

การออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID อย่างเหมาะสม ด้วยขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาท

กิตติศักดิ์ ฤาแรง^{1*} ทิวา จิตหวัง² เดชา พวงดาวเรือง³

^{1*}สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น, กาญจนบุรี, ประเทศไทย

²นักวิชาการอิสระ, นนทบุรี, ประเทศไทย

³สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*ผู้ประพันธ์บรรณกิจ อีเมล : kitiskak.l@western.ac.th

รับต้นฉบับ : 8 มีนาคม 2568; รับบทความฉบับแก้ไข : 12 กันยายน 2568; ตอบรับบทความ : 22 กันยายน 2568

เผยแพร่ออนไลน์ : 26 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ

ตัวควบคุม PID ถูกนำเสนอครั้งแรกในปี ค.ศ.1922 และได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรมมาร่วม 1 ศตวรรษ ทั้งนี้เนื่องจากตัวควบคุม PID สามารถปรับปรุงผลตอบสนองภาวะชั่วครู่และผลตอบสนองสถานะอยู่ตัว อีกทั้งยังสามารถอนุวัติได้โดยง่าย อย่างไรก็ตาม โดยธรรมชาติแล้วตัวควบคุม PID จะให้สมรรถนะของระบบมีความโดดเด่นเพียงด้านใดด้านหนึ่งตามภาวะแล็กกัน เมื่อทำการออกแบบตัวควบคุม PID ให้บรรลุวัตถุประสงค์ด้านการตามรอยสัญญาณอินพุต สมรรถนะในด้านการคุมค่าโหลดของระบบจะลดลง และในทางกลับกันก็เป็นจริง ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยอาศัยตัวควบคุม PID แบบสองระดับขั้นความเสถียร บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID อย่างเหมาะสม โดยใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาท ซึ่งเป็นเทคนิคการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตาฮิวริสติกที่ทรงประสิทธิภาพ สำหรับระบบที่มีเวลาประวิงซึ่งมีผลตอบสนองล่าช้า และระบบเซอร์โวซึ่งมีผลตอบสนองรวดเร็ว ผลการออกแบบจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม 1DOF-PID จากผลการจำลองสถานการณ์ พบว่าตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาท สามารถควบคุมระบบที่มีเวลาประวิงและระบบเซอร์โวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่า IAE ที่ลดลงสูงสุดเท่ากับ 19.22% สำหรับระบบที่มีเวลาประวิง และ 17.14% สำหรับระบบเซอร์โว ส่งผลทำให้ผลตอบสนองแบบตามรอยสัญญาณอินพุตและผลตอบสนองแบบคุมค่าโหลดที่รวดเร็วและราบเรียบกว่าตัวควบคุม 1DOF-PID อย่างน่าพึงพอใจ

คำสำคัญ : ตัวควบคุม 1DOF-PID ตัวควบคุม 2DOF-PID เทคนิคการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตาฮิวริสติก ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาท



Optimal 2DOF-PID Controller Design Using Whale Optimization Algorithm

Kittisak Lurang^{1*} Thiwa Jitwang² Deacha Puangdownreong³

^{1*}*Department of Surveying Engineering, Faculty of Liberal Arts and Science, Western University,
Kanchanaburi, Thailand*

²*Independent Scholar, Nonthaburi, Thailand*

³*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia University, Bangkok, Thailand*

*Corresponding Author. E-mail address: kitisak.lu@western.ac.th

Received: 8 March 2025; Revised: 12 September 2025; Accepted: 22 September 2025

Published online: 26 December 2025

Abstract

The proportional-integral-derivative (PID) controller was first introduced in 1922. It has been widely accepted in industry for almost a century, because it can improve transient and steady-state responses as well as easily implementation. However, PID controllers tend by nature to excel in one aspect of system performance due to its trade-off. When the PID controller is designed to achieve input tracking, the load regulation performance of the system is then reduced, and vice versa. This problem can be solved by using a two degree-of-freedom PID (2DOF-PID) controller. This paper presents the design of the optimal 2DOF-PID controller by using the whale optimization algorithm (WOA), one of the most efficient metaheuristic optimization techniques for the time-delayed systems having slow responses and the servo systems possessing fast responses. Results obtained by the 2DOF-PID designed by the WOA will be compared with those obtained by the 1DOF-PID controller. From the simulation results, it was found that the 2DOF-PID controller designed by the WOA algorithm can effectively control the time-delayed system and the servo system. A maximum reduction in the IAE has been achieved, with 19.22% for the time-delay system and 17.14% for the servo system. Consequently, faster and smoother tracking and load regulation responses have been satisfactorily obtained once compared to those of the 1DOF-PID controller.

Keywords: 1DOF-PID controller, 2DOF-PID controller, Metaheuristic optimization techniques, Whale optimization algorithm

1) บทนำ

ในปี ค.ศ. 1922 ตัวควบคุม PID ได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Minorsky [1] เพื่อควบคุมและรักษาเสถียรภาพของเรือรบ ตัวควบคุม PID สามารถตอบสนองวัตถุประสงค์ของการควบคุมทั้งในด้านการตามรอยสัญญาณอินพุต (input tracking) หรือการเฝ้าติดตามคำสั่ง (command following) และการคุมค่าโหลด (load regulation) หรือการกำจัดการรบกวน (disturbance rejection) ตัวควบคุม PID สามารถปรับปรุงผลตอบสนองภาวะชั่วคราวและผลตอบสนองสถานะอยู่ตัว เพื่อให้ระบบถูกควบคุมมีผลตอบสนองที่รวดเร็วและมีความแม่นยำ นอกจากนี้ การออกแบบและการอนุวัติตัวควบคุม PID สามารถกระทำได้อย่างง่ายดาย ด้วยเหตุนี้ ตัวควบคุม PID จึงได้รับการยอมรับและถูกประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางในฐานะหัวใจหลักของระบบควบคุมอัตโนมัติมาพร้อม 1 ศตวรรษ [2], [3]

อย่างไรก็ตาม การใช้ตัวควบคุม PID เพียงตัวเดียว ซึ่งอาจเรียกว่า ตัวควบคุม PID แบบหนึ่งระดับขั้นความเสรี (one degree-of-freedom PID: 1DOF-PID controller) จะส่งผลทำให้สมรรถนะของระบบมีความโดดเด่นเพียงด้านใดด้านหนึ่ง สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากธรรมชาติของระบบ 1DOF ที่มีการใช้ตัวควบคุมเพียงตัวเดียว เมื่อทำการปรับจูนตัวควบคุมให้บรรลุวัตถุประสงค์ด้านการตามรอยสัญญาณอินพุต สมรรถนะในด้านการคุมค่าโหลดของระบบจะลดลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อทำการปรับจูนตัวควบคุมให้บรรลุวัตถุประสงค์ด้านการคุมค่าโหลด สมรรถนะในด้านการตามรอยสัญญาณอินพุตของระบบจะลดลง ปรากฏการณ์ดังกล่าวคือภาวะแลกกัน (trade-off) ของระบบ 1DOF ซึ่งการประยุกต์ในระบบอุตสาหกรรมจริง อาจส่งผลกระทบ เนื่องจากระบบควบคุมในภาคอุตสาหกรรมส่วนใหญ่มีความต้องการผลตอบสนองที่มีการตามรอยสัญญาณอินพุตและการคุมค่าโหลดที่เหมาะสมไปพร้อมกัน การควบคุมให้ระบบสามารถผลิตผลตอบสนองได้ตามวัตถุประสงค์ ทั้งในด้านการตามรอยสัญญาณอินพุตและด้านการคุมค่าโหลดไปพร้อมกัน ระบบควบคุมจะต้องมีโครงสร้างเป็น 2DOF และใช้ตัวควบคุม PID แบบสองระดับขั้นความเสรี (two degree-of-freedom PID controller: 2DOF-PID controller) [4]–[7] แนวทางการออกแบบ ตัวควบคุม 2DOF-PID แบบดั้งเดิมจะอาศัยหลักเกณฑ์การปรับจูน (tuning rules) [5], [6] ซึ่งมีข้อจำกัดเกี่ยวกับผลตอบสนองของระบบภายใต้การควบคุม (พลาเน็ต) ที่จะต้องมีลักษณะเป็นเส้นโค้งปฏิกิริยา (reaction curve) นั้นหมายความว่า ถ้าหากพลาเน็ตมีผลตอบสนองไม่เป็นไปตาม

เงื่อนไขดังกล่าว ก็จะไม่สามารถออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID ได้ จะเห็นได้ว่า การออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID อย่างเหมาะสมที่สามารถสร้างสมดุลระหว่างการตามรอยสัญญาณอินพุตและการคุมค่าโหลด สำหรับระบบควบคุมประเภทต่าง ๆ ยังคงเป็นงานที่ท้าทายในทางทฤษฎีระบบควบคุมแบบดั้งเดิม และอาจจำเป็นต้องพึ่งพาเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

ในปัจจุบัน การออกแบบตัวควบคุมได้เปลี่ยนจากแนวทางการปรับจูนแบบดั้งเดิมมาเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแนวใหม่โดยอาศัยเทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮิวริสติก (metaheuristic optimization techniques) [8] จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวาฬ (Whale Optimization Algorithm: WOA) เป็นเทคนิคการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบเมตาฮิวริสติกที่ทรงประสิทธิภาพ ซึ่งได้รับการนำเสนอเป็นครั้งแรกโดย Mirjalili และ Lewis ในปี ค.ศ. 2016 [9] ขั้นตอนวิธี WOA ได้รับการพัฒนาขึ้นจากพฤติกรรมการล่าเหยื่อของวาฬหลังค่อม (humpback whales) ที่อาศัยเทคนิคการปล่อยเกลียวฟองอากาศเพื่อต้อนให้ฝูงปลา (เหยื่อ) มารวมกลุ่มกันบนผิวน้ำเพื่อกินเหยื่อ กลไกสำคัญของขั้นตอนวิธี WOA คือการค้นหาค่าเหยื่อ (searching for prey), การล้อมเหยื่อ (encircling prey), และการโจมตีแบบฟองอากาศ (bubble-net attacking) ขั้นตอนวิธี WOA ได้รับการทดสอบสมรรถนะกับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาตรฐานแล้ว พบว่ามีสมรรถนะการค้นหาค่าเฉลียวกว้าง (global solution) ที่เหนือกว่าขั้นตอนวิธีการค้นหาค่าเชิงแรงโน้มถ่วง (gravitational search algorithm: GSA), วิธีวิวัฒนาการเชิงผลต่าง (Differential Evolution: DE), วิธีกลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ (Evolution Strategy: ES), โปรแกรมเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Programming: EP), ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบฝูงอนุภาค (particle swarm optimization) [9] และเนื่องจากขั้นตอนวิธี WOA เป็นเทคนิคการค้นหาแบบเมตาฮิวริสติกที่ค่อนข้างใหม่ และมีกลไกการค้นหาที่ไม่ซับซ้อน ขั้นตอนวิธี WOA จึงได้รับการประยุกต์ใช้ เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทางวิศวกรรมที่หลากหลาย อาทิเช่น การแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทางวิศวกรรมไฟฟ้า [10], [12] วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ [13], [14] วิศวกรรมอากาศยาน [15], [16] วิศวกรรมเครื่องกล [17], [18] และวิศวกรรมโยธา [19], [20] เป็นต้น ดังที่ได้รับการปริทัศน์ไว้ใน [21], [22] จากผลการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะเห็นได้

ว่า ยังไม่มีการประยุกต์ขั้นตอนวิธี WOA เพื่อออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID อย่างเหมาะสม

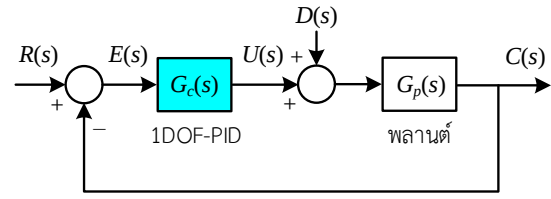
บทความวิจัยนี้ได้ประยุกต์ขั้นตอนวิธี WOA เพื่อออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID อย่างเหมาะสม สำหรับระบบที่มีเวลาประวิงซึ่งมีผลตอบสนองล่าช้า และระบบเซอร์โวซึ่งมีผลตอบสนองรวดเร็ว ผลการออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID ด้วยขั้นตอนวิธี WOA จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม 1DOF-PID เพื่อตรวจสอบสมรรถนะในการควบคุมระบบลำดับถัดไปจะนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง, วิธีดำเนินการวิจัย, ผลการวิจัยและการอภิปราย และสรุปผลการวิจัย ตามลำดับ

2) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1) ระดับขั้นความเสรี

ระดับขั้นความเสรี จะพิจารณาจากจำนวนฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด (closed-loop transfer function) ที่สามารถปรับแต่งได้อย่างอิสระ [4]–[6] ยกตัวอย่างเช่น ระบบมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด $C(s)/R(s)$ สำหรับวัตถุประสงค์ด้านการตามรอยสัญญาณอินพุต และมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด $C(s)/D(s)$ สำหรับวัตถุประสงค์ด้านการคุมค่าโหลด ถ้าฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด $C(s)/R(s)$ และ $C(s)/D(s)$ สามารถปรับจูนได้อย่างอิสระต่อกัน ระบบดังกล่าวจะถูกพิจารณาเป็นระบบสองระดับขั้นความเสรี (ระบบ 2DOF) แต่ถ้าฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด $C(s)/R(s)$ และ $C(s)/D(s)$ ไม่สามารถปรับจูนได้อย่างอิสระต่อกัน ระบบดังกล่าวจะถูกพิจารณาเป็นระบบหนึ่งระดับขั้นความเสรี (ระบบ 1DOF)

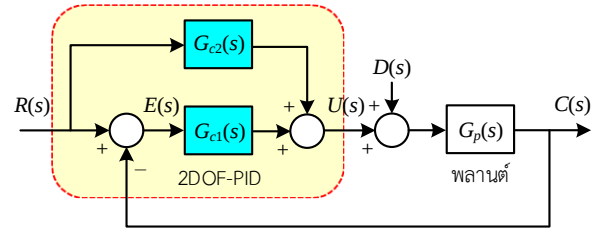
โครงสร้างของระบบ 1DOF เมื่อใช้ตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม ซึ่งจะพิจารณาเป็นตัวควบคุม 1DOF-PID ดังรูปที่ 1 เมื่อ $R(s)$ คือสัญญาณอินพุต, $E(s)$ คือสัญญาณความคลาดเคลื่อน, $U(s)$ คือสัญญาณควบคุม, $D(s)$ คือสัญญาณรบกวนหรือโหลด, และ $C(s)$ คือสัญญาณเอาต์พุต หรือผลตอบสนองของระบบ กำหนดให้พลานต์ (plant) มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น $G_p(s)$ และตัวควบคุม 1DOF-PID มีฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น $G_c(s)$ ดังแสดงในสมการที่ (1) เมื่อ K_c คืออัตราขยายตัวควบคุม (controller gain), τ_i คือค่าคงตัวเวลาเชิงปริพันธ์ (integral time constant), และ τ_d คือค่าคงตัวเวลาเชิงอนุพันธ์ (derivative time constant)



รูปที่ 1 : ระบบ 1DOF

$$G_c(s)|_{1DOF-PID} = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (1)$$

สำหรับโครงสร้างของระบบ 2DOF เมื่อใช้ตัวควบคุม 2DOF-PID แสดงดังรูปที่ 2 และฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม 2DOF-PID แสดงดังสมการที่ (2) เมื่อ α และ β คือค่าตัวประกอบการลดทอน (attenuation factors) [4], [5], [6], [7]



รูปที่ 2 : ระบบ 2DOF

$$\begin{aligned} G_{c1}(s)|_{2DOF-PID} &= K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \\ G_{c2}(s)|_{2DOF-PID} &= -K_c (\alpha + \beta \tau_d s) \end{aligned} \quad (2)$$

2.2) หลักเกณฑ์การปรับจูน

การออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID แบบดั้งเดิม จะอาศัยหลักเกณฑ์การปรับจูน AT (Araki-Taguchi tuning rules) [5], [6] ซึ่งพัฒนามาจากหลักเกณฑ์การปรับจูน ZN (Ziegler-Nichols tuning rule) วิธีที่ 1 [23], [24] โดยจะใช้ประโยชน์จากค่าเวลาประวิง L และค่าคงตัวเวลา T ที่ได้จากเส้นโค้งปฏิกิริยาของพลานต์ ซึ่งให้ผลตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (unit-step input) เป็นรูปทรงตัวอักษร S เมื่อทราบค่า L และ T จากเส้นโค้งปฏิกิริยาแล้ว การออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID ด้วยหลักเกณฑ์การปรับจูน AT จะอาศัยความสัมพันธ์ตามสูตรสำเร็จทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 1

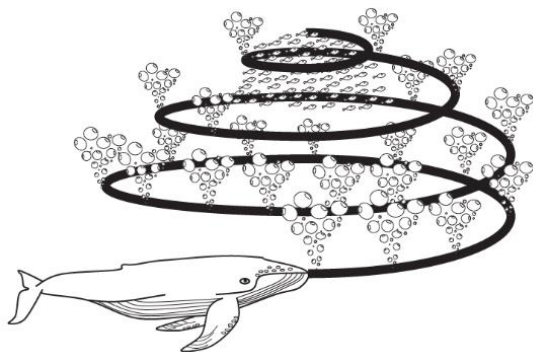
ตารางที่ 1 : หลักเกณฑ์การปรับจูน AT

Ratio L/T	2DOF-PID parameters				
	K_c	τ/T	τ_d/T	α	β
0.1	12.57	0.22	0.04	0.64	0.66
0.2	6.32	0.40	0.08	0.61	0.64
0.4	3.21	0.69	0.16	0.56	0.61
0.8	1.68	1.09	0.30	0.47	0.54

หลักเกณฑ์การปรับจูน AT มีข้อดีคือไม่ซับซ้อน สามารถดำเนินการได้โดยสะดวกและรวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดคือไม่สามารถใช้กับพลานต์ที่มีผลตอบสนองไม่เป็นรูปทรงตัวอักษร S และอัตราส่วนระหว่าง L/T ต้องอยู่ในช่วง $0.1 \leq L/T \leq 0.8$ [5-6]

2.3) ขั้นตอนวิธี WOA

ขั้นตอนวิธี WOA ได้รับการพัฒนาขึ้นจากกลไกการล่าเหยื่อของวาฬหลังค่อม โดยอาศัยพฤติกรรมการปล่อยเกลียวฟองอากาศเพื่อต้อนให้ฝูงปลา (เหยื่อ) มารวมกลุ่มกัน ดังแสดง ในรูปที่ 3 วาฬหลังค่อมจะดำน้ำลงไปและเริ่มสร้างเกลียวฟองอากาศรอบตัวเหยื่อ และค่อย ๆ ว่ายน้ำขึ้นไปบนผิวน้ำเพื่อกินเหยื่อ [9]



รูปที่ 3 : การปล่อยเกลียวฟองอากาศของวาฬหลังค่อมเพื่อล่าเหยื่อ [9]

กลไกสำคัญของขั้นตอนวิธี WOA คือการค้นหาเหยื่อการล่อเหยื่อ และการโจมตีแบบฟองอากาศ สำหรับกลไกการล่อเหยื่อจะอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4) เมื่อ t คือจำนวนรอบการค้นหา, $\vec{X}^*$ คือตำแหน่ง (ผลเฉลย) ที่ดีที่สุด, $\vec{X}$ คือตำแหน่ง (ผลเฉลย) ปัจจุบัน, $\vec{D}$ คือเวกเตอร์ตำแหน่ง, $\vec{A}$ และ $\vec{C}$ คือเวกเตอร์สัมประสิทธิ์, $\vec{a}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ที่ลดลงจาก $2 \rightarrow 0$ แบบเชิงเส้น ตามจำนวนรอบการค้นหา t , และ $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ คือค่าสุ่ม (random) ที่มีการแจก

แจงแบบเอกรูป (uniform distribution) ในช่วง $[0, 1]$ เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ $\vec{A}$ และ $\vec{C}$ ในสมการที่ (3)-(4) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)| \quad (3)$$

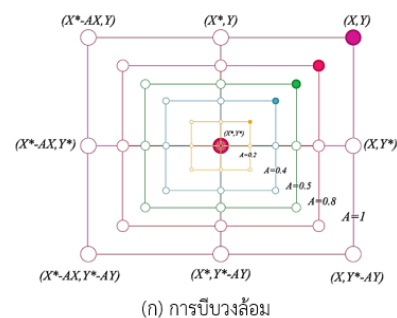
$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4)$$

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (5)$$

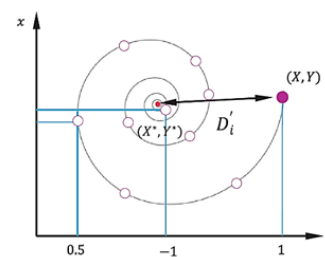
$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (6)$$

กลไกการโจมตีแบบฟองอากาศ จะมีกลไกที่แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือการบีบวงล้อม (shrinking encircling) และการปรับตำแหน่งแบบเกลียวกันหอย (spiral updating positions) ซึ่งวาฬหลังค่อมจะว่ายไปรอบ ๆ เหยื่อเป็นวงเกลียวที่บีบตัวไปพร้อม ๆ กัน โดยกำหนดให้มีค่าความน่าจะเป็นเท่ากับ 50%-50% ระหว่างการบีบวงล้อมและการปรับตำแหน่งแบบเกลียวกันหอย ดังแสดงในสมการที่ (7) และรูปที่ 4

$$\vec{X}(t+1) = \begin{cases} \vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} & \text{if } p < 0.5 \text{ (shrinking encircling),} \\ \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t) & \text{if } p \geq 0.5 \text{ (spiral updating positions),} \end{cases} \quad (7)$$



(ก) การบีบวงล้อม



(ข) การปรับตำแหน่งแบบเกลียวกันหอย

รูปที่ 4 : กลไกการโจมตีแบบฟองอากาศ [9]

เมื่อ $\vec{D}' = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)|$, b คือค่าคงตัวสำหรับการกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่รูปเกลียว, และ l, p คือค่าสุ่มที่มี

การแจกแจงแบบเอกรูปในช่วง $[0, 1]$ การโจมตีแบบฟองอากาศ
เปรียบเสมือนคุณสมบัติความเข้มข้น (intensification property)
ในการค้นหาผลเฉลยเฉพาะที่ (local solution) ของขั้นตอนวิธี
WOA

กลไกการค้นหาเหยื่อ จะอาศัยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์
ดังแสดงในสมการที่ (8) และ (9)

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_{rand}(t) - \vec{X}(t)| \quad (8)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_{rand}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (9)$$

เมื่อ $\vec{X}_{rand}(t)$ คือค่าสุ่มที่มีการแจกแจงแบบเอกรูปในช่วง
 $[0, 1]$ การค้นหาเหยื่อเปรียบเสมือนคุณสมบัติความหลากหลาย
(diversification property) ในการค้นหาผลเฉลยวงกว้าง ของ
ขั้นตอนวิธี WOA

ขั้นตอนวิธี WOA สามารถแสดงด้วยรหัสเทียม (pseudo code)
ดังแสดงในรูปที่ 5

Initialize:

- Initialize the objective function $f(x)$ and search spaces
- Initialize the whales population X_i ($i = 1, 2, \dots, n$)
- Evaluate each search agent X_i via $f(x)$
- Define X^* = the best search agent
- Define the initial iteration $t = 1$, and maximum number of iterations Max_Iter

while ($t \leq \text{Max_Iter}$)

- for** each search agent
- Update a , A , C , l , and p
- if1** ($p < 0.5$)
- if2** ($|A| < 1$)
- Update the position of the current search agent by the Eq. (3)
- else if2** ($|A| \geq 1$)
- Select a random search agent (X_{rand})
- Update the position of the current search agent by the Eq. (9)
- end if2**
- else if1** ($p \geq 0.5$)
- Update the position of the current search agent by the Eq. (7)
- end if1**
- end for**
- Check if any search agent goes beyond the search space and amend it
- Evaluate each search agent X_i via $f(x)$
- Update X^* if there is a better solution
- $t = t + 1$

end while

- Report the optimal solution X^*

รูปที่ 5 : ขั้นตอนวิธี WOA

3) วิธีดำเนินการวิจัย

3.1) พลาเน็ต

งานวิจัยนี้จะประยุกต์ขั้นตอนวิธี WOA เพื่อออกแบบตัว
ควบคุม 2DOF-PID สำหรับระบบที่มีเวลาประวิงซึ่งมีผลตอบสนอง
ล่าช้า ดังแสดงด้วยฟังก์ชันถ่ายโอน $G_{p1}(s)$ ในสมการที่ (10) [7]
และระบบเซอร์โวซึ่งมีผลตอบสนองรวดเร็ว ดังแสดงด้วยฟังก์ชัน
ถ่ายโอน $G_{p2}(s)$ ในสมการที่ (11) [25]

$$G_{p1}(s) = \frac{6}{(s+1)(s+2)(s+3)} \quad (10)$$

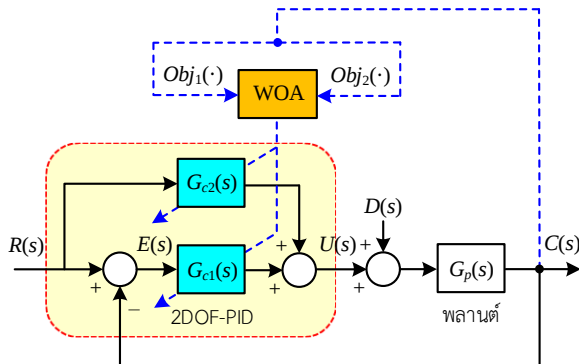
$$G_{p2}(s) = \frac{2.24}{(5.55 \times 10^{-3}s+1)(1.78 \times 10^{-3}s+1)(1.78 \times 10^{-4}s+1)} \quad (11)$$

3.2) การออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID ด้วยขั้นตอนวิธี WOA

การออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID ด้วยขั้นตอนวิธี WOA
มีการอบงานดังแสดงในรูปที่ 6 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective
function) J แสดงดังสมการที่ (12) เมื่อ Obj_1 คือผลตอบสนอง
แบบตามรอยสัญญาณอินพุต และ Obj_2 คือผลตอบสนองแบบ
คุมค่าโหลด ค่า $0 \leq \gamma_1, \gamma_2 \leq 1$ คือตัวประกอบการปรับโทษ
(penalty factors) ซึ่งในงานวิจัยนี้กำหนดให้ $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.5$
เนื่องจากให้ความสำคัญเท่ากัน ระหว่างผลตอบสนองแบบตาม
รอยสัญญาณอินพุตและผลตอบสนองแบบคุมค่าโหลด

จากรูปที่ 6 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J จะถูกป้อนให้กับขั้นตอน
วิธี WOA เพื่อทำให้มีค่าน้อยที่สุด (minimization) ด้วยการ
ค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม 2DOF-PID ใน
สมการที่ (2) ภายใต้ปริภูมิการค้นหาและเงื่อนไขการออกแบบ
ดังแสดงในสมการที่ (13) เมื่อ t_r คือช่วงเวลาดำเนิน (rise time), t_{r_max}
คือ t_r สูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้, M_p คือเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูงสุด
(maximum percent overshoot), M_{p_max} คือ M_p สูงสุดที่ยอม
ให้เกิดขึ้นได้, t_s คือช่วงเวลาเข้าที่ (settling time), t_{s_max} คือ t_s
สูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้, e_{ss} คือความคลาดเคลื่อนในสถานะ
อยู่ตัว (steady-state error), e_{ss_max} คือ e_{ss} สูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้น
ได้, M_{preg} คือเปอร์เซ็นต์การพุ่งเกินสูงสุดเนื่องจากการคุมค่าโหลด
(maximum percent overshoot of load regulation), M_{preg_max}
คือ M_{preg} สูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้, t_{reg} คือช่วงเวลาคุมค่าโหลด
(load regulating time), t_{reg_max} คือ t_{reg} สูงสุดที่ยอมให้เกิดขึ้น
ได้, $[K_{c_min}, K_{c_max}]$ คือปริภูมิการค้นหาของ K_c , $[\tau_{i_min}, \tau_{i_max}]$
คือปริภูมิการค้นหาของ τ_i , $[\tau_{d_min}, \tau_{d_max}]$ คือปริภูมิการค้นหา

ของ τ_d , $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ คือปริภูมิการค้นหาของ α , และ $[\beta_{\min}, \beta_{\max}]$ คือปริภูมิการค้นหาของ β



รูปที่ 6 : การออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID ด้วยขั้นตอนวิธี WOA

$$\text{Minimize } J(\cdot) = \gamma_1 \left(\frac{\text{Obj}_1(\cdot)}{\text{Obj}_{1_max}} \right) + \gamma_2 \left(\frac{\text{Obj}_2(\cdot)}{\text{Obj}_{2_max}} \right) \quad (12)$$

$$\text{Subject to } \left. \begin{aligned} &t_r \leq t_{r_max}, M_p \leq M_{p_max}, \\ &t_s \leq t_{s_max}, e_{ss} \leq e_{ss_max}, \\ &M_{preg} \leq M_{preg_max}, t_{reg} \leq t_{reg_max}, \\ &K_{c_min} \leq K_c \leq K_{c_max}, \\ &\tau_{i_min} \leq \tau_i \leq \tau_{i_max}, \\ &\tau_{d_min} \leq \tau_d \leq \tau_{d_max}, \\ &\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}, \\ &\beta_{min} \leq \beta \leq \beta_{max} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

ในกรณีการออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID ด้วยขั้นตอนวิธี WOA สามารถดำเนินการได้ตามแนวทางที่กล่าวมาข้างต้น โดยการปรับค่า α และ β ในสมการที่ (13) ให้เท่ากับศูนย์ ตัวควบคุม 2DOF-PID จะกลายเป็นตัวควบคุม 1DOF-PID

3.3) การจำลองสถานการณ์และการเปรียบเทียบผล

การจำลองสถานการณ์เพื่อตรวจสอบผลตอบสนองของระบบควบคุมจะดำเนินการโดยอาศัยโปรแกรม MATLAB version 2017b (License No. #40637337) เพื่อประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core (TM) i7-10510U CPU@2.3 GHz, 8.0GB-RAM ขั้นตอนวิธี WOA ในรูปที่ 5 จะได้รับการพัฒนาเป็นโปรแกรมการค้นหาด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID

สำหรับระบบที่มีเวลาประวิง $G_{p1}(s)$ ในสมการที่ (10) ซึ่งมีผลตอบสนองที่เป็นเส้นโค้งปฏิกิริยาในลักษณะเป็นรูปทรงตัวอักษร S ตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA จะถูก

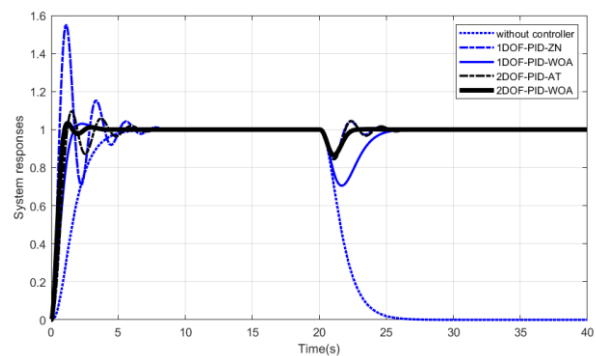
นำไปเปรียบเทียบกับตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยหลักเกณฑ์การปรับจูน AT, ตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยหลักเกณฑ์การปรับจูน ZN, และตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA

สำหรับระบบเซอร์โว $G_{p2}(s)$ ในสมการที่ (11) ซึ่งมีผลตอบสนองไม่เป็นรูปทรงตัวอักษร S ตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA จะถูกเปรียบเทียบกับตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยวิธี Modulus optimum (MO) [25] และตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA

4) ผลการวิจัยและการอภิปราย

4.1) ผลการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบที่มีเวลาประวิง

ระบบที่มีเวลาประวิง $G_{p1}(s)$ ในสมการที่ (10) ให้ผลตอบสนองเป็นเส้นโค้งปฏิกิริยาในลักษณะเป็นรูปทรงตัวอักษร S ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยมีค่า $L = 0.4211$ วินาที และ $T = 2.3157$ วินาที



รูปที่ 7 : ผลตอบสนองของระบบที่มีเวลาประวิง $G_{p1}(s)$

การออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID สำหรับพลาเน็ต $G_{p1}(s)$ ด้วยหลักเกณฑ์การปรับจูน ZN [12-13] อาศัยความสัมพันธ์ $K_c = 1.2T/L = 6.599$, $\tau_i = 2L = 0.8422$ วินาที, และ $\tau_d = 0.5L = 0.2105$ วินาที ตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยหลักเกณฑ์การปรับจูน ZN แสดงดังสมการที่ (14) และให้ผลตอบสนอง ดังแสดงในรูปที่ 7

$$G_c(s)|_{\text{1DOF-PID-ZN}} = 6.60 + \frac{7.84}{s} + 1.39s \quad (14)$$

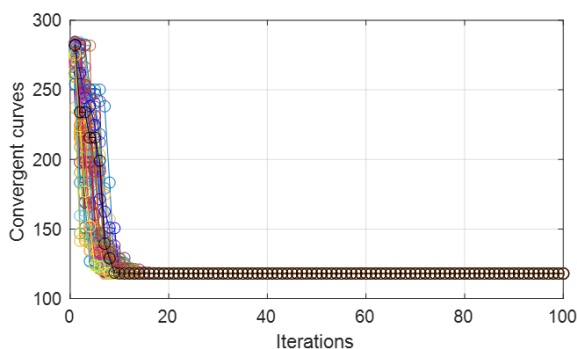
การออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID สำหรับพลาเน็ต $G_{p1}(s)$ ด้วยหลักเกณฑ์การปรับจูน AT [5-6] จะพบว่า อัตราส่วน $L/T = 0.1818 \approx 0.2$ ดังนั้น จากตารางที่ 1 จะได้ $K_c = 6.32$, $\tau_i = 0.4T = 0.9263$ วินาที, $\tau_d = 0.08T = 0.1853$ วินาที, $\alpha = 0.61$

และ $\beta = 0.64$ ตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยหลักเกณฑ์การปรับจูน AT แสดงดังสมการที่ (15) และให้ผลตอบสนอง ดังแสดงในรูปที่ 7

$$\left. \begin{aligned} G_{c1}(s)|_{2DOF-PID-AT} &= 6.32 + \frac{6.82}{s} + 1.17s \\ G_{c2}(s)|_{2DOF-PID-AT} &= -(3.86 + 0.75s) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

การออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID สำหรับพลาเน็ต $G_{p1}(s)$ ด้วยขั้นตอนวิธี WOA เริ่มต้นจากการทดสอบเพื่อหาจำนวนวาทที่เหมาะสม โดยการปรับจำนวนวาท $n = 5, 10, \dots, 50$ ซึ่งพบว่า $n = 30$ คือค่าที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบ กำหนดให้เกณฑ์ยุติการค้นหา (Termination Criteria: TC) คือจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด $Max_Iter = 100$ เนื่องจากเป็นจำนวนรอบสูงสุดที่สามารถรับประกันได้ว่าการค้นหาสามารถลู่เข้าหาผลเฉลยได้อย่างแน่นอน และดำเนินการค้นหาทั้งหมด 50 ครั้ง (trials) เพื่อออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID ที่เหมาะสม อันจะส่งผลทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J ในสมการที่ (12) มีค่าน้อยที่สุด โดยกำหนดให้ปริภูมิการค้นหาและเงื่อนไขการออกแบบในสมการที่ (13) แสดงดังสมการที่ (16)

$$\left. \begin{aligned} \text{Subject to } t_r &\leq 2.00 \text{ s}, M_p \leq 15\%, \\ t_s &\leq 7.50 \text{ s}, e_{ss} \leq 0.01\%, \\ M_{preg} &\leq 30\%, t_{reg} \leq 5.00 \text{ s}, \\ 0 &\leq K_c \leq 10.00, \\ 0 &\leq \tau_i \leq 5.00 \text{ s}, \\ 0 &\leq \tau_d \leq 5.00 \text{ s}, \\ 0 &\leq \alpha \leq 2.50, \\ 0 &\leq \beta \leq 2.50 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$



รูปที่ 8 : เส้นโค้งการลู่เข้าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID สำหรับพลาเน็ต $G_{p1}(s)$ ด้วยขั้นตอนวิธี WOA

รูปที่ 8 แสดงเส้นโค้งการลู่เข้าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J ในการออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID สำหรับพลาเน็ต $G_{p1}(s)$

ด้วยขั้นตอนวิธี WOA จากการดำเนินการค้นหาทั้งหมด 50 ครั้ง จากรูปที่ 8 จะพบว่า ขั้นตอนวิธี WOA สามารถออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 118.02 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.26×10^{-6} สำหรับเส้นโค้งการลู่เข้าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J ในการออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 124.73 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 3.58×10^{-5} และจะมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 8 จึงไม่ขอเสนอในที่นี้ ขั้นตอนวิธี WOA ใช้เวลาเฉลี่ยในการออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID สำหรับพลาเน็ต $G_{p1}(s)$ เท่ากับ 7.12 วินาที และ 9.46 วินาที ตัวควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA สำหรับพลาเน็ต $G_{p1}(s)$ แสดงดังสมการที่ (17) และ (18) และให้ผลตอบสนองดังรูปที่ 7

$$G_c(s)|_{1DOF-PID-WOA} = 2.11 + \frac{1.45}{s} + 0.76s \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} G_{c1}(s)|_{2DOF-PID-WOA} &= 6.24 + \frac{6.28}{s} + 2.13s \\ G_{c2}(s)|_{2DOF-PID-WOA} &= -(1.98 + 0.83s) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

ตารางที่ 2 : การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบที่มีเวลาประวิง

ตัวควบคุม	ผลตอบสนอง								
	ตามรอยสัญญาณอินพุต					คุมค่าโหลด			IAE_Total
	t_r (s)	M_p (%)	t_s (s)	e_{ss} (%)	IAE1	M_{preg} (%)	t_{reg} (s)	IAE2	
ไม่มีตัวควบคุม	3.37	0.00	5.00	0.00	58.51	ไม่สามารถคุมค่าได้			
1DOF-PID-ZN	0.62	55.04	6.83	0/00	49.39	14.65	3.69	1.87	51.26
1DOF-PID-WOA	1.72	3.05	2.94	0.00	47.81	29.50	4.73	5.05	52.86
2DOF-PID-AT	1.20	9.70	5.21	0.00	48.87	15.71	3.83	2.06	50.93
2DOF-PID-WOA	1.01	3.42	2.11	0.00	41.11	13.48	2.17	1.59	42.70

จากรูปที่ 7 ผลตอบสนองแบบตามรอยสัญญาณอินพุตแสดงในช่วงเวลา 0–20 วินาที และผลตอบสนองแบบคุมค่าโหลดแสดงในช่วงเวลา 20–40 วินาที การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบที่มีเวลาประวิง $G_{p1}(s)$ แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า ตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA สามารถควบคุมระบบ $G_{p1}(s)$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับเงื่อนไข

การออกแบบที่กำหนดในสมการที่ (16) และให้ผลตอบสนองแบบตามรอยสัญญาณอินพุตและผลตอบสนองแบบคุ่มค่าโหลดที่รวดเร็วและราบเรียบกว่าตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยหลักเกณฑ์การปรับจูน AT, ตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยหลักเกณฑ์การปรับจูน ZN, และตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA อย่างน่าพึงพอใจ

สมรรถนะด้านการตามรอยสัญญาณอินพุตและการคุ่มค่าโหลดของตัวควบคุม 1DOF-PID-ZN, 1DOF-PID-WOA, 2DOF-PID-AT และ 2DOF-PID-WOA สำหรับระบบที่มีเวลาประวิง ในรูปที่ 7 สามารถแสดงด้วยค่าปริพันธ์ของค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (Integral of Absolute Error: IAE) ระหว่าง สัญญาณอินพุตอ้างอิงและสัญญาณเอาต์พุตของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 2 เมื่อ IAE1 คือค่า IAE ของการตามรอยสัญญาณอินพุต, IAE2 คือค่า IAE ของการคุ่มค่าโหลด และ IAE_Total คือผลรวมของค่า IAE1 และ IAE2 ซึ่งพบว่า ตัวควบคุม 2DOF-PID-WOA สามารถลดค่า IAE_Total ลงได้ 19.22%, 16.70% และ 16.16% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม 1DOF-PID-WOA, 1DOF-PID-ZN และ 2DOF-PID-AT ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ตัวควบคุม 2DOF-PID-WOA สามารถผลิตผลตอบสนองแบบตามรอยสัญญาณอินพุตและผลตอบสนองแบบคุ่มค่าโหลดได้อย่างเหมาะสมและสมดุล ทำให้ผลตอบสนองในภาพรวมมีความรวดเร็วและราบเรียบกว่าตัวควบคุม 1DOF-PID-WOA, 1DOF-PID-ZN และ 2DOF-PID-AT ตามลำดับ

4.2) ผลการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบเซอร์โว

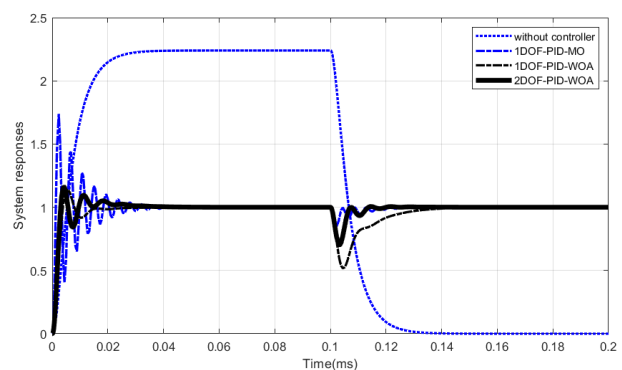
ระบบเซอร์โว $G_{p2}(s)$ ในสมการที่ (11) ให้ผลตอบสนองไม่เป็นรูปทรงตัวอักษร S ดังแสดงในรูปที่ 9 ตัวควบคุม 1DOF-PID ที่

ออกแบบด้วยวิธี MO [14] สำหรับ พลานต์ $G_{p2}(s)$ แสดงดังสมการที่ (19)

$$G_c(s)|_{1DOF-PID-MO} = 9.20 + \frac{1,256.22}{s} + 0.01s \quad (19)$$

การออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID สำหรับพลานต์ $G_{p2}(s)$ ด้วยขั้นตอนวิธี WOA กำหนดให้จำนวนวาท $n = 30$ TC คือ $Max_Iter = 100$ และดำเนินการค้นหาทั้งหมด 50 ครั้ง เพื่อออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID ที่เหมาะสม อันจะส่งผลทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J ในสมการที่ (12) มีค่าน้อยที่สุด โดยกำหนดให้ปริภูมิการค้นหาและเงื่อนไขการออกแบบในสมการที่ (13) แสดงดังสมการที่ (20)

$$\left. \begin{aligned} \text{Subject to } & t_r \leq 10.00 \mu s, M_p \leq 20\%, \\ & t_s \leq 0.50 \text{ ms}, e_{ss} \leq 0.01\%, \\ & M_{preg} \leq 50\%, t_{reg} \leq 0.75 \text{ ms}, \\ & 0 \leq K_c \leq 10.00, \\ & 0 \leq \tau_i \leq 5.00 \text{ s}, \\ & 0 \leq \tau_d \leq 5.00 \text{ s}, \\ & 0 \leq \alpha \leq 2.50, \\ & 0 \leq \beta \leq 2.50 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$



รูปที่ 9 : ผลตอบสนองของระบบเซอร์โว $G_{p2}(s)$

ตารางที่ 3 : การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบเซอร์โว

ตัวควบคุม	ผลตอบสนอง								
	ตามรอยสัญญาณอินพุต					คุมค่าโหลต			IAE_Total
	t_r (ms)	M_p (%)	t_s (ms)	e_{ss} (%)	IAE1	M_{preg} (%)	t_{reg} (ms)	IAE2	
ไม่มีตัวควบคุม	0.015	0.00	0.024	124.0	146.77	ไม่สามารถคุมค่าได้			
1DOF-PID-MO	1.29×10^{-3}	73.85	0.032	0.00	19.18	15.15	0.016	1.18	20.36
1DOF-PID-WOA	3.85×10^{-3}	14.27	0.014	0.00	15.65	48.24	0.034	6.41	22.06
2DOF-PID-WOA	3.07×10^{-3}	15.98	0.026	0.00	15.96	29.72	0.012	2.32	18.28

เส้นโค้งการลู่เข้าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ J ในการออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID สำหรับพลาเน็ต $G_{p2}(s)$ ด้วยขั้นตอนวิธี WOA จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 136.67 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 4.06×10^{-5} และสำหรับตัวควบคุม 2DOF-PID จะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 122.58 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 2.02×10^{-6} ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งเช่นเดียวกับรูปที่ 8 จึงไม่ขอนำเสนอในที่นี้

ขั้นตอนวิธี WOA ใช้เวลาเฉลี่ยในการออกแบบตัวควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID สำหรับพลาเน็ต $G_{p2}(s)$ เท่ากับ 7.14 วินาที และ 9.52 วินาที ตัวควบคุม 1DOF-PID และ 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA สำหรับพลาเน็ต $G_{p2}(s)$ แสดงดังสมการที่ (21) และ (22) และให้ผลตอบสนองดังรูปที่ 9

$$G_c(s)|_{1DOF-PID-WOA} = 1.74 + \frac{192.85}{s} + 0.001s \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} G_{c1}(s)|_{2DOF-PID-WOA} &= 2.67 + \frac{796.45}{s} + 0.01s \\ G_{c2}(s)|_{2DOF-PID-WOA} &= -(0.83 + 0.02s) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

จากรูปที่ 9 ผลตอบสนองแบบตามรอยสัญญาณอินพุตแสดงในช่วงเวลา 0–0.1 มิลลิวินาที และผลตอบสนองแบบคุ่มค่าโหลตแสดงในช่วงเวลา 0.1–0.2 มิลลิวินาที การเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบที่มีเวลาประวิง $G_{p2}(s)$ ดังตารางที่ 3 ซึ่งพบว่า ตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA สามารถควบคุมระบบ $G_{p2}(s)$ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนดในสมการที่ (20) และให้ผลตอบสนองแบบตามรอยสัญญาณอินพุตและผลตอบสนองแบบคุ่มค่าโหลตที่รวดเร็วและราบเรียบกว่าตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยวิธี MO และขั้นตอนวิธี WOA อย่างน่าพึงพอใจ

สมรรถนะด้านการตามรอยสัญญาณอินพุตและการคุ่มค่าโหลต ของตัวควบคุม 1DOF-PID-MO, 1DOF-PID-WOA และ 2DOF-PID-WOA สำหรับระบบเซอร์โว ในรูปที่ 9 สามารถแสดงด้วยค่า IAE ระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิงและสัญญาณเอาต์พุตของระบบ ดังแสดงในตารางที่ 3 เมื่อ IAE1 คือค่า IAE ของการตามรอยสัญญาณอินพุต, IAE2 คือค่า IAE ของการคุ่มค่าโหลต และ IAE_Total คือผลรวมของค่า IAE1 และ IAE2 ซึ่งพบว่า ตัวควบคุม 2DOF-PID-WOA สามารถลดค่า IAE_Total ลงได้ 17.14% และ 10.22% เมื่อเปรียบเทียบกับตัวควบคุม 1DOF-PID-WOA และ 1DOF-PID-MO ตามลำดับ นั้นหมายความว่า ตัวควบคุม 2DOF-PID-WOA สามารถผลิตผลตอบสนองแบบตามรอยสัญญาณอินพุตและผลตอบสนองแบบคุ่มค่าโหลตได้อย่างเหมาะสมและสมคูล ทำให้ผลตอบสนองในภาพรวมมีความรวดเร็ว

และราบเรียบกว่าตัวควบคุม 1DOF-PID-WOA และ 1DOF-PID-MO ตามลำดับ

5) สรุป

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID อย่างเหมาะสม สำหรับระบบที่มีเวลาประวิงและระบบเซอร์โว โดยใช้ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวาท (WOA) จากผลการออกแบบและการจำลองสถานการณ์ พบว่า ขั้นตอนวิธี WOA สามารถออกแบบตัวควบคุม 2DOF-PID ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับเงื่อนไขการออกแบบที่กำหนด ในกรณีของระบบที่มีเวลาประวิง พบว่า ตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA ให้ผลตอบสนองแบบตามรอยสัญญาณอินพุตและผลตอบสนองแบบคุ่มค่าโหลตที่รวดเร็วและราบเรียบกว่าตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยหลักเกณฑ์การปรับจูน AT, ตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยหลักเกณฑ์การปรับจูน ZN, และตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA และในกรณีของระบบเซอร์โว พบว่า ตัวควบคุม 2DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA ให้ผลตอบสนองแบบตามรอยสัญญาณอินพุตและผลตอบสนองแบบคุ่มค่าโหลต ที่รวดเร็วและราบเรียบกว่าตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยวิธี MO และขั้นตอนวิธี WOA เมื่อพิจารณาจากผลการออกแบบในภาพรวมของงานวิจัยนี้ พบว่า ตัวควบคุม 2DOF-PID สามารถควบคุมให้ระบบมีผลตอบสนองที่น่าพึงพอใจทั้งผลตอบสนองแบบตามรอยสัญญาณอินพุตและผลตอบสนองแบบคุ่มค่าโหลต ในขณะที่ตัวควบคุม 1DOF-PID สามารถควบคุมให้ระบบมีผลตอบสนองที่น่าพึงพอใจเฉพาะผลตอบสนองแบบตามรอยสัญญาณอินพุตเท่านั้น แต่จะให้ผลตอบสนองแบบคุ่มค่าโหลตที่มีคุณภาพต่ำจากการวิเคราะห์ผลในภาพรวม การที่ตัวควบคุม 2DOF-PID สามารถผลิตผลตอบสนองได้ตามวัตถุประสงค์ ทั้งในด้านการตามรอยสัญญาณอินพุตและด้านการคุ่มค่าโหลตไปพร้อมกันได้ดีกว่าตัวควบคุม 1DOF-PID เนื่องจากตัวควบคุม 2DOF-PID มีส่วนของตัวควบคุม $G_{c1}(s)$ และ $G_{c2}(s)$ ดังแสดงในสมการที่ (2) ที่สามารถแยกการควบคุมได้อย่างอิสระ เมื่อนำขั้นตอนวิธี WOA ซึ่งเป็นเทคนิคการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบเมตาฮิวริสติกที่ทรงประสิทธิภาพ มาช่วยในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม จึงทำให้ตัวควบคุม 2DOF-PID สามารถให้ผลตอบสนองที่เหนือกว่าตัวควบคุม 2DOF-PID และตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบ

ด้วยหลักเกณฑ์ การปรับปรุง และให้ผลตอบสนองที่เหนือกว่าตัวควบคุม 1DOF-PID ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี WOA

แนวทางการดำเนินงานวิจัยในอนาคต สามารถแบ่งออกได้หลายแนวทาง ดังนี้ แนวทางแรก คือการนำผลการออกแบบตัวควบคุมในบทความนี้ไปอนุวัติ (implementation) เพื่อนำผลการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ แนวทางต่อมา คือการพัฒนาขั้นตอนวิธี WOA ให้มีประสิทธิภาพในการค้นหาผลเฉลยวงกว้างที่รวดเร็วยิ่งขึ้น และแนวทางสุดท้าย คือการประยุกต์ขั้นตอนวิธี WOA เพื่อการระบุเอกลักษณ์ระบบ (system identification) และออกแบบตัวควบคุมให้กับระบบจริงที่มีความซับซ้อนและหลากหลายมากยิ่งขึ้น

REFERENCES

- [1] N. Minorsky, "Directional stability of automatically steered bodies," *J. Amer. Soc. Naval Eng.*, vol. 34, no. 2, pp. 280–309, May 1922.
- [2] K. J. Åström and T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed. North Carolina, NC, USA: Instrument Society of America, 1995.
- [3] A. O'Dwyer, *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*, London, UK: Imperial College Press, 2003.
- [4] M. Araki, "Two-degree-of-freedom control system: part I," *Syst. Control*, vol. 29, pp. 649–656, 1985.
- [5] M. Araki and H. Taguchi, "Two-degree-of-freedom PID controllers," *Syst. Control Inf.*, vol. 42, pp. 18–25, 1998.
- [6] H. Taguchi and M. Araki, "Two-degree-of-freedom PID controllers: their functions and optimal tuning," in *Proc. IFAC Workshop in Digit. Control 2000: Past, Present and Future of PID Control*, Apr. 2000, pp. 91–96.
- [7] 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, Apr. 2020.
- [8] V. Zakian, *Control Systems Design: A New Framework*, London, UK: Springer-Verlag London, 2005.
- [9] S. Mirjalili and A. Lewis, "The whale optimization algorithm," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 95, pp. 51–67, May 2016.
- [10] D. Prakash and C. Lakshminarayana, "Optimal siting of capacitors in radial distribution network using whale optimization algorithm," *Alexandria Eng. J.*, vol. 56, no. 4, pp. 499–509, Dec. 2017.
- [11] H. J. Touma, "Study of the economic dispatch problem on IEEE 30-bus system using whale optimization algorithm," *Int. J. Eng., Sci. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 11–18, Jun. 2016.
- [12] O. Baimakhanov, A. Saukhimov, and O. Ceylan, "Whale optimization algorithm based optimal operation of power distribution systems," in *Proc. 57th Int. Univ. Power Eng. Conf. (UPEC)*, 2022, pp. 1–6, doi: 10.1109/UPEC55022.2022.9917748.
- [13] A. N. Jadhav and N. Gomathi, "WGC: hybridization of exponential grey wolf optimizer with whale optimization for data clustering," *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 3, pp. 1569–1584, Sep. 2018.
- [14] U. Dixit, A. Mishra, A. Shukla, and R. Tiwari, "Texture classification using convolutional neural network optimized with whale optimization algorithm," *SN Appl. Sci.*, vol. 1, no. 655, pp. 1–11, May 2019.
- [15] S. Aftab, N. Razak, A. S. M. Rafie, and K. A. Ahmad, "Mimicking the humpback whale: An aerodynamic perspective," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 84, pp. 48–69, Jul. 2016.
- [16] X. Huang, R. Wang, X. Zhao, and K. Hu, "Aero-engine performance optimization based on whale optimization algorithm," in *Proc. 36th Chinese Control Conf. (CCC)*, 2017, pp. 11437–11441, doi: 10.23919/ChiCC.2017.8029182.
- [17] A. H. Kashan, "An efficient algorithm for constrained global optimization and application to mechanical engineering design: league championship algorithm (LCA)," *Comput.-Aided Des.*, vol. 43, no. 12, pp. 1769–1792, Dec. 2011.
- [18] G. Hou, L. Gong, Z. Yang, and J. Zhang, "Multi-objective economic model predictive control for gas turbine system based on quantum simultaneous whale optimization algorithm," *Energy Convers. Manage.*, vol. 207, Mar. 2020, Art. no. 112498.
- [19] A. Kaveh and M. I. Ghazaan, "Enhanced whale optimization algorithm for sizing optimization of skeletal structures," *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, vol. 45, no. 3, pp. 345–362, Sep. 2016.
- [20] M. Rohani, G. Shafabakhsh, A. Haddad, and E. Asnaashari, "The workflow planning of construction sites using whale optimization algorithm (WOA)," *Turkish Online J. Des. Art Commun.*, vol. 6, pp. 2938–2950, Nov. 2016.
- [21] N. Rana, M. S. A. Latiff, S. M. Abdulhamid, and H. Chiroma, "Whale optimization algorithm: a systematic review of contemporary applications, modifications and developments," *Neural Comput. Appl.*, vol. 32, pp. 16245–16277, Mar. 2020.



- [22] H. N.-S. Mohammad, H. Zamani, Z. A. Varzaneh, and S. Mirjalili, "A systematic review of the whale optimization algorithm: theoretical foundation, improvements, and hybridizations," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 30, pp. 4113–4159, May 2023.
- [23] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Trans. ASME*, vol. 64, no. 8, pp. 759–765, Nov. 1942.
- [24] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Process lags in automatic control circuits," *Trans. ASME*, vol. 65, no. 5, pp. 433–444, Jul. 1943.
- [25] D. Puangdownreong, Y. Prempraneerat, and S. Sujitjorn, "Development of a dc-servo motor control system for testing of the Eitelberg's method," (in Thai), in *Proc. 18th Elect. Eng. Conf. (EECON-18)*, pp. 809–814, 1995.