

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

**การระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิดสำหรับเตาอบเหล็กชนิด Walking Hearth
ในกระบวนการอุ่นเตา
Open-loop Identification for Reheating Furnace Walking Hearth Type
in Heating Curve Up Process**

ปริญญ์ ตระกูลวงศ์งาม จิระพล ศรีเสริญผล และวรพจน์ ขำพิศ
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา 30000
* ติดต่อ: โทรศัพท์: 044 224412, โทรสาร: 044 224613
E-mail: jiraphon@sut.ac.th

บทคัดย่อ

กระบวนการอบเหล็กเพื่อทำการรีดเหล็กให้มีขนาดเล็กเป็นเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 5.5 - 32 มิลลิเมตรนั้น ใช้เตาอบเหล็กชนิด Walking hearth ในการควบคุมอุณหภูมิในการอบให้มีอุณหภูมิของเหล็กในช่วง 1150 – 1200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเตาอบมีการควบคุมแบบวงเปิด (Open-loop) ที่มีการควบคุมเชื้อเพลิงและการเปิดและปิดจำนวนหัวเผาให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งปัญหาที่พบในสภาพปัจจุบัน คือระบบมีอุณหภูมิสูงเกินความต้องการทำให้เตาอบเสียหายรวมทั้งสูญเสียเชื้อเพลิงซึ่งเป็นต้นทุนหลักในการผลิตอีกทั้งเตาอบเหล็กมีอายุการใช้งานมาเป็นเวลานาน ระบบอาจมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพซึ่งลักษณะการควบคุมที่ใช้กันอยู่ อาจไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอบเหล็กในปัจจุบัน ส่งผลให้เกิดอุณหภูมิของเหล็กนั้นไม่เป็นไปตามความต้องการ จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์และศึกษาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาอบเหล็ก ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอวิธีระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิดสำหรับเตาอบเหล็กชนิด Walking hearth ในกระบวนการอุ่นเตาโดยประยุกต์การประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากการตอบสนองอุณหภูมิของกระบวนการอุ่นเตาโดยวิธี Nonlinear least square และ Pattern search เพื่อนำไปใช้พิจารณาออกแบบตัวควบคุมให้เหมาะสมในด้านการประหยัดเชื้อเพลิงและผลการตอบสนองทางอุณหภูมิ

คำสำคัญ: แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาอบเหล็ก, ระบบความร้อน, วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ และการประมาณตัวแปร

Abstract

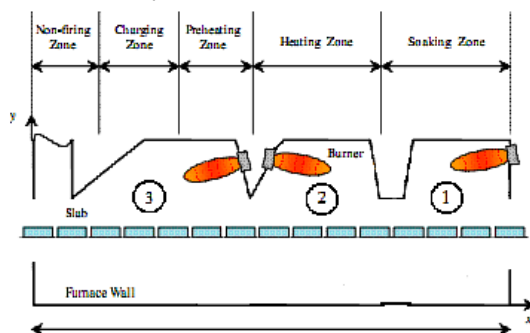
The slab reheating process for iron to small diameter size 5.5 - 32 mm wire is used reheating furnace type walking hearth to control temperature in range 1150-1200 Celsius during 2 hours by using open-loop control. The proper temperature get by controlling fuel and number of opening burners. The current problem is over heat inside the wall, which cause the furnace damage and the fuel loss. That increase the primary cost of production. Moreover, the reheating furnace has been used for a long time. So the physical characteristics might be changed, which influence to the controller. In this study will analysis and develop the mathematical model of the reheating furnace for design. The proper controller in

the fuel economy and good temperature response. The open-loop identification method has been applied to the reheating furnace walking hearth type, by Nonlinear least square and Pattern search.

Keywords: Mathematical model of reheating furnace, Thermal system, System identification and Parameters estimation

1. บทนำ

กระบวนการเตาอบเหล็กเป็นกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบหนึ่ง ที่ได้มีการนำไปประยุกต์ใช้กันอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) เป็นที่ได้รับความนิยมในการนำไปใช้งานเป็นส่วนมากในอุตสาหกรรม จากคู่มือการทำงานของเตาอบ [1] ได้อธิบายกระบวนการทำงานของเตาอบเหล็ก โดยการให้พลังงานความร้อนแก่เตาอบโดยผ่านทางหัวเผาโดยใช้วิธี Double cross limit ปรับการจ่ายอัตราส่วนของอากาศและน้ำมันเตา ซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับ



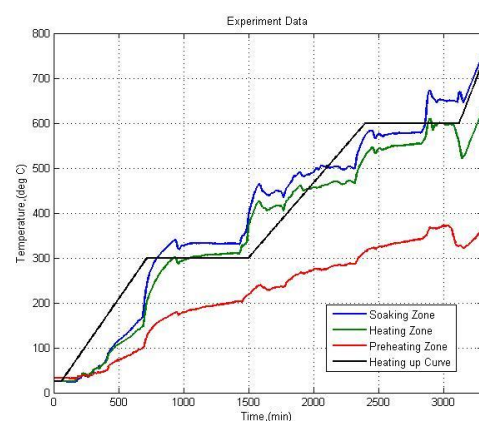
รูปที่ 1 เตาอบเหล็กชนิด Walking hearth

โครงสร้างของเตาอบเหล็กชนิด Walking hearth นั้นจะมีการทำงานแบ่งออกเป็น 3 Zone ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้แก่

1. Soaking zone มีหัวเผา Type NXB-125 10 หัว
2. Heating zone มีหัวเผา Type NXB-300 8 หัว
3. Preheating zone มีหัวเผา Type NXB-300 8 หัว

อุณหภูมิของแต่ละโซนจะแตกต่างกันตามหน้าที่ได้แก่ Preheating zone ทำหน้าที่ไล่ความชื้นออกจากเหล็กและให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 700-800 องศาเซลเซียส Heating zone ทำหน้าที่ให้

ความร้อนแก่เหล็กโดยตรงมีอุณหภูมิประมาณ 1100 - 1200 องศาเซลเซียส และ Soaking zone จะรักษาอุณหภูมิของเหล็กให้คงที่ประมาณ 1150 - 1200 องศาเซลเซียส ก่อนเหล็กจะออกจากเตา



รูปที่ 2 การตอบสนองอุณหภูมิของแต่ละ Zone

ในการเริ่มต้นให้ความร้อนแก่เตาอบนั้น ไม่สามารถให้ความร้อนได้อย่างรวดเร็วได้ เนื่องจากผนังเตาจะเกิดความเสียหายได้ เมื่อได้รับความร้อนเร็วเกินไป จึงมีการค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสม และรักษาอุณหภูมิคงที่นั้นไว้เป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้ผนังเตาภายในมีการปรับขยายตัวเสียก่อนแล้ว จึงเพิ่มอุณหภูมิขึ้น โดยมี Heating up curve เป็นอุณหภูมิอ้างอิงที่ต้องการของ Soaking zone ในการเปิดหัวเผาดังแสดงในรูปที่ 2

การเก็บค่าอุณหภูมิจริงในช่วงของการอุ่นเตาอบ โดยมีการเก็บค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแต่ละโซนจากเทอร์โมคัปเปิลจำนวน 2 ตัว ในปัจจุบันอัตราส่วนอากาศต่อน้ำมันเตา 10:1 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้นั้นมีประมาณ 300 องศาเซลเซียส

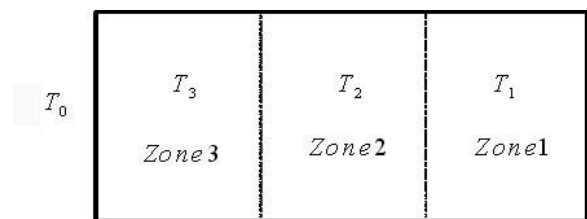
ผ.ศ.ดร.จิตติน แดงเที่ยง [2] ได้ศึกษาวิเคราะห์ค่าพลังงานความร้อนเกี่ยวกับการพาความร้อนการแผ่รังสี และการสูญเสียความร้อนต่างๆ ที่ออกจากเตาอบที่เกิดขึ้นในกระบวนการอบเหล็ก A.Kuster, G.A.J.M

Van D. [3] ได้ศึกษาวิเคราะห์วิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบแบบป้อนกลับ (Closed-loop Identification) แบบหลายตัวแปร (MIMO system identification) ของแท่งเหล็ก ด้วยวิธี (Quadratic error function) Lars M.P. ,Bjorn W. [4] ได้ศึกษาวิเคราะห์แบบจำลองทางพลวัตของแท่งเหล็กเกี่ยวกับการพาความร้อน, การนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อน Gustaaf V.D.Z. และคณะ [5] ได้ศึกษาวิเคราะห์แบบจำลองแบบ Black box model บนแท่งเหล็กเพื่อใช้หาค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบฟuzzy C.H. Lo, และคณะ [6] ได้ศึกษาวิเคราะห์การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธี Genetic algorithm L.Balbis และคณะ [7] ได้ศึกษาวิเคราะห์และหาแบบจำลองแบบ Nonlinear ของพลังงานความร้อนที่ผ่านแท่งเหล็ก Jiraphon S. และคณะ [8] ได้ศึกษาวิเคราะห์หาแบบจำลองของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดและการระบุเอกลักษณ์แบบวงปิดของเตาอบ อาทิตย์ ศรีแก้ว [9] ได้นำเสนอการใช้ Artificial Intelligence (AI) รวมทั้งการใช้ Genetic algorithm เพื่อค้นหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุด Jann N.Y. และคณะ [10] ได้นำเสนอการวิเคราะห์แบบหาค่าตัวแปรของโครงสร้างระบบแบบไม่ทราบอินพุตและเอาต์พุต โดยใช้วิธี Nonlinear least square และ Adaptive nonlinear Yao Nie และ Kai-Kuang Ma. [11] ได้นำเสนอการหาค่าตัวแปรแบบสุ่มโดยวิธี Adaptive rood pattern search ที่ได้ค่าตัวแปรที่มีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด

บทความนี้ได้นำเสนอวิธีระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิดและหลักการระบบความร้อน ในการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาอบเหล็กแบบชนิด Walking hearth ซึ่งจะได้สมการ State – Space model และประยุกต์ใช้ Nonlinear least squares และ Pattern search ในการประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากผลการตอบสนองอุณหภูมิของกระบวนการอุ่นเตาอบเหล็ก เพื่อใช้พิจารณาในการออกแบบระบบควบคุมที่เหมาะสม ในด้านการประหยัดพลังงานและลดต้นทุนในการผลิตต่อไป

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเตาอบเหล็กชนิด Walking Hearth

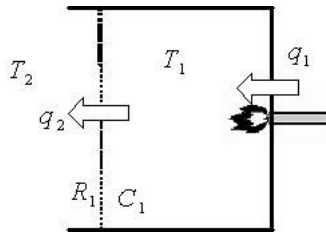
ในการวิเคราะห์ระบบมีความจำเป็นต้องทราบถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโดยประมาณ ซึ่งเราสามารถหาได้จากแบบจำลองที่ได้เคยมีการศึกษา โดยนำแบบจำลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่เกิดขึ้น หรือใช้หลักการถ่ายเทความร้อนมาวิเคราะห์หาโครงสร้างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ สำหรับเตาอบเหล็กชนิด Walking hearth ที่โรงงานสีมาผลิตเหล็ก จ. นครราชสีมา นั้น มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1 โดยแต่ละโซนจะมีเทอร์โมคัปเปิลในการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละโซน ในกรณีนี้เราจะพิจารณาระบบทั้งหมดเป็นกระบวนการไหลแบบคงตัว (Steady flow process)



รูปที่ 3. แบบจำลองอย่างง่ายของเตาอบเหล็กชนิด Walking hearth

โดยโครงสร้างของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภายใต้ข้อมูลที่สามารวัดได้ในกระบวนการอุ่นเตา เพื่อประยุกต์ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิดในการประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย ดังแสดงในรูปที่ 3 ที่สามารถนำไปออกแบบวิธีการควบคุมอุณหภูมิของระบบในการอุ่นเตาให้มีประสิทธิภาพในการทำงานตามสภาพปัจจุบัน

อุณหภูมิที่ 1- Soaking zone



รูปที่ 4. ระบบความร้อน ที่ Soaking zone

จากระบบความร้อน ได้พิจารณาถึงการถ่ายเทพลังงานความร้อนระหว่างอุณหภูมิที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4 โดยวิเคราะห์ในเทอมของ Thermal capacitance ดังสมการ

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = q_1 - q_2 \quad (1)$$

Thermal resistance ของอัตราไหลของความร้อนจากโซน 1 เข้าสู่โซน 2 จะได้

$$q_2 = \frac{T_1 - T_2}{R_1} \quad (2)$$

โดยที่ C_1 - thermal capacitance ที่โซน1

R_1 - thermal resistance ที่โซน1

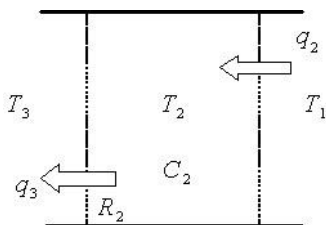
q_1 - อัตราการไหลของความร้อนเข้าสู่โซน1

q_2 - อัตราการไหลของความร้อนเข้าสู่โซน2

T_1 - อุณหภูมิที่โซน 1

T_2 - อุณหภูมิที่โซน 2

อุณหภูมิที่ 2- Heating Zone



รูปที่ 5. ระบบความร้อน ที่ Heating Zone

Thermal capacitance ของโซน 2 ดังแสดงในรูปที่ 5 เราสามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = q_2 - q_3 \quad (3)$$

Thermal resistance ของอัตราไหลของความร้อนจากโซน 2 เข้าสู่โซน 3 จะได้

$$q_3 = \frac{T_2 - T_3}{R_2} \quad (4)$$

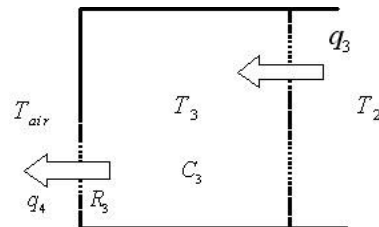
โดยที่ C_2 - thermal capacitance ที่โซน2

R_2 - thermal resistance ที่โซน2

q_3 - อัตราการไหลของความร้อนเข้าสู่โซน3

T_3 - อุณหภูมิที่โซน 3

อุณหภูมิที่ 3- Preheating Zone



รูปที่ 6. ระบบความร้อน ที่ Preheating Zone

Thermal capacitance ของโซน 3 ดังแสดงในรูปที่ 6 สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$C_3 \frac{dT_3}{dt} = q_3 - q_4 \quad (5)$$

Thermal resistance ของอัตราไหลของความร้อนจากโซน 3 ออกสู่อากาศภายนอก จะได้

$$q_4 = \frac{T_3 - T_{air}}{R_3} \quad (6)$$

โดยที่ C_3 - thermal capacitance ที่โซน3

R_3 - thermal resistance ที่โซน3

q_4 - อัตราการความร้อนสูญเสีย

T_{air} - อุณหภูมิอากาศ

เราสามารถจัดรูปแบบสมการ 4, 5 และ 6 ใหม่ได้ดังนี้

$$\dot{T}_1 = -\frac{1}{R_1 C_1} T_1 + \frac{1}{R_1 C_1} T_2 + \frac{1}{C_1} q_1 \quad (7)$$

$$\dot{T}_2 = \frac{1}{R_1 C_2} T_1 - \left(\frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2} \right) T_2 + \frac{1}{R_2 C_2} T_3 \quad (8)$$

$$\dot{T}_3 = \frac{1}{R_2 C_3} T_2 - \left(\frac{1}{R_2 C_3} + \frac{1}{R_3 C_3} \right) T_3 + \frac{1}{R_3 C_3} T_{air} \quad (9)$$

ดังนั้นเราสามารถจัดอยู่ในรูปสมการปริภูมิสถานะ

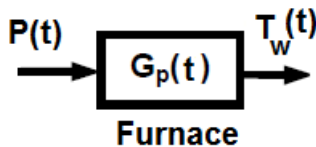
$$\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & \frac{1}{R_1 C_1} & 0 \\ \frac{1}{R_1 C_2} & -\left(\frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_2}\right) & \frac{1}{R_2 C_2} \\ 0 & \frac{1}{R_2 C_3} & -\left(\frac{1}{R_2 C_3} + \frac{1}{R_3 C_3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} q_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{R_3 C_3} \end{bmatrix} T_{air} \quad (10)$$

จากสมการที่ 10 แทนตัวแปรอย่างง่าย จะได้

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ b & -(b+c) & c \\ 0 & d & -(d+e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} q_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ e \end{bmatrix} T_{air} \quad (11)$$

$$\text{โดยที่ } a = \frac{1}{R_1 C_1}, b = \frac{1}{R_1 C_2}, c = \frac{1}{R_2 C_2}, d = \frac{1}{R_2 C_3}, \\ e = \frac{1}{R_3 C_3} \text{ และ } f = \frac{1}{C_1}$$

3. การระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิดของกระบวนการ อุณหภูมิ



รูปที่ 7. แผนภาพระบบการอุณหภูมิแบบวงเปิด

สำหรับการระบุเอกลักษณ์กระบวนการอุณหภูมิแบบวงเปิด ในการทดลองการประมาณค่าตัวแปรจะกำหนดให้จำนวนหัวเผาที่เปิด, $P(t)$ เป็นอินพุต อุณหภูมิที่วัดได้ในแต่ละโซน, $T_w(t)$ เป็นเอาต์พุต

1. การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการ โดยวิธี Nonlinear least square [8], [10] เพื่อประมาณค่าตัวแปรต่างๆ โดยตัวแปรที่เหมาะสมจะต้องทำให้ $\hat{T}_w(t) - T_w(t)$ ผลต่างกำลังสองน้อยที่สุด (least square error: LSE)

$$LSE = \sum_{i=1}^n (\hat{T}_w(t)_i - T_w(t)_i)^2 \quad (12)$$

โดยที่ n คือ จำนวนข้อมูลของอุณหภูมิที่วัดได้

$\hat{T}_w(t)$ คือ อุณหภูมิได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยที่ $w=1,2,3$

จากสมการที่ (12) จะได้

$$\text{Minimize } g(a,b,c,d,e,f) = \sum_{i=1}^n (\hat{T}_w(t)_i - T_w(t)_i)^2$$

ให้ $z = g[a,b,c,d,e,f]^T$ นั่นคือ Minimize $g(z)$

$$z_k = [a_k, b_k, c_k, d_k, e_k, f_k]^T$$

โดยที่ k คือจำนวนรอบของการคำนวณ

ที่ $k=0$ จะได้ $z_0 = [a_0, b_0, c_0, d_0, e_0, f_0]^T$

และ $B_0 = I$

เมื่อ Z_0 คือค่าตัวแปรเริ่มต้นที่กำหนดให้สำหรับการคำนวณ

$$p_k = -[B_k]^{-1} \nabla g(Z_k) \\ F(\lambda_k) = g(z_k + \lambda_k p_k) \quad (13)$$

โดยที่ $\lambda_k > 0$ จากสมการ (13) จะได้ค่า λ_k จะได้

$$Z_{k+1} = Z_k + \lambda_k p_k \\ S_k = Z_{k+1} + Z_k \\ B_{k+1} = B_k - \frac{(B_k S_k)(B_k S_k)^T}{S_k^T B_k S_k} + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T S_k}$$

ตรวจสอบ $\|\nabla g(Z_{k+1})\| < \varepsilon$ เมื่อ ε คือ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

ถ้า $\|\nabla g(Z_{k+1})\| > \varepsilon$ ทำการคำนวณใหม่จนกว่า $\|\nabla g(Z_{k+1})\| < \varepsilon$ ซึ่งทำให้ได้ Z_{k+1} ของรอบการคำนวณนั้นเป็นผลเฉลยของค่าตัวแปร

2. การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการ โดยวิธี Pattern search [11], [12] เป็นการหาค่า Minimize ของฟังก์ชัน

$$\text{Minimize } g(a,b,c,d,e,f) = \hat{T}_w(t)_i - T_w(t)_i$$

กำหนดค่าเริ่มต้น

$$x_0 = [a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}, e_{ij}, f_{ij}]$$

i, j เป็น Coordinate ที่มีค่าตั้งแต่ $-\infty$ ถึง ∞

และระยะก้าวกระโดด S

$$\begin{aligned} \text{คำนวณหาค่า } & g(x_0 + [S, 0]) \\ & g(x_0 + [0, S]) \\ & g(x_0 + [-S, 0]) \\ & g(x_0 + [0, -S]) \end{aligned}$$

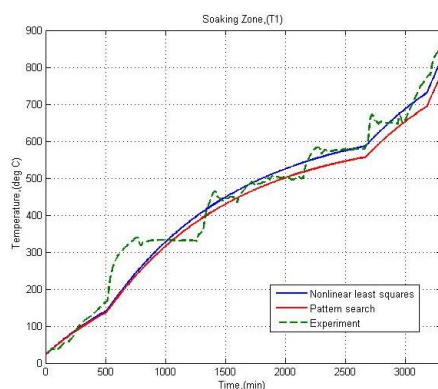
พิจารณาค่าใดมีค่าใดมีค่าใกล้เคียงกับค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่สุด เลือกค่านั้นให้เป็น x_1

ในการคำนวณหาค่า x_2 ระยะก้าวกระโดดจะเป็นสองเท่าคือ $2*[0,S], 2*[S,0], 2*[0,-S]$ และ $2*[-S,0]$ เมื่อพิจารณาค่าที่ได้ใหม่มีค่าที่ใกล้เคียงมากกว่า x_1 จะถูกกำหนดให้เป็น x_2 ในทำนองเดียวกันถ้าการคำนวณรอบที่ 3 มีค่าที่ใกล้เคียงมากกว่า x_2 ค่าที่ได้จะเป็น x_3 แต่ถ้าไม่มีค่าที่ได้ในปัจจุบันจะเป็น x_2 แต่ Pattern search จะทำการลดระยะก้าวกระโดดโดยการคูณ 0.5 แล้วทำการหาใหม่ จนกว่าระยะก้าวกระโดดจะมีค่าน้อยมากจนเข้าสู่ค่าที่กำหนดไว้

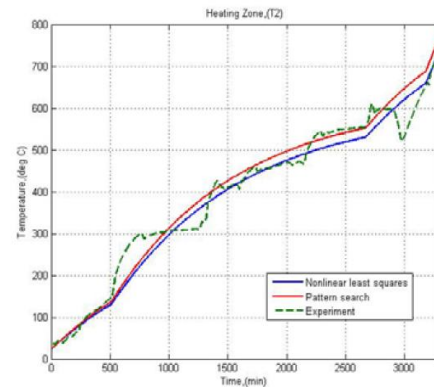
สำหรับการวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการ Nonlinear least square และ Pattern search ของโปรแกรม MATLAB

4. ผลการทดลองและจำลองสถานการณ์

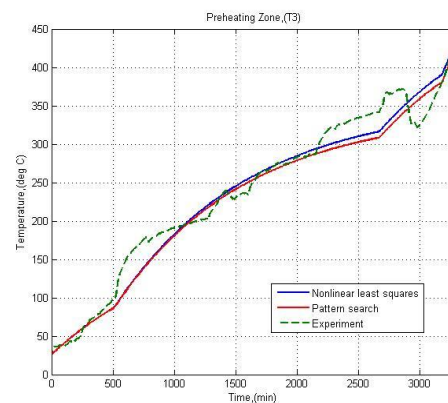
ในการทดลองการประมาณค่าตัวแปรด้วย Nonlinear least squares และ Pattern search ของกระบวนการอุ่นเตาอบเหล็กของ บริษัท ราชสีมา ผลิตเหล็ก จำกัด โดยกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิเตาอบเหล็กตาม Heating curve up



รูปที่ 8. ผลการตอบสนองอุณหภูมิของการทดลองและการประมาณแบบจำลอง ที่ T1



รูปที่ 9. ผลการตอบสนองอุณหภูมิของการทดลองและการประมาณแบบจำลอง ที่ T2



รูปที่ 10. ผลการตอบสนองอุณหภูมิของการทดลองและการประมาณแบบจำลอง ที่ T3

ผลการตอบสนองของอุณหภูมิในเกิดขึ้นจากการทดลองและการจำลองสถานการณ์ ดังแสดงในรูปที่ 8,9 และ 10 ค่าตัวแปรที่ได้จากการประมาณโดยวิธี Nonlinear least squares และ Pattern search แสดงในตารางที่ 1 ซึ่งค่าความผิดพลาดเฉลี่ยทั้ง 3 โซนของการประมาณตัวแปรเปรียบเทียบกับผลการวัดอุณหภูมิโดยวิธี Nonlinear least squares เท่ากับ 7.39533 และ Pattern search เท่ากับ 15.1496

ตารางที่ 1 ค่าประมาณตัวแปรของแบบจำลอง

ตัวแปร	ค่าประมาณ	
	Pattern search	Nonlinear least squares
<i>a</i>	0.12028	0.00888
<i>b</i>	0.92183	2.9412
<i>c</i>	0.017474	0.78088
<i>d</i>	3.1801	0.96634
<i>e</i>	2.7854	0.72051
<i>f</i>	0.15592	0.14266
<i>Error</i> *	15.1496	7.39533

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิดของระบบสำหรับเตาอบเหล็กชนิด Walking hearth เพื่อหาค่าตัวแปรด้วย Nonlinear least squares และ Pattern search ในกระบวนการอุ่นเตาอบ ซึ่งผลแสดงลักษณะการตอบสนองอุณหภูมิจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และผลการวัดอุณหภูมิมีการตอบสนองที่สอดคล้องกัน ดังนั้นการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้นั้นสามารถนำไปออกแบบการเปิด-ปิดหัวเผาสำหรับการควบคุมอุณหภูมิที่ทำให้ระบบมีการตอบสนองที่เหมาะสมกับ Heating curve up และการประหยัดพลังงานของเตาอบเหล็กโดยพิจารณาร่วมด้วยได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทราชสีมาผลิตเหล็ก จำกัดและผศ.ดร.จิตติน แดงเที่ยง ที่ให้คำแนะนำในการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ratchasima steel industry rolling mill, (1998). Reheating furnace - function specification.
- [2] จิตติน แดงเที่ยง, (2550).โครงการการศึกษาวิธีปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาอบเหล็ก,

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสถาบันเหล็กและเหล็กกล้าแห่งประเทศไทย, หน้า.1-33

[3] A Kuster and G.A.J.M van Ditzhuijzen, (1994). MIMO system identification of a slab reheating furnace, paper presented in the 3rd IEEE Conference on Control Applications, Glasgow, Scotland, UK.

[4] Lars Malcolm Pederson and Bjorn Wittenmark, (1998). On the reheat furnace control problem, paper presented in the 1998 American Control Conference, Philadelphia, USA.

[5] Gustaaf Van Ditzhuijzen.,Dirk Staaman.,Arnol Koorn, (2002). Identification and model predictive control of a slab reheating furnace, paper presented in the 2002 IEEE International Conference on Control Applications, Glasgow, Scotland, UK.

[6] C.H. Lo, K.M. Chow, Y.K. Wong, A.B. Rad ., (2001). Qualitative system identification with the use of on-line genetic algorithm, *Simulation Practice and Theory*, Vol.8(6-7), March 2001, pp.415-431.

[7] L.Balbis, J. Balderud and M. J. Grimble, (2008). Nonlinear predictive control of Steel Slab reheating furnace, paper presented in the 2008 American Control Conference, Washington, USA.

[8] Jiraphon Srisertpol, Supot Phungpimai, Pawin Jawayon,(2009).PID Closed-loop identification and design for an infrared oven, paper presented in the 9th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation, Cambridge, UK..

[9] อาทิตย์ ศรีแก้ว.(2552). ปัญญาเชิงคำนวณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.

- [10] Jann N. Yang, Hongwei Huang, Silian Lin, (2005). Sequential non-linear least square estimation for damage identification of structures, International Journal of Nonlinear Mechanics 41, pp.124-140
- [11] Yao Nie, Student Member,IEEE ,Kai-Kuang Ma , Senior Member,IEEE,(2002). Adaptive rood pattern search for fast block - matching motion estimation, IEEE Transaction on Image Processing, Vol.11 ,No.12,pp.1442-1448
- [12] A.K.AI-Othman and K.M. El-Nagger, (2007). Application of pattern search method to power system security constrained economic dispatch, World Academy of Science, Engineering and technology 25., PP.28-33