



วิทยานิพนธ์

อัลกอริทึมการประมาณค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการหลอมโลหะ
เพื่อการประหยัดพลังงาน

**PARAMETER ESTIMATION ALGORITHM OF METAL
MELTING PROCESS FOR ENERGY SAVING PURPOSE**

นายนครินทร์ หงษ์สิทธิ์วงศ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

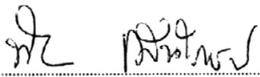
เรื่อง อัลกอริทึมการประมาณค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการหลอมโลหะเพื่อการประหยัดพลังงาน

Parameter Estimation Algorithm of Metal Melting Process for Energy Saving Purpose

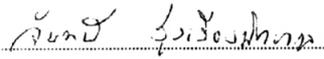
นามผู้วิจัย นายณักรินทร์ หงษ์สิทธิ์วงศ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

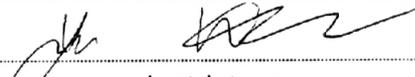
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก


(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิเศษ แสน โภชน์, D.Sc.)

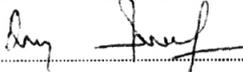
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


(อาจารย์จันทน์ รุ่งเรืองพิทยากุล, D.Sc.)

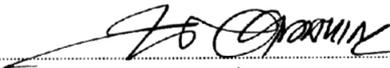
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


(อาจารย์ยศวีร์ วีระกำแพง, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา


(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพิชรวงศ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว


(รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 2 เดือน เมษายน พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

อัลกอริทึมการประมาณค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการหลอมโลหะเพื่อการประหยัดพลังงาน

Parameter Estimation Algorithm of Metal Melting Process for Energy Saving Purpose

โดย

นายณักรินทร์ หงษ์สิทธิ์วงศ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2551

นัครินทร์ หงษ์สิทธิวงศ์ 2551: อัลกอริทึมการประมาณค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ
หลอมโลหะเพื่อการประหยัดพลังงาน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
(วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์พีระยศ แสน โภชน์, D.Sc. 89 หน้า

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการพัฒนาระบบประมาณอุณหภูมิของน้ำเหล็ก
สำหรับเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าของ บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม
จำกัด ให้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยปัญหาที่สำคัญของการหลอมโลหะ
แบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าก็คือกระบวนการหลอมเหล็กที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่องเพราะ
ไม่สามารถจุ่มหัววัดเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กได้เป็นเวลานาน จากเหตุผล
ดังกล่าวบริษัทต้องการที่จะปรับปรุงระบบการประมาณอุณหภูมิของเตาหลอมเหล็กให้มี
ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นซึ่งจะทำการวัดอุณหภูมิทางอ้อมโดยทำการติดตั้งเซนเซอร์เพื่อวัดค่าต่างๆ
เช่น กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อนำมาหาแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ของเตาหลอมโลหะ

ในงานวิจัยนี้จะนำเสนอการประมาณค่าพารามิเตอร์ ด้วยตัวกรองคาร์ลมาน (Kalman
Filter) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการประมาณสถานะของระบบพลศาสตร์เชิงเส้นในการหาค่าพารามิเตอร์
เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีเจ
เนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถสร้างแบบจำลองอุณหภูมิของเตา
หลอมโลหะได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงมาก แต่เนื่องด้วยขั้นตอนการคัดเลือกชุด
ค่าพารามิเตอร์ที่จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิต่ำที่สุดซึ่งต้องใช้เวลาทำให้ไม่
สามารถทำนายอุณหภูมิแบบ On-Line ได้ ซึ่งวิธีการของ Kalman Filter จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ทำ
ให้สามารถประมาณและทำนายอุณหภูมิของน้ำเหล็กแบบ On-Line ได้อย่างต่อเนื่องทำให้สามารถ
ประหยัดพลังงานลงได้จากการที่รู้อุณหภูมิ ณ จุดที่ต้องการล่วงหน้า และสามารถหยุดการป้อน
พลังงานไฟฟ้าได้ทันที ก่อนที่อุณหภูมิจะเกินค่าที่ต้องการ (1480-1520 องศาเซลเซียส)

นัครินทร์ หงษ์สิทธิวงศ์

ลายมือชื่อนิสิต

พีระยศ แสน โภชน์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

17 / 03 / 51

Nakkarin Hongsitthiwong 2008: Parameter Estimation Algorithm of Metal Melting Process for Energy Saving Purpose. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Peerayot Sanposh, D.Sc. 89 pages.

The purpose of this research is to develop a high efficient temperature estimation system for induction furnace in the Somboon Malleable Iron Industrial Co., Ltd. The main obstruction of temperature measurement is that the thermocouple cannot be used to measure temperature continuously because of the high temperature of molten steel. Therefore, the company wants to develop an efficient temperature estimation system. The temperature is estimated indirectly from the power input, the coolant temperature, and the flow rate of the coolant in order to find a mathematics model of the induction furnace.

In this research, the parameter estimation using Kalman Filter is proposed for state estimation of the linear dynamics in finding its parameters in order to estimate the molten steel in the induction furnace by compared with Genetic Algorithm that in previous research that required a long time to finds the parameters of induction furnace model. It make a temperature estimation can not be an On-Line estimation. Therefore a Kalman Filter is applied for On-Line parameter estimation that has a purpose is to save energy, operator can stop the power instantly before the molten steel's temperature is more over 1480-1520 °C

Nakkarin Hongsitthiwong

Student's signature

Peerayot Sanposh

Thesis Advisor's signature

17/03/08

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. พิระยศ แสนโกชณ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา เป็นอย่างสูง ที่ให้คำปรึกษาและช่วยชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ รวมถึงความการให้ความสนับสนุนและช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานกับทางบริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ดร. สุธี ผู้เจริญชนะเลิศ นักวิจัยและผู้ช่วยผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (Nectec) ที่ให้คำปรึกษาและตรวจสอบเพื่อชี้ให้เห็นถึงปัญหาเพื่อนำไปปรับปรุงการทำงานวิจัยนี้ให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ โครงการทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (Thailand Graduate Institute of Science and Technology, TGIST) ที่ให้ทุนในโครงการวิจัยนี้และขอขอบคุณ บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ข้อมูลและอำนวยความสะดวกในการเข้าไปดำเนินการปรับแต่งอุปกรณ์และจัดเก็บข้อมูลในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณเขมภัทร สมสังข์ ที่ให้ข้อมูลและคำปรึกษาสำหรับโครงการวิจัยเดิม ทำให้สามารถดำเนินการวิจัยได้สะดวกยิ่งขึ้นและขอขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการ IMARC ที่เป็นกำลังใจและให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัยนี้

สุดท้าย ต้องขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา เป็นอย่างสูงที่เป็นกำลังใจที่สำคัญซึ่งทำให้การเรียนระดับปริญญาโทประสบผลสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นัครินทร์ หงษ์สิทธิวงศ์

มกราคม 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
รายงานผลงานวิจัยที่ผ่านมา	4
เตาหลอมโลหะ	5
แบบจำลองอุณหภูมินำเหล็กของเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำไฟฟ้า	17
การประยุกต์ใช้ตัวกรองคาร์บอนในการประมาณอุณหภูมินำโลหะ	32
อุปกรณ์และวิธีการ	44
อุปกรณ์	44
วิธีการ	44
ผลการทดลองและวิจารณ์	50
ผลการทดลอง	50
วิจารณ์	79
สรุปและข้อเสนอแนะ	84
สรุป	84
ข้อเสนอแนะ	85
ปัญหาที่พบ	85
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	86
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	89

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณสมบัติโดยสรุปของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ชนิดไม่มีแกนเหล็ก (Coreless Induction Furnace)	14
2	ความจุความร้อนจำเพาะ และความจุความร้อนโมลาร์ของวัสดุบางชนิด รักษาความดันให้คงที่ ; วัสดุอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 0 °C ถึง 100 °C	20
3	ความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวและการกลายเป็นไอ	20
4	สภาพการนำความร้อนของวัสดุ	22
5	ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน	24
6	ค่าการแผ่รังสีของวัสดุชนิดต่างๆ	26
7	สมการสมดุลความร้อนของเตา	28
8	สมการ Kalman Filter ในระบบ Discrete-Time	39
9	สมการ Kalman filter สำหรับแบบจำลองเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า	42
10	แบบการทดลองการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะ	50
11	ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 1	52
12	ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2	53
13	ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3	54
14	ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4	55
15	ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5	56
16	ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2	58

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
39	อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2	75
40	พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 3	76
41	อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3	76
42	พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 4	77
43	อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4	77
44	พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 5	78
45	อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5	78
46	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการวัดที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการทดลองที่ 1	79
47	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการวัดที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการทดลองที่ 2	80
48	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการวัดที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการทดลองที่ 3	81
49	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการวัดที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการทดลองที่ 4	82
50	เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการวัดที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการทดลองที่ 5	83

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	การแบ่งประเภทของโลหะหล่อ	5
2	เตาเบ้า (Crucible Furnace)	7
3	เตาคิว โปลา (Cupola Furnace)	7
4	เตาสะท้อนความร้อน (Reverberatory Furnace)	8
5	เตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าทางตรง	10
6	เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดที่มีแกนเหล็ก	11
7	เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนเหล็ก	12
8	โครงสร้างของเตาหลอมโลหะแบบไม่มีแกนเหล็ก	13
9	การไหลเวียนของน้ำโลหะภายในเตาหลอมโลหะ	15
10	เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าและกระบวนการหลอมโลหะของ บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด	16
11	แข่งก๊ไคอะแกรมของความร้อนในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า	17
12	การนำความร้อนผ่านตัวนำความร้อน	21
13	การพาความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหลที่มีอุณหภูมิต่างกัน	23
14	การแผ่รังสีความร้อนจากแหล่งกำหนดความร้อนใดๆ	25
15	การถ่ายเทความร้อนรวมของเตาหลอมโลหะ	26
16	แบบจำลองของระบบพลศาสตร์	34
17	ตัวประมาณสแตตอย่างง่าย	34
18	Block diagram ของระบบที่ประมาณสแตตโดยใช้ Kalman Filter	35
19	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการรับ-ส่งสัญญาณและแสดงผลการประมาณอุณหภูมิ	44
20	อุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งในการเก็บข้อมูล	45
21	Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW ในการเก็บข้อมูล	47
22	Block diagram ของโปรแกรม LabVIEW ในการเก็บข้อมูล	47
23	Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW แบบ Online	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
24	Block diagram ในส่วนของการรับข้อมูลจาก FieldPoint	49
25	Block diagram ในส่วนของ Kalman Filter เพื่อประมาณอนุกรมแบบ On-Line	49
26	การประมาณอนุกรมของน้ำโลหะโดยวิธี GA ในการหลอมโลหะรอบแรก	51
27	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 1	52
28	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2	53
29	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3	54
30	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4	55
31	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5	56
32	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2	58
33	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3	59
34	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4	60
35	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5	61
36	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2	63
37	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
38	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4	65
39	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5	66
40	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2	69
41	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3	70
42	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4	71
43	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5	72
44	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบแรก	74
45	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2	75
46	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3	75
47	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4	77
48	เปรียบเทียบอนุกรมที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5	78

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

- A = พื้นที่ผิวของการแผ่รังสี (m^2)
 $C_{P,S}$ = ค่าความจุความร้อนของเหล็ก ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)
 $C_{P,W}$ = ค่าความจุความร้อนของน้ำ ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)
 $\mathbf{H}(k-1)$ = เมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการวัดและสเตตเวคเตอร์
 I_{INV} = กระแสอินเวอร์เตอร์ (Amp)
 K = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($kcal / m^2 h \text{ } ^\circ C$)
 L = ค่าความร้อนแฝงของเหล็ก (kJ/kg)
 \dot{M}_w = อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/s)
 P_{in} = พลังงานป้อนเข้าเตาหลอม (kW)
 R = ความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)
 R_{CU} = ความต้านทานของขดลวดตัวนำในหม้อแปลง (ohm)
 T_1 = อุณหภูมิของของไหลที่มีอุณหภูมิสูง ($^\circ C, K$)
 T_2 = อุณหภูมิของของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำ ($^\circ C, K$)
 T_F = อุณหภูมิของของไหล ($^\circ C, K$)
 T_S = อุณหภูมิของเหล็ก (K)
 T_w = อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (K)
 T_h = อุณหภูมิของผิวด้านที่มีอุณหภูมิสูง ($^\circ C, K$)
 T_l = อุณหภูมิผิวด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ ($^\circ C, K$)
 T_w = อุณหภูมิที่ผิวของผนังของแข็ง ($^\circ C, K$)
 c_1 = ค่าที่ขึ้นกับค่าความจุความร้อนจำเพาะและมวลของน้ำโลหะ
 c_2 = ค่าที่ขึ้นกับค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็น
 c_3 = ค่าที่ขึ้นกับการสูญเสียความร้อนของน้ำโลหะ
 h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($kcal / m^2 h \text{ } ^\circ C, kW / m^2 K$)
 m_s = มวลของเหล็ก (kg)
 $\mathbf{x}(k)$ = สเตตเวคเตอร์
 $\mathbf{u}(k-1)$ = อินพุตเวคเตอร์
 $\mathbf{v}(k-1)$ = สัญญาณรบกวนจากเครื่องมือวัด
 $\mathbf{w}(k-1)$ = สัญญาณรบกวนของกระบวนการ

$\Phi(k-1)$ = ทรานซิชันเมตริกซ์

$\Gamma(k-1)$ = ดิสกรีตอีควาเลนซ์เมตริกซ์

δ = ความหนาของแผ่นราบ/ผนังเรียบ (m)

λ = สภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ($kcal / mh^{\circ}C, kW / mK$)

ε = ค่า Emissivity

Δt = เวลาที่ใช้หลอม (s)

อัลกอริทึมการประมาณค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการหลอมโลหะเพื่อการประหยัดพลังงาน

Parameter Estimation Algorithm of Metal Melting Process for Energy Saving

Purpose

คำนำ

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการที่ทำงานร่วมกับบริษัทสมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวจำกัด เพื่อทำการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบประมาณและควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมโลหะแบบเหนียวน้ำ โดยปัญหาที่สำคัญก่อนหน้านี้ก็คือกระบวนการหลอมเหล็กที่ไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งการวัดอุณหภูมิจะใช้ความชำนาญของพนักงานโดยจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลนำไปจุ่มวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่ปากเตาเมื่อทำการเดินเครื่องได้ประมาณ 45 นาที ซึ่งอุณหภูมิที่วัดได้บางครั้งก็จะเกินอุณหภูมิที่ใช้ในการหลอม (1500 องศาเซลเซียส) ก็จะต้องทำการลดอุณหภูมิลงทำให้สูญเสียพลังงานโดยไม่จำเป็น ซึ่งทางบริษัทก็ได้ปรับปรุงระบบการประมาณอุณหภูมิของเตาหลอมเหล็กขนาด 2 ตันให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยทำการติดตั้ง sensor เพื่อวัดค่าต่างๆ เช่น กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และหาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาพัฒนาระบบการประมาณอุณหภูมิให้ดีขึ้น

ในปัจจุบันบริษัทได้มีการพัฒนาระบบเตาหลอมเป็นแบบ 2 เตาที่สลับกันทำงานไปมา โดยจะให้พลังงานเพื่อทำให้อุณหภูมิของเตาที่ 1 เกิน 1500 องศาเซลเซียสแล้วจึงสลับมาให้พลังงานเตาตัวที่ 2 จนอุณหภูมิเกิน 1500 องศาเซลเซียส ระหว่างนั้นพนักงานก็จะทำการเทน้ำเหล็กจากเตาที่ 1 ลงในแบบ แต่ถ้าแม่แบบไม่ว่าง ก็จะปล่อยน้ำเหล็กไว้ในเตาที่ 1 แต่ถ้าอุณหภูมิน้ำเหล็กลดต่ำลงมากก็就会有การสลับมาอุ่นเตาที่ 1 และจะมีการทำงานแบบนี้ไปอย่างต่อเนื่อง โดยในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ใช้วิธี Genetic Algorithm ในการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตา แต่เนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาหลอมโลหะที่ยาวนานทำให้วิธี Genetic Algorithm ไม่สามารถประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะแบบ On-Line ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงการวิจัยนี้จึงทำการพัฒนาอัลกอริทึมในการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิของเตาหลอมโลหะเพื่อทำให้การประมาณอุณหภูมิเป็นไปอย่างต่อเนื่องและแม่นยำด้วยวิธี Kalman Filter ที่เป็นวิธีที่ใช้ในการประมาณสถานะของระบบพลศาสตร์เชิงเส้น ซึ่ง

จะช่วยให้การปรับค่าพารามิเตอร์ของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาหลอมโลหะมีความรวดเร็วและแม่นยำ ทำให้สามารถพัฒนาระบบประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะแบบ On-Line ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะทำให้สามารถประหยัดพลังงานที่เกิดจากการให้อุณหภูมิเหล็กเกิน 1,500 องศาเซลเซียสลงได้มากอีกทั้งยังลดปัญหาการระบายความร้อนส่วนเกินออกมาสู่บรรยากาศได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อทำการศึกษาและพัฒนาระบบประมาณอุณหภูมิของเตาหลอมโลหะให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น
2. เพื่อทำการทำการศึกษาและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาหลอมโลหะในการประมาณอุณหภูมิของน้ำเหล็กให้เป็นไปอย่างต่อเนื่องและแม่นยำเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานในการหลอมโลหะ

การตรวจเอกสาร

รายงานผลงานวิจัยที่ผ่านมา

ในปี พ.ศ. 2548 เขมภัทร สมสังข์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประมาณอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาหลอมขนาด 2 ตันจำนวน 1 เตาทางอ้อมโดยทำการวัดพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าเตาหลอม, อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นเข้า-ออก และอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นแล้วนำค่าที่ได้นำมาคำนวณหาอุณหภูมิของน้ำเหล็กด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาหลอมเหล็กซึ่งผลของการประมาณพบว่าอุณหภูมิที่ประมาณได้ค่อนข้างจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงทำให้สามารถประหยัดพลังงานลงได้

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 โดยใช้สมการสมดุลความร้อนในการคำนวณเพื่อทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็ก ปริมาณพลังงานป้อนเข้า และการควบคุมที่เหมาะสม จากการวิจัยพบว่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตามีความสัมพันธ์กับพลังงานป้อนเข้า (Power Input) และสรุปว่า การทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเหล็ก กับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งใช้การวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) นั้นไม่สามารถทำนายอุณหภูมิน้ำเหล็กได้อย่างแม่นยำนักเนื่องจากความซับซ้อนระหว่างอุณหภูมิน้ำเหล็ก, พลังงานไฟฟ้าเข้า, เหล็กที่หลอมละลายและเวลา 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

เตาหลอมโลหะ



ภาพที่ 1 การแบ่งประเภทของโลหะหล่อ

การหล่อโลหะ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2548) คือการขึ้นรูปโลหะให้มีรูปร่างตามความต้องการโดยการเทโลหะเหลวลงในแบบหล่อแล้วปล่อยให้เย็นและแข็งตัว การหล่อโลหะเป็นหนึ่งในวิธีการขึ้นรูปโลหะที่เก่าแก่ที่สุด กล่าวกันว่ามนุษย์เรารู้จักการหล่อโลหะมาตั้งแต่ 4,000 ปีก่อนคริสต์ศักราช การหล่อโลหะเป็นวิธีการขึ้นรูปโลหะให้มีรูปร่างตามความต้องการหรือใกล้เคียงกับรูปร่างที่ต้องการหรือใกล้เคียงกับรูปร่างที่ต้องการที่มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถหล่อชิ้นงานได้ตั้งแต่รูปร่างง่ายๆ ไปจนถึงชิ้นงานที่มีความซับซ้อน เช่น ชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องจักรกล ชิ้นส่วนเครื่องใช้ไฟฟ้า วาล์วและข้อต่อต่างๆ ซึ่งจะพบว่ากว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของผลิตภัณฑ์ในท้องตลาดจะประกอบไปด้วยชิ้นงานหล่อในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง

โลหะเกือบทุกชนิดที่สามารถนำมาหลอมใช้เป็นโลหะเหลว สามารถนำมาใช้ขึ้นรูปโดยการหล่อได้แต่โลหะที่ใช้ในการหล่อในอุตสาหกรรมปัจจุบันเป็นโลหะผสม (Alloy) ซึ่งสามารถแบ่งโดยใช้องค์ประกอบของเหล็กเป็นเกณฑ์ได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ โลหะที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบสำคัญ เรียกว่า โลหะกลุ่มเหล็ก (Ferrous Metals) และโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบสำคัญ เรียกว่า โลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous Metals) ทั้งนี้โลหะในกลุ่มเหล็กและโลหะนอกกลุ่มเหล็กยังสามารถแยกย่อยได้อีกตามส่วนผสมของโลหะดังที่แสดงในภาพที่ 1

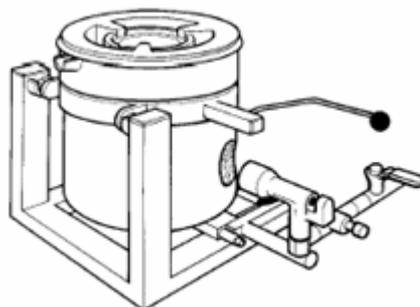
เตาหลอมโลหะที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้ (วิโรจน์ หัตถเสรีพงษ์, 2544) สามารถแบ่งได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับรูปแบบการให้ความร้อน คืออาจจะใช้เชื้อเพลิงหรือกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดความร้อนขึ้นมาหรืออาจจะแบ่งตามลักษณะการทำงานของเตาหลอมก็ได้ โดยต่อไปจะกล่าวถึงหลักการทำงานของเตาหลอมโลหะชนิดต่างๆ ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่รูปแบบการให้ความร้อนทางเชื้อเพลิง รูปแบบการให้ความร้อนทางไฟฟ้า และชนิดของเตาหลอมโลหะแบบต่างๆ

1. เตาหลอมโลหะแบบใช้เชื้อเพลิง

การหลอมโลหะของเตาหลอมที่ใช้เชื้อเพลิงจะใช้ความร้อนจากการสันดาปเพื่อใช้ในการหลอมโลหะ โดยเตาหลอมโลหะแบบใช้เชื้อเพลิงที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมประเภทหล่อโลหะ เช่น เตาเบ้า (Crucible Furnace), เตาคิวโปลา (Cupola Furnace) และเตาสสะท้อนความร้อน (Reverberatory Furnace) เป็นต้น ซึ่งจะทำงานร่วมกับระบบมอเตอร์เพื่อนำอากาศและเชื้อเพลิงเข้ามาผสมกันเพื่อทำการสันดาป

1.1 เตาเบ้า (Crucible Furnace)

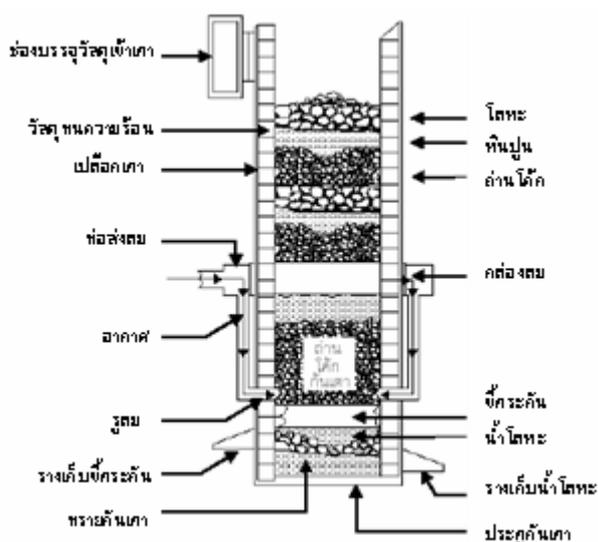
เตาเบ้า (Crucible Furnace) เป็นเตาอีกประเภทหนึ่งที่มีความนิยมนานหลายยุคหลายสมัย นิยมใช้หลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็ก (Non-Ferrous Metals) เช่น ทองแดง, ทองเหลือง และอลูมิเนียม เป็นต้น เตาเบ้าถือว่าเป็นเตาหลอมโลหะที่เก่าแก่ที่สุดและมีโครงสร้างที่ง่ายที่สุด



ภาพที่ 2 เตาเบ้า (Crucible Furnace)

จากภาพที่ 2 โครงสร้างของเตาเบ้านั้นจะประกอบไปด้วยเบ้าสำหรับบรรจุโลหะที่ใช้หลอมซึ่งทำจาก กราไฟต์ (Clay-Graphite) หรือซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon-Carbide) อยู่ในเปลือกที่ทำจากวัสดุทนความร้อนที่มีเหล็กหุ้มอยู่ด้านนอก เปลือกดังกล่าวจะทำหน้าที่กักความร้อนจากการสันดาปให้ถ่ายเทไปยังเบ้าให้มากที่สุด ซึ่งความร้อนจากการสันดาปจะไม่ได้สัมผัสกับโลหะที่ใช้หลอมโดยตรงแต่ถ่ายเทโดยผ่านเบ้าที่บรรจุโลหะ โดยทั่วไปแล้วเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเตาเบ้าได้แก่ น้ำมัน และก๊าซ อย่างไรก็ตามบางครั้งอาจจะใช้ถ่านหินหรือถ่านโค้กแทนได้

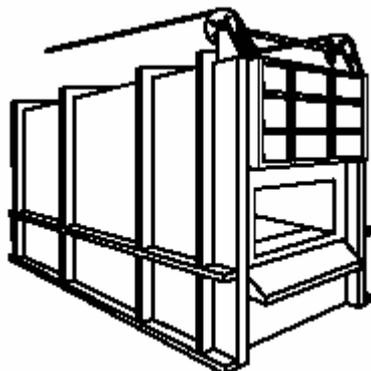
1.2 เตาถ่านโค้ก (Cupola Furnace)



ภาพที่ 3 เตาถ่านโค้ก (Cupola Furnace)

เตาด่านโค้ก (Cupola Furnace) เป็นเตาที่ใช้ถ่านโค้กเป็นเชื้อเพลิง และถูกใช้ในงานหลอมเหล็กหล่อ เตาด่านโค้กมีลักษณะเป็นแท่งเหล็กทรงกระบอกแนวตั้ง ภายในบุด้วยวัสดุทนความร้อน ที่ก้นของเตาเป็นแอ่งพักน้ำโลหะที่หลอมเหลวก่อนที่น้ำโลหะจะถูกจ่ายออกมาดังภาพที่ 3 เมื่อใช้งานเตาจะถูกบรรจุด้วยชั้นของถ่านโค้ก หินปูน และเหล็กที่ใช้หล่อ สลับกันไปโดยผ่านช่องบรรจุวัสดุเข้าที่ด้านบนของเตา ชั้นของถ่านโค้กที่อยู่ใกล้กับรูจ่ายลม จะเกิดการสันดาป เราจะเรียกบริเวณนี้ว่าเขตสันดาป หรือเขตเพิ่มออกซิเจน ความร้อนจากการสันดาปจะหลอมชั้นของโลหะที่อยู่ใกล้กับเขตสันดาป ส่วนโลหะที่หลอมเหลวจะไหลลงสู่แอ่งพักน้ำโลหะ เมื่อถ่านโค้กชั้นแรกถูกสันดาปจนหมด ถ่านโค้กชั้นถัดไปก็จะเลื่อนลงมาแทนที่ ด้วยวิธีนี้กระบวนการสันดาปและการหลอมเหลวก็สามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่อง

1.3 เตาสะท้อนความร้อน (Reverberatory Furnace)



ภาพที่ 4 เตาสะท้อนความร้อน (Reverberatory Furnace)

เตาสะท้อนความร้อน (Reverberatory Furnace) นิยมใช้กันในงานหลอมโลหะนอกกลุ่มเหล็กครั้งละปริมาณมากๆ โดยโครงสร้างของเตาสะท้อนความร้อนจะเป็นห้องที่บุด้วยวัสดุทนไฟ ภายในห้องมีอ่างสำหรับบรรจุโลหะที่ใช้หลอม โดยหัวเผา (Burner) จะฉีดเชื้อเพลิงซึ่งเป็นน้ำมันหรือก๊าซให้มาสันดาปในห้องดังกล่าว ความร้อนที่ได้จากการสันดาปจะถ่ายเทเข้าสู่โลหะที่ใช้หลอมโดยวิธีการแผ่รังสีทั้งจากเปลวไฟโดยตรงและจากเพดานเตาที่ดูดซับความร้อนจากเปลวไฟ เตาสะท้อนความร้อนบางตัวอาจจะมีปัมพ์เพื่อหมุนเวียนน้ำโลหะเพื่อเพิ่มผลผลิต (Productivity) และลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง

2. เตาหลอมโลหะแบบใช้ไฟฟ้า

ในปัจจุบันเตาหลอมไฟฟ้ามีบทบาทสำคัญ ในอุตสาหกรรมการหล่อโลหะเป็นอย่างมาก เนื่องจากเตาหลอมไฟฟ้าให้คุณสมบัติในการผลิตโลหะชนิดต่างๆ ได้ดีกว่าเตาหลอมโลหะแบบอื่นๆ โดยเตาหลอมโลหะแบบใช้ไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน เพื่อใช้ในการหลอมโลหะ

เตาหลอมโลหะแบบใช้ไฟฟ้า (เขมภัทร สมสังข์, 2548) ซึ่งเป็นเตาที่มีบทบาทมาก ในอุตสาหกรรมหล่อ/หลอมโลหะในปัจจุบัน แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace) และเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Electric Induction Furnace)

2.1 เตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้า (Electric Arc Furnace)

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

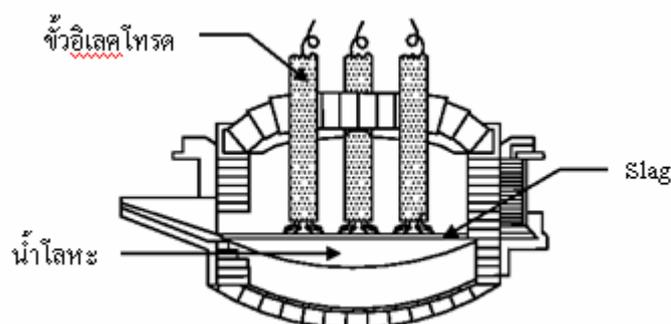
2.1.1 แบบอาร์คไฟฟ้าทางอ้อม (Indirect Arc)

เตาชนิดนี้มีแท่งอิเล็กโทรด (Electrode) 2 แท่ง ตั้งอยู่ในแนวนอน (Horizontal) การแผ่รังสีจากการอาร์คกันของแท่งอิเล็กโทรด ทำให้โลหะได้รับความร้อนและหลอมละลาย ตัวเตาจะตั้งบนแท่นแบบหมุน (Roller) และกระดกขึ้น-ลง ในขณะที่ทำการหลอม ซึ่งทำให้น้ำโลหะผสมเป็นเนื้อเดียวกันเตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้าทางอ้อม นิยมใช้หลอมโลหะประเภทเหล็ก (Ferrous Metal) และประเภททองแดง (Copper Base) แต่มีปริมาณการหลอมที่ไม่มาก ประมาณ 200 – 1000 กิโลกรัม

2.1.2 แบบอาร์คไฟฟ้าทางตรง (Direct Arc)

เตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้าทางตรง ให้ความร้อนต่อโลหะได้ดีกว่า เตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้าทางอ้อม ตัวเตาจะประกอบด้วย แท่งอิเล็กโทรด 3 แท่ง อยู่บริเวณ

ด้านบน โดยแต่ละแท่งจะถูกขยับลงมาอาร์ค กับแท่งโลหะ (Metal หรือ Charge) ดังภาพที่ 5 โดยตรงในขณะที่ทำงาน เตาชนิดนี้ใช้หลอมได้ปริมาณมาก 0.25 – 200 ตัน เตาหลอมโลหะแบบอาร์คไฟฟ้าทางตรง ใช้หลอมโลหะประเภทเหล็กเหนียว (Steel) ที่ใช้ผลิตเหล็กแผ่น เหล็กเส้น เป็นต้น



ภาพที่ 5 เตาหลอมแบบอาร์คไฟฟ้าทางตรง

2.2 เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Electric Induction Furnace)

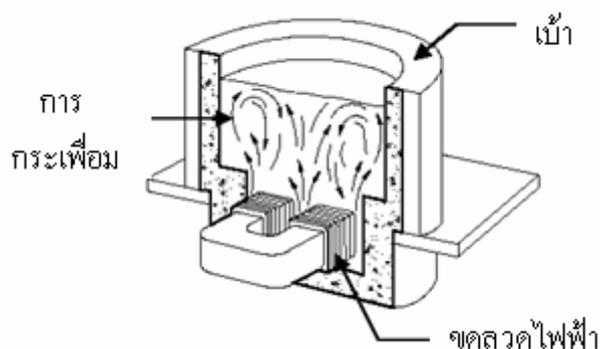
ความต้องการที่จะนำเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า มาแทนเตาทั่วไป เช่น เตาถ่านโค้ก (Cupola), เตาเบ้า (Crucible) ฯลฯ มีแนวโน้มสูงขึ้น ทั้งนี้เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ให้ความยืดหยุ่นได้ดีกว่า และมีองค์ประกอบอื่นๆ อีกมากที่ค่อนข้างเด่นชัด เช่น

1. การควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะกระทำได้ง่าย
2. ส่วนผสมของน้ำโลหะสามารถควบคุมได้ง่าย
3. ความเป็นเนื้อเดียวกันของธาตุต่างๆ ในส่วนผสมเป็นไปได้เป็นอย่างดี
4. สามารถรับน้ำโลหะจากเบ้าที่เคลื่อนกลับมาได้
5. สามารถหลอมวัสดุที่มีราคาต่ำ
6. ลดมลภาวะเป็นพิษในสภาพการทำงาน
7. ใช้พื้นที่โรงงานน้อยกว่า
8. สามารถลดอัตราการสูญเสียโลหะ (Melting loss) ได้มาก
9. เป็นเตาที่ให้การยืดหยุ่นในการทำงานได้มากที่สุด

ชนิดของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Electric Induction Furnace) สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ เตาหลอมโลหะเหนี่ยวนำแบบมีแกนเหล็ก (Core Induction Furnace) และเตาหลอมโลหะเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนเหล็ก (Coreless Induction Furnace)

2.2.1 เตาหลอมโลหะเหนี่ยวนำแบบมีแกนเหล็ก (Core Induction Furnace)

เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดที่มีแกนเหล็ก(วิโรจน์ หัตถเสวีพงษ์, 2544) เป็นเตาหลอมที่มีประสิทธิภาพในการหลอมดีที่สุดในลักษณะการทำงานของเตาหลอมจะมีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลง กล่าวคือ จะมีขดลวดเหนี่ยวนำอยู่ตรงกลางของเบ้าหลอม (Metal Bath) ทำหน้าที่เหมือนขดลวดปฐมภูมิและมีโลหะที่หลอมอยู่ล้อมรอบทำหน้าที่เป็นขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลง ดังภาพที่ 6



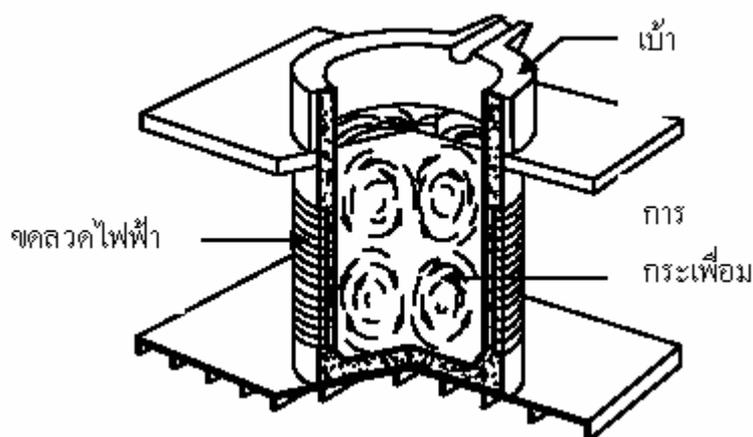
ภาพที่ 6 เตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าชนิดที่มีแกนเหล็ก

เมื่อกระแสไฟฟ้าสลับผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆขดลวด ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้จะผ่านโลหะที่อยู่รอบๆขดลวด ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในเนื้อโลหะ ซึ่งมีความต้านทานจะทำให้พลังงานไฟฟ้าที่ผ่านโลหะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน และจะสูงขึ้นเรื่อยๆจนทำให้โลหะหลอมละลาย จากผลของกระแสเหนี่ยวนำจะทำให้โลหะร้อนขึ้นที่ด้านบน และโลหะทั้งเบ้าได้รับการถ่ายเทความร้อนอย่างสม่ำเสมอ แต่เตาหลอมประเภทนี้จะมีข้อเสียตรงที่จะต้องทำการหลอมติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน เพราะการเริ่มต้นหลอมแต่ละครั้งจะกินเวลานานและในการเทโลหะหลอมเหลวออกจะต้องเหลือไว้จำนวนหนึ่ง คือให้เหลือไว้ตรงรอบๆขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนสำหรับการหล่อโลหะในช่วงถัดไป ความถี่

ของกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะใช้ความถี่ต่ำ ที่ 50-60 Hz เตาหลอมประเภทนี้นิยมใช้หลอมโลหะพวก ทองแดงผสม หรือเหล็กหล่อที่ใช้หล่องานเป็นจำนวนมาก

การเริ่มต้นการหลอมเตาหลอมโลหะแบบมีแกนเหล็กนั้น จะต้องมีน้ำโลหะอยู่ในเตาหลอมให้มากพอที่จะครบวงจร ซึ่งอาจจะทำได้โดยใช้หัวก๊าซมาเผาให้โลหะหลอมละลาย หรือนำเอาโลหะเหลวจากเตาหลอมอื่นมาใส่แทน และถ้าเอาโลหะเหลวมาใส่จะต้องทำการอุ่นเตาให้ร้อนพอเสียก่อนเพื่อป้องกันความร้อนจากโลหะเหลวถ่ายเทให้กับตัวเตาหลอมมากเกินไปซึ่งจะทำให้โลหะเหลวแข็งตัวก่อนซึ่งจะทำให้เตาไม่สามารถทำงานได้ เมื่อมีน้ำโลหะเหลวเป็นตัวเริ่มต้นสำหรับการหลอมแล้วจากนั้นก็สามารที่จะเพิ่มโลหะแข็งลงไปตามความจุของเตา

2.2.2 เตาหลอมโลหะเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนเหล็ก (Coreless Induction Furnace)



ภาพที่ 7 เตาหลอมโลหะเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนเหล็ก

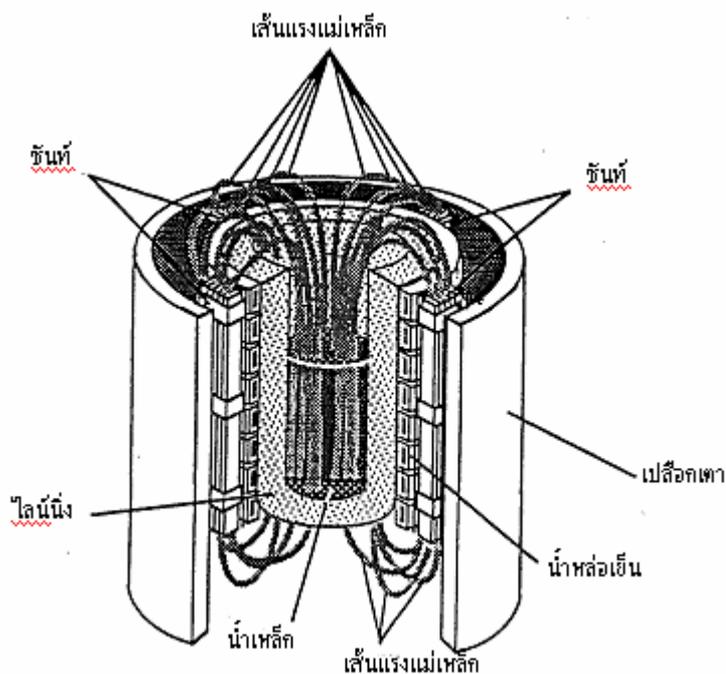
เตาหลอมโลหะเหนี่ยวนำแบบไม่มีแกนเหล็กจะไม่มีขดลวดอยู่ตรงกลางเบ้าหลอมแต่จะใช้ขดลวดพันอยู่รอบๆเตาดังภาพที่ 7 และจะอาศัยหลักการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กในโลหะที่จะทำการหลอม ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) และการสูญเสียเนื่องจากกระแสไฟไหลวน (Eddy Current Loss) การสูญเสียพลังงานของสนามแม่เหล็กจะเปลี่ยนเป็นรูปพลังงานความร้อนซึ่งจะมีอุณหภูมิถึงจุดใดนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

1) สนามแม่เหล็กไฟฟ้า-มีการเปลี่ยนแปลงตามขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ดังนั้นถ้าทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงๆให้แก่ขดลวดก็จะทำให้มีความร้อนสูงขึ้น

2) ความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า-ถ้าความถี่ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ามีค่าสูงมากแค่ไหนก็จะทำให้เกิดความร้อนสูงมากขึ้นด้วย เพราะว่าที่ความถี่สูงๆจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของโลหะมากกว่าที่ความถี่ต่ำๆ

3) ขนาดพื้นที่ที่หน้าตัดของลวดตัวนำ-พิจารณาได้เช่นเดียวกับแกนเหล็กของหม้อแปลง ซึ่งในหม้อแปลงจะทำเป็นแผ่นบางๆเพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากฮิสเทอรีซิสและการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวน แต่ในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้าต้องการปริมาณเหล่านี้จึงจำเป็นต้องทำให้พื้นที่หน้าตัดของลวดตัวนำมีมาก

3. ส่วนประกอบและหลักการทำงานของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า



ภาพที่ 8 โครงสร้างของเตาหลอมโลหะแบบไม่มีแกนเหล็ก

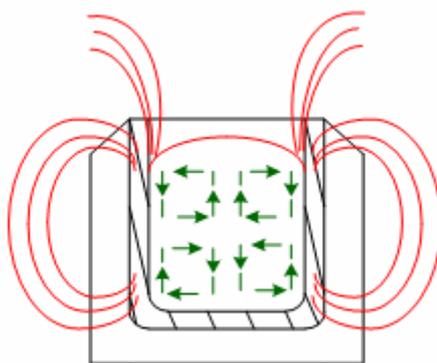
เตาหลอมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเตาหลอมโลหะแบบไม่มีแกนเหล็กซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญแบ่งเป็น 3 ระบบ คือ ระบบโครงสร้าง ระบบไฟฟ้า และระบบน้ำหล่อเย็น ในการออกแบบระบบแต่ละระบบนั้นจะมีระบบป้องกันอย่างดี เช่น ในระบบไฟฟ้า จะมีระบบป้องกันกระแสไม่ไหลออกมานอกระบบควบคุม ในระบบน้ำหล่อเย็น จะมีระบบป้องกันการรั่วไหลของน้ำโลหะที่แทรกผ่านชั้นไลน์นิง (Lining) และมีระบบการทำงานที่มีรายละเอียดชัดเจน เช่น เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่ชุดคอยล์ ถ้าไม่มีน้ำไหลในระบบก็ จะจ่ายกระแสไฟไม่ได้ เป็นต้น

ในระบบโครงสร้างของเตา โดยทั่วไปได้แบ่งชนิดของเตาหลอมเหนี่ยวนำไฟฟ้า ออกเป็น 3 ชนิด ตามชนิดโครงสร้างและความถี่ของกำลังงานที่ใช้ คือ แบบ Crucible มีทั้งความถี่สูงและต่ำ และแบบ Channel ความถี่ต่ำโดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 1 นอกจากนี้ในโครงสร้างเตาจะประกอบไปด้วยชุด คอยล์ ชันท์ (Shunt) ซึ่งจะเป็นตัวเก็บเส้นแรงแม่เหล็ก ไม่ให้เกิดการเหนี่ยวนำไปยัง โครงสร้างของตัวเตาที่เป็นเหล็ก ระบบไฮโดรลิก ซึ่งใช้สำหรับยกเตา ตัวโครงสร้างเหล็กฉนวน เช่น ไมกา ซิลิกอน เทปลอน และสายน้ำ โดยมีซีเมนต์คอยล์เป็นตัวหุ้มคอยล์เพื่อป้องกันการแทรกของน้ำโลหะผ่านชั้นไลน์นิงมาถูกคอยล์

ตารางที่ 1 คุณสมบัติโดยสรุปของเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ชนิดไม่มีแกนเหล็ก (Coreless Induction Furnace)

ประเภทของเตา	ขนาดการหลอมสูงสุด	ลักษณะการหลอม	การป้อนพลังงาน
ความถี่สูง (500-10,000 Hz)	5 ตัน	กระทำได้ที่ทันที	ส่วนใหญ่กระทำได้ที่ทันที ยกเว้นบางผู้ผลิต
ความถี่ปานกลาง (150 – 500 Hz)	10 ตัน	สามารถเริ่มหลอมได้ แต่ต้องอาศัยความชำนาญ	กระทำได้เมื่อใส่โลหะ (Charge) ขนาดใหญ่พอประมาณ
ความถี่ต่ำ (50 Hz)	60 ตัน	ต้องมีน้ำโลหะในเบ้า	กระทำได้ต้องมีน้ำโลหะอยู่ 2 ใน 3 ส่วนของเตา

สำหรับหลักการทำงานนั้น เมื่อนำโลหะใดๆ ใส่ลงในเตาหลอมที่เป็นสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดทองแดง (Coil) ที่พันอยู่รอบตัวเตา จะเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นระหว่างขดลวด (Coil) กับโลหะ (Charge) เป็นผลทำให้โลหะเกิดความร้อน และหลอมละลายในที่สุด (สุนทร, 2534) กระแสที่ขดลวด และที่โลหะจะไหลในทิศทางตรงกันข้าม ซึ่งขดลวดอยู่กับที่ ในขณะที่โลหะสามารถเคลื่อนตัวได้ ดังนั้นน้ำโลหะจะถูกผลักออกจากขดลวด ไปยังศูนย์กลางของเตาหลอม และไหลกลับมายังขดลวดอีกจึงทำให้เกิดการไหลเวียนของน้ำโลหะภายในเตาหลอมอยู่ตลอดเวลา ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การไหลเวียนของน้ำโลหะภายในเตาหลอมโลหะ

สำหรับเตาหลอมในงานวิจัยนี้ ลักษณะเตาที่ใช้ เป็นเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า ชนิดไม่มีแกนเหล็ก (Coreless Induction Furnace) ความถี่สูง (500 Hz) ขนาดกำลังผลิต (capacity) 2 ตัน ตั้งอยู่ที่บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด ทำการหลอมเหล็กจากอุณหภูมิห้องให้ได้อุณหภูมิ 1520 ± 20 องศาเซลเซียส ใช้เวลาหลอมโดยประมาณ 55 – 80 นาที ขนาดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเตาอยู่ที่ 1000 – 1200 กิโลวัตต์ ดังภาพที่ 10 โดยมีขั้นตอนการหลอมดังต่อไปนี้

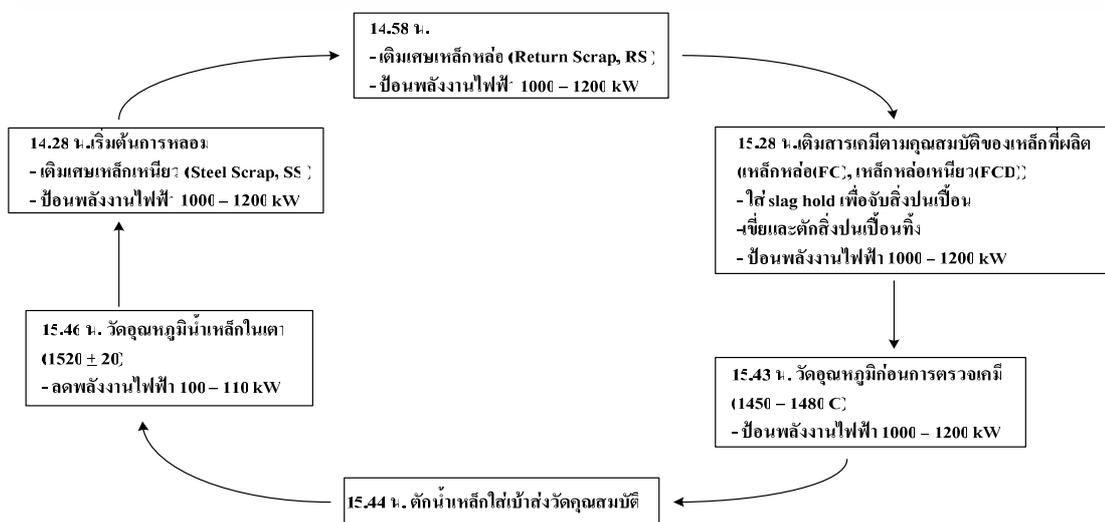
- (1) นำสารเคมี (Chemical) ใส่ลงในเตาที่ทำงาน เต็ม C ใส่ในเตา 10-15 kg, เต็ม Si ใส่ในเตา 0-3 kg, เต็ม Mn ใส่ในเตา 4-6 kg
- (2) เปิดไฟเข้าเตา (1000-1200 kW)
- (3) หลอมให้เหล็กและเคมีในเตาจนกระทั่งละลาย ใช้เวลาประมาณ 35-40 นาที
- (4) เมื่อเหล็กและเคมีละลายหมดแล้วให้ปิดไฟเข้าเตา (0 kW)

(5) ตัก Slag hold โรยลงบนน้ำเหล็กให้ทั่วเตา 2 ระบายเสร็จแล้วเอาเหล็กเขี่ย Slag คู้ยให้ทั่ว เพื่อให้ Slag hold จับสิ่งสกปรกในเตา และเมื่อ Slag จับสิ่งสกปรกในเตาแล้วให้นำออกจากเตาให้หมด

(6) ตรวจสอบอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาให้ได้ 1450-1480 องศาเซลเซียส

(7) ตักน้ำเหล็กในเตาทดลองในแบบ (Test Piece) เพื่อนำไปตรวจค่าเคมีตามข้อกำหนด ซึ่งถ้าผลเป็นไปตามข้อกำหนด ให้เปิดไฟเข้าเตาหลอมต่อให้ได้อุณหภูมิ 1520 องศาเซลเซียส

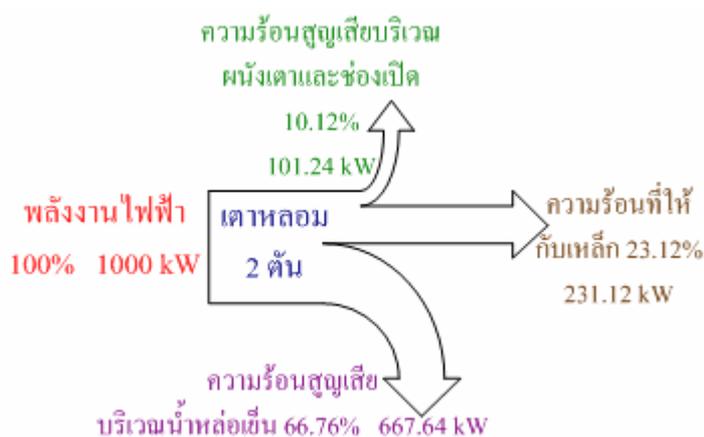
(8) ปิดไฟเข้าเตาหลอมเพื่อลดอุณหภูมิให้เหลือ 1510-1500 องศาเซลเซียส เพื่อรอเทต่อไป



ภาพที่ 10 เตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำไฟฟ้าและกระบวนการหลอมโลหะของ บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียวอุตสาหกรรม จำกัด

แบบจำลองอุณหภูมิน้ำเหล็กของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า การวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้านั้น จะการใช้ความชำนาญของผู้ควบคุมเตาเป็นหลัก โดยจะพิจารณาจากสีและลักษณะของน้ำเหล็ก และวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลซึ่งไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างต่อเนื่อง เพราะอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่สูงถึง 1500 องศาเซลเซียส ทำให้ในการจุ่มวัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กในบางครั้งมีอุณหภูมิเกินอุณหภูมิที่ต้องการ จึงต้องทำการปรับลดอุณหภูมิลงซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานโดยสูญเปล่า ดังนั้นคณะวิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงระบบการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมาพบว่า การประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะทางอ้อมสามารถทำได้โดยพิจารณาจากพลังงานไฟฟ้าที่เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนที่จ่ายให้แก่เตาหลอม พบว่าพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่เตาหลอมสามารถนำมาเขียนแผนภาพแซงก์ไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แซงก์ไดอะแกรมของความร้อนในเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

จากภาพที่ 11 จะพบว่าความร้อนที่เข้าสู่เตาหลอม จะเข้าสู่เหล็กเพียงแค่ 23.12% หรือพูดได้ว่าประสิทธิภาพของเตาเท่ากับ 23.12% โดยที่ความร้อนส่วนมาก จะสูญเสียไปกับระบบน้ำหล่อเย็น ซึ่งคิดเป็นปริมาณถึง 66.76% ส่วนความร้อนที่เหลือจะสูญเสียไปตามช่องเปิด และผนังเตาคิดเป็น 10.12% ดังนั้นถ้าทราบค่าพลังงานไฟฟ้าที่ให้กับเตาหลอม, ค่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียในระบบน้ำหล่อเย็น และค่าความร้อนที่เสียไปในส่วนอื่นๆ ก็จะสามารถประมาณค่าความร้อน หรือค่า

อุณหภูมิของน้ำโลหะที่อยู่ในเตาได้ และค่าความร้อนที่โลหะภายในเตาได้รับนี้จะสามารถนำไปคำนวณค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะที่เพิ่มขึ้นจากค่าเริ่มต้นได้ แต่ในความเป็นจริงนั้น ค่าพลังงานที่สูญเสียไปทางผนังเตาและช่องเปิดต่าง ๆ นั้น ไม่สามารถวัดได้ จึงจำเป็นจะต้องมีการประมาณค่า แต่เนื่องจากพลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้มีเพียง 10% ระบบการประมาณจึงไม่จำเป็นจะต้องมีความแม่นยำสูงมาก (เขมภัทร สมสังข์, 2548)

ในโครงการวิจัยนี้ ได้ทำการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมด้วยวิธีทางอ้อม โดยนำสัญญาณข้อมูลต่างๆ ที่วัดได้จากเซนเซอร์ เช่น กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น มาแทนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาหลอมโลหะและใช้วิธีการของ Kalman Filter ในการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

1. ความร้อน (Heat)

ความร้อนเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้อุณหภูมิของวัตถุเปลี่ยนแปลงไป ปริมาณความร้อน (Quantity of Heat) มีหน่วยวัดหลายหน่วยแต่ที่ใช้เป็นปกติคือ kilocalories (kcal) ซึ่ง 1 kcal คือ ปริมาณความร้อนที่ทำให้ น้ำบริสุทธิ์หนัก 1 kg ที่อุณหภูมิ 15°C ($14.5 - 15.5^{\circ}\text{C}$) ให้มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1°C ความร้อนสามารถแบ่งได้เป็นความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝง ดังนี้คือ

1.1 ความร้อนสัมผัส (Sensible Heat)

ความร้อนสัมผัสเป็นความร้อนที่ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนโดยที่สถานะไม่เปลี่ยนเรารู้สึกสัมผัสความร้อนนี้ได้และทำการวัดได้โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ เช่น น้ำเย็นที่ 32°F (0°C) ถูกเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 212°F (100°C) เป็นน้ำร้อน

สารต่างชนิดกันมีความสามารถในการรับหรือคายพลังงานความร้อนได้ต่างกันและเรียกค่าพลังงานความร้อนที่ทำให้สารชนิดหนึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 หน่วยว่า ความจุความร้อน (heat capacity "C") ของสารชนิดนั้นตามที่ใช้ในระบบเอสไอเป็นจูลต่อเคลวิน (J/K) โดยที่ค่าความจุความร้อนของสารดังกล่าวนี้ นอกจากจะต่างกันไปตามชนิดของสารแล้วยังขึ้นกับขนาดคือปริมาตรหรือมวล รวมถึงจำนวน โมลอีกด้วย ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้ค่าความจุความร้อนของสารเพื่อเป็นเกณฑ์สำหรับการเปรียบเทียบเรามักจะพิจารณาสารหลายชนิดเปรียบเทียบกันโดยใช้ค่าความจุ

ความร้อนต่อหนึ่งหน่วยมวลของสารแทนและเรียกปริมาณดังกล่าวนี้ว่า ความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity “c”) ของสารนั้นโดยมีหน่วยในระบบเอสไอเป็นจูลต่อ (กิโลกรัม-เคลวิน) “J/kg-K” แต่บางครั้งก็เรียกว่า ความร้อนจำเพาะ (specific heat “c”) ซึ่งก็คือปริมาณเดียวกันนั่นเอง นอกจากนี้ในกรณีที่ต้องการกล่าวให้สัมพันธ์กับจำนวน โมล (n) ของสารก็จะใช้ค่าความจุความร้อนต่อโมลโดยเรียกว่า ความจุความร้อนโมลาร์ (molar heat capacity “C_m”) ของสารนั้นก็คือ C/n และมีหน่วยเป็นจูลต่อโมล (J/mole) ในระบบเอสไอ

ถ้าสารชนิดหนึ่งมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ΔT เคลวิน โดยมีพลังงานความร้อนที่ได้รับเป็น Q จูล จะได้

$$Q = mc(\Delta T) = nC_m(\Delta T) \quad (1)$$

1.2 ความร้อนแฝง (Latent heat)

ความร้อนแฝง หมายถึงปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนสถานะของสารโดยอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งมี 2 ประเภท คือความร้อนแฝงของการหลอมเหลวและความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ ถ้าเป็นสารชนิดเดียวกันแต่มีมวลต่างกันก็จะมีค่า ความร้อนแฝงที่แตกต่างกัน ยิ่งถ้าเป็นสารต่างชนิดกันก็ย่อมมีค่าที่ไม่อาจมีเกณฑ์ที่ใช้เปรียบเทียบกันได้ จึงกำหนดค่าความร้อนแฝงต่อหน่วยมวลของสารเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ โดยเรียกว่า ความร้อนแฝงจำเพาะ (specific latent heat “L”) ของสารมีหน่วยเป็นจูลต่อกิโลกรัม (J/kg) ในระบบเอสไอ

ถ้าสารชนิดหนึ่ง ซึ่งมีมวล m กิโลกรัมและมีค่าความร้อนแฝงจำเพาะ L จูลต่อกิโลกรัม เมื่อเปลี่ยนสถานะจนหมดโดยมีการรับหรือคายพลังงานความร้อน Q จูล ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่ไม่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ ขณะที่สารชนิดนั้นมีการเปลี่ยนเฟส จะได้

$$Q = mL \quad (2)$$

ตารางที่ 2 ความจุความร้อนจำเพาะ และความจุความร้อน โมลาร์ของวัตถุบางชนิด (ค่าเฉลี่ย)
รักษาความดันให้คงที่ ; วัตถุอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 0 °C ถึง 100 °C

โลหะ	ความจุความร้อนจำเพาะ (c)		M	ความจุความร้อน โมลาร์ C
	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot (^\circ\text{C})^{-1}$	$\text{Cal} \cdot \text{g}^{-1} \cdot (^\circ\text{C})^{-1}$	$\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot (^\circ\text{C})^{-1}$
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	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 3 ความร้อนแฝงจำเพาะของการหลอมเหลวและการกลายเป็นไอ

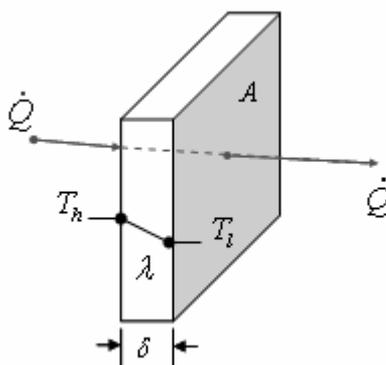
โลหะ	จุดหลอมเหลว ปกติ (1K)	L_F หลอมเหลว ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	จุดเดือดปกติ (1K)	L_V กลายเป็นไอ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
ซีลีเนียม	3.5	5.23	4.216	20.9
ไฮโดรเจน	13.84	58.6	20.26	452
ไนโตรเจน	63.18	25.5	77.34	201
ออกซิเจน	54.36	13.8	90.18	213
ตะกั่ว	600.5	24.5	2023	871
น้ำ	273.15	335	373.15	2256
เงิน	1233.95	88.3	2466	2336
ทองแดง	1356	134	1460	5069

2. การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

โดยธรรมชาติความร้อนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ลักษณะการเคลื่อนที่ของความร้อนนี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ การนำความร้อน (Heat Conduction) การพาความร้อน (Heat Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน (Conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านของแข็งหรือวัตถุที่เป็นตัวกลางทึบแสง เมื่อมีความลาดชันของอุณหภูมิเกิดขึ้นในวัตถุก้อนนั้นรวมทั้งการถ่ายเทความร้อนในของเหลวหรือก๊าซ เมื่อของเหลวหรือก๊าซนั้นไม่มีการเคลื่อนที่อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนจะเพิ่มขึ้นถ้าผลต่างของอุณหภูมิด้านสูงและอุณหภูมิด้านต่ำมีมากหรือพื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่านมีมาก แต่ถ้าระยะทางที่ความร้อนถ่ายเทยิ่งยาวขึ้นความร้อนก็จะถ่ายเทได้น้อยขึ้นและอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยการนำความร้อนสามารถหาได้โดยอาศัยกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ซึ่งเขียนเป็นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อ 1 ชั่วโมง \dot{Q} ($kcal / h, kW$)



ภาพที่ 12 การนำความร้อนผ่านตัวนำความร้อน

พิจารณาภาพที่ 12 (มนตรี พิรุณเกษตร, 2542) การนำความร้อนผ่านตัวกลางหนา δ (m) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A (m^2) โดยมีความร้อนซึ่งไหลจากผนังด้านที่มีอุณหภูมิสูง T_h ($^{\circ}C$) ไปยังผนังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า T_l ($^{\circ}C$) ถ้ากำหนดให้แผ่นตัวนำมีสภาพนำความร้อน

คือ λ ($kcal / mh^{\circ}C, kW / mK$) ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถคำนวณได้โดยสมการต่อไปนี

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} (T_h - T_l) A \quad (3)$$

โดยที่ δ (m) เป็นความหนาของแผ่นราบ/ผนังเรียบ
 A (m^2) เป็นพื้นที่ของการนำความร้อนในทิศทางตั้งฉากกับแกน x
 T_h ($^{\circ}C, K$) เป็นอุณหภูมิของผิวด้านที่มีอุณหภูมิสูง
 T_l ($^{\circ}C, K$) เป็นอุณหภูมิผิวด้านที่มีอุณหภูมิต่ำ
 λ ($kcal / mh^{\circ}C, kW / mK$) เรียกว่า สภาพการนำความร้อน (Thermal Conductivity) ซึ่งแสดงปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทโดยการนำความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยเวลา

สมการที่ (3) สามารถจัดรูปให้อยู่ในรูปของเลียนแบบสมการไฟฟ้าตามกฎของโอห์มได้ดังนี้

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (4)$$

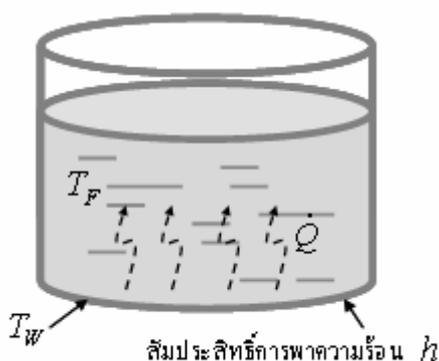
โดยที่ $\Delta T = T_h - T_l$ เป็นศักยภาพทางด้านความร้อน (Thermal Potential)
 $R = \frac{\delta}{\lambda \cdot A}$ เป็นความต้านทานความร้อน (Thermal Resistance)

ตารางที่ 4 สภาพการนำความร้อนของวัสดุ

ชื่อวัสดุ	สภาพการนำความร้อน ($kcal/mh^{\circ}C$)	ชื่อวัสดุ	สภาพการนำความร้อน ($kcal/mh^{\circ}C$)
เหล็กเหนียวคาร์บอน	40 – 50	ตะกั่วในหม้อไอน้ำ	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

2.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน (Convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนพาของของไหล เช่น จากการหลอมเหล็ก เมื่ออุณหภูมิของภาชนะ/เตาหลอมสูงขึ้น จากนั้นน้ำด้านในที่สัมผัสกับภาชนะ/ผนังเตาก็จะร้อนขึ้น น้ำเหล็กที่ร้อนขึ้นนี้จะเบากว่าน้ำเหล็กในส่วนอื่นๆ จะลอยตัวขึ้นและเกิดการพาความร้อน โดยวิธีนี้น้ำเหล็กทั้งหมดในภาชนะก็จะร้อนขึ้น การเคลื่อนย้ายของความร้อนระหว่างของแข็ง (ผิวของภาชนะ) และของเหลว/ของไหล (น้ำเหล็ก) นี้เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน ซึ่งจะแสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การพาความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหลที่มีอุณหภูมิต่างกัน

การพาความร้อน (รศ.ดร.ชวลิต, 2549) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ตามการไหลของของไหล คือ

1) การพาความร้อนตามธรรมชาติ (Natural or Free Convection) คือ การพาความร้อนซึ่งเป็นผลจากแรงลอยตัว (Buoyancy Force) ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของของไหล แรงลอยตัวที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหวและมีการพาความร้อนเกิดขึ้นนี้ มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลใน 2 บริเวณที่มีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ตัวอย่างการพาความร้อนตามธรรมชาติ เช่น การวางไข่ต้มสุก ซึ่งที่ผิวของเปลือกไข่มีอุณหภูมิที่สูงกว่าอากาศโดยรอบ ถ้าพิจารณาอากาศที่อยู่ชิดกับเปลือกไข่ อากาศบริเวณนี้จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่าอากาศที่อยู่ห่างออกไปจากเปลือกไข่ ดังนั้นเมื่อมีผลต่างของอุณหภูมิที่บริเวณทั้งสอง ทำให้เกิดผลต่างของความหนาแน่นของอากาศที่บริเวณทั้งสอง ทำให้เกิดแรงลอยตัว อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะลอยขึ้น

และพาเอาความร้อนไปด้วย ในขณะที่อากาศที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะลอยต่ำลงและพาเอาความเย็นมา ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไป เปลือกไข่จะมีอุณหภูมิที่ต่ำลง

2) การพาความร้อนแบบบังคับ (Forced Convection) คือการพาความร้อนซึ่งเป็นผลมาจากแรงกระทำจากภายนอก (External Force) ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของของไหลและมีการพาความร้อนเกิดขึ้น

อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนสามารถหาได้โดยอาศัยกฎการระบายความร้อน/การเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ซึ่งเขียนเป็นปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อ 1 ชั่วโมง \dot{Q} (kcal/h, kW) และสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (5)

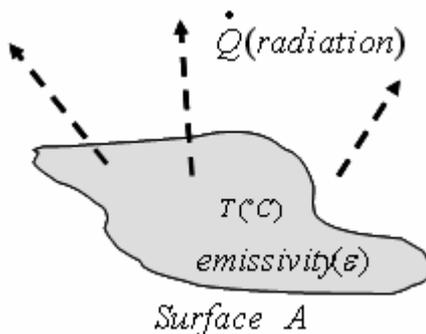
$$\dot{Q} = h(T_w - T_F)A \quad (5)$$

โดยที่ A (m^2) เป็นพื้นที่ของผนังของแข็งที่สัมผัสกับของไหล
 T_w ($^{\circ}C, K$) เป็นอุณหภูมิที่ผิวของผนังของแข็ง
 T_F ($^{\circ}C, K$) เป็นอุณหภูมิของของไหล
 h ($kcal/m^2h^{\circ}C, kW/m^2K$) เป็นค่าคงที่ เรียกว่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat Transfer Coefficient)

ตารางที่ 5 ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

ชนิดของไหล	ประเภทการพาความร้อน	(kcal/m ² 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

2.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)



ภาพที่ 14 การแผ่รังสีความร้อนจากแหล่งกำหนดความร้อนใดๆ

วัตถุทั้งหลายจะแผ่รังสีพลังงานความร้อนจากผิวออกสู่ช่องว่างในปริมาณที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิของวัตถุนั้นๆ โดยไม่จำเป็นต้องมีตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน การแผ่รังสีพลังงานนี้เรียกว่า การแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ซึ่งปริมาณการแผ่รังสีความร้อนต่อ 1 ชั่วโมง \dot{Q} ($kcal / h, kW$) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\dot{Q} = \varepsilon c_b A \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (6)$$

โดยที่ $A (m^2)$ เป็นพื้นที่ผิวของวัตถุ

$T (°C, K)$ เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ของผิว

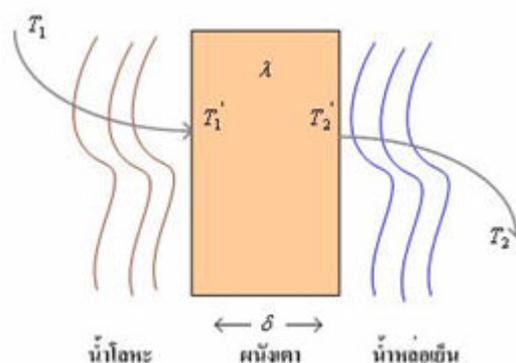
ε เป็นค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับอัตราส่วนของความร้อนที่ดูดได้กับรังสีความร้อนที่ได้รับ ทั้งหมด เช่น ในกรณีของท่อเหล็กเหนียว ε มีค่าประมาณ 0.8 – 0.86

c_b เป็นค่าคงที่สเตฟาน – โบลทซ์มันน์ (Stefan – Boltzmann Constant) มีค่าเท่ากับ $5.7 \times 10^{-8} W / m^2 K^4$

ตารางที่ 6 ค่าการแผ่รังสีของวัสดุชนิดต่างๆ

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
ผิวขี้ผึ้งของเหล็ก	อุณหภูมิห้อง	0.06
แผ่นเหล็กเหนียวรีด	อุณหภูมิห้อง	0.56
เหล็กหล่อ (ผิวดำ)	อุณหภูมิห้อง	0.7 – 0.8
ผิวขี้ผึ้งของทองเหลือง	อุณหภูมิห้อง	0.09
อิฐทนไฟ	อุณหภูมิห้อง – 1,000	0.85
อิฐแดง	อุณหภูมิห้อง – 1,000	0.90

3. การถ่ายเทความร้อนรวม (Combined Heat Transfer)



ภาพที่ 15 การถ่ายเทความร้อนรวมของเตาหลอมโลหะ

การถ่ายเทความร้อน (เขมภักทร สมสังข์, 2548) มักไม่ปรากฏเป็นวิธีใดวิธีหนึ่งโดยเฉพาะแต่เป็นรูปแบบผสมของการถ่ายเทความร้อนหลายประเภท ปรากฏการณ์ที่ความร้อนถ่ายเทจากของไหลด้านหนึ่งผ่านผนังของแข็งไปยังของไหลอีกด้านหนึ่ง ดังแสดงในภาพที่ 15 เรียกว่า การถ่ายเทความร้อนรวม (Combined Heat Transfer) ซึ่งปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อ 1 ชั่วโมง \dot{Q} (kcal/h) สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\dot{Q} = K(T_1 - T_2)A \quad (7)$$

โดยที่ $A (m^2)$ เป็นพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของของแข็ง
 $T_1 (^{\circ}C)$ เป็นอุณหภูมิของของไหลที่มีอุณหภูมิสูง
 $T_2 (^{\circ}C)$ เป็นอุณหภูมิของของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำ
 $K (kcal / m^2 h^{\circ}C)$ เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient)

ความร้อนจากน้ำเหล็ก ช่วง $T_1 (^{\circ}C) - T_1' (^{\circ}C)$ ซึ่งช่วงนี้ความร้อนจะถ่ายเทจากน้ำเหล็กไปยังผนังเตาโดยการพาความร้อนตามสมการดังนี้ คือ

$$\dot{Q}_1 = \frac{(T_1 - T_1')}{R_1}, \quad R_1 = \frac{1}{hA} \quad (8)$$

ช่วง $T_1' (^{\circ}C) - T_2' (^{\circ}C)$ เป็นช่วงที่สภาวะที่ค่าต่างๆ คงที่ หรือไม่แปรตามเวลา (Steady State) ความร้อนก็จะไหลผ่านผนังเตาโดยการนำความร้อน ในอัตราเดียวกับที่ไหลจากน้ำเหล็กมายังผิว ดังนั้น

$$\dot{Q}_2 = \frac{(T_1' - T_2')}{R_2}, \quad R_2 = \frac{\delta}{\lambda A} \quad (9)$$

ช่วง $T_2' (^{\circ}C) - T_2 (^{\circ}C)$ เป็นช่วงที่ความร้อนไหลผ่านผนังแล้วและจะไหลไปยังสารหล่อเย็นโดยการพาความร้อน ดังนั้น

$$\dot{Q}_3 = \frac{(T_2' - T_2)}{R_3}, \quad R_3 = \frac{1}{hA} \quad (10)$$

จากสมการที่ (8), (9) และ(10) สามารถหาการถ่ายเทความร้อนรวมได้ดังนี้

$$\dot{Q}_{T_1-T_2} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 = \frac{A(T_1 - T_2)}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad K = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (11)$$

และเนื่องจากในช่วงอุณหภูมิ $T_1(^{\circ}\text{C}) - T_1'(^{\circ}\text{C})$ ได้เกิดการแผ่รังสีความร้อนด้วย ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนรวมจะเป็นไปตามสมการ

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{T_1-T_2} + \dot{Q}_r = \frac{A(T_1 - T_2)}{R_1 + R_2 + R_3} + \varepsilon c_b A \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \quad (12)$$

จากการศึกษาการประมาณค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะ (ประพันธ์ พิภุตทอง, 2545) จะทำโดยการวัดพลังงานเข้า – ออก แล้วนำมาใช้ประมาณค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากอุณหภูมิเริ่มต้นที่วัดได้ในครั้งแรก โดยอุณหภูมิเริ่มต้นจะทำการวัดด้วยเทอร์โมคัปเปิลเมื่อโลหะภายในเตาหลอมได้หลอมละลายหมดสิ้นและใช้สมการสมดุลความร้อนดังนี้

$$\text{Energy input} = \text{Energy stored} + \text{Energy loss} \quad (13)$$

$$P_{in} = \dot{Q}_s + \dot{Q}_T + \dot{Q}_W + \dot{Q}_C + \dot{Q}_R + \dot{Q}_{th} \quad (14)$$

ตารางที่ 7 สมการสมดุลความร้อนของเตา

กำลังงาน (kW, kJ/s)	สัญลักษณ์และสมการ
กำลังงานเข้าระบบ	P_{in}
กำลังงานที่ให้กับเหล็ก	$\dot{Q}_s = \frac{m_s L}{\Delta t} + \frac{m_s C_{p,s} \Delta T_s}{\Delta t}$ (15)
กำลังงานสูญเสียในหม้อแปลง	$\dot{Q}_T = 4I_{INV}^2 R_{CU}$ (16)
กำลังงานสูญเสียกับระบบหล่อเย็น	$\dot{Q}_W = \dot{M}_W C_{p,w} \Delta T_W$ (17)
กำลังงานสูญเสียจากการนำความร้อน	$\dot{Q}_C = \frac{T_s - T_w}{R} \cdot 10^{-3}$ (18)
กำลังงานสูญเสียจากการแผ่รังสี	$\dot{Q}_R = \varepsilon c_b A \left(\frac{T_s}{100} \right)^4$ (19)
กำลังงานสูญเสียอื่นๆ	\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)
	Δt	=	เวลาที่ใช้หลอม (s)
	R	=	ค่าความต้านทานความร้อนของผนังเตา (K/kW)
	ε	=	ค่า Emissivity
	A	=	พื้นที่ผิวของการแผ่รังสี (m ²)
	R_{CU}	=	ความต้านทานของขดลวดตัวนำในหม้อแปลง (ohm)
	I_{INV}	=	กระแสอินเวอร์เตอร์ (Amp)

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาหลอมโลหะ

ความร้อนที่ให้กับเหล็ก (เขมภัทร สมสังข์และคณะ, 2548) ในขั้นตอนการวัดอุณหภูมิ น้ำเหล็กนั้น เป็นขั้นตอนที่เหล็กในเตาหลอมกลายเป็นของเหลวหมดแล้ว เพราะฉะนั้นความร้อนในส่วนความร้อนแฝง (Latent Heat) จึงไม่มี จะมีเฉพาะในส่วนของการที่ให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น (อุณหภูมิจริง, Sensible Heat) ซึ่งประกอบไปด้วยความร้อนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 7 ดังนั้นจึงสามารถตัดความร้อน ในส่วนความร้อนแฝงทิ้งไปได้ และพบว่าค่าความร้อนต่างๆ จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันของสมการทางความร้อน ดังนี้

1. กำลังงานที่ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น เป็นฟังก์ชันของผลต่างของอุณหภูมิ น้ำเหล็กในเตา $f(\Delta T_s)$
2. กำลังงานที่สูญเสียในหม้อแปลง พบว่าจะเป็นฟังก์ชันของค่าความต้านทานและกระแส ซึ่งค่าทั้งสองนี้จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่ากำลังงานที่สูญเสียในหม้อแปลงจะเป็นฟังก์ชันของค่าพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า $f(P_{in})$

3. กำลังงานสูญเสียเกี่ยวกับระบบหล่อเย็น ค่าความร้อนในส่วนนี้คือความร้อนที่ใช้ถ่ายเทความร้อนให้กับระบบคอล์ยของเรา ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น และค่าอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น $f(\dot{M}_w, T_w)$
4. กำลังงานสูญเสียจากการนำความร้อนนั้นก็คือความร้อนจากน้ำเหล็กในเตาผ่านผนังเตาออกมา ซึ่งจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตา $f(\Delta T_s)$
5. กำลังงานสูญเสียจากการแผ่รังสีพบว่าจะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตายกกำลังสี่ซึ่งจากการศึกษาจากสมดุลความร้อนของเตาชนิดเดียวกันนี้พบว่ามิต้าน้อย จึงให้รวมกับกำลังงานสูญเสียอื่นๆ (*heatloss*) และประมาณให้มีค่าคงที่

เมื่อแทนค่าตัวแปรที่วัดค่าได้ กับตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันของสมการทางความร้อนข้างต้นลงในสมการ (14) จะได้รูปแบบสมการ ดังนี้

$$P_{in} = \frac{m_s C_{p,s} \Delta T_s}{\Delta t} + \dot{M}_w C_{p,w} \Delta T_w + f(P_{in}) + f(\Delta T_s) + \text{heatloss} \quad (20)$$

กำหนดให้กำลังงานความร้อนสูญเสียในหม้อแปลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังงานความร้อนเข้าระบบโดยแทนด้วยค่าคงที่ a (อัตราส่วนความร้อนสูญเสียในหม้อแปลง) ลงในความร้อนสูญเสียในหม้อแปลง และกำหนดให้กำลังงานความร้อนสูญเสียจากการนำความร้อนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตา (ΔT_s) โดยแทนด้วยค่าคงที่ b (อัตราส่วนความร้อนสูญเสียเนื่องจากความร้อนผ่านผนังเตา) จะได้

$$P_{in} = \frac{m_s C_{p,s} \Delta T_s}{\Delta t} + \dot{M}_w C_{p,w} \Delta T_w + a.P_{in} + b.\Delta T_s + \text{heatloss} \quad (21)$$

ทำการลดรูปของสมการ (21) จะได้

$$P_{in} = c_1 \Delta T_s + c_2 \dot{M}_w \Delta T_w + c_3 \quad (22)$$

โดยที่

$$c_1 = \frac{\left(\frac{m_s C_{p,s}}{\Delta t} + b \right)}{(1-a)}, \quad c_2 = \left(\frac{C_{p,w}}{1-a} \right), \quad c_3 = \left(\frac{\text{heatloss}}{1-a} \right)$$

ซึ่งสมการที่ (22) สามารถจัดรูปเพื่อหา ค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในเตาจะ ได้

$$T_S(i) = \frac{P_{in}(i) + c_1 T_S(i-1) - c_2 \dot{M}_w(i) \Delta T_w(i) - c_3}{c_1} \quad (23)$$

โดยที่

$T_S(i)$	เป็นอุณหภูมิน้ำเหล็กในเวลาที่เหมาะสมได้ ที่เวลา i
$T_S(i-1)$	เป็นอุณหภูมิน้ำเหล็กในเวลาที่เหมาะสมได้ ที่เวลา $i-1$
$P_{in}(i)$	พลังงานไฟฟ้าป้อนเข้า (KW)
$\dot{M}_w(i)$	อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (Kg/hr)
$\Delta T_w(i)$	ผลต่างอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น (K)
c_1	เป็นค่าที่ขึ้นกับค่าความจุความร้อนจำเพาะและมวลของน้ำโลหะ
c_2	เป็นค่าที่ขึ้นกับค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำหล่อเย็น
c_3	เป็นค่าที่ขึ้นกับการสูญเสียความร้อนของน้ำโลหะ

การประยุกต์ใช้ตัวกรองคาร์ลมานในการประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะ

จากการศึกษาข้อมูลที่ผ่านมาพบว่า การประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะในโครงการวิจัยที่ผ่านมา นั้นจะใช้วิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm, GA) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมของการค้นหาแบบการกระจายความน่าจะเป็น (Stochastic) ที่ทำการเลียนแบบกลไกการคัดเลือกสายพันธุ์ทางธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตในการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะ ซึ่งผลที่ได้พบว่าการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะด้วยวิธี GA นั้นสามารถสร้างแบบจำลองอุณหภูมิของน้ำเหล็กในเตาหลอมโลหะได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงมาก แต่เนื่องด้วยขั้นตอนในการคัดเลือกชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด จึงต้องใช้เวลาอย่างมากในการประมวลผล (10-20 นาที) ทำให้ไม่สามารถประมาณอุณหภูมิได้ทันเวลา หรือไม่สามารถประมาณอุณหภูมิล่วงหน้าได้ ดังนั้นวิธีการของ ตัวกรองคาร์ลมาน (Kalman Filter) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลองของเตาหลอมโลหะในการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาได้อย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง

1. ตัวกรองคาร์ลมาน (Kalman Filter)

Kalman Filter (A. Girgis, A et al. 1981; F.Franklin, G et al. 1997; Negenborn, R. 2003 and Welch, G et al. 2006) เป็นกระบวนการการวนซ้ำของข้อมูลที่จะทำการประมาณสแตตของระบบพลศาสตร์เชิงเส้นที่มีสัญญาณรบกวน ซึ่งในการประมาณสแตตของ Kalman Filter จะเข้าถึงปริมาณที่ได้จากการวัดของระบบที่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับสแตตและถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวน โดย Kalman Filter จะดำเนินการกับทุกๆ ปริมาณที่วัดได้จากระบบทั้งปริมาณที่วัดได้อย่างแม่นยำและปริมาณที่วัดได้ไม่แม่นยำเพื่อทำการประมาณสแตตของระบบโดยจะใช้สิ่งที่รู้ได้จากระบบรวมไปถึงเซนเซอร์ สัญญาณรบกวนจากการวัดและทุกๆ ข้อมูลในการกำหนด

จุดเริ่มต้นหลักการของ Kalman Filter นั้นมาจากหลากหลายทฤษฎีความรู้ เช่น วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares), วิธีค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (Least mean squares), ทฤษฎีความน่าจะเป็น (Probability theory), ระบบการสุ่มทางสถิติ (Stochastic systems) ซึ่งทฤษฎีและความรู้เหล่านี้มีเป็นพื้นฐานในการออกแบบ Kalman Filter

พิจารณาระบบ Dynamic discrete model

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{\Phi}(k-1)\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{\Gamma}(k-1)\mathbf{u}(k-1) + \mathbf{w}(k-1) \quad (24)$$

ที่มี Measurement model

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (25)$$

โดยที่ $\mathbf{x}(k)$ คือ เสดตเวกเตอร์ขนาด $n \times 1$ ที่เวลา k
 $\mathbf{u}(k-1)$ คือ อินพุตเวกเตอร์ขนาด $n \times 1$
 $\mathbf{\Phi}(k-1)$ คือ ทราบนซ์ขั้นเมทริกซ์ขนาด $n \times n$
 $\mathbf{\Gamma}(k-1)$ คือ ดิสกรีตอีควิวาเลนต์ของอินพุตเมทริกซ์ขนาด $n \times n$
 $\mathbf{v}(k-1)$ คือ สัญญาณรบกวนจากการวัด (Measurement noise) ขนาด $n \times 1$
 $\mathbf{w}(k-1)$ คือ สัญญาณรบกวนของกระบวนการ (Process noise) ขนาด $n \times 1$

กำหนดให้ $\mathbf{w}(k-1), \mathbf{v}(k-1)$ เป็นสัญญาณแบบสุ่ม (random sequence) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ คือ

$$E\{\mathbf{w}(k)\} = E\{\mathbf{v}(k)\} = 0, \quad E\{\bullet\} \text{ คือ ค่าการคาดคะเน (Expected Value)}$$

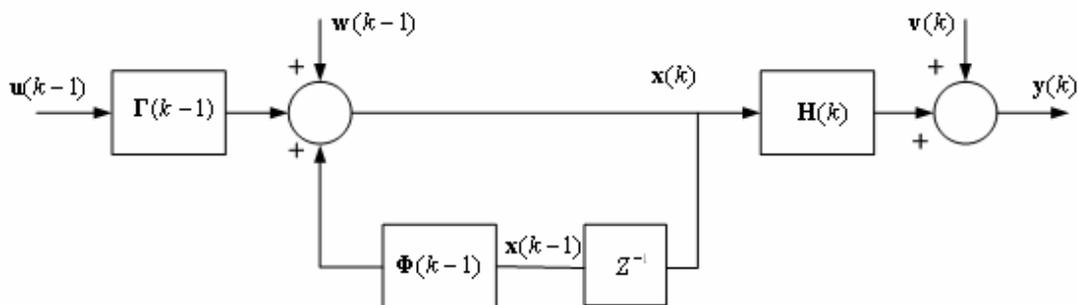
ซึ่งสัญญาณทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กันทางเวลาหรือเรียกว่าเป็นสัญญาณรบกวนสีขาว (White noise) คือ

$$E\{\mathbf{w}(i)\mathbf{w}(j)^T\} = E\{\mathbf{v}(i)\mathbf{v}(j)^T\} = 0 \quad \text{ถ้า } i \neq j$$

และให้มีค่าความแปรปรวนร่วม (covariance) เป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

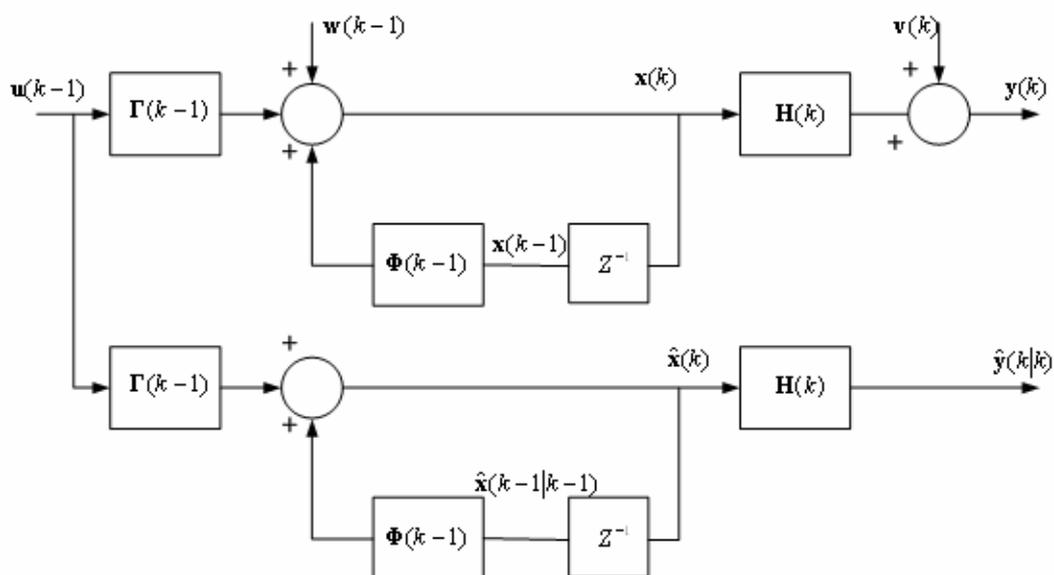
$$E\{\mathbf{w}(k)\mathbf{w}(k)^T\} = \mathbf{R}_w, \quad E\{\mathbf{v}(k)\mathbf{v}(k)^T\} = \mathbf{R}_v$$

จากสมการที่ (24) และ (25) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป block diagram ได้ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 แบบจำลองของระบบพลศาสตร์

เนื่องจาก ในขั้นตอนแรกของการออกแบบการควบคุมระบบในภาพที่ 16 เราต้องทำให้ระบบเสถียรโดยใช้วิธีการป้อนกลับสเตต $x(k)$ ซึ่งจำเป็นต้องทราบข้อมูลของสเตตจากการวัด $y(k)$ (หรือ $y(k-1)$) ดังนั้น ตัวประมาณสเตต (State Estimators) อย่างง่าย จึงถูกนำมาใช้ประมาณสเตต $\hat{x}(k|k)$ (หรือ $\hat{x}(k|k-1)$) ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 17

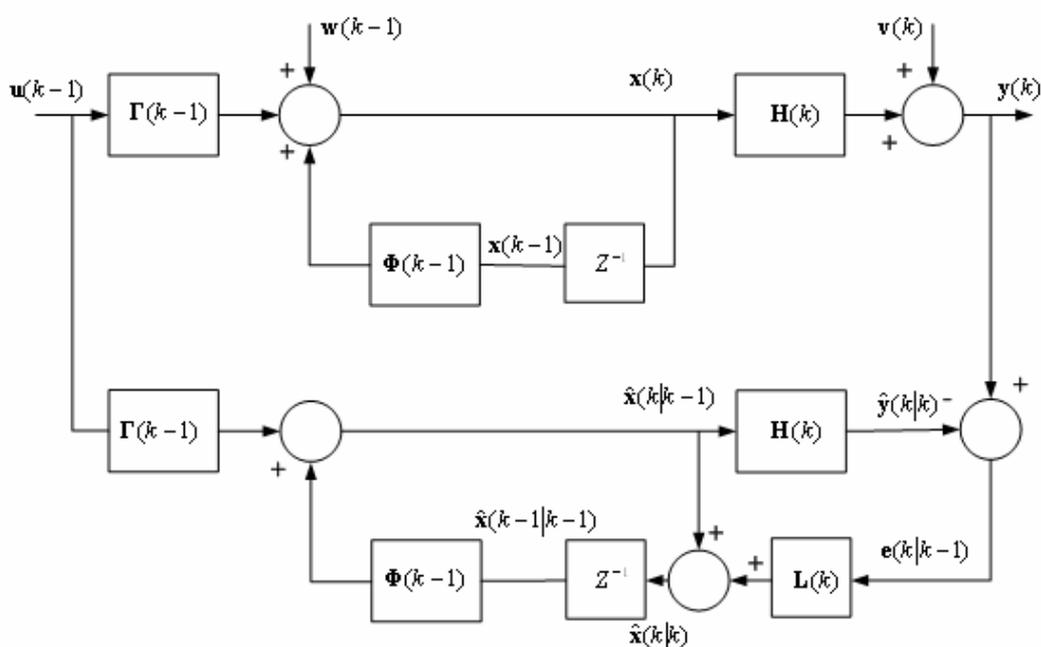


ภาพที่ 17 ตัวประมาณสเตตอย่างง่าย

ปัญหาที่เกิดขึ้นของตัวประมาณสเตรในภาพที่ 17 มีสองประการ คือ

1. ถ้าเราไม่สามารถรู้ปริมาณที่แน่นอนของ matrix $\Phi(k)$, $\Gamma(k)$, $H(k)$ การประมาณค่า \hat{x} จะไม่ asymptotically track ตามค่าของ x
2. ระบบนี้ไม่ได้ทำการแก้หรือชดเชยค่าของสัญญาณ noise ($w(k)$, $v(k)$)

ดังนั้น ค่าจากการวัด $y(k)$ ต้องถูกนำมาป้อนเข้าสู่ตัวประมาณสเตร อันเป็นเป็นที่มาของตัวประมาณสเตร ที่เรียกว่า Kalman Filter ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 Block diagram ของระบบที่ประมาณสเตรโดยใช้ Kalman Filter

จากระบบในภาพที่ 18 เป็นระบบที่อยู่ในรูปทั่วไปของ Kalman Filter โดยจะทำการแก้ปัญหาทั้ง 2 ประการจากระบบในภาพที่ 17 โดยสิ่งที่แตกต่างออกไปจากระบบในภาพที่ 17 คือ ตัวประมาณเริ่มต้นของ $x(k)$ จะแทนด้วย $\hat{x}(k|k-1)$ ซึ่งจะเรียกตัวประมาณนี้ว่า Priors Estimate โดย $\hat{x}(k|k-1)$ เป็นค่าประมาณที่ได้การวัด $y(i)$, $i = 0, 1, 2, \dots, k-1$ ซึ่งจะเป็นไปตามสมการที่ (26) คือ

Priori Estimate

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) = \mathbf{\Phi}(k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) + \mathbf{\Gamma}(k-1)\mathbf{u}(k-1) \quad (26)$$

ใช้สมการที่ (26) (Priori Estimate) ในการทำนายตัวประมาณสำหรับ Output $\hat{\mathbf{y}}(k)$ และผลต่างระหว่าง Estimated Output และ Actual Output จะเรียกว่า Priori Error ดังสมการที่ (27)

$$\mathbf{e}(k|k-1) = \mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k|k-1) = \mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) \quad (27)$$

จากสมการที่ (27) เป็นสมการที่แสดงผลต่างระหว่าง Estimated Output และ Actual Output ซึ่งจะ
เป็นสมการที่แสดงว่าตัวประมาณ $\hat{\mathbf{x}}(k)$ เหมาะสมหรือไม่โดยจะดูได้จากค่า error ที่เกิดขึ้น

Posteriori Estimate

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{L}(k)[\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)] \quad (28)$$

จากสมการที่ (28) (Posteriori Estimate) ต้องทำการ Optimize หาค่า $\mathbf{L}(k)$ ซึ่งเป็น Gain ของ Kalman Filter เพื่อทำการแก้ไขปรับตัวประมาณ $\hat{\mathbf{x}}(k)$ ของให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด

กำหนดให้ระบบมี Error ของตัวประมาณ $\hat{\mathbf{x}}(k)$ คือ Priori error $\mathbf{e}(k|k-1)$ และ posteriori error $\mathbf{e}(k|k)$ ดังสมการที่ (29)

$$\begin{aligned} \text{Priori error} & : \mathbf{e}(k|k-1) = \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) \\ \text{Posteriori error} & : \mathbf{e}(k|k) = \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k) \end{aligned} \quad (29)$$

และกำหนด Error แต่ละตัวให้มีค่า Error covariance ตามสมการที่ (30)

$$\begin{aligned} \text{Priori error} & : \mathbf{P}(k|k-1) = E\{\mathbf{e}(k|k-1)\mathbf{e}^T(k|k-1)\} \\ \text{Posteriori error} & : \mathbf{P}(k|k) = E\{\mathbf{e}(k|k)\mathbf{e}^T(k|k)\} \end{aligned} \quad (30)$$

ดัชนีที่ใช้ชี้ความแม่นยำในการประมาณค่า คือ ค่า Square error

$$\text{Square Error} = \sum_{i=1}^n E \left\{ (e_i(k|k))(e_i(k|k))^T \right\} = \text{tr } \mathbf{P}(k|k)$$

โดย $\text{tr } \mathbf{P}(k|k)$ คือผลบวกตามแนวเส้นทแยงมุมของ matrix $\mathbf{P}(k|k)$

ดังนั้นเราจะหาค่า $\mathbf{L}(k)$ ที่ทำให้ Mean Square Error ของ $\text{tr } (\mathbf{P}(k|k))$ ให้มีค่าน้อยที่สุด โดย

$$\frac{\partial \text{tr } (\mathbf{P}(k|k))}{\partial \mathbf{L}(k)} = 0$$

โดยมีวิธีการหา ดังนี้ จากสมการที่ (30)

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k|k) &= E \left\{ \mathbf{e}(k|k) \mathbf{e}(k|k)^T \right\} \\ &= E \left\{ (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k)) (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k))^T \right\} \\ &= E \left\{ (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) - \mathbf{L}(k)(\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1))) \right. \\ &\quad \left. * (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) - \mathbf{L}(k)(\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)))^T \right\} \\ &= E \left\{ (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) - \mathbf{L}(k)(\mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1))) \right. \\ &\quad \left. * (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) - \mathbf{L}(k)(\mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)))^T \right\} \\ &= E \left\{ ((\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k))(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1)) + (\mathbf{L}(k)\mathbf{v}(k))) \right. \\ &\quad \left. * ((\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k))(\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1)) + (\mathbf{L}(k)\mathbf{v}(k)))^T \right\} \\ &= (\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k)) E \left\{ (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1)) (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1))^T \right\} (\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k))^T \\ &\quad + \mathbf{L}(k) E \left\{ \mathbf{v}(k) \mathbf{v}^T(k) \right\} \mathbf{L}^T(k) + 2(\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k)) E \left\{ (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1)) \mathbf{v}(k)^T \right\} \mathbf{L}^T(k) \end{aligned}$$

จาก $E \left\{ \mathbf{v}(k) \mathbf{v}^T(k) \right\} = \mathbf{R}_v$ และ $E \left\{ (\mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1)) \mathbf{v}^T(k) \right\} = E \left\{ \mathbf{e}(k|k-1) \mathbf{v}^T(k) \right\} = 0$ จะได้

$$\mathbf{P}(k|k) = (\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k)) \mathbf{P}(k|k-1) (\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k))^T + \mathbf{L}(k) \mathbf{R}_v \mathbf{L}^T(k) \quad (31)$$

เมื่อใช้สมการ (31) และใช้เอกลักษณ์ $\frac{\partial \text{tr}(\mathbf{ABA}^T)}{\partial \mathbf{A}} = 2\mathbf{AB}$ เราสามารถทำให้ $SE(k|k)$ มี

ค่าน้อยที่สุดโดย

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \text{tr}(\mathbf{P}(k|k))}{\partial \mathbf{L}(k)} &= 0 \\
&= \frac{\partial \text{tr}\left\{\left(\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k)\right)\mathbf{P}(k|k-1)\left(\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k)\right)^T + \mathbf{L}(k)\mathbf{R}_v\mathbf{L}^T(k)\right\}}{\partial \mathbf{L}(k)} \\
&= -2\left(\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k)\right)\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + 2\mathbf{L}(k)\mathbf{R}_v \\
&= -2\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + 2\mathbf{L}(k)\left(\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}_v\right)
\end{aligned}$$

จะได้ Gain $\mathbf{L}(k)$ ของ Kalman Filter ตามสมการที่ (32) คือ

Kalman Filter Gain

$$\mathbf{L}(k) = \mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k)\left(\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}_v\right)^{-1} \quad (32)$$

การหา Posteriori covariance ($\mathbf{P}(k|k)$)

นำสมการที่ (32) มาจัดรูปให้อยู่ในฟังก์ชันของ \mathbf{R}_v และนำมาแทนลงในสมการที่ (31) จะได้สมการที่เรียกว่า Posteriori covariance หรือ Error covariance update ตามสมการที่ (33)

$$\mathbf{P}(k|k) = \left(\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k)\right)\mathbf{P}(k|k-1) \quad (33)$$

การหา Priori covariance ($\mathbf{P}(k|k-1)$)

พิจารณา Priori error ตามสมการที่ (29) จะได้

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}(k|k-1) &= \mathbf{x}(k) - \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) \\
&= \left(\Phi(k-1)\mathbf{x}(k-1) + \Gamma(k-1)\mathbf{u}(k-1) + \mathbf{w}(k-1)\right) \\
&\quad - \left(\Phi(k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) + \Gamma(k-1)\hat{\mathbf{u}}(k-1)\right) \\
&= \Phi(k-1)\left(\mathbf{x}(k-1) - \hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1)\right) \\
&\quad + \Gamma(k-1)\left(\mathbf{u}(k-1) - \hat{\mathbf{u}}(k-1)\right) + \mathbf{w}(k-1) \\
&= \Phi(k-1)\mathbf{e}(k-1|k-1) + \Gamma(k-1)\mathbf{e}_u(k-1|k-1) + \mathbf{w}(k-1)
\end{aligned} \quad (34)$$

จากสมการที่ (30) Priori error

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}(k|k-1) &= E\left\{\mathbf{e}(k|k-1)\mathbf{e}(k|k-1)^T\right\} \\
&= E\left\{\left(\Phi(k-1)\mathbf{e}(k-1|k-1) + \Gamma(k-1)\mathbf{e}_u(k-1|k-1) + \mathbf{w}(k-1)\right)\right. \\
&\quad \left.*\left(\Phi(k-1)\mathbf{e}(k-1|k-1) + \Gamma(k-1)\mathbf{e}_u(k-1|k-1) + \mathbf{w}(k-1)\right)^T\right\} \\
&= \Phi(k-1)E\left\{\mathbf{e}(k-1|k-1)\mathbf{e}(k-1|k-1)^T\right\}\Phi^T(k-1) \\
&\quad + \Gamma(k-1)E\left\{\mathbf{e}_u(k-1|k-1)\mathbf{e}_u(k-1|k-1)^T\right\}\Gamma^T(k-1) \\
&\quad + E\left\{\mathbf{w}(k-1)\mathbf{w}(k-1)^T\right\}
\end{aligned} \tag{35}$$

กำหนดให้ $E\left\{\mathbf{e}_u(k-1|k-1)\mathbf{e}_u(k-1|k-1)^T\right\} = 0$ และ $E\left\{\mathbf{w}(k-1)\mathbf{w}(k-1)^T\right\} = \mathbf{R}_w$
จากสมการที่ (35) จะได้สมการ Priori covariance ตามสมการที่ (36)

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \Phi(k-1)\mathbf{P}(k-1|k-1)\Phi(k-1)^T + \mathbf{R}_w \tag{36}$$

ตารางที่ 8 สมการ Kalman Filter ในระบบ Discrete-Time

Equation Name	Equation
System dynamic model	$\mathbf{x}(k) = \Phi(k-1)\mathbf{x}(k-1) + \Gamma(k-1)\mathbf{u}(k-1) + \mathbf{w}(k-1)$
Measurement model	$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k)$
Initial condition	$E\{\mathbf{x}_0\} = \hat{\mathbf{x}}_0, \quad E\{\tilde{\mathbf{x}}_0\tilde{\mathbf{x}}_0^T\} = \mathbf{P}_0$
Independence assumption	$E\{\mathbf{w}(k)\mathbf{v}^T(j)\} = 0$
State estimate extrapolation	$\hat{\mathbf{x}}(k k-1) = \Phi(k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1 k-1) + \Gamma(k-1)\mathbf{u}(k-1)$
Error covariance extrapolation	$\mathbf{P}(k k-1) = \Phi(k-1)\mathbf{P}(k-1 k-1)\Phi^T(k-1) + \mathbf{R}_w$
State estimate observational update	$\hat{\mathbf{x}}(k k) = \hat{\mathbf{x}}(k k-1) + \mathbf{L}(k)(\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k k-1))$
Error covariance update	$\mathbf{P}(k k) = (\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k))\mathbf{P}(k k-1)$
Kalman gain matrix	$\mathbf{L}(k) = \mathbf{P}(k k-1)\mathbf{H}^T(k)\left(\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}_v\right)^{-1}$

จากตารางที่ 8 เราสามารถสรุปสมการและกระบวนการของ Kalman Filter ได้ดังนี้

Initialization

$$\hat{\mathbf{x}}(0|0) = E\{\mathbf{x}_0\}$$

$$\mathbf{P}(0|0) = E\left\{\left(\mathbf{x}(0) - \hat{\mathbf{x}}(0|0)\right)\left(\mathbf{x}(0) - \hat{\mathbf{x}}(0|0)\right)^T\right\}$$

Time update

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) = \mathbf{\Phi}(k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) + \mathbf{\Gamma}(k-1)\mathbf{u}(k-1)$$

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{\Phi}(k-1)\mathbf{P}(k-1|k-1)\mathbf{\Phi}^T(k-1) + \mathbf{R}_w$$

Measurement update

$$\mathbf{L}(k) = \mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k)\left(\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}_v\right)^{-1}$$

$$\mathbf{P}(k|k) = (\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k))\mathbf{P}(k|k-1)$$

$$\hat{\mathbf{x}}(k|k) = \hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{L}(k)(\mathbf{y}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1))$$

ขั้นตอนของกระบวนการของ Kalman Filter (Sanchai Leaspitthagoorn, 2003) มีดังนี้

1. กำหนดค่า initial condition $\hat{\mathbf{x}}(0|0)$, $\mathbf{P}(0|0)$
2. คำนวณ $\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)$ จาก $\mathbf{\Phi}(k-1)$, $\hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1)$, $\mathbf{\Gamma}(k-1)$ และ $\mathbf{u}(k-1)$
3. คำนวณ $\mathbf{P}(k|k-1)$ โดยใช้ $\mathbf{P}(k-1|k-1)$, $\mathbf{\Phi}(k-1)$ และ \mathbf{R}_w
4. คำนวณค่า $\mathbf{L}(k)$ จาก $\mathbf{P}(k|k-1)$, $\mathbf{H}(k)$ และ \mathbf{R}_v
5. คำนวณ $\mathbf{P}(k|k)$ จากค่า $\mathbf{L}(k)$ และ $\mathbf{P}(k|k-1)$
6. คำนวณหาตัวประมาณ $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ จากค่า $\mathbf{L}(k)$, $\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)$ และ $\mathbf{y}(k)$
7. ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 ไปจนถึงขั้นตอนที่ 5 และจะจบกระบวนการเมื่อทำซ้ำถึงค่า k ที่ได้กำหนดไว้

2. แบบจำลองเตาหลอมโลหะในรูปแบบของตัวกรองคาร์ลมาน

พิจารณาแบบจำลองทางความของเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า คือ

$$T_s(i) = \frac{P_{in}(i) + c_1 T_s(i-1) - c_2 \dot{M}_w(i) \Delta T_w(i) - c_3}{c_1} \quad (37)$$

จากสมการที่ (37) เราสามารถจัดสมการใหม่ได้ดังนี้คือ

$$T_s(i) = \left(\frac{1}{c_1} \right) P_{in}(i) - \left(\frac{c_2}{c_1} \right) \dot{M}_w(i) \Delta T_w(i) - \left(\frac{c_3}{c_1} \right) + \left(\frac{c_1}{c_1} \right) T_s(i-1) \quad (38)$$

โดยกำหนดให้ $\theta_1 = \left(\frac{1}{c_1} \right)$, $\theta_2 = \left(\frac{c_2}{c_1} \right)$, $\theta_3 = \left(\frac{c_3}{c_1} \right)$, $\theta_4 = \left(\frac{c_1}{c_1} \right)$ ซึ่งสมการที่ (38)

สามารถจัดอยู่ให้อยู่ในรูปแบบ measurement model ของ Kalman filter

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (39)$$

ซึ่งจะได้แบบจำลองของเตาหลอมโลหะที่อยู่ในรูปแบบของ Kalman Filter ได้ดังนี้คือ

$$T_s(k) = \begin{bmatrix} P_{in}(k) & -\dot{M}_w(k) \Delta T_w(k) & -1 & T_s(k-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1(k) \\ \theta_2(k) \\ \theta_3(k) \\ \theta_4(k) \end{bmatrix} + \mathbf{v}(k) \quad (40)$$

โดยที่

$\mathbf{y}(k)$ คือ $T_s(k)$

$\mathbf{H}(k)$ คือ $\begin{bmatrix} P_{in}(k) & -\dot{M}_w(k) \Delta T_w(k) & -1 & T_s(k-1) \end{bmatrix}$

$\mathbf{x}(k)$ คือ $\boldsymbol{\theta}(k)$

$\mathbf{v}(k)$ คือ Measurement noise

จากสมการ Dynamic discrete model ของ Kalman Filter ตามสมการที่ (41) คือ

$$\mathbf{x}(k) = \mathbf{\Phi}(k-1)\mathbf{x}(k-1) + \mathbf{\Gamma}(k-1)\mathbf{u}(k-1) + \mathbf{w}(k-1) \quad (41)$$

สามารถหาสมการ Dynamic discrete model ของเตาหลอมโลหะได้ตามสมการดังนี้ คือ

$$\boldsymbol{\theta}(k) = \mathbf{\Phi}(k-1)\boldsymbol{\theta}(k-1) \quad (42)$$

ซึ่งระบบตามสมการที่ (42) จะเป็นระบบที่ไม่มี input $\mathbf{u}(k-1)$ และ process noise $\mathbf{w}(k-1)$ เพราะตัวแปรสแตตเป็นเพียงค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเตาหลอมโลหะโดยที่ $\mathbf{\Phi}(k-1)$ คือ Identity matrix ขนาด 4×4

ตารางที่ 9 สมการ Kalman filter สำหรับแบบจำลองเตาหลอมโลหะแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า

Equation Name	Equation
System dynamic model	$\boldsymbol{\theta}(k) = \mathbf{\Phi}(k-1)\boldsymbol{\theta}(k-1)$
Measurement model	$\mathbf{T}_s(k) = \mathbf{H}(k)\boldsymbol{\theta}(k) + \mathbf{v}(k)$
Initial condition	$E\{\boldsymbol{\theta}_0\} = \hat{\boldsymbol{\theta}}_0, \quad E\{\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^T\} = \mathbf{P}_0$
Independence assumption	$E\{\mathbf{w}(k)\mathbf{v}^T(j)\} = 0$
State estimate extrapolation	$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k k-1) = \mathbf{\Phi}(k-1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1 k-1)$
Error covariance extrapolation	$\mathbf{P}(k k-1) = \mathbf{\Phi}(k-1)\mathbf{P}(k-1 k-1)\mathbf{\Phi}^T(k-1)$
State estimate observational update	$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k k-1) + \mathbf{L}(k)(\mathbf{T}_s(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k k-1))$
Error covariance update	$\mathbf{P}(k k) = (\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k))\mathbf{P}(k k-1)$
Kalman gain matrix	$\mathbf{L}(k) = \mathbf{P}(k k-1)\mathbf{H}^T(k)(\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}_v)^{-1}$

จากตารางที่ 9 สามารถแบ่งขั้นตอนการออกแบบตัวประมาณ โดย Kalman Filter ได้ 3 ขั้นตอน คือ

Initialization step

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(0|0) = E\{\boldsymbol{\theta}_0\}$$

$$\mathbf{P}(0|0) = E\left\{\left(\boldsymbol{\theta}(0) - \hat{\boldsymbol{\theta}}(0|0)\right)\left(\boldsymbol{\theta}(0) - \hat{\boldsymbol{\theta}}(0|0)\right)^T\right\}$$

Prediction step

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k|k-1) = \boldsymbol{\Phi}(k-1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1|k-1)$$

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \boldsymbol{\Phi}(k-1)\mathbf{P}(k-1|k-1)\boldsymbol{\Phi}^T(k-1)$$

Update step

$$\mathbf{L}(k) = \mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k)\left(\mathbf{H}(k)\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T(k) + \mathbf{R}_v\right)^{-1}$$

$$\mathbf{P}(k|k) = (\mathbf{I} - \mathbf{L}(k)\mathbf{H}(k))\mathbf{P}(k|k-1)$$

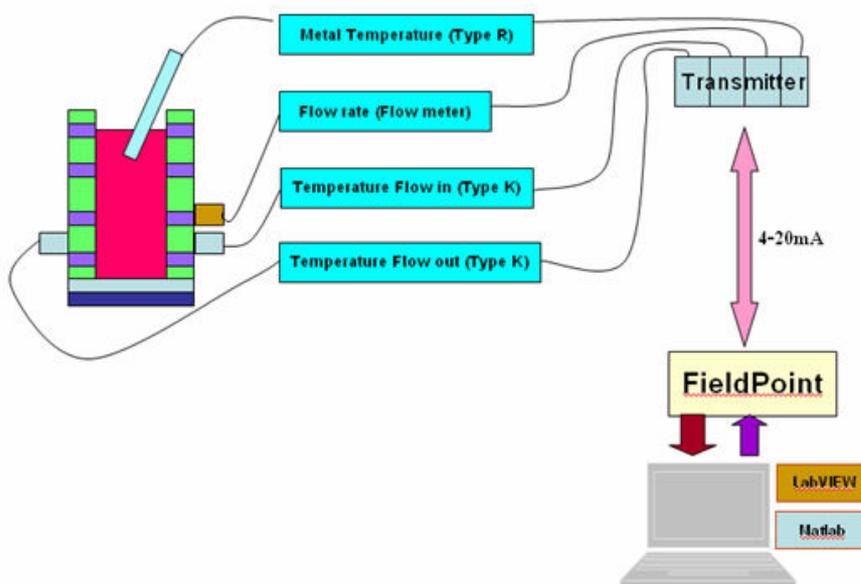
$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k|k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k|k-1) + \mathbf{L}(k)(\mathbf{T}_s(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k|k-1))$$

อุปกรณ์และวิธีการ

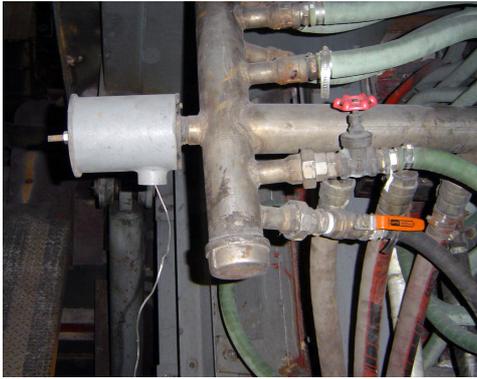
อุปกรณ์

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

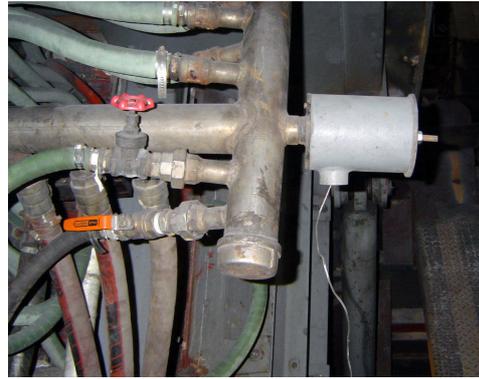
วิธีการ



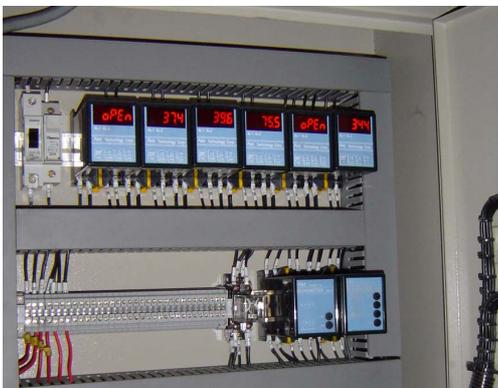
ภาพที่ 19 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการรับ-ส่งสัญญาณและแสดงผลการประมาณอุณหภูมิ



อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาเข้า



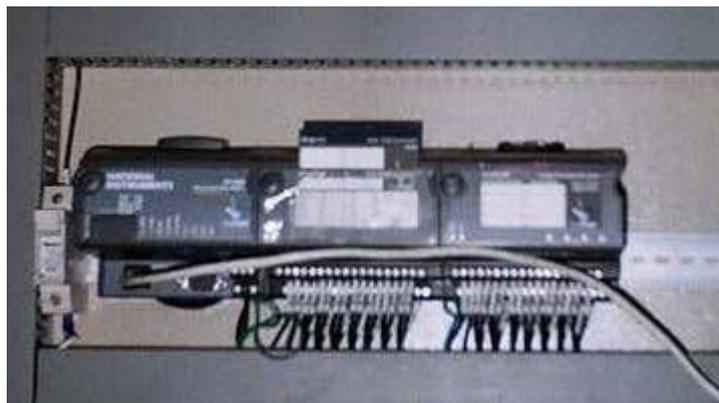
อุณหภูมิน้ำหล่อเย็นขาออก



ทรานสมิตเตอร์



มาตรวัดอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น



FieldPoint Modules

ภาพที่ 20 อุปกรณ์ที่ทำการติดตั้งในการเก็บข้อมูล

วิธีการรับและส่งสัญญาณเพื่อนำข้อมูลที่วัดได้มาทำการประมาณอุณหภูมิขั้นตอนนี้คือ

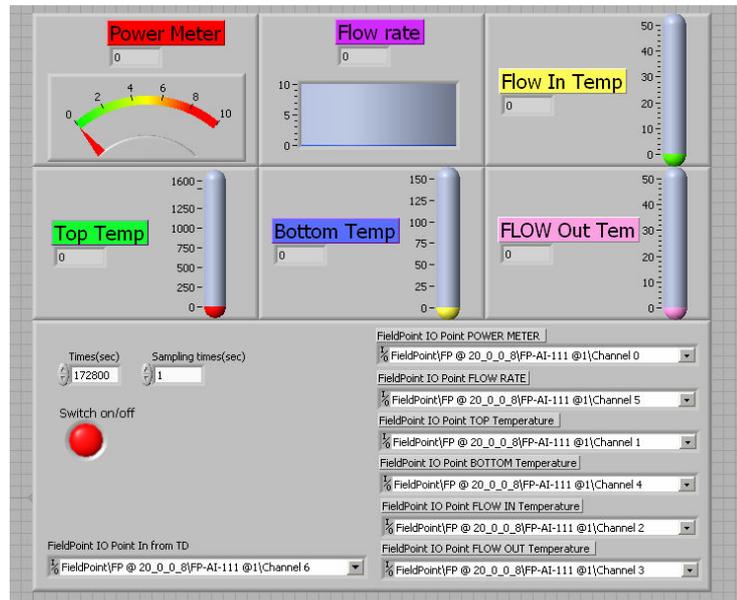
1. รับค่าอุณหภูมิของน้ำโลหะ (Thermocouples type R), ค่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (Flow meter) และอุณหภูมิขาเข้า-ออกของน้ำหล่อเย็น (Thermocouples type K) หลังจากนั้นค่าที่วัดได้จะถูกส่งสัญญาณผ่านไปยังทรานสมิตเตอร์ (Transmitter) เพื่อทำการแปลงสัญญาณเป็นกระแสไฟฟ้ามาตรฐาน (4-20mA) ส่วนค่าของพลังงานไฟฟ้าป้อนเข้าเตานั้นจะให้ค่าคงที่คือ 1100 kW (เนื่องจากจะเริ่มทำการประมาณอุณหภูมิเมื่อ โลหะหลอมละลายเป็นของเหลวแล้ว ซึ่งเป็นช่วงที่มีการจ่ายพลังงานไฟฟ้าคงที่)

2. สัญญาณหลังจากการแปลงเป็นกระแสมาตรฐาน (4-20mA) จะถูกเชื่อมต่อกับ module FP-AI-111 ซึ่งเป็น module ที่ใช้รับสัญญาณที่เป็นอนาล็อก (Analog) หลังจากนั้น module FP-2000 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม (Controller) ซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางโปรแกรม LabVIEW จะทำการส่งผ่านข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำการเก็บข้อมูลและแสดงผล

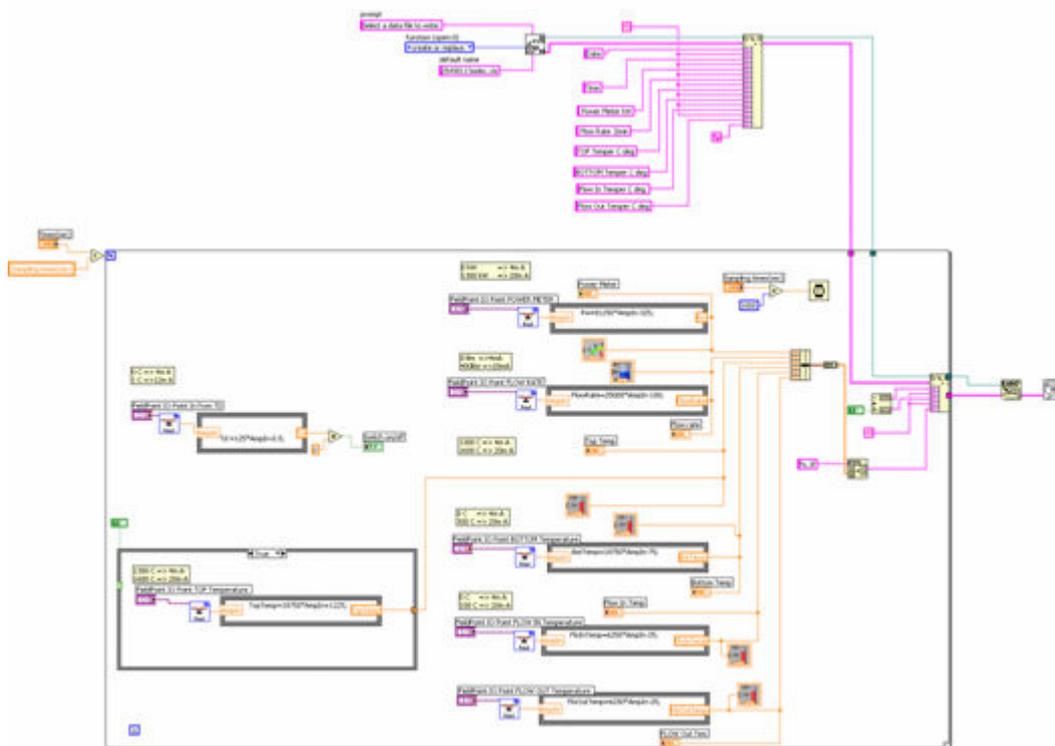
3. หลังจากโปรแกรม LabVIEW รับข้อมูลที่วัดได้จากเตาหลอมโลหะแล้วจึงนำข้อมูลที่วัดได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อทำการหาพารามิเตอร์ ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลอง คือ

3.1. แบบออฟไลน์ (Off-Line)

ในแบบ Off-Line นี้โปรแกรม LabVIEW จะถูกใช้เป็นตัวเก็บข้อมูลที่วัดได้จากการวัดตั้งแต่เริ่มทำการหลอมจนกระทั่งสิ้นสุดการหลอมในรอบนั้นแล้วจึงนำข้อมูลที่ได้นำมาหาค่าพารามิเตอร์ ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะด้วยวิธี Kalman Filter โดยใช้โปรแกรม Matlab



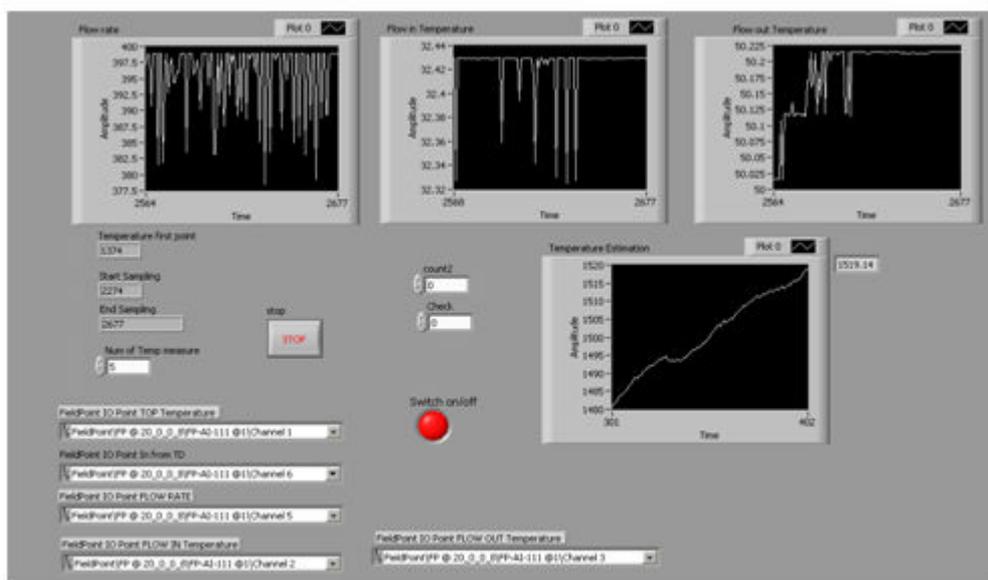
ภาพที่ 21 Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW ในการเก็บข้อมูล



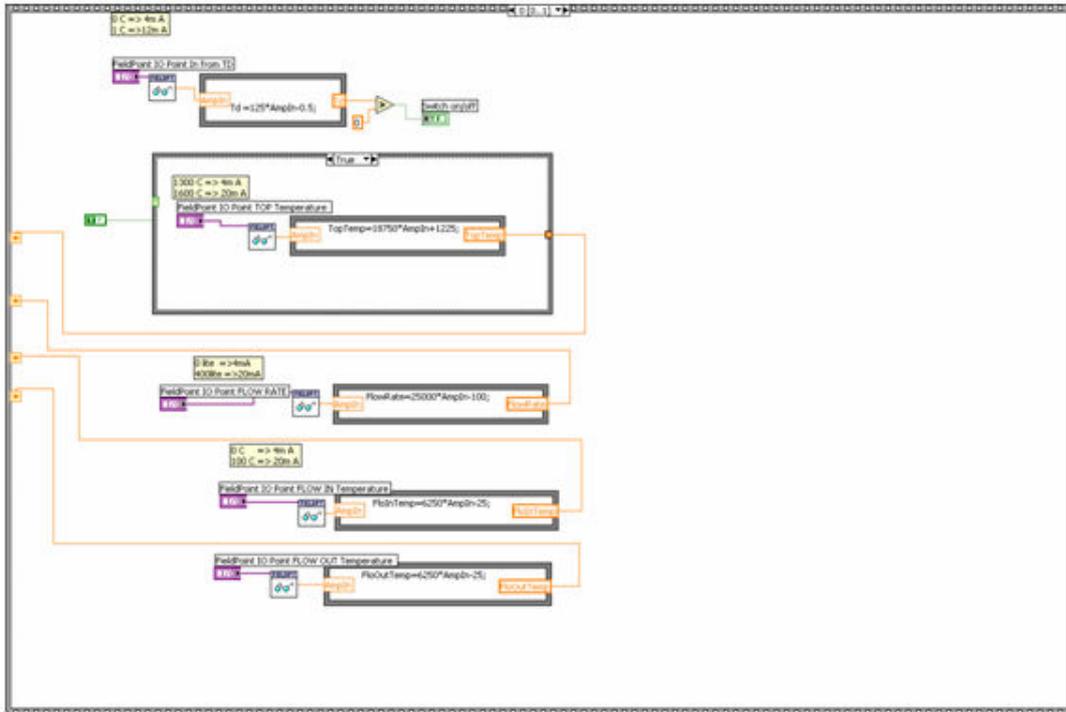
ภาพที่ 22 Block diagram ของโปรแกรม LabVIEW ในการเก็บข้อมูล

3.1 แบบออนไลน์ (On-Line)

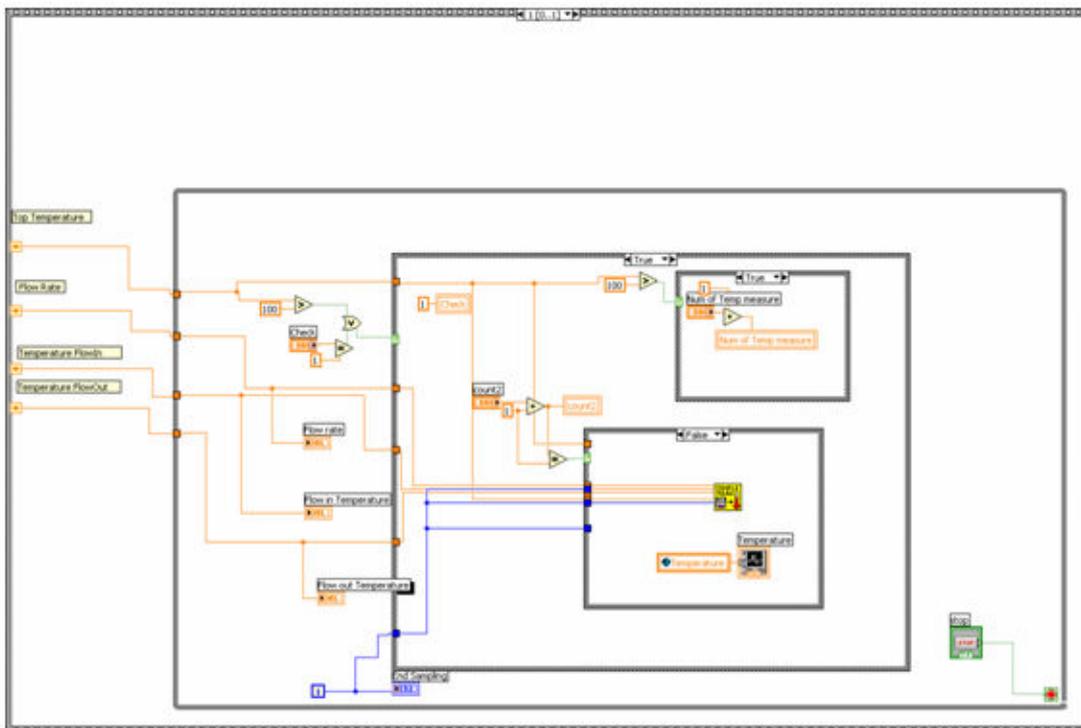
ในแบบ On-Line นั้นการประมาณอุณหภูมิจะเริ่มขึ้นทันทีเมื่อตรวจพบการจุ่มวัดน้ำโลหะในครั้งแรกและจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ทันทีเมื่อพบจุดการวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะในจุดถัดไป โดยโปรแกรม LabVIEW จะถูกนำมาใช้เป็นตัวเก็บข้อมูลและสร้างแบบจำลองของเตาหลอมโลหะแล้วนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าพารามิเตอร์ ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$) เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะด้วยวิธี Kalman Filter ดังภาพที่ 23, 24 และ 25



ภาพที่ 23 Front Panel ของ โปรแกรม LabVIEW แบบ Online



ภาพที่ 24 Block diagram ในส่วนของการรับข้อมูลจาก FieldPoint



ภาพที่ 25 Block diagram ในส่วนของ Kalman Filter เพื่อประมาณอุณหภูมิแบบ On-Line

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลอง

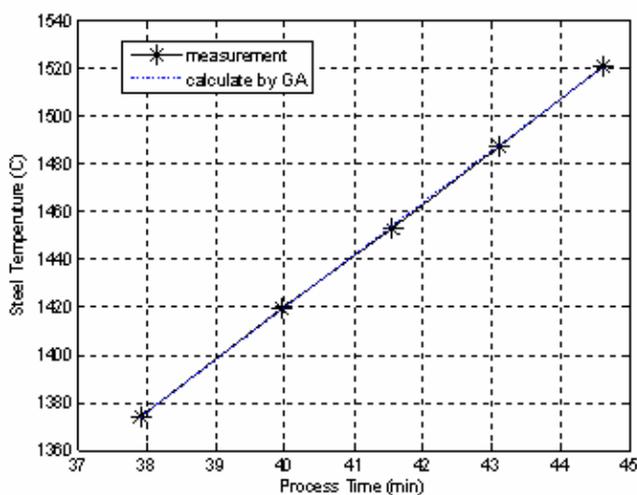
งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะได้ตามตารางดังนี้ คือ

ตารางที่ 10 แบบการทดลองการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะ

การทดลอง	วิธีการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะ	
	Genetic Algorithm (GA)	Kalman Filter
การทดลองที่ 1 (Off-Line)	ใช้วิธี GA ในการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะในการหลอมแต่ละรอบ	สมมติให้อุณหภูมิที่ประมาณด้วย GA เป็นอุณหภูมิที่วัดได้จริงแล้วใช้ Kalman Filter ปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อประมาณอุณหภูมิน้ำโลหะด้วยค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นใดๆ
การทดลองที่ 2 (Off-Line)		ใช้อุณหภูมิที่วัดได้จริงที่เป็นแบบไม่ต่อเนื่องในการทดลองและสร้างเงื่อนไขการปรับค่าพารามิเตอร์เมื่อจุดวัดอุณหภูมิไม่ต่อเนื่อง
การทดลองที่ 3 (On-Line)	นำค่าพารามิเตอร์ที่หาได้ด้วยวิธี GA ในการหลอมโลหะรอบก่อนหน้า มาใช้	ใช้วิธีการเหมือนการทดลองที่ 2 แต่จะทำการแสดงผลการประมาณอุณหภูมิทันทีเมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์
การทดลองที่ 4 (On-Line)	ประมาณอุณหภูมิตลอดการหลอมในรอบถัดไป	นำค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จาก GA ในการหลอมรอบที่ 1 เป็นค่าเริ่มต้นในการหลอมทุกรอบและใช้ Kalman Filter ร่วมกับวิธีการประมาณเชิงเส้นในการปรับค่าพารามิเตอร์
การทดลองที่ 5 (On-Line)		ใช้วิธีเดียวกับการทดลองที่ 4 แต่กำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการหลอมรอบที่ 1 เป็นศูนย์ และใช้ Kalman Filter ปรับค่าพารามิเตอร์ โดยจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากรอบก่อนหน้ามาเป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นเพื่อทำการปรับในรอบถัดไป

การทดลองที่ 1

พิจารณาสมการ $\hat{\theta}(k|k) = \hat{\theta}(k|k-1) + L(k)(T_s(k) - H(k)\hat{\theta}(k|k-1))$ ซึ่งเป็นสมการในการปรับค่าพารามิเตอร์ของ Kalman Filter แสดงให้เห็นว่าจุดที่ทำการวัดน้ำโลหะที่ปากเตา ($T_s(k)$) ต้องเป็นจุดที่ต่อเนื่องกันทุกจุดเพื่อที่จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ ($\hat{\theta}(k|k)$) ให้เป็นไปอย่างต่อเนื่องได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว อุณหภูมิน้ำโลหะที่ปากเตาไม่สามารถวัดได้อย่างต่อเนื่อง (วัดได้เพียงบางจุด) ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมามีพบว่าวิธี Genetic Algorithm สามารถใช้ประมาณอุณหภูมิแบบ Off-Line ได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่วัดได้จริงมากดังแสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 การประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะโดยวิธี GA ในการหลอมโลหะรอบแรก

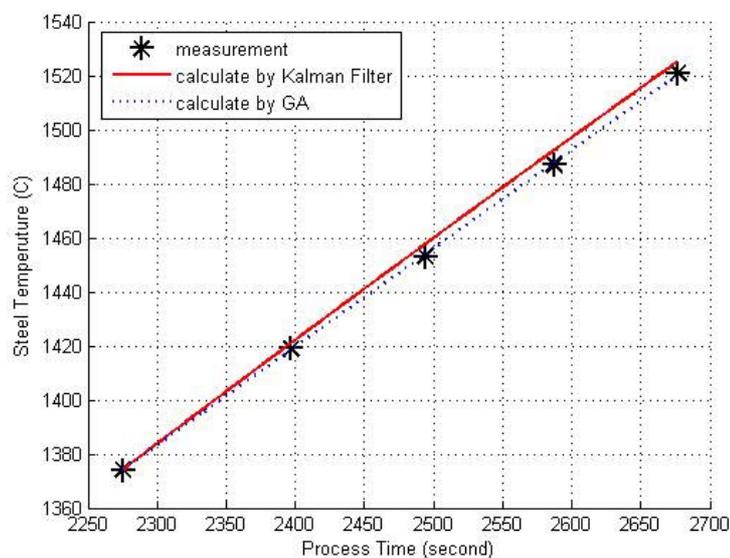
ดังนั้นในการทดลองที่ 1 จะสมมุติให้อุณหภูมิของน้ำโลหะที่ประมาณได้จากวิธี Genetic Algorithm ในการหลอมแต่ละรอบเป็นอุณหภูมิของน้ำโลหะที่ปากเตา ($T_s(k)$) ที่สามารถวัดได้อย่างต่อเนื่องหลังจากนั้นใช้วิธีการของ Kalman Filter ในการหาค่าพารามิเตอร์ ($\hat{\theta}(k)$) เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะด้วย Initial condition ของพารามิเตอร์ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ที่มีค่าต่างๆ กัน และมีผลลัพธ์ดังนี้

การหลอมโลหะรอบที่ 1

ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่หาได้คือ $\theta_1 = 0.0007, \theta_2 = 0.0017, \theta_3 = 0.0915$

ตารางที่ 11 ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 1

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,	k=5,
เวลา(sec)	2275s	2397s	2494s	2587s	2677s
อุณหภูมิที่ทำการวัดจริง ($^{\circ}\text{C}$)	1374.0	1419.0	1453.0	1487.0	1521.0
อุณหภูมิจากการประมาณด้วย GA ($^{\circ}\text{C}$)	1374.0	1418.0	1453.4	1487.7	1520.5
อุณหภูมิจากการประมาณด้วย Kalman Filter ($^{\circ}\text{C}$)	1374.0	1420.7	1457.3	1491.9	1525.0



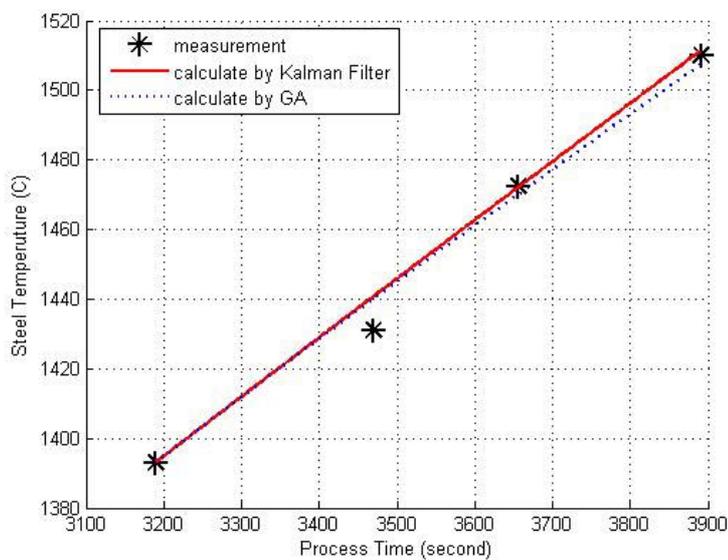
ภาพที่ 27 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 1

การหลอมโลหะรอบที่ 2

ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่หาได้ คือ $\theta_1 = 0.0003$, $\theta_2 = 0.0012$, $\theta_3 = 0.0915$

ตารางที่ 12 ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1, 3190s	k=2, 3470s	k=3, 3656s	k=4, 3890s
อุณหภูมิที่ทำกรวัดจริง ($^{\circ}C$)	1393.1	1431.1	1472.5	1510.0
อุณหภูมิจากการประมาณด้วย GA ($^{\circ}C$)	1393.1	1440.0	1470.0	1507.5
อุณหภูมิจากการประมาณด้วย Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1393.1	1440.8	1472.1	1511.4



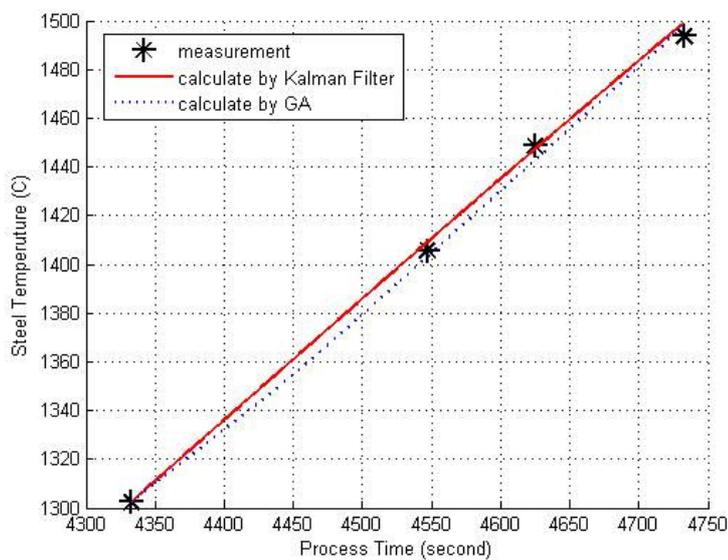
ภาพที่ 28 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2

การหลอมโลหะรอบที่ 3

ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่หาได้ คือ $\theta_1 = 0.0008, \theta_2 = 0.0001, \theta_3 = 0.0915$

ตารางที่ 13 ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	4333s	4547s	4626s	4732s
อุณหภูมิที่ทำกรวัดจริง ($^{\circ}C$)	1302.5	1405.5	1448.6	1493.7
อุณหภูมิจากการประมาณด้วยGA ($^{\circ}C$)	1302.5	1403.1	1442.8	1497.7
อุณหภูมิจากการประมาณด้วย Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1302.5	1409.1	1447.3	1498.3



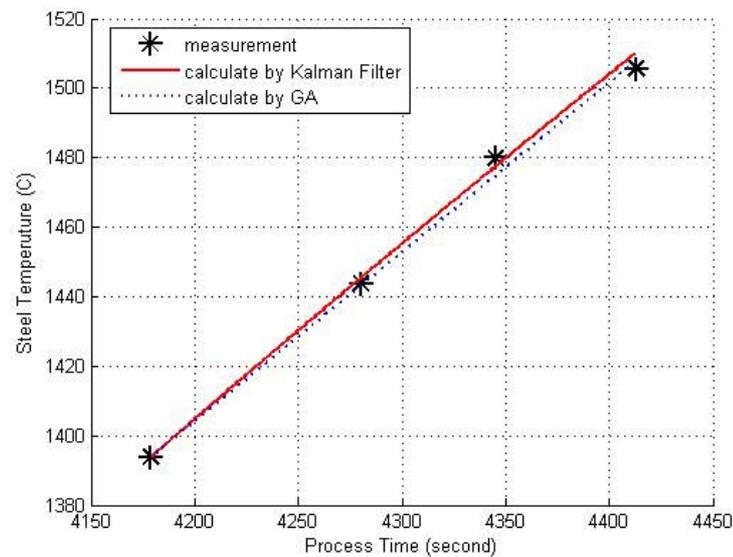
ภาพที่ 29 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3

การหลอมโลหะรอบที่ 4

ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่หาได้ คือ $\theta_1 = 0.0010$ $\theta_2 = 0.0008$, $\theta_3 = 0.0915$

ตารางที่ 14 ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
อุณหภูมิที่ทำการวัดจริง ($^{\circ}\text{C}$)	1393.8	1443.7	1480.0	1505.6
อุณหภูมิจากการประมาณด้วย GA ($^{\circ}\text{C}$)	1393.8	1443.0	1474.6	1507.8
อุณหภูมิจากการประมาณด้วย Kalman Filter ($^{\circ}\text{C}$)	1393.8	1445.2	1477.3	1510.1



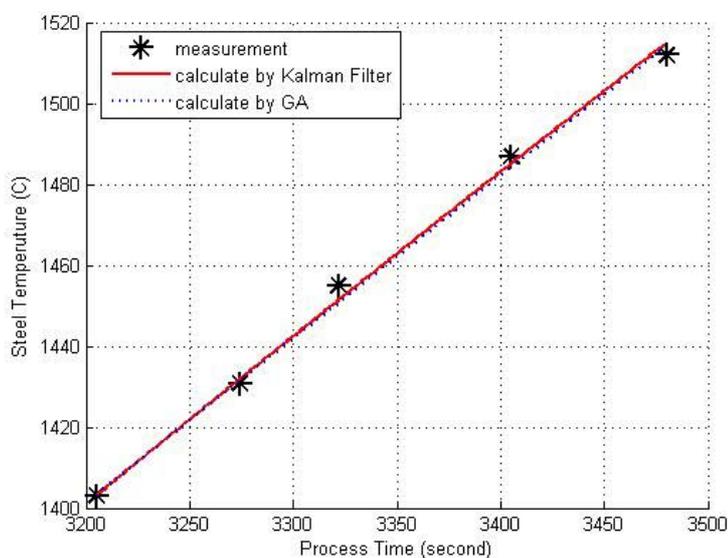
ภาพที่ 30 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4

การหลอมโลหะรอบที่ 5

ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่หาได้คือ $\theta_1 = 0.0008$, $\theta_2 = 0.0012$, $\theta_3 = 0.0915$

ตารางที่ 15 ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่ เวลา(sec)	k=1, 3205s	k=2, 3274s	k=3, 3322s	k=4, 3405s	k=5, 3480s
อุณหภูมิที่ทำการวัดจริง ($^{\circ}C$)	1403.2	1430.8	1454.9	1503.2	1512.0
อุณหภูมิจากการประมาณด้วย GA ($^{\circ}C$)	1403.2	1431.3	1450.6	1484.1	1514.0
อุณหภูมิจากการประมาณด้วย Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1403.2	1431.7	1451.4	1485.0	1514.8



ภาพที่ 31 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5

จากผลการหลอมแต่ละรอบในการทดลองที่ 1 พบว่า Kalman Filter จะใช้เวลาในการหาค่าพารามิเตอร์และประมาณอุณหภูมิน้อยกว่าวิธี GA มาก (Kalman Filter ใช้เวลาน้อยกว่า 5 วินาที, GA ใช้เวลามากกว่า 6 นาที ในการหาค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิ)

การทดลองที่ 2

จากการทดลองที่ 1 นั้นจะสมมติให้จุดที่ทำการจุ่มวัดจริงของอุณหภูมิของน้ำโลหะที่ปากเตาต่อเนื่องกันทุกจุดหลังจากนั้นจึงใช้ Kalman Filter ในการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะเตา แต่ในการปฏิบัติงานจริงแล้วการจุ่มวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะที่ปากเตาหลอมนั้นไม่สามารถทำการวัดต่อเนื่องกันได้ทุกจุด ดังนั้นในการทดลองที่ 2 นี้จะใช้จุดที่ทำการจุ่มวัดจริงซึ่งวัดแบบไม่ต่อเนื่องในการทดลอง และจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้ในการหลอมรอบแรกด้วยวิธี GA ($\theta_1 = 0.0007, \theta_2 = 0.0017, \theta_3 = 0.0915$) เป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในทุกรอบการหลอมและใช้ Kalman Filter ในการปรับค่าพารามิเตอร์หลังจากนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์ ณ จุดสุดท้ายนำมาใช้ประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะในการหลอมรอบนั้น

จากสมการ $\hat{\theta}(k|k) = \hat{\theta}(k|k-1) + \mathbf{L}(k)(\mathbf{T}_s(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\theta}(k|k-1))$ ซึ่งเป็นสมการในการปรับค่าพารามิเตอร์ เราจะทำการกำหนดเงื่อนไขในการปรับค่าพารามิเตอร์ดังนี้คือ

1. เมื่อพบการจุ่มวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะ ($\mathbf{T}_s(k) = \mathbf{T}_{measure}(k)$) ที่เวลา k จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ตามสมการดังนี้คือ

$$\hat{\theta}(k|k) = \hat{\theta}(k|k-1) + \mathbf{L}(k)(\mathbf{T}_{measure}(k) - \mathbf{H}(k)\hat{\theta}(k|k-1)) \quad (43)$$

2. เมื่อไม่พบการจุ่มวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะที่เวลา k จะไม่ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้คือ

$$\hat{\theta}(k|k) = \hat{\theta}(k|k-1) \quad (44)$$

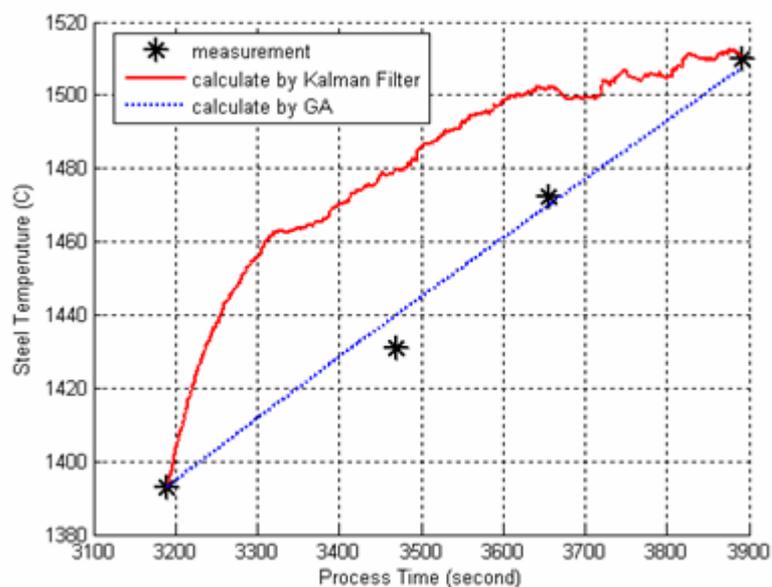
ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากการประมาณด้วยวิธี Kalman Filter ที่มีการกำหนดเงื่อนไขในการปรับค่าพารามิเตอร์กับการประมาณด้วยวิธี GA ในการหลอมโลหะแต่ละรอบได้ผลการทดลองดังนี้คือ

การหลอมโลหะรอบที่ 2

ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่หาได้ คือ $\theta_1 = 0.0207, \theta_2 = -0.1072, \theta_3 = 0.0915$

ตารางที่ 16 ค่าของอุณหภูมินำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	3190s	3470s	3656s	3890s
อุณหภูมิที่ทำกรวัดจริง ($^{\circ}\text{C}$)	1393.1	1431.1	1472.5	1510.0
อุณหภูมิจากการประมาณด้วยGA ($^{\circ}\text{C}$)	1393.1	1440.0	1470.0	1507.5
อุณหภูมิจากการประมาณด้วย Kalman Filter ($^{\circ}\text{C}$)	1393.1	1479.3	1501.9	1512.8



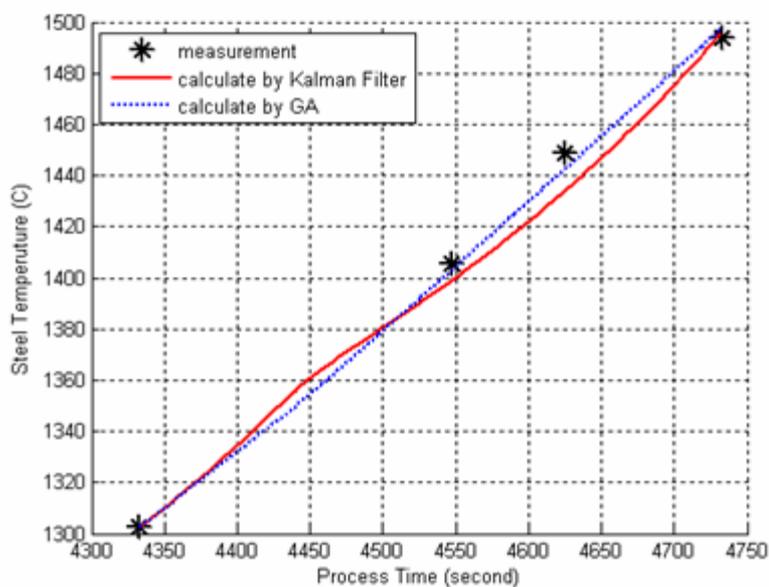
ภาพที่ 32 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2

การหลอมโลหะรอบที่ 3

ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่หาได้ คือ $\theta_1 = -0.0030$, $\theta_2 = -0.0036$, $\theta_3 = 0.0915$

ตารางที่ 17 ค่าของอุณหภูมินำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	4333s	4547s	4626s	4732s
อุณหภูมิที่ทำกรวัดจริง ($^{\circ}\text{C}$)	1302.5	1405.5	1448.6	1493.7
อุณหภูมิจากการประมาณด้วยGA ($^{\circ}\text{C}$)	1302.5	1403.1	1442.8	1497.7
อุณหภูมิจากการประมาณด้วย Kalman Filter ($^{\circ}\text{C}$)	1302.5	1398.9	1434.1	1497.9



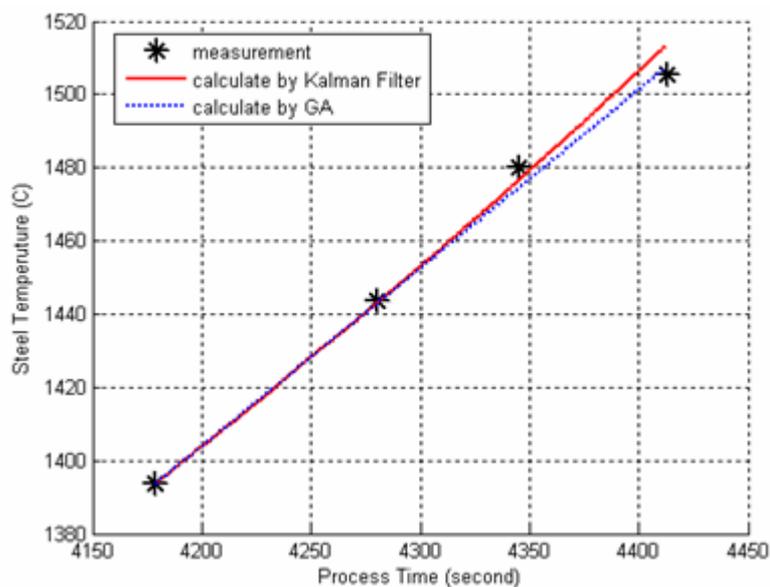
ภาพที่ 33 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3

การหลอมโลหะรอบที่ 4

ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่หาได้ คือ $\theta_1 = 0.0009$, $\theta_2 = 0.0321$, $\theta_3 = 0.0915$

ตารางที่ 18 ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
อุณหภูมิที่ทำกรวัดจริง ($^{\circ}\text{C}$)	1393.8	1443.7	1480.0	1505.6
GA ($^{\circ}\text{C}$)	1393.8	1443.0	1474.6	1507.8
Kalman Filter ($^{\circ}\text{C}$)	1393.8	1443.1	1476.7	1513.8



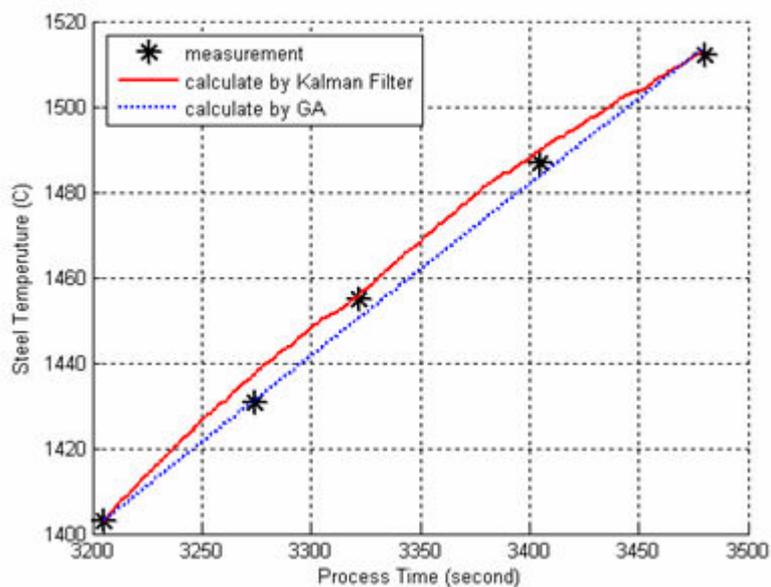
ภาพที่ 34 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4

การหลอมโลหะรอบที่ 5

ค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่หาได้คือ $\theta_1 = 0.0038, \theta_2 = 0.0516, \theta_3 = 0.0915$

ตารางที่ 19 ค่าของอุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,	k=5,
เวลา(sec)	3205s	3274s	3322s	3405s	3480s
อุณหภูมิที่ทำการวัดจริง ($^{\circ}\text{C}$)	1403.2	1430.8	1454.9	1503.2	1512.0
GA ($^{\circ}\text{C}$)	1403.2	1431.3	1450.6	1484.1	1514.0
Kalman Filter ($^{\circ}\text{C}$)	1403.2	1437.5	1455.9	1490.0	1514.8



ภาพที่ 35 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5

การทดลองที่ 3

จากการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 ที่ผ่านมานั้นเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเตาหลอมโลหะและทำการอนุมานน้ำโลหะแบบ Off-Line ซึ่งในการปฏิบัติงานจริงของกระบวนการหลอมโลหะนั้นต้องการการประมาณอุณหภูมิแบบ On-Line ดังนั้นในการทดลองที่ 3 นี้จะทำการหาค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเตาหลอมโลหะและทำการอนุมานน้ำโลหะด้วยวิธี Kalman Filter แบบ On-Line โดยใช้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นด้วยวิธี GA จากการหลอมรอบแรกตามการทดลองที่ 1 และมีจุดที่ทำการจุ่มวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งมีข้อกำหนดในการปรับค่าพารามิเตอร์นั้นจะเป็นไปตามสมการที่ (43) และ (44) เช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 แต่ในการทดลองนี้เป็นแบบ On-Line ดังนั้นการแสดงผลของการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะจะเกิดขึ้นทันทีเมื่อพบจุดวัดอุณหภูมิในครั้งแรกและค่าพารามิเตอร์จะถูกปรับเพื่อแสดงผลของการประมาณอุณหภูมิเมื่อพบจุดวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะในจุดถัดไป

ในส่วนของวิธี GA นั้นเนื่องจากวิธี GA ไม่สามารถทำการประมาณอุณหภูมิแบบ On-Line ได้เพราะต้องใช้เวลาในการคัดเลือกค่าพารามิเตอร์ที่จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างอุณหภูมิที่วัดกับที่ประมาณได้ให้มีค่าน้อยที่สุด ทำให้ไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้ทันเวลาเมื่อพบจุดจุ่มวัดอุณหภูมิจริงของน้ำโลหะ ดังนั้นวิธีการประมาณอุณหภูมิด้วย GA ในการทดลองนี้จึงใช้วิธีการนำค่าพารามิเตอร์ที่หาได้ในการหลอมรอบแรกมาเป็นค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิตลอดการหลอมรอบที่ 2 และเมื่อการหลอมรอบที่ 2 เสร็จ จึงใช้ GA หาค่าพารามิเตอร์ของการหลอมรอบที่ 2 เพื่อนำเป็นค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิตลอดการหลอมรอบที่ 3 ทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ทุกการหลอมแต่ละรอบ

ทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิจากการประมาณด้วยวิธี Kalman Filter แบบ On-Line กับการประมาณด้วยวิธี GA ในการหลอมโลหะแต่ละรอบได้ผลการทดลองดังนี้คือ

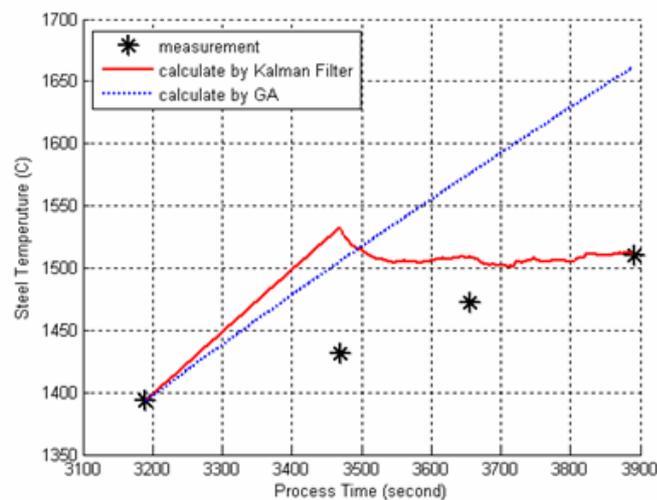
การหลอมโลหะรอบที่ 2

ตารางที่ 20 พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 2

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	3190s	3470s	3656s	3890s
θ_1	0.0007	0.0189	0.0206	0.0207
θ_2	0.0017	-0.1159	-0.1079	-0.1072
θ_3	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915

ตารางที่ 21 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	3190s	3470s	3656s	3890s
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	1393.1	1431.1	1472.5	1510.0
GA ($^{\circ}C$)	1393.1	1505.8	1570.6	1661.9
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1393.1	1531.3	1508.9	1514.9



ภาพที่ 36 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2

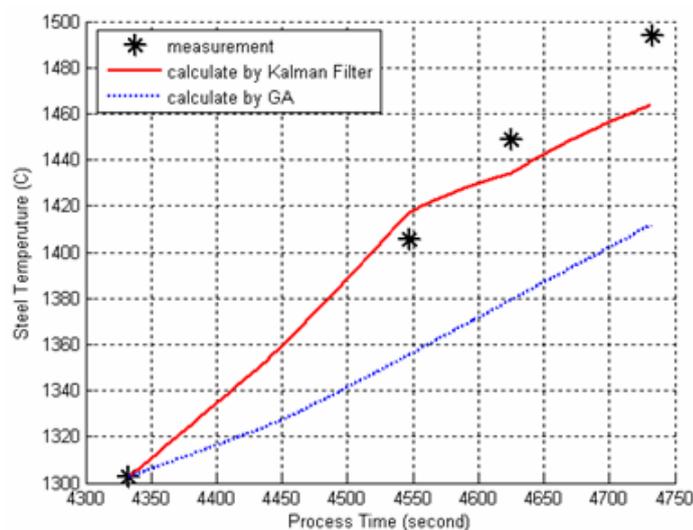
การหลอมโลหะรอบที่ 3

ตารางที่ 22 พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 3

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	4333s	4547s	4626s	4732s
θ_1	0.0007	0.0118	0.0062	-0.0030
θ_2	0.0017	0.0075	0.0042	-0.0036
θ_3	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915

ตารางที่ 23 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	4333s	4547s	4626s	4732s
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	1302.5	1405.5	1448.6	1493.7
GA ($^{\circ}C$)	1302.5	1355.7	1379.3	1412.2
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1302.5	1417.0	1434.2	1464.2



ภาพที่ 37 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3

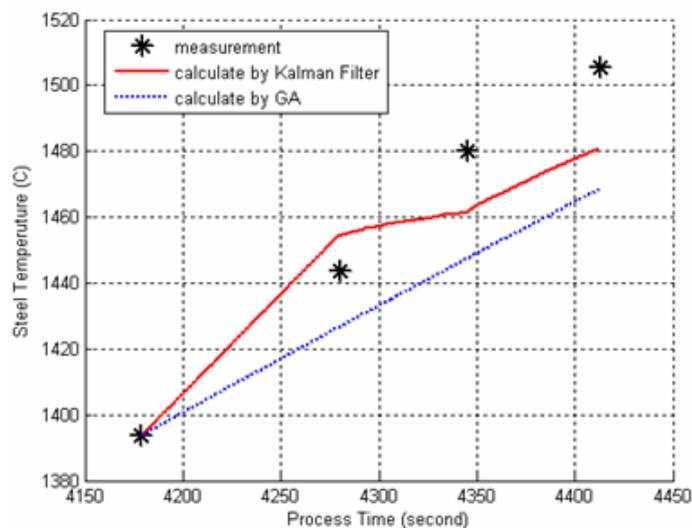
การหลอมโลหะรอบที่ 4

ตารางที่ 24 พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 4

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	4179s	4280s	4345s	4413s
θ_1	0.0007	0.0127	0.0094	0.0009
θ_2	0.0017	-0.0619	0.0490	0.0325
θ_3	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915

ตารางที่ 25 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	4179s	4280s	4345s	4413s
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	1393.8	1443.7	1480.0	1505.6
GA ($^{\circ}C$)	1393.8	1426.8	1447.5	1468.8
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1393.8	1454.4	1461.8	1481.1



ภาพที่ 38 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4

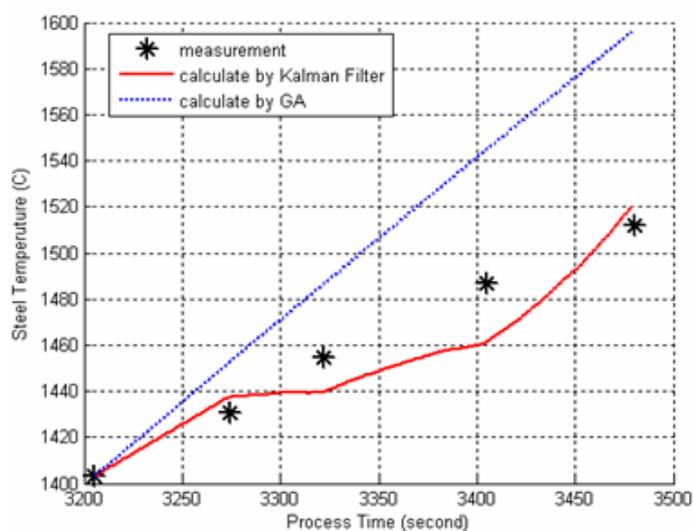
การหลอมโลหะรอบที่ 5

ตารางที่ 26 พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 5

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,	k=5,
	3205s	3274s	3322s	3405s	3480s
θ_1	0.0007	0.0220	0.00760	0.0084	0.0041
θ_2	0.0017	0.0319	0.0420	0.0312	0.0184
θ_3	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915

ตารางที่ 27 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่ เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,	k=5,
	3205s	3274s	3322s	3405s	3480s
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	0.0007	0.0220	0.00760	0.0084	0.0041
GA ($^{\circ}C$)	0.0017	0.0319	0.0420	0.0312	0.0184
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915



ภาพที่ 39 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5

การทดลองที่ 4

จากการทดลองที่ผ่านมาจะพบว่าค่าพารามิเตอร์จะถูกปรับค่าก็ต่อเมื่อพบจุดวัดอุณหภูมิจริง ซึ่งมีจำนวนจุดที่ค่อนข้างน้อยทำให้การประมาณอุณหภูมิยังไม่แม่นยำเท่าที่ควร ทำให้การทดลองที่ 4 นั้นได้ทำการสร้างเงื่อนไขเพิ่มขึ้นมาจากการทดลองที่ 3 โดยเมื่อพิจารณาจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของน้ำโลหะจากการทดลองที่ผ่านมาจะสังเกตว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปตามเวลาจะเพิ่มขึ้นค่อนข้างจะเป็นเส้นตรงดังนั้นเราจึงสร้างเงื่อนไขโดยทำการสร้างสมการเส้นตรงเมื่อพบการจุ่มวัดจริงของอุณหภูมิน้ำโลหะเพื่อทำให้การปรับค่าพารามิเตอร์ในการประมาณอุณหภูมิตมีความละเอียดและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีขั้นตอนการประมาณอุณหภูมิดังนี้คือ

1. การประมาณอุณหภูมิจะเริ่มขึ้นเมื่อพบการจุ่มวัดของน้ำโลหะครั้งแรก $T_{measure}(k, i)$ (k = เวลาในการหลอม, i = ลำดับครั้งที่วัดอุณหภูมิ) ที่เวลาคือ $samplingtime(k, i)$ หลังจากนั้นอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณจะเปลี่ยนไปตามค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น ($\theta_1 = 0.0007, \theta_2 = 0.0017, \theta_3 = 0.0915$)
2. เมื่อพบการจุ่มวัดจุดถัดไป ($T_{measure}(k+1, i+1)$) ให้ทำการสร้างสมการกราฟเส้นตรงที่จำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ คือ

$$T_{s_sim}(k+1) = Slope.(k+1 - update_samplingtime) + update_T_{measure}$$

โดยที่

$update_samplingtime = samplingtime(k+1, i+1)$ หรือเวลาที่พบการวัดอุณหภูมิจริงครั้งล่าสุด

$update_T_{measure} = T_{measure}(k+1, i+1)$ หรืออุณหภูมิที่วัดได้จริงที่เวลาล่าสุด

$$Slope = \left(\frac{T_{measure}(k+1, i+1) - T_{measure}(k, i)}{samplingtime(k+1, i+1) - samplingtime(k, i)} \right)$$

หลังจากนั้นทำการหาผลต่างระหว่างอนุภูมิที่ประมาณได้กับอนุภูมิที่จำลองจากสมการเส้นตรง $(\mathbf{T}_{s_est} - \mathbf{T}_{s_sim})$ โดยถ้าผลต่างมากกว่า limit ที่กำหนดไว้ (ในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ 0.5 องศาเซลเซียส) ให้ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ตามสมการ ดังนี้

$$\hat{\theta}(k+1|k+1) = \hat{\theta}(k+1|k) + \mathbf{L}(k)(\mathbf{T}_{s_sim}(k+1) - \mathbf{H}(k+1)\hat{\theta}(k+1|k))$$

แต่ถ้าผลต่างน้อยกว่า limit ที่กำหนดไว้จะไม่ทำการปรับค่าพารามิเตอร์และเมื่อพบจุดวัดอนุภูมิจริง ณ จุดถัดไป ก็จะทำการสร้างสมการเส้นตรงและทำการปรับค่าพารามิเตอร์ตามขั้นตอนที่ 2

เนื่องด้วยการทดลองที่ 4 นี้เป็นการประมาณอนุภูมิของน้ำโลหะแบบ On-Line ดังนั้นการประมาณอนุภูมิของน้ำโลหะด้วยวิธี GA จะมีขั้นตอนเหมือนกับการทดลองที่ 3 ที่ได้กล่าวมาแล้วคือ ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธี GA ในการหลอมรอบก่อนหน้ามาใช้ประมาณอนุภูมิของน้ำโลหะในรอบถัดไปโดยไม่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ตลอดการหลอมรอบนั้น

ทำการเปรียบอนุภูมิจากการประมาณด้วยวิธี Kalman Filter แบบ On-Line กับการประมาณด้วยวิธี GA ในการหลอมโลหะแต่ละรอบได้ผลการทดลองดังนี้คือ

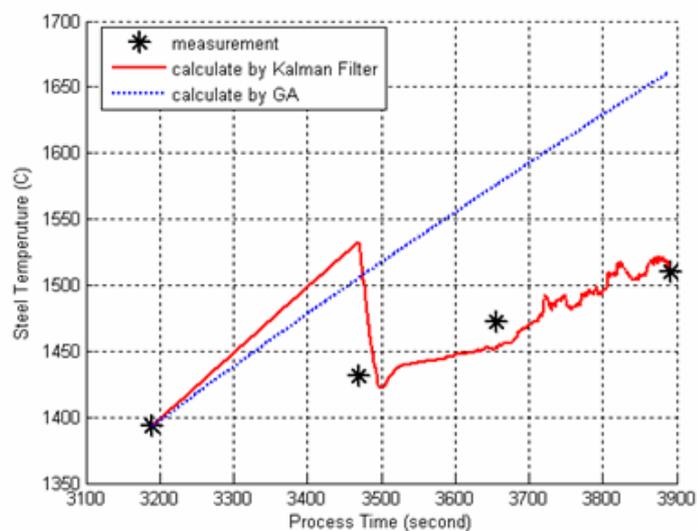
การหลอมโลหะรอบที่ 2

ตารางที่ 28 พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 2

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	3190s	3470s	3656s	3890s
θ_1	0.0007	0.0189	0.1440	0.0649
θ_2	0.0017	-0.1159	-0.1136	-0.4966
θ_3	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915

ตารางที่ 29 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	3190s	3470s	3656s	3890s
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	1393.1	1431.1	1472.5	1510.0
GA ($^{\circ}C$)	1393.1	1505.8	1576.0	1661.9
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1393.1	1531.3	1453.2	1513.1



ภาพที่ 40 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2

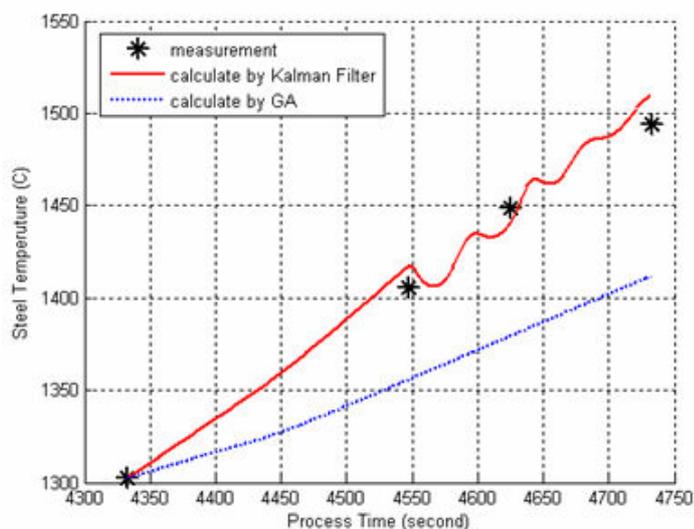
การหลอมโลหะรอบที่ 3

ตารางที่ 30 พารามิเตอร์ที่ประมาณ โดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 3

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	4333s	4547s	4626s	4732s
θ_1	0.0007	0.0118	0.0026	0.0109
θ_2	0.0017	0.0075	0.0060	0.0133
θ_3	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915

ตารางที่ 31 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	4333s	4547s	4626s	4732s
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	1302.5	1405.5	1448.6	1493.7
GA ($^{\circ}C$)	1302.5	1355.7	1379.3	1412.2
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1302.5	1417.0	1444.9	1510.7



ภาพที่ 41 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3

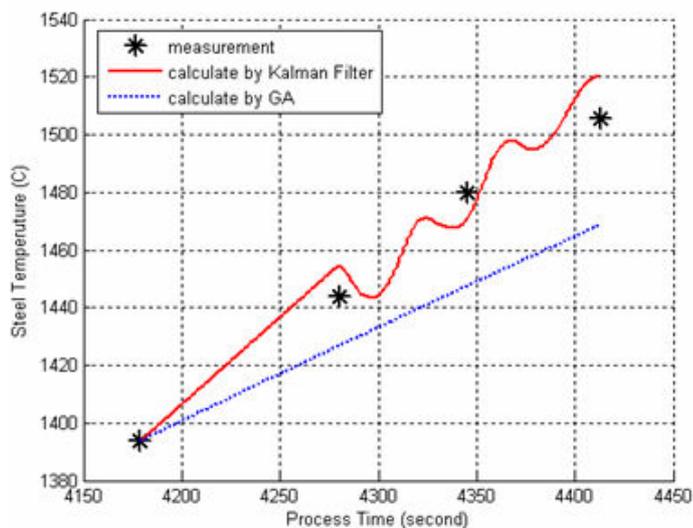
การหลอมโลหะรอบที่ 4

ตารางที่ 32 พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 4

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
θ_1	0.0007	0.0127	0.0004	0.0140
θ_2	0.0017	-0.0619	-0.1026	0.0740
θ_3	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915

ตารางที่ 33 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	1393.8	1443.7	1480.0	1505.6
GA ($^{\circ}C$)	1393.8	1426.8	1447.5	1468.8
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1393.8	1454.4	1470.9	1519.1



ภาพที่ 42 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4

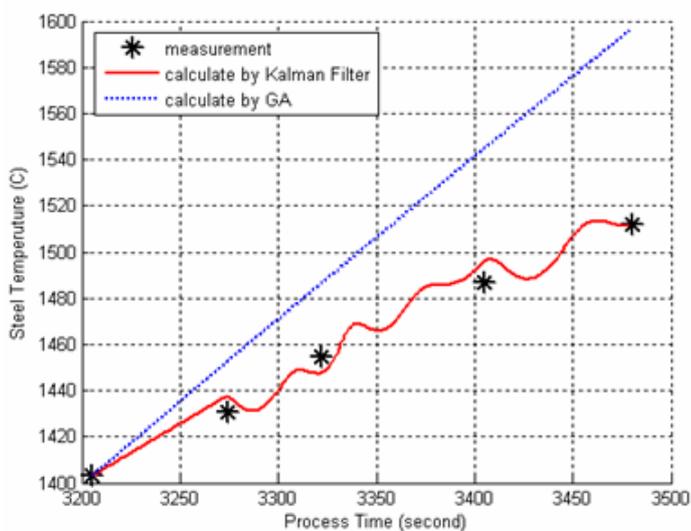
การหลอมโลหะรอบที่ 5

ตารางที่ 34 พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 5

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่ เวลา(sec)	k=1, 3205s	k=2, 3274s	k=3, 3322s	k=4, 3405s	k=5, 3480s
θ_1	0.0007	0.0220	0.0272	0.0049	0.0170
θ_2	0.0017	0.0319	-0.0002	-0.0092	-0.0330
θ_3	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915	0.0915

ตารางที่ 35 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่ เวลา(sec)	k=1, 3205s	k=2, 3274s	k=3, 3322s	k=4, 3405s	k=5, 3480s
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	1403.2	1430.8	1454.9	1503.2	1512.0
GA ($^{\circ}C$)	1403.2	1452.7	1486.7	1545.1	1596.9
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1403.2	1437.3	1447.6	1496.1	1511.4



ภาพที่ 43 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5

การทดลองที่ 5

ในการทดลองที่ 1-4 ที่ผ่านมานั้นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในวิธีการประมาณอนุกรมของน้ำโลหะด้วย Kalman Filter นั้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธี GA ในการหลอมรอบแรกเป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการประมาณอนุกรมด้วย Kalman Filter ในการหลอมรอบถัดไป ซึ่งในการทดลองที่ 5 นี้จะใช้วิธีการปรับค่าพารามิเตอร์เช่นเดียวกับการทดลองที่ 4 ซึ่งเป็นแบบ On-Line แต่จะไม่ใช้ค่าพารามิเตอร์จากวิธี GA เป็นค่าเริ่มต้นในการประมาณอนุกรมในการหลอมโลหะ

การทดลองนี้จะกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการหลอมรอบแรกเป็นศูนย์ ($\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0$) แล้วใช้วิธี Kalman Filter หาค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการประมาณอนุกรมของน้ำโลหะในรอบแรก จากนั้นจะนำค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่คำนวณได้จากการหลอมรอบแรกมาเป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการหลอมรอบที่ 2 แล้วใช้วิธี Kalman Filter หาค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการประมาณอนุกรมของน้ำโลหะในรอบที่ 2 จากนั้นก็จะนำค่าพารามิเตอร์สุดท้ายที่คำนวณได้จากการหลอมรอบที่ 2 มาเป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการหลอมรอบที่ 3 โดยจะทำตามขั้นตอนนี้ไปเรื่อยๆ ในทุกๆรอบของการหลอมโลหะ

ทำการเปรียบเทียบการประมาณอนุกรมด้วยวิธี Kalman Filter และวิธี GA กับอนุกรมที่วัดได้จริงจะได้ผลการทดลองดังนี้ คือ

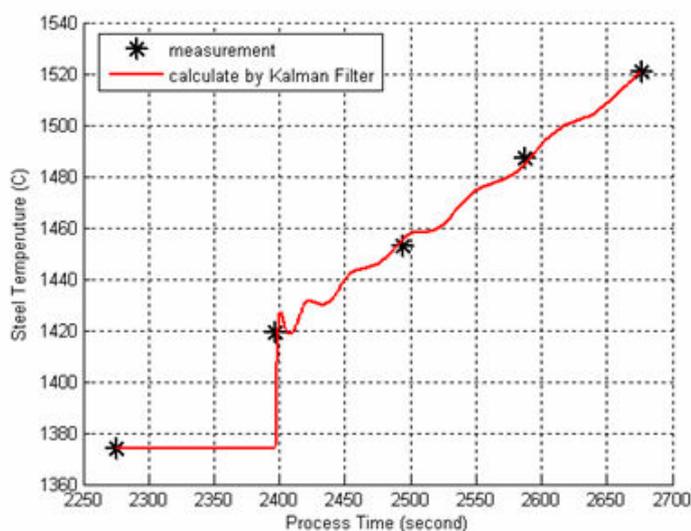
การหลอมโลหะรอบที่ 1

ตารางที่ 36 พารามิเตอร์ที่ประมาณ โดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 1

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่ เวลา(sec)	k=1, 2275s	k=2, 2397s	k=3, 2494s	k=4, 2587s	k=5, 2677s
θ_1	0.0000	-0.0081	0.0017	0.0007	0.0006
θ_2	0.0000	-0.2049	-0.0393	-0.0480	-0.0448
θ_3	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0001

ตารางที่ 37 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 1

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่ เวลา(sec)	k=1, 2275s	k=2, 2397s	k=3, 2494s	k=4, 2587s	k=5, 2677s
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}\text{C}$)	1374.0	1419.0	1453.0	1487.0	1521.0
Kalman Filter ($^{\circ}\text{C}$)	1374.0	1374.8	1455.5	1484.8	1521.3



ภาพที่ 44 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบแรก

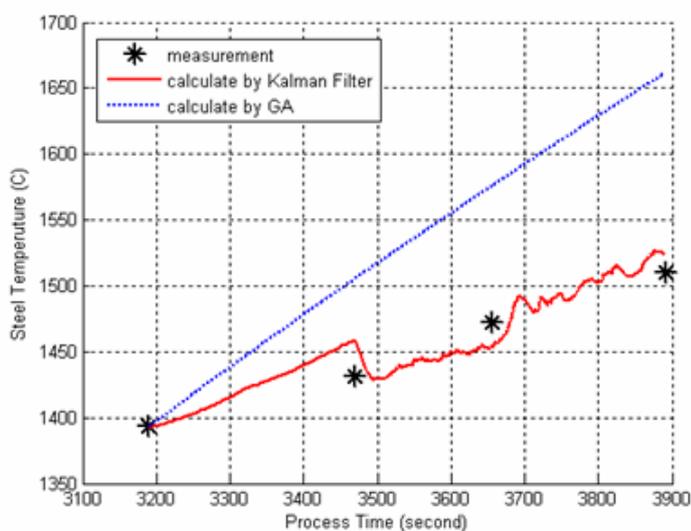
การหลอมโลหะรอบที่ 2

ตารางที่ 38 พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 2

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	3190s	3470s	3656s	3890s
θ_1	0.0006	0.0142	0.0614	0.0164
θ_2	-0.0448	-0.0775	-0.2765	-0.2261
θ_3	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0001

ตารางที่ 39 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
	3190s	3470s	3656s	3890s
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	1393.1	1431.1	1472.5	1510.0
GA ($^{\circ}C$)	1393.1	1505.8	1576.0	1661.9
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1393.1	1458.3	1454.5	1524.1



ภาพที่ 45 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 2

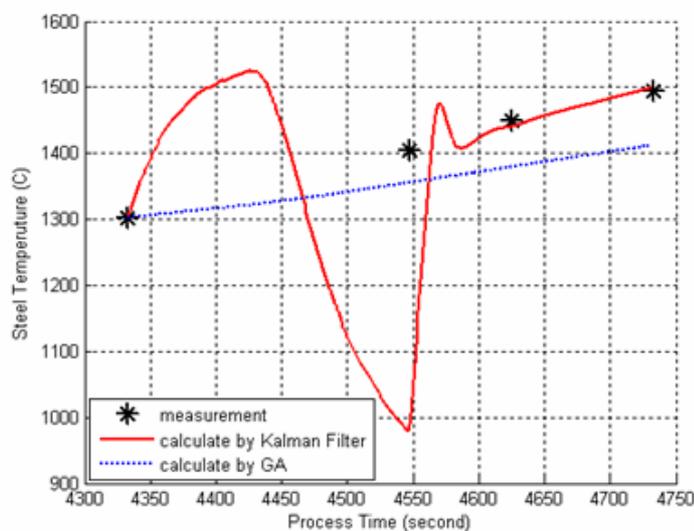
การหลอมโลหะรอบที่ 3

ตารางที่ 40 พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 3

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
θ_1	0.0164	0.0564	0.1581	0.1433
θ_2	-0.2261	-0.3306	-0.0194	0.0696
θ_3	-0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002

ตารางที่ 41 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	1302.5	1405.5	1448.6	1493.7
GA ($^{\circ}C$)	1302.5	1355.7	1379.3	1412.2
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1302.5	989.1	1440.4	1500.0



ภาพที่ 46 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 3

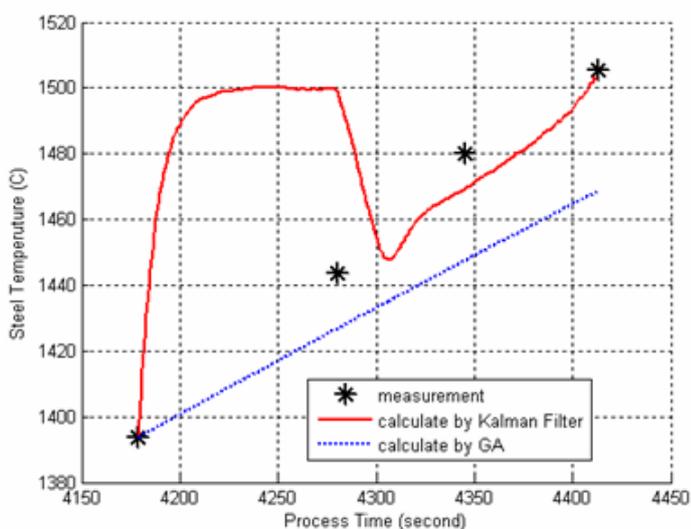
การหลอมโลหะรอบที่ 4

ตารางที่ 42 พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 4

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
θ_1	0.1433	0.1510	0.2366	0.1769
θ_2	0.0696	-0.2257	0.1018	0.4578
θ_3	-0.0002	-0.0002	-0.0003	-0.0002

ตารางที่ 43 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่เวลา(sec)	k=1,	k=2,	k=3,	k=4,
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	1393.8	1443.7	1480.0	1505.6
GA ($^{\circ}C$)	1393.8	1426.8	1447.5	1468.8
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1393.8	1498.8	1469.3	1502.9



ภาพที่ 47 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 4

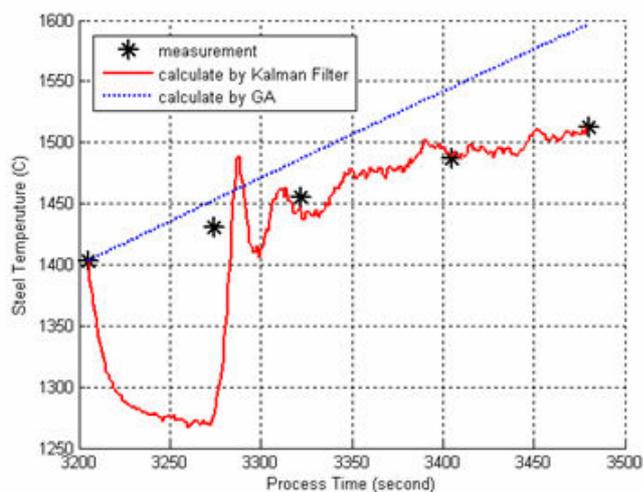
การหลอมโลหะรอบที่ 5

ตารางที่ 44 พารามิเตอร์ที่ประมาณโดย Kalman Filter ในการหลอมรอบที่ 5

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่ เวลา(sec)	k=1, 3205s	k=2, 3274s	k=3, 3322s	k=4, 3405s	k=5, 3480s
θ_1	0.1769	0.1233	0.0336	0.0329	0.0390
θ_2	0.4578	-0.4469	-1.3066	-0.9338	-0.8223
θ_3	-0.0002	-0.0002	-0.0001	-0.0001	-0.0001

ตารางที่ 45 อุณหภูมิน้ำโลหะที่ประมาณได้เทียบกับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5

การวัดน้ำเหล็กครั้งที่ (k), ที่ เวลา(sec)	k=1, 3205s	k=2, 3274s	k=3, 3322s	k=4, 3405s	k=5, 3480s
อุณหภูมิที่วัดจริง ($^{\circ}C$)	1403.2	1430.8	1454.9	1503.2	1512.0
GA ($^{\circ}C$)	1403.2	1452.7	1486.7	1545.1	1596.9
Kalman Filter ($^{\circ}C$)	1403.2	1277.4	1446.5	1493.5	1511.0



ภาพที่ 48 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการหลอมรอบที่ 5

วิจารณ์

การทดลองที่ 1

เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำโลหะที่ได้จากการประมาณและการวัด ณ จุดสุดท้ายของการวัดอุณหภูมิจริงจะได้ดังตามตารางที่ 43

ตารางที่ 46 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการวัดที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการทดลองที่ 1

รอบของการหลอมโลหะ	อุณหภูมิของน้ำโลหะที่จุดสุดท้าย ($^{\circ}C$)			ผลต่างของอุณหภูมิจากการประมาณกับการวัดจริง ($^{\circ}C$)	
	จุ่มวัดจริง	GA	Kalman Filter	GA	Kalman Filter
1	1521.0	1520.5	1525.0	0.5	4.0
2	1510.0	1507.5	1511.4	2.5	1.4
3	1493.7	1497.7	1498.3	4.0	4.6
4	1505.6	1507.8	1510.1	2.2	4.5
5	1512.0	1514.0	1514.8	2.0	2.8

จากผลการทดลองที่ 1 ซึ่งเป็นการประมาณอุณหภูมิแบบ Off-Line แสดงให้เห็นว่าถ้าจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิที่ปากเตา ($T_s(k)$) สามารถทำการวัดได้ทุกจุดอย่างต่อเนื่องแล้ว วิธีการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะด้วย Kalman Filter จะทำการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะได้เร็วกว่าวิธี GA มากถึงแม้จะมีความคลาดเคลื่อนในการประมาณอุณหภูมิมากกว่าเล็กน้อยในการหลอมแต่ละรอบ

การทดลองที่ 2

เมื่อทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิของน้ำโลหะที่ได้จากการประมาณและการวัด ณ จุดสุดท้ายของการวัดอุณหภูมิจริงจะได้ดังผลตารางที่ 44

ตารางที่ 47 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการวัดที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการทดลองที่ 2

รอบของการหลอมโลหะ	อุณหภูมิของน้ำโลหะที่จุดสุดท้าย ($^{\circ}\text{C}$)			ผลต่างของอุณหภูมิจากการประมาณกับการวัดจริง ($^{\circ}\text{C}$)	
	จุ่มวัดจริง	GA	Kalman Filter	GA	Kalman Filter
1	1521.0	1520.5	-	0.5	-
2	1510.0	1507.5	1512.8	2.5	2.8
3	1493.7	1497.7	1497.9	4.0	4.2
4	1505.6	1507.8	1513.8	2.2	8.2
5	1512.0	1514.0	1514.8	2.0	2.8

ในการทดลองที่ 2 นี้แสดงให้เห็นว่าวิธีการของ Kalman Filter ในการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิ ที่เป็นแบบ Off-Line สามารถประมาณอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 ถึงแม้ว่าจุดที่ทำการวัดอุณหภูมิจริงของน้ำโลหะจะไม่ต่อเนื่องก็ตาม โดยทำการสร้างเงื่อนไขในการปรับค่าพารามิเตอร์เพิ่มขึ้นมาในกระบวนการของ Kalman Filter ทำให้วิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วย Kalman Filter แบบ Off-Line ในการทดลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วย Kalman Filter แบบ On-Line ในการทดลองที่ 3-5 ได้อีกด้วย

การทดลองที่ 3

จากวิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วย Kalman Filter แบบ Off-Line โดยการสร้างเงื่อนไขการปรับค่าพารามิเตอร์ในการทดลองที่ 2 ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการทดลองที่ 3 นี้ และผลการทดลองที่ได้โดยสังเกตจากผลต่างของอุณหภูมิจากการประมาณกับการวัดจริงในตารางที่ 45 จะเห็นได้ว่าวิธี GA เมื่อถูกนำไปใช้งานแบบ On-Line แล้วจะมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงมากเมื่อเทียบกับวิธี Kalman Filter ทั้งนี้ก็เพราะการประมาณด้วย GA นั้นค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะในแต่ละรอบจะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธี GA แบบ Off-Line ในเตาก่อนหน้านี้ ซึ่งต่างจากวิธี Kalman Filter ที่ทุกๆรอบของการหลอมจะมีการปรับค่าพารามิเตอร์ทุกครั้งเมื่อพบจุดที่วัดอุณหภูมิจริง ทำให้ Kalman Filter มีความคลาดเคลื่อนในการประมาณอุณหภูมิน้อยกว่า

ตารางที่ 48 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการวัดที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการทดลองที่ 3

รอบของการหลอมโลหะ	อุณหภูมิของน้ำโลหะที่จุดสุดท้าย (°C)			ผลต่างของอุณหภูมิจากการประมาณกับการวัดจริง (°C)	
	จุ่มวัดจริง	GA	Kalman Filter	GA	Kalman Filter
1	-	-	-	-	-
2	1510.0	1661.9	1514.9	151.9	4.9
3	1493.7	1412.2	1464.2	81.5	29.5
4	1505.6	1468.8	1481.1	36.8	24.5
5	1512.0	1596.9	1521.5	84.9	9.5

เมื่อทำการเปรียบเทียบการทดลองนี้ที่เป็นแบบ On-Line กับการทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นแบบ Off-Line จะเห็นได้ว่า ผลต่างของอุณหภูมิจากการประมาณด้วย Kalman Filter กับการวัดจริง มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าการทดลองที่ 2 มาก ทั้งนี้เนื่องจากจุดที่การวัดอุณหภูมิจริงมีจำนวนจุดที่น้อยเกินไปทำให้ความละเอียดและแม่นยำในการปรับค่าพารามิเตอร์เพื่อทำการประมาณอุณหภูมिन้อย ทำให้ต้องทำการพัฒนาวิธีการที่จะทำให้การปรับค่าพารามิเตอร์มีความละเอียดและแม่นยำขึ้นเมื่อมีจำนวนจุดจุ่มวัดอุณหภูมิจริงน้อยครั้ง ในการทดลองที่ 4 และ 5 ต่อไป

การทดลองที่ 4

จากผลการทดลองที่ 4 ซึ่งใช้การวิเคราะห์การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำโลหะในการทดลองที่ผ่านๆ มา พบว่าอุณหภูมิจะสูงขึ้นในลักษณะเป็นเชิงเส้นที่มีความชันเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จึงได้สร้างสมการเส้นตรงขึ้นมาเพื่อจำลองการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิทำให้การปรับค่าพารามิเตอร์มีความละเอียดแม่นยำขึ้น เพราะที่ผ่านมามีค่าพารามิเตอร์จะถูกปรับก็ต่อเมื่อพบจุดวัดอุณหภูมิจริง แต่ในการทดลองนี้ค่าพารามิเตอร์จะปรับตัวเองโดยเทียบกับสมการเส้นตรงที่ได้จำลองขึ้นมา ทำให้การประมาณอุณหภูมิด้วยวิธี Kalman Filter มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองในการหาลมรอบต่างๆดังตารางที่ 46 ว่าอุณหภูมิของน้ำเหล็กที่ได้จากการประมาณด้วย Kalman Filter มีผลต่างของอุณหภูมิต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการวัดอุณหภูมิจริงมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธี GA มาก และความคลาดเคลื่อนจากการประมาณด้วย Kalman Filter ก็ยังน้อยกว่าการทดลองที่ 3 อีกด้วย

ตารางที่ 49 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการวัดที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการทดลองที่ 4

รอบของการ หลอมโลหะ	อุณหภูมิของน้ำโลหะที่จุดสุดท้าย ($^{\circ}\text{C}$)			ผลต่างของอุณหภูมิจากการ ประมาณกับการวัดจริง ($^{\circ}\text{C}$)	
	จุ่มวัดจริง	GA	Kalman Filter	GA	Kalman Filter
1	-	-	-	-	-
2	1510.0	1661.9	1513.1	151.9	3.1
3	1493.7	1412.2	1510.7	81.5	7.0
4	1505.6	1468.8	1519.1	36.8	13.5
5	1512.0	1596.9	1511.4	84.9	0.6

การทดลองที่ 5

ในการทดลองที่ 5 แสดงให้เห็นว่าไม่จำเป็นต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธี GA ในการหาลอมรอบแรก เพื่อนำมาเป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Kalman Filter ในการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะในการหาลอมรอบถัดไป แต่สามารถใช้ Kalman Filter ในการหาลอมรอบแรกได้ทันที และเมื่อเปรียบเทียบกับ การทดลองที่ 4 ถึงแม้ว่าในบางรอบของการหลอมโลหะ ผลต่างของอุณหภูมิจากการประมาณกับการวัดจริงด้วยวิธี Kalman Filter ในการทดลองนี้จะมากกว่าในการทดลองที่ 4 เล็กน้อยแต่ก็สามารถบอกได้ว่าในการทดลองที่ 5 นี้เป็นอีกการทดลองที่ทำให้สะดวกและแม่นยำในการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะด้วย Kalman Filter

ตารางที่ 50 เปรียบเทียบอุณหภูมิที่จุดสุดท้ายของการวัดที่ได้จาก การประมาณด้วย Kalman Filter และ Genetic Algorithm กับค่าที่วัดได้จริงในการทดลองที่ 5

รอบของการหลอมโลหะ	อุณหภูมิของน้ำโลหะที่จุดสุดท้าย ($^{\circ}C$)			ผลต่างของอุณหภูมิจากการประมาณกับการวัดจริง ($^{\circ}C$)	
	จุ่มวัดจริง	GA	Kalman Filter	GA	Kalman Filter
1	1521.0	-	1521.3	-	0.3
2	1510.0	1661.9	1524.1	151.9	14.1
3	1493.7	1412.2	1500.0	81.5	6.3
4	1505.6	1468.8	1502.9	36.8	2.7
5	1512.0	1596.9	1511.0	84.9	1.0

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากความต้องการในการวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมให้เป็นไปอย่างต่อเนื่องและแม่นยำเพื่อประสิทธิภาพในการหลอมที่สูงสุด ซึ่งในการปฏิบัติงานจริง อุณหภูมิของน้ำโลหะที่สูงมาก (1500 องศาเซลเซียส) จึงไม่สามารถจุ่มหัววัดเทอร์โมคัปเปิ้ลเพื่อวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะได้ตลอดเวลาได้ ดังนั้นวิธีการวัดอุณหภูมิทางอ้อมโดยทำการติดตั้งเซนเซอร์เพื่อวัดค่าต่างๆ เช่น กำลังไฟฟ้า อุณหภูมิและอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นเพื่อนำมาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาหลอมโลหะและใช้วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตา เมื่อพิจารณาจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า วิธีการของ Kalman Filter สามารถนำมาใช้ในการประมาณและปรับค่าพารามิเตอร์ เพื่อทำการประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธี Genetic Algorithm ที่ใช้ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยเห็นได้ชัดจากการทดลองที่ทำปรับค่าพารามิเตอร์และประมาณอุณหภูมิของน้ำโลหะแบบ On-Line ซึ่ง Kalman Filter จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ทุกครั้งเมื่อตรวจพบจุดวัดอุณหภูมิจริง แต่วิธีการของ Genetic Algorithm นั้นจะใช้เวลานานในการคัดเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทำให้ไม่สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ได้ทันเวลา จึงไม่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ในการหลอมรอบนั้น (ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธี GA แบบ Off-Line ในรอบก่อนหน้านี้ มาใช้ประมาณอุณหภูมิในรอบถัดไป) ผลการประมาณอุณหภูมิที่ได้จาก Kalman Filter จึงมีความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิที่วัดได้จริงน้อยกว่าวิธี GA มาก วิธี Kalman Filter จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานจริงซึ่งจะทำให้สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าจากการหลอมโลหะลงได้ด้วยการประมาณอุณหภูมิที่แม่นยำ

ข้อเสนอแนะ

1. การวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะที่ปากเตา ปัจจุบันเนื่องจากเตาหลอมโลหะที่ บริษัท สมบูรณ์หล่อเหล็กเหนียว นั้น มีเตาหลอมทั้งหมด 5 เตา แต่มีหัวจุ่มเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้วัดอุณหภูมิ ของน้ำโลหะในเตาเพียง 1 ชุด ทำให้เมื่อทำการวัดอุณหภูมิที่เตาอื่นๆ อีก 4 เตา ที่ไม่ใช่เตา สำหรับงานวิจัยนี้ อุณหภูมิของเตาอื่นๆ ก็จะถูกลงค่ามายังเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ด้วย ดังนั้นจึงมีข้อเสนอแนะให้ทำการติดตั้ง switch ที่ชุดหัวจุ่มเทอร์โมคัปเปิ้ล เพื่อให้พนักงานทำการ กด switch นี้เพื่อทำการวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้

2. ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณอุณหภูมิด้วยวิธี Kalman Filter นั้น เนื่องมาจากจุดวัดอุณหภูมิของน้ำโลหะจริงที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิจากการประมาณเพื่อ ทำการปรับค่าพารามิเตอร์มีจุดวัดจำนวนค่อนข้างน้อย (4-5 จุด) ซึ่งถ้าเพิ่มจุดวัดอุณหภูมิจริงให้มาก ขึ้นก็จะทำให้การประมาณอุณหภูมามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นด้วย

ปัญหาที่พบ

1. ปัญหาจากฝุ่นเหล็กที่เกิดจากการหลอมโลหะนั้น ทำให้อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในตู้ควบคุม บริเวณหน้าเตา เมื่อติดตั้งเป็นเวลานานๆ โดยไม่มีการดูแลรักษาทำให้อุปกรณ์บางชนิดเกิดทำงาน บกพร่อง เช่น ทรานสมิตเตอร์ ทำให้อาจต้องนำกลับมาซ่อมและนำกลับไปติดตั้งใหม่

2. ปัญหาเรื่องการเข้าไปปรับแต่งหรือตรวจสอบอุปกรณ์ที่อยู่บริเวณหน้าเตาหรือใต้เตา นั้น จะเข้าไปดำเนินการได้ต้องทำการหยุดเดินเตาก่อน ซึ่งในการหลอมบางครั้งก็จะใช้เวลาในการ หลอมที่ต่อเนื่องกันเป็นอาทิตย์ หรือเป็นเดือน แล้วจึงทำการหยุดเดินเตาเพื่อทำการตรวจเช็คและ ซ่อมแซม ทำให้การเข้าไปปรับแต่งหรือตรวจสอบอุปกรณ์ เป็นไปอย่างไม่สะดวกและล่าช้า พอสมควร

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548. คู่มือการอนุรักษ์โรงงานอุตสาหกรรมประเภทหล่อหลอมโลหะ. สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม
- เขมภัทร สมสังข์. 2548. การพัฒนาระบบประมาณและควบคุมอุณหภูมิของน้ำโลหะในเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- เขมภัทร สมสังข์, พีระยศ แสนโกชณ์ และ ศุภวุฒิ จันทรานูวัฒน์. 2548. การพัฒนาระบบประมาณน้ำโลหะในเตาหลอมโลหะแบบเหนียวนำโดยใช้เซนติคัลอัลกอริทึม, น. 5-8. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28.
- ประพันธ์ พิภูทอง. 2545. การประมาณค่าอุณหภูมินำเหล็กในเตาหลอมแบบเหนียวนำไฟฟ้า วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิโรจน์ หัตถเสรีพงษ์. 2544. แบบจำลองเตาหลอมแบบเหนียวนำในย่านฮาร์โมนิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นัครินทร์ หงษ์สิทธิวงศ์, พีระยศ แสนโกชณ์ และ สุธี ผู้เจริญชนะชัย. 2550. การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวกรองคาร์ลมานสำหรับค่าการวัดแบบสุ่มในกระบวนการหลอมโลหะ, น. 1177-1180. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30.
- พีระยศ แสนโกชณ์, สุธี ผู้เจริญชนะชัย และ นัครินทร์ หงษ์สิทธิวงศ์. 2551. อัลกอริทึมตัวกรองคาร์ลมานผสมการประมาณเชิงเส้นเป็นช่วงเพื่อประมาณอุณหภูมิในกระบวนการหลอมโลหะ, น. 257-264. ใน การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 46 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มนตรี พิรุณเกษตร 2542. อุณหพลศาสตร์ 1, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รัชทิน จันทร์เจริญ, มิ่งศักดิ์ ตั้งตระกูล และ ประพันธ์ พิกุลทอง. 2544. การประมาณค่าอนุหภูมิ
น้ำเหล็กในเตาหลอมแบบเหนี่ยวนำไฟฟ้า, น. 38-42. ใน การประชุมวิชาการเครือข่าย
เครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15.

สุนันท์ ศรีณยนิตย์. 2535. การถ่ายเทความร้อน. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี,
กรุงเทพฯ.

A. Girgis, A, Brown, G. 1981. Application of Kalman Filtering in Computer Relaying. **IEEE
Transactions on Power Apparatus and Systems**. Vol. PAS-100

B. Rhodes, J. 1971. A Tutorial Introduction to Estiamtion and Filtering. **IEE Transactions on
automatic control**: 688-705

F.Franklin, G , Powell, J.David and Workman, M. 1997. **Digital Control of Dynamic
Systems**.

Gupta, S and John, J. 2005. **Virtual Instrumentation Using LabVIEW**. Tata McGraw-Hill
Publishing Company Limited

Jeffrey, T.2002. **LabVIEW for Everyone**. 2 ed. Prentice Hall PTR.

Negenborn, R. 2003. **Robot Localization and Kalman Filters**. Master Degree thesis, Utrecht
University.

P. Sage, A and C. White, C. 1977. **Optimum Systems Control**. 2 ed. Prentice-Hall, Inc,
Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

Stark, H and W.Woods, J. 1994. **Probability, Random Process, and Estimation Theory for
Engineers**. 2 ed. Prentice-Hall, Inc, Upper Saddle River, New Jersey 07458.

Welch, G and Bishop, G. 2006. **An Introduction to the Kalman Filter.** Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill.

Y. Beyon, J. 2001. **LabVIEW Programming, Data Acquisition and Analysis.** Prentice-Hall, Inc, Upper Saddle River, New Jersey 07458.

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

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นาย นครินทร์ หงษ์สิทธิวงษ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	20 มกราคม พ.ศ. 2526
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
ประวัติการศึกษา	จบการศึกษาระดับปริญญาตรี จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ม.เกษตรศาสตร์ ในปี พ.ศ. 2548, ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ม.เกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักศึกษา
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	รางวัลโครงงานวิศวกรรมดีเด่น ประจำปี พ.ศ. 2548 ประเภท ซอฟต์แวร์ เรื่องการวัดในกระบวนการอุตสาหกรรมโดยโปรแกรม Labview
ผลงานตีพิมพ์ทางวิชาการ	- นครินทร์ หงษ์สิทธิวงษ์, พีระยศ แสนโกชณ์ และ สุธี ผู้เจริญชนะชัย. 2550. การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยตัวกรองคาร์ลมานสำหรับค่าการวัดแบบสุ่มในกระบวนการหลอมโลหะ, น. 1177-1180. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30. - พีระยศ แสนโกชณ์, สุธี ผู้เจริญชนะชัย และ นครินทร์ หงษ์สิทธิวงษ์. 2551. อัลกอริทึมตัวกรองคาร์ลมานผสมการประมาณเชิงเส้นเป็นช่วงเพื่อประมาณอุณหภูมิในกระบวนการหลอมโลหะ, น. 257-264. ใน การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 46 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (ทุน TGIST)