

การออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีสองระดับความอิสระอย่างเหมาะสมโดยใช้การค้นหาแบบนกดูเหว่าสำหรับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Optimal Design and Implementation of 2DOF-PID controller using Cuckoo Search for DC Motor Speed Control

สัตยาณุมิ ไทยพานิช¹, ปฐิภาณ บังทิม² และ ดนุพล คำปัญญา^{1*}

¹มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
สุวรรณภูมิ
²วิทยาลัยเทคนิคโคกสำโรง
* ผู้รับผิดชอบบทความ
danupon.k@rmutsb.ac.th

Received: 5 Jun 2025
Revised: 6 Aug 2026
Accepted: 11 Aug 2026

บทคัดย่อ

ระบบควบคุมพีไอดีหนึ่งระดับความอิสระใช้ตัวควบคุมเพียงตัวเดียว เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์การติดตามคำสั่งและการคุมค่าโหลด ส่งผลทำให้สมรรถนะของระบบควบคุมมีความโดดเด่นเพียงด้านใดด้านหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากระบบควบคุมพีไอดีหนึ่งระดับความอิสระ เมื่อออกแบบตัวควบคุมให้บรรลุเป้าหมายการติดตามคำสั่ง สมรรถนะในด้านการคุมค่าโหลดของระบบก็จะลดลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อออกแบบตัวควบคุมให้บรรลุเป้าหมายการคุมค่าโหลด สมรรถนะในด้านการติดตามคำสั่งของระบบก็จะลดลงเช่นกัน ในบทความนี้ จึงนำเสนอการออกแบบและอนุวัตตัวควบคุมพีไอดีสองระดับความอิสระอย่างเหมาะสมโดยใช้การค้นหาแบบนกดูเหว่า หนึ่งในเทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติกทรงประสิทธิภาพ วิธีนี้ถูกใช้หาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีสองระดับความอิสระอย่างเหมาะสมสำหรับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงถูกพิจารณาเป็นระบบอันดับสาม บนพื้นฐานการค้นหาแบบนกดูเหว่า สมรรถนะของระบบควบคุมพีไอดีสองระดับความอิสระจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับระบบควบคุมพีไอดีหนึ่งระดับความอิสระ ผลที่ได้รับพบว่า การค้นหาแบบนกดูเหว่าสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีสองระดับความอิสระได้อย่างเหมาะสม ให้สมรรถนะในด้านการติดตามคำสั่งของระบบ มีค่าพุงเกินสูงสุด ($M_{p(sim)} = 4.62\%$, $M_{p(act)} = 5.10\%$) น้อยกว่าตัวควบคุมพีไอดีหนึ่งระดับความอิสระ โดยที่ สมรรถนะในด้านการคุมค่าโหลดของระบบไม่เปลี่ยนแปลง และมีการขยายตัวของสัญญาณควบคุมต่ำกว่าตัวควบคุมพีไอดีหนึ่งระดับความอิสระ ตามผลการจำลองสถานการณ์ได้รับการยืนยันด้วยผลการควบคุมระบบจริงที่ได้อนุวัตขึ้นจริงในห้องปฏิบัติการ

คำสำคัญ: ตัวควบคุมพีไอดีสองระดับความอิสระ การค้นหาแบบนกดูเหว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมตา-ฮิวริสติก

Abstract

A one-degree-of-freedom (1 DOF) PID control system uses a single controller to achieve both command-following (input tracking) and load-regulation (disturbance regulation) objectives. Consequently, the system is performance can only excel in one aspect at a time. This paper

presents an optimal design and implementation of a two-degree-of-freedom (2DOF) PID controller tuned by the cuckoo search (CS) algorithm, which is one of the most efficient meta-heuristic optimization techniques. The CS is applied to search for the optimal parameters of the 2DOF-PID controller for DC motor speed control. The model of the DC motor is considered as a third-order system. Based on the CS algorithm, performances of the system controlled by the 2DOF-PID controller are compared with those of the 1DOF-PID controller. The results show that the CS algorithm successfully finds optimal parameters for the 2DOF-PID controller. The command-following performance achieved a lower maximum overshoot ($M_{p(sim)} = 4.62\%$, $M_{p(act)} = 5.10\%$) than that of the 1DOF-PID controller, while the system is load-regulation performance remains unchanged. Furthermore, the control signal magnitude is smaller than that of the 1DOF-PID controller. Finally, the simulation results were confirmed by the experiments in a laboratory.

Keywords: 2DOF-PID controllers, Cuckoo search, DC motor, Meta-heuristic

1. บทนำ

ในบริบทของการควบคุมระดับความอิสระ (Degree of Freedom: DOF) ของระบบควบคุม ถูกกำหนดโดยจำนวนของวงรอบการควบคุม (Control Loop) ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างอิสระ [1] แบบดั้งเดิม ระบบควบคุมแบบหนึ่งระดับความอิสระ (One-Degree-of-Freedom: 1DOF) ถูกนำไปใช้กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากทำได้ง่ายและสะดวกใช้งาน อย่างไรก็ตาม การออกแบบระบบควบคุมเป็นปัญหาที่หลายวัตถุประสงค์ ระบบควบคุมแบบสองระดับความอิสระ (Two-Degree-of-Freedom: 2DOF) มีข้อได้เปรียบกว่าแบบ 1DOF ซึ่งความจริงนี้ ได้ถูกระบุไว้โดยโฮเวิร์ด [1] และได้รับการรับรองโดยอารากิและทากุจิ

[2-3] จากวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่าโครงสร้างของ PID (Proportional-Integral-Derivative) [4] ในรูปแบบ 2DOF ถูกนำเสนอใช้งานในภาคอุตสาหกรรม [5] รายงานผลที่ได้รับจากตัวควบคุม 2DOF-PID [6] และขยายผลตัวควบคุม 2DOF-PID ด้วยการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสม [7] โดยสร้างตัวควบคุมดิจิทัล 2DOF-PID จำกัดขนาดและความลาดชัน [8] และลักษณะอื่นๆ ของตัวควบคุม 2DOF-PID สำหรับใช้ในภาคอุตสาหกรรม [9]

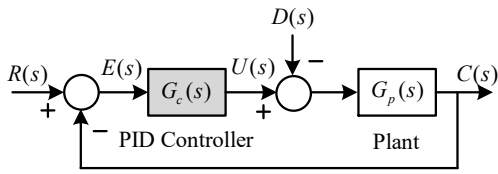
ปัจจุบันกรอบการออกแบบตัวควบคุมสามารถพิจารณาให้เป็นปัญหาของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) [10] ซึ่งแก้ปัญหาอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติก (Meta-heuristic Optimization Search Technique) [11] ด้วยการออกแบบตัวควบคุมอย่างเหมาะสมจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า โครงสร้าง 2DOF ถูกประยุกต์ใช้กับการออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PIDA อย่างเหมาะสมสำหรับระบบระดับของเหลวด้วยการค้นหาแบบค้างคาเชิงตัดแปรร [12] และการออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID อย่างเหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวาท [13] ดังนั้น บทความนี้จึงนำเสนอการออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID อย่างเหมาะสมโดยใช้การค้นหาแบบนกดูเหว้า (Cuckoo Search: CS) [14] กับการบินแบบเลวี (Lévy Flight) [15] สำหรับการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) จากที่ผ่านมาวิธี CS ถูกประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า (Feedforward Controller) [16] เพื่อให้สามารถสมรรถนะในด้านการติดตามคำสั่ง (Command-following) ของระบบให้ผลตอบแทนที่รวดเร็วและยอมรับค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Overshoot) ที่เพิ่มขึ้นขณะที่งานในภาคอุตสาหกรรมบางชนิดต้องการสมรรถนะของระบบทั้งในด้านการติดตามคำสั่งที่นุ่มนวลและการคุมค่าโหลด (Load-regulation) ที่รวดเร็ว จึงนิยมใช้ตัวควบคุม 2DOF-PID ที่มีการชดเชยแบบป้อนไปหน้า เรียกว่า พรีฟิลเตอร์ (Prefilter) เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ 2DOF-PID กับ 1DOF-PID ด้วยการจำลองสถานการณ์และอนุวัตรระบบจริงในห้องปฏิบัติการ

2. โครงสร้างของระบบควบคุม

โครงสร้างของระบบควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID รวมถึงแบบจำลอง DC Motor สามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

2.1 ระบบควบคุม 1DOF-PID

ระบบควบคุม 1DOF-PID มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวควบคุม $G_c(s)$ ที่วางตัวในวิถีป้อนไปหน้า (Forward Path) ต่ออันดับกับพลานต์ (Plant) $G_p(s)$ ตัวควบคุม $G_c(s)$ จะรับสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน $E(s)$ ผลิตเป็นสัญญาณควบคุม $U(s)$ และส่งไปควบคุมพลานต์ $G_p(s)$ ทำให้เอาต์พุต $C(s)$ เป็นไปตามเป้าหมายการติดตามคำสั่ง (ติดตามอินพุต) $R(s)$ และการคุมค่าโหลด (กำจัดสัญญาณรบกวน) $D(s)$ ไปพร้อมกัน



รูปที่ 1 ระบบควบคุม 1DOF-PID

จากรูปที่ 1 $G_c(s)$ คือ ตัวควบคุม PID และ $G_p(s)$ คือ พลานต์ที่ถูกควบคุม นั่นคือ DC Motor โดยที่ ตัวควบคุม PID ของระบบควบคุม 1DOF-PID แสดงได้ดังสมการที่ (1)

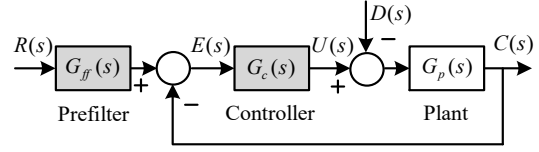
$$G_c(s)|_{PID} = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (1)$$

โดยที่ K_p คือ อัตราขยายปรับสัดส่วน (Proportional Gain) K_i คือ อัตราขยายปริพันธ์ (Integral Gain) และ K_d คือ อัตราขยายอนุพันธ์ (Derivative Gain) ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด (Closed-loop) เมื่อ $C(s)/R(s)$ ของระบบควบคุม 1DOF-PID แสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$\frac{C(s)}{R(s)}|_{1DOF-PID} = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (2)$$

2.2 ระบบควบคุม 2DOF-PID

ระบบควบคุม 2DOF-PID มีโครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 2 โครงสร้างของระบบนี้ มีตัวควบคุม 2 ตัว คือ ตัวควบคุม $G_c(s)$ และตัวควบคุมแบบป้อนไปหน้า (Feedforward Controller) $G_{ff}(s)$ (พรีฟิลเตอร์) ลดความไวของระบบจากการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ ส่งผลทำให้ระบบคงทน (Robustness) มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 2 ระบบควบคุม 2DOF-PID

จากรูปที่ 2 ตัวควบคุม $G_{ff}(s)$ จะวางตัวต่ออนุกรมกับวงรอบการควบคุมที่มีตัวควบคุม $G_c(s)$ ที่อยู่ในวิถีป้อนไปหน้า ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม $G_{ff}(s)$ แบบพรีฟิลเตอร์แสดงได้ดังสมการที่ (3)

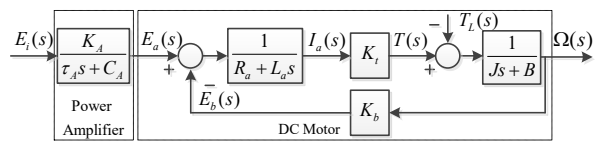
$$G_{ff}(s)|_{prefilter} = \frac{1}{K_a s^2 + K_b s + 1} \quad (3)$$

โดยที่ $K_a = K_d / K_i$ และ $K_b = K_p / K_i$ คือ อัตราขยายพรีฟิลเตอร์ (Prefilter Gain) ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด $C(s)/R(s)$ ของระบบควบคุม 2DOF-PID แสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$\frac{C(s)}{R(s)}|_{2DOF-PID} = G_{ff}(s) \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)} \quad (4)$$

2.3 แบบจำลอง DC Motor

การควบคุม DC Motor สามารถพิจารณาแบบจำลอง DC Motor ร่วมกับอุปกรณ์กำลังดังรูปที่ 3 เขียนฟังก์ชันถ่ายโอนของแบบจำลอง DC Motor แสดงได้ดังสมการที่ (5)



รูปที่ 3 แบบจำลอง DC motor ร่วมกับอุปกรณ์กำลัง

$$G_p(s) = \left(\frac{K_A}{\tau_A s + C_A} \right) \left(\frac{K_t}{J L_a s^2 + (B L_a + J R_a) s + (B R_a + K_t K_b)} \right) \quad (5)$$

โดยที่ ค่าพารามิเตอร์จำนวน 9 ตัว ของ DC Motor กับอุปกรณ์กำลังหาได้จากการระบุตัวตน (Identification) [17] ของ DC Motor ด้วย CS ฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s)$ ของ DC Motor เขียนได้ดังสมการที่ (6)

$$G_p(s) = \left(\frac{0.02587}{1.5 \times 10^{-12} s^3 + 9.623 \times 10^{-8} s^2 + 0.0008131 s + 0.007904} \right) \quad (6)$$

3. ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

3.1 การค้นหาแบบนกคุเหว่า

การค้นหาแบบนกคุเหว่า (CS) ได้รับการนำเสนอครั้งแรกโดย นักวิจัยหยางและเดป ในปี ค.ศ. 2009 [14] หนึ่งในเทคนิคการ หาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบเมตา-ฮิวริสติกที่มีประสิทธิภาพมาก อัลกอริทึมของ CS ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมกรวางไข่ ของนกคุเหว่าและพฤติกรรมการบินแบบเลวี [15] ซึ่งเป็นการบิน ของนกหรือแมลงในรูปแบบหนึ่ง (การบินในวิถีตรงแล้วหักเลี้ยว ด้วยมุมตั้งฉาก 90 องศาอย่างทันทีทันใด) โดยมีค่าพารามิเตอร์ หลักอยู่ 2 ประการ คือ จำนวนรังนกคุเหว่า (n) และค่าสัดส่วน P_a ที่แสดงถึงความสามารถของแมงกิ้งก่าขาของรังในการค้นพบไข่นกคุเหว่า อัลกอริทึมของ CS ผลเฉลยใหม่ $x^{(t+1)}$ ของนกคุเหว่า ตัวที่ i สามารถสร้างได้ด้วยการแจกแจงแบบเลวีดังสมการที่ (7) ในขณะที่ สัญลักษณ์ของ $Levy(\lambda)$ คือ การแจกแจงแบบเลวี ซึ่งมีค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนเป็นอนันต์ตามสมการที่ (8) ขนาดขั้นของการค้นหา s สามารถคำนวณหาจากความสัมพันธ์ ในสมการที่ (9) เมื่อค่า u และค่า v คือ การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) ดังสมการที่ (10) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของค่า u และค่า v ดังสมการที่ (11) ในขณะที่ ค่า Γ คือ ค่าของฟังก์ชันแกมมามาตรฐาน (Standard Grammar Function) ที่สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (12)

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \alpha \oplus Levy(\lambda) \quad (7)$$

$$Levy \approx u = t^{-\lambda}, \quad (1 < \lambda \leq 3) \quad (8)$$

$$s = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \quad (9)$$

$$u \sim N(0, \sigma_u^2), \quad v \sim N(0, \sigma_v^2) \quad (10)$$

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta)\sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2]\beta 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta}, \quad \sigma_v = 1 \quad (11)$$

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (12)$$

อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของ CS ได้ตามคำแนะนำของนักวิจัยหยางและเดป เพื่อให้มีค่าเพียงพอ ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด กำหนดให้ $n=15 \rightarrow 40$ ค่าสัดส่วน $P_a=0.2 \rightarrow 0.25$ และ $\lambda, \beta=1.5 \rightarrow 2.0$ โดย เขียนรหัสจำลอง (Pseudo Code) แสดงอัลกอริทึมของ CS ดัง รูปที่ 4

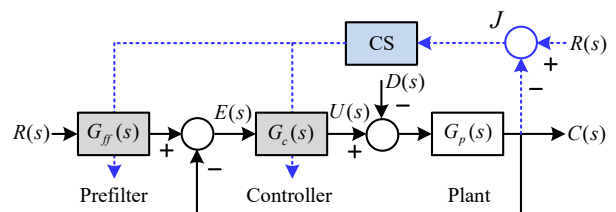
Initialized:

- Objective function $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)^T$.
- Generate initial population of n host nests x_i ($i = 1, 2, \dots, n$).
- while** ($t < MaxGen$) or (termination criteria: TC)
 - Get the j cuckoo randomly by Lévy flight.
 - Evaluate its quality by the given objective function F_j .
 - Choose a nest j among n nests randomly.
 - if** ($F_i < F_j$)
 - Replace j by the new solution.
- end**
 - A fraction (p_a) of worse nests are abandoned, and build new ones at new locations via Lévy flight.
 - Keep best solution (or nests with quality solutions).
 - Rank the solutions and find the current best.
- end**
 - Report the best solution found.

รูปที่ 4 รหัสจำลองแสดงอัลกอริทึมของ CS [14]

3.2 การออกแบบระบบควบคุม 2DOF-PID อย่างเหมาะสม

การออกแบบระบบควบคุม 2DOF-PID อย่างเหมาะสมด้วย CS แสดงได้ดังรูปที่ 5 เพื่อประเมินสมรรถนะของตัวควบคุม ใน บทความนี้ ใช้เกณฑ์การทดสอบค่าความคลื่อนจากผลรวมค่า ความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (Sum Square Error: SSE) [18] ระหว่างสัญญาณอินพุต $R(s)$ และเอาต์พุต $C(s)$ ของระบบ เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J แสดงได้ดังสมการที่ (13) โดยค่า J จะเป็นดัชนีชี้วัดสมรรถนะ (Performance Index) ของวิธี CS ในการหาค่าพารามิเตอร์ของ 2DOF-PID ที่ทำให้สมรรถนะ ของระบบเข้าสู่สถานะคงตัวอย่างรวดเร็ว มีค่าคลาดเคลื่อนต่ำสุด มีค่าพุ่งเกินต่ำ โดยที่ ค่า J ถูกป้อนให้กับ CS ให้มีค่าน้อยที่สุด กับผลเฉลยที่เป็นไปได้ที่มีทั้งผลเฉลยเฉพาะที่ (Local Solution) และผลเฉลยวงกว้าง (Global Solution) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ ของตัวควบคุม $G_c(s)$ และฟีดแบ็คเตอร์ $G_{ff}(s)$ โดยที่ M_p คือ เปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum Overshoot) และ e_{ss} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะคงตัว (Steady-state Error)



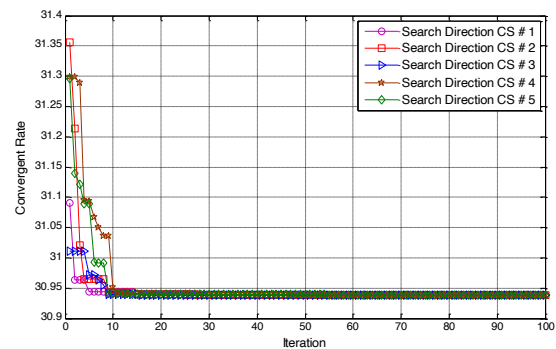
รูปที่ 5 การออกแบบระบบควบคุม 2DOF-PID ด้วย CS

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize} \quad J = \sum_{i=1}^N [r(i) - c(i)]^2 \\
 &\text{subject to} \quad \left. \begin{aligned} M_p &\leq 10\%, e_{ss} \leq 0.1\%, \\ 0 &\leq K_a \leq 0.1, \\ 0 &\leq K_b \leq 0.1 \end{aligned} \right\} \text{Prefilter} \\
 &\quad \quad \quad \left. \begin{aligned} 0 &\leq K_p \leq 1, \\ 0 &\leq K_i \leq 50, \\ 0 &\leq K_d \leq 0.1 \end{aligned} \right\} \text{Controller}
 \end{aligned} \quad (13)$$

4. ผลการทดสอบและการอภิปรายผล

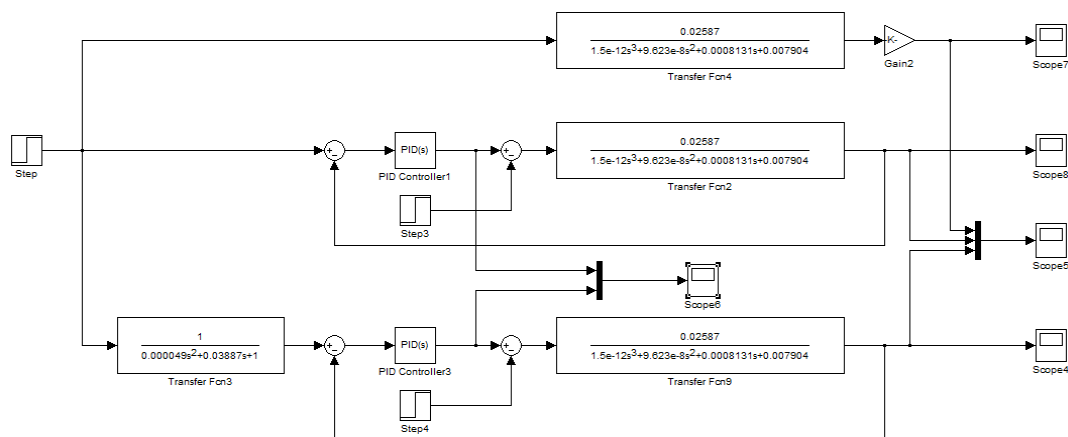
อัลกอริทึมของ CS ได้ถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมการค้นหาคำพารามิเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK บนคอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง 8 แกน มีสัญญาณนาฬิกา 3.2 กิกะเฮิรตซ์ และมีหน่วยความจำหลัก DDR4 32 กิกะไบต์ ที่คาบเวลาซิกซ์ตัวอย่าง (Sampling Period) เท่ากับ 1 มิลลิวินาที สำหรับการออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID อย่างเหมาะสม เบื้องต้นสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ CS ตามคำแนะนำของนักวิจัยยางและเดบ [14] ทำได้ดังนี้ จำนวนของฟังก์ชัน $n = 25$ ค่าสัดส่วนความสามารถของแมงกนีสัมกับโซเดียมคือ $P_a = 0.25$ ดำเนินการค้นหา 40 ครั้ง (Trial) ในแต่ละครั้งจะยุติการค้นหาเมื่อจำนวนรอบการค้นหาเท่ากับจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด (Max_Gen) = 100 ให้เป็นเกณฑ์ยุติการค้นหา (Termination Criteria: TC) ที่สอดคล้องกับขอบเขต (Boundary) ที่กำหนดไว้ในสมการที่ (13) จากการรอบการทำงานจริง หลังจากยุติการค้นหาตัวควบคุม 2DOF-PID ด้วย CS พบว่า ค่า J ทั้งหมด 40 ครั้ง (แสดงผลการทดสอบ 5 ครั้ง) มีเพียงครั้งเดียว ที่ค่า J ลู่เข้าหา

ผลเฉลยวงกว้างอย่างรวดเร็วและมีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่าลดลงจาก 31.0116 ในรอบแรก ลงมาอยู่ที่ 30.9394 ในรอบที่ 10 และมีค่าคงที่ต่อเนื่องไปจนถึงรอบที่ 100 ดังรูปที่ 6 แสดงว่า CS ได้ลู่เข้าผลเฉลยวงกว้างที่ดีที่สุดของตัวควบคุม 2DOF-PID แล้ว นอกจากนี้ ผลการทดสอบทั้ง 5 ครั้ง ยังแสดงเส้นทางการค้นหาและมีค่าคงที่ต่อเนื่องเดียวกัน ในรอบที่ 16 ไปจนถึงรอบที่ 100 ซึ่งสะท้อนความเสถียรและความน่าเชื่อถือของอัลกอริทึมอีกด้วย



รูปที่ 6 การลู่เข้าหาผลเฉลยโดยใช้ CS

จากการออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID ด้วยอัลกอริทึมของ CS จำนวน 40 ครั้ง พบว่า อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของ CS ที่กระทำกับค่า J ดังสมการที่ (13) ในกรณีการออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID ในรูปที่ 5 ซึ่งสังเกตเห็นว่า CS สามารถออกแบบค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม 2DOF-PID ที่มีค่าพารามิเตอร์ K_p , K_i และ K_d ของตัวควบคุม PID และค่าพารามิเตอร์ K_a และ K_b ของพรีฟิลเตอร์สำหรับการควบคุมความเร็วรอบ DC Motor ได้อย่างน่าพอใจ แสดงได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 7 การจำลองสถานการณ์ระบบควบคุม

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุม

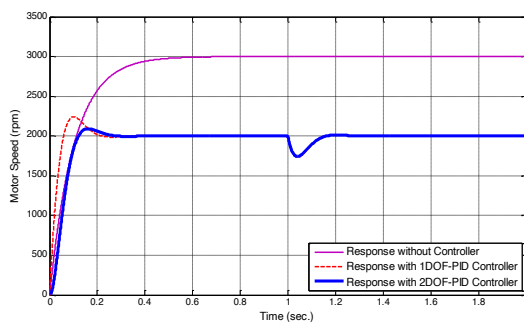
Control Structures	Prefilter		PID Controller		
	K_a	K_b	K_p	K_i	K_d
1DOF-PID	—	—	0.8798	23.5027	0.0014
2DOF-PID	0.000049	0.03887	0.9342	24.0344	0.0012

4.1 การจำลองสถานการณ์ระบบควบคุม

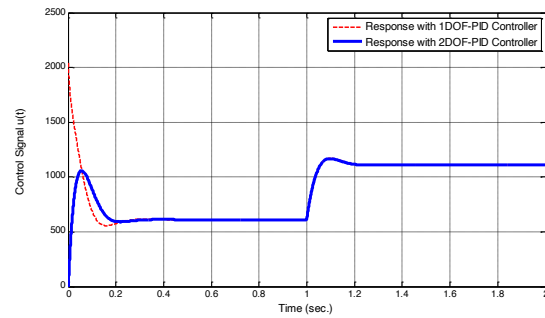
ในหัวข้อนี้ จำลองสถานการณ์ระบบควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID โดยใช้ CS เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบควบคุมด้วยการจำลองในโปรแกรม MATLAB/SIMULINK แสดงได้ดังรูปที่ 7 ผลตอบสนองของระบบควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID ด้วย CS กำหนดที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที ในขณะที่ เมื่อมีสัญญาณการรบกวน $d(t) = -500$ รอบต่อนาที เข้ามาที่เวลา 1 วินาที แสดงได้ดังรูปที่ 8 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID ด้วย CS แสดงได้ดังตารางที่ 2 โดยที่ t_r คือ ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) คิดที่ 0 ถึง 100% ของค่าสุดท้าย t_s คือ ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time) คิดที่ $\pm 2\%$ ของค่าสุดท้าย และ t_{reg} คือ ช่วงเวลาคุมค่าโหลด (Load Regulation) คิดที่ $\pm 2\%$ ของค่าสุดท้าย ในขณะที่ สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID ด้วย CS แสดงได้ดังรูปที่ 9 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 สมรรถนะของระบบควบคุม

Control Structures	Speed Responses				
	t_r (sec.)	t_s (sec.)	M_p (%)	e_{ss} (%)	t_{reg} (sec.)
1DOF-PID	0.0589	0.1855	9.98	0.00	0.1375
2DOF-PID	0.1245	0.2190	4.62	0.00	0.1372



รูปที่ 8 ผลตอบสนองของระบบควบคุม

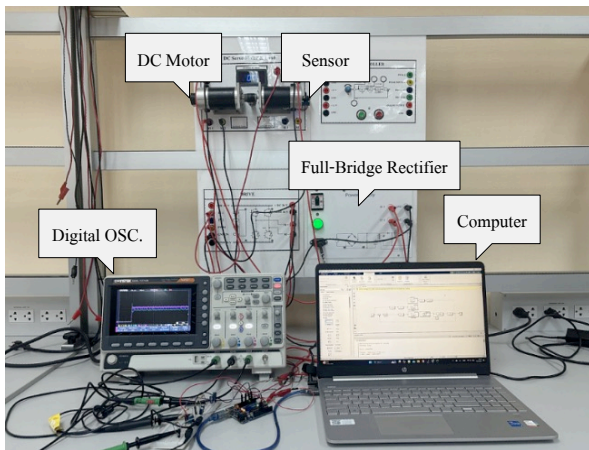


รูปที่ 9 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม

จากรูปที่ 8 และตารางที่ 2 พบว่า ผลตอบสนองและสมรรถนะของระบบควบคุม 2DOF-PID มีค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p น้อยกว่าระบบควบคุม 1DOF-PID ถึงแม้ว่าจะมีช่วงเวลาดำเนิน t_r และมีช่วงเวลาเข้าที่ t_s มากกว่าระบบควบคุม 1DOF-PID อย่างไรก็ตาม ที่ช่วงเวลาคุมค่าโหลด t_{reg} พบว่า ระบบควบคุม 2DOF-PID สามารถคุมค่าโหลดเหมือนระบบควบคุม 1DOF-PID โดยไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะคงตัว e_{ss} จึงทำให้บรรลุเป้าหมายการติดตามคำสั่งและการคุมค่าโหลดอย่างอิสระต่อกัน ในขณะที่ สัญญาณควบคุมของระบบควบคุม 2DOF-PID รูปที่ 9 ที่ค่าเริ่มต้นการขยายตัวจะมีค่าต่ำกว่าระบบควบคุม 1DOF-PID ส่งผลให้ระบบควบคุม 2DOF-PID ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 การอนุวัตระบบควบคุมจริง

เพื่อยืนยันผลจากการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุม ในหัวข้อที่ 4.1 การอนุวัตระบบควบคุมความเร็วรอบ DC Motor ในห้องปฏิบัติการจริง จะใช้มอเตอร์ DC ยี่ห้อ MAGMOTOR รุ่น C21-H-175FX แรงดัน 36 โวลต์ ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที การทำงานจะอยู่บนพื้นฐานของบอร์ด อาดุยโน้ ยูโน อาร์ 3 (Arduino UNO R3) ซึ่งเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด ATmega328P ร่วมกับ MATLAB/SIMULINK ใช้ตัวตรวจรู้ (Sensor) รุ่น HC-020K ซึ่งเป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์ เพื่อใช้คำนวณค่าเป็นความเร็วรอบ DC Motor ในห้องปฏิบัติการจริง การอนุวัตระบบควบคุมจริง แสดงได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การอนุวัตระบบควบคุมจริง

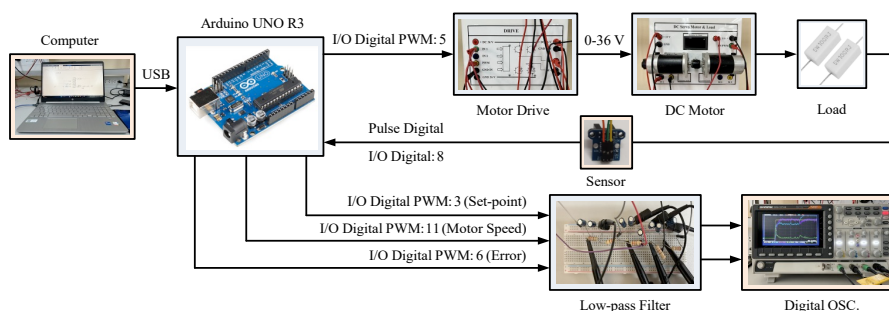
ทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เพื่อเปรียบเทียบผลการออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID โดยใช้ CS ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ใช้ในการอนุวัตระบบควบคุมจริง จะมีค่าเท่ากับการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมดังตารางที่ 1 ที่คาบเวลาชักตัวอย่าง 1 มิลลิวินาที สำหรับการควบคุมความเร็วรอบของ DC Motor จะใช้ตัวตรวจรู้เป็นตัวสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อนำมาใช้คำนวณหาความเร็วให้เป็นความเร็วรอบ DC Motor ดังรูปที่ 11 โดยที่ เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้สามารถเข้าถึงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ยี่ห้อ อาดูอิน โยนู อาร์ 3 ด้วยการติดตั้งโปรแกรม MATLAB/SIMULINK สำหรับใช้ติดต่อสื่อสารข้อมูลและการประยุกต์ใช้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ อาดูอิน โยนู อาร์ 3 การวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของระบบควบคุม

ทำได้ด้วยการสร้างแผนภาพ SIMULINK ในโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของ DC Motor แสดงได้ดังรูปที่ 12 จากผลของการทดสอบ พบว่า ผลตอบสนองของระบบควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เมื่อให้สัญญาณอินพุตเป็นแบบขั้นบันได (Unit-step Input Signal) โดยที่ ป้อนโพลด์เข้ามารบกวนระบบควบคุม ที่เวลา 2 วินาที ผลตอบสนองของระบบควบคุมจริงแสดงได้ดังรูปที่ 13 และสมรรถนะของระบบควบคุมจริงแสดงได้ดังตารางที่ 3 ในขณะที่สัญญาณควบคุมของระบบควบคุมจริงแสดงได้ดังรูปที่ 14

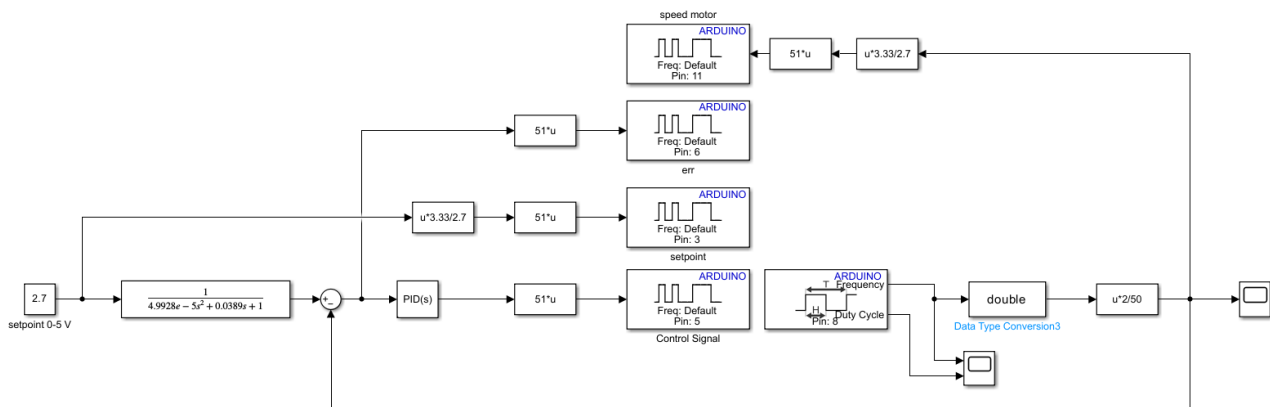
ตารางที่ 3 สมรรถนะของระบบควบคุมจริง

Control Structures	Speed Responses				
	t_r (sec.)	t_s (sec.)	M_p (%)	e_{ss} (%)	t_{reg} (sec.)
1DOF-PID	0.0650	0.6611	9.75	0.00	0.7331
2DOF-PID	0.4341	1.0291	5.10	0.00	0.7341

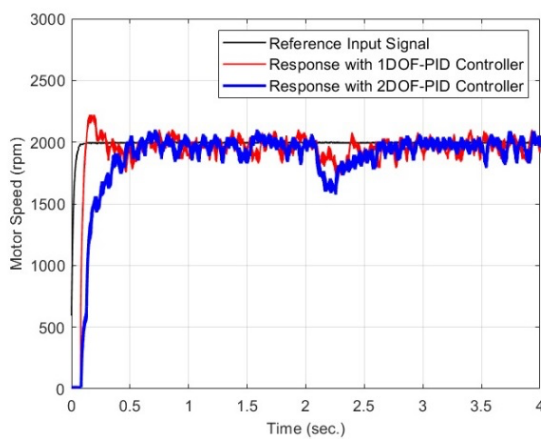
จากรูปที่ 13 และตารางที่ 3 พบว่า ผลตอบสนองและสมรรถนะของระบบควบคุมจริง 1DOF-PID จะมีช่วงเวลาขึ้น t_r และมีช่วงเวลาเข้าที่ t_s มีค่าน้อยกว่าระบบควบคุม 2DOF-PID ในขณะที่ระบบควบคุม 2DOF-PID มีเปอร์เซ็นต์ค่าพุ่งเกินสูงสุด M_p น้อยกว่าระบบควบคุม 1DOF-PID เมื่อพิจารณาช่วงเวลาคุมค่าโพลด์ t_{reg} พบว่า ระบบควบคุม 2DOF-PID สามารถคุมค่าโพลด์ได้เหมือนระบบควบคุม 1DOF-PID โดยไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะคงตัว e_{ss} ในขณะที่ สัญญาณควบคุมของระบบควบคุมจริงดังรูปที่ 14 ระบบควบคุม 2DOF-PID ค่าเริ่มต้นการขยายตัวจะมีค่าต่ำกว่าระบบควบคุม 1DOF-PID เช่นเดียวกัน



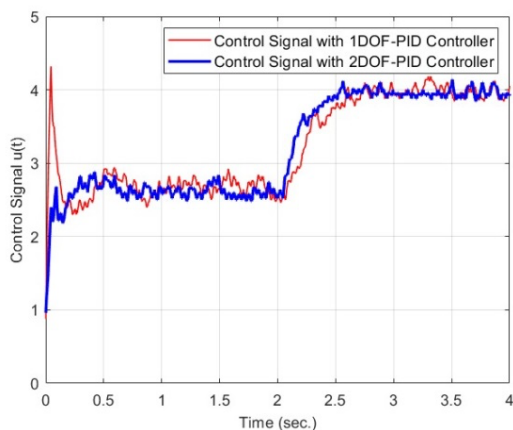
รูปที่ 11 การควบคุมความเร็วรอบของ DC Motor



รูปที่ 12 การสร้างแผนภาพ SIMULINK ในโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 13 ผลตอบสนองของระบบควบคุมจริง



รูปที่ 14 สัญญาณควบคุมของระบบควบคุมจริง

5. สรุป

ตัวควบคุม 1DOF-PID เมื่อออกแบบให้บรรลุเป้าหมายการติดตามคำสั่ง สมรรถนะในด้านการคุมค่าโหลดจะลดลง ตรงกัน

ข้าม เมื่อออกแบบให้บรรลุเป้าหมายการคุมค่าโหลด สมรรถนะในด้านการติดตามคำสั่งจะลดลง บทความนี้ นำเสนอตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ให้สมรรถนะในด้านการติดตามคำสั่งและสมรรถนะในด้านการคุมค่าโหลดแยกออกจากกันอย่างอิสระ วิธี CS นี้สามารถค้นหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม 2DOF-PID ได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ ยังพบว่า ค่า J ทั้งหมด 40 ครั้ง (แสดงผลการทดสอบ 5 ครั้ง) มีเพียงครั้งเดียว ที่ค่า J ลู่เข้าหาผลเฉลยวงกว้างได้อย่างรวดเร็วและมีค่าน้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบจำนวน 5 ครั้ง เส้นทางในการค้นหาจะมีค่าคงที่ต่อเนื่องไปกันจนถึงรอบการค้นหาสูงสุด ซึ่งสะท้อนความเสถียรและความน่าเชื่อถือของอัลกอริทึม CS อีกด้วย เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุม 1DOF-PID และตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ถูกออกแบบด้วยวิธี CS พบว่า มีเปอร์เซ็นต์ค่าพ่วงเกินสูงสุด M_p น้อยกว่าตัวควบคุม 1DOF-PID ในขณะที่ สัญญาณควบคุมของตัวควบคุม 2DOF-PID ค่าเริ่มต้นมีการขยายตัวของสัญญาณควบคุมต่ำกว่าตัวควบคุม 1DOF-PID อย่างมีประสิทธิภาพ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] I. M. Horowitz, *Synthesis of Feedback Systems*. Academic Press, 1963.
- [2] M. Araki and H. Taguchi, "Two-degree-of-freedom PID controllers," *Systems, Control and Information*, Vol. 42, pp. 18–25, 1998.

- [3] M. Araki and H. Taguchi, "Two-degree-of-freedom PID controllers," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol. 1, No. 4, pp. 401–411, 2003.
- [4] N. Minorsky, "Directional Stability of Automatically Steered Bodies," *American Society of Naval Engineering*, Vol. 34, pp. 284, 1922.
- [5] M. Araki, "Two-Degree-of-Freedom Control System, Part I," *Systems and Control*, Vol. 29, pp. 649–656, 1985.
- [6] K. Hiroi, "Two-degree-of-freedom PID control system and its application," *Instrumentation*, Vol. 29, pp. 39–43, 1986.
- [7] H. Taguchi and M. Araki, "On Tuning of Two-Degree-of-Freedom PID Controllers with Consideration on Location of Disturbance Input," *Trans. SICE*, Vol. 38, pp. 441–446, 2002.
- [8] K. Hiroi and K. Nagakawa, "Improvement of A Digital PID Algorithm with Rate Limitation on MV Change," *The 28th SICE Annual Conference*, pp. 243–244, 1989.
- [9] M. Kanda and K. Hiroi, "Super Two-Degree-of-Freedom PID Algorithm," *The 30th SICE Annual Conference*, pp. 465–466, 1991.
- [10] V. Zakian, *Control Systems Design: A New Framework*, Springer-Verlag, 2005.
- [11] X. S. Yang, *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*, John Wiley & Sons, 2010.
- [12] K. Lurang and D. Puangdownreong, "Two-degree-of-freedom PIDA controllers design optimization for liquid-level system by using modified bat algorithm," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, Vol. 16, No. 2, pp. 715–732, 2020.
- [13] กิตติศักดิ์ ฤกษ์, ทิพา จิตหวัง และ เดชา พวงดาวเรือง, "การออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID อย่างเหมาะสมด้วยขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาท," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีดิจิทัล*, ปีที่ 13, ฉบับที่ 2, หน้า 63–74, 2568.
- [14] X. S. Yang and S. Deb, "Cuckoo search via Lévy flights," *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing*, pp. 210–214, 2009.
- [15] X. S. Yang, "Cuckoo search and firefly algorithm: overview and analysis," *Cuckoo Search and Firefly Algorithm Theory and Applications*, Springer, pp. 1–26, 2014.
- [16] P. Dash, L. C. Saikia and N. Sinha, "Comparison of performances of several cuckoo search algorithm based 2DOF controllers in AGC of multi-area thermal system," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 55, pp. 429–436, 2014.
- [17] ชนิตา แก้วเพชร, วรณัฐ จันทร์โอ, สุภิญญา เจริญกิจธนาภ, สัตถาภูมิ ไทยพานิช, ชาญณรงค์ อ่างทอง และ ดนุพล คำปัญญา, "การประยุกต์การค้นหาแบบค้างคาวเพื่อระบุเอกลักษณ์แบบจำลองอันดับเศษส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง," *การประชุมวิชาการ งานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ครั้งที่ 17*, หน้า 213–216, 2568.
- [18] นคร เสาวรส, สัตถาภูมิ ไทยพานิช และ ดนุพล คำปัญญา, "การเปรียบเทียบการปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดีอย่างเหมาะสมโดยใช้เทคนิคการค้นหาแบบนกคุเหว่า," *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 44*, หน้า 489–492, 2564.