



## วิทยานิพนธ์

การประมาณ และควบคุมอุณหภูมิของน้ำเหล็ก ในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

**Temperature Estimation and Control of Molten Steel in the Induction Furnace**

นายเขมภัทร สมสังข์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2549



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)  
ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชา

เรื่อง การประมาณ และควบคุมอุณหภูมิของน้ำเหล็ก ในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

Temperature Estimation and Control of Molten Steel in the Induction Furnace

นามผู้วิจัย นายเชมภัทร สมสังข์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ ดร. สันติ ไชย  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีระยศ แสนโกชณ์, D.Sc. )

กรรมการ ดร. ชัยวัฒน์ ชื่นชูชัยกิจ  
( อาจารย์จันทน์ รุ่งเรืองพิทยากุล, D.Sc. )

กรรมการ ดร. พงษ์  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ พูนวสิน, M.S. )

หัวหน้าภาควิชา ดร. ชัยวัฒน์ ชื่นชูชัยกิจ  
( อาจารย์ชูเกียรติ การะเกตุ, Ph.D. )

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

ดร. อรรถกฤษณ์  
( รองศาสตราจารย์วินัย อางคองหาญ, M.A. )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 17 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2549

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประมาณ และควบคุมอุณหภูมิของน้ำเหล็ก ในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

Temperature Estimation and Control of Molten Steel in the Induction Furnace

โดย

นายเชมภัทร สมสังข์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2549

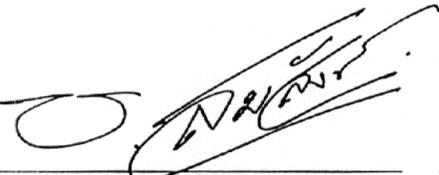
ISBN 974-16-1236-2

เขมภัทร สมสังข์ 2549: การประมาณ และควบคุมอุณหภูมิของน้ำเหล็ก ในเตาหลอม  
โลหะแบบเหนียวนำ ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)  
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมที่ปรึกษา:  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีระยศ แสนโกชณ์, D.Sc. 111 หน้า  
ISBN 974-16-1236-2

การวิจัยนี้เป็นการประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะในเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำ โดยปัญหาสำคัญของกระบวนการหลอมโลหะที่เกิดขึ้นในปัจจุบันคือ ไม่สามารถวัดอุณหภูมิน้ำโลหะระหว่างกระบวนการอย่างต่อเนื่องได้เนื่องจากน้ำโลหะมีอุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส และจะส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของอุปกรณ์การวัด จึงจำเป็นต้องประมาณอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำด้วยวิธีการทางอ้อม โดยกระทำการวัดพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าเตาหลอม, อุณหภูมิบริเวณใต้เตา, อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า-ออก และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น

จุดประสงค์หลักของการประมาณอุณหภูมิ เพื่อประโยชน์ในการลดพลังงานโดยผู้ใช้งานสามารถรู้อุณหภูมิประมาณของเตาฯ เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ต้องการก็สามารถหยุดให้พลังงานไฟฟ้าได้ทันที โดยไม่เกิดการให้ความร้อนเกิน (overheat)

ในงานวิจัยนี้การหาแบบจำลองของกระบวนการหลอมโลหะ เพื่อการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำจะใช้วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) และได้มีการแสดงค่าเปรียบเทียบของค่าอุณหภูมิวัดจริงกับค่าอุณหภูมิที่ประมาณได้ โดยค่าที่ได้จากการวัดจริงเทียบกับค่าที่ได้จากการประมาณมีค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ -2.25 องศาเซลเซียสและมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ -1.124 องศาเซลเซียส เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีที่ผ่านมามีการประมาณด้วยวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุด ค่าประมาณที่ได้จากวิธีเจเนติกอัลกอริทึมให้ค่าประมาณที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิจริง

  
ลายมือชื่อนิติติ

พีระยศ แสนโกชณ์  
ลายมือชื่อประธานกรรมการ

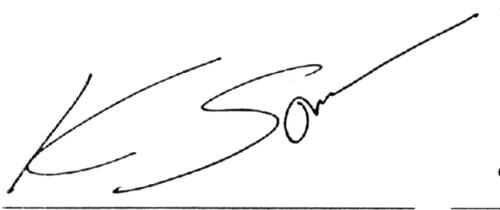
13 / 03 / 49

Khemaphatdra Somsung 2006: Temperature Estimation and Control of Molten Steel in the Induction Furnace. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Peerayot Sanposh, D.Sc. 111 pages.  
ISBN 974-16-1236-2

This research solves the problem that estimates molten steel temperature of induction furnace. However, measuring the steel temperature can not be performed continuously since the molten steel temperature may exceed  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . This exceeding high temperature results in an extremely short lifetime of the thermocouple. Therefore, the temperature is indirectly estimated from the power input, temperature at the furnace bottom and the temperature/flow rate of the coolant.

The main purpose of the temperature estimation is for energy saving by the user can estimate temperature of induction furnace. When the estimated temperature reaches to the point of the requirement, the user can stop the power instantly before it is overheated.

In this research, genetic algorithm is used for finding the process model and compares estimated temperature from this process model with the measured temperature. The results have the maximum error and the average error equal  $-2.25$ ,  $-1.124\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectively by comparing the estimated temperature from the genetic algorithm with the least square method in the past, the estimated value from the genetic algorithm is near the measurement temperature.



Student's signature

Peerayot Sanposh 13 / 03 / 06  
Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระยศ แสนโกชณ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และนำไปแก้ปัญหาที่ประสบขณะทำการวิจัย พร้อมทั้งให้การสนับสนุนช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ และเครื่องมือสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ ดร.ศุภวุฒิ จันทร์านวัฒน์, ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ และคุณประพันธ์ พิกุลทอง ที่ให้ข้อมูล และคำปรึกษาเกี่ยวกับโครงการวิจัยเดิม

บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุน โครงการวิจัย และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย และขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ซึ่งเป็นผู้ให้ทุนสนับสนุน โครงการ และเป็นผู้ดูแลช่วยเหลือให้โครงการสำเร็จลุล่วงไปตามเป้าหมาย

ขอขอบคุณ พี่ ๆ น้อง ๆ และเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษาและสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายที่สุด ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อย่างสูง ที่คอยให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจขณะที่กำลังศึกษาในระดับปริญญาโทจนประสบผลสำเร็จในการเล่าเรียน

เขมภัทร สมสังข์

กุมภาพันธ์ 2549

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
รายงานผลงานวิจัยที่ผ่านมา	4
เตาหลอมโลหะ	5
แบบจำลองของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า	29
การหาค่าเหมาะสมโดยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม	44
อุปกรณ์และวิธีการ	59
อุปกรณ์	59
วิธีการ	59
สถานที่ทำการวิจัย	66
ผลและการวิจารณ์	60
ผลการทดลองการประมาณค่าอุณหภูมิ	60
การวิจารณ์ผลการทดลองการประมาณค่าอุณหภูมิ	91
สรุป	100
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	101
ภาคผนวก	104

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงน้ำหนักเฉพาะ และความต้านทานเฉพาะของน้ำโลหะ	13
2	ลักษณะพื้นฐานของเตาประเภทต่างๆ	19
3	คุณสมบัติโดยสรุปของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ชนิดไม่มีไส้ (Coreless Induction Furnace)	21
4	แสดงตัวอย่างรูปร่าง และลักษณะที่ใช้งานของ เซรามิกไฟเบอร์	27
5	แสดงความจุความร้อนจำเพาะ และความจุความร้อนโมลาร์ของวัสดุบางชนิด (ค่าเฉลี่ย) รักษาความดันให้คงที่ ; วัสดุในช่วงอุณหภูมิ 0 °C ถึง 100 °C	34
6	แสดงความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวและการกลายเป็นไอ	34
7	สภาพการนำความร้อนของวัสดุ	36
8	ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	38
9	สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติในอากาศ ณ ความดันบรรยากาศ	38
10	ค่า Emissivity ของผิวประเภทต่างๆ	39
11	แสดงสมการสมดุลความร้อนของเตา	41
12	แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีการวัดค่าอย่างต่อเนื่อง ใน 1 วันทำงาน (2 กะ การทำงาน (กะแรก 8.00 – 20.00 น., กะสอง 20.00 – 8.00 น.))	64
13	แสดงการเปรียบเทียบการหาค่าคงที่ ( $c_1, c_3$ ) ในกรณีต่างๆ	65
14	แสดงค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กจากการวัด ใน 2 วันทำงาน (2 กะการทำงาน (กะแรก 8.00 – 20.00 น., กะสอง 20.00 – 8.00 น.))	68
15	แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีเจนติกอัลกอริทึม	69
16	แสดงค่าผิดพลาด และค่าผิดพลาดเฉลี่ย ของอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างวิธีการ วัดจริงกับวิธีการประมาณฯ	70

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ชนิดไม่มีไส้ (Coreless Induction Furnace)	11
2	แสดงสนามแม่เหล็ก และรูปแบบการเคลื่อนตัวของโลหะ	11
3	ภาพระบบหล่อเย็น บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด	17
4	ตัวอย่าง ขั้นตอนการหลอมโลหะในหนึ่งรอบการทำงาน(การหลอม 1 ครั้ง)	18
5	แสดงภาพเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง	18
6	แสดงการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา (ขณะเจ้าหน้าที่จุ่มวัด)	18
7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $n$ , $\varepsilon$ และปริมาณน้ำโลหะ/ของหลอมที่เหลือ ในเตา	23
8	สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ เซรามิกไฟเบอร์ รูปร่างต่างๆ	28
9	แข่งกึ่งไดอะแกรมของความร้อนในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า	29
10	แสดงอุปกรณ์ และตำแหน่งของการรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ บริเวณเตาหลอม	31
11	การถ่ายเทความร้อนรวม	41
12	Flow chart การดำเนินการของเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA)	46
13	แสดงขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ $c_1, c_3$ ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม	51
14	แสดงขั้นตอนการหาค่าเหมาะสม (Fitness Value) ของประชากร	54
15	แสดงขั้นตอนการทดสอบประชากรด้วยฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) เพื่อดูค่าความเหมาะสม (Fitness Value) ของประชากร นั้นๆ	55
16	แสดงการหาเจเนอเรชันต่อไป (Next Generation)	56
17	แสดงแสดงขั้นตอนการประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก	57
18	แสดงวิธีการ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการรับ – ส่ง สัญญาณในปัจจุบัน	59

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	แสดง control panel และ front panel of LabVIEW โปรแกรม	63
20	แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเหล็ก ระหว่างค่าจากการวัดจริง กับ วิธีการประมาณฯ โดยนำค่า $c_1, c_3$ ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอม ครั้ง นั้น มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งนั้นๆ	77
21	แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเหล็ก ระหว่างค่าจากการวัดจริง กับ วิธีการประมาณฯ โดยนำค่า $c_1, c_3$ ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งต่อไป	85
22	แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเหล็ก ระหว่างค่าจากการวัดจริง กับ วิธีการประมาณฯ โดยนำค่า $c_1, c_3$ ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1, 2, ..., 6 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 2, 3, ..., 7 ตามลำดับ	92
23	แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเหล็ก ระหว่างค่าจากการวัดจริง กับ วิธีการประมาณฯ โดยนำค่า $c_1, c_3$ ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1, 3, ..., 6, 7 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 2, 4, ..., 7, 1(วันต่อไป) ตามลำดับ	97
24	แสดงแผนภาพเชิงกึ่งไดอะแกรมในช่วงให้ความร้อนในงานวิจัยปัจจุบัน	98

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$m_s$	=	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> )
$R_{cu}$	=	ความต้านทานของขดลวดตัวนำในหม้อแปลง (ohm)
$I_{inv}$	=	กระแสอินเวอร์เตอร์ (Amp)
$H$	=	ส่วนโค้งของน้ำโลหะในเบ้า (inch)
$D$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของเบ้าหลอม (inch)
$L_t$	=	ความสูงของเบ้าหลอม (inch)
$S$	=	น้ำหนักเฉพาะของน้ำโลหะ
$F$	=	ความถี่ (Hz)
$R$	=	ความต้านทานเฉพาะของน้ำโลหะ (โอห์ม.ซม. <sup>3</sup> )
$P$	=	พลังงาน (kW)
$C_1$	=	ค่าคงที่ ขึ้นกับค่าความจุความร้อนจำเพาะและมวลของน้ำโลหะ
$C_2$	=	ค่าคงที่ ขึ้นกับค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็นของระบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า
$C_3$	=	ค่าคงที่ ขึ้นกับการสูญเสียความร้อนของน้ำโลหะ
$n$	=	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการชดเชย เมื่อหากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใส่ให้เตา ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำโลหะ/ของหลอมที่เหลืออยู่
$s$	=	ปริมาณความร้อนทางทฤษฎี (kWh/t, t: ตัน)
$\eta$	=	ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าของคอยล์

$\varepsilon$	=	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการชดเชย เมื่อคำนวณประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าเฉลี่ย ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำโลหะ/ของหลอมที่เหลืออยู่
$\eta_e$	=	ประสิทธิภาพของการเดินสาย (หม้อแปลง, รีแอกเตอร์, คาปาซิเตอร์ และการเดินสาย)
$\eta_f$	=	ประสิทธิภาพของอุปกรณ์การเปลี่ยนความถี่
$P_L$	=	ปริมาณความร้อนสูญเสียของเตา (kW)
$\delta$	=	ความหนาของแผ่นราบ/ผนังเรียบ (m)
$A$	=	พื้นที่ของการนำความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับแกน x ( $m^2$ )
$t_h$	=	ผิวด้านที่มีอุณหภูมิสูง ( $^{\circ}C$ )
$t_l$	=	ผิวด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ ( $^{\circ}C$ )
$\lambda$	=	ค่าคงที่ เรียกว่า สภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity)
$t_w$	=	อุณหภูมิที่ผิวของผนังของแข็ง
$t_F$	=	อุณหภูมิของของไหลบริเวณที่อยู่ห่างออกไปจากผนังของแข็ง
$h$	=	เป็นค่าคงที่ เรียกว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Heat Transfer Coefficient) ( $kcal/m^2h^{\circ}C$ , $W/mK$ )
$\hat{\cdot}$	=	ค่าประมาณ

## การประมาณ และควบคุมอุณหภูมิของน้ำเหล็ก ในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ

### Temperature Estimation and Control of Molten Steel in the Induction Furnace

#### คำนำ

การวิจัยนี้เป็นโครงการความร่วมมือระหว่างบริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยเป็นโครงการต่อเนื่องจากโครงการวิจัยการประมาณค่า และควบคุมอุณหภูมิเพื่อการประหยัดพลังงานของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (ราชทิน และ ประพันธ์, 2544) และการวิจัยนี้ยังเป็นการใช้ระบบคอมพิวเตอร์แสดงสถานะของอุณหภูมิของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ ของบริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด หรือ SBM ซึ่งก่อตั้งเมื่อปี พ.ศ. 2518 โดยดำเนินการหล่อเหล็กเหนียว, งานหล่อเหล็กกล้าสำหรับชิ้นส่วนยานยนต์ รวมถึงการกัดขึ้นรูปชิ้นส่วน ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักคือ ทรัมเบรก ดิสก์เบรก ฟลายวีว เอ็กซอท ฮับ เกียร์บ็อกซ์ และทามมิ่งคัพเวอร์ โดยได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากบริษัท อาซาฮีเทค คอปอเรชั่น ประเทศญี่ปุ่น

ปัญหาสำคัญของกระบวนการหลอมเหล็ก ในปัจจุบันคือ ไม่สามารถวัดอุณหภูมิน้ำเหล็ก ระหว่างกระบวนการอย่างต่อเนื่องได้ จึงจำเป็นต้องวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำด้วยวิธีการทางอ้อม การวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กด้วยวิธีการทางตรง ด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ล มีข้อจำกัดคือไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่อง เพราะน้ำเหล็กมีอุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส ทำให้หัววัดมีอายุการใช้งานสั้น และส่งผลต่อค่าที่วัดได้ มีความผิดพลาด การที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้การควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กในขณะหลอมไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร ดังนั้นการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กด้วยวิธีการทางอ้อม จึงเป็นแนวทางแก้ไขอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจและเป็นไปได้ และสามารถกระทำด้วยการ วัดพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าเตาหลอม, อุณหภูมิบริเวณใต้เตา, อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า-ออก และอัตราการไหลของน้ำในระบบหล่อเย็น

สำหรับการแก้ไขแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิโลหะภายในเตา ทุกครั้งที่สูญเสียความเที่ยงตรงไปนั้น ทำให้ระบบไม่เหมาะกับการใช้งานจริง เนื่องจากเวลาที่ระบบ

สามารถใช้งานได้ ก่อนที่จะต้องทำการแก้ไขนั้น สิ้นเกินไป ประกอบกับการแก้ไขนั้นต้องใช้บุคลากรที่มีพื้นฐานทางการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการแก้ไขนั้นกระทบการผลิต โครงการนี้จึงเสนอที่จะพัฒนาระบบประมาณ และควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะ ในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ ให้มีการใช้งาน และเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งส่งผลให้เกิดการจัดการที่ดี และสามารถประหยัดพลังงานได้

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาระบบประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมฯ ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น โดยแก้ไขหรือเพิ่มเติมตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิของน้ำโลหะภายในเตาหลอมฯ
2. เพื่อพัฒนาระบบการแก้ไขแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของอุณหภูมิของน้ำโลหะภายในเตาหลอมฯ ให้เป็นระบบกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งทำให้การแก้ไขแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิของน้ำโลหะสะดวกและรวดเร็ว
3. เพื่อการประหยัดพลังงาน

## การตรวจเอกสาร

### รายงานผลงานวิจัยที่ผ่านมา

จากการศึกษาค้นคว้าข้อมูล และผลงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาพบว่า การวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะ ที่อุณหภูมิสูงๆ ในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ยังไม่มีอุปกรณ์ใดสามารถวัดโดยตรงได้อย่างต่อเนื่อง จำเป็นต้องใช้การวัดด้วยวิธีการทางอ้อม และผลจากการวัดพบว่าจะทำให้สามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 10-14%

ในปี พ.ศ. 2544 ประพันธ์ พิกุลทอง (รัชทิน และ ประพันธ์, 2544) ซึ่งเป็นผู้วิจัยรุ่นแรก ในโครงการนี้ ได้ทำการวิจัยพบว่า ถ้าทราบอุณหภูมิของ น้ำเหล็กภายในเตาหลอมอย่างต่อเนื่องได้ จะทำให้ทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาได้แม่นยำขึ้น และสามารถประหยัดพลังงานได้ 7 %

ในปี ค.ศ. 2000 Sun Y.G. (Sun et al., 2000) ได้ศึกษาเกี่ยวกับระบบการควบคุมของ Ladle Furnace โดยใช้สมการสมดุลความร้อนในการคำนวณ เพื่อทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็ก ปริมาณพลังงานป้อนเข้า และการควบคุมที่เหมาะสม จากการวิจัยพบว่า อุณหภูมิน้ำเหล็กในเตามีความสัมพันธ์กับพลังงานป้อนเข้า (Power Input) และสรุปว่า การทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเหล็ก กับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) นั้นไม่สามารถทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กได้อย่างแม่นยำนัก เนื่องจากความซับซ้อนระหว่างอุณหภูมิน้ำเหล็ก, พลังงานไฟฟ้าเข้า, เหล็กที่หลอมละลาย และเวลา ดังนั้นจึงได้พัฒนาระบบ Intelligent Ladle Furnace (ILF) มาใช้ในการทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็ก พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ซึ่งมีความแม่นยำกว่าวิธีแรก และวิธีนี้จะช่วยลดพลังงานไฟฟ้าต่อตันเหล็กลงถึง 14%

ในปี ค.ศ. 1977 Tadeusz M. D. (Tadeusz et al., 1977) ได้ศึกษาการวัดและแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องในกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิสูง เช่นในโรงงานและอุตสาหกรรมเหล็ก พบว่าถ้ามีการวัด และแสดงอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้ จะช่วยประหยัดพลังงานลงได้ประมาณ 10% ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมด

บริษัท อินดักโทเทอม (INDUCTOTHERM) ผู้ผลิตและพัฒนาเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้คิดค้นชุดการทำงานของเตาโดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุม (Computer Monitoring and

Control for Charging, Melting and Holding Operations) โดยอาศัยความสัมพันธ์ของพลังงานไฟฟ้า ป้อนเข้ากับอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตา ซึ่งผลที่ได้ ทำให้ทำนายอุณหภูมิหน้าเหล็กในเตาได้แม่นยำขึ้น และทำให้ประหยัดพลังงานที่ใช้ลงได้

### เตาหลอมโลหะ

ในปัจจุบันเตาหลอมไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญ ในอุตสาหกรรมการหล่อโลหะเป็นอย่างมาก เนื่องจากเตาหลอมไฟฟ้าให้คุณสมบัติในการผลิตโลหะชนิดต่างๆ ได้ดีกว่า ดังแสดงในตารางที่ 1 และมีแนวโน้มที่จะมาแทนเตาหลอมประเภทอื่นๆ เช่น เตาคิวโปลา (Cupola Furnace), เตาเบ้า (Crucible Furnace) เป็นต้น (สุนทร, 2534)

เตาคิวโปลา (Cupola Furnace) เป็นเตาที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางพอสมควร ใช้ถ่านโค้ก เป็นเชื้อเพลิง ในการให้ความร้อนในการหลอมโลหะให้ละลาย ตัวเตาจะสร้างเป็นลักษณะรูปทรงกระบอก จะมีการเรียงวัตถุดิบ (Charge) ในการหลอม เรียงสลับกันเป็นชั้นๆ อัดกันไว้ในเตา อาทิเช่น โลหะที่จะหลอม, ถ่านโค้ก และ Flux เป็นต้น เป็นเตาที่มีอัตราการหลอมละลายได้สูง, ปรับปรุงส่วนผสมได้ง่าย, สร้างได้ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน, สามารถทำการหลอมละลายติดต่อกันโดยไม่ต้องหยุดพักได้ และอุปกรณ์ต่างๆ มีราคาต่ำ ผลผลิตที่ได้จากเตาคิวโปลา เป็นประเภทเหล็กหล่อ

วัตถุดิบที่ใช้ในการหลอม ประกอบไปด้วย

1. เหล็กพิก (Pig Iron) ใช้ประมาณ 20 – 30 % ของวัตถุดิบ (Charge)
2. เศษเหล็กเหนียว (Steel Scrap) ใช้ประมาณ 30 – 40 % ของวัตถุดิบ (Charge)
3. เศษเหล็กหล่อ (Return Scrap) ที่ใช้แล้ว เช่นพวกช่องทางเข้าของน้ำโลหะ, ช่องทางวิ่งของน้ำโลหะ, รุเท และรูล้น เป็นต้น

เตาเบ้า (Crucible Furnace) เป็นเตาอีกประเภทหนึ่งที่มีความนิยมมาหลายยุคสมัย นิยมใช้หลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non – Ferrous) เช่น ทองแดง, ทองเหลือง และอลูมิเนียม เป็นต้น ตัวเบ้าที่ใช้จะทำมาจากแกรไฟต์ผสมกับดินเหนียว (Clay) ผสมผสานเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน สามารถคงทนต่อสภาวะอุณหภูมิได้พอสมควร จะใช้น้ำมันดีเซล หรือก๊าซธรรมชาติ เป็นเชื้อเพลิงในการหลอมโลหะ หรือบางครั้งอาจใช้ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงเช่นกัน

เตาหลอมไฟฟ้า ซึ่งเป็นเตาที่มีบทบาทมาก ในอุตสาหกรรมหล่อ/หลอมโลหะในปัจจุบัน แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) และเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Electric Induction Furnace) (พยูร, 2526)

## 1. เตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace)

เตาประเภทนี้จะให้ความร้อนกับโลหะที่จะหลอมโดยการอาร์คของแท่งอิเล็กโทรด (Electrode) และสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบอาร์คไฟฟ้าทางอ้อม (Indirect Arc) และแบบอาร์คไฟฟ้าทางตรง (Direct Arc)

### 1.1 แบบอาร์คไฟฟ้าทางอ้อม (Indirect Arc)

เตาชนิดนี้มีแท่งอิเล็กโทรด (Electrode) 2 แท่ง ตั้งอยู่ในแนวนอน (Horizontal) การแผ่รังสีจากการ Arc กันของแท่งอิเล็กโทรด ทำให้โลหะได้รับความร้อนและหลอมละลาย ตัวเตาจะตั้งบนแท่นแบบหมุน (Roller) และกระดกขึ้น-ลง ในขณะที่ทำการหลอม ซึ่งทำให้น้ำโลหะผสมเป็นเนื้อเดียวกัน

เตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้าทางอ้อม นิยมใช้หลอมโลหะประเภทเหล็ก (Ferrous Metal) และประเภททองแดง (Copper Base) แต่มีปริมาณการหลอมที่ไม่มาก ประมาณ 200 – 1000 กิโลกรัม

#### ข้อดี

1. การลงทุนต่ำ
2. ควบคุมง่าย
3. สามารถเพิ่มอุณหภูมิของน้ำโลหะได้ง่าย

#### ข้อเสีย

1. เสี่ยงดัง
2. มีมลภาวะเป็นพิษในสภาพการทำงาน

3. กระแสไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากใช้ไฟฟ้าแบบเฟสเดียว โดยปรับจาก 3 เฟส

## 1.2 แบบอาร์คไฟฟ้าทางตรง (Direct Arc)

เตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้าทางตรง ให้ความร้อนต่อโลหะได้ดีกว่า เตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้าทางอ้อม ตัวเตาจะประกอบด้วย แท่งอิเล็กโทรด 3 แท่ง อยู่บริเวณด้านบน โดยแต่ละแท่งจะถูกขยับลงมาอาร์ค กับแท่งโลหะ (Metal หรือ Charge) โดยตรงในขณะที่ทำงาน เตาชนิดนี้ใช้หลอมได้ปริมาณมาก 0.25 – 200 ตัน เตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้าทางตรง ใช้หลอมโลหะประเภทเหล็กเหนียว (Steel) ที่ใช้ผลิตเหล็กแผ่น เหล็กเส้น เป็นต้น

## 1.3 ขั้นตอนและกรรมวิธี การหลอมโลหะด้วยเตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้า

ขั้นตอนและกรรมวิธีในการหลอมโลหะ ด้วยเตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้า มีหลายวิธี ขึ้นกับชนิดของโลหะสำเร็จรูปที่จะหลอม และสัมพัทธ์กับวัสดุที่ใช้กรูเตาหลอม เช่น

1. กรูด้วยวัสดุที่เป็นกรด ประเภทอิฐที่ทำจากซิลิกา (Silica), กานิสเตอร์ (Ganister) กระบวนการทำจะเป็นกรด (Acid Process)
2. กรูด้วยวัสดุที่เป็นด่าง ประเภทแมกนีเซีย (Magnesia), โดโลไมท์ (Dolomite), กระบวนการทำจะเป็นด่าง (Basic Process)

นอกจากชนิดของโลหะสำเร็จรูปที่จะหลอม และวัสดุที่ใช้กรูเตาหลอมแล้ว ประการสำคัญ คือการปรับสภาพบรรยากาศภายในเตาให้เป็นลักษณะออกซิไดซิง (Oxidizing Atmosphere) หรือลดออกซิเจน (Reducing Atmosphere) ซึ่งจะสัมพันธ์โดยตรงกับการปรุงแต่งขี้ตะกรันว่าจะให้มีสภาพเป็นชนิดใด ทั้งนี้เพื่อนำโลหะสะอาด อีกทั้งการเติมธาตุผสมต่างๆ เพื่อปรุงแต่งน้ำโลหะให้ได้มาตรฐาน

การปรุงแต่งขี้ตะกรันกระทำ 2 ครั้ง (Double Slag Process) ได้แก่ช่วงปรับสภาพในเตาให้มีออกซิเจน (Oxidation Stage) ช่วงนี้ส่วนผสมทั้งเศษเหล็ก และตะกรัน (Slag) เช่น หินปูน (Limestone) จะถูกหลอมด้วยกัน หลังจากนั้นก๊าซออกซิเจนจะถูกเป่าเข้าไปในน้ำโลหะ เพื่อไล่หรือลดคาร์บอน (Carbon), แมงกานีส (Manganese), ซิลิกอน (Silicon), ฟอสฟอรัส (Phosphorous)

กระแสไฟฟ้าในช่วงนี้จะหยุด ส่วนผสมของน้ำเหล็กจะถูกนำมาวิเคราะห์ จากนั้นจึงตะแกรงที่มีสภาพเป็นต่าง ซึ่งมี  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  มากจะถูกนำออกมาจากเตา (พวยร, 2526)

ช่วงต่อมาจะปรับช่วงสภาพภายในเตาที่ถูกลดออกซิเจน (Reducing Stage) โดยการเติมปูนขาว (Lime), แคลเซียมฟลูออไรด์ (Calcium Fluoride), ถ่านโค้ก (Coke) เป็นต้น ส่วนการเติมธาตุผสม (Ferro Alloys) เพื่อปรุงแต่งส่วนผสมของน้ำโลหะ เช่น วานาเดียม (Vanadium), โครเมียม (Chromium), นิกเกิล (Nickel), สามารถเติมได้ในช่วงเวลานี้ และจะไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) และเพื่อให้ส่วนผสมต่างๆ ทัวถึง จะทำการกวนน้ำโลหะภายในเตาด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro Magnetic Stirring) (สุนทร, 2534)

ประโยชน์ของการหลอมโลหะด้วยเตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้า คือ

1. สามารถปรับสภาพภายในเตาได้ง่าย (Oxidising/Reducing Conditions)
2. การสูญเสียของธาตุผสม (Ferro Alloys) มีน้อย เนื่องจากการปรับสภาพภายในเตาไม่ให้มีออกซิเจน (Reducing Condition)
3. การควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะกระทำได้ไม่ยาก
4. สามารถควบคุมส่วนผสมของซิลเฟอร์ และฟอสฟอรัสให้ต่ำได้
5. การหลอมสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว และการขจัดสารมลทิน สามารถทำได้อย่างรวดเร็วเช่นกัน

## 2. เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Electric Induction Furnace)

ความต้องการที่จะนำเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า มาแทนเตาทั่วไป เช่น เตาด่านโค้ก (Cupola), เตาบ้า (Crucible) ฯลฯ มีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าให้ความยืดหยุ่นได้ดีกว่า และมีองค์ประกอบอื่นๆ อีกมากที่ค่อนข้างเด่นชัด เช่น

1. การควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะกระทำได้ง่าย
2. ส่วนผสมของน้ำโลหะสามารถควบคุมได้ง่าย
3. ความเป็นเนื้อเดียวกันของธาตุต่างๆ ในส่วนผสมเป็นไปได้อย่างดี
4. สามารถรับน้ำโลหะจากบ้าเทที่เหลือคืนกลับมาได้

5. สามารถหลอมวัสดุดิบที่มีราคาต่ำ
6. ลดมลภาวะเป็นพิษในสภาพการทำงาน
7. ใช้พื้นที่โรงงานน้อยกว่า
8. สามารถลดอัตราการสูญเสียโลหะ (Melting loss) ได้มาก
9. เป็นเตาที่ให้การยืดหยุ่นในการทำงานได้มากที่สุด

ชนิดของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Electric Induction Furnace) สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด ดังนี้

1. ชนิดที่มีไส้ (Core Induction Furnace)
2. ชนิดที่ไม่มีไส้ (Coreless Induction Furnace)

โยซิโอะ (2543) การให้ความร้อน สามารถทำได้ด้วยวิธีการ 3 วิธี โดยวิธีแรกคือ เหนี่ยวนำ เป็นการให้ความร้อนโดยทำให้เกิด Eddy Current Loss หรือ Hysteresis Loss (เป็นการสูญเสียทางไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นตอนกระแสไหลในสารแม่เหล็ก) ในสารตัวนำไฟฟ้า โดยใช้สนามแม่เหล็ก กระแสสลับความถี่สูง หรือความถี่ต่ำ

วิธีที่สองคือ แบบโดยตรง เป็นวิธีให้ความร้อนโดยทำให้เกิด Eddy Current Loss หรือ Hysteresis Loss ในวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าโดยตรง และวิธีสุดท้ายคือ แบบโดยทางอ้อม เป็นวิธีส่งผ่านความร้อนแก่วัสดุที่จะต้องให้ความร้อนที่เป็นฉนวน โดยวางไว้ในภาชนะที่เป็นตัวนำ ซึ่ง Eddy Current Loss หรือ Hysteresis Loss ในภาชนะจะส่งผ่านไปยังวัสดุที่ต้องการให้ความร้อนโดยการนำเป็นส่วนใหญ่

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะชนิดที่ไม่มีไส้เท่านั้น (เป็นแบบที่ใช้ในงานวิจัย) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท โดยแบ่งจากความถี่ ได้ดังตารางที่ 3

ส่วนประกอบของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 1 มีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

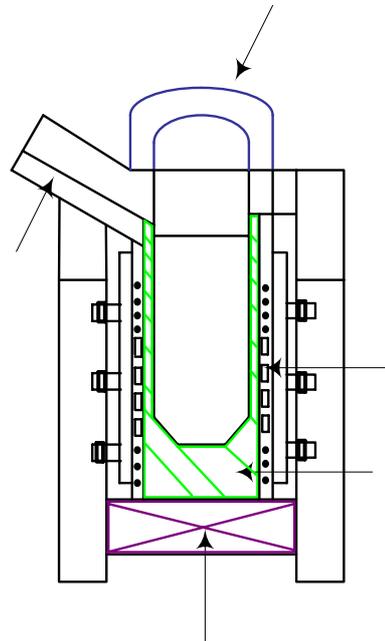
1. ตัวเตา (Furnace Body)

2. ชุดจ่ายพลังงาน (Power Supply/Generator)
3. ระบบระบายความร้อน (Cooler)
4. ระบบไฮดรอลิกยกเตา (Hydraulic Tilting Facility)
5. ระบบยกเตาฉุกเฉิน (Emergency Tilting Facility)
6. ระบบระบายความร้อนฉุกเฉิน (Emergency Water)
7. วัสดุกรุเตา (Lining)

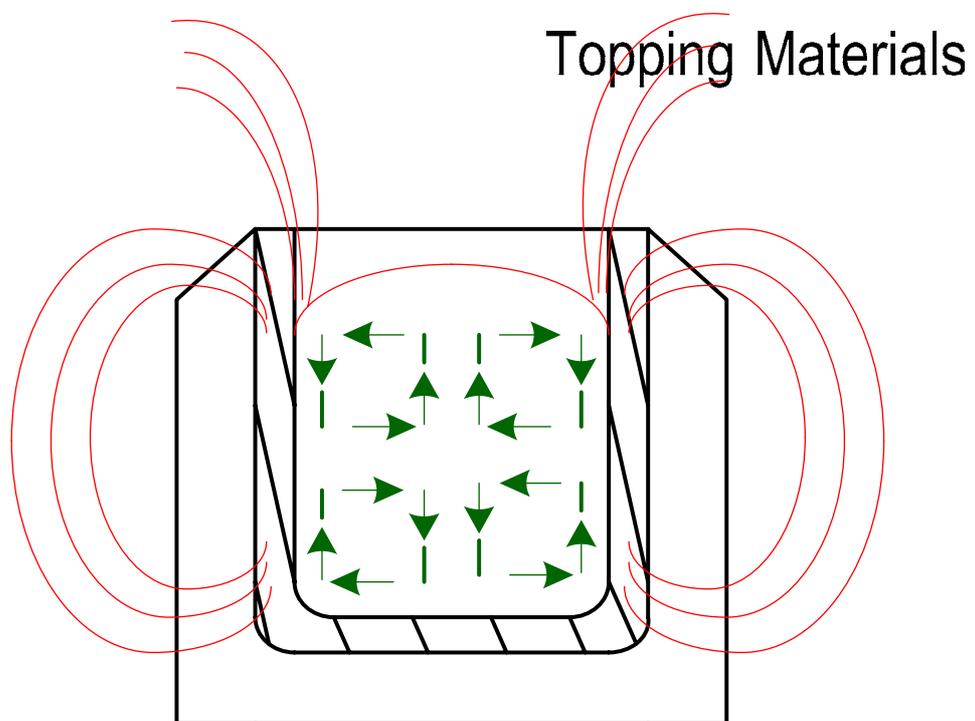
## 2.1 หลักการทำงานของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

เมื่อนำโลหะใดๆ ใส่ลงในเตาหลอมที่เป็นสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทองแดง (Coil) ที่พันอยู่รอบตัวเตา จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นระหว่างขดลวด (Coil) กับโลหะ (Charge) เป็นผลทำให้โลหะเกิดความร้อน และหลอมละลายในที่สุด ดังแสดงในภาพที่ 2 (สุนทร, 2534)

กระแสที่ขดลวด และที่โลหะจะไหลในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งขดลวดอยู่กับที่ ในขณะที่โลหะสามารถเคลื่อนตัวได้ ดังนั้นน้ำโลหะจะถูกผลักออกจากขดลวด ไปยังศูนย์กลางของเตาหลอม และไหลกลับมายังขดลวดอีกจึงทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำโลหะภายในเตาหลอมอยู่ตลอดเวลา ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 โครงสร้างเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ชนิดไม่มีไส้ (Coreless Induction Furnace)



ภาพที่ 2 แสดงสนามแม่เหล็ก และรูปแบบการเคลื่อนตัวของโลหะ

เตาชนิดนี้เหมาะสำหรับหลอมเหล็ก หรือผลิตเหล็กได้เกือบทุกประเภท ไม่ว่าจะเป็นเหล็กหล่อ (Cast Iron), เหล็กกล้า (Steel) หรือโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous) เช่น ทองแดง, ทองเหลือง หรือบรอนซ์ รวมทั้งสามารถใช้ความร้อนจากการเหนี่ยวนำไปใช้ในกระบวนการอบชุบผิวแข็ง และให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนนำไปทำการตีขึ้นรูป หรือปั๊มขึ้นรูป (Forging) (พยูร, 2526)

ในการเลือกใช้น้ำของเตา และขนาดของชุดจ่ายพลังงานให้เหมาะสม จะคำนึงถึงสิ่งต่างๆ ประกอบด้วย

1. การผลิต ต้องคิดถึงผลผลิตรวม เช่น น้ำโลหะที่หลอมได้มีปริมาณ 1,000 กก./ครั้ง นำไปเทแบบเหล็กหล่อที่เป็นน้ำหนักชิ้นงานจริงประมาณ 700- 800 กก. ในขณะที่ 200 กก.จะเป็นระบบทางน้ำ หรือช่องทางวิ่งของน้ำโลหะ (Running System) ของชิ้นงาน และต้องคำนึงถึงอัตราความต้องการน้ำโลหะต่อชั่วโมง เช่น ต้องการน้ำโลหะชั่วโมงละ 1 ตัน ชุดจ่ายพลังงานควรมีขนาด 600 กิโลวัตต์ เป็นต้น

2. ขนาดของเตา ในการเลือกขนาดของเตาจะต้องคำนึงถึง

2.1 อัตราการหลอม

2.2 การสูญเสียความร้อน

2.3 การซ่อมหรือเปลี่ยนวัสดุครุเตา (Lining)

2.4 ความถี่

3. ความถี่ของพลังงาน มักเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดความสับสนในการเลือกใช้เตา ซึ่งความถี่ที่เหมาะสมนั้นจะพิจารณาได้จาก การกวนของโลหะ และการเกิดกระแสไฟฟ้าที่ผิวของชิ้นโลหะ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่มาจากเหนี่ยวนำจะไหลผ่านอย่างแน่นหนาบริเวณผิวของโลหะ โดยรอบ หากความถี่ต่ำ ก็จะทำให้กระแสไหลลึกลงในเนื้อโลหะได้มากกว่า นั่นคือ หากชิ้นโลหะใหญ่ ก็ควรเลือกความถี่ต่ำ ในขณะที่โลหะหลอมเหลวจะเกิดการไหลวน ซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ ความถี่ต่ำจะทำให้เกิดการไหลวนรุนแรง ส่งผลให้ไลน์นิ่งสีกร้อนเร็ว และเกิดขี้ตะกรันปนกับน้ำโลหะ ความรุนแรงของการไหลวน จะขึ้นกับขนาดของเตา ( $D \times L_f$ ), ขนาดของพลังงาน และความถี่ ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$H = \frac{7050 \times P}{D \times L_1 \times S \times \sqrt{F \times R}} \quad (1)$$

- โดยที่  $H$  = ส่วนโค้งของน้ำโลหะในเบ้า (inch)  
 $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของเบ้าหลอม (inch)  
 $L$  = ความสูงของเบ้าหลอม (inch)  
 $S$  = น้ำหนักเฉพาะของน้ำโลหะ  
 $F$  = ความถี่ (Hz)  
 $R$  = ความต้านทานเฉพาะของน้ำโลหะ (โอห์ม.ซม.<sup>3</sup>)  
 $P$  = พลังงาน (kW)

ตารางที่ 1 แสดงน้ำหนักเฉพาะ และความต้านทานเฉพาะของน้ำโลหะ

โลหะ	ความต้านทานเฉพาะ (โอห์ม.ซม. <sup>3</sup> )	น้ำหนักเฉพาะ
เหล็ก	158	6.9
ทองแดง	22	8.3
อลูมิเนียม	29	2.4
ทองเหลือง	33	7.8

การกระจายของกระแสไฟฟ้า, แรง และการหมุนวนของน้ำโลหะ ซึ่งการหมุนวนของน้ำโลหะ เป็นอีกเรื่องที่สำคัญสำหรับการเลือกใช้เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า แต่ทฤษฎีที่แน่ชัดที่จะใช้อธิบายยังไม่มี แต่จากการทดลองวัดการกระจายของกระแสที่เกิดขึ้นบนผิวโลหะ และแรงทำให้สรุปได้ว่า การหมุนวนนี้ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้า และแรงที่เกิดขึ้นกับผิวโลหะ ซึ่งแรงนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของโลหะในเบ้าเทียบกับขดลวด (สุนทร, 2534)

การเกิดส่วนโค้งบริเวณผิวของน้ำโลหะในเบ้า และการหมุนวนนั้น เป็นผลจากแรงทางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติของกระแสที่ไหลบนผิวโลหะ กับสนามแม่เหล็ก และมุมระหว่างกระแสกับสนามแม่เหล็ก ส่วนกระแสที่ไหลบนผิวโลหะ และสนามแม่เหล็กขึ้นอยู่กับ

ความถี่, พลังงาน, ความสามารถในการนำไฟฟ้าของโลหะ และตำแหน่งของโลหะในเบ้าเมื่อเทียบกับขดลวด ซึ่งสามารถสรุปเป็นข้อสังเกตได้ ดังนี้

1. ในกรณีความถี่สูง จะทำให้เกิดกระแสบนผิวโลหะหนาแน่น ที่บริเวณมุมของชั้นโลหะ
2. ในกรณีความถี่ต่ำ จะทำให้เกิดแรงดันแม่เหล็กสูง ทำให้ต้องเพิ่ม พลังงานในการหลอม
3. ส่วนโค้งของผิวน้ำโลหะในเบ้า ไม่ได้เป็นสิ่งชี้แสดงถึงการหมุนวน ของน้ำโลหะ เช่นในกรณีที่มีน้ำโลหะเต็มเบ้า และมีส่วนโค้งของผิวน้ำโลหะเพียงเล็กน้อย ก็อาจมีการหมุนวนอย่างรุนแรงภายในได้
4. ในกรณีที่ความถี่ต่ำ จะเกิดแรงหมุนวนสูง
5. พลังงานที่เกิดขึ้นบนส่วนปลายของชั้น โลหะ จะขึ้นอยู่กับความถี่ และตำแหน่งของชั้นโลหะในเบ้า เมื่อเทียบกับขดลวด

วัสดุทนไฟ/วัสดุครุเตา (Lining) ก็เป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญ เพราะนอกจากจะเป็นเบ้าสำหรับหลอมโลหะแล้ว ยังเป็นกำแพงป้องกันมิให้ขดทองแดง (Coil) หรือส่วนอื่นของเตาได้รับความเสียหาย อันสืบเนื่องจากเตาทะลุ

ประเภทของไลน์นึ่ง ที่ใช้กับเตาหลอมฯ สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม ดังนี้

1. กลุ่มที่มีส่วนผสมวัสดุประเภทเป็นกรดสูง (High Silica Materials)
2. กลุ่มที่มีส่วนผสมวัสดุประเภทเป็นด่างสูง (High Magnesite Materials)
3. กลุ่มที่มีส่วนผสมวัสดุประเภทเป็นกลางสูง (High Alumina Materials)
4. กลุ่มที่มีส่วนผสมวัสดุประเภทเป็นด่างและกลางสูง (Spinel Forming Materials)

หรือต่างกับกรด

ข้อพิจารณาสำหรับการเลือกใช้ไลน์นึ่ง

1. ต้องสามารถทนอุณหภูมิการใช้งานได้สูง

2. ต้องสามารถรับสภาพการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ เช่น จากเย็นไปสู่อุ่นเป็นต้น
3. ต้องทนต่อการกัดกร่อนของ Slag ได้
4. ต้องให้ความแข็งแรงทั้งในสภาพปกติ และเวลาใช้งาน

## 2.2 ระบบระบายความร้อนสำหรับเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

ในจำนวนสารที่ใช้เป็นตัวกลางในการระบายความร้อน น้ำเป็นตัวสำคัญที่ได้รับความนิยมมากที่สุด และระบบระบายความร้อนด้วยน้ำเรียกว่าระบบน้ำหล่อเย็น ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ ระบบน้ำหล่อเย็นแบบเปิดที่ไม่มี การหมุนเวียนน้ำกลับ, ระบบน้ำหล่อเย็นแบบปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับ และระบบน้ำหล่อเย็นแบบเปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับ (มันสิน และไพพรรณ, 2524)

ระบบน้ำหล่อเย็นแบบเปิดที่ไม่มี การหมุนเวียนน้ำกลับ เป็นระบบที่น้ำหล่อเย็นถูกใช้เพียงครั้งเดียว โดยน้ำเย็นจะไหลเข้าไปในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือเครื่องควบแน่น เพื่อรับความร้อนจากของเหลวที่มีอุณหภูมิสูง ทำให้น้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น และของเหลวมีอุณหภูมิลดลง จากนั้นน้ำที่ถูกใช้หล่อเย็นแล้ว จะถูกระบายทิ้งซึ่งส่วนใหญ่มักเป็นน้ำสาธารณะ

ระบบน้ำหล่อเย็นแบบปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับ เป็นระบบที่มีการหมุนเวียนน้ำหล่อเย็นอย่างต่อเนื่อง น้ำหล่อเย็นที่รับความร้อนมาแล้ว จะถูกส่งเข้าอุปกรณ์กำจัดความร้อน โดยจะต้องไม่ให้น้ำสัมผัสกับอากาศ ตัวอย่างได้แก่ ระบบซิลเลอร์ของเครื่องปรับอากาศ

ระบบน้ำหล่อเย็นแบบเปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับ (ในงานวิจัยนี้เป็นระบบลักษณะนี้) เป็นระบบที่คล้ายกับ ระบบน้ำหล่อเย็นแบบปิดที่มีการหมุนเวียนน้ำกลับ โดยมีความแตกต่างกันที่อุปกรณ์กำจัด ความร้อนออกจากน้ำหล่อเย็นที่ถูกใช้แล้ว จะเป็นแบบที่น้ำสัมผัสอากาศโดยตรง (สาเหตุการกัดกร่อน) เช่น หอระบายความร้อน (Cooling Tower, เป็นแบบที่ใช้อยู่ในโรงงานของบริษัทฯ) ระบบอื่นที่ใช้หลักการเดียวกันคือ Evaporative Condenser และ Surface Spray Unit เช่น Air Washer, Humidifier System

ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำงานได้ดี ต้องอาศัยระบบน้ำหล่อเย็นที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นความสำคัญของระบบหล่อเย็น จึงไม่ใช่เป็นสิ่งที่มองข้ามไปได้ และปัญหาต่างๆ ของระบบน้ำหล่อเย็น แม้มีจำกัดแต่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ประกอบด้วย

1. ปัญหาเรื่องตะกรัน
2. ปัญหาเรื่องการกัดกร่อนวัสดุ
3. ปัญหาเรื่องการสะสมตัวของฝุ่นละออง เมื่อกจลินทรีย์ และตะไคร่น้ำ

การแก้ไขปัญหาดังกล่าวเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากปัญหาเหล่านี้เป็นสาเหตุสำคัญ 2 ประการต่อระบบน้ำหล่อเย็น คือทำให้ส่วนประกอบของระบบน้ำหล่อเย็นเสียหาย-ชำรุด และทำให้เกิดความสิ้นเปลืองพลังงานเกินความจำเป็น (มันสิน และ ไพพรรณ, 2524)

ในระบบน้ำหล่อเย็นที่ใช้หอระบายความร้อน การสูญเสียน้ำเกิดขึ้น 2 ทาง คือโดยการระเหย และลมพัดพาไป น้ำที่โดนลมพัดพาไปมีคุณภาพเหมือนน้ำหมุนเวียน (มีแร่ธาตุปะปน) แต่ น้ำที่ระเหยกลายเป็นไอเป็นน้ำบริสุทธิ์ที่ไม่มีแร่ธาตุปะปน ดังนั้นการระเหยของน้ำจึงเป็นการสะสมแร่ธาตุไว้ในน้ำหมุนเวียน เนื่องจากต้องรักษาปริมาณน้ำหมุนเวียนให้คงที่ การเติมน้ำทดแทนจึงเป็นสิ่งจำเป็นและในขณะเดียวกันก็เป็นการเพิ่มความเข้มข้นของแร่ธาตุให้กับน้ำหมุนเวียนด้วย ปริมาณสารละลายในน้ำหมุนเวียนจะเพิ่มขึ้นตลอดเวลาจนกระทั่งถึงจุดหนึ่ง สารละลายบางอย่าง จะไม่สามารถละลายน้ำได้อีกแล้ว ทำให้เกิดการตกผลึก และในที่สุดก็กลายเป็นตะกรัน เกาะติดอยู่ที่ต่างๆ ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากประสิทธิภาพในการระบายความร้อนลดลง (มันสิน และ ไพพรรณ, 2524)

ในบางครั้งการสัมผัสระหว่างน้ำหล่อเย็นกับไอน้ำที่มีสารอินทรีย์ติดมาด้วย ทำให้น้ำหล่อเย็นได้รับสารอินทรีย์จากไอน้ำ ปริมาณสารอินทรีย์จะสะสมเพิ่มขึ้นด้วย พร้อมกับการสะสมตัวของแร่ธาตุ เนื่องจากสารอินทรีย์เป็นอาหารของจุลินทรีย์ต่างๆ จึงทำให้มีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เกิดขึ้นทั่วไป และจะก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ



แผงควบคุมปั๊มน้ำในระบบหล่อเย็น



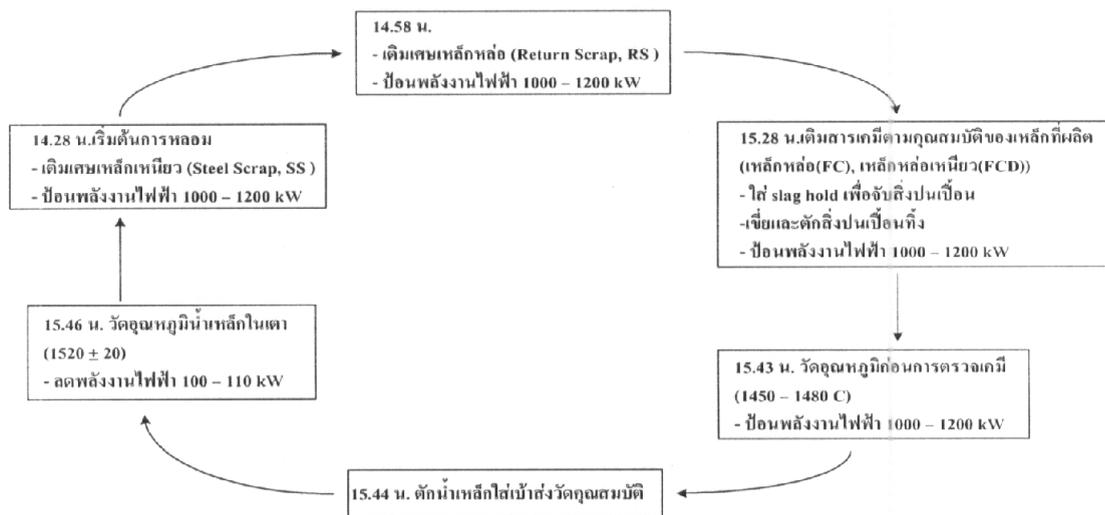
ท่อส่งน้ำจากระบบฯ สู่อ่างหลอม



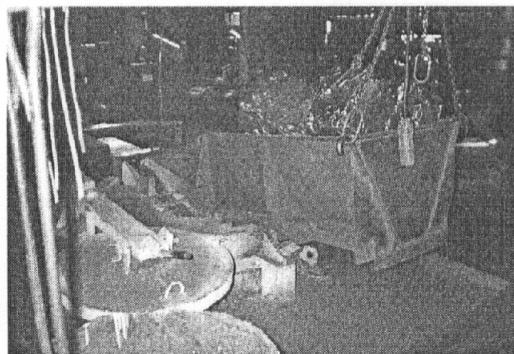
หอผึ่งเย็น/หอระบายความร้อน

ภาพที่ 3 แสดงภาพระบบหล่อเย็น บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด

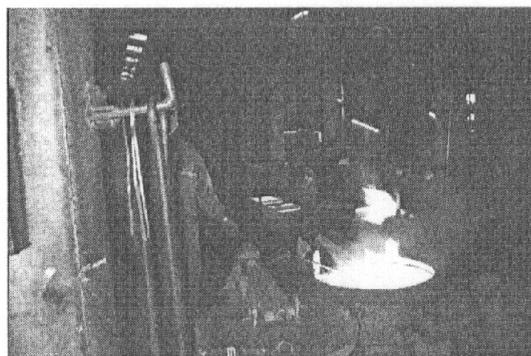
สำหรับเตาหลอมในงานวิจัยนี้ ลักษณะเตาที่ใช้ เป็นเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำไฟฟ้าชนิดไม่มีไส้ (Coreless Induction Furnace) ความถี่สูง (500 Hz) ขนาดกำลังผลิต (capacity) 2 ตัน ตั้งอยู่ที่โรงงาน สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ทำการหลอมเหล็กจากอุณหภูมิห้องให้ได้อุณหภูมิ  $1520 \pm 20$  องศาเซลเซียส ใช้เวลาหลอมโดยประมาณ 55 – 80 นาที ขนาดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาอยู่ที่ 1000 – 1200 กิโลวัตต์ ในโครงการแรกเป็นแบบเตาเดี่ยว ปัจจุบันเป็นแบบเตาคู่ คือเป็นเตาชนิด 2 ตัน 2 เตาวางคู่กัน และใช้ไฟร่วมกัน โดยเรียกเป็นเตาสอง – เตาสาม (เตาสามเป็นเตาที่ใช้ในงานวิจัยนี้) ขณะเตาสามมีการหลอมโลหะจะมีการป้อนไฟให้ และเมื่อเตาสองจะทำการหลอม จะทำการสวิตซ์ไฟไปให้กับเตา



ภาพที่ 4 แสดงตัวอย่าง ขั้นตอนการหลอม โลหะในหนึ่งรอบการทำงาน(การหลอม 1 ครั้ง)



ภาพที่ 5 แสดงภาพเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 6 แสดงการวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา (ขณะเจ้าหน้าที่จุ่มวัด)

ตารางที่ 2 ลักษณะพื้นฐานของเตาประเภทต่างๆ

Energy	Energy	Furnace	Means of heating	Main fields of application	
1. Fuel Fired	Shaft	Cupola	Coke. Charge in direct contact with fuel. Continuous melting	Cast iron; steel (duplex with converter)	
	Heart	Reverbatory (air)	Gas; oil; solid fuel	Non – Ferrous alloy; cast iron malleable	
	Crucible	Crucible Lift out or pit type	Gas; oil; solid fuel	}	Most alloys, except steel
		Tilting	Gas; oil; solid fuel		
		Bale out	Gas; oil	Light castings, especially die castings	

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Energy	Energy	Furnace	Means of heating	Main fields of application	
2. Electric	Heart	Arc	Direct arc	Arc to charge	Steel; cast iron
			Indirect arc (rocking)	Radiant arc	Non – Ferrous alloy; high alloy steel and special iron
	Crucible	Resistance	Resistor (static or rocking)	Radiant resistor rod	Steel; cast iron; copper alloys
			Resistance	Elements (shroud or immersion)	Non – Ferrous alloy; especially holding for die casting
	Melting Channel	Induction	Coreless induction	High frequency induction	Steel, especially alloy and small tonnage; Ni base
				Low frequency induction	Cast iron
		Cored induction	Low frequency induction	Non – Ferrous alloy; holding for die and light casting	

ตารางที่ 3 คุณสมบัติโดยสรุปของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ชนิดไม่มีไส้ (Coreless Induction Furnace)

คุณสมบัติ	ขนาดการหลอมสูงสุด	ลักษณะการกวน	ลักษณะการหลอม	การป้อนพลังงาน
ความถี่สูง (500 – 10,000 Hz)	5 ตัน (เคยมีผู้ผลิตทำได้ 60 ตัน)	ดี (Good)	กระทำได้ดีทันที	ส่วนใหญ่กระทำได้ดีทันที ยกเว้นบางผู้ผลิต
ความถี่ปานกลาง (150 – 500 Hz)	10 ตัน	รุนแรง (Very Vigorous)	สามารถเริ่มหลอมได้แต่ต้องอาศัย ความชำนาญ	กระทำได้ดีเมื่อใส่โลหะ (Charge) ขนาดใหญ่ พอประมาณ
ความถี่ต่ำ (50 Hz)	60 ตัน	รุนแรงมาก (Extreamly Vigorous)	ต้องมีน้ำโลหะในเบ้า	กระทำได้ดีต้องมีน้ำโลหะอยู่ 2 ใน 3 ส่วน ของเตา

### 3. การประหยัดพลังงาน

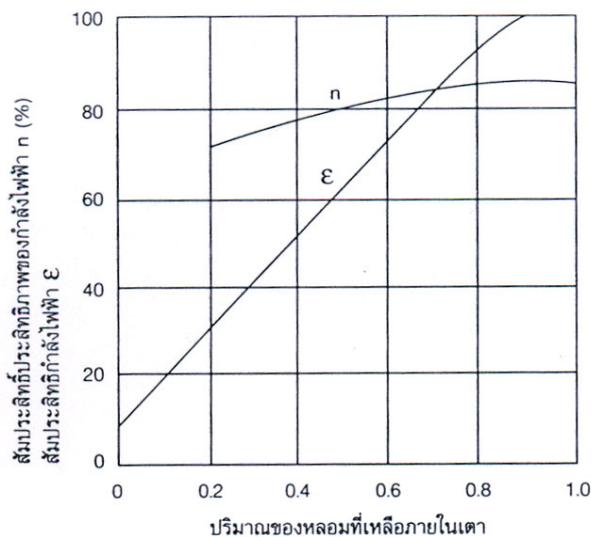
โมโตกิ (2544) การประหยัดพลังงานในส่วนเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำฯ กระทำได้ดังนี้

1. พยายามตั้งกำลังไฟฟ้าของเตาให้สูง เพื่อให้ความเร็วในการหลอมสูง และช่วงเวลาที่ไม่ได้ใช้ในการหลอม เช่น ใช้รักษาอุณหภูมิ ก็ให้ลดกำลังไฟฟ้าลง
2. ทาวิธีหุ้มฉนวนให้เตาเพื่อให้ความร้อนสูญเสียน้อยลง
3. เพื่อให้ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ป้อนให้เตามีค่าสูง ให้คงปริมาณน้ำโลหะให้มากที่สุดเพื่อให้  $n$  และ  $\varepsilon$  มีค่าสูง

กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิหลอมละลายในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ สามารถแสดงได้ดังนี้

$$E = \frac{P \cdot n \cdot s}{(P \cdot n \cdot \eta_e \cdot \varepsilon \cdot \eta_f) - P_L} \quad (2)$$

โดยที่	$P$	กำลังไฟฟ้าของเตา
	$n$	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการชดเชย เมื่อหากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใส่ให้เตา ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำโลหะ/ของหลอมที่เหลืออยู่
	$s$	ปริมาณความร้อนทางทฤษฎี (kWh/t, t: ตัน)
	$\eta$	ประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าของคอยล์
	$\varepsilon$	สัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการชดเชย เมื่อคำนวณประสิทธิภาพเชิงไฟฟ้าเฉลี่ย ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำโลหะ/ของหลอมที่เหลืออยู่
	$\eta_e$	ประสิทธิภาพของการเดินสาย (หม้อแปลง, รีแอกเตอร์, คาปาซิเตอร์ และการเดินสาย)
	$\eta_f$	ประสิทธิภาพของอุปกรณ์การเปลี่ยนความถี่
	$P_L$	ปริมาณความร้อนสูญเสียของเตา (kW)



ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $n$ ,  $\epsilon$  และปริมาณน้ำโลหะ/ของหลอมที่เหลือในเตา

หัวข้อต่างๆดังกล่าวข้างต้น สามารถกระทำได้ดังรายละเอียด ดังต่อไปนี้

การเลือกใช้เตาที่มีกำลังสูง นั่นคือมีกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยของปริมาตรเตา (kWh/ตัน) สูง จะสามารถใช้เวลาในการทำการหลอมน้อย ซึ่งทำให้ต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อหน่วยผลผลิต (kWh/ตัน) ดีขึ้น โดยความเข้มของกำลังไฟฟ้าของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ ในปัจจุบันมีค่าโดยประมาณ 1200 kWh/ตัน สำหรับเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำชนิดความถี่สูง (500 Hz) และ 300 kWh/ตัน สำหรับเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำชนิดความถี่ต่ำ

การเพิ่มกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่ให้กับเตา จะต้องคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

1. แรงดันไฟฟ้าของเตา ให้ใช้แทป (Tap) สูงสุด ซึ่งเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อให้มีการหลอมอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับการใช้เตาที่มีกำลังสูง
2. กรณีเตาแบบความถี่ต่ำ ถ้าปริมาณน้ำโลหะ/ของหลอม ในเตามากกว่า 60% ของค่าพิกัด จะสามารถใส่ค่ากำลังพิกัดได้ เพราะฉะนั้นการเติมวัสดุเข้าไปในขณะที่มีน้ำโลหะในเตาไม่ต่ำกว่า 50% แล้วค่อยถ่ายน้ำโลหะออก หมุนเวียนไปเช่นนี้ จะเป็นวิธีการที่เหมาะสม และเพื่อให้ได้เงื่อนไขดังกล่าวนี้ จะต้องรีบเพิ่มน้ำโลหะให้สูงกว่าความสูงของคอกยส์

การป้องกันการสูญเสียความร้อนเนื่องจากเตาเย็นตัวโดยไม่จำเป็นนั้น จะทำได้โดยการเปิดปิดฝาเตาอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้การปรับปริมาณลมของเครื่องกำจัดฝุ่นในเตาให้เหมาะสม สภาพภายในเตา อย่าให้มากเกินไป ก็เป็นวิธีการป้องกันไม่ให้เตาเย็นลงโดยไม่จำเป็น เช่น เครื่องกำจัดฝุ่นแบบ ring hood ที่ใช้กันทั่วไปนั้นจะทำให้สูญเสียกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 5% เมื่อเทียบกับการไม่ใช้เครื่องกำจัดฝุ่น

ทำการควบคุมอุณหภูมิอย่างเข้มงวดในช่วงอุณหภูมิที่ไม่ทำให้คุณภาพของน้ำโลหะต่ำลง ถ้าสามารถลดอุณหภูมิของน้ำโลหะที่พร้อมเทได้ จะเป็นการลดพลังงานไฟฟ้าส่วนที่ต้องการใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิได้ เช่น โดยทั่วไปจะให้ความร้อนจนอุณหภูมิของน้ำโลหะสูงเกินความจำเป็น โดยมีเหตุผลว่าต้องการให้น้ำโลหะไหลได้ดี, เพื่อการลดต่ำลงของอุณหภูมิระหว่างที่อยู่ในภาชนะ/กา รับน้ำโลหะ เป็นต้น ในกรณีของเหล็กหล่อถ้าสามารถลดอุณหภูมิของน้ำโลหะที่พร้อมเท ลง  $10^{\circ}\text{C}$  จะสามารถลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อหน่วยผลผลิตได้ 4 kWh/ตัน การป้องกันการลดอุณหภูมิของน้ำโลหะ กระทำได้โดยการใช้ภาชนะ/กา ที่กันความร้อนได้ดี นอกจากนี้การวัดอุณหภูมิระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิเพื่อทำการหลอม ถ้าทำซ้ำไปจะมีผลเสีย กรณีเตาฯ ชนิดความถี่ต่ำ ขนาด 5 ตัน (1-200 kW) อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น  $10^{\circ}\text{C}$ /นาที กรณีเตาฯชนิดความถี่สูง ขนาด 2 ตัน (1200 kW) อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้น  $25^{\circ}\text{C}$ /นาที

การใช้เครื่องอย่างต่อเนื่อง ในการคิดอัตราค่าไฟฟ้านั้น ส่วนที่เป็นอัตราพื้นฐาน (regular charge) นั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอัตราการใช้กำลังไฟฟ้า แต่ถูกกำหนดจากขนาดของอุปกรณ์เท่านั้น เพราะฉะนั้นการใช้เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน จะทำให้ค่าไฟฟ้าที่เป็นอัตราพื้นฐานต่อหนึ่งหน่วยของน้ำโลหะมีราคาถูกลง ในกรณีของเตาหลอมเหนี่ยวนำนั้นใช้วัสดุบุเตา (lining) อยู่เป็นปริมาณมาก เพราะฉะนั้นจะต้องเสียปริมาณความร้อนสำหรับวัสดุบุเตาในการจุดเตาใหม่ทุกครั้ง เช่น เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ ขนาด 5 ตัน จะใช้สารซิลิกาทำตัวเตาหนักประมาณ 1.2 ตัน ในการเผาให้ผนังเตามีอุณหภูมิเป็น  $1500^{\circ}\text{C}$  จะต้องใช้ความร้อนถึง 290 kWh ถ้าเป็นเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำชนิดความถี่สูง ขนาด 2 ตัน จะใช้สารซิลิกาหนัก 0.6 ตันจะต้องใช้ความร้อนถึง 145 kWh

การกำจัดสิ่งแปลกปนที่จะเกาะติดเข้าไปกับวัสดุที่ป้อนเข้าเตา วัสดุที่ป้อนเข้าเตามักจะมีสิ่งแปลกปน เช่น ทรายจากแบบหล่อ หรือออกไซด์เกาะติดเข้าไปด้วย ซึ่งสิ่งแปลกปนเหล่านั้นจะเป็นต้นเหตุของการเกิด slag โดยทั่วไปปริมาณของ slag จะมีประมาณ 2% ของปริมาณน้ำโลหะ แต่

เนื่องจากความจุความร้อนของ slag ที่อุณหภูมิ  $1500^{\circ}\text{C}$  มีค่าประมาณ  $800\text{ kWh/ตัน}$  ส่วนของเหล็กหล่อมีค่าประมาณ  $375\text{ kWh/ตัน}$  เพราะฉะนั้นการเกิด slag 2% จะเท่ากับ 4.3% ของเหล็กหล่อ จึงเป็นการสูญเสียพลังงานที่ค่อนข้างจะสูง นอกจากนี้การเกิด slag ยังทำให้เสียเวลาในการตัดออก จึงทำให้สูญเสียความร้อนทางฝาเตาเพิ่มขึ้น และยังทำให้อายุการใช้งานของวัสดุเตาล้นลงด้วย ฉะนั้นการขัดวัสดุโดยวิธี Shot blast หรืออื่นๆ เพื่อขจัดสิ่งแปลกปนจึงเป็นสิ่งจำเป็น

การลดค่าการสูญเสียในสายไฟ และคาปาซิเตอร์ ในกรณีเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ ค่ากำลังงานสูญเสียในสายเคเบิลหรือบัสบาร์ (bus bar) ที่เชื่อมระหว่างอุปกรณ์โดยทั่วไปจะมีค่าต่ำกว่า 0.5% อย่างไรก็ตามยังสามารถทำให้ต่ำลงได้ ด้วยวิธีการดังนี้

1. การจัดระยะห่างของอุปกรณ์ให้เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งระหว่างคาปาซิเตอร์ที่มีกระแสไหลสูงกับตัวเตาควรให้มีระยะสั้น
2. เมนบัสบาร์ (main bus bar) ในกรอบโครงของคาปาซิเตอร์ (capacitor frame) ควรดึงออกมาจากตรงกลางเพื่อป้องกันการไม่สมดุลของกระแส
3. กรณีของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำชนิดความถี่สูง จะมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าเนื่องจาก skin effect ด้วย เพื่อให้ค่าการสูญเสียนี้น้อยควรเลือกความหนาของบัสบาร์ ดังนี้

$$3.1 \text{ กรณีที่เป็นทองแดง : } 10/\sqrt{f} < T < 13\sqrt{f}$$

$$3.2 \text{ กรณีที่เป็นอลูมิเนียม : } 12/\sqrt{f} < T < 15\sqrt{f}$$

โดยที่  $T$  เป็นความหนาของบัสบาร์ (cm)

$f$  เป็นความถี่ (Hz)

การหุ้มฉนวนให้ตัวเตาอย่างเพียงพอ ในการป้องกันการแผ่ความร้อนจากเตา ถ้าใช้ฉนวนความร้อนชนิดที่เหมาะสม เช่น พวกรวมิกไฟเบอร์ (ceramic fiber) จะช่วยในการประหยัดพลังงานได้มากขึ้น เซรามิกไฟเบอร์เป็นเส้นใยทนไฟที่ตามปกติใช้ที่อุณหภูมิ  $1200 - 1400^{\circ}\text{C}$  หรืออาจจะใช้ที่  $1600^{\circ}\text{C}$  ในระยะเวลาสั้น เซรามิกไฟเบอร์ทำจากสารอลูมินา ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และซิลิกา ( $\text{SiO}_2$ ) ที่บริสุทธิ์ แล้วหลอมด้วยไฟฟ้าด้วยอุณหภูมิประมาณ  $2000^{\circ}\text{C}$  และเป่าด้วยอากาศที่มีแรงดันสูง เพื่อให้อยู่ในรูปเส้นใย

เซรามิกไฟเบอร์มีโครงสร้างที่มีอากาศอยู่ระหว่างเส้นไฟเบอร์ทนไฟ และอาศัยอากาศนี้ในการปิดกั้นความร้อน ฉะนั้นสัมประสิทธิ์ในการนำความร้อนต่ำมาก เมื่อใช้เป็นวัสดุในการสร้างเตาจะสามารถประหยัดพลังงานได้ 30 – 50 % เมื่อเทียบกับการใช้อลูมินไฟ และเซรามิกไฟเบอร์มีคุณสมบัติพิเศษ ดังนี้

1. ทนต่ออุณหภูมิสูง
2. น้ำหนักเบา และความจุความร้อนน้อย
3. มีสมรรถนะในการเป็นฉนวนกันความร้อนสูง
4. ทนต่อการเพิ่ม และการลดอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว
5. มีเสถียรภาพทางเคมีสูง
6. การใช้งานสะดวก
7. ใช้เป็น โครงสร้างของผนังเตา และความจุความร้อน

นอกจากนี้การที่มีน้ำหนักจำเพาะน้อยจึงเบา และทำ casing ทำได้ง่าย เซรามิกไฟเบอร์มีโครงสร้างต่างๆ กัน การใช้งานก็เป็นไปตามลักษณะพิเศษของโครงสร้างนั้นๆ ดังแสดงในภาพที่ 24 และตารางที่ 16

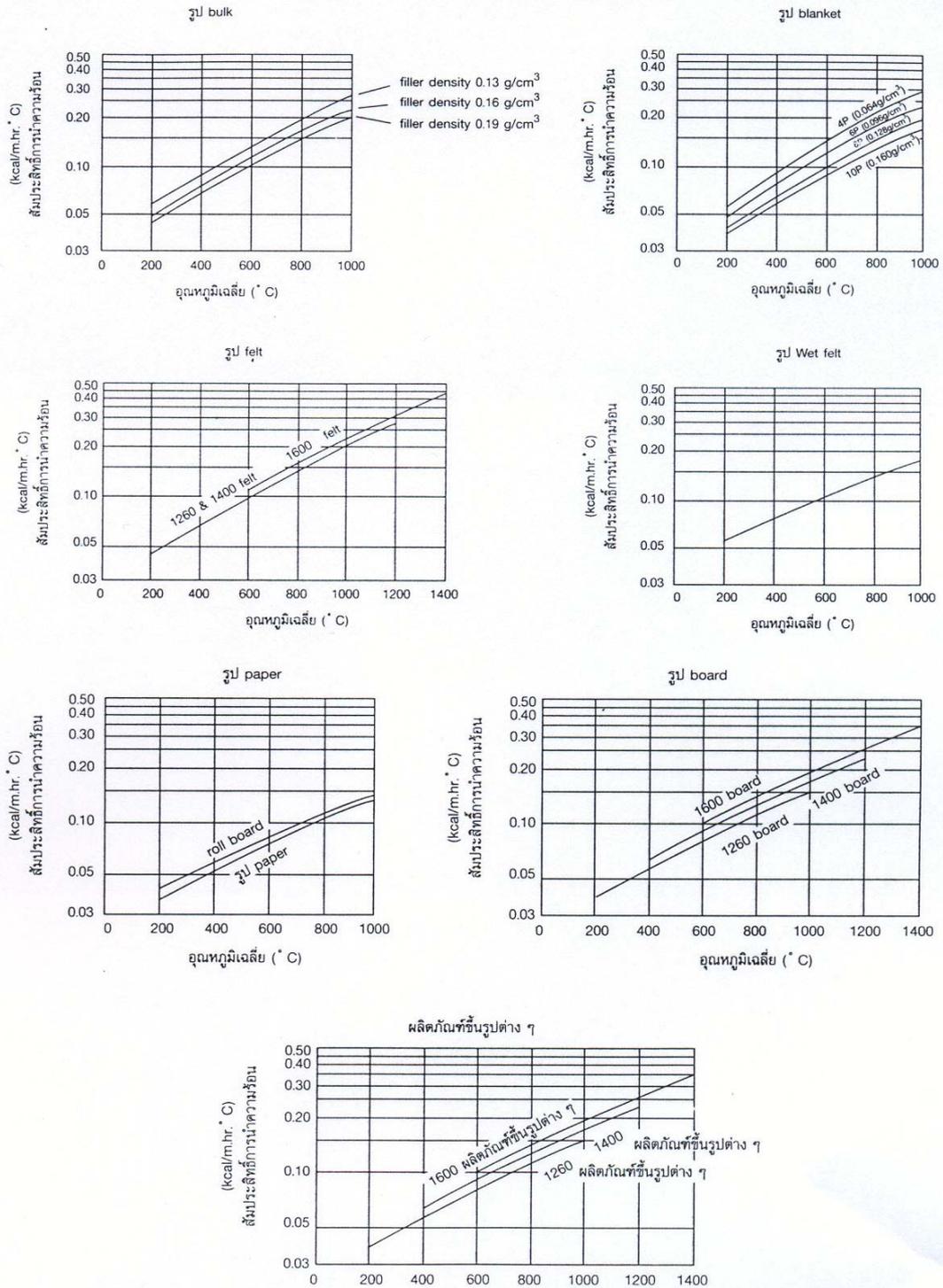
การประหยัดพลังงานในส่วนของระบบหล่อเย็น สามารถทำได้วิธีด้วยการดังนี้

1. ต้องมีบลิคดออฟ (Bleedoff : การระบายน้ำหมุนเวียนส่วนน้อย/บางส่วนทิ้ง เพื่อควบคุมระดับความเข้มข้นของสารต่างๆ ในน้ำหล่อเย็น รวมถึงน้ำที่สูญเสียไปเนื่องจากโดนลมพัด ระบบหล่อเย็นที่ดีต้องมีบลิคดออฟต่ำ หรือไม่มีเลย การไม่มีบลิคดออฟหมายความว่า น้ำที่ถูกลมพัดไปมีสารละลายติดออกไปด้วยในปริมาณที่สูงจนกระทั่งไม่ต้องทำบลิคดออฟเพิ่มอีกเลย ลักษณะนี้เป็นแบบอุดมคติ (มันสิน และไพพรรณ, 2524) เพื่อทำการกำจัดหรือควบคุมความเข้มข้นของส่วนประกอบต่างๆ 3 ชนิดในน้ำหล่อเย็น คือความเป็นด่าง, ความกระด้างทั้งหมด และซิลิกา ซึ่งส่วนประกอบ 3 ชนิดนี้เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดตะกรัน โดยตะกรัน จะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการระบายความร้อน และการสูญเสียพลังงาน

2. ควรมีการเติมสารเคมี ซึ่งอาจเป็นสารห้ามตะกรัน หรือสารละลายตะกรัน เพื่อลดอัตราการบดลีดออฟ (ปริมาตร/เวลา) และเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของเกลือแคลเซียม และสารอื่น ส่งผลต่อความสามารถในการละลาย มีผลให้เกิดการลดการตกผลึกซ้ำและน้อยลง

ตารางที่ 4 แสดงตัวอย่างรูปร่าง และลักษณะที่ใช้งานของ เซรามิกไฟเบอร์

รูปร่าง	ลักษณะที่ใช้หลัก	อุณหภูมิสูงสุด ( $^{\circ}C$ )	จุดหลอมเหลว ( $^{\circ}C$ )
Bulk	ใช้เป็นสารอุดช่องว่างเพื่อรับการขยายตัวของอิฐทนไฟที่บวมในเตา	1260	1730
Blanket	ใช้เป็นสารบุผนังภายในเตาแบบต่างๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรม	1260	1760
Wet felt	ใช้บุด้านในของท่อชม (duct)	1200	1760
Paper	ใช้เป็นปะเก็น (packing) ต่างๆ	1260	1760
Board	ใช้บุผนังภายในเตาแบบต่างๆที่ใช้ในอุตสาหกรรม	1600	2000
ผลิตภัณฑ์ขึ้นรูปต่างๆ	ใช้เป็นสารกันความร้อนใน panel heater (ที่ใช้ลวดนิโครม)	1600	2000



ภาพที่ 8 สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ เซรามิกไฟเบอร์รูปร่างต่างๆ

### แบบจำลองของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบปัญหาหลัก ในกระบวนการหลอมโลหะ/เหล็ก มีดังนี้

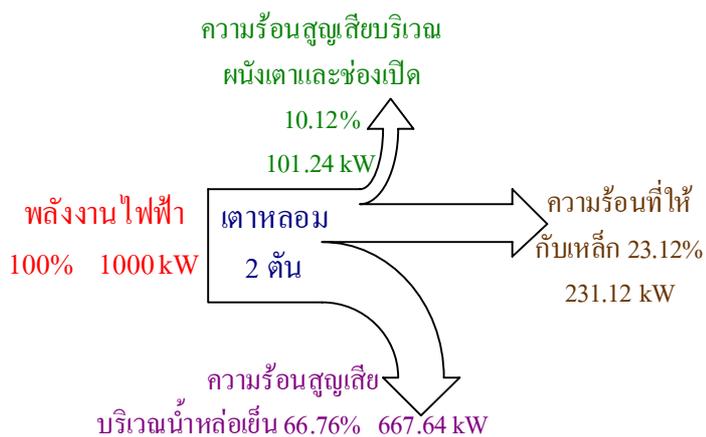
1. น้ำโลหะ/เหล็ก ที่ทำการวัดมีอุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส
2. ไม่สามารถวัดอุณหภูมิน้ำโลหะ/เหล็ก ระหว่างกระบวนการได้อย่างต่อเนื่อง
3. หัววัด (เทอร์โมคัปเปิล) มีอายุการใช้งานสั้น

และจากการศึกษาข้อมูลในโครงการแรก การประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะ จะทำโดยการวัดพลังงานเข้า – ออก แล้วนำมาใช้ประมาณค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่วัดได้ ในครั้งแรก โดยอุณหภูมิเริ่มต้นจะทำการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิล เมื่อโลหะภายในเตาหลอม ได้หลอมละลายหมดสิ้น และใช้สมการสมดุลความร้อนดังนี้

$$\text{พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า} = \text{ความร้อนให้กับเหล็ก} + \text{ความร้อนสูญเสียใน} \quad (3)$$

$$\text{ระบบน้ำหล่อเย็น} + \text{ความร้อนสูญเสียอื่นๆ}$$

พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่ให้นั้น เมื่อนำมาเขียนแผนภาพเชิงกิโลจูลสามารถแบ่งเป็นส่วนๆ ได้ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 8 เชิงกิโลจูลของความร้อนในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

จากภาพที่ 7 จะพบว่าความร้อนที่เข้าสู่เตาหลอม จะเข้าสู่เหล็กเพียงแค่ 23.12% หรือพูดได้ว่าประสิทธิภาพของเตาเท่ากับ 23.12% โดยที่ความร้อนส่วนมาก จะสูญเสียไปกับระบบน้ำหล่อเย็น ซึ่งคิดเป็นปริมาณถึง 66.76% ส่วนความร้อนที่เหลือจะสูญเสียไปตามช่องเปิด และผนังเตาคิดเป็น 10.12% (รัชทิน และ ประพันธ์, 2544)

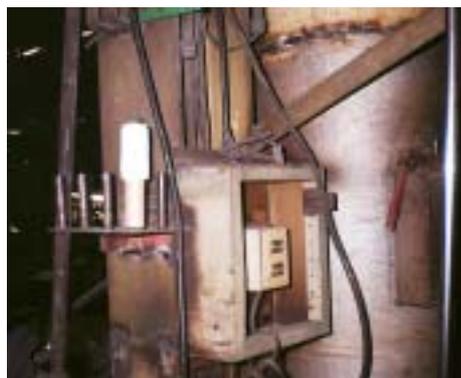
ฉะนั้นถ้าทราบค่าพลังงาน ไฟฟ้าที่ให้กับเตาหลอม, ค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียในระบบน้ำหล่อเย็น และค่าความร้อนที่เสียไปในส่วนอื่นๆ ก็จะสามารถประมาณค่าความร้อน หรือค่าอุณหภูมินของน้ำโลหะที่อยู่ในเตาได้ และค่าความร้อนที่โลหะภายในเตาได้รับนี้จะสามารถนำไปคำนวณค่าอุณหภูมิกของน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้น ได้ แต่ในความเป็นจริงนั้น ค่าพลังงานที่สูญเสียไปทางผนังเตาและช่องเปิดต่าง ๆ นั้น ไม่สามารถวัดได้ จึงจำเป็นจะต้องมีการประมาณค่า แต่เนื่องจากพลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้มีเพียง 10% ระบบการประมาณจึงไม่จำเป็นจะต้องมีความแม่นยำสูงมาก

จากเหตุผลข้างต้น การประมาณค่าอุณหภูมิกของน้ำโลหะที่อยู่ในเตา ที่ใช้สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ จึงได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์อื่นๆ แทนการวัดค่าอุณหภูมิกของน้ำโลหะโดยตรง แล้วนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้ มาวิเคราะห์ เพื่อหาค่าอุณหภูมิกของน้ำโลหะที่อยู่ในเตา ซึ่งวิธีการวัดลักษณะนี้เป็นการวัดด้วยวิธีการทางอ้อม โดยภาพที่ 8 จะแสดงอุปกรณ์ และตำแหน่งของการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ บริเวณเตาหลอม ซึ่งประกอบด้วย

1. พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าเตาหลอม
2. อุณหภูมิกบริเวณปากเตาหลอม
3. อุณหภูมิกของน้ำหล่อเย็นเข้า-ออก ของระบบหล่อเย็น
4. อุณหภูมิกบริเวณใต้เตาหลอม
5. อัตราการไหลของน้ำในระบบหล่อเย็น



พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าเตาหลอม



อุณหภูมิบริเวณปากเตาหลอม



อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า



อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก



อุณหภูมิบริเวณใต้เตาหลอม



อัตราการไหลของระบบน้ำหล่อเย็น

ภาพที่ 10 แสดงอุปกรณ์ และตำแหน่งของการรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ บริเวณเตาหลอม

## 1. สมการสมดุลความร้อน (Heat Balance)

ความร้อน (สุรนันท์, 2535) เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อุณหภูมิของวัตถุเปลี่ยนแปลงไป ปริมาณความร้อน (Quantity of Heat) มีหน่วยวัดหลายหน่วย แต่ที่ใช้เป็นปกติคือ (kcal) 1 kcal คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้ให้น้ำบริสุทธิ์ หนัก 1 kg ที่อุณหภูมิ  $15^{\circ}\text{C}$  ( $14.5 - 15.5^{\circ}\text{C}$ ) ให้มี อุณหภูมิ เพิ่มขึ้น  $1^{\circ}\text{C}$  สามารถแบ่งได้เป็นความร้อนสัมผัส และความร้อนแฝง โดยที่

ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) เป็นความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยน โดยที่สถานะไม่เปลี่ยน เราารู้สึกสัมผัสความร้อนนี้ได้ และทำการวัดได้โดยใช้ เทอร์โมมิเตอร์ เช่น น้ำเย็นที่  $32^{\circ}\text{F}$  ( $0^{\circ}\text{C}$ ) ถูกเพิ่มอุณหภูมิจนถึง  $212^{\circ}\text{F}$  ( $100^{\circ}\text{C}$ ) เป็นน้ำร้อน

ความร้อนแฝง (Latent heat) หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสาร โดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งมี 2 ประเภท คือ ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว และ ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ความร้อนแฝงของสารแต่ละชนิดมีค่าเฉพาะตัว ดังนี้

1. ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (Latent heat of fusion) หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนสถานะของแข็งให้กลายเป็นของเหลว ณ จุดหลอมเหลวของสาร เช่น ความร้อนแฝงของการหลอมเหลวของน้ำแข็งเท่ากับ 334.8 กิโลจูลต่อกิโลกรัม หมายความว่า ถ้าต้องการทำให้น้ำแข็ง 1 กิโลกรัม ที่  $0^{\circ}\text{C}$  เปลี่ยนเป็นน้ำ 1 กิโลกรัมที่  $0^{\circ}\text{C}$  ต้องใช้พลังงาน 334.8 กิโลจูล

2. ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (Latent heat of vaporization) หมายถึง ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้ในการเปลี่ยนสถานะของเหลวให้กลายเป็นไอ ณ จุดเดือดของของเหลว นั้น เช่น ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำเท่ากับ 2256 กิโลจูลต่อกิโลกรัม หมายความว่า ถ้าต้องการทำให้น้ำ 1 กิโลกรัม ที่  $100^{\circ}\text{C}$  เปลี่ยนเป็นไอน้ำ 1 กิโลกรัมที่  $100^{\circ}\text{C}$  ต้องใช้พลังงาน 2256 กิโลจูล

สารต่างชนิดกันมีความสามารถในการรับ หรือคายพลังงานความร้อนได้ต่างกัน และเรียกค่าพลังงานความร้อนที่ทำให้สารชนิดหนึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ว่า ความจุความร้อน (heat capacity "C") ของสารชนิดนั้นตามที่ใช้ในระบบเอสไอเป็นจูลต่อเคลวิน (J/K) โดยที่ค่าความจุความร้อนของสารดังกล่าวนี้ นอกจากจะต่างกันไปตามชนิดของสารแล้วยังขึ้นกับขนาดคือ

ปริมาตรหรือมวล รวมถึงจำนวน โมลอีกด้วย ดังนั้น จึงไม่เหมาะที่จะใช้ค่าความจุความร้อนของสาร เพื่อเป็นเกณฑ์สำหรับการเปรียบเทียบ เรามักจะพิจารณาสารหลายชนิดเปรียบเทียบกัน โดยใช้ค่า ความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลของสารแทน และเรียกปริมาณดังกล่าวนี้ว่า ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity “c”) ของสารนั้น โดยมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นจูลต่อ (กิโลกรัม-เคลวิน) “J/kg-K” แต่บางครั้งก็เรียกว่า ความร้อนจำเพาะ (specific heat “c”) ซึ่งก็คือปริมาณเดียวกันนั่นเอง นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการกล่าวให้สัมพันธ์กับจำนวน โมล (n) ของสาร ก็จะใช้ค่า ความจุความร้อนต่อ โมล โดยเรียกว่า ความจุความร้อนโมลาร์ (molar heat capacity “C”) ของสารนั้นก็คือ C/n และมีหน่วยเป็นจูลต่อโมล (J/mole) ในระบบเอสไอ

ถ้าสารชนิดหนึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น  $\Delta T$  เคลวิน โดยมีพลังงานความร้อนที่ได้รับเป็น Q จูล จะได้

$$Q = mc(\Delta T) = nC(\Delta T) \quad (4)$$

ความร้อนแฝง (latent heat) ของสาร ถ้าเป็นสารชนิดเดียวกันแต่มีมวลต่างกันก็จะมีค่า ความร้อนแฝงที่แตกต่างกัน ยิ่งถ้าเป็นสารต่างชนิดกัน ก็ย่อมมีค่าที่ไม่อาจมีเกณฑ์ที่ใช้เปรียบเทียบ กันได้ จึงกำหนด ค่าความร้อนแฝงต่อหน่วยมวลของสารเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ โดยเรียกว่า ความร้อนแฝงจำเพาะ (specific latent heat “L”) ของสารมีหน่วยเป็นจูลต่อกิโลกรัม (J/kg) ใน ระบบเอสไอ

ถ้าสารชนิดหนึ่ง ซึ่งมีมวล m กิโลกรัม และมีค่าความร้อนแฝงจำเพาะ L จูลต่อกิโลกรัม เมื่อ เปลี่ยนสถานะจนหมด โดยมีการรับหรือคายพลังงานความร้อน Q จูล ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ไม่ เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ขณะที่สารชนิดนั้นมีการเปลี่ยนเฟส จะได้

$$Q = mL \quad (5)$$

ตารางที่ 5 แสดงความจุความร้อนจำเพาะ และความจุความร้อน โมลาร์ของวัตถุบางชนิด (ค่าเฉลี่ย)  
รักษาความดันให้คงที่ ; วัตถุอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 0 °C ถึง 100 °C

โลหะ	ความจุความร้อนจำเพาะ (c)		M g mol <sup>-1</sup>	ความจุความร้อน
	J kg <sup>-1</sup> (°C) <sup>-1</sup>	Cal g <sup>-1</sup> (°C) <sup>-1</sup>		โมลาร์ C J mol <sup>-1</sup> (°C) <sup>-1</sup>
อลูมิเนียม	910	0.217	27.0	24.6
เบอริลเลียม	1970	0.417	9.01	17.7
ทองแดง	390	0.093	63.5	24.8
เอทานอล	2428	0.58	46.0	112.0
น้ำแข็ง (25 °C ถึง 0 °C)	2000	0.48	18.0	36.5
เหล็ก	470	0.112	55.9	26.3
ตะกั่ว 0 – 300 °C	130	0.031	207.0	26.9
ปรอท	138	0.033	201.0	27.7
เกลือ	879	0.21	58.5	51.4
เงิน	234	0.056	108.0	25.3
น้ำ	4190	1.00	18.0	75.4

ตารางที่ 6 แสดงความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวและการกลายเป็นไอ

	จุดหลอมเหลว ปกติ (1 K)	L <sub>F</sub> หลอมเหลว (1 kJ kg <sup>-1</sup> )	จุดเดือดปกติ (1 K)	L <sub>V</sub> กลายเป็นไอ (1 kJ kg <sup>-1</sup> )
ซิลิเนียม	3.5	5.23	4.216	20.9
ไฮโดรเจน	13.84	58.6	20.26	452
ไนโตรเจน	63.18	25.5	77.34	201
ออกซิเจน	54.36	13.8	90.18	213
ตะกั่ว	600.5	24.5	2023	871
น้ำ	273.15	335	373.15	2256
เงิน	1233.95	88.3	2466	2336
ทองแดง	1356	134	1460	5069

ศิริกัลยา (2548), โมโตกิ (2544) และ โยชิอิโกะ (2543) ความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ลักษณะการเคลื่อนที่ หรือการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) แบ่งออกได้เป็น 3 วิธี คือ การนำความร้อน (Heat Conduction) การพาความร้อน (Heat Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) การถ่ายเทความร้อนมักไม่ปรากฏเป็นวิธีใดวิธีหนึ่ง โดยเฉพาะแต่เป็นรูปแบบผสมของวิธีดังกล่าว

### 1.1 อัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อน

การนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านของแข็ง หรือวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสง เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิเกิดขึ้นในวัตถุก้อนนั้น รวมทั้งการถ่ายเทความร้อนในของเหลวหรือก๊าซเมื่อของเหลวหรือก๊าซนั้นไม่มีการเคลื่อนที่

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อน จะเพิ่มขึ้นถ้าผลต่างของอุณหภูมิด้านสูงและอุณหภูมิด้านต่ำมีมาก หรือพื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่านมีมาก แต่ถ้าระยะทางที่ความร้อนถ่ายเทยิ่งยาวขึ้น ความร้อนก็จะถ่ายเทได้น้อยขึ้น และอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนสามารถหาได้โดยอาศัยกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ซึ่งเขียนเป็นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อ 1 ชั่วโมง  $\dot{Q}$  (kcal/h, kW/s) และสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} (t_h - t_l) A \quad (6)$$

โดยที่  $\delta$  (m) เป็นความหนาของแผ่นราบ/ผนังเรียบ

$A$  ( $m^2$ ) เป็นพื้นที่ของการนำความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับแกน x

$t_h$  ( $^{\circ}C$ ) เป็นผิวด้านที่มีอุณหภูมิสูง

$t_l$  ( $^{\circ}C$ ) เป็นผิวด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ

$\lambda$  (kcal/mh $^{\circ}C$ , kW/mK) เป็นค่าคงที่ เรียกว่า สภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ถ้าค่านี้มีค่าสูงขึ้น ความร้อนที่ถ่ายเทโดยการนำความร้อนจะยิ่งมากขึ้น สภาพการนำความร้อน แสดงปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท โดยการนำความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลาผ่านแผ่นราบที่หนา 1m และผิวสองด้านมีอุณหภูมิต่างกัน 1 องศา

จากสมการ (6) จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการไฟฟ้าตามกฎของโอห์ม จะได้

$$Q = \frac{\Delta T}{R} \quad (7)$$

โดยที่  $\Delta T = T_h - T_l$  เป็นศักย์ภาพทางด้านความร้อน (Thermal Potential)

$R = \frac{\delta}{\lambda \cdot A}$  เป็นความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)

ตารางที่ 5 แสดงสภาพการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ และจะพบว่าสภาพการนำความร้อนของทองแดงมีค่าสูงมากคือ ประมาณ 7 เท่าของเหล็กเหนียวคาร์บอนธรรมดา ดังนั้นนิยมใช้ทองแดงเป็นวัสดุทำอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ตารางที่ 7 สภาพการนำความร้อนของวัสดุ

ชื่อวัสดุ	สภาพการนำความร้อน (kcal/mh°C)	ชื่อวัสดุ	สภาพการนำความร้อน (kcal/mh°C)
เหล็กเหนียวคาร์บอน	40 – 50	ตะกรันในหม้อไอน้ำ	0.07 – 2
ทองแดง	320 – 340	เขม่า	0.03 – 0.2
เหล็กเหนียวไร้สนิม	12 – 15	น้ำ	0.48 – 0.58
คอนกรีต	0.7 – 1.2	น้ำมัน	0.11 – 0.15
อิฐทนไฟ	0.1 – 0.3	ไอน้ำ	0.2 – 0.3
ใยหิน	0.04 – 0.08	อากาศ	0.02 – 0.03
ใยแก้ว	0.03 – 0.05		

## 1.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

การพาความร้อน (Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อน ที่เกิดจากการเคลื่อนพาของของไหล เช่นจากการไหลเวียนของน้ำในหม้อไอน้ำ เมื่ออุณหภูมิของภาชนะ/เตาหลอมสูงขึ้น จากนั้นน้ำด้านในที่สัมผัสกับภาชนะ/ผนังเตา ก็จะร้อนขึ้น น้ำที่ร้อนขึ้นนี้จะเบากว่าน้ำที่เย็นในส่วนอื่นๆ จะลอยตัวขึ้นและเกิดการพาความร้อน โดยวิธีนี้น้ำที่ร้อนขึ้นในภาชนะก็จะร้อนขึ้น การเคลื่อนย้ายของความร้อนระหว่างของแข็ง (ผิวของภาชนะ) และของเหลว/ของไหล (น้ำที่ร้อน) นี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ตามสาเหตุที่ทำให้เกิดการพา คือ

1. กรณีที่อุณหภูมิของไหลสูงขึ้นโดยการนำความร้อน และเกิดความแตกต่างของความหนาแน่นขึ้นภายในของไหลจนเกิดการไหลขึ้น เรียกว่า การพาแบบธรรมชาติ (Natural Convection)
2. กรณีที่ใช้เครื่องสูบน้ำหรือวิธีการอื่นๆ ทำให้เกิดการไหลขึ้น เรียกว่า การพาแบบบังคับ (Forced Convection)

ทั้งสองกรณี อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น จะเปลี่ยนค่าไปตามสภาพการไหล ดังนั้นถ้าการไหลของของไหลยิ่งสูง หรือผลต่างของอุณหภูมิระหว่างผนัง (ของแข็ง) และของไหลมีค่ายิ่งสูง อัตราการถ่ายเทความร้อนจะยิ่งมากขึ้น อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนสามารถหาได้โดยอาศัยกฎการระบายความร้อน/การเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งเขียนเป็นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อ 1 ชั่วโมง  $\dot{Q}$  (kcal/h, kW/s) และสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\dot{Q} = h \cdot (t_w - t_f) \cdot A \quad (8)$$

โดยที่  $A(m^2)$  เป็นพื้นที่ของผนังของแข็งที่สัมผัสกับของไหล

$t_w$  (°C) เป็นอุณหภูมิที่ผิวของผนังของแข็ง

$t_f$  (°C) เป็นอุณหภูมิของของไหลบริเวณที่อยู่ห่างออกไปจากผนังของแข็ง

$h$  (kcal/m<sup>2</sup>h°C, W/mK) เป็นค่าคงที่ เรียกว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Heat Transfer Coefficient)

การถ่ายเทความร้อนจะเปลี่ยนค่าไปตามลักษณะการไหลคือ แม้ว่าของไหลจะเป็นชนิดเดียวกัน ของไหลที่มีความเร็วในการไหลยิ่งสูง อัตราการถ่ายเทความร้อนก็ยิ่งสูงด้วย จึงไม่แสดงเป็นค่าคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุเช่นสภาพการนำความร้อน แต่จะทราบค่าโดยการประมาณ ถ้ากำหนดประเภทของไหลและสภาพการไหล และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนในของเหลว จะมีค่าสูงกว่าในก๊าซมาก ซึ่งเป็นผลโดยตรงของความหนาแน่น นอกจากนี้การถ่ายเทความร้อนในขณะที่มีการเปลี่ยนสถานะ จากของเหลวกลายเป็นไอ (การเดือด) หรือจากไอกลายเป็นของ

เหลว (การควบแน่น) จะมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสูงมากเมื่อเทียบกับกรณีไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

ตารางที่ 8 ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ชนิดของไหล	ประเภทการพาความร้อน	(kcal/m <sup>2</sup> h°C)
อากาศ	การพาแบบธรรมชาติ	3 – 30
	การพาแบบบังคับ	10 – 500
น้ำ	การพาแบบบังคับ	200 – 5,000
	ขณะเดือด	4,000 – 6,000
ไอน้ำ	ควบแน่น	7,000 – 12,000

ตารางที่ 9 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติในอากาศ ณ ความดันบรรยากาศ

พื้นผิว	$h$ (1 W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
แผ่นแนวระดับ, หันหน้าขึ้นบน	2.491 ( $\Delta T$ ) <sup>1/4</sup>
แผ่นแนวระดับ, หันหน้าลงล่าง	1.314 ( $\Delta T$ ) <sup>1/4</sup>
แผ่นแนวตั้ง	1.775 ( $\Delta T$ ) <sup>1/4</sup>
ท่อแนวระดับหรือแนวตั้งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง D	4.186 $\left(\frac{\Delta T}{D}\right)^{1/4}$

### 1.3 อัตราการแผ่รังสีความร้อน

วัตถุทั้งหลายจะแผ่รังสีพลังงานความร้อนจากผิวออกสู่ช่องว่าง ในปริมาณที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิของวัตถุนั้นๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีตัวกลาง ในการถ่ายเทความร้อน การแผ่รังสีพลังงานนี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ซึ่งปริมาณการแผ่รังสีความร้อนต่อ 1 ชั่วโมง  $\mathcal{Q}$  (kcal/h, kW/s) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\mathcal{Q} = \epsilon \cdot c_b \cdot A \left( \frac{T}{100} \right)^4 \quad (9)$$

โดยที่  $A(m^2)$  เป็นพื้นที่ผิวของวัตถุ  
 $T(K)$  เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ของผิว  
 $\epsilon$  เป็นค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของความร้อนที่ดูดได้กับ  
 รังสีความร้อนที่ได้รับทั้งหมด เช่น ในกรณีของท่อเหล็กเหนียว  $\epsilon$  มีค่าประมาณ 0.8 – 0.86  
 $c_b$  เป็นค่าคงที่สเตฟาน – โบลทซ์มันน์ (Stefan – Boltzmann Constant) มีค่าเท่ากับ  
 $5.7 \times 10^{-8} (W/m^2 K^4)$

ตารางที่ 10 ค่า Emissivity ของผิวประเภทต่างๆ

วัตถุ	อุณหภูมิ ( $^{\circ}C$ )	ค่า Emissivity
Lamp Black	อุณหภูมิห้อง	0.97
Platinum Black	อุณหภูมิห้อง – 1,650	0.97
ผิวทาสีแก่	อุณหภูมิห้อง	0.95
สีอลูมิเนียม	อุณหภูมิห้อง	0.4 – 0.7
ผิวขัดมันของเหล็ก	อุณหภูมิห้อง	0.06
	540	0.12
แผ่นเหล็กเหนียวรีด	อุณหภูมิห้อง	0.56
เหล็กหล่อ (ผิวดำ)	อุณหภูมิห้อง	0.7 – 0.8
ผิวขัดมันของทองเหลือง	อุณหภูมิห้อง	0.09
อิฐทนไฟ	อุณหภูมิห้อง – 1,000	0.85
อิฐแดง	อุณหภูมิห้อง – 1,000	0.90

#### 1.4 การถ่ายเทความร้อนรวม

ปรากฏการณ์ที่ความร้อนถ่ายเทจากของไหลด้านหนึ่ง ผ่านผนังของแข็งไปยังของไหล  
 อีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 9 เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนรวม (Combined Heat Transfer) ซึ่ง  
 ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อ 1 ชั่วโมง  $\mathcal{Q}$  (kcal/h) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\mathcal{Q} = K \cdot (t_1 - t_2) \cdot A \quad (10)$$

โดยที่  $A(m^2)$  เป็นพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของของแข็ง

$t_1$  (°C) เป็นอุณหภูมิของของไหลอุณหภูมิสูง

$t_2$  (°C) เป็นอุณหภูมิของของไหลอุณหภูมิต่ำ

$K$  (kcal/m<sup>2</sup>h°C) เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient)

เช่น ความร้อนจากน้ำเหล็ก ช่วง  $t_1$  (°C) -  $t'_1$  (°C) ช่วงนี้ความร้อนจะถ่ายเทจากน้ำเหล็กไปยังผนังเตาโดยการพา และการแผ่รังสีพร้อมๆ กัน ดังนั้น

$$\begin{aligned} Q &= Q_c + Q_r \\ &= \frac{T_1 - T'_1}{R_1}, \quad R_1 = \frac{1}{hA} + \frac{1}{\epsilon c_b A} \end{aligned} \quad (11)$$

ช่วง  $t'_1$  (°C) -  $t'_2$  (°C) เป็นช่วงที่สภาวะที่ค่าต่างๆ คงที่ หรือ ไม่แปรตามเวลา (Steady State) ความร้อนก็จะไหลผ่านผนังเตาโดยการนำความร้อน ในอัตราเดียวกับที่ไหลจากน้ำเหล็กมายังผิว ดังนั้น

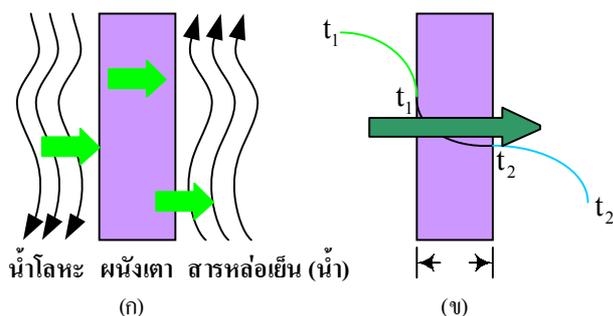
$$\mathcal{Q} = \frac{(t'_1 - t'_2)}{R_2}, \quad R_2 = \frac{\delta}{\lambda A} \quad (12)$$

ช่วง  $t'_2$  (°C) -  $t_2$  (°C) เป็นช่วงที่ความร้อนไหลผ่านผนังแล้ว และจะไหลไปยังสารหล่อเย็นโดยการพาความร้อน ดังนั้น

$$\mathcal{Q} = \frac{(t'_2 - t_2)}{R_3}, \quad R_3 = \frac{1}{hA} \quad (13)$$

จากสมการ (11), (12) และ (13) สามารถหาการถ่ายเทความร้อนรวมได้ดังนี้

$$\mathcal{Q}_{total} = \frac{A(t_1 - t_2)}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad K = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (14)$$



ภาพที่ 11 การถ่ายเทความร้อนรวม

(ก) การไหลของความร้อน      (ข) การถ่ายเทความร้อนรวม

ในการพิจารณาสมดุลความร้อน จะพิจารณาจากสมการสมดุลความร้อนดังนี้

$$\text{Energy input} = \text{Energy stored} + \text{Energy loss} \quad (15)$$

$$P_{in} = \dot{Q}_S + \dot{Q}_T + \dot{Q}_W + \dot{Q}_C + \dot{Q}_R + \dot{Q}_{th} \quad (16)$$

ตารางที่ 11 แสดงสมการสมดุลความร้อนของเตา

ความร้อน (kW)	สัญลักษณ์และสมการ
ความร้อนเข้า	$P_{in}$
ความร้อนที่ให้กับเหล็ก	$\dot{Q}_S = \frac{m_S \cdot L}{\Delta t} + \frac{m_S \cdot C_{p,S} \cdot \Delta T_S}{\Delta t}$ (17)
ความร้อนสูญเสียในหม้อแปลง	$\dot{Q}_T = 4 \cdot I_{INV}^2 \cdot R_{CU}$ (9) (18)
ความร้อนสูญเสียกับระบบหล่อเย็น	$\dot{Q}_W = \dot{M}_W \cdot C_{p,W} \cdot \Delta T_W$ (19)
ความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อน	$\dot{Q}_C = \frac{T_S - T_W}{R} \cdot 10^{-3}$ (20)
ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสี	$\dot{Q}_R = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot A \cdot \epsilon \cdot \left(\frac{T_S}{100}\right)^4$ (21)
ความร้อนสูญเสียอื่นๆ	$\dot{Q}_{th}$

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> )
	$R_{cu}$	=	ความต้านทานของขดลวดตัวนำในหม้อแปลง (ohm)
	$I_{inv}$	=	กระแสอินเวอร์เตอร์ (Amp)

## 2. แบบจำลองทางความร้อนของเตา

ข้อมูลในงานวิจัยเดิมแบบจำลองในสมการที่ (15) และ (16) ยังมีความเที่ยงตรงเพียงพอต่อการใช้งาน แต่เวลาที่ใช้งานได้นั้นสั้นไป อีกทั้งพบว่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นมิได้วัดอย่างต่อเนื่อง และยังพบว่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นไม่คงที่ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในปัจจุบันยังคงใช้สมมูลความร้อน และสมการสมมูลความร้อนเดิม แต่ได้เพิ่มการติดตั้งอุปกรณ์การวัดอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเป็นแบบต่อเนื่องเพิ่มเติม รวมถึงการวัดค่าปัจจัยอื่นๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ให้เป็นการวัดอย่างต่อเนื่อง (Real Time) เพื่อควบคุมค่าพลังงานความร้อน ที่สูญเสียไปกับระบบน้ำหล่อเย็น และทำให้การประมาณค่าอุณหภูมิ มีความแม่นยำมากขึ้น

รัชทิน และ ประพันธ์ (2544) ความร้อนที่ให้กับเหล็ก ในขั้นตอนการวัดอุณหภูมิหน้าเหล็ก นั้น เป็นขั้นตอนที่เหล็กในเตาหลอมกลายเป็นของเหลวหมดแล้ว เพราะฉะนั้นความร้อนในส่วนของความร้อนแฝง (Latent Heat) จึงไม่มี จะมีเฉพาะในส่วนของความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (อุณหภูมิจริง, Sensible Heat) ซึ่งประกอบไปด้วยความร้อนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 11 ดังนั้นจึงสามารถตัดความร้อน ในส่วนของความร้อนแฝงทิ้งไปได้ และพบว่าค่าความร้อนต่างๆ จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันของสมการทางความร้อน ดังนี้

1. ความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น เป็นฟังก์ชันของผลต่างของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา  $f(\Delta T_S)$
2. ความร้อนที่สูญเสียในหม้อแปลง พบว่าจะเป็นฟังก์ชันของค่าความต้านทานและกระแส ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าความร้อนที่สูญเสียในหม้อแปลงจะเป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า  $f(P_{in})$
3. ความร้อนสูญเสียกับระบบหล่อเย็น ค่าความร้อนในส่วนนี้คือความร้อนที่ใส่ถ่ายเทความร้อนให้กับระบบคอยล์ของเตา ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น  $f(\dot{M}_w, T_w)$
4. ความร้อนสูญเสียจากการนำความร้อนนั้นก็คือความร้อนจากน้ำเหล็กในเตาผ่านผนังเตาออกมา ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา  $f(\Delta T_S)$
5. ความร้อนสูญเสียจากการแผ่รังสีพบว่าจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตายกกำลังสี่ซึ่งจากการศึกษาจากสมดุลความร้อนของเตาชนิดเดียวกันนี้พบว่ามีค่าน้อย จึงให้รวมกับค่าความร้อนสูญเสียอื่นๆ และประมาณให้มีค่าคงที่ (heat-loss)

เมื่อแทนค่าตัวแปรที่วัดค่าได้ กับตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันของสมการทางความร้อนข้างต้นลงในสมการ (16) จะได้รูปแบบสมการ ดังนี้

$$P_{in} = \frac{m_s \cdot C_{p,s} \cdot \Delta T_S}{\Delta t} + \dot{M}_w \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_w + f(P_{in}) + f(\Delta T_S) + \text{heatloss} \quad (22)$$

แทนค่าคงที่  $a$  (อัตราส่วนความร้อนสูญเสียในหม้อแปลง) ลงในความร้อนสูญเสียในหม้อแปลงที่เป็นฟังก์ชันของพลังงานป้อนเข้า และแทนค่าคงที่  $b$  (อัตราส่วนความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนผ่านผนังเตา) ค่าคงที่ทั้งสองหาได้จากการทดลอง ลงในความร้อนสูญเสียเนื่องจากการนำความร้อนที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิเหล็กในเตา จะได้

$$P_{in} = \frac{m_s \cdot C_{p,s} \cdot \Delta T_S}{\Delta t} + \dot{M}_w \cdot C_{p,w} \cdot \Delta T_w + a \cdot P_{in} + b \cdot \Delta T_S + \text{heatloss} \quad (23)$$

ทำการลดรูปของสมการ (23) จะได้

$$P_{in} = c_1 \cdot \Delta T_s + c_2 \cdot \dot{M}_w \cdot \Delta T_w + c_3 \quad (24)$$

โดยที่

$$c_1 = \frac{\left( \frac{m_s \cdot C_{P,S}}{\Delta t} + b \right)}{(1-a)}$$

$$c_2 = \left( \frac{C_{P,W}}{1-a} \right)$$

$$c_3 = \left( \frac{\text{heatloss}}{1-a} \right)$$

จัดรูปสมการเพื่อหาค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอม (แบบจำลองทางความร้อนของเตาหลอม) จะได้

$$T_s(i) = \frac{P_{in}(i) + c_1 \cdot T_s(i-1) - c_2 \cdot \dot{M}_w(i) \cdot \Delta T_w(i) - c_3}{c_1} \quad (25)$$

และมีเงื่อนไขว่า

$$c_2 = \frac{P_{in,min} - c_3}{\dot{M}_{w,average} \cdot \Delta T_{w,average}}$$

### การหาค่าเหมาะสมโดยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม

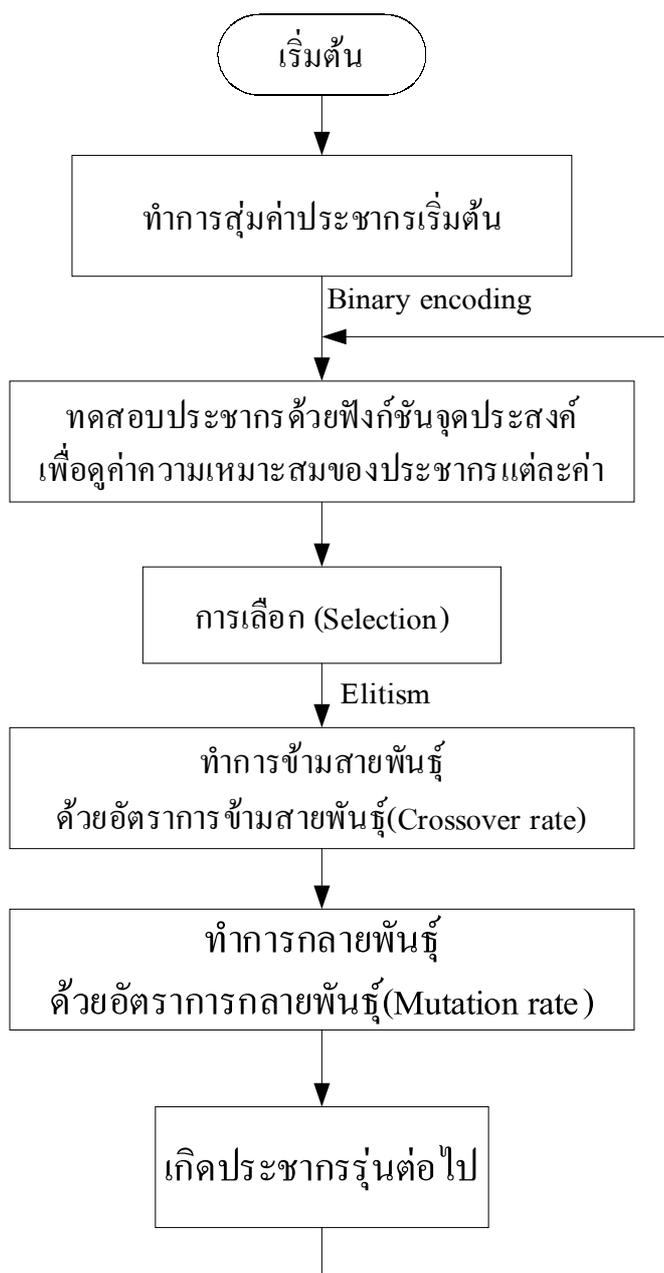
เจเนติกอัลกอริทึม เป็นอัลกอริทึมชนิดพิเศษของการค้นหาแบบสโตแคสติก (Stochastic search) ซึ่งตั้งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีการวิวัฒนาการของธรรมชาติ นั่นคือเจเนติกอัลกอริทึมเป็นวิธีที่เลียนแบบกลไกการคัดเลือกสายพันธุ์ทางธรรมชาติของสิ่งมีชีวิต โดยที่พันธุ์ที่ดีกว่าจะถูกคัดเลือกให้ดำรงอยู่ ซึ่งถูกคิดค้นโดย John Holland แห่งมหาวิทยาลัยมิชิแกน สหรัฐอเมริกา ในปี 1975 (Holland J.H., 1975)

เจเนติกอัลกอริทึมถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับออปติไมซ์เซชัน (Optimization) เพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด ภายใต้เงื่อนไข (Constraint) และฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function)

เจเนติกอัลกอริทึม มีโครงสร้างเริ่มต้นจาก ยีน (Gene) หลายๆ ยีน เรียงต่อกันกลายเป็น โครโมโซม (Chromosome) แต่ละโครโมโซม จะเรียกว่าประชากร (Population)

เมื่อนำไปใช้ในแก้ปัญหา จะเริ่มจากการสุ่มประชากรเริ่มต้นขึ้นมาจำนวนหนึ่งก่อน แล้วนำประชากรแต่ละอันไปทดสอบกับฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) เพื่อดูค่าความเหมาะสม (Fitness Value) ของประชากรที่ผ่านการทดสอบ (ไม่ได้หมายความว่าประชากรที่ผ่านการทดสอบนั้น มีความเหมาะสมที่สุด หากแต่ประชากรแต่ละค่า จะมีความเหมาะสมเฉพาะแต่ละค่า) เมื่อทราบค่าความเหมาะสมแล้ว จะทำการคัดเลือกพ่อแม่พันธุ์ (Parent Selection) จากประชากรที่ผ่านการทดสอบ และมีค่าความเหมาะสม ด้วยวิธีการเลือก ซึ่งวิธีการเลือกนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี สำหรับในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีอีลิติซึม (Elitism) ซึ่งเป็นวิธีการเลียนแบบ (Copying) โครโมโซมที่ดีที่สุด ในลำดับแรก (โครโมโซมพ่อแม่) มาสองค่าแล้วส่งไปยังประชากรรุ่นลูกหลาน (Offspring)

จากนั้นทำการสร้างประชากรรุ่นใหม่ (รุ่นลูกหลาน) โดยเลือกพ่อ และแม่พันธุ์จากประชากรรุ่นพ่อแม่ สำหรับในงานวิจัยนี้ การเลือกพ่อแม่พันธุ์คือ การเลือกโครโมโซม ( $c_1, c_3$ ) 2 โครโมโซมที่ดีที่สุด พิจารณาจากค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุด 2 ค่าแรก จากนั้นนำประชากรในรุ่นพ่อแม่ที่เหลือรวมทั้ง 2 ค่าที่ถูกเลือกแล้ว มาทำการข้ามพันธุ์ (Crossover) และ/หรือวิธีการกลายพันธุ์ (Mutation) เมื่อผ่านขั้นตอนการเลือก, การข้ามพันธุ์ และ/หรือวิธีการกลายพันธุ์แล้ว ประชากรใหม่จะแทนที่ (Replacement) ในรุ่นพ่อแม่ที่มีความด้อยกว่า นั่นคือจะได้ประชากรรุ่นใหม่ ทำกระบวนการเหล่านี้ไปเรื่อยๆ จนถึงรอบสุดท้ายที่ได้กำหนดไว้ หรือจนกว่าจะได้ค่าที่อยู่ในขอบเขตที่ต้องการ นั่นคือโครโมโซมที่ได้จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหา กระบวนการเจเนติก มีขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 Flow chart การดำเนินการของเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA)

## 1. การเข้ารหัสของโครโมโซม (Encoding of Chromosome)

มีวิธีการจำนวนมาก สำหรับการเข้ารหัสโครโมโซมในเจเนติกอัลกอริทึม ซึ่งแต่ละโครโมโซม ประกอบไปด้วยยีน (Gene) จำนวนมาก เช่น

1. การเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง (Binary Encoding)
2. การเข้ารหัสแบบการเปลี่ยนลำดับ (Permutation Encoding)
3. การเข้ารหัสแบบประเมินค่า (Value Encoding)
4. การเข้ารหัสแบบแผนผังต้นไม้ (Tree Encoding)

การเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง (Binary Encoding) เป็นการทำงานที่นิยมมาก เพราะจุดเริ่มต้นของเจเนติกอัลกอริทึมก็ใช้การเข้ารหัสชนิดนี้ การเข้ารหัสชนิดนี้ทุกๆ โครโมโซมเป็นแถวของบิต (0, 1) สำหรับในงานวิจัยนี้ ใช้การเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง

โครโมโซม A : 110000001010101011110

โครโมโซม B : 110100011110100010101

การเข้ารหัสแบบการเปลี่ยนลำดับ (Permutation Encoding) สามารถใช้ในปัญหาการตั้งชื่อ เช่น ปัญหาการเดินทางของพนักงานขาย ปัญหาการสั่งซื้อที่ซับซ้อน การเข้ารหัสชนิดนี้ทุกๆ โครโมโซมเป็นแถวของจำนวน ซึ่งจำนวนเหล่านั้นจะเรียงลำดับตามเหตุการณ์

โครโมโซม A : 9 8 7 5 6 4 1 2

โครโมโซม B : 2 5 8 1 9 7

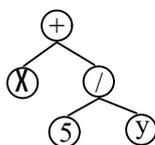
การเข้ารหัสแบบประเมินค่า (Value Encoding) สามารถใช้ในปัญหาที่การประเมินค่าบางค่ามีความยาก และการใช้การเข้ารหัสแบบเลขฐานสองสำหรับปัญหาชนิดนี้ อาจจะยากมากๆ การเข้ารหัสชนิดนี้ ทุกๆ โครโมโซมเป็นแถวของค่าบางค่า อาทิเช่น โครงสร้างจำนวน จำนวนจริง หรือตัวอักษร

โครโมโซม A : 1.8579 6.2354 0.9517 3.2580

โครโมโซม B : ABCDDENEJDIEEKAC

การเข้ารหัสแบบแผนผังต้นไม้ (Tree Encoding) โดยส่วนมากจะถูกใช้สำหรับการพัฒนาโปรแกรม หรือสูตรทางคณิตศาสตร์ สำหรับกระบวนการเขียน และทดสอบโปรแกรมทางเจเนติก การเข้ารหัสชนิดนี้ทุกๆ โครโมโซมเป็นแผนผังต้นไม้ของบางวัตถุประสงค์ เช่น ฟังก์ชัน หรือคำสั่ง ในภาษาของกระบวนการเขียนและทดสอบโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์

โครโมโซม A :



## 2. การเลือก (Selection)

เป็นกระบวนการเพื่อเลือกโครโมโซมที่ดีที่สุดภายในกลุ่มประชากรทั้งหมด โดยขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะสมของโครโมโซมเหล่านั้น โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่า ก็จะมีโอกาสถูกเลือกมากกว่า วิธีการสำหรับการเลือกมีด้วยกันหลายวิธี ดังเช่น

1. การเลือกแบบ Roulette Wheel
2. การเลือกแบบ Rank
3. การเลือกแบบ Steady – State
4. การเลือกแบบ Elitism

การเลือกแบบ Roulette Wheel หรือที่เรียกว่าวิธีวงล้อลูเร่ต เป็นวิธีที่นำเอาโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ ถ่ายทอดไปยังรุ่นต่อไป (รุ่นลูกหลาน) โดยตรง

การเลือกแบบ Rank หรือที่เรียกว่าวิธีการจัดอันดับ เป็นวิธีที่กระทำโดย นำโครโมโซมเรียงให้มีอันดับ  $r$  ตามความเหมาะสม โครโมโซมที่มีความเหมาะสมที่น้อยที่สุด จะมีอันดับ 1 ในขณะที่

โครโมโซมที่มีความเหมาะสมที่สุดจะมีอันดับ  $N$  โดยที่  $N$  คือโครโมโซมทั้งหมด โอกาสในการถูกเลือกของโครโมโซม  $P(S)$  จะมีค่าเท่ากับ

$$P(s) = \frac{r}{E_{avg}} \quad (26)$$

โดยที่  $E_{avg}$  เป็นค่าเฉลี่ยของค่าความเหมาะสม (*Fitness Value*) ของโครโมโซมทั้งหมด ซึ่งโอกาสในการถูกเลือกจะมากขึ้นตามโครโมโซมที่มีลำดับค่าความเหมาะสมมากขึ้น

การเลือกแบบ Stead – State แนวคิดหลักของการเลือกแบบนี้ อยู่ที่ว่า ส่วนใหญ่ของโครโมโซมควรมีชีวิตรอดไปสู่รุ่นต่อไป (Next Generation) นั่นคือในทุกๆรุ่น (Generation) จะถูกเลือกโครโมโซมมา 2-3 โครโมโซม ถ้ามีโครโมโซมเป็นแบบ good – with high fitness ก็จะใช้สำหรับการสร้างลูกหลานใหม่ (new offspring) ในขณะที่เดียวกันบางโครโมโซมเป็นแบบ bad – with low fitness ก็จะถูกกำจัดทิ้ง แล้วให้ลูกหลานที่ถูกสร้างใหม่มาแทนที่ในตำแหน่งที่ว่างเหล่านั้น

การเลือกแบบ Elitism เป็นการเลียนแบบ (Copying) โครโมโซม  $2n$ ,  $n = 1, 2, 3 \dots$  โครโมโซมที่ดีที่สุดในรอบ (โครโมโซมรุ่นพ่อแม่) แล้วเก็บค่าสองโครโมโซมนี้ไว้ จากนั้นนำโครโมโซมส่วนที่เหลือมาดำเนินการข้ามสายพันธุ์ และการกลายพันธุ์ เพื่อหาโครโมโซมที่เหมาะสมกว่าโครโมโซมส่วนที่เหลือ เมื่อได้โครโมโซมเหมาะสมครบแล้วก็นำไปแทนที่โครโมโซมส่วนที่เหลือ ซึ่งจะได้ประชากรใหม่ ในงานวิจัยนี้ใช้การเลือกชนิดนี้ ในขั้นตอนการคัดเลือก

### 3. การข้ามสายพันธุ์ (Crossover)

การข้ามสายพันธุ์ เป็นวิธีการรวมตัวใหม่ของโครโมโซมพ่อแม่พันธุ์ (Parent) ตั้งแต่ 2 โครโมโซมขึ้นไป เพื่อให้ได้เป็นโครโมโซมรุ่นลูกหลาน (Offspring) การข้ามสายพันธุ์นี้ จะมีการกำหนดอัตราการข้ามสายพันธุ์ ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะใช้ความน่าจะเป็น เป็นตัวกำหนด การข้ามสายพันธุ์จะมี 2 ลักษณะขึ้นกับ ตำแหน่งการข้ามสายพันธุ์ (Jang J.S. et al., 1997) ดังนี้

## 1. การข้ามสายพันธุ์ 1 ตำแหน่ง

Crossover point

1 0 1		1 1 1 1 0		1 0 1		1 0 0 1 0
1 1 1		1 0 0 1 0		1 1 1		1 1 1 1 0

## 2. การข้ามสายพันธุ์ 2 ตำแหน่ง

Crossover point

1   0 0 1 1		1 1 0		1   0 1 1 0		1 1 0
1   0 1 1 0		0 1 0		1   0 0 1 1		0 1 0

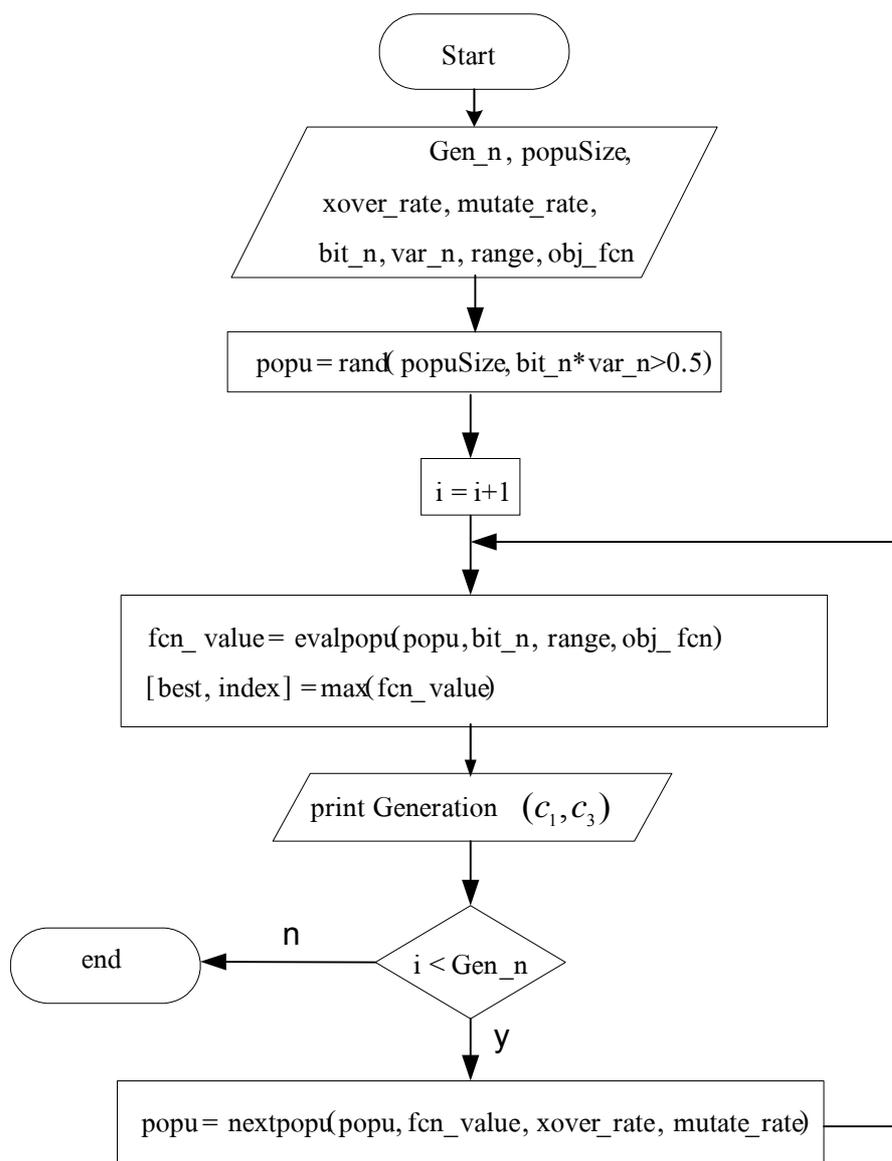
**4. การกลายพันธุ์ (Mutation)**

เป็นวิธีการเปลี่ยนแปลงยีน (Gene) หรือเปลี่ยนแปลงส่วนย่อยของโครโมโซมเดิม ทำให้โครโมโซมนั้นกลายเป็นโครโมโซมใหม่ โดยปกติแล้วการกลายพันธุ์จะมีอัตราการกลายพันธุ์ที่ค่อนข้างต่ำ เช่น การกลายพันธุ์ที่ตำแหน่ง เลข 7 กับ 3

$$9 \ 8 \ \underline{7} \ 1 \ 2 \ 3 \ 11 \Rightarrow 9 \ 8 \ \underline{15} \ 1 \ 2 \ \underline{0} \ 11$$
**5. การหาค่าพารามิเตอร์**

จากสมการหาค่าอนุภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอม (แบบจำลองทางความร้อนของเขา) สมการ (24) ค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่จะได้ออกมาจากการวัดค่า มีเพียงค่าคงที่  $(c_1, c_2, c_3)$  ที่จะต้องทำการคำนวณหาค่า

ในการหาค่าพารามิเตอร์  $(c_1, c_2, c_3)$  ที่ไม่รู้ค่านั้นจะใช้วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) ซึ่งวิธีนี้จะเป็นวิธีที่ทำให้ได้ค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ที่ดีที่สุด ตามเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อเจเนติกอัลกอริทึม ซึ่งจะมีหลักการ ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 13 แสดงขั้นตอนการหาพารามิเตอร์  $c_1, c_3$  ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม

จากภาพที่ 13 สามารถอธิบายขั้นตอนการทำงาน ได้ดังนี้

1. กำหนดค่าต่างๆ

1.1  $Gen\_n$  : จำนวนรุ่น (Generation) ของประชากร หรือจำนวนรุ่นของค่าคงที่  $(c_1, c_3)$

1.2  $popuSize$  : ขนาดของประชากรในรุ่น หรือขนาดของค่าคงที่  $(c_1, c_3)$

- 1.3 *xover\_rate* : อัตราการข้ามสายพันธุ์
- 1.4 *mutate\_rate* : อัตราการกลายพันธุ์
- 1.5 *bit\_n* : จำนวนบิตสำหรับพารามิเตอร์ ( $c_1, c_3$ ) ที่หาค่าแต่ละตัว
- 1.6 *var\_n* : จำนวนพารามิเตอร์ ( $c_1, c_3$ )
- 1.7 *range* : ช่วงของพารามิเตอร์ ( $c_1, c_3$ ) แต่ละค่า
- 1.8 *obj\_fcn* : ฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) ในที่นี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้ประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอม

$$\hat{T}_s(i) = \frac{P_{in}(i) + c_1 \cdot \hat{T}_s(i-1) - c_2 \cdot \dot{M}_w(i) \cdot \Delta T_w(i) - c_3}{c_1} \quad (27)$$

และ

$$c_2 = \frac{P_{in, \min} - c_3}{\dot{M}_{w, average} \cdot \Delta T_{w, average}}$$

- 1.9 *Fitness\_Function* หรือ เงื่อนไข (Constraint)

$$error = - \sum_{k=1}^5 (\hat{T}_s(i_k) - T_s(i_k))^2 \quad (28)$$

โดยที่  $\hat{T}_s(i_k)$  เป็นอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วยสมการที่ (27)  
 $T_s(i_k)$  เป็นอุณหภูมิที่ได้จากการวัดจริง

2. หาประชากรเริ่มต้น (ค่าคงที่ ( $c_1, c_3$ )) ด้วยวิธีการสุ่ม และทำการเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง (Binary Encoding)

ตัวอย่าง สมมติกำหนดให้  $popuSize = 5$ ,  $bit\_n = 6$ ,  $var\_n = 2$  จะได้ประชากรเริ่มต้น ( $popu$ , ขนาดของค่าคงที่ ( $c_1, c_3$ )) ที่มีขนาดของเมตริกเท่ากับ  $(popuSize \times bit\_n * var\_n) = (5 \times 12)$  ดังตัวอย่างเช่น



$$popu = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{5 \times 12}$$

3. สำหรับ  $i=1$  ถึง  $Gen\_n$  โดยเพิ่มครั้งละ 1

4. การหาค่าเหมาะสม (*Fitness Value*) ประชากรที่ผ่านฟังก์ชันจุดประสงค์ สำหรับในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการหา ดังแสดงในภาพที่ 14 และภาพที่ 15 โดยในภาพที่ 15 เป็นการทดสอบประชากร (ค่าคงที่  $(c_1, c_3)$ ) ด้วยฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) เพื่อดูค่าความเหมาะสม (*Fitness Value*) ของประชากรนั้นๆ ซึ่งมีหลักการดังนี้

4.1 นำประชากร (ค่าคงที่  $(c_1, c_3)$ ) ที่ได้จากขั้นตอนในภาพที่ 13 หรือจากขั้นตอนที่ 2 ซึ่งอยู่ในรูปของเลขฐานสอง (binary string) มาไว้ในตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 14

4.2 นำประชากรที่ได้จากขั้นตอนในภาพที่ 15 ซึ่งในขั้นตอนนี้แทนด้วย String มาผ่านกระบวนการแปลงเลขฐานสอง ให้เป็นเลขฐานสิบ เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์  $c_1, c_3$  เริ่มต้น

4.3 นำค่าพารามิเตอร์  $c_1, c_3$  ที่ได้จากขั้นตอน 4.2 แทนในฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) สมการที่ (27) ซึ่งในที่นี้จะได้อุณหภูมิของน้ำเหล็ก (การประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก)

4.4 นำค่าอุณหภูมิที่ได้ ไปทดสอบด้วยฟังก์ชันความเหมาะสม (*Fitness Function*) สมการที่ (28) หรือทดสอบภายใต้เงื่อนไข ซึ่งมีเงื่อนไขว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดจะต้องมีความผิดพลาดน้อยที่สุด (ค่าที่ได้เป็นลบ)

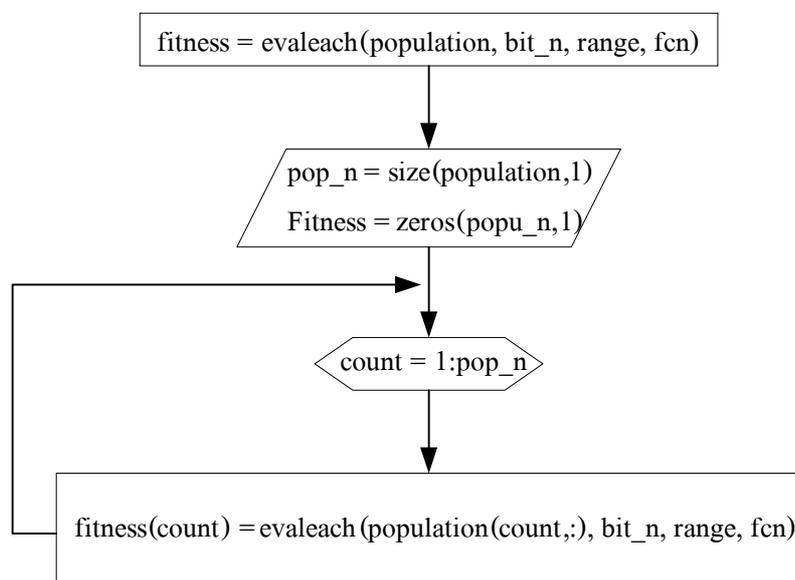
4.5 จากนั้นค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 4.3 จะถูกส่งกลับมาไว้ในขั้นตอนการหาค่าเหมาะสม (*Fitness Value*) ดังแสดงในภาพที่ 14

4.6 ซึ่งขั้นตอนตั้งแต่ข้อ 4.1 – 4.4 จะเป็นการทำซ้ำๆ เท่ากับจำนวนของ  $pop\_n$

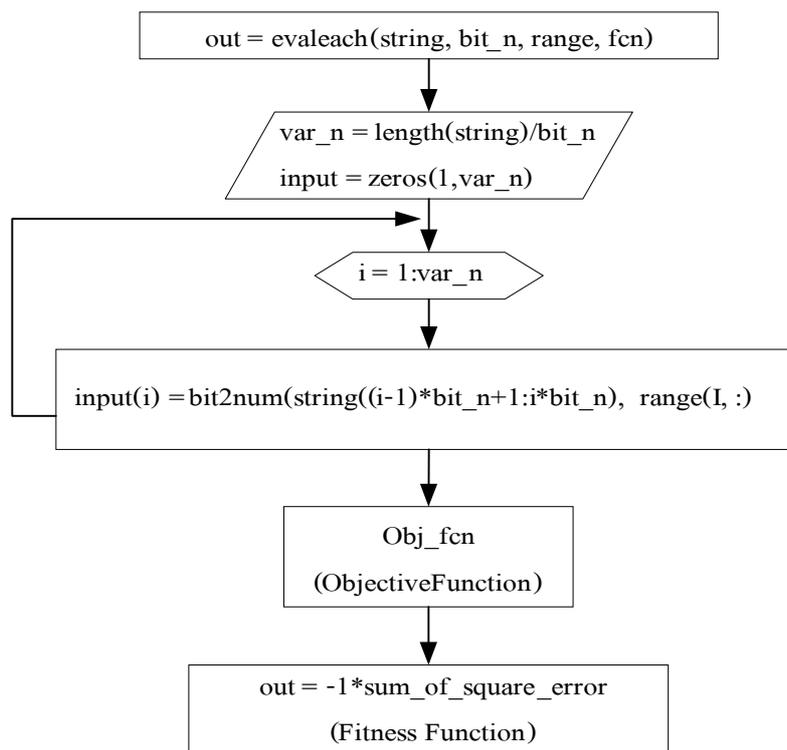
4.7 ส่งค่าเหมาะสม (*Fitness Value*) กลับไปยังขั้นตอนในภาพที่ 13

ซึ่งจะได้ค่าเหมาะสม (*Fitness value*) ที่ดีที่สุด ดังตัวอย่างเช่น

$$Fitness = \begin{bmatrix} -0.0337 \times 10^4 \\ -1.1562 \times 10^4 \\ -0.1162 \times 10^4 \\ -3.5065 \times 10^4 \\ -3.2967 \times 10^4 \end{bmatrix}_{5 \times 1}$$



ภาพที่ 14 แสดงขั้นตอนการหาค่าเหมาะสม (*Fitness Value*) ของประชากร



ภาพที่ 15 แสดงขั้นตอนการทดสอบประชากรด้วยฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) เพื่อหาค่าความเหมาะสม (Fitness Value) ของประชากรนั้นๆ

5. หาประชากรรุ่นต่อไป (Next Generation) ด้วยวิธีเลือก (Selection), การข้ามสายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) สำหรับในงานวิจัยนี้มีขั้นตอนการทำงาน ดังแสดงในภาพที่ 14 โดยมีหลักการดังนี้

5.1 นำประชากรที่ได้ จากการผ่านการทดสอบประชากรด้วยฟังก์ชันจุดประสงค์และมีค่าเหมาะสม (Fitness Value) แล้ว จากขั้นตอนในภาพที่ 14 ภาพที่ 15 ซึ่งถูกส่งกลับมาไว้ขั้นตอนในภาพที่ 11 มาผ่านการเลือก (Selection) สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้วิธี อีลิติซึม โดยการเก็บประชากรที่ดีที่สุดของรุ่นนี้ พิจารณาจากค่าเหมาะสมของประชากรนั้นๆ มา 2 ค่า

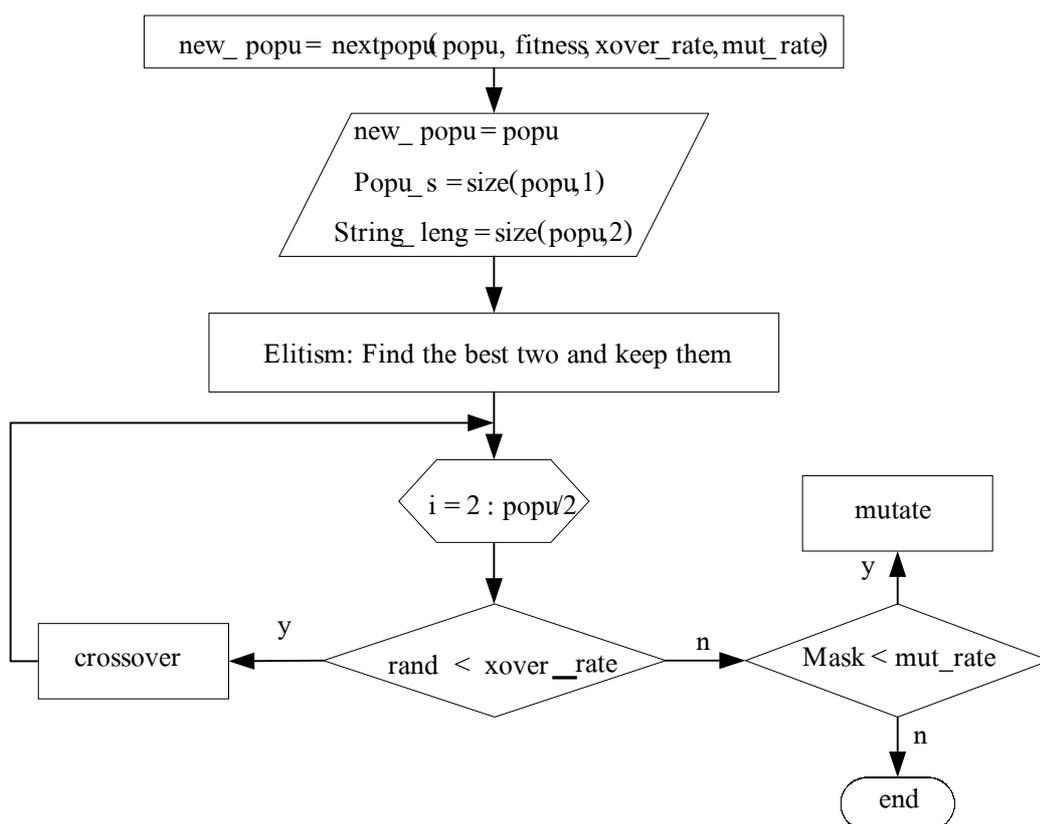
5.2 เลือกประชากร อีกครั้งละ 2 ค่า จากประชากรส่วนที่เหลือในขั้นตอน 5.1 นำประชากรที่ถูกเลือก มาผ่านการข้ามสายพันธุ์ (Crossover) ซึ่งใช้การข้ามสายพันธุ์แบบ 1 ตำแหน่ง และในขั้นตอนนี้มีการกำหนดอัตราการข้ามสายพันธุ์ไว้เท่ากับ 1 สำหรับในงานวิจัยนี้

5.3 นำค่าที่ได้จากขั้นตอน 5.2 ไปแทนที่ประชากรเดิมในขั้นตอน 5.1 จนครบมีปริมาณเท่ากับประชากรเดิม

5.4 จากนั้นนำประชากรในขั้นตอนที่ 5.3 ไปทำการกลายพันธุ์ (Mutation) สำหรับในงานวิจัยนี้กำหนดอัตราการกลายพันธุ์ไว้เท่ากับ 0.01

เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนที่ 5.4 จะได้ประชากรรุ่นต่อไป (Next Generation) ดังตัวอย่าง เช่น

$$\text{Next Generation} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}_{5 \times 12}$$



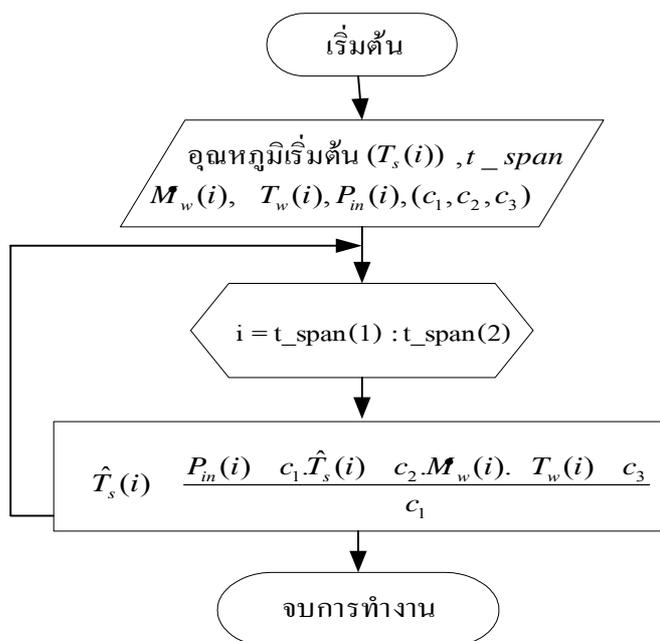
ภาพที่ 16 แสดงการหาเจเนอเนชันต่อไป (Next Generation)

6. จากขั้นตอนที่ 1 – 5 จะได้ค่า  $(c_1, c_3)$  (ของแต่ละรุ่น เท่ากับ  $Gen\_n$  ที่กำหนด) ดังตัวอย่างเช่น

	$c_1$	$c_3$
รุ่น 1 (Generation 1) =	1788.85	374.62
รุ่น 2 (Generation 2) =	1788.85	145.88
รุ่น 3 (Generation 3) =	1783.36	159.95
รุ่น 4 (Generation 4) =	923.46	396.77
รุ่น 5 (Generation 5) =	945.85	278.02

#### 6. การประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะ

การหาค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอม สามารถอธิบายขั้นตอนการทำงานได้ ดังแสดงในภาพที่ 17 โดยที่สมการการประมาณค่าอุณหภูมิ คือสมการที่ (25) ส่วนพลังงานไฟฟ้าเข้า, อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น, อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นเข้า – ออก ได้จากการวัดค่าซึ่งเป็นค่าแบบต่อเนื่อง (Real Time) ส่วนในส่วนของค่าคงที่  $(c_1, c_2, c_3)$  ก็มีวิธีการคำนวณดังที่ได้กล่าวมาแล้วในการหาค่าพารามิเตอร์



ภาพที่ 17 แสดงแสดงขั้นตอนการประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก

สำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ เมื่อกำหนดให้  $Gen\_n=5$ ,  $popuSize =20$ ,  $xover\_rate = 1.0$ ,  $mutate\_rate = 0.01$ ,  $bit\_n = 16$ ,  $var\_n = 2$ ,  $range = [500\ 3000; 100\ 250]$ ,  $obj\_fcn$  เป็นสมการที่ (27) และฟังก์ชันเหมาะสม ( $Fitness\_Function$ ) เป็นสมการที่ (28) เมื่อทำการประมวลผลจะได้ค่าพารามิเตอร์ ( $c_1, c_3$ ) มีค่าตามลำดับดังนี้

$$c_1 = 2693.71$$

$$c_3 = 212.14$$

และจะได้

$$c_2 = 9.4$$

เมื่อนำค่า ( $c_1, c_2, c_3$ ) ที่ได้แทนลงในสมการที่ (25) จะได้

$$\hat{T}_s(i) = \frac{P_{in,i} + 2693.71 \times \hat{T}_s(i-1) - (9.4 \times M_{w,i}^* \cdot \Delta T_{w,i}) - 212.14}{2693.71} \quad (29)$$

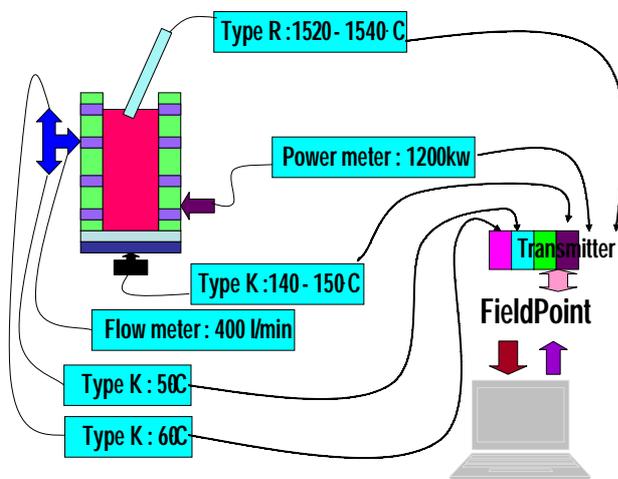
## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### อุปกรณ์

1. FieldPoint	3	module (FP- 2000,FP-AIO-600,FP-AI-111)
2. Thermocouple Type: R	1	ชุด
3. Thermocouple Type: K	3	ชุด
4. Power meter	1	ชุด
5. Flow meter	1	ชุด
6. Transmitter	5	ชุด
7. คอมพิวเตอร์	1	ชุด
8. Display	1	ชุด
9. โปรแกรม LabVIEW 7 และ โปรแกรม MatLab 7		

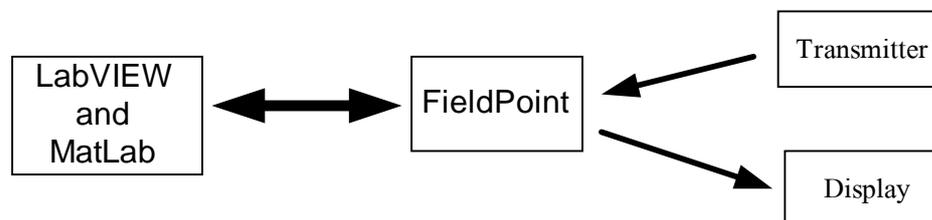
### วิธีการ

จากการศึกษาทฤษฎีพื้นฐาน และการควบคุมเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำได้พบปัญหา ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อการตรวจเอกสาร จึงได้แก้ไขปรับปรุงวิธีการวัดและรับ – ส่ง ค่า สัญญาณ ดังแสดงในภาพที่ 18

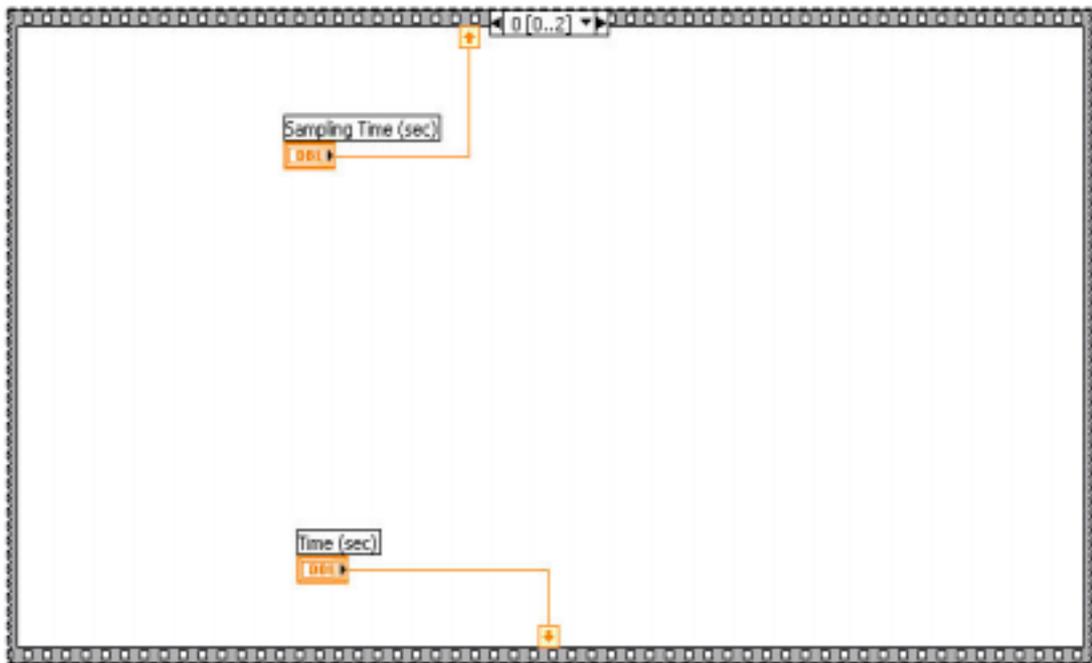


ภาพที่ 18 แสดงวิธีการ และอุปกรณ์ต่างๆ ในการรับ – ส่ง สัญญาณในปัจจุบัน

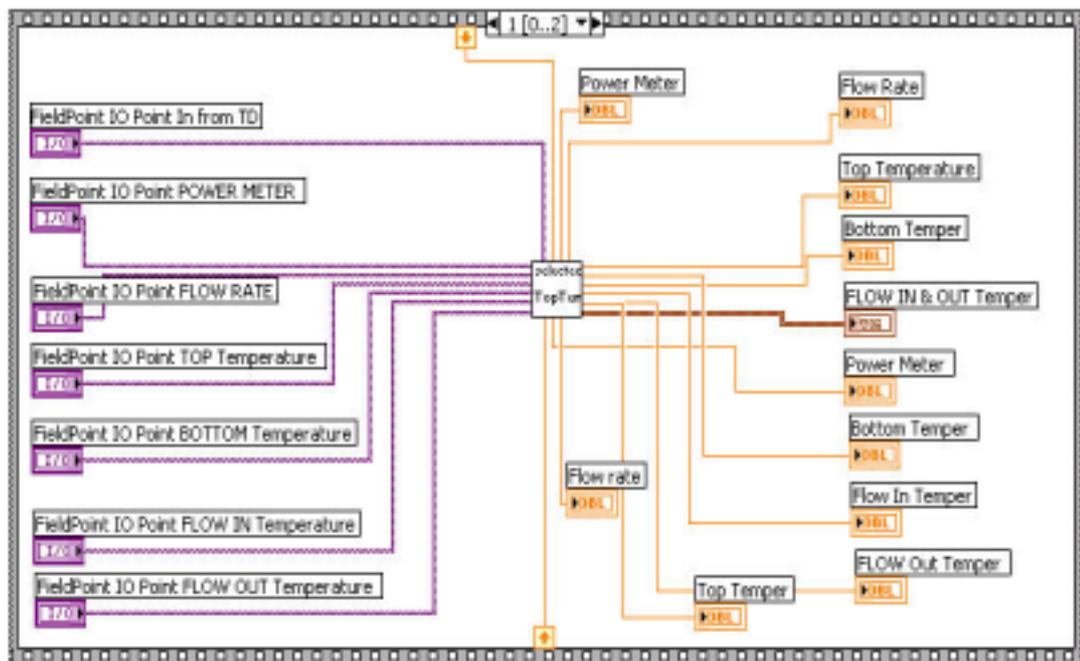
วิธีการวัด และรับ – ส่ง ค่าสัญญาณ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีหลักการทำงานดังนี้



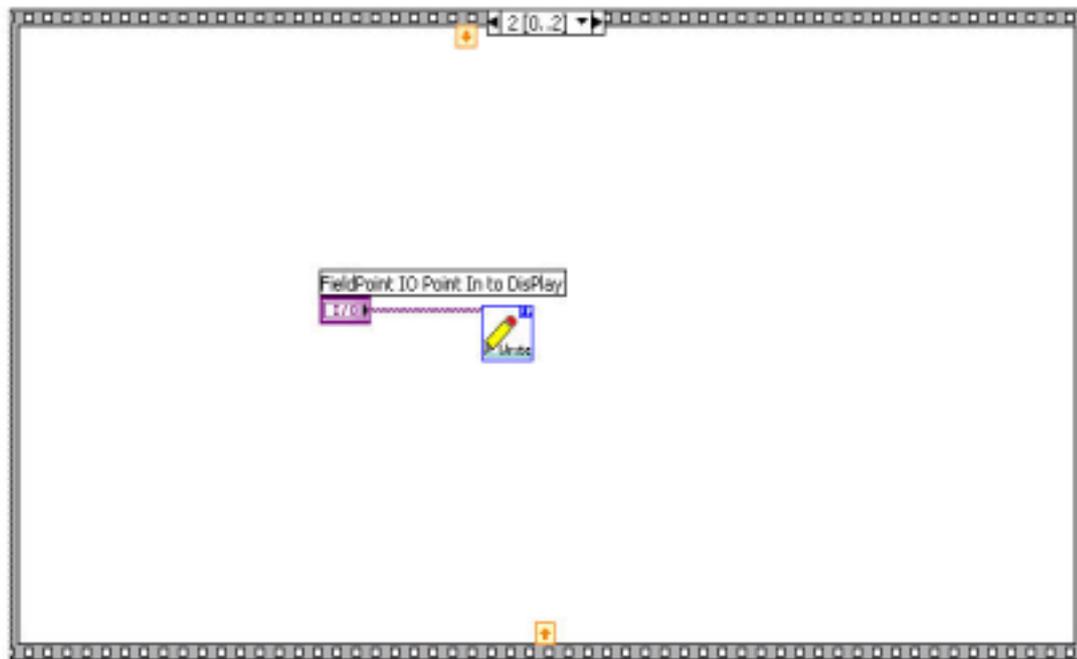
1. รับค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กจากเทอร์โมคัพเปิด ชนิด R ที่จุ่มวัดบริเวณปากเตา และส่งสัญญาณผ่านทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) เพื่อแปลงสัญญาณ เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4 – 20 mA แล้วส่งค่ามายัง module FP-AI-111 ของ FieldPoint
2. รับค่าอุณหภูมิบริเวณใต้เตา ซึ่งได้มีการฝังเทอร์โมคัพเปิด ชนิด K ไว้ และส่งสัญญาณผ่านทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) เพื่อแปลงสัญญาณ เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4 – 20 mA แล้วส่งค่ามายัง module FP-AI-111 ของ FieldPoint
3. รับค่าอุณหภูมิบริเวณน้ำหล่อเย็นเข้า ซึ่งได้มีการฝังเทอร์โมคัพเปิด ชนิด K ไว้ และส่งสัญญาณผ่านทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) เพื่อแปลงสัญญาณ เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4 – 20 mA แล้วส่งค่ามายัง module FP-AI-111 ของ FieldPoint
4. รับค่าอุณหภูมิบริเวณน้ำหล่อเย็นออก ซึ่งได้มีการฝังเทอร์โมคัพเปิด ชนิด K ไว้ และส่งสัญญาณผ่านทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) เพื่อแปลงสัญญาณ เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4 – 20 mA แล้วส่งค่ามายัง module FP-AI-111 ของ FieldPoint
5. รับค่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น อุปกรณ์การวัดอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (Flow Meter) และส่งสัญญาณผ่านอุปกรณ์เปลี่ยนความถี่ ( Microprocessor Frequency Isolated Transmitter) เป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4 – 20 mA มายัง module FP-AI-111 ของ FieldPoint
6. รับค่าพลังงานไฟฟ้า ด้วยเพาเวอร์มิเตอร์ (Power Meter) แล้วส่งสัญญาณเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน 4 – 20 mA มายัง module FP-AI-111 ของ FieldPoint
7. รับค่าสัญญาณต่างๆ จาก FieldPoint และทำการประมวลผลด้วยโปรแกรม LabVIEW
8. นำค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 6 ไปประมวลผลด้วยโปรแกรม MatLab
9. จากนั้นส่งค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 7 กลับ ไปยัง module FP-AIO-600 ของFieldPoint ผ่านทางโปรแกรม LabVIEW เพื่อ แสดงผล โดยการส่งค่าไปยัง Display และควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอม ซึ่งเป็นการควบคุมแบบกึ่งอัตโนมัติ



(1) Control panel

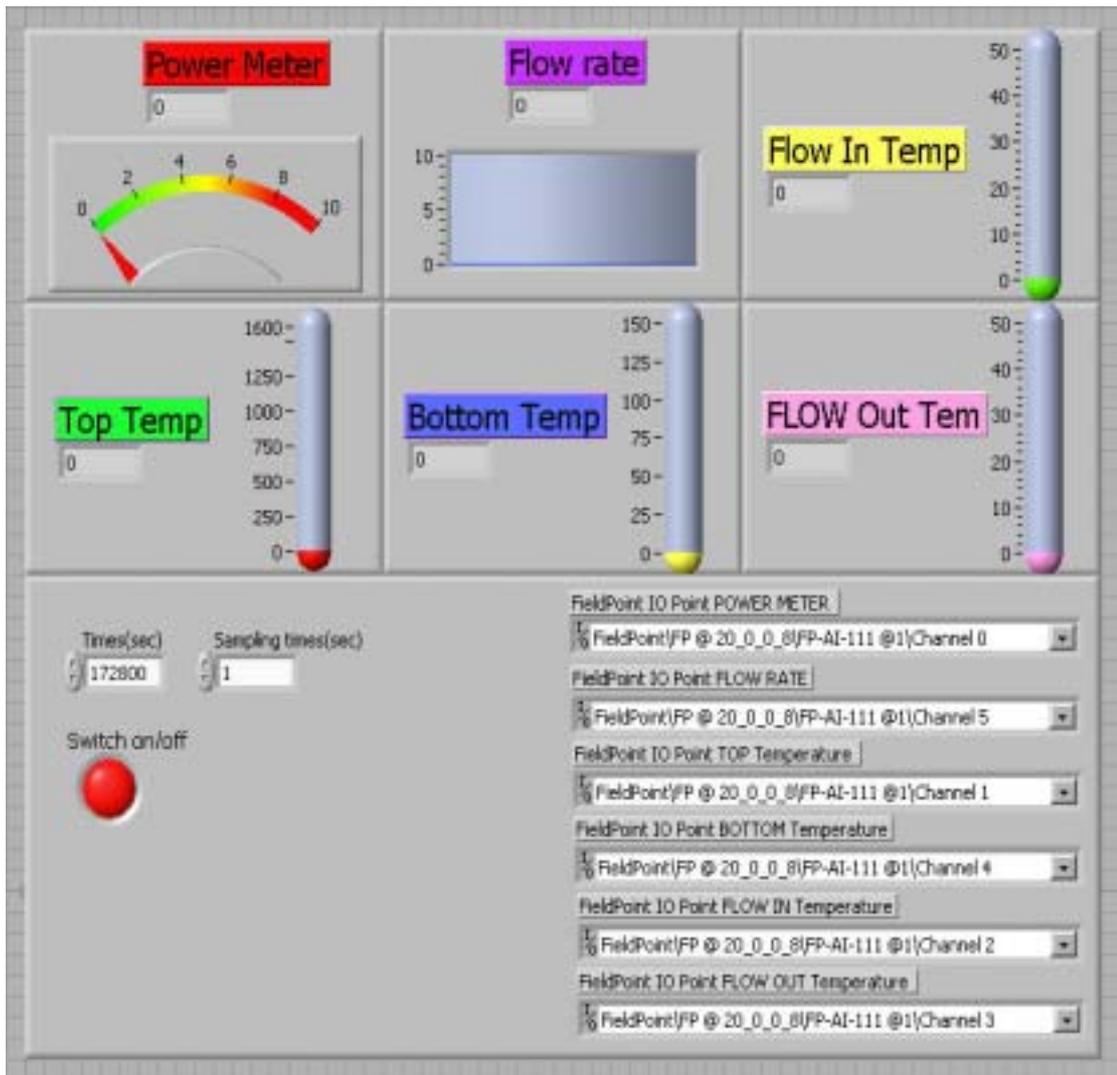


(2) Control panel



(3) Control panel

ภาพที่ 19 แสดง control panel of LabVIEW โปรแกรม



Front panel

ภาพที่ 19 แสดง front panel of LabVIEW โปรแกรม

ตารางที่ 12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีการวัดค่าอย่างต่อเนื่อง ใน 1 วันทำงาน (2 กะการทำงาน (กะแรก 8.00 – 20.00 น., กะสอง 20.00 – 8.00 น.))

พารามิเตอร์	การหลอม ครั้งที่ 1	การหลอม ครั้งที่ 2	การหลอม ครั้งที่ 3	การหลอม ครั้งที่ 4	การหลอม ครั้งที่ 5	การหลอม ครั้งที่ 6	การหลอม ครั้งที่ 7
พลังงานไฟฟ้า (kW)	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/min)	395.83	399.091	399.091	390.726	388.563	390.726	390.726
อุณหภูมิบริเวณใต้เตา (°C)	136.615	136.615	136.615	136.82	136.82	136.82	136.82
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า (°C)	32.924	32.924	32.924	32.924	32.924	32.924	32.924
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นออก (°C)	38.732	38.732	50.807	50.807	50.807	45.415	45.415

เมื่อเก็บข้อมูล ดังแสดงในตารางที่ 11 แล้วนำมาทำการออกแบบ และการแก้ไขแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิน้ำโลหะภายในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ ได้มีการแก้ไขการเก็บข้อมูลให้เป็นข้อมูลที่มีการทำงานอย่างต่อเนื่อง เพื่อการคำนวณหาค่าคงที่ ( $c_1, c_3$ ) ที่แม่นยำมากขึ้น และได้มีการเปรียบเทียบการหาค่าคงที่ ( $c_1, c_3$ ) ในกรณีต่างๆ ไว้ 4 กรณี โดยพารามิเตอร์ต่างๆ คงที่ ยกเว้น  $Gen\_n$ ,  $popuSize$  สำหรับการเลือกใช้งานได้อย่างเหมาะสม ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบการหาค่าคงที่ ( $c_1, c_3$ ) ในกรณีต่างๆ

กรณี	ค่าผิดพลาดน้อยที่สุด ( $^{\circ}\text{C}$ )	ความเร็วในการ ประมวลผล (นาที)
$Gen\_n$ มีค่ามาก, $popuSize$ มีค่าน้อย	19.20	17
$Gen\_n$ มีค่าน้อย, $popuSize$ มีค่ามาก	-0.59	15
$Gen\_n$ มีค่ามาก, $popuSize$ มีค่ามาก	-0.07	38
$Gen\_n$ มีค่าน้อย, $popuSize$ มีค่าน้อย	23.81	5

หมายเหตุ 1. คอมพิวเตอร์: CPU AMD Athlon(tm) Processor, 900 MHz, 256 MB of RAM

2. จำนวนการทดลอง 10 ครั้งการทดลองต่อกรณี โดยที่  $Gen\_n = 5, 20$  รุ่น และ  $popuSize = 5, 20$  ประชากร

### สถานที่ทำการวิจัย

ห้อง 2308 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และห้อง 5/14 ชั้น 5 ตึก  
วิศวกรรมศาสตร์ 60 ปี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เตาหลอมขนาด 2 ตัน เตาที่ 2 โรงหลอม 6 บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม  
จำกัด

### ระยะเวลาทำการวิจัย

ทำการวิจัยตั้งแต่เดือนมิถุนายน 2547 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ 2549 รวมระยะเวลาทำการวิจัย 1  
ปี 8 เดือน

## ผลและการวิจารณ์

### ผลการทดลองการประมาณค่าอุณหภูมิ

การควบคุมเตาหลอมในปัจจุบัน ใช้พนักงานที่มีประสบการณ์รวมถึงทักษะในงานที่ปฏิบัติมานาน เป็นผู้ควบคุมอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอม โดยผู้ควบคุมจะสังเกตจากการหลอมละลายหมดของเหล็ก, สีของน้ำเหล็ก, ความหนืดของน้ำเหล็ก และระยะเวลาตั้งแต่เริ่มหลอม สำหรับการวัดอุณหภูมิจะใช้วิธีการจุ่มวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กบริเวณปากเตา ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด R โดยตรงจำนวน 2 ครั้งคือ ครั้งแรกเป็นการวัดเพื่อส่งตัวอย่างน้ำเหล็ก ไปทดสอบคุณสมบัติทางเคมี โดยอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง 1450 – 1480 องศาเซลเซียส ครั้งที่สองเป็นการวัดเพื่อสิ้นสุดการหลอมโดยอุณหภูมิจะอยู่ในช่วง  $1520 \pm 20$  องศาเซลเซียส ในการหลอมแต่ละครั้งอุณหภูมินี้เป็นตัวบ่งชี้ถึงสถานะของน้ำเหล็ก ว่าน้ำเหล็กสามารถใช้หล่อขึ้นรูปอุปกรณ์ได้หรือยัง อุณหภูมิที่วัดค่าด้วยวิธีนี้ได้แสดงในตารางที่ 14 การทดลองนี้เป็นการทดลองเพียงเตาเดียว แต่ในการปฏิบัติงานจริงเป็นการทำงานแบบเตาคู่โดยใช้วงจรสวิทช์เป็นตัวสวิทช์เพื่อให้กำลังไฟฟ้ากับเตาแต่ละเตา ได้มีการสังเกตการทดลองเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 6 เดือน และมีการเก็บตัวอย่างมากกว่า 1 เดือน

#### การทดลอง แบบที่ 1

จุดประสงค์ของการทดลองแบบที่ 1 เพื่อทดสอบค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากวิธีเจเนติกอัลกอริทึมว่าสามารถหาค่าอุณหภูมิประมาณ ได้ใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิวัดจริง โดยให้ค่าผิดพลาดน้อยที่สุด

จากการคำนวณหาค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม ตามหัวข้อที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อเจเนติกอัลกอริทึม จะได้ค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ดังแสดงในตารางที่ 15 แทนค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้แต่ละชุด และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากตารางที่ 12 ลงในสมการที่ (25) ทำการคำนวณหาค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมๆ จะได้ค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กจากวิธีการประมาณๆ ดังแสดงในตารางที่ 14

ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเหล็กด้วยวิธีการประมาณๆ กับอุณหภูมิน้ำเหล็กจากการวัดจริง จะได้ค่าผิดพลาด และค่าผิดพลาดเฉลี่ย ดังแสดงในตารางที่ 16 และภาพที่ 20

ตารางที่ 14 แสดงค่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กจากการวัด ใน 2 วันทำงาน (2 กะการทำงาน (กะแรก 8.00 – 20.00 น., กะสอง 20.00 – 8.00 น.))

วัดครั้งที่	การหลอม ครั้งที่ 1		การหลอม ครั้งที่ 2		การหลอม ครั้งที่ 3		การหลอม ครั้งที่ 4		การหลอม ครั้งที่ 5		การหลอม ครั้งที่ 6		การหลอม ครั้งที่ 7	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
วันที่														
1														
อุณหภูมิปาก เตา (°C)	1478.25	1528.57	1476.33	1532.55	1455.27	1532.21	1468.18	1528.72	1450.57	1539.72	1478.69	1520.79	1478.57	1528.04
2														
อุณหภูมิปาก เตา (°C)	1480.00	1522.68	1472.59	1521.49	1453.70	1529.68	1464.34	1524.91	1470.80	1530.37	1454.83	1528.68	1479.70	1523.46

หมายเหตุ 1. อุณหภูมิบริเวณปากเตา: อุณหภูมิน้ำโลหะในเตา

2. การวัดครั้งที่ 1 เป็นการวัดก่อนการตรวจวัดเคมีของน้ำโลหะ (1450 – 1480 °C )

3. การวัดครั้งที่ 2 เป็นการวัดเพื่อสิ้นสุดการหลอม (1520 ± 20 °C)

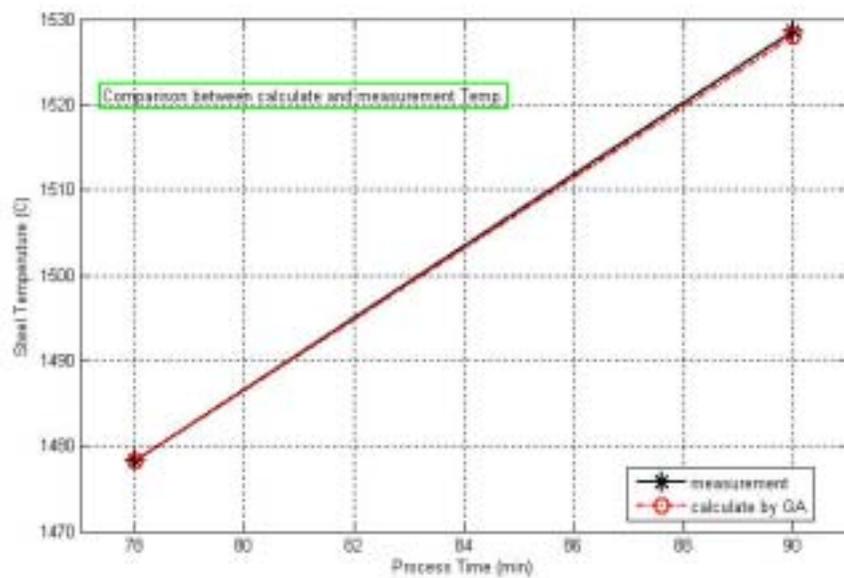
ตารางที่ 15 แสดงค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม

	การหลอม ครั้งที่ 1		การหลอม ครั้งที่ 2		การหลอม ครั้งที่ 3		การหลอม ครั้งที่ 4		การหลอม ครั้งที่ 5		การหลอม ครั้งที่ 6		การหลอม ครั้งที่ 7	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
วัดครั้งที่														
วันที่														
1														
ค่าคงที่	2693.7		2541.05		2688.79		2993.25		1875.10		2993.25		2304.30	
$(c_1, c_3)$	212.14		195.32		234.52		234.37		166.69		234.66		185.60	
ค่าประมาณ (°C)	1478.25	1527.98	1476.33	1533.48	1455.27	1534.46	1468.18	1528.40	1450.57	1540.27	1478.69	1521.09	1470.69	1536.66
2														
ค่าคงที่	2868.96		2679.03		1893.22		1234.30		2731.59		2244.11		875.10	
$(c_1, c_3)$	205.49		221.08		108.15		145.45		160.99		247.84		117.40	
ค่าประมาณ (°C)	1480.00	1522.66	1472.59	1521.43	1453.70	1530.44	1464.34	1525.93	1470.80	1530.22	1454.83	1528.26	1479.70	1522.84

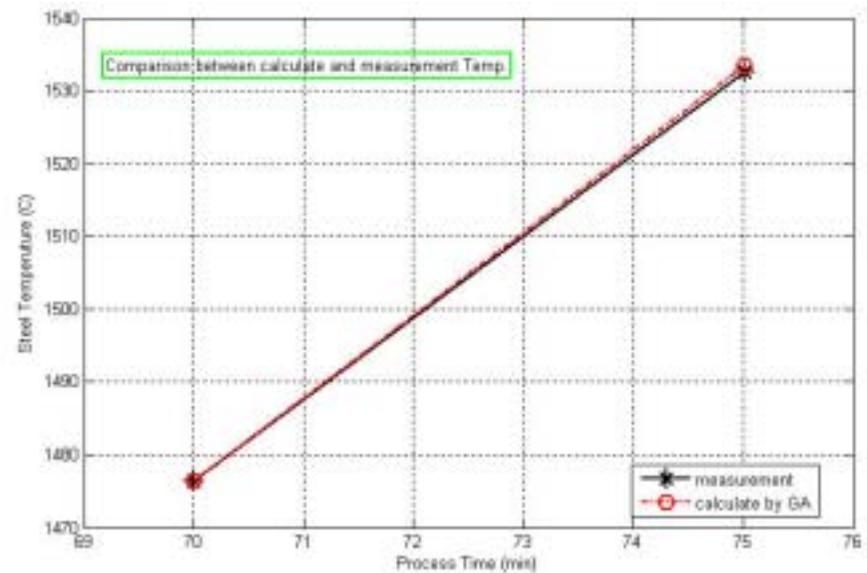
ตารางที่ 16 แสดงค่าผิดพลาด และค่าผิดพลาดเฉลี่ย ของอุณหภูมิน้ำเหนือระหว่างวิธีการวัดจริงกับวิธีการประมาณฯ

วัดครั้งที่	การหลอม ครั้งที่ 1		การหลอม ครั้งที่ 2		การหลอม ครั้งที่ 3		การหลอม ครั้งที่ 4		การหลอม ครั้งที่ 5		การหลอม ครั้งที่ 6		การหลอม ครั้งที่ 7	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
วันที่														
1														
ค่าความผิดพลาด(°C)	0.00	0.59	0.00	-0.93	0.00	-2.25	0.00	0.32	0.00	-0.55	0.00	0.30	0.00	-0.11
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย(°C)	0.294		-0.467		-1.124		0.159		-0.273		0.152		0.057	
2														
ค่าความผิดพลาด(°C)	0.00	0.02	0.00	0.06	0.00	-0.76	0.00	-1.01	0.00	0.16	0.00	0.42	0.00	0.65
ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย(°C)	0.009		0.030		-0.38		-0.507		0.078		0.209		0.324	

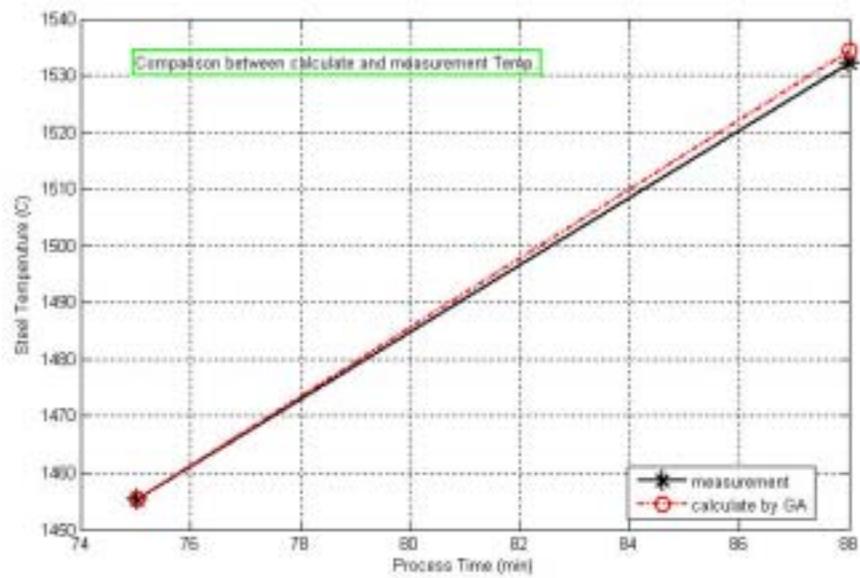
## ข้อมูลการหลอม วันที่ 1



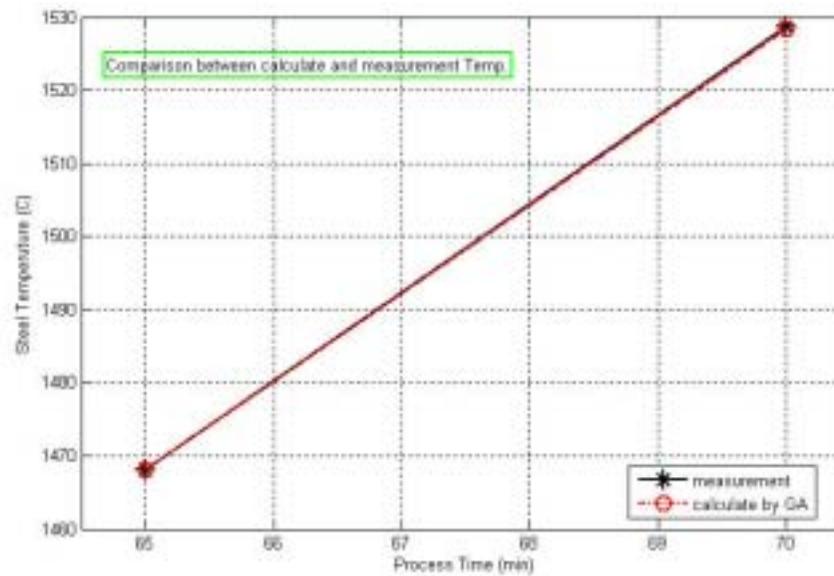
การหลอมครั้งที่ 1 วันที่ 1



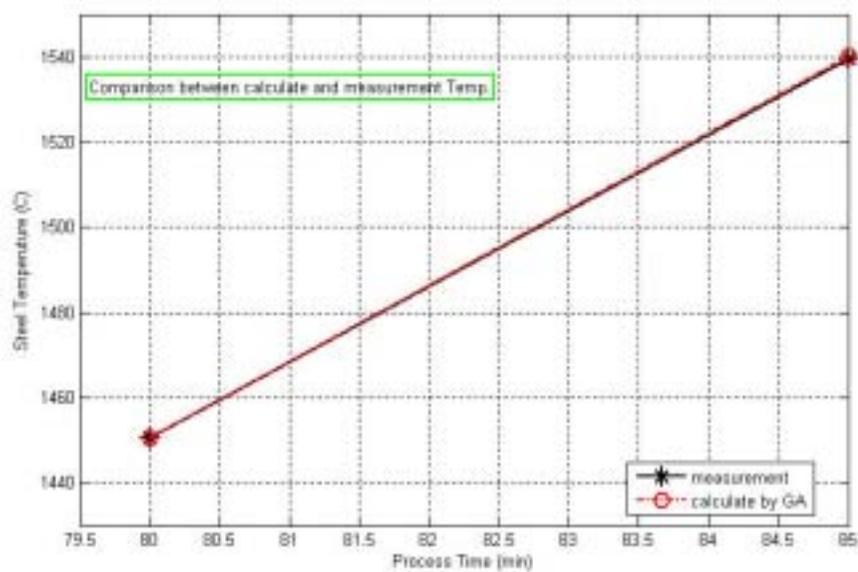
การหลอมครั้งที่ 2 วันที่ 1



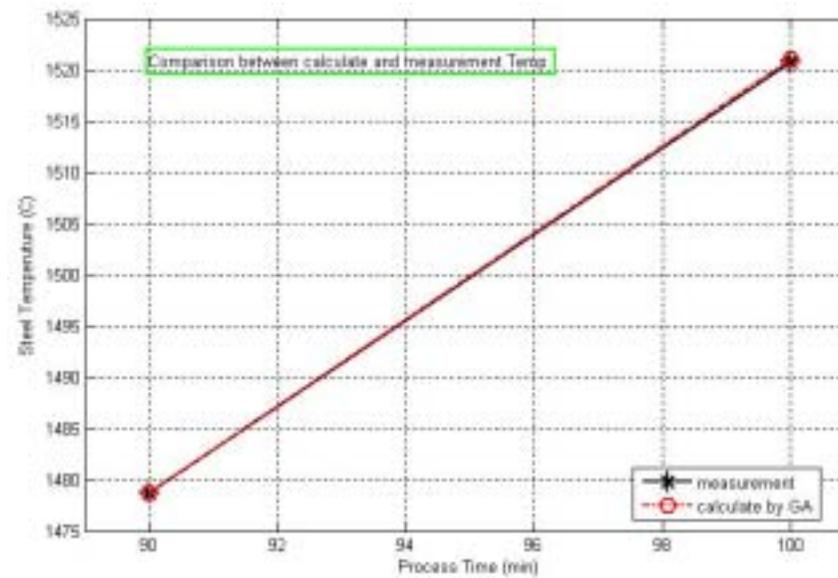
การหลอมครั้งที่ 3 วันที่ 1



การหลอมครั้งที่ 4 วันที่ 1

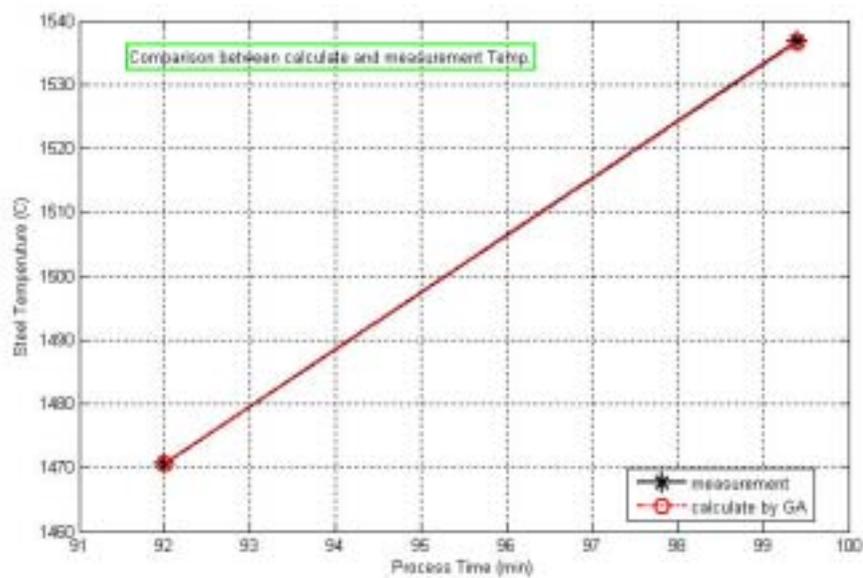


การหลอมครั้งที่ 5 วันที่ 1

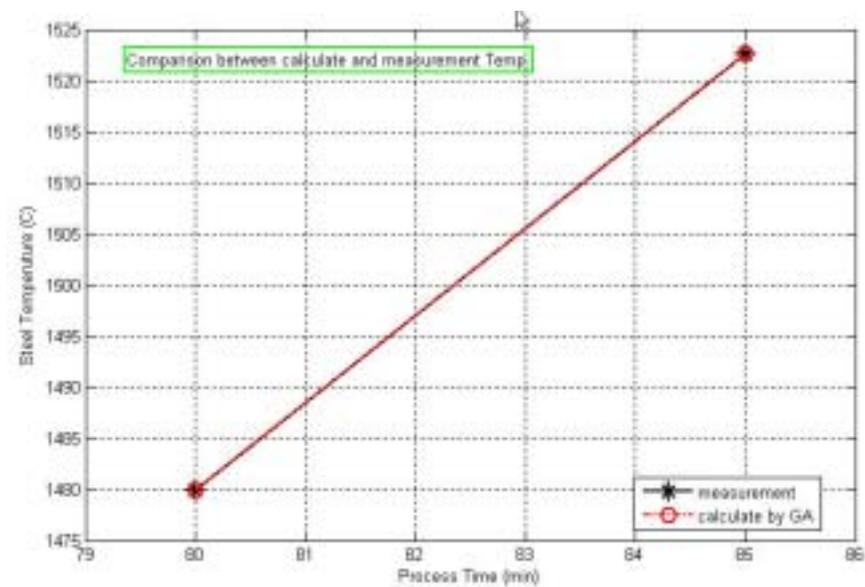


การหลอมครั้งที่ 6 วันที่ 1

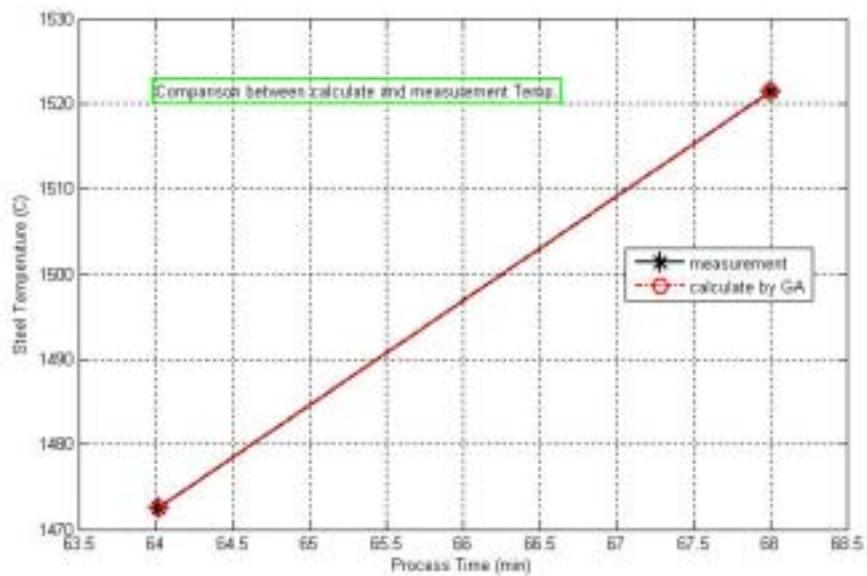
## ข้อมูลการหลอม วันที่ 2



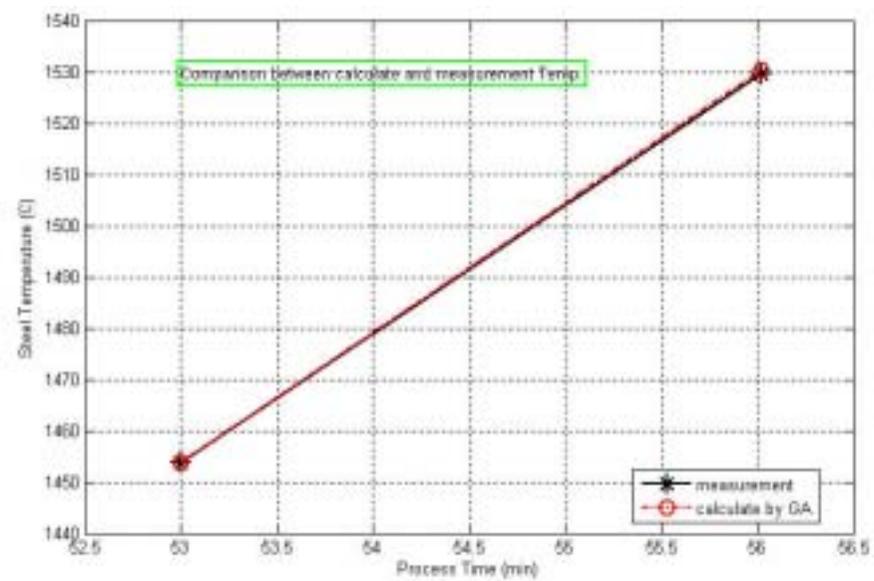
การหลอมครั้งที่ 7 วันที่ 1



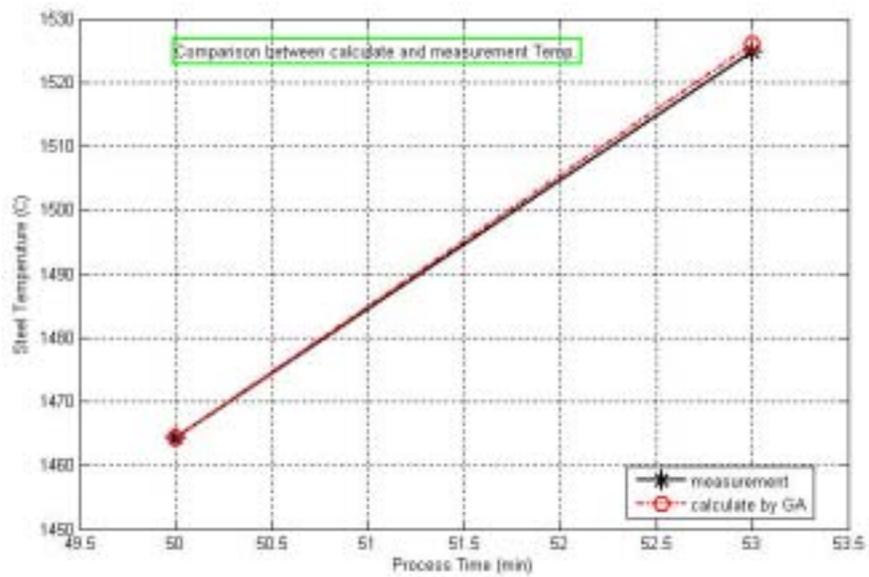
การหลอมครั้งที่ 1 วันที่ 2



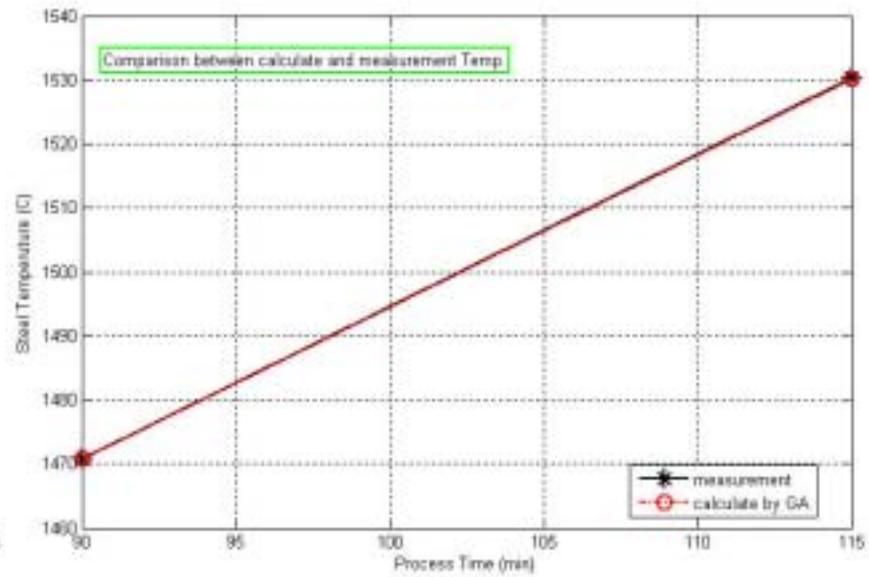
การหลอมครั้งที่ 2 วันที่ 2



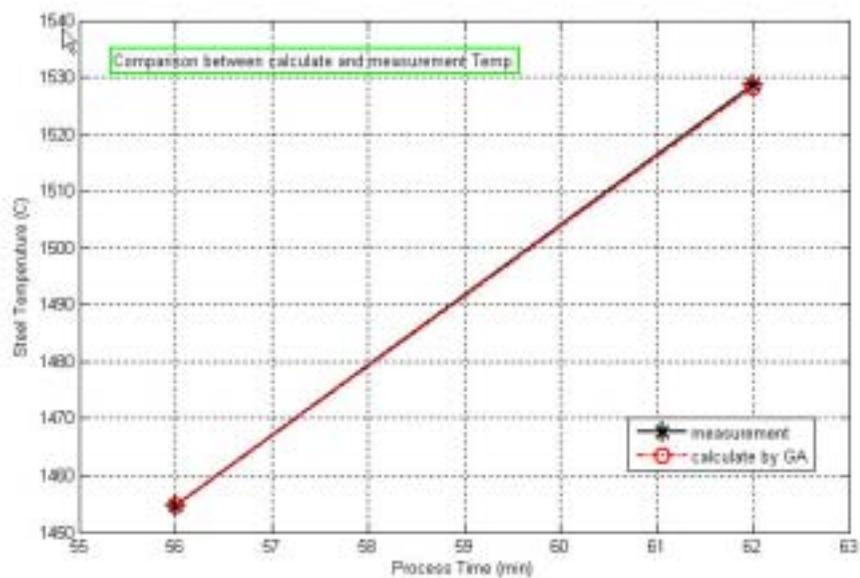
การหลอมครั้งที่ 3 วันที่ 2



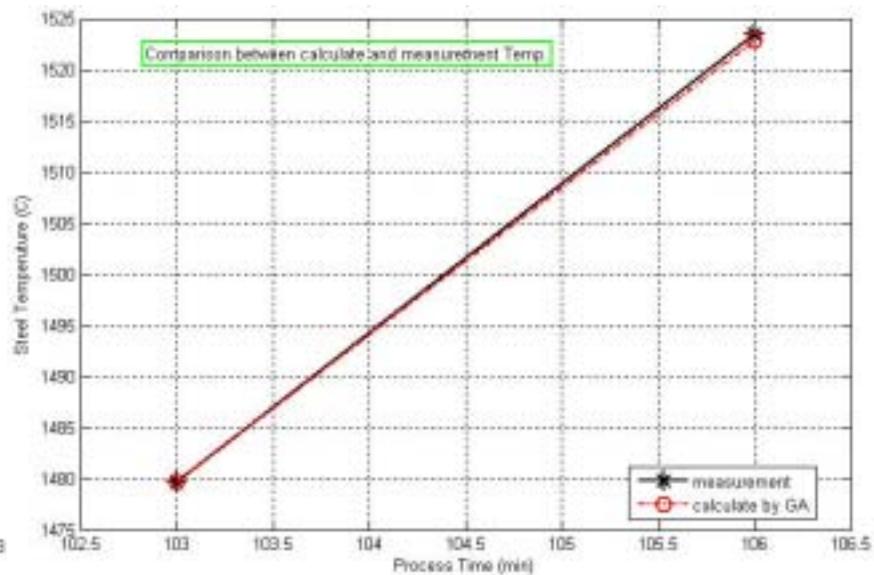
การหลอมครั้งที่ 4 วันที่ 2



การหลอมครั้งที่ 5 วันที่ 2



การหลอมครั้งที่ 6 วันที่ 2



การหลอมครั้งที่ 7 วันที่ 2

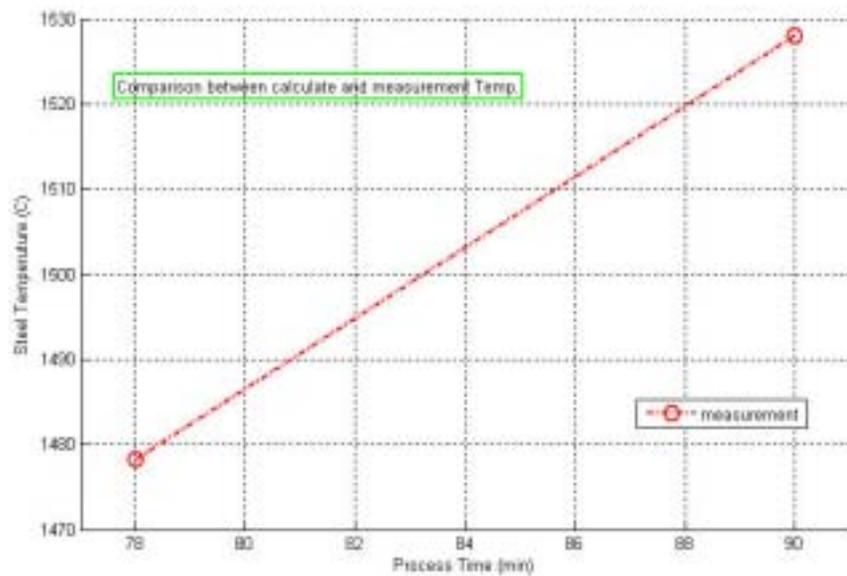
ภาพที่ 20 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิหน้าเหล็ก ระหว่างค่าจากการวัดจริง กับวิธีการประมาณฯ โดยนำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอม ครั้งนั้น มาประมาณค่าอุณหภูมิหน้าเหล็ก ในการหลอมครั้งนั้นๆ

## การทดลอง แบบที่ 2

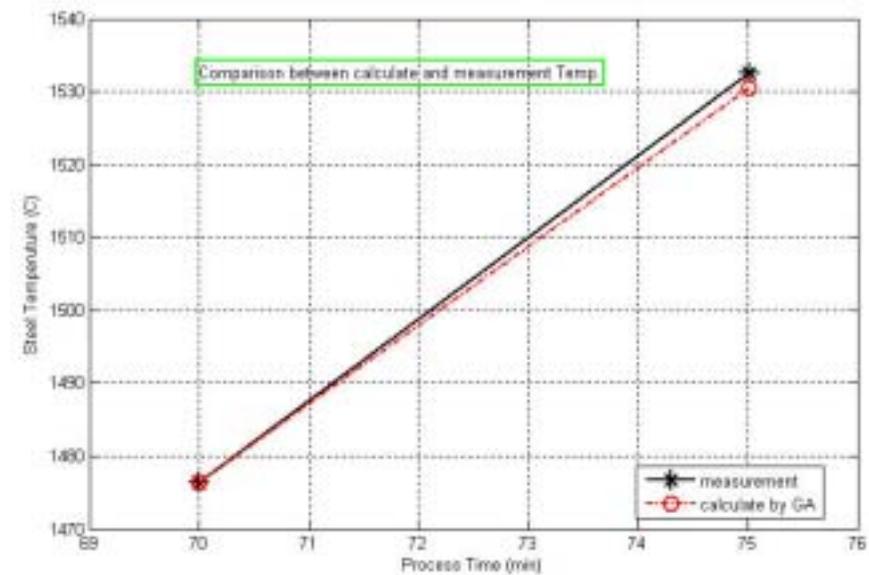
จุดประสงค์ของการทดลองแบบที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กถ่วงหน้า โดยการหาค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม เฉพาะการหลอมครั้งที่ 1 ของแต่ละวัน เท่านั้น

แล้วนำค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ที่ได้ รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากตารางที่ 12 แทนลงในสมการที่ (25) เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในทุกๆ การหลอมที่เหลือ ของแต่ละวัน ดังแสดงในภาพที่ 21

## ข้อมูลการหลอม วันที่ 1

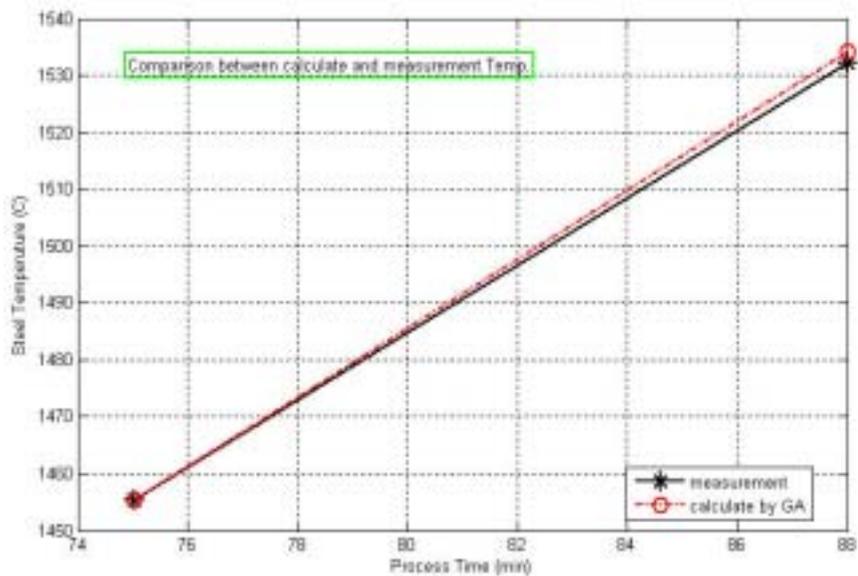


การหลอมครั้งที่ 1 วันที่ 1



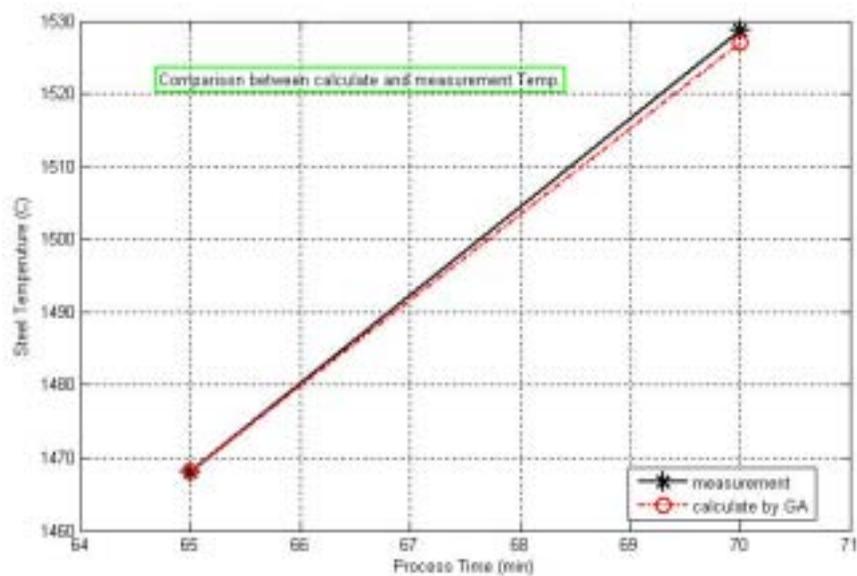
การหลอมครั้งที่ 2 วันที่ 1

(นําค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิหน้าเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 2)



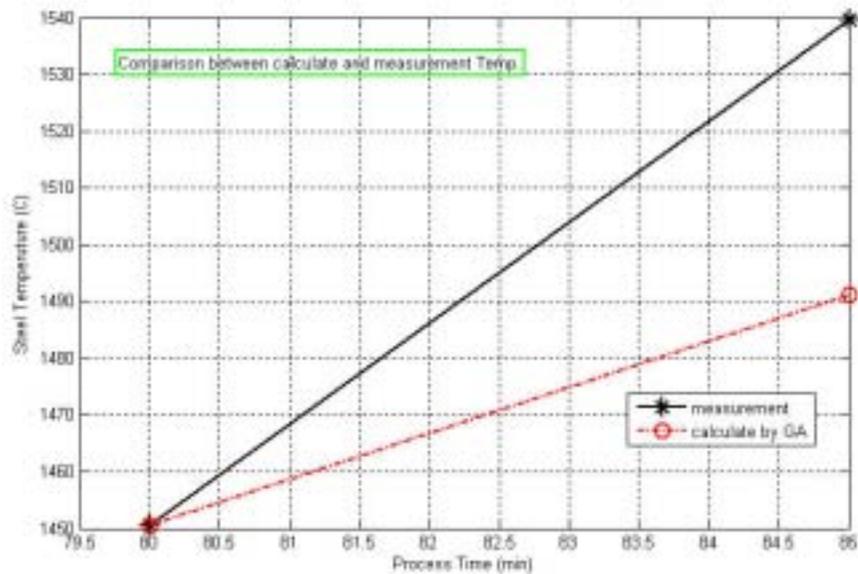
การหลอมครั้งที่ 3 วันที่ 1

(นำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 3)



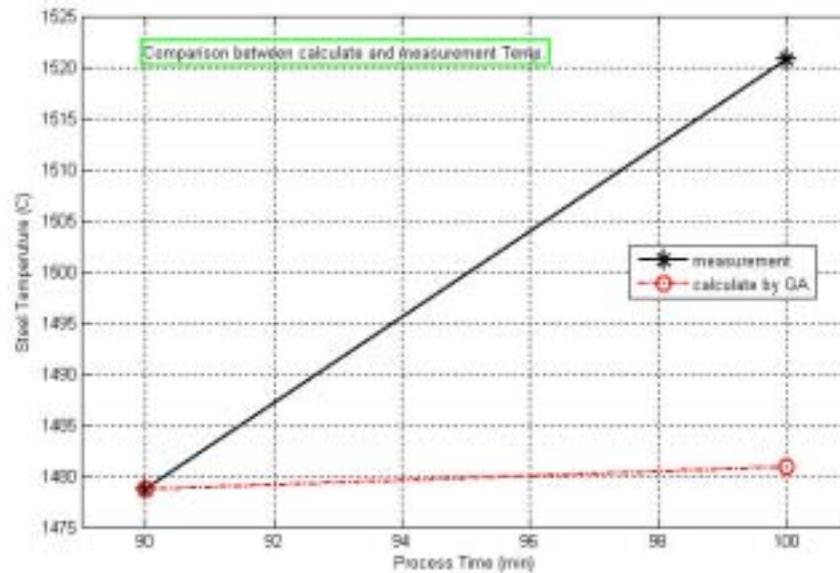
การหลอมครั้งที่ 4 วันที่ 1

(นำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 4)



การหลอมครั้งที่ 5 วันที่ 1

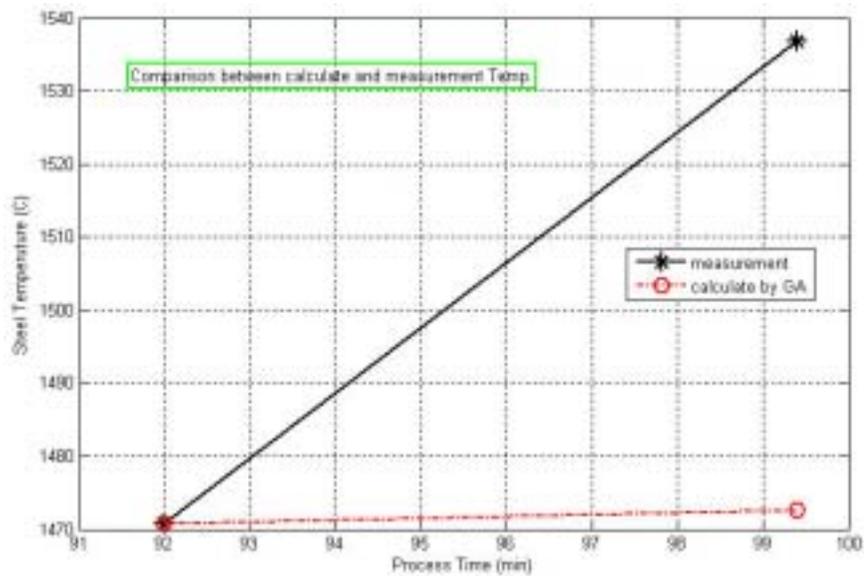
(นำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 5)



การหลอมครั้งที่ 6 วันที่ 1

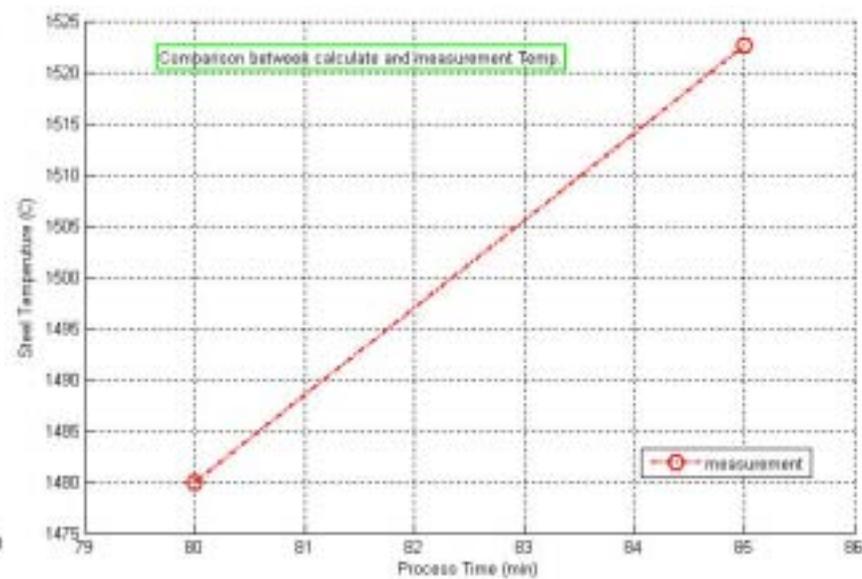
(นำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 6)

## ข้อมูลการหลอม วันที่ 2

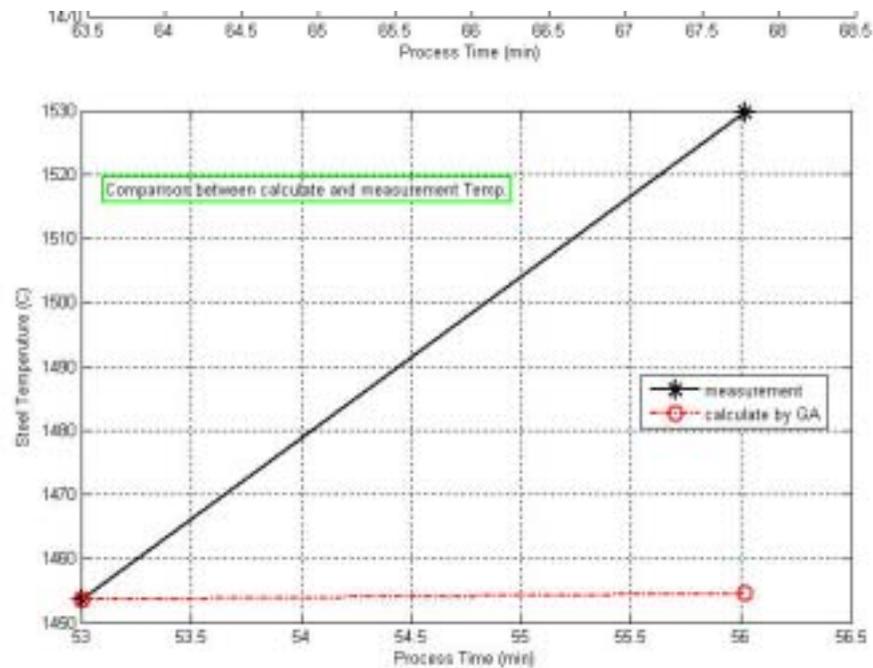


## การหลอมครั้งที่ 7 วันที่ 1

(นำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิหน้าเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 7)



## การหลอมครั้งที่ 1 วันที่ 2

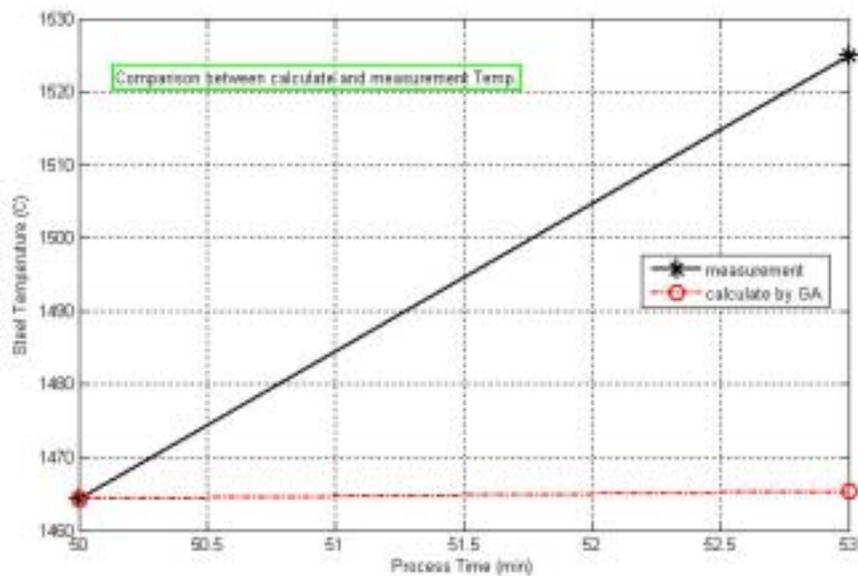


การหลอมครั้งที่ 2 วันที่ 2

(นำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 2)

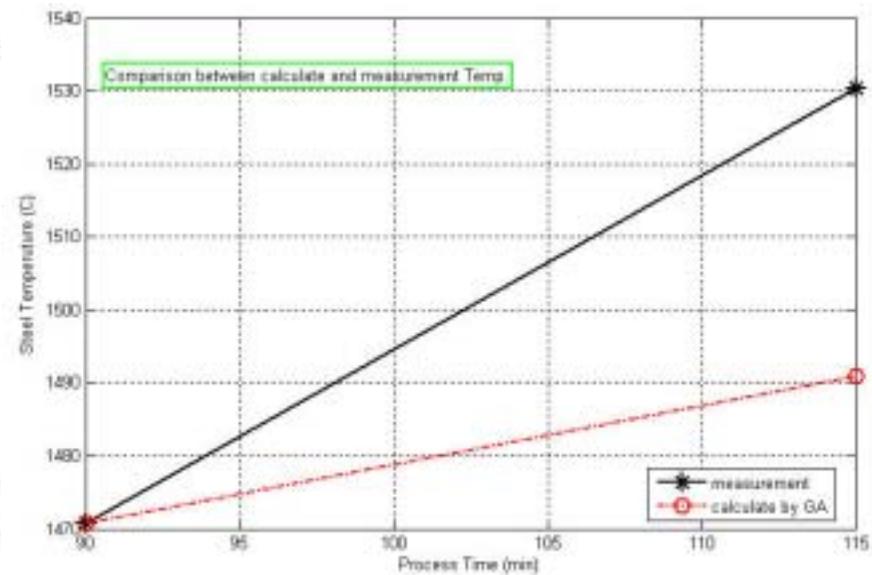
การหลอมครั้งที่ 3 วันที่ 2

(นำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 3)



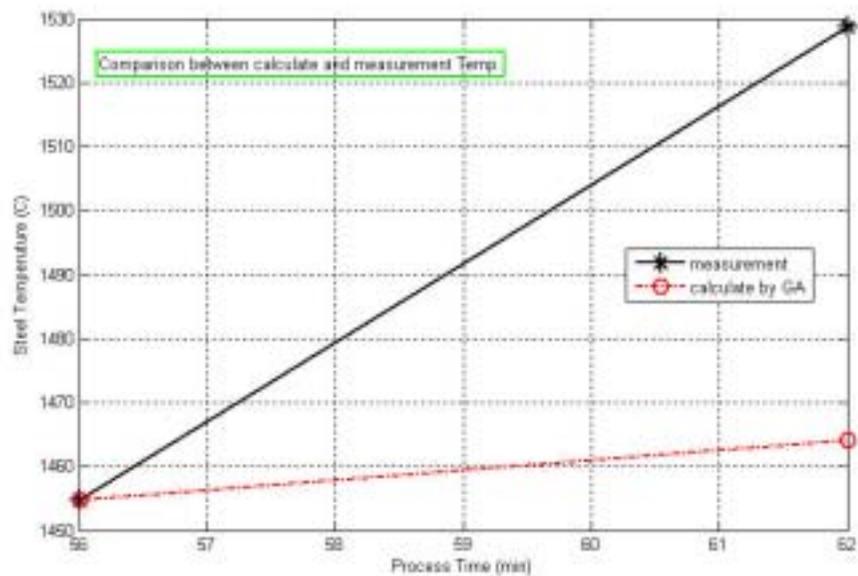
การหลอมครั้งที่ 4 วันที่ 2

(นำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 4)



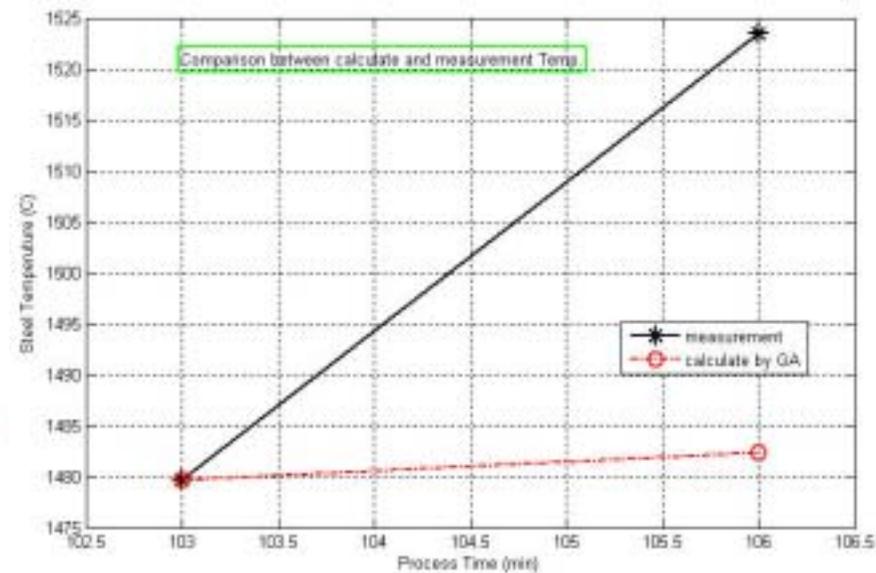
การหลอมครั้งที่ 5 วันที่ 2

(นำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 5)



การหลอมครั้งที่ 6 วันที่ 2

(นำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 6)



การหลอมครั้งที่ 7 วันที่ 2

(นำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 7)

ภาพที่ 21 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเหล็ก ระหว่างค่าจากการวัดจริง กับวิธีการประมาณฯ โดยนำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งต่อไป

### การทดลอง แบบที่ 3

จุดประสงค์ของการทดลองแบบที่ 3 เป็นการทดลองเพื่อประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กถ่วงหน้า โดยการหาค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม ทุกๆ การหลอม ของแต่ละวัน

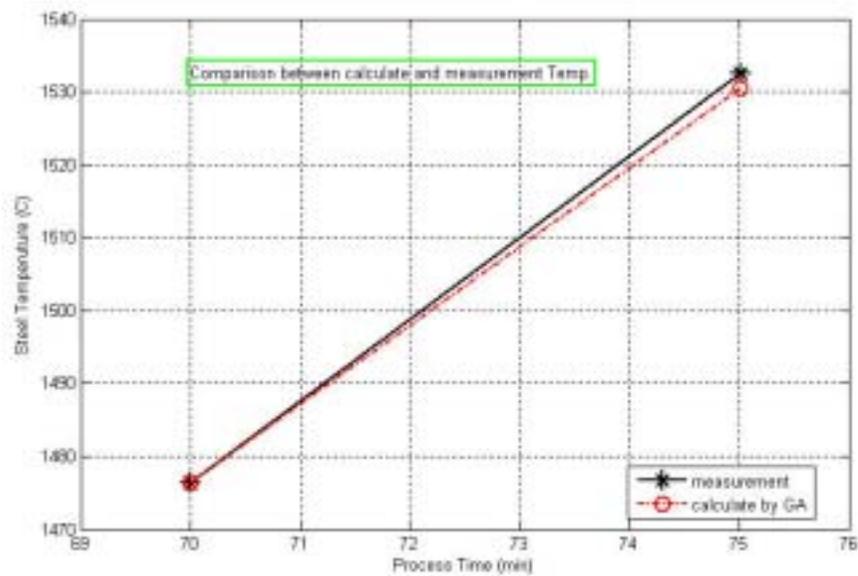
ให้นำค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ที่ได้ รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากตารางที่ 12 แทนลงในสมการที่ (25) เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งถัดไป คือ

นำค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ของการหลอมครั้งที่ 1 ของวันที่ 1 ไปประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 2 ของวันที่ 1

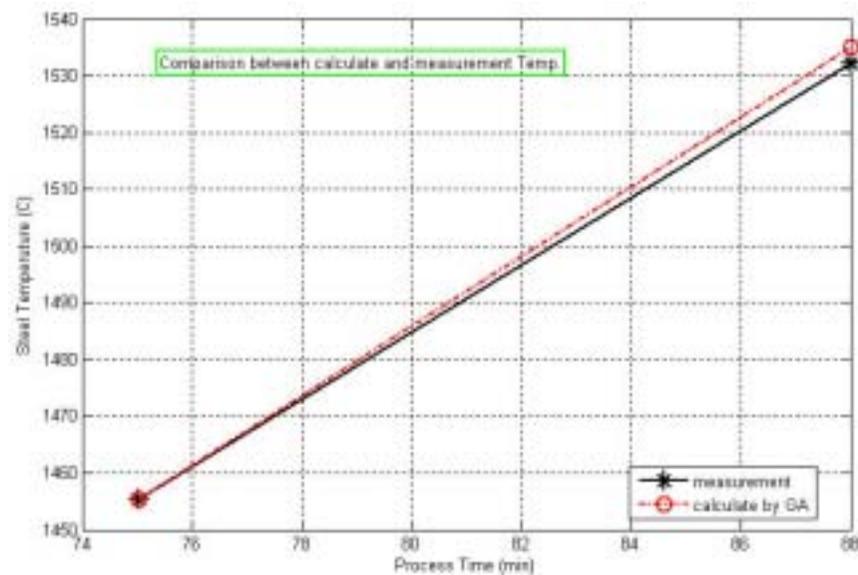
นำค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ของการหลอมครั้งที่ 2 ของวันที่ 1 ไปประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 3 ของวันที่ 1 ทำเช่นนี้ซ้ำๆ จนครบทุกการหลอม

จะได้ ดังแสดงในภาพที่ 22

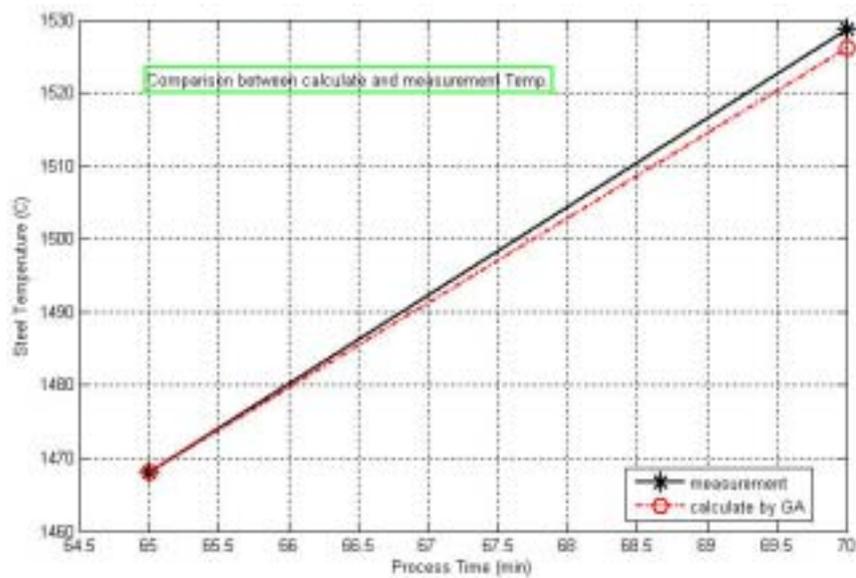
ข้อมูลการหลอม วันที่ 1



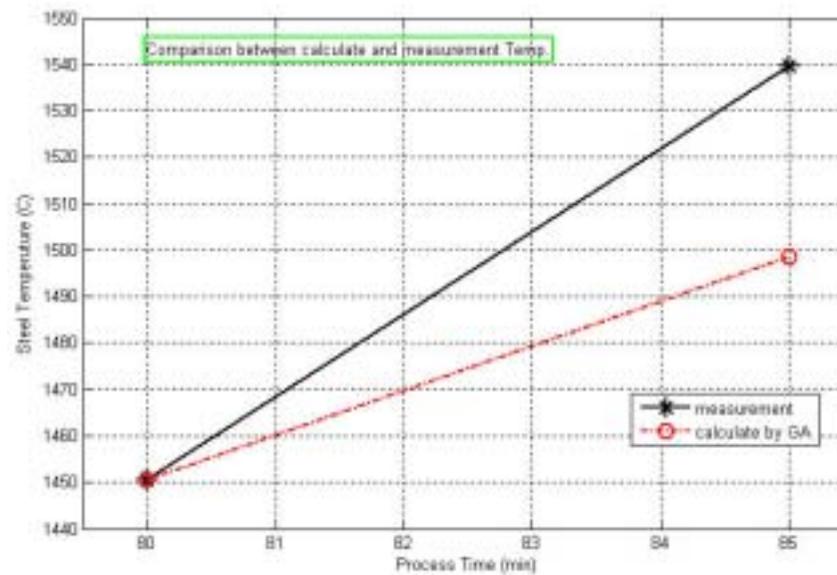
นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 วันที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิหน้าเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 2 วันที่ 1



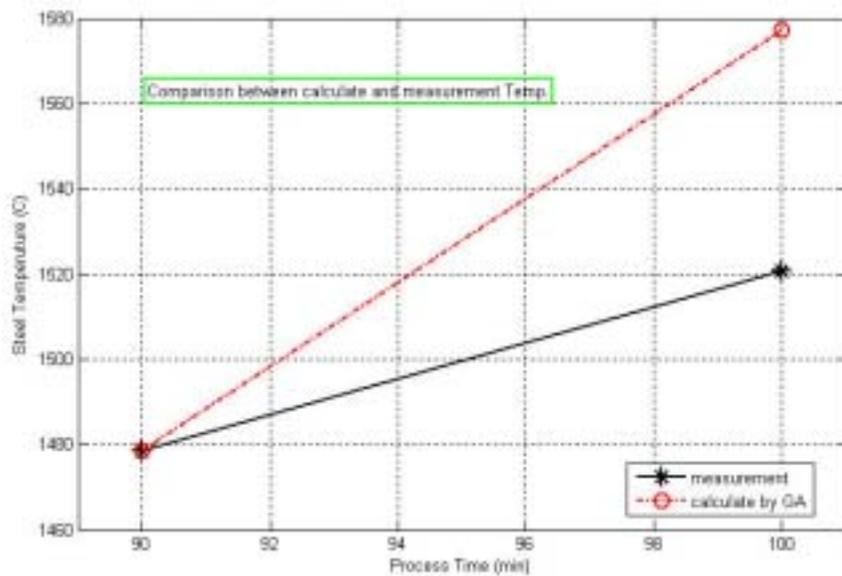
นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 2 วันที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิหน้าเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 3 วันที่ 1



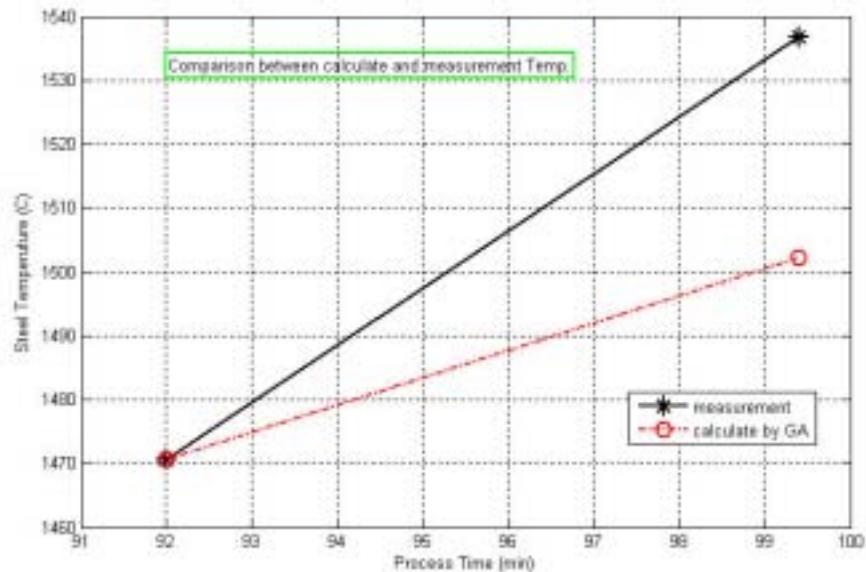
นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 3 วันที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 4 วันที่ 1



นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 4 วันที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 5 วันที่ 1

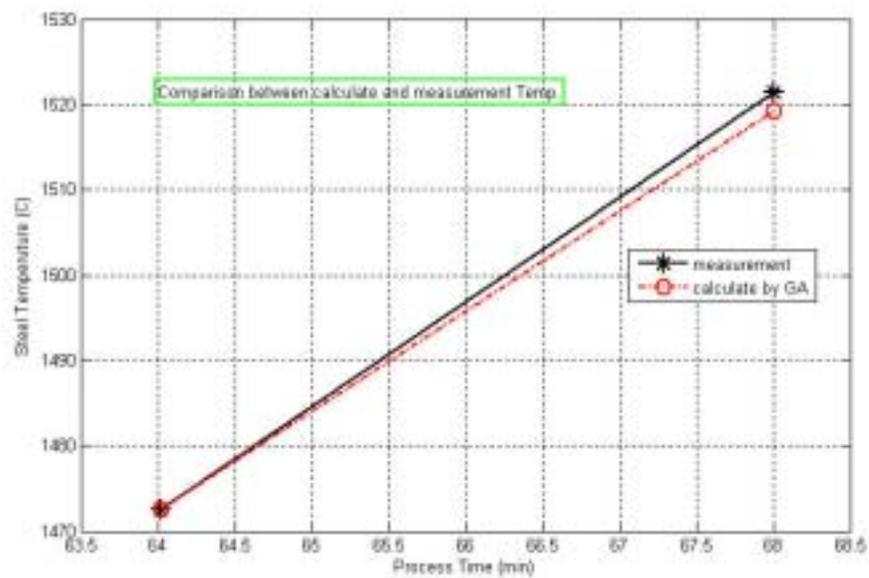


นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 5 วันที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 6 วันที่ 1

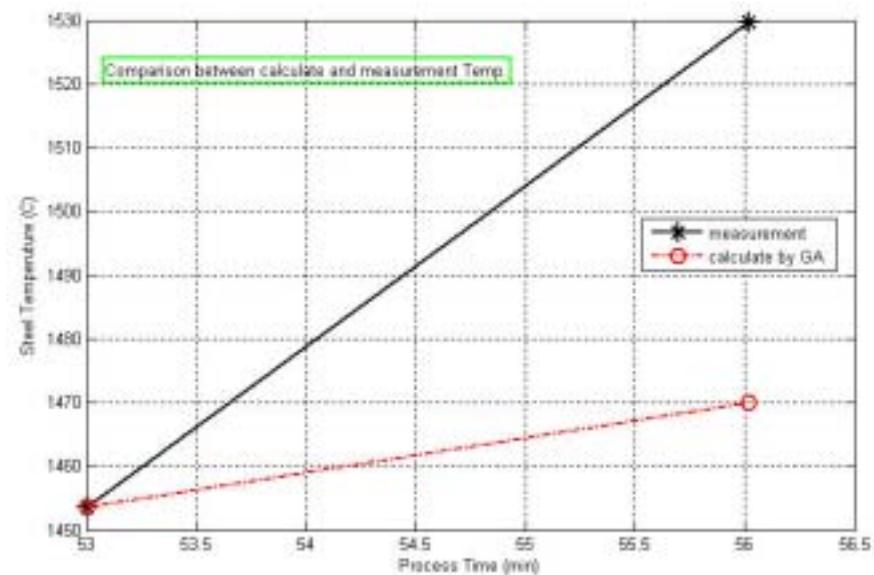


นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 6 วันที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 7 วันที่ 1

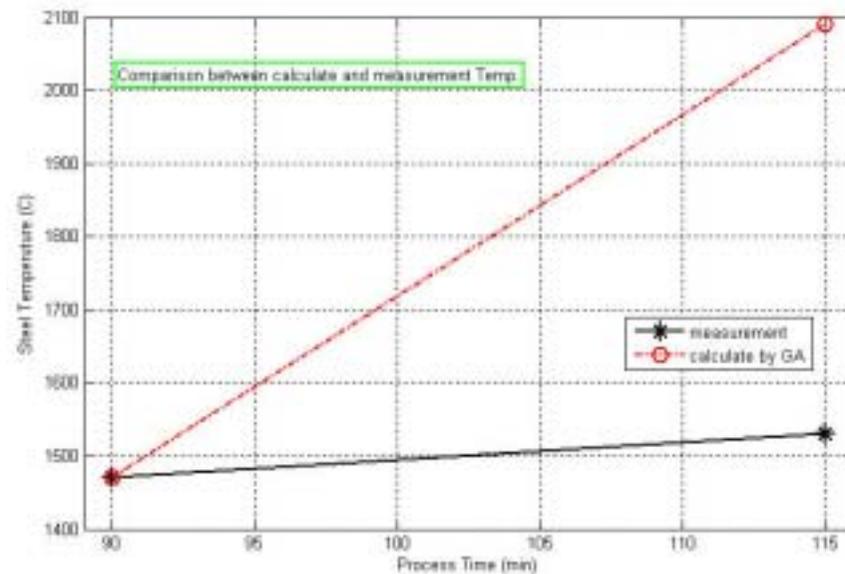
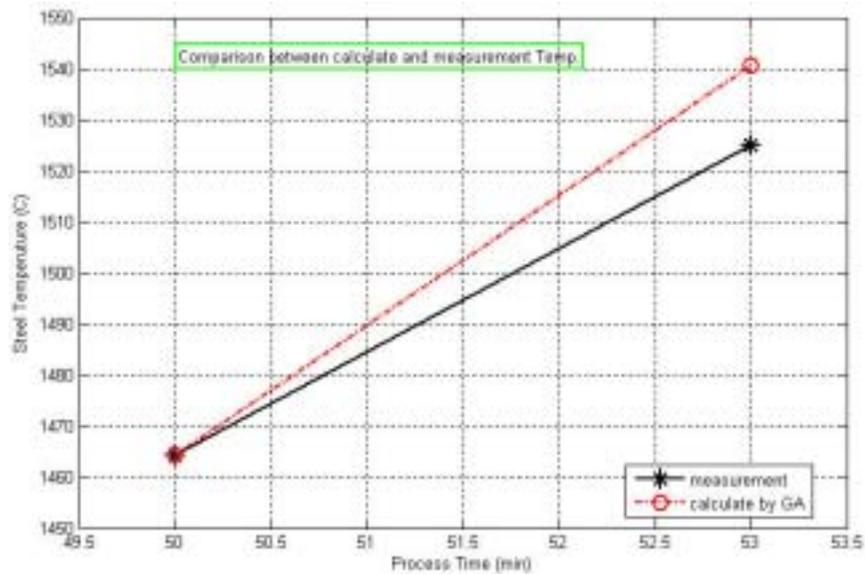
## ข้อมูลการหลอม วันที่ 2



นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 วันที่ 2 มาประมาณค่าอุณหภูมิเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 2 วันที่ 2

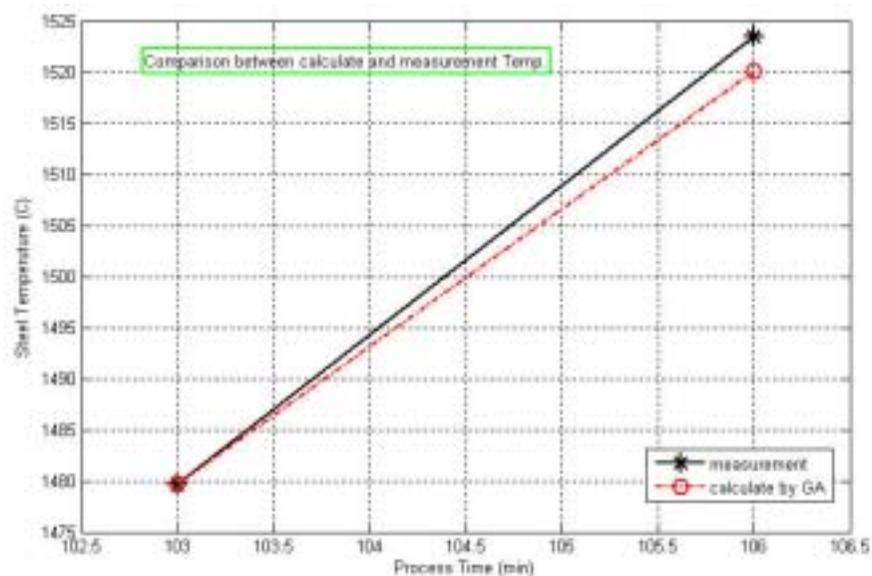
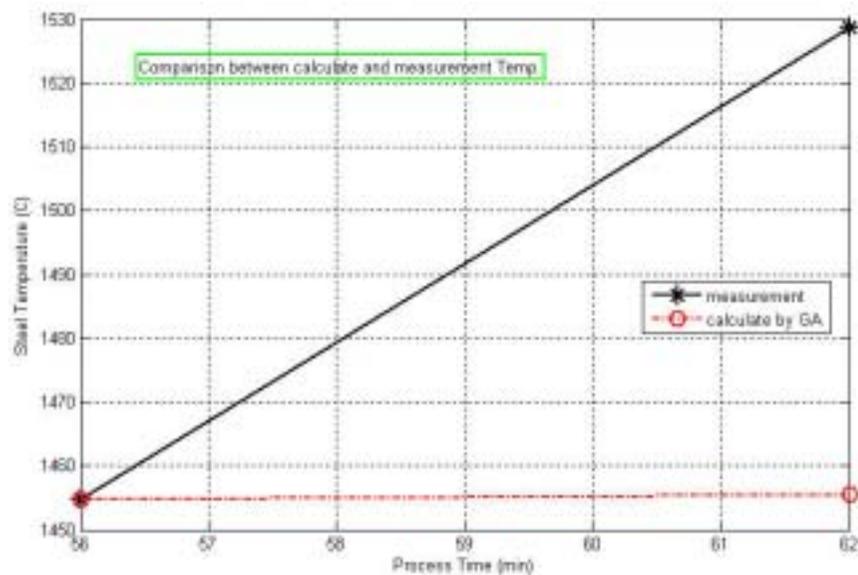


นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 2 วันที่ 2 มาประมาณค่าอุณหภูมิเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 3 วันที่ 2



นำค่า  $(c_1, c_2, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 3 วันที่ 2 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 4 วันที่ 2

นำค่า  $(c_1, c_2, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 4 วันที่ 2 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 5 วันที่ 2



นำค่า  $(c_1, c_2, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 5 วันที่ 2 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 6 วันที่ 2

นำค่า  $(c_1, c_2, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 6 วันที่ 2 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 7 วันที่ 2

ภาพที่ 22 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเหล็ก ระหว่างค่าจากการวัดจริง กับวิธีการประมาณฯ โดยนำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1, 2, ..., 6 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 2, 3, ..., 7 ตามลำดับ

#### การทดลอง แบบที่ 4

จุดประสงค์ของการทดลองแบบที่ 4 เป็นการทดลองเพื่อประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กถ่วงหน้า มีลักษณะคล้ายกับการทดลองแบบที่ 3 โดยการหาค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม ทุกๆ การหลอม ของทั้ง 2 วัน

ให้นำค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ที่ได้ รวมถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จากตารางที่ 12 แทนลงในสมการที่ (25) เพื่อประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งถัดไปคือ

นำค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ของการหลอมครั้งที่ 1 ของวันที่ 1 ไปประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 2 ของวันที่ 1

นำค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ของการหลอมครั้งที่ 3 ของวันที่ 1 ไปประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 4 ของวันที่ 1

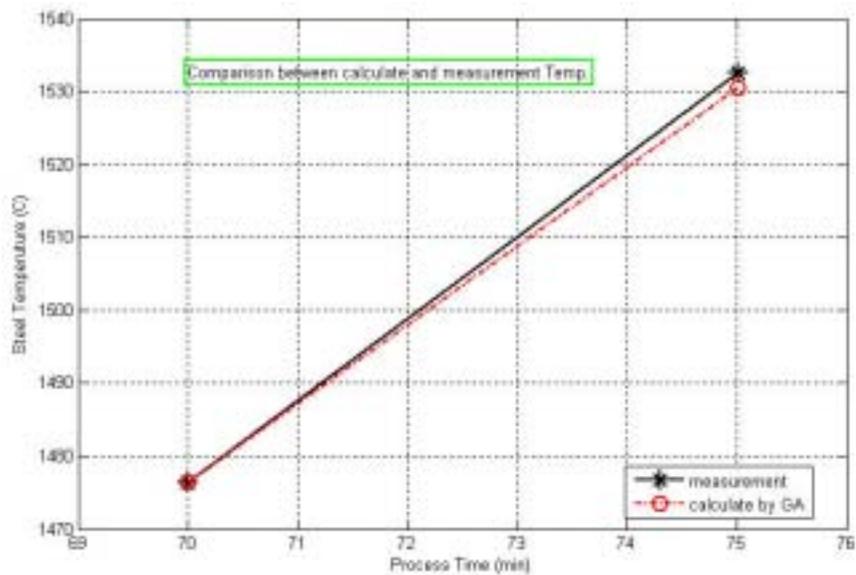
นำค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ของการหลอมครั้งที่ 5 ของวันที่ 1 ไปประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 6 ของวันที่ 1

นำค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ของการหลอมครั้งที่ 7 ของวันที่ 1 ไปประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 1 ของวันที่ 2

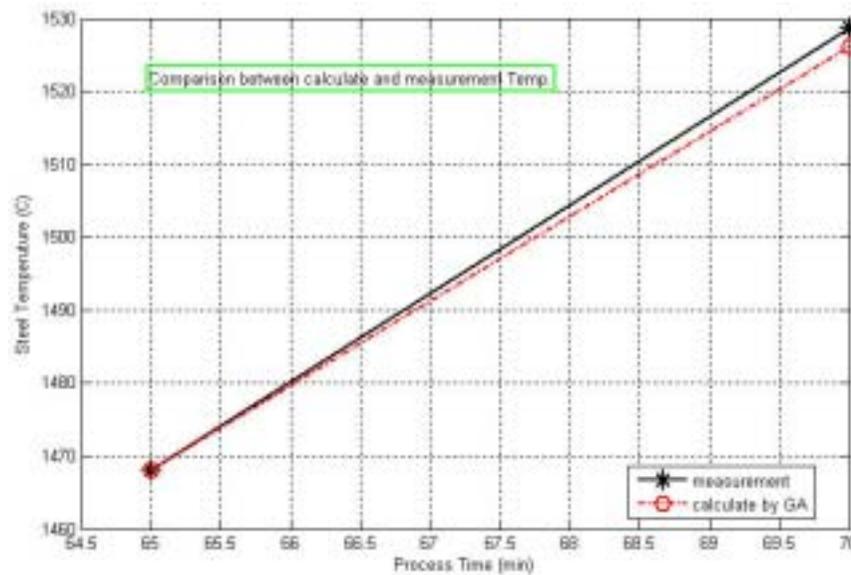
กระทำต่อเนื่องจนถึงการประมาณค่าครั้งสุดท้าย จะเป็นการนำค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ของการหลอมครั้งที่ 6 ของวันที่ 2 ไปประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 7 ของวันที่ 2

จะได้ ดังแสดงในภาพที่ 23

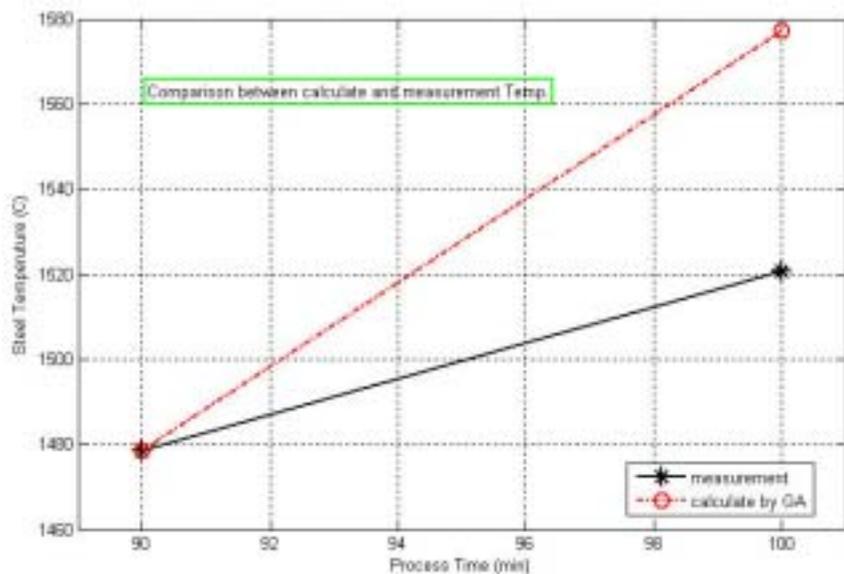
ข้อมูลการหลอม วันที่ 1 และวันที่ 2



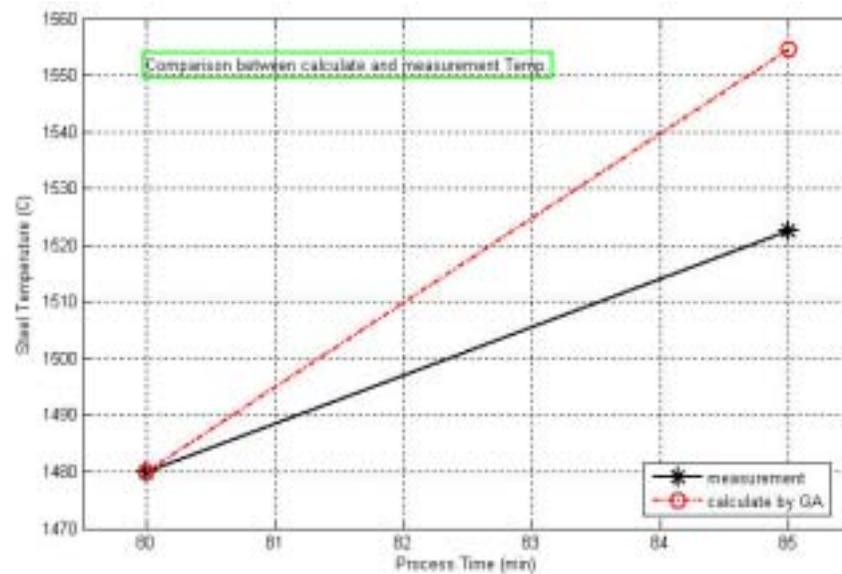
นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 1 วันที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 2 วันที่ 1



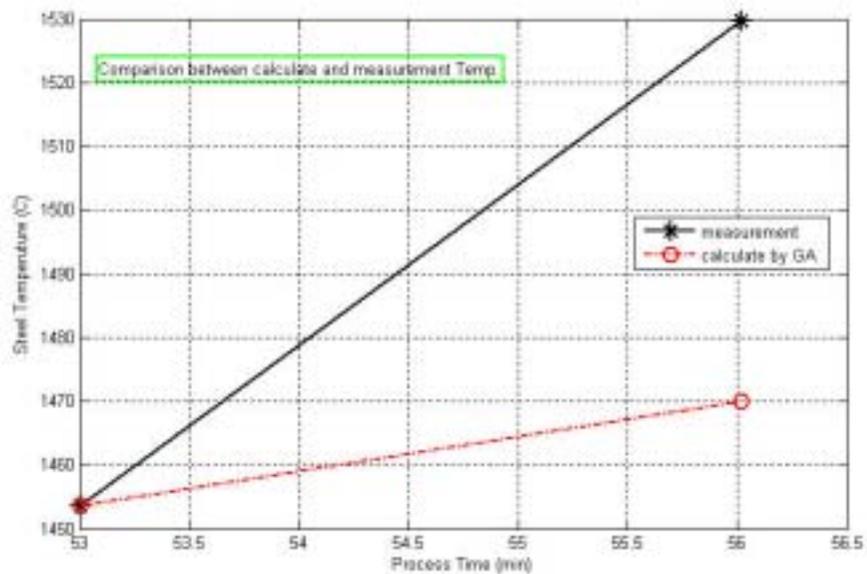
นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 3 วันที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 4 วันที่ 1



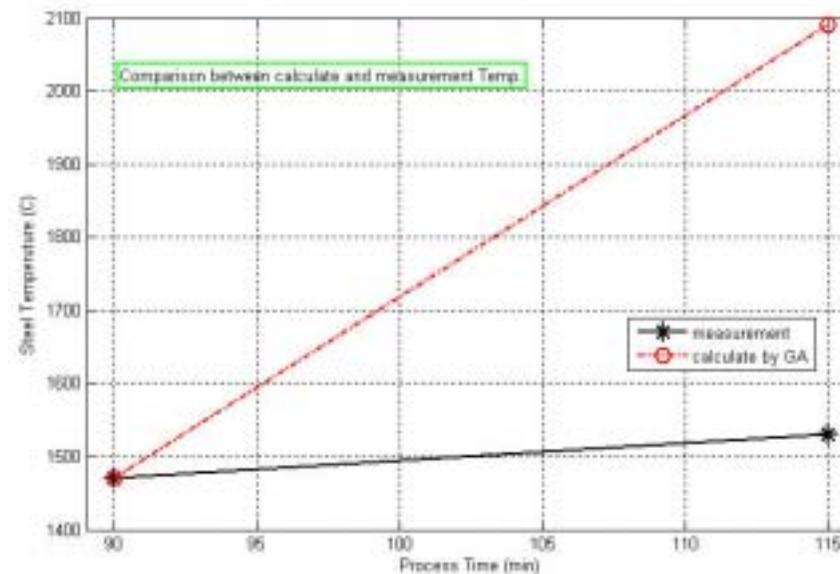
นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 5 วันที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 6 วันที่ 1



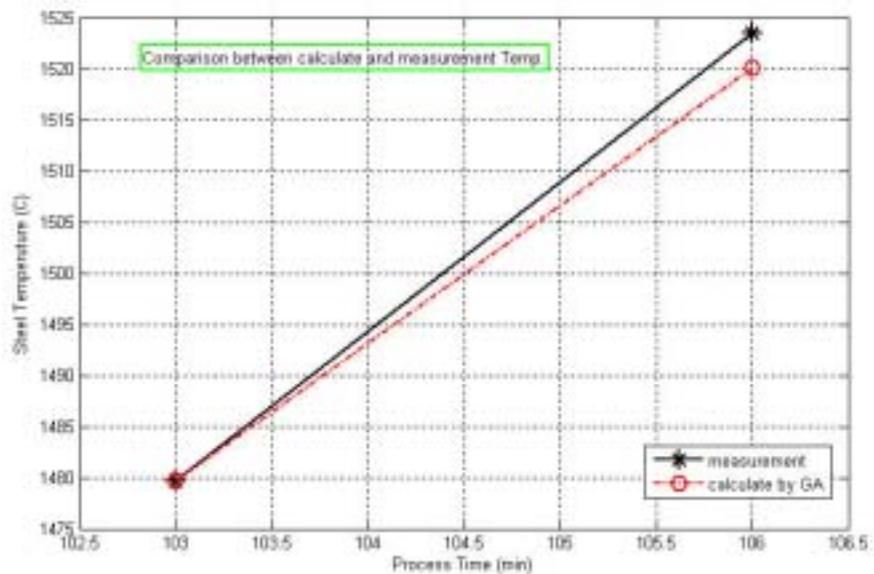
นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 7 วันที่ 1 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 1 วันที่ 2



นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 2 วันที่ 2 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 3 วันที่ 2



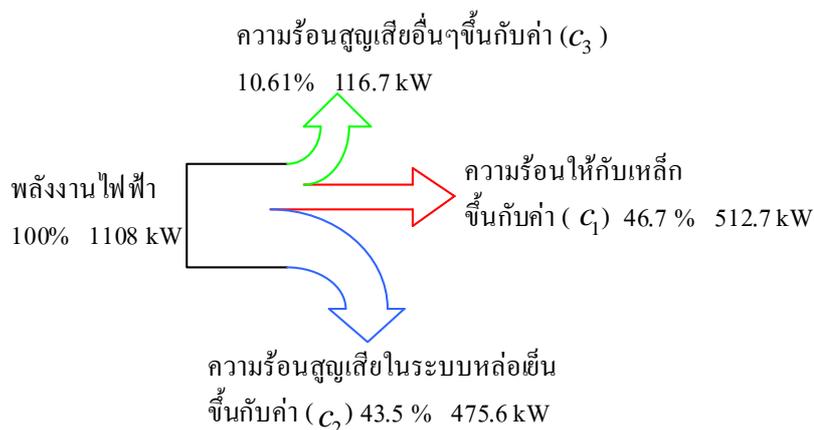
นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 4 วันที่ 2 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 5 วันที่ 2



นำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอมครั้งที่ 6 วันที่ 2  
มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 7 วันที่ 2

ภาพที่ 23 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำเหล็ก ระหว่างค่าจากการวัดจริง กับวิธีการประมาณฯ โดยนำค่า ( $c_1, c_3$ ) ที่ได้จากการประมาณ ในการหลอม  
ครั้งที่ 1, 3, ..., 6, 7 มาประมาณค่าอุณหภูมิน้ำเหล็ก ในการหลอมครั้งที่ 2, 4, ..., 7, 1(วันต่อไป) ตามลำดับ

จากการทดลองเมื่อนำค่า  $(c_1, c_2, c_3)$  ที่ได้ เช่นการหลอมครั้งที่ 5 ของวันที่ 1 มีค่า  $(c_1, c_2, c_3) = 1875.10, 6.70, 166.69$  9 ตามลำดับ เมื่อแทนค่าลงในสมการ (25) เพื่อเขียนแผนภาพ แชนจ์ที่ไดอะแกรม จะมีค่าพลังงานต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 22



ภาพที่ 24 แสดงแผนภาพแชนจ์ที่ไดอะแกรมในช่วงให้ความร้อนในงานวิจัยปัจจุบัน

### การวิจารณ์ผลการทดลองการประมาณค่าอุณหภูมิ

1. จากผลการทดลองแบบที่ 1 พบว่าในการหลอมครั้งที่ 3 ของวันที่ 1 ค่าที่วัดจริงกับค่าที่ประมาณฯ มีค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ  $-2.25$  องศาเซลเซียส ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ  $-1.124$  องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการประมาณด้วยวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุด ที่มีค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 8 องศาเซลเซียส ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยเท่ากับ 2.42 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงเชื่อได้ว่าการประมาณค่าอุณหภูมิ ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึมมีความถูกต้อง และสามารถทำงานได้

2. จากผลการทดลองแบบที่ 2, 3 และ 4 พบว่าอุณหภูมินำเหล็กที่ได้จากการประมาณ มีทั้งค่าใกล้เคียงและแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่ลักษณะที่ได้ทั้งสองแบบไม่ได้เป็นไปในลักษณะเชิงเส้น ดังนั้นไม่สามารถบอกได้ว่า การนำค่า  $(c_1, c_3)$  ที่ได้จากการประมาณฯ ในการหลอมก่อนหน้า มาประมาณค่าอุณหภูมินำเหล็กในการหลอมครั้งต่อไป จะสามารถประมาณค่าอุณหภูมิได้อย่างถูกต้องทุกครั้ง สาเหตุความผิดพลาดน่าจะมีผลมาจาก

- นำหนักของเหล็ก และอัตราส่วนระหว่างเหล็กหล่อ – เหล็กหล่อเหนียว ในการหลอมแต่ละครั้งที่ไม่เท่ากัน ซึ่งจะมีผลต่อความร้อนที่ให้กับเหล็ก

- การเปิด – ปิด ฝาเตาบ่อยและนานเกินไป ซึ่งจะมีผลต่อความร้อนสูญเสียอื่นๆ
  - ระยะเวลาในการจุ่มวัดเทอร์โมคัปเปิลชนิด R ที่ไม่เท่ากันของพนักงานผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจะมีผลต่อความร้อนสูญเสียอื่นๆ และค่าอุณหภูมิวัดจริง
3. จากภาพที่ 20 – 23 ในการทดลองแบบที่ 1 – 4 พบว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตามีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย  $8 - 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$  / นาที
  4. จากการทดลองทั้งหมด การทดลองแบบที่ 1 มีความเหมาะสมที่สุดในการหาค่าอุณหภูมิประมาณ โดยพบว่าการที่จะให้ได้ค่าอุณหภูมิประมาณที่เหมาะสมจะต้องทำการประมาณฯ เมื่อรู้ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นแล้ว จะต้องใช้เวลาไม่เกิน 10 – 15 นาที ในการประมวลผลหาค่า ( $c_1, c_3$ ) ของการหลอมครั้งนั้นๆ และสั่งให้ระบบลดพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าลงมาอยู่ที่ 100 – 110 kW ในเวลาที่แน่นอน นั้นเท่ากับเป็นการลดการสูญเสียพลังงาน และลดต้นทุนค่าไฟฟ้าต่อหน่วยผลผลิต
  5. จากแผนภาพเชิงกึ่งโคอะแกรม พบว่าประสิทธิภาพ (พลังงานที่ให้กับเหล็ก) มีประสิทธิภาพโดยรวม 46.7 % เมื่อเทียบกับข้อมูลในการวิจัยของโครงการแรก พบว่าประสิทธิภาพของการประมาณค่าอุณหภูมิด้วยวิธีนี้ ให้ประสิทธิภาพโดยรวมเพิ่มขึ้น
  6. ควรปรับแรงดันไฟฟ้าของเตา ให้ใช้แทป (Tap) สูงสุด ซึ่งเป็นการใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด เพื่อให้มีการหลอมอย่างรวดเร็วเพื่อลดการสูญเสียพลังงาน และการป้องกันการสูญเสียความร้อนเนื่องจากเตาเย็นตัวโดยไม่จำเป็นนั้น จะทำได้โดยการเปิด – ปิดฝาเตาอย่างรวดเร็ว
  7. การกำจัดสิ่งแปลกปนที่จะเกาะติดเข้าไปกับวัสดุที่ป้อนเข้าเตา เช่น ทรายจากแบบหล่อ หรือออกไซด์เกาะติดเข้าไปด้วยเพราะปริมาณของ slag จะมีประมาณ 2% ของปริมาณน้ำโลหะ แต่เนื่องจากความจุความร้อนของ slag ที่อุณหภูมิ  $1500 \text{ }^{\circ}\text{C}$  มีค่าประมาณ 800 kWh/ตัน ส่วนของเหล็กหล่อก็มีค่าประมาณ 375 kWh/ตัน เพราะฉะนั้นการเกิด slag 2% จะเท่ากับ 4.3% ของเหล็กหล่อ จึงเป็นการสูญเสียพลังงานที่ค่อนข้างจะสูง
  8. หากมีการนำรูปแบบของสมการ และแนวทางปฏิบัติของงานวิจัยนี้ไปใช้โปรดระวังปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ดังต่อไปนี้คือ
    - ตัวพนักงานผู้ปฏิบัติการ
    - น้ำหนักของเหล็ก, อัตราส่วนระหว่างเหล็กหล่อและเหล็กหล่อเหนียว
    - การเปิด – ปิด ฝาเตา
    - ระยะเวลาในการจุ่มวัดเทอร์โมคัปเปิลชนิด R
    - การทดลองนี้เป็นการทดลองเพียงเตาเดียว แต่ในการปฏิบัติงานจริงเป็นการทำงานแบบเตาคู่โดยใช้วงจรสวิตช์เป็นตัวสวิตช์เพื่อให้กำลังไฟฟ้ากับเตาแต่ละเตา

## สรุป

ด้วยเหตุผลที่ว่า การวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กอย่างต่อเนื่องไม่สามารถทำได้ เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงของน้ำเหล็กเอง อีกทั้งอายุการใช้งานของอุปกรณ์การวัด (เทอร์โมคัพเบิลชนิด R) ไม่สามารถใช้งานได้นานพอ รวมถึงปัจจัยอื่นๆที่ไม่สามารถควบคุมได้ อาทิเช่น ทักษะผู้ปฏิบัติการ, การเปิด – ปิด ฝาเตาบ่อยและนานเกินไป, ความนานในการจุ่มวัดเทอร์โมคัพเบิลชนิด R และน้ำหนักของเหล็กในการหลอมแต่ละครั้ง เป็นต้น

ดังนั้นการนำวิธีการประมาณค่า ( $c_1, c_3$ ) ด้วยวิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm) ซึ่งมีวิธีการที่ง่าย และเป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ที่ใช้ค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด มาทำการประมาณค่า ( $c_1, c_3$ ) เพื่อหาอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมฯ ที่เสนอในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ และสามารถใช้งานได้จริง โดยที่ค่าที่ได้ มีความแม่นยำมากกว่า เมื่อเทียบกับวิธีการอื่นๆ เช่นวิธีกำลังสองที่น้อยที่สุด และถ้าผู้สนใจหรือผู้ที่ต้องการดำเนินการต่อ สามารถหารูปแบบ (model) กระบวนการผลิต เช่นรู้น้ำหนักเหล็กที่แน่นอนในการหลอมแต่ละครั้ง, รู้อัตราส่วนระหว่างเหล็กหล่อและเหล็กหล่อเหนียวที่แน่นอน เป็นต้น จะทำให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

ผลที่ได้ จากการที่มีการติดตั้ง เพื่อการปฏิบัติงานที่เตาหลอมขนาด 2 ตัน เตาคี่ 3 ของโรงหลอม 6 บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด เป็นที่น่าพอใจ รวมถึงค่าผิดพลาดของอุณหภูมิน้ำเหล็กระหว่างวิธีการวัดจริงกับวิธีการประมาณที่ได้มีค่าน้อย แสดงว่าการประมาณด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพ สามารถใช้ได้จริง

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กัญญา ทองถิ่น และ ขจรศักดิ์ คันทพนิต. 2545. การควบคุมกำลังย้อนกลับของระบบบรอดแบนด์ DS/CDMA โดยใช้หลักการพีซีลอคจิก ร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึม. ใน รายงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25
- เจมภัทร สมสังข์, พีระยศ แสนโกชน์ และ ศุภวุฒิ จันทร์วานุวัฒน์. 2548. การพัฒนาระบบประมาณน้ำไหลในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำ โดยใช้เจเนติกอัลกอริทึม. ใน รายงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28
- เจริญ เพชรมณี. 2547. **เรียนลัด LabVIEW**. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่นจำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.
- ทิวาวรรณ เนตรผง, อาทิตย์ ศรีแก้ว และ สราวุฒิ สุจิจร. 2545. จินเนติกอัลกอริทึมสำหรับการวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิก โดยวิธีการตั้งค่าจุดเริ่มเปลี่ยนที่เหมาะสมที่สุด. ใน รายงานการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25
- เทพนารินทร์ ประพันธ์พัฒน์. 2538. **พื้นฐานงานหล่อโลหะ**. บริษัทสกายบุ๊กส์จำกัด, ปทุมธานี.
- พงษ์ธร จริญญากรณ์. 2542. **อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในงานอุตสาหกรรม**. บริษัทซีเอ็ด ยูเคชั่นจำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.
- พยูร เกตุกราย. 2526. **การหล่อโลหะ ภาคผลิต**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.
- มันสิน ตันทุลเวศม์ และ ไพพรรณ พรประภา. 2524. **การปรุงแต่งคุณภาพน้ำ สำหรับระบบหม้อไอน้ำ ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบประปาในอาคาร**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ
- โมโตกิ มัสซุโอะ. 2544. **เทคนิคการประหยัดพลังงานไฟฟ้าในอุตสาหกรรม**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

โยชิฮิโกะ ทากามุระ. 2543. การประหยัดพลังงานความร้อนในอุตสาหกรรม. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

รัชทิน จันทรเจริญ และ ประพันธ์ พิกุลทอง. 2544. โครงการการปรับปรุงการใช้ไฟฟ้าในเตาหลอมเหนียวนำไฟฟ้าด้วยวิธีควบคุมความร้อน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.).

รัชทิน จันทรเจริญ, มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล และ ประพันธ์ พิกุลทอง. การประมาณค่าและควบคุมอุณหภูมิเพื่อการประหยัดพลังงานของเตาหลอมแบบเหนียวนำไฟฟ้า. ใน รายงานการประชุมวิชาการเครือข่ายเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 16

ศิริกัลยา สุวจิตตานนท์. 2548. เทคนิคการอนุรักษ์พลังงานในโรงงานอุตสาหกรรมและกรณีศึกษา. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สุนทร รุณวงศ์. 2534. เทคโนโลยีการผลิตเหล็กหล่อเบื้องต้น. สภาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ. กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม

สุนันท์ ศรีณชนิดย์. 2535. การถ่ายเทความร้อน. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพฯ.

เอก ไชยสวัสดิ์. 2539. การวัดและเครื่องวัดไฟฟ้า. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), กรุงเทพฯ.

Astrom, K.J. and B. Wittenmark. 1976. **Adaptive Control**. Addison Wesley, Second Edition

Elliot, R. 1998. Induction melting. **Cast Iron Technology** : 10(63)

Holand J.H. 1975. **Adaptation in natural and artificial system**. University of Michigan Press, Michigan.

Industrial Technology. 2547. Signal Transmitter. **Industrial Technology Review** : 10(119)

Jang J.S., C.T. Sun and E. Mizutani. 1997. Neuro – Fuzzy and Soft Computing. Prentice – Hall, Inc

Jeffrey, T. 2002. **LabVIEW for Everyone**. Prentice Hall PTR, Second Edition

John, E. 1998. **Advanced LabVIEW Labs**. Prentice Hall, Inc.

Katsuhito, Y., O. Masuji, A. Norihiro, H.G. Tamotsu and S. Kouichi. 1997. Precise temperature control for molten ferrous alloy in induction furnace. **SAE Special Publications**

Sun, Y.G., D.X. Wang, B.S. Tao, T. Yan, Y. Shi, S.B. Fang and Y.H. Wang. 2000. An Intelligent Ladle Furnace Control System. **Proceedings of the 3<sup>rd</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation**: 330-334.

Tadeusz, M. D., R. M. Phillippi and E. P. Charles. 1977. Fluidics-A New Potential for Energy Conservation by Continuous High Temperature Monitoring and control. **Heat Transfer in Energy Conservation: 127-134.**

Westphal, E., A. Mankbauer and A. Muiznieks. 1997. Study of the heat fluxes in an induction furnace with cold crucible. **Advance in Engineering Heat Transfer.**

Yamada, K. and M. Oshima. 1997. Precise Temperature Control for Molten Ferrous Alloy in Induction Furnace. **SAE Special Publication**: 123-137

ภาคผนวก

การหาค่าคงที่  $(c_1, c_3)$  ด้วยเจเนติกอัลกอริทึม

```
% Genetic Algorithm %
```

```
generation_n = 20;
```

```
popuSize = 20;
```

```
xover_rate = 1.0;
```

```
mutate_rate = 0.01;
```

```
bit_n = 16;
```

```
var_n = 2;
```

```
range = [500,3000; 100,250];
```

```
obj_fcn = 'temp_dyn';
```

```
popu = rand(popuSize,bit_n*var_n)>0.5;
```

```
disp('          C1   C3   fitness value(-error)')
```

```
for i = 1:generation_n;
```

```
    fcn_value = evalpopu(popu,bit_n,range,obj_fcn);
```

```
    [best,index] = max(fcn_value);
```

```
    fprintf('Generation %i: ',i);
```

```
    fprintf('%3.2f, %3.2f = %3.2f\n',bit2num(popu(index,1:bit_n),range(1,:)),...
```

```
        bit2num(popu(index,bit_n+1:2*bit_n),range(2,:)),best);
```

```
    popu = nextpopu(popu,fcn_value,xover_rate,mutate_rate);
```

```
end
```

---

```
% Find Fitness Value%
```

```

function fitness = evalpopu(population,bit_n,range,fcn)

pop_n = size(population,1);
fitness = zeros(pop_n,1);

for count = 1:pop_n

    fitness(count) = evaleach(population(count,:),bit_n,range,fcn);

end

```

---

% Find  $(c_1, c_3)$  and Test by Object Function %

```

function out = evaleach(string,bit_n,range,fcn)

var_n = length(string)/bit_n;
input = zeros(1,var_n);

for i = 1:var_n

    input(i) = bit2num(string((i-1)*bit_n+1:i*bit_n),range(i,:));

end

%%% modify 15,16 %%%
st_time = 4680;    % start Time ,change in evaleach mfile
end_time = 5400;  % end Time ,change in evaleach mfile
qq;
CII = constII(st_time,end_time,input);
Ts_est= feval(fcn,t_span,Ts_init,input);
sum_of_square_error = find_error(Ts_meas,Ts_est,t_span);

```

```
out = -1*sum_of_square_error;
```

---

```
% Select and Test by Crossover Rate – Mutation rate %
```

```
function new_popu = nextpopu(popu,fitness,xover_rate,mut_rate)
```

```
new_popu = popu;
```

```
popu_s = size(popu,1);
```

```
string_leng = size(popu,2);
```

```
tmp_fitness = fitness;
```

```
[junk,index1] = max(tmp_fitness);
```

```
tmp_fitness(index1) = min(tmp_fitness);
```

```
[junk,index2] = max(tmp_fitness);
```

```
new_popu([1,2],:) = popu([index1 index2],:);
```

```
fitness = fitness-min(fitness);
```

```
total = sum(fitness);
```

```
if total == 0
```

```
    fitness = ones(popu_s,1)/popu_s;
```

```
else
```

```
    fitness = fitness/sum(fitness);
```

```
end
```

```
cum_prob = cumsum(fitness);
```

```
for i = 2:popu_s/2
```

```

tmp = find(cum_prob-rand>0);
parent1 = popu(tmp(1),:);
tmp = find(cum_prob-rand>0);
parent2 = popu(tmp(1),:);

if rand < xover_rate

    xover_point = ceil(rand*(string_leng-1));
    new_popu(i*2-1,:) = ...
        [parent1(1:xover_point) parent2(xover_point+1:string_leng)];
    new_popu(i*2,:) = ...
        [parent2(1:xover_point) parent1(xover_point+1:string_leng)];

end
end

mask = rand(popu_s,string_leng)<mut_rate;
new_popu = xor(new_popu,mask);

new_popu([1 2],:) = popu([index1 index2],:);

```

---

```

% Find Initial Temperature Tstimation %

%qq.m

%%% modify 5 %%%

Ts_meas = xlsread('TOP2');
tinit_span = [st_time end_time];
Tinit = zeros(tinit_span(2),1);

```

```
Tinit(tinit_span(1)-60:tinit_span(1)+60) = Ts_meas(tinit_span(1)-60:tinit_span(1)+60);
```

```
index0 = find(Tinit>1450 & Tinit<1480);
```

```
Ts_init = max(Ts_meas(index0));
```

```
index00 = find(Tinit == Ts_init);
```

```
t_span = [index00(length(index00)) tinit_span(2)];
```

```
% Find Temperature estimation %
```

```
function Ts_est = temp_dyn(t_span,Ts_init,input) %(t_span,Ts_init,Mw,input)
```

```
% P_in = 1100;
```

```
%Power in
```

```
P_in = xlsread('Pin'); %Pin is power in ; %P_in = max(P_in)
```

```
% Temperature of water flowrate
```

```
Tw_in = xlsread('FLOWIN1'); %tempIn is temperature of water flow in
```

```
Tw_out = xlsread('FLOWOUT1'); %tempOut is temperature of water flow out
```

```
delta_Tw(1:t_span(2)+60) = (Tw_out(1:t_span(2)+60) - Tw_in(1:t_span(2)+60));
```

```
Mw = xlsread('FLOWRATE1');
```

```
% Estimate steel temperature
```

```
Ts_est = zeros(t_span(2)+60,1);
```

```
Ts_est(t_span(1)) = Ts_init; % Initialize steel temperature
```

```
for i = t_span(1):t_span(2)+60;
```

```
    Ts_est(i+1) = (P_in+(input(1)*Ts_est(i))-...
```

```
        (input(2)*(Mw(i)/60)*(delta_Tw(i))-input(3))/input(1);
```

End

% Object Function %

`function` sum\_of\_square\_error = find\_error(Ts\_meas,Ts\_est,t\_span)

T1(t\_span(1)-60:t\_span(1)+60) = Ts\_meas(t\_span(1)-60:t\_span(1)+60);

T2(t\_span(2)-60:t\_span(2)+60) = Ts\_meas(t\_span(2)-60:t\_span(2)+60); % to change same as fig  
mfile

index1 = find(T1 > 1450 & T1 < 1480);

index2 = find(T2 > 1500 & T2 < 1540);

ts\_meas1 = max(Ts\_meas(index1));

ts\_meas2 = max(Ts\_meas(index2));

index11 = find(T1==ts\_meas1);

index22 = find(T2==ts\_meas2);

index = [index11(length(index11));index22(length(index22))];

error = zeros(length(index),1);

`for` i = 1:length(index);

    error(i) = Ts\_est(index(i))-Ts\_meas(index(i));

`end`

sum\_of\_square\_error = sum((error).^2); % time to sum = munber of length(index)

% Find  $c_2$  %

```
function CII = constII(st_time,end_time,input)
```

```
ct_span = [st_time end_time];
```

```
Tw_in = xlsread('FLOWIN1');
```

```
Tw_out = xlsread('FLOWOUT1');
```

```
delta_Tw(1:ct_span(2)+60) = (Tw_out(1:ct_span(2)+60) - Tw_in(1:ct_span(2)+60));
```

```
Mw = xlsread('FLOWRATE1');
```

```
%P_in = 1100;
```

```
P_in = xlsread('Pin');
```

```
Mwdelta_Tw = zeros(ct_span(2),1);
```

```
for i = ct_span(1):ct_span(2);
```

```
    Mwdelta_Tw(i) = ((Mw(i)/60)*delta_Tw(i));
```

```
end
```

```
L = length(Mwdelta_Tw(ct_span(1):ct_span(2)));
```

```
avgMwdel = sum(Mwdelta_Tw(ct_span(1):ct_span(2)))/L;
```

```
CII = (P_in - input(2))/max(Mwdelta_Tw); % input(2) is C3
```

```
.....
```

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นายเขมภัทร สมสังข์

เกิดวันที่ 29 เดือน กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2519

สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัดนครศรีธรรมราช

ประวัติการศึกษา วศ.บ. (ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี,

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ทุนการศึกษาที่ได้รับ ได้รับทุนโครงการสนับสนุนผู้ปฏิบัติการวิจัยในภาคอุตสาหกรรมสาขา

พลังงาน ของสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)