

การควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

โดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้

Temperature Control of Infrared Oven Process using

Model Reference Adaptive System

จิระพล ศรีเสริฐผล* สุพจน์ ปลั่งพิมายและ ชาญยุทธ ขจรไตรเดช

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

*E-mail : jiraphon@sut.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 044-223117, เบอร์โทรสาร 044-223119

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด เป็นการให้ความร้อนกับกาวที่ใช้ในการยึดติดระหว่าง ชิ้นส่วนของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมี การควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ที่มีตัวควบคุมแบบ PID เป็นกระบวนการที่สำคัญของกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ปัญญาที่เกิดขึ้นต่อ การควบคุมอุณหภูมิของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดหลายเครื่อง เมื่อเตาอบได้ผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาหนึ่ง จะมีผลการตอบสนองของอุณหภูมิของเตาอบไม่เป็นไปตามความต้องการ เช่น อุณหภูมิที่พุ่งสูงเกิน การตอบสนองที่ช้า ส่งผลให้เกิดความเสียหายในกระบวนการผลิต ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้น ดังกล่าว มีสาเหตุมาจากการ เปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด จึงทำให้ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบ PID ที่ใช้อยู่มีค่าไม่เหมาะสม จึงทำให้ประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นไปตามความต้องการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอ วิธีการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดโดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้ (Model Reference Adaptive System) เพื่อปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบ PI สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดได้ทุกเครื่องให้มีการตอบสนองเป็นไปตามความต้องการ ทั้งนี้ได้ใช้วิธีระบุเอกลักษณ์ (System identification) และการตอบสนองเหมาะสมที่สุด (Response optimization) ในการวิเคราะห์หา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

คำหลัก: การถ่ายเทความร้อน, ทัศนวิสัยควบคุม, การตอบสนองเหมาะสมที่สุด และแบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้

Abstract

The oven process is processes by heating the electronic component adhesive nowadays. The oven temperature is controlled using PID feedback control system. It is one of significant step for electronic manufacturing process. However, this type of control system often cause temperature over rising and lead in product damaging. The over temperature problem is suspect to be taken from physical changing of oven. This change makes PID control parameters not appropriate to that new condition and

result in low efficiency of its control system. This paper is presents temperature control of infrared oven process using Model reference adaptive system for adjust PI controller and can be applied to control the temperature of infrared oven process in the case of difference machine. Moreover, via identification technique and optimize response to evaluate mathematical model coefficients and design PI controller for infrared oven process.

Keywords: Heat Transfer, Control Theory, Response optimization and Model Reference Adaptive System

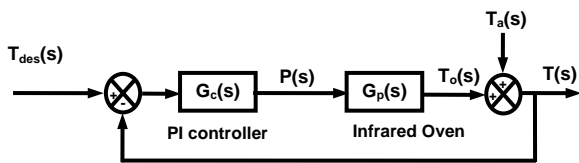
1. บทนำ

กระบวนการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สำหรับ โรงงานอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีกระบวนการ ประกอบชิ้นงาน โดยใช้กาวเพื่อยึดติด และมีการอบ กาวให้แห้งโดยใช้เตาอบแบบหลอดอินฟราเรด ซึ่งใน การควบคุมอุณหภูมิของการอบให้อยู่ในช่วง $T_1 - T_2$ $^{\circ}\text{C}$ และระยะเวลาในการอบเป็นเวลา t_s วินาที พบว่า กระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่ไม่มีประสิทธิภาพ จะ ทำให้เกิดอุณหภูมิที่เกินตามที่กำหนด ส่งผลให้เกิด ความเสียหายเกิดขึ้นกับตัวชิ้นงาน จากข้อมูลการวัด อุณหภูมิของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดที่ใช้อยู่ใน สายการผลิต พบว่า การตอบสนอง อุณหภูมิของเตาอบ ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ อันเนื่องมาจากการฟุ้งเกิน ของอุณหภูมิประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้น มาจากการใช้ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบ PID ที่ ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุม อุณหภูมิลดลง การแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นดังกล่าวใน ปัจจุบันคือการใช้วิธี วิธี ระบุเอกลักษณ์ และการ ตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด ในการวิเคราะห์หา แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และออกแบบ ตัวควบคุม ของแต่ละเครื่อง ซึ่งเป็นวิธียุ่งยากและเสียเวลาอย่าง มากในการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมสำหรับ กระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด ที่มีจำนวน มากกว่า 50 เครื่อง สำหรับงานวิจัยนี้ได้ ประยุกต์ใช้ วิธีการควบคุมปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง [10] ที่สามารถช่วย ในการ ปรับค่าตัวแปรของตัว ควบคุม สำหรับ กระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดทุก เครื่อง ให้สามารถ ตอบสนองได้ เป็นไปตาม ความ ต้องการ

Choi J.Y. และ Do, H.M.[1] ได้ศึกษาวิเคราะห์ โครงสร้างและองค์ประกอบของกระบวนการทำงาน ของเตาอบ ที่มีหลอด Tungsten-Halogen เป็นตัวให้ ความร้อน Lord, H. A. [2] ได้วิเคราะห์การถ่ายเท ความร้อนที่ศึกษาเกี่ยวกับการพาความร้อน , การนำ ความร้อน และ การแผ่รังสีที่เกิดขึ้นในกระบวนการเตา อบ งานวิจัยของ Wonhui Cho.[3] ได้ศึกษาการ ตอบสนองทางความร้อนของระบบ และแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบการควบคุม กระบวนการเตาอบ Wonhui Cho, Thomas F. Edgar และ Jietae Lee.[4] ได้เสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ ระบบแบบป้อนกลับ (Closed-loop Identification) ใน การตอบสนองทางความร้อนของตัว wafer โดยใช้ วิธีการ Nonlinear least squares เพื่อหาค่าตัวแปรใน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบ แบบหลอด Tungsten-Halogen นอกจากนั้นได้มีการ ใช้ วิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบที่มีการควบคุมแบบ ป้อนกลับดังงานวิจัยของ Yeo, Y K., Kwon, T. I., Lee, K. W.[5] และ Pramod, S.,Chidambaram, M [6] สำหรับงานวิจัยของ Lin, C. A. and Jan, Y. K.[7] ได้นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมในกระบวนการ เตาอบ Choi, J. Y., Do, H. M., Choi, H. S.[8] และ Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark [10] เสนอการใช้ ควบคุมแบบปรับตัวได้มาใช้ในการควบคุมและ Stephen, A. Norman,[9] ได้เสนอเทคนิคการหาค่า เหมาะสมที่สุดในการควบคุมกระบวนการเตาอบ จิระ พล ศรีเสริฐผลและคณะ [11] ได้ออกแบบและวิเคราะห์ หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบ แบบหลอดอินฟราเรดโดยใช้วิธีระบุเอกลักษณ์และการ ตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

กระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด เป็นกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบปิด ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ มีชุดควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหลอดอินฟราเรด ภายในเตาอบมีเทอร์โมคัปเปิลทำหน้าที่วัดอุณหภูมิ ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด สามารถหาได้โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์และการตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด [11] ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพระบบควบคุมของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ

โดยที่ $T(s)$ คือ อุณหภูมิของชิ้นงาน, $T_{des}(s)$ คือ อุณหภูมิที่ต้องการ, $T_o(s)$ คือ อุณหภูมิจากหลอดอินฟราเรดและ $T_a(s)$ คือ อุณหภูมิอากาศ

กระบวนการเตาอบเป็นกระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนอง (Delay time) รวมอยู่ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s)$ เราประมาณได้

$$\frac{T_o(s)}{P(s)} = G_p(s) = \frac{Ke^{-ds}}{(\tau s + 1)} \quad (1)$$

โดยที่ K คือ อัตราขยาย (Gain)

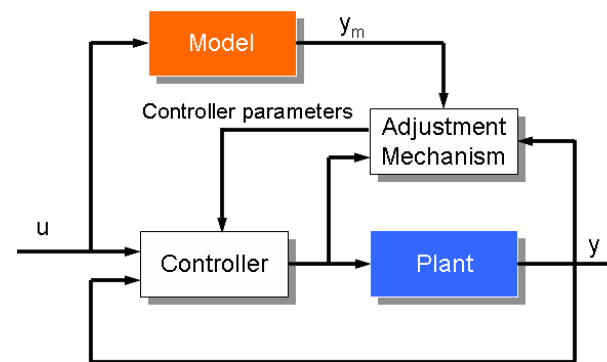
τ คือ ค่าคงตัวเวลา (Time constant)

และ d คือ ค่าเวลาไร้ผลตอบสนอง

3. ระบบควบคุมปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง

จากการออกแบบและวิเคราะห์การควบคุมอุณหภูมิสำหรับกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดนั้น [11] เราสามารถใช้ตัวควบคุมแบบ PI ซึ่งมีประสิทธิภาพพอเพียงต่อการควบคุมดังกล่าวได้ ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิ กระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด ที่เป็นแบบป้อนกลับและมีตัวควบคุมแบบ PI โดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัว

ได้ ซึ่งในการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบ PI ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดจะใช้ วิธีการ Lyapunov's Direct Method ในการสร้างตัว Adjustment mechanism ที่ทำหน้าที่รับค่า output ของแบบจำลองที่อ้างอิง (y_m), ค่า output ของ Plant (y) และปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบ PI ของระบบ เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองเช่นเดียวกับแบบจำลองที่อ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS

กำหนดให้การประมาณค่าเวลาไร้ผลตอบสนองของแบบจำลองที่อ้างอิง ดังนี้

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

เมื่อ d คือค่าเวลาไร้ผลตอบสนองของแบบจำลองที่อ้างอิง

ฟังก์ชันถ่ายโอนของ Plant คือ

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \quad (2)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลองที่อ้างอิง คือ

$$\frac{Y_m(s)}{U(s)} = \frac{\hat{b}_0 s^2 + \hat{b}_1 s + \hat{b}_2}{\hat{a}_0 s^2 + \hat{a}_1 s + \hat{a}_2} \quad (3)$$

โดยที่ $b_0 = -KK_p d, b_1 = KK_p - KK_i d, b_2 = KK_i$

$$a_0 = \tau - KK_p d, a_1 = 1 + KK_p - KK_i d$$

$$a_2 = KK_i$$

$$\hat{b}_0 = -\hat{K}\hat{K}_p d, \hat{b}_1 = \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{K}_i d, \hat{b}_2 = \hat{K}\hat{K}_i$$

$$\hat{a}_0 = \hat{\tau} - \hat{K}\hat{K}_p d, \hat{a}_1 = 1 + \hat{K}\hat{K}_p - \hat{K}\hat{K}_i d$$

$$\hat{a}_2 = \hat{K}\hat{K}_i$$

ตัวควบคุมแบบ PI คือ $G_c(s) = \left(\frac{K_p s + K_i}{s} \right)$

ทำการจัดรูปสมการที่ (2) และ (3) ให้อยู่ในรูปของอนุพันธ์อันดับสอง

$$\begin{aligned} \hat{a}_0 \ddot{e} + \hat{a}_1 \dot{e} + \hat{a}_2 e = & -(a_0 - \hat{a}_0) \ddot{y} - (a_1 - \hat{a}_1) \dot{y} \\ & - (a_2 - \hat{a}_2) y + (b_0 - \hat{b}_0) \ddot{u} + (b_1 - \hat{b}_1) \dot{u} + (b_2 - \hat{b}_2) u \end{aligned} \quad (4)$$

โดยที่ $\ddot{e} = \ddot{y} - \ddot{y}_m$, $\dot{e} = \dot{y} - \dot{y}_m$, $e = y - y_m$
กำหนดให้ Lyapunov Function คือ

$$V(e, \dot{e}, K_p, K_i) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\hat{a}_2}{\hat{a}_0} e^2 + \dot{e}^2 + \frac{1}{\gamma_1} (K_p - \hat{K}_p)^2 + \frac{1}{\gamma_2} (K_i - \hat{K}_i)^2 \right\} \quad (5)$$

โดยที่ γ_1 และ γ_2 คือ อัตราการปรับตัว พิจารณาอนุพันธ์ของ Lyapunov Function

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & \frac{\hat{a}_2}{\hat{a}_0} e \dot{e} + \dot{e} \ddot{e} + \frac{1}{\gamma_1} (K_p - \hat{K}_p) \dot{K}_p \\ & + \frac{1}{\gamma_2} (K_i - \hat{K}_i) \dot{K}_i \end{aligned} \quad (6)$$

จากสมการที่ (4) และสมการที่ (6) และสมมติให้ $\tau \approx \hat{\tau}$, $k \approx \hat{k}$ และ $d \approx \hat{d}$ เราจะได้

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} = & -\frac{\hat{a}_1}{\hat{a}_0} \dot{e}^2 \\ & + \frac{1}{\gamma_1} (K_p - \hat{K}_p) \left\{ \dot{K}_p + \frac{\gamma_1 \hat{K}}{\hat{a}_0} (\hat{d} \dot{y} - \dot{y} - \hat{d} \ddot{u} + \ddot{u}) \dot{e} \right\} \\ & + \frac{1}{\gamma_2} (K_i - \hat{K}_i) \left\{ \dot{K}_i + \frac{\gamma_2 \hat{K}}{\hat{a}_0} (\hat{d} \dot{y} - \dot{y} - \hat{d} \dot{u} + \dot{u}) \dot{e} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

เมื่อ

$$\dot{K}_p = -\frac{\gamma_1 \hat{K}}{\hat{a}_0} (\hat{d} \dot{y} - \dot{y} - \hat{d} \ddot{u} + \ddot{u}) \dot{e} \quad (8)$$

$$\dot{K}_i = -\frac{\gamma_2 \hat{K}}{\hat{a}_0} (\hat{d} \dot{y} - \dot{y} - \hat{d} \dot{u} + \dot{u}) \dot{e} \quad (9)$$

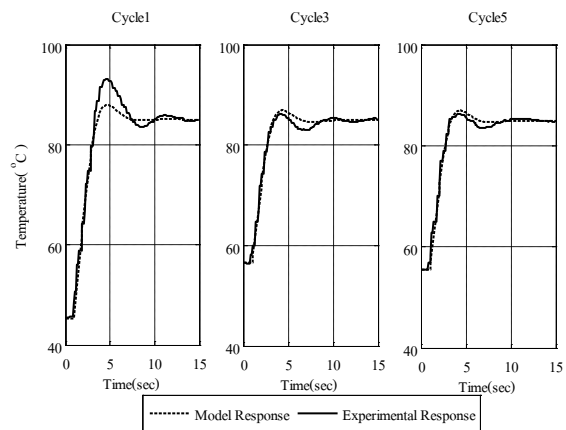
จะทำให้

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{\hat{a}_1}{\hat{a}_0} \dot{e}^2 \quad (10)$$

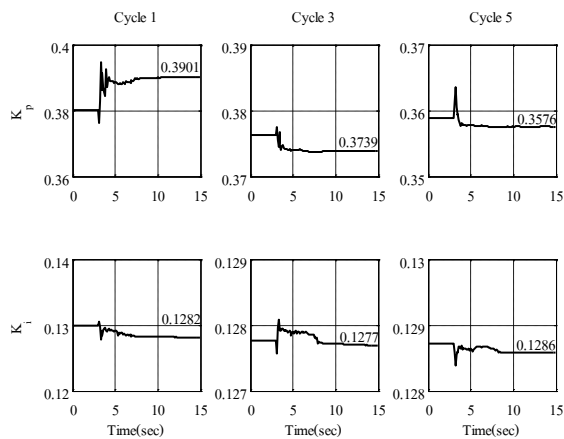
จากสมการที่ (10) จะทำให้อนุพันธ์ของ Lyapunov Function เป็น Negative Semi-Definite ระบบที่สร้างขึ้นจะมีเสถียรภาพแบบ Global Stability

4. ผลการทดลอง

ในการทดลองระบบควบคุมปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลองของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดโดยใช้อัลกอริทึมที่ได้จากวิธีการของ Lyapunov's Direct Method ในการทำหน้าที่ปรับตัวแปรของ ควบคุมแบบ PI ของระบบ เพื่อให้ระบบมีการตอบสนองเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิง โดยมีค่าอัตราการปรับตัว $\gamma_1 = 0.00005$ และ $\gamma_2 = 0.00001$ ซึ่งรูปแบบการตอบสนอง อุณหภูมิ ของระบบ ที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันได (Step input) ที่อุณหภูมิ 85 °C ของแบบจำลองที่อ้างอิงให้มีค่า Percent Overshoot ไม่เกิน 5 % , ค่า Rise Time น้อยกว่า 3.5 sec และค่า Settling Time น้อยกว่า 5 sec ดังนั้นเราจะได้ตัวควบคุม PI ของแบบจำลองที่อ้างอิงมีค่า $K_p = 0.38$ และ $K_i = 0.13$ และกำหนดให้ แบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ของ Plant คือ $\hat{K} = 5.3698$, $\hat{\tau} = 3.5137$ sec. $\hat{d} = 1.0$ sec.



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงการตอบสนองของอุณหภูมิของเตาอบเครื่องที่ 1

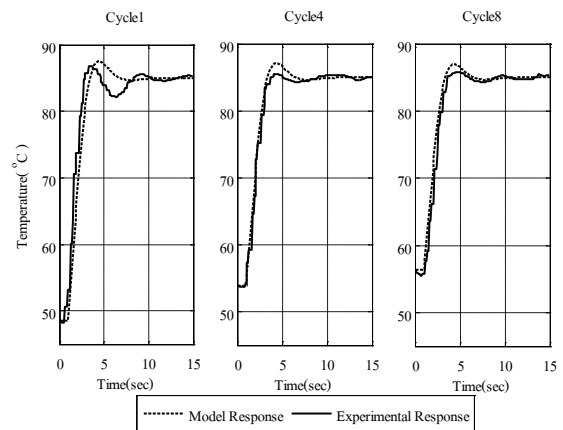


รูปที่ 4 แผนภาพแสดงการตอบสนองของตัวควบคุม PI ของเตาอบเครื่องที่ 1

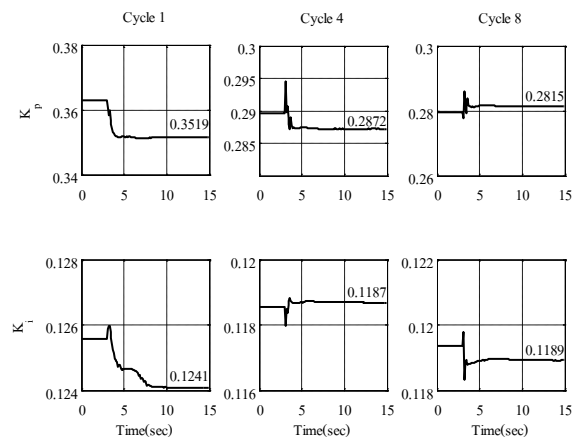
ผลการตอบสนองของอุณหภูมิของ Plant เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่อ้างอิงและการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบ PI ของเตาอบเครื่องที่ 1 โดยมีอุณหภูมิในเตาอบเริ่มต้นที่ 46 °C และมีค่าเริ่มต้นของตัวควบคุมแบบ PI ของ Plant คือค่า $K_p = 0.38$ และ $K_i = 0.13$ ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ และได้ทดลองกับเตาอบเครื่องที่ 2 โดยมีอุณหภูมิในเตาอบเริ่มต้นที่ 48 °C และมีค่าเริ่มต้นของตัวควบคุมแบบ PI ของ Plant คือค่า $K_p = 0.363$ และ $K_i = 0.125$ ผลการตอบสนองของ Plant และแบบจำลองอ้างอิง และการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบ PI แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

ผลการตอบสนองของอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดทั้งสองเครื่องนั้น เป็นไปตามหลักการของระบบควบคุมปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง อัลกอริทึมที่ได้จากวิธีการของ Lyapunov's Direct Method จะพยายามปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบ PI เพื่อให้กระบวนการเตาอบทั้งสองเครื่องให้มีการตอบสนองเช่นเดียวกับแบบจำลองอ้างอิงเป็นไปตามรายละเอียดของลักษณะการตอบสนองที่กำหนดอย่างมีประสิทธิภาพ แม้จะมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่เพิ่มขึ้นจากการสะสมอุณหภูมิที่ผนังเตาอบ ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยการตอบสนองของอุณหภูมิของเตาอบเครื่องที่ 1 มีการรันโปรแกรมไปเป็นจำนวน 5 ครั้ง และเตาอบเครื่องที่ 2 มีการรัน

โปรแกรมไปเป็นจำนวน 8 ครั้ง ระบบจึงมีผลการตอบสนองเป็นไปตามแบบจำลองที่อ้างอิง



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงการตอบสนองของอุณหภูมิของเตาอบเครื่องที่ 2



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงการตอบสนองของตัวควบคุม PI ของเตาอบเครื่องที่ 2

ตารางที่ 1. ผลการตอบสนองอุณหภูมิ ที่ 85 °C

การตอบสนองอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบ เครื่องที่ 1				
Cycle	Maximum Overshoot (C°)	Percent Overshoot (%)	Rise time (second)	Settling time (5%) (second)
1	93.2	9.64	3.3	6.2
5	86.3	1.52	3.2	4.3
การตอบสนองอุณหภูมิของกระบวนการเตาอบ เครื่องที่ 2				
Cycle	Maximum Overshoot (C°)	Percent Overshoot (%)	Rise time (second)	Settling time (5%) (second)
1	87	2.35	3.2	9.2
8	86	1.17	3.3	4.3

5.สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธี ควบคุมปรับตัว ได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง ึ่งสำหรับ กระบวนการเตาอบ แบบหลอดอินฟราเรดโดยใช้ตัวควบคุมแบบ PI โดยใช้ อัลกอริทึมแบบปรับตัวได้จากวิธีการของ Lyapunov's Direct Method ทำหน้าที่ปรับ ค่าตัวแปรของตัว ควบคุมแบบPI ของระบบเพื่อให้ระบบมีการตอบสนอง เป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิง ผลการทดลอง ที่ได้ แสดงการ ปรับ ค่าตัวแปรของตัว ควบคุม และการ ควบคุมอุณหภูมิ ของกระบวนการเตาอบแบบ หลอดอินฟราเรดให้มีการตอบสนองเป็นไปตามความ ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปใช้ เตาอบแบบหลอดอินฟราเรดได้ทุกเครื่อง

6.กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วม เฉพาะทางด้านการผลิตขั้นสูงในอุตสาหกรรม ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานวิทยาศาสตร์และ เทคโนโลยีแห่งชาติ และ บริษัท Seagate (Thailand) จำกัด และขอขอบคุณ ศ.นท.ดร. สรวุฒิ สุจิตจร ที่ให้ คำแนะนำในการวิจัย

7.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.(2005). Temperature control and modeling of the rapid thermal processing

chamber. PhD Dissertation, University of Texas at Austin, pp. 1-264.

[4] Wonhui Cho., Thomas F. Edgar and Jietae Lee.(2006). Closed loop identification of wafer temperature dynamics in a rapid thermal process. *Korean J. Chem. Eng.*, Vol. 23, No. 2, pp. 171-175.

[5] 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 J. Chem. Eng.*, Vol. 21, No. 5, pp. 935-941.

[6]Prمود, S. and Chidambaram, M.(2000). Closed Loop Identification of Transfer Function Model for Unstable Bioreactors for Tuning PID Controllers. *Bioprocess Eng.*, Vol. 22, No. 2, pp. 185-188.

[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, 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, pp. 621-632.

[9]Stephen, A. Norman.(1991). Optimization of wafer temperature uniformity in rapid thermal processing. *IEEE Transactions on Electronics Devices*, pp.1-46.

[10] Karl J. Astrom and Bjorn Wittenmark. (1995). *Adaptive Control*. (2nd Edition), USA, Addison Wesley.

[11]Jiraphon Srisertpol, Supot Phungpimai and Napoj Chinanawin.(2008). Analysis and PID Controller Design for Infrared Oven, *Proceedings of the 22th National Mechanical Engineering Conference*, pp.220-226