

การควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้าด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบลิงแมงมุมบนพื้นฐานตัวควบคุมพีไอดี A Temperature Control of Electric Kettle by Spider Monkey Optimization Based on PID Controller

ไกรสร สว่างศรี¹ สัตตาภูมิ ไทยพานิช² และ ดนุพล คำปัญญา³

Krisorn Swangsri^{1*} Sattarpoom Taipanich² Danuphol Khampanya³

^{1,2*} สาขาวิชาระบบสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

^{1,2} Department of Information Systems and Business Computing Faculty of Business Administration and Information Technology Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi, Thailand.

³ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

³ Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering and Architecture Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi, Thailand.

*Corresponding Author E-mail: danupon.k@rmutsb.ac.th

Received: 20/12/23, Revised: 23/01/24, Accepted: 27/01/24

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้าด้วยการหาค่าเหมาะที่สุดแบบลิงแมงมุม วิธีการนี้เป็นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติกที่ทรงประสิทธิภาพ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิอ้างอิงและอุณหภูมิจริงของระบบถูกกำหนดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต้องการให้มีค่าน้อยที่สุด โดยได้ทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส จากผลการจำลองพบว่า การหาค่าเหมาะที่สุดแบบลิงแมงมุมสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีที่เหมาะสมให้ผลตอบสนองมีประสิทธิภาพมาก นอกจากนี้ ผลการจำลองได้รับการยืนยันจากผลการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้าที่ถูกพัฒนาขึ้นจริงในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: การหาค่าเหมาะที่สุดแบบลิงแมงมุม การหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติก ตัวควบคุมพีไอดี กาต้มน้ำไฟฟ้า

Abstract

This paper proposes an optimal PID controller design for temperature control of electric kettle by spider monkey optimization (SMO). The SMO is one of the powerful meta-heuristic optimization search methods. The sum squared errors between reference temperature and actual temperature of electric kettle is performed to minimize the objective function, 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. From the simulation results, it was found that the SMO was able to optimize the parameters of the PID controller with very effective responses. In addition, the simulation results are

confirmed by the real experiment of the temperature control of electric kettle developed in the laboratory.

Keywords: Spider Monkey Optimization, Meta-heuristic Optimization, PID Controller, Electric Kettle

1. บทนำ

กาต้มน้ำไฟฟ้า (Electric Kettle) โดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนไฟฟ้า 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนความร้อนและส่วนสวิตช์เปิด-ปิด เมื่อพลังงานไฟฟ้าจ่ายให้กับส่วนความร้อนซึ่งจะทำให้น้ำในกาต้มน้ำร้อนขึ้นอย่างเต็มกำลังที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แรงดันไอน้ำที่เกิดขึ้นจะกระตุ้นให้เปิด-ปิดสวิตช์เพื่อหยุดกระบวนการทำความร้อน ขั้นตอนง่ายๆ นี้ กาต้มน้ำไฟฟ้ามีไว้เพื่อจุดประสงค์เดียวกันเท่านั้น คือ เพื่อต้มน้ำ หลายปีที่ผ่านมาปัญหาของการควบคุมอุณหภูมิเป็นปัญหาที่ท้าทายตลอดกับวิศวกรควบคุม ถึงแม้ว่าเครื่องใช้ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีการควบคุมอุณหภูมิในรูปแบบเดียวหรือในรูปแบบอื่นๆ แต่ยังคงใช้วิธีการควบคุมง่ายๆ ดังเช่น การควบคุมแบบเปิด-ปิดสวิตช์ของกาต้มน้ำไฟฟ้าโดยใช้เทอร์โมสแตท (Thermostat) เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการต้มน้ำด้วยกาต้มน้ำไฟฟ้ามีค่าสูงมากด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องพัฒนาระบบควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าและต้นทุนที่ใช้กาต้มน้ำไฟฟ้า

ตัวควบคุมพีไอดี (Proportional-Integral-Derivative หรือ PID) [1] นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม วิศวกรชอบตัวควบคุม PID ในการประยุกต์ใช้กับงานทางวิศวกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างที่เรียบง่ายและสมรรถนะคงทน โดยได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถควบคุมเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น ให้การตอบสนองของระบบที่รวดเร็วและเข้าได้ด้วยวิธีการปรับแต่งค่า PID ที่เหมาะสม แม่นยำและคงที่ ที่จุดตั้งค่าที่ต้องการ งานวิจัยนี้ กาต้มน้ำไฟฟ้าค้นแบบถูกประดิษฐ์ขึ้น เพื่อลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าบนพื้นฐานตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสม ด้วยการหาค่า

เหมาะที่สุดเชิงเมตา-ฮิวริสติก (Meta-heuristic Optimization) [2] ที่ได้รับความนิยมและใช้อย่างแพร่หลาย หนึ่งในเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติก ที่มีประสิทธิภาพมาก คือ การหาค่าเหมาะที่สุดแบบลิงแมงมุม (Spider Monkey Optimization หรือ SMO) นำเสนอครั้งแรกโดย J. C. Bansal เมื่อปี ค.ศ. 2014 [3] ได้แนวคิดจากพฤติกรรมทางสังคมของลิงแมงมุม ซึ่งถูกจัดออกเป็นประเภทของสัตว์ตามโครงสร้างที่อาศัยกันอยู่ในสังคมแบบแยกกันอยู่และรวมกันอยู่เป็นช่วงๆ (Fission-fusion Social Structure หรือ FFSS) ที่ผ่านมา พบว่า SMO ประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมต่างๆ เช่น การออกแบบภาชนะรับแรงดัน (Pressure Vessel Design) การปรับคลื่นเสียง FM (Frequency-modulated) และการบีบอัดในสปริง (Compression Spring) ในบทความนี้ จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสมสำหรับการควบคุมอุณหภูมิของกาดม้มน้ำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ผลการจำลองได้รับการยืนยันจากผลการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของกาดม้มน้ำไฟฟ้าที่ถูกพัฒนาขึ้นจริงในห้องปฏิบัติการ

2. แบบจำลองของกาดม้มน้ำไฟฟ้า

การหาแบบจำลองของกาดม้มน้ำไฟฟ้า สามารถหาได้โดยให้สมมติอุณหภูมิของน้ำที่อยู่ภายในกาดม้มน้ำไฟฟ้าสม่ำเสมอ และอุณหภูมิภายนอกของระบบมีค่าคงที่ โดยใช้กฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ (First Law of Thermodynamics) แสดง ได้ดังสมการที่ (1)

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

โดยที่ C_T คือ ความจุความร้อนของระบบ ($J / ^\circ C$)

$q_o(t)$ คือ การสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม (J)

$q(t)$ คือ ความร้อนที่ถูกจ่ายโดยอุปกรณ์ทำความร้อน (J),

$$q_o(t) = \frac{(T_w - T_a)}{R_T} \tag{2}$$

T_w คือ อุณหภูมิของน้ำ ($^\circ C$)

T_a คือ อุณหภูมิสภาพแวดล้อม ($^\circ C$)

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

แทนค่า สมการที่ (2) ลงในสมการที่ (1) แสดง ได้ดังสมการที่ (3)

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

$$\frac{dT_w}{dt} + \frac{T_w}{R_T C_T} = \frac{q(t)}{C_T} + \frac{T_a}{R_T C_T} \tag{4}$$

ผลการแปลงลาปลาซสมการที่ (4) แสดง ได้ดังสมการที่ (5)

$$sR_T C_T T_w(s) + T_w(0) + T_w(s) = Q(s)R_T + T_a(s) \tag{5}$$

แต่อุณหภูมิสภาพแวดล้อมมีค่าคงที่ $T_w(0) = T_a(s)$ ดังนั้น สมการที่ (5) แสดง ได้ดังสมการที่ (6)

$$G(s) = \frac{T_w(s)}{Q(s)} = \frac{R_T}{(R_T C_T s + 1)} \tag{6}$$

โดยที่ $R_T C_T$ คือ ค่าคงตัวทางเวลาของกระบวนการ มีค่าเท่ากับ τ

R_T คือ ค่าอัตราขยายของกระบวนการ มีค่าเท่ากับ K_g

ในทางปฏิบัติ พบว่า ค่าเวลาหน่วง (Delay Time หรือ L) เขียนเป็น e^{-Ls} ดังนั้น สมการที่ (6) จึงก่อรูปเป็นสมการที่ (7)

$$G_p(s) = \frac{K_g}{(\tau s + 1)} e^{-Ls} \tag{7}$$

ในงานวิจัยนี้ ใช้กาดม้มน้ำไฟฟ้า 1.8 ลิตร และใช้ตัวตรวจจับแบบเทอร์โมคัปเปิล ชนิดเค (K-type) ส่งสัญญาณแอนะล็อกเข้าบอร์ดคาอูโนนาโน (Arduino Nano) 10 บิต มีค่าในช่วง 0-1023 ใสน้ำ 1/2 ของกาดม้มน้ำ ผลตอบสนองวงเปิดในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน แสดง ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของผลตอบสนองวงเปิดในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอน

Temperature ($^\circ C$)	Parameters			Transfer functions
	K_g	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	$G_p(s) = \frac{1.03}{282.0s + 1} e^{-19.8s}$

3. ขั้นตอนวิธีของการหาค่าเหมาะที่สุดแบบลิงแมงมุม

การหาค่าเหมาะที่สุดแบบลิงแมงมุม (SMO) [3] โดยได้แนวคิดจากพฤติกรรมทางสังคมของลิงแมงมุม (FFSS) ลิงแมงมุมจะเป็นสัตว์สังคมอาศัยรวมกลุ่มอยู่ในฝูงจำนวน 40 ถึง 50 ตัว ลิงตัวเมียที่เป็นผู้นำวงกว้าง (Global Leader) จะมีหน้าที่ในการค้นหาแหล่งอาหาร ถ้ามันไม่สามารถหาอาหารให้เพียงพอสำหรับกลุ่ม มันจะแบ่งกลุ่มออกเป็นกลุ่มย่อยที่มีสมาชิก 3 ถึง 8 ตัว กลุ่มย่อยจะถูกชี้นำจากลิงตัวเมียที่เป็นผู้นำเฉพาะที่ (Local Leader) ซึ่งกลายมาเป็นผู้มีอำนาจตัดสินใจในการวางแผนเส้นทาง การจับเหยื่อที่มีประสิทธิภาพในแต่ละวัน จากพฤติกรรมทางสังคมของลิงแมงมุดังกล่าว เขียนเป็นขั้นตอนการทำงานของ SMO ได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเริ่มต้นของประชากร

เริ่มแรกประชากรมีมิติ $[n \times d]$ โดยเริ่มต้นกระทำตามสมการดังนี้

$$SM_{ij} = SM_{\min j} + (SM_{\max j} - SM_{\min j}) \times U(0,1) \tag{8}$$

โดยที่ $n, d, SM_{\min j}, SM_{\max j}$ คือ ขนาดของประชากร จำนวนตัวแปรควบคุม ขอบเขตค่าสุดและสูงสุดของมิติ j^{th}

ขั้นตอนที่ 2 ระดับผู้นำเฉพาะที่

ในระดับนี้ ที่ตั้งของลิงแต่ละตัวจะได้รับการปรับโครงสร้างใหม่ โดยอาศัยความช่วยเหลือจากตัวเมียที่เป็นผู้นำเฉพาะที่และสมาชิกในกลุ่มที่มีประสิทธิภาพโดยใช้สมการที่ (9)

$$SM_{newij} = SM_{ij} + (LL_{ij} - SM_{ij}) \times U(0,1) + (SM_{ij} - SM_{ij}) \times U(-1,1) \tag{9}$$

ในกลุ่มเฉพาะที่ i^{th} นี้ ลิง k^{th} และ j^{th} พยายามปรับปรุงตำแหน่งที่ตั้งของพวกเขาด้วยอัตราการก่อวน (Perturbation Rate) $pr \in [-1, 1]$

ขั้นตอนที่ 3 ระดับผู้นำวงกว้าง

ในระดับการแสวงหาผลประโยชน์นี้ ตำแหน่งของสมาชิกทั้งหมด จะได้รับการปรับปรุงจากประสบการณ์ของผู้นำวงกว้างและสมาชิก เฉพาะที่อื่นๆ โดยทำตามสมการที่ (10)

$$SM_{newij} = SM_{ij} + (GL_j - SM_{ij}) \times U(0,1) + (SM_{rj} - SM_{ij}) \times U(-1,1) \quad (10)$$

บนพื้นฐานปัจจัยความน่าจะเป็น $prob_i$ ถึง j^{th} จะปรับปรุงตำแหน่ง ของพวกมัน โดยใช้สมการที่ (11)

$$prob_i = 0.9 \times \left(\frac{fit_i}{max_fit} \right) + 0.1 \quad (11)$$

โดยที่ fit_i และ max_fit คือความเหมาะสมของ i^{th} และความเหมาะสม สูงสุดของฝูง ลิขที่ความเหมาะสมดีกว่ามีโอกาสปรับปรุงตำแหน่งของมัน

ขั้นตอนที่ 4 ระดับการเรียนรู้ของผู้นำเฉพาะที่

ตำแหน่งของผู้นำเฉพาะที่จะได้รับการปรับปรุงตามตำแหน่งของลิข ที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดในฝูง ในกรณีลิขตัวเมียที่เป็นผู้นำเฉพาะที่ ไม่ปรับปรุงตำแหน่งของมัน ซิดจำกัดเฉพาะที่จะเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตำแหน่ง

ขั้นตอนที่ 5 ระดับการเรียนรู้ของผู้นำวงกว้าง

ตำแหน่งของผู้นำวงกว้างจะได้รับการปรับปรุงโดยการเปรียบเทียบกับ ตำแหน่งเดิมของมันกับการช่วยเหลือของการเลือกแบบละโมภ ถ้าไม่เป็น เช่นนั้นซิดจำกัดวงกว้างจะเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งตำแหน่ง

ขั้นตอนที่ 6 ระดับการตัดสินใจของผู้นำเฉพาะที่

ในขั้นตอนนี้ สมาชิกทุกตัวในฝูงจะเริ่มต้นใหม่ โดยรวบรวมข้อมูล จากผู้นำเฉพาะที่และผู้นำวงกว้างโดยทำตามสมการที่ (12)

$$SM_{newij} = SM_{ij} + (GL_j - SM_{ij}) \times U(0,1) + (SM_{rj} - LL_{ij}) \times U(0,1) \quad (12)$$

ในช่วงนี้ ลิขได้รับการหันเหความสนใจจากผู้นำเฉพาะที่และได้รับ ความสนใจจากผู้นำวงกว้าง

ขั้นตอนที่ 7 การตัดสินใจของผู้นำวงกว้าง

หากที่ตั้งของผู้นำวงกว้างยังคงไม่เปลี่ยนแปลงจนถึงซิดจำกัดสูงสุด สมาชิกทุกตัวจะรวมตัวกันเป็นฝูงเดียวและแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยอีกครั้ง

จากขั้นตอนที่สำคัญ 7 ของ SMO สามารถเขียนเป็นรหัสจำลอง (Pseudo Codes) แสดงขั้นตอนวิธีของ SMO ได้ดังรูปที่ 1

```

Initialized:
- Set the initial values of the population size  $N$ , Local Leader Limit ( $LLL$ ),
Global Leader Limit ( $GLL$ ), perturbation rate ( $pr$ )
for ( $i = 1; i \leq N$ ) do
- Generate an initial population  $SM_i$  randomly.
- Evaluate the fitness function of each spider monkey (solution)  $SM_i$ .
end for
- Assign the global leader and the local leader by applying greedy selection.
repeat
for ( $i = 1; i \leq N$ ) do
- Generate the new position for each spider monkey  $SM_i$  by using self experience,
local leader experience and global leader experience as shown in eq. (9).
- Evaluate the fitness function of the new spider monkeys positions.
- Apply greedy selection and select the best solution.
- Calculate the probability  $prob_i$  for each  $SM_i$  as shown in eq. (11).
- By using  $prob_i$ , self experience, global leader experience and group member
experience as shown in eq. (10).
- If local group leader position is not updated for a specific number of iterations
( $LLL$ ), then redirect all members for food searching as shown in eq. (12).
- If global leader position is not updated for a specific number of iterations
( $GLL$ ), then she divides the group into sub-groups by following steps.
end for
until Termination criteria (TC) satisfied.
Produce the best solution  $SM_i$ .
    
```

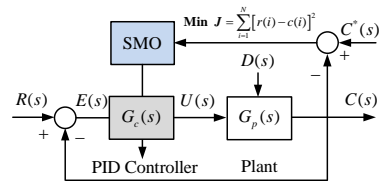
รูปที่ 1 รหัสจำลองแสดงขั้นตอนวิธีของ SMO [3]

4. การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม PID [1] แสดงได้ดังสมการที่ (13) โดยที่ K_p เป็นอัตราขยายเชิงปรับสัดส่วน K_i เป็นอัตราขยายเชิง อินทิกรัล และ K_D เป็นอัตราขยายเชิงอนุพันธ์ ตามลำดับ

$$G_c(s)|_{PID} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s \quad (13)$$

โครงสร้างของระบบควบคุม PID โดยใช้ SMO แสดงได้ดังรูปที่ 2 ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J จะถูกป้อนให้ SMO เพื่อทำให้มีค่าน้อยที่สุด ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ ทั้ง 3 ตัว ของตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสม โดยที่ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J จะถูกดำเนินการให้สอดคล้องกับปริภูมิ การค้นหาแสดงได้ดังสมการที่ (14)



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบควบคุม PID โดยใช้ SMO

$$K_p \in [0, 5], \quad K_i \in [0, 0.05], \quad K_D \in [0, 0.005] \quad (14)$$

จากคำแนะนำของ J. C. Bansal [3] การใช้ค่าพารามิเตอร์ของ SMO เริ่มต้นจะกำหนดจำนวนลิขแมงมุม $n = 50$ อัตราการก่ออวน $pr = 0.1$ จำนวนรอบการค้นหาสูงสุด $MaxGen = 1000$ รอบ ให้เป็นเกณฑ์ยุติ การค้นหา (Termination Criteria หรือ TC) ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID จะกำหนดให้สอดคล้องกับสมการที่ (14) หลังจากยุติการค้นหาด้วย SMO ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID แสดงได้ดังตารางที่ 2

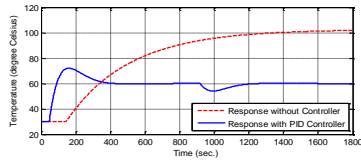
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ถูกออกแบบอย่างเหมาะสมด้วย SMO

Temperature (°C)	Parameters			Obj. (J)
	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

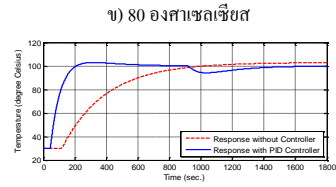
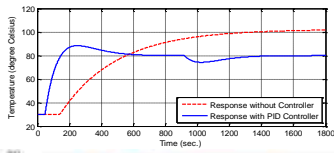
5. ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

5.1 ผลการจำลองระบบควบคุม

จำลองระบบควบคุมอุณหภูมิของกาน้ำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ด้วยโปรแกรมแมตแล็บ โดยที่ t_r คือ ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) M_p คือ ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Overshoot) t_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) e_{ss} คือ ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady-state Error) และ t_d คือ การรบกวน (Disturbance) เข้ามาในระบบควบคุมที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ที่เวลา 900 วินาที ดังนั้น ผลตอบสนองของการจำลอง ระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 3 และตารางที่ 3



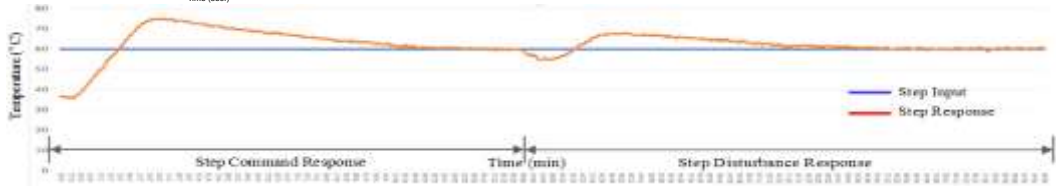
ก) 60 องศาเซลเซียส



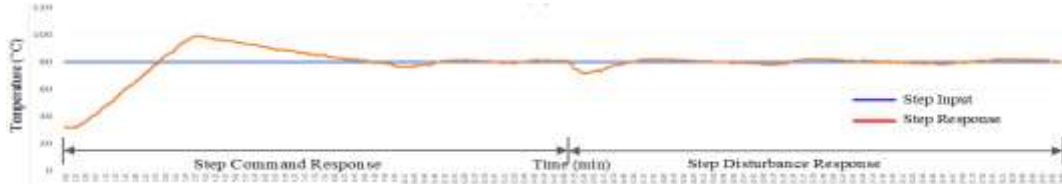
ข) 80 องศาเซลเซียส

ค) 100 องศาเซลเซียส

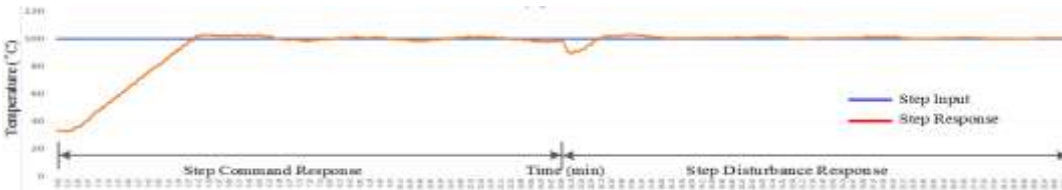
รูปที่ 3 ผลตอบสนองของการจำลองระบบควบคุม



ก) 60 องศาเซลเซียส



ข) 80 องศาเซลเซียส



ค) 100 องศาเซลเซียส

รูปที่ 5 ผลตอบสนองของระบบควบคุม

ตารางที่ 3 สมรรถนะของการจำลองระบบควบคุม

Temperature (°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

จากรูปที่ 3 และตารางที่ 3 พบว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีช่วงเวลาดำเนิน t_r มีช่วงเวลาดำเนิน t_s น้อยกว่า 80 และ 100 องศาเซลเซียส โดยมีค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p น้อยกว่า 20% ในขณะที่ เมื่อมีการรบกวน t_d เข้ามาในระบบควบคุมที่อุณหภูมิ -30 องศาเซลเซียส ที่เวลา 900 วินาที ระบบควบคุม PID ที่ถูกออกแบบอย่างเหมาะสมด้วย SMO สามารถกำจัด การรบกวน t_d ได้โดยไม่มีค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว e_{ss}

5.2 ผลการทดสอบระบบควบคุม

เพื่อยืนยันผลการจำลองระบบควบคุมที่ได้รับนำค่าพารามิเตอร์ของ ตัวควบคุม PID ที่ถูกปรับแต่งอย่างเหมาะสมด้วย SMO ไปควบคุม อุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการจริง แสดงได้ดังรูปที่ 4 ทดสอบระบบควบคุมเป็นเวลา 1800 วินาที ใส่การรบกวนระบบควบคุม

โดยทำให้อุณหภูมิในกาต้มน้ำลดลง 30 องศาเซลเซียส ที่เวลา 900 วินาที ผลตอบสนองของระบบควบคุมแสดงดังรูปที่ 5 และตารางที่ 4



รูปที่ 4 การควบคุมอุณหภูมิของกาต้มน้ำไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการจริง

ตารางที่ 4 สมรรถนะของระบบควบคุม

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

จากรูปที่ 5 และตารางที่ 4 พบว่า ที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีช่วงเวลาดำเนิน t_r น้อยกว่า 80 และ 100 องศาเซลเซียส ในทางตรงกันข้าม มีช่วงเวลาดำเนิน t_s มากกว่า 80 และ 100 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิด

ความร้อนสะสมในกาดม้มน้ำ โดยมีค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p น้อยกว่า 30% เมื่อใส่การรบกวน t_d โดยทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลง 30 องศาเซลเซียส ที่เวลา 900 วินาที ระบบควบคุม PID ก็จะสามารถกำจัดการรบกวน t_d ได้โดยไม่มีค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว e_{ss} เช่นเดียวกับการจำลอง

6. สรุป

SMO สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID อย่างเหมาะสม ให้ผลตอบสนองมีประสิทธิภาพมาก ผลการจำลองได้รับการยืนยันจากผลการทดสอบการควบคุมอุณหภูมิของกาดม้มน้ำไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ที่ถูกพัฒนาขึ้นจริงในห้องปฏิบัติการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. O. Dwyer, Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules, Imperial College Press, 2003.
- [2] X. S. Yang, *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*, John Wiley & Sons, 2010.
- [3] J. C. Bansal, H. Sharma, S. S. Jadon and Maurice Clerc, "Spider Monkey Optimization Algorithm for Numerical Optimization," *Memetic Computing* 6, no.1, pp. 31–47, 2014.