<EN-125>

(60)

ET4_6

การศึกษาฟังก์ชันถ่ายโอนระบบให้ความร้อนในเตาเผาปลูกผลึก

The study of transfer function of heating system in crystal growth furnace

ประชา เหล่าอวยพร[1,2] จักรี ศรีนนท์ฉัตร[1] และ ศิริพร ลาภเกียรติถาวร[2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 12110

E-mail: pracha@tistr.or.th, jakkree_s@hotmail.com

[2]สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย เทคโนธานี ปทุมธานี

E-mail: slarpkia@yahoo.com

บทคัดย่อ

ฟังก์ชั่นถ่ายโอนระบบให้ความร้อนในเตาเผาปลูกผลึก ซึ่งเตาเผาปลูกผลึกเป็นเตาเผาที่ใช้ในการหลอมสารให้มีความบริสุทธิ์ ประกอบด้วยส่วนของตัวกำเนิดและตัวควบคุมอุณหภูมิความร้อน โดยการกำเนิดความร้อนใช้ลวดความร้อน เมื่อทำการทดสอบระบบเพื่อหาค่าฟังก์ชันถ่ายโอน โดยการใช้อินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดที่ระดับกำลัง 50% พบว่าอุณหภูมิเอาต์พุตเป็นระบบอันดับหนึ่ง มีค่าเวลาคงที่เท่ากับ 635 วินาที ซึ่งเมื่อใช้ค่านี้ในการจำลองระบบและใช้อินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดเดียวกัน ได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงระบบจริงมีค่าผิดพลาด 3.99% การทดสอบเพื่อหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ทำให้การพัฒนาระบบควบคุมง่ายขึ้นและสามารถทดสอบได้ด้วยโปรแกรม Simulink จากการทดลองโดยเลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PID พบว่าเอาต์พุตที่ได้ใกล้เคียงอินพุต

คำสำคัญ : ฟังก์ชันถ่ายโอน, การถดถอยแบบเชิงเส้น, การแบ่งชั้นอุณหภูมิ

Abstract

The transfer function of heating system in crystal growth furnace. Crystal growth furnace is used to melt material for synthesis single crystal. The system is composed of generator and temperature controller. Wire heating element was used as heating generator. The experiments were carried out with unit step function as input. It was found that at 50% of power, the temperature output was the first order system. Time constant was equal to 635 second. When used these values in model system, the final values were close to valuable from real system. It can be maintained to a precision of 3.99%. Transfer function of testing system will be easy to develop control system and can be tested by using Simulink program. Using PID as controller, it was found that the output was close to input.

Keyword : Transfer function, Linear regression, Gradient temperature

1. บทนำ

เตาเผาปลูกผลึกถูกใช้ในงานหลอมสารให้มีความบริสุทธิ์ มีลักษณะการให้ความร้อนกับชิ้นงานตัวอย่าง ทำให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการหลอมตัว จากนั้นทำให้ชิ้นงานตัวอย่างเกิดการเย็นตัวอย่างช้าๆ จากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของชิ้นงาน เตาเผาปลูกผลึกแบ่งส่วนให้ความร้อนออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนให้อุณหภูมิสูงและส่วนที่ให้อุณหภูมิต่ำ [1], [4] ทั้ง 2 ส่วนนี้นำมาต่อกันส่งผลให้เกิดอุณหภูมิไล่ลงจากอุณหภูมิสูงไปหาอุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิที่แตกต่างกันต่อระยะทางของเตาเผา (Gradient temperature) จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเตาเผาปลูกผลึก ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผานี้ถือได้ว่ามีส่วนสำคัญยิ่ง

ตั้งแต่อดีตมีการพัฒนาการควบคุมอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในการควบคุมที่มีการวิจัยอย่างมากเป็นการควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) เช่น ในปี 2004 มีการนำเสนอการควบคุมอุณหภูมิของเตาเผาแบบสูญญากาศ มีการแก้ปัญหาในการไต่ระดับของอุณหภูมิและความเฉื่อยโดยการควบคุม adaptive immune genetic algorithm [6] ปี 2005 มีการทดลองควบคุมอุณหภูมิของเตาอบโดย ทำการทดสอบเป็น FOPDT (First Order Plus Dead Time) ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นการควบคุมแบบดิจิตอลเพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการควบคุมแบบ PI และ PID [7] ปี 2007 มีการนำเสนอ PID self-tuning control algorithm โดยวิธีการ Recursion Least Squares และประเมินการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์แบบออนไลน์ [8] ในปัจจุบันมีการใช้โปรแกรม Matlab Simulink ในการจำลองระบบการควบคุม ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้สามารถใช้งานได้เหมือนควบคุมระบบจริง โดยจะต้องใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบในการประมวลผล

เตาเผาปลูกผลึกนี้ เป็นการพัฒนาในส่วนของการให้ความร้อนมีความจำเป็นต้องทราบคุณลักษณะของระบบ ประกอบไปด้วย ตัวควบคุมอุณหภูมิ คุณลักษณะลวดความร้อนและการป้อนกลับ ในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำเสนอการหาฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบให้ความร้อน ซึ่งแบบจำลองที่ได้นี้จะทำให้พัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ET4_6

2. ทฤษฎี

การถดถอยแบบเชิงเส้น (Linear regression) เป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการสร้างฟังก์ชันเส้นตรงสำหรับชุดของข้อมูล ประกอบด้วย x_i, y_i โดยที่ i = 1, 2, ...n ซึ่งจะสร้างสมการเส้นตรงในรูปของ

$$Y = AX + B \tag{1}$$

ค่าความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดจากข้อมูล n ข้อมูล จะได้

$$E = \sum [Y_i - Y(X_i)]^2 \tag{2}$$

แทนค่า $y(x_i)$ จาก (1) ลงใน (2)

$$E = \sum [Y_i - (AX_i + B)]^2 \tag{3}$$

หาค่า A และ B ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยการหาค่าต่ำสุดของค่าความผิดพลาด คือ $\frac{\partial E}{\partial A} = 0$ และ $\frac{\partial E}{\partial B} = 0$ ในสมการที่ 3 จะได้

$$nB + (\sum X_i)A = \sum Y_i \tag{4}$$

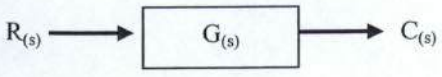
$$(\sum X_i)B + (\sum X_i^2)A = \sum Y_i \tag{5}$$

ดังนั้น

$$A = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i)(\sum Y_i)}{n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2} \tag{6}$$

$$B = \frac{(\sum Y_i)(\sum X_i^2) - (\sum X_i Y_i)(\sum X_i)}{n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2} \tag{7}$$

ระบบอันดับหนึ่ง (First Order System) ไดอะแกรมระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 1 สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 8



รูปที่ 1 ไดอะแกรมระบบควบคุม

$$C_{(s)} = G_{(s)} R_{(s)} \tag{8}$$

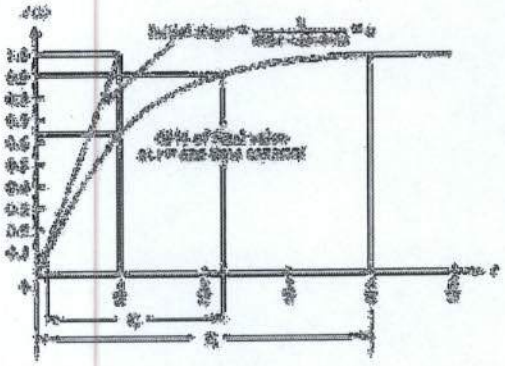
กำหนดให้อินพุตของระบบเป็นฟังก์ชันขั้นบันได (Unit Step Function) ซึ่งมีโดเมนของลาปลาซดังสมการที่ 9

$$R_{(s)} = \frac{1}{s} \tag{9}$$

ระบบเป็นอันดับหนึ่งมีโดเมนของลาปลาซดังสมการที่ 10

$$G_{(s)} = \frac{a}{s + a} \tag{10}$$

ถ้า $a = \frac{1}{\tau}$ มีค่ามากระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) เร็วขึ้น โดย τ คือค่าเวลาคงที่ (Time constant) ที่จุด $t = \tau$ จะบ่งบอกสภาวะของระบบที่จะเข้าสู่เป้าหมาย จะมีค่าเท่ากับ 0.632 ของค่าสภาวะคงตัว (Final Value) [2] แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผลตอบสนองระบบอันดับหนึ่งต่อสัญญาณขั้นบันได

สัญญาณเอาต์พุตของระบบอันดับหนึ่งต่อสัญญาณขั้นบันไดที่ได้แสดงในโดเมนของลาปลาซดังสมการที่ 11

$$C_{(s)} = \frac{a}{s(s + a)} \tag{11}$$

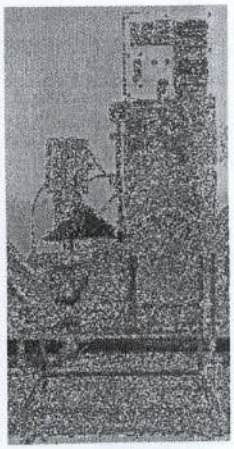
ผลของการแปลงลาปลาซสัญญาณเอาต์พุตจะได้

$$C_{(t)} = 1 - e^{-at} \tag{12}$$

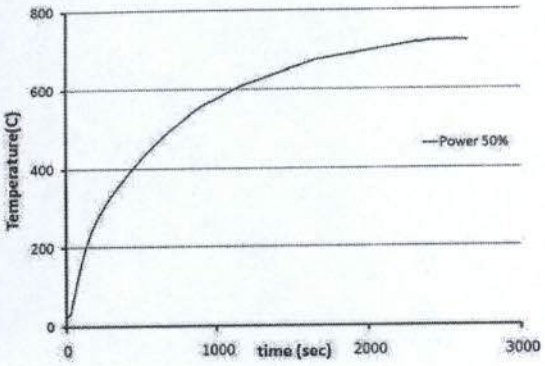
3. การทดลองและผลการทดลอง

เตาเผาปลูกผลึกดังรูปที่ 3 ทำการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบให้ความร้อน โดยทดสอบระบบด้วยการป้อนสัญญาณอินพุทแบบขั้นบันได [3] โดยการตั้งขนาดกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับลวดความร้อนที่ 50% วัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นซึ่งเป็นสัญญาณเอาต์พุตทุกๆ 15 วินาที แสดงเป็นกราฟดังรูปที่ 4

ET4_6



รูปที่ 3 เตาเผาที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 4 กราฟเอาต์พุตที่กำลัง 50%

จัดการข้อมูลด้วยระเบียบวิธีเชิงเส้นจากกราฟมีลักษณะเป็นฟังก์ชันลอการิทึมดังสมการที่ 13

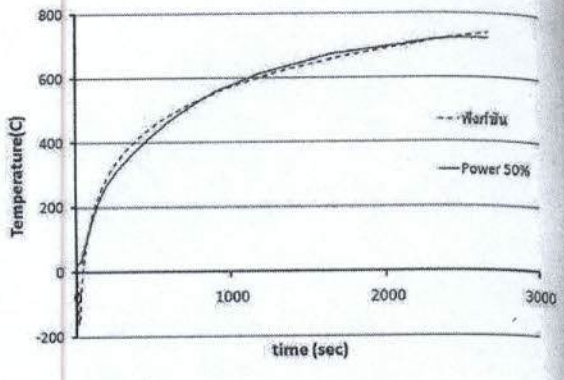
$$y = A\ln x + B \tag{13}$$

ให้ $Y = y$ และ $X = x$ จะอยู่ในรูปของสมการที่ 1 ใช้ข้อมูลจากกราฟที่จุดต่างๆแทนลงในสมการที่ 6 และ 7 จะได้ฟังก์ชันแสดงชุดข้อมูลดังสมการที่ 14

$$y = 173.775\ln x - 629.554 \tag{14}$$

สมการที่ได้นำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับค่าจริงแสดงดังรูปที่ 5 พิจารณา จากกราฟพบว่าระบบอยู่ในฟังก์ชันลอการิทึมในรูปแบบระบบอันดับหนึ่ง จากอุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียสถึงค่าสภาวะคงตัวอยู่ที่ 740 องศาเซลเซียส ค่าเวลาคงที่จะได้จาก

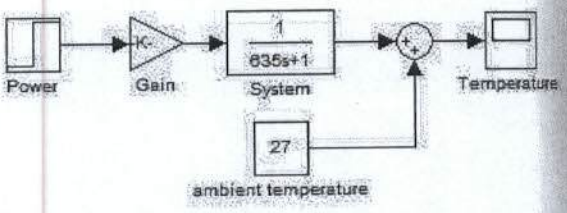
$$C_{(\tau)} = 0.632 \times (740 - 27)$$
$$= 450.62\ ^{\circ}\mathrm{C}$$



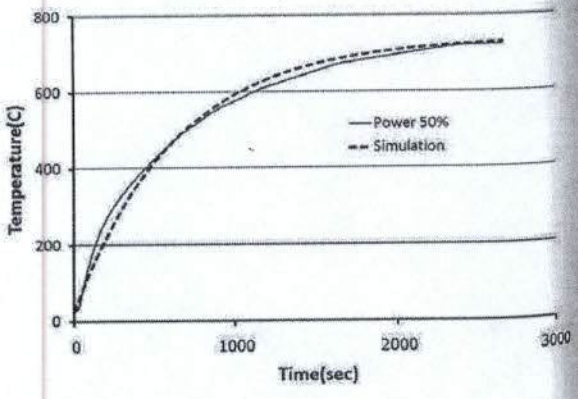
รูปที่ 5 กราฟเอาต์พุตเปรียบเทียบกับฟังก์ชัน

ค่าที่ได้เพิ่มจากอุณหภูมิห้องที่ 27 องศาเซลเซียสจะได้ค่า 477.62 องศาเซลเซียส จากกราฟจะได้ค่าเวลาที่จุดนี้ประมาณ 635 วินาที ซึ่งค่านี้จะเป็นค่าเวลาคงที่ของระบบ (τ) ค่าอัตราขยายคำนวณได้จากอัตราส่วนเอาต์พุตต่ออินพุต

$$\text{Gain} = \frac{\text{Final value}}{\text{Power input}} \tag{15}$$



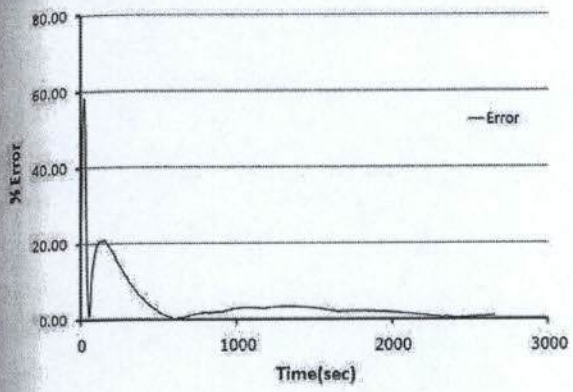
รูปที่ 6 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบระบบจริงกับฟังก์ชันถ่ายโอน

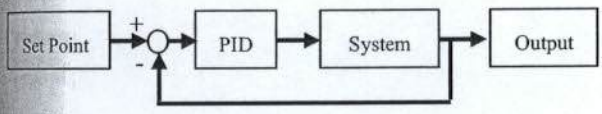
อุณหภูมิที่สภาวะคงตัวของระบบเท่ากับ 713 องศาเซลเซียส ค่ากำลังอินพุตเท่ากับ 50 อัตราขยายจะได้ 14.26 เท่า ใช้ค่าต่างๆที่ได้มาสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Simulink ของ Matlab [5] ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการพัฒนา ดังรูปที่ 6 เปรียบเทียบอุณหภูมิจากระบบจริงกับระบบฟังก์ชัน

ถ่ายโอน ซึ่งจำลองจากโปรแกรม Simulink ดังรูปที่ 7 และค่าผิดพลาดระบบจริงกับฟังก์ชันถ่ายโอนดังรูปที่ 8 ทดสอบการควบคุมระบบ โดยการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีดังสมการที่ 16 ซึ่งพีไอดีเป็นการนำคุณสมบัติของระบบควบคุมแบบ พี, พีดีและพีไอมารวมกัน โดยสามารถกำหนดค่าอัตราขยายทั้ง 3 ชุดคือ พี, ไอและดีได้อย่างอิสระ



รูปที่ 8 กราฟค่าผิดพลาดระบบจริงกับฟังก์ชันถ่ายโอน

$$PID = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \qquad (16)$$



รูปที่ 9 ไดอะแกรมระบบควบคุม

ใช้บล็อกควบคุมระบบแบบพีไอดีแสดงดังรูปที่ 9 โดยใช้ค่า PID เหมือนกับระบบจริงและกำหนดรูปแบบควบคุมอุณหภูมิโดยให้สภาวะแรกเป็นสัญญาณ RAMP มีค่าอัตราเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสต่อนาทีอุณหภูมิสุดท้ายที่ 700 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบอุณหภูมิเอาต์พุตระหว่างระบบจริงและระบบจำลองพบว่าแบบจำลองนี้ให้ผลใกล้เคียงระบบจริง 93.72%

4. สรุปการทดลอง

ระบบให้ความร้อนที่ใช้ในเตาเผาปลูกผลึก เมื่อทำการทดสอบระบบด้วยสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดที่กำลังไฟฟ้า 50% พบว่าเอาต์พุตที่ได้อยู่ในรูปของระบบอนุพันธ์อันดับหนึ่ง การตอบสนองต่อฟังก์ชันอินพุตได้ค่าเวลาคงที่ 635 วินาที นำค่าที่ได้มาสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Simulink ทดสอบระบบด้วยฟังก์ชันขั้นบันได สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ใกล้เคียงกับระบบจริงจากนั้นทดสอบด้วยการควบคุมแบบพีไอดี พบว่าสามารถควบคุมสัญญาณเอาต์พุตตามสัญญาณอินพุตได้ใกล้เคียงระบบจริง 93.72%

เอกสารอ้างอิง

[1] Hongbing Chen, Ccongxin Ge, Rongsheng Li, Jinhao Wang, Changgen Wu and Xianling Eng, "Growth of lead molybdate crystals by vertical Bridgman method", Indian Academy of Sciences, Vol. 28, No. 6, pp. 555–560 October 2005.

[2] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice-Hall, Fourth Edition, 2001.

[3] Kannan M. Moudgaly, "Identification of transfer function of a single board heater system through step response experiments", 2009.

[4] Pracha Lao-Auyporn, Jakree srinonchat, Siriporn Larpkiattaworn, "Development of controllable temperature gradient single crystal growth furnace", The 3rd Technology and Innovation for Sustainable Development International Conference (TISD2010), Thailand, March 4-6, 2010.

[5] Jiaoyu Liu, Kun Chen, Yi Deng, "Simulation of the Atmosphere-temperature Decoupling System on Grey Predicting PID Control of the Gas-burning Roller Ceramic Kilns in SIMULINK", The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), pp. 742–746, 2009.

[6] Xiao-Bin LI, Ding Liu, Shang-Bin Jiao, Jun-Xian Guo, "Intelligent PID Control System for Vacuum Annealing Furnace Workpiecs Temperature", Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, 26-29 August 2004.

[7] Emine Dogru Bolat, Kadir Erkan and Seda Postalcloglu, "Experimental Autotuning PID Control of Temperature Using Microcontroller", EUROCON 2005, Serbia & Montenegro, Belgrade, November 22-24, 2005

[8] Su Zhong Kang Chunpeng Zhang Weina Xu Dawei, "Research of PID Parameter Self-Tuning Applied in Temperature Control System", The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments ICEMI'2007

ET4_6