

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสมสำหรับควบคุมอุณหภูมิ ของกาต้มน้ำไฟฟ้าด้วยการค้นหาแบบค้างคาว Optimal PID Controller Design for Temperature Control of Electric Kettle by Bat Search

สัตถาภูมิ ไทยพานิช¹, ดนุพล คำปัญญา^{2*}

Sattarpoom Thaiparnit¹, Danupon Kumpanya^{2*}

¹สาขาวิชาระบบสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์สุพรรณบุรี

¹Department of Information System and Business Computer,
Faculty of Business Administration and Information Technology,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Suphanburi

*Corresponding author email: danupon.k@rmutsb.ac.th

Received 30 Aug. 2025 Revised 24 Jan. 2026 Accepted 24 Mar. 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสมสำหรับควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้าด้วยการค้นหาแบบค้างคาวซึ่งเป็นวิธีเชิงเมตา-ฮิวริสติกที่มีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ การค้นหาแบบค้างคาวจะทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์มีค่าน้อยที่สุดที่กำหนดจากค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองระหว่างค่าอุณหภูมิอ้างอิงและค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงของกาต้มน้ำไฟฟ้า ทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส จากผลการจำลอง พบว่า การค้นหาแบบค้างคาวสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีได้อย่างเหมาะสม ให้ผลตอบสนองของระบบควบคุม

อย่างมีประสิทธิภาพกว่าการควบคุมด้วยเทอร์โมสแตท นอกจากนี้ ผลการจำลองยังได้รับการยืนยันจากผลการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของกาทัมน้ำไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการจริง

คำสำคัญ: ตัวควบคุมพีไอดี, กาทัมน้ำไฟฟ้า, การค้นหาแบบคางคาว, เมตา-ฮิวริสติก

Abstract

This research presents an optimal the PID controller design for temperature control of an electric kettle by bat search (BS) which is the most efficient meta-heuristic methods. In this research, the BS is conducted to minimize the control objective function formulated by the sum-squared error between the reference temperature and the actual temperature of an electric kettle, and the experiment was carried out by testing the temperature control of electric kettles at 3 different temperature levels: 60, 80 and 100 degree Celsius. As the simulation, it resulted that the BS was able to optimize the parameters of the PID controller with very effective responses than the control by thermostat. In addition, the simulation results are confirmed by the experiment results of the temperature control of an electric kettle developed in the real laboratory.

Keywords: PID controller, electric kettle, bat search, meta-heuristic

1. บทนำ

กาต้มน้ำไฟฟ้าเป็นหม้อต้มน้ำให้ร้อนชนิดหนึ่ง โดยทั่วไป มีโครงสร้างเป็นโลหะสำหรับต้มน้ำร้อน ฝาครอบและหุ้บมีลักษณะอยู่ในตัว กาต้มน้ำไฟฟ้าใช้กันอย่างแพร่หลายในการต้มน้ำชงชา กาแฟ และอื่นๆ เป็นต้น กาต้มน้ำไฟฟ้าสามารถทำความเร็วในการต้มน้ำให้ร้อนได้เร็วที่สุด มีความเร็วเกือบสองเท่าของเตาต้มน้ำร้อนแบบตั้งพื้น ดังนั้น การใช้กาต้มน้ำไฟฟ้าจึงใช้ทำอาหารและเครื่องดื่มได้หลากหลาย หลายปีที่ผ่านมาปัญหาของการควบคุมอุณหภูมิเป็นปัญหาที่ทำลายมาตลอดโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับวิศวกรรมระบบควบคุม (Yadav & Trivedi, 2014) แม้ว่าเครื่องใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีการควบคุมอุณหภูมิในรูปแบบเดียวหรือในรูปแบบอื่นๆ แต่ยังคงใช้วิธีการควบคุมอย่างง่าย ๆ เช่น วิธีการควบคุมแบบเปิด-ปิดสำหรับกาต้มน้ำไฟฟ้าที่ใช้วิธีการควบคุมอุณหภูมิที่โดดเด่น ก็คือ การควบคุมแบบเปิด-ปิดโดยใช้เทอร์โมสแตท (thermostat) แต่เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการต้มน้ำด้วยกาต้มน้ำไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าการต้มน้ำชนิดเดียวกันแบบตั้งพื้น ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องพัฒนาระบบควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียพลังงานและต้นทุนที่ใช้กาต้มน้ำไฟฟ้า

ตัวควบคุมตระกูลพีไอดี (proportional-integral-derivative: PID) เป็นตัวควบคุมที่มีประวัติศาสตร์ยาวนานที่สุดและใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน (Minorsky, 1922), (Pessen, 1996) วิศวกรทั่วไปชอบใช้ตัวควบคุม PID ในการประยุกต์กับงานทางวิศวกรรมเนื่องจากสร้างได้ง่าย และให้สมรรถนะคงทน (Madugu, 2018) แต่การทำงานก็ยังคงถูกจำกัดไว้เพียงบางส่วนเท่านั้น และมีคุณสมบัติการออกแบบความคงทนที่ไม่น่าพอใจมากนัก ในงานวิจัยนี้ การต้มน้ำไฟฟ้าจึงได้ถูกประดิษฐ์ขึ้น เพื่อลดการใช้พลังงานโดยใช้ตัวควบคุม PID ด้วยวิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงเมตา-ฮิวริสติก (meta-heuristic optimization search) (Talbi, 2009) ที่ได้รับการยอมรับและนิยมอย่างแพร่หลาย (Yang, 2010a) อัลกอริทึมเมตา-ฮิวริสติกจำนวนมากได้รับการพัฒนาสำหรับแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงตัวเลขและเชิงการจัด (combinatorial) และได้ประสบความสำเร็จในการนำไปประยุกต์กับการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่เป็นปัญหาจริงทางวิศวกรรม อาทิเช่น การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบู่เชิงปรับตัว (โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง และพิรวัจน์ มีสุข, 2563) และการออกแบบพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Golden Section Search (อนันต์

นิมิตวาทน์ และอรรถสิทธิ์ ชื่นใจ, 2565) ซึ่งหนึ่งในวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเชิงเมตา-ฮิวริสติกที่พบว่ามีประสิทธิภาพมาก นั่นคือ การค้นหาแบบค้างคาว (bat search: BS) ถูกนำเสนอโดย Yang เมื่อปี ค.ศ. 2010 (Yang, 2010b) โดยได้รับแรงบันดาลใจที่เกิดจากพฤติกรรมการสะท้อนคลื่นเสียงความถี่สูง (sonar) ของค้างคาวกินแมลงขนาดเล็กที่มีการปล่อยพัลส์และความดังที่แตกต่างกัน (echolocation) จากที่ผ่านมา พบว่า BS ได้ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมด้านต่างๆ เช่น การออกแบบคานเชื่อมประกอบ (design of welded beam) (Yang, 2011) การออกแบบภาชนะรับแรงดัน (design of pressure vessel) การออกแบบสปริง (design of spring) (Tsai et al., 2011) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาผลตอบสนองของระบบในโดเมนเวลา (time-domain) ที่สามารถแบ่งออกเป็นผลตอบสนองเชิงการติดตามคำสั่งอินพุต (command following) และการกำจัดสัญญาณรบกวน (disturbance rejection) ประกอบด้วย ค่าพุ่งเกินสูงสุด (maximum overshoot: M_p) ช่วงเวลาขึ้น (rise time: t_r) ช่วงเวลาเข้าที่ (settling time: t_s) และค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว (steady-state error: e_{ss}) ในขณะที่ ความคงทน (robustness) จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงจากการรบกวนที่เกิดจากภายนอก (external disturbance: t_d) นอกจากนี้ การออกแบบตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสมด้วย BS สามารถกำหนดค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p ให้มีค่าน้อยกว่า 20% และค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว e_{ss} ให้มีค่าน้อยกว่า 1%

ดังนั้น วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ คือ การออกแบบตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสมสำหรับควบคุมอุณหภูมิของกาดม้มน้ำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 3 ระดับ โดยใช้วิธี BS (Yang, 2010b) กับค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (sum-squared error: SSE) ซึ่งคำนวณจากผลรวมของค่าผลต่างกำลังสองระหว่างค่าอุณหภูมิอ้างอิง (reference temperature) และค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริง (actual temperature) ของกาดม้มน้ำไฟฟ้าที่กำหนดให้เป็นค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function: F) ที่มีค่าน้อยที่สุดสำหรับอุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส

รายละเอียดในงานวิจัยจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้ วิธีดำเนินการวิจัยจะกล่าวในหัวข้อที่ 2 ในหัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงผลการวิจัย ส่วนในหัวข้อที่ 4 จะกล่าวถึงอภิปรายผลและสุดท้ายในหัวข้อที่ 5 จะเป็นสรุปผลการวิจัย ตามลำดับ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกาต้มน้ำไฟฟ้า

การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ของกาต้มน้ำไฟฟ้าสามารถหาได้โดยให้สมมติอุณหภูมิของน้ำที่อยู่ภายในกาต้มน้ำไฟฟ้าสม่ำเสมอ และอุณหภูมิภายนอกของระบบมีค่าคงที่ โดยใช้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (the first law of thermodynamics) (Stphanopoulos, 2006) แสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$C_T \frac{dT_w}{dt} = q(t) - q_o(t) \quad (1)$$

โดยที่ C_T คือ ความจุความร้อนของระบบ (thermal capacity of the system) ($J / ^\circ C$)

$q_o(t)$ คือ การสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม (heat loss to the environment)

$$(J), q_o(t) = \frac{(T_w - T_a)}{R_T}$$

T_a คือ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (ambient temperature) ($^\circ C$)

R_T คือ ความต้านทานความร้อน (thermal resistance) ($^\circ C / J$)

T_w คือ อุณหภูมิของน้ำ (temperature of the water) ($^\circ C$)

$q(t)$ คือ ความร้อนที่ถูกจ่ายโดยอุปกรณ์ทำความร้อน (heat supplied by the heater)(J)

แทนค่า $q_o(t) = \frac{(T_w - T_a)}{R_T}$ ลงในสมการที่ (1) แสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$C_T \frac{dT_w}{dt} = q(t) - \frac{(T_w - T_a)}{R_T} \quad (2)$$

$$\frac{dT_w}{dt} + \frac{T_w}{R_T C_T} = \frac{q(t)}{C_T} + \frac{T_a}{R_T C_T} \quad (3)$$

ผลการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) สมการที่ (3) แสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$sR_T C_T T_w(s) + T_w(0) + T_w(s) = Q(s)R_T + T_a(s) \quad (4)$$

แต่อุณหภูมิสภาพแวดล้อมคงที่ $T_w(0) = T_a(s)$ สมการที่ (4) แสดงได้ดังสมการที่ (5)

$$G(s) = \frac{T_w(s)}{Q(s)} = \frac{R_T}{(R_T C_T s + 1)} \quad (5)$$

โดยที่ $R_T C_T$ คือ ค่าคงตัวทางเวลาของกระบวนการ (time constant of the process) มีค่าเท่ากับ τ

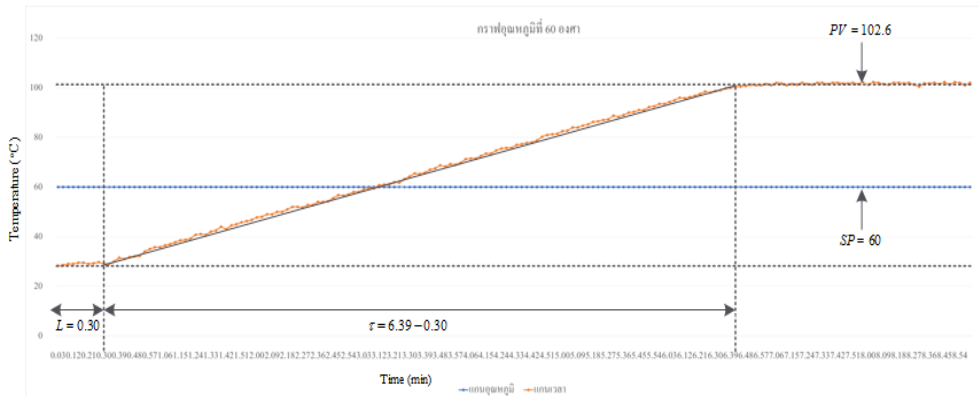
R_T คือ ค่าอัตราขยายของกระบวนการ (process of the gain) มีค่าเท่ากับ K_g ในทางปฏิบัติ พบว่า มีเวลาไร้ผลสนอง (dead time: L) (Prasad et al, 2012) สามารถเขียนได้เป็น e^{-Ls} สมการที่ (5) จึงก่อรูปเป็นสมการที่ (6)

$$G_p(s) = \frac{K_g}{(\tau s + 1)} e^{-Ls} \quad (6)$$

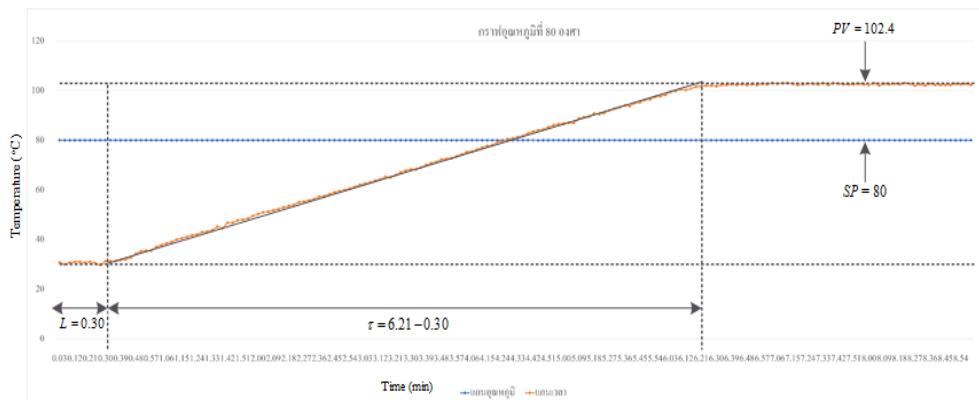
ในงานวิจัยนี้ ทดสอบผลตอบสนองวงเปิดการควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการจริง แสดงได้ดังภาพที่ 1 การทดสอบใช้กาต้มน้ำไฟฟ้า OTTO รุ่น PT-104 กำลังไฟฟ้า 1,500 วัตต์ ขนาดความจุ 1.8 ลิตร ที่มีระบบตัดความร้อนและมีขดลวดความร้อนโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ชนิดเค (K-type) ตรวจจับอุณหภูมิที่มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 1.5 องศาเซลเซียส ส่งสัญญาณแอนะล็อกมามาตรฐานเข้าบอร์ดอาดูโน นาโน (arduino nano) ขนาด 10 บิต มีค่าอยู่ในช่วง 0–1023 อัตราการสุ่มตัวอย่าง (sampling rate) 9.6 กิโลเฮิรตซ์ ใส่น้ำในกาต้มน้ำร้อนไฟฟ้า 1/2 ของกาต้มน้ำ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 30 องศาเซลเซียส ทดสอบหาผลตอบสนองวงเปิดที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 9 นาที แสดงได้ดังภาพที่ 2–4 ในขณะที่ ค่าพารามิเตอร์ของผลตอบสนองวงเปิดในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนแสดงได้ดังตารางที่ 1



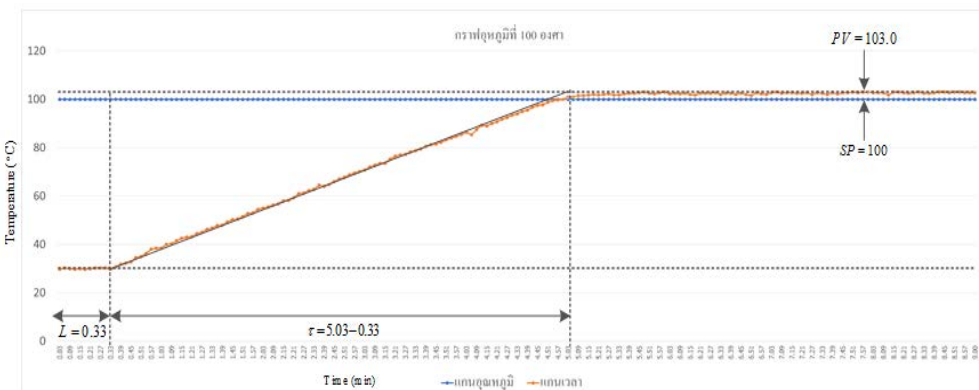
ภาพที่ 1 การควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้า



ภาพที่ 2 ผลตอบสนองวงเปิดที่ 60 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3 ผลตอบสนองวงเปิดที่ 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 4 ผลตอบสนองวงเปิดที่ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของผลตอบสนองวงเปิดในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน

Temperature (°C)	Parameters			Transfer functions
	$K_g = \frac{\Delta PV}{\Delta SP}$	τ (sec.)	L (sec.)	
60	1.71	365.4	18.0	$G_p(s) = \frac{1.71}{365.4s + 1} e^{-18.0s}$
80	1.28	354.6	18.0	$G_p(s) = \frac{1.28}{354.6s + 1} e^{-18.0s}$
100	1.03	282.0	19.8	$G_p(s) = \frac{1.03}{282.0s + 1} e^{-19.8s}$

หมายเหตุ: PV คือ ตัวแปรกระบวนการ (process variable) และ SP คือ ค่าที่กำหนดไว้ (value to a set-point) (ไชยันต์ สุวรรณชีวะศิริ, 2553)

2.2 การค้นหาแบบค้างคาว

การค้นหาแบบค้างคาว (BS) (Yang, 2010b) เป็นวิธีการเลียนแบบพฤติกรรม การสะท้อนคลื่นเสียงความถี่สูง (sonar) คลื่นเสียงความถี่สูงหูของมนุษย์จะไม่ได้ยินเสียง แต่หูของค้างคาวมีความไวสูงมากสามารถตรวจจับคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงที่ส่งออกไป กระแทกกับวัตถุใดๆ แล้วสะท้อนกลับมายังหูของค้างคาวได้ ทำให้ค้างคาวสามารถรับรู้ถึง ตำแหน่งและระยะห่างของสิ่งกีดขวางจากเสียงที่สะท้อนกลับมาได้ รวมทั้งตรวจสอบ ตำแหน่งของอาหาร (เหยื่อ) ได้อีกด้วย การค้นหาแบบค้างคาวอาศัยกลไกที่สำคัญ 3 ข้อ คือ

1) ค้างคาวสามารถค้นหาตำแหน่งของวัตถุ โดยให้ปริภูมิการค้นหาเป็น d มิติ และ ค้างคาวตัวที่ i สามารถแทนด้วย x_i ความเร็วของค้างคาวตัวที่ i สามารถแทนด้วย v_i ความถี่พัลส์ของค้างคาวตัวที่ i สามารถแทนด้วย f_i ตำแหน่ง (ผลเฉลย) ใหม่ x'_i และ ความเร็วใหม่ v'_i ในช่วงเวลา t การปรับปรุงความถี่พัลส์อาศัยสมการที่ (7) ถึงสมการที่ (9) เมื่อ $\beta \in [0,1]$ คือ เวกเตอร์การสุ่ม (random vector) ที่หาได้จากการแจกแจงแบบปกติ (uniform distribution) x_* คือ ผลเฉลยวงกว้าง (global solution) ที่อยู่ในรอบปัจจุบัน เมื่อเทียบกับผลเฉลยทั้งหมดในจำนวนค้างคาว n ตัว และ t คือ รอบการค้นหาปัจจุบัน โดยการค้นหาเฉพาะที่ (local search) ผลเฉลยใหม่ถูกสร้างขึ้นจากผลเฉลยวงกว้างที่ดีที่สุด ในรอบปัจจุบันดังสมการที่ (10) เมื่อ $\varepsilon \in [-1,1]$ คือ จำนวนการสุ่ม (random number) โดยที่ $A' = (A'_i)$ คือ ความดังของเสียงเฉลี่ยของค้างคาวทั้งหมดในช่วงเวลานั้น

$$f_i = f_{\min} + \beta(f_{\max} - f_{\min}) \quad (7)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + f_i(x_i^{t-1} - x_*) \quad (8)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (9)$$

$$x_{\text{new}} = x_{\text{old}} + \varepsilon A^t \quad (10)$$

2) ค่าความถี่ทิศทางบินแบบสุ่ม (randomly) ด้วยความเร็ว v_i ในตำแหน่ง x_i ด้วยความถี่คงที่ $f_{\min}$ โดยเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่น λ และความดังของเสียง A_0 เพื่อค้นหาอาหารและสามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นของพัลส์ที่ปล่อยออกมาและปรับอัตราการปล่อยพัลส์ (pulse emission: r) โดยที่ $r \in [0,1]$ ปกติขึ้นอยู่กับระยะห่างเป้าหมาย การปล่อยพัลส์จะเริ่มจากค่าที่เป็นศูนย์และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อค่าความถี่ของพัลส์ (เหยื่อ) เพิ่มขึ้น อัตราการปล่อยพัลส์ของค่าความถี่จะถูกปรับเปลี่ยนไปตามสมการที่ (11)

$$r_i^{t+1} = r_i^0(1 - e^{-\gamma t}) \quad (11)$$

3) ความดังของเสียงสามารถเปลี่ยนแปลงได้หลายรูปแบบ นั่นคือ ความดังของเสียงจะเปลี่ยนแปลงจากความดังของเสียงสูงที่สุด A_0 ไปยังค่าคงที่ต่ำที่สุด $A_{\min}$ ความดังจะลดเรื่อยๆ เมื่อค่าความถี่ของพัลส์ (เหยื่อ) เพิ่มขึ้น โดยที่ ความดังของเสียงจะถูกปรับเปลี่ยนตามสมการที่ (12)

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t \quad (12)$$

จากกลไกที่สำคัญ 3 ข้อ ของ BS สามารถเขียนเป็นรหัสจำลอง (pseudo codes) ที่ใช้เป็นตัวแทนขั้นตอนวิธีของ BS แสดงได้ดังภาพที่ 5

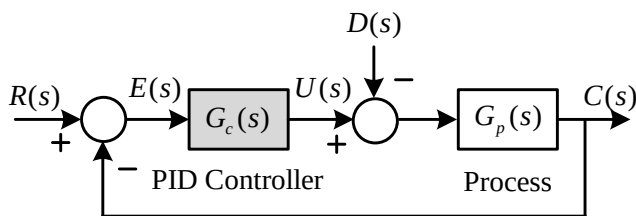
Initialized:

- Objective function $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$
- Initialize the bat population $x_i = (i = 1, 2, \dots, n)$ and v_i
- Define pulse frequency f_i at x_i
- Initialize pulse rate r_i and the loudness A_i
- while** ($t < \text{Max_Gen}$) or (Termination Criteria: TC)
 - Generate new solutions by adjusting frequency
 - Update velocities and locations/solutions by using (7) - (9)
 - if** ($\text{rand} > r_i$)
 - Select as solution among the best solutions
 - Generate a local solution around the selected best solution
 - else if**
 - Generate a new solution by flying randomly
 - if** ($\text{rand} < A_i \ \& \ f(x_i) < f(x_*)$)
 - Accept the new solutions
 - Increase r_i and reduce A_i
 - end if**
 - Rank the bats and find the current best x_*
- End while**
- Report the best solution found

ภาพที่ 5 รหัสจำลองที่ใช้เป็นตัวแทนขั้นตอนวิธีของ BS (Yang, 2010b)

2.3 การออกแบบระบบควบคุมพีไอดี

โครงสร้างของระบบควบคุม PID แสดงได้ดังภาพที่ 6 ตัวควบคุม (controller) $G_c(s)$ รับสัญญาณคลาดเคลื่อน (error signal) $E(s)$ มาคำนวณเพื่อผลิตสัญญาณควบคุม (control signal) $U(s)$ และส่งไปควบคุมกระบวนการ (process) $G_p(s)$ ให้ผลตอบแทนหรือเอาต์พุต (output) $C(s)$ มีความสอดคล้องกับอินพุตอ้างอิง (reference input) $R(s)$ พร้อมทั้งกำจัดสัญญาณรบกวน (disturbance signal) $D(s)$ ไปพร้อมกัน

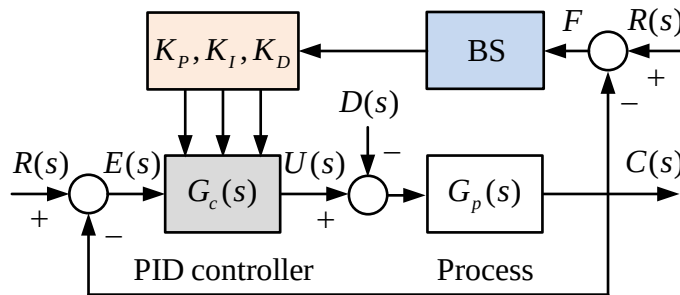


ภาพที่ 6 โครงสร้างของระบบควบคุม PID

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PID แสดงได้ดังสมการที่ (13) โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายเชิงปรับสัดส่วน (proportional gain) K_i เป็นอัตราขยายเชิงอินทิกรัล (integral gain) และ K_d เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (derivative gain) ตามลำดับ

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s = \frac{K_D s^2 + K_p s + K_I}{s} \quad (13)$$

การออกแบบระบบควบคุม PID ด้วย BS แสดงได้ดังภาพที่ 7 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F จะถูกป้อนให้กับ BS เพื่อทำหน้าที่ค้นหาค่าพารามิเตอร์ K_p , K_I และ K_D ทั้ง 3 ตัว ของตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสม โดยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F หาจากผลรวมของ ค่าผลต่างกำลังสองระหว่างค่าอนุพันธ์อ้างอิง $R(s)$ และค่าอนุพันธ์ที่เกิดขึ้นจริง $C(s)$ เมื่อ N คือ จำนวนข้อมูล (data number) ที่นำมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F เพื่อให้อยู่ในรูปผลรวมค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (SSE) แสดงได้ดังสมการที่ (14) โดยค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F จะถูกป้อนให้กับ BS เพื่อให้มีค่าน้อยที่สุดในการค้นหา ค่าพารามิเตอร์ K_p , K_I และ K_D ทั้ง 3 ตัว ของตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสม



ภาพที่ 7 การออกแบบระบบควบคุม PID ด้วย BS

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & F = \sum_{i=1}^N [r(i) - c(i)]^2 \\ \text{subject to} \quad & M_p \leq 20\%, e_{ss} \leq 1\%, \\ & 0 \leq K_p \leq 5.0, 0 \leq K_I \leq 0.05, 0 \leq K_D \leq 0.005 \end{aligned} \quad (14)$$

3. ผลการวิจัย

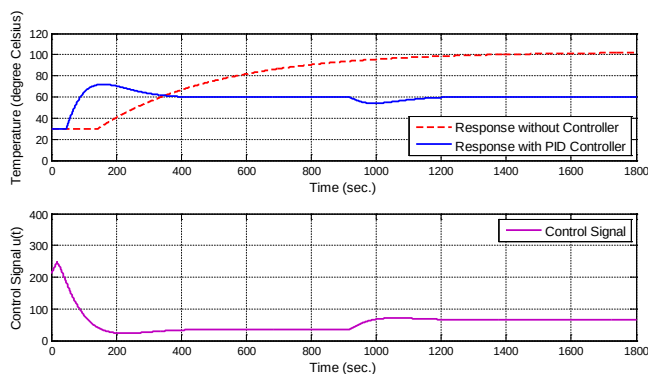
3.1 ผลการจำลองระบบควบคุม

การค้นหาค่าพารามิเตอร์ของ BS ในเบื้องต้น กำหนดให้จำนวนค่าความ $n = 20$ ความถี่ $f_{\min} = 0.0$ และ $f_{\max} = 2.0$ ความดังของเสียง $A_0 = 0.5$ อัตราการปล่อยพัลส์ $r_0 = 0.5$ และ $\alpha = \gamma = 0.9$ จำนวนรอบสูงสุด (Max_Gen) = 1000 กำหนดเป็นเกณฑ์ยุติ การค้นหา (termination criteria: TC) การออกแบบดำเนินการค้นหาทั้งหมด 40 ตัวอย่าง กับการสุ่มผลเฉลยค่าเริ่มต้นในแบบต่างๆ เพื่อทำให้ได้รับผลเฉลยที่ดีที่สุด โดยกำหนด เงื่อนไขการปรับแต่งตัวควบคุม PID ภายใต้เงื่อนไขของขอบเขตค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F

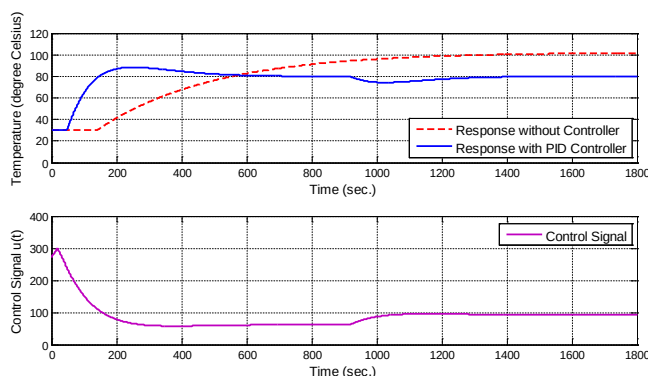
แสดงได้ดังสมการที่ (14) หลังจากยุติการค้นหาค่าด้วย BS จะได้ค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i และ K_d ของตัวควบคุม PID ที่ถูกออกแบบอย่างเหมาะสมด้วย BS แสดงได้ดังตารางที่ 2 ผลตอบสนองของการจำลองระบบควบคุมที่อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังภาพที่ 8-10 และสมรรถนะของการจำลองระบบควบคุมแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ถูกออกแบบอย่างเหมาะสมด้วย BS

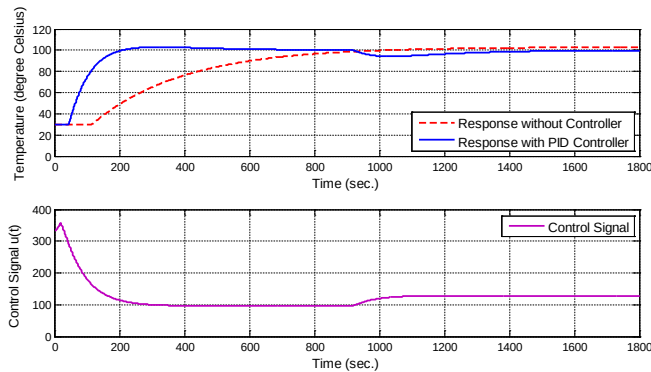
Temperature (°C)	Parameters			Obj. (F)
	K_p	K_i	K_d	
60	3.5279	0.0325	0.0014	0.9832
80	3.3888	0.0201	0.0012	0.9849
100	3.2738	0.0148	0.0010	0.9749



ภาพที่ 8 ผลตอบสนองของการจำลองระบบควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 9 ผลตอบสนองของการจำลองระบบควบคุมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 10 ผลตอบสนองของการจำลองระบบควบคุมที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 สมรรถนะของการจำลองระบบควบคุม

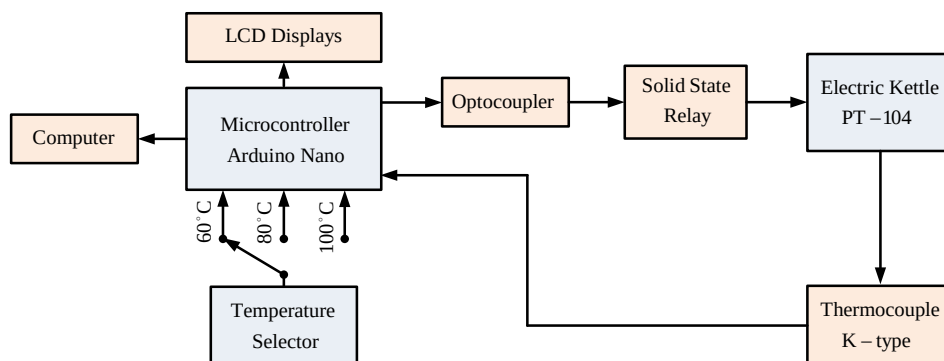
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Simulation Responses				
	t_r (sec.)	M_p (%)	t_s (sec.)	e_{ss} (%)	t_d (sec.)
60	90.1622	19.28	355.2030	0.00	253.8965
80	147.6685	10.52	538.8285	0.00	366.6594
100	209.8653	2.97	613.0448	0.00	422.3595

จากภาพที่ 8-10 และตารางที่ 3 พบว่า ผลตอบสนองของการจำลองระบบควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีช่วงเวลาขึ้น t_r มีช่วงเวลาเข้าที่ t_s น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 80 และ 100 องศาเซลเซียส โดยมีค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p น้อยกว่า 20% เมื่อมีสัญญาณรบกวน t_d เข้ามาในระบบควบคุมโดยทำให้อุณหภูมิลดลง -30 องศาเซลเซียส ที่เวลา 900 วินาที การจำลองระบบควบคุม PID ที่ถูกออกแบบอย่างเหมาะสมด้วย BS สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของกาน้ำต้มน้ำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดสัญญาณรบกวน t_d ได้โดยไม่มีค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว e_{ss}

3.2 ผลการทดสอบระบบควบคุม

เพื่อยืนยันผลการจำลองระบบควบคุมที่ได้รับให้นำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ถูกออกแบบอย่างเหมาะสมด้วย BS ไปควบคุมอุณหภูมิของกาน้ำต้มน้ำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส ในห้องปฏิบัติการจริงแสดงได้ดังภาพที่ 11 โดยใช้กาน้ำต้มน้ำไฟฟ้าขนาดความจุ 1.8 ลิตร ที่มีขดลวดความร้อนและใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิดเค ตรวจสอบอุณหภูมิที่มีค่าความคลาดเคลื่อน ± 1.5 องศาเซลเซียส ส่งสัญญาณแบบ

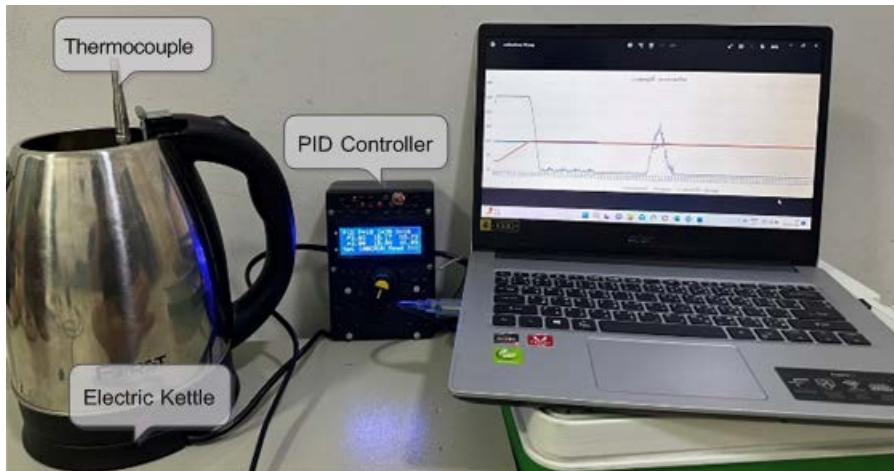
แวนะลอกมาตรฐานเข้าบอร์ดอาดูโน นาโน ขนาด 10 บิต ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0–1023 อัตราการสูมตัวอย่าง 9.6 กิโลเฮิร์ตซ์ ใส่น้ำในกาต้มน้ำ 1/2 ของกาต้มน้ำ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม 32 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังภาพที่ 12 ทดสอบหาผลตอบสนองของระบบควบคุมวงปิดเป็นเวลา 1800 วินาที เมื่อมีการรบกวน t_d เข้ามาในระบบควบคุมโดยการทำให้อุณหภูมิลดลง 30 องศาเซลเซียส ด้วยการเติมน้ำเย็นที่เวลา 900 วินาที แสดงได้ดังภาพที่ 13 ผลตอบสนองของการทดสอบระบบควบคุมที่อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังภาพที่ 14–16 และสมรรถนะของการทดสอบระบบควบคุมแสดงได้ดังตารางที่ 4



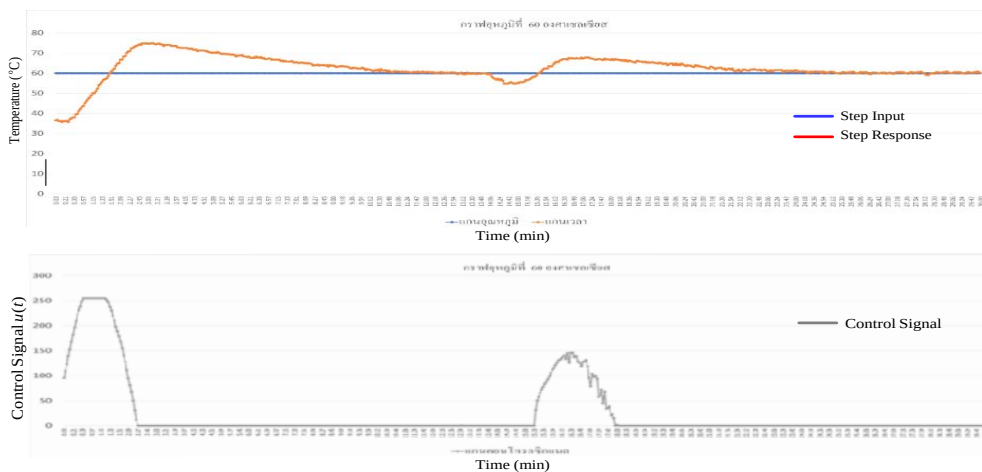
ภาพที่ 11 การควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้า



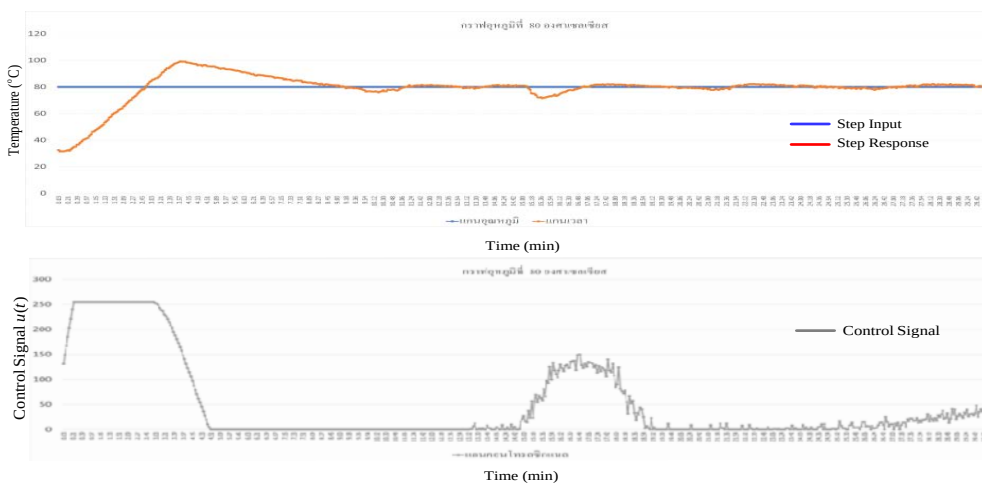
ภาพที่ 12 ใส่น้ำลงในกาต้มน้ำประมาณ 1/2 ของกาต้มน้ำร้อน



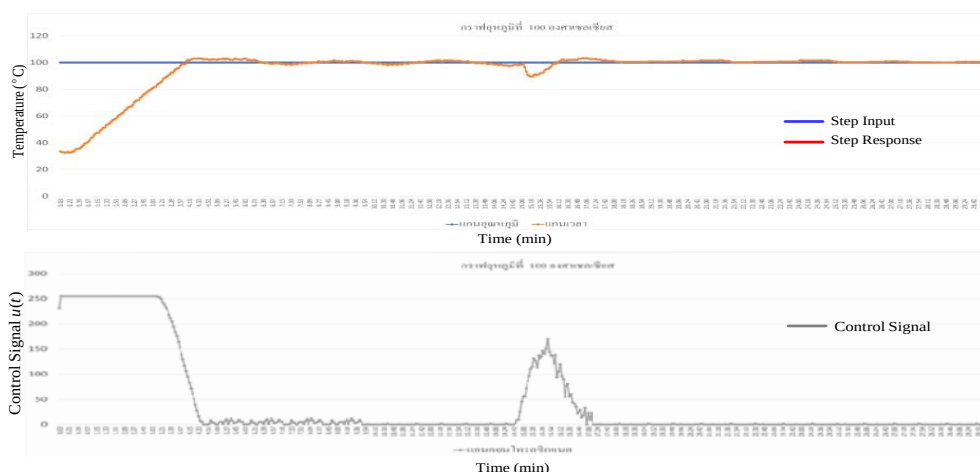
ภาพที่ 13 การควบคุมอุณหภูมิของกาน้ำไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการจริง



ภาพที่ 14 ผลตอบสนองของการทดสอบระบบควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 15 ผลตอบสนองของการทดสอบระบบควบคุมที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 16 ผลตอบสนองของการทดสอบระบบควบคุมที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4 สมรรถนะของการทดสอบระบบควบคุม

Temperature (°C)	System Responses				
	t_r (sec.)	M_p (%)	t_s (sec.)	e_{ss} (%)	t_d (sec.)
60	90.60	26.66	618.00	0.00	448.80
80	147.00	25.00	496.20	0.00	201.60
100	214.20	5.00	372.60	0.00	145.20

จากภาพที่ 14–16 และตารางที่ 4 พบว่า ผลตอบสนองของการทดสอบระบบควบคุมที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีช่วงเวลาขึ้น t_r น้อยกว่าที่อุณหภูมิ 80 และ 100 องศาเซลเซียส ในทางตรงกันข้าม มีช่วงเวลาเข้าที่ t_s มากกว่าที่อุณหภูมิ 80 และ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากกาน้ำไฟฟ้าสามารถทำความเร็วในการต้มน้ำให้ร้อนได้เร็วที่สุดในขณะที่ ตัวควบคุมพยายามควบคุมอุณหภูมิให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย (set-point) ที่กำหนด โดยมีค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p มากกว่าเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดไว้ในสมการที่ 14 เนื่องจากมีความร้อนสะสมภายในกาน้ำไฟฟ้า เมื่อใส่การรบกวน t_d ด้วยการทำให้อุณหภูมิภายในกาน้ำมีค่าลดลง 30 องศาเซลเซียส ด้วยการเติมน้ำเย็นที่เวลา 900 วินาที ผลตอบสนองของการทดสอบระบบควบคุม PID ที่ถูกออกแบบอย่างเหมาะสมด้วย BS

สำหรับการควบคุมอุณหภูมิของกาดม้ไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส สามารถกำจัดการรบกวนระบบควบคุม t_d ได้โดยไม่มีค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว e_{ss} เช่นเดียวกับผลการจำลอง

4. การอภิปรายผล

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบตัวควบคุม PID ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมอุณหภูมิของกาดม้ไฟฟ้าโดยใช้ BS ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ F จะถูกป้อนให้กับ BS เพื่อทำหน้าที่ค้นหาค่าพารามิเตอร์ K_p , K_I และ K_D ทั้ง 3 ตัว ของตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสม โดยค่า F หาจากผลรวมของค่าผลต่างกำลังสองระหว่างค่าอุณหภูมิอ้างอิงและค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริง ทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของกาดม้ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส จากผลการจำลอง พบว่า วิธี BS สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ได้อย่างเหมาะสม ให้ผลตอบสนองของระบบควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพกว่าการควบคุมด้วยเทอร์โมสตัท โดยที่ ผลการจำลองได้รับการยืนยันจากผลการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของกาดม้ไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการจริง

นอกจากนี้ ตัวควบคุม PID มีข้อจำกัดการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม แนวทางการพัฒนาในอนาคตสามารถใช้ตัวควบคุม PI-PD PIDA หรือ TID เพื่อปรับปรุงผลตอบสนองที่ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบควบคุมแบบโดดเด่น ทั้งการติดตามคำสั่งอินพุต และการกำจัดการรบกวนรบกวน รวมทั้ง ประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PID กับกระบวนการอื่นๆ เพื่อพิจารณาถึงผลตอบสนองและสมรรถนะของระบบควบคุมในเชิงเปรียบเทียบ

5. สรุปผลการวิจัย

การควบคุมอุณหภูมิของกาดม้ไฟฟ้าด้วยตัวควบคุม PID ที่ถูกออกแบบด้วย BS ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ วิธีของ BS จะทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยที่สุด ตามบริบทการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่ ในรูปของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองระหว่างอุณหภูมิอ้างอิงและอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงของกาดม้ไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส จากผลที่ได้รับ พบว่า BS สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ได้อย่างเหมาะสมให้ผลตอบสนองและสมรรถนะของระบบควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

- โกศล ชัยเจริญอุดมรุ่ง, & พีรวัจน์ มีสุข. (2563). การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านด้วยวิธีการค้นหาแบบตาปูเชิงปรับตัว. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมบ้านสมเด็จ*, 1(1), 72–85.
- ไชยันต์ สุวรรณชีวะศิริ. (2553). *วิศวกรรมระบบควบคุม 1* (พิมพ์ครั้งที่ 5) กรุงเทพมหานคร: ศูนย์ผลิตตำราเรียน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- อนันต์ นิมทวัฒน์, & อรรถสิทธิ์ ชื่นใจ. (2565). การออกแบบฟังก์ชันคอนกรีตเสริมเหล็กที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี Golden Section Search. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรมบ้านสมเด็จ*, 3(2), 93–103.
- Madugu, J. S. (2018). Modeling and simulation of proportional-integral-derivative (PID) temperature controller for an electric kettle. *International Journal of Engineering, Science and Mathematics*, 7(9), 15–20.
- Minorsky, N. (1922). Directional stability of automatically steered bodies. *Transactions of the American Society of Naval Engineers*, 34, 280–309.
- Pessen, D. W. (1996). A new look at PID controller tuning. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 116(3), 553–557.
- Prasad, S. J. S. (2012). Optimization of I-PD controller for a FOLIPD model using particle swarm intelligence. *International Journal of Computer Applications*, 43(9), 23–26.
- Stephanopoulos, G. (2006). *Chemical process control: An introduction to theory and practice*. New Delhi, India: Prentice-Hall of India.
- Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: From design to implementation*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

- Tsai, P. W., Pan, J. S., Liao, B. Y., Tsai, M. J., & Istanda, V. (2011). Bat algorithm inspired algorithm for solving numerical optimization problems. *Applied Mechanics and Materials*, 148–149, 134–137.
- Yadav, I., & Trivedi, A. (2014). Temperature control of CSTR: A comparative approach. *International Journal of Engineering Research and Reviews*, 2(3), 200–208.
- Yang, X. S. (2010a). *Engineering optimization: An introduction with metaheuristic applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Yang, X. S. (2010b). A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In J. R. González et al. (Eds.), *Nature inspired cooperative strategies for optimization (NICSO 2010)* (Studies in Computational Intelligence, Vol. 284, pp. 65–74). Berlin, Germany: Springer.
- Yang, X. S. (2011). Bat algorithm for multi-objective optimization. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 3(5), 267–274.