

การวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ สำหรับเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

จิระพล ศรีเสริฐผล¹ สุพจน์ ปลั่งพิมาย² และ ภาวิน จาวยล²
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันกระบวนการเตาอบเป็นกระบวนการที่สำคัญของการผลิตชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเป็นกระบวนการทำความร้อนให้กับกาวที่ใช้ในการยึดติดระหว่างชั้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้หลอดอินฟราเรด โดยมีระบบการควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ (Feedback control) ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี ปัญหาที่เกิดขึ้นกับกระบวนการควบคุมอุณหภูมิของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดที่มีอยู่หลายเครื่องในกระบวนการผลิตคือ ระบบมีการตอบสนองของอุณหภูมิไม่เป็นไปตามความต้องการ อาทิเช่น อุณหภูมิที่พุ่งสูงเกิน การตอบสนองอุณหภูมิที่ล่าช้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในกระบวนการผลิต ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นคาดว่ามีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเตาอบอินฟราเรดที่ผ่านการใช้งานมานาน จึงทำให้ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นไปตามความต้องการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคการระบุเอกลักษณ์ (System identification) ร่วมกับวิธีการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด (Response optimization) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิเคราะห์การตอบสนองของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอให้มีความเหมาะสมและสามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบให้ทำงานเป็นไปตามความต้องการ และนำเสนอเทคนิคการควบคุมแบบปรับตัวได้ ที่สามารถปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมอุณหภูมิของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดได้ทุกเครื่องให้มีการตอบสนองเป็นไปตามความต้องการสำหรับกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้ (Model Reference Adaptive System: MRAS)

คำสำคัญ : การถ่ายเทความร้อน / การระบุเอกลักษณ์ของระบบ / การตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดและแบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

² นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

Analysis and Design Adaptive Control for an Infrared Oven in Hard Disk Drive Manufacturing Process

Jiraphon Srisertpol ¹, Supot Phungphimai ², and Pawin Jawayon ²

Suranaree University of Technology, Muang, Nakhon Ratchasima 30000

Abstract

Nowadays, infrared oven heating process is an important process in hard disk drive (HDD) industry. The infrared ovens are used to heat adhesive material for attach parts of hard disk drive. PID controller with feedback signal is used to control heating process of the infrared ovens. Most of the infrared oven control systems have an important problem in temperature control because of physical change of infrared oven. Overshoot of temperature response and increasing of delay time are result from the problem. If the infrared oven control systems cannot control temperature of the process, it will lead to damage of the products. The problem may be caused from improper parameters of PID controller which are used for temperature control in infrared oven process. This paper presents system identification technique with response optimization for determination of system model parameter coefficients. This research analyzed response of the infrared oven process and design PI controller for optimization system responses. Also present an adaptive control technique based on Model Reference Adaptive System (MRAS) which can control every infrared oven in the HDD manufacturing process.

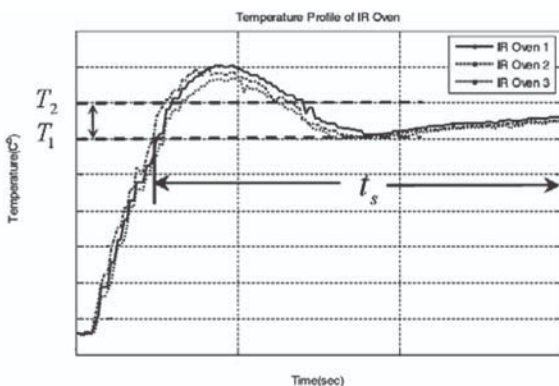
Keywords : Heat Transfer / System Identification / Response Optimization and Model Reference Adaptive System

¹ Assistant Professor, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering.

² Graduate Student, School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering.

1. บทนำ

กระบวนการผลิตชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งมีกระบวนการประกอบชิ้นงานโดยใช้กาวเพื่อยึดติดและมีการอบกาวให้แห้งโดยใช้เตาอบแบบหลอดอินฟราเรด ซึ่งจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของการอบให้อยู่ในช่วง $T_1 - T_2$ °C เป็นเวลา t_s วินาที พบว่ากระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่ไม่มีประสิทธิภาพ จะทำให้เกิดอุณหภูมิที่พุ่งเกินตามที่กำหนด ส่งผลให้เกิดความเสียหายเกิดขึ้นกับตัวชิ้นงาน จากข้อมูลการวัดอุณหภูมิของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดที่ใช้อยู่ในสายการผลิตจำนวน 3 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าอุณหภูมิของเตาอบทุกเครื่องมีค่าออกนอกช่วงที่ต้องการ อันเนื่องมาจากการพุ่งเกินของอุณหภูมิ



รูปที่ 1 ผลการตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดจำนวน 3 เครื่อง

ปัญหาที่เกิดขึ้นนั้น เกิดจากค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ไม่เหมาะสมต่อสภาพของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด ณ ปัจจุบัน จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นไปตามความต้องการ บทความนี้ได้แนะนำเสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด และใช้เทคนิคการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีไอดี พร้อมทั้งได้สร้างโปรแกรมที่สามารถปรับค่าตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับเตาอบแบบ

อินฟราเรดได้ทุกเครื่อง ให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ โดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้ บทความนี้ประกอบด้วย 8 ส่วน ส่วนที่ 2 เป็นการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่ 3 การหาโครงสร้างและการระบุเอกลักษณ์ระบบแบบป้อนกลับของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด ส่วนที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมโดยวิธีการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด และการปรับค่าตัวควบคุมให้มีการตอบสนองเป็นไปตามความต้องการสำหรับกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้ ส่วนที่ 5 นำเสนอผลการทดลองและผลการจำลองสถานการณ์ ส่วนที่ 6 เป็นสรุปและข้อเสนอแนะ

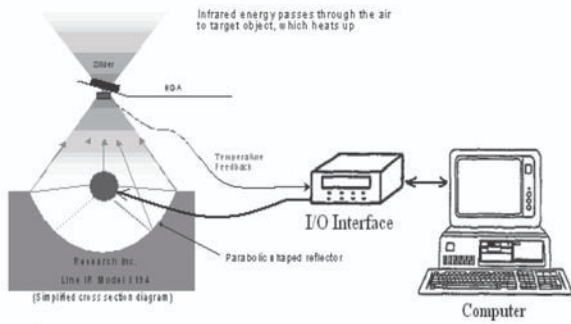
2. การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างและการตอบสนองของกระบวนการทำงานของเตาอบเพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนที่ศึกษาเกี่ยวกับการพาความร้อน การนำความร้อน และการแผ่รังสีที่เกิดขึ้น [1-2] อย่างไรก็ตาม การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการทำงานของเตาอบโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบแบบป้อนกลับ (Closed-loop Identification) ในการตอบสนองทางความร้อน [3-6] เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบตัวควบคุมอุณหภูมิแบบปรับตัวได้ [7-11]

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

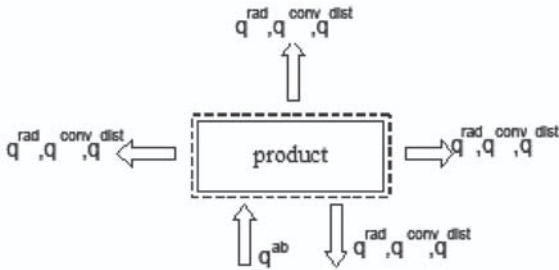
3.1 โครงสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

กระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดมีขนาด 30 x 19.6 x 62.5 นิ้ว มีชุดควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหลอดอินฟราเรด ภายในเตาอบมีเทอร์โมคัปเปิลทำหน้าที่วัดอุณหภูมิ และชุดควบคุมกระบวนการเตาอบดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

ผู้วิจัยใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของตัวชิ้นงานในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงาน

เมื่ออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของตัวชิ้นงานเท่ากับความร้อนสุทธิที่ไหลเข้ามาในตัวชิ้นงานจะได้

$$mC_p \frac{dT}{dt} = q^{rad} + q^{conv} + q^{ab} + q^{dist} \quad (1)$$

- เมื่อ m - มวลของชิ้นงาน
- C_p - ค่าความร้อนจำเพาะของชิ้นงาน
- T - อุณหภูมิของชิ้นงาน
- t - เวลา

และ q^{rad} , q^{conv} , q^{ab} และ q^{dist} เป็นความร้อน (heat flow) ที่ไหลเข้ามาในตัวชิ้นงาน คือ

- q^{rad} - radiation heat flow
- q^{conv} - convection heat flow
- q^{ab} - radiation absorbed heat flow
- q^{dist} - disturbance heat flow

การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

สมมุติให้ความร้อนแผ่รังสีออกจากหน้าตัดของตัวชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอ ตลอดทั้งหน้าตัด หรือค่าพลังงานการแผ่รังสีความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่ และขนาดหน้าตัดส่วนที่แผ่รังสีของตัวชิ้นงานมีขนาดเล็ก ดังนั้นความร้อนที่สูญเสียจากการแผ่รังสีคือ

$$q^{rad} = -\epsilon\sigma A_r T^4 \quad (2)$$

เมื่อ σ - Stefan-Boltzmann constant = $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$, ϵ - Emissivity และ A_r - พื้นที่ส่วนที่แผ่รังสีของตัวชิ้นงาน

การพาความร้อน (Convection)

การแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีการพาความร้อนระหว่างผิวสัมผัสอากาศด้านนอกของตัวชิ้นงานกับอากาศโดยรอบ คือ

$$q^{conv} = -hA_a(T - T_a) \quad (3)$$

เมื่อ h - convection heat transfer coefficient, A_a - พื้นที่หน้าตัดที่สัมผัสอากาศ และ T_a - อุณหภูมิของอากาศโดยรอบ

การดูดซับการแผ่รังสี (Radiation absorbed)

พลังงานความร้อนที่ได้รับจากหลอดอินฟราเรด (P) และความร้อนจากผนังของเตาอบ q^{wall} คือ

$$q^{ab} = FP + q^{wall} \quad (4)$$

- เมื่อ F - View factor
- P - Power input (lamp)

จากสมการที่ (1) จะได้

$$mC_p \frac{dT}{dt} = -\epsilon\sigma A_r T^4 - hA_a(T - T_a) + FP + q^{wall} + q^{dist} \quad (5)$$

จากสมการที่ (5) เป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นและพบว่าเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้นคือ $\epsilon\sigma A_r T^4$ ซึ่งสามารถประมาณ

สมการเชิงเส้นได้เมื่อกำหนดให้

$$\text{Operating point} = \bar{T}$$

โดยใช้ Taylor series จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \varepsilon\sigma A_r T^4 &\cong \varepsilon\sigma A_r \left(\bar{T}^4 + \left. \frac{dT^4}{dt} \right|_{T=\bar{T}} \right) (T - \bar{T}) \\ &\cong \varepsilon\sigma A_r (4\bar{T}^3 T - 3\bar{T}^4) \end{aligned}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (5) จะได้

$$mC_p \frac{dT}{dt} = -\varepsilon\sigma A_r (4\bar{T}^3 T - 3\bar{T}^4) - hA_a(T - T_a) + FP + q^{wall} + q^{dist} \quad (6)$$

สมการที่ (6) หารถลอดด้วย $(\varepsilon\sigma A_r 4\bar{T}^3 + hA_a)$ และ

เมื่อกำหนดให้ $P = P(t)$, $\tau = \left(\frac{mC_p}{4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a} \right)$,

$$\begin{aligned} K &= \left(\frac{F}{4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a} \right) \text{ และ} \\ \eta(t) &= 3\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^4 + hA_a T_a + q^{wall} + q^{dist} \end{aligned}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (6) จะได้

$$\tau \frac{dT}{dt} = -T(t) + KP(t) + \frac{K}{F} \eta(t) \quad (7)$$

สมการที่ (7) เขียนอยู่ในรูป Laplace transforms โดยให้เงื่อนไขเริ่มต้น $T(t) = 0$, $\dot{T}(t) = 0$ จะได้

$$T(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)} P(s) + \frac{K}{F(\tau s + 1)} \eta(s) \quad (8)$$

กำหนดให้

$$G(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)} \quad (9)$$

และ

$$G_d(s) = \frac{K}{F(\tau s + 1)} \quad (10)$$

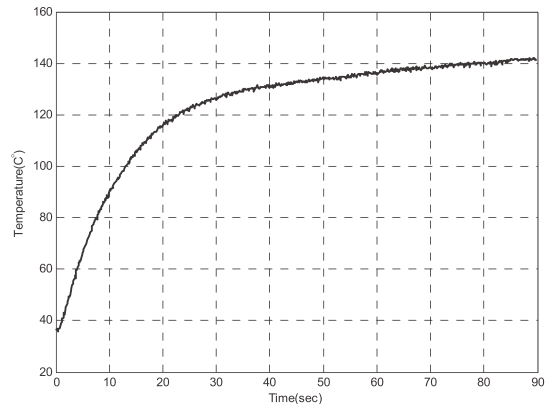
เมื่อ $G(s)$ ในสมการที่ (9) คือฟังก์ชันถ่ายโอนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของชิ้นงานและพลังงานที่ตัวชิ้นงานได้รับ $P(s)$ แต่กระบวนการเตาอบเป็นกระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนอง (Delay time) รวมอยู่ด้วย ดังนั้นประมาณได้ว่า

$$G_p(s) = G(s)e^{-ds} = \frac{Ke^{-ds}}{(\tau s + 1)} \quad (11)$$

เมื่อ K - อัตราขยาย (Gain), τ - ค่าคงตัวเวลา (Time constant) และ d - ค่าเวลาไร้ผลตอบสนอง ดังนั้นสมการที่ (8) จะได้

$$T(s) = G_p(s)P(s) + G_d(s)\eta(s) \quad (12)$$

ผลการตอบสนองของอุณหภูมิที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันได โดยอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 35 °C ที่บริเวณตัวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การตอบสนองของอุณหภูมิที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันได

จากลักษณะการตอบสนองที่เกิดขึ้น สมมุติให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นเชิงเส้น ในขั้นตอนของการประมาณค่าตัวแปรและการตอบสนองของระบบแบบอินพุตแบบขั้นบันไดคือ

$$T(t) = T_p(t) + T_r(t) \quad (13)$$

เมื่อ $T(t)$ - อุณหภูมิที่วัดที่ตัวชิ้นงาน, $T_p(t)$ - อุณหภูมิของความร้อนที่ได้รับจากหลอดอินฟราเรด และ $T_r(t)$ - อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีลักษณะแบบ Ramp

พิจารณาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ (12) และ (13) สามารถเขียนอยู่ในรูป Laplace transform จะได้

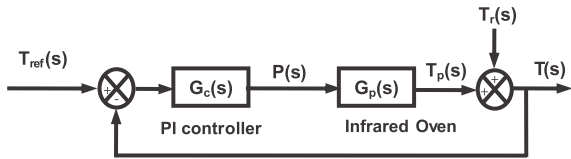
$$T(s) = G_p(s)P(s) + T_r(s) \quad (14)$$

โดยที่ $T_p(s) = G_p(s)P(s)$

และ $T_r(s) = G_d(s)\eta(s)$

3.2 การระบุเอกลักษณ์ของระบบกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

สำหรับการระบุเอกลักษณ์ของระบบกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด จะใช้สำหรับระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีโอ ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพระบบควบคุมของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดที่มีตัวควบคุมแบบพีโอ

โดยที่ $T(s)$ - อุณหภูมิของชิ้นงาน, $T_{ref}(s)$ - อุณหภูมิที่ต้องการ, $T_o(s)$ - อุณหภูมิจากหลอดอินฟราเรด และ $T_a(s)$ - อุณหภูมิอากาศ

โดยที่ ตัวควบคุมแบบพีโอคือ $G_c = \left(\frac{K_p s + K_i}{s} \right)$

ในการประมาณค่าตัวแปรของกระบวนการในระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีโอ และการตอบสนองของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีลักษณะแบบ Ramp ร่วมด้วย โดยใช้วิธีการ Nonlinear least squares สำหรับการประมาณค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดจากผลการทดลองของการตอบสนองของระบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$$T(t) = L^{-1} \left[\left(\frac{G_c G_p}{1 + G_c G_p} \right) T_{ref}(s) + \left(\frac{1}{1 + G_c G_p} \right) T_r(s) \right] \quad (15)$$

$L^{-1}(\cdot)$ - Inverse Laplace Transform

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการที่ (15) โดยวิธี Nonlinear least square เพื่อประมาณค่าตัวแปร K , τ และ d โดยตัวแปรที่เหมาะสมจะต้องทำให้ผลต่างกำลังสองน้อยที่สุด (least square error: LSE)

$$LSE = \sum_{i=1}^n (T(t_i)_i - \hat{T}(t_i)_i)^2 \quad (16)$$

โดยที่ n คือ จำนวนข้อมูลของอุณหภูมิจากการวัด และ $\hat{T}(t)$ คือ ชุดข้อมูลของอุณหภูมิจากการวัด จากสมการที่ (16) จะได้

$$\text{Minimize } f(K, \tau, d) = \sum_{i=1}^n (T(t_i)_i - \hat{T}(t_i)_i)^2$$

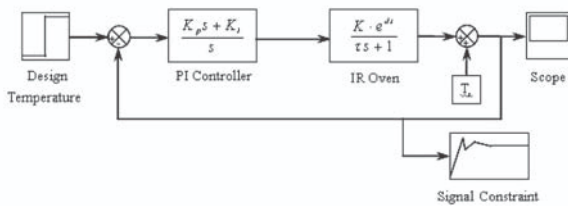
เมื่อ $z = [K \ \tau \ d]^T$ จะหา $\text{Minimize } f(z)$
 $z_k = [K_k \ \tau_k \ d_k]^T$

โดยที่ k คือจำนวนรอบของการคำนวณ สำหรับบทความนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการ Nonlinear least squares ของโปรแกรม MATLAB

4. การออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

4.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีโอ

ผลการระบุเอกลักษณ์สำหรับระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีโอ จะใช้ค่าตัวแปรเฉลี่ยเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีโอ ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพระบบควบคุมของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดในระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีโอได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพระบบควบคุมแบบปิดของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ

สำหรับการออกแบบค่าพีไอ งานวิจัยนี้ใช้วิธี Response optimization ของโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาค่าพีไอที่เหมาะสม โดยการกำหนดรูปแบบการตอบสนองของสัญญาณ output ที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันไดให้มี Percent Overshoot ไม่เกิน 5%, ค่า Rise Time น้อยกว่า 4 วินาที และค่า Settling Time น้อยกว่า 6 วินาที ซึ่งโปรแกรม MATLAB จะใช้วิธี Gradient Descent เพื่อหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีไอคือ K_p และ K_i แล้วนำค่าพีไอที่ได้ไปทดลองกับเครื่องเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของอุณหภูมิ

การหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมที่สุดจากผลการตอบสนองโดยวิธี Gradient descent แบบมีเงื่อนไขบังคับ (Output constraint) เพื่อหาค่าตัวแปร K_p และ K_i สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

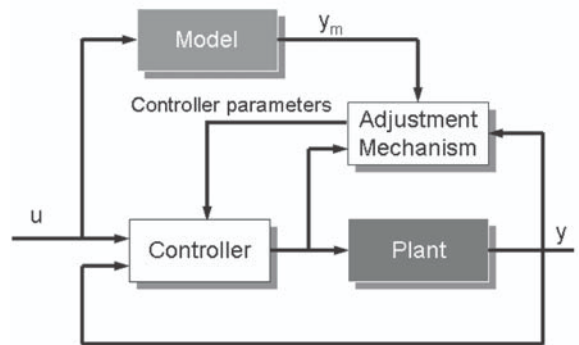
$$f(x_k) = \sum_{i=1}^n (T_i - (T_c)_i)^2$$

โดยที่ x_k คือ K_p และ K_i , T_i - ค่าอุณหภูมิของแบบจำลอง และ T_c - ค่าอุณหภูมิที่ Output constraint

วิธี Gradient descent เป็นระเบียบวิธีขั้นพื้นฐานของการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด โดยพิจารณา gradient ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ถ้าเคลื่อนจุดคำตอบไปในทิศทางของค่า gradient จากจุดเริ่มต้นใดๆ การเคลื่อนตำแหน่งของผลเฉลยในทิศทางลบ gradient จะส่งผลให้การลดลงของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด

4.2 ระบบควบคุมปรับตัวได้นิยามเชิงแบบจำลอง

ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดที่สามารถทำงานได้กับทุกเครื่อง จะใช้วิธีการ Lyapunov's Direct Method ในการสร้างอัลกอริทึมควบคุมและปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองของอุณหภูมิเป็นไปตามแบบจำลองที่อ้างอิง ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS

การควบคุมอุณหภูมิกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดที่เป็นแบบป้อนกลับและมีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้ ซึ่งตัว Adjustment เป็นอัลกอริทึมที่รับค่า output ของโมเดล (y_m), ค่า output ของ Plant (y) และ สัญญาณควบคุม (u) จะทำหน้าที่ปรับตัวควบคุมแบบพีไอของระบบ เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองเช่นเดียวกับแบบจำลองที่อ้างอิง กำหนดให้การประมาณค่าเวลาไร้ผลตอบสนองของแบบจำลองที่อ้างอิง ดังนี้

$$e^{ds} = 1 - ds$$

เมื่อ d คือค่าเวลาไร้ผลตอบสนองของแบบจำลองที่อ้างอิง ฟังก์ชันถ่ายโอนของ Plant คือ

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0s^2 + b_1s + b_2}{a_0s^2 + a_1s + a_2} \quad (17)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองที่อ้างอิง คือ

$$\frac{Y_m(s)}{U(s)} = \frac{\hat{b}_0 s^2 + \hat{b}_1 s + \hat{b}_2}{\hat{a}_0 s^2 + \hat{a}_1 s + \hat{a}_2} \quad (18)$$

โดยที่ $b_0 = -KK_p d, b_1 = KK_p - KK_i d, b_2 = KK_i$
 $a_0 = \tau - KK_p d, a_1 = 1 + KK_p - KK_i d$
 $a_2 = KK_i$
 $\hat{b}_0 = -\hat{K}\hat{K}_p \hat{d}, \hat{b}_1 = \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{K}_i \hat{d}, \hat{b}_2 = \hat{K}\hat{K}_i$
 $\hat{a}_0 = \hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p \hat{d}, \hat{a}_1 = 1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{K}_i \hat{d}$
 $\hat{a}_2 = \hat{K}\hat{K}_i$

จัดรูปสมการที่ (17) และ (18) ให้อยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับสองได้ดังสมการที่ (19) และ (20)

$$a_0 \ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_2 y = b_0 \ddot{u} + b_1 \dot{u} + b_2 u \quad (19)$$

และ

$$\hat{a}_0 \ddot{y}_m + \hat{a}_1 \dot{y}_m + \hat{a}_2 y_m = \hat{b}_0 \ddot{u} + \hat{b}_1 \dot{u} + \hat{b}_2 u \quad (20)$$

สมการที่ (19) ลบสมการที่ (20) จะได้

$$\begin{aligned} \hat{a}_0 \ddot{e} + \hat{a}_1 \dot{e} + \hat{a}_2 e = & -(a_0 - \hat{a}_0) \ddot{y} - (a_1 - \hat{a}_1) \dot{y} \\ & - (a_2 - \hat{a}_2) y + (b_0 - \hat{b}_0) \ddot{u} \\ & + (b_1 - \hat{b}_1) \dot{u} + (b_2 - \hat{b}_2) u \end{aligned} \quad (21)$$

โดยที่ $\ddot{e} = \ddot{y} - \ddot{y}_m, \dot{e} = \dot{y} - \dot{y}_m, e = y - y_m$

กำหนดให้ Lyapunov Function คือ

$$\begin{aligned} V(e, \dot{e}, K_p, K_i) = & \frac{1}{2} \left\{ \frac{\hat{a}_2}{\hat{a}_0} e^2 + \dot{e}^2 + \frac{1}{\gamma_1} (K_p - \hat{K}_p)^2 \right. \\ & \left. + \frac{1}{\gamma_2} (K_i - \hat{K}_i)^2 \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

โดยที่ γ_1 และ γ_2 คือ อัตราการปรับตัว
พิจารณาอนุพันธ์ของ Lyapunov Function

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & \frac{\hat{a}_2}{\hat{a}_0} e \dot{e} + \dot{e} \ddot{e} + \frac{1}{\gamma_1} (K_p - \hat{K}_p) \dot{K}_p \\ & + \frac{1}{\gamma_2} (K_i - \hat{K}_i) \dot{K}_i \end{aligned} \quad (23)$$

จากสมการที่ (21) และสมการที่ (23) จัดรูปสมการ จะได้

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -\frac{\hat{a}_1}{\hat{a}_0} \dot{e}^2 + \frac{1}{\gamma_1} (K_p - \hat{K}_p) \dot{K}_p + \frac{1}{\gamma_2} (K_i - \hat{K}_i) \dot{K}_i \\ & + \frac{\dot{e}}{\hat{a}_0} \{ -(a_0 - \hat{a}_0) \ddot{y} - (a_1 - \hat{a}_1) \dot{y} - (a_2 - \hat{a}_2) y \\ & + (b_0 - \hat{b}_0) \ddot{u} + (b_1 - \hat{b}_1) \dot{u} + (b_2 - \hat{b}_2) u \} \end{aligned} \quad (24)$$

จากสมการที่ (24) สมมติให้ $\tau \approx \hat{\tau}, K \approx \hat{K}$ และ $d \approx \hat{d}$ ดังนั้น

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\hat{a}_1}{\hat{a}_0} \dot{e}^2$$

$$\begin{aligned} & + \frac{1}{\gamma_1} (K_p - \hat{K}_p) \left\{ \dot{K}_p + \frac{\gamma_1 \hat{K}}{\hat{a}_0} (\hat{d} \ddot{y} - \dot{y} - \hat{d} \ddot{u} + \dot{u}) \dot{e} \right\} \\ & + \frac{1}{\gamma_2} (K_i - \hat{K}_i) \left\{ \dot{K}_i + \frac{\gamma_2 \hat{K}}{\hat{a}_0} (\hat{d} \dot{y} - y - \hat{d} \dot{u} + u) \dot{e} \right\} \end{aligned} \quad (25)$$

เมื่อ $\dot{K}_p = -\frac{\gamma_1 \hat{K}}{\hat{a}_0} (\hat{d} \ddot{y} - \dot{y} - \hat{d} \ddot{u} + \dot{u}) \dot{e}$ (26)

$\dot{K}_i = -\frac{\gamma_2 \hat{K}}{\hat{a}_0} (\hat{d} \dot{y} - y - \hat{d} \dot{u} + u) \dot{e}$ (27)

จะทำให้

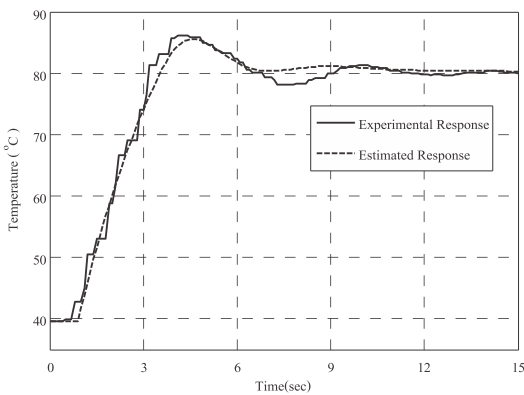
$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\hat{a}_1}{\hat{a}_0} \dot{e}^2 \quad (28)$$

จากสมการที่ (28) จะทำให้อนุพันธ์ของ Lyapunov Function เป็น Negative Semi-Definite ระบบที่สร้างขึ้นจะมีเสถียรภาพแบบ Global Stability

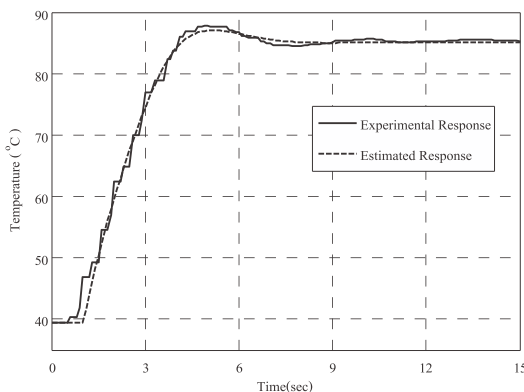
5. ผลการทดลองและการจำลองสถานการณ์

5.1 ผลของการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

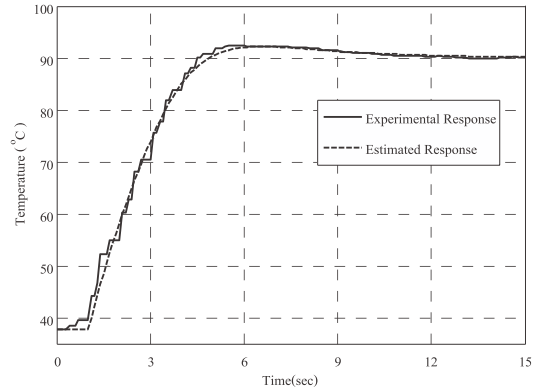
ผลการระบุเอกลักษณ์สำหรับระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ จะทดลองที่อุณหภูมิ 80, 85 และ 90 °C โดยแต่ละอุณหภูมิจะมีการปรับค่าตัวแปรพีไอที่แตกต่างกัน 3 แบบ



รูปที่ 8 ผลการตอบสนองของระบบปิดที่มีตัวควบคุมพีไอ แบบ No. 1 ที่อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ 9 ผลการตอบสนองของระบบปิดที่มีตัวควบคุมพีไอ แบบ No. 2 ที่อุณหภูมิ 85 °C



รูปที่ 10 ผลการตอบสนองของระบบปิดที่มีตัวควบคุมพีไอ แบบ No. 3 ที่อุณหภูมิ 90 °C

ตารางที่ 1 ผลของการระบุเอกลักษณ์ที่อุณหภูมิ 80 °C

No. Test	PI control parameter		Parameters of Model Identification		
	K_p	K_i	K	τ	d
1	0.6	0.12	5.097	3.498	0.899
2	0.35	0.09	4.759	3.112	0.964
3	0.27	0.075	4.852	3.511	1
ค่าเฉลี่ย			4.903	3.374	0.954

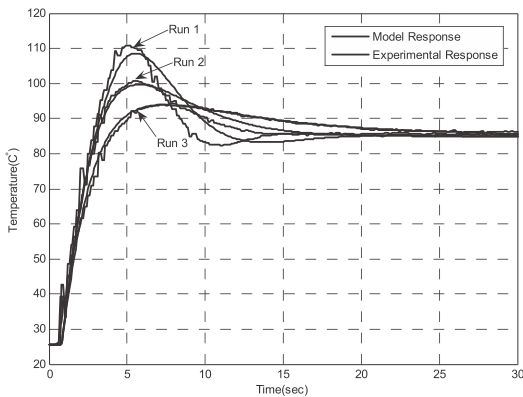
ตารางที่ 2 ผลของการระบุเอกลักษณ์ที่อุณหภูมิ 85 °C

No. Test	PI control parameter		Parameters of Model Identification		
	K_p	K_i	K	τ	d
1	0.6	0.12	5.450	3.372	1
2	0.35	0.09	5.134	3.306	1
3	0.27	0.075	5.247	3.503	0.987
ค่าเฉลี่ย			5.277	3.394	0.995

ตารางที่ 3 ผลของการระบุเอกลักษณ์ที่อุณหภูมิ 90 °C

No. Test	PI control parameter		Parameters of Model Identification		
	K_p	K_i	K	τ	d
1	0.6	0.12	6.025	3.761	0.995
2	0.35	0.09	5.860	3.762	1
3	0.27	0.075	5.899	3.794	1
ค่าเฉลี่ย			5.928	3.772	0.998

เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของอุณหภูมิที่ต่างกันในแต่ละ การตอบสนองของอุณหภูมิที่ต้องการดังผลที่แสดงในรูป 8, 9 และ 10 และผลการประมาณค่าตัวแปรของระบบที่ อุณหภูมิ 80, 85 และ 90°C ดังแสดงในตารางที่ 1, 2 และ 3 พิจารณาค่าตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดที่ได้จาก ผลการทดลองทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยของทุกอุณหภูมิ คือ $K = 5.369$, $\tau = 3.513$ sec และ $d = 0.983$ sec จากนั้นเปรียบเทียบผลการตอบสนองระหว่างแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่ได้กับค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ที่มีต่ออินพุต แบบขั้นบันไดที่ 85 °C ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 การตอบสนองของระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้ค่าเฉลี่ยตัวแปรของระบบที่ 85 °C

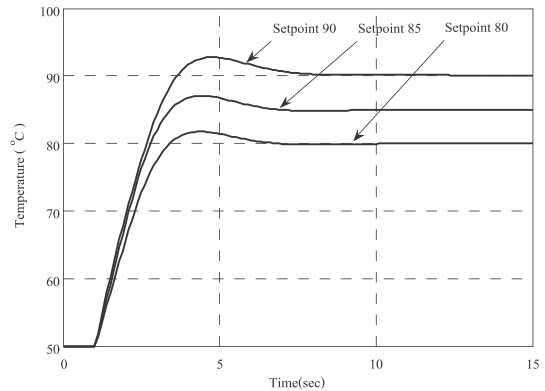
ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยของตัวแปรของระบบ

No. Test	PI control parameter		Parameters of Identification Model		
	K_p	K_i	K	τ	d
Run 1	0.6	0.12	5.369	3.513	0.983
Run 2	0.35	0.09			
Run 3	0.27	0.075			

5.2 ผลการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ

ผลการระบุเอกลักษณ์สำหรับระบบปิดที่มีตัว ควบคุมแบบพีไอ จะใช้ค่าตัวแปรเฉลี่ยในตารางที่ 4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดเพื่อนำไป

ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ โดยวิธีการหาค่า ที่เหมาะสมที่สุด ค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีไอที่ได้คือ $K_p = 0.38$, $K_i = 0.13$ เมื่อ $T_r = 50$ °C ดังแสดงผล การตอบสนองดังรูปที่ 12



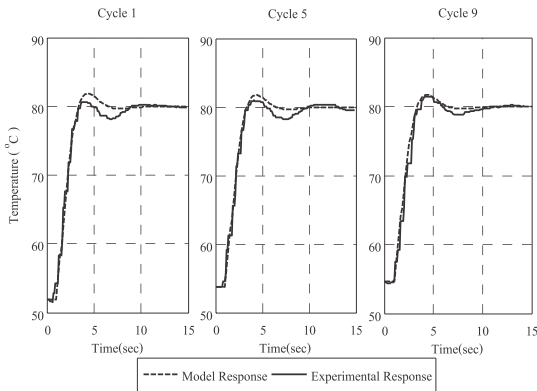
รูปที่ 12 ผลการตอบสนองของการออกแบบตัวควบคุม แบบพีไอ สำหรับเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

5.3 ผลการควบคุมแบบปรับตัวได้ชนิดอ้างอิง แบบจำลอง

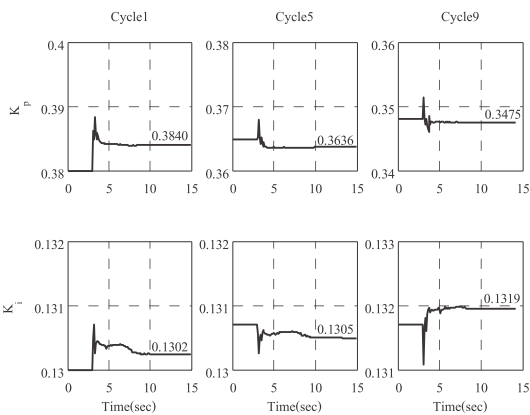
ในการทดสอบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ชนิด อ้างอิงแบบจำลองของกระบวนการเตาอบแบบหลอด อินฟราเรดกับตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้อัลกอริทึมที่ สร้างขึ้นด้วยวิธี Lyapunov's Direct Method เพื่อทำ หน้าที่ปรับค่าตัวควบคุมแบบพีไอของระบบเพื่อให้ระบบมี การตอบสนองเป็นไปตามแบบจำลองที่อ้างอิงที่มีต่ออินพุต แบบขั้นบันได ซึ่งเป็นรูปแบบการตอบสนองที่ต้องการ โดยกำหนดให้ผลการตอบสนองมีค่า Percent Overshoot ไม่เกิน 5%, ค่า Rise Time น้อยกว่า 4 วินาที และค่า Settling Time น้อยกว่า 6 วินาที และทดลองที่อุณหภูมิ 80°C และ 90°C โดยแบบจำลองอ้างอิงจะมีค่า $K = 5.369$, $\tau = 3.513$ sec และ $d = 0.983$ sec และตัวควบคุม แบบพีไอมีค่า $K_p = 0.38$, $K_i = 0.13$ ซึ่งอัลกอริทึมที่ใช้ ปรับค่าของตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม $K_p = 0.38$, $K_i = 0.13$ และอัตราการปรับตัว $\gamma_1 = 0.00005$ และ $\gamma_2 = 0.00001$

การทดลองครั้งแรก ได้พิจารณาที่อุณหภูมิ 80 °C ผล การตอบสนองของอุณหภูมิของ Plant เทียบกับแบบ

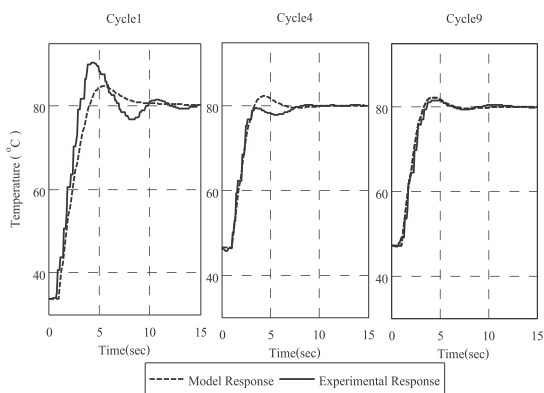
จำลองอ้างอิงและการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีและไอของเตาอบเครื่องที่ 1 แสดงดังรูปที่ 13 และ 14 ตามลำดับ และได้ทดสอบกับเตาอบเครื่องที่ 2 ผลการตอบสนองอุณหภูมิและการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีและไอ แสดงดังรูปที่ 15 และ 16 ตามลำดับ



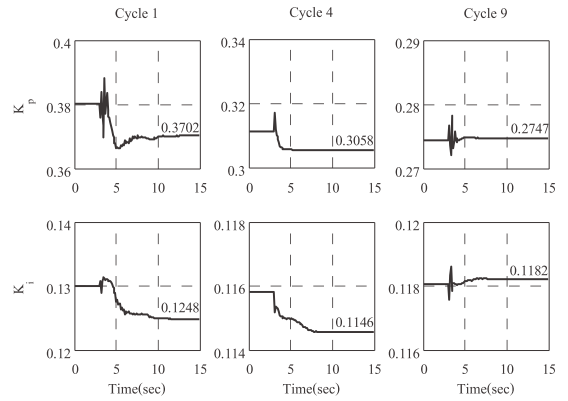
รูปที่ 13 การตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบเครื่องที่ 1



รูปที่ 14 การตอบสนองตัวควบคุมพีไอของเตาอบเครื่องที่ 1



รูปที่ 15 การตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบเครื่องที่ 2



รูปที่ 16 การตอบสนองตัวควบคุมพีไอของเตาอบเครื่องที่ 2

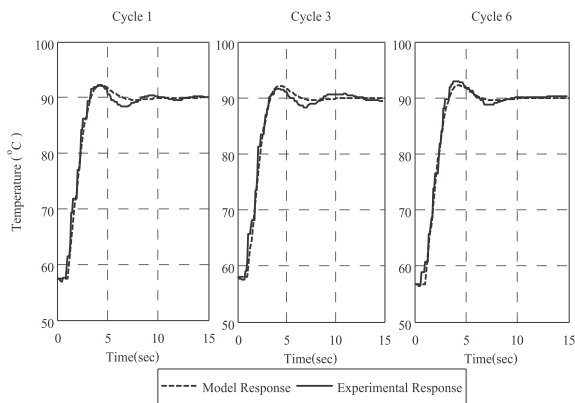
ผลการตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบแบบอินฟราเรดเครื่องที่ 1 ที่อุณหภูมิ 80 °C ในรอบแรก (Cycle 1) มีตอบสนองที่ช้า (settling time 8.4 วินาที) และมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 52 °C หลังจากอัลกอริทึมทำงานไปถึง Cycle 9 ตัวควบคุมได้ปรับค่าเป็น $K_p = 0.347$, $K_i = 0.131$ จนลักษณะการตอบสนองของระบบเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิง และการตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบแบบอินฟราเรดเครื่องที่ 2 ใน Cycle 1 ลักษณะการพุ่งเกินของอุณหภูมิ 15.62% การตอบสนองที่ช้า (settling time 10.2 วินาที) และมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 34 °C เมื่ออัลกอริทึมทำงานจนถึง Cycle 9 ค่าตัวควบคุมได้ปรับค่าเป็น $K_p = 0.274$, $K_i = 0.118$ การตอบสนองของระบบเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงเช่นกัน ดังรายละเอียดการตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบแบบอินฟราเรดที่อุณหภูมิ 80 °C แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบแบบอินฟราเรด ที่ 80 °C

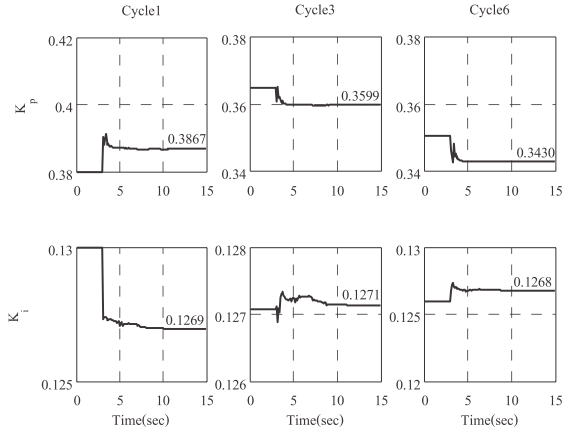
Temperature response of 1 st infrared oven				
Cycle	Maximum Overshoot (°C)	Percent Overshoot (%)	Rise time (sec)	Settling time (2%) (sec)
1	80.5	0.62	3.7	8.4
9	82	2.5	3.7	5.5
Temperature response of 2 nd infrared oven				
Cycle	Maximum Overshoot (°C)	Percent Overshoot (%)	Rise time (sec)	Settling time (2%) (sec)
1	92.5	15.62	3.1	10.2
9	81.7	2.12	3.7	5.5

ในการทดลองครั้งที่สองได้ทดสอบที่อุณหภูมิ 90 °C ผลการตอบสนองของอุณหภูมิของ Plant เทียบกับแบบจำลองอ้างอิงและการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีและไอของเตาอบเครื่องที่ 1 แสดงดังรูปที่ 17 และ 18 ตามลำดับ และได้ทดสอบกับเตาอบเครื่องที่ 2 ผลการตอบสนองอุณหภูมิและการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีและไอ แสดงดังรูปที่ 19 และ 20 ตามลำดับ

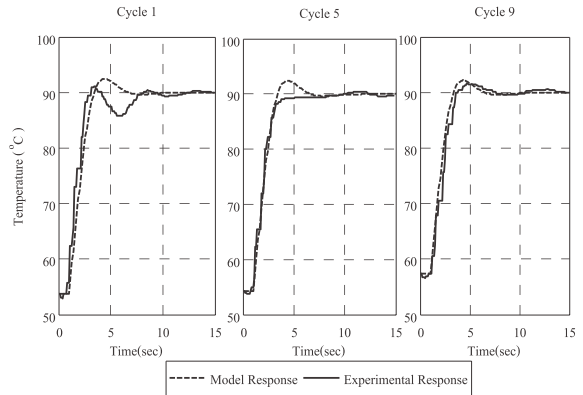
ผลการตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบแบบอินฟราเรดเครื่องที่ 1 ที่อุณหภูมิ 90 °C ใน Cycle 1 มีตอบสนองที่ช้า (settling time 7.3 วินาที) และมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 58 °C ลักษณะการตอบสนองของระบบได้ปรับเปลี่ยนเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิง เมื่ออัลกอริทึมทำงานที่ Cycle 6 ตัวควบคุมได้ปรับค่าเป็น $K_p = 0.343$, $K_i = 0.126$ และการตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบแบบอินฟราเรด เครื่องที่ 2 ใน Cycle 1 มีลักษณะการตอบสนองที่ช้า (settling time 8.2 วินาที) และมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 34 °C เมื่อตัวควบคุมได้ปรับค่า $K_p = 0.266$, $K_i = 0.112$ ที่ Cycle 9 จะทำให้การตอบสนองของระบบเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงเช่นกัน รายละเอียดของการตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบแบบอินฟราเรด ที่อุณหภูมิ 90 °C ดังแสดงในตารางที่ 6



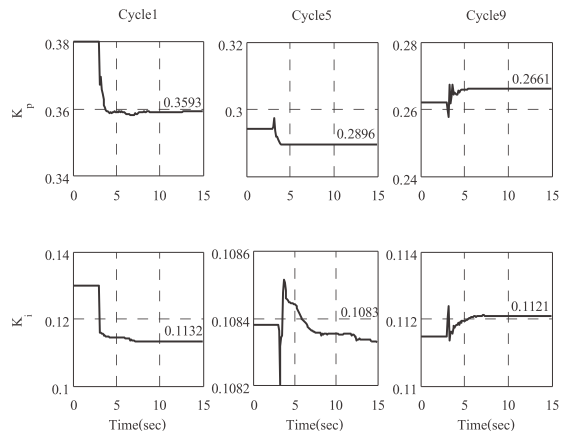
รูปที่ 17 การตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบเครื่องที่ 1



รูปที่ 18 การตอบสนองตัวควบคุมพีไอของเตาอบเครื่องที่ 1



รูปที่ 19 การตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบเครื่องที่ 2



รูปที่ 20 การตอบสนองตัวควบคุมพีไอของเตาอบเครื่องที่ 2

ตารางที่ 6 ผลการตอบสนองอุณหภูมิของเตาอบแบบอินฟราเรด ที่ 90 °C

Temperature response of 1 st infrared oven				
Cycle	Maximum Overshoot (°C)	Percent Overshoot (%)	Rise time (sec)	Settling time (2%) (sec)
1	92.5	2.77	3.7	7.3
6	92.8	3.11	3.7	5.5
Temperature response of 2 nd infrared oven				
Cycle	Maximum Overshoot (°C)	Percent Overshoot (%)	Rise time (sec)	Settling time (2%) (sec)
1	90.5	0.55	3.2	8.2
9	91.8	2	3.8	5.5

ผลการตอบสนองของอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดทั้งสองเครื่องนั้น เป็นไปตามหลักการของระบบควบคุมปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง คือระบบจะพยายามปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีและไอ เพื่อให้กระบวนการเตาอบทั้งสองเครื่องมีการตอบสนองเช่นเดียวกับแบบจำลองอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถใช้งานได้กับเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดลักษณะเดียวกันทุกเครื่อง

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์สำหรับหาค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดโดยวิเคราะห์การตอบสนองของแบบจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลทดลองในระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอโดยใช้วิธีการ Nonlinear least squares ซึ่งค่าตัวแปรที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์นั้นเป็นค่าตัวแปรโดยประมาณ จากผลการทดสอบพบว่าค่าตัวแปรของแบบจำลองที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ดังกล่าวนี้ สามารถนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอโดยวิธีตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด ที่ให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเป็นไปตามความต้องการ

ค่าตัวแปรของระบบที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์นี้เป็นค่าตัวแปรโดยประมาณ ซึ่งได้มาจากการทดลอง

ในช่วงอุณหภูมิที่ 80-90 °C และสามารถนำไปใช้ในการออกตัวควบคุมแบบพีไอที่เหมาะสมในการควบคุมอุณหภูมิในช่วงดังกล่าว ดังนั้นถ้าต้องการออกตัวควบคุมแบบพีไอที่เหมาะสมในการควบคุมอุณหภูมิในช่วงอื่นๆ ต้องทำการทดลองในช่วงอุณหภูมินั้นๆ และใช้ในการประมาณค่าตัวแปร เพื่อให้ได้ค่าตัวแปรของระบบที่เหมาะสมในการออกแบบพีไอในช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ จากศึกษาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองของอุณหภูมิพบว่ากระบวนการเตาอบเป็นกระบวนการที่มีเวลาไรผลตอบสนองประมาณ 1 วินาที ซึ่งถ้าสามารถลดเวลาไรผลตอบสนองได้ก็จะสามารถลดเวลาของกระบวนการอบได้ ซึ่งจะทำให้อัตราการผลิตชิ้นงานเพิ่มขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบควบคุมปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลองของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีไอโดยใช้อัลกอริทึมแบบปรับตัวได้จากวิธีการของ Lyapunov's Direct Method ทำหน้าที่ปรับตัวควบคุมแบบพีไอของระบบเพื่อให้ระบบมีการตอบสนองเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงซึ่งเป็นรูปแบบการตอบสนองที่ต้องการ ผลการทดลองตัวควบคุมพีและไอมีการปรับตัวเพื่อทำให้การตอบสนองของ Plant มีลักษณะการตอบสนองใกล้เคียงกับแบบจำลองอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และวิธีการการควบคุมที่ปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลองสามารถใช้ควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดทุกเครื่องให้มีการตอบสนองเป็นไปตามความต้องการ

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านการผลิตขั้นสูงในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และบริษัทซีเทค เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด และขอขอบคุณ ศ.นท.ดร. สรวาภูมิ สุจิตจร ที่ให้คำแนะนำในการวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

1. Choi, J.Y. and Do, H.M., 2001, "A Leaning Approach of Wafer Temperature Control in a Rapid Thermal Processing System", *IEEE Transactions on*

Semiconductor Manufacturing, Vol. 14, No. 1, pp. 1-10.

2. Lord, H.A., 1988, "Thermal and Stress Analysis of Semiconductor Wafers in a Rapid Thermal Processing Oven", *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 1, No. 3, pp. 105-114.

3. Wonhui, Cho, Thomas F. Edgar, and Jietae Lee, 2006, "Closed Loop Identification of Wafer Temperature Dynamics in a Rapid Thermal Process", *Korean Journal of Chemistry Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 171-175.

4. Yeo, Y.K., Kwon, T.I., and Lee, K.W., 2004, "An Energy Effective PID Tuning Method for the Control of Polybutadiene Latex Reactor Based on Closed-loop Identification", *Korean Journal of Chemistry Engineering*, Vol. 21, No. 5, pp. 935-941.

5. Pramod, S. and Chidambaram, M., 2000, "Closed Loop Identification of Transfer Function Model for Unstable Bioreactors for Tuning PID Controller", *Bioprocess Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 185-188.

6. Stephen, A. Norman.,1992, "Optimization of

Transient Temperature Uniformity in RTP Systems", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 39, No. 1, pp. 205-207.

7. Lin, C.A. and Jan, Y.K., 2001, "Control System Design for a Rapid Thermal Processing System", *IEEE Transactions on Control System Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 122-129.

8. Choi, J.Y., Do, H.M., and Choi, H.S., 2003, "Adaptive Control Approach of Rapid Thermal Processing", *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 16, No. 4, pp. 621-632.

9. Karl J. Astrom and Bjorn Wittenmark, 1995. *Adaptive Control*, Addison Wesley, pp. 185-262.

10. Qian Xinhua, Jia Shiyang, Su Xing, Chen Yue, Wang Kefeng, and Yao Pingling, 2010, "Adaptive On-line Operation Guide for Dry Gas-to-Ethylbenzene Reactor", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 419-424.

11. Guang Qu and M. Zaheeruddin, 2010, "Online H_{∞} Adaptive Tuning of PI-Controllers for Discharge Air Temperature System", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, Issue 6, pp. 1179-1195.