

DRC-60

การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีน

Temperature Control System Design in Melamine Container Production Process

ณรงค์ศักดิ์ สีแก้ว^{1*}, วรพจน์ ขำพิศ¹ และ จิระพล ศรีเสริฐผล¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: E-mail: rong_pet@hotmail.com, เบอร์โทรศัพท์: 088-466-9703

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันภาชนะที่ทำจากวัสดุเมลามีนเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เพราะมีความสวยงามและแข็งแรงทนทานต่อการใช้งาน ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีนเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญ ซึ่งจำเป็นต้องควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ โดยระบบควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์เป็นระบบควบคุมแบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบ PID ผ่านรีเลย์แบบแม่เหล็ก เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุเมลามีนของบริษัทศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด มหาชน มีจำนวนมากและอายุการใช้งานหลายปี ส่งผลให้อุณหภูมิของแม่พิมพ์ไม่เป็นไปตามความต้องการ ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อนของแม่พิมพ์ที่ใช้อัดขึ้นรูปภาชนะโดยใช้วิธีระบบปรับตัวได้ในการประมาณแบบจำลอง และออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอให้มีความเหมาะสมกับระบบ และควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามความต้องการ

คำหลัก: ระบบปรับตัวได้, แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีน, การระบุเอกลักษณ์ของระบบ

Abstract

Nowadays, the melamine is one of the most thermosetting plastic used for tableware such as plate, dishes and cup etc., because of the excellent hardness and high thermal resistance properties. In the manufacturing process, melamine is compressed and heated to form into the desire shape that the temperature control of compression mold is required. The temperature control system of mold in Srithai Superware Public Company Limited (Thailand) has the close loop control system with PID controller. It has overshoot in the temperature response. Therefore, this paper presented the mathematical model of heat transfer in melamine extrusion machine using adaptive system and design PI controller for control the mold temperature.

Keywords: Adaptive system, Mathematical models of melamine container in extrusion machine, System Identification

DRC-60

1. บทนำ

กระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะที่ทำจากวัสดุเมลามีน ซึ่งกระบวนการอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เมลามีนเป็นกระบวนการผลิตที่สำคัญ สำหรับการควบคุมอุณหภูมิจะใช้ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบ PID ผ่านรีเลย์แบบแม่เหล็ก เพื่อใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ ก่อนจะเริ่มกระบวนการผลิตทุกครั้งจะต้องผ่านกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์ให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิที่ 150 – 170 องศาเซลเซียส จึงจะสามารถเริ่มกระบวนการอัดขึ้นรูปได้ เนื่องจากกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์ของเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีน จะใช้เวลาในกระบวนการอุ่นแม่พิมพ์นานประมาณ 2 ชั่วโมง ซึ่งบริษัทมีจำนวนเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีนประมาณ 300 เครื่อง จึงทำให้มีการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามาก ปัญหาที่พบเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีนมีการใช้งานมาเป็นระยะเวลานาน และปราศจากวิธีการปรับค่าตัวแปรของตัวควบคุมที่เหมาะสม จึงส่งผลต่อประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิไม่เป็นไปตามความต้องการ

บทความที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย การศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างและการตอบสนองของกระบวนการทำงานในรูปแบบเชิงความร้อนเพื่อนำไปสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้หลักการการถ่ายเทความร้อนที่ศึกษาเกี่ยวกับการพาความร้อนและการนำความร้อน [1] อย่างไรก็ตาม การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการทำงานเชิงความร้อนโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ระบบ ในการตอบสนองทางความร้อน [2-6] เพื่อหาสัมประสิทธิ์ของตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมแบบพีไอที่เหมาะสมกับระบบ [7-10]

บทความนี้ได้นำเสนอการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะจากวัสดุเมลามีน โดยใช้หลักการแลกเปลี่ยนความร้อนร่วมกับวิธีระบุเอกลักษณ์ที่มีเงินเนติกอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และนำไป

ออกแบบตัวควบคุมแบบ PI ในการควบคุมอุณหภูมิของแม่พิมพ์ ให้มีประสิทธิภาพตามความต้องการ

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

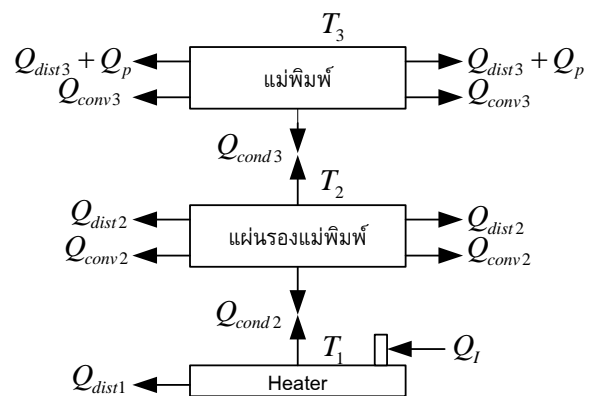
กระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะผลิตภัณฑ์เมลามีนเป็นการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ให้มีอุณหภูมิคงที่ตามรูปร่างของภาชนะนั้น โดยสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แผ่น Heater

ส่วนที่ 2 แผ่นรองแม่พิมพ์

ส่วนที่ 3 แม่พิมพ์ (Mold)

ดังนั้นจึงใช้กฎอนุรักษ์พลังงานพิจารณาการถ่ายเทความร้อนของระบบในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพการถ่ายเทความร้อนของระบบ

เมื่ออัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเท่ากับพลังงานความร้อนที่ไหลเข้าในระบบจะตามกฎการอนุรักษ์พลังงานดังนี้

$$mC_{p1} \frac{dT_1}{dt} = Q_I - Q_{cond2} - Q_{dist1} \quad (1)$$

$$mC_{p2} \frac{dT_2}{dt} = -Q_{cond2} - Q_{conv2} - Q_{cond3} - Q_{dist2} \quad (2)$$

$$mC_{p3} \frac{dT_3}{dt} = -Q_{cond3} - Q_{conv3} - (Q_{dist3} + Q_p) \quad (3)$$

จากสมการที่ (1) , (2) และ (3) สามารถจัดรูปสมการให้อยู่ในเทอมการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ตำแหน่ง T_1 , T_2 และ T_3 ได้ดังนี้

DRC-60

$$C_1 \dot{T}_1 = I^2 RN - \frac{(T_1 - T_2)}{R_{cond2}} - Q_{dist1} \quad (4)$$

$$C_2 \dot{T}_2 = -\frac{(T_2 - T_1)}{R_{cond2}} - \frac{(T_2 - T_{air})}{R_{conv2}} - \frac{(T_2 - T_3)}{R_{cond3}} - Q_{dist2} \quad (5)$$

$$C_3 \dot{T}_3 = -\frac{(T_3 - T_2)}{R_{cond3}} - \frac{(T_3 - T_{air})}{R_{conv3}} - (Q_{dist3} + Q_p) \quad (6)$$

กำหนดให้ $C_1 = mC_{p1}$, $C_2 = mC_{p2}$ และ $C_3 = mC_{p3}$

เมื่อ

- m คือ มวลของชิ้นงาน
- I คือ ค่ากระแสไฟฟ้า
- R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของแผ่น Heater
- N คือ จำนวนแผ่น Heater
- T_1 คือ อุณหภูมิที่แผ่น Heater
- T_2 คือ อุณหภูมิที่แผ่นรองแม่พิมพ์
- T_3 คือ อุณหภูมิที่แม่พิมพ์
- $C_{p1,p2,p3}$ คือ ความจุความร้อนจำเพาะของแผ่น Heater, แผ่นรองแม่พิมพ์ และ แม่พิมพ์
- C_1, C_2, C_3 คือ ความจุความร้อนของแผ่น Heater, แผ่นรองแม่พิมพ์ และ แม่พิมพ์
- Q_I คือ พลังงานที่ได้จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแผ่น Heater
- Q_{cond} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการนำ
- Q_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนแบบการพา
- $Q_{dist1}, Q_{dist2}, Q_{dist3}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการรบกวนภายนอกที่แผ่น Heater, แผ่นรองแม่พิมพ์ และ แม่พิมพ์
- Q_p คือ การสูญเสียความร้อนของกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีน

ในการพิจารณาค่าประมาณตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะจัดสมการที่ (4), (5) และ (6) ให้อยู่ในรูปสมการปริภูมิสแตต จึงได้กำหนดอุณหภูมิเป็นตัวแปรสแตตในแต่ละส่วนคือ T_1 , T_2 และ T_3 โดยมีอินพุตของระบบคือ Q_I ดังสมการที่ (7)

$$\begin{bmatrix} C_1 \dot{T}_1 \\ C_2 \dot{T}_2 \\ C_3 \dot{T}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ a & -(a+b+c) & c \\ 0 & c & -(c+d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ d \end{bmatrix} T_{air} \quad (7)$$

$$+ \begin{bmatrix} Q_I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{dist1} \\ Q_{dist2} \\ (Q_{dist3} + Q_p) \end{bmatrix}$$

โดยที่

$$a = \frac{1}{R_{cond2}}, b = \frac{1}{R_{conv2}}, c = \frac{1}{R_{cond3}}, d = \frac{1}{R_{conv3}}$$

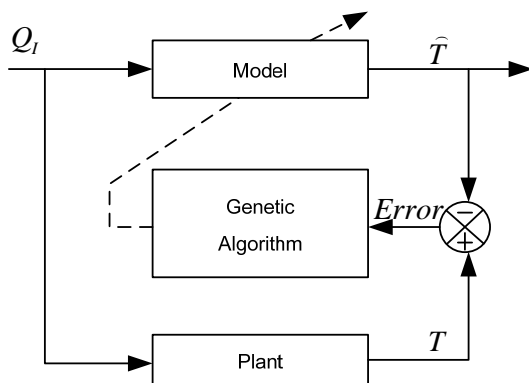
3. การประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีจินเนติกอัลกอริทึม

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีตัวแปรของโครงสร้างที่ไม่ทราบค่า จึงใช้เทคนิคการระบุเอกลักษณ์ระบบ (System Identification) เป็นการระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัตแบบวงเปิด จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลความรู้เกี่ยวกับอินพุตและเอาต์พุตของระบบจากการทดลองและการตรวจสอบวัดอย่างเหมาะสม ที่อาศัยการคำนวณเชิงตัวเลขแบบกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least Squares) เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าเอาต์พุตจริงที่ได้จากข้อมูลการทดลองและค่าเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อค้นหาตัวแปรที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สมบูรณ์ที่สุด การระบุเอกลักษณ์ระบบพลวัตแบบวงเปิดจะใช้วิธีการค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาทางปัญญาประดิษฐ์ที่ทรงประสิทธิภาพ ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพและมีการนำไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด จินเนติกอัลกอริทึมหรือเรียกโดยย่อว่า "GA" ดังนั้นจึงใช้วิธีการจินเนติกอัลกอริทึมเพื่อประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 2 จะเก็บข้อมูล อินพุตคือค่ากระแสไฟฟ้า (Q_I) และ เอาต์พุตคือค่าอุณหภูมิ (T) แบบวงเปิดเพื่อนำมาเป็น plant ให้กับระบบ ส่วน

DRC-60

แบบจำลอง (Model) จะใช้ค่าอินพุตเดียวกับ Plant ซึ่งจะนำค่าเอาต์พุตของ Plant ไปเปรียบเทียบกับค่าเอาต์พุตของแบบจำลอง จะเป็นค่าความคลาดเคลื่อน (Error) เพื่อใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร จนกว่าจะได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสมบูรณ์



ตารางที่ 1 ค่าตัวแปรที่ได้จากการประมาณค่า

Parameter	Ga1	Ga2	Ga3	mean
a	24.000	24.001	24.000	24.000
b	9.000	9.002	9.001	9.001
c	43.945	43.950	43.943	43.946
d	0.447	0.450	0.449	0.449
C1	799.995	799.987	799.999	799.994
C2	41,000.376	41,000.372	41,000.350	41,000.366
C3	52,250.181	52,250.175	52,249.005	52,249.787
Q_{dist1}	0.00024	0.00031	0.00027	0.00027
Q_{dist2}	0.00275	0.00268	0.00273	0.00272
Q_{dist3}	0.00011	0.00013	0.00012	0.00012

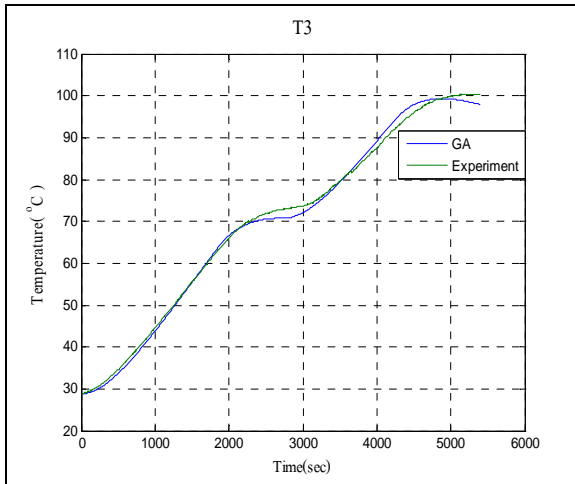
ผลของการระบุเอกลักษณ์ของระบบวงเปิด เมื่อนำค่า mean ที่ได้จากรายการที่ 1 แทนค่าตัวแปรในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อดูผลการตอบสนองของแบบจำลองเทียบกับผลการทดลอง ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3 กราฟเส้นสีน้ำเงินแสดงผลการตอบสนองอุณหภูมิ (T_3) ของแบบจำลองจากการประมาณค่าตัวแปร ส่วนกราฟเส้นสีเขียวแสดงผลการตอบสนองอุณหภูมิ (T_3) ของการทดลองจริง จะเห็นได้ว่าผลการตอบสนองมีความ

รูปที่ 2 การระบุเอกลักษณ์แบบวงเปิด

โดยจะเก็บผลการทดลองแบบวงเปิดโดยใช้การเปิดปิดรีเลย์แบบแม่เหล็ก เพื่อตัดต่อกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแผ่น Heater แทนตัวควบคุม โดยในการทำการทดลองเปิดปิดรีเลย์แบบแม่เหล็ก จะทำการเปิดปิดเป็นจำนวน 2 ครั้ง ซึ่งกำหนดค่าเริ่มต้นในการรันโปรแกรมดังนี้ $R = 45 \Omega$, $T_{air} = 32^\circ C$ และ $N = 3$ ส่วนตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจะใช้การประมาณค่าตัวแปรด้วยโปรแกรมจิ้นเนติกอัลกอริทึมเพื่อหาค่าที่เหมาะสมผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 1

ใกล้เคียงกัน แสดงว่าค่าตัวแปรที่ได้สามารถทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความสมบูรณ์ในระดับหนึ่ง

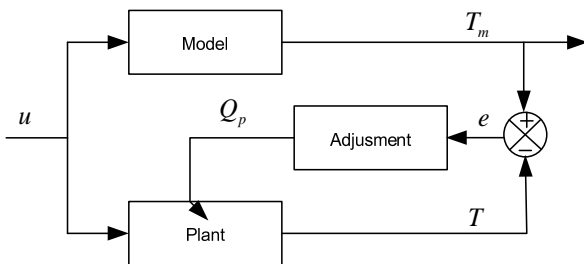
DRC-60



รูปที่ 3 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ (T_3)

4. การประมาณการสูญเสียความร้อน

ในการประมาณการสูญเสียความร้อนของกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีนมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยใช้วิธีระบบปรับตัวได้ (Adaptive system) ในการสร้างอัลกอริทึมเพื่อประมาณฟังก์ชันเปลี่ยนแปลงตามเวลาของการสูญเสียความร้อนของระบบเป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิง ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพหลักการทำงานของระบบปรับตัวได้

การประมาณค่าการสูญเสียความร้อนของกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีนโดยใช้แบบจำลองอ้างอิงที่ปรับตัวได้ ซึ่งตัว Adjustment เป็นอัลกอริทึมที่รับค่าเอาต์พุตของแบบจำลอง (T_m), ค่าเอาต์พุตของ Plant (T) และ สัญญาณอินพุต (u) ทำหน้าที่ปรับตัวแปรของ Plant คือค่าการสูญเสียความร้อน (Q_p) ของระบบ เพื่อให้ระบบมีการตอบสนอง เช่นเดียวกับแบบจำลองอ้างอิง

4.1 ระบบปรับตัวได้

ใช้ MIT rule ดังนั้นหลักการการทำงานของตัวชดเชยแบบปรับตัวได้คือการปรับค่าตัวแปร (Q_p) ให้แตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสองหมดไปทำได้โดยกำหนดให้ Loss function (J) จะมีค่าดังสมการที่ 8

$$J(Q_p) = \frac{1}{2}e^2 \quad (8)$$

การเปลี่ยนแปลงของตัวแปร (Q_p) ในทิศทาง Negative gradient of Loss function (J) คือ

$$\frac{\partial Q_p}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial Q_p} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial Q_p} \quad (9)$$

ซึ่งพิจารณาการเปลี่ยนอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ T_2 และ T_3 ดังนั้น Transfer function คือ

$$G(s) = \frac{T_3(s)}{T_2(s)} \quad (10)$$

กำหนดให้ Transfer function ของ Plant

คือ $kG(s)$ และ Transfer function ของแบบจำลองคือ $G_m(s) = k_o G(s)$ ซึ่งใช้หลักการ feedforward control แสดงดังนี้

$$u = Q_p u_c \quad (11)$$

เมื่อ u คือสัญญาณควบคุม และ u_c คือ สัญญาณอินพุต ส่วนสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากระบบ Transfer function คือ $Q_p kG(s)$ ซึ่งจะเท่ากับกับ $G_m(s)$ จะได้ตัวแปรในการปรับค่า (Q_p) คือ

$$Q_p = \frac{k_o}{k} \quad (12)$$

เมื่อนำสัญญาณเอาต์พุตของ plant เทียบกับแบบจำลอง จะได้ค่าความผิดพลาด (e) คือ

$$e = T - T_m = kG(p)Q_p u_c - k_o G(p)u_c \quad (13)$$

เมื่อ T คือเอาต์พุตของ plant, T_m คือเอาต์พุตของแบบจำลอง, Q_p คือตัวแปรปรับค่า และ $p = d/dt$ จึงกำหนดให้ sensitivity derivative เท่ากับ

$$\frac{\partial e}{\partial Q_p} = kG(p)u_c = \frac{k}{k_o} T_m \quad (14)$$

DRC-60

ใช้ MIT rule จะได้

$$\frac{de}{dt} = -\gamma' \frac{k}{k_o} T_m e = -\gamma T_m e \quad (15)$$

เมื่อ $\gamma = \gamma' k / k_o$, γ คือ อัตราการปรับตัว ในการวิเคราะห์ของ MRAS ถ้าตัวแปร (Q_p) ที่ใช้ในการปรับค่าเป็น time - varying แสดงดังนี้

$$G(p)(Q_p u) \quad (16)$$

เมื่อ $p = d / dt$ ถ้า $G(p) = p$ จะเท่ากับ

$$G(p)(Q_p u) = p(Q_p u) = Q_p \frac{du}{dt} + u \frac{dQ_p}{dt} \quad (17)$$

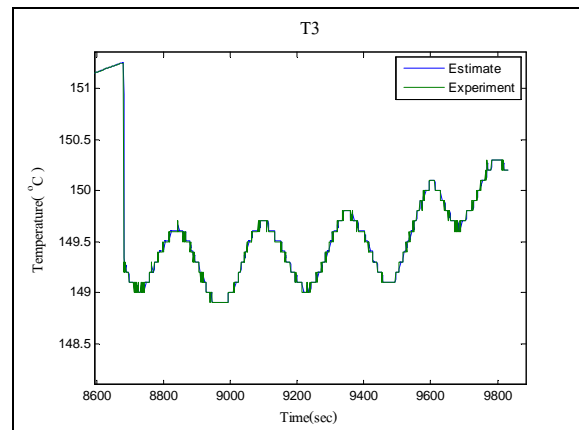
4.2 ผลการประมาณการสูญเสียความร้อน

ผลจากการประมาณค่าการสูญเสียความร้อนโดยวิธีระบบปรับตัวได้ในการสร้างอัลกอริทึมเพื่อปรับค่าการสูญเสียความร้อน (Q_p) ให้มีผลการตอบสนองของแบบจำลอง มีลักษณะคล้ายกับผลการทดลองทั้งหมด 2 ครั้ง ดังรูปที่ 5,6 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีนและรูปที่ 7,8 จะแสดงค่าการสูญเสียความร้อนที่ใช้ในการปรับเพื่อให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

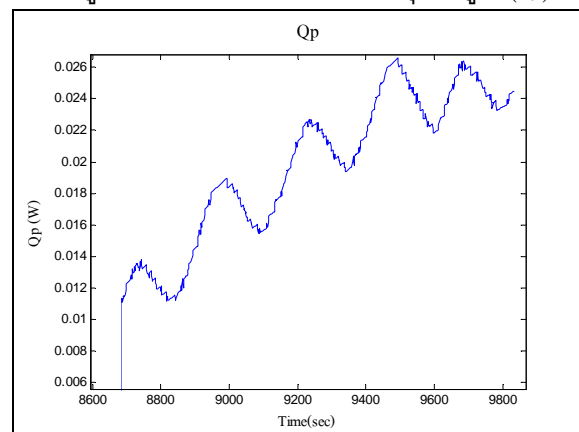
เมื่อแม่พิมพ์มีอุณหภูมิคงที่ประมาณ 151 องศาเซลเซียสก็จะสามารถเริ่มการผลิตชิ้นแรกได้ จากรูปที่ 5 เป็นการทดลองผลิตครั้งที่ 1 จะเริ่มผลิตที่เวลา 8,680 วินาที เริ่มโดยใส่ก้อนเมลามีนที่มีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการอัดแม่พิมพ์ใช้ระยะเวลาจนถึง 8,815 วินาที เมื่อถึงเวลาที่จะทำการเปิดแม่พิมพ์ออกเพื่อนำงานออกจากแม่พิมพ์และ เป่าทำความสะอาดแม่พิมพ์ถึงเวลา 8,931 วินาที ช่วงเวลานี้เป็นการรอวัตถุดิบที่เป็นผงเมลามีนผ่านการให้ความร้อนด้วยเตาไมโครเวฟให้มีอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะมีลักษณะเป็นก้อนเล็ก ถึงจะสามารถผลิตงานชิ้นต่อไปได้ การผลิตงานจะใช้เวลาประมาณ 4 นาทีต่อ 1 ชิ้น ชิ้นที่สองเริ่มโดยการใส่วัตถุดิบเข้าไปเหมือนเดิมจากนั้นทำการอัดใช้

ระยะเวลาถึง 9,070 วินาที ถึงเวลาก็เปิดแม่พิมพ์ออกเพื่อนำชิ้นงานออกถึงเวลา 9,186 วินาที ชิ้นที่สามใช้ระยะเวลาอัดถึง 9,317 วินาที เปิดแม่พิมพ์นำชิ้นงานออกถึง 9,436 วินาที ชิ้นที่สี่ใช้ระยะเวลาอัดถึง 9,571 วินาที เปิดแม่พิมพ์นำชิ้นงานออกถึง 9,632 วินาที และชิ้นที่ห้าใช้ระยะเวลาอัดถึง 9,765 วินาที เปิดแม่พิมพ์นำชิ้นงานออกถึง 9,830 วินาที ส่วนการผลิตครั้งที่ 2 อาจจะใช้เวลาไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับผู้ควบคุมเครื่อง แต่ช่วงเวลาที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปเท่ากัน ต่างกันเฉพาะช่วงเวลาเตรียมวัตถุดิบ

การทดลองครั้งที่ 1



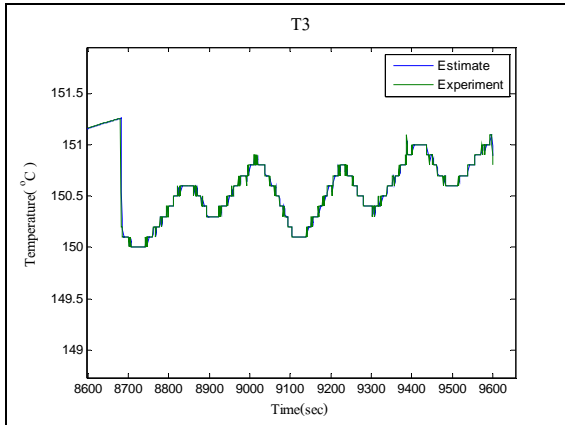
รูปที่ 5 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ (T_3)



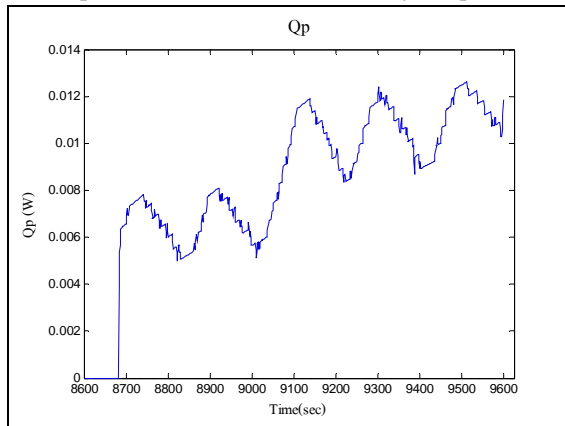
รูปที่ 6 การสูญเสียความร้อนของกระบวนการผลิต

DRC-60

การทดลองครั้งที่ 2



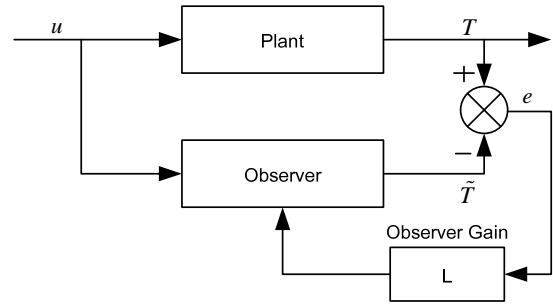
รูปที่ 7 ผลการตอบสนองของอุณหภูมิ (T_3)



รูปที่ 8 การสูญเสียความร้อนของกระบวนการผลิต

5. ตัวประมาณค่าสแตตแบบอันดับเต็ม

ในทางปฏิบัติตัวแปรสแตตของระบบที่ทำการศึกษานั้นไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง ดังนั้นหากมีความจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรสแตตของระบบเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการควบคุมระบบจึงต้องการประมาณค่าโดยใช้ตัวสังเกต ทั้งนี้ระบบต้องมีคุณสมบัติในการสังเกตได้ หลักการทำงานของตัวสังเกตจะนำค่าความแตกต่างระหว่างเอาท์พุทของระบบที่ต้องการจะประมาณค่าตัวแปรสแตต และเอาท์พุทจากระบบของตัวสังเกตมาประมวลผลผ่านค่าอัตราขยาย (Observer Gain) ของตัวสังเกตเพื่อลดค่าความผิดพลาดระหว่างทั้งสองระบบ แสดงหลักการทำงานดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แผนภาพระบบประมาณค่าสแตตหรือตัวสังเกตอันดับเต็ม

ระบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะทำการควบคุมมีรูปแบบดังนี้

$$\dot{T} = AT + Bu + Dw \quad (18)$$

$$y = CT \quad (19)$$

การออกแบบตัวประมาณค่าสแตตของระบบที่ต้องการควบคุมจะมีรูปแบบดังนี้

$$\dot{\tilde{T}} = A\tilde{T} + Bu + Dw \quad (20)$$

$$\tilde{y} = C\tilde{T} \quad (21)$$

กำหนดค่าผิดพลาดของการประมาณค่าสแตตได้ตั้งสมการที่ 22

$$e = T - \tilde{T} \quad (22)$$

จากสมการที่ 18, 20 และ 22 สมการพลวัตของสัญญาณผิดพลาดสามารถเขียนได้คือ

$$\dot{e} = Ae \quad (23)$$

โดยที่

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-a}{C_1} & \frac{a}{C_1} & 0 \\ \frac{a}{C_2} & \frac{-(a+b+c)}{C_2} & \frac{c}{C_2} \\ 0 & \frac{c}{C_3} & \frac{-(c+d)}{C_3} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{RN}{C_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \ 1 \ 0]$$

DRC-60

$$\text{และ } D = \begin{bmatrix} -Q_{dist1} \\ \frac{b \cdot T_{air}}{C_2} - Q_{dist2} \\ \frac{d \cdot T_{air}}{C_3} - (Q_{dist3} + Q_p) \end{bmatrix}$$

เราสามารถตรวจสอบคุณสมบัติความสังเกตได้โดยพิจารณาเมตริกซ์ความสังเกตได้ดังนี้

$$\text{Observability matrix} = P = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

ระบบจะมีคุณสมบัติความสังเกตได้ก็ต่อเมื่อค่าลำดับชั้นของเมตริกซ์ความสังเกตได้เท่ากับ n คือ

$$\text{rank}[P] = 3 \quad (25)$$

การออกแบบ Observer Poles จะกำหนดค่า $\zeta = 0.7$ คือ อัตราส่วนความหน่วงของตัวสังเกตและคำนวณค่า ω_n คือค่าความถี่ธรรมชาติของตัวสังเกตจากเวลาเข้าที่ (setting time) กำหนด $t_s = 6,600 \text{ sec}$ ที่ 2% จะได้ตำแหน่งโพล S_1 และ S_2 ดังสมการที่ 26

$$S_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad (26)$$

ส่วนตำแหน่งโพล S_3 จะกำหนดเป็น 10 เท่าของตำแหน่งโพล S_1 และ S_2 บนแกนจริง จากนั้นคำนวณค่า L คือค่าอัตราขยายได้ดังนี้

$$L = \text{acker}(A, B, S) \quad (27)$$

สมการของตัวสังเกตอันดับเต็มในรูปแบบของ State Space Form ได้ดังสมการที่ 28 และ 29

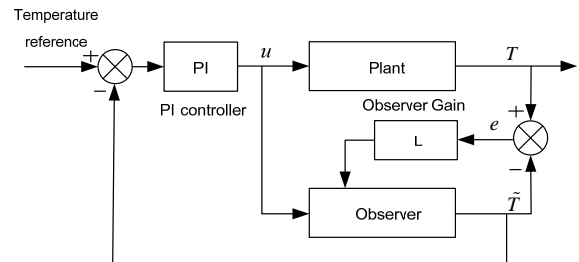
$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{T}}_1 \\ \dot{\tilde{T}}_2 \\ \dot{\tilde{T}}_3 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \tilde{T}_1 \\ \tilde{T}_2 \\ \tilde{T}_3 \end{bmatrix} + [B]T^2 + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} e + [D]w \quad (28)$$

$$\tilde{y} = [0 \quad 1 \quad 0] \begin{bmatrix} \tilde{T}_1 \\ \tilde{T}_2 \\ \tilde{T}_3 \end{bmatrix} \quad (29)$$

โดยที่ w นั้นเป็นสัญญาณรบกวนหรือ Disturbance input

6. การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีน

จากการศึกษาระบบการทำงานของเครื่องมีระบบควบคุมอุณหภูมิที่แผ่นรองแม่พิมพ์ ซึ่งเป็นแบบปิดที่มีตัวควบคุมแบบ PID ผ่านรีเลย์แบบแม่เหล็ก ลักษณะการควบคุมมีผลต่อประสิทธิภาพของอุณหภูมิที่แม่พิมพ์ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิตชิ้นงาน ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบตัวควบคุมใหม่เป็นแบบพีไอโดยจะควบคุมอุณหภูมิที่แม่พิมพ์โดยตรง ซึ่งอุณหภูมิที่แม่พิมพ์ ไม่สามารถวัดได้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงใช้ค่าอุณหภูมิที่ได้จากการประมาณค่าสแตตแบบอันดับเต็มเพื่อเป็นค่าป้อนกลับให้กับระบบควบคุม แสดงหลักการทำงานดังรูป 10



รูปที่ 10 แผนภาพระบบควบคุมแบบปิดของเครื่องอัดขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ สำหรับการออกแบบค่าพีไอ งานวิจัยนี้ใช้วิธี Response optimization ของโปรแกรม MATLAB เพื่อคำนวณค่าพีไอที่เหมาะสม โดยการกำหนดรูปแบบการตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุต ที่มีต่ออินพุตแบบขั้นบันไดให้มี Percent Overshoot ไม่เกิน 5%, ค่า Rise Time น้อยกว่า 6,000 วินาที และค่า Setting time น้อยกว่า 8,000 วินาที ซึ่งโปรแกรม MATLAB จะใช้วิธี Gradient Descent เพื่อหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีไอคือ K_p และ K_i

การหาค่าตัวแปรของตัวควบคุมพีไอที่เหมาะสมที่สุดจากการตอบสนองโดยวิธี Gradient Descent แบบมีเงื่อนไข (Output constrain) เพื่อหาค่าตัวแปร K_p และ K_i สำหรับฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

DRC-60

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

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

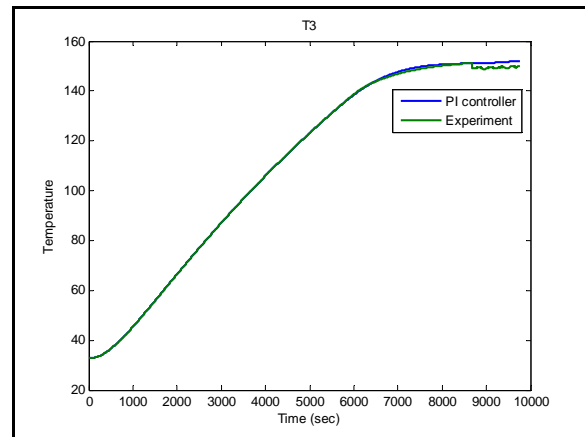
วิธี Gradient Descent เป็นระเบียบวิธีขั้นพื้นฐานของการแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดโดยพิจารณา Gradient ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ถ้าเคลื่อนจุดคำตอบไปในทิศทางของค่า Gradient จากจุดเริ่มต้นใดๆ การเคลื่อนที่ตำแหน่งของผลเฉลยในทิศทางลบ Gradient จะส่งผลให้การลดลงของค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์มากที่สุด

7. ผลการทดลอง

ตารางที่ 2 ค่าตัวแปรตัวควบคุมพีไอ

No. Test	PI control parameter	
	K_p	K_i
1	0.5248	0.0000248
2	0.5567	0.0000234
3	0.5467	0.0000249
ค่าเฉลี่ย	0.5427	0.0000244

จากตารางที่ 2 นำค่าเฉลี่ยของตัวแปรตัวควบคุมพีไอ ที่ได้จากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าตัวแปรของตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้คือ $K_p = 0.5427$ และ $K_i = 0.0000244$ สามารถควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการผลิตภาชนะเมลามีนเป็นไปตามความต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID เดิม แสดงผลการตอบสนองดังกราฟที่ 11



รูปที่ 11 กราฟแสดงผลการตอบสนองระหว่างการออกแบบตัวควบคุมพีไอกับตัวควบคุมแบบ PID เดิม

8. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้ได้ศึกษาการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีน เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และได้ใช้การระบุเอกลักษณ์โดยใช้วิธีการค้นหาแบบจีนเนติกอัลกอริทึม โดยวิเคราะห์การตอบสนองของแบบจำลองเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลอง เพื่อประมาณค่าตัวแปรของแบบจำลองของเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีน และใช้วิธีระบบปรับตัวได้ในการสร้างอัลกอริทึมเพื่อประมาณค่าการสูญเสียความร้อนของกระบวนการผลิตจานเมลามีนที่ทำให้อุณหภูมิระหว่างการผลิตเปลี่ยนแปลงไม่มาก ผลการทดลองซึ่งสามารถหาค่าการสูญเสียความร้อนที่มีผลการตอบสนองของอุณหภูมิใกล้เคียงกับแบบจำลองอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะสามารถประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการอัดขึ้นรูปภาชนะเมลามีนไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอที่มีความเหมาะสมกับระบบ เพื่อให้การตอบสนองของอุณหภูมิเป็นไปตามความต้องการได้

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และ บริษัท ศรีไทยซูเปอร์แวร์ จำกัด มหาชน ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย

DRC-60

10. เอกสารอ้างอิง

[1] Shimpei Hashida, Ikuo Nanno, Nobutomo Matsunaga and Shigeyasu Kawaji. (2007). Experimental Study on Uniform Temperature Control for Two-dimensional Heating Plate Control, International Conference on Control, Automation and Systems, Oct. 17-20, 2007 in COEX, Seoul, Korea.

[2] Liu Yucheng, Liu Yubin, Li Taifu, Su Yingying, Wang Debiao. (2009). A Method of Synthetic Optimizing Adjustment Based on Fuzzy Genetic Arithmetic for Control of Electric Heater, International Forum on Computer Science-Technology and Applications, Dec. 25-27, 2009 in Chongqing.

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

[4] John J.Grefenstette. (1986). Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms, IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-16(1), January/ February 1986, pp. 122 - 128.

[5] Yeong-Koo Yeo and Tae-In Kwon. (2004). Control of pH Processes Based on the Genetic Algorithm, Korean J. Chem. Eng, 21(1), 6-13.

[6] K. J. Astrom and Wittenmark. (1995). Adaptive Control (Second edition). Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Korean J. Chem. Eng., 21(5), 6-13.

[7] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2538). การควบคุมระบบพลศาสตร์, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[8] จิระพล ศรีเสริฐผล, สุพจน์ ปลั่งพิมาย และ ภาวิน จาวายล (2553). การวิเคราะห์และออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้สำหรับเตาอบหลอดอินฟราเรดในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, วารสารวิจัยและ

พัฒนา มจร, ปีที่ 33 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม – กันยายน 2553, หน้า 235 – 248.

[9] Yeong-Koo Yeo, Tae-In Kwon and Kwang Hee Lee. (2004) An Energy Effective PID Tuning Method for the Control of Polybutadiene Latex Reactor Based on Closed-loop Identification. Korean J. Chem. Eng., 21(5), 935-941.

[10] 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(1), pp. 122-129.