้สามารถควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าของเตาโดยรวมไม่ให้เกินค่าที่ต้องการในช่วงเวลาค่าไฟฟ้าแพงเป็นต้น และในที่นี้ได้แสดงตัวอย่างการเก็บค่าพารามิเตอร์ต่างๆ นำมาใช้คำนวณค่าความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีเนื่องจากการเปิด-ปิดฝาเตาว่าสูญเสียเป็นปริมาณเท่าไร

### 8.1 การควบคุมเตาหลอมให้ประหยัดพลังงาน

จากกระบวนการหลอมเหล็กโดยใช้เตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้าของโรงงานนั้น พบว่าปัจจุบันโรงงานมีเตาหลอมทั้งหมด 3 เตา โดยแต่ละเตาจะหลอมเหล็กให้ได้อุณหภูมิประมาณ 1500 องศาเซลเซียส เมื่อได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วก็จะเทน้ำเหล็กใส่ที่รองรับน้ำเหล็กเพื่อไปเทลงในแบบอีกที แต่เนื่องจากเตาหลอมมีถึง 3 เตา ทำให้บางครั้งเมื่อหลอมได้อุณหภูมิตามต้องการแล้วยังเทน้ำเหล็กไม่ได้ ต้องรอเตาหลอมอื่นเทน้ำเหล็กให้เสร็จก่อนหรือไม่ก็ส่วนผสมของน้ำเหล็กในเตายังไม่ได้ตามต้องการต้องทำการผสมใหม่ ดังนั้นถ้าสามารถควบคุมการหลอมให้พอดีกับการเทน้ำเหล็กไปใช้งานได้โดยไม่ต้องเสียเวลารอได้นั้น ก็จะเป็นแนวทางหนึ่งในการควบคุมเตาหลอมให้ประหยัดพลังงาน

การควบคุมเตาหลอมเบื้องต้นที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอวิธีการหลอมมาทั้งหมด 4 วิธีด้วยกัน โดยทั้ง 4 วิธีจะกำหนดให้สภาวะการทำงานและระยะเวลาที่ใช้ในการหลอม

เท่ากันหมด แต่วิธีในควบคุมการหลอมนั้นจะต่างกันและจะเริ่มควบคุมเมื่อเหล็กหลอมเหลวแล้ว อุณหภูมิประมาณ 1300 องศาเซลเซียส ถึงอุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส

วิธีที่หนึ่ง เมื่อเหล็กหลอมละลายหมดแล้ว ก็ทำการเร่งกำลังไฟฟ้าให้อุณหภูมิขึ้นถึง 1500 องศาเซลเซียสโดยเร็วที่สุด เมื่อได้อุณหภูมิตามที่ต้องการแล้วก็ปรับลดกำลังไฟฟ้าเข้าเตาโดยปรับให้อุณหภูมิคงที่ที่ 1500 องศาเซลเซียส (ประมาณ 250 kW) ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเหน้าเหล็ก (ดังแสดงในรูปที่ 8.1)

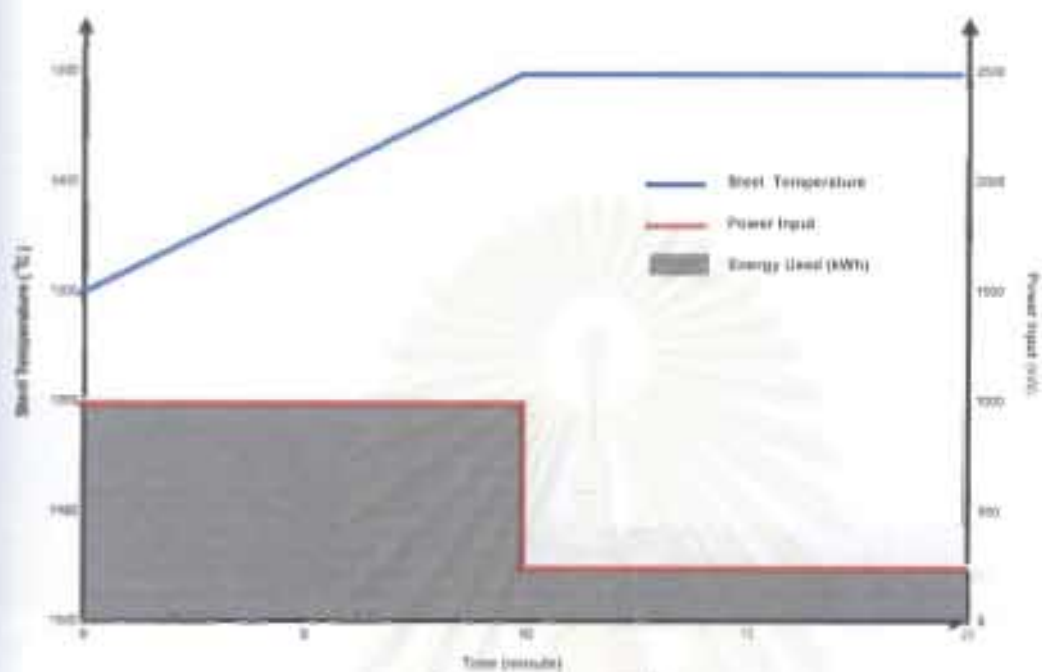
วิธีที่สอง เมื่อเหล็กหลอมละลายหมดแล้ว ก็ทำการปรับกำลังไฟฟ้าเข้าเตาให้เหล็กในเตา อุณหภูมิเพิ่มถึง 1500 องศาเซลเซียสให้พอดีกับช่วงเวลาที่ใช้ในการหลอม ซึ่งเมื่อหลอมเหล็กจนได้อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ก็จะพอดีเหน้าเหล็กได้พอดี (ดังแสดงในรูปที่ 8.2)

วิธีที่สาม เมื่อเหล็กหลอมละลายหมดแล้ว ก็ให้ปรับกำลังไฟฟ้าเข้าเตาให้อุณหภูมิในเตาคงที่ประมาณ 1300 องศาเซลเซียส (ประมาณ 150 kW) ไปเรื่อยๆ เสร็จแล้วให้เร่งกำลังไฟฟ้าเข้าเตาให้อุณหภูมิในเตา 1500 องศาเซลเซียส พอดีกับช่วงเวลาที่เหลือซึ่งจะทำให้พอดีกับการเหน้าเหล็กพอดี (ดังแสดงในรูปที่ 8.3)

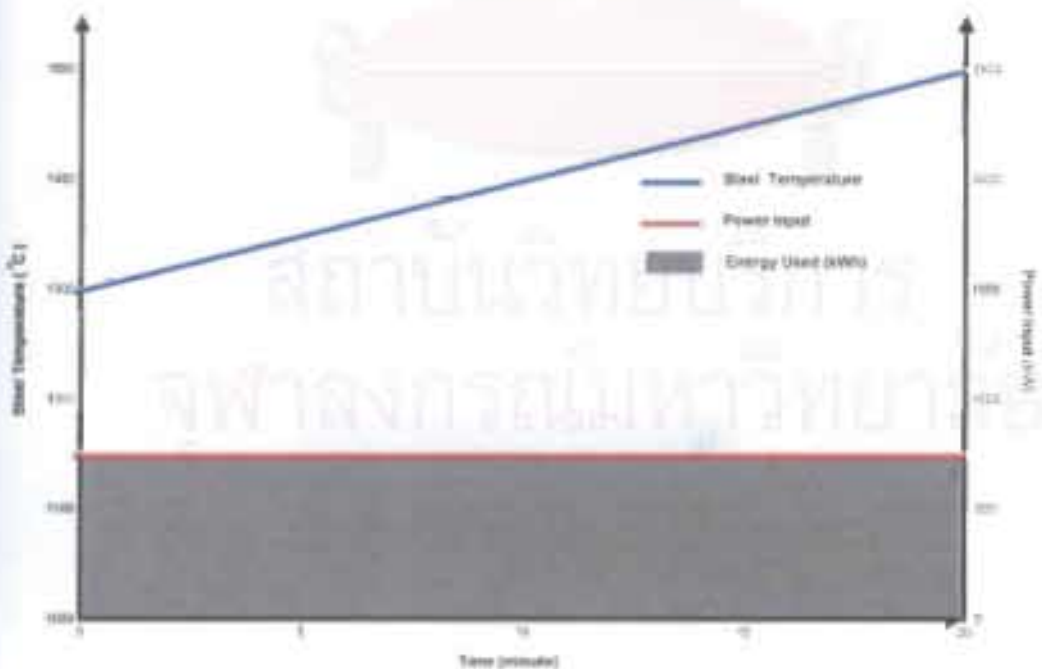
วิธีที่สี่ เมื่อเหล็กหลอมละลายหมดแล้ว ก็ให้ปรับกำลังไฟฟ้าเข้าเตาให้อุณหภูมิในเตาคงที่ประมาณ 1300 องศาเซลเซียสไปเรื่อยๆ เช่นเดียวกับวิธีที่สาม เสร็จแล้วก็ทำการเร่งกำลังไฟฟ้าให้อุณหภูมิขึ้นถึง 1500 องศาเซลเซียสโดยเร็วที่สุด เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้วก็ปรับลดกำลังไฟฟ้าเข้าเตาโดยปรับให้อุณหภูมิคงที่ที่ 1500 องศาเซลเซียสไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเหน้าเหล็ก (ดังแสดงในรูปที่ 8.4)

จากวิธีการควบคุมเตาหลอมทั้ง 4 วิธี พบว่าในปัจจุบันวิธีการหลอมที่โรงงานใช้อยู่ได้แก่ วิธีที่หนึ่ง ซึ่งถ้าสามารถหลอมเหล็กได้อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสตามต้องการแล้วสามารถเหน้าเหล็กได้ทันที ก็จะเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานมากที่สุด แต่ในการทำงานจริงมักไม่เป็นเช่นนั้น เพราะเมื่อหลอมเหล็กได้อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสแล้ว ก็ยังต้องรอกระบวนการผลิตให้พร้อมก่อนหรือไม่ก็ต้องรอให้น้ำเหล็กในเตาอื่นเทให้หมดก่อนหรือไม่ก็ส่วนผสมในเตายังไม่ถูกต้อง ต้องทำการผสมใหม่ ทำให้ต้องรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 1500 องศาเซลเซียสไปเรื่อยๆ จนกว่าจะพร้อมเหน้าเหล็ก

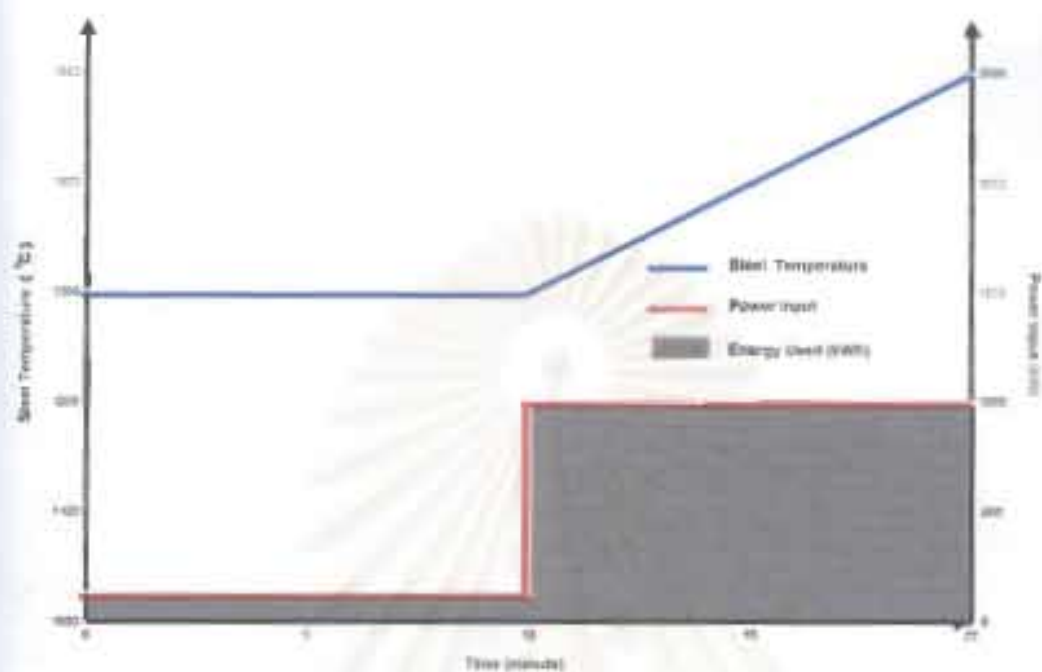
เมื่อเป็นเช่นนี้แล้วจึงต้องหาวิธีที่เหมาะสมมาใช้ในการควบคุมเตาหลอม ซึ่งเมื่อดูกราฟทั้งสี่กราฟพบว่า พื้นที่ในส่วนที่เร่งซึ่งก็คือพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้านั้น ในส่วนของกราฟรูปที่สาม ใช้พลังงานน้อยสุด (ดังแสดงในตารางที่ 8.1) และเหมาะสมกับการใช้งานในสภาพการทำงานจริงของโรงงานมากที่สุด



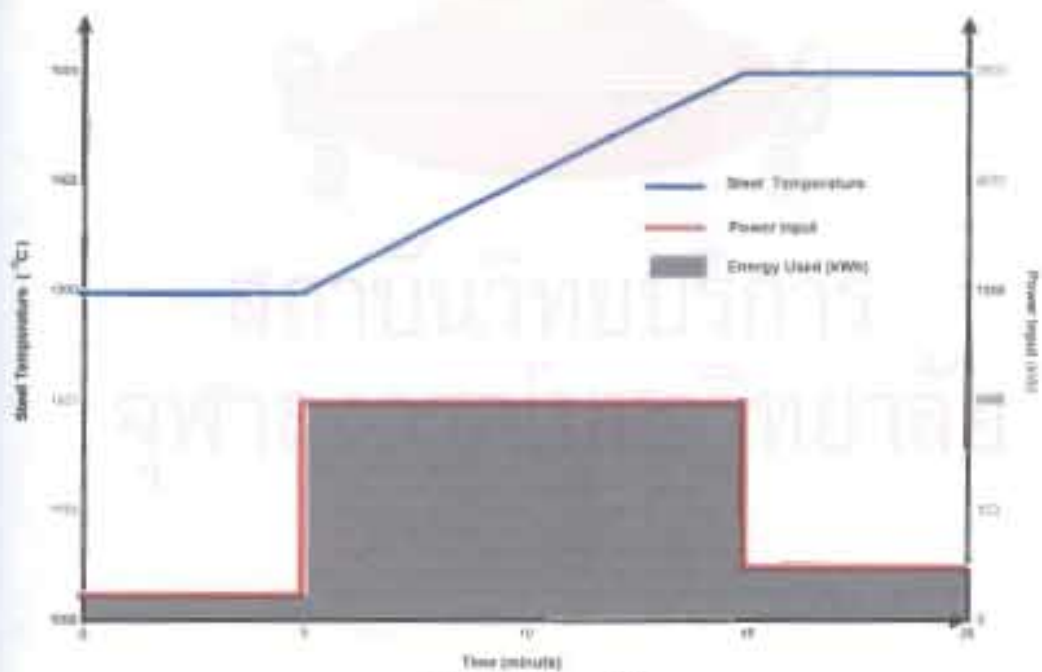
รูปที่ 8.1 การควบคุมวิธีที่ 1



รูปที่ 8.2 การควบคุมวิธีที่ 2



รูปที่ 8.3 การควบคุมวิธีที่ 3



รูปที่ 8.4 การควบคุมวิธีที่ 4

ตารางที่ 8.1 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการหลอมเหล็กทั้ง 4 วิธี

วิธีที่ใช้หลอม	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้หลอม (kWh)	ค่าใช้จ่ายที่ประหยัดได้ (บาท) เมื่อเทียบกับวิธี ปัจจุบันของโรงงาน (วิธีที่ 1)
1	208.33	-
2	250.00	- 83.34
3	191.67	+ 33.32
4	200.00	+ 16.66

หมายเหตุ ค่าไฟฟ้าเฉลี่ยคิดที่ 2 บาท/kWh

กล่าวคือเนื่องจากถ้าสามารถรู้เวลาที่จะเทน้ำเหล็กได้แน่นอนแล้วนั้น ก็ให้ปรับแรงกำลังไฟฟ้าให้หลอมเหล็กให้ได้อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียสพอดีกับการเทน้ำเหล็ก โดยไม่ต้องมาเสียเวลาปรับไฟฟ้าเพื่อรักษาอุณหภูมิน้ำเหล็กที่อุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ให้ทำการปรับไฟฟ้าเพื่อรักษาอุณหภูมิที่อุณหภูมิประมาณ 1300 องศาเซลเซียส เพื่อให้รู้เวลาที่น้ำเหล็กที่แน่นอนซึ่งจะเสียพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าวิธีปัจจุบันของโรงงาน (วิธีที่ 1) เมื่อคิดเป็นเงินเท่ากับ 33.32 บาท และในช่วงนี้ที่รอนี้ก็สามารถปรับส่วนผสมน้ำเหล็กภายในเตาให้ถูกต้องได้โดยไม่ต้องมาเสียเวลาปรับในภายหลัง

จากวิธีการควบคุมเตาหลอมที่แสดงให้ดูในตอนต้น เมื่อลองคิดคำนวณการหลอมในหนึ่งวันของโรงงานพบว่าค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งที่หลอมอยู่ที่ประมาณ 12 ครั้งต่อวันโดยในหนึ่งรอบของการหลอมใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 1 ชั่วโมง โดยมีช่วงเวลาค่าไฟฟ้าแพงอีก 3 ชั่วโมง ซึ่งจะหยุดการหลอม ดังนั้นจะเหลือเวลาอีก 9 ชั่วโมงต่อวันที่เป็นช่วงเวลาที่จะต้องรักษาอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ 1500 องศาเซลเซียส (ประมาณ 250 kW) ซึ่งเมื่อใช้วิธีการหลอมที่ได้เสนอในตอนต้น (แบบที่ 3) ซึ่งจะเปลี่ยนมารักษาอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ 1300 องศาเซลเซียส (ประมาณ 150 kW) พบว่าจะช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าลงได้ประมาณ 324,000 kWh/ปี คิดเป็นเงินประมาณ 648,000 บาท/ปี

## 8.2 ผลการประหยัดที่เกิดจากการใช้งานจริง

หลังจากที่ได้ทดลองและทดสอบการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ ซึ่งพบว่าสามารถทำนายอุณหภูมิในเตาได้ผิดพลาดบวกลบ 8 องศาเซลเซียสและมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่

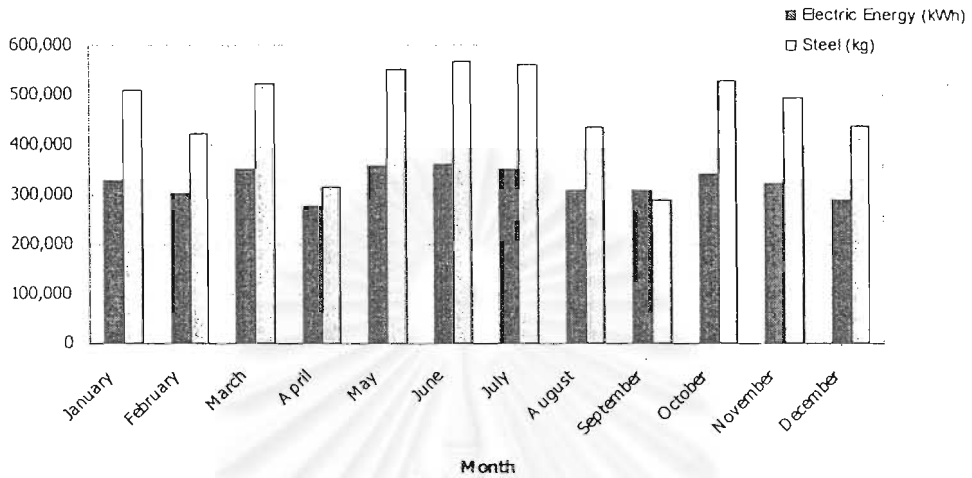


2.42 อองศาเซลเซียส ต่อมาจึงได้นำมาใช้งานกับการทำงานจริงๆของเตาหลอม 2 ตัน 1 ที่ บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรมจำกัด เป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยเริ่มต้นใช้งานเมื่อวันที่ 10 มีนาคม 2545 ถึง วันที่ 9 เมษายน 2545 (รายละเอียดแสดงอยู่ในตารางที่ 8.3) ซึ่งผลการ ประหยัดนี้จะคิดออกมาอยู่ในหน่วยของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อยอดการหลอมที่หลอม (kWh/ตัน) และค่าที่ได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับการใช้งานเมื่อปี 2544 ทั้งปี (รายละเอียดแสดงอยู่ในตารางที่ 8.2 และรูปที่ 8.5) จากข้อมูลการใช้พลังงานของโรงงานในช่วงที่ทำการหลอมโดยมีการติดตั้ง ระบบประมาณค่าอุณหภูมิเข้าไปเป็นระยะเวลา 1 เดือนนั้นพบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อยอด การหลอมเท่ากับ 644.12 kWh/ตัน ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปี 2544 จะเห็นว่า ค่าที่ได้นี้เมื่อ เปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปีของปี 2544 ซึ่งอยู่ที่ 693.17 kWh/ตัน พบว่ามีค่าลดลง 49.05 kWh/ตัน เมื่อคิดค่าไฟฟ้าที่ 2.00 บาท/kWh จะประหยัดพลังงานลงเท่ากับ 98.10 บาท/ตัน เมื่อคิด ยอดการหลอมในปี 2544 คือ 5,636.28 ตัน/ปี พบว่าจะประหยัดพลังงานไฟฟ้าลงเท่ากับ 276,459.53 kWh/ปี คิดเป็นเงิน 552,919.07 บาท/ปี หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การประหยัดพลังงาน เท่ากับ 7.08% เมื่อคิดเงินลงทุนทั้งหมด 137,042.80 บาท ดังนั้นจะมีเวลาคืนทุนเท่ากับ 0.25 ปี

ตารางที่ 8.2 รายละเอียดการหลอมของเตา 2 ตัน 1 ในรอบปี 2544

เดือน	พ.ศ.	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	ยอดการหลอม (ตัน)	kWh/ตัน
มกราคม	2544	330,400	509.00	649.12
กุมภาพันธ์	2544	301,800	422.14	714.93
มีนาคม	2544	350,400	523.68	669.11
เมษายน	2544	277,600	314.87	881.63
พฤษภาคม	2544	358,600	552.60	648.93
มิถุนายน	2544	360,500	567.87	634.83
กรกฎาคม	2544	351,700	560.62	627.34
สิงหาคม	2544	309,800	434.04	713.76
กันยายน	2544	309,900	290.72	1,065.97
ตุลาคม	2544	343,100	528.14	649.64
พฤศจิกายน	2544	322,600	494.60	652.24
ธันวาคม	2544	290,500	438.00	663.24
เฉลี่ย		325,575	469.69	693.17
รวม		3,906,900	5,636.28	

### Productivity and Energy Usage of Furnace#1 in Y2001



รูปที่ 8.5 การเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้ากับยอดการหลอมในรอบปี 2544

จากการทดลองใช้งานจริงที่โรงงานนอกจากจะดูผลของการประหยัดพลังงานแล้ว ยังได้ทำการตรวจเช็คการใช้งานของหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้วัดอุณหภูมิในเตาด้วย จากเมื่อก่อนโรงงานใช้หัวเทอร์โมคัปเปิ้ลเช็คอุณหภูมิในเตาทั้งหมด 3 ครั้งต่อหนึ่งการหลอม คือ ครั้งแรกก่อนเริ่มเช็คสภาพเคมีในเตา ครั้งที่สองหลังการเช็คสภาพเคมีในเตาแล้ว ครั้งที่สามก่อนเทน้ำเหล็ก เมื่อติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ทำให้ใช้หัวเทอร์โมคัปเปิ้ลเช็คอุณหภูมิในเตาแค่ 1 ครั้งต่อหนึ่งการหลอม ซึ่งเป็นการประหยัดหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลลง 3 เท่า โดยที่หัวเทอร์โมคัปเปิ้ลนี้ 1 หัวใช้งานได้ประมาณ 10 ครั้ง จากข้อมูลการหลอมของเตา 2 ตัน 1 ในปี 2544 มีการหลอมทั้งหมด 3,792 ครั้ง ต้องใช้หัวเทอร์โมคัปเปิ้ลทั้งหมด 380 หัว เมื่อติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้จะลดการใช้หัวเทอร์โมคัปเปิ้ลลง 3 เท่า เหลือ 127 หัว ประหยัดลงไปได้ 253 หัว ราคาหัวละ 120 บาท คิดเป็นเงิน 30,360 บาท/ปี

เมื่อนำผลประหยัดจากการควบคุมอุณหภูมิในเตาหลอมและค่าหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ประหยัดได้มารวมกันพบว่าจะประหยัดเงินได้ทั้งหมดรวม 583,279.07 บาท/ปี เมื่อคิดเงินลงทุนทั้งหมด 137,042.80 บาท ดังนั้นจะมีเวลาคืนทุนเท่ากับ 0.23 ปี

ตารางที่ 8.3 ข้อมูลการหลอมหลังติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมิ

เวลา	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	ยอดการหลอม (ตัน)	(kWh/ตัน)
10 มี.ค. 45	12400	19.50	635.89
11 มี.ค. 45	13200	20.72	637.07
12 มี.ค. 45	12900	20.59	626.52
13 มี.ค. 45	12100	19.54	619.24
14 มี.ค. 45	10800	17.21	627.54
15 มี.ค. 45	11200	17.09	655.35
16 มี.ค. 45	5000	7.89	633.71
17 มี.ค. 45	ไม่มีการหลอม		
18 มี.ค. 45	10700	16.01	668.23
19 มี.ค. 45	11700	18.92	618.39
20 มี.ค. 45	10600	16.89	627.59
21 มี.ค. 45	9600	15.25	629.51
22 มี.ค. 45	12200	18.08	674.77
23 มี.ค. 45	13000	20.48	634.77
24 มี.ค. 45	13200	20.40	647.05
25 มี.ค. 45	11900	19.25	618.18
26 มี.ค. 45	12100	19.04	635.50
27 มี.ค. 45	10100	16.10	627.33
28 มี.ค. 45	11500	16.94	678.87
29 มี.ค. 45	12200	18.33	665.58
30 มี.ค. 45	9900	15.65	632.59
31 มี.ค. 45	12800	20.52	623.78
1 เม.ย. 45	13900	22.59	615.32
2 เม.ย. 45	10000	16.03	623.83
3 เม.ย. 45	13400	20.34	658.80
4 เม.ย. 45	11900	18.11	657.09
5 เม.ย. 45	5000	7.44	672.04
6 เม.ย. 45	11500	18.14	633.96
7 เม.ย. 45	7600	12.24	620.92
8 เม.ย. 45	11200	15.20	736.84
9 เม.ย. 45	13700	19.93	687.41
เฉลี่ย	11243.33	17.78	644.12
รวม	337300	524.42	

### 8.3 ประโยชน์และการประหยัดทางอ้อม

ระบบประมาณค่าอุณหภูมิที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ นอกจากจะช่วยลดพลังงานการใช้ไฟฟ้าและค่าหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลลงแล้ว ระบบสื่อสารกับอุปกรณ์วัดที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ยังทำให้สามารถทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ระหว่างกระบวนการหลอมเช่น ค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า และค่าอุณหภูมิที่ผนังด้านนอกของเตา การบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ทำให้ทราบปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าและจะเป็นข้อมูลที่สำคัญในการวางมาตรการประหยัดพลังงานต่อไปในอนาคต และการทราบค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นอย่างต่อเนื่องก็จะทำให้สามารถสังเกตความผิดพลาดที่อาจมีขึ้นระหว่างกระบวนการได้ นอกจากนี้การที่ทราบค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าอย่างต่อเนื่อง จะทำให้ควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ทำให้สามารถลดค่าไฟฟ้าลงได้ทั้งนี้เนื่องจากโรงงานใช้เตาหลอมในการหลอมเหล็กทั้งหมด 3 เตาด้วยกันประกอบไปด้วยเตา 2 ตัน 2 ตัว เตา 5 ตัน 1 ตัว ซึ่งทางโรงงานมีปัญหาในการควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าของเตาทั้งสามในช่วงเวลา 18.30 – 21.30 น. ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าไฟฟ้าแพง ถ้าทำการติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ เข้าไปกับเตาทั้งสาม ซึ่งระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้สามารถเก็บค่าและแสดงค่ากำลังไฟฟ้ามาที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งก็จะเป็นการง่ายที่จะควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าในช่วงเวลาดังกล่าว

ระบบประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมที่นำเสนอใช้วิธีวัดอุณหภูมิทางตรงเพียงจุดเดียว จากนั้นระบบก็จะประมาณอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการ การวัดแบบนี้จะลดการวัดอุณหภูมิทางตรงลง ทำให้หัวเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด R สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กมีอายุการใช้งานที่นานขึ้น ทำให้ลดค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ส่วนนี้ และด้วยการลดจำนวนการวัดอุณหภูมิทางตรงลง ทำให้ลดความจำเป็นในการเปิด-ปิดฝาเตา ทำให้ลดความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีลงได้อีก นอกจากนี้ยังมีผลทำให้คุณภาพชีวิตของพนักงานควบคุมเตาดีขึ้น และด้วยระบบที่ทำการออกแบบนี้ง่ายต่อการใช้งานของพนักงานในโรงงานทำให้คุณภาพในการหลอมเหล็กของพนักงานมีความใกล้เคียงกันและง่ายต่อการควบคุมเนื่องจากมีค่าอุณหภูมิในเตาแสดงผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ตลอดเวลา

ในที่นี้ได้แสดงการนำประโยชน์ของการที่สามารถเก็บค่าตัวแปรต่างๆ ของเตามาได้นั้นนำมาทดลองและคำนวณหาความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากการเปิด-ปิดฝาเตา โดยการทดลองจะทดลองเปรียบเทียบระหว่างการหลอมที่เปิดฝาเตาและปิดฝาเตาในช่วงที่เหล็กหลอมเหลวหมดแล้ว (ดังแสดงในตารางที่ 8.4) พบว่า ในการทดลองที่เปิดฝาเตาใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 982.31 kW โดย พลังงานได้แบ่งไปที่ส่วนต่างๆ ดังนี้ ความร้อนที่ให้แก่เหล็ก 324.43 kW ความร้อนที่สูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น 312.40 kW และความร้อนสูญเสียส่วนที่เหลือ 345.48 kW

ในส่วนของการทดลองที่ปิดฝาเตา พบว่าใช้กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย 992.96 kW โดยพลังงานได้แบ่งไปที่ส่วนต่างๆ ดังนี้ ความร้อนที่ให้แก่อเหล็ก 357.81 kW ความร้อนที่สูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น 330.57 kW และความร้อนสูญเสียส่วนที่เหลือ 304.19 kW ซึ่งจะพบว่าในการทำงานช่วงที่เหล็กหลอมเหลวแล้วถ้าปิดฝาเตาจะทำให้ประหยัดพลังงานลงได้ 41.29 kW หรือคิดเป็น 4.1% ของกำลังงานที่จ่ายเข้าไป

ตารางที่ 8.4 การทดลองเปรียบเทียบระหว่างเปิด-ปิดฝาเตา

รายการ	การทดลอง	
	เปิดฝา	ปิดฝา
ความร้อนเข้า (kW)		
พลังงานไฟฟ้า	982.31	992.56
ความร้อนออก (kW)		
เหล็ก	324.43	357.81
น้ำหล่อเย็น	312.4	330.57
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	345.48	304.19

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 9

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 9.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการประมาณค่าอุณหภูมิน้ำโลหะในเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้าโดยทางอ้อม โดยประมาณค่าอุณหภูมิจากค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ค่าอุณหภูมิเข้า-ออก และอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และทำการหาแบบจำลองความร้อนสูญเสียของเตาจากสมการสมดุลความร้อน จากการออกแบบระบบควบคุมกึ่งอัตโนมัติที่ใช้สำหรับทำนายและแสดงอุณหภูมิน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่องนั้น พบว่าวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะในเตาหลอมได้อย่างต่อเนื่องและมีความผิดพลาด อยู่ที่บวกลบ 8 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 2.42 องศาเซลเซียส และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.44 องศาเซลเซียส ซึ่งประโยชน์ของการที่สามารถทำนายและแสดงอุณหภูมิน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่องนี้ทำให้สามารถควบคุมพลังงานไฟฟ้าเข้าเตาหลอมไม่ให้หลอมเกินอุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ตามที่ต้องการ ซึ่งจะทำให้สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ และผลของการติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ทำให้สามารถออกแบบวิธีควบคุมเตาหลอมเพื่อให้ประหยัดพลังงานที่สุด ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายลง 33.32 บาทต่อหนึ่งรอบของการหลอม เมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการหลอมของโรงงานในปัจจุบัน นอกจากนี้ค่าที่วัดต่างๆ นี้ วัดได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับน้ำโลหะอุณหภูมิสูง ทำให้ระบบการวัดมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และสามารถประหยัดการใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด R ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาได้ ซึ่งในระบบควบคุมนี้ในแต่ละการหลอมจะใช้เทอร์โมคัปเปิลนี้วัดอุณหภูมิน้ำเหล็กเพียงครั้งเดียว หลังจากนั้นระบบจะทำการคำนวณและแสดงค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กออกมาเอง ซึ่งเมื่อติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้และทดลองใช้งานจริงจะลดการใช้หัวเทอร์โมคัปเปิลลง 3 เท่า คิดเป็นเงินประมาณ 30,360 บาท/ปี

เมื่อมีการนำระบบประมาณค่าอุณหภูมิไปใช้งานจริง โดยได้ไปใช้งานจริงที่โรงงานสมบурณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรมจำกัด พบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อยอดการหลอมเท่ากับ 644.12 kWh/ตัน เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่านี้เมื่อปี 2544 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อยอดการหลอมเท่ากับ 693.17 kWh/ตัน ดังนั้นเมื่อคิดผลประหยัดพลังงานจะประหยัดพลังงานไฟฟ้าลงประมาณ 276,459.53 kWh/ปี คิดเป็นเงิน 552,919.07 บาท/ปี เมื่อนำผลประหยัดจากการควบคุมอุณหภูมิในเตาหลอมและค่าหัวเทอร์โมคัปเปิลที่ประหยัดได้มารวมกัน พบว่า

จะประหยัดเงินได้ทั้งหมดรวม 583,279.07 บาท/ปี เมื่อคิดเงินลงทุนทั้งหมด 137,042.80 บาท/ปี  
ดังนั้นจะมีเวลาคืนทุนเท่ากับ 0.23 ปี

## 9.2 ข้อเสนอนแนะ

- (1) ทำการศึกษาการหาแบบจำลองทางความร้อนโดยใช้วิธีอื่นๆ เพื่อที่จะสามารถทำนาย  
อุณหภูมิในเตาหลอมได้แม่นยำกว่านี้
- (2) เนื่องจากการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมิที่ออกแบบนี้ยังเป็นการใช้งานแบบกึ่ง  
อัตโนมัติอยู่ ดังนั้นควรทำการพัฒนาโปรแกรมการใช้งานให้เป็นแบบอัตโนมัติต่อไป  
ในอนาคตเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการใช้งาน
- (3) เนื่องจากการใช้งานระบบอิเล็กทรอนิกส์ในบริเวณที่มีสัญญาณรบกวนสูงๆ และมี  
สภาวะการทำงานที่เต็มไปด้วย ฝุ่น ควัน และแรงกระแทก ซึ่งจะทำให้เป็นอันตรายต่อ  
ระบบอิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังนั้นควรทำการพัฒนาระบบควบคุมนี้ให้อยู่ในห้องควบคุม  
โดยเฉพาะ โดยในบริเวณทำงานให้แสดงเฉพาะค่าที่วัดหรือคำนวณได้ เพื่อให้ระบบ  
ประมาณค่าอุณหภูมินี้ใช้งานได้ยาวนานๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. The Energy conservation Center Japan. The Utilization of The Electric Heating Installation Efficiency of The Energy Japan. Induction Heating 1990 : 1-33.
2. 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 3<sup>rd</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation 2000 : 330-334.
3. 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 : 127-134.
4. INDUCTOTHERM INDUSTRIES. 10 Indel Avenue Rancocas, New Jersey, USA.
5. Elliott R. Induction melting. Cast Iron Technology 1998 : 58-63.
6. RADYNE DOUBLE AXIS TILT INDUCTION MELTING FURNACES. Molly Millars Lane Wokingham Berk Rg11 2PX.
7. The Energy conservation Center Japan. SEMINAR ON ENERGY CONSERVATION IN IRON CASTING INDUSTRY. The Energy Conservation 1998 : 53-67.
8. Davies J. & Simpson P.G. Induction Heating Handbook. UK : McGRAW-Hill Book, 1926.
9. Jang J.-S.R., Sun C.T. and Mizutani E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing. UK : Prentice-Hall International, 1997.



ภาคผนวก ก.

รายละเอียดงบประมาณที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดงบประมาณที่ใช้ในโครงการ

	ค่าใช้จ่าย (บาท)
งบ สกว.	
1. หมวดค่าตอบแทน ที่ปรึกษาโครงการ	60,000
2. หมวดค่าจ้าง ผู้ปฏิบัติการวิจัย	120,000
3. หมวดค่าวัสดุ	32,000
4. หมวดค่าใช้สอย	48,000
5. หมวดค่าครุภัณฑ์	280,000
6. หมวดค่าใช้จ่ายทางอ้อม	26,000
รวม	566,000
งบ หน่วยงาน	
1. หมวดค่าตอบแทน ที่ปรึกษาโครงการ	180,000
2. หมวดค่าวัสดุ	13,000
3. หมวดค่าใช้สอย (ค่าเช่ารถ-มหาวิทยาลัย)	100,000
4. หมวดค่าครุภัณฑ์	175,000
รวม	468,000
รวมทั้งสิ้น	1,034,000

ตารางที่ ก.2 รายละเอียดงบประมาณที่ใช้ติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมิ

	ค่าใช้จ่าย (บาท)
งบ สกว.	
1. หมวดค่าวัสดุ (วัสดุวงจรไฟฟ้า)	19,000.75
2. หมวดค่าครุภัณฑ์ (คอมพิวเตอร์)	50,000
3. หมวดค่าครุภัณฑ์ (ค่าติดตั้ง)	20,000
งบ หน่วยงาน	
1. หมวดค่าวัสดุ (วัสดุวงจรไฟฟ้า)	4,922
2. หมวดค่าครุภัณฑ์ (วัสดุกล่องควบคุม)	43,120.25
รวม	137,042.80

ภาคผนวก ข.

รูปแบบและตัวอย่างการส่งผ่านข้อมูลโดยใช้ Modbus โพรโตคอล  
485 โพรโตคอล และตัวอย่างโปรแกรม LabVIEW

ข.1 รูปแบบและตัวอย่างการส่งผ่านข้อมูลผ่านตัว ACM 3300 โดยใช้ Modbus โพรโตคอล

ตารางที่ ข.1 รูปแบบการขอข้อมูล (Master to ACM 3300)

ลักษณะของข้อมูล	จำนวนไบนารี (Byte)
14	1
FD	1
83 (Read registers command)	1
Length	1
Master address	2
3300 address	2
Password	2
Start register requested	2
End register requested	2
LRC Checksum	1

ตารางที่ ข.2 รูปแบบการตอบกลับของข้อมูล (ACM 3300 to Master)

ลักษณะของข้อมูล	จำนวนไบนารี (Byte)
27	1
FD	1
83 (Read registers command)	1
Length	1
3300 address	2
Master address	2
Device type	2
Number of register sent	2
1 <sup>st</sup> Register in Range	4
2 <sup>nd</sup> Register in Range	4
.....	...
LRC Checksum	1

## ตัวอย่างการขอข้อมูล (Master to ACM 3300)

14 FD 83 0A            00 00 64 00            00 00 00 00            FF 00 12

## ตัวอย่างการตอบกลับของข้อมูล (ACM 3300 to Master)

24 FD 83 90            64 00 00 00            E4 0C 22 00            64 00 00 0A  
 64 00 00 0B            64 00 00 0C            64 00 00 0D            AD 00 00 0E  
 AD 00 00 0F            AD 00 00 10            AD 00 00 11            88 13 00 14  
 88 13 00 15            88 13 00 16            88 13 00 17            F4 01 00 1E  
 F4 01 00 1F            F4 01 00 20            DC 05 00 21            00 00 00 22  
 00 00 00 23            00 00 00 24            00 00 00 25            E8 03 00 26  
 E8 03 00 27            E8 03 00 28            E8 03 00 29            F4 01 00 2A  
 F4 01 00 2B            F4 01 00 2C            DC 05 00 2D            AE 0F 00 2F  
 DA 2F 01 36            00 00 00 37            93 0E 00 40            00 00 00 41  
 1F 05 00 85            55

## ข.2 รูปแบบและตัวอย่างการส่งผ่านข้อมูลผ่านตัว NuDAM - 6018 โดยใช้ 485 โปรโตคอล

## ตารางที่ ข.3 รูปแบบการขอข้อมูลตัว NuDAM - 6018

ลักษณะของข้อมูล	จำนวนตัวอักษร (Character)
Leading code (% , \$ , # , @)	1
Address	2
Command variable	Variable length
Data	Variable length
Checksum	2
<CR>	1

ตารางที่ ข.4 รูปแบบการตอบกลับของตัวตัว NuDAM - 6018

ลักษณะของข้อมูล	จำนวนตัวอักษร (Character)
Leading code (!, >, ?)	1
Address	2
Data	Variable length
Checksum	2
<CR>	1

ตัวอย่างการขอข้อมูลตัว NuDAM – 6018

\$012B7<CR>

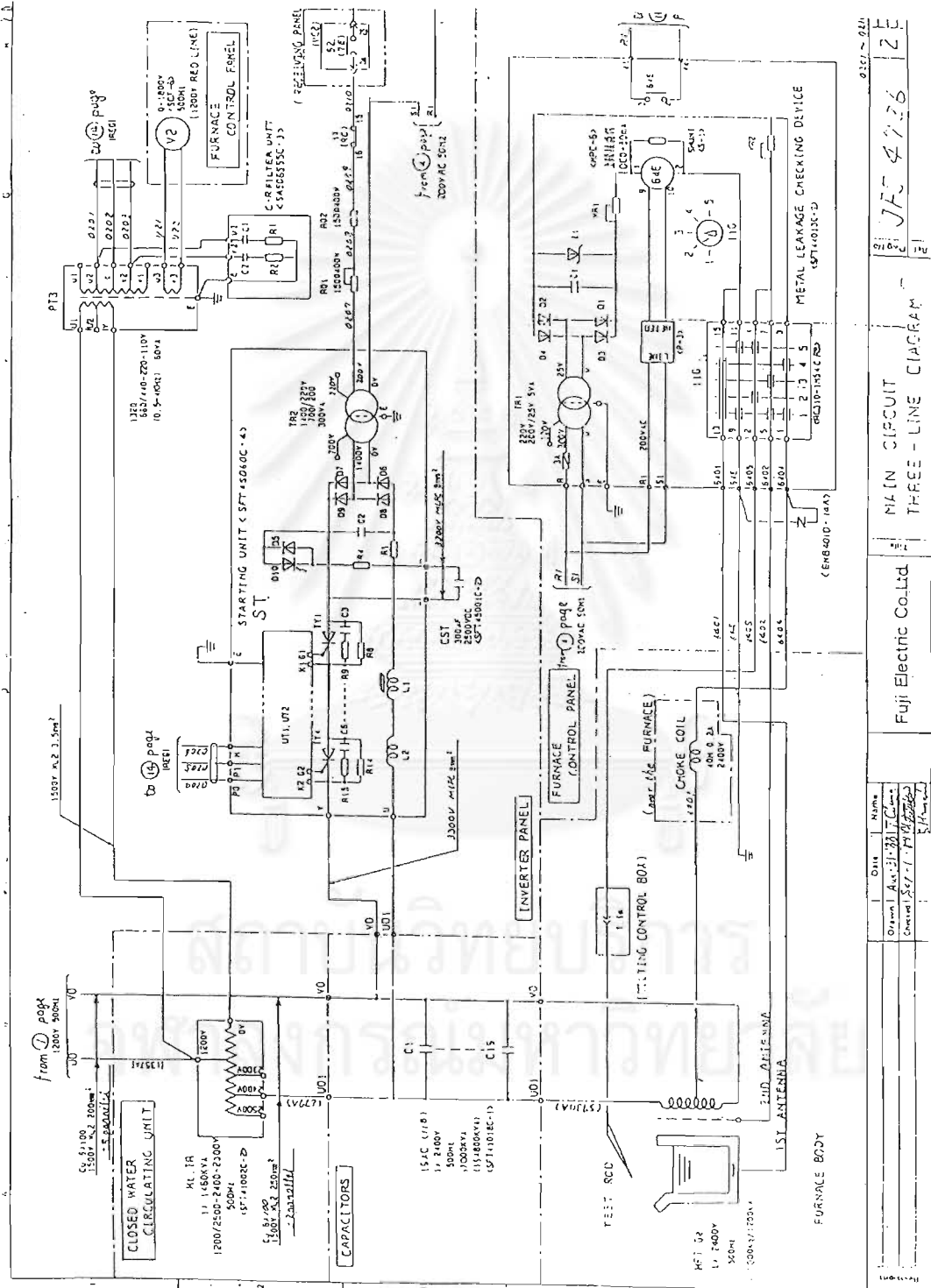
ตัวอย่างการตอบกลับของตัว NuDAM – 6018

!01400600AC<CR>

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

รายละเอียดเครื่องมือและแบบโครงสร้างเตา

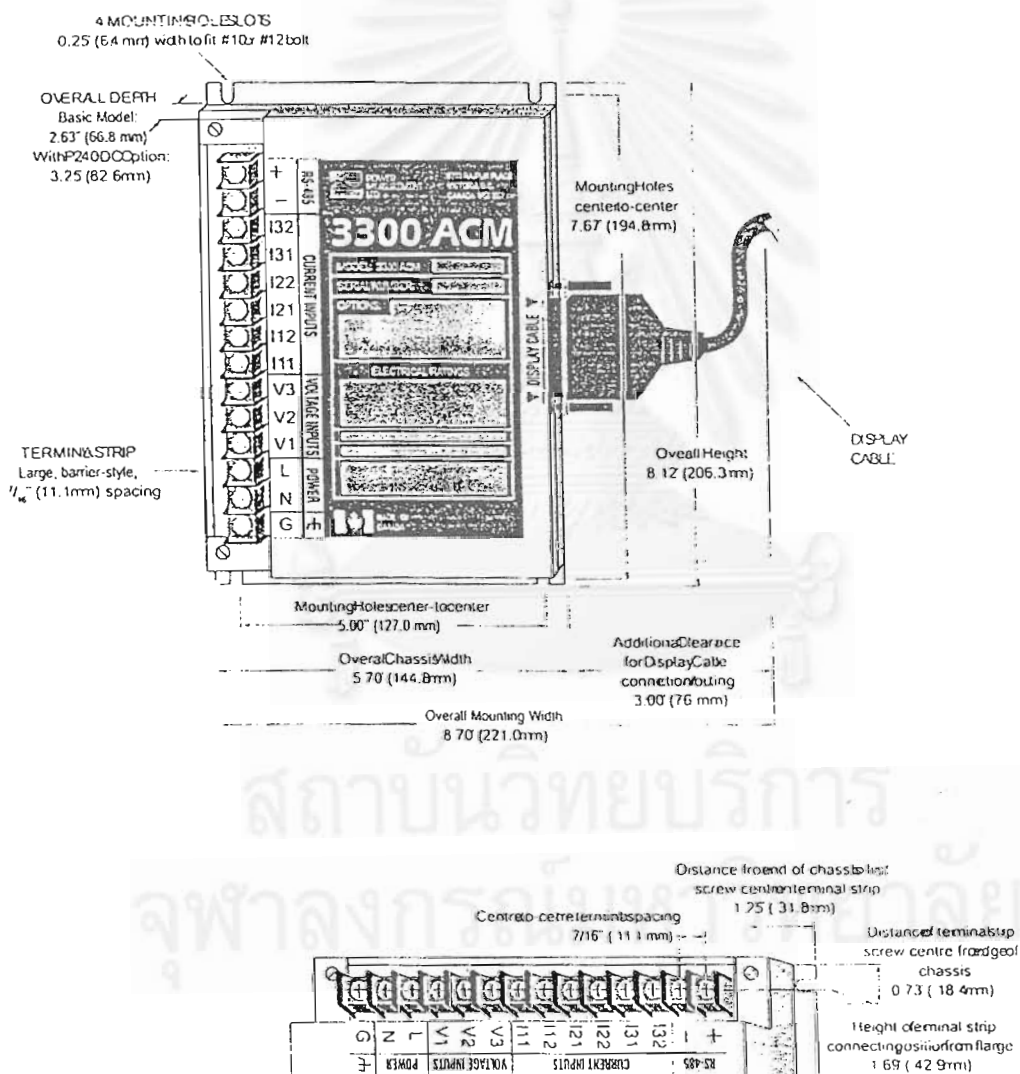


0317-011	2	1	JFC 4726	2E
0317-011	2	1	JFC 4726	2E
Fuji Electric Co. Ltd.		MAIN CIRCUIT THREE-LINE DIAGRAM		
Drawn	Checked	Appr.	Name	

รูปที่ ค.1 Single line diagram ของเตาหลอม

APPENDIX A

MECHANICAL & MOUNTING DIMENSIONS



A 2 Appendix A Mechanical Dimensions

รูปที่ ค.2 รายละเอียดเครื่อง ACM 3300

## APPENDIX C

## 3300 ACM TECHNICAL SPECIFICATIONS

## ACCURACY, RESOLUTION, &amp; RANGE

Parameter	Accuracy (% of Full Scale)		Resolution	Range
	Standard	HIACC Option		
Volts & Volts Demand <sup>1</sup>	0.5 %	0.25 %	0.1 %	0 - 999,999 <sup>2</sup>
Amps & Amps Demand <sup>1</sup>	0.5 %	0.25 %	0.1 %	0 - 32,000
kW & kW Demand <sup>1</sup>	1.0 %	0.5 %	0.1 %	0 - 999,999
kVAR <sup>1</sup> & kVAR Demand <sup>1</sup>	1.0 %	0.5 %	0.1 %	0 - 999,999
kVA <sup>1</sup> & kVA Demand <sup>1</sup>	1.0 %	0.5 %	0.1 %	0 - 999,999
Power Factor <sup>1</sup> & PF Demand <sup>1</sup>	2.0 %	1.0 %	1.0 %	-0.6 to 1.0 to +0.6
Frequency <sup>1</sup> & Freq. Demand <sup>1</sup>	0.2 Hz	0.2 Hz	0.1 Hz	45 to 70 Hz
kWh, kVARh <sup>1</sup> & kVAh <sup>1</sup>	1.0 %	0.5 %	1 kWh, kVARh, or kVAh	0 - 999,999,999
Volt-Hours <sup>1</sup>	1.0 %	0.5 %	1 Hour	0 - 999,999,999

NOTES: <sup>1</sup> Optional measurement. <sup>2</sup> Reads in k (i.e. x 1000) for readings over 9,999

## INPUT RATINGS

Type	Basic or Optional	Description
Voltage Inputs:	Basic Model:	120 VAC line-neutral / 208 VAC line-line to 347 VAC line-neutral / 600 VAC line-line nominal full scale input (programmable). Overload withstand: 600 VAC continuous, 1500 VAC for 1 Sec. Input impedance: 1 Megohm
Current Inputs:	Basic Model 1AMP Option All Options:	5,000 Amps AC nominal full scale input 1,000 Amp AC nominal full scale Overload withstand: 15 Amps continuous, 300 Amps for 1 sec. Input impedance: 0.002 ohm. Burden: 0.05 VA
Power Supply:	Basic model P240 Option P24 Option P120DC Option P240DC Option	108 to 132 VAC / 47 to 66 Hz @ 0.25 Amp 216 to 264 VAC / 47 to 66 Hz @ 0.125 Amp 22 to 27 VDC @ 0.3 Amp 85 to 132 VAC / 47 to 440 Hz or 110 to 170 VDC @ 0.1 Amp 85 to 264 VAC / 47 to 440 Hz or 110 to 340 VDC @ 0.1 Amp

Operating Temperature: All models 0°C to 50°C (32°F to 122°F) ambient air

Storage Temperature: All models -30°C to +70°C (-22°F to +158°F)

Humidity: All models 5 to 95 percent, non-condensing

Shipping Weight: Basic Model: 3.3 kg, 7 lb 4 oz

Shipping Dimensions: All models 38 x 25 x 18 cm, 15 x 9.8 x 7.1 inches

Voltage, Current, and Power inputs all pass the ANSI/IEEE C37.90A-1989 surge withstand and fast transient tests.  
Complies with FCC/DOC emissions standard.



NOTE: P120DC and P240DC options are not currently CSA or UL approved.

## 2. NuDAM-6520

---

### 2.1. Overview

---

#### *What is NuDAM-6520 ?*

NuDAM-6520 is a RS-232 to RS-422/RS-485 converter, it converts the RS-232 signal to the RS-422/RS-485 signals. The ND-6520 can be considered as an extension RS-422/RS-485 serial port for the host computer. A standard 9-pin D-type connector is used to connect the host computer and the ND-6520. Hence, the ND-6520 can connect with all kinds the PC, IPC or Notebook PC, which install a standard RS-232 interface.

#### *Features of NuDAM-6520*

- RS-422/RS-485 transceiver
- Differential 2-wire half-duplex RS-485
- Easily setup and installation
- Auto direction flow control
- Maximum 128 NuDAM on a bus without using repeaters
- Maximum 256 addressable NuDAM modules
- High transfer speed
- High isolation voltage
- Lower power consumption

---

NuDAM-6520 2-1

---



### Specifications of NuDAM-6520

- ◇ Input
  - Interface : standard RS-232 9 pin female D-type connector
  - Speed (bps) : 1200(115.2K<sup>1</sup>), 2400, 4800, 9600, 19.2K, 38.4K, RTS
  - Data Format : 9 bits, 10 bits, 11 bits, or 12 bits
- ◇ Output
  - Interface : RS-485, differential, 2 half-duplex wires  
RS-422, differential, 4 full-duplex wires
  - Speed (bps) : 1200(115.2K<sup>1</sup>), 2400, 4800, 9600, 19.2K, 38.4K, RTS
  - Max RS-485 network bus distance : 4000 ft. (1200m)
- ◇ Isolation
  - Isolation voltage : 5000 Vrms(between RS-422/RS-485 network and host computer)
- ◇ Bus
  - Max loading : 128 NuDAMs on a RS-485 network
  - Max modules : 256 NuDAMs with one ND-6510 repeater
- ◇ Power
  - Power Supply : +10V to +30V
  - Power Consumption : 0.95 W

Note 1: 115.2K is supported by version A1.2 or later.

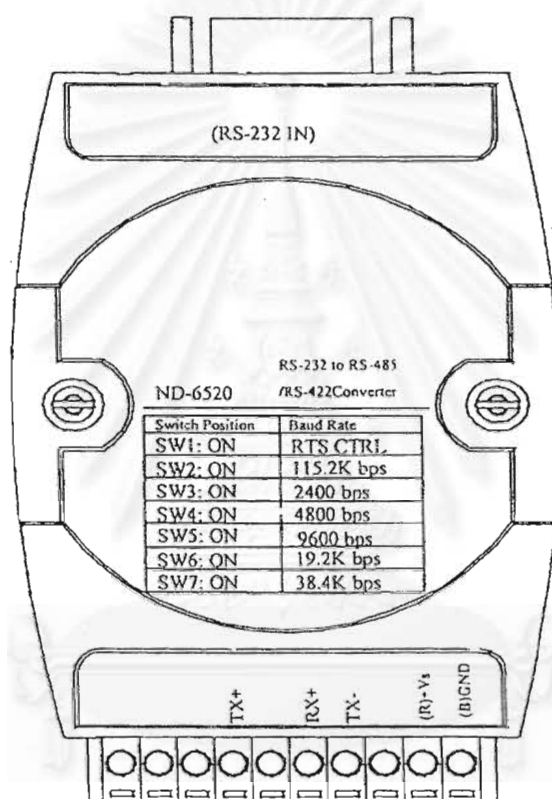
---

2-2 NuDAM-6520

---

รูปที่ ค.3(ต่อ) รายละเอียดเครื่อง NuDAM-6520

A Look at NuDAM-6520 & Pin Assignment



NuDAM-6520 2-3

## 1. 6. Overview of NuDAM-6018

---

### *What is NuDAM-6018 ?*

NuDAM-6018 is a thermocouple input module with 8 input channels. Six of the eight channels are differential type and the other two are single ended type.

### *Features of NuDAM-6018*

- 8 analog input channels
- 6 differential input and 2 single ended input
- programmable input voltage range
- Programmable host watchdog timer for host failure protection
- On board CJC for temperature measurement
- 5000 Vrms isolation voltage
- Internal watchdog timer for device failure protection
- Easy programming by software
- Easy installation and wiring

### *Specifications of NuDAM-6018*

#### ◇ Interface

- Interface : RS-485, 2 wires
- Speed (bps) : 1200, 2400, 4800, 9600, 19.2K, 38.4K

#### ◇ Analog Input

- Input type: Differential input
- Channels Numbers: 8
- Resolution: 16 bits
- Unit Conversion: Thermocouple
- Thermocouple Type: J, K, T, E, R, S, B, N, C
 

J: 0°C~760°C	K: 0°C~1000°C
T: -100°C~400°C	E: 0°C~1000°C
R: 500°C~1750°C	S: 500°C~1750°C
B: 500°C~1800°C	N: -270°C~1300°C
C: 0°C~2320°C	

---

### **1-16 Introduction**

---

- ◇ Power
  - Power supply : +10V to +30V
  - Power consumption : 0.8 W

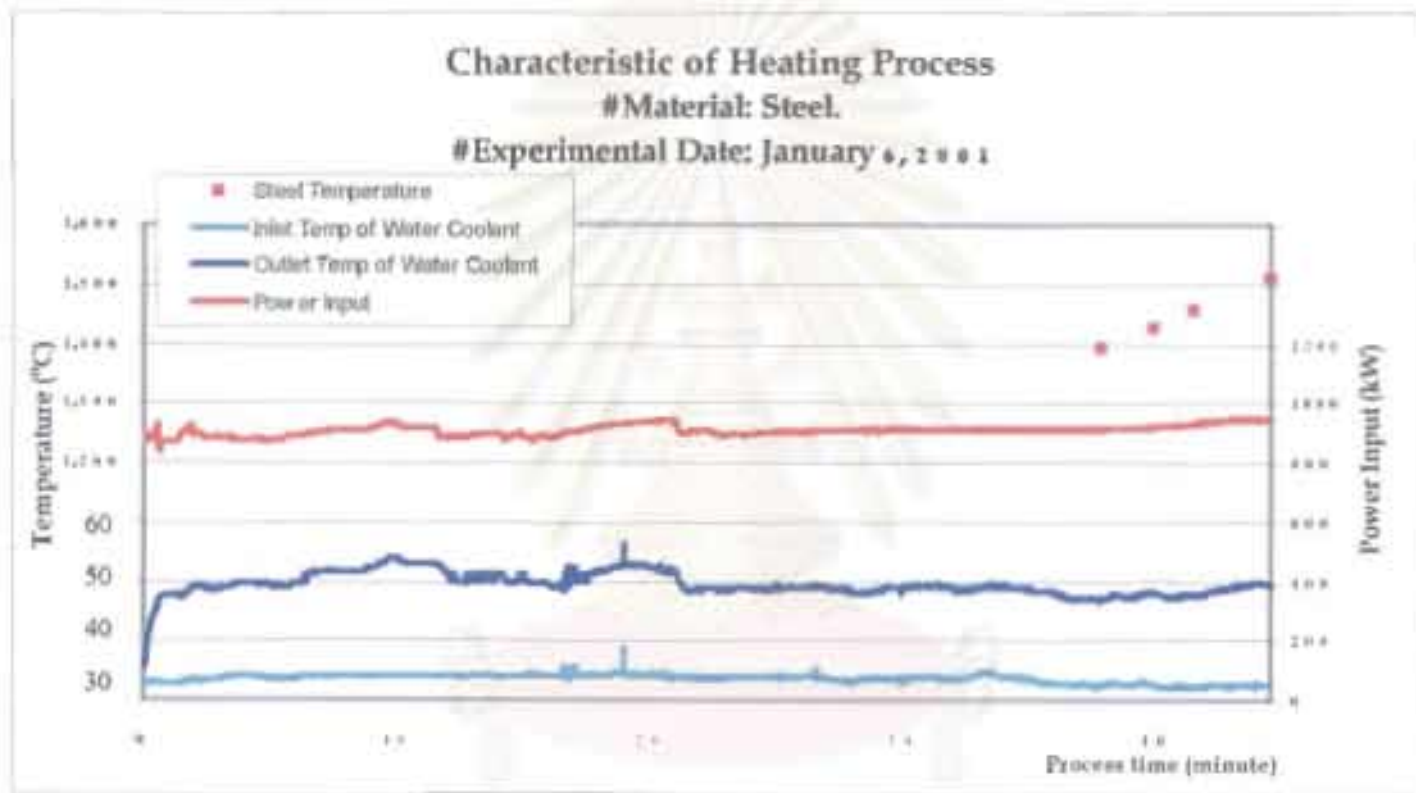
*Pin Definitions of ND-6018*

Pin #	Signal Name	Description
1	Vin5+	Differential positive input channel 5
2	Vin5-	Differential negative input channel 5
3	Vin6+	Single-ended voltage input channel 6
4	AGND	Analog signal ground of CH6 & 7
5	Vin7+	Single-ended voltage input channel 7
6	DEFAULT*	Initial state setting
7	(Y) DATA+	RS-485 series signal, positive
8	(G) DATA-	RS-485 series signal, negative
9	(R) +Vs	Power supply, +10V~+30V
10	(B) GND	Ground
11	Vin0+	Differential positive input channel 0
12	Vin0-	Differential negative input channel 0
13	Vin1+	Differential positive input channel 1
14	Vin1-	Differential negative input channel 1
15	Vin2+	Differential positive input channel 2
16	Vin2-	Differential negative input channel 2
17	Vin3+	Differential positive input channel 3
18	Vin3-	Differential negative input channel 3
19	Vin4+	Differential positive input channel 4
20	Vin4-	Differential negative input channel 4

ภาคผนวก ง.

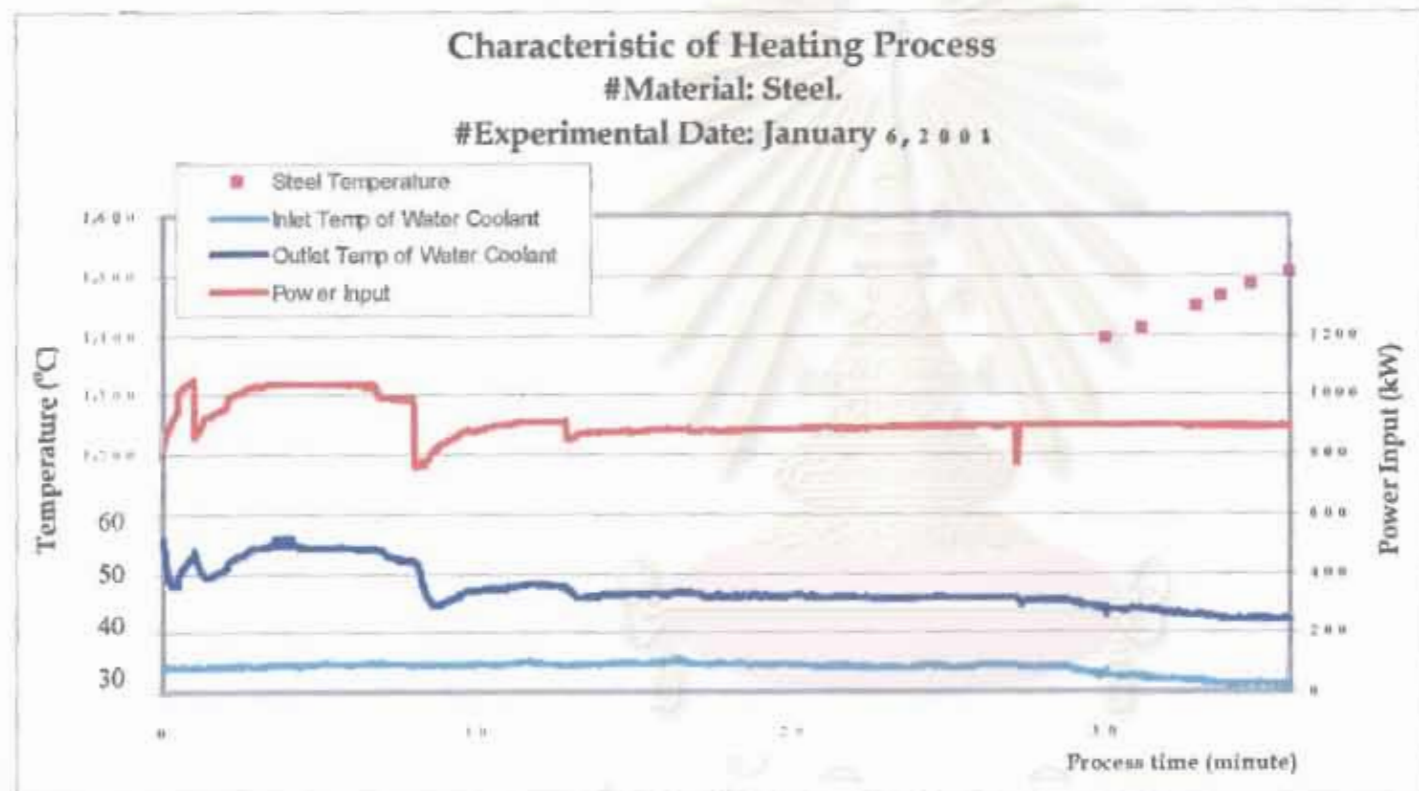
รายละเอียดข้อมูลการทดลอง





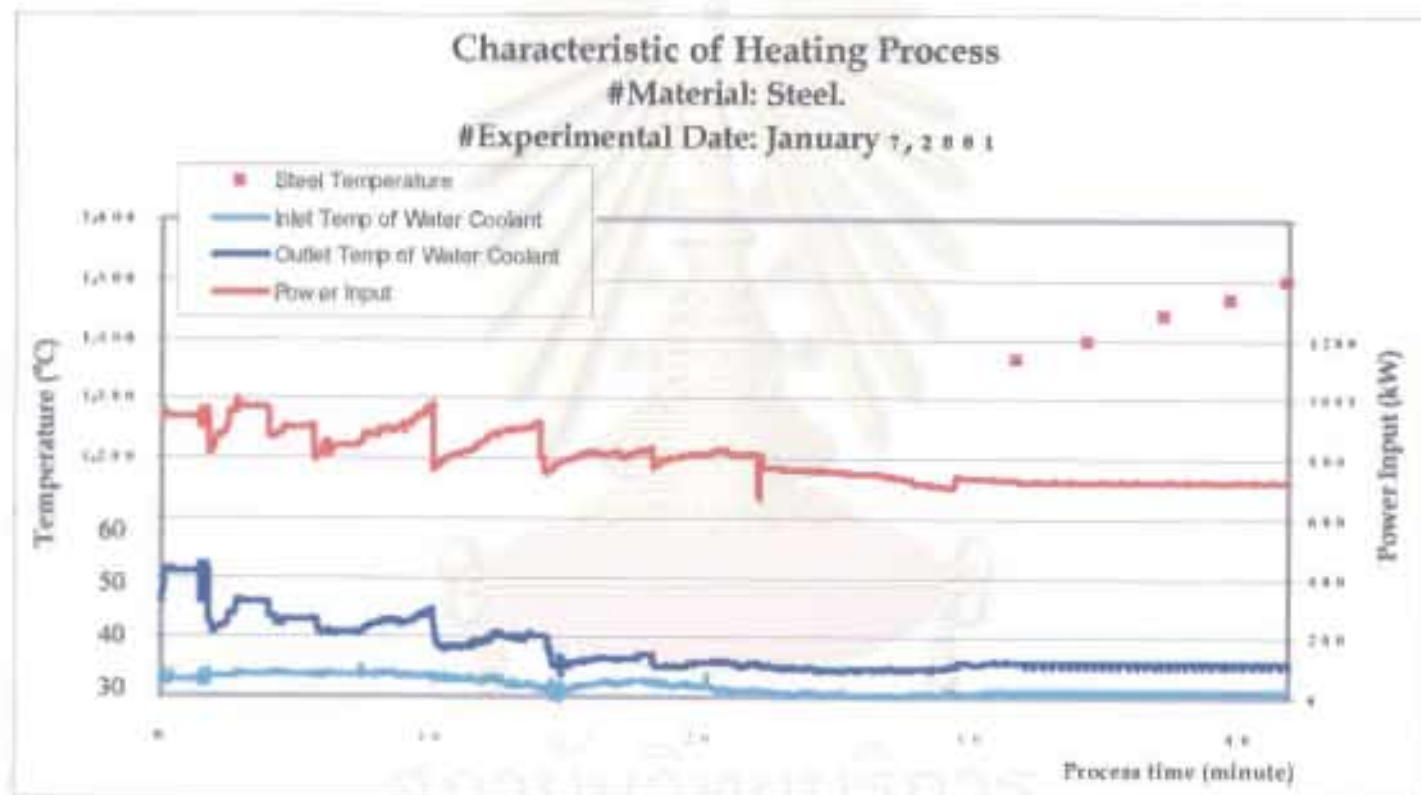
รูปที่ 4.1 จุดมีงมุลสำหรัการนำค่าพารามิเตอร์ C1, C2, และ C3 ของแบบจำลองทางความร้อนจุดมีงมุลที่ 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



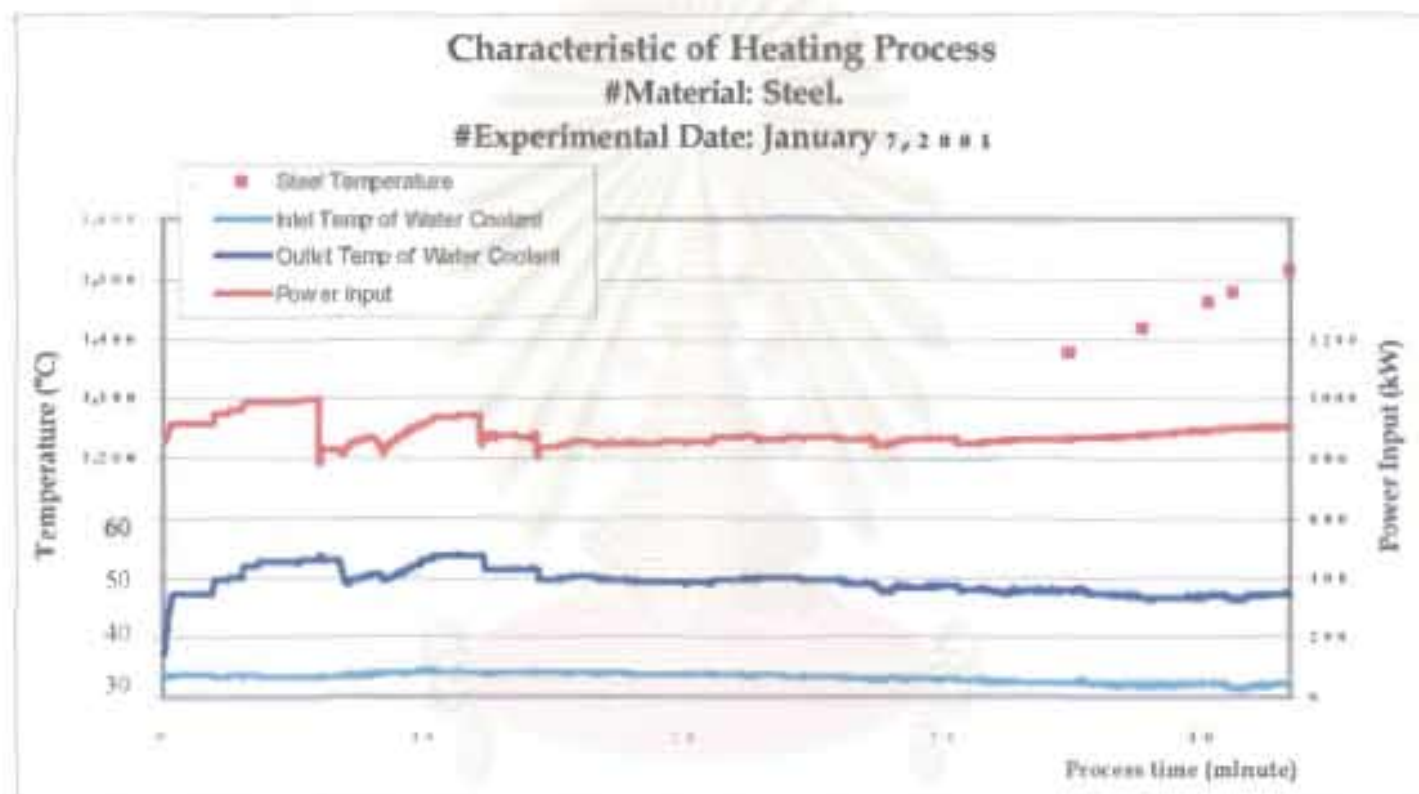
รูปที่ ๓.2 ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ C1, C2, และ C3 ของแบบจำลองทางความร้อนชุดข้อมูลที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



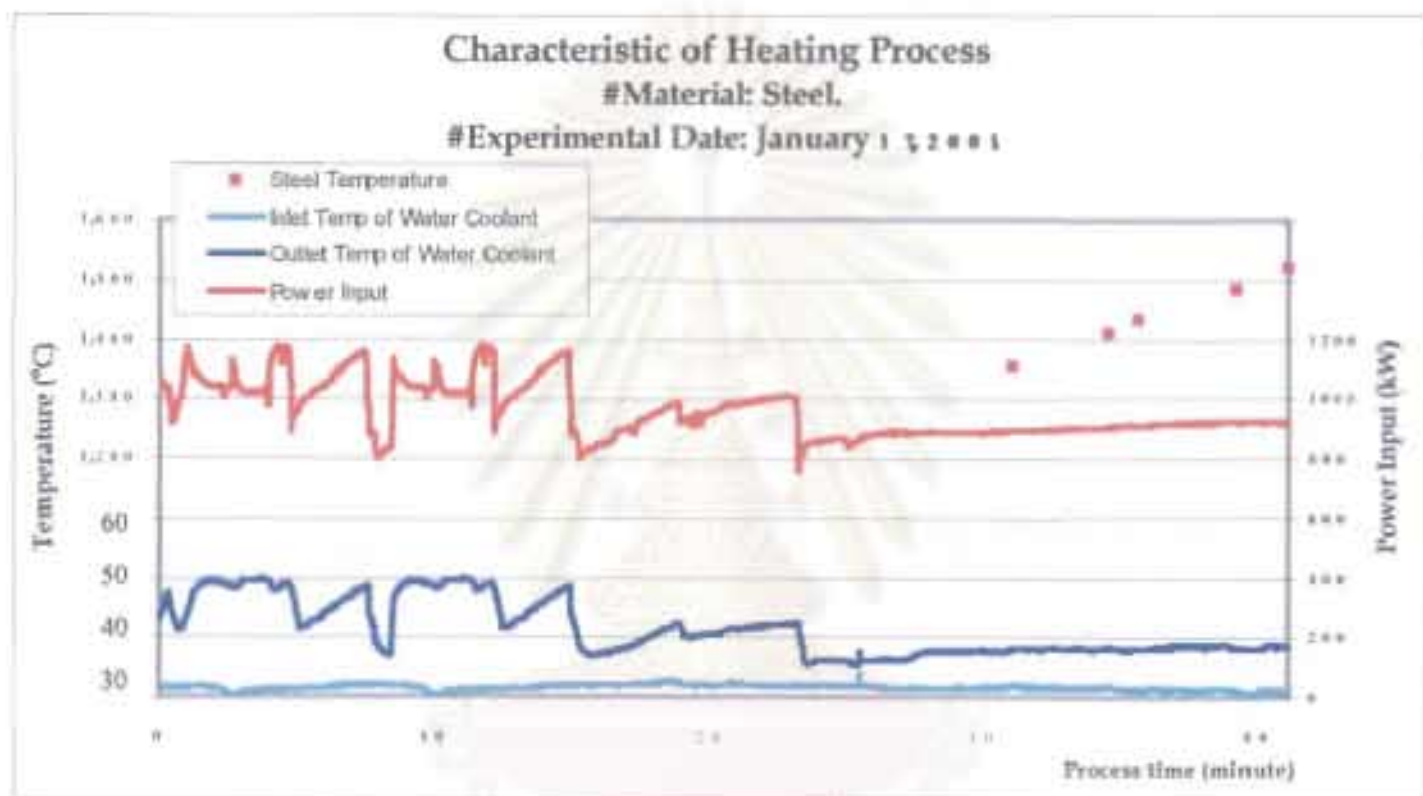
รูปที่ ๔.3 กราฟเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนของ C1, C2, และ C3 ของแบบจำลองทางความร้อนในชุดข้อมูลที่ 3



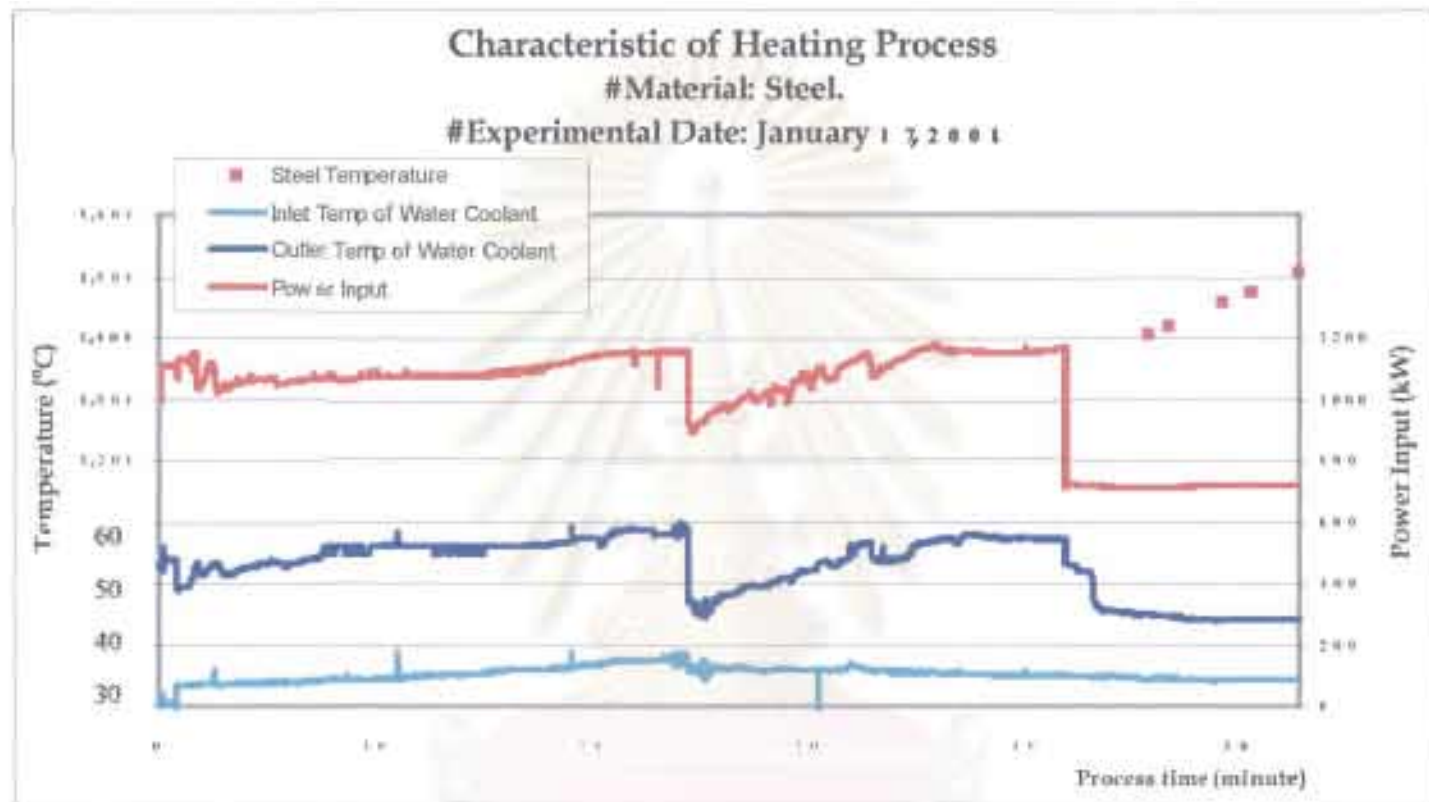


รูปที่ 4.4 ชุดข้อมูลสำหรับการหาค่าพารามิเตอร์ C1, C2, และ C3 ของแบบจำลองทางความร้อนชุดข้อมูลที่ 4

สถาบันเทคโนโลยีการ  
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี



รูปที่ 4.5 ชุดข้อมูลสำหรับการทำพารามิเตอร์ C1, C2, และ C3 ของแบบจำลองทางความร้อนชุดขั้นตอนที่ 5



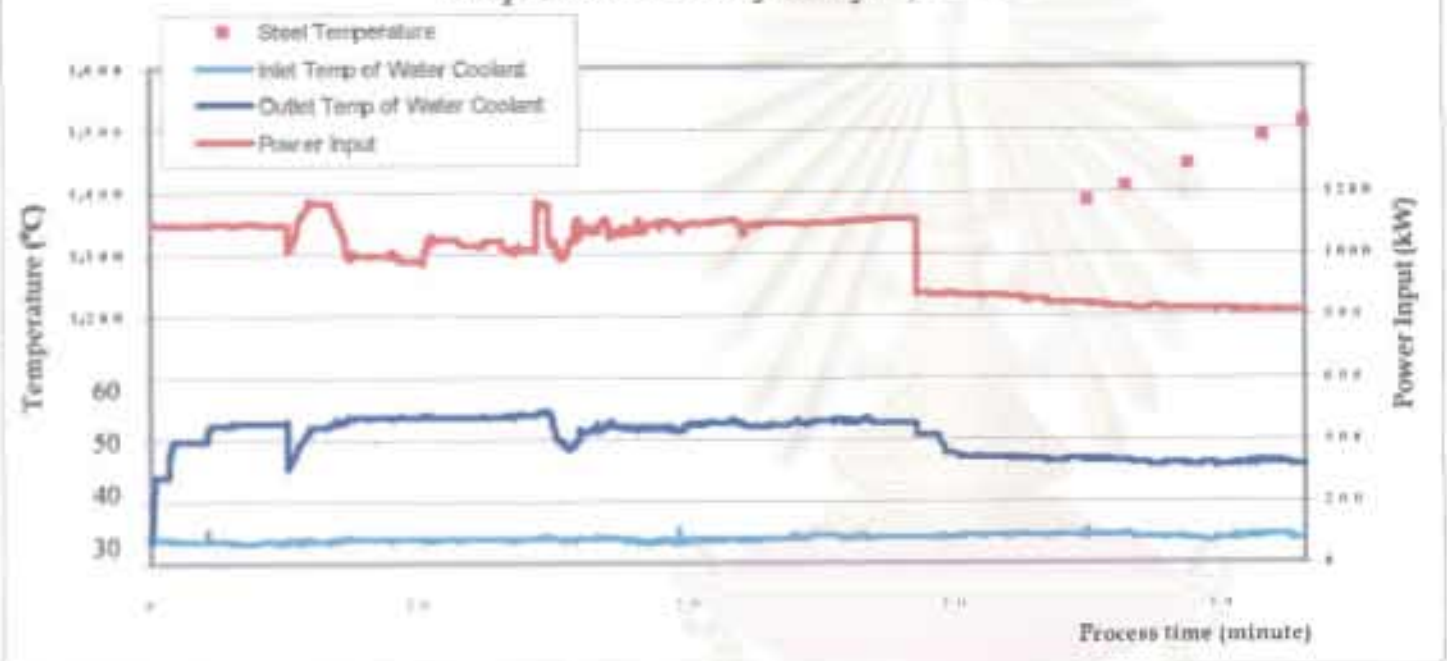
รูปที่ 4.6 จุดข้อมูลส่วนรับกาทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองจุดข้อมูลที่ 1

สถาบันวิจัยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### Characteristic of Heating Process

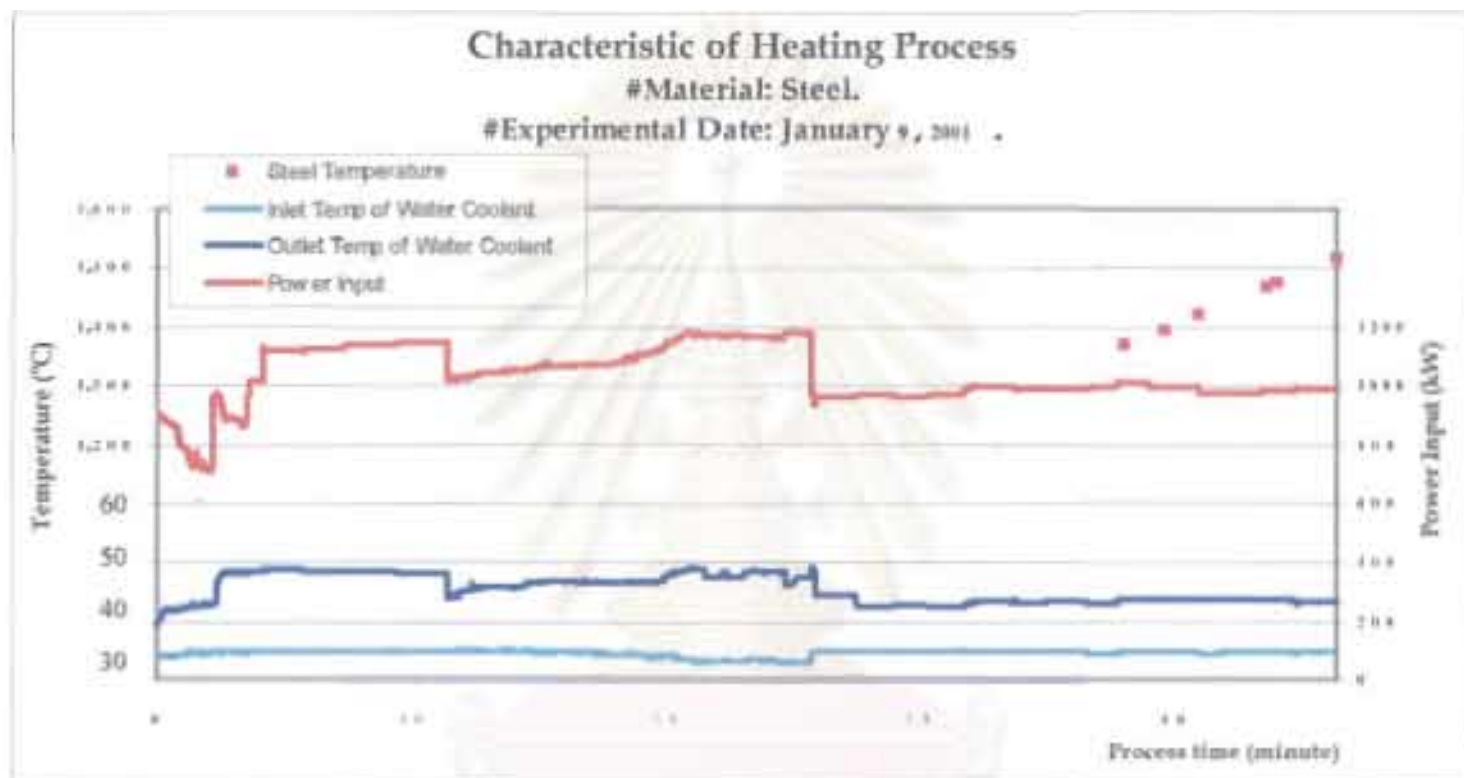
#Material: Steel.

#Experimental Date: January 1, 2001



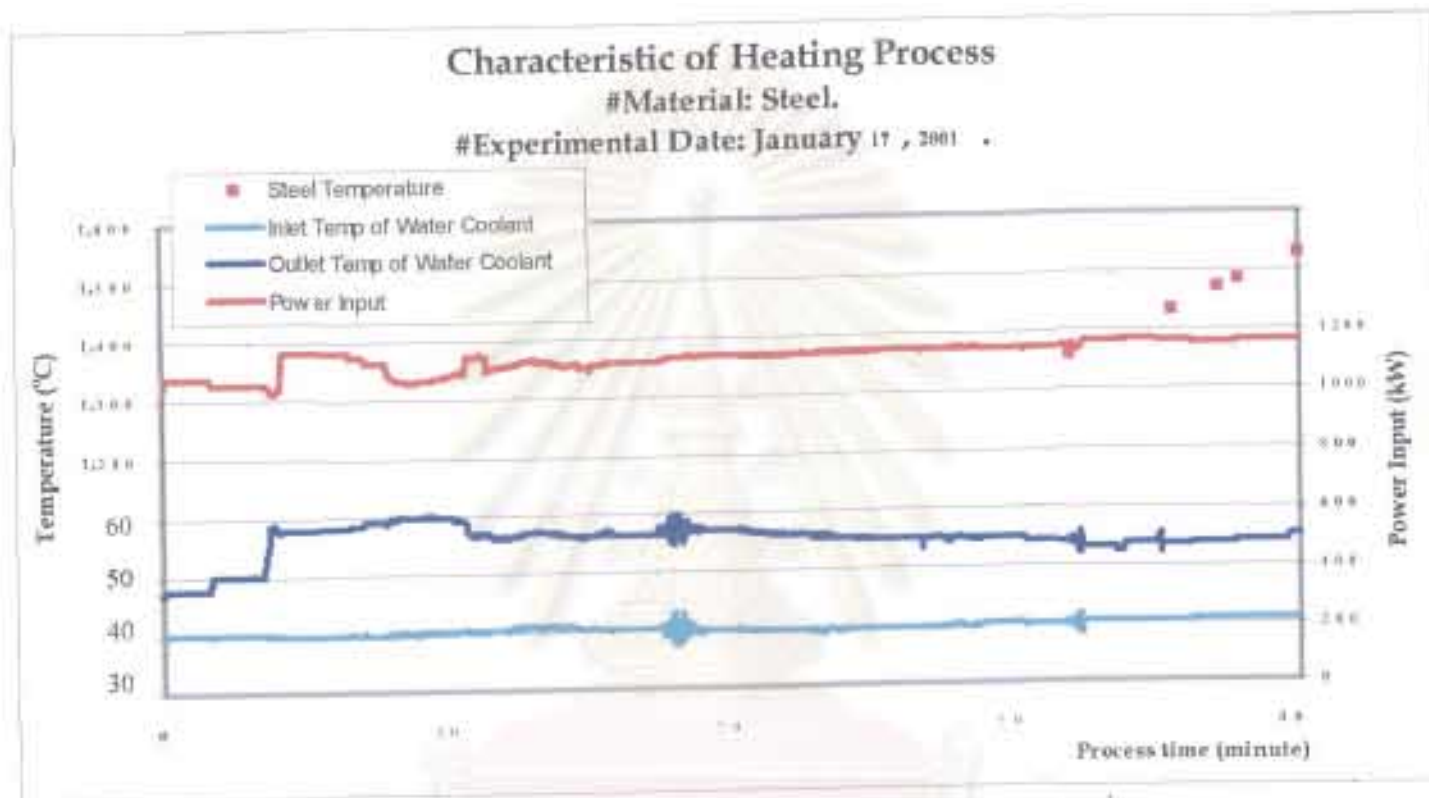
รูปที่ 4.7 จุดข้อมูลสำหรับการทดลองความแม่นยำของแบบจำลองจุดที่สองที่ 2

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



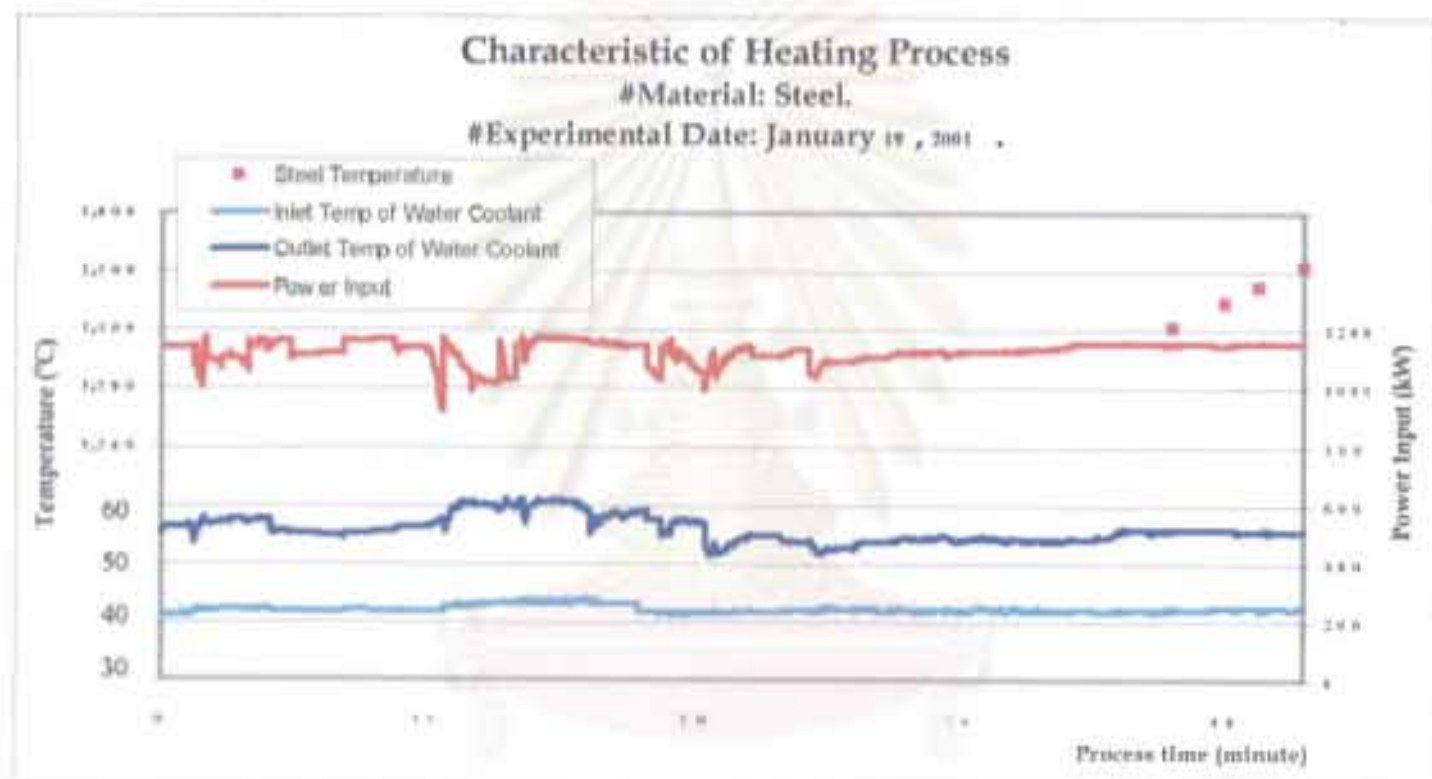
รูปที่ 4.8 จุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองของชุดข้อมูลที่ 3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



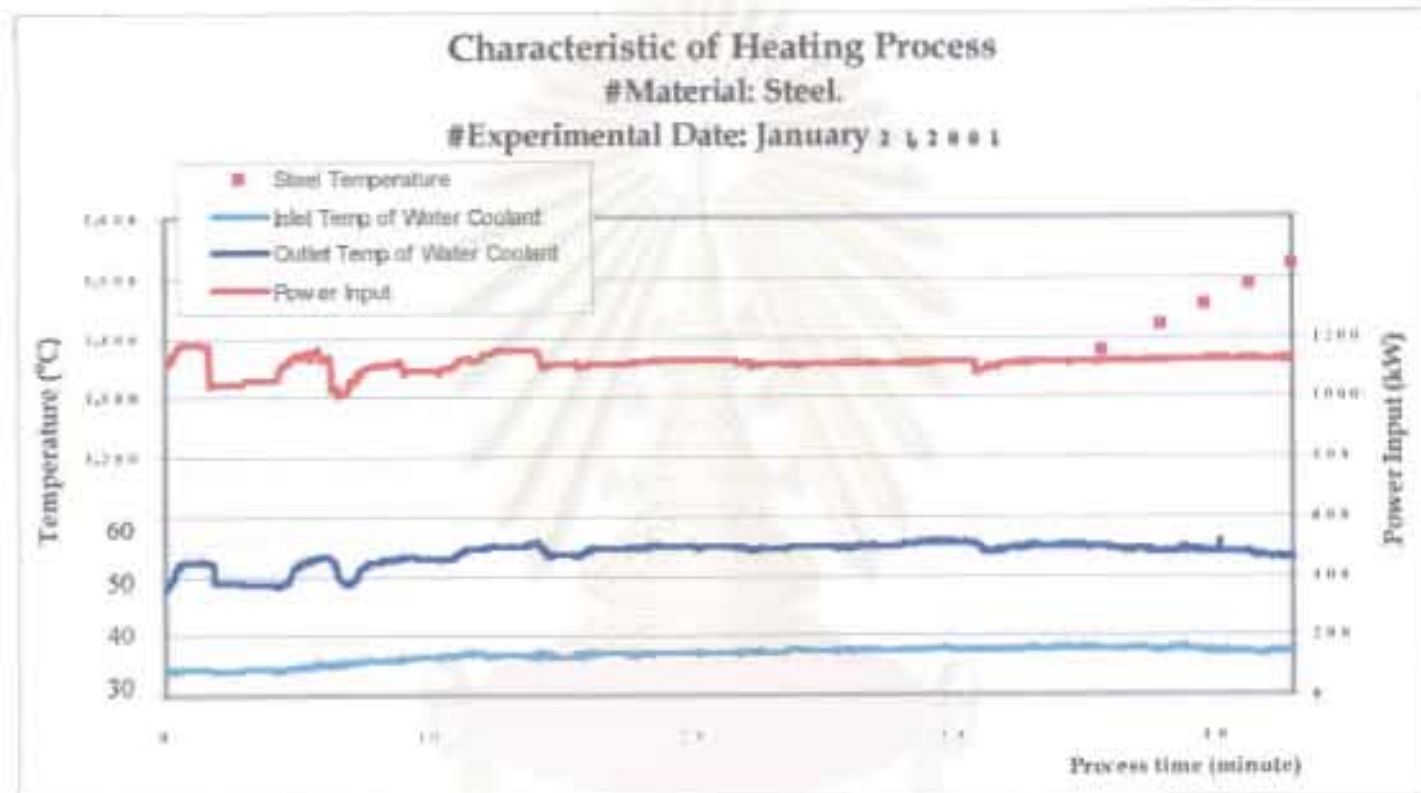
รูปที่ ๓.๙ ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 4

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.10 ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองจุดข้อมูลที่ 5

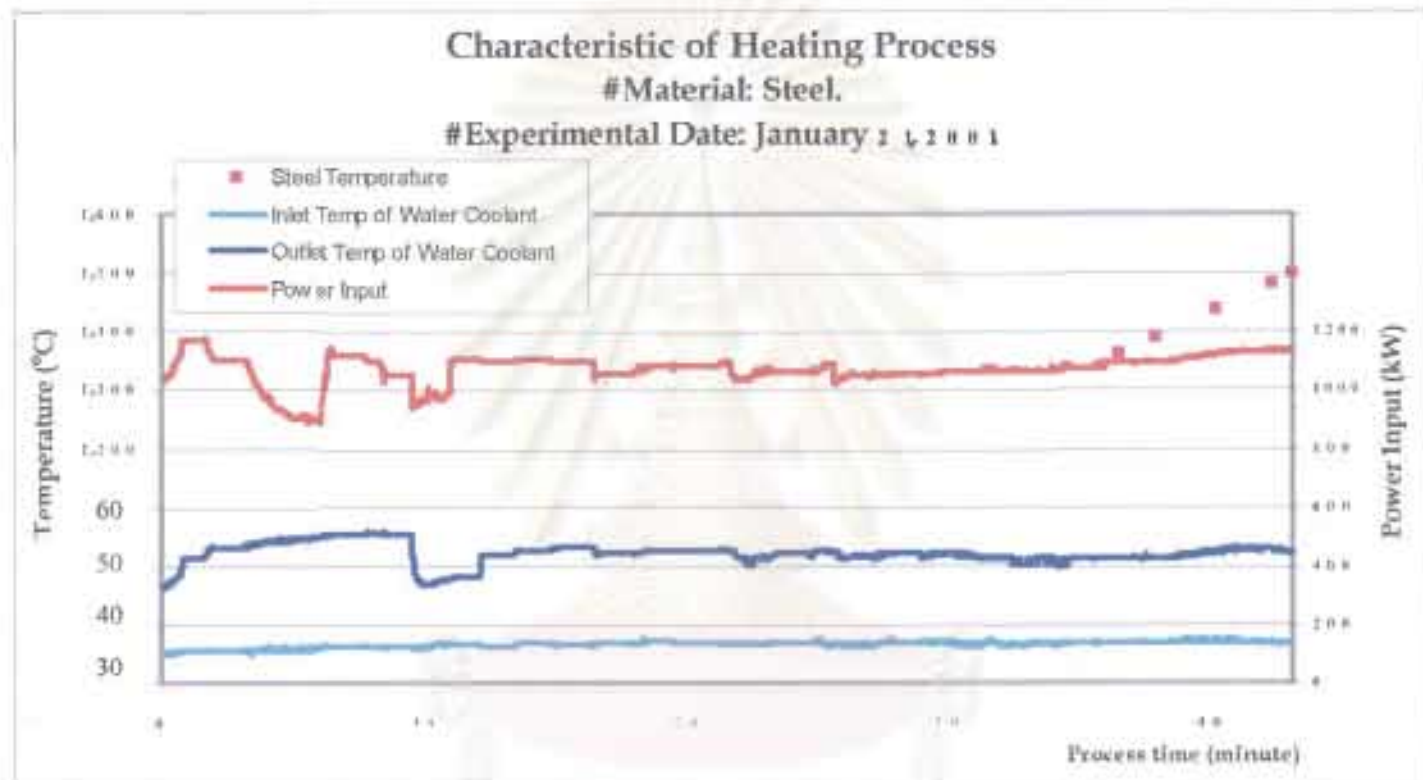
สถาบันวิจัยปวช.  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.11 ชุดข้อมูลค่าเฝ้าการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดวิชาหมู่ที่ 6

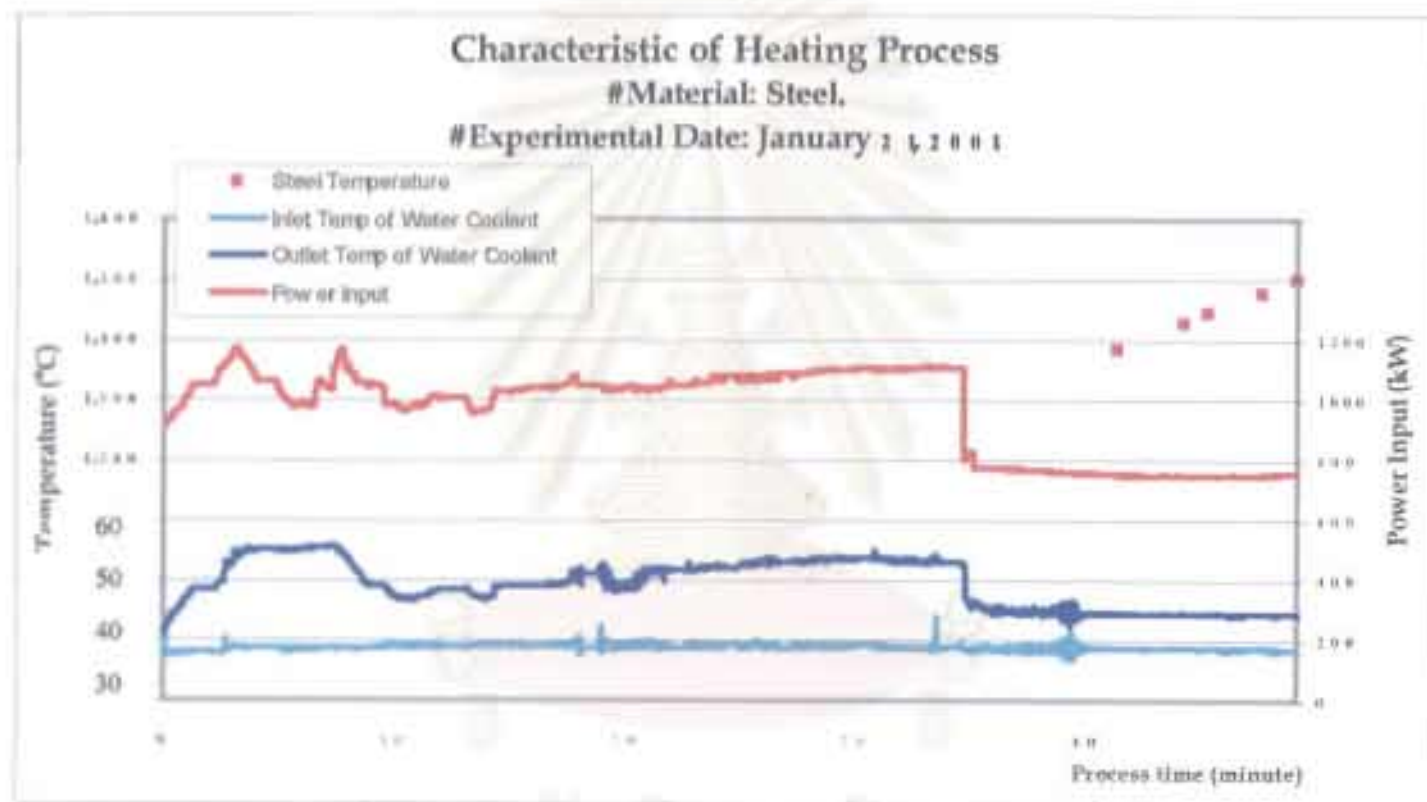
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





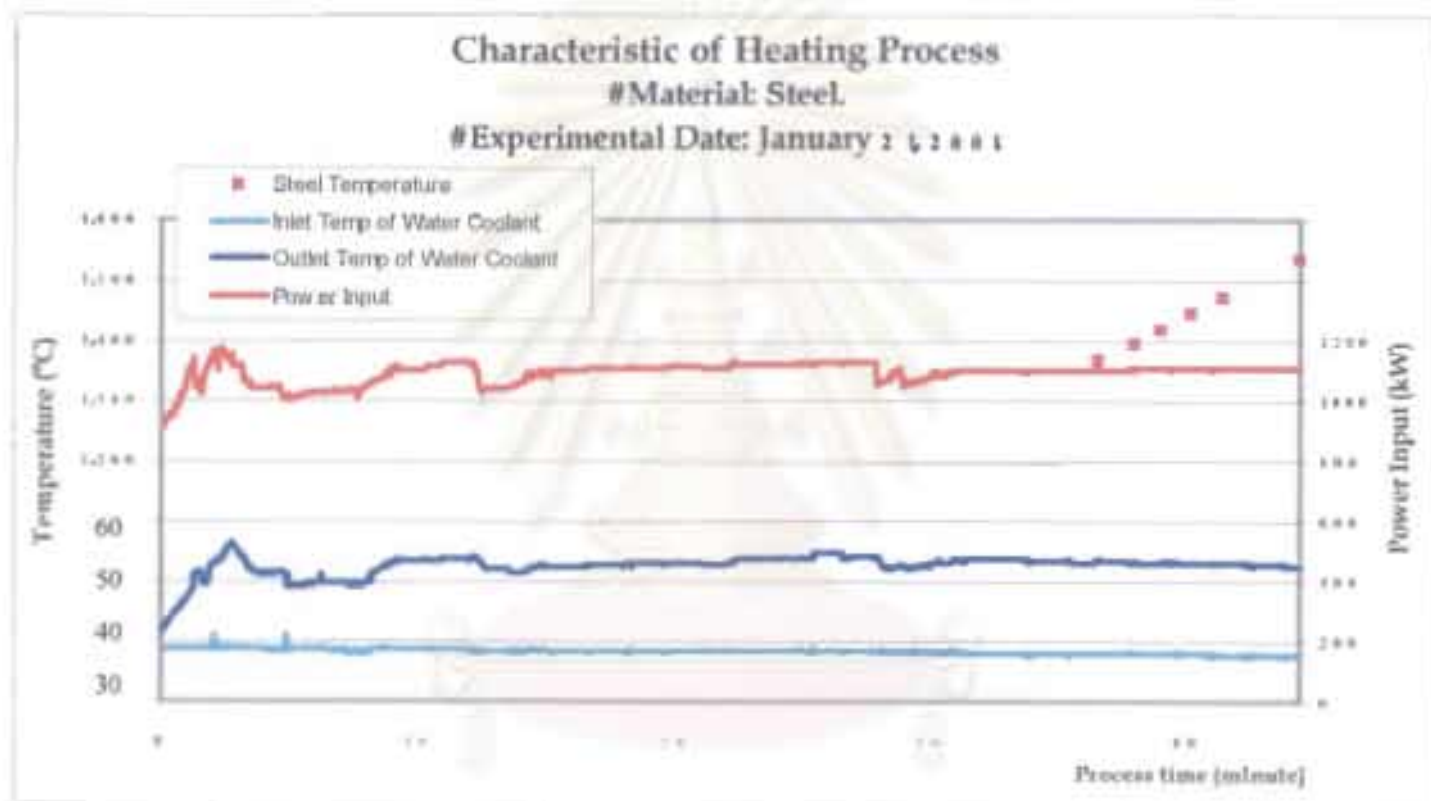
รูปที่ 3.12 ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 7

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



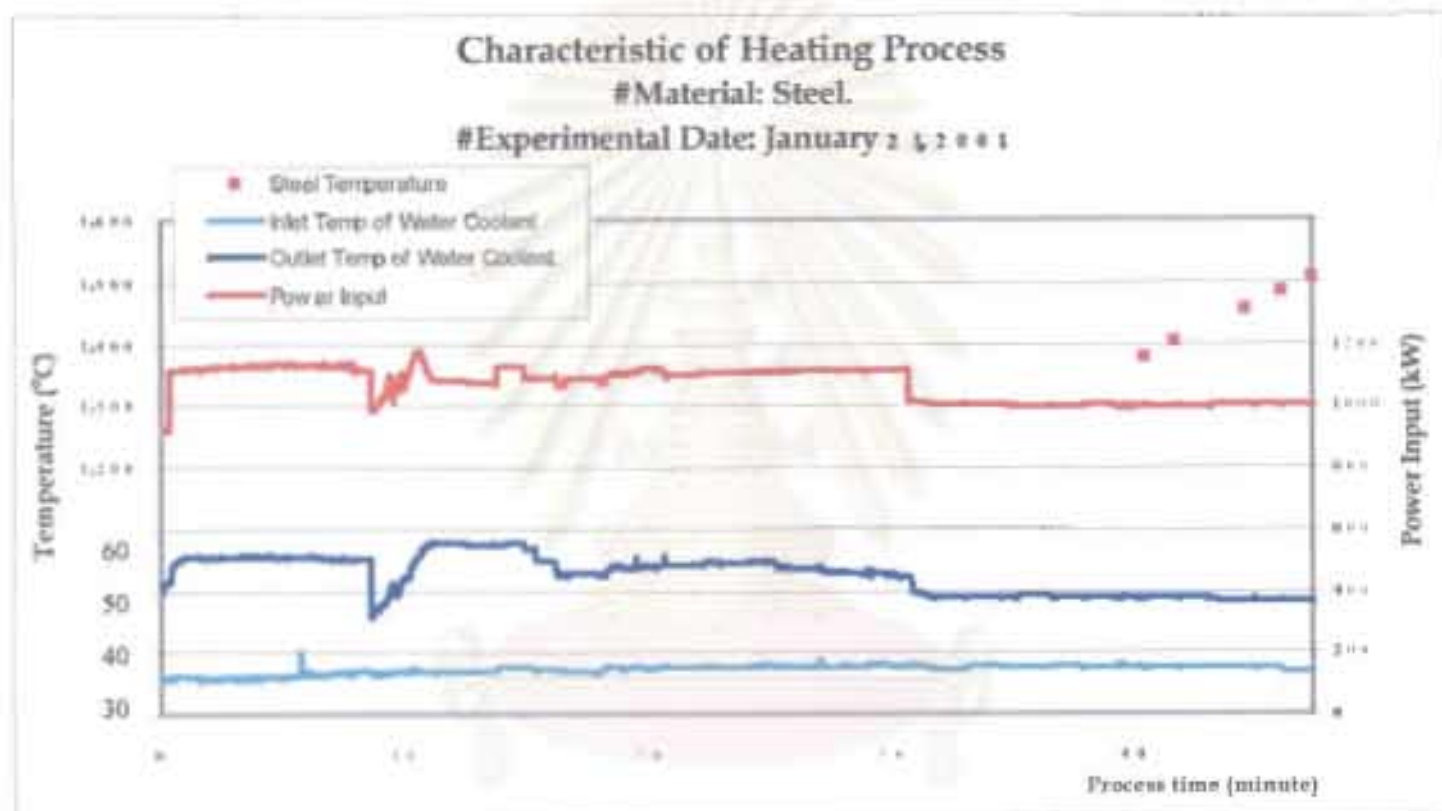
รูปที่ 4.13 ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.14 จุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองของชุดข้อมูลที่ 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 ชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองชุดข้อมูลที่ 10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก จ.

### ความคิดเห็นทางโรงงาน

คุณสุวัฒน์ โรจนอังกูร (หัวหน้าส่วนเตาหลอม) ให้ความเห็นว่าระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ใช้งานได้ง่าย สามารถควบคุมอุณหภูมิน้ำโลหะภายในเตาได้โดยทำการวัดเพียงครั้งเดียว มีความแม่นยำในช่วงเวลาการหลอมสั้นๆ แต่จะเริ่มผิดพลาดเมื่อทิ้งเตาหลอมไว้นานๆ และถ้าระบบมีการแสดงค่าแรงดันของน้ำหล่อเย็นจะสามารถทำให้การทำงานสะดวกมากยิ่งขึ้น

คุณประภาส แจ่มใจ (หัวหน้าส่วนซ่อมบำรุง) ให้ความเห็นว่าระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ช่วยให้สามารถกำหนดระยะเวลาในการหลอมได้โดยดูจากหน้าจอกอมพิวเตอร์ และช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ดีเพราะสามารถที่จะมองเห็นจากจอกอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ยังทำให้ประหยัดหัวเชื้ออุณหภูมิเพราะไม่ต้องเช็คบ่อยๆ แต่ที่น่าจะมีระบบการเช็คอุณหภูมินำเหล็กโดยไม่ต้องใส่ค่าอุณหภูมิเข้าคอมพิวเตอร์บ่อยๆ

คุณสุคนธ์ เมฆฉาย (หัวหน้าส่วนฝ่ายเพิ่มผลผลิต) ให้ความเห็นว่าระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการหลอมได้ตามที่ต้องการทำให้ไม่สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ และควรที่จะมีการทำเพิ่มอีก 2 เตาที่เหลือ เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายของบริษัท

คุณประทวน คล้ายศรี (ผู้จัดการฝ่ายเพิ่มผลผลิต) ให้ความเห็นว่าระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ทำให้ผู้ปฏิบัติงานรู้แนวทางและควบคุมอุณหภูมิที่ต้องการได้ที่สำคัญคือช่วยประหยัดต้นทุนได้ซึ่งเป็นไปตามต้องการขององค์กรขณะนี้ และควรสานต่อแนวทางที่คณะอาจารย์และนักศึกษาทำวิจัยไว้ให้ครบถ้วนขบวนการ เพื่อประสิทธิภาพสูงสุด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ.

บทความทางวิชาการ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การประมาณอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า Temperature Estimation of melting steel in Induction Furnace

รัชทิน จันทรเจริญ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล ประพันธ์ พิกุลทอง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10300

โทร 218-6642, โทรสาร 218-6642, E-mail : pikuldong78@hotmail.com

Ratchatin Chancharoen, Mingsak Tangtakul, Praphun Pikultong  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,  
Pyathai Road, Patumwan, Bangkok, 10300, Thailand  
Tel : 218-6642, Fax : 218-6642

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เกี่ยวข้องกับการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าทางอ้อม การวัดอุณหภูมิทางตรงด้วยเทอร์โมคัปเปิลมีข้อจำกัดที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องเพราะน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงถึง 1500 องศาเซลเซียส ประกอบกับมีสิ่งเจือปนในน้ำเหล็ก หัววัดจะมีอายุการใช้งานสั้นหากแช่อยู่ในน้ำเหล็กอุณหภูมิสูงนานเกินไป การที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องทำให้การควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กในขณะที่ทำการหลอมไม่มีประสิทธิภาพมากเท่าที่ควร ทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ไม่ได้กำลังการผลิตตามที่ควร และอาจมีผลกับคุณภาพของน้ำเหล็ก

บทความนี้ได้นำเสนอการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กทางอ้อม โดยการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านนอก เพื่อประมาณอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอม เทคนิคการประมาณอาศัยการพิจารณาสมการสมดุลความร้อนของเตาและใช้การวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเตาในระหว่างขบวนการ เพื่อประมาณหาการสูญเสียความร้อนของเตาเพื่อประกอบการคำนวณสมการสมดุลความร้อน เป็นผลทำให้สามารถประมาณอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมได้อย่างแม่นยำ บทความนี้ได้แสดงเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิจริงกับค่าที่ประมาณด้วยวิธีการที่นำเสนอซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของวิธีการ

### 1. บทนำ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงสมรรถนะในการหลอมโลหะของเตาหลอมโลหะด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ระบบควบคุมที่ออกแบบขึ้นมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานและเพิ่มคุณภาพของน้ำเหล็ก โดยควบคุมให้ขบวนการหลอมมีความสม่ำเสมอขึ้น ปัญหาสำคัญของขบวนการหลอมก็คือไม่สามารถวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างขบวนการอย่างต่อเนื่องได้ ปัจจุบัน บริษัทฯ ใช้การวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กทางตรงด้วยเทอร์โมคัปเปิลซึ่งไม่สามารถวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่องได้

เนื่องจากน้ำเหล็กจะได้รับการหลอมจนมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ประกอบกับน้ำเหล็กมีสิ่งเจือปน เช่นสนิม เป็นต้น การวัดอุณหภูมิด้วยวิธีอย่างต่อเนื่องจะทำให้หัววัดเทอร์โมคัปเปิลเสียหายอีกทางเลือกหนึ่งในการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กก็คือการวัดการแผ่รังสี การวัดแบบนี้ทำให้หัววัดไม่ต้องสัมผัสกับโลหะหลอมละลายอุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม วิธีการวัดการแผ่รังสีจะมีความคลาดเคลื่อนในกรณีที่มีควัน หรือสิ่งสกปรก บังวิสัยทัศน์ของหัววัด และเตาอาจต้องมีช่องเปิดเพื่อให้รังสีผ่านออกมาที่หัววัดได้ตลอดเวลา ช่องเปิดนี้อาจทำให้ความร้อนสูญเสียของเตามากขึ้น

เพื่อพัฒนาขบวนการหลอมโลหะให้มีสมรรถนะสูงขึ้น ทั้งในเรื่องของการประหยัดพลังงาน กำลังการผลิต และคุณภาพของโลหะหลอมละลาย จำเป็นที่จะต้องทราบอุณหภูมิของน้ำโลหะอย่างต่อเนื่อง และจากข้อจำกัดในการวัดอุณหภูมิทางตรงด้วยวิธีการต่างๆ ในตอนต้นคณะวิจัยนี้จึงได้ออกแบบวิธีการวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะขึ้น วิธีการวัดที่นำเสนอนี้อาศัยการประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะจากการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผิวด้านนอก และทำการทดลองเพื่อประมาณความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างขบวนการ จากนั้น จึงนำค่าต่างๆ เหล่านี้มาประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะโดยใช้สมการสมดุลความร้อน

บทความที่นำเสนอนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 ส่วน ส่วนแรกหรือส่วนนี้เป็นบทนำ บทที่สองกล่าวถึงบริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทในโครงการวิจัย บทที่สามกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมา บทที่สี่กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง บทที่ห้ากล่าวถึงรายละเอียดการทดลอง บทที่หกแสดงถึงผลลัพธ์และการอภิปราย บทที่เจ็ดกล่าวถึงผลสรุปของวิธีการที่นำเสนอ

### 2. บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด

บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด หรือ SBM ก่อตั้งเมื่อปี พ.ศ. 2518 ด้วยเงินลงทุน 34 ล้านบาท ดำเนินงานหล่อเหล็กเหนียว งานหล่อเหล็กกล้าสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์และชิ้นส่วนต่างๆ โดยได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากบริษัท อาซฮิเทค

คอปอเรชัน ประเทศ ญี่ปุ่น ต่อมาในปี 2538 บริษัทได้อายางงานระบบ การควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ CNC ด้วยเงินทุนอีก 40 ล้านบาท สำหรับการกีดขึ้นรูปชิ้นส่วน ผลิตภัณฑ์หลักของบริษัท คือ ดรัมเบรค ดิสก์เบรค ฟลายวีว เอ็กซอท ฮับ เกียร์บ็อกซ์ และทามมิ่งคัพเวอร์

ในส่วนของการหล่อเหล็กเหนียว ปัจจุบันบริษัทมีเตาหลอม โลหะแบบใช้ไฟฟ้า (Induction furnace) ทั้งหมด 3 เตา ประกอบด้วยเตาขนาด 2 ตัน จำนวน 2 เตา และเตาขนาด 5 ตัน จำนวน 1 เตา ใช้กำลังไฟฟารวม 3,600 กิโลวัตต์ และมีกำลังการผลิต 11,400 ตันต่อปี จากการสำรวจการใช้พลังงานเบื้องต้นของบริษัท พบว่า เตาหลอมไฟฟ้าใช้กำลังงานคิดเป็นสัดส่วนถึง เกือบ 60 เปอร์เซ็นต์ของการใช้ไฟฟารวมทั้งหมด หรือใช้ไฟฟ้าถึง 10,935,000 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี หรือคิดเป็นเงินกว่า 20 ล้านบาท ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงมาก

การควบคุมเตาหลอมของโรงงานในปัจจุบันอาศัยความชำนาญของผู้ควบคุมเตา โดยการวัดอุณหภูมิของเหล็กในเตาจะใช้เทอร์โมคัปเปิลจุ่มลงไปในน้ำเหล็กอุณหภูมิสูง การวัดด้วยวิธีนี้ไม่สามารถให้หัววัดจุ่มอยู่ในน้ำเหล็กอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานได้เนื่องจากจะทำให้อายุการใช้งานสั้น ทำให้ผู้ควบคุมเตาใช้การวัดเพียงบางตำแหน่งของขบวนการ และใช้ประสบการณ์ในการประมาณอุณหภูมิของน้ำเหล็กจากการสังเกตการวัด 10 ครั้งพบว่าอุณหภูมิเหล็กเกินค่าที่ต้องการถึง 8 ครั้ง เป็นผลทำให้สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์และกำลังการผลิตไม่ได้ตามที่ต้องการ และเมื่ออุณหภูมิเหล็กเกินค่าที่ต้องการ ก็จะต้องลดอุณหภูมิเหล็กในเตาลงโดยทิ้งให้น้ำเหล็กระบายความร้อนโดยธรรมชาติสู่สิ่งแวดล้อม เป็นผลให้เพิ่มมลพิษโดยไม่จำเป็น การวัดอุณหภูมิได้อย่างแม่นยำและต่อเนื่องจะสามารถแก้ปัญหานี้ได้

คณะวิจัยได้นำเสนอการพัฒนาระบบการใช้ไฟฟ้าในเตาหลอมโลหะด้วยวิธีการควบคุมความร้อน ซึ่งจะเป็นการศึกษาออกแบบ และดำเนินการควบคุมการใช้ไฟฟ้าของเตาหลอมโลหะ เพื่อให้ใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการพัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมขึ้นในประเทศ โครงการนั้นนอกจากจะทำให้บริษัทลดภาวะค่าประกอบการจากการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพขึ้น ยังจะเป็นการส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมเพื่อให้สามารถแข่งขันกับต่างประเทศได้ โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการความร่วมมือระหว่าง บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ (TPI) และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อทำการวิจัยและพัฒนาเตาหลอมโลหะด้วยวิธีเหนียวนำไฟฟ้าของบริษัทฯ

### 3. งานวิจัยที่ผ่านมา

Sun Yanguang และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบการควบคุมของ Ladle Furnace วิธีการที่นำเสนอใช้สมการสมดุลความร้อนเพื่อคำนวณอุณหภูมิเหล็ก พลังงานป้อนเข้าที่เหมาะสม และการควบคุมที่เหมาะสม Sun Yanguang และคณะแนะนำว่าอุณหภูมิเหล็กในเตาหลอมมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานป้อนเข้า และได้สรุปว่าการทำนายอุณหภูมิเหล็กในเตาหลอมโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเหล็กกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งใช้การวิเคราะห์แบบ Regression นั้นไม่สามารถทำนายอุณหภูมิเหล็กได้

อย่างแม่นยำนัก เนื่องจากความซับซ้อนระหว่างอุณหภูมิเหล็ก ค่าพลังงานป้อนเข้า เหล็กที่หลอมละลาย และเวลา และได้พัฒนาระบบ Intelligent Ladle Furnace (ILF) เพื่อประมาณหาอุณหภูมิเหล็กและค่าพลังงานป้อนเข้า ซึ่งจะแม่นยำกว่าวิธีแรก ระบบควบคุมที่นำเสนอช่วยลดพลังงานไฟฟ้าต่อตันเหล็กลงถึง 14%

Tadeusz M. Drzewiecki, R. Michael Phillippi and Charles E. Paras [2] ได้ทำการศึกษาวิธีการวัดและแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องในกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง เช่นในโรงงานและอุตสาหกรรมเหล็ก พบว่าถ้ามีการวัดและแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้จะช่วยประหยัดพลังงานลงได้ประมาณ 10% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด

บริษัท INDUCTOTHERM [3] ผู้ผลิตและพัฒนาเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำไฟฟ้า (Induction Furnace) ได้ประดิษฐ์คิดค้น Computer monitoring and control for charging, melting and holding operations โดยอาศัยความสัมพันธ์ของพลังงานป้อนเข้า กับ อุณหภูมิเหล็กในเตาหลอม ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทำนายอุณหภูมิเหล็กในเตาได้แม่นยำขึ้น ทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้งานได้

Roy Elliott [4] ได้กล่าวถึงประสิทธิภาพโดยทั่วไปของเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำไฟฟ้าไว้ว่า เตาหลอมฯ โดยทั่วไปจะใช้พลังงานไฟฟ้า 430 kWh ในการหลอมเหล็ก 1 ตัน จากอุณหภูมิห้องถึงสภาวะหลอมเหลวอุณหภูมิ 1538 °C คิดเป็น 75% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนพลังงานที่เหลือจะสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น และการแผ่รังสีความร้อน

บริษัท RADYNE [5] เป็นบริษัทซึ่งดำเนินงานเกี่ยวกับการออกแบบและผลิตเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำไฟฟ้ามาเป็นเวลากว่า 30 ปี ได้ทดลองและสร้างกราฟสมรรถนะ (Performance curve) ของเตาในการหลอมโลหะต่างๆ จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิที่ใช้งาน จากกราฟสมรรถนะ ที่ได้จากการทดลองพบว่า เหล็กน้ำหนัก 1000 กิโลกรัม ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการหลอมประมาณ 470 kWh ในการหลอมเหล็กจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 1450 °C

Yamada Katsuhito และคณะ [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมของอุณหภูมิเหนียวหลอมเหลวในเตาหลอมแบบเหนียวนำไฟฟ้าจากการศึกษาพบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิของอุณหภูมิเหนียวที่อุณหภูมิสูงๆ ได้อย่างแม่นยำ โดยที่ทำการวัดอุณหภูมิของอุณหภูมิเหนียวโดยเทอร์โมคัปเปิลเพียงครั้งเดียวแทนการวัดซ้ำๆ หลายๆ ครั้ง แล้วปรับกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ระบบนี้จะสามารถทำนายอุณหภูมิของอุณหภูมิเหนียวหลอมเหลวได้อย่างแม่นยำโดยใช้ โมเดลทางความร้อนและการปรับเปลี่ยนกำลังไฟที่ใช้ได้อย่างอัตโนมัติ

### 4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### สมดุลความร้อน

ในการพิจารณาสมดุลความร้อนของเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำไฟฟ้า จะพิจารณาเตาหลอมแบบ crucible ชนิดความถี่สูง โดยจะอาศัยสมการสมดุลความร้อน ดังนี้

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



Energy input ที่ใส่เข้าไปในเตาในที่นี้ก็คือค่าพลังงานป้อนเข้า (Power input) ในส่วนของพลังงานออก (Energy output) ก็คือความร้อนที่ให้กับเหล็กในเตาทำให้อุณหภูมิของเหล็กสูงขึ้น ความร้อนส่วนนี้แบ่งเป็น Sensible heat กับ Latent heat เมื่อพิจารณาถึงความร้อนสูญเสีย (Energy loss) ของเตาหลอม พบว่าจะประกอบด้วยลักษณะการสูญเสียความร้อน 2 แบบ คือ ความร้อนสูญเสียจากระบบไฟฟ้า (Electrical loss) และความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม (Heat loss) โดยที่ความร้อนสูญเสียจากระบบไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยความร้อนสูญเสียในหม้อแปลง (transformer loss) ความร้อนสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ (inverter loss) ความร้อนสูญเสียในสายไฟ (wiring loss) ความร้อนสูญเสียในขดลวดเหนี่ยวนำ (coil loss) และความร้อนสูญเสียอื่นๆ (other loss) ขณะที่ความร้อนสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะประกอบไปด้วยความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อนจากผนังเตาไปสู่ระบบหล่อเย็น (conduction loss) ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีบริเวณปากเตา (radiation loss) และความร้อนสูญเสียอื่นๆ (other loss) พฤติกรรมของพลังงานความร้อนในส่วนต่างๆ แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พฤติกรรมของพลังงานความร้อนต่างๆ

ความร้อน (kW)	สัญลักษณ์และสมการ
ความร้อนเข้า	$P_{in}$
ความร้อนที่ให้กับเหล็ก	$Q_s = \frac{M_s * L}{t} + \frac{M_s * C_{p,s} * \Delta T_s}{t}$ (2)
ความร้อนสูญเสียในหม้อแปลง	$Q_T = 4 * I_{inv}^2 * R_{cu}$ (3)
ความร้อนสูญเสียกับระบบหล่อเย็น	$Q_w = M_w * C_{p,w} * \Delta T_w$ (4)
ความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อน	$Q_c = \frac{T_s - T_w}{R} * 10^{-3}$ (5)
ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี	$Q_R = 5.67 * 10^{-8} * A * \epsilon * (\frac{T_s}{100})^4$ (6)
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	$Q_{in}$

โดยที่  $M_s$  = มวลของเหล็ก (kg)  
 $m_w$  = อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/s)  
 $C_{p,s}$  = ค่าความจุความร้อนของเหล็ก (kJ/kg°C)  
 $C_{p,w}$  = ค่าความจุความร้อนของน้ำ (kJ/kg °C)  
 $L$  = ค่าความร้อนแฝงของเหล็ก (kJ/kg)  
 $T_s$  = อุณหภูมิของเหล็ก (K)  
 $T_w$  = อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (K)  
 $t$  = เวลาที่ใช้หลอม (s)

$R$  = ค่าความต้านทานความร้อนของผนังเตา (kW/K)

$\epsilon$  = ค่า Emissivity

$A$  = พื้นที่ผิวของการแผ่รังสี (m<sup>2</sup>)

$R_{cu}$  = ความต้านทานของลวดตัวนำในหม้อแปลง (โอห์ม)

$I_{inv}$  = กระแสอินเวอร์เตอร์ (Amp)

ดังนั้นสมการสมดุลความร้อนจะเขียนได้ดังนี้

$$P_{in} = Q_s + Q_T + Q_w + Q_c + Q_R + Q_{in} \quad (7)$$

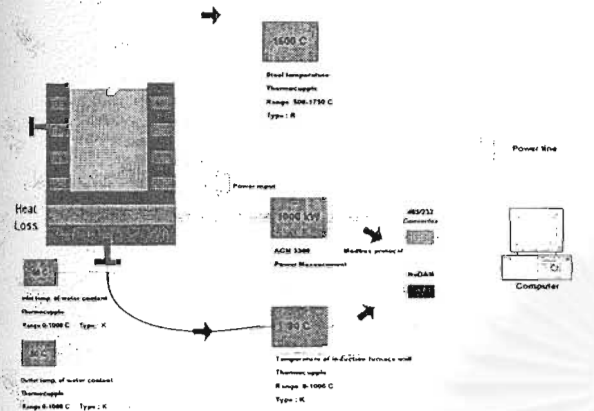
### 5. การทดลอง

งานวิจัยนี้นำเสนอการวัดอุณหภูมินำเหล็กในเตาหลอมโลหะ ด้วยวิธีเหนี่ยวนำความร้อนทางอ้อม การวัดอุณหภูมิทางอ้อมทำได้โดยการวัดการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิเข้าออกและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก และทดลองเพื่อหาแบบจำลองของการสูญเสียความร้อนของเตา การทดลองแบ่งออกเป็นสองตอน ตอนแรกเป็นการวัดการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิเข้าออกและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก และค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะ จากนั้น นำค่าต่างๆ เหล่านี้มาประมาณหาแบบจำลองการสูญเสียความร้อนของเตาผ่านทางสมการสมดุลความร้อน ตอนที่สองจะใช้แบบจำลองการสูญเสียความร้อนของเตา พลังงานที่ป้อนเข้า ค่าอุณหภูมิเข้าออกและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก เพื่อประมาณหาอุณหภูมิของน้ำโลหะผ่านทางสมการสมดุลความร้อน

วิธีการที่นำเสนอนี้พยายามที่จะใช้อุปกรณ์เดิมที่บริษัทฯ ได้ติดตั้งไว้เพื่อควบคุมเตา และติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเท่าที่จำเป็นเท่านั้น โดยค่าพลังงานป้อนเข้าจะวัดผ่านเครื่อง ACM 3300 Power Measurement ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่เดิม และใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus กับเครื่องวัดฯ ผ่านตัวแปลง RS485/232 การวัดอุณหภูมิด้านนอกจะวัดอุณหภูมิที่ด้านล่างของเตาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type K ติดเข้าไปในผิวใต้เตาชั้นอิฐทนไฟ และนำค่าสัญญาณอุณหภูมิเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางอุปกรณ์ NuDAM ซึ่งมีโปรโตคอล แบบ RS485 ในส่วนของอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นนั้น จะวัดด้วยเครื่อง Ultrasonic Flowmeter ซึ่งอัตราการไหลนี้จะมีค่าคงที่ตลอดขบวนการ และจะวัดอุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็นด้วยเทอร์โมคัปเปิล และนำค่าสัญญาณอุณหภูมิเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางอุปกรณ์ NuDAM อุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาจะวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล Type R ของบริษัทซึ่งไม่สามารถวัดได้อย่างต่อเนื่อง และวัดโดยผ่านอุปกรณ์ของโรงงานที่ติดตั้งอยู่เดิม

จากนั้น จะนำค่าต่างๆ ที่วัดได้นี้มาประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นบน LabVIEW โปรแกรมที่เขียนขึ้นจะทำการสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus กับเครื่อง ACM 3300 และสื่อสารด้วยโปรโตคอล RS485 กับอุปกรณ์ NuDAM และ

ประมวลข้อมูลต่างๆ เพื่อประมาณหาอุณหภูมิของน้ำโลหะโดยใช้สมการสมดุลความร้อน



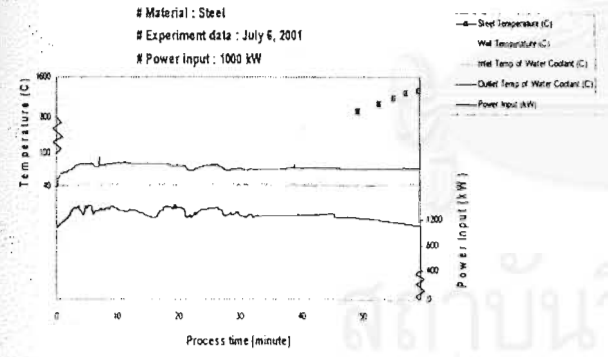
รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดลอง

6. ผลการทดลองและการอภิปราย

รูปที่ 2 แสดงค่าพลังงานความร้อนป้อนเข้า อุณหภูมิที่ผนัง ด้านนอก อุณหภูมิเข้าและออกของระบบน้ำหล่อเย็น และอุณหภูมิของน้ำโลหะ โดยในการทดลองนี้ได้ทำการปรับพลังงานป้อนเข้าคงที่ มา 6 การทดลอง ได้แก่ ที่ 1100, 1000, 900, 800, 700, 500 kW โดยในรูปแสดงผลการทดลองปรับพลังงานป้อนเข้าคงที่ 1000 kW หลัง จากที่น้ำเหล็กเริ่มหลอมเหลว

Temperature rise in induction furnace during the heating process

# Material : Steel  
# Experiment data : July 6, 2001  
# Power Input : 1000 kW



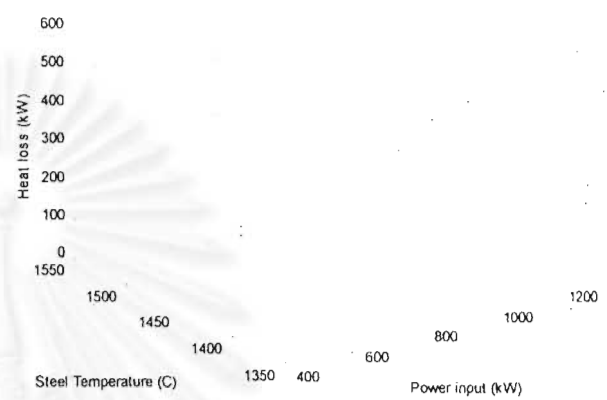
รูปที่ 2 อุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ระหว่างขบวนการหลอม โดยปรับพลังงานป้อนเข้าคงที่ 1000 kW

เมื่อนำค่าที่วัดได้นี้แทนลงในสมการสมดุลความร้อน จะสามารถประมาณหาอุณหภูมิของเตาหลอมได้ จากการวิเคราะห์เบื้องต้นพบว่าความร้อนสูญเสียมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานป้อนเข้าอย่างชัดเจน และยังมีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็ก

เพื่อให้แบบจำลองของความร้อนสูญเสียมีความแม่นยำขึ้น จึงได้ทดลองให้ความร้อนกับน้ำเหล็กที่อุณหภูมิต่างๆ โดยปรับค่าพลังงานป้อนเข้าตั้งแต่ 500 จนถึง 1000 kW ในขณะที่น้ำเหล็กมีอุณหภูมิระหว่าง 1400 ถึง 1500 °C จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ป้อนเข้าสมการสมดุลความร้อนเพื่อประมาณหาความสัมพันธ์ของความร้อน

สูญเสียที่สัมพันธ์กับพลังงานป้อนเข้า ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 3 จาก รูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความร้อนสูญเสียมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานป้อนเข้า ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียกับอุณหภูมิของน้ำเหล็กยังไม่ชัดเจนนัก

Heat loss as a function of power input and steel temperature



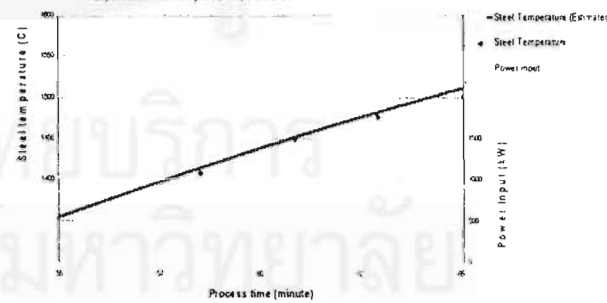
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนสูญเสียกับค่าพลังงานป้อนเข้า และอุณหภูมิของน้ำเหล็ก

เราสามารถประมาณหาแบบจำลองของความร้อนสูญเสียได้โดยใช้วิธี Regression ซึ่งได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\text{Heat Loss} = 0.3783 \cdot (P_{in}) + 0.0407 \cdot (T_s) + 10.9058 \quad (8)$$

Steel temperature Estimation by Heat balance Calculation with linear model of heat loss

# Material : Steel  
# Experiment data : May 17, 2001, Power : 1000 kW



รูปที่ 4 ผลการทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็กสำหรับการทดลองที่ พลังงานป้อนเข้าคงที่ 1000 kW

เมื่อนำแบบจำลองความร้อนสูญเสียป้อนกลับเข้ามาในสมการสมดุลความร้อนเพื่อทำนายอุณหภูมิของน้ำโลหะ จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4 วิธีการที่นำเสนอทำให้สามารถประมาณหาอุณหภูมิของน้ำเหล็กได้อย่างต่อเนื่องโดยมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง บวกลบสิบห้าองศาเซลเซียส

## 7. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะทางอ้อม โดยประมาณค่าอุณหภูมิจากค่าพลังงานป้อนเข้า ค่าอุณหภูมิเข้าออก และอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก และแบบจำลองความร้อนสูญเสียของเตา ค่าที่วัดต่างๆ นี้ วัดได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับน้ำโลหะอุณหภูมิสูง ทำให้ระบบการวัดมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และทำให้สามารถทราบอุณหภูมิของน้ำโลหะได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นรากฐานที่สำคัญในการพัฒนากระบวนการหลอมโลหะเพื่อให้ประสิทธิภาพในการหลอมสูงขึ้น และมีกำลังการผลิตเต็มศักยภาพของเตาหลอม ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิตและลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากกระบวนการลงได้ วิธีการที่นำเสนอสามารถประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะในเตาหลอมได้อย่างต่อเนื่องและมีความผิดพลาด  $\pm 15$  องศาเซลเซียส

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการและอำนวยความสะดวกในการทดลอง ขอขอบคุณ สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ ผู้ประสานงานโครงการทำให้โครงการดำเนินไปได้อย่างราบรื่น และขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ผู้ให้ทุนสนับสนุนโครงการและกำกับดูแลให้โครงการสำเร็จผล

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Sun Yanguang, Wang Daixian, Tao Baisheng, Yan Tao, Shi Yang, Fang Shubiao and Wang Yuanhou, "An Intelligent Ladle Furnace Control System", Automation Research Institute of Ministry of Metallurgical Industry, Beijing, 100071, P.R.China.
- [2] Tadeusz M. Drzewiecki, R. Michael Phillippi and Charles E. Paras, "Fluidics-A New Potential for Energy Conservation by Continuous High Temperature Monitoring and Control", Fluid Control Branch Harry Diamond Laboratories Adelphi, Maryland.
- [3] INDUCTOTHERM.
- [4] Roy Elliott, "Cast Iron Technology", 1998.
- [5] RADYNE DOUBLE AXIS TILT INDUCTION MELTING FURNACES, Molly Millars Lane Wokingham Berk Rg11 2PX.
- [6] Yamada Katsuhito, Oshima Masuji, Amano Norihiro, Hasegawa Tamotsu, Souda Kouichi, "Precise temperature control for molten ferrous alloy in induction furnace", SAE Special Publications, Proceeding of the 1997 International Congress and Exposition, Feb 24-7 1997, Detroit, MI, USA.

## การประมาณค่าและควบคุมอุณหภูมิเพื่อการประหยัดพลังงาน ของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

### Temperature Estimation and Control for Energy Saving of Induction Furnace

วิชทิน จันทร์เจริญ มิ่งศักดิ์ ดั่งตระกูล ประพันธ์ พิกุลทอง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10300

โทร 218-6642. โทรสาร 218-6642. E-mail : pikuldong78@hotmail.com

Ratchatin Chancharoen, Mingsak Tangtakul, Praphun Pikultong

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,  
Pyathai Road, Patumwan, Bangkok, 10300, Thailand

Tel : 218-6642, Fax : 218-6642

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยในบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยใช้เทคโนโลยีในการควบคุมในการหาค่าตัวแปรที่มีผลกับอุณหภูมิในเตาโดยตรง และทำการวัดอุณหภูมิโดยทางอ้อมเพื่อทำนายอุณหภูมิในเตาหลอม ทำให้การควบคุมเตาหลอมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และประหยัดพลังงาน

การวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กทางอ้อมนี้ทำได้โดยการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอม เทคนิคการประมาณอาศัยการพิจารณาสมการสมดุลความร้อนของเตา งานวิจัยได้แสดงเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิจริงกับค่าที่ประมาณ โดยค่าที่ประมาณได้กับค่าที่วัดได้จริงมีความผิดพลาดสูงสุดอยู่ที่บริเวณ 8 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเท่ากับ 2.42 องศาเซลเซียส และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.44 องศาเซลเซียส

เมื่อนำระบบประมาณค่าอุณหภูมิที่ออกแบบนี้ไปใช้งานจริงที่บริษัทสมุทรหล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด พบว่าสามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าในส่วนของควบคุมเตาหลอมลงได้ 276,459.53 kWh/ปี คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เท่ากับ 7.08% ของพลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้หลอม คิดเป็นเงิน 552,919.07 บาท/ปี

#### 1. บทนำ

งานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุม เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อปรับปรุงสมรรถนะในการหลอมโลหะของเตาหลอมโลหะด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่บริษัท สมุทรหล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ระบบควบคุมที่ออกแบบขึ้นนี้มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประหยัดพลังงานและเพิ่มคุณภาพของน้ำเหล็กโดยควบคุมให้ขบวนการหลอมมีความสม่ำเสมอขึ้น ปัญหาสำคัญของการหลอมก็คือไม่สามารถวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กระหว่างขบวนการอย่างต่อเนื่องได้ ปัจจุบัน บริษัทฯ ใช้การวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กทางตรงด้วยเทอร์โมคัปเปิลซึ่งไม่สามารถวัดอุณหภูมิหน้าเหล็กอย่างต่อเนื่องได้เนื่อง

จากน้ำเหล็กจะได้รับการหลอมจนมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 1500 องศาเซลเซียส ประกอบกับน้ำเหล็กมีสิ่งเจือปน เช่นสนิม เป็นต้น การวัดอุณหภูมิด้วยวิธีนี้อย่างต่อเนื่องจะทำให้เทอร์โมคัปเปิลเสียหาย เพื่อพัฒนาขบวนการหลอมโลหะให้มีสมรรถนะสูงขึ้น ทั้งในเรื่องของการประหยัดพลังงาน กำลังการผลิต และคุณภาพของโลหะหลอมละลาย จำเป็นที่จะต้องทราบอุณหภูมิของน้ำโลหะอย่างต่อเนื่อง และจากข้อจำกัดในการวัดอุณหภูมิทางตรงด้วยวิธีการต่างๆ ในตอนต้นคณะวิจัยนี้จึงได้ออกแบบวิธีการวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะทางอ้อมขึ้น วิธีการวัดที่นำเสนอนี้อาศัยการประมาณอุณหภูมิหน้าโลหะจากการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก และทำการทดลองเพื่อประมาณความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นระหว่างขบวนการ จากนั้น จึงนำค่าต่างๆเหล่านี้มาประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะโดยใช้สมการสมดุลความร้อน (1)

บทความที่นำเสนอแบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 ส่วน ส่วนแรกหรือส่วนนี้เป็นบทนำ ส่วนที่สองกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมา ส่วนที่สามกล่าวถึงการประมาณค่าอุณหภูมิ ส่วนที่สี่กล่าวถึงการหาแบบจำลองทางความร้อนของเตา ส่วนที่ห้ากล่าวถึงการประหยัดพลังงานเมื่อนำระบบประมาณค่าอุณหภูมิไปใช้งานจริงและสุดท้ายส่วนที่หกกล่าวถึงผลสรุปของงานวิจัยนี้

#### 2. งานวิจัยที่ผ่านมา

Sun Yanguang และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบการควบคุมของ Ladle Furnace วิธีการที่นำเสนอใช้สมการสมดุลความร้อนเพื่อคำนวณอุณหภูมิเหล็ก พลังงานป้อนเข้าที่เหมาะสม และการควบคุมที่เหมาะสม Sun Yanguang และคณะแนะนำว่าอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตาหลอมมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานป้อนเข้า และได้สรุปว่าการทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตาหลอมโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหน้าเหล็กกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งใช้การวิเคราะห์แบบ Regression นั้นไม่สามารถทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็กได้อย่างแม่นยำ

นัก เนื่องจากความซับซ้อนระหว่างอุณหภูมินำเหล็ก ค่าพลังงานป้อนเข้า เหล็กที่หลอมละลาย และเวลา และได้พัฒนาระบบ Intelligent Ladle Furnace (ILF) เพื่อประมาณหาอุณหภูมินำเหล็กและค่าพลังงานป้อนเข้า ซึ่งจะแม่นยำกว่าวิธีแรก ระบบควบคุมที่นำเสนอช่วยลดพลังงานไฟฟ้าต่อตันเหล็กได้ถึง 14%

Tadeusz M. Drzewiecki, R. Michael Phillippi and Charles E. Paras [3] ได้ทำการศึกษาวิธีการวัดและแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องในกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง เช่นในโรงงานและอุตสาหกรรมเหล็ก พบว่าถ้ามีการวัดและแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้จะช่วยประหยัดพลังงานลงได้ประมาณ 10% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด

บริษัท INDUCTOTHERM [4] ผู้ผลิตและพัฒนาเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induction Furnace) ได้ประดิษฐ์คิดค้น Computer monitoring and control for charging, melting and holding operations โดยอาศัยความสัมพันธ์ของพลังงานป้อนเข้า กับ อุณหภูมินำเหล็กในเตาหลอม ซึ่งผลที่ได้ทำให้ทำนายอุณหภูมินำเหล็กในเตาได้แม่นยำขึ้น ทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ลงได้

Roy Elliott [5] ได้กล่าวถึงประสิทธิภาพโดยทั่วไปของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าไว้ว่า เตาหลอมฯ โดยทั่วไปจะใช้พลังงานไฟฟ้า 430 kWh ในการหลอมเหล็ก 1 ตัน จากอุณหภูมิห้องถึงสภาวะหลอมเหลวอุณหภูมิ 1538 °C คิดเป็น 75% ของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ส่วนพลังงานที่เหลือจะสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น และการแผ่รังสีความร้อน

บริษัท RADYNE [6] เป็นบริษัทซึ่งดำเนินงานเกี่ยวกับการออกแบบและผลิตเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาเป็นเวลากว่า 30 ปี ได้ทดลองและสร้างกราฟสมรรถนะ (Performance curve) ของเตาในการหลอมโลหะต่างๆ จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิที่ใช้งาน จากกราฟสมรรถนะ ที่ได้จากการทดลองพบว่า เหล็กน้ำหนัก 1000 กิโลกรัม ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในการหลอมประมาณ 470 kWh ในการหลอมเหล็กจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 1450 °C

Yamada Katsuhito และคณะ [7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมของอุณหภูมิเนียมหลอมเหลวในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า จากการศึกษาพบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิของอุณหภูมิสูงๆ ได้อย่างแม่นยำ โดยที่ทำการวัดอุณหภูมิของอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิ้ลเพียงครั้งเดียวแทนการวัดซ้ำๆ หลายๆ ครั้ง แล้วปรับกำลังไฟฟ้าป้อนเข้า ระบบนี้จะสามารถทำนายอุณหภูมิของอุณหภูมิเนียมหลอมเหลวได้อย่างแม่นยำโดยใช้ โมเดลทางความร้อนและการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าที่ใช้ได้อย่างอัตโนมัติ

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีตพบว่าเทคโนโลยีการวัดอุณหภูมิโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงๆ ของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ยังไม่มีอุปกรณ์ชนิดใดที่สามารถวัดอุณหภูมิสูงๆ โดยตรงได้อย่างต่อเนื่อง การควบคุมอุณหภูมิของโลหะที่หลอมเหลวจะใช้วิธีการวัดทางอ้อม โดยการวัดตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกับอุณหภูมินำเหล็กในเตา และใช้สมการสมดุลความร้อนของเตาในการคำนวณหาอุณหภูมิของโลหะในเตา และผลของการวัดอุณหภูมิโลหะในเตาได้อย่างต่อเนื่องทำให้สามารถประหยัดพลังงานลงได้ประมาณ 10% งานวิจัยนี้จะเน้นการออกแบบระบบประมาณค่าอุณหภูมิและระบบควบคุมเตาหลอมสำหรับเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ติดตั้งใช้งานในบริษัทซึ่งมีอยู่เดิม

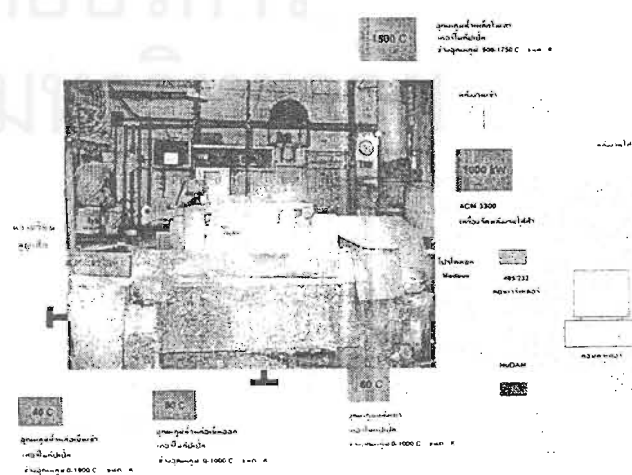
ผลลัพธ์จากการวิจัยจะทำให้สามารถใช้งานเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และจะเป็นการสนับสนุนการพัฒนาในระยะยาวต่อไป

### 3. การประมาณค่าอุณหภูมิในเตาหลอม

งานวิจัยนี้นำเสนอการวัดอุณหภูมินำเหล็กในเตาหลอมโลหะด้วยวิธีเหนี่ยวนำความร้อนทางอ้อม การวัดอุณหภูมิทางอ้อมทำได้โดยการวัดการวัดพลังงานที่ป้อนเข้าเตาหลอม ค่าอุณหภูมิเข้าออกและอัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิที่ผนังเตาด้านนอก และทดลองเพื่อหาแบบจำลองของการสูญเสียความร้อนของเตา

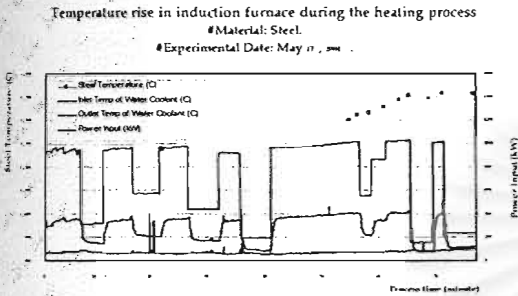
วิธีการที่นำเสนอนี้พยายามที่จะใช้อุปกรณ์เดิมที่บริษัท ได้ติดตั้งไว้เพื่อควบคุมเตา และติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเท่าที่จำเป็นเท่านั้น โดยค่าพลังงานป้อนเข้าจะวัดผ่านเครื่อง ACM 3300 Power Measurement [8] ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่เดิม และใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus [9] กับเครื่องวัดผ่านตัวแปลง RS485/232 [10] การวัดอุณหภูมิด้านนอกจะวัดอุณหภูมิที่ด้านล่างของเตาโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล Type K ติดเข้าไปในผิวใต้เตาชั้นอิฐทนไฟ และนำค่าสัญญาณอุณหภูมิเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางอุปกรณ์ NuDAM<sup>®</sup> [11] ซึ่งมีโปรโตคอลแบบ RS485 ในส่วนของอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นนั้น จะวัดด้วยเครื่อง Ultrasonic Flowmeter ซึ่งอัตราการไหลนั้นจะมีค่าคงที่ตลอดขบวนการ และจะวัดอุณหภูมิเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็นด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล และนำค่าสัญญาณอุณหภูมิเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางอุปกรณ์ NuDAM อุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาจะวัดโดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ล Type R ของบริษัทซึ่งไม่สามารถวัดได้อย่างต่อเนื่อง และวัดโดยผ่านอุปกรณ์ของโรงงานที่ติดตั้งอยู่เดิม

จากนั้น จะนำค่าต่างๆ ที่วัดได้นี้มาประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นบน LabVIEW<sup>™</sup> [12] โปรแกรมที่เขียนขึ้นจะทำการสื่อสารด้วยโปรโตคอล Modbus กับเครื่อง ACM 3300 และสื่อสารด้วยโปรโตคอล RS485 กับอุปกรณ์ NuDAM และประมวลผลข้อมูลต่างๆ เพื่อประมาณหาอุณหภูมิของนำโลหะโดยใช้สมการสมดุลความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดลอง

เมื่อได้ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ตามที่ได้กล่าวมา และเขียนโปรแกรมสื่อสารบน LabVIEW ก็จะทำให้สามารถเก็บค่าต่างๆ ประกอบด้วย กำลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ค่าอุณหภูมิที่ผนังเตา ค่าอุณหภูมิเข้าและออกของน้ำหล่อเย็น ค่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่สามารถวัดได้เป็นครั้งๆ อย่างไม่ต่อเนื่อง ค่าต่างๆ ที่บันทึกได้ระหว่างขบวนการหลอมเหล็กจะแสดงอยู่ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขบวนการหลอมเหล็ก

เมื่อทำการวัดค่าต่างๆ ที่ต้องใช้ในสมการสมดุลความร้อนโดยจะทำการวัดค่าต่างๆ 2 ช่วง คือช่วงให้ความร้อน กับช่วงความร้อนคงที่ และเมื่อคำนวณจากสมการสมดุลความร้อน พบว่าพลังงานที่ใส่เข้าไปในเตาจะไปทำให้เหล็กในเตาหลอมเหลว และพลังงานที่เหลือจะสูญเสียออกไปกับน้ำหล่อเย็นและสูญเสียไปกับการพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อนรอบๆเตาหลอมโดยค่าต่างๆที่คำนวณได้แสดงตามตารางที่ 1

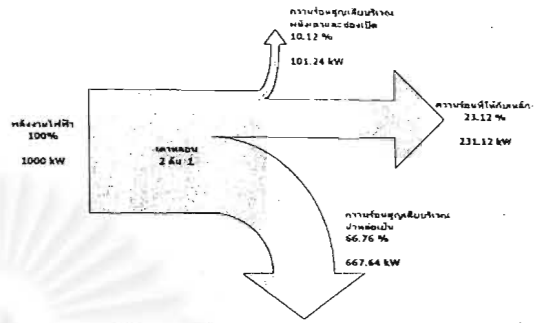
ตารางที่ 1 พลังงานที่คำนวณได้ทั้งสองช่วง

รายการ	ช่วงให้ความร้อน (kW)	ช่วงความร้อนคงที่ (kW)
พลังงานป้อนเข้า	1000	150
ความร้อนให้กับเหล็ก	231.12	0
ความร้อนสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น	667.64	106.82
ความร้อนสูญเสียไปกับการพาความร้อนและแผ่รังสี	101.04	43.18

จากการคำนวณพบว่าค่าความร้อนสูญเสียในช่วงให้ความร้อนเท่ากับ 101.04 kW ค่าความร้อนสูญเสียในช่วงความร้อนคงที่เท่ากับ 43.18 kW พบว่าค่าทั้งสองช่วงต่างกันค่อนข้างมาก ทั้งนี้ค่าพลังงานป้อนเข้าในระหว่าง ช่วงให้ความร้อน กับ ช่วงความร้อนคงที่ ก็มีค่าแตกต่างกันค่อนข้างมาก ค่าความร้อนสูญเสียในคอลย์จะมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานป้อนเข้านี้ และอาจเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้ค่าความร้อนสูญเสียจากทั้งสองช่วงมีค่าต่างกัน

ต่อมาเมื่อพิจารณาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการหลอมเหล็กของช่วงให้ความร้อน และนำมาเขียนแผนภาพ แชนจ์ที่ไดอะแกรมในช่วงให้ความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3 จะพบว่าความร้อนที่เข้าสู่เตาจะเข้าสู่เหล็กเพียงแค่ 23.12% หรือจะพูดได้ว่าประสิทธิภาพของเตาเท่ากับ 23.12%

โดยที่ความร้อนส่วนมากจะสูญเสียไปกับน้ำหล่อเย็น ซึ่งคิดเป็นปริมาณถึง 66.76% ส่วนความร้อนที่เหลือจะสูญเสียไปตามช่องเปิดและผนังเตาดังคิดเป็น 10.12%



รูปที่ 3 แชนจ์ที่ไดอะแกรมในช่วงให้ความร้อน

#### 4. แบบจำลองทางความร้อน

ในการหาแบบจำลองทางความร้อนของเตา จะใช้สมการสมดุลความร้อนของเตาในการพิจารณา โดยรูปแบบสมการสมดุลความร้อนจะเป็นดังนี้

$$\text{ความร้อนเข้า} = \text{ความร้อนออก} + \text{ความร้อนสูญเสีย} \quad (1)$$

ความร้อนเข้า ความร้อนที่ใส่เข้าไปในเตาในที่นี้ก็คือ พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ในส่วนของ ความร้อนออก ก็คือความร้อนที่ให้แก่เหล็กในเตา โดยจะแบ่งเป็น ความร้อนที่ทำให้เหล็กอุณหภูมิสูงขึ้น กับ ความร้อนแฝงของเหล็ก เมื่อพิจารณาถึง ความร้อนสูญเสียของเตา พบว่าจะประกอบด้วยลักษณะการสูญเสียความร้อน 2 ลักษณะ คือ ความร้อนสูญเสียทางด้านไฟฟ้าและความร้อนสูญเสียทางด้านความร้อน

เมื่อพิจารณา ความร้อนสูญเสียทางด้านไฟฟ้าจะประกอบไปด้วย ความร้อนสูญเสียในหม้อแปลง ความร้อนสูญเสียในอินเวอร์เตอร์ ความร้อนสูญเสียในสายไฟ ความร้อนสูญเสียในคอลย์ และความร้อนสูญเสียอื่น กลไกของการสูญเสียทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสไฟฟ้าและค่าความต้านทาน ความร้อนสูญเสียทางด้านความร้อน จะประกอบไปด้วย ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนจากผนังเตาไปสู่คอลย์ ความร้อนสูญเสียเนื่องจากการแผ่รังสีบริเวณปากเตา ความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อนของระบบน้ำหล่อเย็น ความร้อนสูญเสียอื่นๆ โดยที่กลไกการสูญเสียทางความร้อนจะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิ

ตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสมการและสามารถตรวจวัดได้ประกอบด้วย กำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาหลอม อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา อุณหภูมิน้ำหล่อเย็น เข้า-ออก อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และมวลของเหล็ก ในการหาแบบจำลองทางความร้อนของระบบเตาหลอมที่ออกแบบนี้จะพยายามนำค่าความร้อนต่างๆที่เกิดขึ้นของเตาหลอมมาอยู่ในรูปของตัวแปรที่สามารถตรวจวัดได้เพื่อทำให้อุณหภูมิที่ประมาณได้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิในเตาจริงที่สุด โดยพบว่า ความร้อนที่ให้กับเหล็กในขั้นตอนการวัดอุณหภูมิที่เหล็กนั้น เป็นขั้นตอนที่เหล็กในเตาหลอมกลายเป็นของเหลวหมดแล้ว เพราะฉะนั้นความร้อนในส่วนความร้อนแฝง จึงไม่มี จะมีเฉพาะในส่วนความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น



เดาหมอมกลายเป็นของเหลวหมดแล้ว เพราะฉะนั้นความร้อนในส่วนความร้อนแฝง จึงไม่มี จะมีเฉพาะในส่วนความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถตัดความร้อนส่วนนี้ทิ้งไปได้ และพบว่าในส่วนของการความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นนี้ จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา  $f(\Delta T_s)$  เมื่อพิจารณาความร้อนที่สูญเสียในหม้อแปลงพบว่าจะเป็นฟังก์ชันของค่าความดันทานและกระแส ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความร้อนที่สูญเสียในหม้อแปลงจะเป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า  $f(P_m)$  ในส่วนของการความร้อนสูญเสียกับระบบหล่อเย็น ค่าความร้อนในส่วนนี้คือความร้อนที่ใส่ถ่ายเทความร้อนให้กับระบบคอยล์ของเตา ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นและค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น  $f(\dot{M}_w, T_w)$  ในส่วนของการความร้อนสูญเสียจากการนำความร้อนนั้นก็คือความร้อนจากน้ำเหล็กในเตาผ่านผนังเตาออกมาซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา  $f(\Delta T_s)$  และในส่วนของการความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีพบว่าจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา ยกกำลังสี่ซึ่งจากการศึกษาจากสมการความร้อนของเดาชนิดเดียวกันนี้พบว่ามีย่านน้อย จึงให้รวมกับค่าความร้อนสูญเสียอื่นๆ และประมาณให้มีค่าคงที่ (Heatloss) ทำให้เมื่อแทนค่าตัวแปรที่วัดค่าได้กับตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันของสมการทางความร้อนจะได้รูปแบบสมการดังนี้

$$P_m = \frac{m_s \cdot C_{p,s} \cdot \Delta T_s}{\Delta t} + \dot{M}_w \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_w + f(P_m) + f(\Delta T_s) + \text{heatloss} \quad (2)$$

แทนค่าคงที่ a ลงในความร้อนสูญเสียในหม้อแปลงที่เป็นฟังก์ชันของพลังงานป้อนเข้าและแทนค่าคงที่ b ลงในความร้อนสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา

$$P_m = \frac{m_s \cdot C_{p,s} \cdot \Delta T_s}{\Delta t} + \dot{M}_w \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_w + a \cdot P_m + b \cdot \Delta T_s + \text{heatloss} \quad (3)$$

หลังจากนั้นทำการจัดรูปสมการโดยนำค่าคงที่มารวมกัน

$$P_m = \left( \frac{m_s \cdot C_{p,s}}{\Delta t} + b \right) \cdot \Delta T_s + \left( \frac{C_{p,w}}{1-a} \right) \cdot \dot{M}_w \cdot \Delta T_w + \left( \frac{\text{heatloss}}{1-a} \right) \quad (4)$$

แทนค่าคงที่ด้วย C1, C2 และ C3 จะได้สมการดังนี้

$$P_m = C1 \cdot \Delta T_s + C2 \cdot \dot{M}_w \cdot \Delta T_w + C3 \quad (5)$$

โดยที่

$$C1 = \frac{\left( \frac{m_s \cdot C_{p,s}}{\Delta t} + b \right)}{(1-a)}$$

$$C2 = \left( \frac{C_{p,w}}{1-a} \right)$$

$$C3 = \left( \frac{\text{heatloss}}{1-a} \right)$$

จัดรูปสมการเพื่อหาค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา

$$T_{s,i} = \frac{(P_m + C1 \cdot T_{s,i-1} - C2 \cdot \dot{M}_w \cdot \Delta T_w - C3)}{C1} \quad (6)$$

โดยที่  $T_{s,i}$  เป็นอุณหภูมิน้ำเหล็กในเวลาที่ประมาณ และ  $T_{s,i-1}$  เป็นอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ประมาณในครั้งที่ผ่านมา

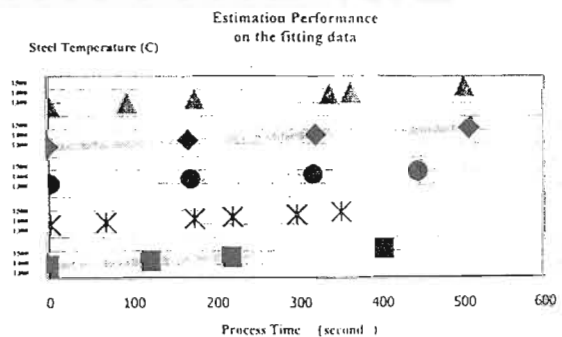
จากนั้นจึงทำการทดลองเพื่อประมาณค่า C1, C2, C3 นี้ ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยเก็บข้อมูลต่างๆ จากขบวนการทั้งหมด 5 รอบการทำงานและมีจำนวนจุดการทดลองทั้งหมด 12,738 จุด โดยในแต่ละรอบการทำงานนี้จะให้ค่าพลังงานป้อนเข้ามีค่าต่างๆ กัน พบว่าค่า C1, C2, C3 มีค่าดังนี้

$$C1 = 3810, C2 = 7.60, C3 = 417$$

ดังนั้นแบบจำลองทางความร้อนของเดาจะแสดงได้ดังนี้

$$T_{s,i} = \frac{P + 3810 \cdot T_{s,i-1} - 7.60 \cdot \dot{M}_w \cdot \Delta T_w - 417}{3810} \quad (7)$$

ในการหาแบบจำลองทางความร้อนของเดาที่ทางคณะวิจัยได้ทำการวัดอุณหภูมิในเดามาทั้งหมด 24 ครั้ง พบว่าหลังจากหาพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าได้แล้วและทำการคำนวณกลับมาทำนายหาอุณหภูมิน้ำเหล็กเพื่อทำการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่วัดได้จริง (ดังแสดงในรูปที่ 4) พบว่ามีค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่บวกลบ 6 องศาเซลเซียส คิดเป็นค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 2.3 องศาเซลเซียส ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 3.10 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4 การประมาณค่าอุณหภูมิบนชุดข้อมูลที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าที่ประมาณได้กับค่าที่ได้จากการวัดจริง

จุดทดลองที่	1	2	3	4	5
อุณหภูมิจากการประมาณ	1404	1419	1457	1473	1504
อุณหภูมิจากการวัด	1404	1418	1455	1477	1502
จุดทดลองที่	6	7	8	9	10
อุณหภูมิจากการประมาณ	1383	1405	1443	1487	1510
อุณหภูมิจากการวัด	1383	1405	1445	1483	1517
จุดทดลองที่	11	12	13	14	15
อุณหภูมิจากการประมาณ	1354	1413	1431	1484	1519
อุณหภูมิจากการวัด	1354	1410	1432	1488	1523
จุดทดลองที่	16	17	18	19	20
อุณหภูมิจากการประมาณ	1356	1434	1470	1487	1529
อุณหภูมิจากการวัด	1356	1433	1475	1483	1523
จุดทดลองที่	21	22	23	24	25
อุณหภูมิจากการประมาณ	1404	1445	1473	1509	1374
อุณหภูมิจากการวัด	1404	1445	1472	1506	1374
จุดทดลองที่	26	27	28	29	30
อุณหภูมิจากการประมาณ	1422	1457	1493	1528	1358
อุณหภูมิจากการวัด	1419	1453	1487	1521	1358
จุดทดลองที่	31	32	33	34	35
อุณหภูมิจากการประมาณ	1387	1435	1479	1495	1384
อุณหภูมิจากการวัด	1387	1435	1487	1502	1384
จุดทดลองที่	36	37	38	39	40
อุณหภูมิจากการประมาณ	1428	1444	1478	1500	1366
อุณหภูมิจากการวัด	1427	1443	1475	1503	1366
จุดทดลองที่	41	42	43	44	45
อุณหภูมิจากการประมาณ	1394	1416	1441	1466	1529
อุณหภูมิจากการวัด	1395	1418	1440	1473	1535
จุดทดลองที่	46	47	48	49	50
อุณหภูมิจากการประมาณ	1377	1401	1456	1484	1507
อุณหภูมิจากการวัด	1377	1401	1458	1481	1509

จากรูปแบบสมการที่ (7) เมื่อเราสามารถวัดค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า เป็นกิโลวัตต์ ค่าปริมาณน้ำหล่อเย็นและค่าอุณหภูมิเข้าและออกของน้ำหล่อเย็น เป็นกิโลกรัมต่อวินาที และองศาเซลเซียสตามลำดับ และทราบค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กจุดแรก ก็จะทำให้สามารถประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในจุดถัดๆ ไปได้ การสุ่มค่าวัดในการทดลองใช้เวลา 10 วินาที และใช้วิธีการ Sample & Hold แบบ Zero-Order-Hold จากนั้น จึงนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วัดได้นี้มาประมาณค่าผ่านทางแบบจำลองทางความร้อนของเตาหลอม

การทดสอบความแม่นยำในการประมาณค่าอุณหภูมิกระทำโดยทดสอบกับชุดการทดลองทั้งหมด 10 ชุดการทดลองหรือมีจุดที่เปรียบเทียบความแม่นยำในการวัดทั้งหมด 50 จุด (ดังแสดงในตารางที่ 2) ซึ่งผลที่ได้พบว่ามีค่าเฉลี่ยความผิดพลาด 2.42 องศาเซลเซียส ค่า

เบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.44 องศาเซลเซียส และค่าผิดพลาดสูงสุดบวกลบ 8 องศาเซลเซียส

5. การประหยัดพลังงาน

เมื่อติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้เข้าไปแล้วทำให้สามารถควบคุมอุณหภูมิในเตาหลอมไม่ให้เกินค่าที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาพัฒนาหาวิธีควบคุมเตาหลอมที่เหมาะสมเพื่อให้ประหยัดพลังงานที่สุด ซึ่งผลของการพัฒนานี้จะทำให้สามารถประหยัดพลังงานลงได้เป็นจำนวนมาก และช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการรักษาอุณหภูมิน้ำเหล็กที่อุณหภูมิสูงๆ หลังจากที่ได้ทดลองและทดสอบการใช้งานระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ ต่อมาจึงได้นำมาใช้งานกับการทำงานจริงๆ ของเตาหลอม 2 ตัน 1 ที่ บริษัทสมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด เป็นระยะเวลา 1 เดือน โดยเริ่มต้นใช้งานเมื่อเดือนมีนาคม 2545 ซึ่งผลการประหยัดนี้จะเป็นคิดออกมาอยู่ในหน่วยของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ต่อยอดการหลอมที่หลอม (kWh/ตัน) และค่าที่ได้นี้จะนำมาเปรียบเทียบกับการใช้งานเมื่อปี 2544 ทั้งปี (รายละเอียดแสดงอยู่ในตารางที่ 3) จากข้อมูลการใช้พลังงานของโรงงานในช่วงที่ทำการหลอมโดยการติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมิเข้าไปได้ตั้งแต่วันที่ 10 มีนาคม - 9 เมษายน 2545 พบว่าค่าพลังงานไฟฟ้าต่อยอดการหลอมเท่ากับ 644.12 kWh/ตัน ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับปี 2544 จะเห็นว่า ค่าที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยตลอดทั้งปีของปี 2544 ซึ่งอยู่ที่ 693.17 kWh/ตัน พบว่าสามารถประหยัดพลังงานในส่วนของการควบคุมเตาหลอมลงได้ 276,459.53 kWh/ปี คิดเป็น 7.08% ของพลังงานที่ใช้หลอม คิดเป็นเงิน 552,919.07 บาท/ปี

ตารางที่ 3 รายละเอียดการหลอมในรอบปี 2544

เดือน	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh)	ยอดการหลอม (ตัน)	kWh/ตัน
มกราคม	330,400	509.00	649.12
กุมภาพันธ์	301,800	422.14	714.93
มีนาคม	350,400	523.68	669.11
เมษายน	277,600	314.87	881.63
พฤษภาคม	358,600	552.60	648.93
มิถุนายน	360,500	567.87	634.83
กรกฎาคม	351,700	560.62	627.34
สิงหาคม	309,800	434.04	713.76
กันยายน	309,900	290.72	1,065.97
ตุลาคม	343,100	528.14	649.64
พฤศจิกายน	322,600	494.60	652.24
ธันวาคม	290,500	438.00	663.24
เฉลี่ย	325,575	469.69	693.17
รวม	3,906,900	5,636.28	

จากการทดลองใช้งานจริงที่โรงงานนอกจากจะดูผลของการประหยัดพลังงานแล้ว ยังได้ทำการตรวจเช็คการใช้งานของหัวเทอร์โม



ค่าเปลี่ยที่วัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาด้วย จากเมื่อก่อนโรงงานใช้หัวเทอร์โมคัปเปิ้ลเช็คอุณหภูมิในเตาทั้งหมด 3 ครั้งต่อหนึ่งการหลอม เมื่อติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้ทำให้ใช้หัวเทอร์โมคัปเปิ้ลเช็คอุณหภูมิในเตาแค่ 1 ครั้งต่อหนึ่งการหลอม เมื่อติดตั้งระบบประมาณค่าอุณหภูมินี้จะลดการใช้หัวเทอร์โมคัปเปิ้ลลง 3 เท่า คิดเป็นเงิน 30,360 บาท/ปี

ระบบประมาณค่าอุณหภูมิที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ นอกจากจะช่วยลดพลังงานการใช้ไฟฟ้าและค่าหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลลงแล้ว ระบบสื่อสารกับอุปกรณ์วัดที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ยังทำให้สามารถทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ระหว่างขบวนการหลอมเช่น ค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น ค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า และค่าอุณหภูมิที่ผนังด้านนอกของเตา การบันทึกค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ทำให้ทราบปริมาณการใช้ไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องและจะเป็นข้อมูลที่สคัญในการวางมาตรการประหยัดพลังงานต่อไปในอนาคต นอกจากนี้การที่ทราบค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าอย่างต่อเนื่อง จะทำให้ควบคุมค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้ ทำให้สามารถลดค่าไฟฟ้าลงได้

## 6. บทสรุป

จากการออกแบบระบบควบคุมกึ่งอัตโนมัติที่ใช้สำหรับทำนายและแสดงอุณหภูมิน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่องนั้น พบว่าวิธีการที่นำเสนอนี้สามารถประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะในเตาหลอมได้อย่างต่อเนื่องและมีความผิดพลาด อยู่ที่वलกบ 8 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดอยู่ที่ 2.42 องศาเซลเซียส และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.44 องศาเซลเซียส ซึ่งประโยชน์ของการที่สามารถทำนายและแสดงอุณหภูมิน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่องนี้ทำให้สามารถควบคุมพลังงานไฟฟ้าเข้าเตาหลอมไม่ให้หลอมเกินอุณหภูมิ 1500 องศาเซลเซียส ตามที่ต้องการซึ่งจะทำให้สูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์ เมื่อมีการนำระบบประมาณค่าอุณหภูมิไปใช้งานจริง โดยได้ไปใช้งานจริงที่โรงงานสมุทรหล่อเหล็กเหนียว พบว่าจะประหยัดพลังงานไฟฟ้าลงประมาณ 276,459.53 kWh/ปี คิดเป็นเงิน 552,919.07 บาท/ปี นอกจากนี้ค่าที่วัดต่างๆ นี้ วัดได้โดยไม่ต้องสัมผัสกับน้ำโลหะอุณหภูมิสูง ทำให้ระบบการวัดมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และสามารถประหยัดการใช้หัวเทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด R ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาได้ 3 เท่า คิดเป็นเงินประมาณ 30,360 บาท/ปี

เมื่อนำผลประโยชน์จากการควบคุมอุณหภูมิในเตาหลอมและค่าหัวเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ประหยัดได้มารวมกันพบว่าจะประหยัดเงินได้ทั้งหมดรวม 583,279.07 บาท/ปี เมื่อคิดเงินลงทุนทั้งหมด 137,042.80 บาท/ปี ดังนั้นจะมีเวลาคืนทุนเท่ากับ 0.23 ปี

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท สมุทรหล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการและอำนวยความสะดวกในการทดลอง ขอขอบคุณ สถาบันเพิ่มผลผลิตแห่งชาติ ผู้ประสานงานโครงการทำให้โครงการดำเนินไปได้อย่างราบรื่น และขอขอบคุณ สำนักงาน

กองทุนสนับสนุนการวิจัย ผู้ให้ทุนสนับสนุนโครงการและกำกับดูแลให้โครงการสำเร็จผล

## รายการอ้างอิง

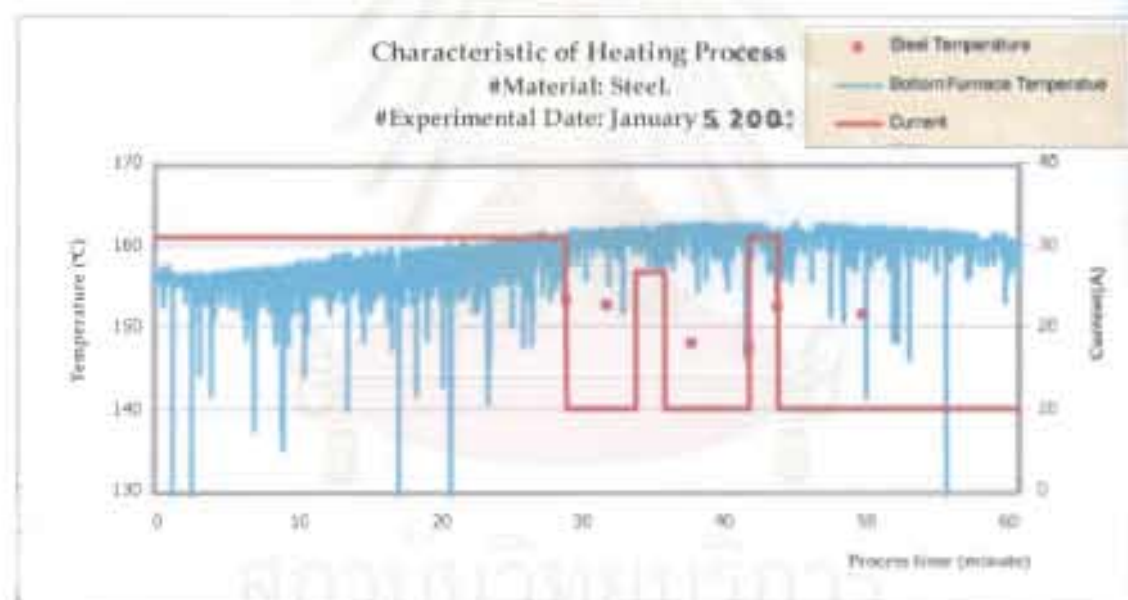
- [1] รัชทิน จันทรเจริญ มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล ประพันธ์ พิภพทอง.การประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมแบบเหนียวไฟฟ้า.การประชุมวิชาการเครือข่ายเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 พฤศจิกายน 2544 38-42
- [2] Sun Y.G., Wang D.X., Tao B.S., Yan T., Shi Y., Fang S.B. and Wang Y.H. An Intelligent Ladle Furnace Control System. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation 2000 : 330-334.
- [3] 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 : 127-134.
- [4] INDUCTOTHERM INDUSTRIES. 10 Indel Avenue Rancocas, New Jersey USA.
- [5] Elliott R. Induction melting. Cast Iron Technology 1998 : 58-63.
- [6] RADYNE DOUBLE AXIS TILT INDUCTION MELTING FURNACES. Molly Millars Lane Wokingham Berk Rg11 2PX.
- [7] Katsuhito Y., Masuji O., Norihiro A., Tamotsu H.G., Kouichi S. Precise temperature control for molten ferrous alloy in induction furnace. SAE Special Publications Feb 24-7 1997 : 123-132.
- [8] [www.powermeasurement.com](http://www.powermeasurement.com)
- [9] [www.modbus.org](http://www.modbus.org)
- [10] Martin D.S. Computer Interfaces. Englewood Cliff, N.J. : Prentice Hall, 1998.
- [11] [www.industrialpc.com](http://www.industrialpc.com)
- [12] [www.ni.com](http://www.ni.com)

## ภาคผนวก ข.

### เบื้องหลังการทดลอง

#### ข.1 สัญญาณรบกวนในระหว่างการทดลอง

ในช่วงแรกๆของการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่ามีปัญหาสำคัญที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณรบกวนในบริเวณที่ทำการหลอมขึ้นเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก ทำให้ค่าที่วัดได้มีการแกว่งไปมาตามรูปข้างล่างทำให้ไม่สามารถทำการวิเคราะห์หาค่าการตรวจวัดบนเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ จึงทำให้งานวิจัยล่าช้าอยู่ช่วงหนึ่ง ซึ่งในกรณีที่ให้นำค่าที่วัดได้มาประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์นั้นต้องไม่ให้มีสัญญาณรบกวนเข้ามาตามสายสัญญาณและเครื่องมือตรวจวัด ซึ่งวิธีที่ใช้ก็คือจะใช้สายสัญญาณชนิดชีลด์ และหุ้มด้วยท่อเหล็กอีกชั้นหนึ่งในการป้องกันสัญญาณรบกวนนี้



รูปที่ ข.1 ค่าการตรวจวัดที่เกิดจากสัญญาณรบกวน

สงวนลิขสิทธิ์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ประพันธ์ พิกุลทอง เกิดวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ. 2520 กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย