



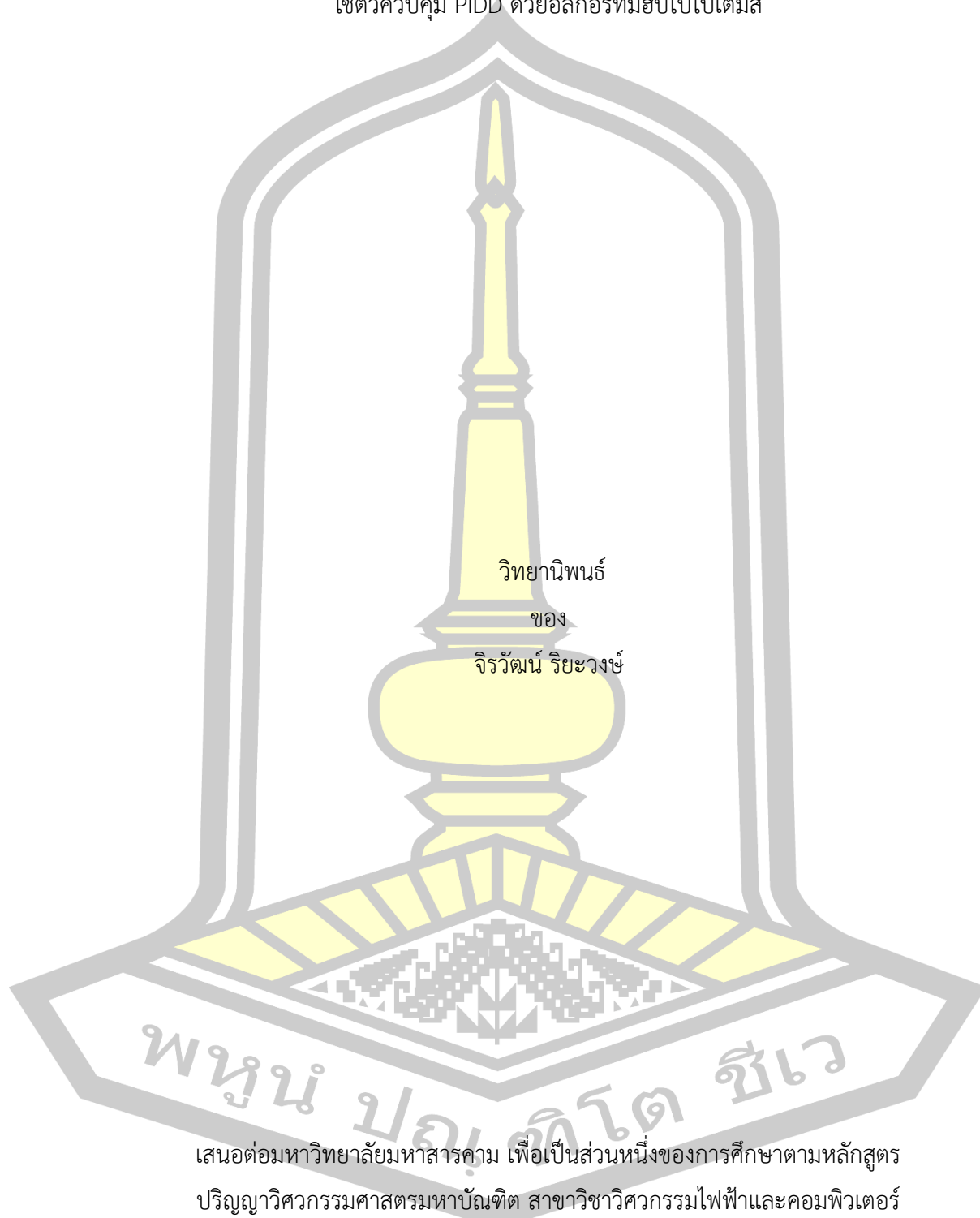
การควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติของระบบผลิตไฟฟ้าความร้อนแบบ PV-Reheat แบบไฮบริด โดย
ใช้ตัวควบคุม PID ด้วยอัลกอริทึมฮิปโปโปแตมัส

วิทยานิพนธ์
ของ
จิรวัดน์ รียะวงษ์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
สิงหาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติของระบบผลิตไฟฟ้าความร้อนแบบ PV-Reheat แบบไฮบริด โดย
ใช้ตัวควบคุม PIDD ด้วยอัลกอริทึมฮิวริสติก

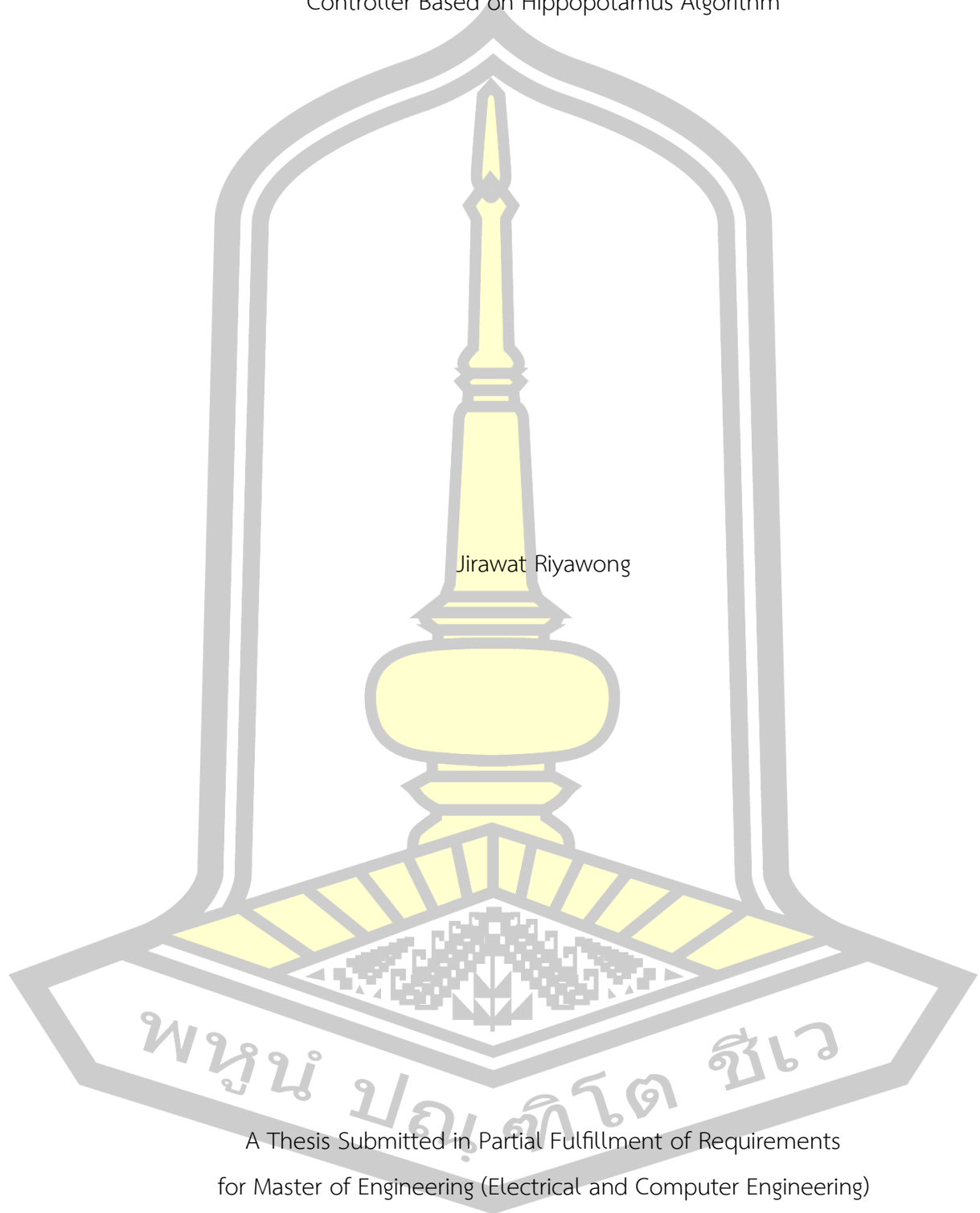


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

สิงหาคม 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Hybrid PV-Reheat Thermal Power System Automatic Generation Control Using PIDD
Controller Based on Hippopotamus Algorithm



Jirawat Riyawong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

August 2025

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายจิรวัฒน์ ริยะวงษ์ แล้ว
เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. จักรพันธ์ ออบมา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. สุพรรณนิภา วัฒนะ)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ชัยยงค์ เสริมผล)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย
มหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. จักรมาส เลหาวิช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(ผศ. ดร. พลเดช เขาวรัตน์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติของระบบผลิตไฟฟ้าความร้อนแบบ PV-Reheat แบบไฮบริด โดยใช้ตัวควบคุม PIDD ด้วยอัลกอริทึมฮิปโปโปแตมัส		
ผู้วิจัย	จิรวัดน์ รียะวงษ์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สุพรรณนิภา วัฒนะ		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2568

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้อัลกอริทึม Hippopotamus Optimization (HO) ในการปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PIDD สำหรับการควบคุมความถี่ของระบบผลิตไฟฟ้าแบบไฮบริดที่ประกอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) และโรงไฟฟ้าแบบรีฮีต (Reheat Thermal Power System) ซึ่งเป็นระบบ 2 พื้นที่ที่มีพฤติกรรมพลวัตซับซ้อน โดยมีการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับอัลกอริทึมมาตรฐาน ได้แก่ PSO, WCA และ GWO เพื่อให้ครอบคลุมการประเมินผลที่รอบด้าน งานวิจัยนี้ได้ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 4 รูปแบบ ได้แก่ IAE, ITAE, ISE และ ITSE ในการวัดประสิทธิภาพของระบบควบคุม พร้อมทั้งจำลองระบบใน 2 กรณีคือ การเปลี่ยนโหลดในพื้นที่ที่ 2 และการเปลี่ยนโหลดพร้อมกันในพื้นที่ที่ 1 และ 2 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า HO มีแนวโน้มให้ผลลัพธ์ที่เสถียรและสม่ำเสมอ แม้จะไม่สามารถให้ค่าเป้าหมายต่ำที่สุดในทุกกรณี แต่ผลลัพธ์จากกราฟ box plot และการเปรียบเทียบค่าทางพลวัตต่าง ๆ บ่งชี้ว่า HO มีความเหมาะสมในการใช้งานกับระบบที่ต้องการความมั่นคงของผลการควบคุมและค่าพารามิเตอร์ที่มีความเสถียร

คำสำคัญ : อัลกอริทึมฮิปโปโปแตมัส, ระบบพลังงานไฟฟ้าผสมพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับความร้อนแบบรีฮีต, การควบคุมความถี่โหลด, ตัวควบคุมพีไอดีดี

พูน ปณ จิต ชเว

TITLE	Hybrid PV-Reheat Thermal Power System Automatic Generation Control Using PID Controller Based on Hippopotamus Algorithm		
AUTHOR	Jirawat Riyawong		
ADVISORS	Associate Professor Supannika Wattana , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2025

ABSTRACT

This research presents the application of the Hippopotamus Optimization (HO) algorithm to adjust the parameters of the PID controller for frequency control of a hybrid power generation system consisting of a solar PV and reheat thermal power system, which is a 2-area system with complex dynamic behavior. The results are compared with standard algorithms, namely PSO, WCA, and GWO, to cover the comprehensive evaluation. This research uses 4 objective functions, namely IAE, ITAE, ISE, and ITSE, to measure the efficiency of the control system and simulate the system in 2 cases: load change in area 2 and simultaneous load change in areas 1 and 2.

The experimental results show that HO tends to yield stable and consistent results. Although it cannot determine the lowest target value in all cases, the results from box plots and comparisons of various dynamic values indicate that HO is suitable for use in systems that require stable control results and stable parameter values.

Keyword : Hippopotamus Algorithm, Hybrid PV-Reheat Thermal System, Load Frequency Control, PID

กิตติกรรมประกาศ

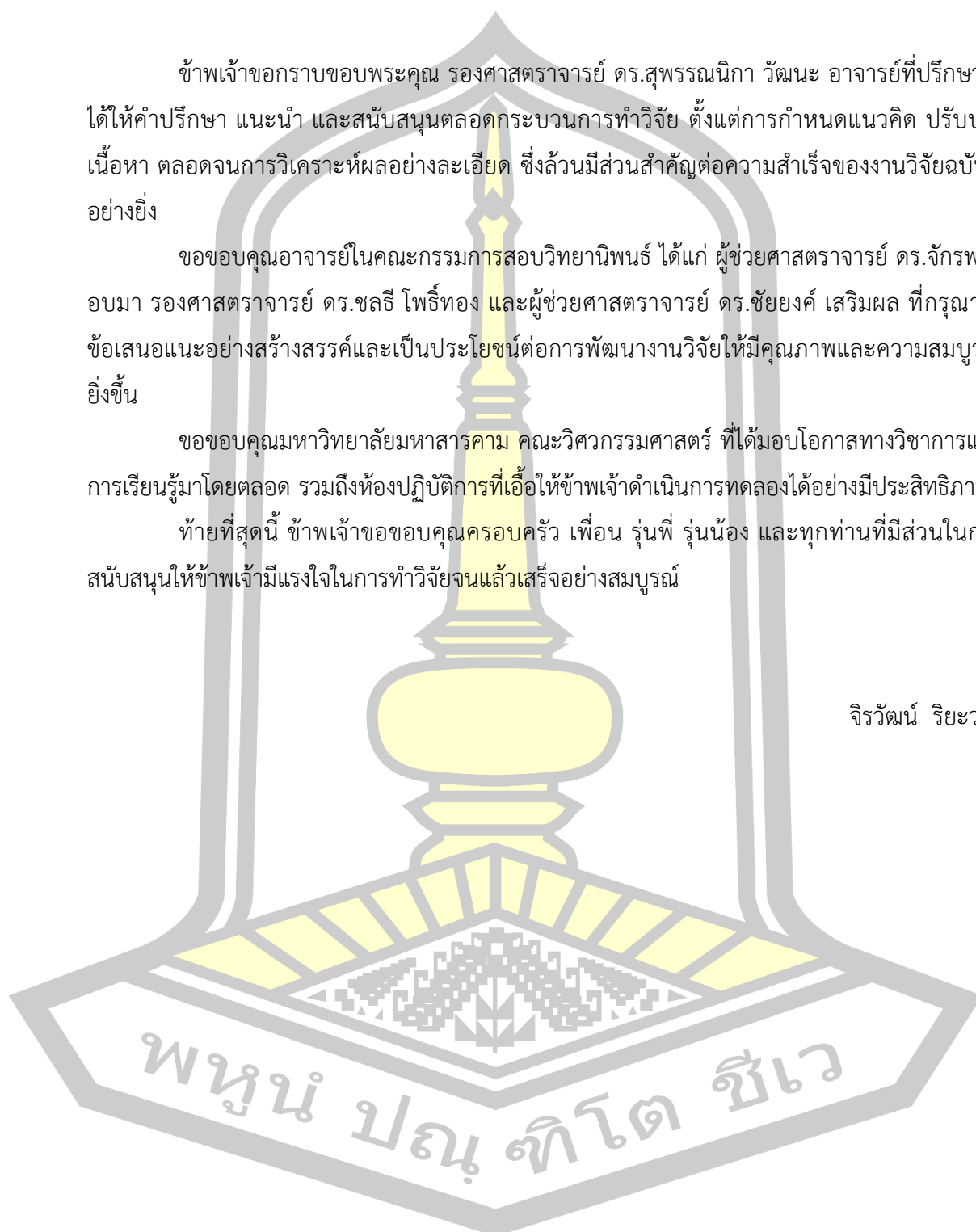
ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุพรรณนิภา วัฒนะ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำ และสนับสนุนตลอดกระบวนการทำวิจัย ตั้งแต่การกำหนดแนวคิด ปรับปรุงเนื้อหา ตลอดจนการวิเคราะห์ผลอย่างละเอียด ซึ่งล้วนมีส่วนสำคัญต่อความสำเร็จของงานวิจัยฉบับนี้อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณอาจารย์ในคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพนธ์ ออบมา รองศาสตราจารย์ ดร.ชลธิ์ โพธิ์ทอง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยยงค์ เสริมผล ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะอย่างสร้างสรรค์และเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัยให้มีคุณภาพและความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยมหาสารคาม คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้มอบโอกาสทางวิชาการและการเรียนรู้มาโดยตลอด รวมถึงห้องปฏิบัติการที่เอื้อให้ข้าพเจ้าดำเนินการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณครอบครัว เพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้อง และทุกท่านที่มีส่วนในการสนับสนุนให้ข้าพเจ้ามีแรงใจในการทำวิจัยจนแล้วเสร็จอย่างสมบูรณ์

จิรวัฒน์ รียะวงษ์



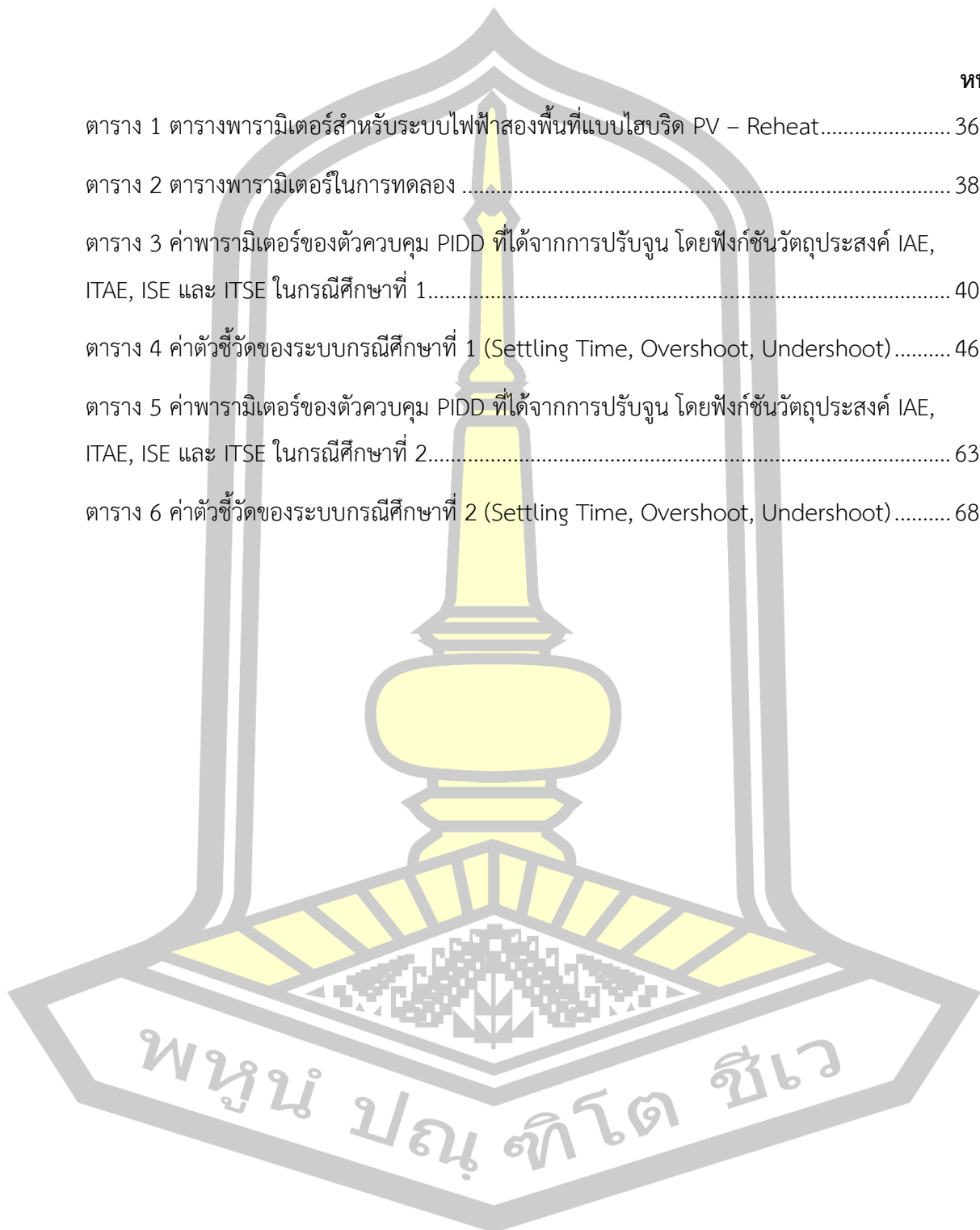
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2	3
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การผลิตไฟฟ้า.....	3
2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าหลายพื้นที่.....	5
2.3 การผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control).....	6
2.4 การควบคุมความถี่ (Load Frequency Control).....	7
2.5 ระบบควบคุม (Control System).....	9
2.6 การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization).....	11
2.7 อัลกอริทึมการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization Algorithm).....	12

2.8 อัลกอริทึมวัฏจักรของน้ำ (Water Cycle Algorithm)	15
2.9 อัลกอริทึมของหมาป่าสีเทา (Grey Wolf Optimizer Algorithm)	19
2.10 อัลกอริทึมของฮิปโปโปเตมัส (Hippopotamus Optimization Algorithm – HO)	23
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3	33
วิธีการดำเนินงานวิจัย	33
3.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าแบบไฮบริด PV-Reheat Thermal Power System	33
3.2 การออกแบบตัวควบคุม PID	36
3.3 กรณีศึกษา	38
3.4 ประเมินผลการทดลองโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	39
บทที่ 4	40
ผลการดำเนินงานวิจัย	40
4.1 กรณีศึกษาที่ 1 การเปลี่ยนโหลดในพื้นที่ที่ 2	40
4.2 กรณีศึกษาที่ 2 การเปลี่ยนโหลดพร้อมกันทั้งพื้นที่ที่ 1 และ 2	63
บทที่ 5	85
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	85
5.1 สรุปผลการทดลอง	85
5.2 อภิปรายผลการทดลอง	86
5.3 ข้อเสนอแนะ	86
บรรณานุกรม	88
ประวัติผู้เขียน	92

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ตารางพารามิเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้าสองพื้นที่แบบไฮบริด PV – Reheat.....	36
ตาราง 2 ตารางพารามิเตอร์ในการทดลอง	38
ตาราง 3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ได้จากการปรับจูน โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE, ITAE, ISE และ ITSE ในกรณีศึกษาที่ 1.....	40
ตาราง 4 ค่าตัวชี้วัดของระบบกรณีศึกษาที่ 1 (Settling Time, Overshoot, Undershoot)	46
ตาราง 5 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ได้จากการปรับจูน โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE, ITAE, ISE และ ITSE ในกรณีศึกษาที่ 2.....	63
ตาราง 6 ค่าตัวชี้วัดของระบบกรณีศึกษาที่ 2 (Settling Time, Overshoot, Undershoot)	68



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ระบบควบคุมการผลิตและความถี่แบบหลายพื้นที่ [6]	6
ภาพประกอบ 2 การควบคุมแบบวงเปิด (Open-Loop Control System) [12]	9
ภาพประกอบ 3 การควบคุมแบบวงปิด (Closed-Loop Control System) [12]	9
ภาพประกอบ 4 ฝั่งงานของอัลกอริทึมการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค [17]	14
ภาพประกอบ 5 ฝั่งงานของอัลกอริทึมวิวัฒนาการน้ำ [18]	18
ภาพประกอบ 6 ฝั่งงานของอัลกอริทึมหมาป่าสีเทา [19]	22
ภาพประกอบ 7 ฝั่งงานของอัลกอริทึมฮิปโปโปเตมัส [20]	29
ภาพประกอบ 8 วงจรของเซลล์แสงอาทิตย์	34
ภาพประกอบ 9 แบบจำลองระบบไฟฟ้าสองพื้นที่แบบไฮบริด PV – Reheat	36
ภาพประกอบ 10 โครงสร้างของตัวควบคุม PID [22]	37
ภาพประกอบ 11 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2 ...	42
ภาพประกอบ 12 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2 ...	42
ภาพประกอบ 13 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2 .	42
ภาพประกอบ 14 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2 .	43
ภาพประกอบ 15 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2 .	43
ภาพประกอบ 16 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-243	
ภาพประกอบ 17 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2 ...	44
ภาพประกอบ 18 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2 ...	44
ภาพประกอบ 19 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2..	44
ภาพประกอบ 20 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2 .	45
ภาพประกอบ 21 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2 .	45

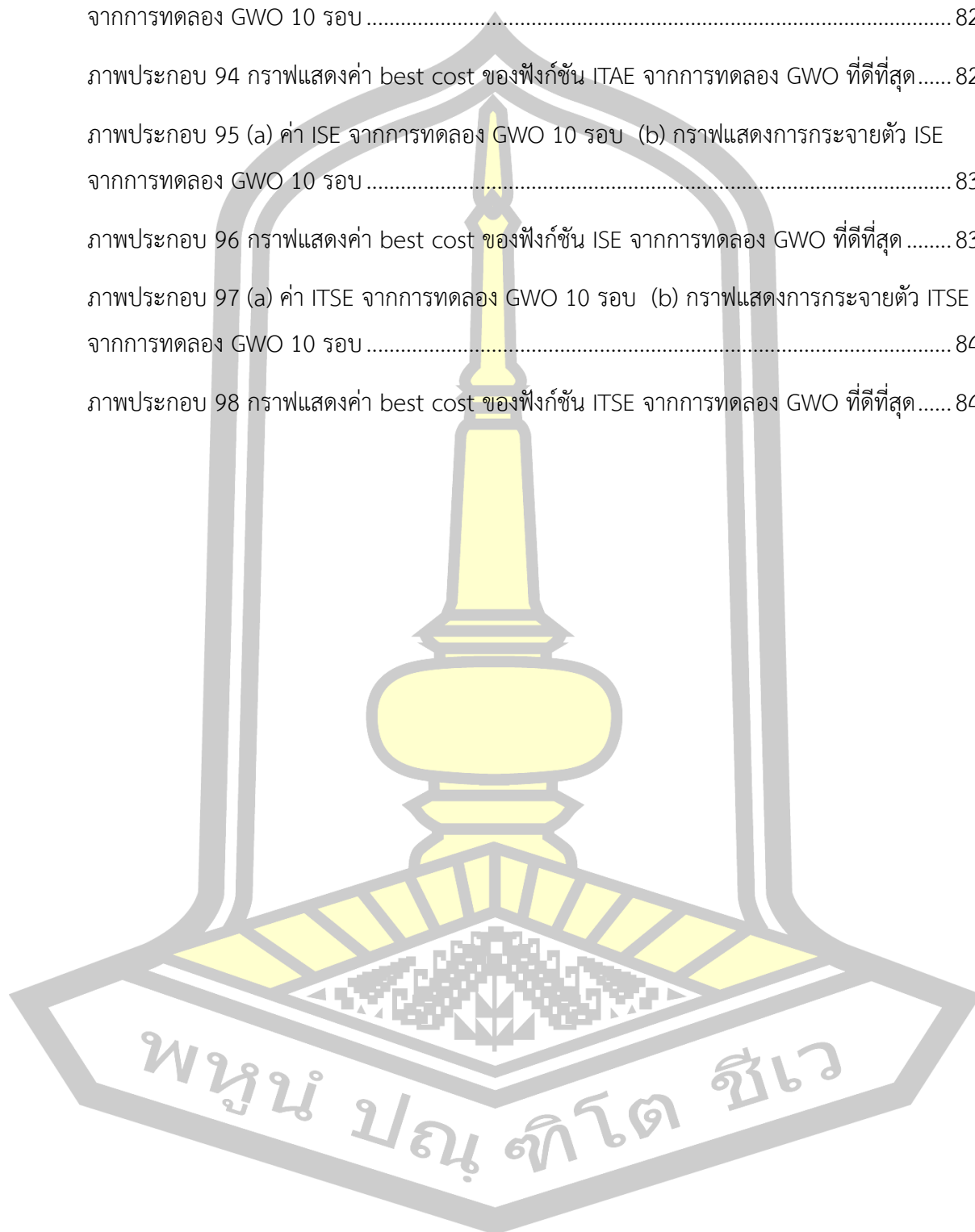
ภาพประกอบ 22 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-245	
ภาพประกอบ 23 (a) ค่า IAE จากการทดลอง HO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง HO 10 รอบ	47
ภาพประกอบ 24 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด	47
ภาพประกอบ 25 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง HO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง HO 10 รอบ.....	48
ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด	48
ภาพประกอบ 27 (a) ค่า ISE จากการทดลอง HO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง HO 10 รอบ	49
ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด.....	49
ภาพประกอบ 29 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง HO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง HO 10 รอบ.....	50
ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด	50
ภาพประกอบ 31 (a) ค่า IAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ	51
ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด.....	51
ภาพประกอบ 33 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ	52
ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด.....	52
ภาพประกอบ 35 (a) ค่า ISE จากการทดลอง PSO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง PSO 10 รอบ	53
ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด.....	53
ภาพประกอบ 37 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง PSO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง PSO 10 รอบ	54
ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด.....	54

ภาพประกอบ 39 (a) ค่า IAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ.....	55
ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด.....	55
ภาพประกอบ 41 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ.....	56
ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด	56
ภาพประกอบ 43 (a) ค่า ISE จากการทดลอง WCA 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง WCA 10 รอบ.....	57
ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด.....	57
ภาพประกอบ 45 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง WCA 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง WCA 10 รอบ.....	58
ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด.....	58
ภาพประกอบ 47 (a) ค่า IAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ	59
ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด.....	59
ภาพประกอบ 49 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ	60
ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด.....	60
ภาพประกอบ 51 (a) ค่า ISE จากการทดลอง GWO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง GWO 10 รอบ	61
ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด	61
ภาพประกอบ 53 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง GWO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง GWO 10 รอบ	62
ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด.....	62
ภาพประกอบ 55 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่..	64
ภาพประกอบ 56 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่..	64

ภาพประกอบ 57 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่ 65	
ภาพประกอบ 58 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่ 65	
ภาพประกอบ 59 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่ 65	
ภาพประกอบ 60 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่	66
ภาพประกอบ 61 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่..	66
ภาพประกอบ 62 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่..	66
ภาพประกอบ 63 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่	67
ภาพประกอบ 64 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่	67
ภาพประกอบ 65 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่	67
ภาพประกอบ 66 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่	68
ภาพประกอบ 67 (a) ค่า IAE จากการทดลอง HO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง HO 10 รอบ	69
ภาพประกอบ 68 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด	69
ภาพประกอบ 69 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง HO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง HO 10 รอบ.....	70
ภาพประกอบ 70 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด	70
ภาพประกอบ 71 (a) ค่า ISE จากการทดลอง HO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง HO 10 รอบ	71
ภาพประกอบ 72 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด.....	71
ภาพประกอบ 73 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง HO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง HO 10 รอบ.....	72
ภาพประกอบ 74 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด	72
ภาพประกอบ 75 (a) ค่า IAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ	73

ภาพประกอบ 76 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด.....	73
ภาพประกอบ 77 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ	74
ภาพประกอบ 78 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด.....	74
ภาพประกอบ 79 (a) ค่า ISE จากการทดลอง PSO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จาก การทดลอง PSO 10 รอบ	75
ภาพประกอบ 80 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด.....	75
ภาพประกอบ 81 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง PSO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง PSO 10 รอบ	76
ภาพประกอบ 82 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด.....	76
ภาพประกอบ 83 (a) ค่า IAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ.....	77
ภาพประกอบ 84 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด.....	77
ภาพประกอบ 85 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ.....	78
ภาพประกอบ 86 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด	78
ภาพประกอบ 87 (a) ค่า ISE จากการทดลอง WCA 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง WCA 10 รอบ.....	79
ภาพประกอบ 88 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด.....	79
ภาพประกอบ 89 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง WCA 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง WCA 10 รอบ.....	80
ภาพประกอบ 90 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด.....	80
ภาพประกอบ 91 (a) ค่า IAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ	81
ภาพประกอบ 92 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด.....	81

ภาพประกอบ 93 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ	82
ภาพประกอบ 94 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด	82
ภาพประกอบ 95 (a) ค่า ISE จากการทดลอง GWO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง GWO 10 รอบ	83
ภาพประกอบ 96 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด	83
ภาพประกอบ 97 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง GWO 10 รอบ (b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง GWO 10 รอบ	84
ภาพประกอบ 98 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด	84



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบไฟฟ้าเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่มีความซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบหลากหลาย แต่แต่ละส่วนมีขีดความสามารถในการรองรับโหลดแตกต่างกัน ในยุคที่การจ่ายพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ความมั่นคงและความเพียงพอของการจัดหาพลังงานไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง ความต้องการดังกล่าวเกิดจากธรรมชาติของระบบไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยความผันผวนของการผลิตไฟฟ้าเมื่อเทียบกับความต้องการโหลดอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความถี่ในระบบ หากไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสม ความเปลี่ยนแปลงเหล่านี้อาจนำไปสู่ปัญหาที่ร้ายแรง เช่น ความล้มเหลวของระบบไฟฟ้า [1]

เพื่อแก้ไขปัญหา ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control) หรือ AGC ได้พัฒนาขึ้นเพื่อช่วยจัดการ และประสานการทำงานของระบบไฟฟ้า หน้าที่หลักของระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ คือการควบคุมความผันผวนของระบบไฟฟ้าบนสายส่ง และรักษาความถี่ของระบบให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ ระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติจึงมีบทบาทสำคัญในการรักษาเสถียรภาพ และความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า และป้องกันปัญหาที่อาจเกิดจากความไม่เสถียรของความถี่ในระบบไฟฟ้า [2]

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) [3] เป็นวิธีการสำคัญที่ถูกนำมาใช้ในการวางแผน และบริหารจัดการระบบพลังงานไฟฟ้าเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดต้นทุน และรักษาความมั่นคงของระบบไฟฟ้า โดยการปรับปรุงประสิทธิภาพในงานวิจัยลักษณะนี้อาจครอบคลุมประเด็นต่างๆ เช่น การวางแผนการผลิต การจัดการโหลดไฟฟ้า และการกำหนดเส้นทางพลังงานไฟฟ้า

การปรับค่าพารามิเตอร์ KP KI และ KD ในตัวควบคุม PID [4] เป็นกระบวนการที่สำคัญของระบบควบคุม แต่กระบวนการมีความซับซ้อน และใช้เวลานาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบที่มีความซับซ้อนสูงหรือมีความผันผวนสูง วิธีการปรับจูนแบบเดิม เช่น Ziegler-Nichols อาจไม่สามารถตอบสนองความต้องการในระบบที่มีความหลากหลายและความซับซ้อนได้ การใช้อัลกอริทึมหรือขั้นตอนวิธี เช่น Genetic Algorithm (GA) Particle Swarm Optimization (PSO) หรือแม้กระทั่ง Hippopotamus Algorithm ก็สามารถช่วยแก้ปัญหานี้ได้ โดยการสุ่มค่าเริ่มต้นและค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบอัตโนมัติ ผ่านกระบวนการทดสอบและปรับปรุงค่าในแต่ละรอบ อัลกอริทึมเหล่านี้

สามารถหลีกเลี่ยงจุด Local Optimum และช่วยค้นหาค่าที่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ แม้ในระบบที่มีข้อจำกัดและมีความซับซ้อน การใช้อัลกอริทึมจึงไม่เพียงช่วยลดเวลาในการปรับจูน แต่ยังเพิ่มโอกาสในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งยากต่อการค้นหาหากใช้วิธีการหาค่าแบบทั่วไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาและออกแบบตัวควบคุมฟuzzyเพิ่มส่วนอนุพันธ์อันดับสอง (PIDD)

1.2.2 ศึกษาและประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกในการหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบตัวควบคุม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ระบบไฟฟ้าสองพื้นที่แบบไฮบริดที่ประกอบไปด้วย PV และ Reheat Thermal Power System

1.3.2 นำอัลกอริทึมฮิวริสติกในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

1.3.3 เปรียบเทียบอัลกอริทึมฮิวริสติกกับอัลกอริทึมอื่น (PSO,WCA,GWO)

1.3.4 ใช้โปรแกรม MATLAB® / SIMULINK ในการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถออกแบบตัวควบคุมฟuzzyเพิ่มส่วนอนุพันธ์อันดับสอง (PIDD)

1.4.2 ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมฮิวริสติกในการออกแบบของตัวควบคุมฟuzzyเพิ่มส่วนอนุพันธ์อันดับสอง (PIDD)

พนุ ปรณ จิต ชีเว

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมแนวคิดทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้องจากแหล่งข้อมูลที่น่าเชื่อถือ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย เพื่อพัฒนาและออกแบบตัวควบคุมแบบ PID (Proportional Integral with Double Derivative) ผู้วิจัยจึงได้เสนออัลกอริทึมฮิปโปโปแตมัส (Hippopotamus Algorithm) ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของตัวควบคุม

2.1 การผลิตไฟฟ้า

การผลิตไฟฟ้า [5] เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวัน และการพัฒนาสังคม โดยเป็นแหล่งพลังงานหลักที่ขับเคลื่อนอุตสาหกรรม การคมนาคม และเทคโนโลยีต่างๆ ไฟฟ้าผลิตจากแหล่งพลังงานหลายประเภท เช่น พลังงานความร้อน พลังงานน้ำ พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ หลักการทำงานเริ่มจากการเปลี่ยนรูปพลังงาน เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เพื่อผลิตไอน้ำเพื่อขับเคลื่อนกังหันในโรงไฟฟ้าความร้อน หรือการใช้แรงดันน้ำหมุนกังหันในโรงไฟฟ้าพลังน้ำ กระแสไฟฟ้าที่ได้จะถูกส่งผ่านระบบสายส่งไปยังผู้ใช้ปลายทาง ประเภทของโรงไฟฟ้าแบ่งได้หลายประเภท ตามลักษณะและวิธีการผลิต ได้แก่

2.1.1 โรงไฟฟ้าพลังน้ำ (Hydroelectric Power Plants)

โรงไฟฟ้าพลังน้ำจะได้อิทธิพลจากเขื่อน ซึ่งเขื่อนมีจุดประสงค์เพื่อกักเก็บน้ำไว้ใช้ในการอุปโภคบริโภคเพื่อการเกษตร และเพื่อใช้ในการผลิตไฟฟ้า น้ำในเขื่อนจะไหลผ่านช่องทางที่กำหนดไว้ไปขับเคลื่อนกังหัน (Turbine) เมื่อกังหันหมุน เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่ต่ออยู่กับกังหันก็จะหมุนไปด้วย ซึ่งจะผลิตไฟฟ้ากระแสสลับออกมา

2.1.2 โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ (Steam Turbine Power Plants)

โรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ มีหลักการทำงานโดยการเปลี่ยนพลังงานเคมี จากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ให้เป็นพลังงานความร้อน ซึ่งจะทำให้ไอน้ำในหม้อน้ำเปลี่ยนสถานะเป็นไอ ไอน้ำนี้จะไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำ โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีเพลาคู่กับกังหันไอน้ำอยู่ และไอน้ำที่ผ่านกังหันออกมามจะเข้าเครื่องควบแน่น ให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นน้ำเข้าสู่หม้อน้ำต่อไป โดยแหล่งพลังงานของโรงไฟฟ้าประเภทนี้ ส่วนใหญ่จะเป็นพลังงานฟอสซิล (Fossil Energy) เช่น ถ่านหิน (Coal) น้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum) และก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)

2.1.3 โรงไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล (Diesel Engine Power Plants)

โรงไฟฟ้าเครื่องยนต์ดีเซล มีหลักการทำงาน โดยการเปลี่ยนพลังงานจากการเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล เป็นพลังงานกลเพื่อไปขับโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ที่มีเพลาคู่กับเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ระบบนี้เหมาะสำหรับการผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ที่มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าไม่สูงมาก หรือในพื้นที่ที่ไฟฟ้าจากระบบสายส่งยังเข้าไม่ถึง โรงไฟฟ้าประเภทนี้มีข้อดีคือการเริ่มต้นและหยุดการทำงานได้รวดเร็ว ใช้พื้นที่ติดตั้งน้อย และสามารถใช้เป็นระบบสำรองไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.4 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม (Combined-Cycle Power Plants)

โรงไฟฟ้าความร้อนร่วม คือ การรวมกันระหว่างเครื่องกังหันก๊าซ และกังหันไอน้ำเข้าเป็นระบบเดียวกัน โดยนำเอาความร้อนที่ออกจากเครื่องกังหันก๊าซป้อนเข้าสู่เตาของหม้อน้ำ เพื่อต้มน้ำให้เกิดไอน้ำ แล้วนำเอาไอน้ำไปขับเครื่องกังหันไอน้ำ สำหรับเครื่องกังหันก๊าซ สามารถเดินเครื่องได้อย่างอิสระ โดยไม่จำเป็นต้องเดินเครื่องพร้อมกับเครื่องกังหันไอน้ำ

2.1.5 โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ (Gas Turbine Power Plants)

การทำงานของโรงไฟฟ้าเครื่องกังหันก๊าซ คล้ายกับเครื่องกังหันไอน้ำ โดยกังหันไอน้ำจะใช้พลังงานจากไอน้ำเป็นตัวขับเคลื่อน แล้วเปลี่ยนพลังงานกลขณะไอน้ำวิ่งผ่านใบพัด ส่วนกังหันก๊าซนั้นตัวขับเคลื่อนจะเป็นก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง แล้วส่งเข้าตัวกังหัน การทำงานของเครื่องกังหันก๊าซ โดยมีเครื่องอัดอากาศ (Compressor) ต่อยู่บนเพลาคู่กับชุดกังหัน และต่อตรงไปยังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อเริ่มเดินเครื่อง อากาศจะถูกดูดจากภายนอกเข้าหาเครื่องอัดอากาศทางด้านล่าง ถูกอัดจนมีความดันและอุณหภูมิสูงขึ้น แล้วถูกส่งไปยังห้องเผาไหม้ ซึ่งใช้เชื้อเพลิงเป็นก๊าซธรรมชาติหรือน้ำมัน จะถูกเผาไหม้และให้ความร้อนแก่อากาศ ก๊าซร้อนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปยังตัวกังหัน ทำให้กังหันหมุนและขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย

2.1.6 โรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Power Plants)

พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานธรรมชาติที่มีปริมาณมาก และเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่นำมาใช้เพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งทำมาจากสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน เจอร์เมเนียมและสารอื่นๆ เมื่อเซลล์ได้รับแสง จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะต้องถูกส่งผ่านเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ

2.1.7 โรงไฟฟ้าพลังงานลม (Wind Power Plants)

พลังงานลมเป็นพลังงานสะอาด และไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โรงไฟฟ้าพลังงานลมจะติดตั้งไว้ในสถานที่ที่ลมพัดแรงตลอดเวลาจึงจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อกังหันลมหมุน แกนของกังหันลมที่ต่อมายังเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ก็จะผลิตไฟฟ้ากระแสตรง หรืออัลเทอร์เน

เตอร์เพื่อผลิตไฟฟ้ากระแสสลับ ถ้าเป็นกระแสตรงจะผ่านเข้าเครื่องแปลงกระแสให้เป็นกระแสสลับก่อนใช้งาน

2.1.8 โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal Power Plants)

โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพได้มาจากแหล่งน้ำพุร้อนที่มีอุณหภูมิสูง จนสามารถนำมาทำการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพจะมีการเจาะหลุมที่มีน้ำร้อน เพื่อปั๊มดูดเข้าถึงต้มไอน้ำแล้วส่งเข้าไปดันเครื่องกังหันไอน้ำ โดยที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่ออยู่กับเครื่องกังหันไอน้ำ ซึ่งจะผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมา

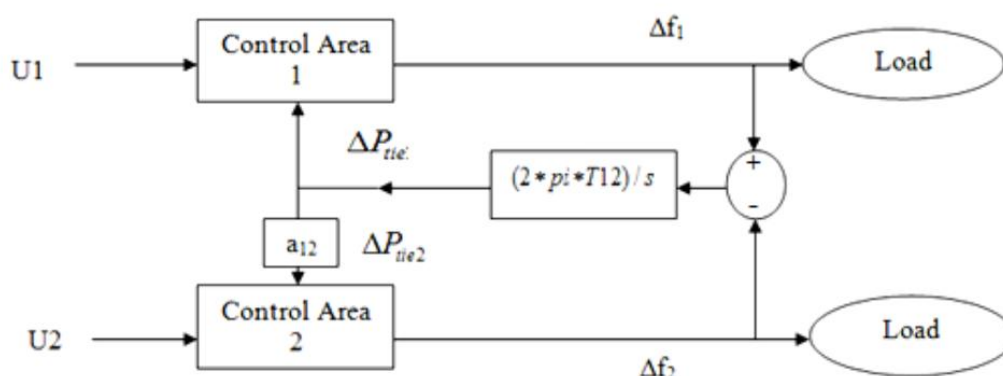
2.1.9 โรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ (Biogas Power Plants)

ก๊าซชีวภาพได้จากของเสียที่เกิดจากฟาร์มสัตว์ เช่น ฟาร์มสุกร ฟาร์มวัว ฟาร์มควาย มาผ่านการหมักตามธรรมชาติ ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพขึ้น ซึ่งได้แก่อากาศมีเทน แล้วนำก๊าซที่ได้มาเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนในการต้มน้ำ ให้เกิดเป็นไอน้ำ ซึ่งกระบวนการจะคล้ายกับโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำ แต่เปลี่ยนแหล่งเชื้อเพลิงจากเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นเชื้อเพลิงจากก๊าซชีวภาพ

2.2 ระบบผลิตไฟฟ้าหลายพื้นที่

ระบบไฟฟ้าหลายพื้นที่ (Multi-Area Power System) [5] เป็นการบริหารจัดการโครงข่ายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกันระหว่างหลายส่วนผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิต และการใช้พลังงานไฟฟ้าให้สมดุลในทุกพื้นที่ ระบบนี้ช่วยให้สามารถแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดต้นทุนการผลิตไฟฟ้า และเสริมสร้างความมั่นคงของระบบ

บทบาทสำคัญของระบบไฟฟ้าหลายพื้นที่ รวมถึงการรองรับพลังงานหมุนเวียนที่มีความผันผวนสูง เช่น พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ โดยระบบช่วยสร้างสมดุลระหว่างการผลิตและความต้องการไฟฟ้าในโครงข่าย ทำให้การใช้พลังงานสะอาดเป็นไปอย่างยั่งยืน อย่างไรก็ตาม ความท้าทายสำคัญคือ ความซับซ้อนในการประสานงานระหว่างพื้นที่ที่อาจมีข้อกำหนดการดำเนินงานแตกต่างกัน ดังภาพประกอบที่ 1 รวมถึงปัญหาเสถียรภาพ เช่น การเกิดการสั่นไหวระหว่างพื้นที่ (Inter-Area Oscillations) ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการจัดการอย่างรอบคอบด้วยเทคโนโลยีที่ทันสมัย ระบบไฟฟ้าหลายพื้นที่จึงถือเป็นโครงสร้างพื้นฐานสำคัญที่ช่วยผลักดันความมั่นคงและความยั่งยืนของพลังงานในอนาคต



ภาพประกอบ 1 ระบบควบคุมการผลิตและความถี่แบบหลายพื้นที่ [6]

2.3 การผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control)

การผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ (AGC) เป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญของระบบควบคุมพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการบริหารจัดการการผลิตไฟฟ้าในระบบโครงข่ายขนาดใหญ่ แนวคิดหลักของ AGC คือ การรักษาสมดุลระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้และพลังงานไฟฟ้าที่ใช้งานจริงในโครงข่าย การทำงานของ AGC อาศัยการตรวจวัดค่าความถี่ของระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้สถานะของสมดุลพลังงาน หากพลังงานที่ผลิตเกินหรือขาดเมื่อเทียบกับความต้องการใช้ จะส่งผลให้ค่าความถี่ของระบบเบี่ยงเบนไปจากค่ามาตรฐาน เช่น 50 Hz หรือ 60 Hz ขึ้นอยู่กับภูมิภาค [2]

นอกจากนี้ AGC ยังใช้การวัดการไหลของกำลังไฟฟ้าในสายส่งที่เชื่อมต่อระหว่างพื้นที่หรือโซนต่าง ๆ (Tie-Line Power Flow) เพื่อประเมินการไหลของพลังงานในระบบ ตัวควบคุม AGC จะวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากค่าความถี่และ Tie-Line Power Flow เพื่อส่งสัญญาณไปยังหน่วยผลิตไฟฟ้า เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือโรงไฟฟ้าต่าง ๆ ให้ปรับกำลังผลิตให้เหมาะสม ระบบนี้ช่วยให้การผลิตไฟฟ้าสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพ ทั้งยังช่วยลดความเสี่ยงที่ระบบจะล้มเหลวจากการขาดสมดุลพลังงาน [5]

2.3.1 บทบาทของ AGC ในการควบคุมกำลังการผลิตไฟฟ้า

AGC มีบทบาทสำคัญในหลายด้านของการจัดการระบบไฟฟ้า โดยเฉพาะในแง่ของการควบคุมค่าความถี่และการรักษาสมดุลพลังงานในระบบ บทบาทแรกที่สำคัญที่สุดคือการปรับกำลังผลิตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้รองรับการเปลี่ยนแปลงของโหลดในทันที ระบบนี้สามารถตรวจจับการ

เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระดับมิลลิวินาที และตอบสนองด้วยการปรับกำลังผลิตอย่างรวดเร็วผ่านระบบควบคุมย้อนกลับ (Feedback Control System)

นอกจากการควบคุมค่าความถี่แล้ว AGC ยังมีหน้าที่ในการจัดการพลังงานสำรอง (Spinning Reserve) ซึ่งเป็นพลังงานที่ถูกสำรองไว้เพื่อรองรับสถานการณ์ฉุกเฉิน เช่น การเพิ่มของโหลดที่ไม่คาดคิดหรือการขัดข้องของหน่วยผลิตไฟฟ้า ระบบ AGC จะสั่งการให้พลังงานสำรองถูกใช้งานในทันทีเมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว เพื่อป้องกันการล่มของระบบไฟฟ้า บทบาทอีกด้านหนึ่งของ AGC คือการเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน โดยระบบจะจัดลำดับการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีต้นทุนต่ำที่สุดก่อน ซึ่งช่วยลดต้นทุนการผลิตในระยะยาว [7]

2.3.2 การทำงานของ AGC ในระบบพลังงานไฟฟ้าหลายโซน

ในระบบพลังงานไฟฟ้าหลายโซน (Multi-Area Power System) การทำงานของ AGC มีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากระบบต้องควบคุมการผลิตไฟฟ้าในแต่ละโซนให้สอดคล้องกัน ในขณะเดียวกันยังต้องคำนึงถึงการเชื่อมต่อระหว่างโซนผ่านสายส่งไฟฟ้า การทำงานของ AGC ในระบบนี้แบ่งออกเป็นสองระดับหลัก คือ การควบคุมในแต่ละโซน (Local Control) และ การประสานงานระหว่างโซน (Inter-Area Coordination)

ในระดับโซน ระบบ AGC จะทำหน้าที่ปรับการผลิตไฟฟ้าในหน่วยผลิตที่อยู่ภายในโซนให้ตรงกับความต้องการโหลดในโซนนั้น ๆ การทำงานนี้ช่วยลดปัญหาความผันผวนของโหลดที่เกิดขึ้นในโซนอย่างรวดเร็ว ขณะที่ในระดับการประสานงานระหว่างโซน AGC จะคำนึงถึงการไหลของพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งระหว่างโซน (Tie-Line Power Flow) เพื่อรักษาความสมดุลในภาพรวมของระบบ ตัวอย่างเช่น หากโซนหนึ่งมีการผลิตไฟฟ้าเกินความต้องการ พลังงานส่วนเกินจะถูกส่งไปยังโซนที่ขาดแคลน การประสานงานในลักษณะนี้ช่วยลดปัญหาการล้มเหลวของระบบในวงกว้าง

นอกจากนี้ AGC ยังมีบทบาทสำคัญในการลดปัญหาเสถียรภาพที่อาจเกิดขึ้นจากการสั่นไหวระหว่างโซน (Inter-Area Oscillations) ซึ่งมักเกิดจากการที่โหลดหรือกำลังผลิตในพื้นที่หนึ่งเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและส่งผลกระทบต่อพื้นที่อื่น ระบบ AGC จะใช้สัญญาณควบคุมเพื่อปรับกำลังการผลิตในแต่ละโซนให้เหมาะสม ลดการเกิดการสั่นไหวและเสริมสร้างเสถียรภาพในระบบโดยรวม [5]

2.4 การควบคุมความถี่ (Load Frequency Control)

การควบคุมความถี่ (LFC) ถือเป็นกลไกสำคัญในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีบทบาทในการรักษาความเสถียรของระบบไฟฟ้าและความสมดุลระหว่างการผลิตพลังงานไฟฟ้ากับความต้องการใช้งานในโครงข่ายไฟฟ้า [8] ค่าความถี่ที่ใช้งานในระบบไฟฟ้า เช่น 50 Hz หรือ 60 Hz เป็นค่ามาตรฐานที่

กำหนดขึ้นเพื่อรองรับความสามารถของอุปกรณ์ไฟฟ้าให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าความถี่ที่เบี่ยงเบนจากค่ามาตรฐานนั้นอาจสะท้อนถึงการเสียดุลของพลังงานในระบบ ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดหรือข้อจำกัดของแหล่งผลิตพลังงานไฟฟ้า [9]

หน้าที่หลักของ LFC คือการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างรวดเร็วเพื่อรักษาความถี่ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมและเสถียร นอกจากนี้ LFC ยังช่วยให้ระบบสามารถปรับตัวต่อสถานการณ์ต่าง ๆ เช่น การเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายไฟฟ้าหลายโซน หรือกรณีที่เกิดเหตุขัดข้องในระบบ ทั้งนี้ การออกแบบและพัฒนา LFC ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนสูงในปัจจุบัน [8]

2.4.1 ผลกระทบของการเบี่ยงเบนความถี่ต่อระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้า

ค่าความถี่ที่เบี่ยงเบนจากค่ามาตรฐานส่งผลกระทบอย่างชัดเจนต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและความน่าเชื่อถือของการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในโครงข่าย ค่าความถี่ที่ลดต่ำกว่ามาตรฐานอาจทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำงานหนักขึ้น ส่งผลให้เกิดความร้อนสะสมในอุปกรณ์ และอาจทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ลดลง ในทางกลับกัน ค่าความถี่ที่สูงเกินมาตรฐานอาจทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าและมอเตอร์ทำงานเกินพิกัด ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์อย่างถาวร [10]

การเบี่ยงเบนของค่าความถี่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ที่มีความไวต่อค่าความถี่ เช่น ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในโรงงานอุตสาหกรรม หรืออุปกรณ์ที่ใช้ไมโครโพรเซสเซอร์ในภาคครัวเรือน อุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยค่าความถี่ที่เสถียรและคงที่ หากเกิดการเบี่ยงเบนในค่าความถี่ อาจทำให้ระบบขัดข้องหรือเกิดความเสียหาย ซึ่งนำไปสู่ต้นทุนในการซ่อมแซมและการสูญเสียประสิทธิภาพในการดำเนินงานของระบบโดยรวม [11]

2.4.2 แนวทางและเทคนิคในการควบคุมความถี่

การควบคุมค่าความถี่ในระบบไฟฟ้าถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความท้าทายที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความซับซ้อนของระบบไฟฟ้าสมัยใหม่ [10] เทคนิคที่ใช้ในการควบคุมความถี่ครอบคลุมตั้งแต่ระบบควบคุมพื้นฐาน เช่น Proportional-Integral-Derivative (PID) Control ซึ่งเป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดในระบบผ่านกลไกที่ปรับค่ากำลังการผลิตไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความต้องการอย่างเหมาะสม ไปจนถึงเทคนิคที่ซับซ้อนขึ้น เช่น Fuzzy Logic Control ซึ่งใช้แนวคิดของตรรกศาสตร์เชิงคลุมเครือ และ Model Predictive Control (MPC) ที่สามารถวิเคราะห์และคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ [9]

ในปัจจุบัน ระบบ LFC ได้รับการปรับปรุงด้วยเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) และ Machine Learning เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์และการตัดสินใจในสถานการณ์ที่ซับซ้อน การนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ช่วยให้ระบบสามารถตอบสนองได้รวดเร็วขึ้น ลดความเสี่ยงจากการล่มของโครงข่ายไฟฟ้า และเพิ่มความยืดหยุ่นของระบบในการจัดการกับโหลดที่เปลี่ยนแปลง

อย่างต่อเนื่อง การควบคุมความถี่ในระบบไฟฟ้าจึงเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยเพิ่มความเสถียรและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าในระยะยาว [8]

2.5 ระบบควบคุม (Control System)

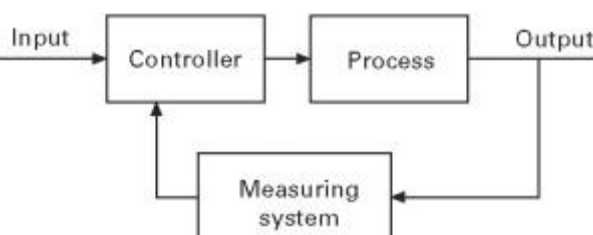
ระบบควบคุม (Control System) [12] มีบทบาทสำคัญในการจัดการพฤติกรรมของระบบพลวัต (Dynamic System) โดยมีเป้าหมายหลักเพื่อให้ผลลัพธ์ของระบบเป็นไปตามค่าที่ต้องการหรือสอดคล้องกับข้อกำหนดที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักได้แก่ ระบบควบคุมวงเปิด (Open-Loop Control System) และระบบควบคุมวงปิด (Closed-Loop Control System) ระบบวงเปิดเป็นการควบคุมที่ไม่พึ่งพาการป้อนกลับข้อมูล ซึ่งมีข้อดีในด้านความง่ายและต้นทุนต่ำ แต่ขาดความแม่นยำในการปรับตัวตามสภาวะที่เปลี่ยนแปลง



ภาพประกอบ 2 การควบคุมแบบวงเปิด (Open-Loop Control System) [12]

ในขณะที่ระบบวงปิดอาศัยการป้อนกลับข้อมูลจากผลลัพธ์ เพื่อนำไปปรับปรุงพฤติกรรมของระบบอย่างต่อเนื่อง ทำให้ระบบมีความสามารถในการตอบสนองต่อความไม่แน่นอนและการรบกวนที่อาจเกิดขึ้น

ระบบควบคุมวงปิดประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ ตัวควบคุม (Controller) ซึ่งมีหน้าที่กำหนดการทำงานของระบบให้เป็นไปตามค่าที่ตั้งไว้ เช่น เซนเซอร์ (Sensor) ที่ใช้วัดค่าตัวแปรต่างๆ ในระบบ และตัวกระทำ (Actuator) ที่รับคำสั่งจากตัวควบคุมเพื่อนำไปปฏิบัติการจริง



ภาพประกอบ 3 การควบคุมแบบวงปิด (Closed-Loop Control System) [12]

การออกแบบระบบควบคุมในปัจจุบันยังมีการพัฒนาเทคนิคขั้นสูง เช่น การควบคุมเชิงสัดส่วน-อินทิกรัล-อนุพันธ์ (Proportional Integral Derivative - PID) ซึ่งเหมาะสำหรับระบบที่ต้องการความแม่นยำสูง และการควบคุมที่ใช้ตัวแบบ (Model Predictive Control) ซึ่งเหมาะสำหรับการจัดการระบบที่มีความซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงตามเวลา

นอกจากนี้ การวิเคราะห์เสถียรภาพ (Stability Analysis) และคุณลักษณะการตอบสนองของระบบ (System Response Characteristics) ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในกระบวนการออกแบบระบบควบคุม การประเมินเสถียรภาพช่วยให้สามารถตรวจสอบว่าสัญญาณเอาต์พุตจะยังคงอยู่ในขอบเขตที่กำหนดหรือไม่เมื่อเวลาผ่านไป ในขณะที่คุณลักษณะการตอบสนอง เช่น เวลาการเซตตัว (Settling Time) และค่าการกระเพื่อม (Overshoot) ช่วยให้เราสามารถปรับปรุงสมรรถนะของระบบในเชิงพลวัตได้ ระบบควบคุมยังคงเป็นสาขาที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการบูรณาการเทคโนโลยีใหม่ เช่น ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบควบคุมให้สอดคล้องกับความต้องการในโลกอุตสาหกรรมสมัยใหม่ [12]

2.5.1 ตัวควบคุม PID (Proportional-Integral-Derivative Controllers)

ตัวควบคุม PID (Proportional-Integral-Derivative Controller) [4] เป็นหนึ่งในเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในการควบคุมระบบพลวัต โดยสามารถแบ่งออกเป็น P, PI, PD และ PID Controllers ซึ่งแต่ละประเภทมีคุณสมบัติที่ตอบสนองต่อความต้องการที่แตกต่างกันในระบบควบคุม

- P Controller (Proportional Controller)

ตัวควบคุม P เป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดของระบบควบคุม โดยสร้างสัญญาณควบคุมที่มีค่าแปรผันตรงกับค่าความผิดพลาด ($e(t)$) ระหว่างค่าที่ต้องการและค่าจริงในระบบ สมการของ P Controller คือ

$$u(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

- I Controller (Integral Controller)

ตัวควบคุม I สร้างสัญญาณควบคุมจากการสะสมค่าความผิดพลาดในอดีต (Integration of Error) เพื่อกำจัดความผิดพลาดคงที่ในระบบ สมการของ I Controller คือ

$$u(t) = K_i \int e(t) dt \quad (2)$$

- PI Controller (Proportional-Integral Controller)

ตัวควบคุม PI Controller รวมข้อดีของตัวควบคุม P และ I เข้าด้วยกัน โดยส่วน P ช่วยให้ระบบตอบสนองรวดเร็วขึ้น ในขณะที่ส่วน I ช่วยลดความผิดพลาดคงที่ในระบบ สมการคือ

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (3)$$

- PD Controller (Proportional-Derivative Controller)

ตัวควบคุม PD Controller เน้นการปรับปรุงการตอบสนองแบบพลวัต (Dynamic Response) โดยเพิ่มส่วนอนุพันธ์ $K_d \frac{de(t)}{dt}$ เพื่อคาดการณ์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาด สมการคือ

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

- PID Controller (Proportional-Integral-Derivative Controller)

ตัวควบคุม PID Controller รวมส่วนของ P, I และ D เข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดความสมดุลระหว่างความเร็วในการตอบสนอง ความแม่นยำ และความเสถียร สมการคือ

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

2.6 การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) [3] เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่มุ่งหวังในการหาค่าหรือชุดของค่าที่สามารถทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) มีค่าสูงสุดหรือต่ำสุดตามข้อจำกัด (Constraints) ที่กำหนด โดยกระบวนการนี้ถือเป็นองค์ประกอบสำคัญในหลายสาขาวิชา ไม่ว่าจะเป็นวิศวกรรมศาสตร์ การวิจัยทางคอมพิวเตอร์ การออกแบบระบบ รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลที่ซับซ้อน [13] การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาที่มีข้อจำกัด (Constrained Optimization) และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาที่ไม่มีข้อจำกัด (Unconstrained Optimization) [14] ซึ่งทั้งสอง

ประเภทนี้มีเทคนิคและวิธีการที่แตกต่างกันไป เช่น การใช้วิธีการเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical Optimization) เช่น วิธีการของเกรเดียนต์ (Gradient-Based Methods) หรือวิธีการที่ไม่ใช้เกณฑ์ทางคณิตศาสตร์อย่างการค้นหาด้วยวิธีของอัลกอริทึมทางวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithms) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการพัฒนาโมเดลหรือการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดยังถูกใช้ในหลากหลายด้านของวิศวกรรมศาสตร์ เช่น การออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรม การควบคุมกระบวนการผลิต หรือแม้กระทั่งการพัฒนาแผนกลยุทธ์ทางธุรกิจ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัดต่าง ๆ เช่น ข้อจำกัดด้านเวลา ทรัพยากร หรือแม้กระทั่งข้อจำกัดทางเศรษฐกิจ การใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดนั้นจำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของฟังก์ชันวัตถุประสงค์และข้อจำกัดที่มีอยู่ รวมทั้งวิธีการที่เหมาะสมในการค้นหาค่าที่ดีที่สุดในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีความซับซ้อนและไม่สามารถหาคำตอบที่แน่นอนได้อย่างง่ายดาย (Multimodal Optimization) หรือในกรณีที่ฟังก์ชันเป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเป็นเครื่องมือที่สำคัญในงานวิจัยและพัฒนา โดยสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการต่าง ๆ ทั้งในระดับทฤษฎีและการปฏิบัติ [15]

2.7 อัลกอริทึมการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization Algorithm)

Particle Swarm Optimization (PSO) [16] เป็นอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Algorithm) ที่ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมทางสังคมของสิ่งมีชีวิต เช่น การรวมฝูงของนกหรือปลา โดยแนวคิดหลักของ PSO คือการใช้การเคลื่อนที่และการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมร่วมกันของอนุภาค (Particles) เพื่อค้นหาวิธีแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดในพื้นที่ค้นหา (Search Space)

อัลกอริทึมนี้พัฒนาขึ้นโดย James Kennedy และ Russell Eberhart แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กับแนวคิดของ Artificial Life (A-life) รวมถึง Evolutionary Computation โดยสามารถใช้งานได้หลากหลาย เช่น การปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบประสาทเทียม (Neural Network Training) และการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เชิงเส้น (Nonlinear Functions) [16]

2.7.1 หลักการทำงานของ Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization ใช้กลุ่มของอนุภาค (Particles) ซึ่งแต่ละอนุภาคเป็นตัวแทนของคำตอบในพื้นที่ค้นหา อนุภาคจะปรับตำแหน่งของตนเองโดยอิงจาก

Personal Best (P) คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคแต่ละตัวเคยพบ

Global Best (G) คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่อนุภาคทั้งหมดในฝูงพบ

การปรับเปลี่ยนตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคในแต่ละรอบจะเป็นไปตามสมการ

$$V_i(t+1) = W \cdot V_i(t) + C_1 \cdot R_1 \cdot (P_i - X_i) + C_2 \cdot R_2 \cdot (G - X_i) \quad (6)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (7)$$

โดยที่

V_i	คือ	ความเร็วของอนุภาค
X_i	คือ	ตำแหน่งปัจจุบันของอนุภาค
W	คือ	ค่า Inertia Weight
C_1, C_2	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้
R_1, R_2	คือ	ค่าการสุ่มในช่วง [0,1]

2.7.2 ขั้นตอนการทำงานของ PSO

1. Initialization (การกำหนดค่าเริ่มต้น)

- กำหนดจำนวนอนุภาค (N) และขนาดของประชากร
- สุ่มตำแหน่งและความเร็วเริ่มต้นของอนุภาคในพื้นที่ค้นหา
- กำหนดค่าพารามิเตอร์ เช่น C_1, C_2 (ค่าสัมประสิทธิ์การเรียนรู้) และ W (ค่า inertia weight)

2. Evaluation (การประเมินผล)

- คำนวณค่าฟิตเนส (Fitness Value) ของแต่ละอนุภาคตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

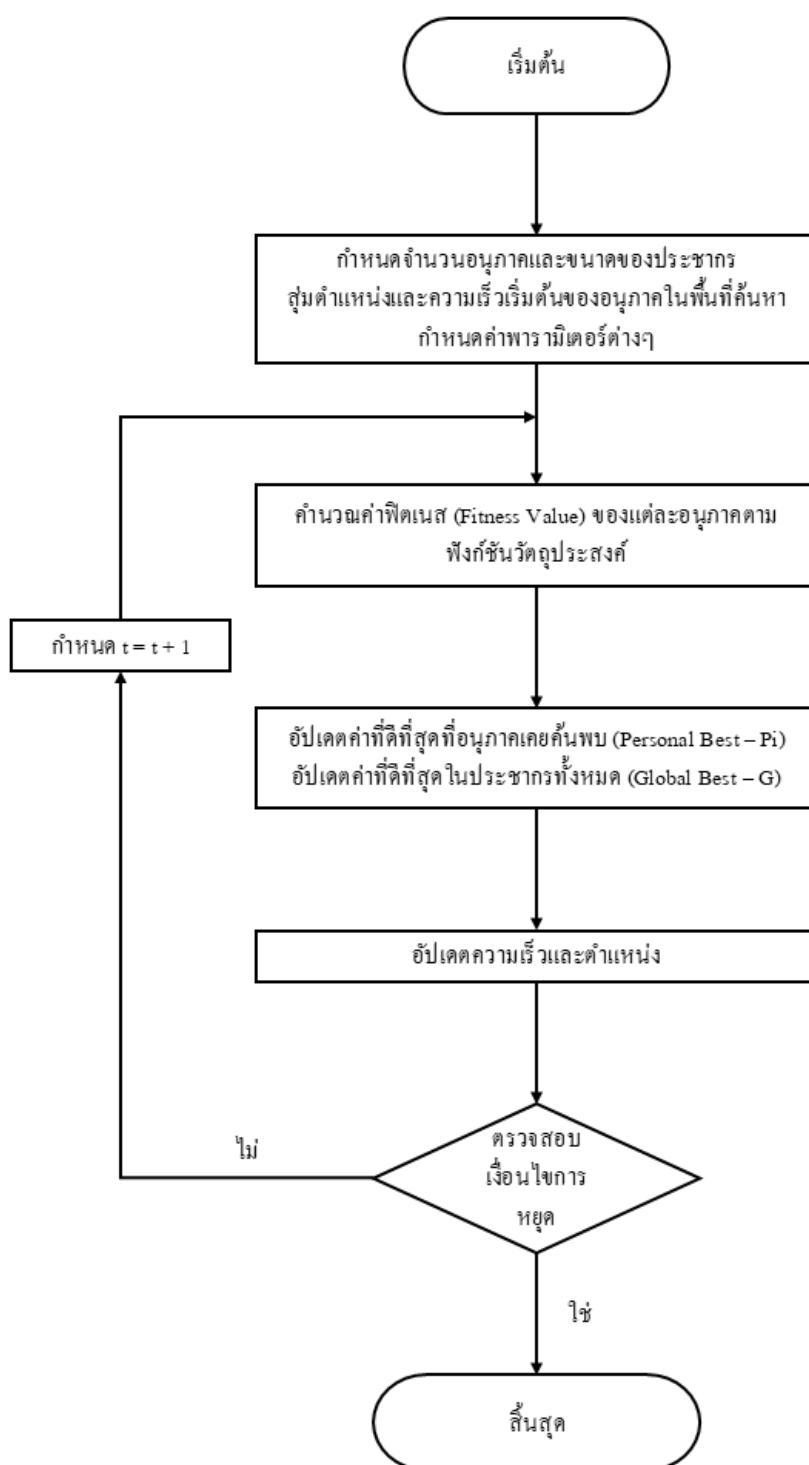
3. Update Personal Best และ Global Best

- อัปเดตค่าที่ดีที่สุดที่อนุภาคเคยค้นพบ โดยอ้างอิงจากค่าฟิตเนสของอนุภาคแต่ละตัว (Personal Best – P_i)
- อัปเดตค่าที่ดีที่สุดในการหาค่าทั้งหมด อ้างอิงจากค่าฟิตเนสของทุกอนุภาครวมกัน (Global Best – G)

4. Update Velocity and Position (การอัปเดตความเร็วและตำแหน่ง) โดยใช้สมการที่ (6) และ (7) ตามลำดับ

5. Stopping Criteria (เกณฑ์การหยุด)

- ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุด
- ถ้าไม่ใช่ (No) ระบบจะเพิ่มค่าการวนซ้ำ (t) โดย Set $t = t + 1$ แล้ววนกลับไปข้อ (2) เพื่อดำเนินการต่อ
- ถ้าใช่ (Yes) สิ้นสุดการทำงาน



ภาพประกอบ 4 ผลงานของอัลกอริทึมการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค [17]

2.8 อัลกอริทึมวัฏจักรของน้ำ (Water Cycle Algorithm)

Water Cycle Algorithm (WCA) [18] เป็นอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นโดย Hadi Eskandar, Ali Sadollah, Ardeshir Bahreininejad และ Mohd Hamdi ในปี 2012 เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงวิศวกรรมที่มีข้อจำกัด และความซับซ้อนสูง แนวคิดของอัลกอริทึมนี้ได้รับแรงบันดาลใจจากกระบวนการวัฏจักรน้ำในธรรมชาติ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการหมุนเวียนของน้ำในระบบนิเวศ ตั้งแต่การระเหยของน้ำในแหล่งน้ำ การกลั่นตัวในชั้นบรรยากาศ ไปจนถึงการตกลงกลับมาเป็นฝน และการไหลของน้ำจากภูเขา ผ่านลำธารและแม่น้ำ จนกระทั่งไหลลงสู่ทะเล

WCA ได้รับการออกแบบมาเพื่อแก้ไขปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพที่มีพื้นที่การค้นหาที่ไม่ต่อเนื่องและมีข้อจำกัดหลากหลาย โดยนำแนวคิดจากธรรมชาติมาใช้ในการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด (Global Optimum) จุดเด่นของ WCA คือการเลียนแบบกระบวนการธรรมชาติเพื่อให้การค้นหาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถหลีกเลี่ยงการติดอยู่ในคำตอบที่ไม่เหมาะสมที่สุด (Local Optima) นอกจากนี้ อัลกอริทึมนี้ยังถูกพัฒนาให้มีโครงสร้างที่เรียบง่าย ใช้งานได้ในหลากหลายปัญหา และมีความยืดหยุ่นสูงในการปรับเปลี่ยนตามลักษณะเฉพาะของปัญหาที่ต้องการแก้ไข

2.8.1 แนวคิดพื้นฐาน

Water Cycle Algorithm (WCA) ถูกออกแบบขึ้นจากการสังเกตพฤติกรรมของน้ำในธรรมชาติ กระบวนการนี้อธิบายถึงการไหลเวียนของน้ำในระบบนิเวศ โดยเริ่มต้นจากการที่น้ำไหลจากพื้นที่สูง เช่น บริเวณภูเขา ผ่านลำธารและแม่น้ำ ไปจนถึงพื้นที่ต่ำสุดคือทะเล กระบวนการนี้ยังรวมถึงการระเหยของน้ำจากแม่น้ำและทะเลขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ และการกลั่นตัวกลับเป็นฝน ซึ่งช่วยเติมเต็มน้ำในแหล่งกำเนิดอีกครั้ง

ในบริบทของ WCA กระบวนการนี้ถูกแปลงให้เป็นโมเดลเชิงคณิตศาสตร์ โดยการจำลองคำตอบที่เป็นไปได้ (Potential Solutions) ในพื้นที่การค้นหาเป็นหยดน้ำ (Raindrops) และจัดกลุ่มหยดน้ำเหล่านี้เป็น 3 ประเภทหลัก

1. ทะเล (Sea) แทนคำตอบที่ดีที่สุดในกลุ่ม เป็นเป้าหมายหลักที่คำตอบอื่น ๆ ต้องมุ่งไป
2. แม่น้ำ (Rivers) แทนคำตอบที่รองลงมาทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำลำธารเข้าสู่ทะเล
3. ลำธาร (Streams) แทนคำตอบที่เหลือซึ่งมีค่าฟิตเนสน้อยที่สุด

ในกระบวนการของ WCA ลำธารจะไหลเข้าสู่แม่น้ำ และแม่น้ำจะไหลลงสู่ทะเลตามหลักการทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดไว้ ซึ่งสมการการไหลนี้คำนวณจากตำแหน่งปัจจุบันของหยดน้ำ ตำแหน่งเป้าหมาย (แม่น้ำหรือทะเล) และระยะทางระหว่างจุดสองจุด สมการที่ใช้แสดงดังนี้

$$X_{\text{new}} = X_{\text{current}} + \text{rand} \cdot C \cdot (X_{\text{target}} - X_{\text{current}}) \quad (8)$$

โดยที่

X_{new} คือ ตำแหน่งใหม่ของหยดน้ำ

X_{current} คือ ตำแหน่งปัจจุบันของหยดน้ำ

X_{target} คือ ตำแหน่งเป้าหมาย (แม่น้ำหรือทะเล)

rand คือ ตัวเลขสุ่มในช่วง $[0,1]$

C คือ ค่าคงที่ที่ช่วยกำหนดระยะการเคลื่อนที่ (ปกติกำหนดใกล้เคียง 2)

นอกจากนี้ WCA ยังรวมกระบวนการระเหยและการตกของฝน เพื่อเพิ่มความหลากหลายของประชากรและลดความเสี่ยงของการติดอยู่ในค่า Local Optima ซึ่งกระบวนการนี้ช่วยให้หยดน้ำสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ที่สุ่มเลือกในพื้นที่ค้นหา

2.8.2 หลักการทำงานของ Water Cycle Algorithm

1. สร้างประชากรเริ่มต้น (Initial Population)

เริ่มต้นกระบวนการด้วยการตั้งค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น จำนวนประชากร $N_{\text{population}}$ และช่วงค่าของพื้นที่ค้นหา (Search Space) จากนั้นทำการสุ่มตำแหน่งเริ่มต้นของหยดน้ำ (Raindrops) และกำหนดบทบาท

- หยดน้ำที่ดีที่สุดจะถูกกำหนดให้เป็นทะเล (Sea)
- หยดน้ำที่ดีที่สุดถัดมาจะกลายเป็นแม่น้ำ (Rivers)
- หยดน้ำที่เหลือจะกลายเป็นลำธาร (Streams)

2. คำนวณค่าฟิตเนส (Fitness Calculation)

ค่าฟิตเนสของหยดน้ำแต่ละหยดจะถูกคำนวณตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ที่กำหนดไว้ ฟิตเนสที่ต่ำกว่าแสดงถึงคำตอบที่ดีกว่า หยดน้ำที่มีค่าฟิตเนสดีที่สุดจะถูกปรับให้อยู่ในตำแหน่งทะเลทันที

3. การไหลของน้ำ (Stream and River Flow)

- ลำธารและแม่น้ำจะไหลไปยังทะเลหรือเป้าหมายที่เหมาะสมกว่าผ่านสมการ (8)
- ตรวจสอบว่าลำธารมีค่าฟิตเนสดีกว่าแม่น้ำหรือไม่

ถ้าไม่ใช่ (No) ลำธารและแม่น้ำจะสลับตำแหน่งกัน

- ตรวจสอบว่าแม่น้ำมีค่าฟิตเนสดีกว่าทะเลหรือไม่

ถ้าไม่ใช่ (No) แม่น้ำและทะเลจะสลับตำแหน่งกัน

4. การระเหยและการตกของฝน (Evaporation and Rainfall)

เมื่อเงื่อนไขการระเหยเป็นจริง (ค่าฟิตเนสไม่ปรับปรุงในรอบที่กำหนด) กระบวนการจะสร้างเมฆและเริ่มต้นการตกของฝน โดยสุ่มตำแหน่งใหม่ให้กับลำธารและแม่น้ำในพื้นที่การค้นหา เพื่อเพิ่มความหลากหลายของประชากร

5. การปรับค่าพารามิเตอร์การค้นหา (Adaptive Search Intensity)

ในระหว่างการทำงาน ค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมการค้นหา เช่น ระยะทางสูงสุดระหว่างลำธาร และ ทะเลจะถูกปรับลดลงเมื่อจำนวนรอบการทำงานเพิ่มขึ้น เพื่อเพิ่มความเข้มข้นในการค้นหาใกล้กับ ตำแหน่งที่ดีที่สุด

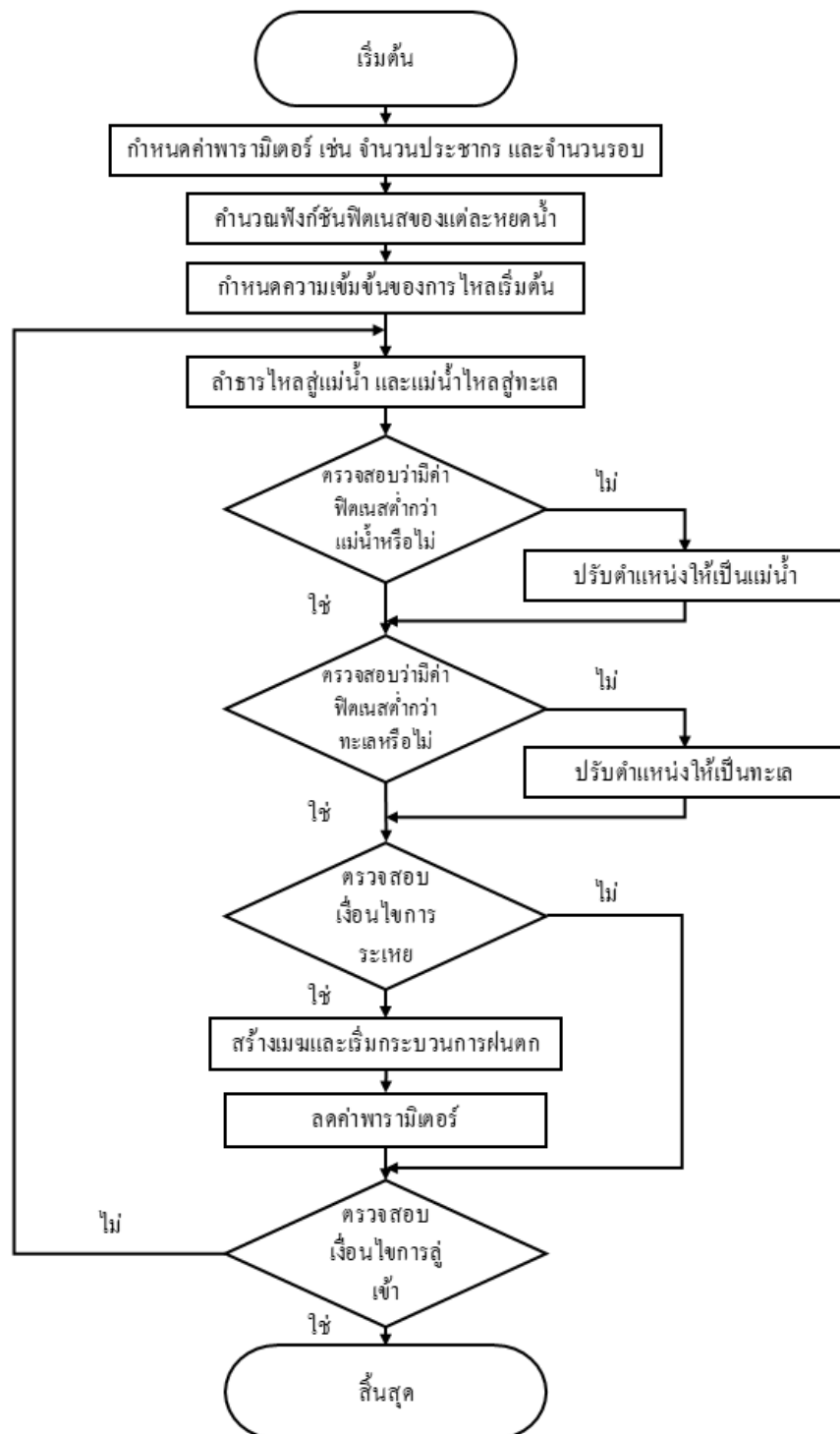
6. เงื่อนไขการหยุด (Stopping Criteria):

อัลกอริทึมหยุดการทำงานเมื่อเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งเป็นจริง

- จำนวนรอบการทำงานถึงค่าที่กำหนด
- การเปลี่ยนแปลงของค่าฟิตเนสในรอบที่ผ่านมา มีค่าน้อยกว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ

ได้





ภาพประกอบ 5 ผลงานของอัลกอริทึมวัฏจักรน้ำ [18]

2.9 อัลกอริทึมของหมาป่าสีเทา (Grey Wolf Optimizer Algorithm)

Grey Wolf Optimizer (GWO) [19] เป็นอัลกอริทึมที่พัฒนาโดย Seyedali Mirjalili, Seyed Mohammad Mirjalili และ Andrew Lewis ในปี 2014 โดยได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมการล่าและโครงสร้างสังคมของหมาป่าสีเทา หมาป่าสีเทาเป็นสัตว์นักล่าที่อยู่จุดสูงสุดของห่วงโซ่อาหาร และมีโครงสร้างทางสังคมที่ซับซ้อนอย่างมาก การเลียนแบบพฤติกรรมดังกล่าวช่วยให้ อัลกอริทึมสามารถจัดการกับปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

GWO ได้รับการออกแบบขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการในงานวิจัยและวิศวกรรม โดยเฉพาะการแก้ปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพในพื้นที่ที่มีหลายมิติและซับซ้อน ซึ่งพื้นที่เหล่านี้มักเต็มไปด้วยค่า Local Optima ที่อาจทำให้อัลกอริทึมทั่วไปหยุดนิ่ง การสร้างสมดุลระหว่างการสำรวจพื้นที่ใหม่ (Exploration) และการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ที่มีศักยภาพสูง (Exploitation) ทำให้ GWO มีความสามารถในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในปัญหาหลากหลายรูปแบบ

2.9.1 แนวคิดของหมาป่าสีเทา

หมาป่าสีเทามีโครงสร้างทางสังคมที่ชัดเจน โดยสมาชิกในฝูงแต่ละตัวมีบทบาทหน้าที่เฉพาะตัว ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ลำดับชั้นหลัก

1. Alpha (α)

- ผู้นำของฝูง มีบทบาทสำคัญในการตัดสินใจ เช่น การล่า การย้ายถิ่นฐาน และการกำหนดเวลาพักผ่อน
- Alpha ไม่จำเป็นต้องแข็งแกร่งที่สุด แต่มีความสามารถสูงที่สุดในการจัดการฝูง
- สมาชิกในฝูงให้การยอมรับ Alpha โดยแสดงความเคารพ เช่น การลดหางลงเมื่ออยู่ในฝูง

2. Beta (β)

- รองผู้นำ มีหน้าที่สนับสนุน Alpha และทำหน้าที่ส่งต่อคำสั่งไปยังระดับล่าง
- หาก Alpha เสียชีวิต Beta จะกลายเป็นผู้นำใหม่

3. Delta (δ)

- ทำหน้าที่เป็นตัวสนับสนุน เช่น การสอดแนม การป้องกันฝูง หรือการล่า

4. Omega (ω)

- หมาป่าที่อยู่ลำดับต่ำสุดในฝูง ทำหน้าที่รักษาสมดุลของความขัดแย้งในกลุ่ม

ลำดับชั้นดังกล่าวถูกจำลองใน GWO เพื่อสร้างการทำงานร่วมกันระหว่างตัวแทนในอัลกอริทึม โดย Alpha แทนคำตอบที่ดีที่สุด Beta และ Delta แทนคำตอบที่รองลงมา และ Omega แทนตัวแทนที่สำรวจพื้นที่ใหม่

2.9.2 หลักการทำงานของ Grey Wolf Optimizer

1. การเริ่มต้นประชากร (Initialize the Grey Wolf Population)

- สร้างประชากรเริ่มต้นของหมาป่า (Wolves) โดยแต่ละหมาป่าจะแทนคำตอบในพื้นที่ค้นหา (Search Space)

- กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้น เช่น จำนวนประชากร (N) และค่าที่ใช้ควบคุมการสำรวจและการใช้ประโยชน์ ($\vec{A}, \vec{C}$)

- ค่าฟิตเนส (Fitness) ของแต่ละหมาป่าจะถูกคำนวณตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)

2. การจัดลำดับชั้น (Social Hierarchy)

3. การล้อมเหยื่อ (Encircling Prey)

หมาป่าล้อมรอบเป้าหมาย (คำตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบัน) โดยตำแหน่งของหมาป่าแต่ละตัวถูกปรับด้วยสมการต่อไปนี้

- คำนวณระยะห่างระหว่างหมาป่าและเหยื่อ

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p - \vec{X}| \quad (9)$$

โดยที่

$\vec{X}_p$ คือ ตำแหน่งของเหยื่อ

$\vec{X}$ คือ ตำแหน่งปัจจุบันของหมาป่า

$\vec{C}$ คือ เวกเตอร์ที่สุ่มค่าในช่วง [0,2]

- ปรับตำแหน่งของหมาป่า

$$\vec{X}_{new} = \vec{X}_p - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (10)$$

$\vec{A}$ เป็นตัวควบคุมระยะและทิศทางการเคลื่อนที่ โดยค่า $\vec{A}$ จะลดลงจาก 2 ไปยัง 0 เพื่อสร้างสมดุลระหว่างการสำรวจ และการใช้ประโยชน์

4. การค้นหาและการโจมตีเหยื่อ (Hunting and Attacking)

- การค้นหาเหยื่อ (Searching for Prey)

หากค่า $|\vec{A}| > 1$ หมาป่าจะเคลื่อนที่ออกจากเหยื่อเพื่อสำรวจพื้นที่ใหม่
กระบวนการนี้ช่วยให้หมาป่ากระจายตัวเพื่อค้นหาคำตอบที่ดีกว่า

- การโจมตีเหยื่อ (Attacking Prey)

หากค่า $|\vec{A}| < 1$ หมาป่าจะเคลื่อนที่ออกจากเหยื่อเพื่อสำรวจพื้นที่ใหม่
กระบวนการนี้เน้นการใช้ประโยชน์จากพื้นที่ที่ค้นพบแล้วเพื่อหาคำตอบ

5. การอัปเดตตำแหน่งหมาป่า (Position Updating)

ตำแหน่งของหมาป่าทั้งหมดจะถูกปรับตามตำแหน่งของ Alpha, Beta และ

Delta

$$\vec{X}_{\text{new}} = \frac{\vec{X}_\alpha + \vec{X}_\beta + \vec{X}_\delta}{3} \quad (11)$$

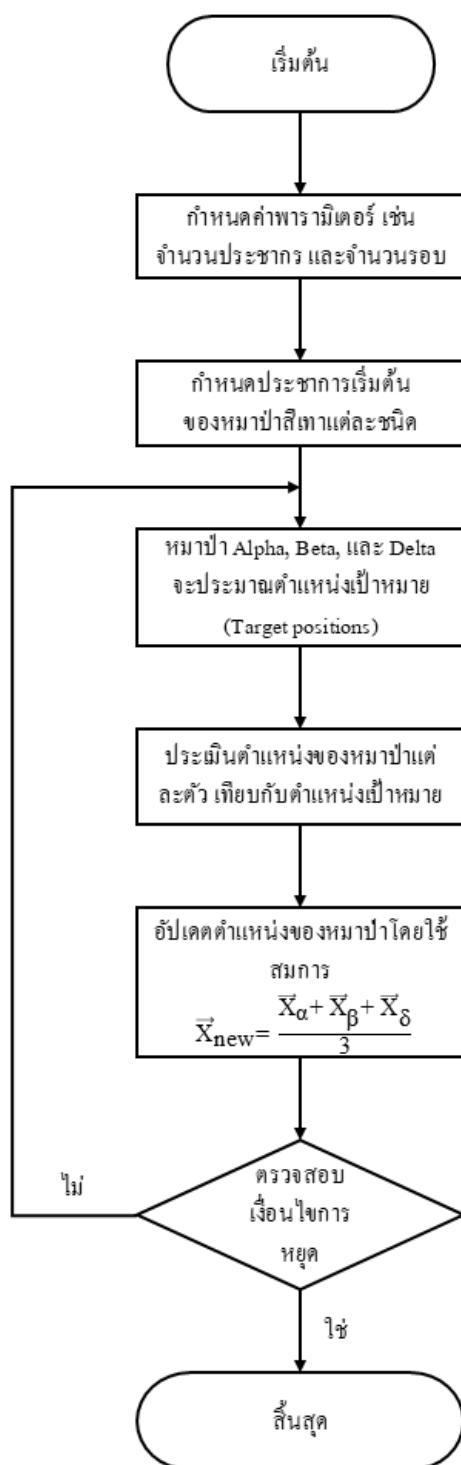
โดยที่ $\vec{X}_\alpha + \vec{X}_\beta + \vec{X}_\delta$ ตำแหน่งที่คำนวณจาก Alpha, Beta และ Delta ตามลำดับ

6. เงื่อนไขการหยุด (Stopping Criteria)

อัลกอริทึมหยุดทำงานเมื่อเงื่อนไขใดเงื่อนไขหนึ่งเป็นจริง

- จำนวนรอบการทำงานถึงค่าที่กำหนด (Maximum Iterations)
- ความเปลี่ยนแปลงของค่าฟิตเนสในแต่ละรอบมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนด

พูน ปณ จิโต ชีเว



ภาพประกอบ 6 ผลงานของอัลกอริทึมหมาป่าสี่ตัว [19]

2.10 อัลกอริทึมของฮิปโปโปแตมัส (Hippopotamus Optimization Algorithm – HO)

Hippopotamus Optimization Algorithm (HO) [20] เป็นอัลกอริทึมเมตาฮีริสติกที่พัฒนาขึ้นในปี 2024 โดยทีมวิจัยที่นำโดย Mohammad Hussein Amiri, Nastaran Mehrabi Hashjin, Mohsen Montazeri, Seyedali Mirjalili และ Nima Khodadadi อัลกอริทึมนี้ได้รับแรงบันดาลใจจากพฤติกรรมธรรมชาติของฮิปโปโปแตมัสในแหล่งน้ำ เช่น การสำรวจ การหลบหนีจากภัยคุกคาม และการป้องกันตัวเอง HO ถูกออกแบบให้จำลองพฤติกรรมเหล่านี้ผ่านโมเดลคณิตศาสตร์ที่เน้นการจัดสมดุลระหว่างการสำรวจพื้นที่ใหม่ (Exploration) และการใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ค้นพบ (Exploitation) กระบวนการทำงานของ HO เริ่มต้นด้วยการสร้างประชากรเริ่มต้นของฮิปโปโปแตมัสในพื้นที่การค้นหาโดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ เช่น จำนวนประชากร และจำนวนรอบการทำงาน จากนั้นฮิปโปโปแตมัสแต่ละตัวจะถูกปรับตำแหน่งตามสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้พฤติกรรมเคลื่อนไหวก้าวแบบสุ่ม การตอบสนองต่อภัยคุกคาม และการหลบหนีในกรณีเผชิญกับอันตราย โดยอัลกอริทึมฮิปโปโปแตมัส มี 3 ระยะ หรือ 3 Phase ได้แก่

1. การอัปเดตตำแหน่งในแม่น้ำหรือบ่อน้ำ (Position update in river or pond)

สมการการกำหนดตำแหน่งของฮิปโปโปแตมัสเพศผู้ในกลุ่ม

ใช้สำหรับคำนวณตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปแตมัสเพศผู้ในกลุ่ม โดยใช้ตำแหน่งของ Dominant Hippopotamus (ฮิปโปโปแตมัสที่มีค่าฟิตเนสดีที่สุดในรอบนั้น) เพื่อกำหนดตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปแตมัสเพศผู้ ตำแหน่งนี้มีการคำนวณดังนี้

$$X_{ij}^{M \text{ hippo}} = x_{ij} + y_1 \cdot (D_{\text{hippo}} - I_1 \cdot X_{ij}) \quad (12)$$

โดยที่

$X_{ij}^{M \text{ hippo}}$ คือ ตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปแตมัสเพศผู้ตัวที่ i

x_{ij} คือ ตำแหน่งปัจจุบันของฮิปโปโปแตมัส

D_{hippo} คือ ตำแหน่งของฮิปโปโปแตมัสที่มีค่าฟิตเนสดีที่สุดในรอบนั้น

y_1 คือ ตัวเลขสุ่มในช่วง $[0,1]$

I_1 คือ ตัวเลขสุ่มที่มีค่าเป็น 1 หรือ 2 เพื่อเพิ่มความหลากหลายของการคำนวณ

สมการการกำหนดตำแหน่งของฮิปโปโปแตมัสเพศเมียหรือฮิปโปโปแตมัสที่ยังไม่โตเต็มวัย (Female and Immature Hippopotamus Position)

ใช้สำหรับคำนวณตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปเตมัสเพศเมียหรือฮิปโปโปเตมัสที่ยังไม่โตเต็มวัย โดยอ้างอิงจากตำแหน่งของแม่หรือตำแหน่งใกล้เคียงภายในฝูง เพื่อจำลองการเคลื่อนไหวที่มีความอยากรู้อยากเห็นแต่ยังคงรักษาระยะห่างที่ปลอดภัย ดังนี้

$$X_{i,j}^{FB\ hippo} = x_{i,j} + h_1 \cdot (m_{G_i} - I_2 \cdot X_{i,j}) \quad (13)$$

โดยที่

$X_{i,j}^{M\ hippo}$ คือ ตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปเตมัสเพศเมียหรือตัวที่ยังไม่โตเต็มวัย

$x_{i,j}$ คือ ตำแหน่งปัจจุบันของฮิปโปโปเตมัส

m_{G_i} คือ ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งฮิปโปโปเตมัสบางตัวในฝูง (สุ่มเลือก)

h_1 คือ ค่าความสุ่มที่ได้จากการกระจาย (สุ่มระหว่าง 0 และ 1)

I_2 คือ ตัวเลขสุ่มที่มีค่าเป็น 1 หรือ 2

สมการการปรับตำแหน่งเพื่อตอบสนองต่อภัยคุกคาม (Defensive Adjustment)

$$X_{i,j}^{Def} = x_{i,j} + R \cdot (P_{avg} - x_{i,j}) \quad (14)$$

โดยที่

$X_{i,j}^{Def}$ คือ ตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปเตมัสตัวที่ i หลังการตอบสนอง

$x_{i,j}$ คือ ตำแหน่งปัจจุบันของฮิปโปโปเตมัสตัวที่ i

P_{avg} คือ ค่าเฉลี่ยของตำแหน่งของฮิปโปโปเตมัสในบริเวณใกล้เคียง

R คือ ตัวแปรควบคุมที่สร้างความสุ่มสำหรับการเคลื่อนไหวในทิศทางใหม่

สมการการปรับตำแหน่งเพิ่มเติมด้วยการสุ่ม (Enhanced Defensive Adjustment)

$$X_{i,j}^{Defensive} = X_{i,j}^{Def} + \epsilon \cdot r \quad (15)$$

โดยที่

$X_{i,j}^{Defensive}$ คือ ตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปเตมัสหลังจากการปรับตำแหน่งเพิ่มเติม

$X_{i,j}^{Def}$ คือ ตำแหน่งที่ได้จากสมการที่ (14)

- ϵ คือ ตัวแปรที่ควบคุมระดับการสุ่ม (Randomization Level)
 r คือ ค่าการสุ่มที่มีการกระจายในช่วง $[0,1]$

2.การป้องกันตัวจากผู้ล่า (Defense against predators)

สมการการกำหนดตำแหน่งของนักล่า สมการนี้จำลองการปรากฏตัวของนักล่าในพื้นที่การค้นหาล่า ซึ่งตำแหน่งของนักล่าถูกสุ่มเพื่อเพิ่มความซับซ้อนของการคำนวณและสร้างแรงกดดันให้ฮิปโปโปแตมัสเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่อันตราย

$$X_{\text{predator}} = X_{\text{random}} + \xi \cdot r \quad (16)$$

โดยที่

- X_{predator} คือ ตำแหน่งของนักล่าในพื้นที่การค้นหาล่า
 X_{random} คือ ตำแหน่งที่สุ่มในพื้นที่การค้นหาล่า
 ξ คือ ตัวแปรควบคุมระดับการกระจายตัวของนักล่า
 r คือ ค่าการสุ่มที่มีการกระจายในช่วง $[0,1]$

สมการการตอบสนองของฮิปโปโปแตมัสต่อภัยคุกคาม (Escape from Predator)

สมการนี้ใช้ในการคำนวณตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปแตมัสเมื่อเผชิญกับนักล่า โดยฮิปโปโปแตมัสจะเคลื่อนไปในทิศทางที่ปลอดภัยออกจากตำแหน่งของนักล่า การปรับเปลี่ยนตำแหน่งนี้ช่วยให้ฮิปโปโปแตมัสสำรวจพื้นที่ใหม่และลดโอกาสของการถูกโจมตี

$$X_{i,j}^{\text{Escape}} = x_{i,j} + k_1 \cdot (X_{\text{predator}} - X_{i,j}) \quad (17)$$

โดยที่

- $X_{i,j}^{\text{Escape}}$ คือ ตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปแตมัสตัวที่ i หลังจากหลบหนีภัยคุกคาม
 $x_{i,j}$ คือ ตำแหน่งปัจจุบันของฮิปโปโปแตมัสตัวที่ i
 X_{predator} คือ ตำแหน่งของนักล่า
 k_1 คือ ค่าควบคุมความเร็วและทิศทางในการหลบหนี

สมการการปรับตำแหน่งเพิ่มเติมเพื่อความหลากหลาย (Further Adjustment for Escape)

สมการนี้เพิ่มองค์ประกอบการสุ่มในตำแหน่งที่ได้จากการหลบหนี (สมการที่ 17) เพื่อสร้างความหลากหลายของตำแหน่งในประชากรและเพิ่มโอกาสในการค้นพบพื้นที่ที่มีค่าฟิตเนสดีกว่า

$$X_{i,j}^{new} = X_{i,j}^{Escape} + \gamma \cdot r \quad (18)$$

โดยที่

$X_{i,j}^{new}$ คือ ตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปเตมัสหลังจากการปรับตำแหน่งเพิ่มเติม

$X_{i,j}^{Escape}$ คือ ตำแหน่งของฮิปโปโปเตมัสที่ได้จากสมการที่ (17)

γ คือ ตัวแปรควบคุมความแรงของการกระจายตัว

r คือ ค่าการสุ่มที่มีการกระจายในช่วง $[0,1]$

3. การหลบหนีจากผู้ล่า (Escaping form the predator)

สมการการเคลื่อนไหวไปยังพื้นที่ปลอดภัย (Escape Movement)

ฮิปโปโปเตมัสเคลื่อนตัวไปยังพื้นที่ที่ปลอดภัยกว่า โดยตำแหน่งของผู้นำทำหน้าที่เป็นจุดหมายที่เหมาะสมที่สุด

$$X_{i,j}^{Exploitation} = x_{i,j} + f_1 \cdot (X_{leader} - X_{i,j}) \quad (19)$$

โดยที่

$X_{i,j}^{Exploitation}$ คือ ตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปเตมัสที่คำนวณจากตำแหน่งของผู้นำ

$x_{i,j}$ คือ ตำแหน่งปัจจุบันของฮิปโปโปเตมัส

X_{leader} คือ ตำแหน่งของผู้นำ (Leader) ซึ่งมีค่าฟิตเนสดีที่สุดในกลุ่ม

f_1 คือ ตัวแปรควบคุมความรุนแรงของการเคลื่อนไหวไปยังผู้นำ

สมการการปรับตำแหน่งเพิ่มเติมในพื้นที่ปลอดภัย

สมการนี้ช่วยเพิ่มโอกาสในการปรับปรุงค่าฟิตเนสในพื้นที่ปลอดภัย โดยการกระจายตำแหน่งรอบ ๆ ผู้นำ

$$X_{i,j}^{final} = X_{i,j}^{Exploitation} + \lambda \cdot r \quad (20)$$

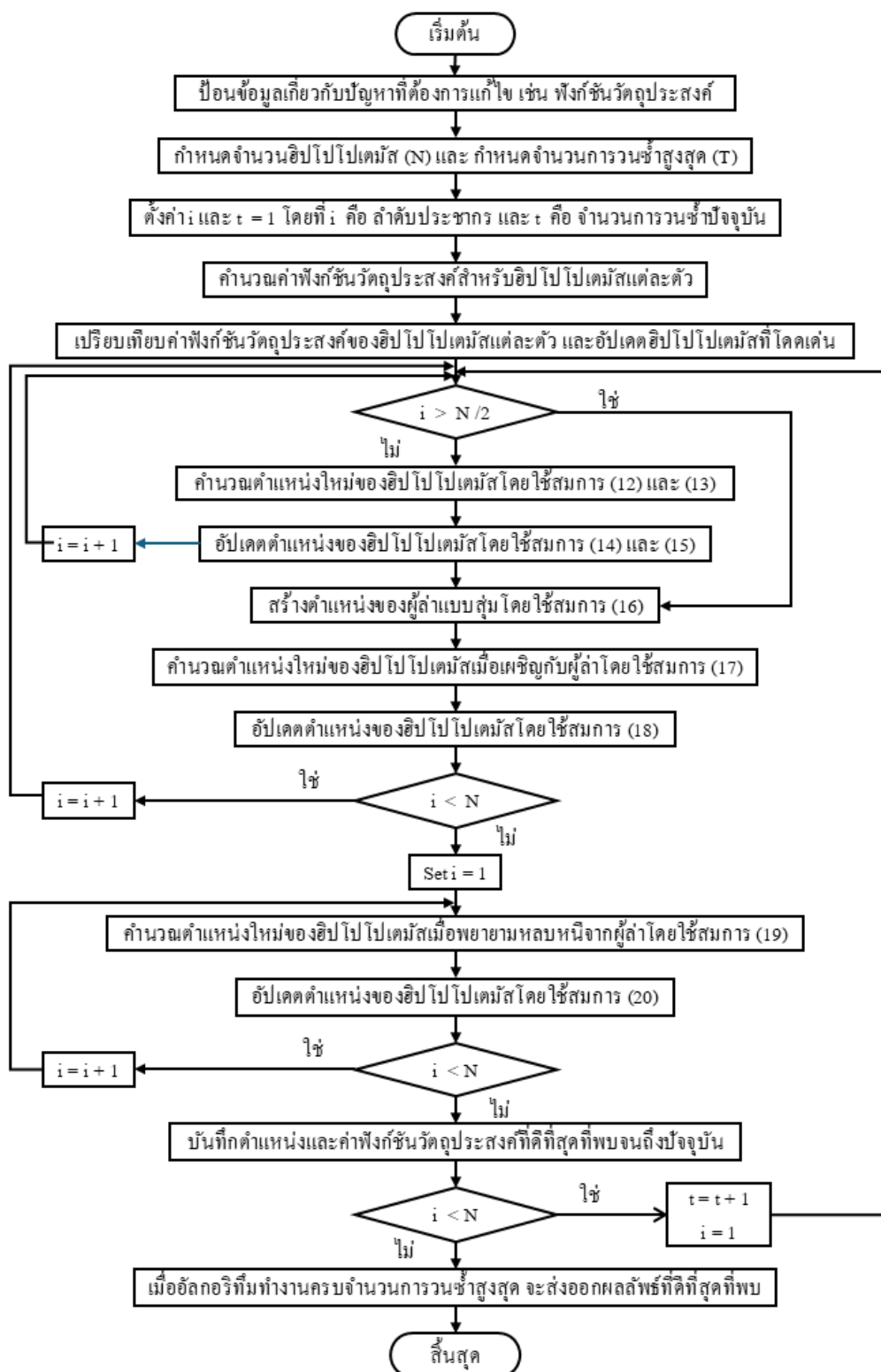
โดยที่

$X_{i,j}^{final}$	คือ ตำแหน่งสุดท้ายของฮิปโปโปเตมัสหลังการหลบหนี
$X_{i,j}^{Exploitation}$	คือ ตำแหน่งที่ได้จากสมการที่ (19)
λ	คือ ตัวแปรควบคุมการกระจายตัวเพิ่มเติม
r	คือ ค่าการสุ่มในช่วง $[0,1]$

ขั้นตอนการทำงาน

1. เริ่มต้น (Start)
2. ป้อนข้อมูลปัญหา (Input all information of optimization problem)
 - ป้อนข้อมูลเกี่ยวกับปัญหาที่ต้องการแก้ไข เช่น ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function), ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables), และข้อจำกัด (Constraints)
3. ตั้งค่าพารามิเตอร์ (Set number of hippopotamus N and total number of iterations T)
 - กำหนดจำนวนฮิปโปโปเตมัส (N) ซึ่งเป็นจำนวนตัวแทนค้นหา (Search Agents)
 - กำหนดจำนวนการวนซ้ำสูงสุด (T) ที่อัลกอริทึมจะทำงาน
4. สร้างประชากรเริ่มต้น (Create initial population)
 - สร้างประชากรเริ่มต้นของฮิปโปโปเตมัสโดยการสุ่มตำแหน่งในพื้นที่ค้นหา
 - ตั้งค่า (i) และ (t) = 1 โดยที่ i คือ ลำดับประชากร และ t คือ จำนวนการวนซ้ำ
5. คำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Calculate objective function)
 - คำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับแต่ละฮิปโปโปเตมัสในประชากรทั้งหมด
6. อัปเดตฮิปโปโปเตมัสที่โดดเด่น (Update dominated hippopotamus)
 - เปรียบเทียบค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของฮิปโปโปเตมัสแต่ละตัว และอัปเดตฮิปโปโปเตมัสที่โดดเด่น (dominant hippopotamus) ซึ่งเป็นตัวที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด
7. ตรวจสอบลำดับประชากร (i) ว่าเข้าเงื่อนไข $i > \frac{N}{2}$ หรือไม่
 - ถ้าไม่ใช่ (No) อัลกอริทึมจะดำเนินขั้นตอนต่อไป ข้อ 8
 - ถ้าใช่ (Yes) ข้ามไปข้อที่ 10
8. ระยะที่ 1 การอัปเดตตำแหน่งในแม่น้ำหรือบ่อน้ำ (Position update in river or pond)
 - คำนวณตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปเตมัสโดยใช้สมการ (12) และ (13)

- อัปเดตตำแหน่งของฮิปโปโปเตมัสโดยใช้สมการ (14) และ (15)
- 9. กำหนดค่าลำดับประชากรใหม่ $i = i + 1$ แล้ววนกลับไปข้อ 7
- 10. ระยะที่ 2 การป้องกันตัวจากผู้ล่า (Defense against predators)
 - สร้างตำแหน่งของผู้ล่าแบบสุ่มโดยใช้สมการ (16)
 - คำนวณตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปเตมัสเมื่อเผชิญกับผู้ล่าโดยใช้สมการ (17)
 - อัปเดตตำแหน่งของฮิปโปโปเตมัสโดยใช้สมการ (18)
- 11. ตรวจสอบลำดับประชากร (i) ว่าเข้าเงื่อนไข $i < N$ หรือไม่
 - ถ้าใช่ (Yes) วนกลับไปข้อ 7
 - ถ้าไม่ใช่ (No) ดำเนินการขั้นต่อไป คือ กำหนดลำดับประชากรใหม่ Set $i = 1$
- 12. ระยะที่ 3 การหลบหนีจากผู้ล่า (Escaping from predators)
 - คำนวณตำแหน่งใหม่ของฮิปโปโปเตมัสเมื่อพยายามหลบหนีจากผู้ล่าโดยใช้สมการ (19)
 - อัปเดตตำแหน่งของฮิปโปโปเตมัสโดยใช้สมการ (20)
- 13. ตรวจสอบลำดับประชากร (i) ว่าเข้าเงื่อนไข $i < N$ หรือไม่
 - ถ้าใช่ (Yes) กำหนดค่าลำดับประชากรใหม่ $i = i + 1$ แล้ววนกลับไปข้อ 12
 - ถ้าไม่ใช่ (No) ดำเนินการขั้นต่อไป
- 14. บันทึกผลลัพธ์ที่ดีที่สุด (Save the best candidate solution found so far)
 - บันทึกตำแหน่งและค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดที่พบจนถึงปัจจุบัน
- 15. ตรวจสอบ (t) ว่าเข้าเงื่อนไข $t < N$ หรือไม่
 - ถ้าใช่ (Yes) กำหนดค่าลำดับประชากรและจำนวนรอบใหม่ $t = t + 1$ และ Set $i = 1$ แล้ววนกลับไปข้อ 6
 - ถ้าไม่ใช่ (No) ดำเนินการขั้นต่อไป
- 16. ส่งออกผลลัพธ์ (Output the best solution of the objective function found by HO)
 - เมื่ออัลกอริทึมทำงานครบจำนวนการวนซ้ำสูงสุด (T) จะส่งออกผลลัพธ์ที่ดีที่สุดที่พบ
- 17. สิ้นสุดการทำงาน (End HO)



ภาพประกอบ 7 ผลงานของอัลกอริทึมฮิปโปโปเตมัส [20]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.11.1 Ekinci และคณะ [21] มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Generation Control - AGC) สำหรับระบบไฟฟ้าผสมผสานที่ประกอบด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic - PV) และระบบพลังงานความร้อนแบบรีฮีท (Reheat Thermal System) โดยเน้นการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าในสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดและความแปรปรวนของพลังงานทดแทน การศึกษาใช้ตัวควบคุมแบบ PI ที่ปรับพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม RIME (Radial Movement Inspired Metaheuristic) ซึ่งเป็นวิธีการที่พัฒนาขึ้นใหม่ โดยใช้งานร่วมกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบ ITAE (Integral Time Absolute Error) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมและลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงโหลด การทดลองดำเนินการในระบบสองพื้นที่ (Two-Area Hybrid System) ที่จำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงโหลดและการรบกวนในหลายรูปแบบ ผลการศึกษาพบว่า อัลกอริทึม RIME สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของตัวควบคุม PI ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยสามารถลดการแกว่งตัวของความถี่และลดพลังงานไฟฟ้าที่ส่งผ่านระหว่างพื้นที่ได้ดีกว่าอัลกอริทึมทั่วไป เช่น Black Widow Optimization Algorithm (BWOA) และ Genetic Algorithm (GA) นอกจากนี้ ระบบที่ควบคุมด้วย RIME ยังมีเวลาการเข้าสู่สถานะคงที่ที่สั้นกว่า และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงโหลดได้อย่างรวดเร็ว ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของอัลกอริทึม RIME ในการนำมาใช้พัฒนาระบบ AGC สำหรับระบบไฟฟ้าผสมผสานที่มีความซับซ้อน และสามารถประยุกต์ใช้งานในระบบพลังงานในอนาคตได้

2.11.2 Indrajit Koley และคณะ [22] ได้พัฒนาระบบควบคุมการผลิตและความถี่ (Load Frequency Control - LFC) สำหรับระบบไมโครกริดแบบไฮบริด AC/DC ที่ประกอบด้วยแหล่งพลังงานลม (Wind Turbine Generator: WTG) และระบบจัดเก็บพลังงานแบตเตอรี่ (Battery Energy Storage System: BESS) โดยใช้ตัวควบคุมแบบ Proportional-Integral-Double-Derivative (PIDDD) ซึ่งพารามิเตอร์ถูกออกแบบด้วยอัลกอริทึม Teaching-Learning-Based Optimization (TLBO) วัตถุประสงค์ของการศึกษาเพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของระบบภายใต้สถานการณ์ที่โหลดและการผลิตพลังงานมีความแปรปรวนอย่างต่อเนื่อง ขอบเขตของการศึกษานี้เน้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุม PIDDD กับตัวควบคุม PI และ PID โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบ Integral Time Absolute Error (ITAE) และจำลองระบบในซอฟต์แวร์ MATLAB/SIMULINK ผลลัพธ์จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม PIDDD ที่ปรับด้วย TLBO มีความสามารถในการลดการสั่นสะเทือนของความถี่ไฟฟ้าและลดพลังงานที่ส่งผ่านระหว่างพื้นที่ในระบบไมโครกริดได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าตัวควบคุม PI และ PID นอกจากนี้ยังมีเวลาการ

ตอบสนองเข้าสู่สถานะคงที่ที่เร็วกว่า ซึ่งบ่งชี้ถึงศักยภาพของการใช้ตัวควบคุมดังกล่าวในระบบพลังงานไฮบริดที่มีความซับซ้อน

2.11.3 Indrajit Koley และคณะ [23] ศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมความถี่ (Load Frequency Control - LFC) ในระบบพลังงานแบบไฮบริดที่ประกอบด้วยพื้นที่หลายส่วน (Multi - Area Power System) โดยใช้แหล่งพลังงานจากลมร่วมกับระบบผลิตพลังงานจากความร้อน งานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงการควบคุมความถี่และเสถียรภาพของพลังงานในระบบพลังงานที่เชื่อมต่อระหว่างแหล่งพลังงานหมุนเวียนและแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล ตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ Proportional-Integral-Double-Derivative (PID) ซึ่งได้รับการปรับพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม Cuckoo Search Algorithm (CSA) โดยเน้นการลดความเบี่ยงเบนของความถี่และพลังงานในสายส่งระหว่างพื้นที่ ขอบเขตของการศึกษาได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุม PID กับตัวควบคุม PI และ PID โดยพิจารณาจากการตอบสนองของระบบต่อความเปลี่ยนแปลงของโหลดกระบวนการศึกษาประกอบด้วยจำลองระบบสามพื้นที่ (Thermal-Wind-Thermal) ใน MATLAB/SIMULINK โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบ Integral Square Error (ISE) ในการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม PID ที่ปรับด้วย CSA ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าตัวควบคุม PI และ PID ทั้งในด้านการลดเวลาการตอบสนองเข้าสู่สถานะคงที่ การลด Overshoot และ Undershoot ของระบบ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบความสามารถของตัวควบคุมภายใต้เงื่อนไขโหลดที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง 25% ในพื้นที่หนึ่ง ซึ่งผลการทดลองยืนยันว่าตัวควบคุม PID มีความแข็งแกร่งและสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ดี

2.11.4 Aatif Altaf และคณะ [20] ศึกษาการออกแบบตัวควบคุม PID สำหรับการควบคุมความถี่โหลด (Load Frequency Control - LFC) ของระบบไมโครกริด โดยใช้พลังงานหมุนเวียน เช่น พลังงานลมและพลังงานแสงอาทิตย์ ภายใต้สถานการณ์ที่มีการโจมตีทางไซเบอร์และความล่าช้าของเวลาสัญญาณ (Time Delay Attack) งานวิจัยนี้ใช้ อัลกอริทึม Hippopotamus Optimization (HO) ในการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบพลังงานไมโครกริดที่ต้องเผชิญกับความไม่แน่นอนของโหลดและการรบกวนที่ซับซ้อน การทดลองดำเนินการในระบบไมโครกริดแบบแยกส่วนที่ประกอบด้วยแหล่งพลังงานลม (Wind Energy) และพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) โดยมีการวิเคราะห์สถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับความไม่แน่นอน เช่น การโจมตีทางไซเบอร์ ความเปลี่ยนแปลงของโหลด และผลกระทบจาก Time Delay การจำลองดำเนินการด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB/SIMULINK เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างตัวควบคุม PID ที่ใช้ HO และตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม PID ที่ใช้ HO สามารถลดการเบี่ยงเบนของความถี่ ลดการสั่นสะเทือน และปรับปรุงเวลาการเข้าสู่สถานะคงที่ได้ดีกว่า PID แบบดั้งเดิม นอกจากนี้ ตัวควบคุมยังแสดงความแข็งแกร่งในการรักษาเสถียรภาพของระบบภายใต้การ

โจมตีและความล่าช้าของเวลาสัญญาณ ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพของ HO ในการออกแบบตัวควบคุม สำหรับระบบพลังงานหมุนเวียนที่มีความไม่แน่นอนสูง

2.11.5 Rattapon Dulyala และคณะ [24] นำเสนอการพัฒนาตัวควบคุม Proportional-Integral-Derivative (PID) แบบ 2DOF-PID โดยใช้ Hippopotamus Optimization Algorithm (HOA) สำหรับการควบคุมความถี่และโหลด (Load Frequency Control - LFC) ในระบบโรงไฟฟ้าพลังความร้อนสองพื้นที่ (Two-Area Thermal Power System) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าและลดความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงโหลด พารามิเตอร์ของตัวควบคุม K_p , K_i และ K_d ถูกปรับโดยใช้ HOA เพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพของระบบผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบ Integral of Absolute Error (IAE) และ Integral of Time-weighted Absolute Error (ITAE) การทดลองใน MATLAB/SIMULINK บนระบบโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่มีกำลังผลิต 2,000 MW แสดงให้เห็นว่า HOA ช่วยลดค่าความผิดพลาดของ ITAE ได้ดีกว่า Sine-Cosine Algorithm (SCA) และ Whale Optimization Algorithm (WOA) ทั้งยังลดเวลาเข้าสู่สถานะคงที่ (Settling Time) และการสั่นสะเทือนของความถี่ในสายส่งระหว่างพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลการทดลองยืนยันศักยภาพของ HOA ในการเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนสูง



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะอธิบายถึงกระบวนการดำเนินงานวิจัยที่ใช้ในการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ ของระบบไฟฟ้าแบบไฮบริด PV-Reheat Thermal Power System โดยใช้ตัวควบคุม PID ที่ได้รับการปรับพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม Hippopotamus Optimization (HO) รายละเอียดในบทนี้จะครอบคลุมการสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า การออกแบบตัวควบคุมกรณีศึกษา และกระบวนการประเมินผลเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมที่นำเสนอ การจำลองและการประเมินผลในงานวิจัยนี้ดำเนินการผ่านซอฟต์แวร์ MATLAB® / SIMULINK ผ่านแล็ปท็อปที่มีระบบปฏิบัติการ Windows 11 Home โดยมีรายละเอียดฮาร์ดแวร์ดังนี้

หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel Core i9-13900HX (2.20 GHz – 5.40 GHz)

หน่วยความจำ (RAM) ขนาด 32 GB DDR5 – 5600 MHz

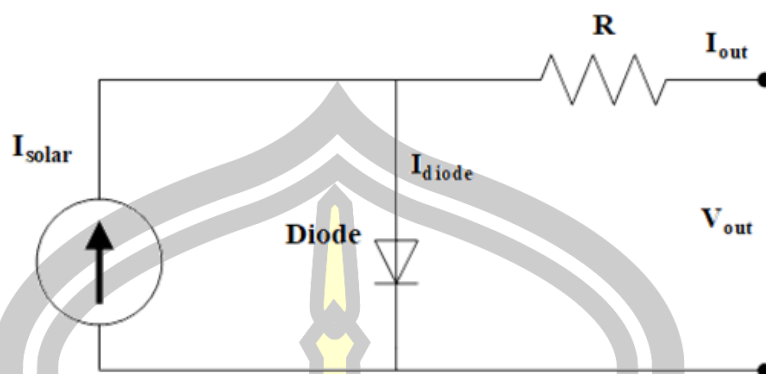
การ์ดจอ (GPU) NVIDIA GeForce RTX 4060 Laptop 8 GB

3.1 แบบจำลองระบบไฟฟ้าแบบไฮบริด PV-Reheat Thermal Power System

ระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาการควบคุมการผลิตไฟฟ้าอัตโนมัติ เป็นระบบไฮบริดแบบสองพื้นที่ โดยประกอบด้วยระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (PV) และระบบพลังงานความร้อนแบบรีฮีท (Reheat Thermal Power System) ที่ทำงานร่วมกัน ในโครงสร้างการจ่ายพลังงาน ระบบ PV จะถูกวางไว้ในพื้นที่ที่ 1 (Area-1) ขณะที่ระบบพลังงานความร้อนแบบรีฮีทจะตั้งอยู่ในพื้นที่ที่ 2 (Area-2)

3.1.1 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์

ระบบไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ที่ 1 (Area-1) กระบวนการพัฒนาแบบจำลองระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (PV System) เริ่มต้นด้วยการสร้างแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน โดยวงจรจำลองดังภาพประกอบที่ 8



ภาพประกอบ 8 วงจรของเซลล์แสงอาทิตย์

ประกอบด้วยตัวต้านทานอนุกรม (Series Resistor), ไดโอดชนิด p-n (Coupled p-n Diode) และแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า PV (PV Current Source) พลังงานแสงอาทิตย์ถูกแปลงเป็นกระแสไฟฟ้าผ่านแหล่งจ่ายกระแส PV โดยกระแสที่ผลิตขึ้นขึ้นกับความเข้มของรังสีแสงอาทิตย์ (Irradiance) และอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บเกี่ยวพลังงาน ระบบใช้กลไก Maximum Power Point Tracking (MPPT) ที่ช่วยให้แผงโซลาร์เซลล์ทำงานที่จุดกำลังสูงสุด นอกจากนี้ พลังงาน DC ที่ผลิตได้จะถูกแปลงเป็น AC ผ่านอินเวอร์เตอร์ เพื่อให้รองรับการใช้งานกับโหนดมาตรฐาน โดยฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบ PV ซึ่งรวมถึงกลไก MPPT, ตัวแปลงพลังงาน และตัวกรอง ได้รับการพัฒนาและอธิบายในสมการที่ (21)

$$G_{PV}(s) = \frac{-18s+900}{s^2+100s+50} \quad (21)$$

3.1.2 การสร้างแบบจำลองของระบบไฟฟ้าพลังงานความร้อน

ระบบไฟฟ้าพลังงานความร้อนในพื้นที่ที่ 2 (Area-2) ประกอบด้วยส่วนประกอบที่ซับซ้อน 4 ส่วน ได้แก่ ตัวควบคุมความเร็ว (Governor), กังหัน (Turbine), ระบบรีฮีท (Reheater) และระบบไฟฟ้า (Power System) โดยการใช้แนวทางเชิงปฏิบัติ เราได้พัฒนาแบบจำลองฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer Function Model) สำหรับระบบพลังงาน โดยถือว่าส่วนประกอบทั้งหมดเป็นระบบเชิงเส้น (Linear Entities) และแทนด้วยฟังก์ชันการถ่ายโอนระดับหนึ่ง (First-Order Transfer Functions) ฟังก์ชันการถ่ายโอนของตัวควบคุมความเร็ว (Governor) แสดงในสมการที่ (22) ซึ่ง K_g คือค่าขยายของตัวควบคุมความเร็ว (Governor Gain) และ T_g คือค่าคงที่เวลาของตัวควบคุมความเร็ว (Governor Time Constant)

$$G_g(s) = \frac{K_g}{s T_g + 1} \quad (22)$$

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของกังหัน (Turbine) แสดงในสมการ (23) โดยที่ K_t คือค่าขยายของกังหัน (Turbine Gain) และ T_t คือค่าคงที่เวลาของกังหัน (Turbine Time Constant)

$$G_t(s) = \frac{K_t}{s T_t + 1} \quad (23)$$

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบรีฮีท (Reheater) แสดงในสมการ (24) โดยที่ K_r คือค่าขยายของระบบรีฮีท (Reheater Gain) และ T_r คือค่าคงที่เวลาของระบบรีฮีท (Reheater Time Constant)

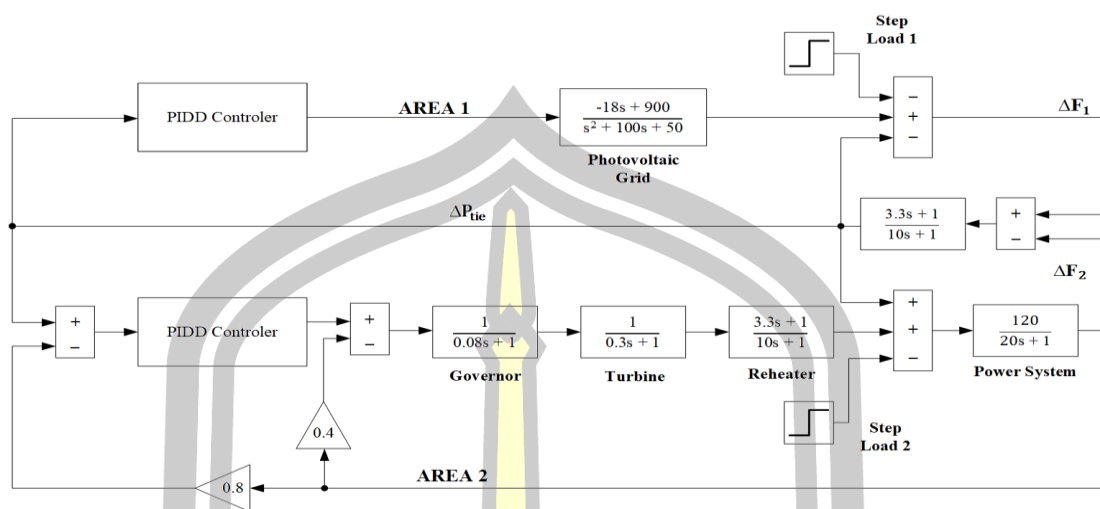
$$G_r(s) = \frac{s K_r T_r + 1}{s T_r + 1} \quad (24)$$

ฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบไฟฟ้า (Power System) ในพื้นที่ที่ 2 แสดงในสมการ (25) โดยที่ K_{ps} คือค่าขยายของระบบไฟฟ้า (Power System Gain) และ T_{ps} คือค่าคงที่เวลาของระบบไฟฟ้า (Power System Time Constant)

$$G_{ps}(s) = \frac{K_{ps}}{s T_{ps} + 1} \quad (25)$$

นอกจากนี้ สมการ (26) ใช้คำนวณข้อผิดพลาดของการควบคุมพื้นที่ (Area Control Error - ACE) สำหรับพื้นที่ i โดยพิจารณาตัวแปรสำคัญ เช่น พารามิเตอร์ชดเชยความถี่ Frequency Bias Parameter (B) การเบี่ยงเบนของความถี่ในพื้นที่ i (Δf_i) และการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง (ΔP_{tie})

$$ACE_i = B \Delta f_i + \Delta P_{tie} \quad (26)$$



ภาพประกอบ 9 แบบจำลองระบบไฟฟ้าสองพื้นที่แบบไฮบริด PV – Reheat

โดยมีค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 1

ตาราง 1 ตารางพารามิเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้าสองพื้นที่แบบไฮบริด PV – Reheat

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
K_{ps}	120 Hz
T_{ps}	20s
K_r	0.33 Hz
$2\pi T_{12}$	0.545 pu.MW / Hz
T_r	10s
T_g	0.08s
T_t	0.3s
B	0.8 pu.MW / Hz
R	2.5 Hz / pu.MW

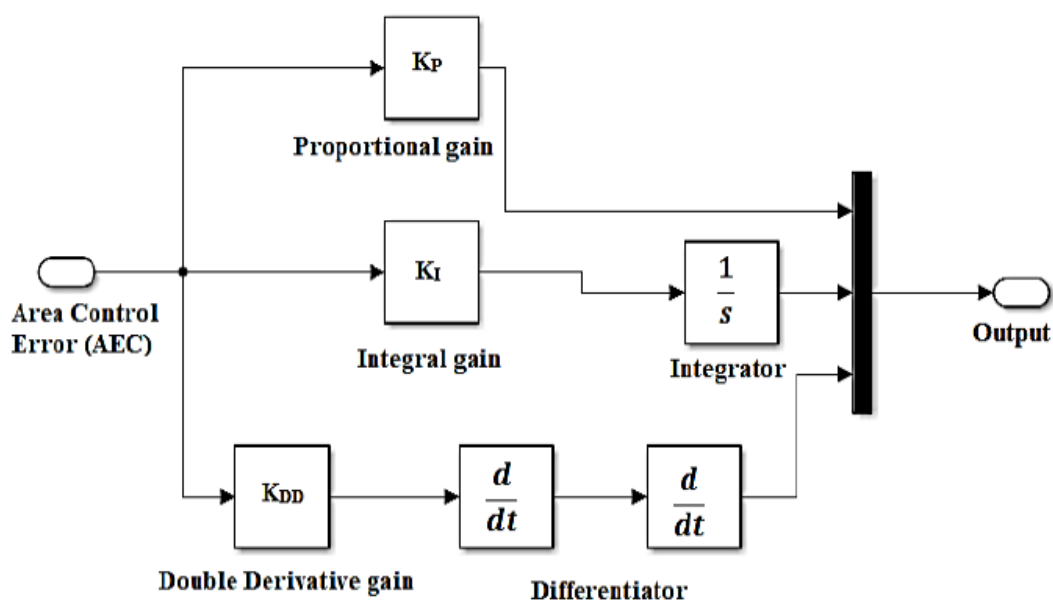
3.2 การออกแบบตัวควบคุม PIDD

ตัวควบคุม Proportional-Integral with Double Derivative (PIDD) เป็นการพัฒนาต่อจากตัวควบคุม PI แบบดั้งเดิม โดยมีการเพิ่มส่วนอนุพันธ์ลำดับสอง (Double Derivative) เพื่อช่วย

ปรับปรุงประสิทธิภาพการตอบสนองเชิงพลวัต (Dynamic Response) โดยเฉพาะในระบบที่มีความซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิกสูง ตัวควบคุมนี้เหมาะสำหรับการลดปัญหาการสั่นสะเทือน (Oscillation) และการกระชาก (Overshoot) ซึ่งเป็นข้อจำกัดของตัวควบคุม PI แบบดั้งเดิม

สมการพื้นฐานของตัวควบคุม PID มีลักษณะดังนี้

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_{dd} \frac{d^2 e(t)}{dt^2} \quad (27)$$



ภาพประกอบ 10 โครงสร้างของตัวควบคุม PID [22]

การใช้อัลกอริทึมเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic Algorithms) ในการหาค่า Gain สำหรับตัวควบคุม มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับระบบที่ซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากระบบเหล่านี้มักมีพฤติกรรมที่ไม่เชิงเส้นและมีพลวัตสูง อัลกอริทึมเหล่านี้ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถสำรวจพื้นที่การค้นหาได้ทั่วถึง ลดโอกาสการติดอยู่ในค่า Local Optima นอกจากนี้ อัลกอริทึมยังช่วยลดเวลาและความซับซ้อนในการปรับค่าพารามิเตอร์เมื่อเทียบกับวิธีดั้งเดิม เช่น Ziegler-Nichols Method และช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพ

ของระบบ เช่น ลด Overshoot, Undershoot, และเวลาการตอบสนองเข้าสู่สถานะคงที่ ทำให้ตัวควบคุมสามารถตอบสนองได้ดีขึ้นและเพิ่มเสถียรภาพให้กับระบบ

โดยการทดลองนี้ทำการทดลองทั้งหมด 4 อัลกอริทึม ได้แก่

1. อัลกอริทึมการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค (Particle Swarm Optimization)
2. อัลกอริทึมวัฏจักรของน้ำ (Water Cycle Algorithm)
3. อัลกอริทึมของหมาป่าสีเทา (Grey Wolf Optimizer)
4. อัลกอริทึมของฮิปโปโปเตมัส (Hippopotamus Optimization Algorithm)

โดยทั้ง 2 กรณี จะต้องดำเนินการด้วยพารามิเตอร์ดังนี้

ตาราง 2 ตารางพารามิเตอร์ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
จำนวนรอบการรัน	10
จำนวนประชากร	50
จำนวนรอบการวนซ้ำ	50
ขอบเขตล่าง	-3
ขอบเขตบน	3

3.3 กรณีศึกษา

1. การเปลี่ยนแปลงโหลดแบบขั้น (Step Load Change)

- โหลดในพื้นที่ที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงแบบขั้น เช่น เพิ่มขึ้น 10% ($\Delta P_{D1} = 0.1\text{pu}$)

2. การเปลี่ยนแปลงพร้อมกันในหลายพื้นที่

- โหลดในพื้นที่ที่ 1 และ 2 เปลี่ยนแปลงพร้อมกัน (ΔP_{D1} และ $\Delta P_{D2} = 0.1\text{pu}$)

นำเอากรณีศึกษาทั้ง 2 กรณี มาใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบต่อความถี่ (ΔP_{D1} ΔP_{D2}) และกำลังไฟฟ้าผ่านสายส่ง (ΔP_{tie})

3.4 ประเมินผลการทดลองโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในการประเมินผลการทดลองของตัวควบคุม PID ที่ปรับพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม Hippopotamus Optimization (HO) ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หลายรูปแบบเพื่อวัดผลการตอบสนองของระบบในมิติที่หลากหลาย ฟังก์ชันเหล่านี้ช่วยในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของตัวควบคุมทั้งในเชิงเวลาและความรุนแรงของข้อผิดพลาด ซึ่งแต่ละฟังก์ชันมีจุดเด่นเฉพาะตัวในการวัดประสิทธิภาพของระบบ ได้แก่

1. ปริพันธ์ค่าความผิดพลาดสมบูรณ์ (Integral Absolute Error – IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (28)$$

2. ปริพันธ์ค่าความผิดพลาดสมบูรณ์คูณด้วยเวลา (Integral Time Absolute Error – ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t \cdot |e(t)| dt \quad (29)$$

3. ปริพันธ์ค่าความผิดพลาดกำลังสอง (Integral Squared Error – ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt \quad (30)$$

4. ปริพันธ์ค่าความผิดพลาดกำลังสองคูณด้วยเวลา (Integral Time Squared Error – ITSE)

$$ITSE = \int_0^{\infty} t \cdot e(t)^2 dt \quad (31)$$

นอกจากการประเมินผลโดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้ว ยังได้ทำการบันทึกค่าตัวชี้วัดเพิ่มเติม ได้แก่ Rise Time, Overshoot, Undershoot, และ Settling Time เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลการตอบสนองของตัวควบคุม PID

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้เสนอผลการทดลองในบทนี้จะนำเสนอผลการทดลองที่ได้จากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID โดยใช้อัลกอริทึม 4 แบบ ได้แก่ HO, PSO, WCA และ GWO นอกจากนี้ยังเสนอผลลัพธ์การตอบสนองของระบบ โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 4 ตัว คือ IAE, ITAE, ISE และ ITSE โดยรูปแบบการทดลองแบ่งออกเป็น 2 กรณีศึกษา ได้แก่ กรณีศึกษาที่ 1 การเปลี่ยนโหลดในพื้นที่ที่ 2 เพียงอย่างเดียว และ กรณีศึกษาที่ 2 การเปลี่ยนโหลดพร้อมกันทั้งพื้นที่ที่ 1 และ 2 โดยแต่ละกรณีจะวิเคราะห์ผลแยกตามอัลกอริทึมที่ใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ โดยจะแสดงผลการทดลองในรูปของแผนภูมิแท่ง (Bar Plot) แผนภาพกล่อง (Box Plot) กราฟการลู่เข้า (Convergence Curve) กราฟการตอบสนองของระบบ (Δf_1 , Δf_2 , ΔP_{tie}) และตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับจูน

4.1 กรณีศึกษาที่ 1 การเปลี่ยนโหลดในพื้นที่ที่ 2

การทดลองในกรณีศึกษานี้เป็นการจำลองสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงโหลดขนาด 0.1 pu ที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่ 2 (Area-2) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ประกอบด้วยโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแบบรีฮีต (Reheat Thermal Power System) จุดประสงค์ของการเปลี่ยนโหลดในลักษณะนี้คือเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมความถี่เมื่อเกิดความไม่สมดุลระหว่างการผลิตและการใช้พลังงานในพื้นที่ ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมทั้ง 2 ตัว ที่ได้จากการทดลอง สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 3 แยกตามอัลกอริทึมได้ดังนี้

ตาราง 3 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ได้จากการปรับจูน โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE, ITAE, ISE และ ITSE ในกรณีศึกษาที่ 1

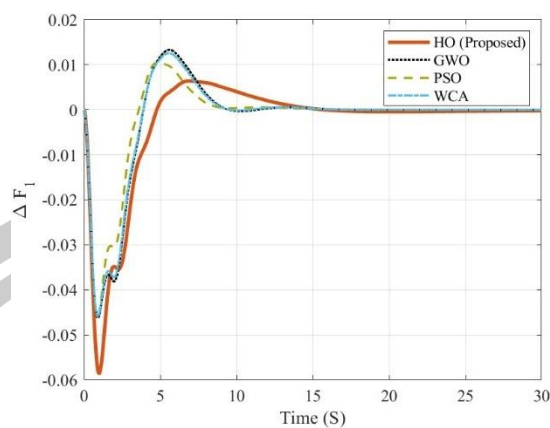
อัลกอริทึม		K_{p1}	K_{i1}	K_{dd1}	K_{p2}	K_{i2}	K_{dd2}
HO	IAE	-0.0394	-0.0085	-0.0166	-0.8688	-1.2863	-1.5013
	ITAE	-0.0750	-0.0126	-0.2011	-1.3272	-1.8173	-1.4406
	ISE	-0.154	-0.0034	-0.1349	-2.1069	-1.8195	-2.3144
	ITSE	-0.0515	-0.0110	-0.1486	-1.3700	-2.1785	-2.0801

อัลกอริทึม		K_{p1}	K_{i1}	K_{dd1}	K_{p2}	K_{i2}	K_{dd2}
PSO	IAE	-0.0400	-0.0137	0.0311	-0.3966	-2.4482	-2.8273
	ITAE	-0.5689	-0.0452	-1.5179	-1.6831	-3	-1.3400
	ISE	0.0061	-0.0014	0.1650	-2.3270	-1.3955	-3
	ITSE	-0.0238	-0.0078	0.0379	-0.7594	-2.0086	-2.8542
WCA	IAE	-0.0400	-0.0133	0.0255	-0.4153	-2.0853	-2.9995
	ITAE	-0.5527	-0.0440	-1.4749	-1.6616	-3	-1.2634
	ISE	-0.0303	-0.0060	0.0559	-1.4749	-3	-3
	ITSE	-0.0296	-0.0091	0.0539	-0.6423	-2.1263	-3
GWO	IAE	-0.0434	-0.0133	0.0267	-0.4224	-2.0696	-3
	ITAE	-0.5022	-0.0412	-1.2411	-1.5521	-3	-1.1908
	ISE	-0.0019	-0.0012	0.1242	-2.0703	-1.2105	-3
	ITSE	-0.0277	-0.0086	0.0566	-0.7170	-2.0682	-3

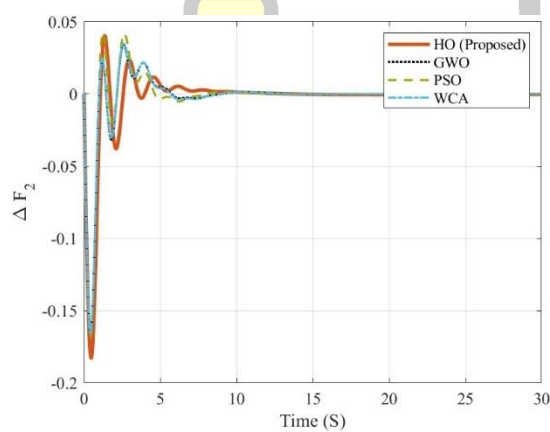
ตารางนี้แสดงค่าของพารามิเตอร์ K_p , K_i , และ K_{dd} สำหรับพื้นที่ที่ 1 และ 2 ที่ได้จากการปรับจูนตัวควบคุม PID ด้วยอัลกอริทึม HO, PSO, WCA และ GWO โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 4 แบบ ได้แก่ IAE, ITAE, ISE และ ITSE เพื่อประเมินประสิทธิภาพในแต่ละกรณี

ภาพประกอบที่ 11-22 แสดงการตอบสนองของระบบไฟฟ้าสองพื้นที่ภายใต้กรณีที่มีการเปลี่ยนโหลดในพื้นที่ที่ 2 โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยอัลกอริทึม HO, PSO, WCA และ GWO โดยประเมินผลผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 4 รูปแบบ ได้แก่ IAE (ภาพที่ 11-13) ITAE (ภาพที่ 14-16) ISE (ภาพที่ 17-19) และ ITSE (ภาพที่ 20-22) ซึ่งแสดงผลการตอบสนองของความถี่ในพื้นที่ที่ 1 (Δf_1), พื้นที่ที่ 2 (Δf_2) และการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าผ่านสายเชื่อมโยงระหว่างพื้นที่ (ΔP_{tie}) ตามลำดับ

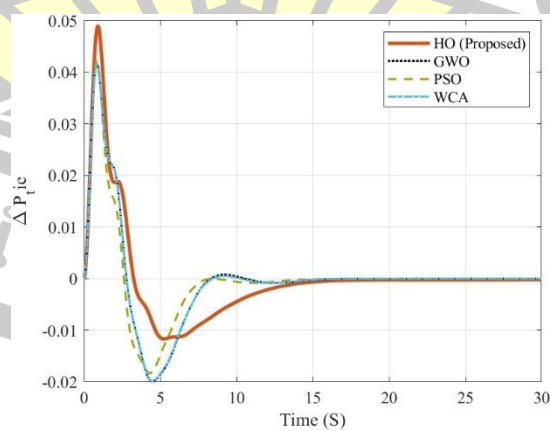
พหุ ประสิทธิภาพ



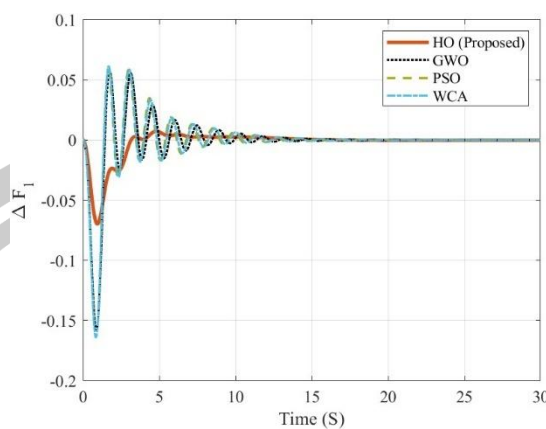
ภาพประกอบ 11 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2



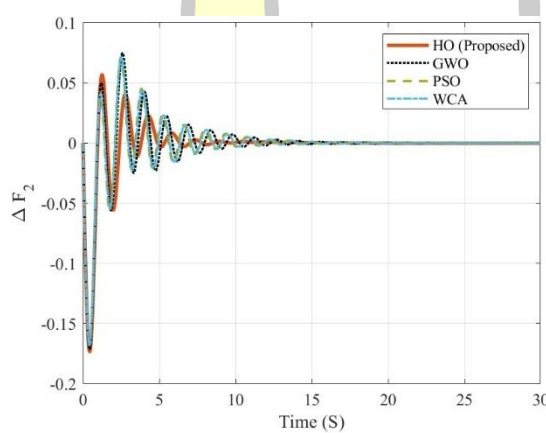
ภาพประกอบ 12 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2



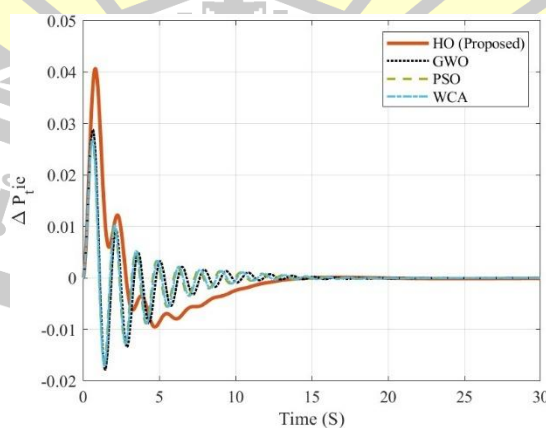
ภาพประกอบ 13 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2



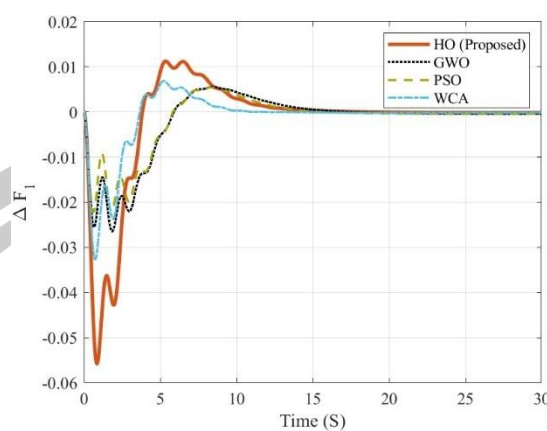
ภาพประกอบ 14 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2



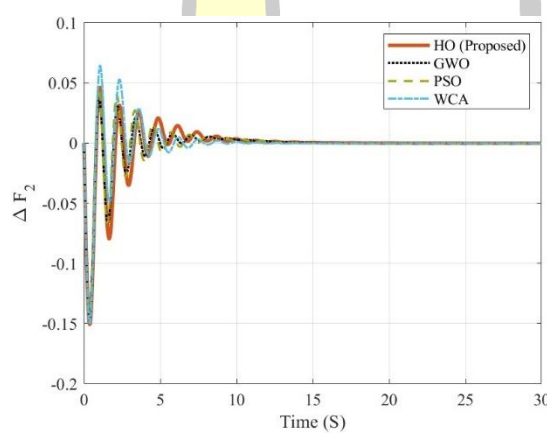
ภาพประกอบ 15 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2



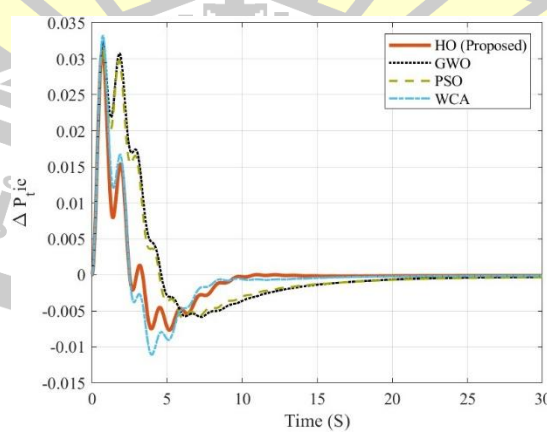
ภาพประกอบ 16 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2



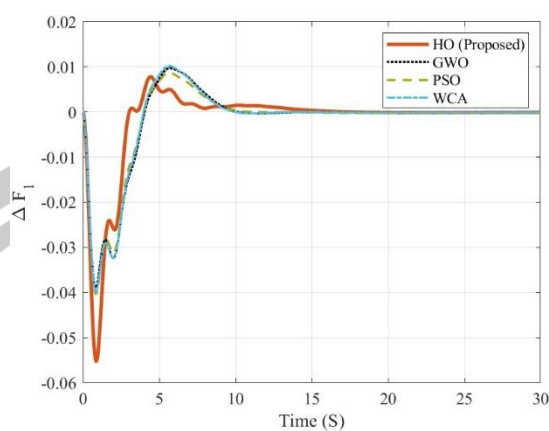
ภาพประกอบ 17 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2



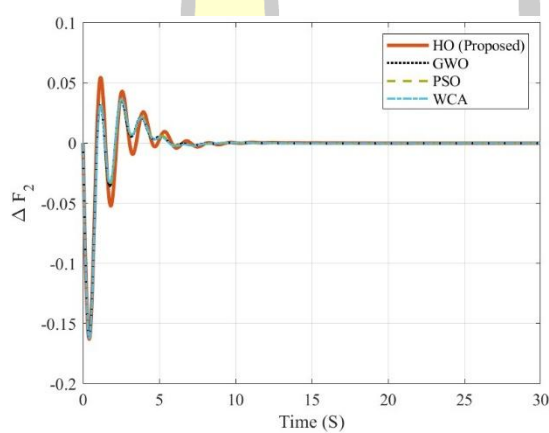
ภาพประกอบ 18 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2



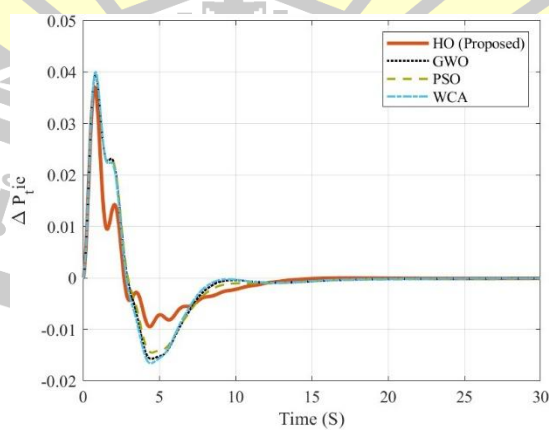
ภาพประกอบ 19 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2



ภาพประกอบ 20 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2



ภาพประกอบ 21 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2



ภาพประกอบ 22 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดที่ Area-2

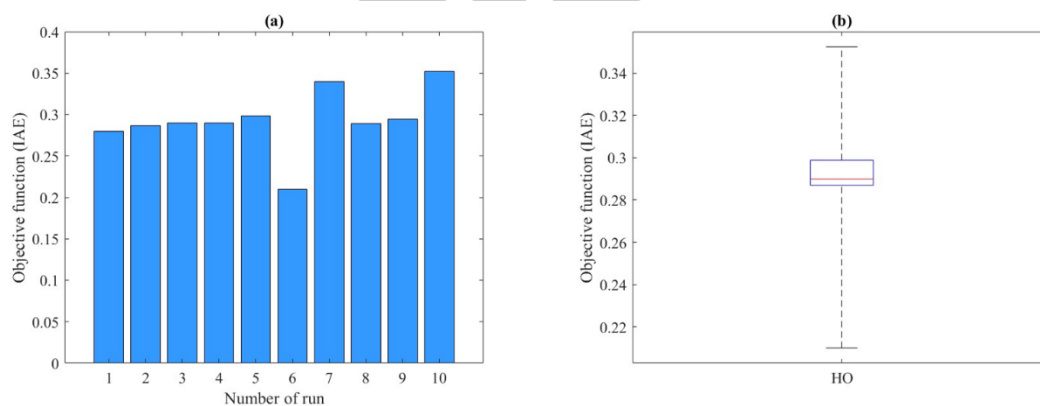
ตาราง 4 ค่าตัวชี้วัดของระบบกรณีสึกษาที่ 1 (Settling Time, Overshoot, Undershoot)

อัลกอริทึม		ΔF_1			ΔF_2			ΔP_{tie}		
		ST _(s)	OS	US ₍₋₎	ST _(s)	OS	US ₍₋₎	ST _(s)	OS	US ₍₋₎
HO	IAE	28.582	0.006	0.059	28.452	0.040	0.183	28.249	0.049	0.012
	ITAE	28.897	0.007	0.070	28.903	0.057	0.173	29.174	0.041	0.009
	ISE	25.244	0.011	0.056	24.877	0.046	0.151	24.338	0.031	0.008
	ITSE	28.857	0.008	0.055	28.751	0.055	0.163	28.925	0.037	0.009
PSO	IAE	29.143	0.010	0.046	29.034	0.042	0.168	28.991	0.042	0.018
	ITAE	29.877	0.059	0.164	29.956	0.071	0.167	29.381	0.026	0.017
	ISE	21.251	0.005	0.022	25.599	0.047	0.142	27.013	0.031	0.006
	ITSE	28.444	0.009	0.040	28.469	0.036	0.163	28.452	0.040	0.014
WCA	IAE	29.634	0.013	0.046	29.496	0.035	0.166	28.930	0.042	0.020
	ITAE	29.938	0.061	0.164	29.726	0.071	0.168	29.756	0.027	0.017
	ISE	27.624	0.007	0.033	27.736	0.064	0.150	27.903	0.033	0.011
	ITSE	28.610	0.010	0.040	28.664	0.037	0.163	28.658	0.040	0.017
GWO	IAE	29.036	0.013	0.046	28.749	0.034	0.166	29.126	0.042	0.020
	ITAE	29.808	0.057	0.158	29.948	0.074	0.171	29.249	0.029	0.018
	ISE	23.091	0.006	0.026	19.592	0.038	0.145	26.734	0.032	0.006
	ITSE	28.533	0.010	0.039	28.603	0.036	0.162	28.598	0.040	0.016

พหุ ประสิทธิภาพ

4.1.1 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมฮิปโปโปแตมัส

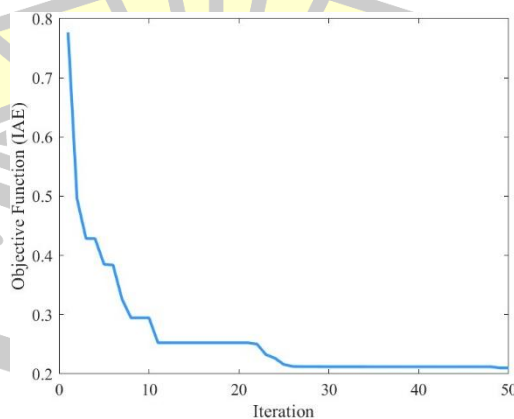
- IAE



ภาพประกอบ 23 (a) ค่า IAE จากการทดลอง HO 10 รอบ

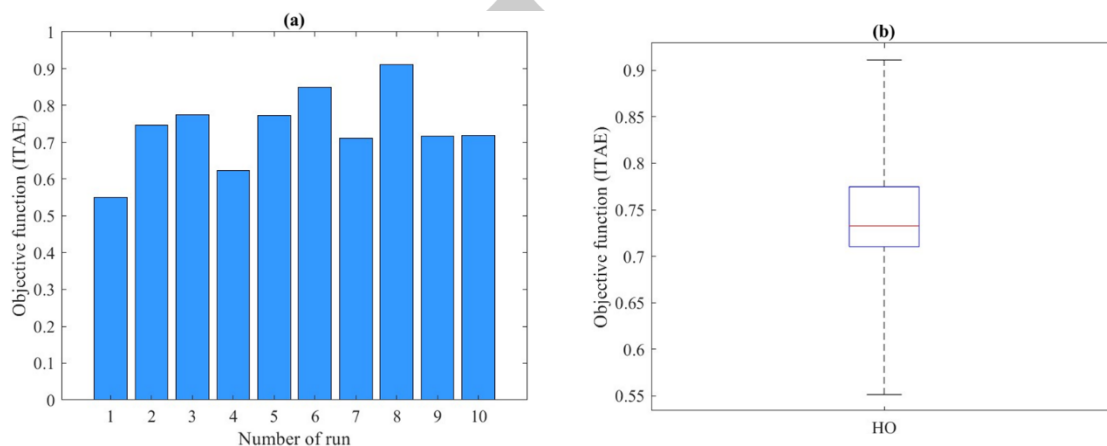
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง HO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 23 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE จากการทดลองรันอัลกอริทึม HO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าที่ได้มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.2100 – 0.3525 โดยมีค่าต่ำสุดอยู่ในรอบที่ 6 และค่าสูงสุดในรอบที่ 10 ขณะที่ภาพประกอบที่ 23 (b) เป็น Box plot ที่แสดงการกระจายตัวของค่า IAE จากทั้ง 10 ครั้ง โดยค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.2947 และ 0.2956 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 24 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 24 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด

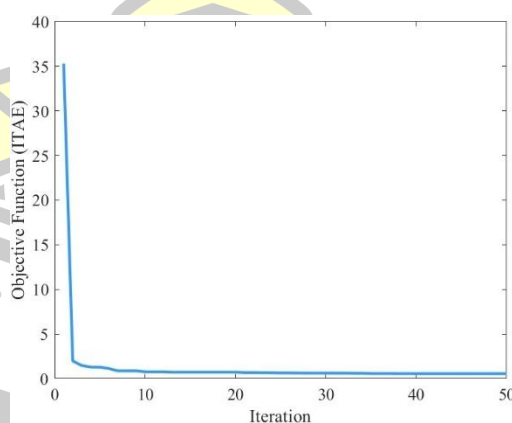
- ITAE



ภาพประกอบ 25 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง HO 10 รอบ

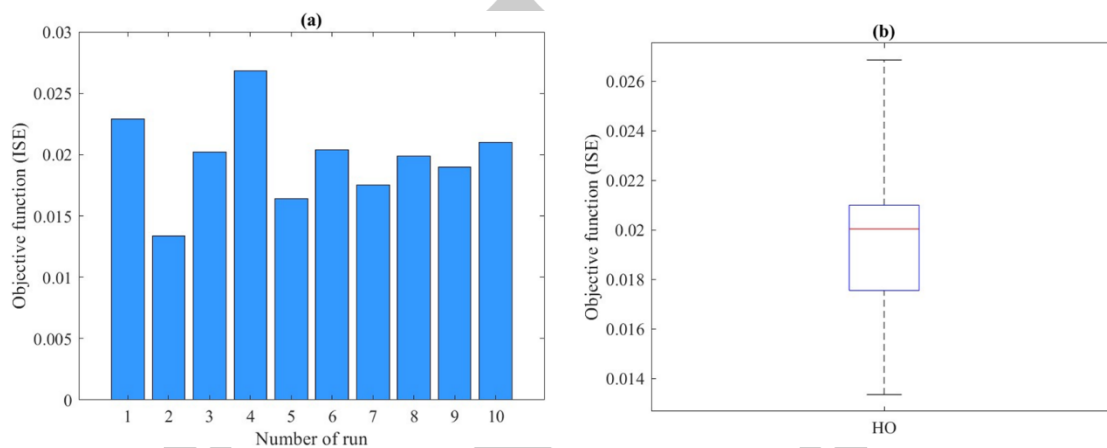
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง HO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 25 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE จากการรันอัลกอริทึม HO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.5512 ถึง 0.9111 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 1 และค่าสูงสุดในรอบที่ 8 ส่วนภาพประกอบที่ 25 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.7183 และ 0.7595 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 26 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด

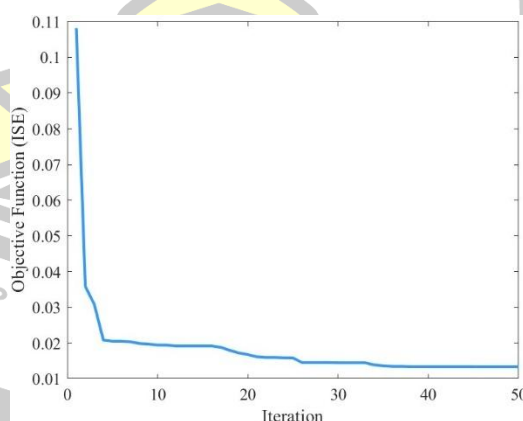
- ISE



ภาพประกอบ 27 (a) ค่า ISE จากการทดลอง HO 10 รอบ

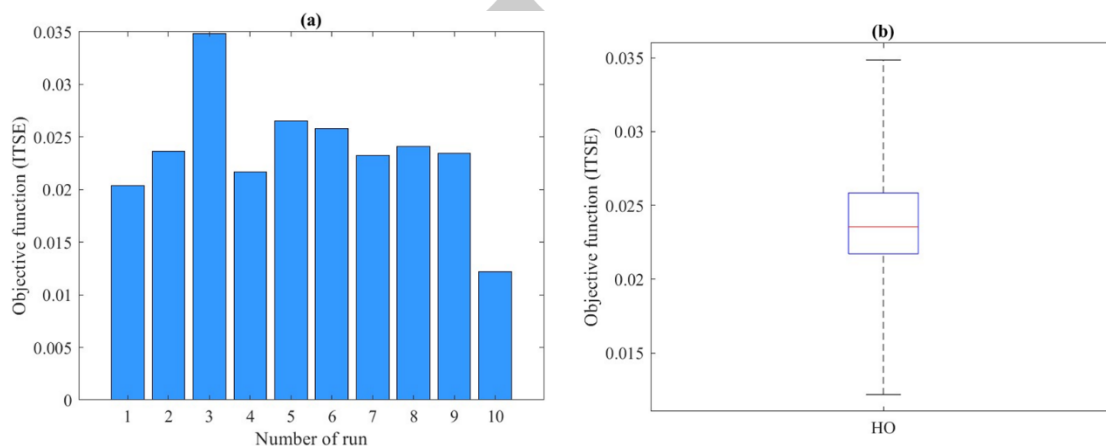
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง HO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 27 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE จากการรันอัลกอริทึม HO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0133 ถึง 0.0269 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 2 และค่าสูงสุดในรอบที่ 4 ส่วนภาพประกอบที่ 27 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ISE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0199 และ 0.0202 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 28 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด

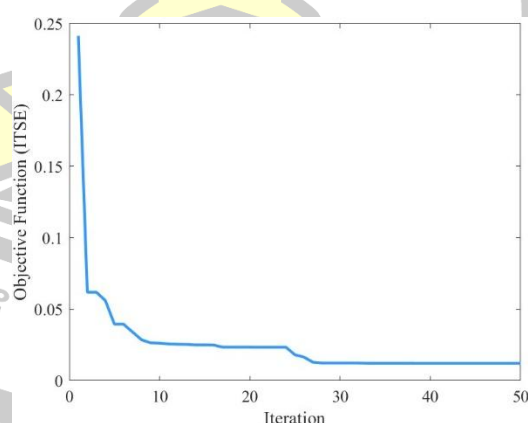
- ITSE



ภาพประกอบ 29 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง HO 10 รอบ

(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง HO 10 รอบ

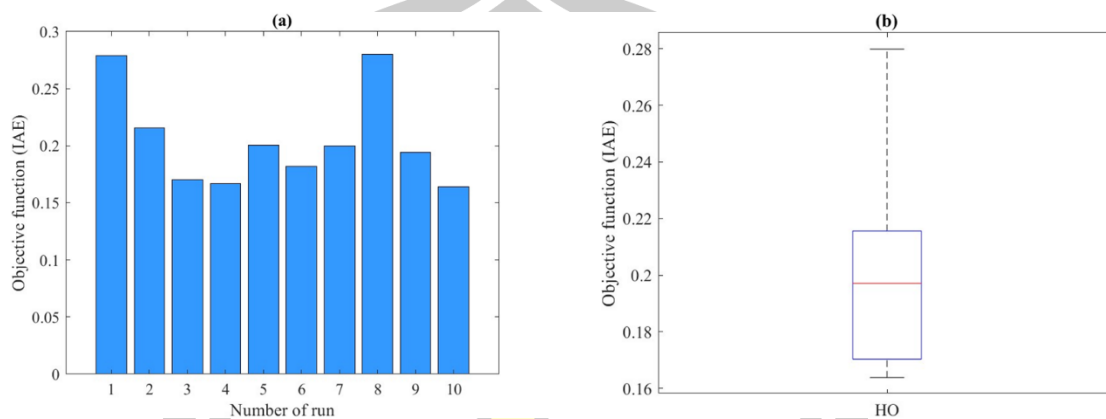
จากภาพประกอบที่ 29 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE จากการรันอัลกอริทึม HO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0122 ถึง 0.0349 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 10 และค่าสูงสุดในรอบที่ 3 ส่วนภาพประกอบที่ 29 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITSE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0234 และ 0.0240 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 30 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด

4.1.2 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค

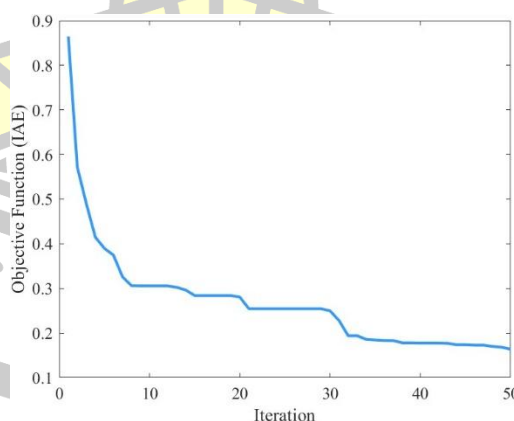
- IAE



ภาพประกอบ 31 (a) ค่า IAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

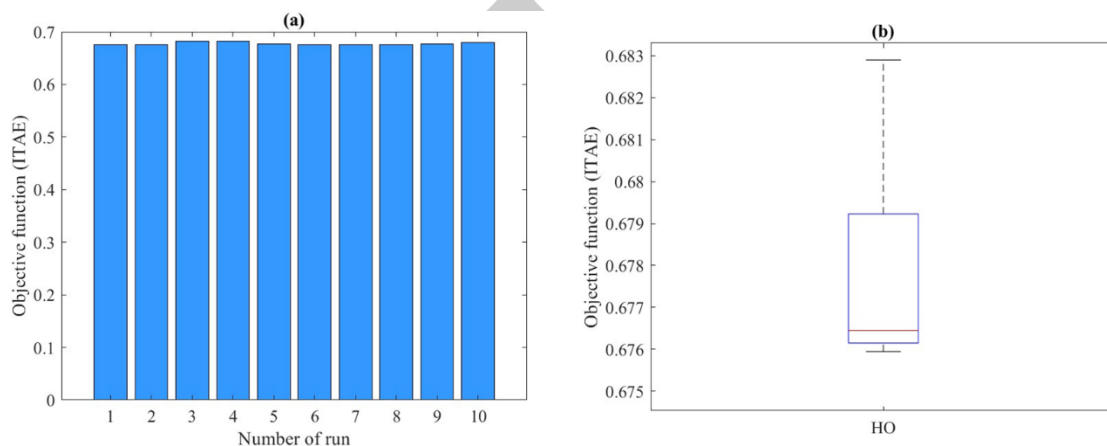
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 31 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE จากการรันอัลกอริทึม PSO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.1638 ถึง 0.2799 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 10 และค่าสูงสุดในรอบที่ 8 ส่วนภาพประกอบที่ 31 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า IAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.1944 และ 0.1947 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 32 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด

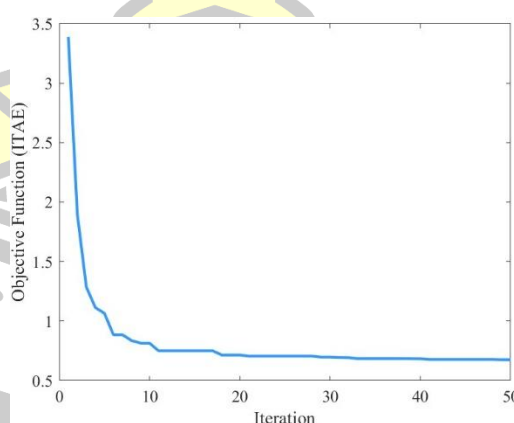
- ITAE



ภาพประกอบ 33 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

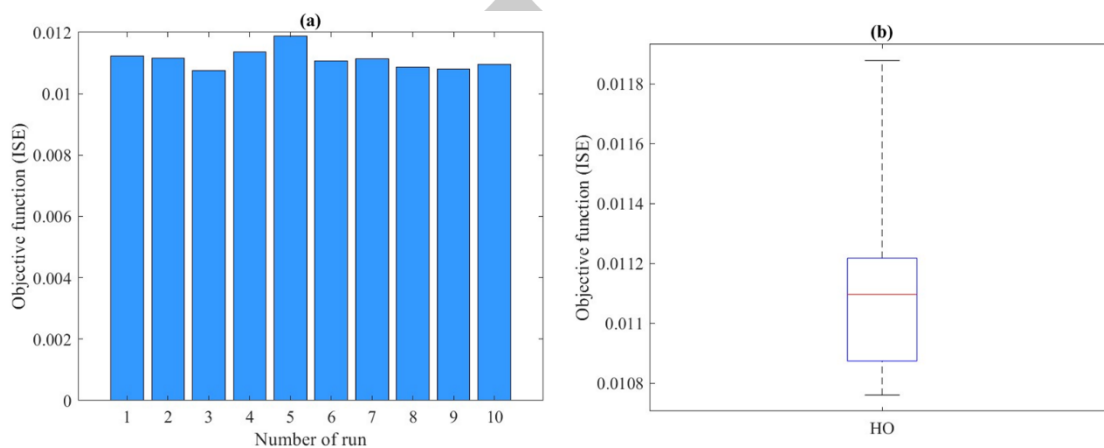
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 33 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE จากการรันอัลกอริทึม PSO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.6759 ถึง 0.6829 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 6 และค่าสูงสุดในรอบที่ 3 ส่วนภาพประกอบที่ 33 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.6765 และ 0.6784 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 34 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด

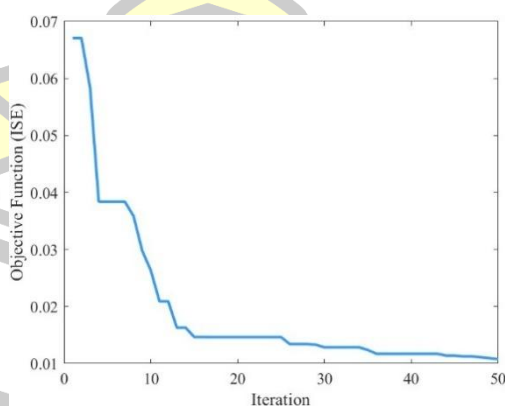
- ISE



ภาพประกอบ 35 (a) ค่า ISE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

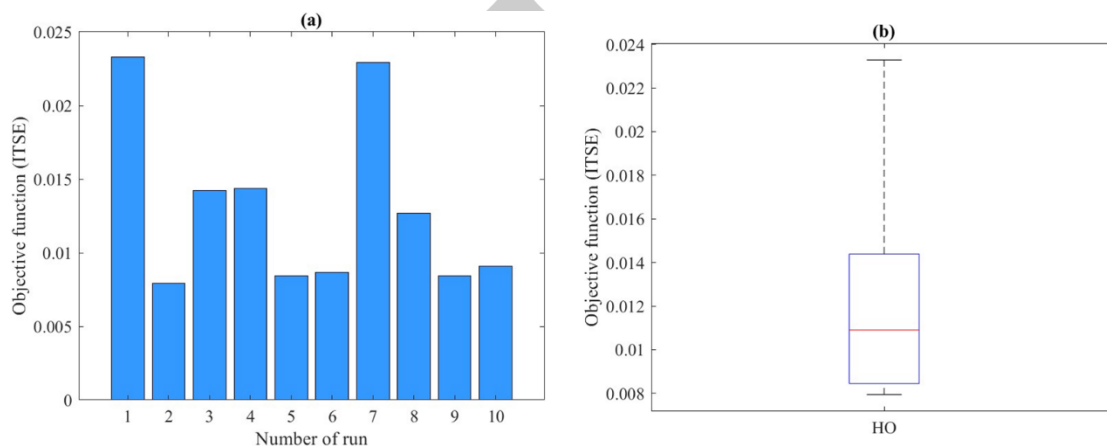
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 35 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE จากการรันอัลกอริทึม PSO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0108 ถึง 0.0119 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 3 และค่าสูงสุดในรอบที่ 5 ส่วนภาพประกอบที่ 35 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ISE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0111 และ 0.0111 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 36 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด

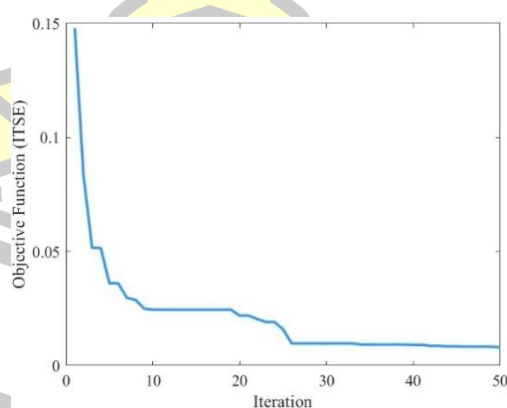
- ITSE



ภาพประกอบ 37 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

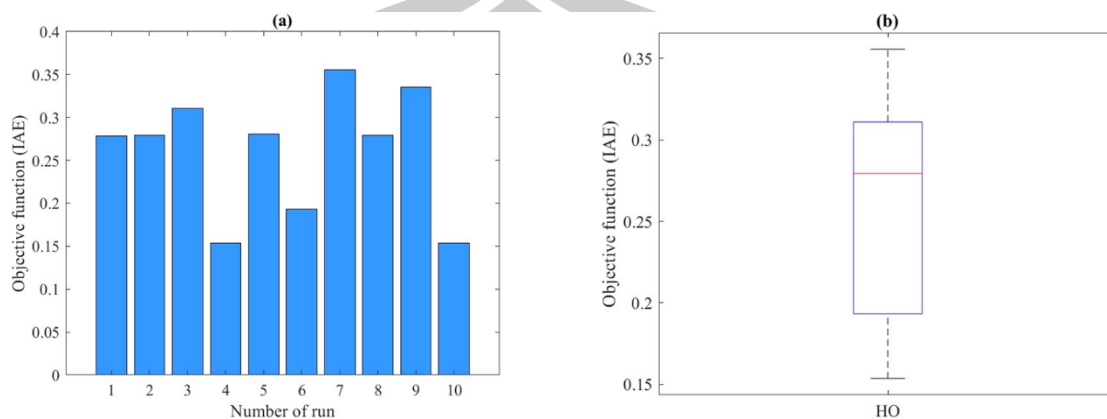
จากภาพประกอบที่ 37 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE จากการรันอัลกอริทึม PSO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0079 ถึง 0.0229 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 2 และค่าสูงสุดในรอบที่ 1 ส่วนภาพประกอบที่ 37 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITSE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0091 และ 0.0124 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 38 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด

4.1.3 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมวิวัฒนาการของน้ำ

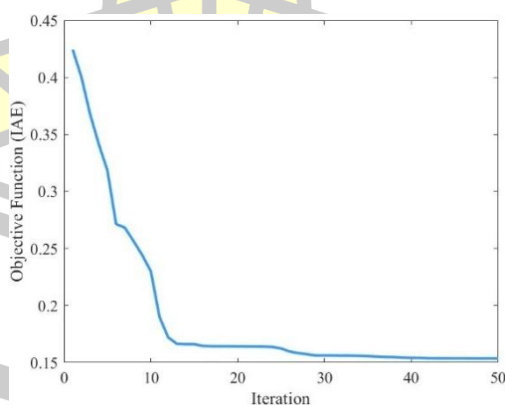
- IAE



ภาพประกอบ 39 (a) ค่า IAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

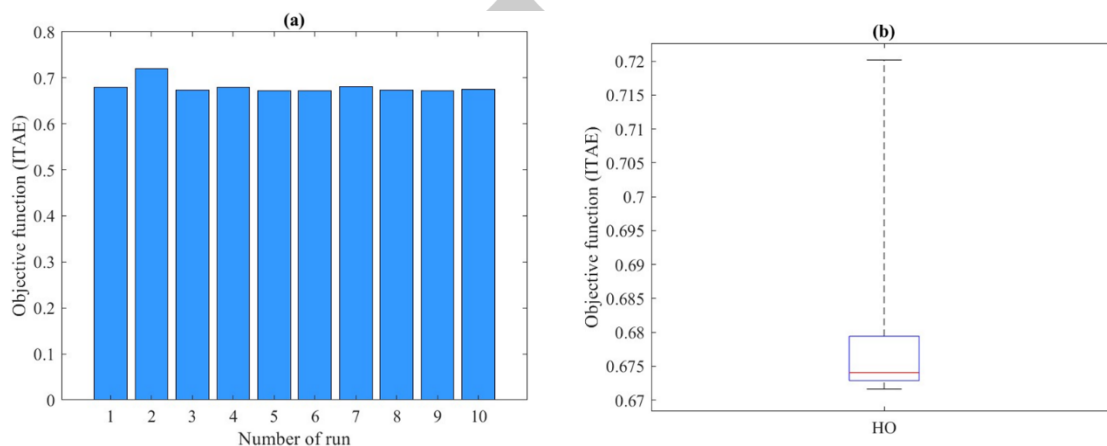
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 39 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE จากการรันอัลกอริทึม WCA จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.1535 ถึง 0.3557 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 10 และค่าสูงสุดในรอบที่ 7 ส่วนภาพประกอบที่ 39 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า IAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.2792 และ 0.2578 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 40 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด

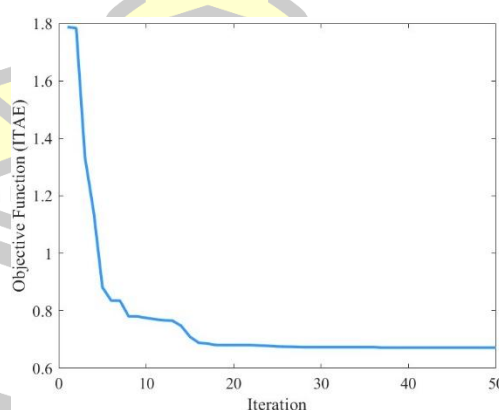
- ITAE



ภาพประกอบ 41 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

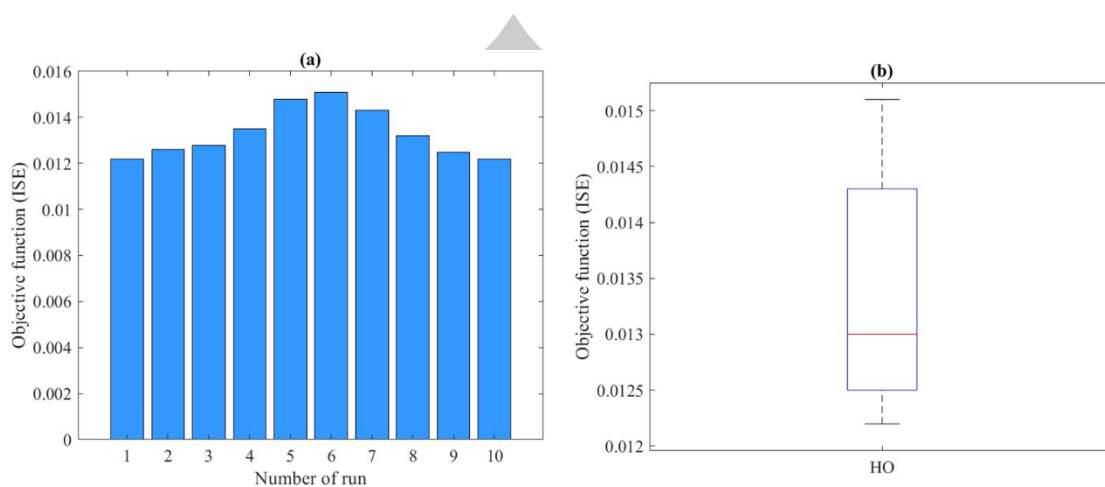
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 41 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE จากการรันอัลกอริทึม WCA จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.6716 ถึง 0.7202 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 9 และค่าสูงสุดในรอบที่ 2 ส่วนภาพประกอบที่ 41 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.6729 และ 0.6747 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 42 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด

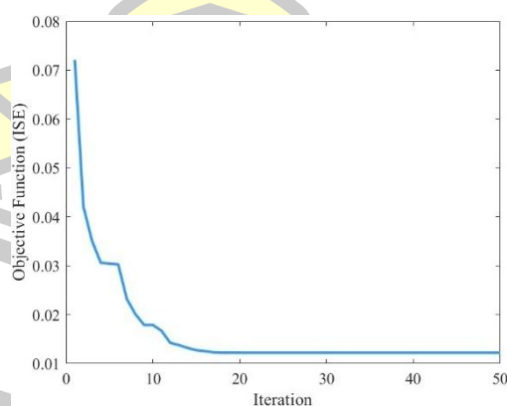
- ISE



ภาพประกอบ 43 (a) ค่า ISE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

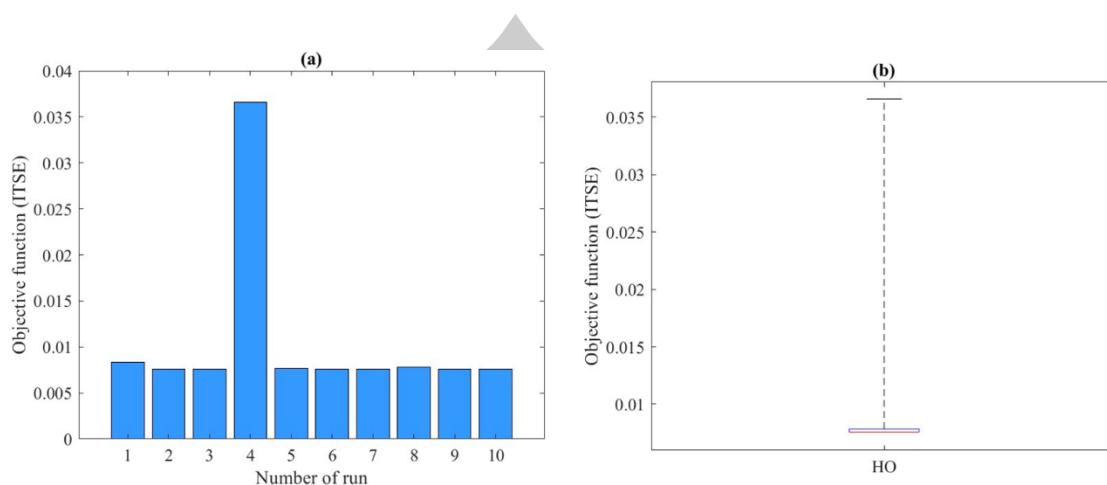
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 43 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE จากการรันอัลกอริทึม WCA จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0122 ถึง 0.0155 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 1 และค่าสูงสุดในรอบที่ 6 ส่วนภาพประกอบที่ 43 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ISE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0132 และ 0.0134 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 44 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด

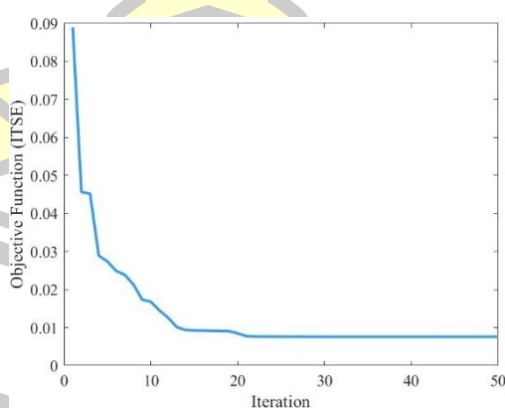
- ITSE



ภาพประกอบ 45 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

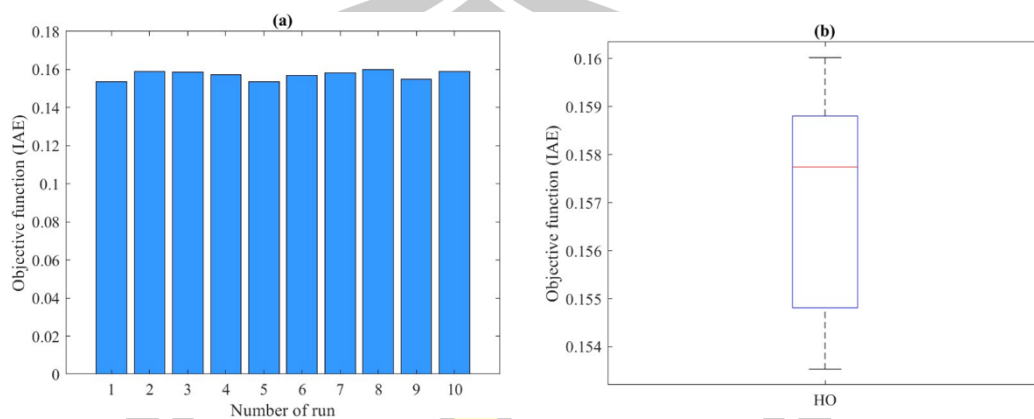
จากภาพประกอบที่ 45 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE จากการรันอัลกอริทึม WCA จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0076 ถึง 0.0366 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 7 และค่าสูงสุดในรอบที่ 4 ส่วนภาพประกอบที่ 45 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITSE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0076 และ 0.0112 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 46 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด

4.1.4 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมของหมาป่าสีเทา

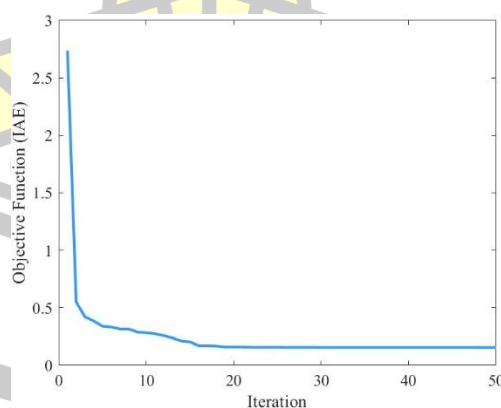
- IAE



ภาพประกอบ 47 (a) ค่า IAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

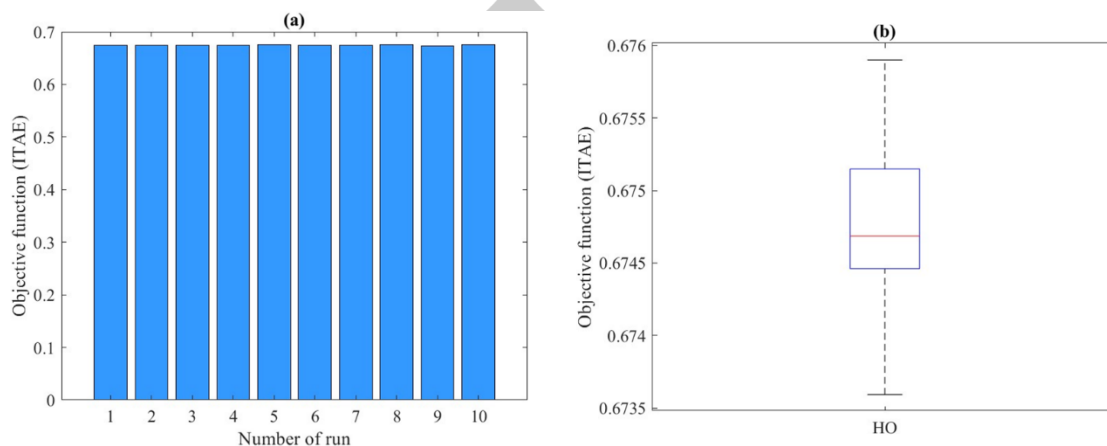
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 47 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE จากการรันอัลกอริทึม GWO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.1535 ถึง 0.1600 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 5 และค่าสูงสุดในรอบที่ 8 ส่วนภาพประกอบที่ 47 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า IAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.1573 และ 0.1573 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 48 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด

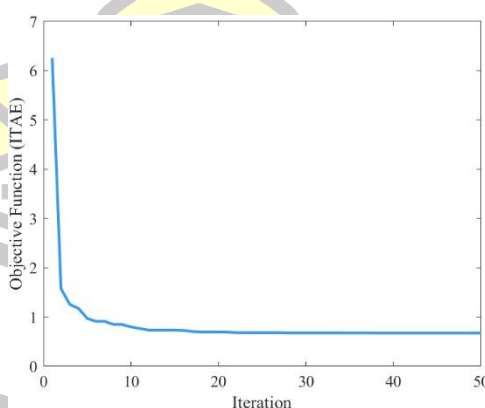
- ITAE



ภาพประกอบ 49 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

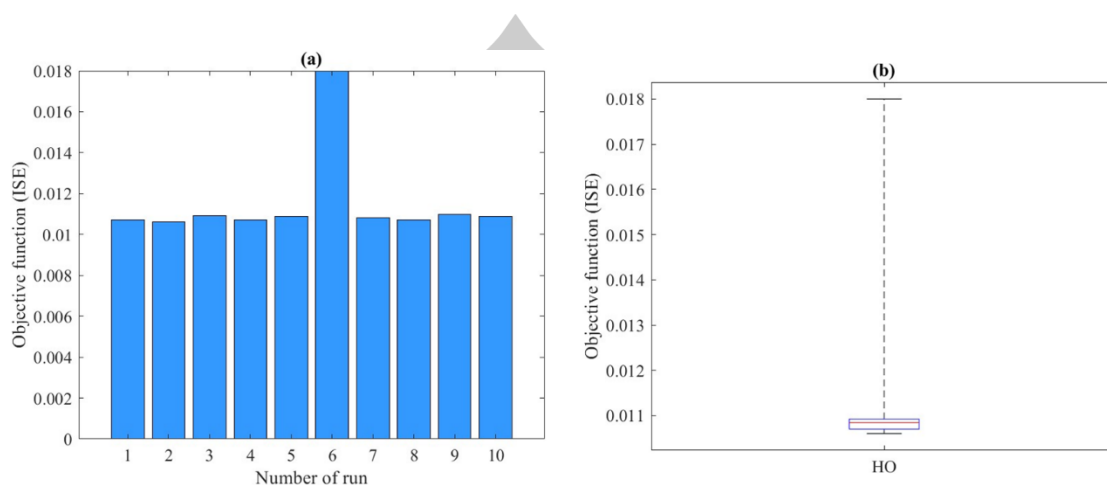
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 49 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE จากการรันอัลกอริทึม GWO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.6736 ถึง 0.6759 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 9 และค่าสูงสุดในรอบที่ 10 ส่วนภาพประกอบที่ 49 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.6746 และ 0.6748 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 50 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด

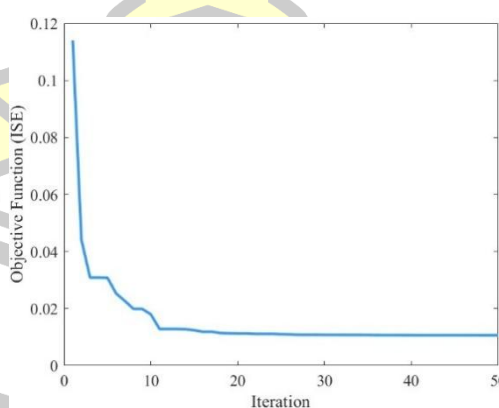
- ISE



ภาพประกอบ 51 (a) ค่า ISE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

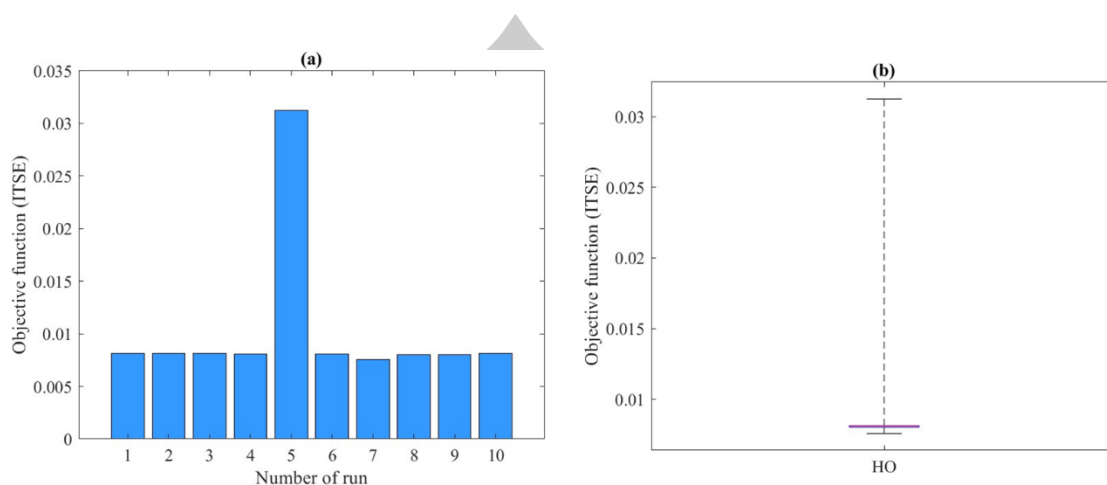
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 51 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE จากการรันอัลกอริทึม GWO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0106 ถึง 0.0180 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 2 และค่าสูงสุดในรอบที่ 6 ส่วนภาพประกอบที่ 51 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ISE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0110 และ 0.0122 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 52 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด

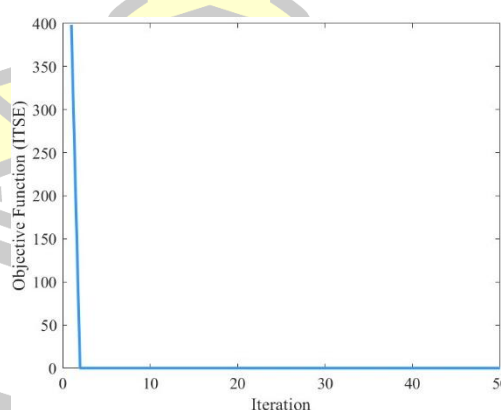
- ITSE



ภาพประกอบ 53 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 53 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE จากการรันอัลกอริทึม GWO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0076 ถึง 0.0313 โดยมีค่าต่ำที่สุดในรอบที่ 7 และค่าสูงสุดในรอบที่ 5 ส่วนภาพประกอบที่ 53 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITSE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0081 และ 0.0109 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 54 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด

4.2 กรณีศึกษาที่ 2 การเปลี่ยนโหลดพร้อมกันทั้งพื้นที่ที่ 1 และ 2

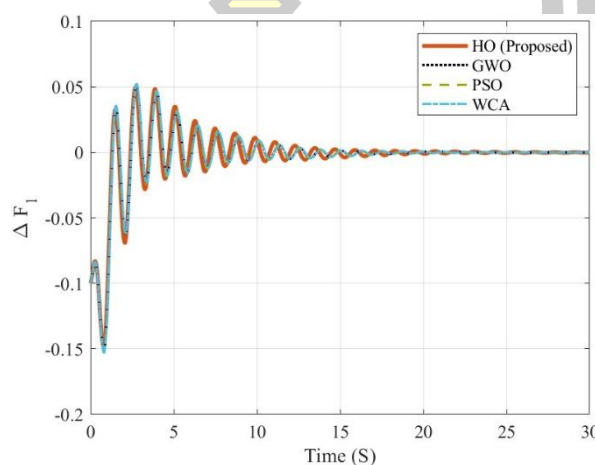
การทดลองในกรณีศึกษานี้เป็นการจำลองสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดขนาด 0.1 pu เกิดขึ้นพร้อมกันในพื้นที่ที่ 1 และพื้นที่ที่ 2 โดยจุดประสงค์ของการเปลี่ยนโหลดพร้อมกันในสองพื้นที่คือเพื่อทดสอบความสามารถของอัลกอริทึมในการควบคุมระบบภายใต้ภาวะที่มีความไม่สมดุลของโหลดแบบซับซ้อนมากขึ้น โดยระบบควบคุมจะต้องสามารถรักษาเสถียรภาพของความถี่ในแต่ละพื้นที่ และควบคุมการไหลของพลังงานผ่านสายเชื่อมโยง (tie-line) ให้มีความราบรื่นและรวดเร็ว ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4

ตาราง 5 ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ที่ได้จากการปรับจูน โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE, ITAE, ISE และ ITSE ในกรณีศึกษาที่ 2

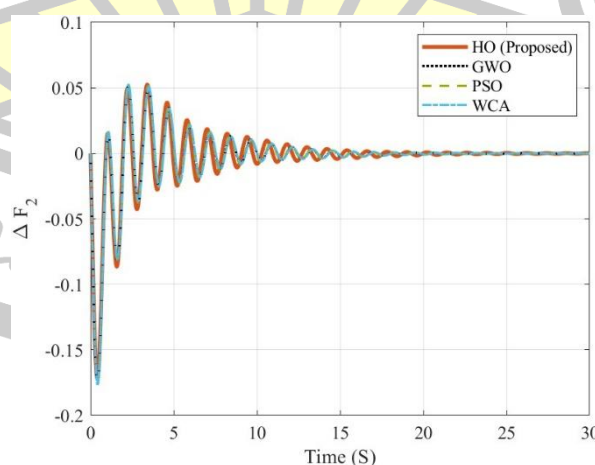
อัลกอริทึม		K_{p1}	K_{i1}	K_{dd1}	K_{p2}	K_{i2}	K_{dd2}
HO	IAE	-0.7092	-0.1124	-2.0454	-2.3385	-2.9437	-2.1433
	ITAE	-0.7745	-0.1588	-1.2559	-1.4400	-3	-1.2740
	ISE	-0.5254	-3	-2.5413	-3	-2.8013	-3
	ITSE	-0.7333	-0.1058	-1.9823	-2.3859	-3	-2.0391
PSO	IAE	-0.7019	-0.1183	-1.9353	-2.1890	-2.9995	-2.0182
	ITAE	-0.7900	-0.1610	-1.4096	-1.4764	-3	-1.3628
	ISE	-1.6130	-0.1097	-1.4694	-2.7967	-3	-3
	ITSE	-0.7001	-0.1016	-2.0830	-2.3500	-3	-2.2478
WCA	IAE	-0.7004	-0.1189	-1.9203	-2.1536	-3	-2.0047
	ITAE	-0.7803	-0.1589	-1.3753	-1.4691	-3	-1.3401
	ISE	-1.2365	-0.1099	-1.9008	-2.8631	-3	-2.9989
	ITSE	-0.6880	-0.1022	-2.0697	-2.3579	-3	-2.2361
GWO	IAE	-0.6977	-0.1197	-1.9262	-2.1570	-3	-2.0302
	ITAE	-0.7715	-0.1568	-1.3703	-1.406	-3	-3
	ISE	-0.4355	-3	-2.6291	-3	-2.7519	-3
	ITSE	-0.6820	-0.1007	-2.0542	-2.3483	-3	-2.2255

ตารางนี้แสดงค่าของพารามิเตอร์ K_p , K_i , และ K_{dd} สำหรับพื้นที่ที่ 1 และ 2 ที่ได้จากการปรับจูนตัวควบคุม PID ด้วยอัลกอริทึม HO, PSO, WCA และ GWO โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 4 แบบ ได้แก่ IAE, ITAE, ISE และ ITSE เพื่อประเมินประสิทธิภาพในแต่ละกรณี

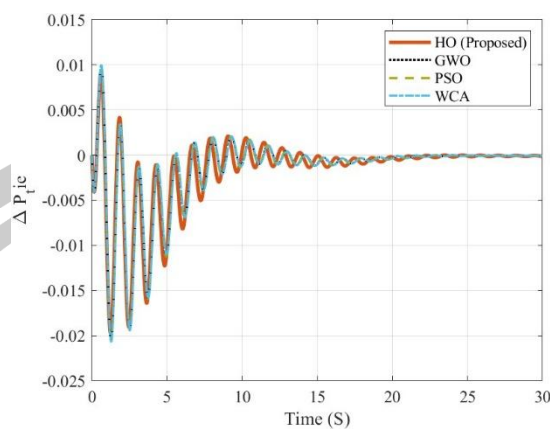
ภาพประกอบที่ 55–66 แสดงการตอบสนองของระบบไฟฟ้าสองพื้นที่ภายใต้กรณีที่มีการเปลี่ยนโหลดในทั้ง 2 พื้นที่ โดยเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยอัลกอริทึม HO, PSO, WCA และ GWO โดยประเมินผลผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ 4 รูปแบบ ได้แก่ IAE (ภาพที่ 55–57) ITAE (ภาพที่ 58–60) ISE (ภาพที่ 61–63) และ ITSE (ภาพที่ 64–66) ซึ่งแสดงผลการตอบสนองของความถี่ในพื้นที่ที่ 1 (Δf_1), พื้นที่ที่ 2 (Δf_2) และการเปลี่ยนแปลงของกำลังไฟฟ้าผ่านสายเชื่อมโยงระหว่างพื้นที่ (ΔP_{tie}) ตามลำดับ



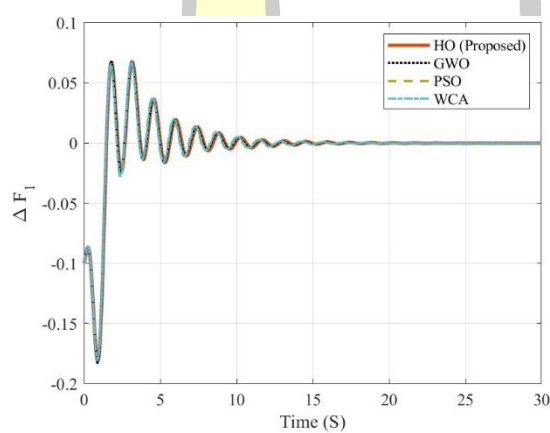
ภาพประกอบ 55 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่



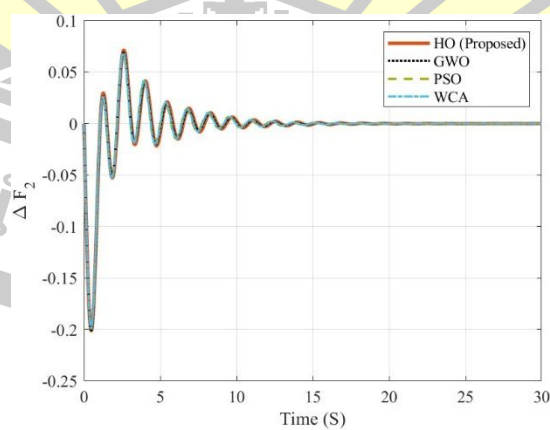
ภาพประกอบ 56 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่



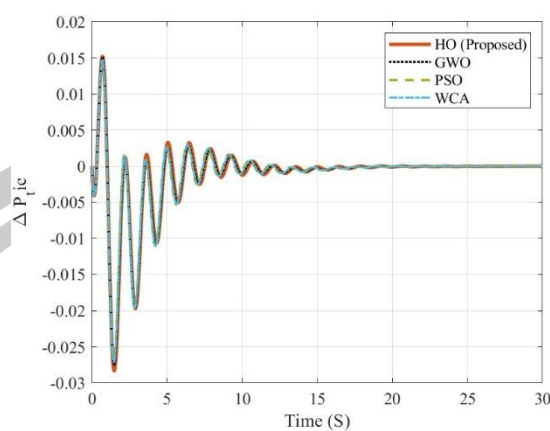
ภาพประกอบ 57 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่



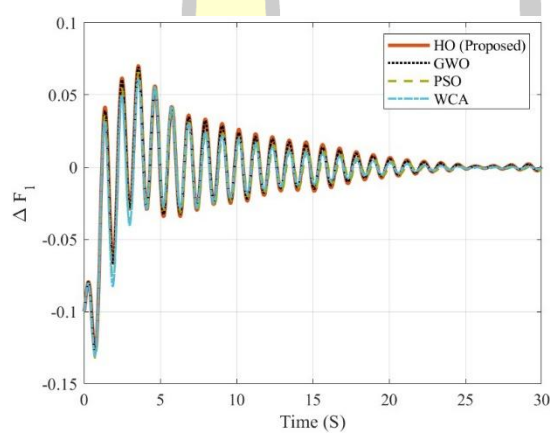
ภาพประกอบ 58 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่



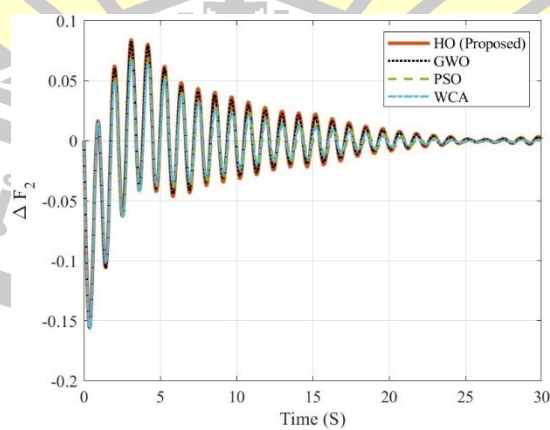
ภาพประกอบ 59 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่



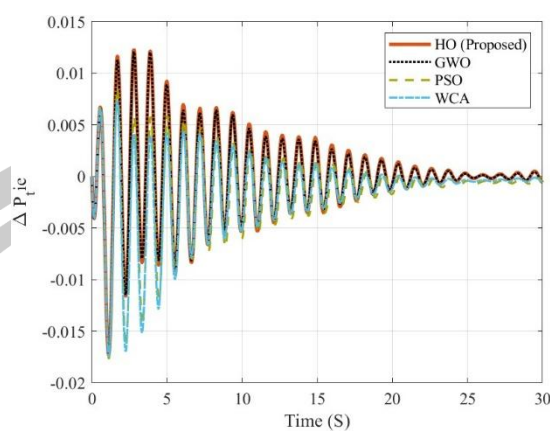
ภาพประกอบ 60 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่



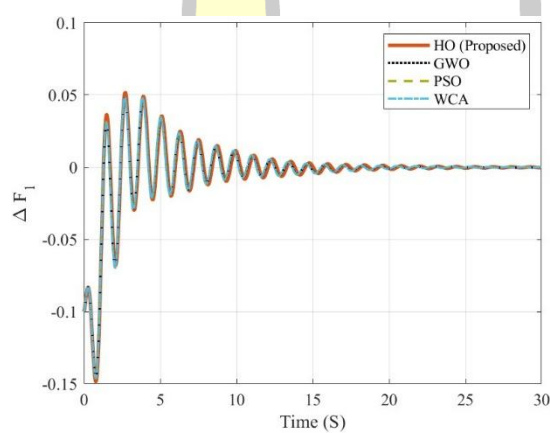
ภาพประกอบ 61 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่



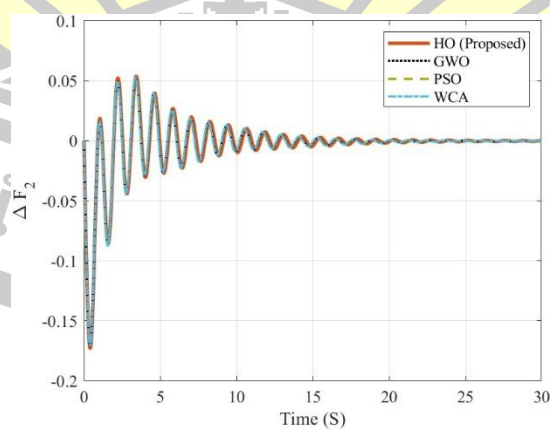
ภาพประกอบ 62 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่



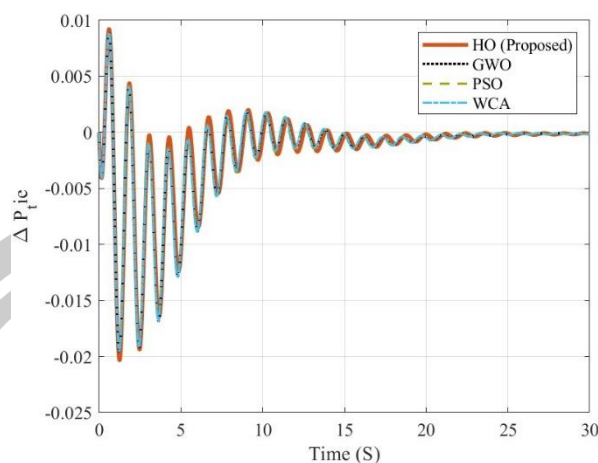
ภาพประกอบ 63 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่



ภาพประกอบ 64 การตอบสนองของ ΔF_1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่



ภาพประกอบ 65 การตอบสนองของ ΔF_2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่



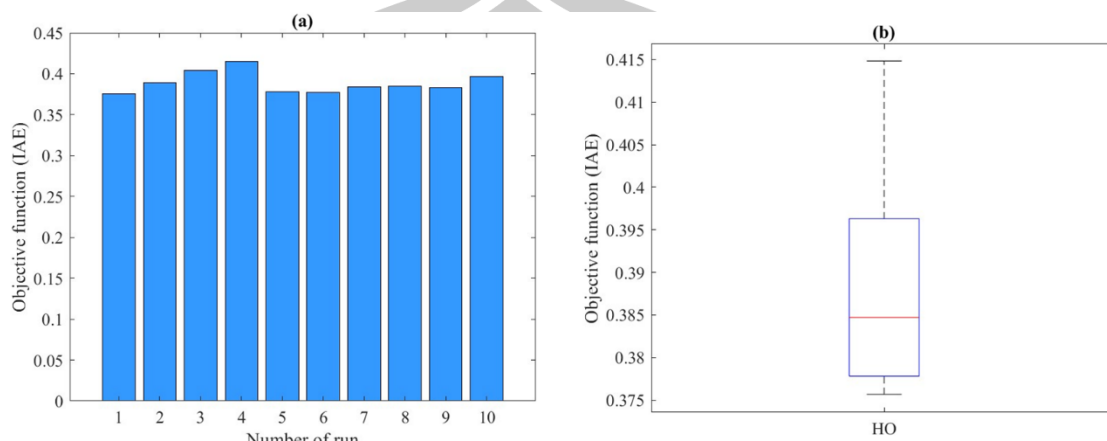
ภาพประกอบ 66 การตอบสนองของ ΔP_{tie} ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE กรณีเปลี่ยนโหลดทั้ง 2 พื้นที่

ตาราง 6 ค่าตัวชี้วัดของระบบกรณีสึกษาที่ 2 (Settling Time, Overshoot, Undershoot)

อัลกอริทึม		ΔF_1			ΔF_2			ΔP_{tie}		
		ST(s)	OS	US(-)	ST(s)	OS	US(-)	ST(s)	OS	US(-)
HO	IAE	29.825	0.049	0.149	29.968	0.051	0.172	29.397	0.009	0.020
	ITAE	29.950	0.067	0.181	29.608	0.071	0.201	29.141	0.015	0.028
	ISE	29.998	0.070	0.128	29.993	0.084	0.156	29.963	0.012	0.017
	ITSE	29.938	0.051	0.149	29.963	0.053	0.173	29.702	0.009	0.020
PSO	IAE	29.942	0.051	0.152	29.916	0.052	0.176	28.539	0.010	0.021
	ITAE	29.942	0.067	0.181	29.518	0.067	0.199	29.815	0.015	0.027
	ISE	29.929	0.066	0.132	29.935	0.072	0.158	29.969	0.009	0.018
	ITSE	29.939	0.048	0.147	29.728	0.052	0.171	29.697	0.009	0.019
WCA	IAE	29.956	0.052	0.153	29.927	0.052	0.177	26.913	0.010	0.021
	ITAE	29.739	0.067	0.181	29.808	0.015	0.027	29.808	0.015	0.027
	ISE	29.996	0.061	0.131	29.994	0.067	0.157	29.927	0.007	0.017
	ITSE	29.929	0.048	0.146	29.798	0.052	0.171	29.745	0.009	0.020
GWO	IAE	29.952	0.051	0.152	29.922	0.052	0.176	26.964	0.010	0.021
	ITAE	29.932	0.068	0.183	29.811	0.069	0.201	29.368	0.015	0.028
	ISE	29.997	0.069	0.128	29.994	0.083	0.156	29.958	0.012	0.017
	ITSE	29.574	0.047	0.146	29.654	0.009	0.020	29.654	0.009	0.020

4.2.1 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมฮิปโปโปเตมัส

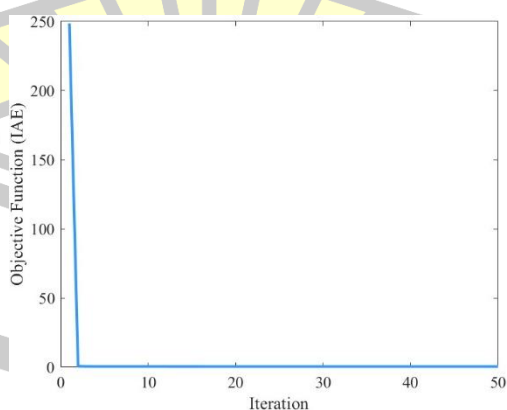
- IAE



ภาพประกอบ 67 (a) ค่า IAE จากการทดลอง HO 10 รอบ

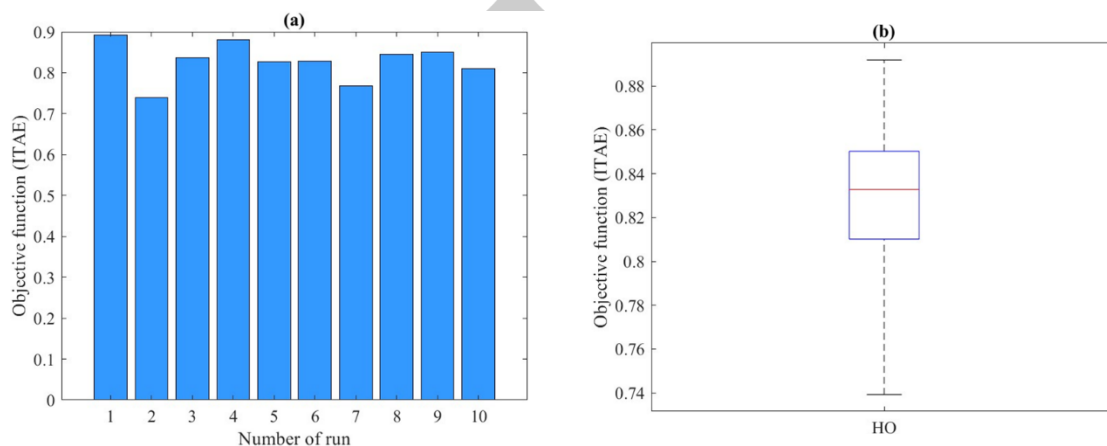
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง HO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 67 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE จากการรันอัลกอริทึม HO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.3757 ถึง 0.4151 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 1 และค่าสูงสุดในรอบที่ 4 ส่วนภาพประกอบที่ 67 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า IAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.385 และ 0.388 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 68 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 68 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด

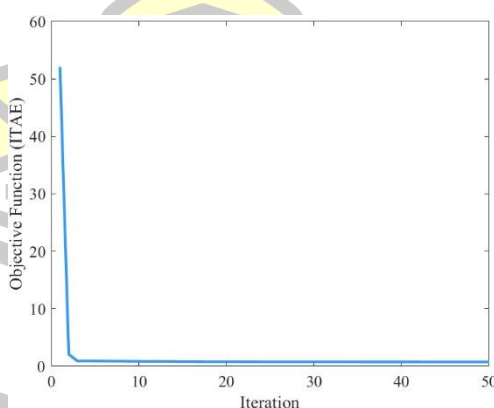
- ITAE



ภาพประกอบ 69 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง HO 10 รอบ

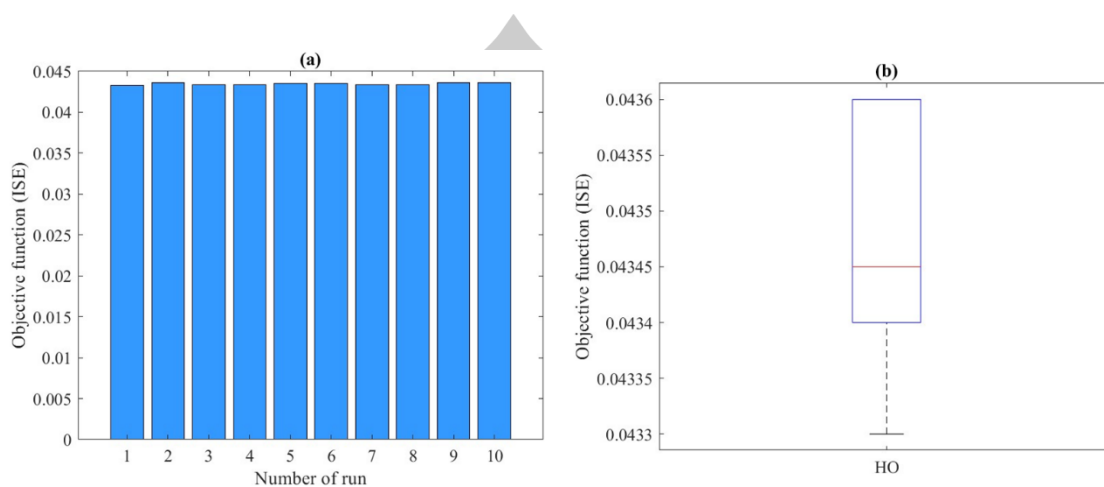
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง HO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 69 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE จากการรันอัลกอริทึม HO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.7423 ถึง 0.8891 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 2 และค่าสูงสุดในรอบที่ 1 ส่วนภาพประกอบที่ 69 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.8284 และ 0.8247 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 70 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 70 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด

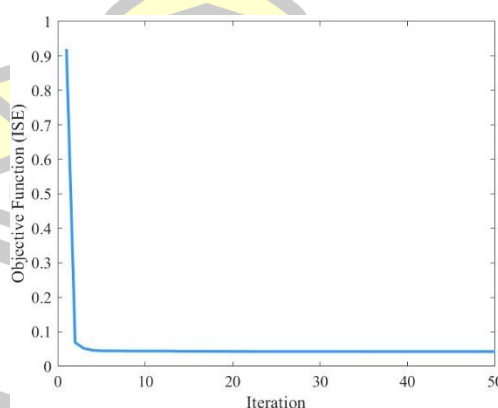
- ISE



ภาพประกอบ 71 (a) ค่า ISE จากการทดลอง HO 10 รอบ

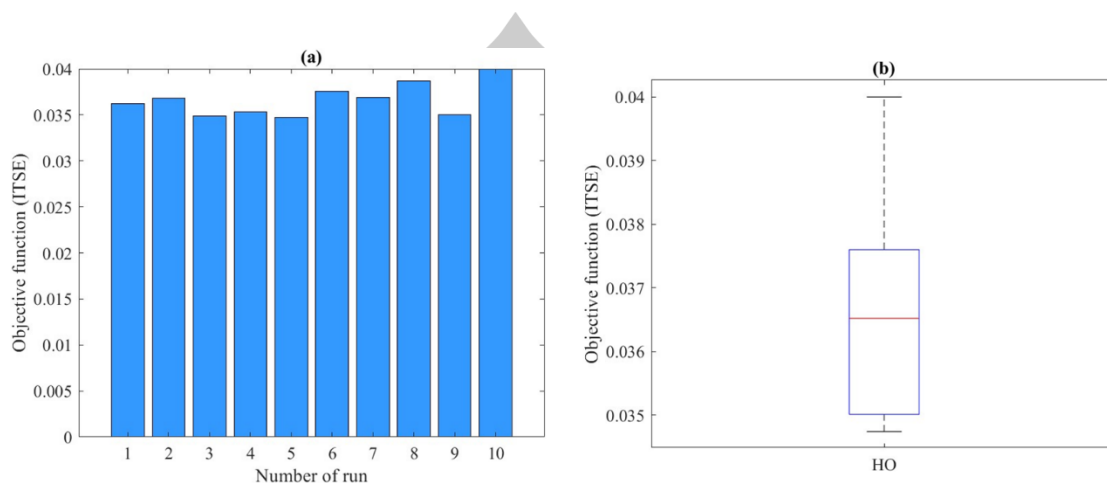
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง HO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 71 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE จากการรันอัลกอริทึม HO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0433 ถึง 0.0436 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 2 และค่าสูงสุดในรอบที่ 9 ส่วนภาพประกอบที่ 71 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ISE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0434 และ 0.0434 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 72 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 72 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด

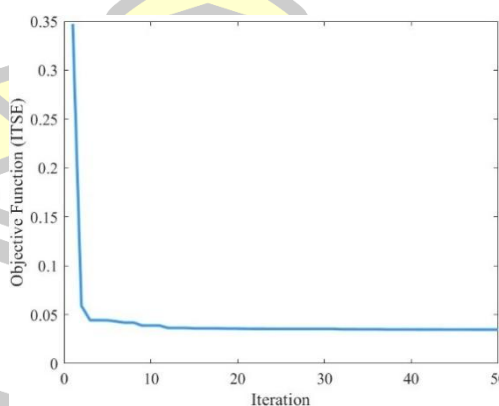
- ITSE



ภาพประกอบ 73 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง HO 10 รอบ

(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง HO 10 รอบ

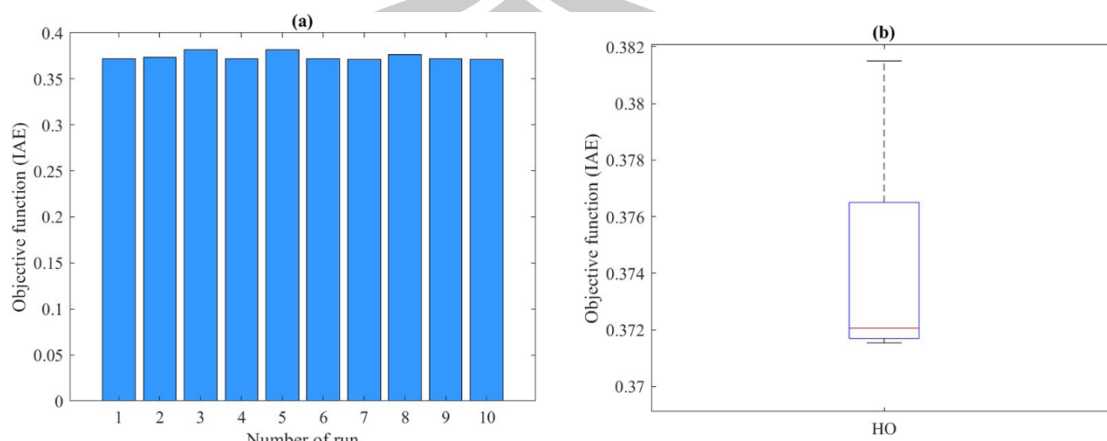
จากภาพประกอบที่ 73 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE จากการรันอัลกอริทึม HO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0348 ถึง 0.0400 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 5 และค่าสูงสุดในรอบที่ 10 ส่วนภาพประกอบที่ 73 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITSE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0367 และ 0.0369 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 74 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 74 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง HO ที่ดีที่สุด

4.1.2 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมการเคลื่อนที่ของฝูงอนุภาค

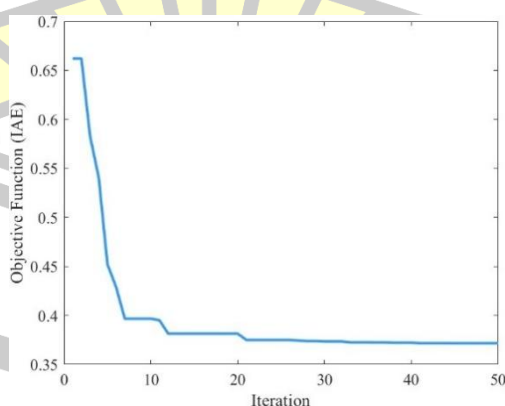
- IAE



ภาพประกอบ 75 (a) ค่า IAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

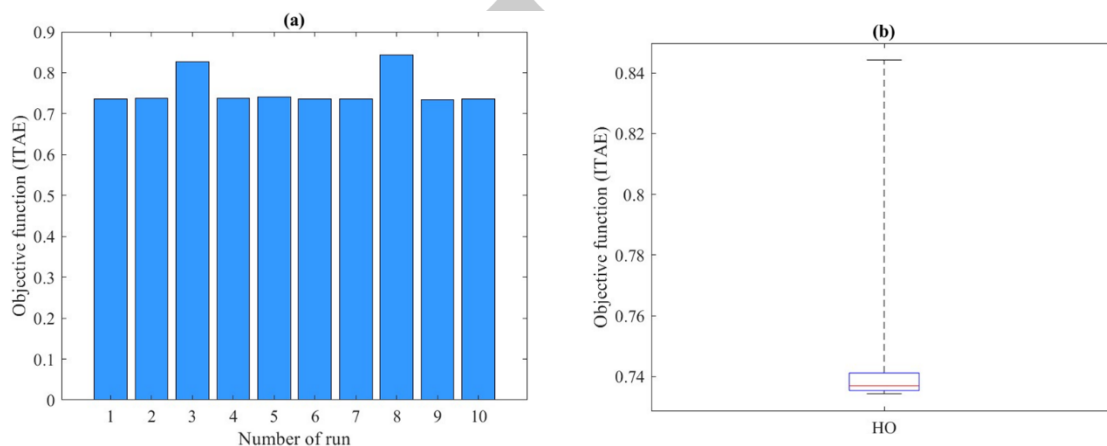
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 75 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE จากการรันอัลกอริทึม PSO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.3716 ถึง 0.3815 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 4 และค่าสูงสุดในรอบที่ 5 ส่วนภาพประกอบที่ 75 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า IAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.3729 และ 0.3743 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 76 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 76 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด

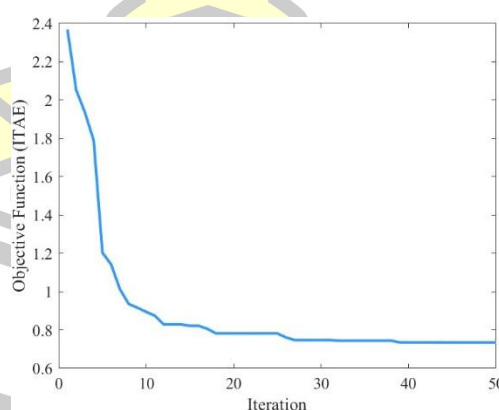
- ITAE



ภาพประกอบ 77 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

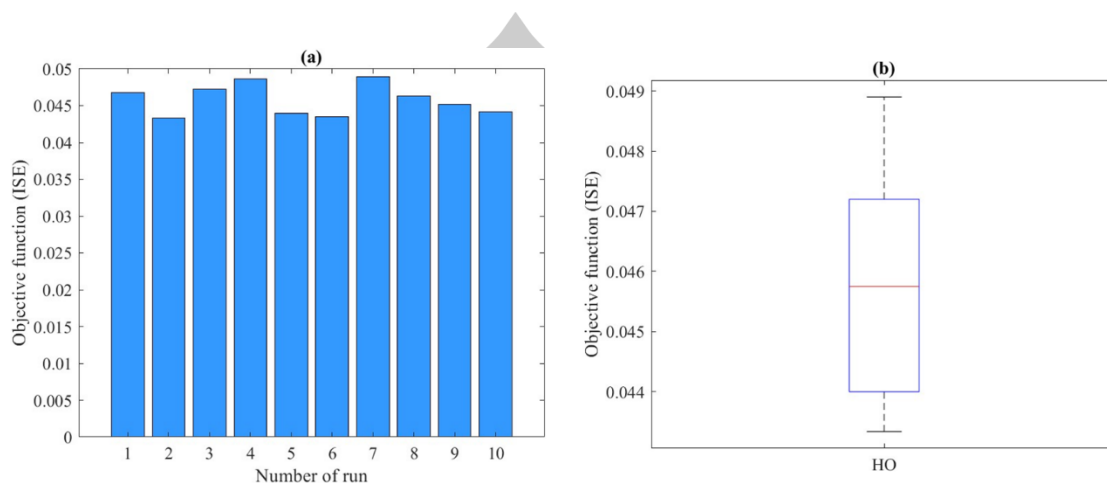
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 77 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE จากการรันอัลกอริทึม PSO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.7354 ถึง 0.8432 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 6 และค่าสูงสุดในรอบที่ 8 ส่วนภาพประกอบที่ 77 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.7515 และ 0.7398 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 78 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 78 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด

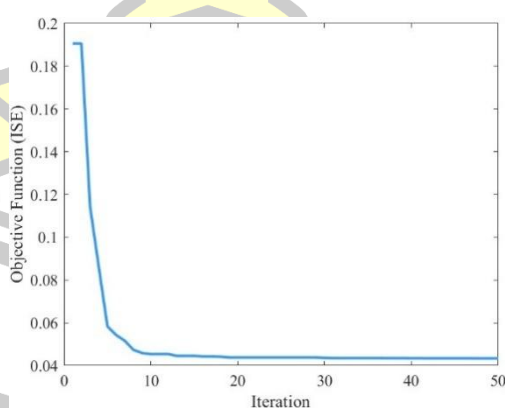
- ISE



ภาพประกอบ 79 (a) ค่า ISE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

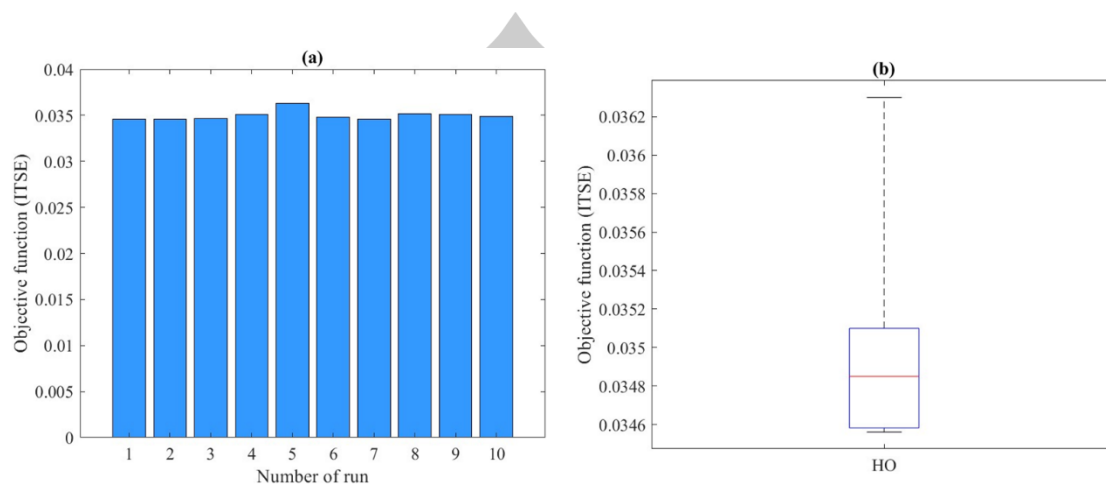
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 79 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE จากการรันอัลกอริทึม PSO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0437 ถึง 0.0489 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 6 และค่าสูงสุดในรอบที่ 7 ส่วนภาพประกอบที่ 79 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ISE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0458 และ 0.0459 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 80 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 80 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด

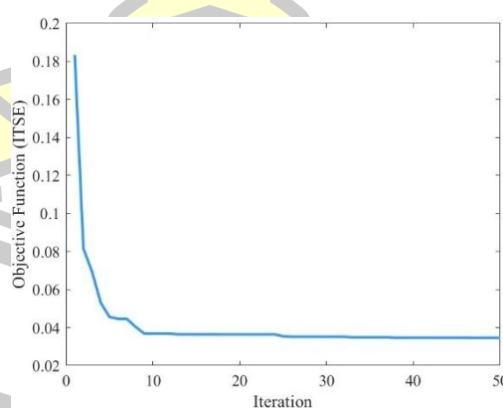
- ITSE



ภาพประกอบ 81 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง PSO 10 รอบ

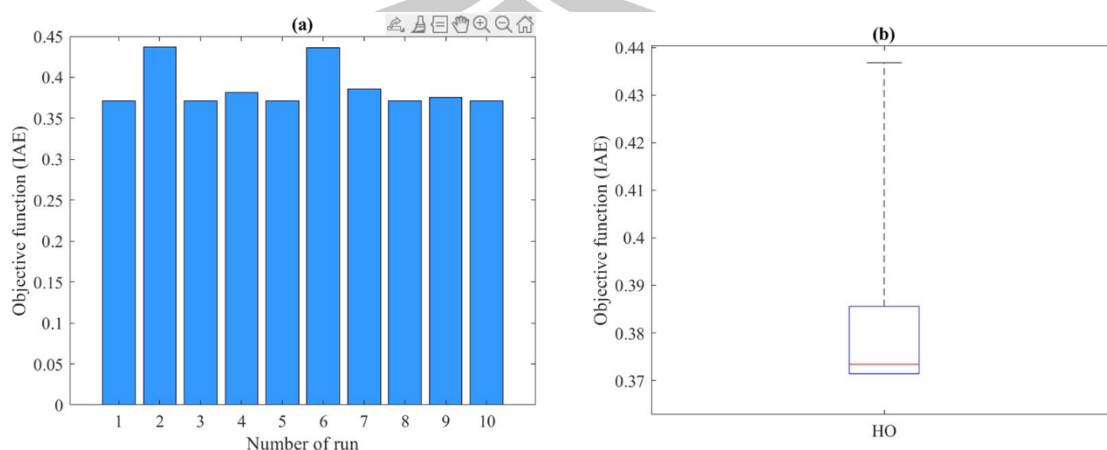
จากภาพประกอบที่ 81 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE จากการรันอัลกอริทึม PSO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0346 ถึง 0.0363 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 1 และค่าสูงสุดในรอบที่ 5 ส่วนภาพประกอบที่ 81 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITSE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0349 และ 0.0352 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 82 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 82 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง PSO ที่ดีที่สุด

4.1.3 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมวิวัฒนาการของน้ำ

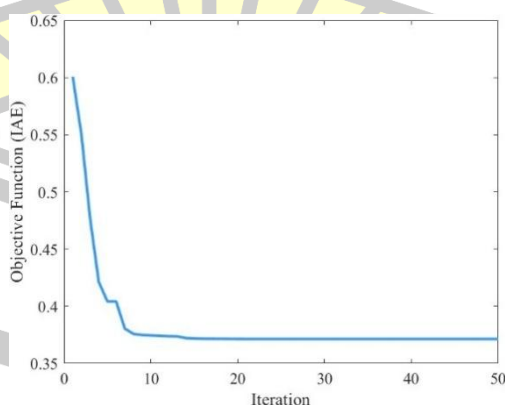
- IAE



ภาพประกอบ 83 (a) ค่า IAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

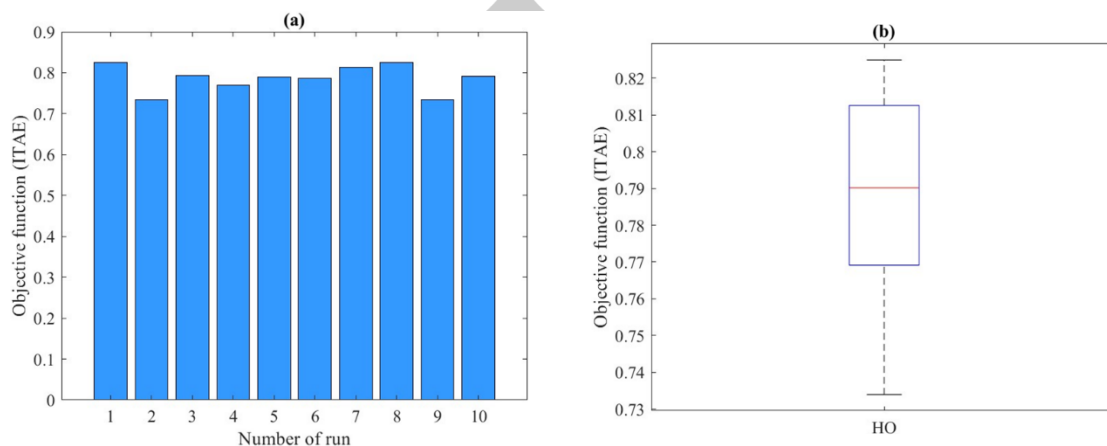
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 83 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE จากการรันอัลกอริทึม WCA จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.3691 ถึง 0.4392 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 3 และค่าสูงสุดในรอบที่ 6 ส่วนภาพประกอบที่ 83 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า IAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.3727 และ 0.3856 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 84 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 84 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด

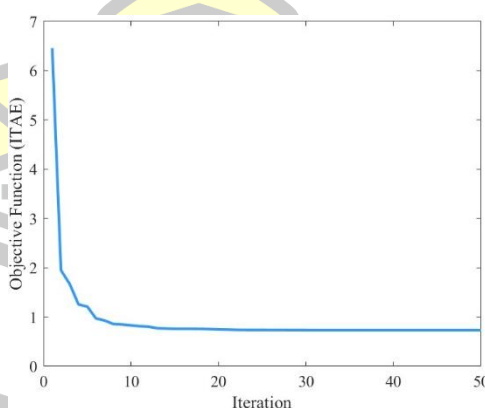
- ITAE



ภาพประกอบ 85 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

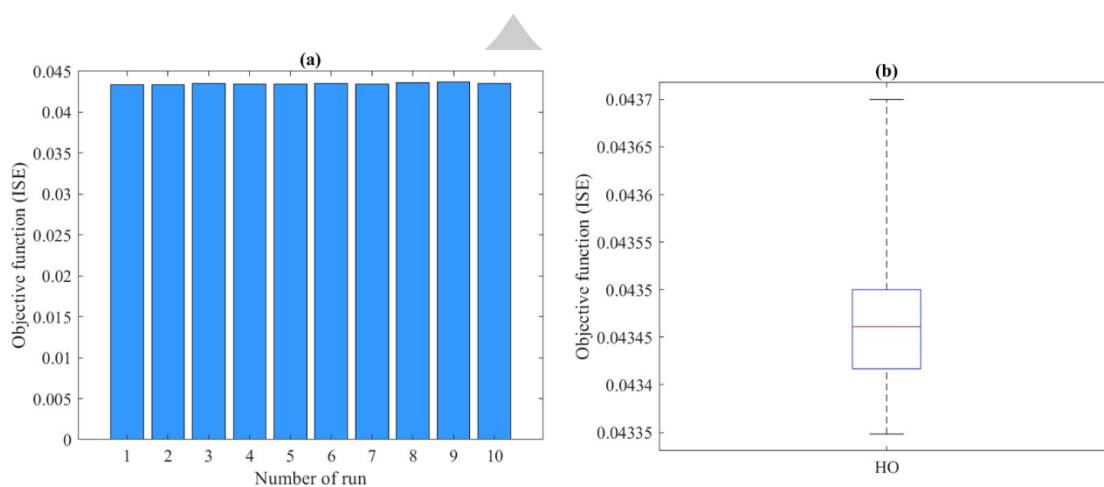
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 85 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE จากการรันอัลกอริทึม WCA จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.7352 ถึง 0.8213 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 2 และค่าสูงสุดในรอบที่ 1 ส่วนภาพประกอบที่ 85 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.7865 และ 0.7812 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 86 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 86 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด

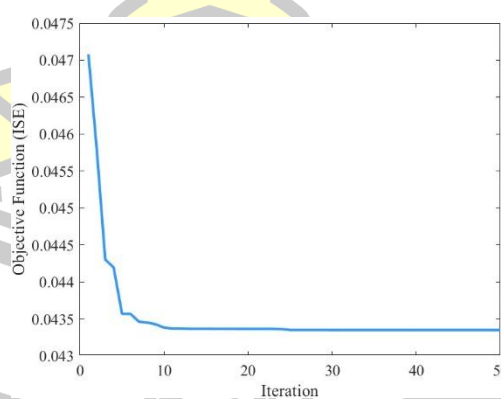
- ISE



ภาพประกอบ 87 (a) ค่า ISE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

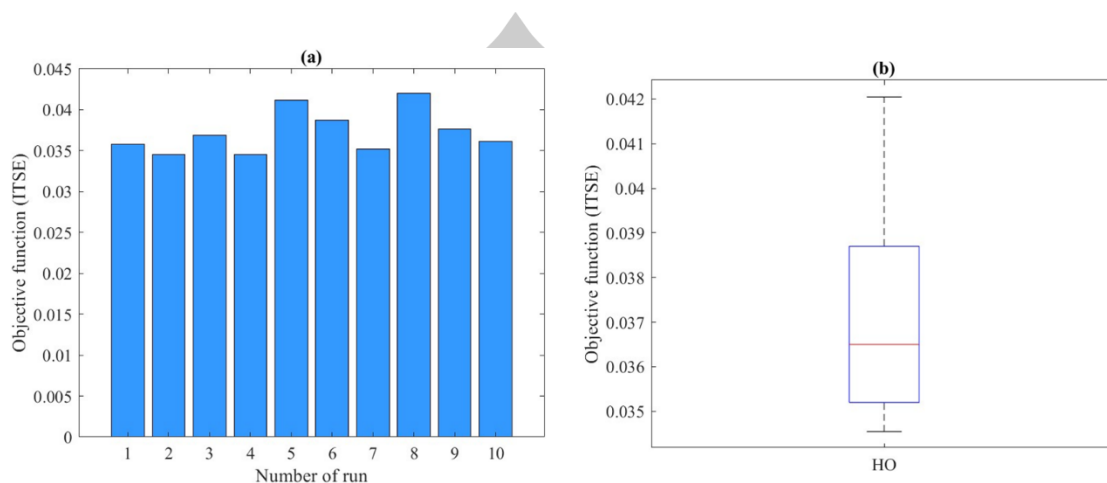
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 87 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE จากการรันอัลกอริทึม WCA จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0433 ถึง 0.0437 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 6 และค่าสูงสุดในรอบที่ 3 ส่วนภาพประกอบที่ 87 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ISE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0434 และ 0.0435 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 88 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 88 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด

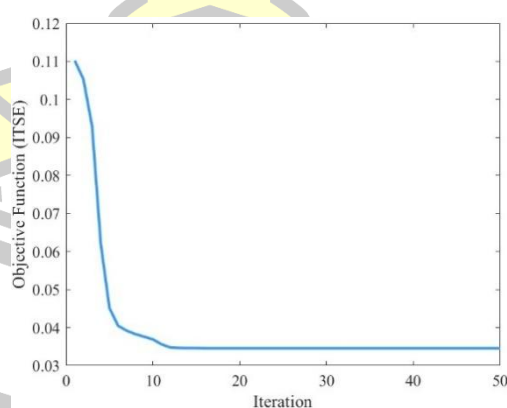
- ITSE



ภาพประกอบ 89 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง WCA 10 รอบ

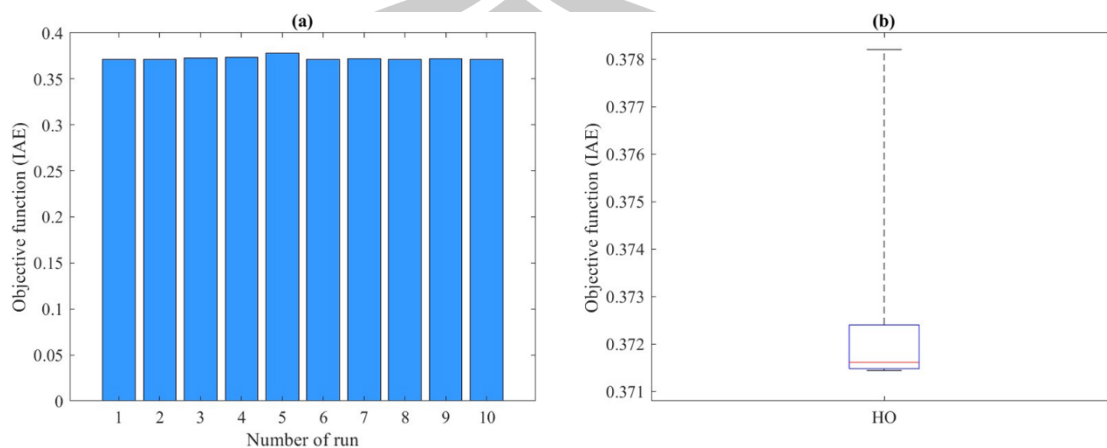
จากภาพประกอบที่ 89 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE จากการรันอัลกอริทึม WCA จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0349 ถึง 0.0422 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 2 และค่าสูงสุดในรอบที่ 8 ส่วนภาพประกอบที่ 89 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITSE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0364 และ 0.0374 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 90 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 90 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง WCA ที่ดีที่สุด

4.1.4 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมของหมาป่าสีเทา

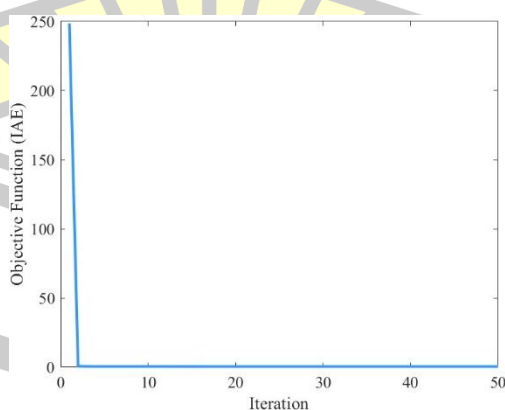
- IAE



ภาพประกอบ 91 (a) ค่า IAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

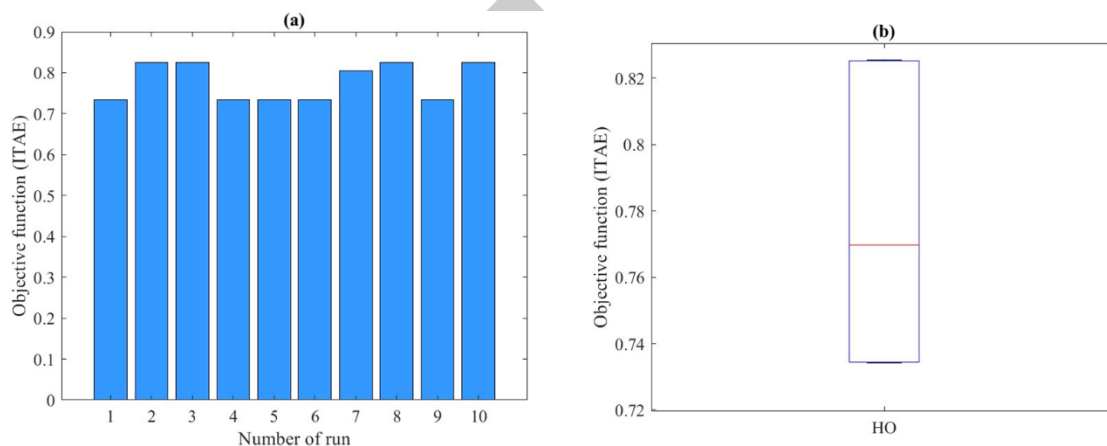
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว IAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 91 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ IAE จากการรันอัลกอริทึม GWO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.3714 ถึง 0.3779 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 6 และค่าสูงสุดในรอบที่ 5 ส่วนภาพประกอบที่ 91 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า IAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.3718 และ 0.3722 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 92 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 92 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน IAE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด

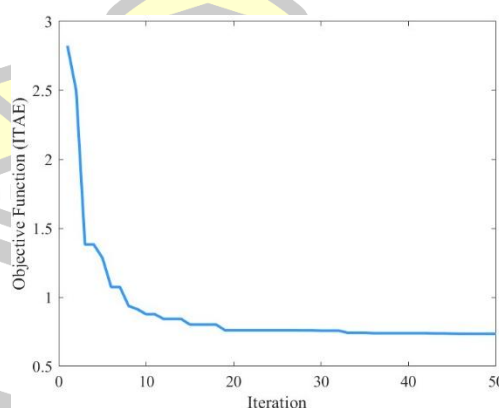
- ITAE



ภาพประกอบ 93 (a) ค่า ITAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

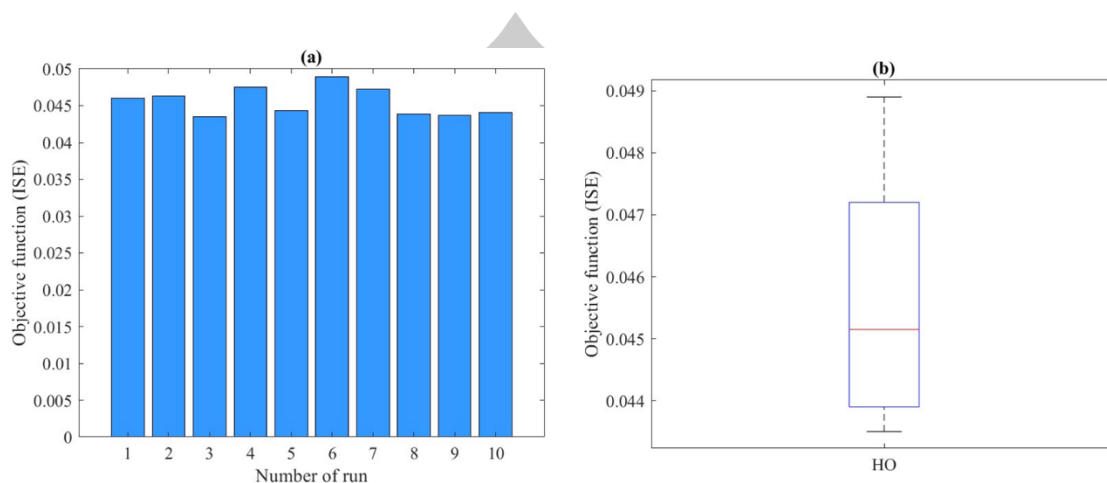
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITAE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 93 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITAE จากการรันอัลกอริทึม GWO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.7296 ถึง 0.8235 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 5 และค่าสูงสุดในรอบที่ 2 ส่วนภาพประกอบที่ 93 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITAE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.7680 และ 0.7689 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 94 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 94 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITAE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด

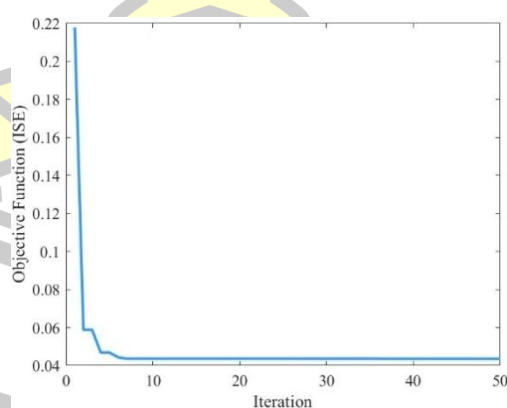
- ISE



ภาพประกอบ 95 (a) ค่า ISE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

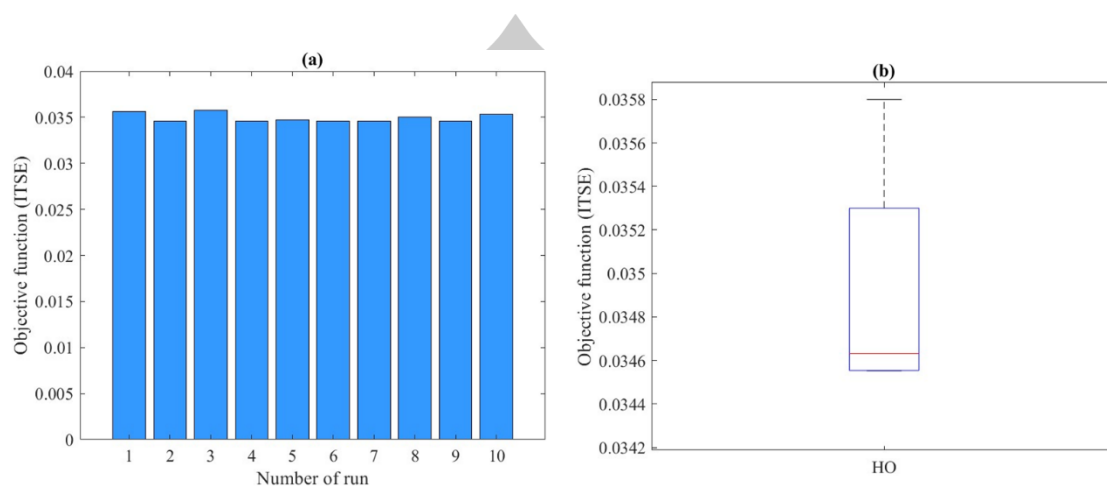
(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ISE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 95 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ISE จากการรันอัลกอริทึม GWO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0438 ถึง 0.0492 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 3 และค่าสูงสุดในรอบที่ 6 ส่วนภาพประกอบที่ 95 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ISE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0459 และ 0.0463 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 96 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 96 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ISE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด

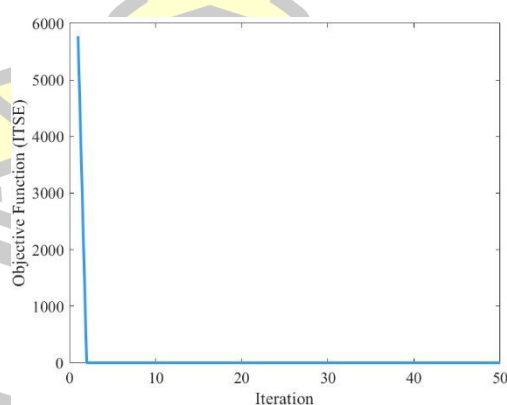
- ITSE



ภาพประกอบ 97 (a) ค่า ITSE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

(b) กราฟแสดงการกระจายตัว ITSE จากการทดลอง GWO 10 รอบ

จากภาพประกอบที่ 97 (a) แสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ITSE จากการรันอัลกอริทึม GWO จำนวน 10 ครั้ง พบว่าค่าผลลัพธ์มีความผันผวนอยู่ในช่วงประมาณ 0.0343 ถึง 0.0358 โดยมีค่าต่ำที่สุดอยู่ในรอบที่ 2 และค่าสูงสุดในรอบที่ 3 ส่วนภาพประกอบที่ 97 (b) เป็น Box plot แสดงการกระจายของค่า ITSE โดยมีค่ามัธยฐานและค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 0.0346 และ 0.0349 ตามลำดับ และภาพประกอบที่ 98 ได้แสดงรอบการทดลองที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุด



ภาพประกอบ 98 กราฟแสดงค่า best cost ของฟังก์ชัน ITSE จากการทดลอง GWO ที่ดีที่สุด

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การวิจัยในครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบ PID (Proportional-Integral-Double Derivative) สำหรับใช้ในระบบควบคุมความถี่ของระบบไฟฟ้าแบบหลายพื้นที่ที่ประกอบด้วยพลังงานหมุนเวียน โดยเฉพาะระบบที่ผสมผสานระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์ (Photovoltaic – PV) และโรงไฟฟ้าพลังความร้อนแบบรีฮีต (Reheat Thermal Power System) ซึ่งมีลักษณะพลวัตของระบบที่ซับซ้อนและมีความไม่แน่นอนสูง ในการปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ได้ประยุกต์ใช้อัลกอริทึมเมตาฮิวริสติกชื่อว่า Hippopotamus Optimization Algorithm (HO) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ได้แรงบันดาลใจจากพฤติกรรมของฮิปโปโปเตมัสในธรรมชาติ โดยมุ่งหวังให้สามารถค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดของ K_p , K_i , และ K_{dd} ให้กับระบบควบคุม เพื่อให้การประเมินผลมีความรอบด้าน การวิจัยนี้ได้ทดลองเปรียบเทียบผลลัพธ์ของ HO กับอัลกอริทึมอื่นที่นิยมใช้กันในการได้แก่ Particle Swarm Optimization (PSO), Water Cycle Algorithm (WCA) และ Grey Wolf Optimizer (GWO) ภายใต้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 4 แบบ ได้แก่ IAE, ITAE, ISE และ ITSE ซึ่งแต่ละฟังก์ชันมีลักษณะการให้น้ำหนักที่แตกต่างกันในการประเมินค่าความผิดพลาดของระบบ

การทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 กรณีหลัก คือ กรณีที่มีการเปลี่ยนโหลดในพื้นที่ 2 (Area-2) และกรณีที่มีการเปลี่ยนโหลดพร้อมกันในพื้นที่ 1 และ 2 เพื่อประเมินการตอบสนองของระบบในสถานการณ์ที่ต่างกัน

จากผลการทดลองพบว่า อัลกอริทึม HO ให้ผลลัพธ์ที่ สม่ำเสมอและมีความเสถียรสูง ในหลายกรณี แม้ในบางฟังก์ชัน เช่น ITAE หรือ ISE จะมีอัลกอริทึมอื่นที่ให้ค่าเป้าหมายต่ำกว่า แต่ HO ยังคงแสดงความสามารถในการควบคุมที่มีค่ากระจายต่ำ (low variance) โดยเฉพาะในฟังก์ชัน IAE และ ITSE ที่ผลลัพธ์มีความใกล้เคียงกันแทบทุกรอบการทดลอง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า HO มีจุดเด่นด้านความเสถียรและเหมาะสมสำหรับสถานการณ์ที่ต้องการความมั่นคงของคำตอบมากกว่าการได้ค่าที่ต่ำที่สุดเพียงครั้งเดียว

5.2 อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองในทั้งสองกรณี คือ การเปลี่ยนแปลงโหลดในพื้นที่ที่ 2 และการเปลี่ยนโหลดพร้อมกันในพื้นที่ที่ 1 และ 2 พบว่าอัลกอริทึม Hippopotamus Optimization (HO) ให้ผลลัพธ์ที่มีความสม่ำเสมอในหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยเฉพาะใน IAE และ ITSE ซึ่งค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานจากการรันหลายรอบมีความใกล้เคียงกันมาก และมีความเบี่ยงเบนของผลลัพธ์ค่อนข้างต่ำ ข้อมูลจากกราฟ bar plot และ box plot แสดงให้เห็นว่า HO สามารถรักษาความเสถียรของผลลัพธ์ได้ดี แม้จะมีบางรอบที่ผลลัพธ์สูงหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยแต่ก็อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

เมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ อย่าง PSO, WCA และ GWO พบว่า PSO ให้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ต่ำในบางรอบ เช่น ITAE และ ISE แต่ผลลัพธ์มีความผันผวนและกระจายตัวสูงกว่า HO ในขณะที่ WCA แม้จะให้ผลลัพธ์ที่ดีในบางรอบ แต่กลับมีค่าความแปรปรวนของผลลัพธ์ค่อนข้างมาก ส่งผลให้ความเชื่อถือในความสม่ำเสมอลดลง ส่วน GWO มีแนวโน้มให้ผลลัพธ์ในระดับกลางค่อนข้างคงที่ และมักอยู่ระหว่างค่าของ HO และ PSO ในการตอบสนองของระบบควบคุมความถี่ พบว่าอัลกอริทึม HO สามารถควบคุมพฤติกรรมของ ΔF_1 , ΔF_2 และ ΔP_{tie} ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยให้ค่าของ Overshoot, Undershoot และ Settling Time อยู่ในระดับที่ดีกว่าอัลกอริทึมอื่นในหลายกรณี ความสามารถของ HO ในการควบคุมการแกว่งของความถี่ในช่วงต้น และทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะคงที่ได้รวดเร็วขึ้น มีความสอดคล้องกับผลจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ส่งผลให้อัลกอริทึมนี้มีแนวโน้มเหมาะสมกับการใช้งานในระบบที่ต้องการความเสถียรและความน่าเชื่อถือในการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ควบคุม

5.3 ข้อเสนอแนะ

แม้ผลการทดลองในวิจัยครั้งนี้จะชี้ให้เห็นว่าอัลกอริทึม HO มีความสามารถในการปรับจูนพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ได้ดีและมีเสถียรภาพและให้ผลลัพธ์ที่อยู่ในเกณฑ์น่าพอใจ แต่ในการประยุกต์ใช้จริงในระบบควบคุมที่มีความซับซ้อนสูงหรือมีเงื่อนไขเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ควรพิจารณาองค์ประกอบเพิ่มเติมหลายด้าน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้น เช่น การเลือกใช้อัลกอริทึมที่เหมาะสมกับประเภทของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การออกแบบฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้สอดคล้องกับพฤติกรรมระบบจริง หรือการนำ HO ไปปรับใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น การปรับน้ำหนักแบบปรับตัว (adaptive weight), การเพิ่มกลไก local search หรือการผสมผสานกับอัลกอริทึมอื่นในลักษณะ hybrid ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดเวลาในการหาค่าที่เหมาะสม

นอกจากนี้ หากมีการนำอัลกอริทึม HO ไปใช้งานจริง ควรพิจารณาผลลัพธ์จากการทดลองหลายรอบโดยดูทั้งค่ากลางและค่าผันผวนร่วมกัน เพื่อให้แน่ใจว่าอัลกอริทึมนั้นให้ผลลัพธ์ที่เชื่อถือได้ ไม่ใช่เพียงค่าเฉพาะรอบที่ดีที่สุดเท่านั้น อีกทั้งควรมีการติดตามประสิทธิภาพของระบบในระยะยาว เพื่อประเมินเสถียรภาพและความยืดหยุ่นของพารามิเตอร์ที่ได้จากการปรับจูน ทั้งนี้เพื่อให้ระบบควบคุมมีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมการใช้งานที่แท้จริงและสามารถคงไว้ซึ่งเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

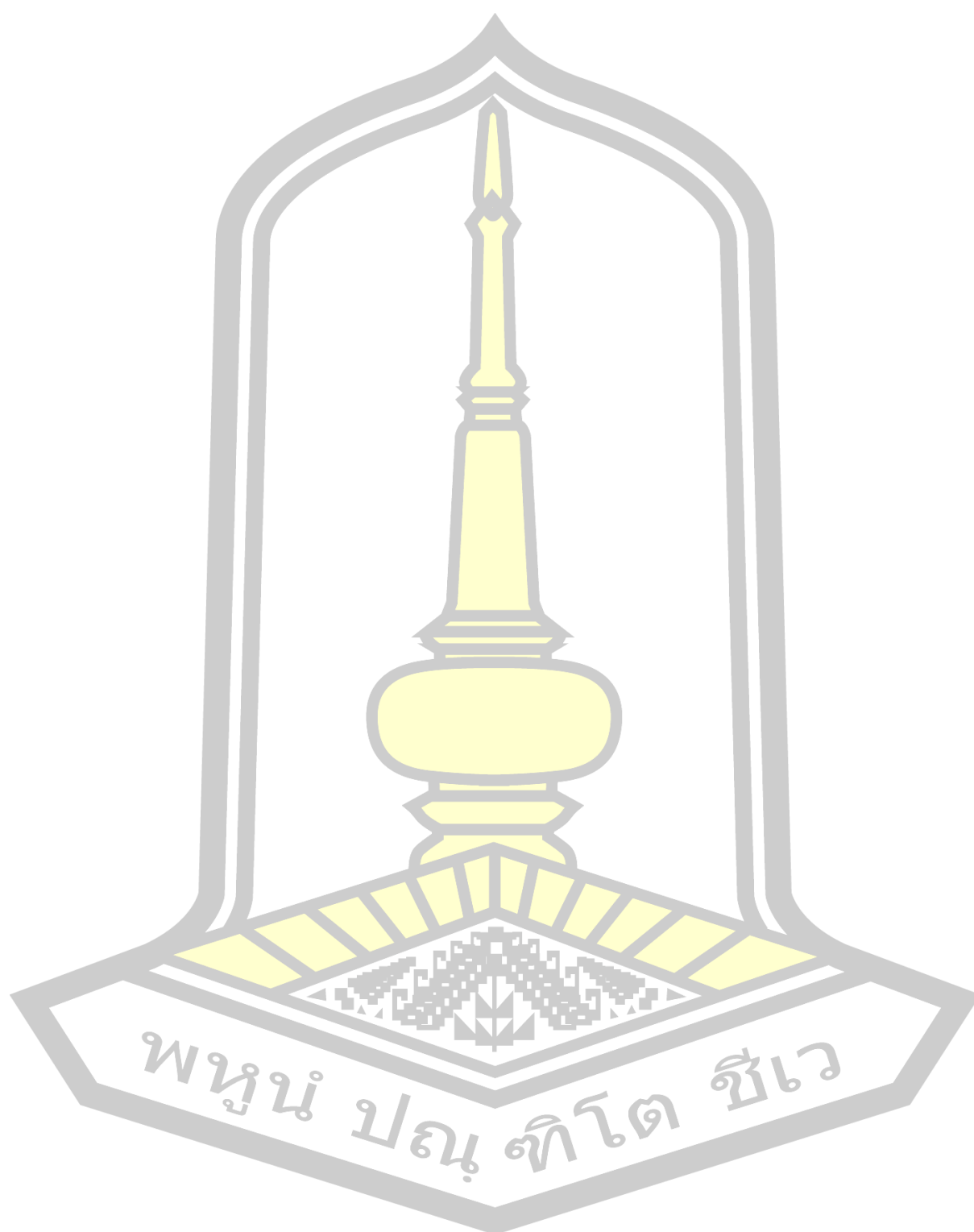


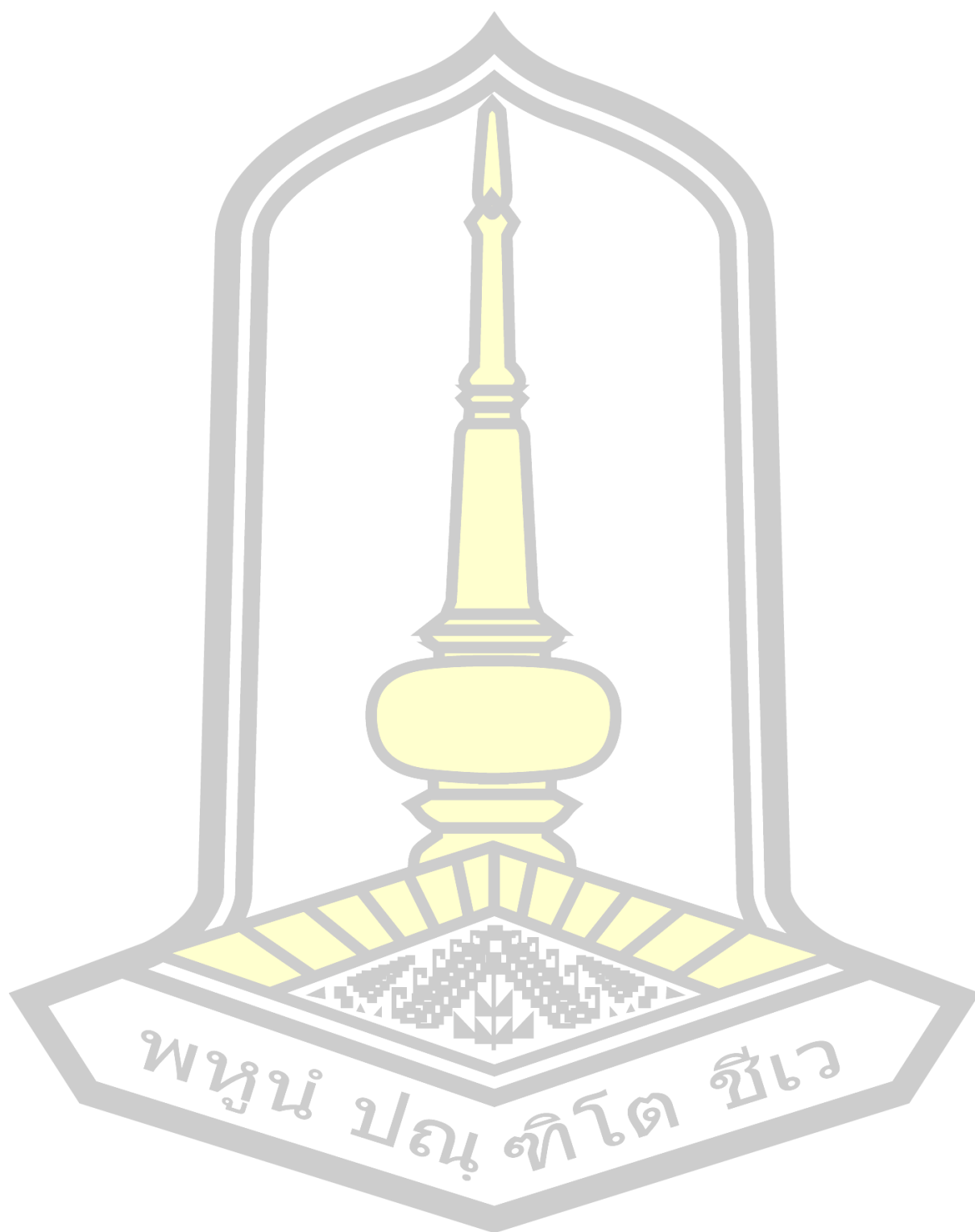
บรรณานุกรม

- [1] J. D. Glover, T. Overbye, and M. S. Sarma, *Power System Analysis and Design, SI Edition*. Cengage Learning, 2015.
- [2] O. I. Elgerd, "Electric energy systems theory: an introduction," 1982.
- [3] S. S. Rao, *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2019.
- [4] D. E. Rivera, M. Morari, and S. Skogestad, "Internal model control: PID controller design," *Industrial & engineering chemistry process design and development*, vol. 25, no. 1, pp. 252-265, 1986.
- [5] P. Kundur, "Power system stability," *Power system stability and control*, vol. 10, pp. 7-1, 2007.
- [6] I. Kocaarslan and E. Çam, "Fuzzy logic controller in interconnected electrical power systems for load-frequency control," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 27, no. 8, pp. 542-549, 2005.
- [7] H. Saadat, *Power system analysis*. McGraw-hill, 1999.
- [8] J. Machowski, Z. Lubosny, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, *Power system dynamics: stability and control*. John Wiley & Sons, 2020.
- [9] H. Bevrani, *Robust power system frequency control* (no. 2014). Springer, 2014.
- [10] J. Das, *Power system harmonics and passive filter designs*. John Wiley & Sons, 2015.
- [11] I. P. Quality, "IEEE recommended practice for monitoring electric power quality," *IEEE recommended practice for monitoring electric power quality*, 1995.
- [12] K. Ogata, "Modern control engineering," 2020.
- [13] K. Y. Lee and M. A. El-Sharkawi, *Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems*. John Wiley & Sons, 2008.
- [14] S. Boyd, "Convex optimization," *Cambridge UP*, 2004.
- [15] A. R. Conn, K. Scheinberg, and L. N. Vicente, *Introduction to derivative-free optimization*. SIAM, 2009.
- [16] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proceedings of*

- ICNN'95-international conference on neural networks*, 1995, vol. 4: ieee, pp. 1942-1948.
- [17] R. Umar, F. Mohammed, M. Deriche, and A. U. Sheikh, "Hybrid cooperative energy detection techniques in cognitive radio networks," in *Handbook of research on software-defined and cognitive radio technologies for dynamic spectrum management*: IGI Global, 2015, pp. 1-37.
- [18] H. Eskandar, A. Sadollah, A. Bahreininejad, and M. Hamdi, "Water cycle algorithm–A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems," *Computers & Structures*, vol. 110, pp. 151-166, 2012.
- [19] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Advances in engineering software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014.
- [20] A. Altaf, M. Kumar, and D. Biswas, "Hippopotamus Optimization Based PID Controller Design for LFC of Microgrid Under Cyber and Time Delay Attack," in *2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, 2024: IEEE, pp. 1-6.
- [21] S. Ekinici, Ö. Can, M. Ş. Ayas, D. Izci, M. Salman, and M. Rashdan, "Automatic generation control of a hybrid PV-reheat thermal power system using RIME algorithm," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 26919-26930, 2024.
- [22] I. Koley, A. Datta, G. K. Panda, and S. Debbarma, "TLBO Optimised PID Controller for Coordinated Control in a Hybrid AC/DC Microgrid," in *2022 4th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE)*, 2022: IEEE, pp. 1-6.
- [23] I. Koley, B. Sarkar, A. Datta, and G. K. Panda, "Load frequency control of a wind energy integrated multiarea power system with CSA tuned PID controller," in *2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, 2020: IEEE, pp. 1-6.
- [24] R. Dulyala, W. Sa-Ngiamvibool, S. Audomsi, K. Ardah, and T. Buranaudsawakul, "Development of a 2 degree of freedom-proportional integral derivative controller using the hippopotamus algorithm," *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, Article vol. 14, no. 1, pp. 780-787, 2025, doi:

10.11591/ijai.v14.i1.pp780-787.





ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นายจิรวุฒน์ รริยะวงศ์
วันเกิด 11 สิงหาคม พ.ศ.2545
สถานที่เกิด อำเภอเมืองนครพนม จังหวัดนครพนม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 12/1 ซอยอรุณนคร ถนนสว่างนคร ตำบลในเมือง อำเภอเมือง
นครพนม จังหวัดนครพนม 48000
ประวัติการศึกษา พ.ศ.2564 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวิทยาศาสตร์จุฬาราชวิทยาลัย
มุกดาหาร จังหวัดมุกดาหาร
พ.ศ.2567 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
พ.ศ.2568 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
และคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

พูน ปณ ภัโต ชีเว