

## การวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีสำหรับเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

## Analysis and PID Controller Design for Infrared Oven

จิระพล ศรีเสริญผล\* สุพจน์ ปลั่งพิมาย และณพจน์ ชินะนาวิน

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

โทร 0-4422-3117 โทรสาร 0-4422-3119 \*อีเมลล์ jiraphon@sut.ac.th

## บทคัดย่อ

ในปัจจุบันกระบวนการเตาอบเป็นกระบวนการที่สำคัญของการผลิตชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งเป็นกระบวนการทำความร้อนให้กับกาวที่ใช้ในการยึดติดระหว่างชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยใช้หลอดอินฟราเรด ซึ่งมีระบบการควบคุมอุณหภูมิแบบป้อนกลับ (Feedback Control) และมีตัวควบคุมแบบพีไอดี กระบวนการควบคุมอุณหภูมิดังกล่าว มักทำให้ระบบมีอุณหภูมิสูงเกินความต้องการและส่งผลให้เกิดความเสียหายในกระบวนการผลิต ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นคาดว่ามีความสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของกระบวนการเตาอบอินฟราเรด จึงทำให้ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ใช้อยู่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นไปตามความต้องการ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิเคราะห์การตอบสนองของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี ให้มีความเหมาะสมและสามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบให้สามารถทำงานเป็นไปตามความต้องการผลที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาประสิทธิภาพของระบบควบคุมกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

**คำสำคัญ:** การถ่ายเทความร้อน, ทฤษฎีควบคุม, การประมาณค่าตัวแปร, การตอบสนองเหมาะสมที่สุด

## Abstract

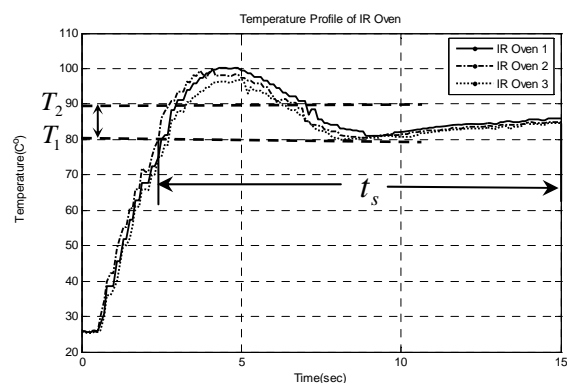
Oven process is one of significant step for hard disk drive manufacturing process nowadays. It processes by heating the hard disk component adhesive using infrared wave. Oven temperature is controlled using PID feedback control system. However, this type of control system often cause temperature over 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 therefore presents infrared oven identification technique to evaluate mathematical model coefficients. Enhanced data are used in analyzing temperature output responses. And then appropriate PID control parameters are designed in order to control temperature to be within specification. The result will be useful for infrared oven controller developing in the future.

**Keywords:** Heat Transfer, Control Theory, Parameter Estimation, Response optimization

## 1. บทนำ

กระบวนการผลิตชิ้นส่วนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งมีกระบวนการประกอบชิ้นงาน โดยใช้กาวเพื่อยึดติด และมีการอบกาวให้แห้งโดยใช้เตาอบแบบหลอดอินฟราเรด ซึ่งในการควบคุมอุณหภูมิของการอบให้อยู่ใน ช่วง  $T_1 - T_2$  C เป็นเวลา  $t_s$  วินาที พบว่ากระบวนการควบคุมอุณหภูมิที่ไม่มีประสิทธิภาพ จะทำให้เกิดอุณหภูมิที่เกินตามที่กำหนด ส่งผลให้เกิดความเสียหายเกิดขึ้นกับตัวชิ้นงาน จากข้อมูลการวัดอุณหภูมิของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดที่ใช้อยู่ในสายการผลิตจำนวน 3 เครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 1 พบว่าอุณหภูมิของเตาอบทุกเครื่อง มีค่าออกนอกช่วงที่ต้องการ อันเนื่องมาจากการฟุ้งเกินของอุณหภูมิ

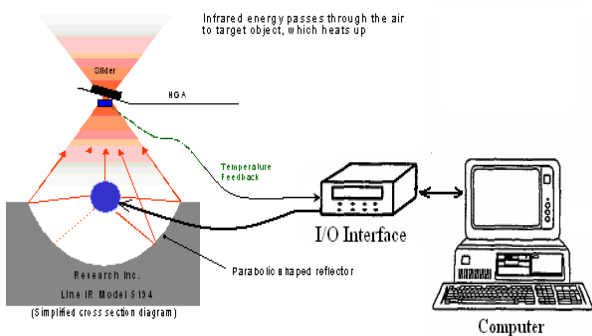


รูปที่ 1 ข้อมูลการวัดอุณหภูมิของเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด 3 เครื่อง

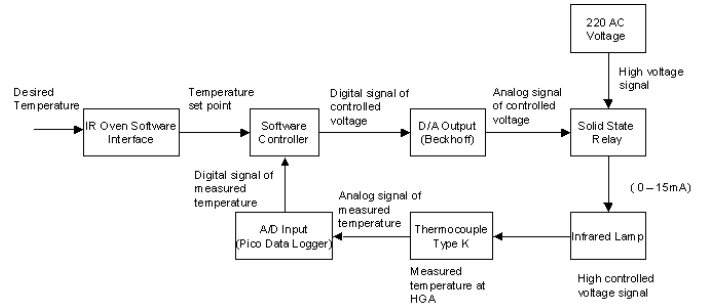
ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นมาจากการใช้ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีโอดีที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นไปตามความต้องการ สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบ เพื่อใช้ในการออกแบบค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีโอดี ให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของระบบให้สามารถทำงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์ Choi J.Y. และ Do, H.M.[1] ได้ศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างและองค์ประกอบของกระบวนการทำงานของเตาอบ ที่มีหลอด Tungsten-Halogen เป็นตัวให้ความร้อน Lord, H. A. [2] ได้วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่ศึกษาเกี่ยวกับการพาความร้อน, การนำความร้อน และ การแผ่รังสีที่เกิดขึ้นในกระบวนการเตาอบ งานวิจัยของ Wonhui Cho.[3] ได้ศึกษาการตอบสนองทางความร้อนของระบบ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบการควบคุมกระบวนการเตาอบ Cho Wonhui Cho, Thomas F. Edgar และ Jietae Lee.[4] ได้เสนอวิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบแบบบ่อนกกลับ (Closed-loop Identification) ในการตอบสนองทางความร้อนของตัว wafer โดยใช้วิธีการ Nonlinear least squares เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอด Tungsten-Halogen นอกจากนี้ได้มีการใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบที่มีการควบคุมแบบบ่อนกกลับดังกล่าวของ 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] ได้แนะนำการออกแบบระบบควบคุมในกระบวนการเตาอบ Choi, J. Y., Do, H. M. และ Choi, H. S.[8] เสนอการใช้ควบคุมแบบปรับตัวได้มาใช้ในการควบคุมและ Stephen, A. Norman,[9] ได้เสนอเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมกระบวนการเตาอบ

## 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

กระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดมีขนาด 30 x 19.6 x 62.5 นิ้ว มีชุดควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหลอดอินฟราเรดภายในเตาอบมีเทอร์โมคัปเปิลที่วัดอุณหภูมิ และชุดควบคุมกระบวนการเตาอบ แสดงในรูปที่ 2 เนื่องจากกระบวนการเตาอบเป็นกระบวนการควบคุมอุณหภูมิแบบปิด สามารถเขียนแผนภาพกระบวนการเตาอบได้ดังรูปที่ 3

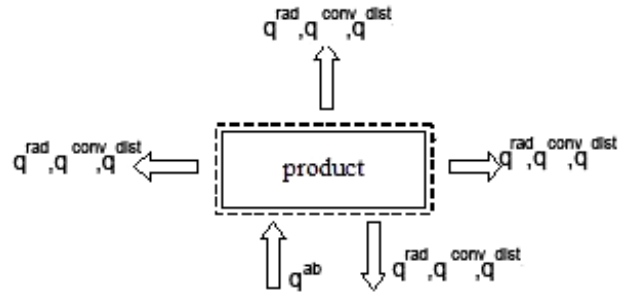


รูปที่ 2. แผนภาพแสดงเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด



รูปที่ 3 แผนภาพระบบควบคุมแบบปิดของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด

เราใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของตัวชิ้นงาน ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่ออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของตัวชิ้นงาน นั้นเท่ากับความร้อนสุทธิที่ไหลเข้ามาในตัว ชิ้นงาน



รูปที่ 4 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนของ ชิ้นงาน

ได้

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

เมื่อ

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

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

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

### การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

สำหรับการแผ่รังสีสมมุติให้ความร้อนแผ่รังสีออกจากหน้าตัดของตัวชิ้นงาน อย่างสม่ำเสมอตลอดทั้งหน้าตัด หรือค่าพลังงานการแผ่รังสีความร้อนต่อหน่วยพื้นที่นั้นคงที่ และขนาดหน้าตัดส่วนที่แผ่รังสีของตัวชิ้นงานมีขนาดเล็ก ดังนั้นความร้อนที่สูญเสียจากการแผ่รังสีคือ

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

เมื่อ

- $\sigma$  - Stefan-Boltzmann constant =  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$

$\mathcal{E}$  - emissivity

$T$  - อุณหภูมิของตัว ชิ้นงาน

$A_r$  - พื้นที่ส่วนที่แผ่รังสีของตัว ชิ้นงาน

### การพาความร้อน (Convection)

การแลกเปลี่ยนความร้อนโดยวิธีการพาความร้อนระหว่างผิวสัมผัสอากาศด้านนอกของตัวชิ้นงานกับอากาศโดยรอบ คือ

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

เมื่อ  $h$  - convection heat transfer coefficient

$A_a$  - พื้นที่หน้าตัดที่สัมผัสอากาศ

$T_a$  - 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

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

จากสมการที่(5) เป็นสมการไม่เป็นเชิงเส้นและพบว่าNonlinear term คือ  $\varepsilon\sigma A_r T^4$  ซึ่งเราสามารถทำการประมาณสมการเชิงเส้นได้เมื่อกำหนดให้

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

โดยการใช้ Taylor series จะได้ว่า

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

ดังนั้นจากสมการที่ (5) จะได้

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

หรือ

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

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

$$\left( \frac{mC_p}{4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a} \right) \frac{dT}{dt} = -T + \frac{FP}{4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a} + \frac{3\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^4 + hA_a T_a + q^{wall} + q^{dist}}{4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a} \quad (7)$$

เมื่อกำหนดให้

$$\tau = \left( \frac{mC_p}{4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a} \right), \quad K = \frac{F}{4\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^3 + hA_a}$$

$$\eta(t) = 3\varepsilon\sigma A_r \bar{T}^4 + hA_a T_a + q^{wall} + q^{dist}$$

และ  $P = P(t)$

ดังนั้นจากสมการที่ (7) จะได้

$$\tau \frac{dT(t)}{dt} = -T(t) + KP(t) + \frac{K}{F} \eta(t) \quad (8)$$

สมการที่ (8) เขียนอยู่ในรูป Laplace transform โดยให้เงื่อนไขเริ่มต้น  $T(t)=0, \dot{T}(t)=0$  เราจะได้

$$T(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)} P(s) + \frac{K}{F(\tau s + 1)} \eta(s) \quad (9)$$

กำหนดให้

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

$$\text{และ } G_d(s) = \frac{K}{F(\tau s + 1)} \quad (11)$$

เมื่อ  $G(s)$  ในสมการที่(10) คือฟังก์ชันถ่ายโอนที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของชิ้นงาน และพลังงานที่ตัวชิ้นงานได้รับ  $P(s)$  แต่กระบวนการเตาอบเป็นกระบวนการที่มีเวลาไร้ผลตอบสนอง (Delay time) รวมอยู่ ดังนั้นเราประมาณได้

$$G_p(s) = G(s)e^{-ds} = \frac{Ke^{-ds}}{(\tau s + 1)} \quad (12)$$

เมื่อ  $K$  คือ อัตราขยาย (Gain)

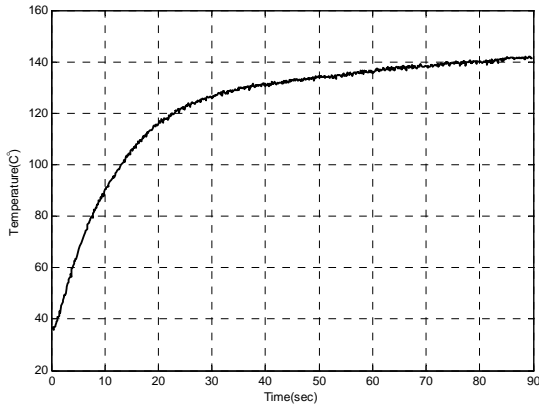
$\tau$  คือ ค่าคงตัวเวลา (Time constant)

และ  $d$  คือ ค่าเวลาไร้ผลตอบสนอง

ดังนั้นสมการที่ (9) จะได้

$$T(s) = G_p(s)P(s) + G_d(s)\eta(s) \quad (13)$$

ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ ที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันได โดยอุณหภูมิเริ่มต้นประมาณ 35 C° ที่บริเวณตัวชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การตอบสนองของอุณหภูมิที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันได จากลักษณะการตอบสนองที่เกิดขึ้น เราสมมุติการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นเชิงเส้น ในขั้นตอนของการประมาณค่าตัวแปรและการตอบสนองของระบบแบบอินพุตแบบขั้นบันไดคือ

$$T(t) = T_p(t) + T_d(t) \quad (14)$$

เมื่อ  $T(t)$  - อุณหภูมิที่วัดที่ตัวชิ้นงาน

$T_p(t)$  - อุณหภูมิของความร้อนที่ได้รับจากหลอดอินฟราเรด

$T_d(t)$  - อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีลักษณะแบบ Ramp

สมการที่ (14) สามารถเขียนอยู่ในรูป Laplace transform ได้

$$T(s) = T_p(s) + T_d(s) \quad (15)$$

พิจารณาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนสมการที่ (13) และ (14) เราจะได้

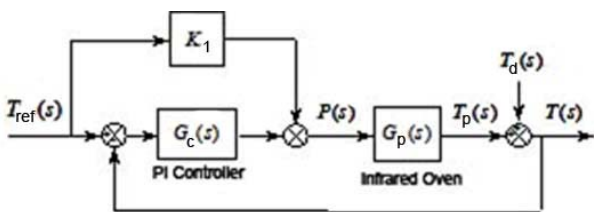
$$T(s) = G_p(s)P(s) + \frac{\alpha}{s^2} \quad (16)$$

โดยที่  $T_p(s) = G_p(s)P(s)$

และ  $T_d(s) = G_d(s)\eta(s) = \frac{\alpha}{s^2}$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ความชันของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่มีลักษณะแบบ Ramp และมีหน่วยเป็น  $C^\circ / \text{sec}$

### 3. การระบุเอกลักษณ์ของระบบกระบวนการตอบแบบ หลอดอินฟราเรด



รูปที่ 6. แผนภาพระบบควบคุมของกระบวนการตอบแบบ หลอดอินฟราเรดในระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ

สำหรับการระบุเอกลักษณ์ของระบบกระบวนการตอบแบบ หลอดอินฟราเรด จะใช้สำหรับระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ [4] ดัง แสดงในรูปที่ 6.

โดยที่  $G_p(s) = \frac{Ke^{-ds}}{\tau s + 1}$ ,  $T_d(s) = \frac{\alpha}{s^2}$  และ  $K_1 = 0.1$

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

ในการประมาณค่าตัวแปรของกระบวนการในระบบปิดที่มีตัว ควบคุมแบบพีไอ และการตอบสนองของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีลักษณะ แบบ Ramp ร่วมด้วย โดยใช้วิธีการ Nonlinear least squares สำหรับการ ประมาณค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดจากผลการทดลองของการ ตอบสนองของระบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$$T(t) = L^{-1} \left( \left( \frac{G_c G_p + K G_p}{1 + G_c G_p} \right) T_{ref}(s) + \left( \frac{1}{1 + G_c G_p} \right) \frac{\alpha}{s^2} \right) \quad (16)$$

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

โดยให้  $\hat{T}(t)$  คือ ชุดข้อมูลของอุณหภูมิจากการวัด

การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการที่ (16)

โดยวิธี Nonlinear least square [11] เพื่อประมาณค่าตัวแปร  $K, \tau, d$  และ  $\alpha$  โดยตัวแปรที่เหมาะสมจะต้องทำให้  $T(t) - \hat{T}(t)$  ผลต่าง กำลังสองน้อยที่สุด (least square error: LSE)

$$LSE = \sum_{i=1}^n \left( T(t_i) - \hat{T}(t_i) \right)^2 \quad (17)$$

โดยที่ n คือ จำนวนข้อมูลของอุณหภูมิจากการวัด จากสมการที่ (17) เราจะได้

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

ให้  $z = [K \ \tau \ d \ \alpha]^T$  นั่นคือ Minimize  $f(z)$

$$z_k = [K_k \ \tau_k \ d_k \ \alpha_k]^T$$

โดยที่ k คือจำนวนรอบของการคำนวณ

ที่  $k = 0$  จะได้  $z_0 = [K_0 \ \tau_0 \ d_0 \ \alpha_0]^T$  และ  $B_0 = I$

เมื่อ  $z_0$  คือค่าตัวแปรเริ่มต้นที่ต้องกำหนดให้สำหรับการคำนวณ

$$p_k = -[B_k]^{-1} \nabla f(z_k)$$

$$F(\lambda_k) = f(z_k + \lambda_k p_k) \quad (18)$$

โดยที่  $\lambda_k > 0$  จากสมการ (18) จะได้ค่า  $\lambda_k$  จะได้

$$z_{k+1} = z_k + \lambda_k p_k$$

$$s_k = z_{k+1} - z_k$$

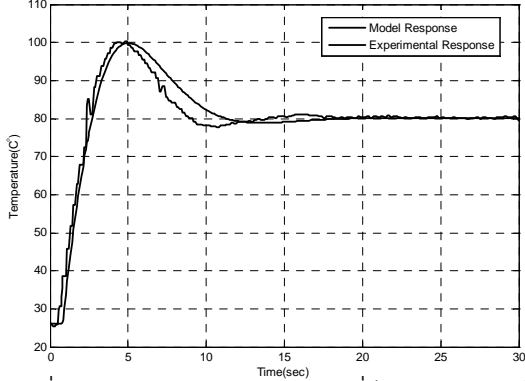
$$B_{k+1} = B_k - \frac{(B_k s_k)(B_k s_k)^T}{s_k^T B_k s_k} + \frac{y_k y_k^T}{y_k^T s_k}$$

ตรวจสอบ  $\|\nabla f(z_{k+1})\| < \epsilon$  เมื่อ  $\epsilon$  คือค่าความคลาดเคลื่อนที่ ยอมรับได้

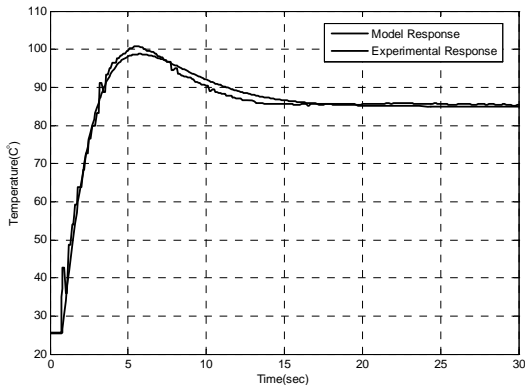
ถ้า  $\|\nabla f(z_{k+1})\| > \varepsilon$  ให้นวนรอบของการคำนวณจนกว่า  $\|\nabla f(z_{k+1})\| < \varepsilon$  ซึ่งทำให้ได้  $z_{k+1}$  ของรอบการคำนวณนั้นเป็นผลเฉลยของค่าตัวแปร  $K, \tau, d$  และ  $\alpha$  สำหรับการวิจัยนี้ได้มีการประยุกต์ใช้วิธีการ Nonlinear least squares ของโปรแกรม MATLAB

#### 4. ผลของการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

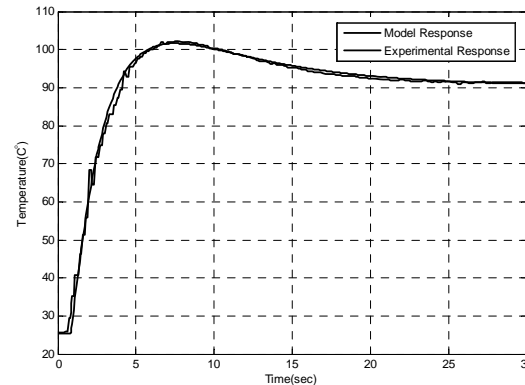
การระบุเอกลักษณ์สำหรับระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ ในการทดลองจะพิจารณาอุณหภูมิที่ 80, 85 และ 90 °C โดยที่แต่ละอุณหภูมิจะมีการปรับค่าตัวแปรพีไอที่แตกต่างกัน 3 แบบ



รูปที่ 7. ผลการตอบสนองของระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ แบบ Run1 ที่อุณหภูมิ 80 °C



รูปที่ 8. ผลการตอบสนองของระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ แบบ Run2 ที่อุณหภูมิ 85 °C



รูปที่ 9. ผลการตอบสนองของระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ แบบ Run3 ที่อุณหภูมิ 90 °C

เพื่อให้ได้ผลตอบสนองของอุณหภูมิที่ต่างกันในแต่ละค่าของอุณหภูมิที่ต้องการตั้งผลที่แสดงในรูป 7, 8 และ 9 และผลการประมาณค่าตัวแปรของระบบที่อุณหภูมิ 80, 85 และ 90 °C ดังแสดงในตารางที่ 1, 2 และ 3

ตารางที่ 1. ผลของการระบุเอกลักษณ์ ที่อุณหภูมิ 80 °C

Test number	PI control parameter		Parameters of Identification Model			
	$K_p$	$K_i$	K	$\tau$	d	$\alpha$
Run 1	0.1	0.07	6.82	2.15	0.72	0.00262
Run 2	0.09	0.04	6.52	2.29	0.85	0.00139
Run 3	0.07	0.02	6.43	2.70	0.79	0.00019
Mean			6.59	2.38	0.79	0.00140

ตารางที่ 2. ผลของการระบุเอกลักษณ์ ที่อุณหภูมิ 85 °C

Test number	PI control parameter		Parameters of Identification Model			
	$K_p$	$K_i$	K	$\tau$	d	$\alpha$
Run 1	0.1	0.07	7.00	2.19	0.85	0.00424
Run 2	0.09	0.04	7.00	2.49	0.67	0.00122
Run 3	0.07	0.02	6.43	2.70	0.79	0
Mean			6.81	2.46	0.77	0.00182

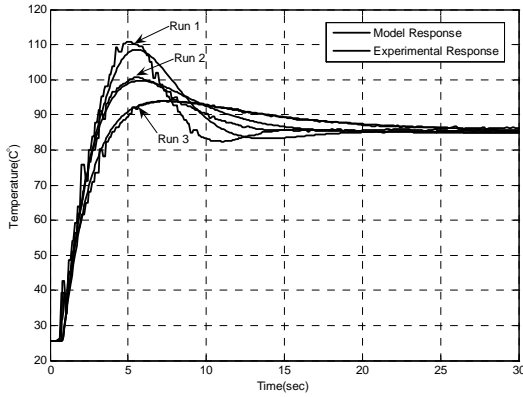
ตารางที่ 3. ผลของการระบุเอกลักษณ์ ที่อุณหภูมิ 90 °C

Test number	PI control parameter		Parameters of Identification Model			
	$K_p$	$K_i$	K	$\tau$	d	$\alpha$
Run 1	0.1	0.07	7.38	2.56	0.93	0.00480
Run 2	0.09	0.04	7.38	2.75	0.82	0.00115
Run 3	0.07	0.02	7.31	2.93	0.75	0
Mean			7.36	2.75	0.83	0.00198

เราจะพิจารณาค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อแทนค่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบ จากนั้นเปรียบเทียบผลการตอบสนองระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้กับค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ที่มีต่ออินพุทแบบขั้นบันได ที่ 85 °C ดังแสดงในรูปที่ 10

ตารางที่ 4. ค่าเฉลี่ยของตัวแปรของระบบ

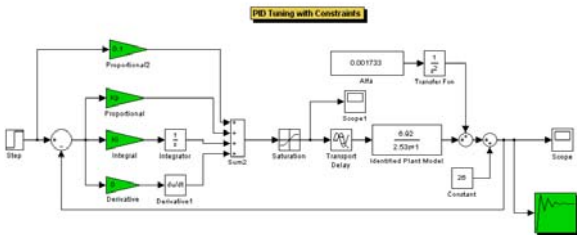
Test number	PI control parameter		Parameters of Identification Model			
	$K_p$	$K_i$	K	$\tau$	d	$\alpha$
Run 1	0.1	0.07	6.92	2.53	0.8	0.00173
Run 2	0.09	0.04				
Run 3	0.07	0.02				



รูปที่ 11 การตอบสนองของระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้ค่าเฉลี่ยตัวแปรของระบบ สำหรับอินพุตแบบขั้นบันได ที่ 85 °C

### 5. การออกแบบค่าพีไอดี

ผลการระบุเอกลักษณ์สำหรับระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ เราจะใช้ค่าแปรเฉื่อยในตารางที่ 4 เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งสามารถเขียนแผนภาพระบบควบคุมของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดในระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดีดังรูปที่ 11



รูปที่ 11. แผนภาพระบบควบคุมของกระบวนการเตาอบแบบหลอดอินฟราเรดในระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอดี

สำหรับการออกแบบค่าพีไอดีงานวิจัยนี้ นั้นจะใช้วิธี Response Optimization ของโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณหาค่าพีไอดีที่เหมาะสม โดยการกำหนดรูปแบบการตอบสนองของสัญญาณ output ที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันไดให้มี ค่า Percent Overshoot ไม่เกิน 5%, ค่า Rise Time < 3 sec และค่า Settling Time < 5 sec ซึ่งโปรแกรม MATLAB จะใช้วิธี Gradient Descent เพื่อหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีไอดีคือ  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_d$  ได้ผลดังตารางที่ 5 แล้วนำค่าพีไอดีที่ได้ไปทดลองกับเครื่องเตาอบแบบหลอดอินฟราเรด เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองของอุณหภูมิ

การหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสมที่สุดจากผลการตอบสนองโดยวิธี Gradient Descent แบบมีเงื่อนไขบังคับ (Output Constraint) เพื่อหาค่าตัวแปร  $K_p, K_i, K_d$  สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

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

โดยที่  $x_k$  คือ  $K_p, K_i, K_d$

รวมบทความวิชาการ เล่มที่ 1 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

$T_i$  - ค่าอุณหภูมิของแบบจำลอง

$T_c$  - ค่าอุณหภูมิที่ Output Constraint

วิธี Gradient Descent [10] เป็นระเบียบวิธีขั้นพื้นฐานของการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุด โดยพิจารณา gradient ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ถ้าเคลื่อนจุดคำตอบไปในทิศทางของค่า gradient จากจุดเริ่มต้นใดๆ การเคลื่อนตำแหน่งของผลเฉลยในทิศทางลบ gradient จะส่งผลให้การลดลงของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด คือ  $p_k = -\nabla f(x_k)$  ระเบียบวิธีนี้ให้คุณสมบัติการลู่เข้าแบบเชิงเส้น (linear convergence)

$$f(x_k + 1) = f(x_k + \lambda p_k) \approx f(x_k) + \lambda p_k^T \nabla f(x_k)$$

การพิจารณาจากจุดคำตอบในรอบการค้นหาค่าที่  $k$  ใดๆ สามารถเขียนกระจายอนุกรมเทย์เลอร์ สำหรับประมาณค่าฟังก์ชันในรอบการค้นหาค่าถัดไป โดยใช้พจน์อนุพันธ์อันดับหนึ่ง

เพื่อให้การปรับปรุงจุดคำตอบมีคุณสมบัติลาดลง ดังนั้นเราจะได้

$$f(x_k + 1) < f(x_k) + \lambda p_k^T \nabla f(x_k)$$

$$\therefore \lambda p_k^T \nabla f(x_k) < 0$$

การเลือกทิศทางลบ Gradient เป็นทิศทางที่การค้นหาค่าจะได้ว่า

$$p_k = -\nabla f(x_k) \Rightarrow \lambda_k [-\nabla f(x_k)]^T \nabla f(x_k) = -\lambda_k \|\nabla f(x_k)\|^2 < 0$$

ขั้นที่ 1: กำหนดค่าเริ่มต้น  $k = 0$ , เลือกจุดเริ่มต้นของการค้นหา  $x_k$

ถ้า  $\|\nabla f(x_k)\| < \epsilon$  สิ้นสุดการคำนวณข้ามไปขั้นที่ 6

ขั้นที่ 2 : คำนวณทิศทางการค้นหา  $p_k = -\nabla f(x_k)$

ขั้นที่ 3 : แก้ปัญหาย่อยการค้นหาตามเส้น (line search sub-problem)

$$\text{Minimize } F(\lambda) = f(x_k + \lambda p_k)$$

โดยที่  $\lambda_k > 0$

ขั้นที่ 4 : ปรับปรุงจุดคำตอบ  $x_{k+1} = x_k + \lambda_k p_k$

ขั้นที่ 5 : ถ้า  $\|\nabla f(x_{k+1})\| < \epsilon$  สิ้นสุดการคำนวณข้ามไปขั้นที่ 6 ถ้าไม่ใช่ ให้เพิ่มตัวนับ  $k = k+1$  ทำซ้ำขั้นที่ 2

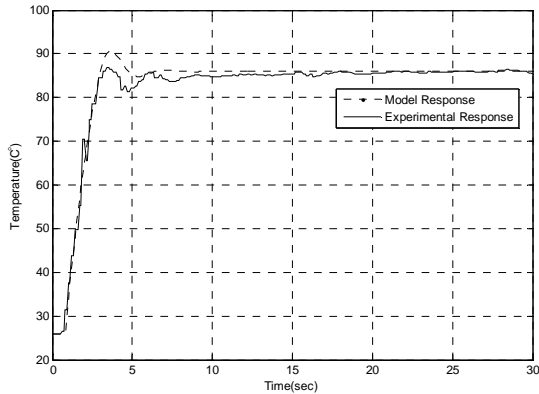
ขั้นที่ 6 : ได้ผลเฉลย  $x^* = x_{k+1}$

ผลการตอบสนองของระบบปิดที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีตามค่าในตารางที่ 5 เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้กับค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันได ที่ 85 °C ดังแสดงในรูปที่ 12

ตารางที่ 5. ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีไอดี

PID Controller	
$K_p$	0.376
$K_i$	0.006
$K_d$	0.0176

การวิเคราะห์ผลการตอบสนองของระบบปิดที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้กับค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันได ที่ 80, 85, 90 °C ดังแสดงในตารางที่ 6



รูปที่ 12. การตอบสนองของระบบปิดที่ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีโดยใช้ค่าตัวแปรในตารางที่ 5 สำหรับอินพุตแบบขั้นบันได ที่ 85 °C

ตารางที่ 6. การตอบสนองแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด

Model Response				
Set point (C°)	Maximum Overshoot (C°)	Percent Overshoot (%)	Rise time (second)	Settling time (5%) (second)
80	86.5	6.47	2.65	3.98
85	90.4	5.11	2.94	4.10
90	94.8	4.23	3.25	4.17
Experimental Response				
Set point (C°)	Maximum Overshoot (C°)	Percent Overshoot (%)	Rise time (second)	Settling time (5%) (second)
80	82.2	2.38	2.85	4.86
85	86.9	1.76	3.13	3.50
90	93.6	4.12	3.17	3.80

## 6.สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการระบุเอกลักษณ์ของกระบวนการเอาแบบหลอดอินฟราเรดโดยวิเคราะห์การตอบสนองของแบบจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลองในระบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอโดยใช้วิธีการ Nonlinear least squares ในการหาค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ โดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบเพื่อหาค่าตัวแปร ซึ่งค่าตัวแปรที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์นั้นเป็นค่าตัวแปรโดยประมาณ จากผลการทดสอบ พบว่าค่าตัวแปรของแบบจำลองที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ดังกล่าวนั้นสามารถนำมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยวิธี Response Optimization ที่ให้ผลการตอบสนองของอุณหภูมิเป็นไปตามความต้องการ และอย่างมีประสิทธิภาพ

ค่าตัวแปรของระบบที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์นั้นเป็นค่าตัวแปรโดยประมาณ ซึ่งได้มาจากการทดลองในช่วงอุณหภูมิที่ 80-90 °C และสามารถนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เหมาะสมในการควบคุมอุณหภูมิในช่วงดังกล่าว ดังนั้นถ้าต้องการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีที่เหมาะสมในการควบคุมอุณหภูมิในช่วงอื่นๆ ต้องทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิอื่นๆ และใช้ในการประมาณค่าตัวแปร เพื่อให้ได้ค่าตัวแปรของระบบที่เหมาะสมในการออกแบบพีไอดี ในช่วงอุณหภูมิที่

ต้องการ จากศึกษาและวิเคราะห์ผลการตอบสนองของอุณหภูมิพบว่ากระบวนการเอาแบบเป็นกระบวนการที่มีเวลาให้ผลตอบสนองประมาณ 1 วินาที ซึ่งถ้าสามารถลดเวลาให้ผลตอบสนองได้ก็จะสามารถลดเวลาของกระบวนการรอบได้ ซึ่งจะทำให้กำลังการผลิตชิ้นงานเพิ่มขึ้น

**7.กิตติกรรมประกาศ** งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านการผลิตขั้นสูงในอุตสาหกรรมอาร์ตติสก์ไทร์ฟ และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และขอบคุณ ศ.นท.ดร. สราวุฒิสุจิตจร ที่ให้คำแนะนำในการวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- 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.
- 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.
- Wonhui Cho., 2005. Temperature control and modeling of the rapid thermal processing chamber. PhD Dissertation, University of Texas at Austin, pp. 1-264.
- 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.
- 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.
- Pramod, 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.
- 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.
- 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.
- Stephen, A. Norman, 1991. Optimization of wafer temperature uniformity in rapid thermal processing. IEEE Transactions on Electronics Devices, pp.1-46.
- ธนต์ชัย กุลวรรานิชพงษ์. 2550. เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด. พิมพ์ครั้งที่ 2. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.