

การควบคุมระบบ 4 ถังแบบสัญญาณป้อนเข้าและออกหลายสัญญาณด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี โดย
วิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริด-โคไซน์

มัมขำจ มากบุญชร

TNII

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
บัณฑิตศึกษา สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม
สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ปีการศึกษา 2566

CONTROL OF MIMO QUADRUPLE TANK SYSTEM USING PID CONTROLLER BASED ON
OPPOSITION-BASED SINE COSINE ALGORITHM

Makawat Makkunchorn

TNII

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate Studies

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมระบบ 4 ถังแบบสัญญาณป้อนเข้าและออกหลายสัญญาณด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮน์-โคไซน์
โดย	มัชวีจ มากบุญชร
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันติชา กิตติพิรชล

บัณฑิตศึกษา สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรพงษ์ ทานอก)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันติชา กิตติพิรชล)

มัทวัจ มากบุญชร: การควบคุมระบบ 4 ถังแบบสัญญาณป้อนเข้าและออกหลายสัญญาณ ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไน, อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กันติชา กิตติพิรชล, 93 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไนสำหรับระบบ 4 ถัง และเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอดีที่ถูกปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีดังกล่าว กับวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไน และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค

ระบบ 4 ถัง เป็นระบบที่สามารถปรับเปลี่ยนสถานะให้เป็นระบบมีเสถียรภาพที่เรียกว่าสถานะ Minimum Phase และระบบไม่มีเสถียรภาพที่เรียกว่าสถานะ Non-minimum Phase ได้ จากจุดเด่นของระบบนี้ นำไปสู่การทดลองและการศึกษาการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่เกิดจากการปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไน โดยมีการทดลอง 3 การทดลอง ดังนี้ การทดลองที่ 1 หาขอบเขตที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอดีต่อระบบถัง 4 ถังในสถานะต่าง ๆ การทดลองที่ 2 หาระดับปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไน ที่ประกอบไปด้วย ปัจจัยจำนวนประชากร และปัจจัยจำนวนรอบค้นหา ต่อการปรับตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบถัง 4 ถัง ในสถานะต่าง ๆ และการทดลองที่ 3 จะนำปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไนในการทดลองที่ 2 กับปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไน และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาคมาปรับตัวควบคุมพีไอดี แล้วเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอดีด้วยฟังก์ชันดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ (ITAE) และผลตอบสนองของระบบ 4 ถัง ในสถานะต่าง ๆ ที่ได้

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้วิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไนในการปรับตัวควบคุมพีไอดีเพื่อควบคุมระบบ 4 ถัง ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ (ITAE) ที่ได้โดยรวมดีกว่าค่าที่ได้จากการใช้วิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไน และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค สำหรับระบบในสถานะ Minimum Phase และสถานะ Non-minimum Phase กรณีที่ระบบไม่ถูกรบกวน ส่วนผลตอบสนองของระบบที่ได้จากวิธีดังกล่าว นั้น ดีกว่าผลจากการใช้ทั้ง 2 วิธีที่นำมาเปรียบเทียบเมื่อระบบอยู่ในสถานะ Non-minimum Phase กรณีที่ไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวน

บัณฑิตศึกษา

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรม

ปีการศึกษา 2566

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

MAKAWAT MAKKUNCHORN: CONTROL OF MIMO QUADRUPLER TANK SYSTEM
USING PID CONTROLLER BASED ON OPPOSITION-BASED SINE COSINE ALGORITHM.
ADVISOR: ASST. PROF. DR. KANTICHA KITTIPEERACHON, 93 PP.

This thesis is to study tuning parameters of PID controller for controlling quadrupole tank system by using Opposition-Based Sine Cosine Algorithm (OBSCA) and compare performance of PID controller based on this algorithm with PID controllers which based on Sine Cosine Algorithm (SCA) and Particle Swarm Optimization (PSO).

A quadrupole tank system is a system that can change its state between stable state (minimum phase state) and unstable state (non-minimum phase state). From this point of the system, it brings to study for controlling this system by using PID controller which controller's parameters are adjusted based on OBSCA. There are 3 experiments. The first experiment is to study boundary of PID controller for controlling quadrupole tank system in various conditions. The second experiment is to find appropriate factor level of OBSCA. The factors are population size and maximum iteration for controlling the system in various conditions. For the final experiment, appropriate factor level of OBSCA from previous experiment and appropriate factor levels of SCA and PSO will be used to adjust parameters of PID controllers, then performance of the controllers will be compared by *ITAE* values and responses of the system.

From the experiment results, it was found that the quadrupole tank system with PID controller based on OBSCA has better performance than the system with PID controllers based on SCA and PSO, in the view of *ITAE* value, for minimum phase state and non-minimum phase state when no disturbance. Besides, the responses of the system which based on OBSCA are better than the responses obtained from other methods for non-minimum phase state when no disturbance and having disturbance.

Graduate Studies

Field of Engineering Technology

Academic Year 2023

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีโดยได้รับคำปรึกษาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กันติชา กิตติพิรชล จากประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรรพงค์ ทานอก ประจำคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และจากกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวดี วงษ์สุวรรณ และรองศาสตราจารย์ ดร.วราร ศรีเชวงทรัพย์ อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ รวมถึงอาจารย์ทุกท่านที่มีได้เอื้อนามมา ณ ที่นี้ด้วย ที่ได้คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในทุกขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้เป็นอย่างดี เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความเรียบร้อยสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น ที่ได้ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอพระคุณบิดา มารดา และสมาชิกในครอบครัวทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ ความห่วงใย คอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัย และสนับสนุนการทำงานจนประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

มีชัย มากบุญ

TNI

TAI - NICH I INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญรูป	ฏ
รายการสัญลักษณ์	ด
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 แผนงานและระยะเวลาการดำเนินงาน	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ระบบที่มีการป้อนสัญญาณเข้าและออกหลายสัญญาณ (Multi-Input Multi-Output System)	5
2.2 ระบบถัง 4 ถัง (Quadruple Tank System)	8
2.2.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบถัง 4 ถัง	9
2.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบถัง 4 ถัง	11
2.2.3 คุณสมบัติของระบบถัง 4 ถัง ณ สภาวะคงตัว	13
2.2.4 ตำแหน่งของ Zero	14
2.3 ตัวควบคุมพีไอดีและดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ (PID Controller and Integral Performance Index Criteria)	15

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.4 วิธีการหาค่าโดยประมาณ (Approximate Methods)	17
2.4.1 การหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO)	18
2.4.2 อัลกอริทึมไซน์-โคไซน์ (Sine-Cosine Algorithm; SCA)	19
2.5 วิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามอัลกอริทึมไซน์โคไซน์	21
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
3 เปรียบเทียบวิธีการวิจัย	34
3.1 กรอบแนวคิดการวิจัย	34
3.2 การออกแบบจำลองระบบถึง 4 ถึง	36
3.3 การประยุกต์ตัวควบคุมพีไอดีและการใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบระบบ	51
3.4 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาคในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี	53
3.5 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมไซน์โคไซน์ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี	55
3.6 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไซน์โคไซน์ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี.....	57
3.7 การออกแบบการทดลองหาขอบเขตของตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถึง	58
3.8 การออกแบบการทดลองหาปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไซน์โคไซน์ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถึง	60
3.9 การออกแบบการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไซน์โคไซน์กับวิธีการอื่นในการปรับตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถึง	60
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	61

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์หาขอบเขตของตัวควบคุมพีไอดี	61
4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรง ข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริดในการปรับตัวควบคุมพีไอดี (OBSCA)	63
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณี ระบบไม่ถูกรบกวน	63
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณี ระบบถูกรบกวน	66
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน	68
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน	71
4.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการ เรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริดกับวิธีการอื่นต่อการ ปรับตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบถึง 4 ถึง	73
4.3.1 การวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับตัว ควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ด้วยวิธี OBSCA, SCA และ PSO	73
4.3.2 การวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับตัว ควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ด้วยวิธี OBSCA, SCA และ PSO	77
4.3.3 การวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับตัว ควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ด้วยวิธี OBSCA, SCA และ PSO	81

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3.4 การวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับตัวควบคุมฟีดกับระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ด้วยวิธี OBSCA, SCA และ PSO	84
5 สรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	87
5.1 สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์หาขอบเขตของตัวควบคุมฟีด 87	87
5.2 สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไนในการปรับตัวควบคุมฟีด 87	87
5.3 สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไนกับวิธีการอื่นต่อการปรับตัวควบคุมฟีดสำหรับระบบถึง 4 ถึง	88
5.4 ข้อเสนอแนะ	89
บรรณานุกรม	90
ประวัติย่อผู้วิจัย	93

TNI

NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินการศึกษาวิจัย	4
2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมต้าฮิวริสติกส์ในการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดี	25
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ minimum phase	36
3.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ non-minimum phase	37
3.3 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงเปิด สำหรับสัญญาณป้อนออก 1	44
3.4 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงเปิด สำหรับสัญญาณป้อนออก 2	44
3.5 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงปิด สำหรับสัญญาณป้อนออก 1	47
3.6 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงปิด สำหรับสัญญาณป้อนออก 2	47
3.7 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงปิด กรณีระบบถูกรบกวน สำหรับสัญญาณป้อนออก 1	51
3.8 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงปิด กรณีระบบถูกรบกวน สำหรับสัญญาณป้อนออก 2	51
3.9 ชุดขอบเขตของการทดลองหาขอบเขตที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอดีทั้ง 2 ตัวกับระบบถึง 4 ถึง	59
3.10 ปัจจัยและค่าระดับปัจจัยของการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง	60
4.1 ค่าตัวบ่งชี้ผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2	75
4.2 ค่าตัวบ่งชี้ผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2	79
4.3 ค่าตัวบ่งชี้ผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะเป็นแบบ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2	83
4.4 ค่าตัวบ่งชี้ผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะเป็นแบบ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2	86

สารบัญรูป

รูป		หน้า
2.1	การวิเคราะห์เวกเตอร์ในปริภูมิสถานะ	5
2.2	แบบจำลองเวกเตอร์ปริภูมิสถานะของระบบเชิงเส้นแบบวงเปิด	6
2.3	แบบจำลองเวกเตอร์ปริภูมิสถานะของระบบเชิงเส้นแบบวงปิด	7
2.4	แบบจำลองระบบถึง 4 ถึง	9
2.5	บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดี	16
2.6	แผนผังการทำงานของการทำงานหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO)	19
2.7	แผนผังการทำงานของอัลกอริทึมไฮโคไซน์ (SCA)	21
2.8	แผนผังการทำงานของวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮโคไซน์ (OBSCA)	23
3.1	แผนผังระเบียบวิธีวิจัย	35
3.2	แผนภาพ Pole-Zero ของระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ minimum phase	39
3.3	แผนภาพ Pole-Zero ของระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ non-minimum phase	40
3.4	แบบจำลองระบบใน Simulink ของ MATLAB	41
3.5	โค้ด MATLAB เพื่อแทนค่าตัวแปรในแบบจำลองระบบใน Simulink	41
3.6	ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงเปิด	42
3.7	ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงเปิด	42
3.8	ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงเปิด	43
3.9	ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงเปิด	43
3.10	แบบจำลองระบบ แบบวงปิด	45
3.11	ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงปิด	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
3.12 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงปิด	46
3.13 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงปิด	46
3.14 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงปิด	47
3.15 แบบจำลองระบบ แบบวงปิด รวมกับตัวรบกวน	48
3.16 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงปิด กรณีระบบถูกรบกวน	49
3.17 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงปิด กรณีระบบถูกรบกวน	49
3.18 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงปิด กรณีระบบถูกรบกวน.....	50
3.19 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงปิด กรณีระบบถูกรบกวน.....	50
3.20 แบบจำลองของระบบถึง 4 ถึงกับตัวควบคุมพีไอดี ที่รูป 1 และ 2	52
3.21 การประยุกต์ตัวควบคุมพีไอดีและใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบระบบ ควบคุม	52
3.22 แผลงผังวิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ในการปรับพารามิเตอร์ของ ตัวควบคุมพีไอดี	53
3.23 แผลงผังวิธีการดำเนินการของอัลกอริทึมไฮไนโคไนซ์ ในการปรับพารามิเตอร์ ตัวควบคุมพีไอดี	55
3.24 แผลงผังวิธีการดำเนินการของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไนซ์ ในการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี	57
4.1 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase ที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดี เมื่อใช้ชุดขอบเขตต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน	61

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.2 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase ที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดี เมื่อใช้ชุดขอบเขตต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน	61
4.3 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase ที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดี เมื่อใช้ชุดขอบเขตต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน	62
4.4 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase ที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดี เมื่อใช้ชุดขอบเขตต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน	62
4.5 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (N) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน	63
4.6 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนรอบค้นหา (<i>Max Iteration</i>) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน	64
4.7 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (N) ร่วมกับจำนวนรอบค้นหา (<i>Max Iteration</i>) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน	64
4.8 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (N) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน	66
4.9 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนรอบค้นหา (<i>Max Iteration</i>) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน	66
4.10 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (N) ร่วมกับจำนวนรอบค้นหา (<i>Max Iteration</i>) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.11 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (<i>N</i>) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน	68
4.12 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนรอบค้นหา (<i>Max Iteration</i>) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน	69
4.13 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (<i>N</i>) ร่วมกับจำนวนรอบค้นหา (<i>Max Iteration</i>) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน	69
4.14 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (<i>N</i>) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน	71
4.15 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนรอบค้นหา (<i>Max Iteration</i>) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน	71
4.16 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (<i>N</i>) ร่วมกับจำนวนรอบค้นหา (<i>Max Iteration</i>) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน ..	72
4.17 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบ สภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี กรณีระบบไม่ถูกรบกวน	73
4.18 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 1 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO (a) ช่วงเวลาทั้งหมด 0-3000 วินาที (b) ขยายภาพช่วงเวลา 0-3 วินาที	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.19 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO (a) ช่วงเวลาทั้งหมด 0-3000 วินาที (b) ขยายภาพช่วงเวลา 0-3 วินาที	75
4.20 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบ สภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี กรณีระบบถูก รบกวน	77
4.21 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 1 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO (a) ช่วงเวลาทั้งหมด 0-3000 วินาที (b) ขยายภาพช่วงเวลา 0-3 วินาที	78
4.22 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO (a) ช่วงเวลาทั้งหมด 0-3000 วินาที (b) ขยายภาพช่วงเวลา 0-3 วินาที	79
4.23 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบ สภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี กรณีระบบไม่ถูก รบกวน	81
4.24 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 1 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO	82
4.25 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO	82
4.26 กราฟแสดงผลค่า <i>ITAE</i> ของผลตอบสนองของระบบ สภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี กรณีระบบถูก รบกวน	84
4.27 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 1 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO	85
4.28 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO	85

รายการสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\dot{x}(t)$	อนุพันธ์ตามเวลาของเวกเตอร์ตัวแปรสถานะ
$x(t)$	เวกเตอร์ตัวแปรสถานะ
$y(t)$	เวกเตอร์ตัวแปรป้อนออกหรือเวกเตอร์ผลลัพธ์
$u(t)$	เวกเตอร์ตัวแปรป้อนเข้าหรือเวกเตอร์สัญญาณควบคุม
A	เมทริกซ์ตัวแปรสถานะหรือเมทริกซ์ระบบ
B	เมทริกซ์ป้อนเข้า
C	เมทริกซ์ป้อนออก
D	เมทริกซ์ป้อนกลับ
K	อัตราขยายป้อนกลับตัวแปรสถานะ มีขนาดเมทริกซ์ $1 \times n$
$r(t)$	สัญญาณป้อนเข้าอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย
n	จำนวนตัวแปรสถานะ
$\dot{m}_{in}$	อัตราการไหลของมวลเข้า
$\dot{m}_{out}$	อัตราการไหลของมวลออก
A_i	พื้นที่ของถัง i มีหน่วยเป็น cm^2
$\dot{q}_{in_i}$	อัตราการไหลเข้า
$\dot{q}_{out_i}$	อัตราการไหลออก
γ_1	อัตราส่วนการไหลของน้ำไปถัง 1 และถัง 4
γ_2	อัตราส่วนการไหลของน้ำไปถัง 2 และถัง 3
k_i	ค่าคงที่สัดส่วนของปั้มน้ำ i มีหน่วยเป็น $\frac{cm^3}{Vs}$
v_i	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าปั้ม i มีหน่วยเป็น V
h_i	ความสูงระดับน้ำในถัง i มีหน่วยเป็น cm
g	ค่าความโน้มถ่วงเท่ากับ 981 มีหน่วยเป็น $\frac{cm}{s^2}$
a_i	พื้นที่ปากท่อของถัง i มีหน่วยเป็น cm^2 และเป็นค่าคงที่เท่ากับ 2 ของอัลกอริทึมไฮเซน-โคไซน์
A_i	พื้นที่ของถัง i มีหน่วยเป็น cm^2
h_i^0	ความสูงระดับน้ำในถัง i ที่สภาวะคงตัว
v_i^0	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าปั้ม i ที่สภาวะคงตัว

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
T_i	ตัวแปรการคำนวณจากสมการ $\frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}$ และจำนวนรอบสูงสุดในการวนลูป ของอัลกอริทึมไฮไนน์-โคไนน์
$G(s)$	ระบบฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเมทริกซ์
η	ตัวบ่งชี้การบอกสถานะระบบ 4 ถังว่า สถานะ minimum phase หรือ สถานะ non-minimum phase
K_P	อัตราขยายสัดส่วน
K_I	อัตราขยายปริพันธ์
K_D	อัตราขยายอนุพันธ์
$e(t)$	ผลต่างของสัญญาณอ้างอิงกับผลลัพธ์
t	เวลา มีหน่วยเป็น วินาที และจำนวนครั้งที่ทำการค้นหา (Iteration) ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค
d	มิติ (Dimension) ของขอบเขตที่ต้องการค้นหา
x_{id}	ตำแหน่งของอนุภาคที่ i มิติ d
v_{id}	ความเร็วสำหรับอนุภาคที่ i มิติ d
$pbest_{id}$	ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหามาแล้วของอนุภาคที่ i มิติ d
$gbest_{id}$	อนุภาคที่ค้นหาคำตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด
ω	ตัวประกอบน้ำหนักความเฉื่อย (Inertial Weight Factor)
c_1, c_2	ค่าคงที่ของอัตราเร่ง
$rand$	ค่าที่ได้จากการสุ่มในช่วง $[0,1]$
v_i^t	ความเร็วของอนุภาคที่ i ในรอบที่ t
P_i	ผลลัพธ์ปลายทาง
X_i	ค่าตำแหน่งปัจจุบัน
$ \cdot $	การระบุของค่าสัมบูรณ์
r	ค่าตัวแปรสุ่ม
$\bar{X}_i$	ชุดค้นหาตรงกันข้ามของ X_i
u_i	ขอบเขตบนของพื้นที่ในการค้นหา
l_i	ขอบเขตล่างของพื้นที่ในการค้นหา

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
N	จำนวนประชากร และจำนวนอนุภาค
(Max Iteration)	จำนวนรอบค้นหา
OBSCA	วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์
SCA	วิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์
PSO	วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

การควบคุมระบบแบบดั้งเดิมเป็นการควบคุมที่เหมาะสมกับระบบที่มีสัญญาณเข้าระบบและสัญญาณออกจากกระบบเพียงสัญญาณเดียว (single-input single-output: SISO) จึงสามารถใช้ในการออกแบบและศึกษาระบบควบคุมอย่างง่ายได้ แต่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้ระบบที่มีสัญญาณเข้าระบบและสัญญาณออกจากกระบบหลายสัญญาณ (multiple-input multiple-Output: MIMO) ทำให้เกิดปัญหาในการออกแบบระบบควบคุมที่ไม่สามารถทำได้หรือทำได้ยาก จึงได้มีการควบคุมระบบแบบสมัยใหม่เข้ามาช่วยในการออกแบบเพื่อควบคุมระบบที่มีสัญญาณเข้าและออกหลายสัญญาณ โดยจะแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบอยู่ในรูปของเวกเตอร์ในปริภูมิสถานะ (state space)

การควบคุมระบบไม่ว่าจะเป็นแบบดั้งเดิมหรือแบบสมัยใหม่ต้องมีตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพที่ดีมาใช้ในการควบคุม ซึ่งตัวควบคุมที่นิยมใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรม คือ ตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) เนื่องจากมีการใช้งานที่ง่ายโดยปรับพารามิเตอร์ที่เรียกว่าอัตราขยาย (gain) สามค่า คือ อัตราขยายสัดส่วน (proportional: P) อัตราขยายปริพันธ์ (integral: I) และอัตราขยายอนุพันธ์ (derivative: D) การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี มีวิธีการในการปรับค่าอยู่หลายวิธี โดยเริ่มแรกจะเป็นการคำนวณด้วยวิธีของ J. G. Ziegler และ N. B. Nichols [1] เป็นหลักในการปรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ แต่ในปัจจุบันเริ่มมีการนำปัญญาประดิษฐ์ของกลุ่มเมตาฮิวริสติก มาใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มากขึ้น ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาหลายงานวิจัยที่นำอัลกอริทึมจากกลุ่มเมตาฮิวริสติกไปใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี เช่น การปรับค่าตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบรักษาแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยวิธีหมากรุก (CA) ของ คณาวุฒิ โพธิยา และ วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล [2] และการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (SCA) ในการหาค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุมในระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและวิเคราะห์ความแข็งแกร่งของ J. Agarwal et al. [3] เป็นต้น การใช้อัลกอริทึมดังกล่าวช่วยลดเวลาในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการควบคุมระบบให้มีเสถียรภาพที่ดีขึ้น

อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมกลุ่มเมตาฮิวริสติกส่วนใหญ่มีจุดอ่อน คือ การค้นหาค่าที่เหมาะสมยังไม่ดีพอ และค่าที่ค้นหามาได้ยังติดอยู่ที่เดิม เพื่อเป็นการลดข้อเสียเหล่านี้ จึงมีการเสริมวิธีบางอย่างเพื่อช่วยการค้นหาคำตอบของอัลกอริทึมไม่ว่าจะเป็น การใช้โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) และตรรกศาสตร์แบบคลุมเครือ (fuzzy logic) งานวิจัยนี้จะเน้นที่วิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรง

ข้าม (opposite-based learning) ที่เสนอโดย S. Mahdavi et al. [4] ร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมด้าฮิวริสติก ตัวอย่างวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมด้าฮิวริสติก เช่น การใช้งานวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮโคไซน์ (OBSCA) เสนอโดย M. A. Elaziz et al. [5] และวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของหมาป่าสีเทา (OBGWO) เสนอโดย Y. Xiaobing et al. [6] เป็นต้น ซึ่งได้มีการนำอัลกอริทึมที่เสริมวิธีดังกล่าวนี้มาใช้ในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี และได้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าอัลกอริทึมที่ไม่เสริม ดังในงานวิจัยของ S. Ekinici et al. [7] ที่ได้เสนอวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับการหาค่าที่เหมาะสมสารละลายเฮนรีแก๊ส (OBL/HGSO) ในการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุมระบบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เป็นต้น

จากการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมทั้งที่เป็นแบบเสริมวิธีและไม่เสริมมาปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีในระบบนั้นหลายงานวิจัยใช้ทั้งระบบแบบ SISO และ MIMO ในสถานะที่ระบบมีเสถียรภาพ ส่วนสถานะของระบบที่ไม่มีเสถียรภาพมีไม่มาก ทำให้งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุมระบบที่มีการป้อนสัญญาณแบบเข้าและออกหลายสัญญาณโดยใช้อัลกอริทึมวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮโคไซน์ โดยในการศึกษาจะวิเคราะห์ถึงความสามารถในการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมของระบบที่มีเสถียรภาพ, ไม่มีเสถียรภาพ และถูกรบกวน รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบ เช่น ค่าพุ่งเกินสูงสุด (overshoot) และค่าเวลาเข้าสู่สมดุล (settling time) เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮโคไซน์สำหรับระบบ 4 ถึงทั้งในสถานะปกติที่ระบบมีเสถียรภาพ และไม่มีเสถียรภาพ และสถานะที่ระบบถูกรบกวน

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอดีถูกปรับค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮโคไซน์ กับวิธีอัลกอริทึมไฮโคไซน์ และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค

1.3. ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 กำหนดสัญญาณป้อนเข้าเป็นความสูงของน้ำที่ต้องการ และสัญญาณป้อนออกเป็นความสูงของระดับน้ำที่วัดได้ ของระบบถึง 4 ถึง

1.3.2 การประเมินสมรรถนะของตัวควบคุมพีไอดีจะการใช้การปรับแก้ค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (ITAE) เป็นตัวประเมิน

1.3.3 ใช้โปรแกรมในการสร้างแบบจำลองและจำลองการทำงาน

1.4. ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 สอบป้องกันโครงร่างวิทยานิพนธ์
- 1.4.3 ออกแบบระเบียบวิธีวิจัย
- 1.4.4 สร้างแบบจำลองและออกแบบการทดลอง
- 1.4.5 เก็บผลการทดลองพร้อมวิเคราะห์ผล
- 1.4.6 เตรียมบทความทางวิชาการ
- 1.4.7 สรุปผลการทดลองและจัดทำวิทยานิพนธ์
- 1.4.8 สอบป้องกันวิทยานิพนธ์

1.5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบ 4 ถึงด้วยวิธีการเรียนรู้จาก
สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริดได้



1.6 แผนงานและระยะเวลาดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ	ปี พ.ศ. 2564		ปี พ.ศ. 2565											
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง														
2. สอบป้องกันโครงร่างวิทยานิพนธ์														
3. ออกแบบระเบียบวิธีวิจัย														
4. สร้างแบบจำลองและออกแบบการทดลอง														
5. เก็บผลการทดลองพร้อมวิเคราะห์ผล														
6. เตรียมบทความทางวิชาการ														
7. สรุปผลการทดลองและจัดทำวิทยานิพนธ์														
8. สอบป้องกันวิทยานิพนธ์														

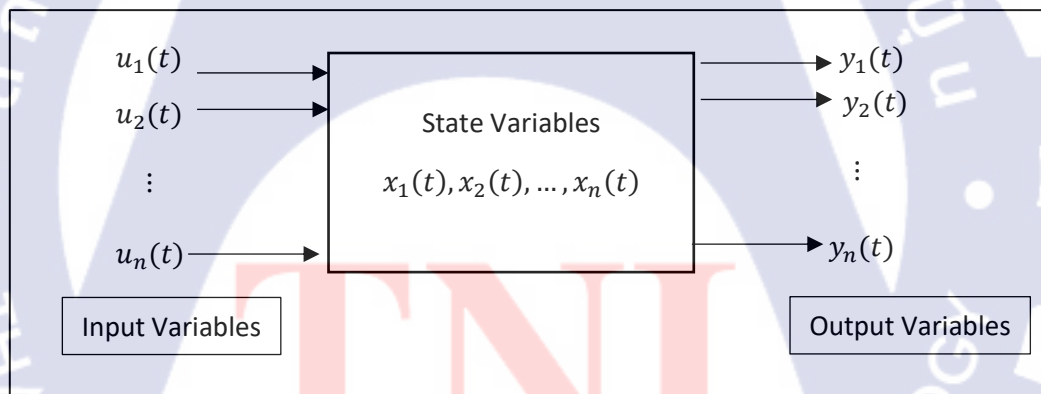
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยชิ้นนี้ได้มีการอ้างอิงเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อช่วยเป็นข้อมูลในการสนับสนุนในการทำวิจัยโดยมีรายละเอียดดังนี้

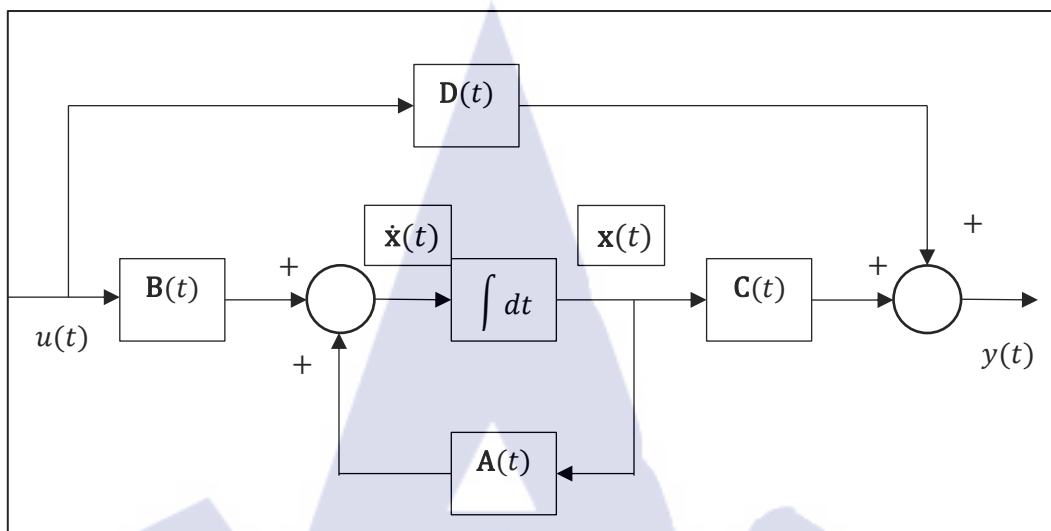
2.1 ระบบที่มีการป้อนสัญญาณเข้าและออกหลายสัญญาณ (Multi-Input Multi-Output System)

ระบบที่มีการป้อนสัญญาณแบบหลายสัญญาณ เป็นระบบที่มีความซับซ้อน เพราะทุกระบบที่ถูกออกแบบมีความสอดคล้องกันและกัน ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์เฉพาะระบบใดระบบหนึ่งได้ จึงวิเคราะห์ระบบโดยแสดงแบบจำลองให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ในปริภูมิสถานะ (state space) การวิเคราะห์เวกเตอร์ในปริภูมิสถานะจากบทที่ 9 ในหนังสือ Modern Control Engineering [8] จะสนใจตัวแปรหลักอยู่เพียง 3 ตัว คือ ตัวแปรป้อนเข้า (input variable) ตัวแปรป้อนออก (output variable) และตัวแปรสถานะ (state variable) ตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การวิเคราะห์เวกเตอร์ในปริภูมิสถานะ [8]

ในการวิเคราะห์แบบจำลองของเวกเตอร์ในปริภูมิสถานะสามารถเขียนแบบจำลองอยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นรูปแบบแบบจำลองของเวกเตอร์ปริภูมิสถานะของระบบเชิงเส้นแบบวงเปิด



รูปที่ 2.2 แบบจำลองเวกเตอร์ปริภูมิสถานะของระบบเชิงเส้นแบบวงปิด

ระบบในรูปที่ 2.2 นี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \quad (2.1)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}u(t) \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- $\dot{\mathbf{x}}(t)$ คืออนุพันธ์ตามเวลาของเวกเตอร์ตัวแปรสถานะ
 - $\mathbf{x}(t)$ คือเวกเตอร์ตัวแปรสถานะ
 - $y(t)$ คือเวกเตอร์ตัวแปรป้อนออกหรือเวกเตอร์ผลลัพธ์
 - $u(t)$ คือเวกเตอร์ตัวแปรป้อนเข้าหรือเวกเตอร์สัญญาณควบคุม
 - $\mathbf{A}$ คือเมทริกซ์ตัวแปรสถานะหรือเมทริกซ์ระบบ
 - $\mathbf{B}$ คือเมทริกซ์ป้อนเข้า
 - $\mathbf{C}$ คือเมทริกซ์ป้อนออก
 - $\mathbf{D}$ คือเมทริกซ์ป้อนกลับ

สมการที่ 2.1 และ 2.2 เรียกว่าสมการสถานะ (state equation) และสมการผลลัพธ์ (output equation) ตามลำดับ จากสมการทั้ง 2 นำไปแปลงลาปลาซแล้วเขียนเป็นสมการผลลัพธ์ใหม่ในโดเมนความถี่ได้ตามสมการที่ 2.3 และ 2.4

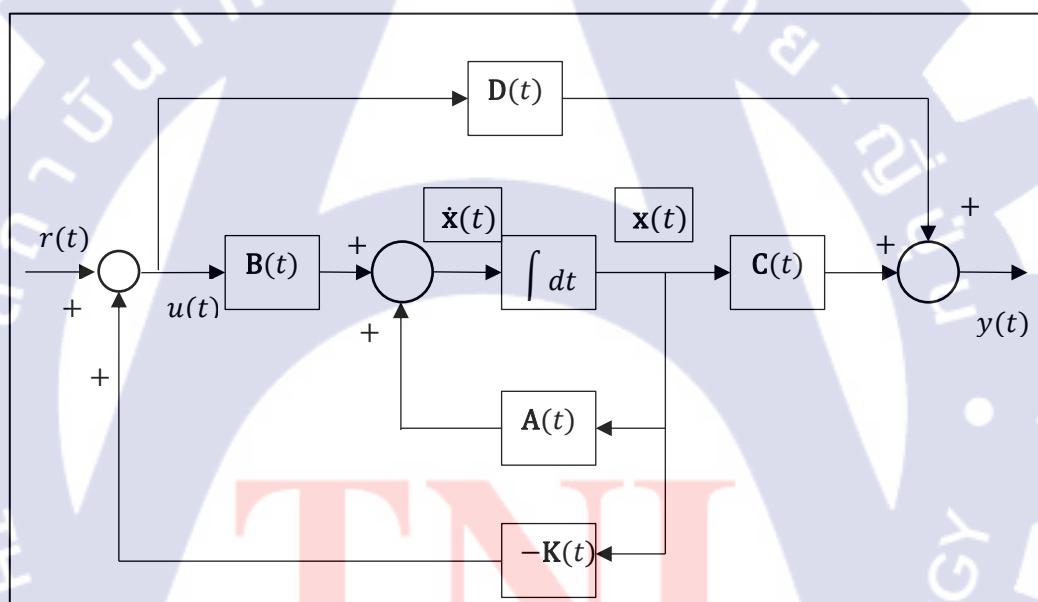
$$X(s) = (sI - A)^{-1}BU(s) \quad (2.3)$$

$$Y(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D]U(s) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 สามารถนำมาแสดงเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนที่ประกอบด้วยตัวแปร A B C และ D ได้ตามสมการที่ 2.5

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D] \quad (2.5)$$

ส่วนรูปแบบจำลองของเวกเตอร์ปริภูมิสถานะของระบบเชิงเส้นแบบวงปิด จะเป็นไปตามรูปที่ 2.3 และมีสมการตามสมการที่ 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.3 แบบจำลองเวกเตอร์ปริภูมิสถานะของระบบเชิงเส้นแบบวงปิด

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) + Br(t) \quad (2.6)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (2.7)$$

เมื่อ K คือ อัตราขยายป้อนกลับตัวแปรสถานะ มีขนาดเมทริกซ์ $1 \times n$
 $r(t)$ คือ สัญญาณป้อนเข้าอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย
 n คือ จำนวนตัวแปรสถานะ

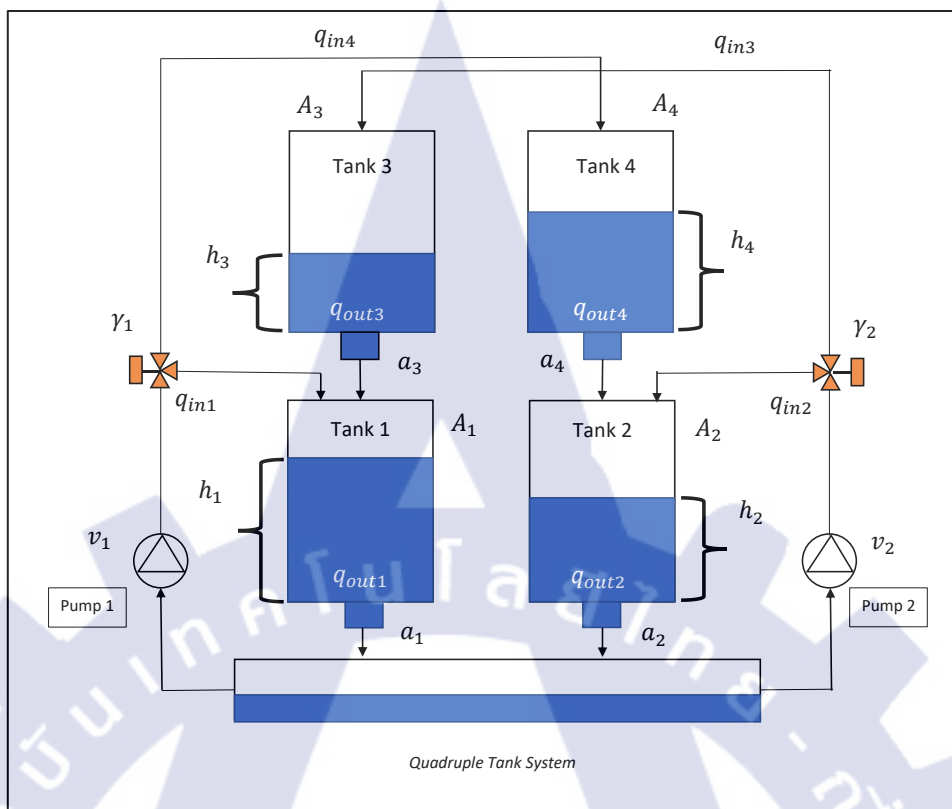
ข้อดีของการจัดสมการอยู่ในรูปแบบเวกเตอร์ปริภูมิสถานะ คือ สามารถนำไปประยุกต์กับระบบที่มีการป้อนสัญญาณเข้าและออกหลายสัญญาณได้ และสะดวกต่อการคำนวณหาการตอบสนองของระบบด้วยคอมพิวเตอร์

2.2 ระบบถัง 4 ถัง (Quadruple Tank System)

ระบบถัง 4 ถัง เป็นระบบที่ถูกออกแบบและใช้สำหรับการทดลองและศึกษาพฤติกรรมของระบบในห้องปฏิบัติการตามงานวิจัย [9], [10] มีแนวคิดหลักในการสอนให้นักศึกษามีทักษะตามข้อต่อไปนี้

1. จัดรูปสมการไม่เชิงเส้นเป็นสมการเชิงเส้น และออกแบบโครงสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบหลายตัวแปร
2. ออกแบบตัวควบคุมแบบไม่รวมศูนย์กลาง
3. การประยุกต์ใช้ Decoupler เพื่อลดผลกระทบจากการผสานกันของระบบ
4. การประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบหลายตัวแปรและเลือกโครงสร้างระบบควบคุมที่ดีที่สุดโดยขึ้นอยู่กับตัวแปรเหล่านั้น

แผนภาพระบบถัง 4 ถัง จะเป็นไปตามรูปที่ 2.4 ระบบนี้มีสัญญาณป้อนเข้า 2 สัญญาณ คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าปั๊ม 1 และปั๊ม 2 และสัญญาณป้อนออก 2 สัญญาณ คือ ความสูงของระดับน้ำในถัง 1 และถัง 2 เมื่อสัญญาณป้อนเข้ามีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ผลลัพธ์ทั้ง 2 ค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยเป้าหมายของการศึกษาคือการควบคุมระดับน้ำในถังด้านล่าง 2 ถังด้วยปั๊มน้ำ 2 เครื่อง



รูปที่ 2.4 แบบจำลองระบบถัง 4 ถัง

2.2.1 สมการทางคณิตศาสตร์ของระบบถัง 4 ถัง

จากรูปที่ 2.4 สามารถนำมาเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้โดยเริ่มต้นจากกฎสมมูลมวลตามสมการที่ 2.8

$$\frac{dm_T}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (2.8)$$

เมื่อ $\frac{dm_T}{dt}$ คือ มวลสะสมที่เกิดขึ้นตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไปในถังแต่ละถัง

$\dot{m}_{in}$ คือ อัตราการไหลของมวลเข้า

$\dot{m}_{out}$ คือ อัตราการไหลของมวลออก

โดยมวลสะสม ($\frac{dm_T}{dt}$), อัตราการไหลมวลเข้า ($\dot{m}_{in}$) และอัตราการไหลมวลออก ($\dot{m}_{out}$) สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2.9 ถึง 2.11

$$\frac{dm_T}{dt} = \rho \frac{dv}{dt} \quad (2.9)$$

$$\dot{m}_{in} = \rho \dot{q}_{in} \quad (2.10)$$

$$\dot{m}_{in} = \rho \dot{q}_{out} \quad (2.11)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2-8 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบตามสมการที่ 2.12 ดังนี้

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho \dot{q}_{in} - \rho \dot{q}_{out} \quad (2.12)$$

เนื่องจากของเหลวในระบบนี้เป็นของเหลวชนิดเดียวกัน จึงจัดสมการใหม่ได้ตามสมการที่ 2.13 และจัดรูปแบบให้ได้ผลลัพธ์เป็นความสูงที่เปลี่ยนไปตามเวลา ($\frac{dh_i}{dt}$) จะได้ตามสมการที่ 2.14

$$\frac{dv}{dt} = \dot{q}_{in} - \dot{q}_{out} \quad (2.13)$$

$$A_i \frac{dh_i}{dt} = \dot{q}_{in_i} - \dot{q}_{out_i} \quad (2.14)$$

เมื่อ A_i คือ พื้นที่ของถัง i มีหน่วยเป็น cm^2

$\dot{q}_{in_i}$ คือ อัตราการไหลเข้า

$\dot{q}_{out_i}$ คือ อัตราการไหลออก

อัตราการไหลเข้า ($\dot{q}_{in_i}$) เกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่ปั้มน้ำ ให้น้ำไหลเข้าสู่ถังแต่ละถัง โดยสมการการไหลของน้ำเข้าสู่ระบบถึง 4 ถัง เป็นไปตามสมการที่ 2.15 ถึง 2.18

$$q_{in_1} = \gamma_1 k_1 v_1 \quad (2.15)$$

$$q_{in_2} = \gamma_2 k_2 v_2 \quad (2.16)$$

$$q_{in_3} = (1 - \gamma_2) k_2 v_2 \quad (2.17)$$

$$q_{in_4} = (1 - \gamma_1) k_1 v_1 \quad (2.18)$$

เมื่อ γ_1 คือ อัตราส่วนการไหลของน้ำไปยัง 1 และถัง 4

γ_2 คือ อัตราส่วนการไหลของน้ำไปยัง 2 และถัง 3

k_i คือ ค่าคงที่สัดส่วนของปั้มน้ำ i มีหน่วยเป็น $\frac{cm^3}{Vs}$
 v_i คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าปั้มน้ำ i มีหน่วยเป็น V

อัตราการไหลออก (q_{out_i}) เกิดจากการไหลของน้ำออกจากถัง ตามความเร่งโน้มถ่วง (g) ของโลกและความสูงของถังแต่ละถัง (h_i) โดยใช้สมการของแบร์นูลลี จะได้อัตราการไหลออกของระบบถัง 4 ถังตามสมการที่ 2.19

$$q_{out_i} = a_i \sqrt{2gh_i} \quad (2.19)$$

เมื่อ h_i คือ ความสูงระดับน้ำในถัง i มีหน่วยเป็น cm
 g คือ ค่าความโน้มถ่วงเท่ากับ 981 มีหน่วยเป็น $\frac{cm}{s^2}$
 a_i คือ พื้นที่ปากท่อของถัง i มีหน่วยเป็น cm^2
 A_i คือ พื้นที่ของถัง i มีหน่วยเป็น cm^2

นำสมการที่ 2.15 ถึง 2.19 มาแทนในสมการที่ 2-14 และจัดรูปสมการใหม่ จะได้สมการของระบบ 4 ถัง ทั้งระบบตามสมการที่ 2.20 ถึง 2.23 ดังนี้

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1(t)} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3(t)} + \frac{\gamma_1 k_1 v_1(t)}{A_1} \quad (2.20)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2(t)} + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4(t)} + \frac{\gamma_2 k_2 v_2(t)}{A_2} \quad (2.21)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3(t)} + \frac{(1 - \gamma_2) k_2 v_2(t)}{A_3} \quad (2.22)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4(t)} + \frac{(1 - \gamma_1) k_1 v_1(t)}{A_4} \quad (2.23)$$

2.2.2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบถัง 4 ถัง

สมการที่ 2.20 ถึง 2.23 เป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น เมื่อนำวิธีการประมาณเชิงเส้นโดยกำหนดให้จุดสภาวะคงตัวระดับน้ำแต่ละถังเป็น h_1^0, h_2^0, h_3^0 และ h_4^0 แรงดันไฟฟ้าของปั้มน้ำ 1 และ 2 เป็น v_1^0 กับ v_2^0 และ $\Delta h_i = h_i - h_i^0$ กับ $\Delta v_i = v_i - v_i^0$ เมื่อ $i = 1, 2$ จะได้เป็นสมการเชิงเส้นตามสมการที่ 2.24 ถึง 2.27

$$\frac{dh_1}{dt} = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_1^0}} \Delta h_1 + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2h_3^0}} \Delta h_3 + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} \Delta v_1 \quad (2-24)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2h_2^0}} \Delta h_2 + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2h_4^0}} \Delta h_4 + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} \Delta v_2 \quad (2-25)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{\frac{g}{2h_3^0}} \Delta h_3 + \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} \Delta v_2 \quad (2-26)$$

$$\frac{dh_4}{dt} = -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{\frac{g}{2h_4^0}} \Delta h_4 + \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4} \Delta v_1 \quad (2-27)$$

จาก 4 สมการนี้เอง มาแปลงรูปแบบสมการตามปริภูมิสถานะสมการที่ 2.1 และ 2.2

โดยกำหนดให้ $T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}$, $x = \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \\ \Delta h_3 \\ \Delta h_4 \end{bmatrix}$ และ $u = \begin{bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \end{bmatrix}$ จะได้สมการเชิงเส้นตามที่สมการ 2.28

$$\frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & \frac{A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} \\ \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix} u \quad (2.28)$$

ความสูงของระดับน้ำที่วัดได้ของถัง 1 และ ถัง 2 คือ $y_1 = k_c h_1$ และ $y_2 = k_c h_2$ ซึ่งนำไปเขียนเป็นสมการผลลัพธ์เมทริกซ์ได้ตามสมการที่ 2.29

$$y = \begin{bmatrix} k_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_c & 0 & 0 \end{bmatrix} x \quad (2.29)$$

จากสมการที่ 2.28 และ 2.29 เมื่อนำไปจัดรูปเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปแบบสมการที่ 2.5 จะได้สมการที่ 2.30 และจากสมการดังกล่าวสามารถแบ่งเป็นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยได้สมการตามที่ 2.31 ถึง 2.34

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1 k_c T_1}{(1 + sT_1)A_1} & \frac{(1 - \gamma_2)k_2 k_c T_1}{(1 + sT_3)(1 + sT_1)A_1} \\ \frac{(1 - \gamma_1)k_1 k_c T_2}{(1 + sT_4)(1 + sT_2)A_2} & \frac{\gamma_2 k_2 k_c T_2}{(1 + sT_2)A_2} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$G_{11}(s) = \frac{\gamma_1 k_1 k_c T_1}{(1 + sT_1)A_1} \quad (2.31)$$

$$G_{12}(s) = \frac{(1 - \gamma_2)k_1 k_c T_1}{(1 + sT_3)(1 + sT_1)A_1} \quad (2.32)$$

$$G_{21}(s) = \frac{(1 - \gamma_1)k_2 k_c T_2}{(1 + sT_4)(1 + sT_2)A_2} \quad (2.33)$$

$$G_{22}(s) = \frac{\gamma_2 k_2 k_c T_2}{(1 + sT_2)A_2} \quad (2.34)$$

2.2.3 คุณสมบัติของระบบถึง 4 ถึง ณ สภาวะคงตัว

จากสมการคณิตศาสตร์ของระบบถึง 4 ถึง ณ สภาวะคงตัว ให้ตัวแปรที่จุดคงตัวของระดับน้ำและปั๊มเป็น $h_1^0, h_2^0, h_3^0, h_4^0, v_1^0$ และ v_2^0 ตามลำดับ มาแทนในสมการที่ 2.20, 2.21, 2.22, 2.23 และ 2.24 จะสามารถอธิบายคุณสมบัติของระบบถึง 4 ถึง ดังนี้

จากสมการที่ 2.22 และ 2.23 ณ สภาวะคงตัว จะได้เป็นตามสมการที่ 2.35 และ 2.36

$$\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3^0} = \frac{(1 - \gamma_2)k_2 v_2^0}{A_3} \quad (2.35)$$

$$\frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4^0} = \frac{(1 - \gamma_1)k_1 v_1^0}{A_4} \quad (2.36)$$

จากสมการที่ 2.20 และ 2.21 ณ สภาวะคงตัว และแทนด้วยสมการที่ 2.35 และ 2.36 จะได้ตามสมการที่ 2.37 และ 2.38

$$\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1^0} = \frac{(1-\gamma_2)k_2 v_2^0}{A_1} + \frac{\gamma_1 k_1 v_1^0}{A_1} \quad (2.37)$$

$$\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2^0} = \frac{(1-\gamma_1)k_1 v_1^0}{A_2} + \frac{\gamma_2 k_2 v_2^0}{A_2} \quad (2.38)$$

จากสมการดังกล่าวนี้ ถ้าพิจารณาแยกเป็นตัวแปรป้อนเข้า (v_1^0, v_2^0) และตัวแปรป้อนออกและค่าคงที่ต่างๆ แล้วส่วนที่เหลือจะเป็นตัวกระบวนการที่จัดรูปแล้วเรียกว่าเมทริกซ์ M ตามสมการที่ 2.39

$$M = \begin{bmatrix} \gamma_1 k_1 & (1-\gamma_2)k_2 \\ (1-\gamma_1)k_1 & \gamma_2 k_2 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

เมทริกซ์ดังกล่าว เมื่อคำนวณหาค่าดีเทอร์มิแนนต์ ($\det$) และสมมติให้ $k_1 = k_2 = 1$ จะพบว่าเมทริกซ์นี้เป็นแบบไม่เอกฐานถ้า $\gamma_1 + \gamma_2 \neq 1$ ส่งผลให้อัตราการไหลรวมที่เข้าถึง 1 เป็น $\gamma_1 q_1 + (1-\gamma_2)q_2$ และอัตราการไหลรวมที่เข้าถึง 2 เป็น $\gamma_2 q_1 + (1-\gamma_1)q_2$

แต่ถ้า $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ หรือเป็นเมทริกซ์แบบเอกฐาน ส่งผลให้อัตราการไหลรวมที่เข้าถึงทั้ง 1 และ 2 เป็น $\gamma_1(q_1 + q_2)$ และ $(1-\gamma_1)(q_1 + q_2)$ ตามลำดับ

2.2.4 ตำแหน่งของ Zero

ตำแหน่ง Zero ของระบบฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเมทริกซ์ $G(s)$ ของสมการที่ 2.30 สามารถหาได้จากสมการเศษส่วน ตามสมการที่ 2.40

$$\det G(s) = \frac{k_1 k_2 T_1 T_2 k_c^2}{A_1 A_2 \gamma_1 \gamma_2 \prod_{i=1}^4 (1 + sT_i)} \left[(1 + sT_3)(1 + sT_4) - \frac{(1-\gamma_1)(1-\gamma_2)}{\gamma_1 \gamma_2} \right] \quad (2.40)$$

จากการสมการนี้ จะพบว่า ระบบฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเมทริกซ์นี้มีค่า Zero อยู่ 2 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งแรกจะอยู่ทางด้านซ้ายของแกนจินตภาพเสมอ และตำแหน่งที่ 2 สามารถอยู่ได้ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของแกนจินตภาพได้ ซึ่งการจะพิจารณาดำแหน่งที่ 2 ว่าจะอยู่ด้านไหนของแกนจินตภาพนั้น พิจารณาองค์ประกอบสุดท้ายของสมการที่ 2.40 และแทนด้วย η จะได้ตามสมการที่ 2.41

$$\eta = 1 - \frac{(1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2)}{\gamma_1 \gamma_2} \quad (2.41)$$

ถ้า $\eta < 0$ จะส่งผลให้ตำแหน่ง Zero ที่ 2 อยู่ฝั่งขวาของแกนจินตภาพ ทำให้เป็นระบบไม่มีเสถียรภาพ เป็นสภาวะ non-minimum phase ตามสมการที่ 2.42

ถ้า $\eta > 0$ จะทำให้ตำแหน่ง Zero ที่ 2 อยู่ฝั่งซ้ายของแกนจินตภาพ เป็นระบบมีเสถียรภาพ เป็นสภาวะ minimum phase ตามสมการที่ 2.43

ถ้า $\eta = 0$ จะส่งผลให้ ตำแหน่ง Zero 1 ตำแหน่งของ Zero จะอยู่ที่จุดดั้งเดิม กรณีนี้จะสอดคล้องกับกรณีที่เมทริกซ์แบบเอกฐาน $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ ทำให้เป็นระบบเป็นสภาวะ non-minimum เช่นกัน

$$0 < \gamma_1 + \gamma_2 \leq 1 \quad (2.42)$$

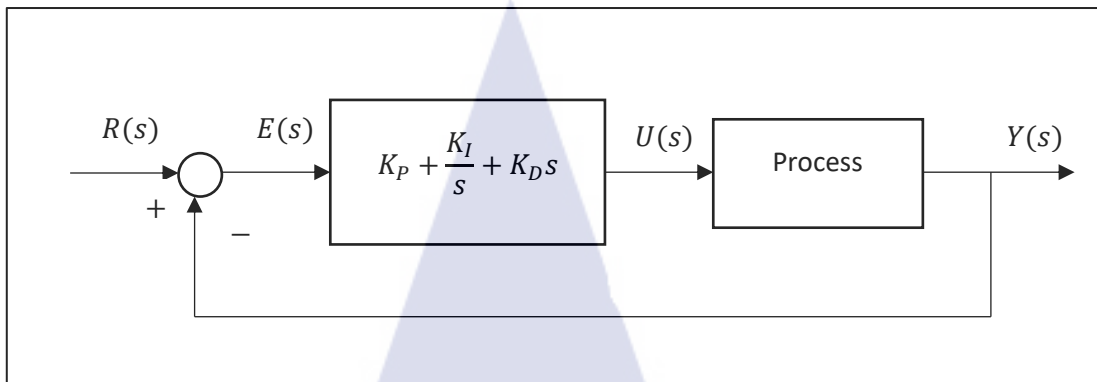
$$1 < \gamma_1 + \gamma_2 \leq 2 \quad (2.43)$$

2.3 ตัวควบคุมพีไอดีและดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ (PID Controller and Integral Performance Index Criteria)

ตัวควบคุมพีไอดี [11] เป็นอุปกรณ์ควบคุมประเภทหนึ่งประกอบไปด้วยอัตราขยาย 3 ค่า คือ อัตราขยายสัดส่วน (proportional gain: K_P), อัตราขยายปริพันธ์ (integration gain: K_I) และอัตราขยายอนุพันธ์ (derivative gain: K_D) นิยมใช้กับระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งระบบแบบป้อนกลับนี้จะนำค่าความผิดพลาดที่ได้จากความแตกต่างของค่าเป้าหมายกับค่าผลลัพธ์ในกระบวนการของระบบมาลดความผิดพลาด ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมพีไอดี จึงขึ้นอยู่กับอัตราขยาย 3 ค่าที่กล่าวมาข้างต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวควบคุมพีไอดีสามารถเขียนในรูปของฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งอยู่ในโดเมนความถี่ของสมการลาปลาซได้ตามสมการที่ (2.44)

$$G_{PID} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (2.44)$$

และบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมพีไอดีจะเป็นไปตามรูปที่ 2.5 ดังนี้



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมป้อนกลับแบบพีไอดี

จากสมการที่ 2-44 เมื่อแปลงให้อยู่ในรูปของโดเมนเวลาจะได้สัญญาณควบคุมดังสมการที่ 2.45

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.45)$$

- เมื่อ $u(t)$ คือ สัญญาณขาออกจากตัวควบคุมพีไอดีหรือสัญญาณควบคุม
- $e(t)$ คือ สัญญาณขาเข้าที่ได้จากการป้อนกลับของระบบหรือค่าความผิดพลาด
- $r(t)$ คือ สัญญาณขาเข้าอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย
- $y(t)$ คือ สัญญาณขาออกจากระบบหรือผลลัพธ์

ผลของอัตราขยายของตัวควบคุมพีไอดีที่มีต่อการตอบสนองของระบบ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. อัตราขยายสัดส่วน ช่วยในเรื่องของการลดค่าความผิดพลาดในสภาวะสมดุลเมื่อค่าอัตราขยายเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของอัตราขยายนี้อาจจะส่งผลให้การตอบสนองของระบบมีการสั่นที่มากขึ้นซึ่งหมายถึงเสถียรภาพของระบบจะลดลง
2. อัตราขยายปริพันธ์ ช่วยในเรื่องของการจัดการไม่ให้มีค่าความผิดพลาดในสภาวะสมดุล แต่ทำให้ระบบมีทั้งค่าพุ่งเกินสูงสุด ค่าเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลช้าลง และบางครั้งอาจจะได้การตอบสนองของระบบที่ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ
3. อัตราขยายอนุพันธ์ ช่วยในเรื่องของการลดค่าพุ่งเกินสูงสุด และค่าเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล รวมไปถึงเพิ่มแนวโน้มให้ระบบมีเสถียรภาพ แต่ตัวควบคุมส่วนนี้จะไวต่อการรบกวน หากระบบถูกรบกวนจะส่งผลให้การควบคุมขาดเสถียรภาพได้

การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแต่ละค่าตัวที่เหมาะสมกับระบบนั้น จะต้องมีการเกณฑ์ที่ใช้ในการวัดค่าของระบบเพื่อชี้วัดว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่นั้นเหมาะสมกับระบบหรือไม่ ซึ่งเกณฑ์ที่จะใช้การวัดในงานวิจัยนี้ จะเป็นเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ คือ การปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์คูณด้วยเวลา (*ITAE*) เป็นฟังก์ชันในการวัดความเหมาะสมของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ที่เน้นการลดค่าความผิดพลาดระหว่างการตอบสนองชั่วคราวเริ่มต้นและปรับข้อผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลานานขึ้น เกณฑ์นี้เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการการตอบสนองและเวลาที่เข้าสู่สมดุลงวดเร็ว รูปแบบสมการที่นำเสนอได้ดังสมการที่ 2.46

$$ITAE = \int_0^t t|e(t)| dt \quad (2.46)$$

เมื่อ $e(t)$ คือ ผลต่างของสัญญาณอ้างอิงกับผลลัพธ์
 t คือ เวลา มีหน่วยเป็น วินาที

จากสมการดังกล่าวถ้าค่า $e(t)$ มีค่าที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเข้าสู่อันต์ ค่าดัชนีสมรรถนะก็จะมีค่าสูงจนเป็นค่าอนันต์ ทำให้การควบคุมระบบไม่เป็นไปตามการออกแบบ แต่ถ้าค่า $e(t)$ มีค่าน้อยลงเข้าสู่ศูนย์ เมื่อเวลาเข้าสู่อันต์ แสดงว่าการควบคุมระบบเป็นไปตามการออกแบบที่ตั้งไว้

2.4 วิธีการหาค่าโดยประมาณ (Approximate Methods)

รูปแบบปัญหา มีทั้งรูปแบบปัญหาที่ง่ายสามารถใช้วิธีการแม่นยำเพื่อหาคำตอบได้ โดยใช้เวลาไม่นาน กับรูปแบบปัญหาที่มีความซับซ้อนมากจนวิธีการแม่นยำอาจไม่สามารถแก้ไขปัญหาเพื่อหาคำตอบได้ หรืออาจจะหาได้แต่ต้องใช้เวลาาน จึงต้องใช้วิธีการหาค่าโดยประมาณ (Approximate Methods) มาช่วยในการปัญหาที่มีรูปแบบเหล่านี้ ซึ่งวิธีการหาค่าโดยประมาณนี้มีอยู่หลายวิธี แต่ที่วิธีนิยมใช้กันนั้นจะเป็นวิธีในกลุ่มของเมตาฮีริสติก (Meta-Heuristic Method)

วิธีเมตาฮีริสติก (Meta-Heuristic Method) เป็นวิธีการหาค่าโดยประมาณแบบหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการสังเกตพฤติกรรมของธรรมชาติ เช่น พฤติกรรมการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต และพฤติกรรมการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต เป็นต้น วิธีการหาคำตอบของกลุ่มนี้ สามารถหาคำตอบของปัญหาที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้เวลาไม่นาน แต่คำตอบที่ได้นั้นอาจจะไม่คำตอบที่ดีที่สุด ตัวอย่างของวิธีในกลุ่มเมตาฮีริสติกนี้ เช่น การหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO), และ อัลกอริทึมไซน์โคไซน์ (Sine-Cosine Algorithm) เป็นต้น

2.4.1 การหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO)

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค [12] เป็นวิธีการหาค่าโดยประมาณที่ถูกคิดค้นโดย Kennedy และ Eberhart ที่ได้รับแรงบันดาลใจมาจากพฤติกรรมกรอยู่รวมกันเป็นกลุ่มและการเคลื่อนที่ค้นหาอาหารของสัตว์ เช่น ผีเสื้อกลางคืน ที่ใช้ประสาทสัมผัสในการได้กลิ่นแหล่งอาหาร ทำให้รู้ว่าแหล่งอาหารต้องไปทางไหน แต่ไม่รู้ตำแหน่งของแหล่งอาหารที่แท้จริง จากพฤติกรรมแบบนี้ ทำให้การเคลื่อนย้ายตำแหน่งแต่ละครั้งต้องอาศัยการอ้างอิงถึงตำแหน่งของตัวเอง และตำแหน่งใกล้เคียงที่เคลื่อนที่ผ่านมาแล้ว เพื่อใช้หาทิศทางเคลื่อนที่ต่อไป จากตรงนี้ทำให้ทราบความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของพวกนก จนนำไปสู่วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาคขึ้นมา การหาผลลัพธ์และการปรับปรุงผลลัพธ์ของวิธีนี้จะนำไปตามสมการการเคลื่อนที่ 2.47 และ 2.48 ดังนี้

$$v_{id}^{t+1} = \omega v_{id}^t + c_1 \text{rand} \cdot (pbest_{id} - x_{id}^t) + c_2 \cdot \text{rand} \cdot (gbest_{id} - x_{id}^t) \quad (2.47)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (2.48)$$

เมื่อ	d	คือ มิติ (Dimension) ของขอบเขตที่ต้องการค้นหา
	x_{id}	คือ ตำแหน่งของอนุภาคที่ i มิติ d
	v_{id}	คือ ความเร็วสำหรับอนุภาคที่ i มิติ d
	$pbest_{id}$	คือ ตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ค้นหามาแล้วของอนุภาคที่ i มิติ d
	$gbest_{id}$	คือ อนุภาคที่ค้นหาคำตอบได้ดีที่สุดจากอนุภาคทั้งหมด
	t	คือ จำนวนครั้งที่ทำการค้นหา (Iteration)
	ω	คือ ตัวประกอบน้ำหนักความเฉื่อย (Inertial Weight Factor)
	c_1, c_2	คือ ค่าคงที่ของอัตราเร่ง
	rand	คือ ค่าที่ได้จากการสุ่มในช่วง $[0,1]$
	v_i^t	คือ ความเร็วของอนุภาคที่ i ในรอบที่ t

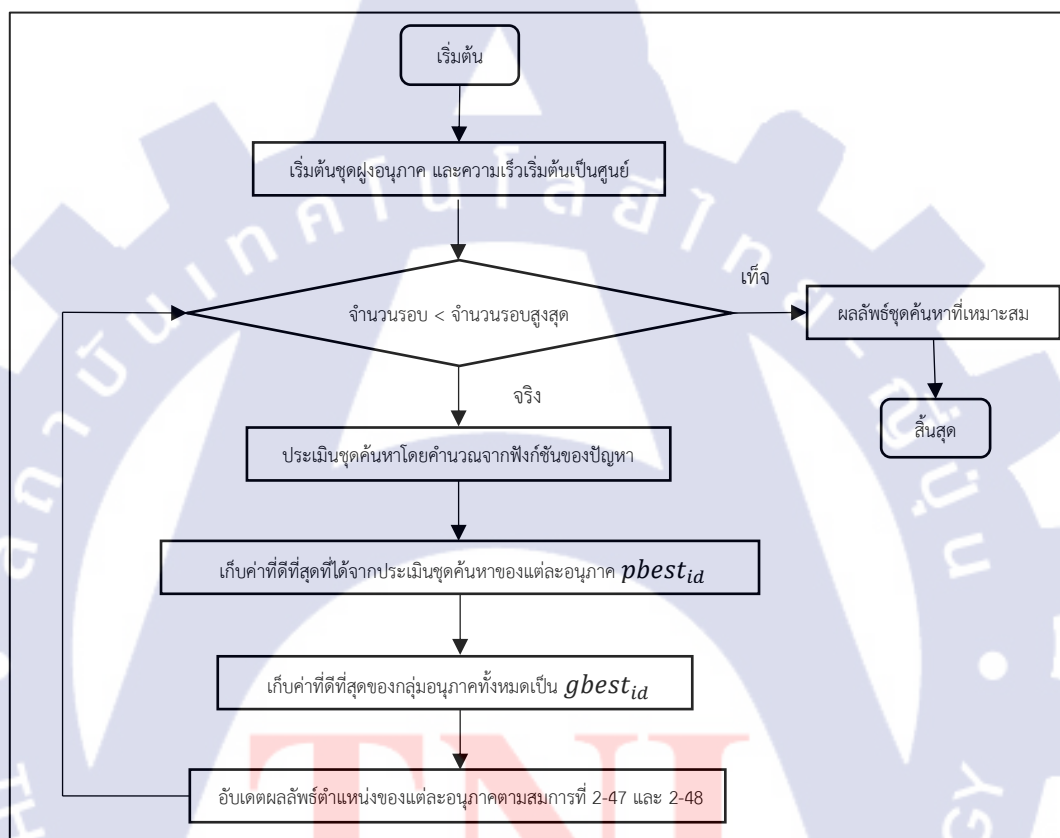
วิธีการดำเนินงานของการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาคจะมีหลักการดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. เริ่มต้นสร้างชุดฝูงอนุภาคจากการสุ่มตำแหน่งของประชากรที่ตั้งไว้และความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์

ขั้นตอนที่ 2. เริ่มการทำการปรับปรุงผลลัพธ์จากการประเมินชุดค้นหาโดยคำนวณจากฟังก์ชันของปัญหาเก็บเป็นค่า $pbest_{id}$ และค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากประเมินชุดค้นหาเป็นทั้งหมดเป็น $gbest_{id}$

ขั้นตอนที่ 3. อัปเดตตำแหน่งใหม่ของแต่ละอนุภาค ตามสมการที่ 2.47 และ 2.48

ขั้นตอนที่ 4. ตำแหน่งใหม่ที่ได้ไปประเมินชุดค้นหาของแต่ละอนุภาคเป็น $pbest_{id}$ ใหม่ในขั้นตอนที่ 2 แล้วเปรียบเทียบกับ $pbest_{id}$ เดิมแต่ละอนุภาคและ นำค่าที่ดีที่สุดของฝูงอนุภาคมาเปรียบเทียบกับ $gbest_{id}$ แล้วกลับมาอัปเดตตำแหน่งใหม่ วนรอบอย่างนี้จนครบ แล้วคำตอบสุดท้ายที่ได้จะเป็นชุดค้นหาที่เหมาะสมของผลลัพธ์ฟังก์ชันของปัญหา ลำดับการทำงานของการทำงานหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาคแสดงตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนผังการทำงานของการทำงานหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization; PSO)

2.4.2 อัลกอริทึมไซน์-โคไซน์ (Sine-Cosine Algorithm; SCA)

อัลกอริทึมไซน์-โคไซน์ (SCA) เป็นวิธีการเมตาฮิวริสติกที่ถูกคิดค้นโดย S. Mirjalili [13] การหาผลลัพธ์และการปรับปรุงผลลัพธ์จะเป็นไปตามฟังก์ชันไซน์และโคไซน์ตามสมการที่ 2.49 และ 2.50

$$X_i = X_i + r_1 \sin(r_2) |r_3 P_i - X_i| \quad (2.49)$$

$$X_i = X_i + r_1 \cos(r_2) |r_3 P_i - X_i| \quad (2.50)$$

จาก 2 สมการข้างต้นสามารถนำมารวมกันเป็นสมการเดียวได้ตามสมการที่ 2.51

$$X_i = \begin{cases} X_i + r_1 \sin(r_2) |r_3 P_i - X_i| & \text{ถ้า } r_4 < 0.5 \\ X_i + r_1 \cos(r_2) |r_3 P_i - X_i| & \text{ถ้า } r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (2.51)$$

เมื่อ	P_i	คือ ผลลัพธ์ปลายทาง
	X_i	คือ ค่าตำแหน่งปัจจุบัน
	$ \cdot $	คือ การระบุของค่าสัมบูรณ์
	r	คือ ค่าตัวแปรสุ่ม

ค่าพารามิเตอร์ r_1 เป็นค่าตัวแปรสุ่มที่ตอบสนองต่อการค้นหาในพื้นที่เพื่อผลลัพธ์ถัดไป พื้นที่นี้อาจเป็นด้านนอกระหว่างค่า X_i และ P_i หรือด้านในก็ได้ ผู้คิดค้นจึงได้ปรับปรุงพารามิเตอร์ r_1 โดยใช้สมการที่ 2.52 เพื่อสร้างสมดุลระหว่างการสำรวจและการหาผลลัพธ์

$$r_1 = a - t \frac{a}{T} \quad (2.52)$$

เมื่อ	a	คือ ค่าคงที่เท่ากับ 2
	T	คือ จำนวนรอบสูงสุดในการวนลูป
	t	คือ จำนวนรอบปัจจุบันในการวนลูป

ค่าพารามิเตอร์ r_2 เป็นตัวแปรสุ่มที่ใช้ในการหาทิศทางในการเคลื่อนที่สำหรับผลลัพธ์ถัดไปค่าพารามิเตอร์ r_3 เป็นตัวแปรสุ่มที่ใช้สุ่มแบบถ่วงน้ำหนัก P_i เพื่อที่จะเน้นการสุ่ม ($r_3 > 1$) หรือเน้นย้ำ ($r_3 < 1$) ถึงผลกระทบของการตกผลึกในการกำหนดระยะทาง ส่วน ค่าพารามิเตอร์ r_4 เป็นค่าที่ใช้ในการสลับใช้ฟังก์ชันไซน์หรือโคไซน์

วิธีการดำเนินงานของอัลกอริทึมไฮไนซ์-โคไซน์จะมีหลักการดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. เริ่มต้นสร้างชุดค้นหาจากการสุ่มตำแหน่งของประชากรที่ตั้งไว้

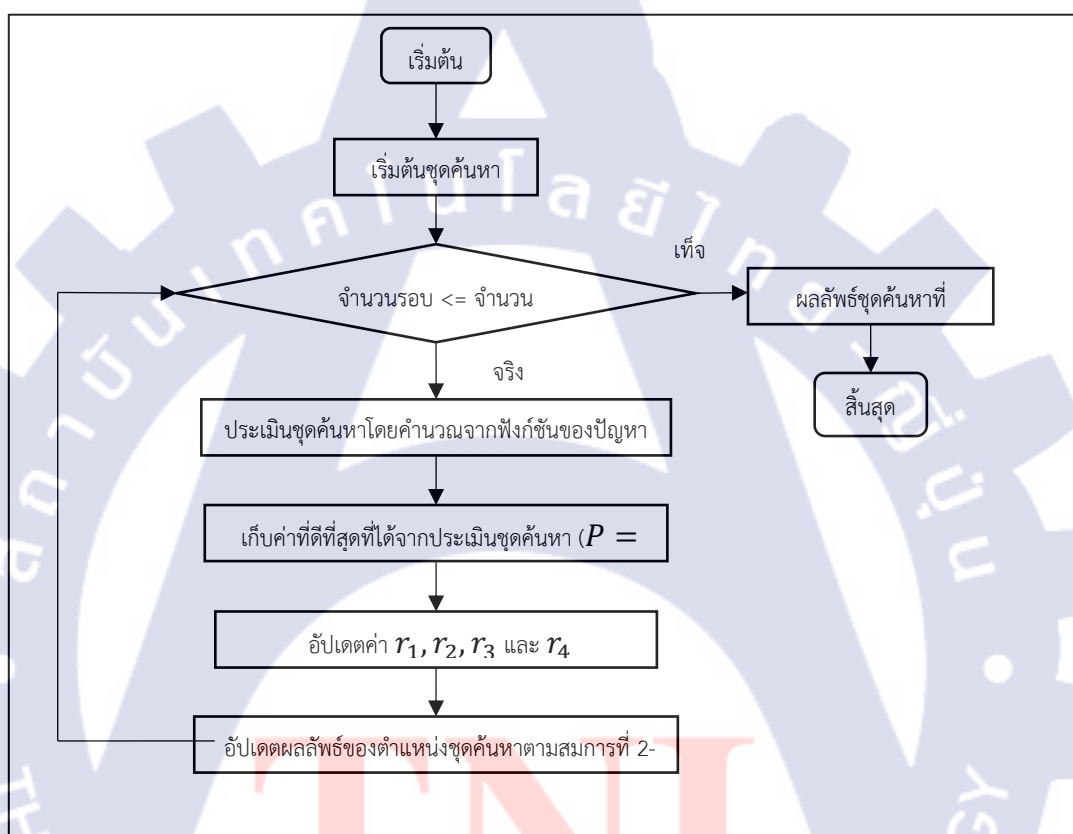
ขั้นตอนที่ 2. เริ่มการทำการปรับปรุงผลลัพธ์จากการประเมินชุดค้นหาโดยคำนวณ

จากฟังก์ชันของปัญหาเก็บเป็นค่าที่ดีที่สุดซึ่งเป็นตัวแทนของชุดค้นหาไว้เป็นค่า P

ขั้นตอนที่ 3. ทำการอัปเดตค่า r_1, r_2, r_3, r_4 และคำนวณหาผลลัพธ์ชุดค้นหา X ใหม่ตามสมการที่ 2.51

ขั้นตอนที่ 4. นำผลลัพธ์ชุดค้นหา X ใหม่ วนกลับมาที่ขั้นตอนที่ 2 อีกรอบแล้วอัปเดตค้นหาใหม่ วนรอบจนครบแล้วคำตอบสุดท้ายที่ได้จะเป็นชุดค้นหาที่เหมาะสมของผลลัพธ์ฟังก์ชันของปัญหา

ลำดับการทำงานของอัลกอริทึมไซน์โคไซน์จะเป็นไปตามรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนผังการทำงานของอัลกอริทึมไซน์โคไซน์(SCA)

2.5 วิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไซน์โคไซน์ (Opposition-Based Sine Cosine Algorithm)

การหาค่าโดยประมาณของวิธีในกลุ่มเมตาฮิวริสติกกับปัญหาที่มีความซับซ้อนเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมนั้น ส่วนมากจะมีข้อเสียในเรื่องของการหาคำตอบในกระบวนการทำงานที่บางครั้งผลลัพธ์ของคำตอบที่ได้จากกระบวนการทำงานแต่ละครั้งในการวนหา ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าติดอยู่กับผลลัพธ์ที่ก่อนเดิมเสมอ และใช้เวลานาน ทำให้ต้องหาวิธีที่เสริมประสิทธิภาพมาประยุกต์ร่วมเพื่อจัด

ปัญหาเหล่านี้ ตัวอย่างของการประยุกต์รวมวิธีเสริมกับวิธีในกลุ่มเมตาฮิวริสติก เช่น อัลกอริทึมการเลียนแบบสวามไฟฟ้า (AEFA) ที่ได้รับการปรับปรุงโดยใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้าม [14] , วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของก๊าซสารละลายเฮนรีได้รับการปรับปรุงโดยใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้าม [7] เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยสนใจวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคโซน (OBSCA) ที่เสนอโดย M. A. Elaziz et al. [5] เป็นการเสริมอัลกอริทึมไฮไนโคโซนโดยนำเอาวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้าม (OBL) มาประยุกต์รวมกับอัลกอริทึมดังกล่าว เพื่อเพิ่มการสำรวจในการหาผลลัพธ์และลดจำนวนชุดการค้นหาเริ่มต้นซึ่งได้ส่งผลให้การใช้เวลาในการหาผลลัพธ์เร็วขึ้น

วิธีการดำเนินงานของวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคโซน (OBSCA) แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลักดังนี้

2.5.1 ขั้นตอนเริ่มต้น

ขั้นตอนนี้จะเริ่มด้วยการสร้างชุดค้นหา X_i โดยที่ i มีขนาดเท่ากับประชากร N จำนวน แต่ละชุดค้นหาของ X ประกอบไปด้วยเซตของ $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in}]$ โดยที่ n เป็นขนาดของตัวแปรในเซต จากนั้นสร้างชุดค้นหาตรงกันข้ามของ X ตามสมการที่ 2.53

$$\bar{X}_i = u_i + l_i - X_i \quad (2.53)$$

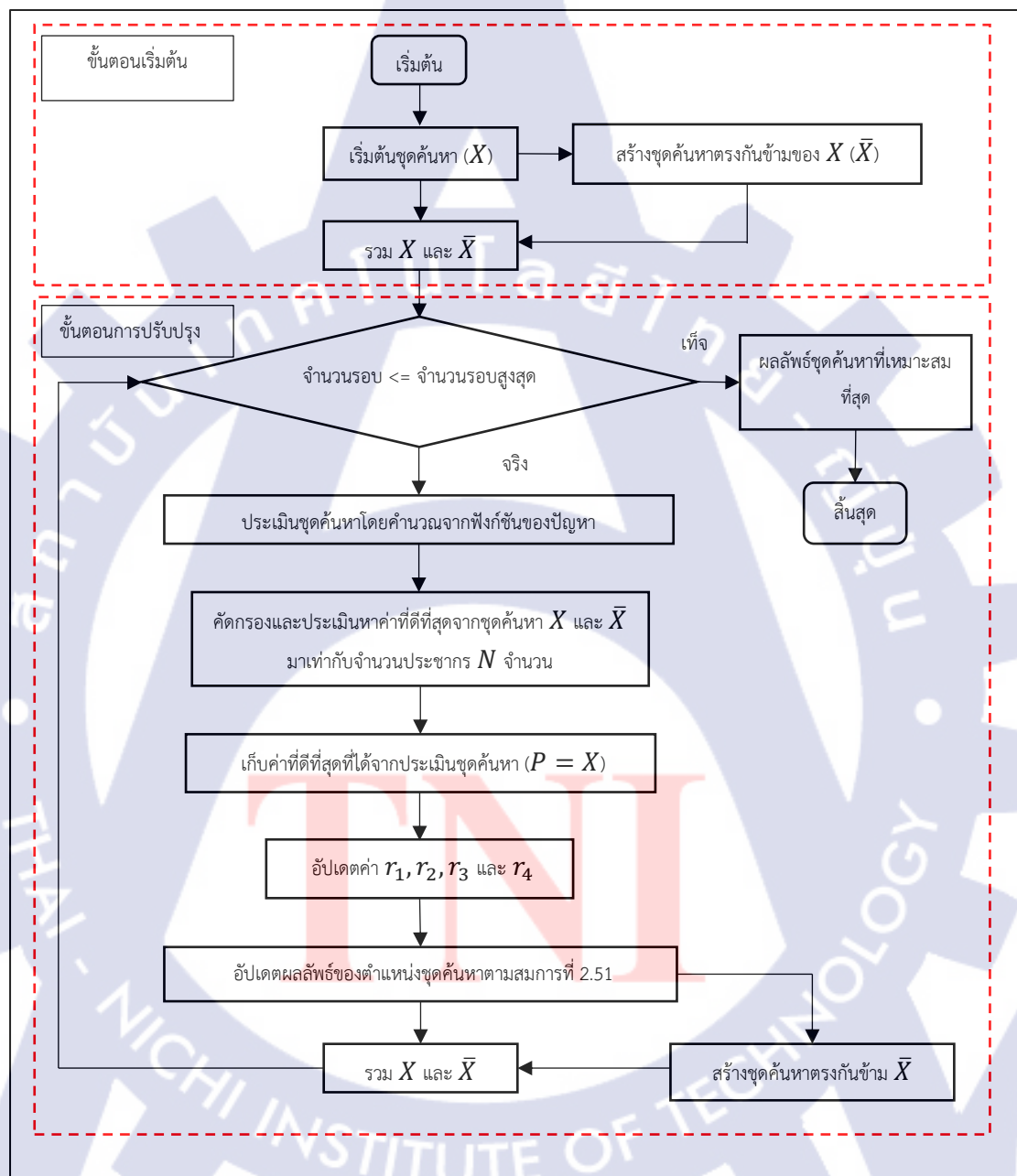
เมื่อ $\bar{X}_i$ คือ ชุดค้นหาตรงกันข้ามของ X_i ,
 u_i คือ ขอบเขตบนของพื้นที่ในการค้นหา
 l_i คือ ขอบเขตล่างของพื้นที่ในการค้นหา

หลังจากสร้าง $\bar{X}$ นำ X และ $\bar{X}$ มารวมกันแล้วมาคำนวณหาค่าฟังก์ชันของปัญหา หลังจากคำนวณจะทำการคัดกรองและประเมินหาค่าที่ดีที่สุดจากชุดค้นหา X และ $\bar{X}$ มาเท่ากับจำนวนประชากร N จำนวน เพื่อสร้างกลุ่มประชากรใหม่

2.5.2 ขั้นตอนการปรับปรุง

ขั้นตอนนี้จะนำชุดค้นหาที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาเลือกเก็บค่าที่ดีที่สุดซึ่งเป็นตัวแทนของชุดค้นหาไว้เป็นค่า P แล้วทำการอัปเดตค่า r_1, r_2, r_3, r_4 และคำนวณหาผลลัพธ์ชุดค้นหา X ใหม่ตามสมการที่ 2-27 หลังจากคำนวณหาผลลัพธ์ชุดค้นหา X ใหม่แล้ว จะทำการสร้างชุดค้นหาตรงข้าม X เป็น $\bar{X}$ แล้วนำชุดค้นหา X และ $\bar{X}$ มารวมกันและคำนวณหาค่าฟังก์ชันของปัญหา หลังจากคำนวณก็

จะทำการคัดกรองและประเมินค่าที่ดีที่สุดจากชุดค้นหา X และ $\bar{X}$ มาเท่ากับจำนวนประชากร N จำนวน เหมือนกับขั้นตอนที่ 2.5.1 แล้วก็นำรอบอยู่ในขั้นตอนนี้นั้นจะครบรอบตามที่กำหนด ค่าสุดท้ายที่ได้จะเป็นชุดค้นหาที่เหมาะสมของผลลัพธ์ฟังก์ชันของปัญหา ซึ่งรายละเอียดขั้นตอนจะเป็นไปตามรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนผังการทำงานของวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไน-โคไซน์ (OBSCA)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมและการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี มีผู้วิจัยได้ศึกษามากหลายคนแล้ว โดยแต่ละคนใช้อัลกอริทึมหลากหลายแบบมาปรับค่าเหล่านี้เองโดยใช้ดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์มาวัดและเปรียบเทียบการปรับค่าว่าอัลกอริทึมใดให้ค่าที่ดีที่สุดและใช้เวลาน้อยที่สุดในการปรับค่า ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 2.1



ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมตาสวิสติกในการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดี

ลำดับ	คณะผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
1	M. A. Elaziz et al. [5]	An improved Opposition-Based Sine Cosine Algorithm for global optimization	- ศึกษาการปรับปรุงเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพในกระบวนการของอัลกอริทึมไซน์โคไซน์โดยใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้าม - การทดลองกับฟังก์ชันทดสอบทางคณิตศาสตร์ - การประยุกต์กับปัญหาทางวิศวกรรมในการออกแบบคานเชื่อม,สปริง และความดันถัง	- อัลกอริทึมไซน์โคไซน์ได้รับการปรับปรุงโดยใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามมีประสิทธิภาพและความแม่นยำเพิ่มขึ้นและดีกว่าตัวอัลกอริทึมเดิม - ผลจากการทดสอบฟังก์ชันและการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่นๆ พบว่าลู่อู่เข้าหาคำตอบดีกว่าตัวอื่นๆ - ผลจากการการประยุกต์แก้ปัญหาทั้ง 3 ปัญหาพบว่าให้คำตอบผลลัพธ์ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมตัวอื่นที่ทำเหมือนกัน

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมตาสหวิริสติกในการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดี (ต่อ)

ลำดับ	คณะผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
2	S. Ekin et al. [7]	Opposite based Henry gas solubility optimization as a novel algorithm for PID control of DC motor	- ศึกษาการปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการของวิธี การหาค่าที่เหมาะสมของก๊าซสารละลายเฮนรี ด้วยวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้าม - การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในการควบคุมระบบ DC Motor ด้วยอัลกอริทึมดังกล่าว โดยใช้การวิเคราะห์ทั้ง 5 แบบ เช่น Transient Response Analysis, Robustness Analysis, Performance Index Analysis, Load disturbance Analysis และ Frequency Response Analysis	- การวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของก๊าซสารละลายเฮนรี ได้รับการปรับปรุงโดยใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้าม ทำให้มีประสิทธิภาพและความแม่นยำเพิ่มขึ้นและดีกว่าตัวอัลกอริทึมเดิม - การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ในการควบคุมระบบ DC Motor ด้วยอัลกอริทึมดังกล่าว โดยใช้การวิเคราะห์ทั้ง 5 แบบ พบว่า มีประสิทธิภาพในการปรับค่าดีกว่าให้ได้ผลในการควบคุมทั้งเวลาเข้าสู่สมดุล และ เวลาไต่ขึ้น ดีกว่าตัวอัลกอริทึมเดิมกับอัลกอริทึมอื่นๆที่นำมาเปรียบเทียบกับกัน

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมตาดิวริสติกในการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดี (ต่อ)

ลำดับ	คณะผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
3	S. T. Dharan et al. [9]	Tuning of PID controller using optimization techniques for a MIMO process	- การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID ด้วยวิธีการหาที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค และวิธีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในการควบคุมของระบบ MIMO ที่ในงานวิจัยใช้ระบบ Quadruple Tank กับ ระบบ CSTR ที่เป็นระบบเปิดและระบบปิด แล้วดูการตอบสนองของระบบทั้ง 2 และเปรียบเทียบว่าอัลกอริทึมไหนปรับค่า ได้เหมาะสมกับระบบนั้น	- จากการศึกษาคพบว่า วิธีการหาที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค จะปรับค่าให้ระบบตอบสนองได้ดีกว่าวิธีขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในระบบ CSTR ส่วนระบบ Quadruple Tank ทั้งสองอัลกอริทึมปรับค่าให้ระบบตอบสนองได้ใกล้เคียงกันมาก

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมตาสต็อกในการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดี (ต่อ)

ลำดับ	คณะผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
4	มัทม์วิจ มากบุญชร และ กันติชา กิตติ พิรัชล [11]	การปรับตัวควบคุมพีไอดี ของระบบควบคุม ความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง ด้วยวิธีการเรียนรู้จากสิ่ง ตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึม ไฮน์-โคไฮน์	- ศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮน์-โคไฮน์ โดยใช้เกณฑ์ ITAE ในการวัดสมรรถนะของอัลกอริทึม - เปรียบเทียบผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮน์-โคไฮน์ กับผลตอบสนองที่ได้จากการใช้อัลกอริทึมอื่น ๆ	- การใช้วิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮน์-โคไฮน์สามารถปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีให้ผลการตอบสนองที่ดีสำหรับระบบนี้ - เมื่ออยู่ในสภาวะการทำงานที่มีสัญญาณรบกวนพบว่าผลตอบสนองที่ได้โดยรวมดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลตอบสนองที่ได้จากการใช้อัลกอริทึมแบบอื่นๆ

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมตาสหวิริสติกในการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดี (ต่อ)

ลำดับ	คณะผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
5	M. J. Mohamed and A. Khashan [12]	Comparison Between PID and FOPID Controllers Based on Particle swarm Optimization	- ศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID และ FOPID โดยใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) ในการแก้ปัญหา 3 ปัญหาและวัดประสิทธิภาพจากค่า ISE และ ITSE	- การใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) กับการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม PID และ FOPID ในการแก้ปัญหา 3 ปัญหานั้น พบว่าตัวควบคุม FOPID โดยใช้วิธีดังกล่าว จะให้ผลตอบสนองการตอบสนองที่ดีกว่าการใช้ตัวควบคุม PID
6	T. Chiranjeevi et al. [14]	Control of electric machines using flower pollination algorithm based fractional order PID controller	- ศึกษาการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID ในการควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้าโดยใช้ flower pollination algorithm เป็นตัวปรับค่า และวัดผลด้วยเกณฑ์ ISE, ITSE, IAE และ ITAE	- จากการวัดผลด้วยเกณฑ์ทั้ง 4 พบว่าการใช้เกณฑ์ ISE เป็นตัววัดผลจะให้คำตอบของการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID โดยใช้ flower pollination algorithm ดีกว่าเกณฑ์ที่เหลือทั้งหมด

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมตาสวิสติกในการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดี (ต่อ)

ลำดับ	คณะผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
7	M. Al-Dhaifallah et al. [15]	Fuzzy Fractional-Order PID Controller for Fractional Model of Pneumatic Pressure System	- ศึกษาการออกแบบใช้ตัว Fuzzy กับตัวควบคุม FOPID ในการควบคุมระบบแรงดันนิวเมติก โดยใช้เกณฑ์ ISE และ IAE ในการวัดประสิทธิภาพ	- การผสมผสานตัว Fuzzy กับตัวควบคุม FOPID ในการควบคุมระบบแรงดันนิวเมติกให้ผลการวัดทั้งเกณฑ์ ISE และ IAE ดีกว่า ตัวควบคุม FOPID และ PID ปกติ
8	A. Demirören et al. [16]	Opposition-based artificial electric field algorithm and its application to FOPID controller design for unstable magnetic ball suspension system	- ศึกษาการปรับปรุงเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิภาพในกระบวนการของอัลกอริทึมการเลียนแบบสนามไฟฟ้าด้วยวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้าม - การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID ด้วยอัลกอริทึมดังกล่าว ในการควบคุมระบบการยกลูกบอลแม่เหล็กไม่เสถียร โดยใช้ฟังก์ชันที่ผู้เขียนได้	- อัลกอริทึมการเลียนแบบสนามไฟฟ้าได้รับการปรับปรุงโดยใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้าม ทำให้มีประสิทธิภาพและความแม่นยำเพิ่มขึ้น - จากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม FOPID พบว่า การใช้อัลกอริทึมที่ได้รับปรับปรุงแล้วนี้มีประสิทธิภาพในการปรับค่าทำให้ได้ผลการตอบสนองในการควบคุมดีกว่าตัวอัลกอริทึมเดิมกับอัลกอริทึมอื่นๆที่นำมาเปรียบเทียบกับกัน

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมตาสวิสติกในการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดี (ต่อ)

ลำดับ	คณะผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
9	J. Ramyashree et al. [17]	Firefly algorithm based multivariable PID controller design for MIMO process	- การปรับค่าตัวควบคุม PID หลายตัวแปรแบบรวมศูนย์และไม่รวมศูนย์โดยใช้วิธีหิ่งห้อย(Firefly algorithm) กับระบบการกลั่น Wood และ Berry และวัดผลด้วยใช้เกณฑ์ ISE, IAE และ ITAE	- การใช้ Firefly algorithm ในการปรับค่า PID ของระบบการกลั่น Wood และ Berry เป็นการปรับแค่ PI จะทำให้ระบบดังกล่าวมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีอื่นๆ ที่ทดลอง
10	M. PIRES et al. [18]	A Methodology for Tuning and Optimization of a Quadruple Tank Control System Using Firefly Algorithm in Wavelet Space	- ศึกษาการปรับตัวควบคุม PI ด้วยวิธีหิ่งห้อย (Firefly algorithm) เพื่อควบคุมระดับน้ำของระบบ 4 ถัง โดยติดตั้ง Decoupler และใช้การแปลงเวฟเล็ตในการประเมินและวิเคราะห์สัญญาณผลตอบสนอง นอกจากนี้เปรียบเทียบผลที่ประเมินด้วยลักษณะดังกล่าวกับการใช้เกณฑ์ ISE, IAE และ ITAE ในการประเมินผล	- การแปลงเวฟเล็ต ในการประเมินสัญญาณผลตอบสนองของการปรับตัวควบคุม PI ด้วยวิธีหิ่งห้อย (Firefly algorithm) จะให้การตอบสนองที่เร็วและไม่รุนแรงเมื่อเทียบกับเกณฑ์ ISE, IAE และ ITAE

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมตาสหิริสติกในการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดี (ต่อ)

ลำดับ	คณะผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
11	R. S. Mohankumar et al. [19]	Heuristic algorithms based optimal tuning of FOLQI controller for quadruple tank process under disturbance conditions	- ศึกษาการปรับตัวควบคุม Fractional Order LQI และ Integer Order LQI กับระบบ 4 ถัง สภาวะ minimum phase และ สภาวะ non-minimum phase ด้วยวิธีการค้นหาแบบนก ก า เ ห ว ' า (Cuckoo Search Algorithm), วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของ กลุ่มอนุภาคแบบเร่ง (Accelerated Particle Swarm Optimization) และวิธีหิ่งห้อย (Firefly algorithm) ภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์และสัญญาณรบกวน โดยใช้การประเมินผลของการควบคุมด้วยฟังก์ชัน J	- ระบบ 4 ถัง ทั้งในสภาวะ minimum phase และ non-minimum phase ถ้าใช้การควบคุม Fractional Order LQI จะให้ผลตอบสนองของ ค่าพุ่งเกินสูงสุด, เวลาเข้าสู่สมดุล และ ผลการประเมิน ฟังก์ชัน J ดีกว่าการใช้ตัวควบคุม Integer Order LQI แต่สำหรับค่าความผิดพลาดที่ สภาวะคงตัวนั้นจะน้อยกว่ากว่าการใช้ตัว ควบคุม Integer Order LQI ส่วน อัลกอริทึมที่สามารถปรับตัวควบคุม Fractional Order LQI และInteger Order LQI และส่งผลให้ระบบ 4 ถังมีการ ตอบสนองที่ดีและแข็งแกร่งกว่านั้นคือ วิธี หิ่งห้อย (Firefly algorithm)

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมกลุ่มเมตาสหวิริสติกในการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดี (ต่อ)

ลำดับ	คณะผู้วิจัย	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
12	N. A. Al-Awad [20]	Optimal control of Quadruple Tank System Using Genetic Algorithm	- ศึกษาการปรับตัวควบคุม PI ด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เพื่อควบคุมระดับน้ำของระบบ 4 ถึงสถานะ minimum phase และลดการผกผันสัญญาณกันในระบบแบบ MIMO โดยติดตั้ง Decoupler - เปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบจากการปรับตัวควบคุม PI ด้วยวิธีดังกล่าว กับวิธี Internal Control model (IMC), วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของการหาอาหารแบคทีเรีย (BFO) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO)	- การควบคุมระดับน้ำของระบบ 4 ถึงสถานะ minimum phase จากการปรับตัวควบคุม PI ด้วยอัลกอริทึมเชิงพันธุกรรม จะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าโดยใช้เวลาเวลาไต่ขึ้น (Rise Time) และ เวลาเข้าสู่สมดุล (Settling Time) สั้นกว่าวิธีอื่นๆ ที่นำมาทดสอบกับระบบในสถานะเดียวกัน

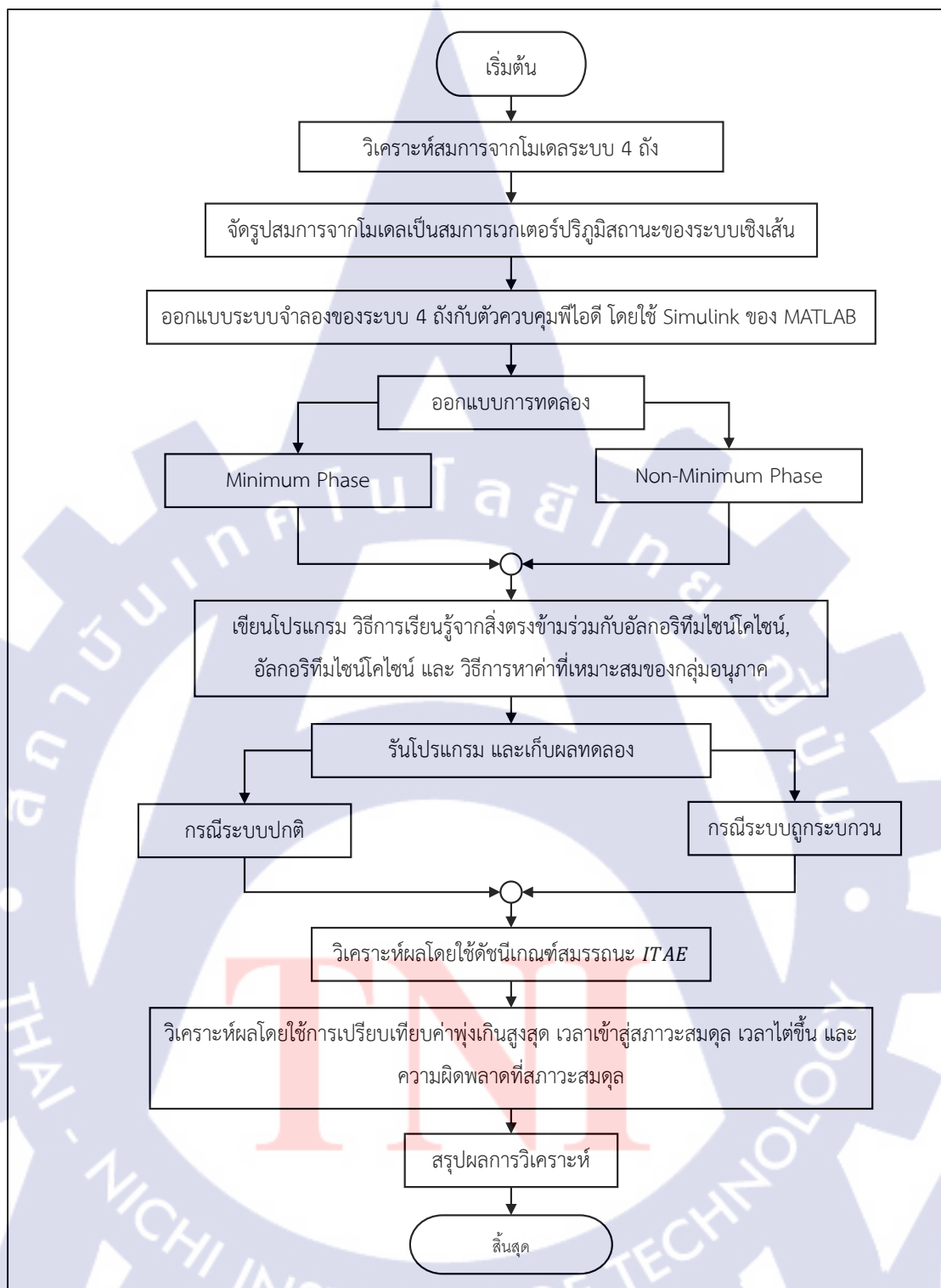
บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

บทนี้กล่าวถึงระเบียบวิธีวิจัยเกี่ยวกับการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีในการควบคุมระบบที่มีการป้อนสัญญาณเข้าและออกหลายสัญญาณโดยใช้วิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริดไดแก์ กรอบแนวคิดการวิจัย การออกแบบแบบจำลองและประยุกต์ระบบถึง 4 ถึง การประยุกต์ตัวควบคุมพีไอดีและการใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบระบบขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมไฮบริดและขั้นตอนการทำงานของวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริดในการหาค่าของตัวควบคุมพีไอดี

3.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

กรอบแนวคิดการวิจัย คือ วิเคราะห์การประยุกต์ใช้วิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริดมาช่วยในการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง โดยพิจารณาจากเกณฑ์ดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ ชนิดการปริพันธ์ของค่าความผิดพลาดสะสมคูณด้วยเวลา (*ITAE*) เป็นฟังก์ชันในการประเมิน และค่าฟังก์ชันสูงสุด เวลาใต้ขึ้น และเวลาเข้าสู่สมดุล เป็นต้น เพื่อพิจารณาความเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์พีไอดี นอกจากนี้มีการเปรียบเทียบค่าดังกล่าวด้วยการใช้อัลกอริทึมไฮบริด กับ วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ในการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดีกับระบบนี้ เพื่อวิเคราะห์ความสามารถของอัลกอริทึมที่เสนอนี้ว่าดีกว่าหรือไม่ โดยแผนผังแสดงวิธีวิจัยเป็นดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังระเบียบวิธีวิจัย

ภาพที่ 3.1 จะเป็นการอธิบายถึงการขั้นตอนระเบียบวิธีวิจัยโดยเริ่มจากการวิเคราะห์หาสมการจากแบบจำลองระบบถึง 4 ถึงและเขียนสมการแบบจำลองเป็นสมการเวกเตอร์ปริภูมิสถานะของระบบเชิงเส้น ซึ่งได้อธิบายและเขียนสมการแล้วในบทที่ 2 หัวข้อ 2.2

หลังจากได้สมการแล้ว ทำการการออกแบบระบบจำลองของระบบถึง 4 ถึงรวมกับตัวควบคุมพีไอดีลงใน Simulink ของ MATLAB และเริ่มออกแบบการทดลองโดยกำหนดสถานะของระบบเป็นแบบ minimum phase กับแบบ non-minimum phase ขึ้นมา เพื่อนำมาทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมพีไอดีที่ได้จากการปรับพารามิเตอร์ด้วยอัลกอริทึม

จากนั้นทำการเขียนโค้ดอัลกอริทึมในโคไซน์ก่อน แล้วคัดลอกโค้ดดังกล่าวพร้อมดัดแปลงโดยเสริมวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามเข้าไป โดยโค้ดอื่นที่ไม่ใช่โค้ดวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามอัลกอริทึมในโคไซน์จะถูกนำมาใช้เป็นตัวรันเปรียบเทียบการทำงานของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามอัลกอริทึมในโคไซน์ทั้งหมด

หลังจากเขียนโค้ดที่จะใช้เรียบร้อยแล้ว ก็ทำการรันโปรแกรมเพื่อเก็บข้อมูลการทดลองทั้งในกรณีระบบทำงานปกติ และกรณีระบบถูกรบกวนในช่วงเวลาหนึ่ง แล้วนำไปวิเคราะห์โดยใช้ดัชนีเกณฑ์สมรรถนะ *ITAE* การเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันสูงสุด เวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล เวลาได้ขึ้นและความผิดพลาดที่สภาวะสมดุล ที่ได้จากผลการตอบสนองของระบบก่อนจะสรุปผลการวิเคราะห์ทั้งหมดแล้วจบกระบวนการ

3.2 การออกแบบแบบจำลองระบบถึง 4 ถึง

จากหัวข้อ 2.2 ในบทที่ 2 นั้นได้กล่าวถึงเนื้อหาในด้านทฤษฎีและการเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ตลอดจนถึงการเขียนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ในหัวข้อนี้จะเป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบถึง 4 ถึงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้อ้างอิงมาจากงานวิจัย [16] โดยการกำหนดค่าจะมีทั้งเป็นแบบสภาวะ minimum phase และแบบสภาวะ non-minimum phase ตามตารางที่ 3.1 และ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ minimum phase

พารามิเตอร์	จำนวนเลข	หน่วย
พื้นที่ปากท่อของถึง 1 และ 3 (a_1, a_3)	0.071	cm^2
พื้นที่ปากท่อของถึง 2 และ 4 (a_2, a_4)	0.057	cm^2
พื้นที่ของถึง 1 และ 3 (A_1, A_3)	28	cm^2

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของระบบถัง 4 ถัง แบบสภาวะ minimum phase (ต่อ)

พารามิเตอร์	จำนวนเลข	หน่วย
พื้นที่ของถัง 2 และ 4 (A_2, A_4)	32	cm^2
ค่าความโน้มถ่วง (g)	981	$\frac{cm}{s^2}$
ค่าคงที่สัดส่วนของปั๊มน้ำ 1 (k_1)	3.33	$\frac{cm^3}{Vs}$
ค่าคงที่สัดส่วนของปั๊มน้ำ 2 (k_2)	3.35	$\frac{cm^3}{Vs}$
ค่า k_c	0.5	$\frac{V}{cm}$
ความสูงระดับน้ำในของถัง 1 และ 2 เริ่มต้น (h_1^0, h_2^0)	12.4, 12.7	cm
ความสูงระดับน้ำในของถัง 3 และ 4 เริ่มต้น (h_3^0, h_4^0)	1.8, 1.4	cm
ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าปั๊ม 1 และ 2 เริ่มต้น (v_1^0, v_2^0)	3.00, 3.00	V
ตำแหน่งการปรับวาล์วของ pump ที่ 1 (γ_1)	0.7	
ตำแหน่งการปรับวาล์วของ pump ที่ 2 (γ_2)	0.6	
ค่า η จากสมการที่ 2-41	0.7143	
$\gamma_1 + \gamma_2$	1.3	
$T_1 = \frac{A_1}{a_1} \sqrt{\frac{2h_1^0}{g}}, T_2 = \frac{A_2}{a_2} \sqrt{\frac{2h_2^0}{g}}, T_3 = \frac{A_3}{a_3} \sqrt{\frac{2h_3^0}{g}}, T_4 = \frac{A_4}{a_4} \sqrt{\frac{2h_4^0}{g}}$	62.7, 90.3, 23.9, 30.0	s

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบถัง 4 ถัง แบบสภาวะ non-minimum phase

พารามิเตอร์	จำนวนเลข	หน่วย
พื้นที่ปากท่อของถัง 1 และ 3 (a_1, a_3)	0.071	cm^2
พื้นที่ปากท่อของถัง 2 และ 4 (a_2, a_4)	0.057	cm^2
พื้นที่ของถัง 1 และ 3 (A_1, A_3)	28	cm^2
พื้นที่ของถัง 2 และ 4 (A_2, A_4)	32	cm^2
ค่าความโน้มถ่วง (g)	981	$\frac{cm}{s^2}$
ค่าคงที่สัดส่วนของปั๊มน้ำ 1 (k_1)	3.14	$\frac{cm^3}{Vs}$
ค่าคงที่สัดส่วนของปั๊มน้ำ 2 (k_2)	3.29	$\frac{cm^3}{Vs}$
ค่า k_c	0.5	$\frac{V}{cm}$

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ non-minimum phase (ต่อ)

พารามิเตอร์	จำนวนเลข	หน่วย
ความสูงระดับน้ำในของถัง 1 และ 2 เริ่มต้น (h_1^0, h_2^0)	12.6, 13.0	cm
ความสูงระดับน้ำในของถัง 3 และ 4 เริ่มต้น (h_3^0, h_4^0)	4.8, 4.9	cm
ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าปั๊ม 1 และ 2 เริ่มต้น (v_1^0, v_2^0)	3.15, 3.15	V
ตำแหน่งการปรับวาล์วของ pump ที่ 1 (γ_1)	0.43	
ตำแหน่งการปรับวาล์วของ pump ที่ 2 (γ_2)	0.34	
ค่า η จากสมการที่ 2-41	-1.5732	
$\gamma_1 + \gamma_2$	0.77	
$T_1 = \frac{A_1}{a_1} \sqrt{\frac{2h_1^0}{g}}, T_2 = \frac{A_2}{a_2} \sqrt{\frac{2h_2^0}{g}}, T_3 = \frac{A_3}{a_3} \sqrt{\frac{2h_3^0}{g}}, T_4 = \frac{A_4}{a_4} \sqrt{\frac{2h_4^0}{g}}$	63.2, 91.4, 39.0, 56.1	s

จากตารางที่ 3.1 และ 3.2 นี้ นำค่ามาแทนลงในสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่ 2.31 ถึง 2.34 จะได้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเป็นดังนี้

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ minimum phase

$$G_{11}(s) = \frac{2.61}{62.7s+1} \quad (3.1)$$

$$G_{12}(s) = \frac{1.5}{(23.9s+1)(62.7s+1)} \quad (3.2)$$

$$G_{21}(s) = \frac{1.41}{(30s+1)(90.3s+1)} \quad (3.3)$$

$$G_{22}(s) = \frac{2.8}{90.3s+1} \quad (3.4)$$

จากสมการทั้ง 4 ที่ได้ก็นำไปแทนในสมการที่ 2.40 แล้วแก้สมการเพื่อหาตำแหน่ง Zero และ Pole จะได้ตามสมการที่ 3.5 ดังนี้

$$\det G(s) = \frac{1.0343 \times 10^{-5} \times (716.5328s^2 + 53.8830s + 0.7143)}{(s + \frac{1}{62.7})(s + \frac{1}{90.3})(s + \frac{1}{23.9})(s + \frac{1}{30.0})}$$

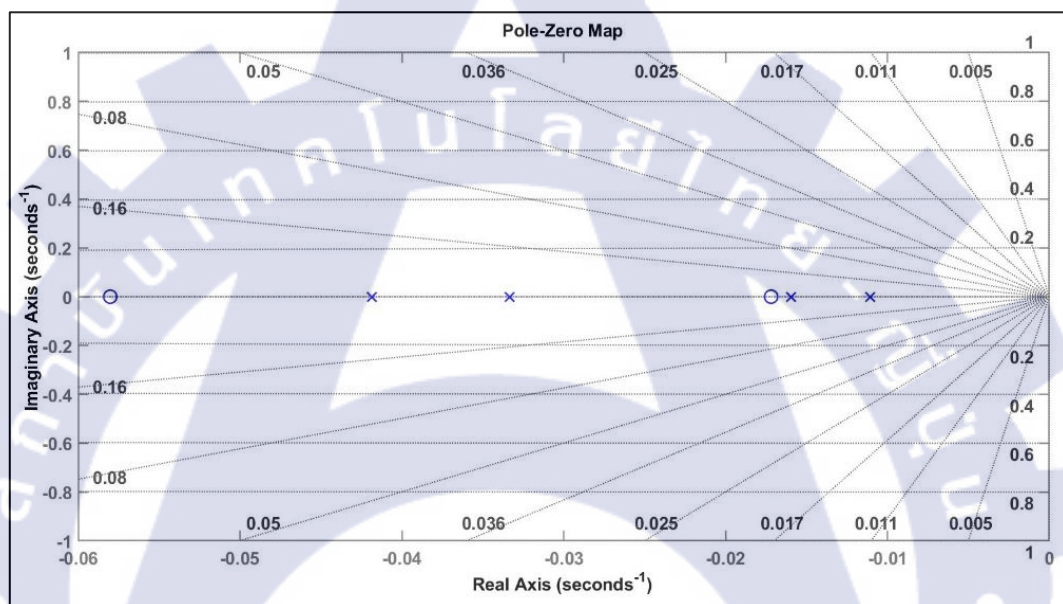
$$\det G(s) = \frac{0.0074s^2 + 0.0005573s + 0.0000073877}{(s + 0.0159)(s + 0.0111)(s + 0.0419)(s + 0.0333)}$$

$$\det G(s) = \frac{(s + 0.0172)(s + 0.0581)}{(s + 0.0159)(s + 0.0111)(s + 0.0419)(s + 0.0333)} \quad (3.5)$$

ตำแหน่ง Zero คือ -0.0172 และ -0.0581

ตำแหน่ง Pole คือ -0.0159, -0.0111, -0.0419 และ -0.0333

จากตำแหน่งเหล่านี้เมื่อไปเขียนในแผนภาพ Pole-Zero จะได้ตำแหน่ง x และ o ของระบบถึง 4 ถึงตามรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพ Pole-Zero ของระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ minimum phase

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ non-minimum phase

$$G_{11}(s) = \frac{1.524}{63.2s+1} \quad (3.6)$$

$$G_{12}(s) = \frac{2.556}{(63.2s+1)(39s+1)} \quad (3.7)$$

$$G_{21}(s) = \frac{2.451}{(91.4s+1)(56.1s+1)} \quad (3.8)$$

$$G_{22}(s) = \frac{1.597}{91.4s+1} \quad (3.9)$$

จากสมการทั้ง 4 ที่ได้ก็นำไปแทนในสมการที่ 2.40 แล้วแก้สมการเพื่อหาตำแหน่ง Zero และ Pole จะได้ตามสมการที่ 3.10 ดังนี้

$$\det G(s) = \frac{9.0065 \times 10^{-6} \times (2189s^2 + 95.124s - 1.5732)}{(s + \frac{1}{63.2})(s + \frac{1}{91.4})(s + \frac{1}{39.0})(s + \frac{1}{56.1})}$$

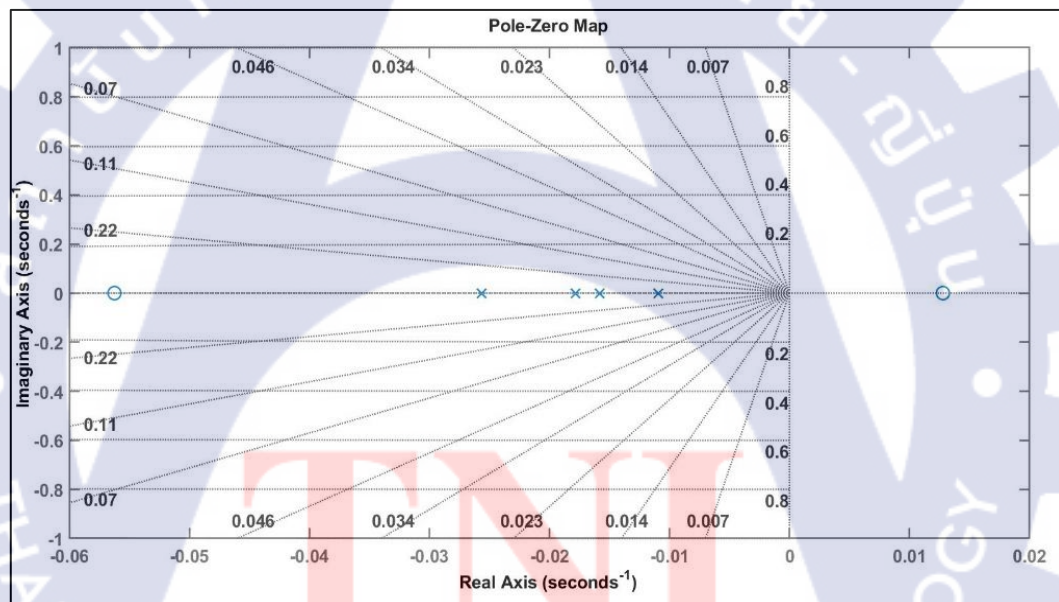
$$\det G(s) = \frac{0.0197s^2 + 0.0008567s - 0.000014169}{(s + 0.0158)(s + 0.0109)(s + 0.0256)(s + 0.0178)}$$

$$\det G(s) = \frac{(s - 0.01278)(s + 0.05627)}{(s + 0.0158)(s + 0.0109)(s + 0.0256)(s + 0.0178)} \quad (3.10)$$

ตำแหน่ง Zero คือ 0.01278 และ -0.05627

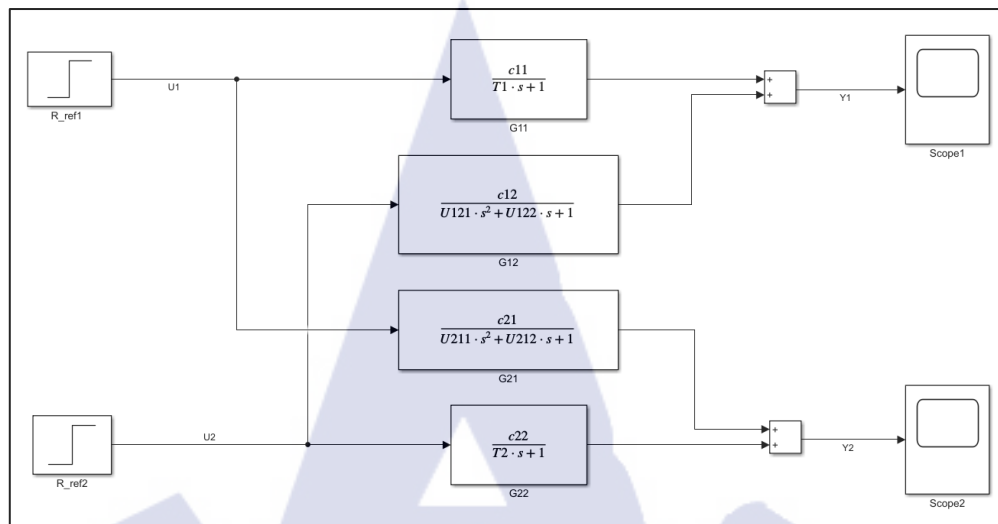
ตำแหน่ง Pole คือ -0.0158, -0.0109, -0.0256 และ -0.0178

จากตำแหน่งเหล่านี้เมื่อไปเขียนในแผนภาพ Pole-Zero จะได้ตำแหน่ง x และ o ของระบบถึง 4 ถึงตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพ Pole-Zero ของระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ non-minimum phase

หลังจากการคำนวณหาตำแหน่ง Pole และ Zero ระบบทั้ง 2 สภาวะแล้ว ต่อกำหนดฟังก์ชันถ่ายโอนทั้ง 2 สภาวะ มาสร้างแบบจำลองระบบใน Simulink จะได้ตามรูปที่ 3.4 และเขียนโค้ดเพื่อแทนค่าตัวแปรจะเป็นไปตามตัวอย่างรูปที่ 3.5



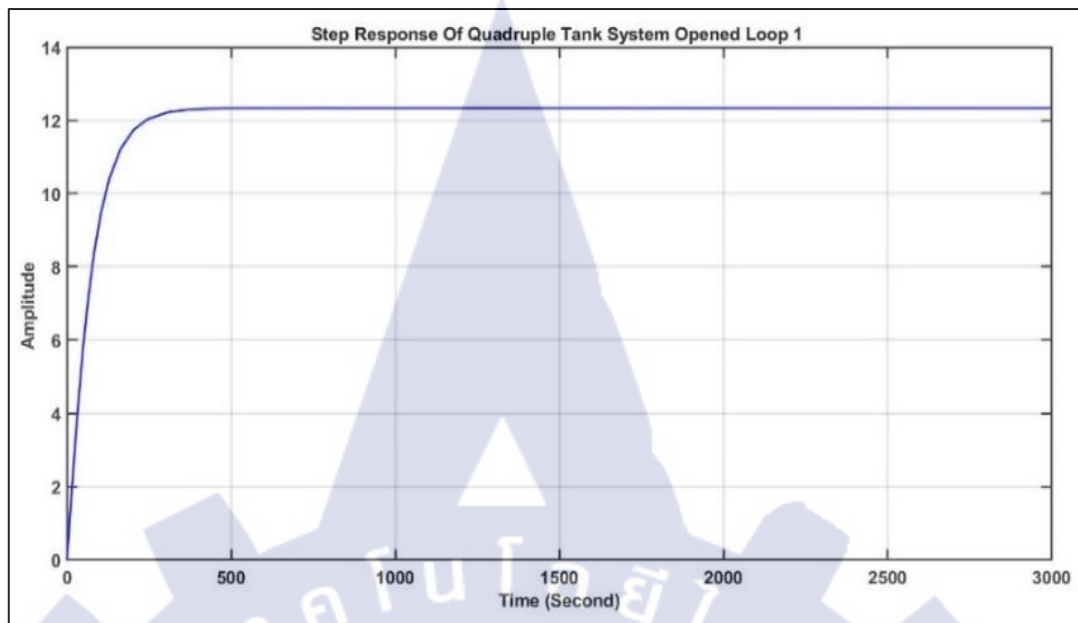
รูปที่ 3.4 แบบจำลองระบบใน Simulink ของ MATLAB

```
%% Equation in Quadruple Tank System
T1 = A1/a1*sqrt(2*h1/g);
T2 = A2/a2*sqrt(2*h2/g);
T3 = A3/a3*sqrt(2*h3/g);
T4 = A4/a4*sqrt(2*h4/g);

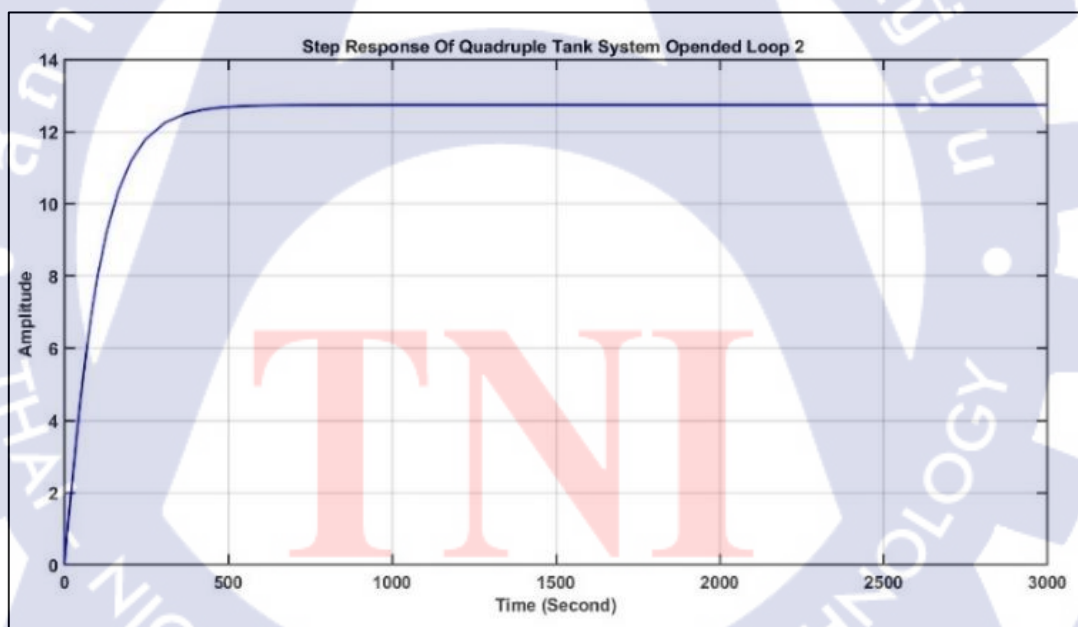
c11 = gamma1*T1*k1*kc/A1; c22 = gamma2*T2*k2*kc/A2;
c12 = (1-gamma2)*T1*k2*kc/A1; c21 = (1-gamma1)*T2*k1*kc/A2;
U121 = T1*T3; U122 = T1+T3; U211 = T2*T4; U212 = T4+T2;
```

รูปที่ 3.5 โค้ด MATLAB เพื่อแทนค่าตัวแปรในแบบจำลองระบบใน Simulink

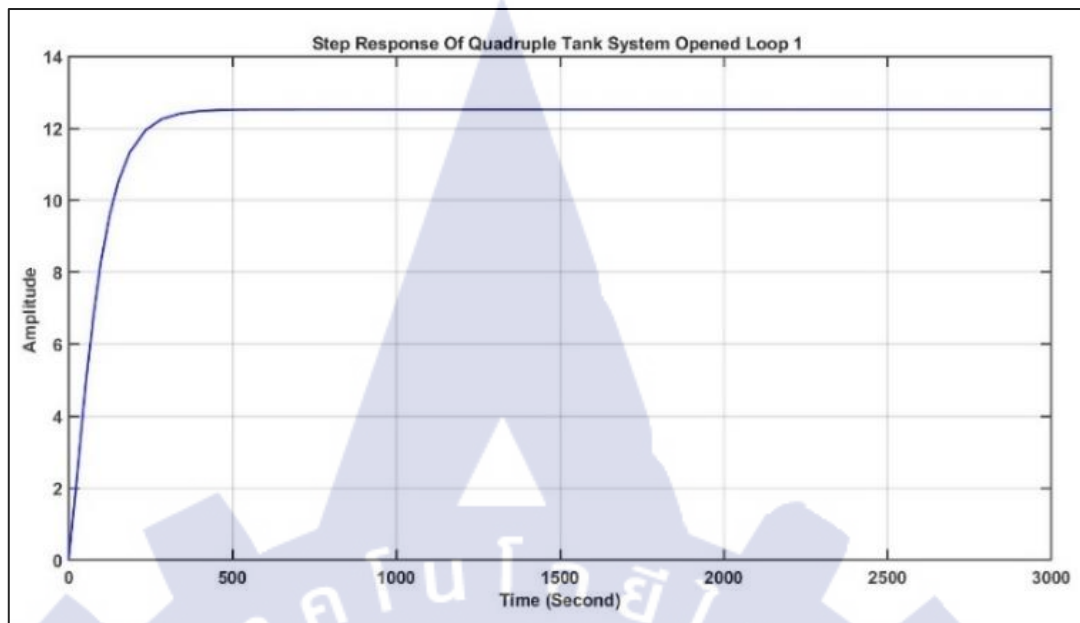
จากรูปที่ 3.4 แบบจำลองมีลักษณะแบบวงเปิด (Open-Loop) ทำให้ผลของการตอบสนองของระบบที่สถานะ minimum phase จะเป็นไปตามรูปที่ 3.6 และ 3.7 ส่วนที่สถานะ non-minimum phase จะเป็นไปตามรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ ส่วนผลค่าเวลาไต่ขึ้น (Rise time) ค่าพุ่งเกินสูงสุด (overshoot) ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล (settling time) และ ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว (Steady state error error) ของสัญญาณป้อนออก 1 จะเป็นไปตามตารางที่ 3.3 และของสัญญาณป้อนออก 2 ตารางที่ 3.4



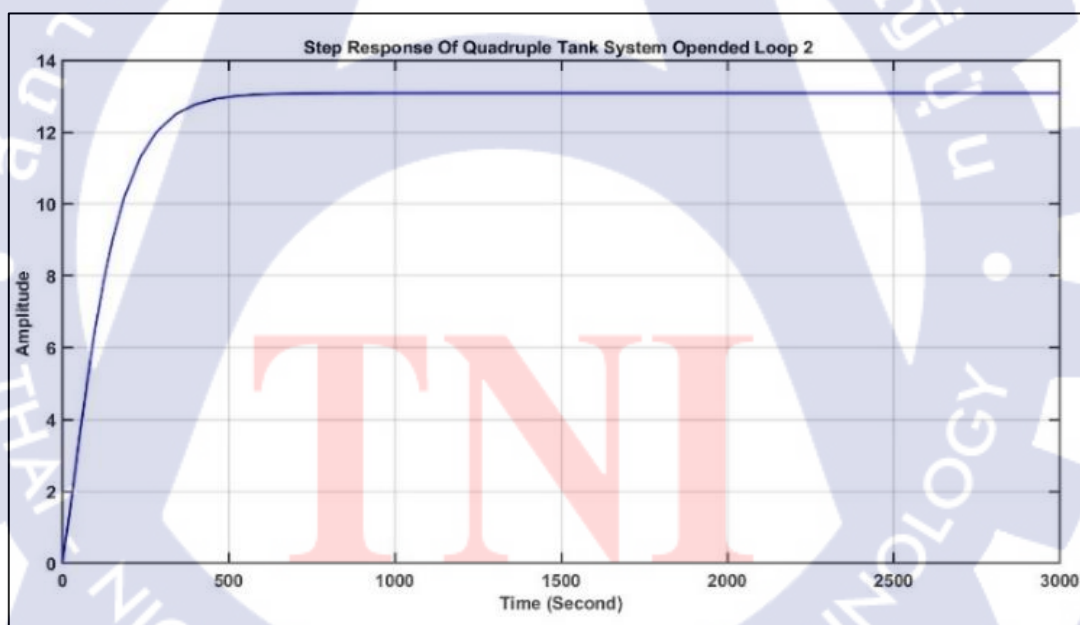
รูปที่ 3.6 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงเปิด



รูปที่ 3.7 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงเปิด



รูปที่ 3.8 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงเปิด



รูปที่ 3.9 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงเปิด

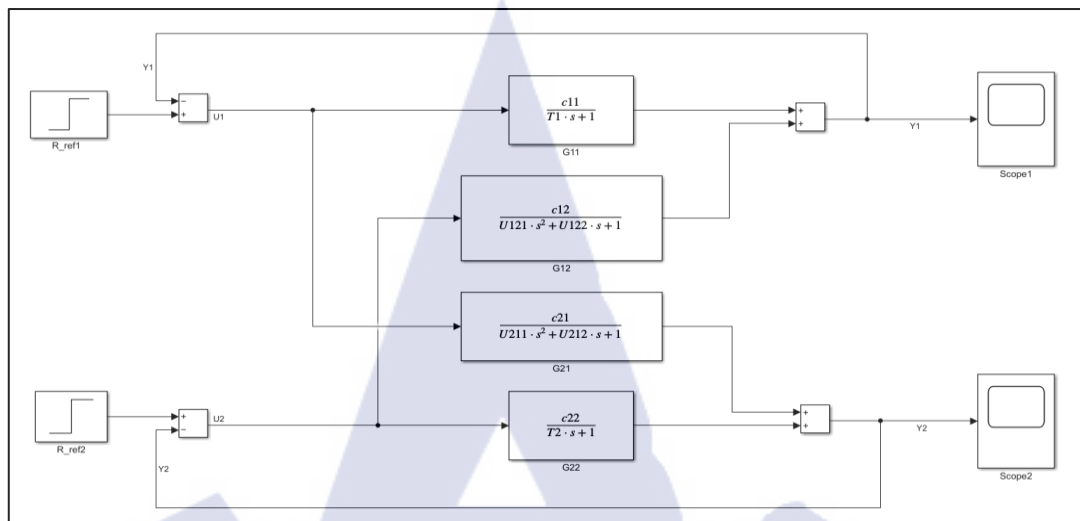
ตารางที่ 3.3 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงเปิด สำหรับสัญญาณป้อนออก 1

สภาวะ	ผลตอบสนองของสัญญาณป้อนออก 1			
	เวลาไต่ขึ้น (Rise time; s)	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (overshoot; %)	เวลาเข้าสู่ สมดุล (Settling time; s)	ค่าความผิดพลาด ที่สภาวะคงตัว (Steady state error)
สภาวะ minimum phase	148.64	0	262.54	9.33
สภาวะ non-minimum phase	170.12	0	291.04	9.37

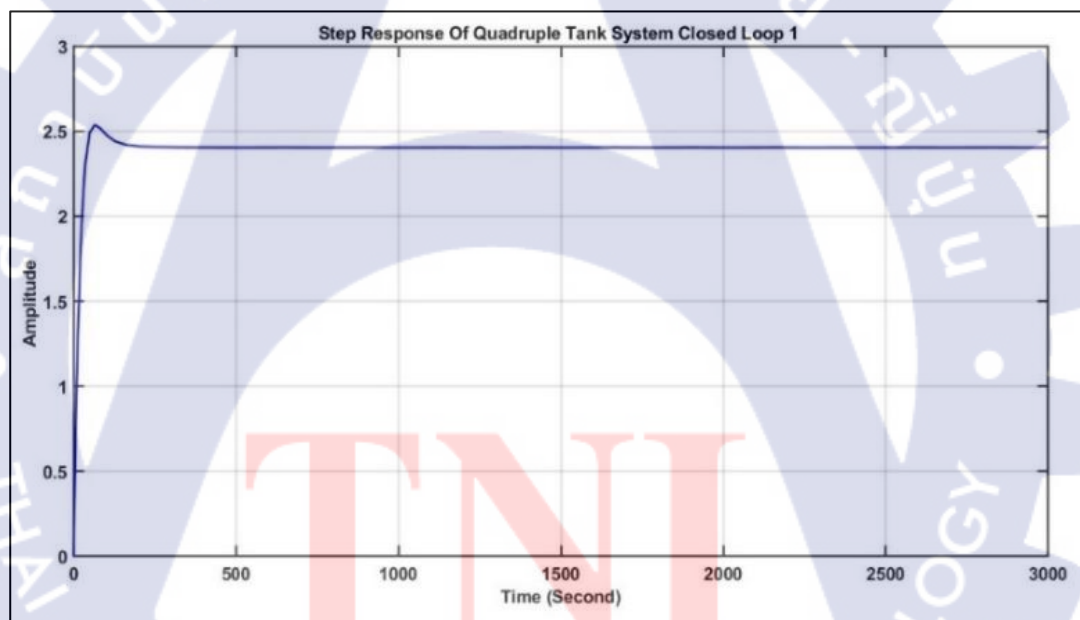
ตารางที่ 3.4 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงเปิด สำหรับสัญญาณป้อนออก 2

สภาวะ	ผลตอบสนองของสัญญาณป้อนออก 2			
	เวลาไต่ขึ้น (Rise time; s)	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (overshoot; %)	เวลาเข้าสู่ สมดุล (Settling time; s)	ค่าความผิดพลาด ที่สภาวะคงตัว (Steady state error)
สภาวะ minimum phase	211.09	0	367.27	9.74
สภาวะ non-minimum phase	247.13	0	421.19	9.93

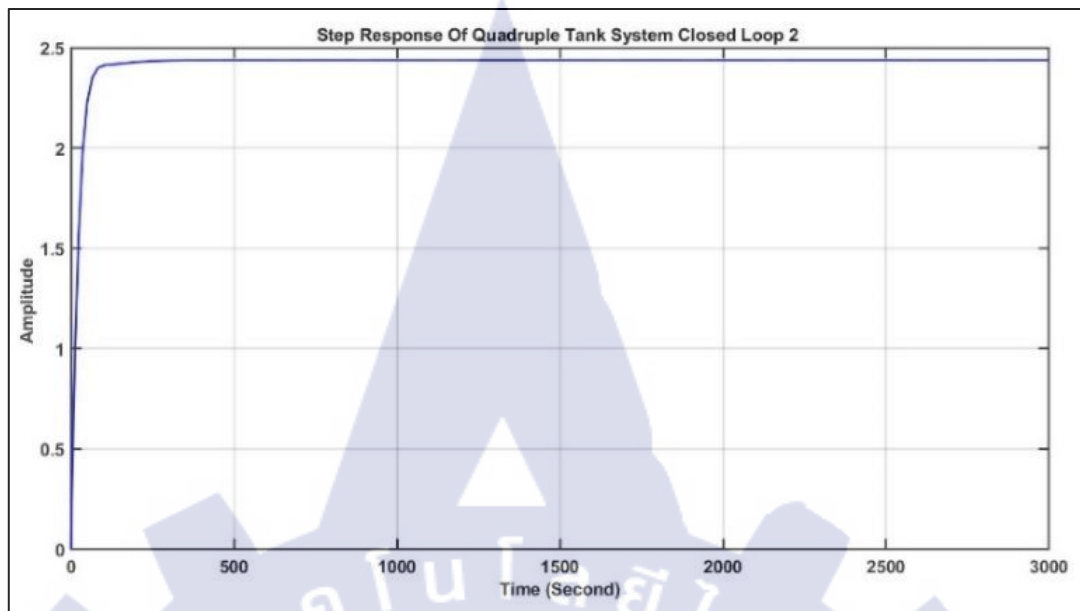
เมื่อนำแบบจำลองระบบแบบวงเปิด (Open-Loop) ในรูป 3.4 มาทำระบบแบบวงปิด (Closed-Loop) จะได้ตามภาพที่ 3.10 และผลของการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase จะเป็นไปตามรูปที่ 3.11 และ 3.12 และที่ สภาวะ non-minimum phase จะเป็นไปตามรูปที่ 3.13 และ 3.14 ตามลำดับ ส่วนผลค่าเวลาไต่ขึ้น (Rise time) ค่าพุ่งเกินสูงสุด (overshoot) ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล (settling time) และ ค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady state error) ของสัญญาณป้อนออก 1 จะเป็นไปตามตารางที่ 3.5 และของสัญญาณป้อนออก 2 ตารางที่ 3.6



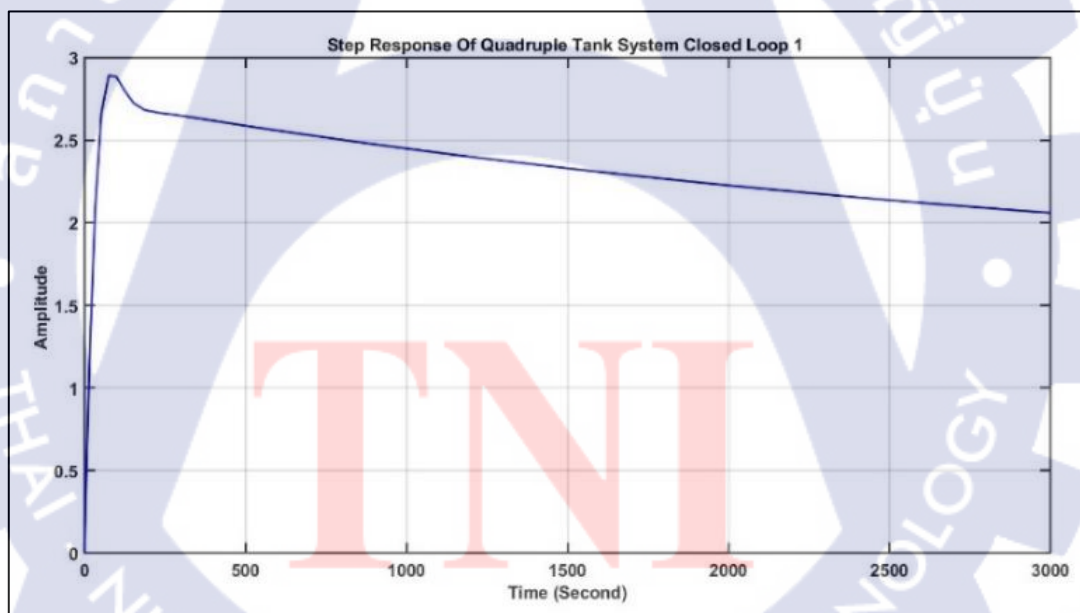
รูปที่ 3.10 แบบจำลองระบบ แบบวงปิด



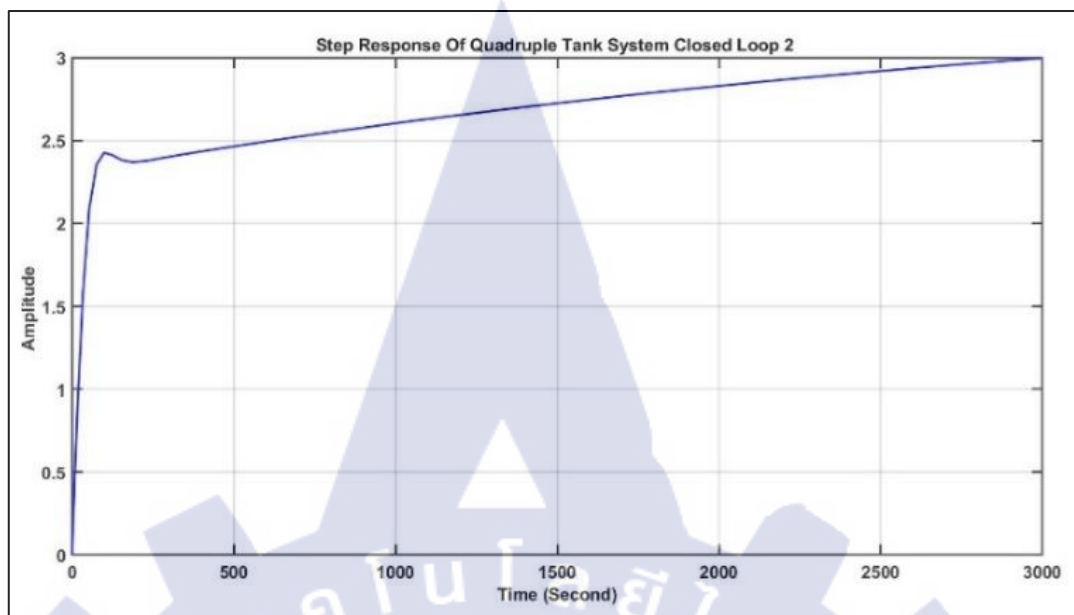
รูปที่ 3.11 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงปิด



รูปที่ 3.12 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงปิด



รูปที่ 3.13 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงปิด



รูปที่ 3.14 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงปิด

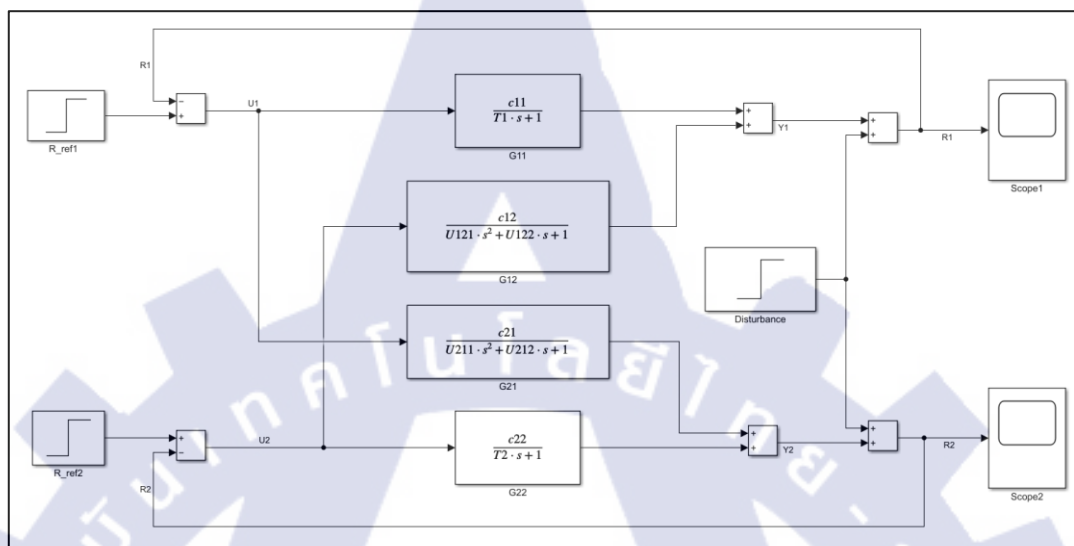
ตารางที่ 3.5 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงปิด สำหรับสัญญาณป้อนออก 1

สภาวะ	ผลตอบสนองของสัญญาณป้อนออก 1			
	เวลาไต่ขึ้น (Rise time; s)	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (overshoot; %)	เวลาเข้าสู่ สมดุล (Settling time; s)	ค่าความผิดพลาด ที่สภาวะคงตัว (Steady state error)
สภาวะ minimum phase	29.39	5.59	119.94	0.60
สภาวะ non-minimum phase	26.29	40.40	2724.42	1.09

ตารางที่ 3.6 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงปิด สำหรับสัญญาณป้อนออก 2

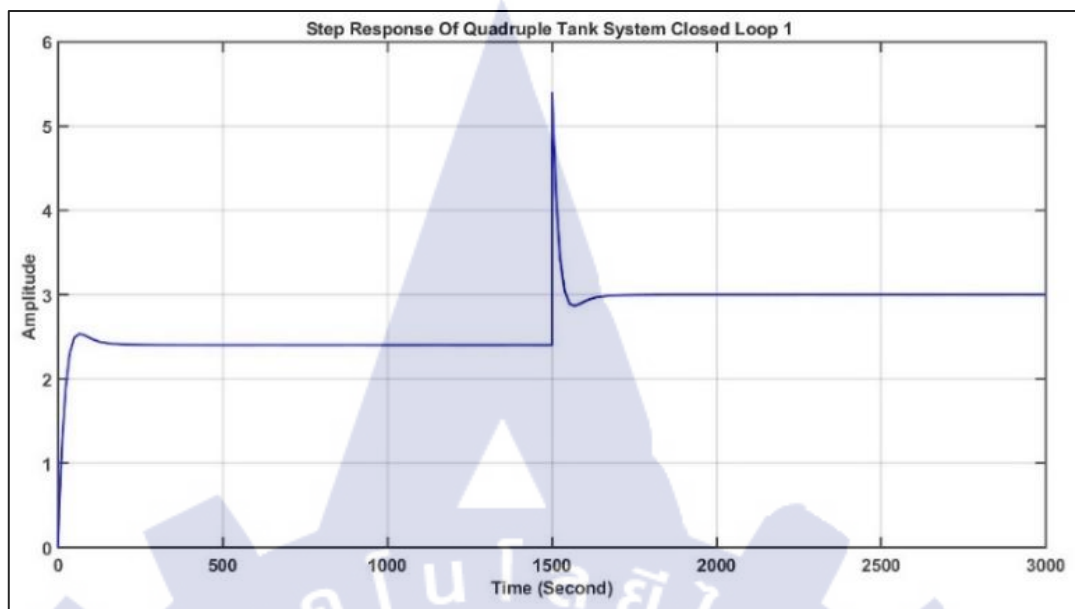
สภาวะ	ผลตอบสนองของสัญญาณป้อนออก 2			
	เวลาไต่ขึ้น (Rise time; s)	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (overshoot; %)	เวลาเข้าสู่ สมดุล (Settling time; s)	ค่าความผิดพลาด ที่สภาวะคงตัว (Steady state error)
สภาวะ minimum phase	45.26	0	79.13	0.56
สภาวะ non-minimum phase	1376.21	0	2609.71	0.15

จากแบบจำลองระบบและผลการตอบสนองทั้งแบบวงเปิด (Open-Loop) และแบบวงปิด (Closed-Loop) ตามภาพที่ 3.4 และ 3.10 เป็นของกรณีที่ระบบทำงานปกติ ส่วนกรณีที่ระบบถูกรบกวน แบบจำลองระบบจะมีการใส่ตัวรบกวนตามภาพที่ 3.15

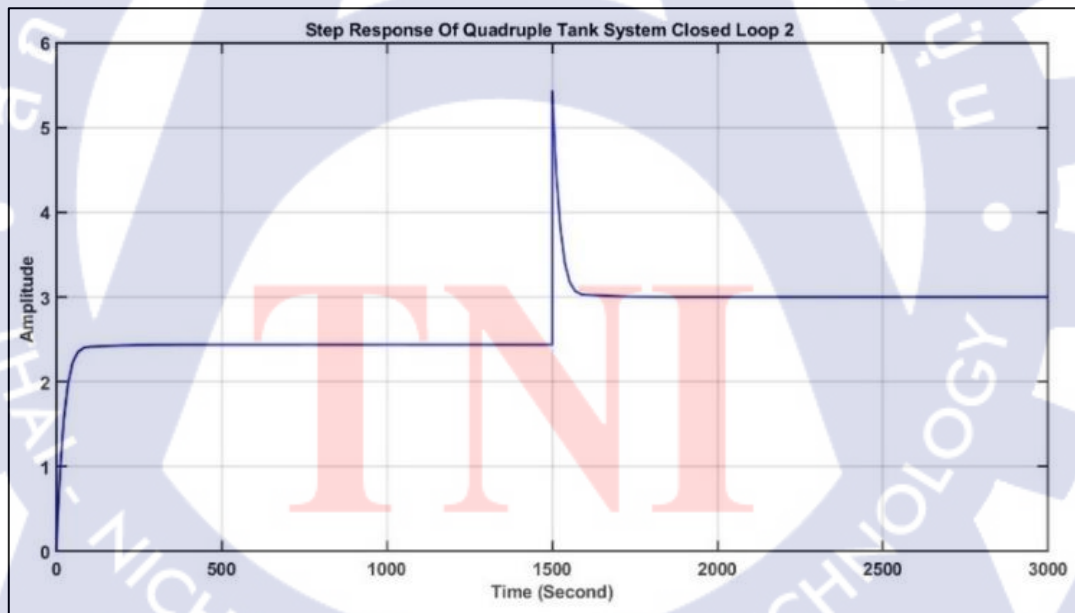


รูปที่ 3.15 แบบจำลองระบบ แบบวงปิด รวมกับตัวรบกวน

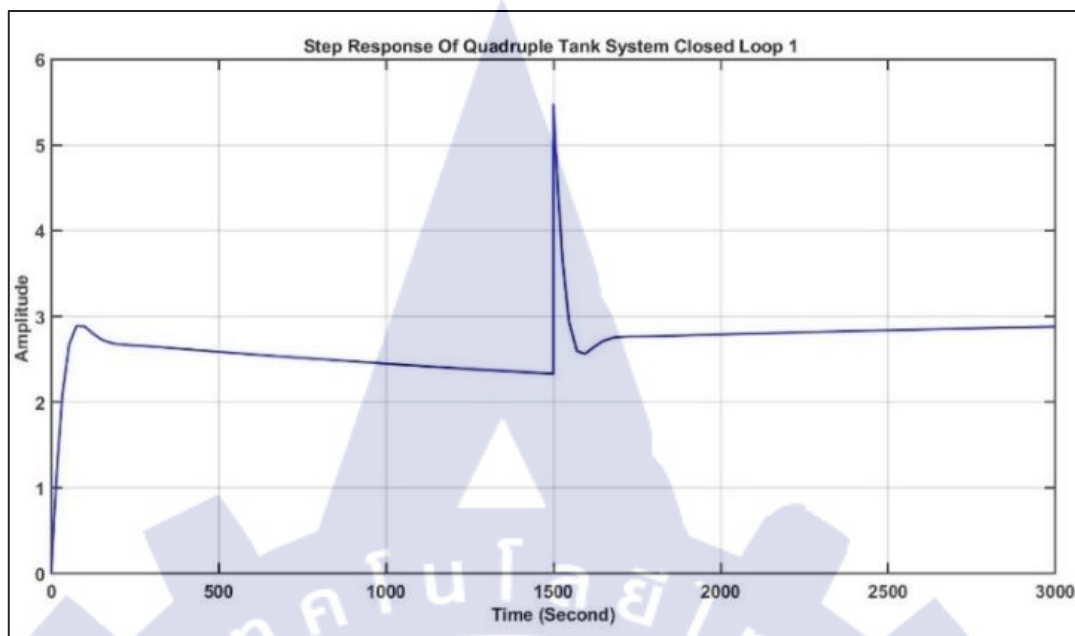
ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase และ สภาวะ non-minimum phase ของกรณีระบบถูกรบกวนจะเป็นไปตามภาพที่ 3.16 จนถึง 3.19 ส่วนผลค่าเวลาไต่ขึ้น (Rise time) ค่าพุ่งเกินสูงสุด (overshoot) ค่าเวลาเข้าสู่สมดุล (settling time) และ ค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady state error) จะเป็นไปตามตารางที่ 3.7 สำหรับตัวป้อนเข้า-ออก 1 และ ตารางที่ 3.8 สำหรับตัวป้อนเข้า-ออก 2



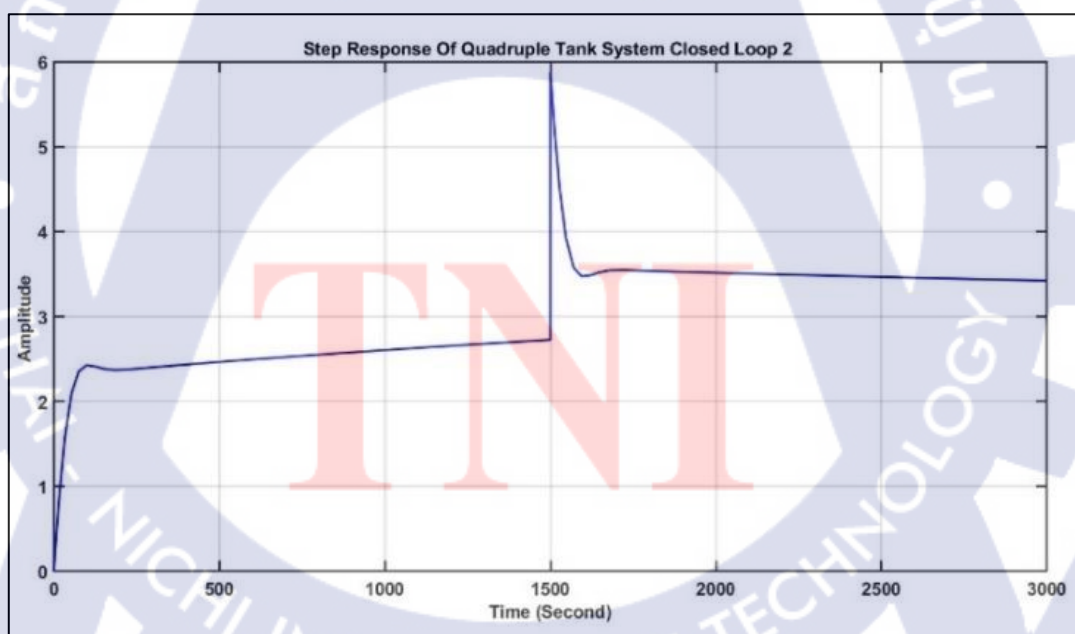
รูปที่ 3.16 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงปิด
กรณีระบบถูกรบกวน



รูปที่ 3.17 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงปิด
กรณีระบบถูกรบกวน



รูปที่ 3.18 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 1 แบบวงปิด กรณีระบบถูกรบกวน



รูปที่ 3.19 ผลการตอบสนองของระบบที่สภาวะ non-minimum phase ที่สัญญาณป้อนออก 2 แบบวงปิด กรณีระบบถูกรบกวน

ตารางที่ 3.7 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงปิด กรณีระบบถูกรบกวน สำหรับสัญญาณป้อนออก 1

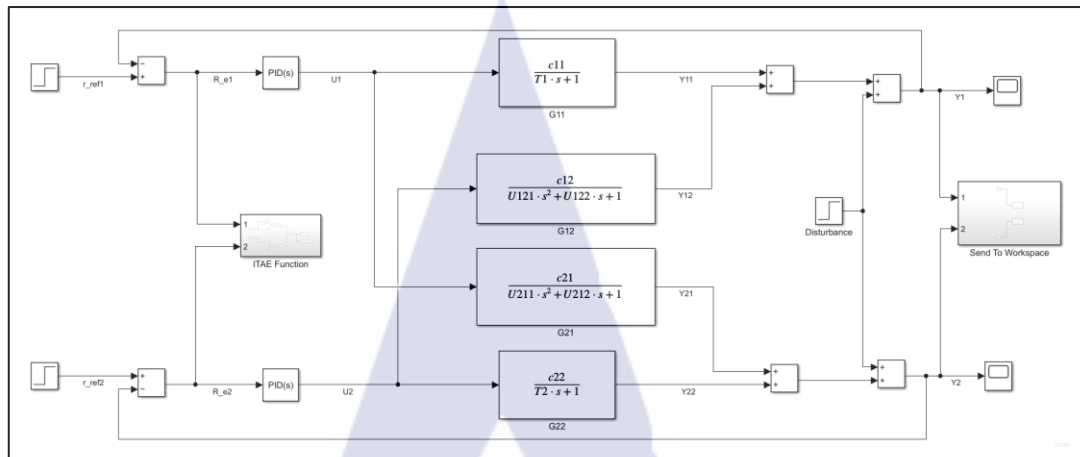
สภาวะ	ผลตอบสนองของสัญญาณป้อนออก 1			
	เวลาไต่ขึ้น (Rise time; s)	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (overshoot; %)	เวลาเข้าสู่ สมดุล (Settling time; s)	ค่าความผิดพลาด ที่สภาวะคงตัว (Steady state error)
สภาวะ minimum phase	1497.43	80.14	1609.82	0.00082725
สภาวะ non-minimum phase	46.8375	90.2365	2335.2927	0.26981

ตารางที่ 3.8 ผลของการตอบสนองของระบบแบบวงปิด กรณีระบบถูกรบกวน สำหรับสัญญาณป้อนออก 2

สภาวะ	ผลตอบสนองของสัญญาณป้อนออก 2			
	เวลาไต่ขึ้น (Rise time; s)	ค่าพุ่งเกินสูงสุด (overshoot; %)	เวลาเข้าสู่ สมดุล (Settling time; s)	ค่าความผิดพลาดที่ สภาวะคงตัว (Steady state error)
สภาวะ minimum phase	1496.61	81.23	1574.45	0.00037044
สภาวะ non-minimum phase	1493.7379	71.6371	2230.6262	0.2727

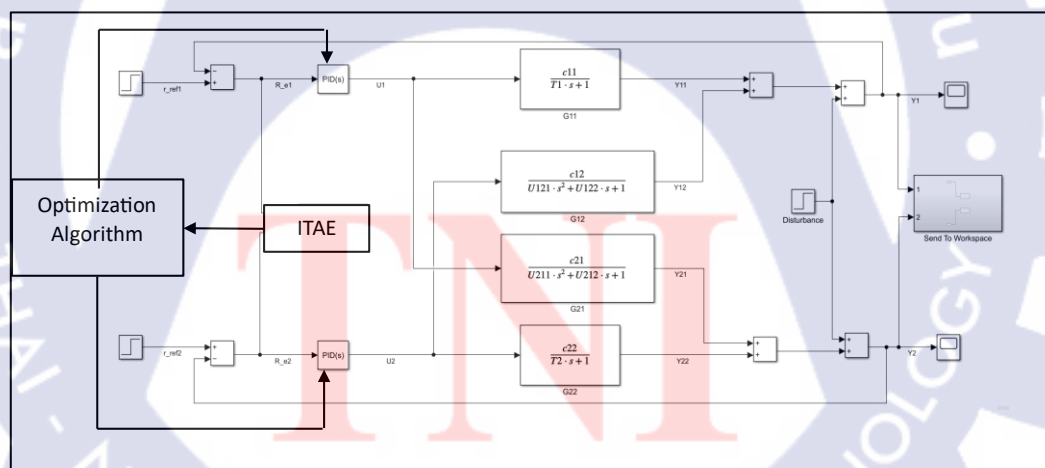
3.3 การประยุกต์ตัวควบคุมพีไอดีและการใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบระบบควบคุม

จากแบบจำลองในรูปที่ 3.15 เมื่อนำตัวควบคุมพีไอดีที่มีการอธิบายพร้อมแบบจำลองตามหัวข้อที่ 2.3 มาประยุกต์ใช้กับระบบในแบบจำลองดังกล่าว โดยตัวควบคุมพีไอดีที่ใช้กับระบบนี้จะมี 2 ตัว แบ่งเป็นตัวควบคุมพีไอดีที่อยู่ในรูป 1 และตัวควบคุมพีไอดีที่อยู่ในรูป 2 ซึ่งรูปแบบนี้เป็นการควบคุมแบบไม่รวมศูนย์กลาง (decentralized) ตามรูปที่ 3.20 ดังนี้



รูปที่ 3.20 แบบจำลองของระบบถึง 4 ถึงกับตัวควบคุมพีไอดี ที่ลูป 1 และ 2

ส่วนการดำเนินการใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมนั้น จะประยุกต์ใช้พร้อมกับฟังก์ชันดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ โดยการนำค่า r_{ref1} r_{ref2} r_{e1} และ r_{e2} มาคำนวณหาค่า $ITAE$ ตามสมการฟังก์ชันที่ 2-46 ในบทที่ 2 แล้วนำค่า $ITAE$ ที่ได้นี้เข้าคำนวณหาค่าตารางขายของตัวควบคุม PID ทั้ง 2 ตัว ใหม่โดยวิธีหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งแนวคิดนี้สามารถสรุปตามรูปที่ 3.21



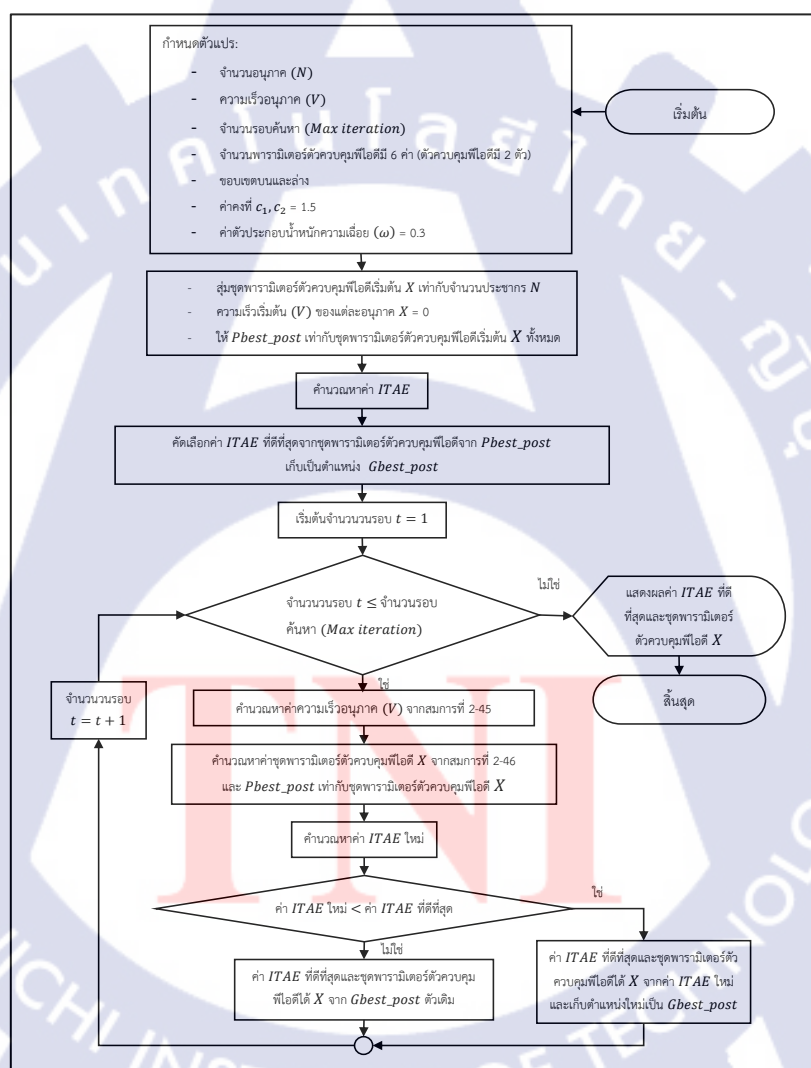
รูปที่ 3.21 การประยุกต์ตัวควบคุมพีไอดีและใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมในการออกแบบระบบควบคุม

โดย r_{ref1} และ r_{ref2} คือ ค่าสัญญาณอ้างอิงที่ 1 และ 2

r_{e1} และ r_{e2} คือ ค่าสัญญาณที่ได้จากการป้อนกลับในลูป 1 และลูป 2

การใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมในการทดลองหาคำตอบของปัญหานั้น เป็นที่รู้จักกันดีว่าเป็นการสุ่มค่าเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งหมายความว่าแต่ละรอบของคำตอบที่ได้นั้นจะไม่ซ้ำกัน ดังนั้นในการทดลองอาจจะต้องใช้การสุ่มไม่ต่ำกว่า 10 ครั้งของการใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสม เพื่อมาหาคำตอบที่ดีที่สุดของวิธีดังกล่าวนี้

3.4 ขั้นตอนการทำงานของ การหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาคในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 3.22 แผนผังวิธีการของการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ในการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี

จากรูปที่ 3.22 คือแผนผังระเบียบวิธีการดำเนินการของการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค ในการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟuzzy มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดตัวแปรและค่าคงที่ โดยมีรายละเอียดตัวอย่างดังนี้

- จำนวนประชากร (N)
- ความเร็วอนุภาค (V)
- จำนวนรอบค้นหา ($Max\ iteration$)
- จำนวนพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟuzzy มี 6 ค่า (ตัวควบคุมฟuzzy มี 2 ตัว)
- ขอบเขตบนและล่าง
- ค่าคงที่ $c_1, c_2 = 1.5$
- ค่าตัวประกอบน้ำหนักความเฉื่อย $\omega = 0.3$

ขั้นตอนที่ 2 เริ่มสุ่มชุดพารามิเตอร์ของตัวควบคุมฟuzzy เริ่มต้น X ตามจำนวนประชากร (N) ที่ตั้งไว้ พร้อมกับความเร็ว (V) เริ่มต้นของประชากรแต่ละตัวเป็นศูนย์ และ ให้จำนวนประชากรกลุ่มแรกที่สุ่ม เป็นค่า $Pbest_post$ เพื่อเป็นค่าของตำแหน่งที่ดีที่สุดเริ่มต้น

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า $ITAE$ จากตำแหน่ง $Pbest_post$

ขั้นตอนที่ 4 คัดเลือกหาตำแหน่งจาก $Pbest_post$ แต่ละตัวที่ให้ผลลัพธ์เหมาะสมที่สุดของประชากร เป็นค่า $Gbest_post$

ขั้นตอนที่ 5 เข้าสู่เงื่อนไขรอบการค้นหาของการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาคโดยจำนวนรอบค้นหาจะถูกกำหนดตามที่ตั้งไว้

ขั้นตอนที่ 6 ทำการคำนวณหาความเร็วในการเคลื่อนที่ไปยังชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy ใหม่จากสมการที่ 2-45

ขั้นตอนที่ 7 ทำการคำนวณหาชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy ใหม่จากความเร็วที่เคลื่อนที่ตามสมการที่ 2-46

ขั้นตอนที่ 8 ตำแหน่งใหม่ที่ได้มากำหนดให้เป็น $Pbest_post$ ตัวใหม่

ขั้นตอนที่ 9 คำนวณหาค่า $ITAE$ ใหม่จากตำแหน่ง $Pbest_post$ ใหม่

ขั้นตอนที่ 10 เปรียบเทียบค่า $ITAE$ ใหม่กับค่า $ITAE$ ที่ดีที่สุดหรือไม่

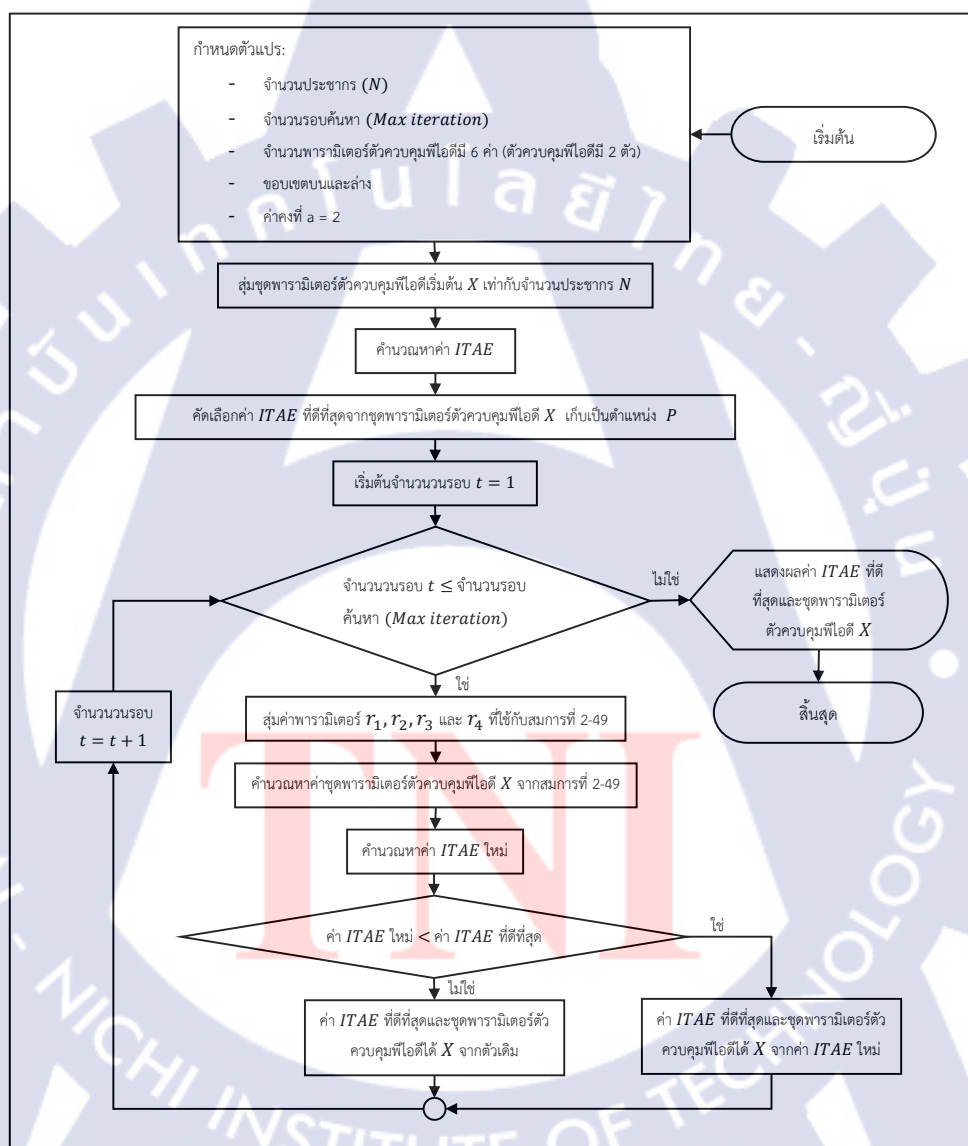
ใช่: ทำการอัปเดตค่า $Gbest_post$ จากชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy ใหม่ X ที่ให้ค่า $ITAE$ ใหม่กับค่า $ITAE$ ที่ดีที่สุด

ไม่ใช่: ค่า $Gbest_post$ จากชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy ใหม่ X ที่ให้ค่า $ITAE$ ที่ดีที่สุดเป็นค่าตัวเดิม

ขั้นตอนที่ 11 เข้าสู่เงื่อนไขรอบการค้นหา ตามขั้นตอนที่ 5 แล้วทำการคำนวณหาชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีใหม่ตามขั้นตอนที่ 6 ถึง 10

ขั้นตอนที่ 12 เมื่อครบเงื่อนไขรอบการค้นหา ผลลัพธ์ชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี X ที่ให้ค่า $ITAE$ ที่ดีที่สุดจะแสดงออกมา

3.5 ขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึมไนโคไซน์ในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 3.23 แผนผังวิธีการดำเนินการของอัลกอริทึมไนโคไซน์ ในการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี

จากรูปที่ 3.23 คือแผนผังวิธีการดำเนินการของอัลกอริทึมไฮบริด ในการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดตัวแปรและค่าคงที่ โดยมีรายละเอียดตัวอย่างดังนี้

- จำนวนประชากร (N)
- จำนวนรอบค้นหา ($Max\ iteration$)
- จำนวนพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy มี 6 ค่า (ตัวควบคุมฟuzzy มี 2 ตัว)
- ขอบเขตบนและล่าง
- ค่าคงที่ $a = 2$

ขั้นตอนที่ 2 เริ่มสุ่มชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy เริ่มต้น X ตามจำนวนประชากร N ที่ตั้งไว้

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า $ITAE$

ขั้นตอนที่ 4 คัดเลือกหาชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy X ที่ให้ค่า $ITAE$ น้อยที่สุด เก็บเป็นตำแหน่ง P

ขั้นตอนที่ 5 เข้าสู่เงื่อนไขรอบการค้นหาของอัลกอริทึมไฮบริด โดยจำนวนรอบค้นหาจะถูกกำหนดตามที่ตั้งไว้

ขั้นตอนที่ 6 สุ่มค่าพารามิเตอร์ r_1 r_2 r_3 และ r_4 ที่ใช้กับสมการที่ 2-49 แล้วนำไปคำนวณหาชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy X ใหม่

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่า $ITAE$ ใหม่

ขั้นตอนที่ 8 เปรียบเทียบค่า $ITAE$ ใหม่กับค่า $ITAE$ ที่ดีที่สุดหรือไม่

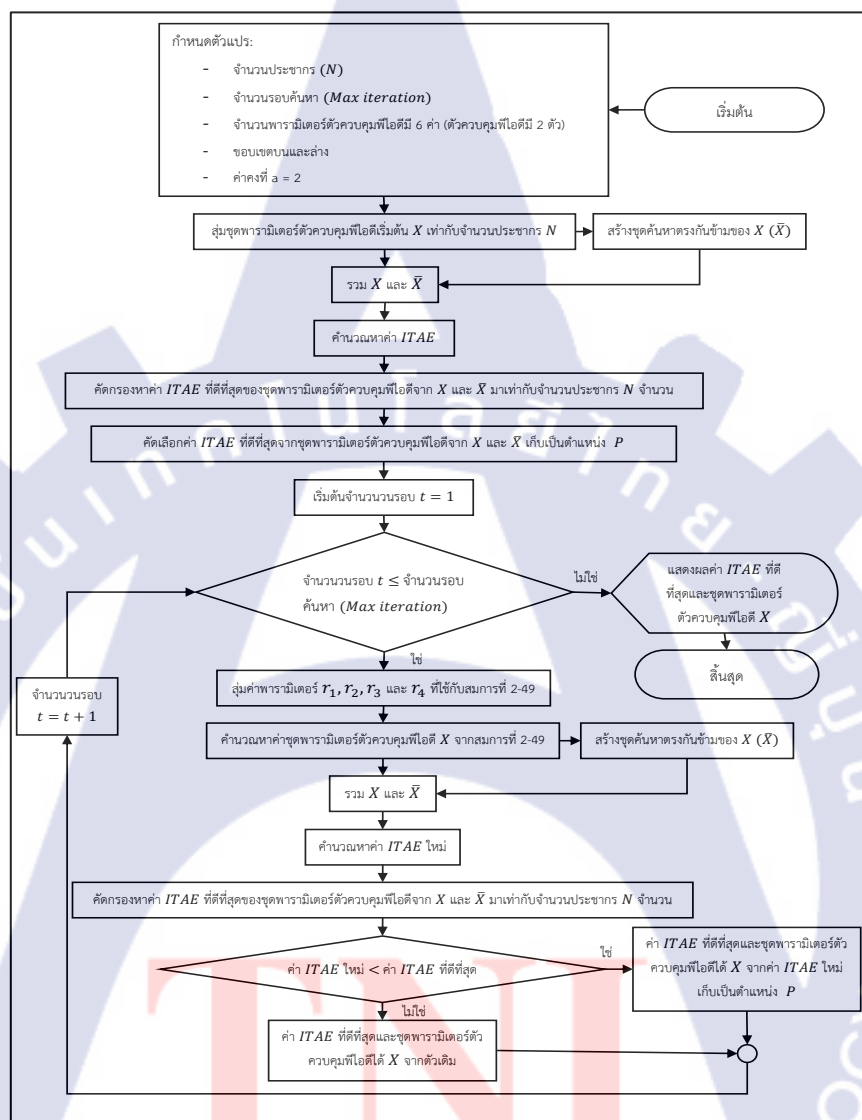
ใช่: ทำการอัปเดต P จากชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy X ที่ให้ค่า $ITAE$ ใหม่ น้อยกว่าค่า $ITAE$ ที่ดีที่สุด

ไม่ใช่: ค่า P จากชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy X ที่ให้ค่า $ITAE$ ที่ดีที่สุดเป็นค่าตัวเดิม

ขั้นตอนที่ 9 เข้าสู่เงื่อนไขรอบการค้นหาตามขั้นตอนที่ 5 แล้วทำการคำนวณหาชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy ใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 6 ถึง 8

ขั้นตอนที่ 10 เมื่อครบเงื่อนไขรอบการค้นหา ผลลัพธ์ชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมฟuzzy X ที่ให้ค่า $ITAE$ ที่ดีที่สุดจะแสดงออกมา

3.6 ขั้นตอนการทำงานของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไนในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี



รูปที่ 3.24 แผนผังวิธีการดำเนินการของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไน ในการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี

จากรูปที่ 3.23 คือแผนผังระเบียบวิธีการดำเนินการของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮไน ในการปรับพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดตัวแปรและค่าคงที่ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- จำนวนประชากร (N)

- จำนวนรอบค้นหา (*Max iteration*)
- จำนวนพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีมี 6 ค่า (ตัวควบคุมพีไอดีมี 2 ตัว)
- ขอบเขตบนและล่าง
- ค่าคงที่ $a = 2$

ขั้นตอนที่ 2 เริ่มสุ่มชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีเริ่มต้น X ตามจำนวนประชากร N ที่ตั้งไว้ และทำการคำนวณหาตำแหน่งตรงกันข้าม $X (\bar{X})$ แล้วนำมารวมกัน

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาค่า *ITAE*

ขั้นตอนที่ 4 คัดเลือกหาชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี X และ $\bar{X}$ ที่ให้ค่า *ITAE* เหมาะสมที่สุดมาเท่ากับจำนวนประชากร N จำนวนที่ตั้งไว้

ขั้นตอนที่ 5 คัดเลือกหาชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี X ที่ให้ค่า *ITAE* น้อยที่สุด เก็บเป็นตำแหน่ง P

ขั้นตอนที่ 6 เข้าสู่เงื่อนไขรอบการค้นหาของอัลกอริทึมไฮลิโคไลซ์ โดยจำนวนรอบค้นหาจะถูกกำหนดตามที่ตั้งไว้

ขั้นตอนที่ 7 สุ่มค่าพารามิเตอร์ r_1 r_2 r_3 และ r_4 ที่ใช้กับสมการที่ 2-49 แล้วนำไปคำนวณหาชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี X ใหม่ และทำการคำนวณหาตำแหน่งตรงกันข้าม $X (\bar{X})$ ใหม่

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณหาค่า *ITAE* ใหม่

ขั้นตอนที่ 9 คัดเลือกหาชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี X และ $\bar{X}$ ที่ให้ค่า *ITAE* เหมาะสมที่สุดมาเท่ากับจำนวนประชากร N จำนวนที่ตั้งไว้

ขั้นตอนที่ 10 เปรียบเทียบค่า *ITAE* ใหม่กับค่า *ITAE* ที่ดีที่สุดหรือไม่

ใช่: ทำการอัปเดต P จากชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี X ที่ให้ค่า *ITAE* ใหม่กับค่า *ITAE* ที่ดีที่สุด

ไม่ใช่: ค่า P จากชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี X ที่ให้ค่า *ITAE* ที่ดีที่สุดเป็นค่าตัวเดิม

ขั้นตอนที่ 11 เข้าสู่เงื่อนไขรอบการค้นหาตามขั้นตอนที่ 6 แล้วทำการคำนวณหาชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีใหม่ตั้งแต่ขั้นตอนที่ 7 ถึง 10

ขั้นตอนที่ 12 เมื่อครบเงื่อนไขรอบการค้นหา ผลลัพธ์ชุดพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี X ที่ให้ค่า *ITAE* ที่ดีที่สุดจะแสดงออกมา

3.7 การออกแบบการทดลองหาขอบเขตของตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถัง

จากการอธิบายการออกแบบระบบจำลอง ที่มีสภาวะของระบบทั้งแบบ minimum phase และ non-minimum phase รวมไปถึงกรณีที่ถูกรบกวนและไม่ถูกรบกวนของระบบถึง 4 ถังตามหัวข้อ

3.2 เมื่อนำมาประยุกต์กับตัวควบคุมพีไอดีตามหัวข้อ 3.3 แล้ว การตั้งค่าขอบเขตของตัวควบคุมพีไอดีทั้ง 2 ตัวที่จะมาควบคุมระบบถึง 4 ถึงในแต่ละสภาวะนั้น จะมีผลต่อการปรับตัวควบคุมเมื่อใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมของอัลกอริทึมด้วย เพราะเกณฑ์ฟังก์ชันดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ในการประเมินผลแต่ละสภาวะนั้นแตกต่างกัน

ดังนั้นหัวข้อนี้จะทำการออกแบบการทดลองหาขอบเขตที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอดีทั้ง 2 ตัวต่อระบบถึง 4 ถึงเมื่อใช้วิธีหาค่าที่เหมาะสมของอัลกอริทึมในการปรับตัวควบคุม ของระบบในสภาวะเป็นแบบ minimum phase และแบบ non-minimum phase ที่อยู่ในกรณีระบบที่ไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวน โดยกำหนดชุดขอบเขตที่ใช้ในการทดลองของหัวข้อนี้ ตามตารางที่ 3.9 กับระบบแบบจำลองใน Simulink ของ MATLAB แล้วใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริดในการปรับตัวควบคุมเพื่อหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมแล้วประเมินด้วยฟังก์ชันดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ซึ่งจะใช้การสุ่มเฉลี่ยทั้งหมด 5 ครั้ง แล้วมาวิเคราะห์หาขอบเขตที่เหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในการทดลองในหัวข้อถัดไป เนื่องจากระบบในสภาวะแบบ non-minimum phase มี ตำแหน่ง Zero อยู่ด้านขวาของแผนภาพ Pole-Zero ทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้นการออกแบบชุดขอบเขตนี้จะต้องมีขอบเขตล่างให้ถึงค่าลบ ซึ่ง ณ ที่นี้ขอบเขตล่างสุดเป็น -1 เพื่อคำนวณตำแหน่ง Zero ของระบบ เคลื่อนย้ายมาด้านซ้ายของแผนภาพ Pole-Zero เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ

ตารางที่ 3.9 ชุดขอบเขตของการทดลองหาขอบเขตที่เหมาะสมของตัวควบคุมพีไอดีทั้ง 2 ตัวกับระบบถึง 4 ถึง

ชุดขอบเขต	ขอบเขตล่าง	ขอบเขตบน
ขอบเขตชุดที่ 1	[-1, -1, -1, -1, -1, -1]	[0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1]
ขอบเขตชุดที่ 2	[-1, -1, -1, -1, -1, -1]	[0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5]
ขอบเขตชุดที่ 3	[-1, -1, -1, -1, -1, -1]	[1, 1, 1, 1, 1, 1]
ขอบเขตชุดที่ 4	[-1, -1, -1, -1, -1, -1]	[5, 5, 5, 5, 5, 5]
ขอบเขตชุดที่ 5	[-1, -1, -1, -1, -1, -1]	[10, 10, 10, 10, 10, 10]
ขอบเขตชุดที่ 6	[-1, -1, -1, -1, -1, -1]	[50, 50, 50, 50, 50, 50]
ขอบเขตชุดที่ 7	[-1, -1, -1, -1, -1, -1]	[100, 100, 100, 100, 100, 100]
ขอบเขตชุดที่ 8	[-1, -1, -1, -1, -1, -1]	[500, 500, 500, 500, 500, 500]

3.8 การออกแบบการทดลองหาปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถึง

การออกแบบนี้จะเป็นการทดลองหาปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบถึง 4 ถึง ที่มีสถานะเป็นแบบ minimum phase และแบบ non-minimum phase ที่อยู่ในกรณีระบบที่ไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวน โดยปัจจัยและค่าระดับปัจจัยที่จะใช้ในการทดลองนี้จะนำไปตามตารางที่ 3.10 แล้วใช้การวิเคราะห์เชิงแพททอเรียลเพื่อหาว่าระดับปัจจัยไหนที่เหมาะสมต่อการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึงนี้

ตารางที่ 3.10 ปัจจัยและค่าระดับปัจจัยของการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง

ปัจจัย	ระดับของปัจจัย				
	ต่ำมาก	ต่ำ	ปานกลาง	สูง	สูงมาก
จำนวนประชากร (N)	10	20	30	40	50
จำนวนรอบค้นหา ($Max\ Iteration$)	10	20	30	40	50

3.9 การออกแบบการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์กับวิธีการอื่นในการปรับตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถึง

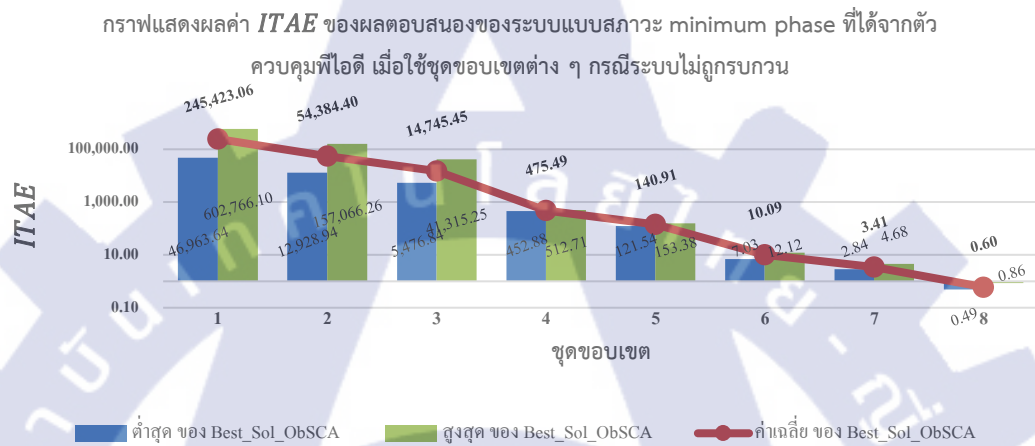
การออกแบบนี้จะเป็นการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์กับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์และการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาคในการปรับตัวควบคุมพีไอดีระบบถึง 4 ถึง โดยวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์จะใช้ระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากหัวข้อ 3.8 กับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์และการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค มาหาค่าอัตราขยายที่เหมาะสมแล้วประเมินด้วยฟังก์ชันดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ $ITAE$ ซึ่งจะใช้การสุ่มเฉลี่ยทั้งหมด 30 ครั้ง ในแต่ละสถานะ แล้วนำผลลัพธ์ $ITAE$ ที่ได้มาเปรียบเทียบ จากนั้นนำตำแหน่งของตัวควบคุมพีไอดีที่ให้ผลลัพธ์ $ITAE$ ดีที่สุดของแต่ละวิธีมาหาผลการตอบสนองที่ได้จากระบบ แล้วมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลที่ได้

บทที่ 4

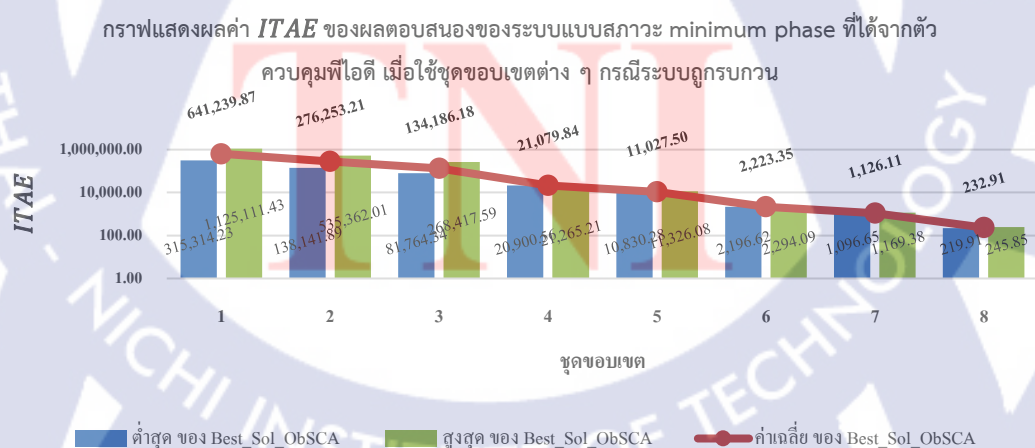
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการทดลองและวิเคราะห์หาขอบเขตของตัวควบคุมพีไอดี

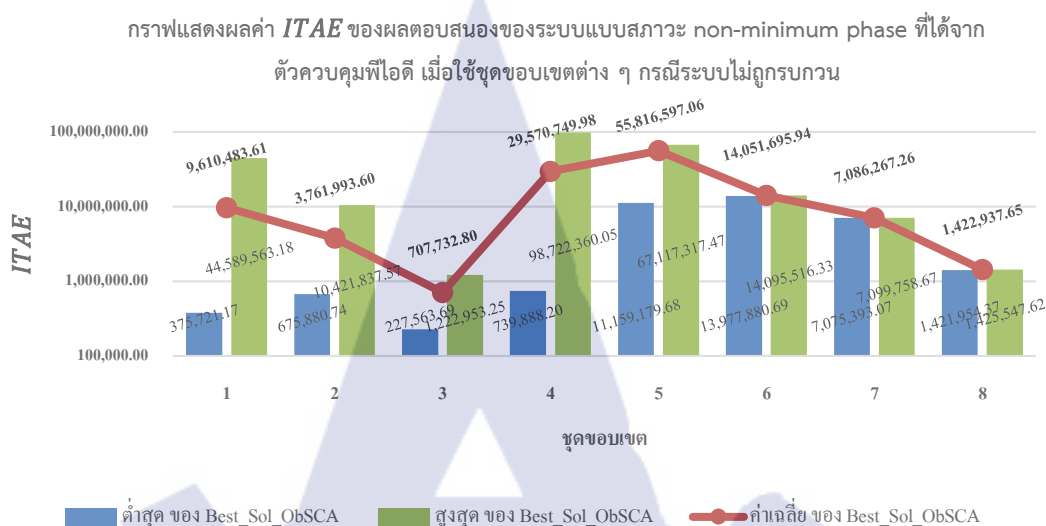
หลังจากการทดลองหาขอบเขตของตัวควบคุมพีไอดีตามหัวข้อที่ 3.7 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองไปเขียนกราฟ ได้ตามรูปที่ 4.1 ถึง 4.4



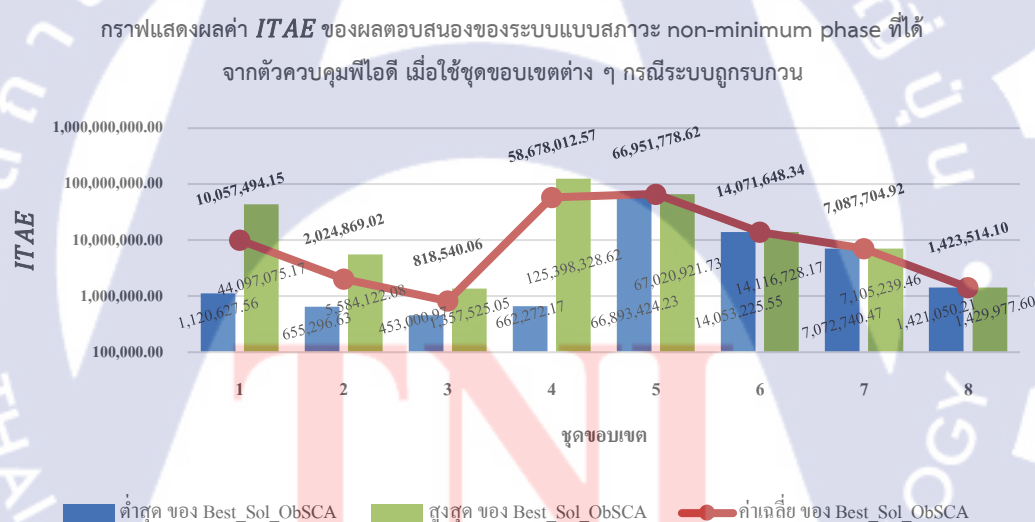
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase ที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดี เมื่อใช้ชุดขอบเขตต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase ที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดี เมื่อใช้ชุดขอบเขตต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase
ที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดี เมื่อใช้ชุดขอบเขตต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase
ที่ได้จากตัวควบคุมพีไอดี เมื่อใช้ชุดขอบเขตต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน

จากรูปที่ 4.1 ถึง 4.4 เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการประเมินด้วยฟังก์ชันดัชนีสมรรถนะแบบ
ปริพันธ์ *ITAE* จะพบว่า ระบบถึง 4 ถึงแบบสภาวะ minimum phase ในกรณีระบบไม่ถูกรบกวน
และถูกรบกวนนั้นให้ผลในลักษณะที่คล้ายกัน กล่าวคือ ลักษณะของค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์
ITAE จะมีค่าลดลง เมื่อขอบเขตของชุดทดลองนั้นมีความห่างกันมากขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะความสัมพันธ์

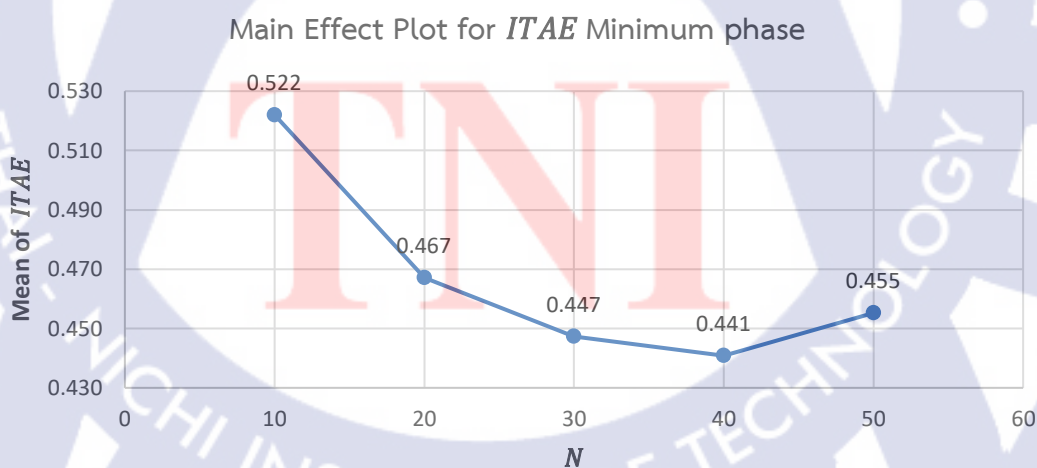
แบบแปรผกผัน ส่วนชุดขอบเขตที่เหมาะสมใช้กับระบบถึง 4 ถึงแบบสภาวะ minimum phase ในกรณีทั้งระบบไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวนในการทดลองนี้ ควรใช้ขอบเขตของชุดที่ 8 เมื่อขอบเขตล่างทั้งหมดมีค่าเท่ากับ -1 และขอบเขตบนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 500

สำหรับระบบถึง 4 ถึงแบบสภาวะ non-minimum phase ในกรณีระบบไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวนนั้นก็ให้ผลในลักษณะที่คล้ายคลึงกันเช่นกัน คือ ลักษณะของค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ในช่วงขอบเขตของชุดทดลองตั้งแต่ชุดที่ 1 ถึง 3 มีแนวโน้มลดลง แต่พอผ่านเข้าสู่ขอบเขตของชุดทดลองที่ 4 กลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนเข้าสู่ช่วงขอบเขตชุดทดลองที่ 5 ถึง 8 กลับมีแนวโน้มลดลงมา ซึ่งเป็นลักษณะความสัมพันธ์แบบกราฟคลื่น ส่วนชุดขอบเขตที่เหมาะสมใช้กับระบบถึง 4 ถึงแบบสภาวะ non-minimum phase ในกรณีทั้งระบบไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวนในการทดลองนี้ ควรใช้ขอบเขตของชุดที่ 3 เมื่อขอบเขตล่างทั้งหมดมีค่าเท่ากับ -1 และขอบเขตบนทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1

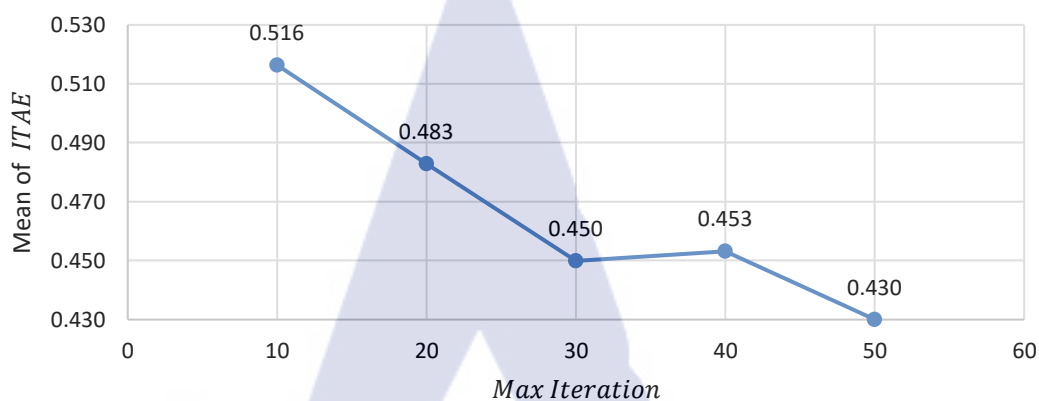
4.2 ผลการทดลองและวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี (OBSCA)

ผลการทดลองหาปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง ที่มีสภาวะเป็นแบบ minimum phase และแบบ non-minimum phase ในกรณีระบบไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวนนั้น เมื่อนำไปวิเคราะห์จะได้ผลการวิเคราะห์ของแต่ละสภาวะเป็นดังนี้

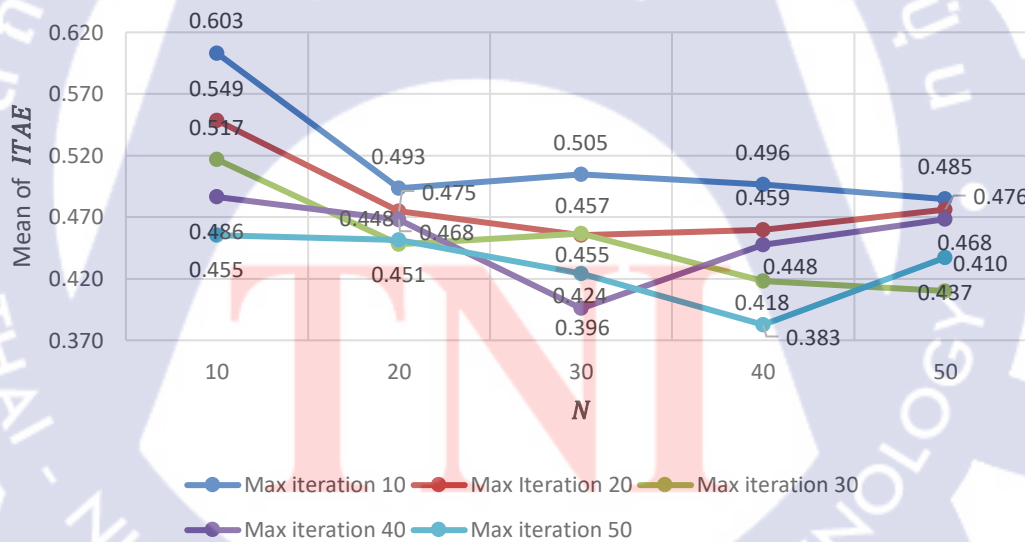
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ระบบถึง 4 ถึงที่สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (N) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน

Main Effect Plot for *ITAE* Minimum phase

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน

Interaction Plot for *ITAE* Minimum phase

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (*N*) ร่วมกับจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน

จากการวิเคราะห์ตามกราฟรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ตามลำดับพบว่า

ผลกระทบปัจจัยหลักของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริด (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบถึง 4 ถึง ทั้งปัจจัยของจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) นี้มีลักษณะแนวโน้มที่คล้ายกัน คือค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลงในช่วง 10–30 แต่ในช่วง 30–40 ปัจจัยของจำนวนประชากรส่งผลให้ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* มีลักษณะแนวโน้มที่ลดลงและเพิ่มขึ้นในช่วง 40–50 ซึ่งต่างจากปัจจัยจำนวนรอบค้นหาที่จะให้ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* เพิ่มขึ้นในช่วงของจำนวนรอบค้นหา 30-40 และลดลงในช่วง 40–50

ส่วนผลกระทบปัจจัยร่วมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริด (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบถึง 4 ถึง พบว่า

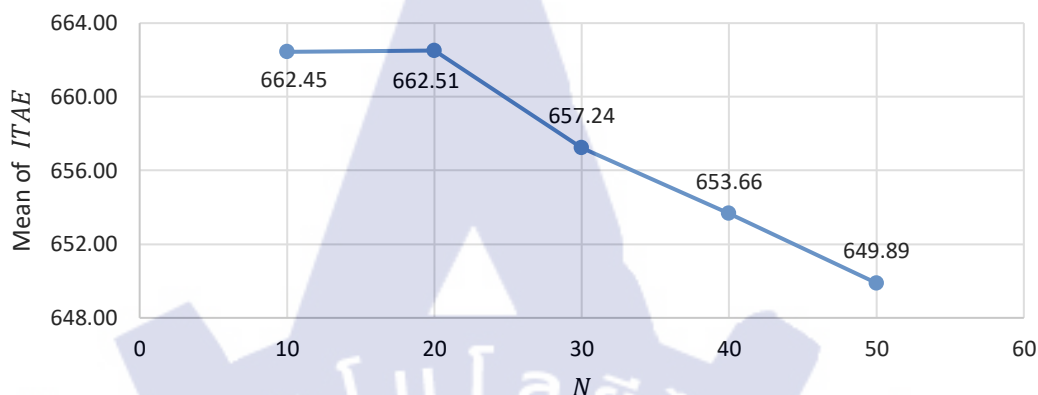
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 10-20 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลง
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 20-30 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลง ยกเว้นจำนวนรอบค้นหาที่ 10 และ 30 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะที่เพิ่มขึ้น
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 30-40 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลง ยกเว้นจำนวนรอบค้นหาที่ 20 และ 40 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะที่เพิ่มขึ้น
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 40-50 จำนวนรอบค้นหาที่ 10 และ 30 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลง ยกเว้นจำนวนรอบค้นหาที่ 20, 40 และ 50 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะที่เพิ่มขึ้น

จากทุกช่วงที่กล่าวมานี้ พบว่าโดยเฉลี่ยแล้วค่าปัจจัยจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) ยังมีค่ามาก จะส่งผลให้ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* มีค่าลดลง

จากผลวิเคราะห์ดังกล่าว ค่าปัจจัยของจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) ที่เหมาะสมกับการปรับตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase ในกรณีระบบไม่ถูกรบกวน ควรใช้ที่จำนวนประชากรเท่ากับ 40 และจำนวนรอบค้นหาที่ 50

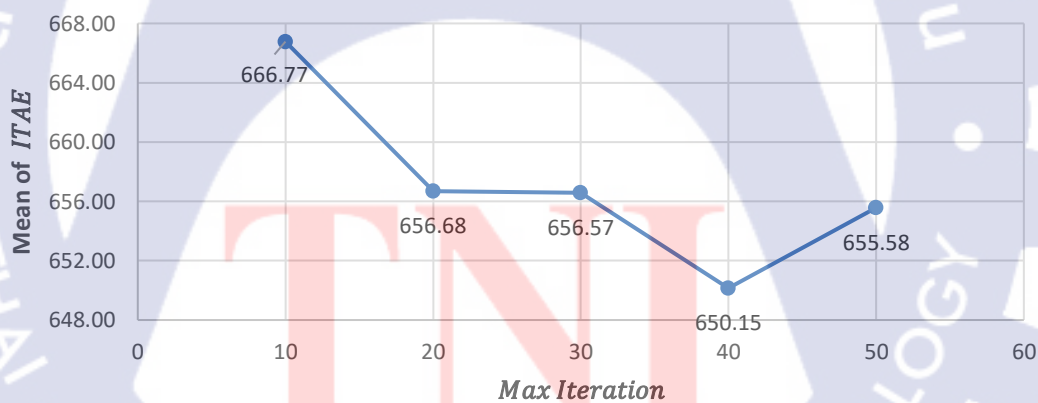
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน

Main Effect Plot for *ITAE* Minimum phase with disturbance

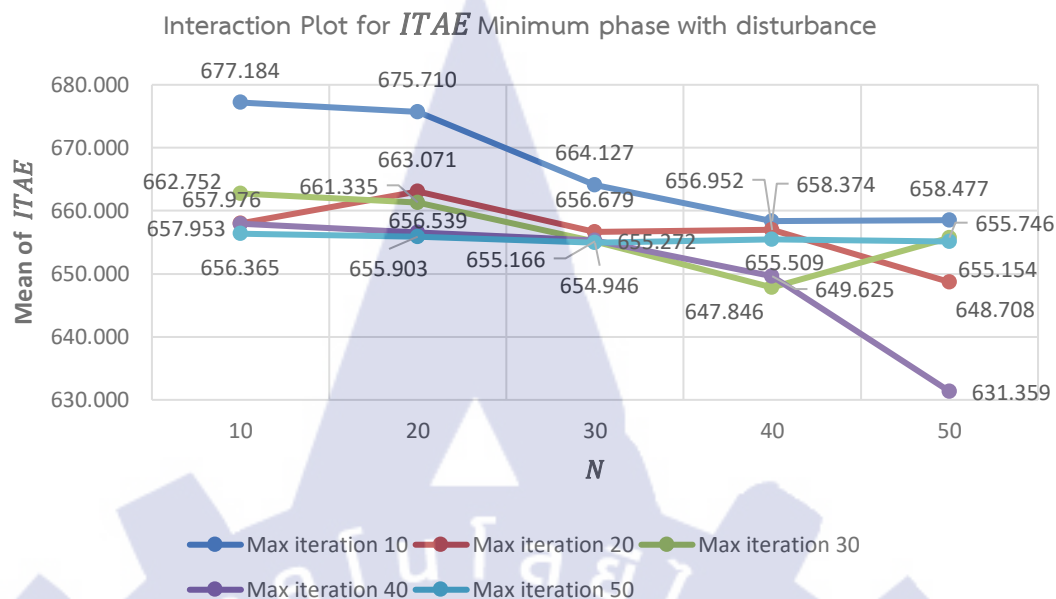


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (N) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน

Main Effect Plot for *ITAE* Minimum phase with disturbance



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (N) ร่วมกับจำนวนรอบค้นหา ($Max Iteration$) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน

จากการวิเคราะห์ตามกราฟรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 ตามลำดับพบว่า

ผลกระทบปัจจัยหลักของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง ทั้งปัจจัยของจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา ($Max Iteration$) นี้มีลักษณะแนวโน้มที่ต่างกันเล็กน้อย คือค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ของปัจจัยจำนวนประชากร (N) เพิ่มขึ้นในช่วง 10-20 แต่ในช่วง 30-50 ปัจจัยของจำนวนประชากรส่งผลให้ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* มีลักษณะแนวโน้มที่ลดลงต่อเนื่อง ซึ่งต่างจากปัจจัยจำนวนรอบค้นหาที่จะให้ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลงในช่วงของจำนวนรอบค้นหา 10-40 และเพิ่มขึ้นในช่วง 40-50

ส่วนผลกระทบปัจจัยร่วมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง พบว่า

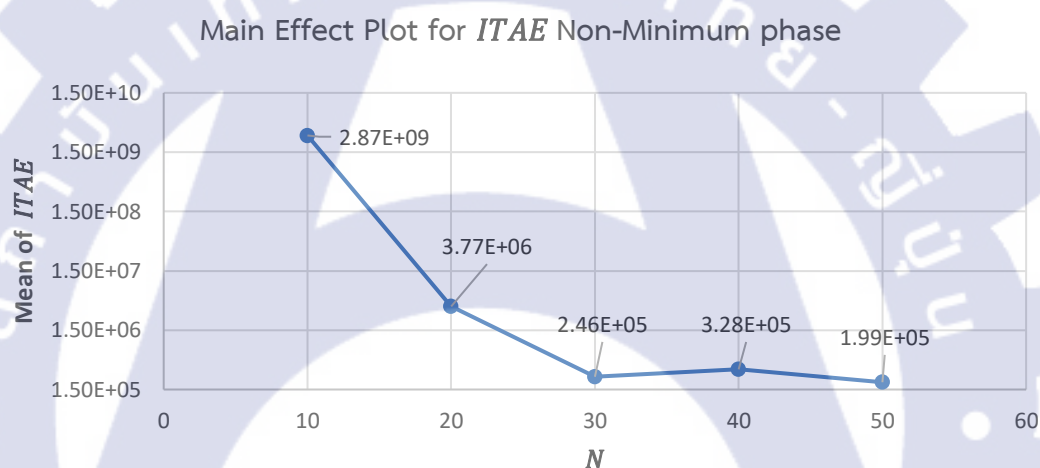
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 10-20 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลง ยกเว้นจำนวนรอบค้นหาที่ 20 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะที่เพิ่มขึ้น
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 20-30 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลงทั้งหมด
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 30-40 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลง ยกเว้นจำนวนรอบค้นหาที่ 20 และ 50 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย

- ช่วงจำนวนประชากรที่ 40-50 จำนวนรอบค้นหาทุกรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลง ยกเว้นจำนวนรอบค้นหาที่ 10 และ 30 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะที่เพิ่มขึ้น

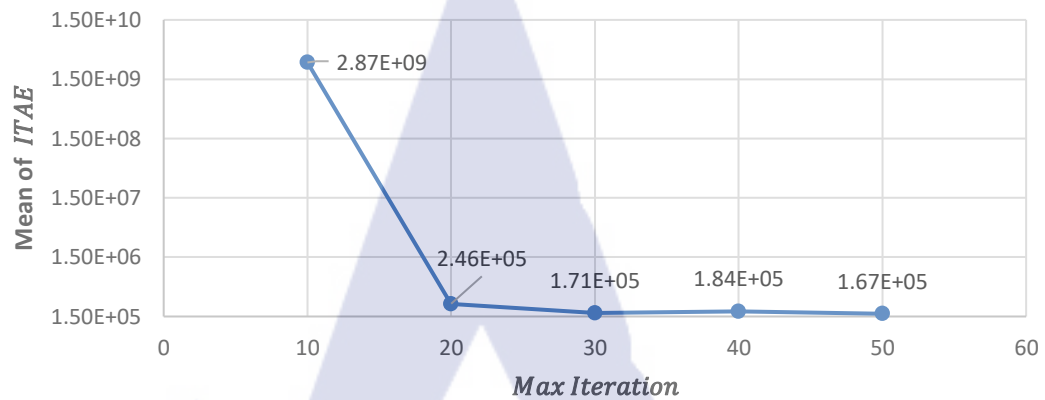
จากทุกช่วงที่กล่าวมานี้ พบว่าโดยเฉลี่ยแล้วค่าปัจจัยจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) ยิ่งมีค่ามาก จะส่งผลให้ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* มีค่าลดลง

จากผลวิเคราะห์ดังกล่าว ค่าปัจจัยของจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) ที่เหมาะสมกับการปรับตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถึงที่สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ควรใช้ที่จำนวนประชากรเท่ากับ 50 และจำนวนรอบค้นหาที่ 40

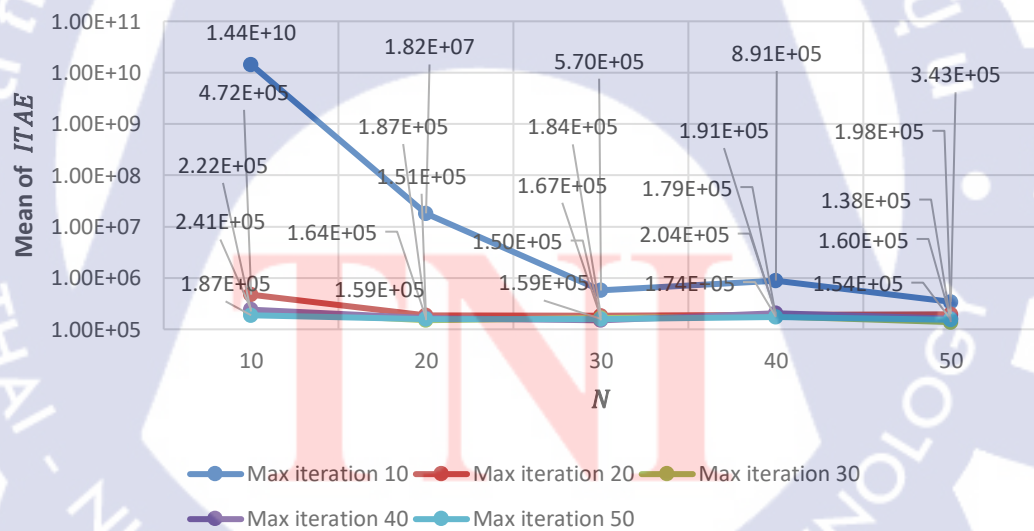
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (N) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน

Main Effect Plot for *ITAE* Non-Minimum phase

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน

Interaction Plot for *ITAE* Non-Minimum phase

รูปที่ 4.13 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (*N*) ร่วมกับจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) ต่างๆ กรณีระบบไม่ถูกรบกวน

จากการวิเคราะห์ตามกราฟรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 ตามลำดับพบว่า

ผลกระทบปัจจัยหลักของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง ทั้งปัจจัยของจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา ($Max Iteration$) นี้มีลักษณะแนวโน้มที่คล้ายกัน คือค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ $ITAE$ ลดลงในช่วง 10-30 และ 40-50 แต่ในช่วง 30-40 ปัจจัยของจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา ($Max Iteration$) ที่ส่งผลให้ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ $ITAE$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

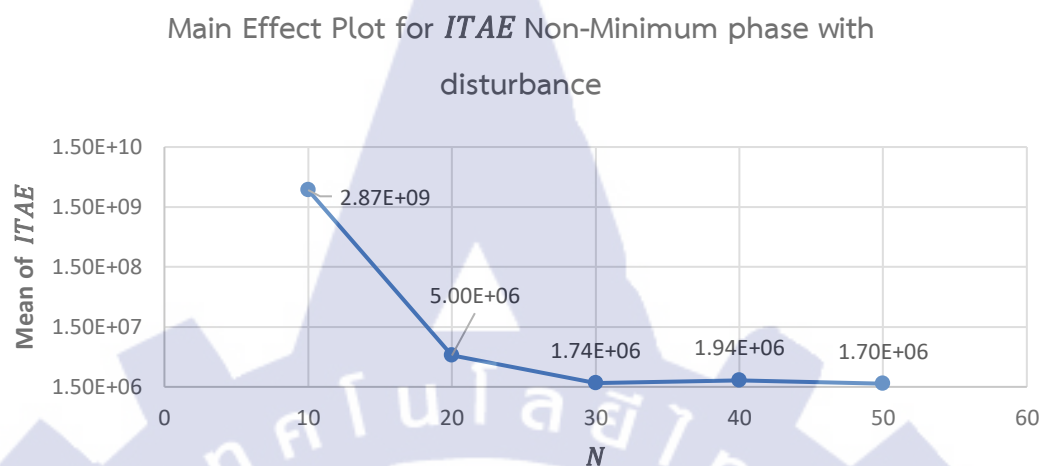
ส่วนผลกระทบปัจจัยร่วมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง พบว่า

- ช่วงจำนวนประชากรที่ 10-20 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ $ITAE$ ลดลงทั้งหมด
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 20-30 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ $ITAE$ ลดลง ยกเว้นจำนวนรอบค้นหาที่ 40 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะที่เพิ่มขึ้น และจำนวนรอบค้นหาที่ 50 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะที่คงที่
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 30-40 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ $ITAE$ เพิ่มขึ้นทั้งหมด
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 40-50 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ $ITAE$ ลดลง ยกเว้นจำนวนรอบค้นหาที่ 20 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะที่เพิ่มขึ้น

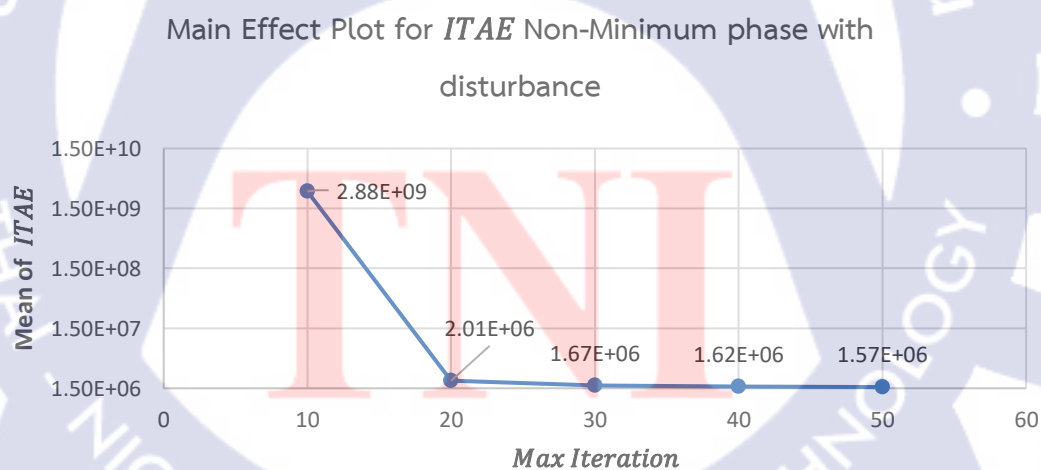
จากทุกช่วงที่กล่าวมานี้ พบว่าโดยเฉลี่ยแล้วคู่ปัจจัยจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา ($Max Iteration$) ยังมีค่ามาก จะส่งผลให้ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ $ITAE$ มีค่าลดลง

จากผลวิเคราะห์ดังกล่าว ค่าปัจจัยของจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา ($Max Iteration$) ที่เหมาะสมกับการปรับตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวนควรใช้ที่จำนวนประชากรเท่ากับ 50 และจำนวนรอบค้นหาที่ 30

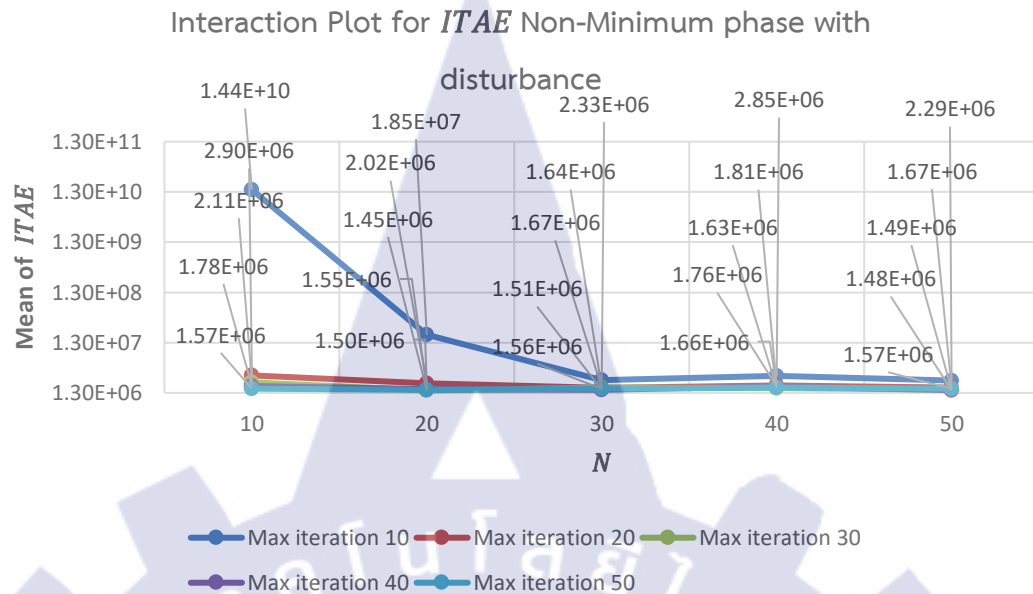
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (N) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนรอบค้นหา ($Max Iteration$) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบแบบสภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี สำหรับจำนวนประชากร (N) ร่วมกับจำนวนรอบค้นหา ($Max\ Iteration$) ต่างๆ กรณีระบบถูกรบกวน

จากการวิเคราะห์ตามกราฟรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 ตามลำดับพบว่า

ผลกระทบปัจจัยหลักของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง ทั้งปัจจัยของจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา ($Max\ Iteration$) นี้มีลักษณะแนวโน้มที่คล้ายกัน คือค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลงทุกช่วง ยกเว้นช่วง 30-40 ของปัจจัยจำนวนประชากร (N) เท่านั้นที่ส่งผลให้ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ส่วนผลกระทบปัจจัยร่วมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไฮน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง พบว่า

- ช่วงจำนวนประชากรที่ 10-20 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลงทั้งหมด
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 20-30 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* เพิ่มขึ้น ยกเว้นจำนวนรอบค้นหาที่ 20 และ 40 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะที่ลดลง
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 30-40 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* เพิ่มขึ้น ยกเว้นจำนวนรอบค้นหาที่ 30 มีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะที่ลดลง
- ช่วงจำนวนประชากรที่ 40-50 จำนวนรอบค้นหาในรอบมีแนวโน้มค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลงทั้งหมด

จากทุกช่วงที่กล่าวมานี้ พบว่าโดยเฉลี่ยรวมแล้วค่าปรับจูนจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา ($Max\ Iteration$) ยังมีค่ามาก จะส่งผลให้ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ $ITAE$ มีค่าลดลง

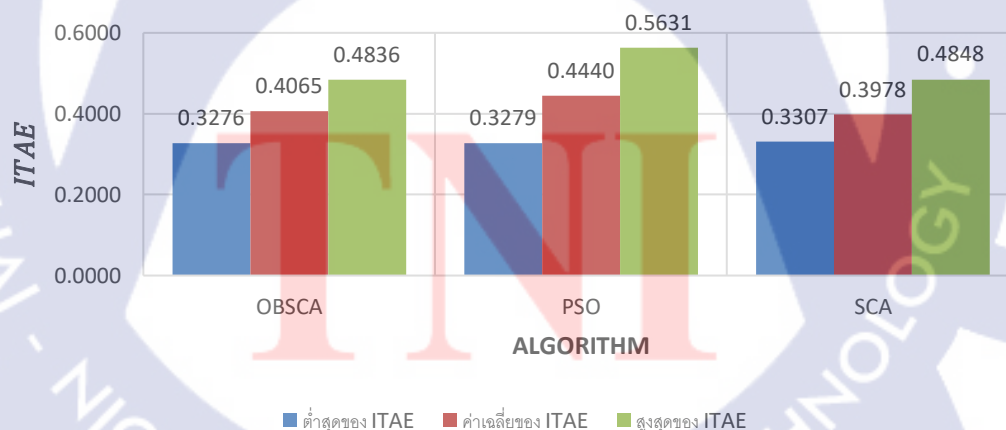
จากผลวิเคราะห์ดังกล่าว ค่าปรับจูนของจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา ($Max\ Iteration$) ที่เหมาะสมกับการปรับตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถึงสถานะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ควรใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 20 และจำนวนรอบค้นหาที่ 30

4.3 ผลการทดลองและวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริดกับวิธีการอื่นต่อการปรับตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบถึง 4 ถึง

จากการทดลองหาปรับจูนที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริดโคไซน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง ณ สถานะต่าง ๆ ในหัวข้อ 4.2 เมื่อนำผลปรับจูนที่ได้จากการทดลองดังกล่าวมาทดลองต่อแล้วนำมาผล $ITAE$ มาเปรียบเทียบกับวิธีการอัลกอริทึมไฮบริดโคไซน์ (SCA) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) ที่หาผลปรับจูนที่เหมาะสมได้จากการทดลองเดียวกับที่ทดลองในหัวข้อ 4.2 นี้ ผลที่ได้เมื่อนำไปวิเคราะห์จะได้ตามดังนี้

4.3.1 การวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง สถานะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ด้วยวิธี OBSCA, SCA และ PSO

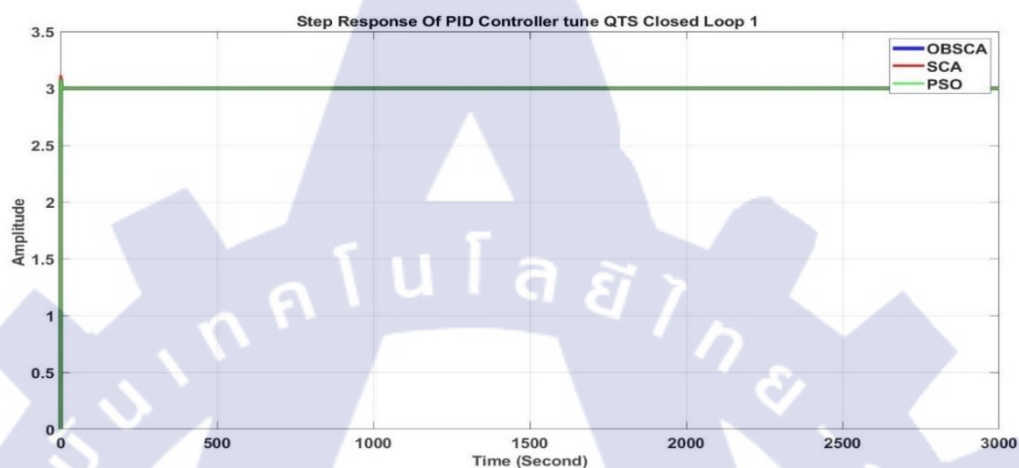
Comparing $ITAE$ Minimum phase tuning by OBSCA, SCA and PSO



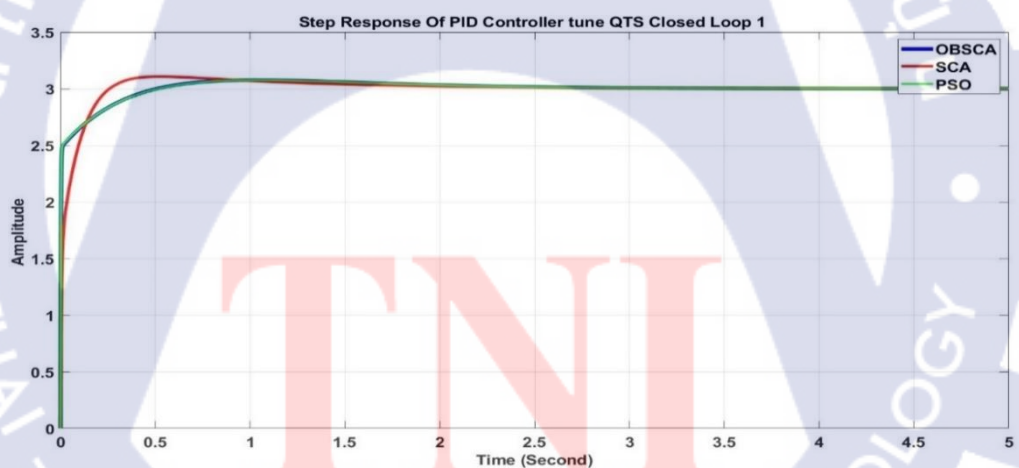
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงผลค่า $ITAE$ ของผลตอบสนองของระบบ สถานะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี กรณีระบบไม่ถูกรบกวน

จากรูปกราฟที่ 4.17 พบว่า ระดับค่าเฉลี่ย $ITAE$ ที่ได้จากการใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริดโคไซน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากวิธีอัลกอริทึม

ไซน์โคไซน์ (SCA) แต่น้อยกว่าค่าที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) ส่วนค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของ *ITAE* จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไซน์โคไซน์ (OBSCA) จะมีค่าน้อยที่สุด สำหรับการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบสัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO จะได้จากค่า *ITAE* น้อยสุดของแต่ละวิธี ผลตอบสนองที่ได้จะเป็นไปตามกราฟที่ 4.18 และ 4.19 กับ ตารางที่ 4.1 ดังนี้

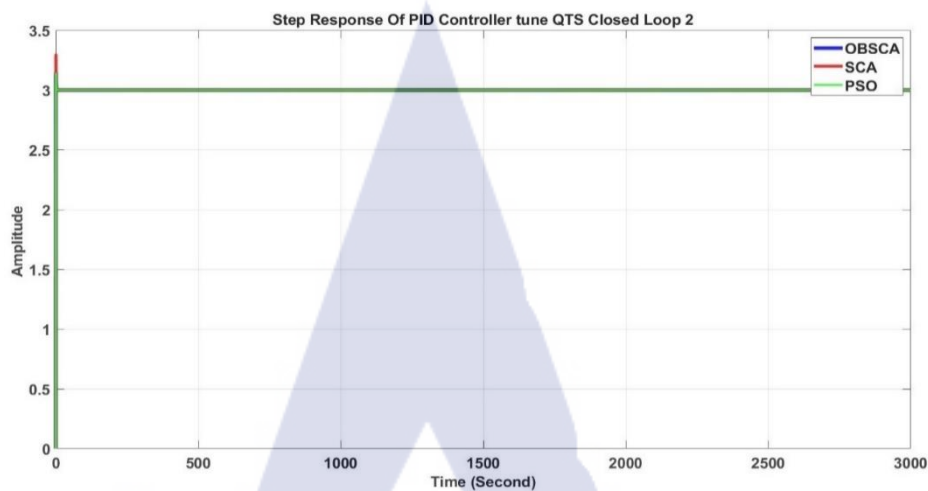


(a)

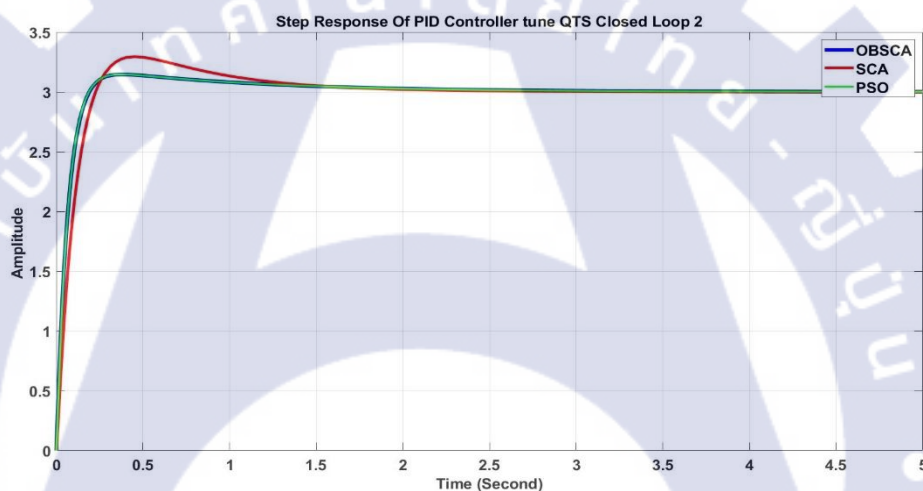


(b)

รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 1 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO (a) ช่วงเวลาทั้งหมด 0-3000 วินาที (b) ขยายภาพช่วงเวลา 0-5 วินาที



(a)



(b)

รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO (a) ช่วงเวลาทั้งหมด 0-3000 วินาที (b) ขยายภาพช่วงเวลา 0-3 วินาที

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวบ่งชี้ผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2

ตัวบ่งชี้	สัญญาณป้อนออก 1			สัญญาณป้อนออก 2		
	OBSCA	SCA	PSO	OBSCA	SCA	PSO
เวลาไต่ขึ้น (Rise time ; s.)	0.13467	0.13503	0.13264	0.1188	0.1571	0.1174

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวบ่งชี้ผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2 (ต่อ)

ตัวบ่งชี้	สัญญาณป้อนออก 1			สัญญาณป้อนออก 2		
	OBSCA	SCA	PSO	OBSCA	SCA	PSO
ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot ; %)	2.56220	3.58350	2.55120	4.8507	9.8138	4.8671
เวลาเข้าสู่สมดุล (settling time ; s.)	1.47110	1.14330	1.48340	1.2822	1.4201	1.2785
ค่าความผิดพลาดที่ สภาวะคงตัว (Steady state error)	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

จากรูปผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ของสัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ตามรูปที่ 4.18 และ 4.19 เมื่อเขียนค่าในตารางที่ 4.1 จะพบว่า

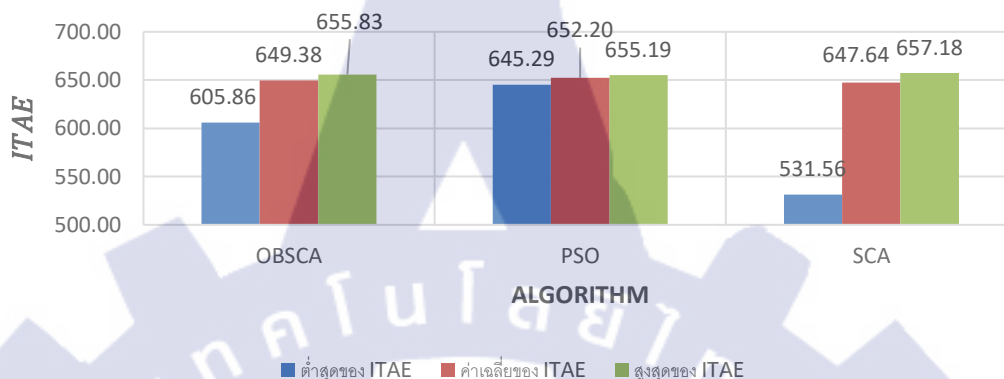
- สัญญาณป้อนออก 1: เวลาไต่ขึ้น และค่าพุ่งเกินสูงสุด ของผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (OBSCA) จะมากกว่าที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) แต่น้อยกว่าวิธีอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (SCA) ส่วนเวลาเข้าสู่สมดุลของผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (OBSCA) ใช้เวลามากกว่าวิธีอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (SCA) แต่น้อยกว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO)

- สัญญาณป้อนออก 2: ผลตอบสนองของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (OBSCA) จะให้ค่าพุ่งเกินสูงสุดดีกว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (SCA) แต่เวลาไต่ขึ้นและเวลาเข้าสู่สมดุลยังช้ากว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO)

จากผลตอบสนองนี้ทำให้สามารถสรุปโดยรวมได้ว่า สำหรับระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน การใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี จะให้ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ดีน้อยกว่า วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) แต่ดีกว่าวิธีอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (SCA)

4.3.2 การวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ด้วยวิธี OBSCA, SCA และ PSO

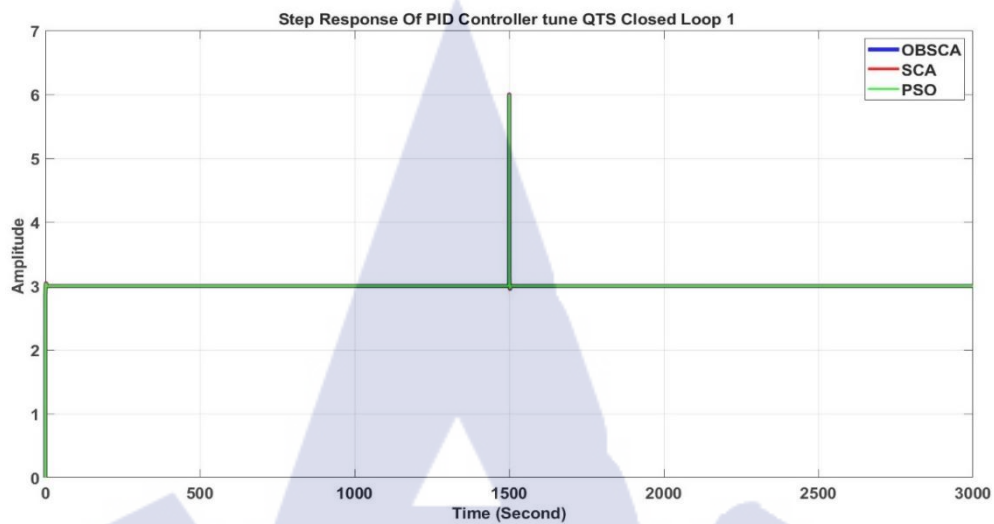
Comparing *ITAE* Minimum phase with disturbance tuning by OBSCA, SCA and PSO



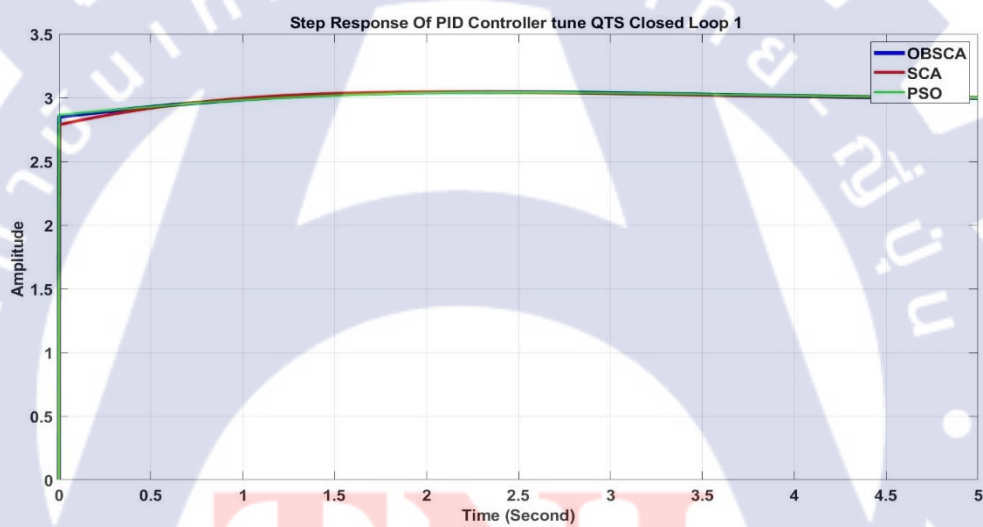
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงผลค่า *ITAE* ของผลตอบสนองของระบบ สภาวะ minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี กรณีระบบถูกรบกวน

จากรูปกราฟที่ 4.20 พบว่า ระดับค่าเฉลี่ย, ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด *ITAE* จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคโซน (OBSCA) จะมีค่าที่มากกว่าเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคโซน (SCA) แต่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO)

สำหรับการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบสัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO จะได้จากค่า *ITAE* น้อยสุดของแต่ละวิธี ผลตอบสนองที่ได้จะเป็นไปตามกราฟที่ 4.21 และ 4.22 กับตารางที่ 4.2 ดังนี้

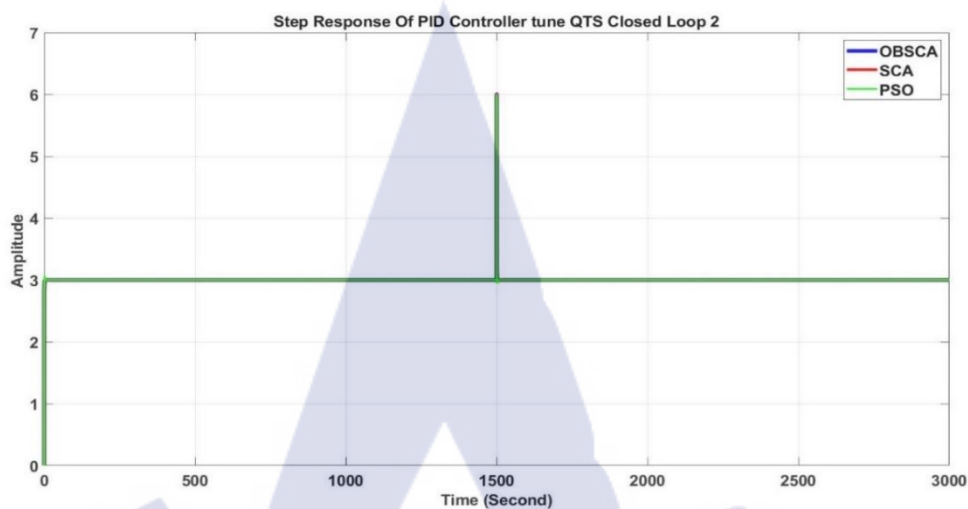


(a)

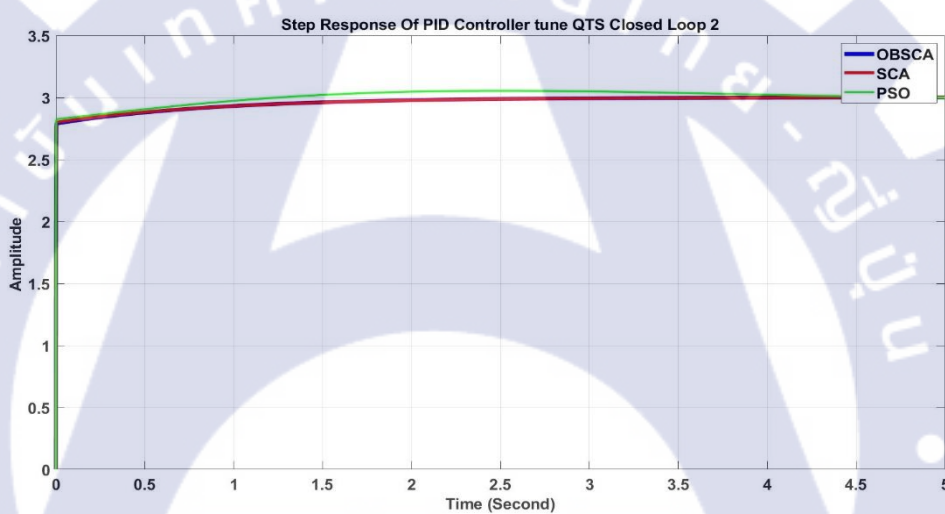


(b)

รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 1 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO (a) ช่วงเวลาทั้งหมด 0-3000 วินาที (b) ขยายภาพช่วงเวลา 0-3 วินาที



(a)



(b)

รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO (a) ช่วงเวลาทั้งหมด 0-3000 วินาที (b) ขยายภาพช่วงเวลา 0-3 วินาที

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวบ่งชี้ผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2

ตัวบ่งชี้	สัญญาณป้อนออก 1			สัญญาณป้อนออก 2		
	OBSCA	SCA	PSO	OBSCA	SCA	PSO
เวลาไต่ขึ้น (Rise time ; s.)	0.00142	0.00242	0.00125	0.00236	0.00217	0.00180

ตารางที่ 4.2 ค่าตัวบ่งชี้ผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2 (ต่อ)

ตัวบ่งชี้	สัญญาณป้อนออก 1			สัญญาณป้อนออก 2		
	OBSCA	SCA	PSO	OBSCA	SCA	PSO
ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot ; %)	100	100	100	100	100	100
เวลาเข้าสู่สมดุลง (settling time ; s.)	1500.60	1500.62	1500.59	1501.12	1501.13	1500.74
ค่าความผิดพลาดที่ สภาวะคงตัว (Steady state error)	1.06E-13	1.22E-12	1.30E-12	2.95E-09	4.85E-11	3.79E-09

จากรูปผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะเป็นแบบ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ตามรูปที่ 4.21 และ 4.22 เมื่อนำมาเขียนค่าในตารางที่ 4.2 จะพบว่า

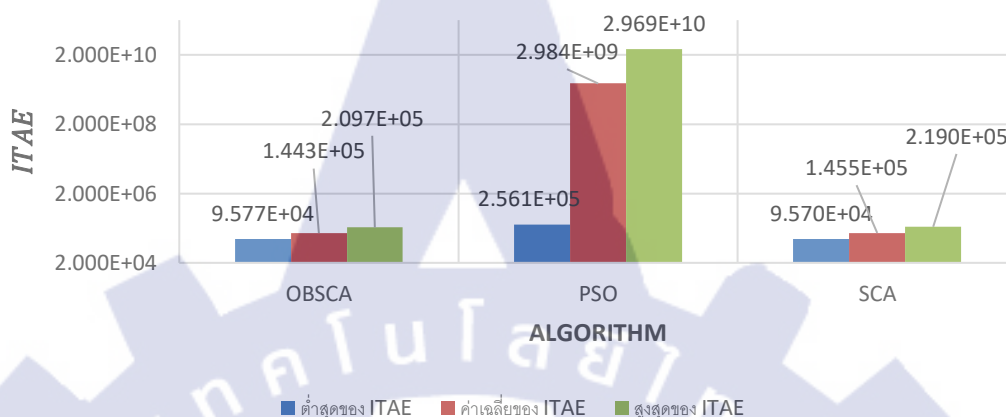
- สัญญาณป้อนออก 1: เวลาไต่ขึ้น และเวลาเข้าสู่สมดุลงของผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (OBSCA) มีค่าที่มากกว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) แต่น้อยกว่าวิธีอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (SCA) ส่วนค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (OBSCA) มีค่าที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับวิธีอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (SCA) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) สำหรับค่าพุ่งเกินสูงสุดของแต่ละวิธีมีค่าเท่ากันหมด

- สัญญาณป้อนออก 2: เวลาไต่ขึ้น, เวลาเข้าสู่สมดุลงและค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (OBSCA) มีค่าที่มากกว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) แต่น้อยกว่าวิธีอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (SCA)

จากผลตอบสนองนี้ทำให้สามารถสรุปโดยรวมได้ว่า สภาวะเป็นแบบ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2 การใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี จะให้ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ดีกว่า เมื่อเทียบกับการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) แต่ดีกว่าการใช้วิธีอัลกอริทึมไฮนโคไซน์ (SCA)

4.3.3 การวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ด้วยวิธี OBSCA, SCA และ PSO

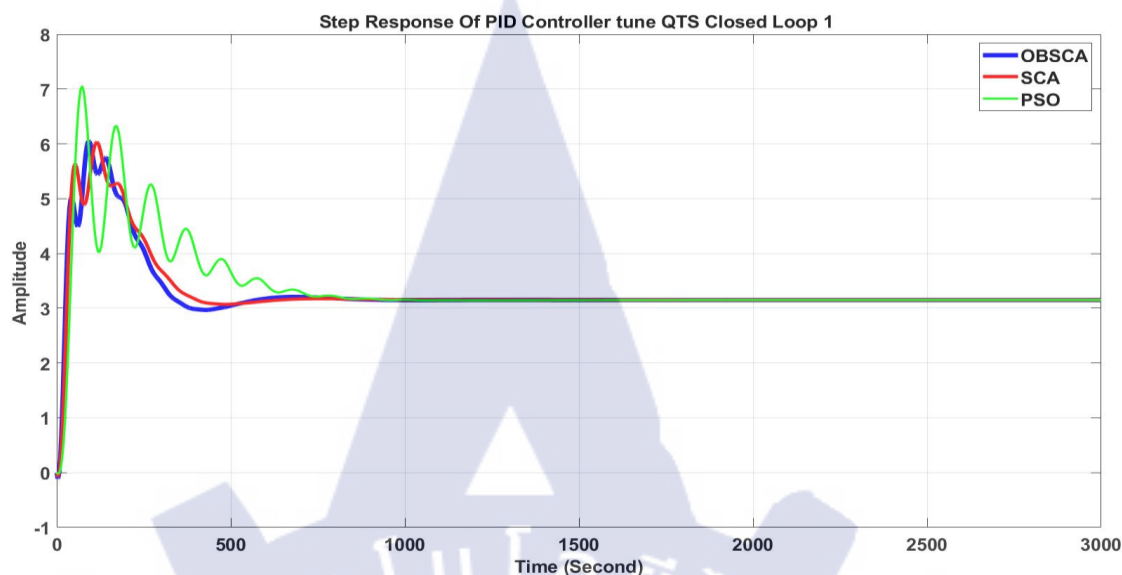
Comparing *ITAE* Non-Minimum phase tuning by OBSCA, SCA and PSO



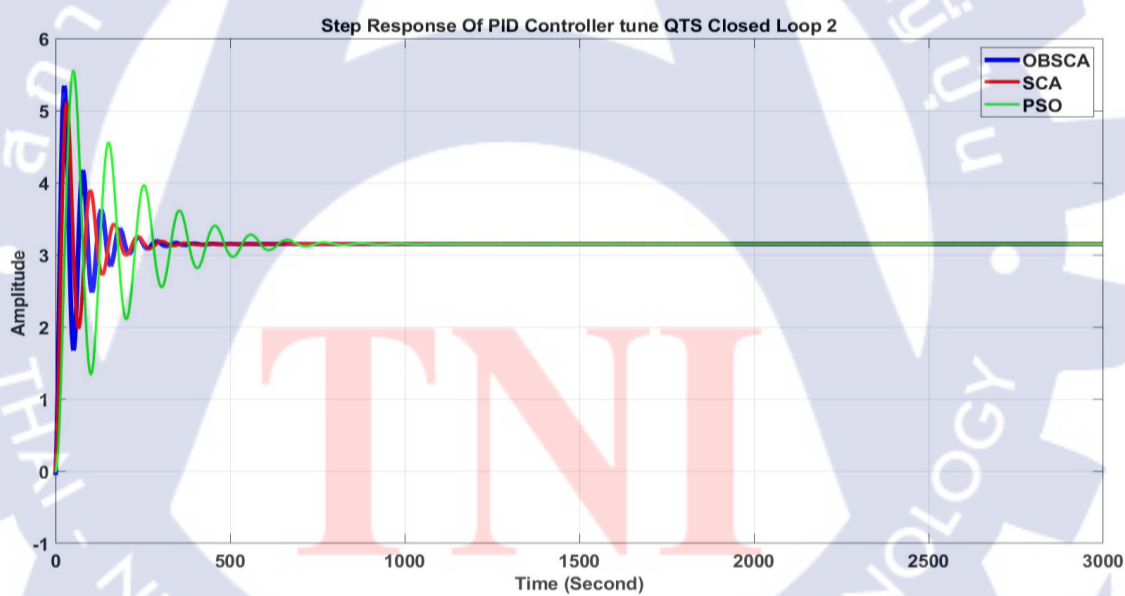
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงผลค่า ITAE ของผลตอบสนองของระบบ สภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี กรณีระบบไม่ถูกรบกวน

จากรูปกราฟที่ 4.23 พบว่า ระดับค่าเฉลี่ย และค่าสูงสุด *ITAE* จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคโซน (OBSCA) จะมีค่าที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคโซน (SCA) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) ส่วนค่าต่ำสุด *ITAE* จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคโซน (OBSCA) จะมีค่าที่มากกว่าเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคโซน (SCA) แต่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO)

สำหรับการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบสัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO จะได้จากค่า *ITAE* น้อยสุดของแต่ละวิธี ผลตอบสนองที่ได้จะเป็นไปตามกราฟที่ 4.24 และ 4.25 กับตารางที่ 4.3 ดังนี้



รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 1 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO



รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO

ตารางที่ 4.3 ค่าตัวบ่งชี้ผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะเป็นแบบ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2

ตัวบ่งชี้	สัญญาณป้อนออก 1			สัญญาณป้อนออก 2		
	OBSCA	SCA	PSO	OBSCA	SCA	PSO
เวลาไต่ขึ้น (Rise time ; s.)	13.3585	15.8003	20.165	8.9649	11.9608	17.5010
ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot ; %)	92.213	91.593	123.886	69.699	62.312	76.325
เวลาเข้าสู่สมดุล (settling time ; s.)	524.308	524.936	789.337	265.859	246.488	623.205
ค่าความผิดพลาดที่ สภาวะคงตัว (Steady state error)	2.94E-08	1.59E-08	1.73E-06	2.24E-06	6.95E-07	1.30E-08

จากรูปผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะเป็นแบบ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ตามรูปที่ 4.24 และ 4.25 เมื่อนำมาเขียนค่าในตารางที่ 4.3 จะพบว่า

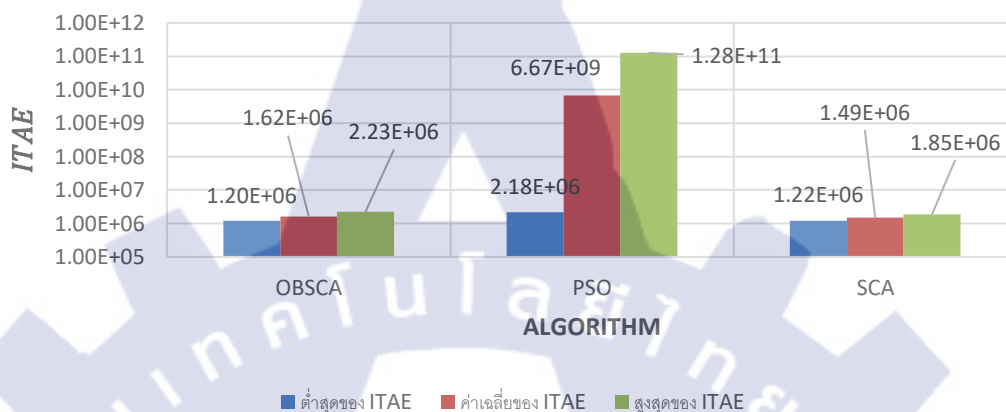
- สัญญาณป้อนออก 1: เวลาไต่ขึ้น และเวลาเข้าสู่สมดุล ของผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริด (OBSCA) มีค่าที่น้อยกว่าวิธีอัลกอริทึมไฮบริด (SCA) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) ยกเว้นค่าพุ่งเกินสูงสุด และค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริด (OBSCA) จะให้ค่าที่มากกว่า

- สัญญาณป้อนออก 2: เวลาไต่ขึ้น ของผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริด (OBSCA) มีค่าที่น้อยกว่าวิธีอัลกอริทึมไฮบริด (SCA) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) แต่ค่าพุ่งเกินสูงสุด, เวลาเข้าสู่สมดุล และค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริด (OBSCA) จะให้ค่าที่มากกว่าเมื่อเทียบกับวิธีอัลกอริทึมไฮบริด (SCA) แต่อย่างน้อยก็วิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO)

จากผลตอบสนองนี้ทำให้สามารถสรุปโดยรวมได้ว่า ระบบถึง 4 ถึง สภาวะเป็นแบบ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน การใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮบริด (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีเอช จะให้ผลตอบสนองโดยรวมที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้วิธีอัลกอริทึมไฮบริด (SCA) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO)

4.3.4 การวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ด้วยวิธี OBSCA, SCA และ PSO

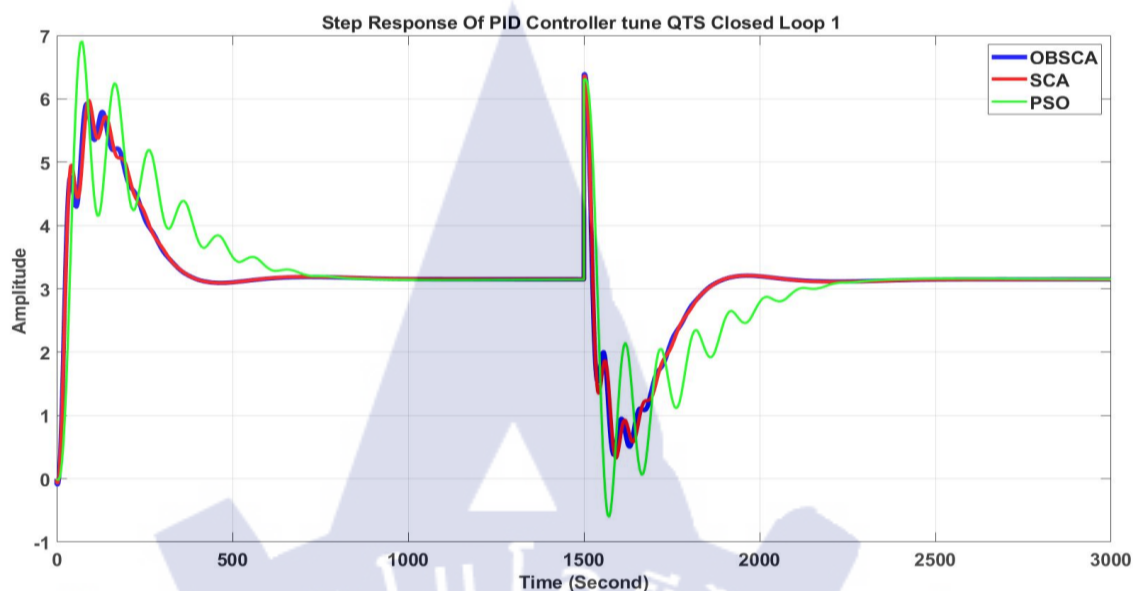
Comparing *ITAE* Non-Minimum phase with disturbance tuning by OBSCA, SCA and PSO



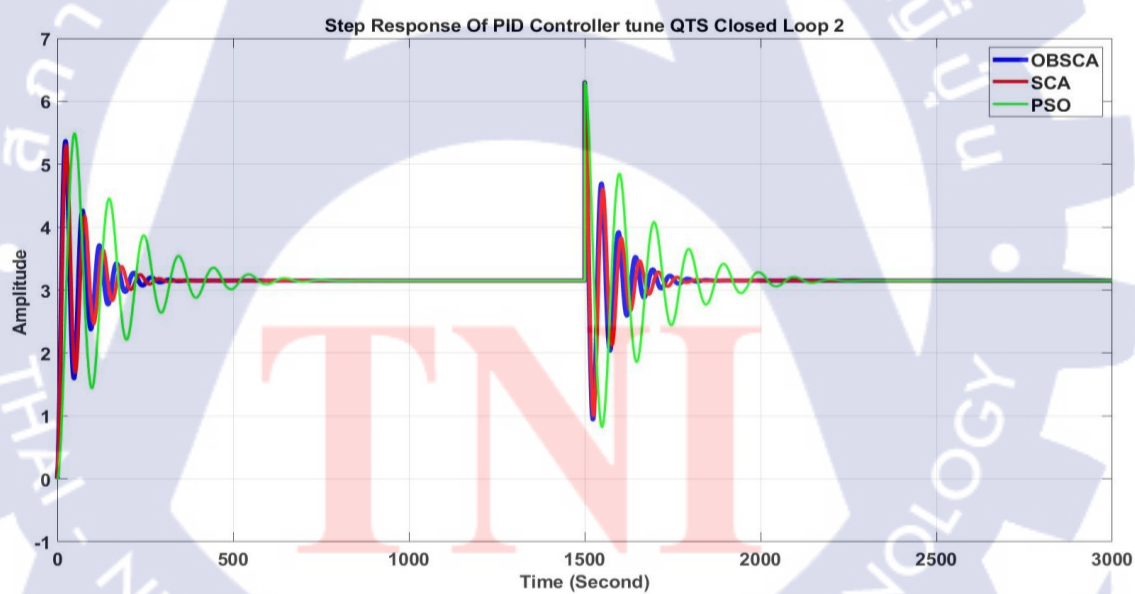
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงผลค่า ITAE ของผลตอบสนองของระบบ สภาวะ non-minimum phase เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี กรณีระบบถูกรบกวน

จากรูปกราฟที่ 4.26 พบว่า ระดับค่าเฉลี่ย และค่าสูงสุด *ITAE* จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮโคไฮโค (OBSCA) จะมีค่าที่มากกว่าเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีอัลกอริทึมไฮโคไฮโค (SCA) แต่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) ส่วนค่าต่ำสุด *ITAE* จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮโคไฮโค (OBSCA) จะมีค่าน้อยที่สุด

สำหรับการเปรียบเทียบผลตอบสนองของระบบสัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO จะได้จากค่า *ITAE* น้อยสุดของแต่ละวิธี ผลตอบสนองที่ได้จะเป็นไปตามกราฟที่ 4.27 และ 4.28 กับตารางที่ 4.3 ดังนี้



รูปที่ 4.27 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 1 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO



รูปที่ 4.28 ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 2 ของระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน เมื่อใช้วิธี OBSCA, SCA และ PSO

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวบ่งชี้ผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะเป็นแบบ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2

ตัวบ่งชี้	สัญญาณป้อนออก 1			สัญญาณป้อนออก 2		
	OBSCA	SCA	PSO	OBSCA	SCA	PSO
เวลาไต่ขึ้น (Rise time ; s.)	13.1160	13.8774	19.9452	8.6506	9.4017	17.1214
ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Overshoot ; %)	102.869	101.953	119.225	100.000	100.000	100.084
เวลาเข้าสู่สมดุล (settling time ; s.)	1872.98	1873.77	2208.32	1747.08	1742.91	2058.16
ค่าความผิดพลาดที่ สภาวะคงตัว (Steady state error)	0.00045	0.00055	0.00246	8.11E-07	1.20E-06	1.65E-05

จากรูปผลตอบสนองของระบบถึง 4 ถึง สภาวะเป็นแบบ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน ที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ตามรูปที่ 4.27 และ 4.28 เมื่อนำมาเขียนค่าในตารางที่ 4.4 จะพบว่า

- **สัญญาณป้อนออก 1:** เวลาไต่ขึ้น, เวลาเข้าสู่สมดุล และค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัวของผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) มีค่าน้อยกว่าวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (SCA) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) ยกเว้นค่าพุ่งเกินสูงสุดที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) มีค่าที่มากกว่าวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (SCA)
- **สัญญาณป้อนออก 2:** เวลาไต่ขึ้น และค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว ที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) มีค่าที่น้อยกว่าวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (SCA) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) ยกเว้นเวลาเข้าสู่สมดุลที่ได้จากวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) จะให้ค่าที่มากกว่าเมื่อเทียบกับวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (SCA)

จากผลตอบสนองนี้ทำให้สามารถสรุปโดยรวมได้ว่า ระบบถึง 4 ถึง สภาวะเป็นแบบ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน การใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) ในการปรับตัวควบคุมพีไอดี จะให้ผลตอบสนองที่สัญญาณป้อนออก 1 และ 2 ดีกว่าเมื่อเทียบกับการใช้วิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (SCA) และวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์

5.1 สรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์หาขอบเขตของตัวควบคุมพีไอดี

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองขอบเขตของตัวควบคุมพีไอดี ทำให้สรุปได้ว่าขอบเขตของตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ minimum phase ในกรณีระบบไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวน ยังมีขอบเขตที่ห่างกันมาก จะส่งผลให้เมื่อปรับตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไฮน ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ที่ได้จะมีค่าลดลง

ส่วนขอบเขตของตัวควบคุมพีไอดีของระบบถึง 4 ถึง แบบสภาวะ non-minimum phase ในกรณีระบบไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวน ขอบเขตต้องมีความห่างระหว่าง -1 ถึง 1 หรือขอบเขตที่ห่างกันมากกว่า 500 ขึ้นไป จึงจะส่งผลให้เมื่อปรับตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไฮนแล้ว ทำให้ค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ลดลง

5.2 สรุปผลการทดลองและการวิเคราะห์หาปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไฮนในการปรับตัวควบคุมพีไอดี

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองหาปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไฮน ในการปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase และ non-minimum phase ของกรณีระบบไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวนนั้น สรุปได้ว่า

5.2.1 ระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน

ปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไฮน เมื่อพิจารณาโดยแยกปัจจัยแล้ว ปัจจัยจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) จะแปรผกผันกับค่าเฉลี่ยดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ยกเว้นจำนวนประชากรที่ 50 จะแปรผันตามค่าเฉลี่ยดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ส่วนการพิจารณาการร่วมปัจจัยของปัจจัยจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) โดยรวมจะแปรผกผันกับค่าเฉลี่ยดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ซึ่งการร่วมปัจจัยที่ให้ผลลัพธ์เฉลี่ยที่ดีที่สุดคือ ปัจจัยจำนวนประชากร (N) ที่ 40 และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) ที่ 50

5.2.2 ระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน

ปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮนโคไฮน เมื่อพิจารณาโดยแยกปัจจัยแล้ว ปัจจัยจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) จะแปรผกผันกับ ค่าเฉลี่ยดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ยกเว้นจำนวนรอบค้นหาที่ 50 จะแปรผัน

ตามค่าเฉลี่ยดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ส่วนการพิจารณาการร่วมปัจจัยของปัจจัยจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) โดยรวมจะแปรผกผันกับ ค่าเฉลี่ยดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ซึ่งการร่วมปัจจัยที่ให้ผลลัพธ์เฉลี่ยดีที่สุดคือ ปัจจัยจำนวนประชากร (N) ที่ 50 และจำนวนรอบค้นหา(*Max Iteration*) ที่ 40

5.2.3 ระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน

ปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ เมื่อพิจารณาโดยแยกปัจจัยแล้ว ปัจจัยจำนวนประชากร(N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) จะแปรผกผันกับ ค่าเฉลี่ยดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ส่วนการพิจารณาการร่วมปัจจัยของปัจจัยจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) โดยรวมจะแปรผกผันกับ ค่าเฉลี่ยดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ซึ่งการร่วมปัจจัยที่ให้ผลลัพธ์เฉลี่ยดีที่สุดคือ ปัจจัยจำนวนประชากร (N) ที่ 50 และจำนวนรอบค้นหา(*Max Iteration*) ที่ 30

5.2.4 ระบบถึง 4 ถึง สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน

ปัจจัยที่เหมาะสมของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ เมื่อพิจารณาโดยแยกปัจจัยแล้ว ปัจจัยจำนวนประชากร(N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) จะแปรผกผันกับ ค่าเฉลี่ยดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ส่วนการพิจารณาการร่วมปัจจัยของปัจจัยจำนวนประชากร (N) และจำนวนรอบค้นหา (*Max Iteration*) โดยรวมจะแปรผกผันกับ ค่าเฉลี่ยดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ซึ่งการร่วมปัจจัยที่ให้ผลลัพธ์เฉลี่ยดีที่สุดคือ ปัจจัยจำนวนประชากร (N) ที่ 20 และจำนวนรอบค้นหา(*Max Iteration*) ที่ 30

5.3 สรุปผลการทดลองและวิเคราะห์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์กับวิธีการอื่นต่อการปรับตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบถึง 4 ถึง

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์(OBSCA) กับวิธีการอื่นต่อการปรับตัวควบคุมพีไอดีระบบถึง 4 ถึง สภาวะ minimum phase และ non-minimum phase ของกรณีระบบไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวน นั้น สรุปได้ว่า

ประสิทธิภาพค่าดัชนีสมรรถนะแบบปริพันธ์ *ITAE* ของวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) ต่อการปรับตัวควบคุมพีไอดีระบบถึง 4 ถึง โดยรวม จะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (SCA) เมื่ออยู่ในระบบเป็นสภาวะ minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน และสภาวะ non-

minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน เท่านั้น ส่วน สภาวะ minimum phase และ สภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน การใช้วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) จะมีประสิทธิภาพค่าดัชนีเป็นรองของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (SCA)

จากผลการตอบสนองที่ได้ วิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) จะให้ผลตอบสนองที่ดีกว่าวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) และวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (SCA) เมื่อระบบเป็นสภาวะ non-minimum phase กรณีระบบไม่ถูกรบกวน และสภาวะ non-minimum phase กรณีระบบถูกรบกวน เท่านั้น ส่วนสภาวะ minimum phase ของกรณีระบบไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวน ผลตอบสนองของวิธีนี้จะดีกว่าผลตอบสนองที่ได้จากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมของกลุ่มอนุภาค (PSO) แต่ดีกว่าวิธีอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (SCA)

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1. การวิจัยครั้งถัดไปควรจะนำการทดลองนี้ไปใช้ทดสอบในกรณีการเปลี่ยนสภาวะ กระทั่งหันจากสภาวะแบบ minimum phase เป็น non- minimum phase หรือจากสภาวะแบบ non-minimum phase เป็น minimum phase

5.4.2. การวิจัยครั้งถัดไปควรจะนำการทดลองนี้ไปใช้ทดสอบกับระบบ 4 ถังของจริงเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากระบบจริง กับระบบจำลอง

5.4.3. การวิจัยครั้งถัดไปควรจะนำวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) มาทดลองปรับตัวควบคุมพีไอดีกับระบบ 4 ถังที่มีการประยุกต์โดยใช้ตัวควบคุมแบบ Decoupling และทดสอบในกรณีการเปลี่ยนสภาวะกระทั่งหันเหมือนข้อ 5.4.1

5.4.4 การวิจัยครั้งถัดไปควรจะนำวิธีการเรียนรู้สิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนโคไซน์ (OBSCA) มาทดสอบมาทดลองปรับตัวควบคุมแบบอื่นที่ไม่ใช่ตัวควบคุมพีไอดี กับระบบ 4 ถัง

บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

- [1] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Transactions of the ASME*, vol. 64, no. 8, pp. 759-765, November 1942.
- [2] คณาวุฒิ โพธิยา และ วรวัฒน์ เสี่ยงมิบูล, "การปรับค่าตัวควบคุมพีไอดีสำหรับระบบรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติด้วยวิธีหามากรุก," *The 14th Mahasarakham University Research Conference*, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, มหาสารคาม, 26 เมษายน 2561, หน้า 154-163.
- [3] J. Agarwal et al., "Application of sine cosine algorithm in optimal control of DC motor and robustness analysis," *Wulfenia Journal*, vol. 24, no. 11, pp. 77-95, November 2017.
- [4] S. Mahdavi et al., "Opposition based learning: A literature review," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 39, no. 1, pp. 1-23, April 2018.
- [5] M. A. Elaziz et al., "An improved opposition-based sine cosine algorithm for global optimization," *Expert Systems with Applications*, vol. 90, no. 1, pp. 484-500, August 2017.
- [6] Y. Xiaobing et al., "Opposition-based learning grey wolf optimizer for global optimization," *Knowledge-Based Systems*, vol. 226, no. 1, pp. 1-11, May 2021.
- [7] S. Ekinici et al., "Opposition based henry gas solubility optimization as a novel algorithm for PID control of DC motor," *Engineering Science and Technology, An International Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 331-342, September 2020.
- [8] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- [9] S. T. Dharan et al., "Tuning of PID controller using optimization techniques for a MIMO process," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 263, no. 5, pp. 1-17, May 2019.
- [10] K. H. Johansson, "The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 456-465, May 2000.
- [11] มัชวัก มากบุญชูร และ กันติชา กิตติพิรชล, "การปรับตัวควบคุมพีไอดีของระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีการเรียนรู้จากสิ่งตรงข้ามร่วมกับอัลกอริทึมไฮไนน์-โคไซน์," *The 8th Thai-Nichi Institute of Technology Academic Conference (TNIAC2022)*, สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น, กรุงเทพฯ, 19-20 พฤษภาคม 2565, pp. 244-249.

- [12] M. J. Mohamed and A. Khashan, "Comparison between PID and FOPID controllers based on particle swarm optimization," *The Second Engineering Conference of Control, Computers and Mechatronics Engineering (ECCCM2, 2014)*, University of Technology Baghdad, Iraq, February 25-27, 2014, pp. 1-9.
- [13] S. Mirjalili, "SCA: A sine cosine Algorithm for solving optimization problems," *Knowledge-Based Systems*, vol. 96, no. 1, pp. 120-466, March 2016.
- [14] T. Chiranjeevi et al., "Control of electric machines using flower pollination algorithm based fractional order PID controller," *Global Transitions Proceedings*, vol. 2, no. 1, pp. 227-232, August 2021.
- [15] M. Al-Dhaifallah et al., "Fuzzy fractional-order PID controller for fractional model of pneumatic pressure system," *Mathematical Problems in Engineering 2018*, vol. 2, no. 1, pp. 1-9, January 2018.
- [16] A. Demirören et al., "Opposition-based artificial electric field algorithm and its application to FOPID controller design for unstable magnetic ball suspension system," *Engineering Science and Technology, An International Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 469-479, August 2020.
- [17] J. Ramyashree et al., "Firefly algorithm based multivariable PID controller design for MIMO process," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 37, no. 2.31, pp. 41-44, May 2019.
- [18] M. Pires et al., "A methodology for tuning and optimization of a quadruple tank control system using firefly algorithm in wavelet space," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 99, no. 5, pp. 83-89, May 2023.
- [19] R. S. Mohankumar et al., "Heuristic algorithms based optimal tuning of FOLQI controller for quadruple tank process under disturbance conditions," *Measurement and Control*, vol. 57, no. 2, pp. 1-23, September 2023.
- [20] N. A. Al-Awad, "Optimal control of quadruple tank system using genetic algorithm," *International Journal of Computing and Digital Systems*, vol. 8, no.1, pp. 51-59, January 2019.