

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างอัตราการไหลเชื้อเพลิงกับอุณหภูมิ
สำหรับเตาอบเหล็กชนิด Walking Hearth ในกระบวนการผลิต
Mathematical Model between Fuel Flow Rate and Temperature Zones of
Reheating Furnace Walking Hearth Type in Manufacturing Process

ธนวัฒน์ โพธิ์งาม¹, จิระพล ศรีเสริฐผล^{1*} และวรพจน์ ขำพิศ¹

¹ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

* Email: jiraphon@sut.ac.th, 044-224412

บทคัดย่อ

ในกระบวนการแปรรูปวัสดุจากแท่งเหล็กเป็นเหล็กเส้นนั้นมีขั้นตอนที่สำคัญคือการควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้แท่งเหล็กมีความอ่อนตัวด้วยความร้อนสูงในอุณหภูมิระหว่าง 1000 - 1150 องศาเซลเซียส โดยระบบควบคุมหลักอยู่มี 2 ส่วนด้วยกัน คือ ระบบควบคุมแบบ PI สำหรับการควบคุมอุณหภูมิและระบบควบคุมอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง ปัจจุบันการควบคุมอุณหภูมิของเตาอบเหล็กในแต่ละโซนนั้นยังไม่มีที่เหมาะสม เช่น มีการฟุ้งเกินของอุณหภูมิสูงเกินไปหรือการทำอุณหภูมิไม่เพียงพอ ซึ่ง ทำให้ในกระบวนการอุ่นเตาต้องสูญเสียพลังงาน ระบบควบคุมเตาอบเหล็กของบริษัทราชสีมาผลิตเหล็กจำกัด ถูกใช้งานมากกว่า 10 ปี ได้มีการดัดแปลงและเปลี่ยนเชื้อเพลิงซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมอุณหภูมิจึงไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมต้องศึกษาระบบของเตาอบเหล็กก่อน ดังนั้นบทความนี้นำเสนอการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาอบเหล็กโดยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนและการระบุเอกลักษณ์ของระบบเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบโดยทำการศึกษาระบบที่พิจารณาแท่งเหล็กคั่งค้างและระบบที่ไม่พิจารณาแท่งเหล็กเพื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองทั้งสองของระบบ

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, การระบุเอกลักษณ์ของระบบ, เตาอบเหล็ก, การถ่ายเทความร้อน

Abstract

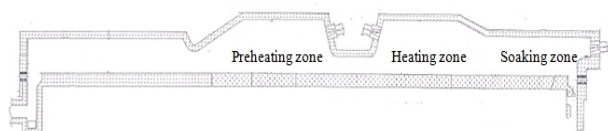
Reheating process is key for wire rod manufacturing process. Steel in the furnace is heated to high temperature range from 1000 to 1150 °C. The furnace has two main controller. First, the zone temperature of reheating furnace is controlled using PI feedback control system and air-fuel ratio controller. However, this type of control system cause temperature overshoot rising. The result in this section is loss energy without avail. The over temperature problem is suspect to be taken from physical changing of reheating furnace or modify burner. This change makes PI control parameters not appropriate to new condition and result in low efficiency of control system. This paper therefore presents Mathematical Model of reheating furnace using theory of heat transfer and system

identification technique to estimate parameters of reheating furnace model considered residues billets and without residues billet for comparison between responses of both model.

Keywords: Mathematical Model, System identification, Furnace, Heat transfer.

1. บทนำ

ในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กในการแปรรูปเป็น เหล็กหลอดในงานก่อสร้างนั้นเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่มีการใช้พลังงานสูงทั้งพลังงานไฟฟ้าและพลังงานเชื้อเพลิงโดยมีอุปกรณ์หลักเป็นเตาอบเหล็ก ซึ่ง ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่วัตถุดิบให้มีความอ่อนตัวเพื่อให้สามารถรีดเป็นเหล็กหลอดขนาดเล็กได้ ในการทำการผลิตนั้นจะมีการผลิตในช่วงเวลาหลัง 22:00น. เป็นต้นไป สาเหตุเพราะค่าไฟฟ้าเวลากลางวันราคาถูก ดังนั้นต้องมีการดับเตาและจุดเตาทุกวัน ซึ่งในแต่ละวันจะมีแท่งเหล็กวัตถุดิบคงค้างในเตาจำนวนมาก โดยเริ่มจุดเตาของทุกวันในเวลาประมาณ 19:00น. เพื่อให้มีอุณหภูมิสำหรับการผลิตที่เหมาะสมนั้น ระบบควบคุมอุณหภูมิมี 2 ส่วนคือ ระบบควบคุมแบบ PI สำหรับการควบคุมอุณหภูมิในโซนและระบบควบคุมอัตราส่วนในการเผาไหม้ของอากาศกับเชื้อเพลิง ซึ่งเตาอบเหล็กถูกแบ่งออกเป็นโซนทั้งหมด 4 โซนตามหน้าที่ของโซนคือ

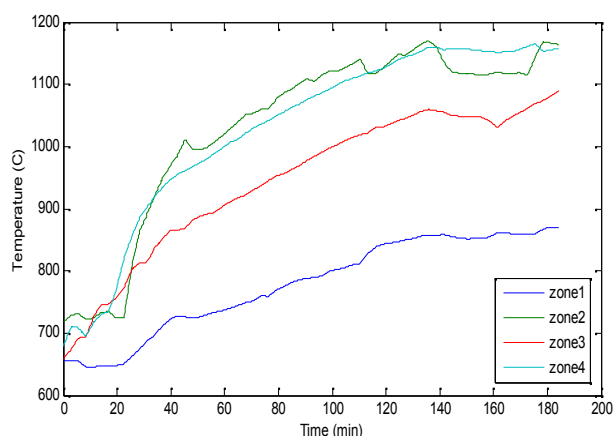


รูปที่ 1 ลักษณะทั่วไปของเตาอบเหล็ก

1. Preheating zone เป็นโซนที่อยู่ติดกับปล่องไอเสียและประตูทางเข้าของแท่งเหล็ก ภายในโซนนี้มีอุณหภูมิประมาณ 700 – 850 องศาเซลเซียส มีหน้าที่ไล่ความชื้นของแท่งเหล็ก มีหัวเผาทั้งหมด 8 หัว
2. Heating zone เป็นโซนที่อยู่ถัดจาก Preheating zone เป็นโซนที่มีอุณหภูมิประมาณ 1000 – 1150 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่ให้ความร้อนโดยตรงกับแท่งเหล็ก มีหัวเผาทั้งหมด 8 หัว

3. Soaking zone 1 เป็นโซนที่อยู่ถัดจาก Heating zone เป็นโซนที่มีอุณหภูมิระหว่าง 1000 – 1100 องศาเซลเซียส ทำหน้าที่บ่มเหล็กให้อ่อนตัวจนถึงแกนกลางของแท่งเหล็กมีหัวเผาทั้งหมด 5 หัว
4. Soaking zone 2 เป็นโซนที่อยู่ถัดจาก Heating zone และติดกับ Soaking zone 1 เป็นโซนที่มีอุณหภูมิระหว่าง 950 – 1100 องศาเซลเซียส อยู่ติดกับประตูทางออกทำหน้าที่บ่มเหล็กให้อ่อนตัวก่อนออกผลิตมีหัวเผาทั้งหมด 5 หัว

ในขณะทำการผลิต Preheating zone จะไม่ทำการจุดหัวเผาเนื่องจากอุณหภูมิพอเพียงต่อการไล่ความชื้นของแท่งเหล็ก



รูปที่ 2 กราฟอุณหภูมิในโซนต่างๆ ของเตาอบเหล็กในกระบวนการอุ่นเตา

รูปที่ 2 เป็นตัวอย่างของอุณหภูมิที่ไม่เพียงพอต่อการผลิตในโซน 3 และการพุ่งเกินของอุณหภูมิของโซน 2 เนื่องจากเตาถูกให้มาเป็นเวลานานรวมทั้งมีการปรับปรุงตัดแปลงหัวเผาและเปลี่ยนแปลงเชื้อเพลิง จึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบควบคุมแบบ PI ในแต่ละโซน ไม่มีความเหมาะสมกับสภาพของเตาในปัจจุบัน จิระพล ศรีเสรีฐผล, ปริญญา ตระกูลวงค์งาม[1] ได้ศึกษา reheating furnace และสร้างสมการคณิตศาสตร์ในรูปแบบ state space model

ในช่วงการอุ่นเตาสำหรับการผลิตและออกแบบการเปิดปิดหัวเผาเพื่อให้ได้ผลการตอบสนองตามอุณหภูมิอ้างอิง (Heating curve up) งานวิจัยของ Arend K. และ Gustaaf A.J.M [2] ได้นำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์แบบหลายตัวแปรของแบบจำลองพลวัตสำหรับ reheating furnace ชนิด walking beam Gustaaf V.D และ Dirk S. [3] ได้นำเสนอการควบคุมแบบทำนายและการระบุเอกลักษณ์ของ reheating furnace ซึ่งจะทำนายอุณหภูมิของเหล็กทุกๆ แท่งโดยค่าผลต่างระหว่างค่าทำนายและเป้าหมายจะเป็น input ให้กับตัวควบคุมอุณหภูมิของโซน โดยที่ตัวทำนายเรียกว่า ARX model [4-5] เป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพของเตาโดยมีสมการทางคณิตศาสตร์เป็นตัวออกแบบการเผาไหม้ที่ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด Yingxin L. และ Min W. [6] ได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองของ reheating furnace โดยใช้ลำดับชั้นการเรียนรู้บนโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network) เพื่อทำนายอุณหภูมิในโซนของเตาจึงต้องมีการออกแบบระบบควบคุมแบบ PI ใหม่เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์แบบเชิงเส้นทั้ง 2 ระบบคือที่พิจารณาแท่งเหล็กคั่งค้างและระบบที่ไม่พิจารณาแท่งเหล็กคั่งค้างระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองทั้งสองเพื่อนำมาเปรียบเทียบและใช้แบบจำลองที่เหมาะสมในการออกแบบชุดควบคุมแบบ PI ในงานต่อไป

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาอบเหล็กนั้นสร้างภายใต้เงื่อนไขของระบบที่เป็นเชิงเส้นเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปออกแบบระบบควบคุมต่อไปโดยใช้ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนเบื้องต้น เช่น การพาความร้อน การแผ่รังสี เป็นต้น โดยแบ่งแบบจำลองออกเป็น 2 ส่วนเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่พิจารณาแท่งเหล็กคั่งค้างและแบบจำลองที่ไม่พิจารณาแท่งเหล็กคั่งค้าง

2.1 แบบจำลองที่ 1 ระบบที่พิจารณาแท่งคั่งค้าง

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{(T_2 - T_1)}{R_2} - \frac{(T_1 - T_0)}{R_1} - 128 \frac{(T_1 - T_{b1})}{R_{b1}} \quad (1)$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = \frac{(T_3 - T_2)}{R_3} + \frac{(T_4 - T_2)}{R_4} - \frac{(T_2 - T_1)}{R_2} - 58 \frac{(T_2 - T_{b2})}{R_{b2}} + m_{f2} LHV \quad (2)$$

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = \frac{(T_4 - T_3)}{R_5} - \frac{(T_3 - T_2)}{R_3} - \frac{(T_3 - T_0)}{R_6} - 19 \frac{(T_3 - T_{b3})}{R_{b3}} + m_{f3} LHV \quad (3)$$

$$C_4 \frac{dT_4}{dt} = -\frac{(T_4 - T_3)}{R_5} - \frac{(T_4 - T_2)}{R_4} - 19 \frac{(T_4 - T_{b4})}{R_{b4}} + m_{f4} LHV \quad (4)$$

$$C_b \frac{dT_{b1}}{dt} = \frac{(T_1 - T_{b1})}{R_{b1}} \quad (5)$$

$$C_b \frac{dT_{b2}}{dt} = \frac{(T_2 - T_{b2})}{R_{b2}} \quad (6)$$

$$C_b \frac{dT_{b3}}{dt} = \frac{(T_3 - T_{b3})}{R_{b3}} \quad (7)$$

$$C_b \frac{dT_{b4}}{dt} = \frac{(T_4 - T_{b4})}{R_{b4}} \quad (8)$$

สมการที่ 1-4 เป็นสมการของระบบในแต่ละโซนของเตา และสมการที่ 5-8 เป็นสมการของแท่งเหล็กคั่งค้างเฉลี่ยภายในเตาอบเหล็กในแต่ละโซน โดยที่ 128, 58, 19 เป็นจำนวนแท่งเหล็กสูงสุดที่คั่งค้าง

2.2 แบบจำลองที่ 2 ระบบที่ไม่พิจารณาแท่งคั่งค้าง

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = \frac{(T_2 - T_1)}{R_2} - \frac{(T_1 - T_0)}{R_1} - Q_1 \quad (9)$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = \frac{(T_3 - T_2)}{R_3} + \frac{(T_4 - T_2)}{R_4} - \frac{(T_2 - T_1)}{R_2} + m_{f2} LHV - Q_2 \quad (10)$$

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = \frac{(T_4 - T_3)}{R_5} - \frac{(T_3 - T_2)}{R_3} - \frac{(T_3 - T_0)}{R_6} + m_{f3} LHV - Q_3 \quad (11)$$

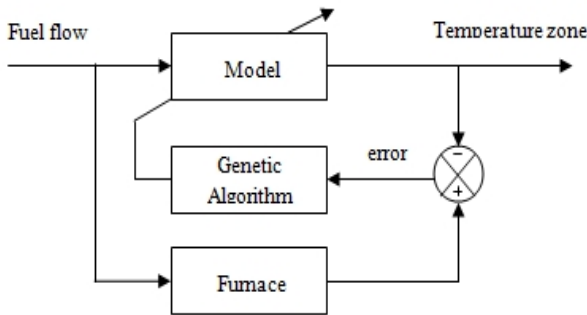
$$C_4 \frac{dT_4}{dt} = -\frac{(T_4 - T_3)}{R_5} - \frac{(T_4 - T_2)}{R_4} + m_{f4} LHV - Q_4 \quad (12)$$

เมื่อกำหนดให้ Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 เป็นตัวแปรชดเชยความร้อนภายในโซนและเมื่อกำหนดให้ R คือค่าความต้านทานความร้อนรวมของระบบที่ประกอบด้วย การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนของทั้งสองระบบ

$$R = \left(\frac{1}{Ah_{conv}} + \frac{1}{Ah_{rad}} \right) \quad (13)$$

3. การระบุเอกลักษณ์

ในการระบุเอกลักษณ์ของระบบนั้นเป็นการระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิดโดยที่ให้อินพุตเป็นอัตราการไหลเชื้อเพลิงของแต่ละโซน เพื่อให้ผลการตอบสนองของแบบจำลองเป็นไปตามที่ต้องการจำเป็นต้องมีการปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยกำหนดให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ค่าความแตกต่างระหว่างผลการตอบสนองของแบบจำลองกับผลการวัดที่ได้ของระบบ



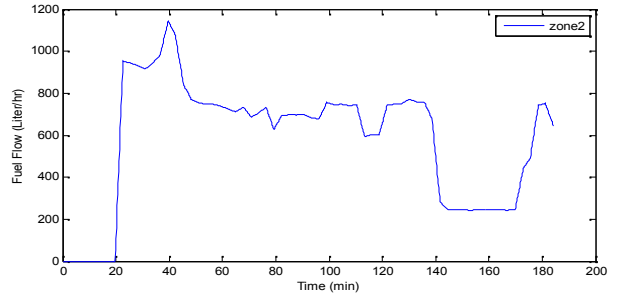
รูปที่ 3 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ของระบบ

โดยอัลกอริทึมที่ใช้ในการค้นหาค่าตอบที่ดีที่สุด ในบทความนี้นำเสนอการใช้ จีเนติกอัลกอริทึม โดยกำหนดค่า พารามิเตอร์ Toolbox ของโปรแกรมมีการกำหนดค่า Selection, Generation, Stall Generation และ Boundary เท่ากันทั้งหมดของแบบจำลองทั้งสองโดยทำการทดลองทั้งหมด 4 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ของแบบจำลองซึ่งแสดงในตารางที่ 1

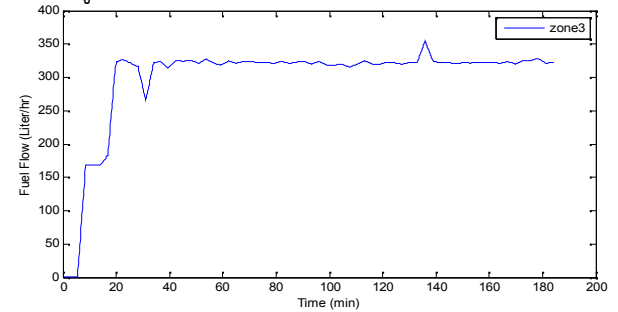
ตารางที่ 1 การตั้งค่าพารามิเตอร์จีเนติก

พารามิเตอร์ GA toolbox	
Generation	20000
Population	200
selection	Tournament
size	default
Stall Generation	Inf

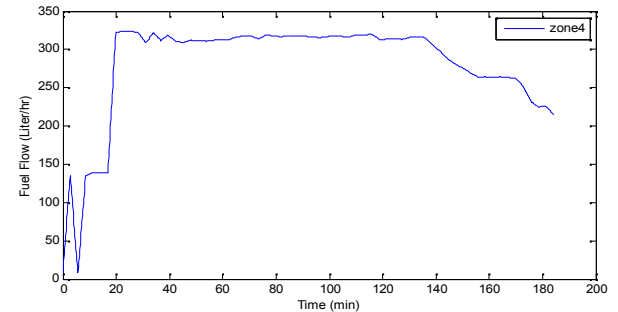
โดยที่ในการระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิดนี้จะมีอัตราการไหลในโซนที่ 2, 3 และ 4 เป็นอินพุตให้กับระบบซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 4 - 6 ตามลำดับและมี เอาท์พุทเป็นอุณหภูมิในแต่ละโซนซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 4 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในโซนที่ 2



รูปที่ 5 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในโซนที่ 3



รูปที่ 6 อัตราการไหลของเชื้อเพลิงในโซนที่ 4

4. ผลการทดลอง

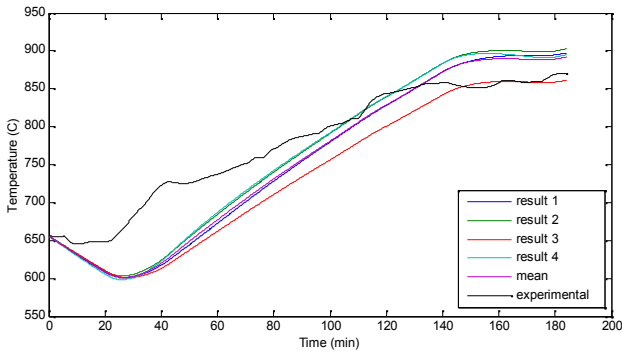
ผลที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของทั้งสองระบบสามารถประมาณพารามิเตอร์ค่าได้ในตารางที่ 2 และ 3 เมื่อนำค่าของพารามิเตอร์แทนในสมการที่ 1 - 8 และ 9 - 12 ได้ผลการตอบสนองดังแสดงในรูปที่ 7 - 10 ซึ่งเป็นผลการตอบสนองของแบบจำลองที่ 1 ในโซนที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับและรูปที่ 11 - 14 นั้นจะเป็นผลการตอบสนองของแบบจำลองที่ 2 ในโซน 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ 1

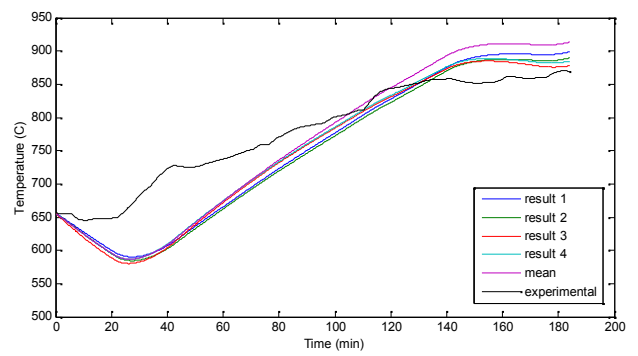
	แบบจำลองที่พิจารณาทางหลักคงค้าง				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
R1	0.0001922	0.0001953	0.0002000	0.0001700	0.0001894
R2	0.0000531	0.0000497	0.0000630	0.0000435	0.0000523
R3	0.0000893	0.0002043	0.0002598	0.0005000	0.0002633
R4	0.0000070	0.0000347	0.0000765	0.0000499	0.0000420
R5	0.0000606	0.0000449	0.0000307	0.0000451	0.0000453
R6	0.0001581	0.0001554	0.0001439	0.0001725	0.0001575
Rb1	0.0220888	0.0320121	0.0050992	0.0255370	0.0211843
Rb2	0.0639999	0.0718549	0.0800000	0.0550247	0.0677199
Rb3	0.0689927	0.0635248	0.0651582	0.0668601	0.0661339
Rb4	0.0800000	0.0807672	0.0724164	0.0790662	0.0780625
C1	52568625	52537588	52486335	52517553	52527525
C2	30178566	30124467	30192511	30174456	30167500
C3	16251786	16261771	16251666	16176786	16235502
C4	14251786	14301772	14256722	14261128	14267849
Cb	37130	36690	36970	37086	36969
%Error	17.261	17.019	18.021	17.208	17.324

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ 2

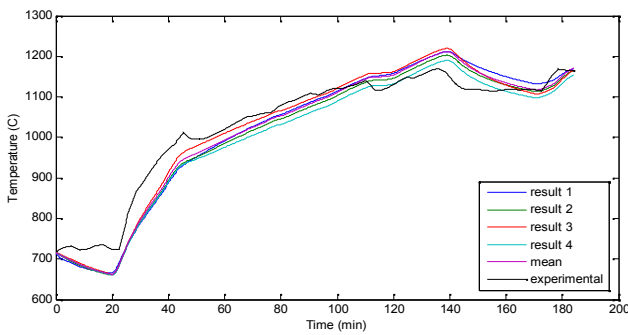
	แบบจำลองที่ไม่พิจารณาทางหลักคงค้าง				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	เฉลี่ย
R1	0.0001825	0.0001644	0.0001382	0.0001598	0.0001612
R2	0.0000459	0.0000427	0.0000372	0.0000402	0.0000415
R3	0.0000999	0.0000985	0.0000790	0.0000621	0.0000849
R4	0.0000210	0.0000281	0.0000118	0.0000348	0.0000240
R5	0.0001487	0.0005155	0.0001530	0.0000963	0.0002284
R6	0.0003298	0.0004340	0.0002022	0.0001729	0.0002847
Q1	0.0021000	0.0024700	0.0042100	0.0028100	0.0028975
Q2	0.0068673	0.0031629	0.0008698	0.0001676	0.0027669
Q3	0.0936158	0.1000000	0.0004727	0.0001117	0.0485500
Q4	0.0825602	0.1000000	0.0010000	0.0010000	0.0461400
C1	52456047	52580408	52553194	52580408	52542514
C2	30166742	30194018	30155695	30194018	30177618
C3	16228916	16267218	16240004	16239963	16244025
C4	14240004	14274658	14236335	14228916	14244978
%Error	21.361	22.269	17.611	18.472	21.335



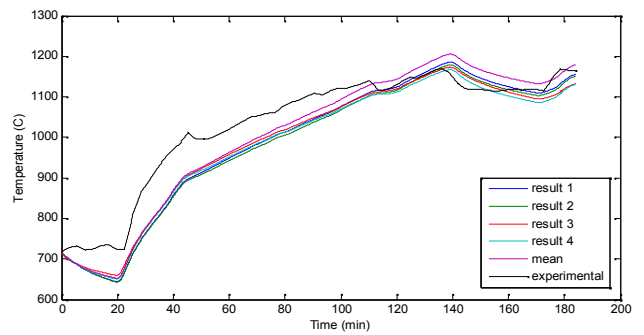
รูปที่ 7 ผลตอบสนองของอุณหภูมิโซนที่ 1 กับแบบจำลองที่ 1



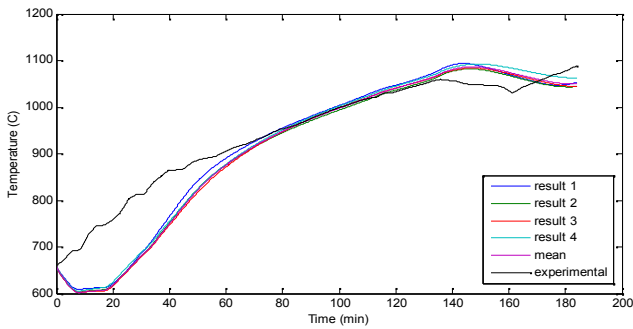
รูปที่ 11 ผลตอบสนองของอุณหภูมิโซนที่ 1 กับแบบจำลองที่ 2



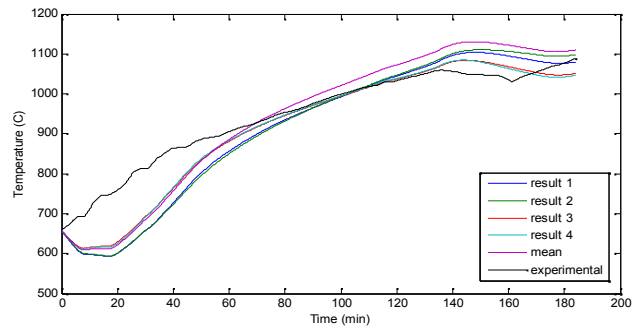
รูปที่ 8 ผลตอบสนองของอุณหภูมิโซนที่ 2 กับแบบจำลองที่ 1



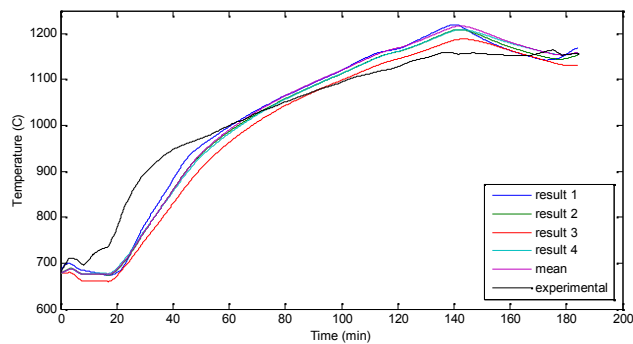
รูปที่ 12 ผลตอบสนองของอุณหภูมิโซนที่ 2 กับแบบจำลองที่ 2



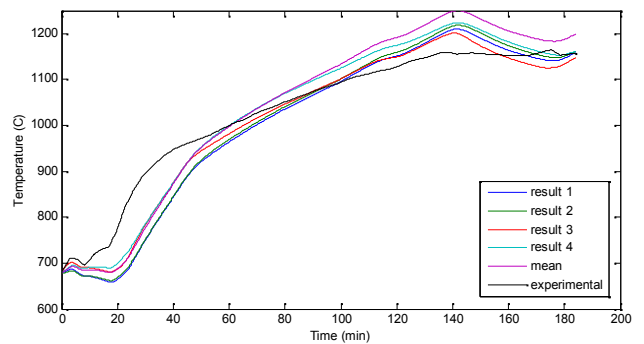
รูปที่ 9 ผลตอบสนองของอุณหภูมิโซนที่ 3 กับแบบจำลองที่ 1



รูปที่ 13 ผลตอบสนองของอุณหภูมิโซนที่ 3 กับแบบจำลองที่ 2



รูปที่ 10 ผลตอบสนองของอุณหภูมิโซนที่ 4 กับแบบจำลองที่ 1



รูปที่ 14 ผลตอบสนองของอุณหภูมิโซนที่ 4 กับแบบจำลองที่ 2

5. สรุปผลการทดลอง

จากข้อมูลค่าความผิดพลาดของระบบเฉลี่ยที่เป็นระบบที่พิจารณาแห่งหลักคือ 17.324% และระบบที่ไม่พิจารณาแห่งหลักคงค้าง 21.335% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบที่พิจารณาแห่งหลักคงค้างในเตาโดยมีจำนวน 128, 58, 19 และ 19 ตามลำดับของโซนนั้นมีระบบสมการควบคุมที่มากกว่าสามารถให้ค่าความถูกต้องสูงกว่าระบบที่ไม่นำปริมาณแห่งหลักมาพิจารณาถึงแม้จะเพิ่มพารามิเตอร์สำหรับชดเชยความร้อนเข้าไปในแบบจำลองที่ 2 ประมาณ 3 - 4% ถึงอย่างไรระบบทั้งสองแบบก็ให้ผลตอบสนองที่ดีจึงสามารถนำไปออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมกับกระบวนการอุ่นเตาได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนข้อมูลจากบริษัท ราชสีมาผลิตเหล็กจำกัดและคุณอิทธิศักดิ์ จำรัสประเสริฐได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับเตาอบเหล็กและข้อมูลการผลิต

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Srisertpol, J., Trakunvongngam, P. and Khomphis V. (2010). Estimation of the Mathematical Model of the Reheating Furnace Walking Hearth Type in Heating Curve Up Process, International Journal of Mathematical Model and Method in Applied Sciences. Issue 1. Vol5. pp. 167 – 174.

[2] Arend Kuster. and Gustaaf A.J.M van Ditzhuijzen. (1994). MIMO system identification of a slab reheating furnace, Department of Rolling Mills & Automation, Hoogovens

Technical Series I&S B.V.,P.O.Box 1970CA., pp. 1557-1563

[3] Gustaaf A.J.M van Ditzhuijzen., Dirk Staaman. and Arnol Koorm. (2002). Identification and model predictive control of a slab reheating furnace, Proceeding of the 2002 IEEE International Conference on Control Application, pp.361-366

[4] Wei-Hsin Chen., Mu-Long Lin., Tzong-Shyng Leu. (2010). Optimal Heating and Energy management for slab in a Reheating furnace, Journal of Marine Science and Technology Vol.18 February 2010, pp. 24-31

[5] Mir Esmaeil Masoumi and Zahra Izakmehri. (2011). Improving of Refinery Furnace Efficiency Using Mathematic Model, International Journal of Modeling and Optimization Vol.1, No.1 pp. 74-79

[6] Yingxin Liao., Min Wu. and Jin-Hua She. (2006). Modeling of Reheating - Furnace Dynamics Using Neural Network Based on Improved Sequential-Learning Algorithm, IEEE International Conference on Control Application, 4-6 Oct. 2006, pp. 243-249

[7] Sang Heon Han, DaeJun Chang and Cheol Huh. (2011). Efficiency analysis of radiative slab reheating in a walking beam type reheating furnace”, Energy, Vol.36 February 2011, pp. 1265-1272