

การออกแบบระบบควบคุมระดับน้ำสามถังโดยใช้
ระบบอนุมานฟัซซีแบบปรับตัวได้

The Design of Three Tank Water Level Control System using
Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Design of Three Tank Water Level Control System using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System



Parkpoom Akkharapunpairoj

Siriwan Suttiso

Supawish Tunsakul

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FUFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUE OF TECHNOLOGY LARKABANG
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2565
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

.....

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การออกแบบระบบควบคุมระดับน้ำสามถังโดยใช้ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้
The Design of Three Tank Water Level Control System using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System

นักศึกษาผู้จัดทำ นายภาคภูมิ อัครพันธ์ไพโรจน์ รหัสนักศึกษา 62010695
นางสาวศิริวรรณ สุทธิโส รหัสนักศึกษา 62010874
นายศุภวิชญ์ ต้นสกุล รหัสนักศึกษา 62010897

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2565

| อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ | ลายมือชื่อ |
|-------------------------------|------------|
| รศ.ดร.อาจินต์ น่วมสำราญ | |

| | | | |
|--------------------|---|------------------|-----------------------|
| หัวข้อปริญญานิพนธ์ | การออกแบบระบบควบคุมระดับน้ำสามถังโดยใช้ ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ | | |
| | The Design of Three Tank Water Level Control System using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference system | | |
| นักศึกษาผู้จัดทำ | นายภาคภูมิ | อัครพันธ์ไพโรจน์ | รหัสนักศึกษา 62010695 |
| | นางสาวศิริวรรณ | สุทธิโส | รหัสนักศึกษา 62010874 |
| | นายศุภวิชญ์ | ต้นสกุล | รหัสนักศึกษา 62010897 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ.ดร.อาจันต์ น่วมสำราญ | | |
| ปีการศึกษา | 2565 | | |

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันกระบวนการของระบบอุตสาหกรรมทั่วโลกต่างเป็นกระบวนการที่มีระบบควบคุมอัตโนมัติเข้ามามีส่วนในกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งที่ปัจจัยในการควบคุมที่สำคัญก็คือค่าพารามิเตอร์เอาร์พุตของระบบ เช่น Tank level, Steam pressure, Temperature ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบตัวควบคุม 3 ถัง ถือเป็นกระบวนการแบบ non – interacting ซึ่งทำการออกแบบได้ยากเพราะเนื่องจากมีความเกี่ยวข้องกับการแปรผันของพารามิเตอร์ ที่ไม่ใช่เชิงเส้น เทคนิคที่ใช้ควบคุมกันทั่วไปในการควบคุมกระบวนการ เช่น Feedback, Feedforward, control of ratio ตัวควบคุมแบบ Adaptive Neuro-Fuzzy (ANFIS) เป็นการควบคุมโดยใช้หลักการการปรับตัวได้เองโดยใช้ logic และ neural network เข้ามาช่วยทำให้สามารถรักษาระดับภายในถังทั้ง 3 ถังให้เท่ากับค่าที่ตั้งไว้ บทความนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมแบบ ANFIS เทียบกับตัวควบคุมแบบอื่นเพื่อเปรียบเทียบว่าตัวควบคุมแบบ ANFIS นั้นมีประสิทธิภาพในการควบคุมระดับน้ำ 3 ถังได้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าตัวควบคุมแบบอื่น

| | | |
|-----------------------|---|------------------|
| Thesis Title | The Design of Three Tank Water Level Control System using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System | |
| Authors | Mr. Parkpoom | Akkharapunpairoj |
| | Miss Siriwan | Suttiso |
| | Mr. Supawish | Tunsakul |
| Thesis Advisor | Assoc.Prof.Dr.Arjin Numsomran | |
| Year | 2022 | |

ABSTRACT

Nowadays, industrial processes around the world are processes where automation is involved in the production process in industrial factories. The important controlling factor is value. Output parameters of the system such as tank level, steam pressure, temperature etc. In this research, the design of a three-tank controller is a non-interacting process, which is difficult to design because it involves variations in the Parameters non-linear Control techniques commonly used in process control, such as Feedback, Feedforward, control of ratio, etc. Adaptive Neuro-Fuzzy (ANFIS) controllers are self-adaptive controls that use logic and neural networks. Makes it possible to keep the level inside all 3 tanks equal to the set value. This article deals with the design of an ANFIS controller compared to other controllers to compare whether the ANFIS controller is effective in controlling the water level of 3 tanks with better performance than the other controllers.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การออกแบบระบบควบคุมระดับน้ำสามถังโดยใช้ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (The Design of Three Tank Water Level Control System using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากบุคคลหลายฝ่าย ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อาจินต์ น่วมสำราญ ที่คอยให้คำปรึกษาชี้แนะ ให้ข้อคิดในการแก้ปัญหาต่างๆ รวมถึงช่วยตรวจทานแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาที่ดีเสมอมา

และสุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ที่ดีให้ข้าพเจ้า และมอบความรัก กำลังใจ และการสนับสนุนในด้านต่างๆเป็นอย่างดีเสมอมา ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

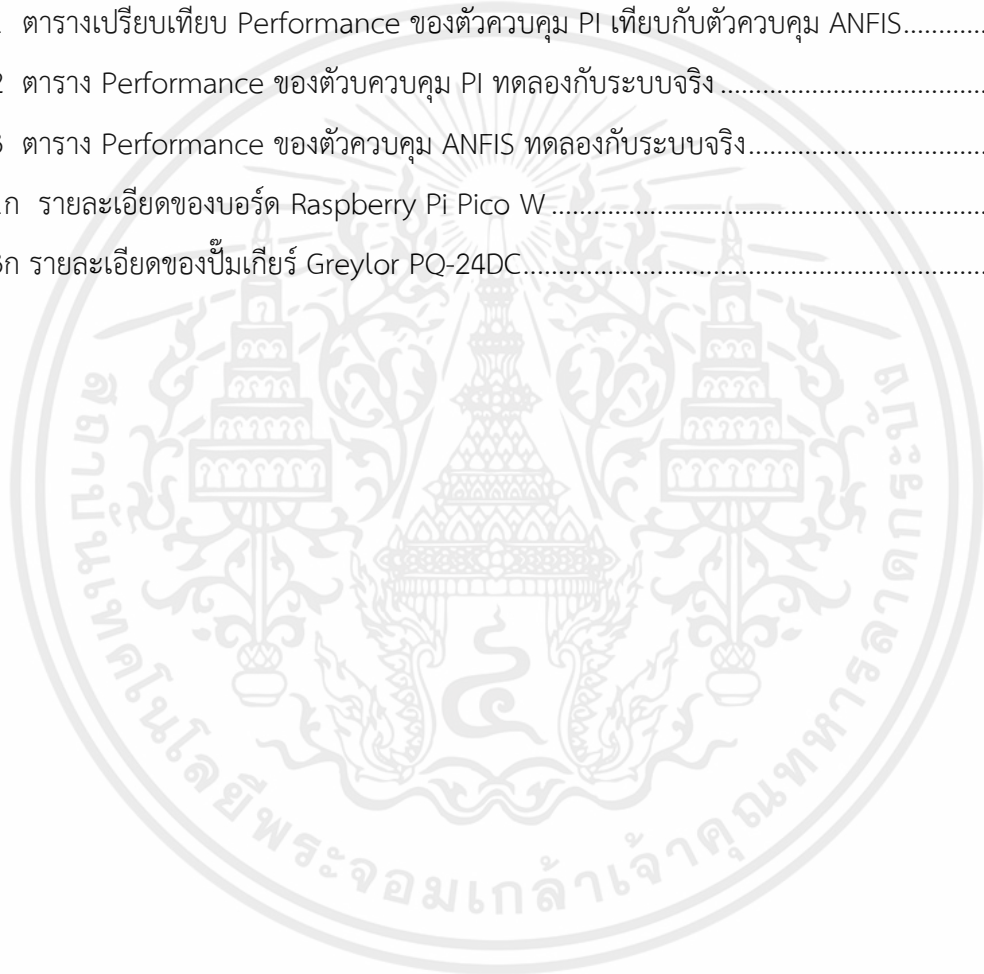
| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อ | I |
| ABSTRACT | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | VII |
| สารบัญรูป | VIII |
| สารบัญรูป (ต่อ) | IX |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความสำคัญของปริญญาโท | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท | 1 |
| 1.3 ขอบเขตของปริญญาโท | 2 |
| 1.4 ขั้นตอนการศึกษา | 2 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 2 |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี | 3 |
| 2.1 ฟัชซีเซต (Fuzzy Set) | 3 |
| 2.2 ฟัชซีลอจิก (Fuzzy logic) | 4 |
| 2.2.1 ฟัชซีฟิเคชันและฟังก์ชันสมาชิก (Fuzzification and membership function) | 5 |
| 2.2.2 กฎการควบคุมฟัชซี (Fuzzy control rules) | 5 |
| 2.2.3 Defuzzification | 6 |
| 2.2.4 ระบบการอนุมานแบบฟัชซี (Fuzzy inference system) | 6 |
| 2.3 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks) | 7 |

| | | |
|----------------|--|-----------|
| 2.4 | ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro - Fuzzy Inference system)..... | 8 |
| 2.5 | ระบบควบคุมพีไอดี | 11 |
| 2.5.1 | The Ziegler–Nichols Method | 15 |
| 2.5.2 | Self-Oscillation Method..... | 16 |
| 2.6 | MATLAB..... | 16 |
| 2.6.1 | กำหนดลักษณะการทำงานของแอฟ | 16 |
| 2.6.2 | MATLAB/SIMULINK..... | 17 |
| 2.7 | ระบบจำลองระดับถังน้ำ 3 ถังแบบไม่มีปฏิสัมพันธ์..... | 18 |
| บทที่ 3 | วิธีการดำเนินงาน | 22 |
| 3.1 | ศึกษา ออกแบบ และวางแผนองค์ประกอบและวิธีดำเนินการ..... | 22 |
| 3.2 | เงื่อนไขกระบวนการ | 24 |
| 3.2.1 | กระบวนการ..... | 25 |
| 3.2.2 | เซนเซอร์..... | 26 |
| 3.2.3 | ตัวควบคุม..... | 26 |
| 3.2.4 | ตัวขับ | 26 |
| 3.3 | ระบุเอกลักษณ์โมเดลจำลองทางคณิตศาสตร์ | 26 |
| 3.3.1 | การเก็บข้อมูล | 26 |
| 3.3.2 | วิธีการสร้างแบบจำลอง | 28 |
| 3.4.1 | PID Tuning | 35 |
| 3.4.2 | ANFIS | 37 |
| 3.5 | การจำลองตัวควบคุมกับกระบวนการจริง | 42 |
| 3.5.1 | การจำลองตัวควบคุม PID กับกระบวนการจริง..... | 42 |
| 3.5.2 | การจำลองตัวควบคุม ANFIS กับกระบวนการจริง | 43 |

| | |
|--|-----------|
| บทที่ 4 การนำเสนอผลของข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล..... | 44 |
| 4.1 ผลการทดลองระบบควบคุมระดับน้ำด้วยการควบคุมแบบ PID และ ANFIS | 44 |
| 4.2 ผลการทดลองระบบควบคุมระดับน้ำด้วยการควบคุมแบบ PID และ ANFIS ในระบบจริง | 46 |
| 4.2.1 ผลการทดลองการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม PI..... | 46 |
| 4.2.2 ผลการทดลองการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม ANFIS..... | 48 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ | 50 |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง..... | 50 |
| 5.2 ปัญหาและอุปสรรค | 50 |
| บรรณานุกรม..... | 51 |
| ภาคผนวก..... | 53 |
| 1.1ก Raspberry Pi Pico W..... | 53 |
| 1.2ก Maker Pi Pico Base (without Pico) : Simplifying Pi Pico for Beginners | 58 |
| 1.3ก ปุ่มเกียร์ Greylor PQ-24DC..... | 60 |
| 1.4ก สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแหล่งจ่ายไฟ 24V 5A (Switching Power Supply) | 63 |
| 1.5ก เซ็นเซอร์วัดระยะทาง Ultrasonic Module HC-SC04 | 64 |
| 1.6ก MD13S 13Amp DC Motor Driver | 65 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 Tuning Mode..... | 16 |
| 2.2 Self-Oscillation Tuning Mode | 16 |
| 3.1 Self-Oscillation Tuning Mode | 35 |
| 4.1 ตารางเปรียบเทียบ Performance ของตัวควบคุม PI เทียบกับตัวควบคุม ANFIS..... | 46 |
| 4.2 ตาราง Performance ของตัวควบคุม PI ทดลองกับระบบจริง | 47 |
| 4.3 ตาราง Performance ของตัวควบคุม ANFIS ทดลองกับระบบจริง..... | 49 |
| 1.1ก รายละเอียดของบอร์ด Raspberry Pi Pico W..... | 57 |
| 1.1ก รายละเอียดของปั๊มเกียร์ Greylor PQ-24DC..... | 60 |



สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 แบบแผนของระบบการอนุมานแบบคลุมเครือ..... | 7 |
| 2.2 โครงสร้างของระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้..... | 9 |
| 2.3 กราฟแสดงสัญญาณ PV ต่อเวลา, K_p กำหนดเท่ากับ 3 โดยค่า K_i และ K_d คงที่..... | 12 |
| 2.4 กราฟแสดงสัญญาณ PV ต่อเวลา, K_i กำหนดเท่ากับ 3 โดยค่า K_p และ K_d คงที่..... | 13 |
| 2.5 กราฟแสดงสัญญาณ PV ต่อเวลา, K_d กำหนดเท่ากับ 3 โดยค่า K_p และ K_i คงที่..... | 14 |
| 2.6 Plant step response to get A and L..... | 15 |
| 2.7 ตัวอย่างฟังก์ชันบางส่วนของ MATLAB..... | 17 |
| 2.8 MATLAB/SIMULINK..... | 18 |
| 2.9 Three tank non-interacting process..... | 19 |
| 3.1 แผนภาพการออกแบบการควบคุมระดับน้ำ..... | 22 |
| 3.2 Process Flow Chart..... | 23 |
| 3.3 Block Diagram Process Conditions..... | 24 |
| 3.4 แบบจำลอง 3 ถัง..... | 25 |
| 3.5 Block Diagram สำหรับการเก็บค่า..... | 27 |
| 3.6 คำสั่งสำหรับการเก็บค่า..... | 27 |
| 3.7 ตัวอย่างข้อมูลจาก Block Diagram..... | 28 |
| 3.8 ขั้นตอนการเปิดฟังก์ชัน System Identification..... | 29 |
| 3.9 เลือกประเภทข้อมูลขาเข้าที่ใช้..... | 30 |
| 3.10 ป้อนค่าที่ใช้ในการปรับค่า..... | 31 |
| 3.11 เลือกประเภทของข้อมูลที่จะได้รับ..... | 32 |
| 3.12 ตั้งค่าข้อมูลที่จะได้รับแบบละเอียด..... | 32 |
| 3.13 กราฟผลการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกราฟของสัญญาณควบคุม..... | 33 |
| 3.14 ผลการจำลองและกราฟเปรียบเทียบความเหมือนของการจำลอง..... | 34 |
| 3.15 โมเดลจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบน้ำ 3 ถัง..... | 34 |
| 3.16 Block Diagram Simulation..... | 35 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.17 กราฟแสดงผลตอบสนองของขณะกระบวนการ Oscillation..... | 36 |
| 3.18 กราฟแสดงผลตอบสนองของระบบปิดของตัวควบคุม PI ด้วยวิธี Self-Oscillation..... | 36 |
| 3.19 กราฟการเก็บข้อมูล Error, Derivative of error, Control signal..... | 37 |
| 3.20 Block Diagram การควบคุมและเก็บค่าของการจำลองการควบคุมแบบปิดของ ANFIS..... | 37 |
| 3.21 กราฟแสดงสัญญาณตัวควบคุม..... | 38 |
| 3.22 การแสดงโค้ดและไฟล์พีชชีบนหน้าต่าง Workspace | 38 |
| 3.23 Training and checking curves of data..... | 39 |
| 3.24 ANFIS Tri model | 40 |
| 3.25 App Neuro-Fuzzy Designer | 40 |
| 3.26 ANFIS rules structure | 41 |
| 3.27 กราฟแสดงผลของระบบควบคุม ANFIS บน MATLAB/SIMULINK..... | 41 |
| 3.28 กราฟแสดงสัญญาณควบคุมของ ANFIS ในการจำลองบน MATLAB/SIMULINK..... | 42 |
| 3.29 แบบจำลองระบบปิดของฮาร์ดแวร์แบบวนซ้ำของตัวควบคุม PI..... | 42 |
| 3.30 แบบจำลองระบบปิดของฮาร์ดแวร์แบบวนซ้ำของตัวควบคุม ANFIS | 43 |
| 4.1 Block Diagram Simulation | 44 |
| 4.2 กราฟแสดงผลการควบคุม PID เปรียบเทียบกับ ANFIS | 45 |
| 4.3 กราฟแสดงผลของสัญญาณควบคุม PID เปรียบเทียบกับ ANFIS | 45 |
| 4.4 แบบจำลองระบบปิดของระบบควบคุมแบบ PI บนแบบจำลองจริง | 46 |
| 4.5 กราฟแสดงผลของระบบควบคุมของตัวควบคุม PI บนแบบจำลองจริง..... | 47 |
| 4.6 กราฟแสดงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PI บนแบบจำลองจริง | 47 |
| 4.7 แบบจำลองระบบปิดของระบบควบคุมแบบ ANFIS บนแบบจำลองจริง | 48 |
| 4.8 กราฟแสดงผลของระบบควบคุม ANFIS บนแบบจำลองจริง..... | 48 |
| 4.9 กราฟแสดงสัญญาณควบคุมของ ANFIS บนแบบจำลองจริง..... | 49 |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปริญญาานิพนธ์

โครงการนี้ได้ศึกษาและออกแบบระบบควบคุมระดับน้ำ โดยชุดจำลองที่ถูกสร้างขึ้นเป็นแบบสามถึง เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในปรับตัวที่ดีของตัวควบคุม ซึ่งตัวควบคุมที่นิยมถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสำหรับการปรับกระบวนการ อย่างเช่น ตัวควบคุม PID แบบดั้งเดิม ที่ผ่านมามีการนำเสนอวิธีการปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมนี้ในวิธีต่าง ๆ เช่น Ziegler Nichols Method, Chine-Hrones-Reswick, Tuning, Cohen-Coon Tuning Algorithm และ Mang-Juang-Chan Method of Tuning เป็นต้น ตัวควบคุมที่ใช้วิธีเหล่านี้เป็นตัวควบคุมที่เป็นแบบคงค่าพารามิเตอร์ซึ่งอาจไม่ครอบคลุมทุกจุดทำงานของกระบวนการนั้น ดังนั้นในโครงการนี้ได้สนใจในการนำความสามารถในการปรับตัวเองของวิธีการออกแบบตัวควบคุมโดยใช้ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (ANFIS) มาใช้ปรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำ อย่างไรก็ตามโครงการนี้ได้ออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (GUI) เพื่อให้ทดลองการควบคุมดำเนินการไปได้อย่างสะดวก และลดข้อผิดพลาด

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์

1. ศึกษาและออกแบบระบบควบคุมระดับน้ำสามถึง
2. ออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมระดับน้ำโดยใช้ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (ANFIS)
3. เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมระหว่างตัวควบคุม PID กับตัวควบคุมที่ออกแบบโดยใช้ระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ (ANFIS)
4. ออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (Graphical User Interface, GUI)
5. ทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมกับกระบวนการจริง

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

1. สร้างชุดจำลองสำหรับออกแบบระบบควบคุมระดับน้ำสามถังออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบควบคุมระดับน้ำโดยใช้ Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
2. สร้างส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (Graphical User Interface, GUI)
3. สร้างชุดรับส่งสัญญาณข้อมูลระหว่างตัวควบคุมกับกระบวนการเช่น ตัวแปรกระบวนการ เอาพุตของตัวควบคุม และการสื่อสารแบบไร้สาย

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

โครงการฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันดังต่อไปนี้

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษา
2. หลักการที่เกี่ยวข้องและทฤษฎี
3. ขั้นตอนการดำเนินการ
4. ผลการทดลอง
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การแก้ปัญหาเชิงวิศวกรรมระบบควบคุมสำหรับระบบควบคุมระดับน้ำ
2. ปรับปรุงสมรรถนะของกระบวนการระบบควบคุมระดับน้ำ
3. สร้างชุดทดลองการเรียนรู้ระบบควบคุมระดับน้ำที่เป็นส่วนหนึ่งสำหรับการศึกษาศาสตร์ทางด้านระบบควบคุม
4. สร้างแอปพลิเคชันสำหรับการทดลองระบบควบคุมเพื่อเติมเต็มประสิทธิภาพในการศึกษาและทดลองควบคุมกระบวนการ

บทที่ 2

หลักการที่เกี่ยวข้องและทฤษฎี

2.1 ฟัซซีเซต (Fuzzy Set)

แนวคิดฟัซซีเซต เป็นแนวคิดของ Zadeh ในปี ค.ศ 1965 โดยนิยามฟัซซีเซต ที่ Zadeh เสนอคือ จากเซตดั้งเดิมด้วยฟังก์ชันเฉพาะ จะมีค่าระดับความเป็นสมาชิกแค่ 0 กับ 1 โดยมีการใส่เงื่อนไขเพิ่มเติมจะมีค่าระดับสมาชิก ได้ทั้ง 0 ถึง 1 ฟัซซีเซตประกอบด้วยองค์ประกอบที่มีระดับสมาชิกต่างกันในเซต ซึ่งตรงข้ามกับเซตคลาสสิกหรือเซตกรอบ เนื่องจากสมาชิกของเซตคลาสสิกไม่สามารถเป็นสมาชิกได้ เว้นแต่สมาชิกของเซตนั้นจะเต็มหรือสมบูรณ์ในเซตนั้น ฟัซซีเซตอนุญาตให้สมาชิกมีระดับความเป็นสมาชิกบางส่วน และสมาชิกภาพบางส่วนนี้สามารถแมเข้ากับฟังก์ชันหรือเอกภพของค่าความเป็นสมาชิกได้ สมมติว่ามีฟัซซีเซต A และถ้าองค์ประกอบ x เป็นสมาชิกของฟัซซีเซต A การแมปนี้สามารถแสดงเป็น [1]:

$$\mu_A(x) \in [0, 1] (A = (x, \mu_A(x) | x \in X) \quad (2.1)$$

เซตย่อยฟัซซี A ที่มีองค์ประกอบ x มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็น $\mu_A(x)$ เมื่อ universe ของ discourse X ไม่ต่อเนื่องและมีขอบเขต การแมปนี้สามารถแสดงเป็น

$$A = \frac{\mu_A(X_1)}{X_1} + \frac{\mu_A(X_2)}{X_2} + \dots = \sum_i \frac{\mu_A(X_i)}{x_i} \quad (2.2)$$

เมื่อ Universe X ต่อเนื่องและไม่มีที่สิ้นสุด เซต A ที่ฟัซซีเซตสามารถเป็นได้

$$A = \int \frac{\mu_A(X)}{X} \quad (2.3)$$

2.2 ฟัชซีลอจิก (Fuzzy logic)

ฟัชซีลอจิกมักถูกนำไปใช้ในชีวิตประจำวัน ตัวอย่างเช่น ในการตอบคำถามแบบสำรวจ ส่วนใหญ่สามารถตอบด้วย 'ค่อนข้างพอใจ' หรือ 'ไม่ค่อยพอใจ' ซึ่งเป็นคำตอบที่กำกวมหรือคลุมเครือ คำตอบที่คลุมเครือเหล่านี้สามารถสร้างและดำเนินการโดยมนุษย์เท่านั้น ไม่ใช่เครื่องจักร เป็นไปไม่ได้แน่นอนที่คอมพิวเตอร์จะตอบคำถามแบบสำรวจโดยตรงเหมือนที่มนุษย์ทำ คอมพิวเตอร์รู้ได้เพียง '0' หรือ '1' และ 'True' หรือ 'False' เท่านั้น ข้อมูลเหล่านั้นถูกกำหนดให้เป็นข้อมูลแบบคมชัดหรือแบบคลาสสิกและสามารถประมวลผลได้ในทุกเครื่อง แนวคิดเรื่องฟัชซีลอจิกถูกคิดค้นโดย L. A. Zadeh ในปี 1965 สิ่งประดิษฐ์นี้ไม่เป็นที่รู้จักจนกระทั่ง E. H. Mamdani นำฟัชซีลอจิกไปประยุกต์ใช้จริงเพื่อควบคุมเครื่องจักรไอน้ำอัตโนมัติในปี 1974 (Mamdani and Assilion, 1974) จากนั้น มีรายงานการใช้งานที่คลุมเครือมากขึ้นเรื่อยๆ ตั้งแต่ทศวรรษ 1980 รวมถึงการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิต การควบคุมอัตโนมัติ การผลิตรถยนต์ ธนาคาร โรงพยาบาล และการศึกษาทางวิชาการ เทคนิค Fuzzy Logic ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในทุกด้านในสังคมปัจจุบัน การนำเทคนิคฟัชซีลอจิกไปประยุกต์ใช้งานจริงต้องมีสามขั้นตอนต่อไปนี้ [2]:

(1) Fuzzification – แปลงข้อมูลคลาสสิกหรือข้อมูลที่คมชัดเป็นข้อมูลเลือนหรือ Membership Functions (MFs)

(2) กระบวนการอนุมานแบบคลุมเครือ – รวมฟังก์ชันการเป็นสมาชิกเข้ากับกฎการควบคุมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์แบบคลุมเครือ

(3) Defuzzification – ใช้วิธีต่างๆ ในการคำนวณแต่ละวิธี เอาต์พุตที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างเช่น ในการควบคุมระบบระดับน้ำ ปริมาตรของน้ำอินพุตและตัวแปรควบคุมเอาต์พุตต้องเปลี่ยนปริมาตรของน้ำเป็นตัวแปรทางภาษาที่เกี่ยวข้อง เช่น ต่ำ, ปานกลาง, สูง และ ช้ำ, ปานกลาง, เร็ว อันแรกเกี่ยวข้องกับอินพุตและอันหลังเกี่ยวข้องกับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่กำลังทำงาน โดยปกติแล้วทั้งอินพุตและเอาต์พุตจะต้องถูกแปลงจากข้อมูลที่คมชัดเป็นข้อมูลฟัชซีในขั้นตอนแรก การทำให้ฟัชซีฟิเคชัน ในขั้นตอนที่สอง กระบวนการอนุมานแบบคลุมเครือ ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกจะรวมกับกฎการควบคุมเพื่อให้ได้ผลลัพธ์การควบคุม กฎควบคุมเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการอนุมานแบบคลุมเครือ และกฎเหล่านั้นเกี่ยวข้องโดยตรงกับสัญชาตญาณและความรู้สึกของมนุษย์ มีการใช้วิธีต่างๆ เช่น ศูนย์กลางแรงโน้มถ่วง (COG) หรือค่าเฉลี่ยสูงสุด (MOM) เพื่อคำนวณเอาต์พุตควบคุมที่เกี่ยวข้อง กระบวนการต่อไปเรียกว่า Defuzzification เอาต์พุตจะถูกแปลงจากตัวแปรทางภาษากลับไปเป็นตัวแปรที่คมชัดเพื่อควบคุมตัวดำเนินการ ในกรณีส่วนใหญ่ ตัวแปรอินพุตมีมากกว่าหนึ่งมิติสำหรับแอปพลิเคชันจริง และจำเป็นต้องทำการ Fuzzification หรือพัฒนา Membership function สำหรับตัวแปรแต่ละมิติโดยอิสระ

ดำเนินการเดียวกันหากระบบมีตัวแปรเอาต์พุตหลายตัว ด้วยการพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีฟัซซี กลยุทธ์การควบคุมฟัซซีที่แตกต่างกันได้รับการพัฒนามาตามวิธีการควบคุมแบบคลาสสิกที่แตกต่างกัน เช่น การควบคุมฟัซซีโหมดเลื่อน การควบคุมฟัซซีของระบบประสาท การควบคุมฟัซซีของอะแดปเตอร์ ปัจจุบัน กลยุทธ์การควบคุมแบบคลุมเครือแบบใหม่หรือเทคนิคการควบคุมแบบรวมแบบ Crisp และแบบคลุมเครือกำลังได้รับการพัฒนาและจะนำไปใช้กับหลายพื้นที่

2.2.1 ฟัซซีฟิเคชันและฟังก์ชันสมาชิก (Fuzzification and membership function)

ขั้นตอนแรกสำหรับการใช้ระบบอนุมานแบบฟัซซีคือฟัซซีฟิเคชัน ตัวแปรที่มีอยู่ในโลกแห่งความจริงส่วนใหญ่เป็นตัวแปรแบบคลาสสิกหรือแบบ Crisp ตัวแปรที่คมชัดเหล่านี้จำเป็นต้องแปลงเป็นตัวแปรฟัซซีสำหรับทั้งอินพุตและเอาต์พุต จากนั้นจึงใช้การอนุมานแบบฟัซซีเพื่อประมวลผลข้อมูลเหล่านั้น เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ สุดท้าย ในกรณีส่วนใหญ่ เอาต์พุตฟัซซีเหล่านี้จำเป็นต้องแปลงกลับเป็นตัวแปรที่คมชัดเพื่อให้ได้เอาต์พุตควบคุมที่ต้องการ ในทางปฏิบัติแล้ว การทำให้เป็นฟัซซีเกี่ยวข้องกับสองกระบวนการ: สร้างฟังก์ชันการเป็นสมาชิกสำหรับตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต และแสดงด้วยตัวแปรทางภาษา กระบวนการนี้คล้ายกับการแมปหรือแปลงชุดคลาสสิกเป็นฟัซซีเซตเพื่อเปลี่ยนองศา โดยทั่วไปการเป็นสมาชิกฟังก์ชันสามารถมีได้หลายประเภท เช่น ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยมคางหมู รูปประฆัง เกาส์เซียน เส้นโค้งรูปตัว S และรูปซิกมอยด์ ประเภทที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับการใช้งานจริง สำหรับระบบที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงไดนามิกอย่างมากในช่วงเวลาสั้นๆ ควรใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมคางหมู สำหรับระบบที่ต้องการความแม่นยำในการควบคุมสูงมาก ควรเลือกฟังก์ชันการเป็นสมาชิก Gaussian หรือ S-curve [2]

2.2.2 กฎการควบคุมฟัซซี (Fuzzy control rules)

กฎการควบคุมแบบฟัซซีหรือแบบคลุมเครือสามารถพิจารณาได้จากความรู้ของผู้เชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้องของแอปพลิเคชัน กฎฟัซซีอธิบายโดยลำดับของฟอร์ม IF – THEN ซึ่งชี้ไปยังอัลกอริทึมที่แสดงถึงการกระทำหรือผลลัพธ์ที่ควรเลือกในแง่ของข้อมูลที่สังเกตได้ในปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วยทั้งข้อมูลป้อนเข้าและผลป้อนกลับ หากใช้ระบบควบคุมวงปิด วิธีการสร้างหรือออกแบบชุดของกฎคลุมเครือนั้นขึ้นอยู่กับความรู้หรือประสบการณ์ของมนุษย์ ซึ่งขึ้นอยู่กับการใช้งานจริงที่แตกต่างกัน กฎ Fuzzy IF – THEN เกี่ยวข้องกับเงื่อนไขที่แสดงโดยใช้ตัวแปรทางภาษาและชุดคลุมเครือเป็นผลลัพธ์หรือข้อสรุป กฎ IF-THEN นี้ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยระบบการอนุมานแบบคลุมเครือเพื่อคำนวณระดับที่ข้อมูลอินพุตสอดคล้องกับเงื่อนไขของกฎตัวอย่างเช่น ในแอปพลิเคชันที่ใช้สองอินพุตสำหรับหนึ่งเอาต์พุต สามารถเขียนกฎง่าย ๆ ได้ดังนี้ [3]:

ถ้า (ปริมาณน้ำครึ่งถัง) และ (ความเร็วปั๊มเป็นปกติ) จากนั้น (ผลลัพธ์คือระดับน้ำเพิ่มในถังรวดเร็ว)
 ถ้า (ปริมาณน้ำเต็มถัง) และ (ความเร็วปั๊มสูง) จากนั้น (ผลลัพธ์คือระดับน้ำเต็มด้วยความเร็วคงที่)
 ถ้า (ปริมาณน้ำน้อยมาก) และ (ความเร็วปั๊มต่ำ) จากนั้น (ผลลัพธ์คือระดับน้ำเพิ่มช้า)

2.2.3 Defuzzification

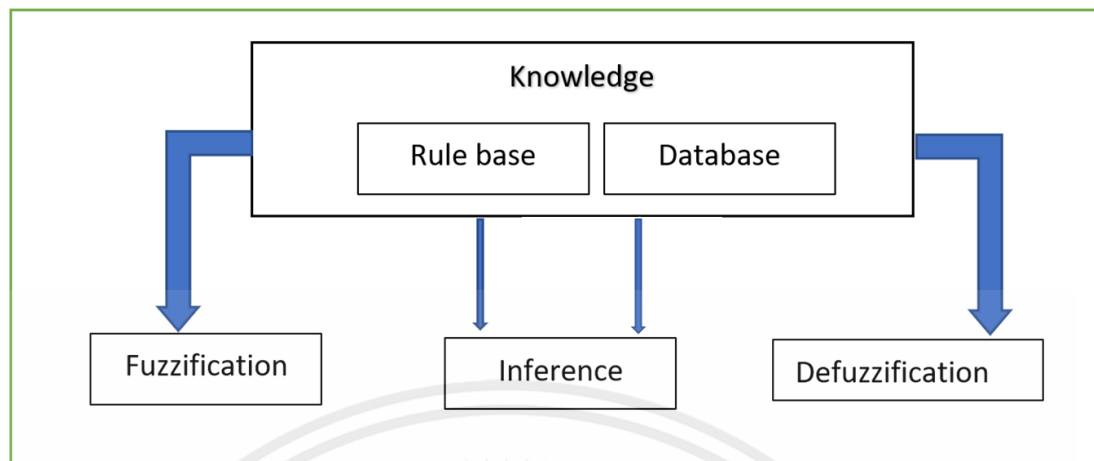
กระบวนการ Defuzzification ใช้สำหรับแปลงเอาต์พุต Fuzzy กลับไปเป็นเอาต์พุตแบบ Crisp หรือแบบคลาสสิกไปยังวัตถุประสงค์การควบคุม จริง ๆ แล้ว Fuzzy output เป็นตัวแปรทางภาษา และจำเป็นต้องแปลงเป็นตัวแปรที่คมชัดผ่านกระบวนการ Defuzzification มี 7 วิธีที่ใช้ในการลบสัญญาณเอาต์พุตฟัซซีดังต่อไปนี้ [4]:

- (1) หลักการสมาชิกสูงสุดหรือวิธีความสูง
- (2) วิธีเซนทรอยด์เมโทดอร์จุดศูนย์กลางของแรงโน้มถ่วง
- (3) วิธีถ่วงเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก
- (4) สมาชิกเฉลี่ยสูงสุด
- (5) ศูนย์กลางของผลรวม
- (6) พื้นที่ศูนย์กลางขนาดใหญ่และ
- (7) จุดสูงสุดของจุดสูงสุดหรือจุดสูงสุดสุดท้าย

วิธีลดแสงโดยทั่วไปมี 3 วิธี ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ยสูงสุด วิธีจุดศูนย์กลางถ่วง และวิธีความสูง

2.2.4 ระบบการอนุมานแบบฟัซซี (Fuzzy inference system)

ระบบการอนุมานแบบฟัซซีหรือแบบคลุมเครือหรือระบบตามกฎแบบคลุมเครือเป็นระบบที่ใช้ควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของระบบ ดังรูปที่ 2.1 ระบบการอนุมานแบบคลุมเครือมีสามประเภท คือประเภท Mamdani, ประเภท Sugeno และประเภท Tsukamoto ความแตกต่างที่สำคัญระหว่าง Mamdani และ Sugeno นั้นเป็นผลมาจากกฎที่คลุมเครือ ประเภท Mamdani ใช้ชุดคลุมเครือเป็นผลลัพธ์ของกฎ ในขณะที่ประเภท Sugeno ใช้ฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรอินพุตเป็นผลลัพธ์ของกฎ สำหรับประเภท Tsukamotoผลที่ตามมาของกฎคลุมเครือแต่ละข้อจะใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกแบบโมนอทอนิก



รูปที่ 2.1 แบบแผนของระบบการอนุมานแบบคลุมเครือ

ในระบบการอนุมานแบบฟัซซี่ อินพุตแบบคมชัดจะถูกแปลงเป็นอินพุตแบบฟัซซี่โดยใช้อินเทอร์เฟซแบบฟัซซี่ หลังจากการทำให้คลุมเครือ กฎพื้นฐานจะก่อตัวขึ้น ฐานกฎและฐานข้อมูลถูกรวมกันว่า ฐานความรู้ Defuzzification ใช้เพื่อแปลงค่า Fuzzy เป็นค่าโลกแห่งความจริงซึ่งเป็นเอาต์พุต FIS ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ แอปพลิเคชัน [5]

2.3 โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks)

เครือข่ายประสาทเทียมประกอบด้วยเซลล์ที่เชื่อมต่อกันจำนวนหนึ่งเป็นเซลล์ประสาทที่มีการทำงานร่วมกันเพื่อเริ่มต้นระบบปัญญาประดิษฐ์หรือการเรียนรู้ในเครื่องจักร ANN ประกอบด้วยสามเลเยอร์คือเลเยอร์อินพุต เลเยอร์ที่ซ่อนอยู่ และเลเยอร์เอาต์พุต เลเยอร์อินพุตและเอาต์พุตประกอบด้วยชุดของเซลล์ประสาทที่เป็นตัวแทนของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต เลเยอร์ที่ซ่อนอยู่จะประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากเลเยอร์อินพุต และส่งการตอบสนองไปยังเลเยอร์เอาต์พุต ไม่มีข้อจำกัดทางทฤษฎีเกี่ยวกับจำนวนของเลเยอร์ที่ซ่อนอยู่ แต่โดยทั่วไปแล้วจะมีเพียงหนึ่งหรือสองเลเยอร์เท่านั้น เลเยอร์เอาต์พุตยอมรับการตอบสนองทั้งหมดจากเลเยอร์ที่ซ่อนอยู่และสร้างเวกเตอร์เอาต์พุต แต่ละชั้นมีองค์ประกอบการประมวลผลที่ทำหน้าที่เป็นเซลล์ประสาทจำนวนหนึ่งซึ่งเชื่อมโยงกับข้อมูลที่ปรับได้ โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกปรับในระหว่างกระบวนการฝึกอบรมจนกว่าข้อผิดพลาดจะลดลงอย่างมากและเป็นที่ยอมรับสำหรับงานโดยเฉพาะ ANN ที่ได้รับการฝึกอบรมโดยอัลกอริทึมที่เหมาะสมสำหรับปัญหาเฉพาะ แม้ว่าจะมีอัลกอริทึมการฝึกอบรมเป็นจำนวนมาก แต่อัลกอริทึมแบบที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคืออัลกอริทึมการแพร่ย้อนกลับ โดยผลลัพธ์ของเซลล์ประสาทแต่ละเซลล์จะคำนวณโดยการคูณอินพุตด้วยเวกเตอร์ข้อมูล รวมผลลัพธ์และใช้ฟังก์ชันกระตุ้นกับผลรวม

$$y = F\left(\sum_{k=1}^l w_k x_k + b_k\right) \quad (2.4)$$

โดยที่ F คือฟังก์ชันกระตุ้น l คือจำนวนของเซลล์ประสาทในชั้นที่ต่อเนื่องกัน w_k คือน้ำหนักของการเชื่อมต่อที่เกี่ยวข้อง และ b_k คือค่าอคติสำหรับเซลล์ประสาท โดยทั่วไป F จะเป็นเชิงเส้น, ซันตอน, เกณฑ์, ลอการิทึมซิกมอยด์ (logsig) หรือฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ซิกมอยด์ (แทนซิก) ANN ถูกนำไปใช้ในแอปพลิเคชันต่าง ๆ มากมาย [6]

2.4 ระบบอนุมานฟัซซีแบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro - Fuzzy Inference system)

ระบบอนุมานฟัซซีแบบปรับตัวได้ (Adaptive Neuro - Fuzzy Inference system, ANFIS) เป็นการประยุกต์ใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network) มาใช้ร่วมด้วย เนื่องจากตัวควบคุม PID แบบเดิมไม่สามารถคาดการณ์และป้องกันข้อผิดพลาดได้จากการที่ไม่สามารถตอบสนองต่อข้อผิดพลาดในการสร้างแบบจำลองได้เร็วพอ การควบคุมป้อนกลับเป็นเทคนิคพื้นฐานในการชดเชยการรบกวนโพลดที่เข้าสู่ระบบและการควบคุมป้อนกลับมีศักยภาพในการกำจัดผลกระทบที่มีข้อบกพร่องหลายประการ เช่น ป้องกันการเกิดการรบกวนโพลดหลังจากเข้าสู่ระบบ และไม่สามารถควบคุมได้เมื่อมีการหน่วงเวลานานในการที่จะลดข้อบกพร่องดังกล่าว ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจะทำงานร่วมกันกับตัวควบคุมแบบป้อนกลับที่มีอยู่ และศึกษาผลกระทบผ่านการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมฟัซซีลอจิกอัจฉริยะแบบบูรณาการ ข้อได้เปรียบหลักของการกำหนดค่านี้คือสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบที่มีอยู่โดยไม่ต้องแก้ไขส่วนประกอบฮาร์ดแวร์ ระบบควบคุมประเภทนี้สามารถใช้ได้กับกระบวนการทุกประเภท การพัฒนาตัวควบคุมฟัซซีลอจิกประกอบด้วยขั้นตอนต่อไปนี้ ระบุช่วงของตัวแปรควบคุมและตัวแปรควบคุม

1. แบ่งช่วงเหล่านี้ออกเป็นชุดคลุมเครือและติดฉลากภาษาศาสตร์ซึ่งสามารถใช้อธิบายได้
2. กำหนดกฎ (rule base) ซึ่งเกี่ยวข้องกับตัวแปรควบคุมและตัวแปรควบคุม เพื่อระบุการดำเนินการควบคุม
3. การประยุกต์ใช้วิธีการจัดสัญญาณที่เหมาะสม จำนวนชุดคลุมเครือที่จำเป็นและช่วงของชุดเหล่านี้ได้รับการออกแบบตามประสบการณ์ที่ได้รับจากกระบวนการ ชุดคลุมเครือมาตรฐานประกอบด้วยสามขั้นตอน : เปลี่ยนข้อมูลที่คลุมเครือให้เป็นตัวเลข

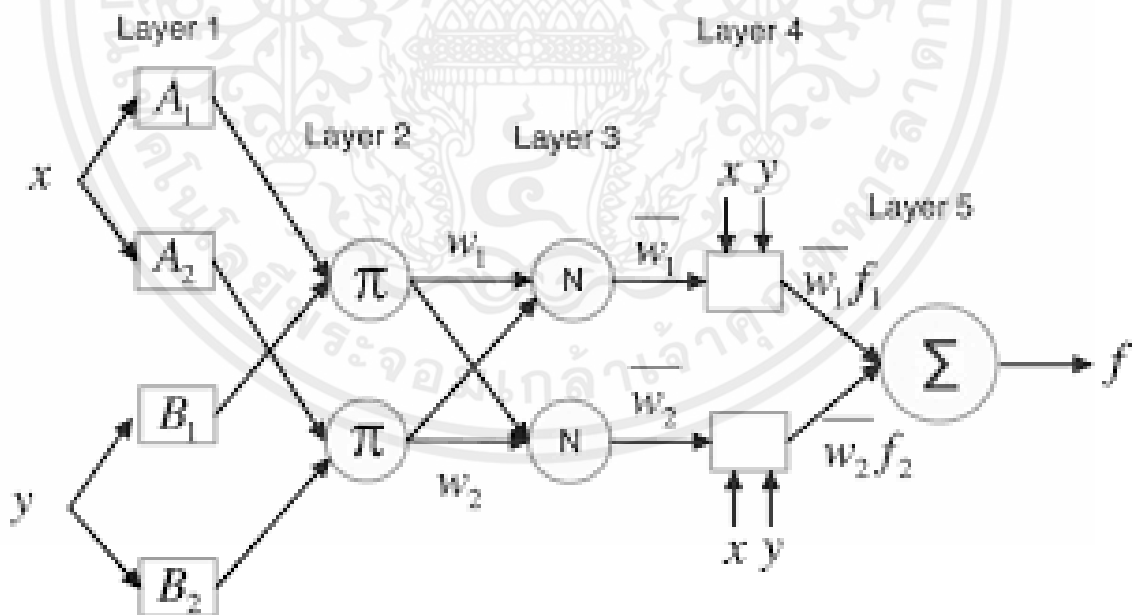
ฟuzzy การเปลี่ยนตัวเลขฟuzzyเป็นตัวเลขจริง และการกำจัดความสับสน โดยการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ในการจัดลำดับความสำคัญของทางเลือกต่างๆ [5]

4. ประยุกต์ระบบอนุมานฟuzzyแบบปรับตัวได้มีจุดเด่นในด้านการเรียนรู้แต่ยังไม่สามารถอธิบายถึงที่มาของการตัดสินใจที่แสดงผลออกมาได้ ร่วมกับตรรกศาสตร์คลุมเครือหรือฟuzzyลอจิก ซึ่งสามารถให้เหตุผลเช่นเดียวกันกับมนุษย์ได้ แต่ไม่สามารถทำได้อัตโนมัติ โดยระบบอนุมานฟuzzyแบบปรับตัวได้สามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วนได้แก่ ส่วนที่หนึ่งคือระบบอนุมานฟuzzy และส่วนที่สอง คือวิธีการเรียนรู้แบบย้อนกลับ จากรูปที่ 2.2 คือโครงสร้างระบบแบบอนุมานฟuzzyโครงข่ายประสาทเทียมที่มี 2 ข้อมูลขาเข้าและ 1 ข้อมูลขาออก โดยข้อมูลขาเข้าแต่ละอันจะแบ่งเป็น 2 ฟuzzyเซต แต่ละเซตประกอบด้วย A_1, A_2 และ B_1, B_2 พารามิเตอร์ของเอาพุตเป็น p_i, q_i และ r_i โดยมีกฎ จำนวน L กฎดังต่อไปนี้

กฎข้อที่ 1: ถ้า x_1 เป็น A_1 และ x_2 เป็น B_2 เมื่อ $f_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$

กฎข้อที่ 2: ถ้า x_1 เป็น A_1 และ x_2 เป็น B_2 เมื่อ $f_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$

กฎข้อที่ 3: ถ้า x_1 เป็น A_L และ x_2 เป็น B_L เมื่อ $f_L = p_Lx_1 + q_Lx_2 + r_L$



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของระบบอนุมานฟuzzyปรับตัวได้

ที่มาของรูป <https://images.app.goo.gl/wWTRA4xH1m78co1n8>

โดยโครงสร้างของระบบอนุมานฟัซซี่แบบปรับตัวได้ถูกแบ่งได้ 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 : การหาค่าพารามิเตอร์ของตัวหน้า เป็นการหาค่า Fuzzy จากอินพุตในรูปทั่วไปให้เป็นค่าสมาชิกผ่านฟังก์ชันความเป็นสมาชิก μ_{A_i} หรือ μ_{B_i} โดยที่

$$O_j^1 = \mu_{A_i}(x) \quad (2.5)$$

เมื่อ O_j^1 เป็นค่าความเป็นสมาชิกของ A_i ที่เกิดจากจากค่า x โดยฟังก์ชันสมาชิกอาจเป็นฟังก์ชันแบบคางหมู รูปประฆังคว่ำหรือแบบอื่นก็ได้

ขั้นที่ 2: เป็นค่า firing strength จากกฎของแต่ละข้อ และ $\mu_{j1}(x_1)$ เป็นค่า Fuzzy จากมิติที่ i ของกฎข้อที่ j

ขั้นที่ 3 : ชั้นค่าถ่วงน้ำหนักเป็นการหาค่าฟัซซี่ผลรวมจากข้อตั้งทุกกฎให้เป็นหนึ่งเดียว

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{w_1 + w_2 + \dots + w_L}, j = 1, 2, \dots, L \dots \quad (2.6)$$

ขั้นที่ 4 : การหาพารามิเตอร์ที่ตามมา เป็นชั้นของเอาต์พุตConsequent Parameters เป็นชั้นของเอาต์พุตพารามิเตอร์ สามารถหาได้จาก

$$\bar{w}_j f_j = \bar{w}_j (p_j x_1 + q_j x_2 + r_{j0}) \quad (2.7)$$

ขั้นที่ 5: การหาเอาต์พุตรวมทั้งหมด เป็นชั้นของการนำเอาต์พุตจากโครงข่ายได้รับมาจากดีฟัซซิฟิเคชัน จากการรวมทุกสัญญาณเข้า

$$\bar{w}^T f = \sum_{j=1}^L \bar{w}_j f_j \quad (2.8)$$

เมื่อ $\bar{w}^T = [\bar{w}_1 \bar{w}_2 \dots \bar{w}_L]$ เป็นค่าของฟัซซี่ที่ได้ผ่านกระบวนการปรับปรุงโครงสร้างของข้อมูลจากกฎข้อ 1 ไปจนถึงถึง L และ $f^T = [f_1 f_2 \dots f_L]$ เป็นส่วนของเอาต์พุตของกฎข้อ 1 ไปจนถึงถึง L

2.5 ระบบควบคุมพีไอดี

ระบบควบคุมแบบพีไอดี หรือ ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมระบบหรือกระบวนการต่างๆ โดยมีการปรับค่าพารามิเตอร์ของระบบตามค่าความต่างของข้อมูลตัวอินพุต และข้อมูลตัวอินพุตเป้าหมาย ของระบบ ที่ต้องการให้เอาต์พุต สามารถปรับตัวไปในทิศทางที่เหมาะสม

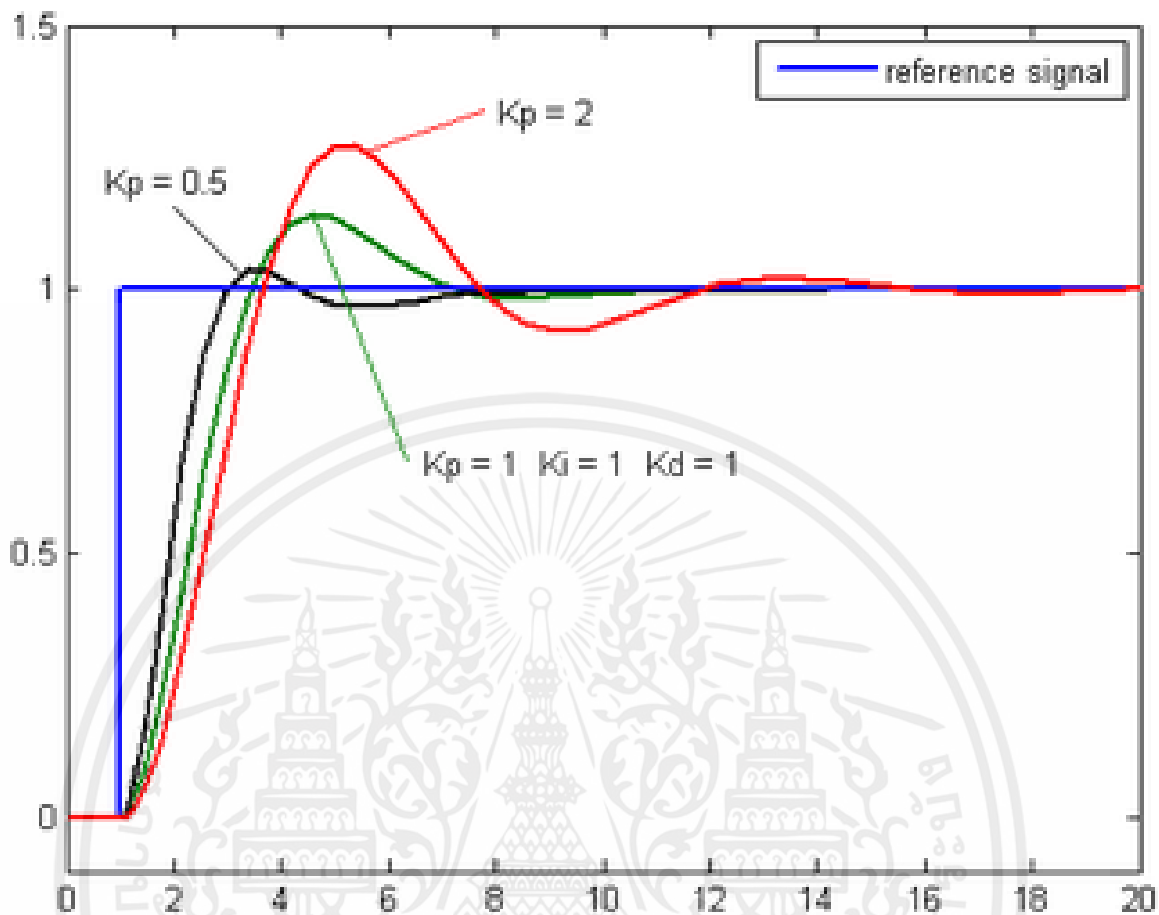
วิธีคำนวณพีไอดี ขึ้นอยู่กับตัวแปรสามตัวคือค่าสัดส่วน (Proportional) ค่าปริพันธ์ (Integral) และค่าอนุพันธ์ (Derivative) โดยค่าสัดส่วนกำหนดจากค่าความต่างระหว่างข้อมูลตัวอินพุตปัจจุบันกับข้อมูลตัวอินพุตเป้าหมาย และนำไปปรับค่าให้กับเอาต์พุต ค่าปริพันธ์กำหนดจากค่าความต่างระหว่างข้อมูลตัวอินพุตปัจจุบันกับข้อมูลตัวอินพุตเป้าหมายในระยะเวลาที่ผ่านมา และค่าอนุพันธ์กำหนดจากค่าเฉลี่ยของอัตราการเปลี่ยนแปลงข้อมูลตัวอินพุตในระยะเวลาที่กำหนด ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณร่วมกันของทั้งสามตัวแปรนี้จะใช้ในการปรับแก้ค่าของกระบวนการ

โดยการปรับค่าคงที่ในพีไอดีตัวควบคุมจะสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของการควบคุมให้เหมาะสมกับที่กระบวนการได้ตามต้องการ การประยุกต์ใช้งานกับงานบางอย่างอาจจะใช้ไม่เกินสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ PID [7]:

- 1) สัดส่วน (Proportional) ผลของสัดส่วน หรือ อัตราขยาย จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.9)$$

| | | |
|-------|-----------|--|
| เมื่อ | P_{out} | คือ สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน |
| | K_p | คือ อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้ |
| | e | คือ ค่าความผิดพลาด |
| | t | คือ เวลา |

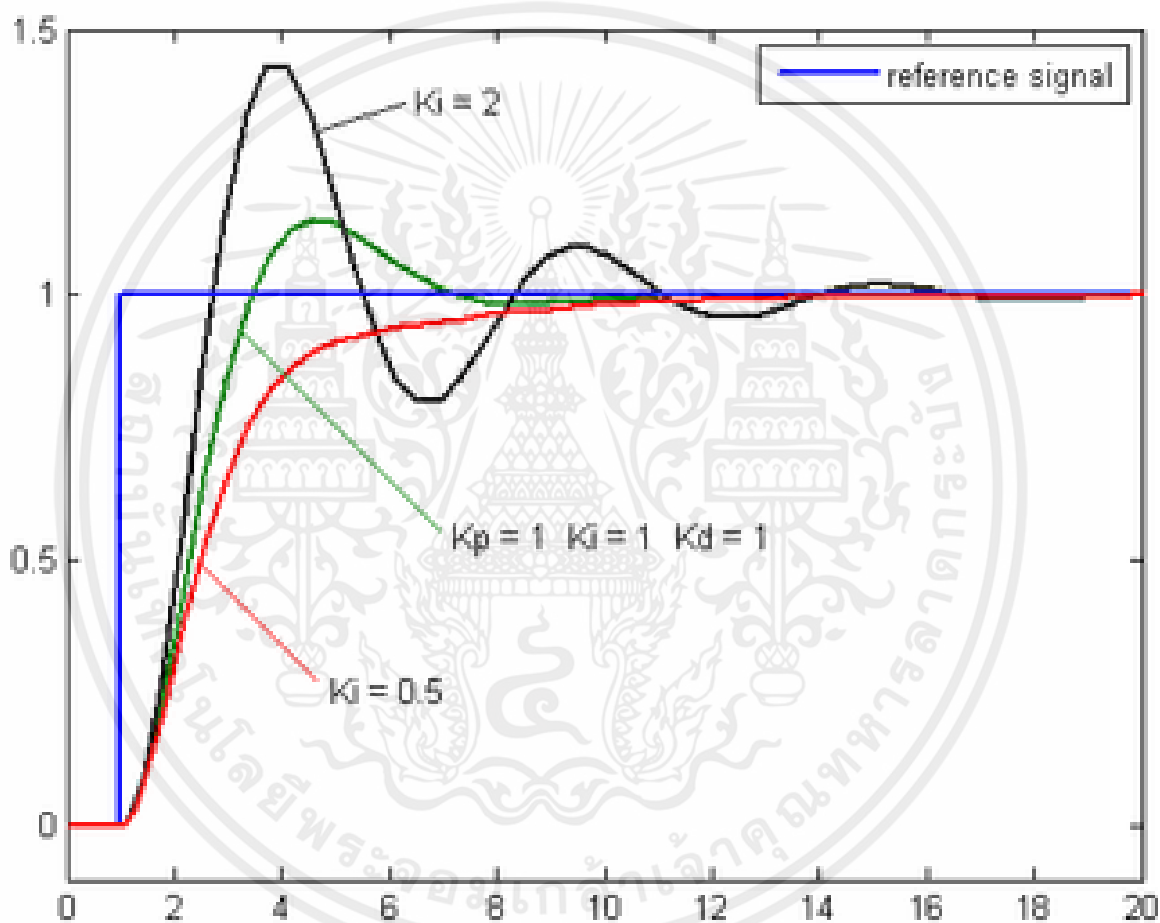


รูปที่ 2.3 กราฟแสดงสัญญาณ PV ต่อเวลา, K_p กำหนดเท่ากับ 3 โดยค่า K_i และ K_d คงที่ ที่มาของรูป http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2311

- 2) ค่าปริพันธ์หรือ reset หมายถึง สัดส่วนและระยะเวลาของความผิดพลาด โดยผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลาจะทำให้เกิด Offset สะสมของค่าก่อนหน้าทำให้ความผิดพลาดสะสมนั้นจะถูกคูณโดยอัตราขยายของค่าปริพันธ์ ผลของปริพันธ์จะถูกแทนด้วย K_i

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d \quad (2.10)$$

| | | |
|-------|-----------|-------------------------------|
| เมื่อ | I_{out} | คือ สัญญาณขาออกของค่าปริพันธ์ |
| | K_i | คือ อัตราขยายค่าปริพันธ์ |
| | e | คือ ค่าความผิดพลาด |
| | t | คือ เวลา |
| | τ | คือ ตัวแปรปริพันธ์หุน |

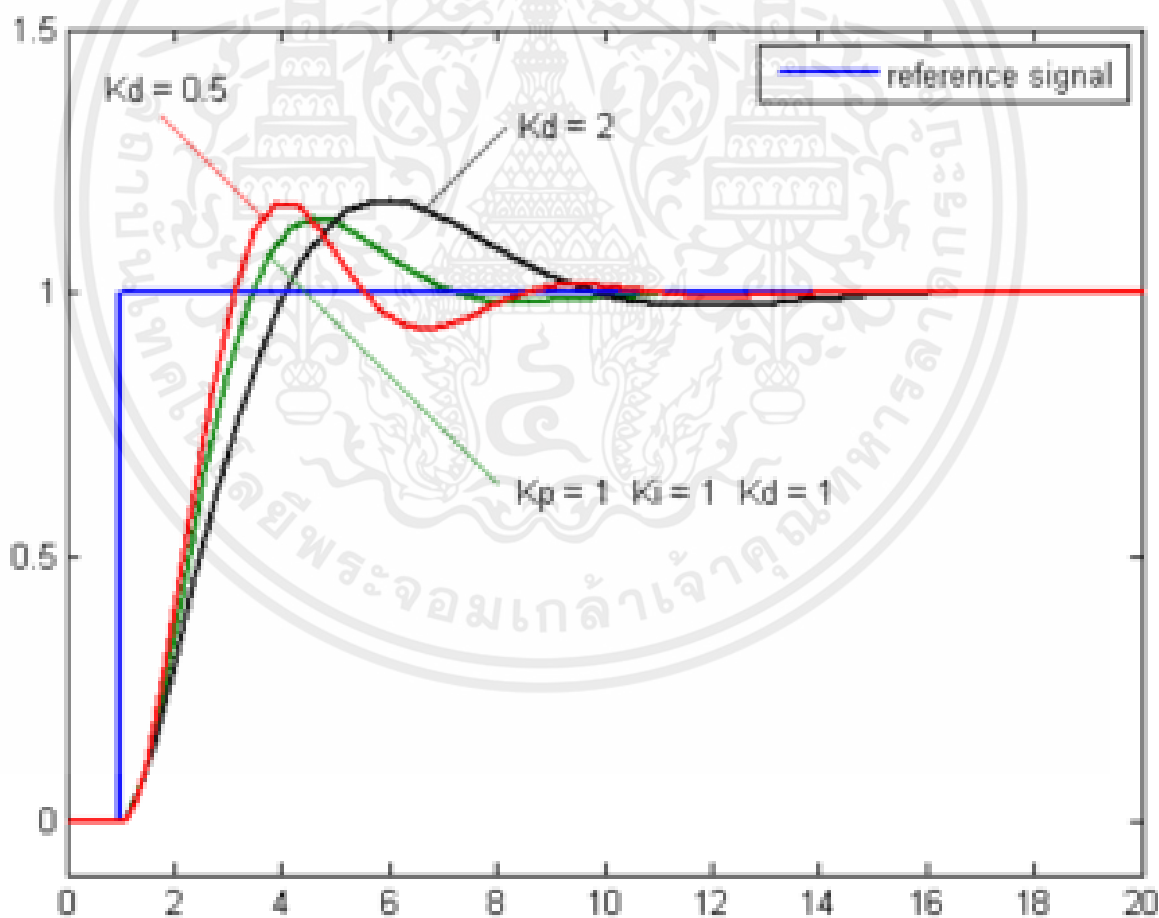


รูปที่ 2.4 กราฟแสดงสัญญาณ PV ต่อเวลา, K_i กำหนดเท่ากับ 3 โดยค่า K_p และ K_d คงที่
ที่มาของรูป http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2311

- 3) อนุพันธ์ คือ ผลของเทอมอนุพันธ์หรือเรียกว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาได้จากความชันของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา ซึ่งก็คืออนุพันธ์อันดับหนึ่งที่สัมพันธ์กับเวลา และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_d

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.11)$$

เมื่อ D_{out} คือ สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์
 K_d คือ อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้
 e คือ ค่าความผิดพลาด
 t คือ เวลา



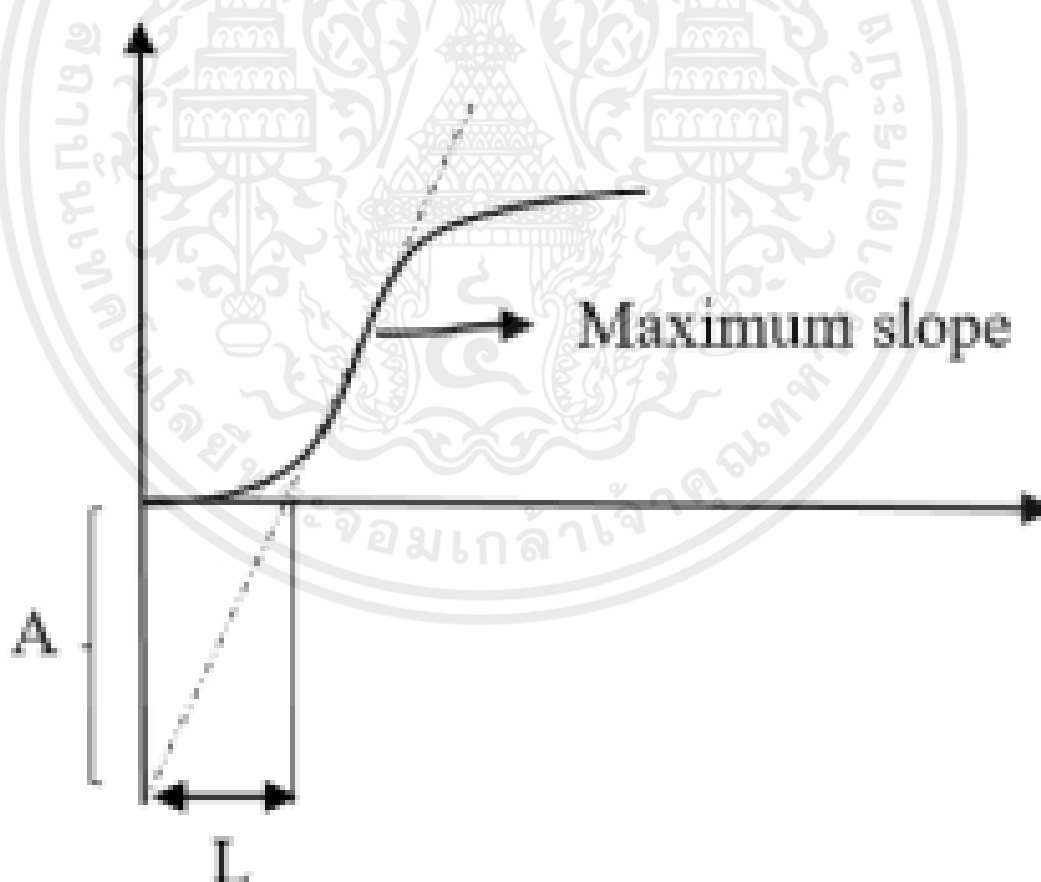
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงสัญญาณ PV ต่อเวลา, K_d กำหนดเท่ากับ 3 โดยค่า K_p และ K_i คงที่ที่มาของรูป http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2311

2.5.1 The Ziegler–Nichols Method

การปรับค่าด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols จะสามารถทำได้เฉพาะในอุปกรณ์ที่มีระบบเป็น Open-loop ที่มีความเสถียรเท่านั้น สิ่งสำคัญที่สุดในกระบวนการนี้คือการหาพารามิเตอร์ A และ L ซึ่งสามารถหาได้จากการตอบสนองของ Step response โดยลำดับแรก จะต้องทำการหาจุดที่มีความชันสูงที่สุดในกราฟแล้วจึงวาดเส้นหาจุดตัดที่ตัดกับเส้นแกนตั้งเพื่อหาค่า A ในขณะที่ค่า L นั้นจะได้จากการระยะจากจุดตัดแกนนอนไปยังจุดตัดแกนตั้งตามแนวแกน [8] ดังรูปที่ 2.6 และสามารถคำนวณค่าได้จากตารางที่ 2.1

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-Ls} \quad (2.12)$$

$$a = \frac{KL}{T} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.6 Plant step response to get A and L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 Tuning Mode

| | Step response | | | Frequency response | | |
|-----|---------------|----------|----------|--------------------|----------|-----------|
| | K_p | τ_i | τ_d | K_p | τ_i | τ_d |
| P | $1/a$ | | | $0.5K_c$ | | |
| PI | $0.9/a$ | $3L$ | | $0.4K_c$ | $0.8T_c$ | |
| PID | $1.2/a$ | $2L$ | $L/2$ | $0.6K_c$ | $0.5T_c$ | $0.12T_c$ |

2.5.2 Self-Oscillation Method

การควบคุมและการปรับค่า P, PI และ PID ของตัวควบคุม PID เริ่มต้นจากการปรับค่าของ K_p และ K_i ให้เริ่มต้นที่ศูนย์ และเพิ่มอัตราขยายของ P ให้สูงที่สุดจะได้ค่า K_{max} เมื่อถึงจุดที่ค่าเริ่มแกว่งให้นำค่าของช่วงที่มีการแกว่งหรือ f_0 มาคำนวณหาตัวแปรอื่นๆจากตารางที่ 2

ตารางที่ 2.2 Self-Oscillation Tuning Mode

| Control type | K_p | T_i | T_d |
|----------------|--------------|--------------|---------------|
| P Controller | $0.5K_{cr}$ | - | - |
| PI Controller | $0.45K_{cr}$ | $P_{cr}/1.2$ | - |
| PID Controller | $0.6K_{cr}$ | $0.5P_{cr}$ | $0.125P_{cr}$ |

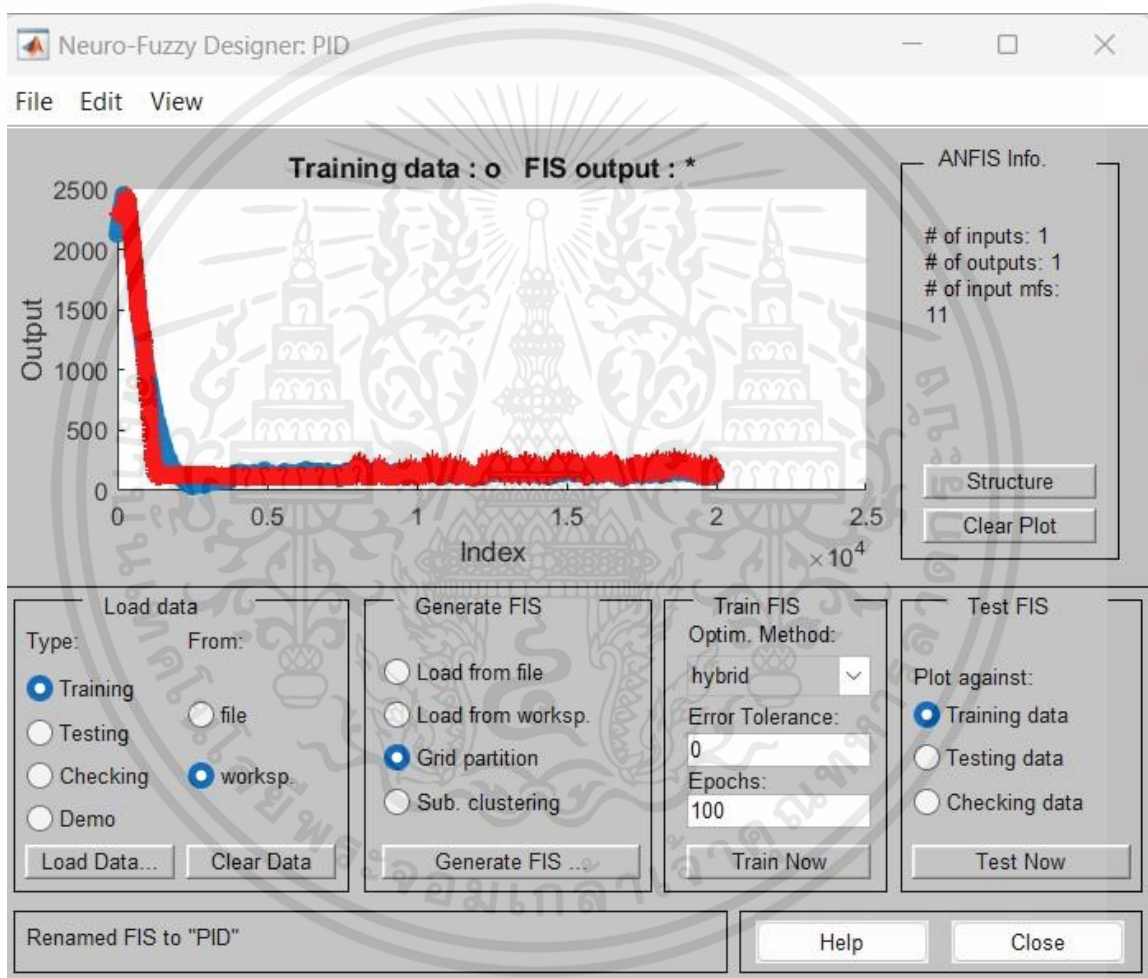
2.6 MATLAB

MATLAB เป็นโปรแกรมสำหรับการออกแบบการคำนวณทางวิทยาศาสตร์ ถูกใช้อย่างหลากหลายและกว้างขวางในหลาย ๆ วิชาเนื่องจากสามารถวิเคราะห์ข้อมูล แก้ไขปัญหา การทดลองและการพัฒนาอัลกอริทึม นอกจากนี้ยังเป็นโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อใช้ในงานที่เกี่ยวข้องเฉพาะด้านได้ [9]

2.6.1 Neuro-fuzzy designer

แอป Neuro-Fuzzy Designer ช่วยให้ผู้ออกแบบ ผูกฝน และทดสอบระบบการอนุมานของประสาทฟัซซีที่ปรับเปลี่ยนได้ (ANFIS) สามารถปรับพารามิเตอร์ฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของระบบการอนุมานแบบฟัซซีประเภท Sugeno สร้างโครงสร้างระบบการอนุมานเบื้องต้นโดยอัตโนมัติตามข้อมูลการฝึกอบรม และสามารถแก้ไขโครงสร้างระบบการอนุมานก่อนปรับแต่ง ป้องกันการโอเวอร์ฟิตข้อมูลการฝึกอบรมโดยใช้ข้อมูลการตรวจสอบเพิ่มเติม ทดสอบความสามารถในการวางระบบโดยทั่วไปโดยใช้ข้อมูล

การทดสอบ ส่งออกระบบการอนุมานแบบฟัซซีที่ปรับแต่งแล้วของคุณไปยังพื้นที่ทำงาน MATLAB® มากกว่า คุณสามารถใช้ Neuro-Fuzzy Designer เพื่อฝึกระบบการอนุมานแบบคลุมเครือประเภท Sugeno-type 1 ที่มีเอาต์พุตเดียว ใช้ Defuzzification ค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เอาต์พุตที่เป็นประเภทเดียวกันทั้งหมด เช่น เชิงเส้นหรือค่าคงที่ มีความครอบคลุมของกฎอย่างสมบูรณ์ โดยไม่มีการแบ่งปันกฎ นั่นคือ จำนวนของกฎต้องตรงกับจำนวนของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต และทุกกฎ ต้องมีผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน มีน้ำหนักเอกภาพสำหรับแต่ละกฎ ดังรูปที่ 2.7



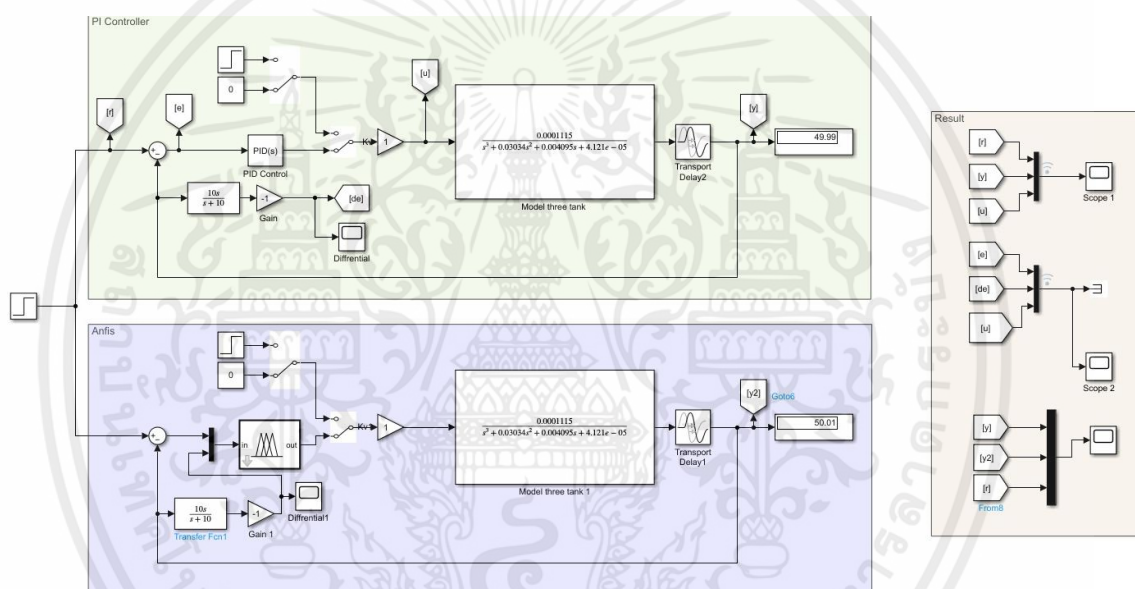
รูปที่ 2.7 ตัวอย่างฟังก์ชันบางส่วนบน MATLAB

2.6.2 MATLAB/SIMULINK

MATLAB/SIMULINK เป็นซอฟต์แวร์ที่ทำงานอยู่บน MATLAB ใช้ในการจำลองแบบทางคณิตศาสตร์ด้วยรูปภาพ สนับสนุนเครื่องมือสร้างแบบจำลอง และเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ข้อมูล ให้สามารถทำแบบจำลองด้วยรูปภาพได้อย่างรวดเร็ว เพื่อแสดงถึงการออกแบบแนวความคิดของระบบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

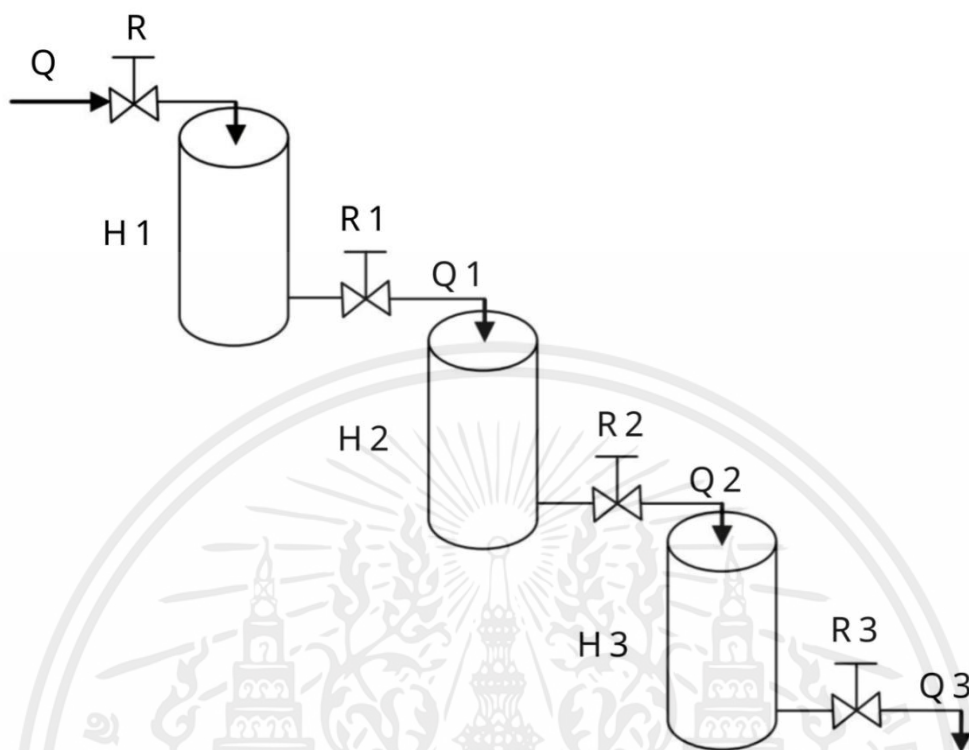
ความพยายามเพียงเล็กน้อย นั่นคือ MATLAB/SIMULINK ติดต่อกับผู้ใช้ผ่านทางรูปภาพ หรือ GUI (Graphic User Interface) ในการสร้างไดอะแกรมของแบบจำลอง นอกจากนั้น MATLAB/SIMULINK ยังประกอบด้วยไลบรารีบล็อกพื้นฐานและขั้นสูงเฉพาะสาขาวิชา ทั้งระบบเชิงเส้น (Linear System) ระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear System) ระบบเวลาต่อเนื่อง (Continuous-time) ระบบที่เวลาแบบแซมปิ้ง (Sample time) ระบบไฮบริด (Hybrid) MATLAB/SIMULINK สนับสนุนการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ได้ขณะที่เรากำลังเลียนแบบระบบอยู่ทำให้เราเห็นการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ทันทีว่าอะไรที่ไหน อย่างไร กับแบบจำลองระบบของเรา สุดท้าย MATLAB/SIMULINK สามารถเชื่อมต่อข้อมูลกับ MATLAB ได้โดยตรง ทำให้เราสามารถเชื่อมต่อกับซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ภายนอกได้



รูปที่ 2.8 MATLAB/SIMULINK

2.7 ระบบจำลองระดับถังน้ำ 3 ถังแบบไม่มีปฏิสัมพันธ์

ในระบบนี้ ถังน้ำทั้ง 3 ถังจะไม่ได้เชื่อมกันในรูปแบบเชื่อมต่อติดกัน แต่เป็นการติดตั้งแยกออกจากกันแต่ทำงานร่วมกัน ในระบบแบบนี้เหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นในถังใดถังหนึ่งจะไม่มีผลกระทบต่อถังอื่นๆ ในระบบ โดยในระบบนี้ อัตราการไหลเข้าของถังแรกจะมีค่าเทียบเท่ากับอัตราการไหลที่สูบเข้ามาในระบบ ในขณะที่อัตราการไหลออกของถังแรกจะมีค่าเทียบเท่ากับอัตราการไหลเข้าของถังต่อไป เนื่องจากการเปิดน้ำเพื่อไปยังถังถัดไปในรูปแบบที่ไม่ได้เชื่อมต่อกัน และจะทำวนไปเช่นเดียวกันในถังสุดท้ายก่อนปล่อยน้ำไปยังถังพักเก็บน้ำต่อไป [10] โดยถังทั้ง 3 จะเชื่อมต่อกันดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 Three tank non-interacting process

สมการสมดุลมวลของแหล่งของถังที่ 1

$$\rho A_1 \frac{dh_1}{dt} = \rho F_1(t) - \rho F_2(t) \quad (2.14)$$

$$F_2(t) = h_1(t) / R_1 \quad (2.15)$$

เมื่อ F_1 - อัตราการไหลเข้าถังที่ 1 (m^3 / s)

F_2 - อัตราการไหลออกถังที่ 1 (m^3 / s)

A_1 - พื้นที่ของถังที่ 1 (m^2)

R_1 - ความต้านทานการไหลของถังที่ 1 ($m / (m^3 / s)$)

h_1 - ระดับของเหลวในถังที่ 1 (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ρ - ความหนาแน่นของของเหลว (Kg / m^3)

สมการสมดุลมวลของเหลวของถังที่ 2

$$\rho A_2 \frac{dh_2}{dt} = \rho F_2(t) - \rho F_3(t) \quad (2.16)$$

$$F_3(t) = h_2(t) / R_2 \quad (2.17)$$

เมื่อ F_2 - อัตราการไหลเข้าถังที่ 2 (m^3 / s)

F_3 - อัตราการไหลออกถังที่ 2 (m^3 / s)

A_2 - พื้นที่ของถังที่ 2 (m^2)

R_2 - ความต้านทานการไหลของถังที่ 2 ($m / (m^3 / s)$)

h_2 - ระดับของเหลวในถังที่ 2 (m)

ρ - ความหนาแน่นของของเหลว (Kg / m^3)

สมการสมดุลมวลของเหลวของถังที่ 3

$$\rho A_3 \frac{dh_3}{dt} = \rho F_3(t) - \rho F_4(t) \quad (2.18)$$

$$F_4(t) = h_3(t) / R_3 \quad (2.19)$$

เมื่อ F_3 - อัตราการไหลเข้าของถังที่ 3 (m^3 / s)

F_4 - อัตราการไหลออกของถังที่ 3 (m^3 / s)

A_3 - พื้นที่ของถังที่ 3 (m^2)

R_3 - ความต้านทานการไหลของถังที่ 3 ($m / (m^3 / s)$)

h_3 - ระดับของเหลวในถังที่ 3 (m)

ρ - ความหนาแน่นของของเหลว (Kg / m^3)

เมื่อรวมสมการที่ (2.14) ถึง (2.19) เข้าด้วยกันจะได้สมการของ 3 ดังว่า

$$\frac{H_3(s)}{F_1(s)} = \frac{R_3}{(A_1R_1s+1)(A_2R_2s+1)(A_3R_3s+1)} \quad (2.20)$$



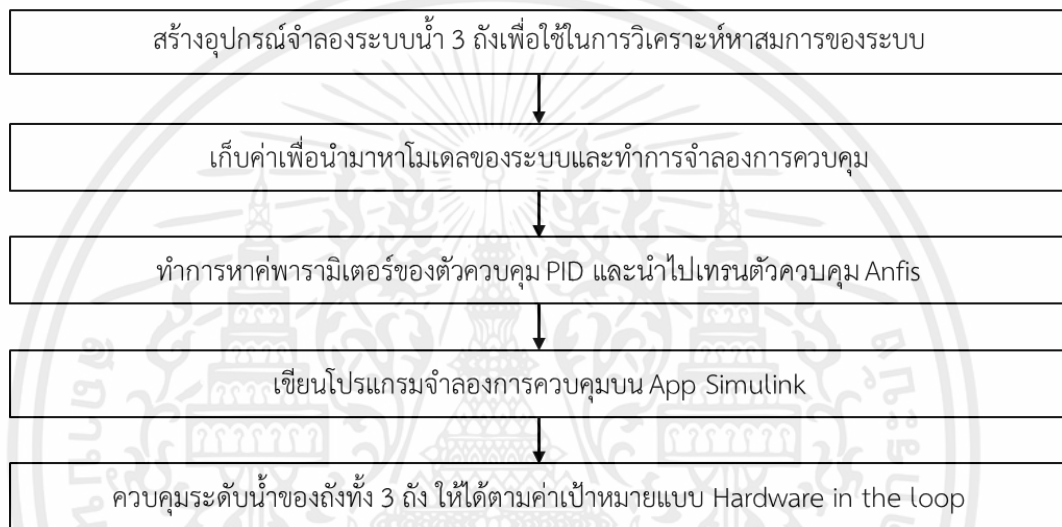
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

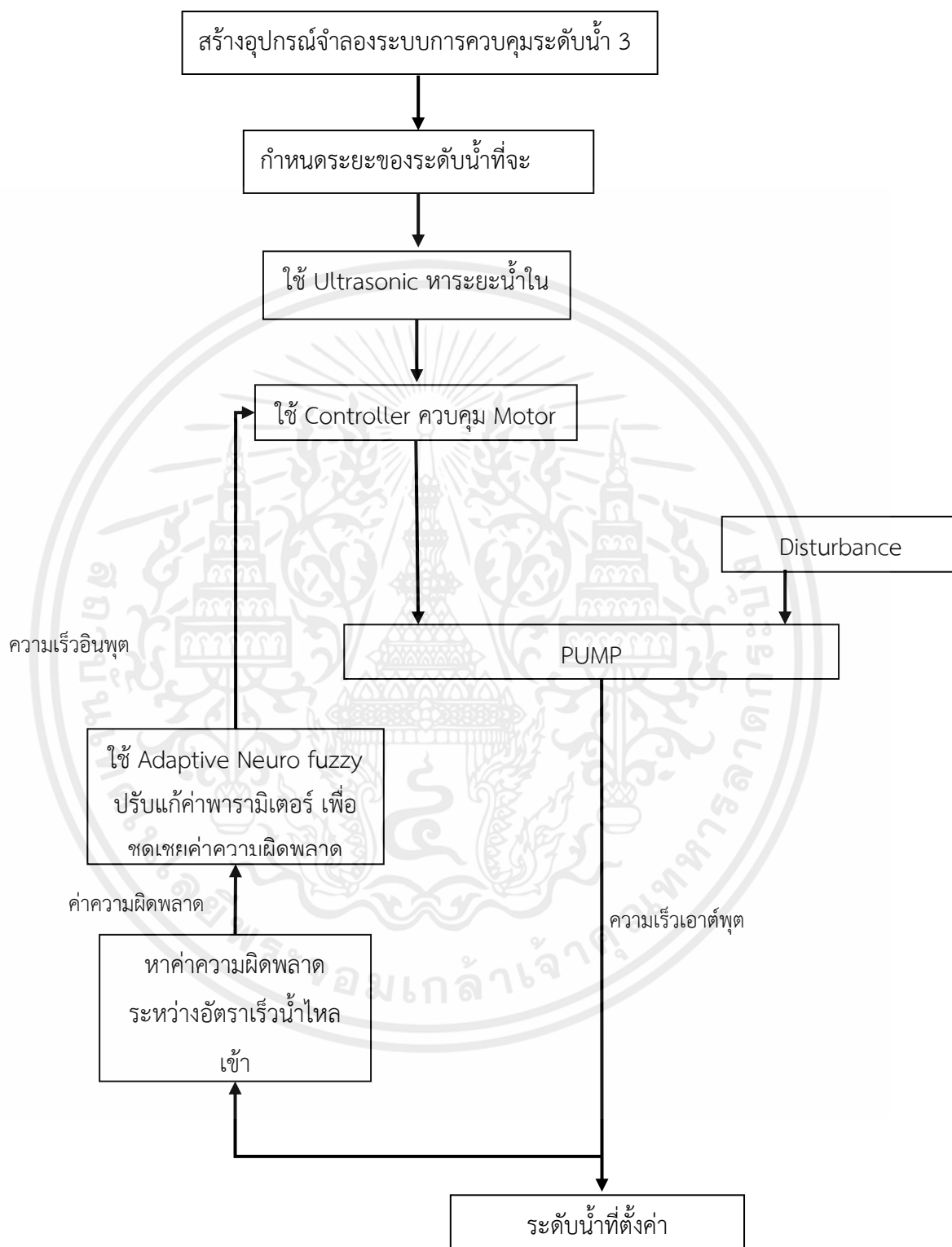
วิธีการดำเนินงาน

3.1 ศึกษา ออกแบบ และวางแผนองค์ประกอบและวิธีดำเนินการ

ตั้งนั้นองค์ประกอบของการทำตัวควบคุมสามารถทำการควบคุมถึงน้ำสามถังได้ประกอบด้วย



รูปที่ 3.1 แผนภาพการออกแบบการควบคุมระดับน้ำ

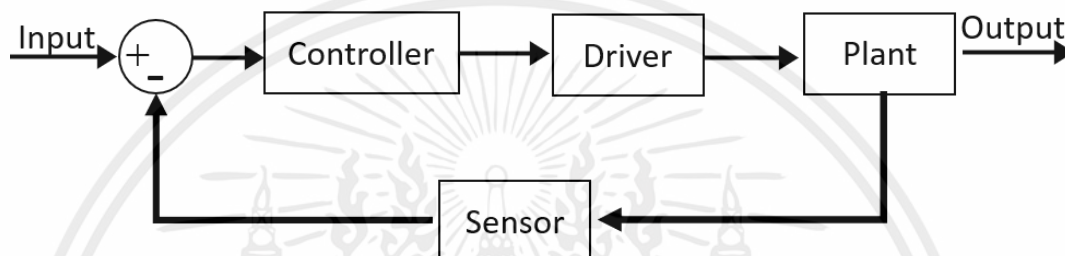


รูปที่ 3.2 Process Flow Chart

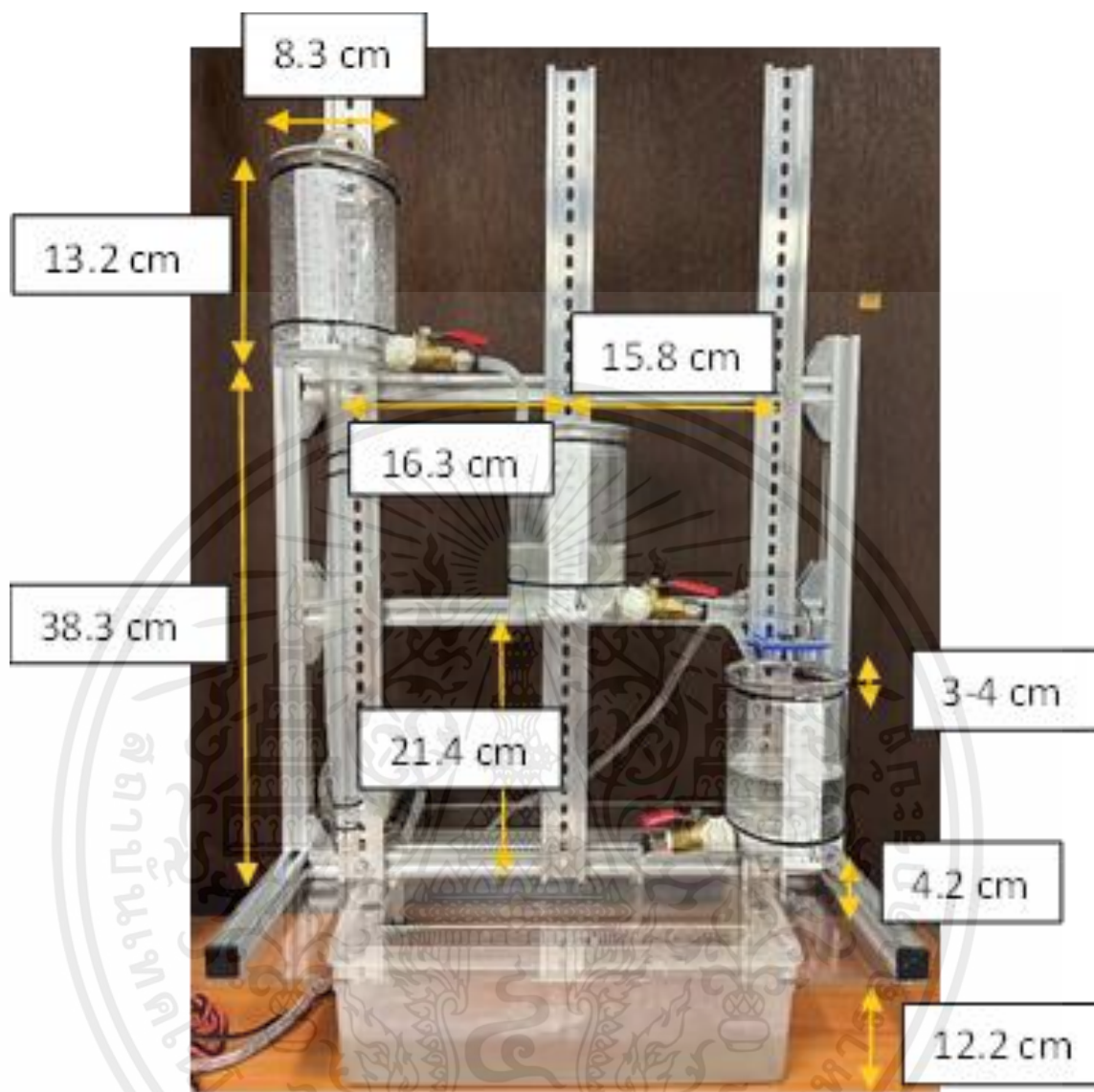
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เงื่อนไขกระบวนการ

ในการจำลองครั้งนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลอง 3 ถัง ขึ้นมาเพื่อนำมาทดลองการควบคุมโดยใช้ Raspberry Pi Pico W เป็นตัวประมวลผลตอบสนองและควบคุม ซึ่งจะใช้ PID และ ANFIS เป็นตัวควบคุมกระบวนการ และมีการใช้เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกเป็นอุปกรณ์อ่านค่าของระดับน้ำตั้งแต่ 0 มิลลิเมตร ถึง 100 มิลลิเมตร สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูป 3.3 และมีอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Block Diagram Process Conditions



รูปที่ 3.4 แบบจำลอง 3 ถัง

3.2.1 กระบวนการ

กระบวนการควบคุมระดับน้ำ 3 ถัง ประกอบด้วยถังน้ำพลาสติก เส้นผ่าศูนย์กลางถัง 8.3 มีขนาดพื้นที่หน้าตัด 0.541 ลูกบาศก์เมตร และสูง 13.2 เซนติเมตร 3 ใบ จากถังที่หนึ่งถึงฐานอะคลิลิก 38.3 เซนติเมตร จากถังที่สองถึงฐานอะคลิลิก 21.4 เซนติเมตร จากถังที่สามถึงฐานอะคลิลิก 4.2 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างถังที่หนึ่งถึงถังที่สอง 16.3 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างถังที่สองถึงถังที่สาม 15.8 เซนติเมตร สายยางเส้นผ่าศูนย์กลางข้างใน มิลลิเมตร เซนเซอร์จะติดขึ้นมาเหนือขอบของถัง 3-4 เซนติเมตร จากโต๊ะถึงฐานอะลูมิเนียมโปรไฟล์ 12.2 เซนติเมตร โดยถังน้ำแต่ละใบจะมีวาล์ว ที่ใช้ในการปรับพื้นที่หน้าตัดรูน้ำด้านในออกจากถัง แสดงได้ดังภาพที่ 3.4 แบบ Non Interacting System น้ำที่ไหล

เข้าสู่ถึงที่ 1 นั้นจะถูกปั๊มขึ้นมาจากบ่อเก็บน้ำด้านล่าง โดยปั๊มน้ำกระแสตรง 24 โวลต์ และไหลไปยังถังใบที่ 2 และ 3 ตามลำดับผ่านสายยางอ่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 มิลลิเมตรและผ่านวาล์ว ที่ใช้ในการปรับความต้านทานการไหลสำหรับปรับเปลี่ยนโหมดการควบคุมของกระบวนการ

3.2.2 เซนเซอร์

เซนเซอร์ใช้เป็นประเภทอัลตราโซนิกที่ติดตั้งไว้ด้านบนห่างจากขอบของกระป๋องเป็นระยะ 3 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.4 เนื่องจากเป็นระยะที่ทำการวัดแล้วเกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด หรือเรียกว่า Dead zone โดยหลักการของเซนเซอร์อัลตราโซนิกคือการปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกไปกระทบกับพื้นผิวของน้ำ แล้วรับคลื่นที่สะท้อนกลับมา แล้วทำการแปลงค่าจากสัญญาณคลื่นเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

3.2.3 ตัวควบคุม

ตัวควบคุมที่ใช้ในปริยฐานิพนธ์ครั้งนี้เลือกใช้เป็น Raspberry Pi Pico W (RP2040W) เป็นตัวควบคุมที่รับสัญญาณจากเซนเซอร์เป็นข้อมูลดิจิทัลและส่งสัญญาณออกไปเป็นข้อมูลทางไฟฟ้าเพื่อนำไปสั่งบอร์ดขับและตัวขับ หรือก็คือปั๊ม 24 VDC และมีการใช้การเขียนโปรแกรมด้วย C/C++ ในการควบคุม

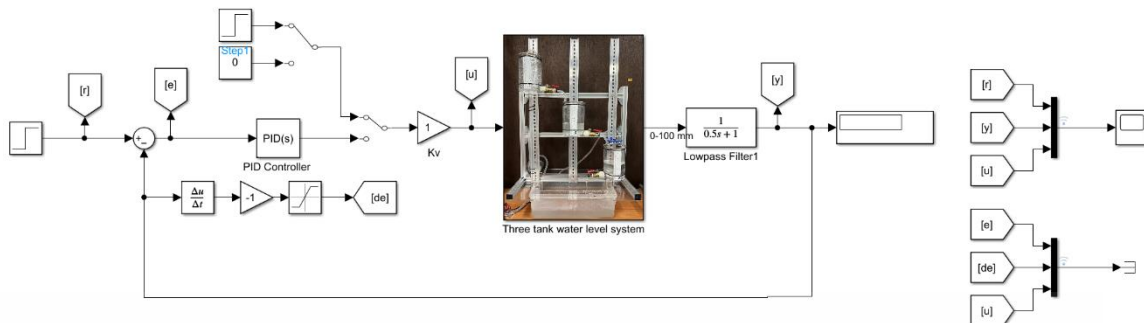
3.2.4 ตัวขับ

ตัวขับที่นำมาใช้คือปั๊ม 24 VDC ใช้คู่กับบอร์ดขับ 13 A ในกระบวนการจะทำการสั่งคำสั่งผ่านตัวควบคุม โดยจะมีการเปลี่ยนสัญญาณจาก 0-255 เป็นแรงดันไฟฟ้า 0-24 V

3.3 ระบุเอกลักษณ์โมเดลจำลองทางคณิตศาสตร์

3.3.1 การเก็บข้อมูล

1) ทำการเก็บค่าสัญญาณตัวควบของระดับน้ำในถังที่ 3 จากอัลตราโซนิกเซนเซอร์โดยจะใช้ Open-loop Block Diagram ใน MATLAB/SIMULINK ดังรูปที่ 3.5 โดยได้ทำการเก็บค่าที่ Sample time เท่ากับ 0.1 s เป็นเวลา 3000 s



รูปที่ 3.5 Block Diagram สำหรับการเก็บค่า

2) ทำการเขียนโปรแกรมคำสั่งที่ใช้สำหรับแยกชุดข้อมูลของสัญญาณตัวควบคุมที่เก็บมาไว้ใน Workspace โดยรูปที่ 3.6 จะเป็นรูปแสดงโปรแกรมที่ใช้ทำการแยกชุดข้อมูลและ รูปที่ 3.8 เป็นรูปแสดงตัวอย่างชุดข้อมูลที่เก็บไว้ใน Workspace โดยข้อมูลที่ทำการเก็บมาจะมี Data1 (Setpoint), Data2 (Response), Data3 (Control signal)

```

1      t=0:0.01:800;
2      y=data.data(1001:81001,2);
3      u=data.data(1001:81001,3);
4      r=data.data(1001:81001,1);
5      plot(t,y,t,r)
6      %plot(data.time,data.data(:,2))
7

```

รูปที่ 3.6 คำสั่งสำหรับการเก็บค่า

Variables - data

data

1x1 double timeseries

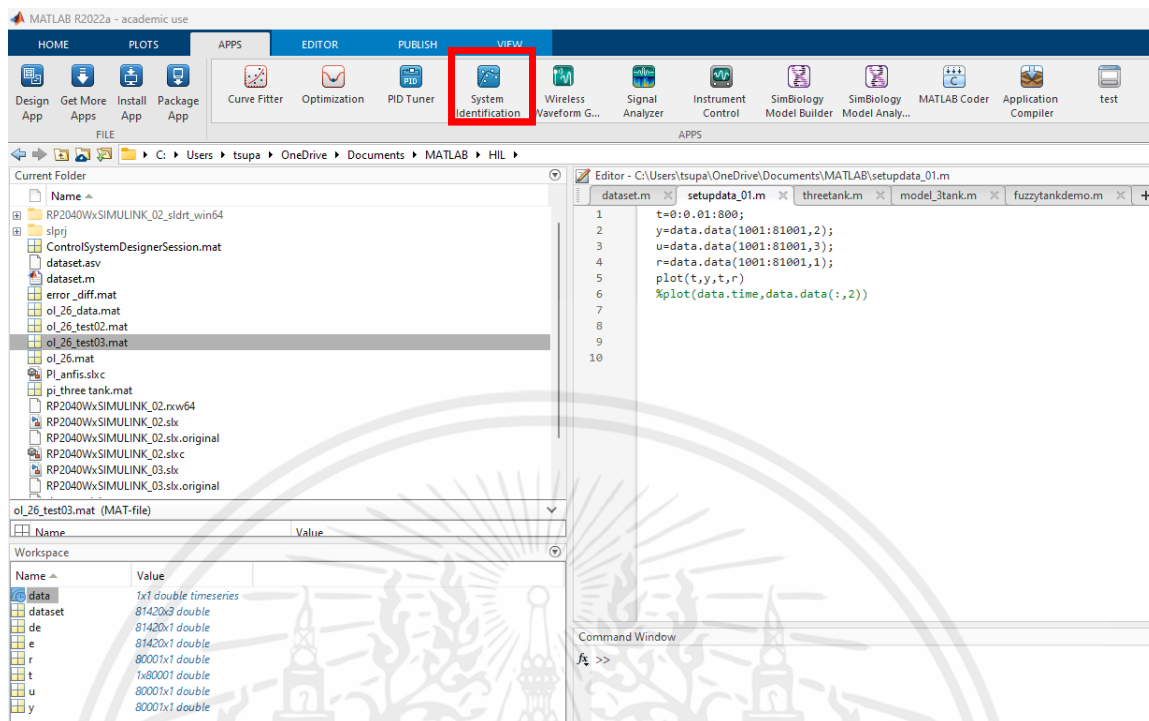
Time series name: Mux2:1

| Time | Data:1 | Data:2 | Data:3 |
|---------|--------|---------|--------|
| 12.3600 | 50 | -0.0453 | 26 |
| 12.3700 | 50 | -0.0453 | 26 |
| 12.3800 | 50 | -0.0453 | 26 |
| 12.3900 | 50 | -0.0453 | 26 |
| 12.4000 | 50 | -0.0453 | 26 |
| 12.4100 | 50 | 0.3926 | 26 |
| 12.4200 | 50 | 0.3926 | 26 |
| 12.4300 | 50 | 0.3926 | 26 |
| 12.4400 | 50 | 0.3926 | 26 |
| 12.4500 | 50 | 0.3926 | 26 |
| 12.4600 | 50 | 0.3926 | 26 |

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างข้อมูลจาก Block Diagram

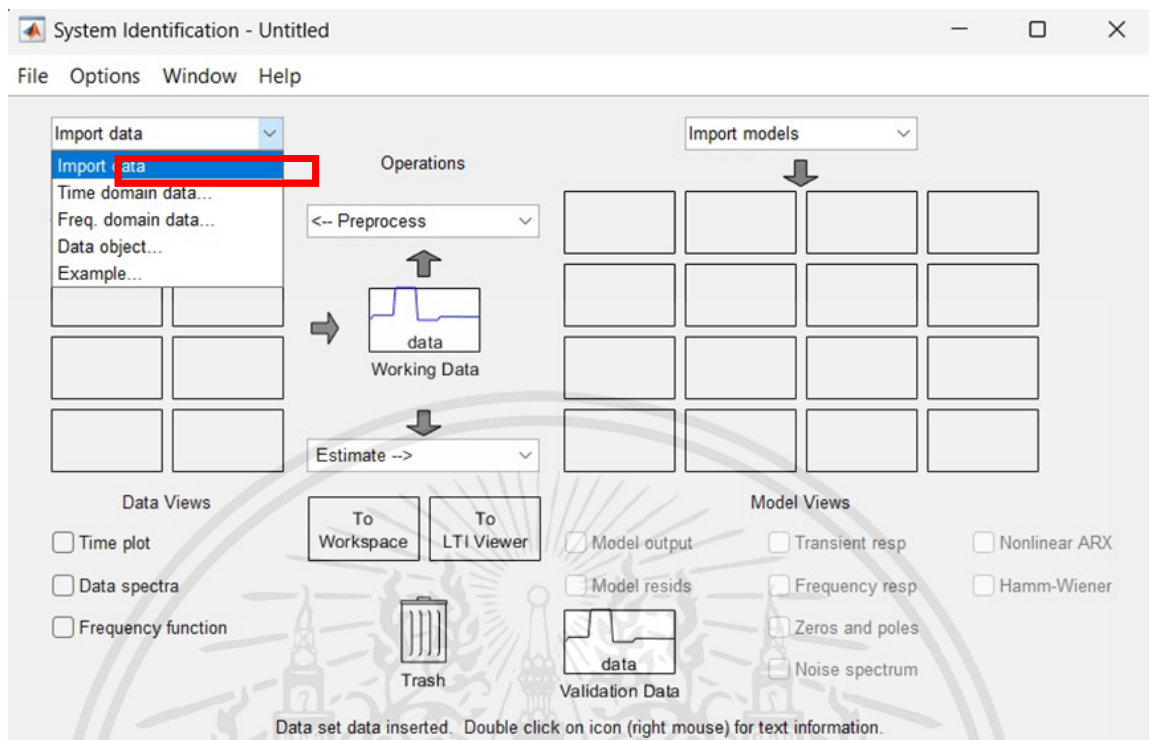
3.3.2 วิธีการสร้างแบบจำลอง

1) ขั้นตอนที่หนึ่งทำการเปิด Application บน MATLAB ที่ชื่อว่า App System Identification ซึ่งเป็น App ที่ใช้ช่วยระบุเอกลักษณ์โมเดลจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถเปิดได้ตามรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการเปิดฟังก์ชัน System Identification

2) ทำการเลือกประเภทของข้อมูลที่จะทำการนำเข้า ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลประเภท Time domain data แสดงอยู่ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 เลือกประเภทข้อมูลนำเข้าที่ใช้

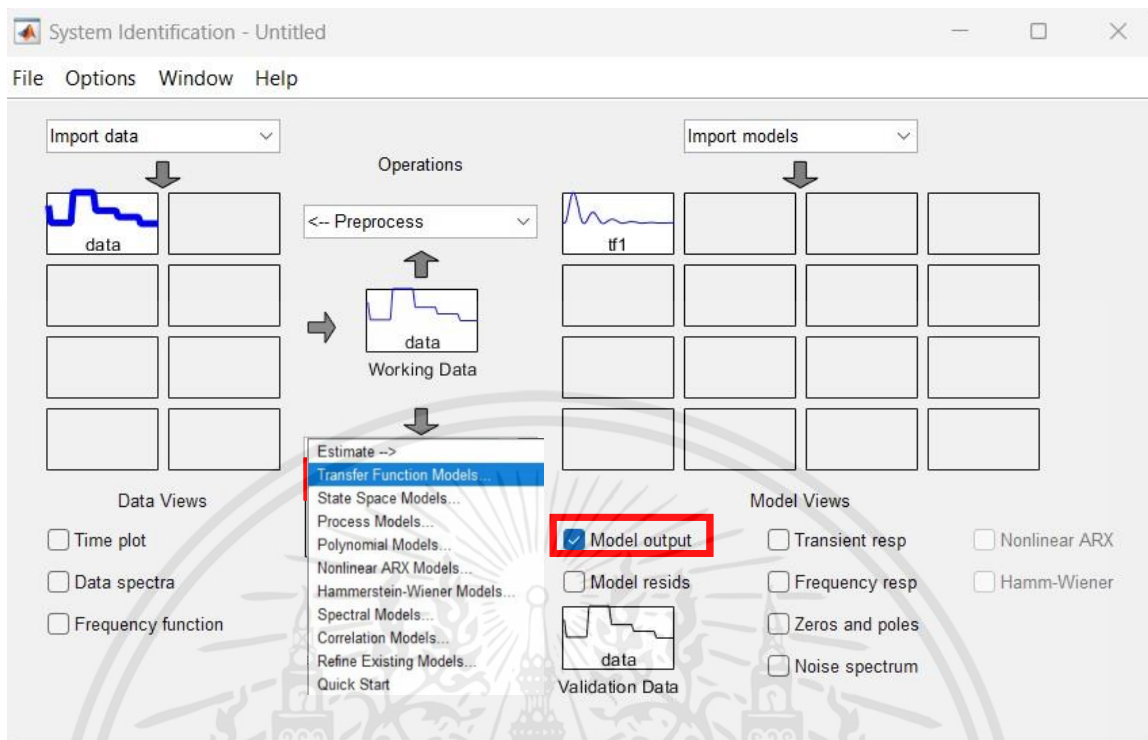
3) หลังจากเลือก Time domain data เป็นประเภทของข้อมูลที่จะนำเข้า จากนั้นจะทำการป้อนตัวแปรข้อมูลที่ทำกรเก็บมาใส่ลงไปในโปรแกรมดังรูปที่ 3.10 โดยมี Input เป็น u และ Output เป็น y ชื่อข้อมูลที่ทำกรเป็น Data โดยจะเริ่มประมวลผลข้อมูลที่ 0 s และ Sample time 0.1 s แล้วกด Import

The screenshot shows the 'Import Data' dialog box with the following settings:

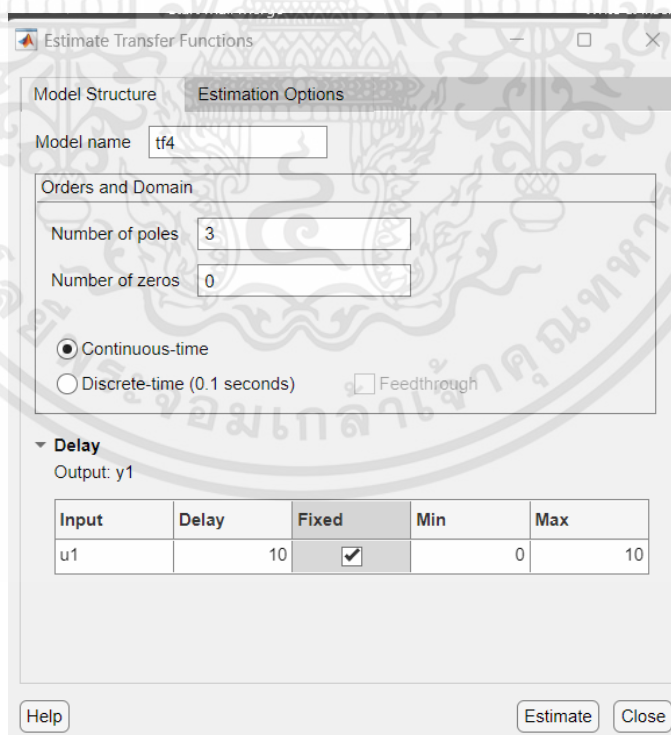
- Data Format for Signals:** Time Domain Signals
- Workspace Variable:** Input: u, Output: y
- Data Information:** Data Name: data, Start Time: 0, Sample time: 0.1
- Buttons:** Import, Reset, Close, Help

รูปที่ 3.10 ป้อนค่าที่ใช้ในการปรับค่า

4) เมื่อทำการ import ข้อมูลแล้วจะแสดงข้อมูลได้ดังรูปที่ 3.11 ในขั้นตอนถัดไปจะทำการเลือกวิธีการประมวลผล ซึ่งในการเก็บข้อมูลในครั้งนี้เลือกเป็น Transfer function models หลังจากเลือกประเภทของ Output ที่ต้องการแล้วจะทำการตั้งค่าง่อนจะทำการ Estimate ซึ่งการตั้งค่านั้นจะทำการเลือก Poles เป็น 3 เนื่องจากแบบจำลอง 3 ถึงเป็น Third-order และตั้งค่า Delay กับ Max เท่ากับ 10 ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 เลือกประเภทของข้อมูลที่จะได้รับ

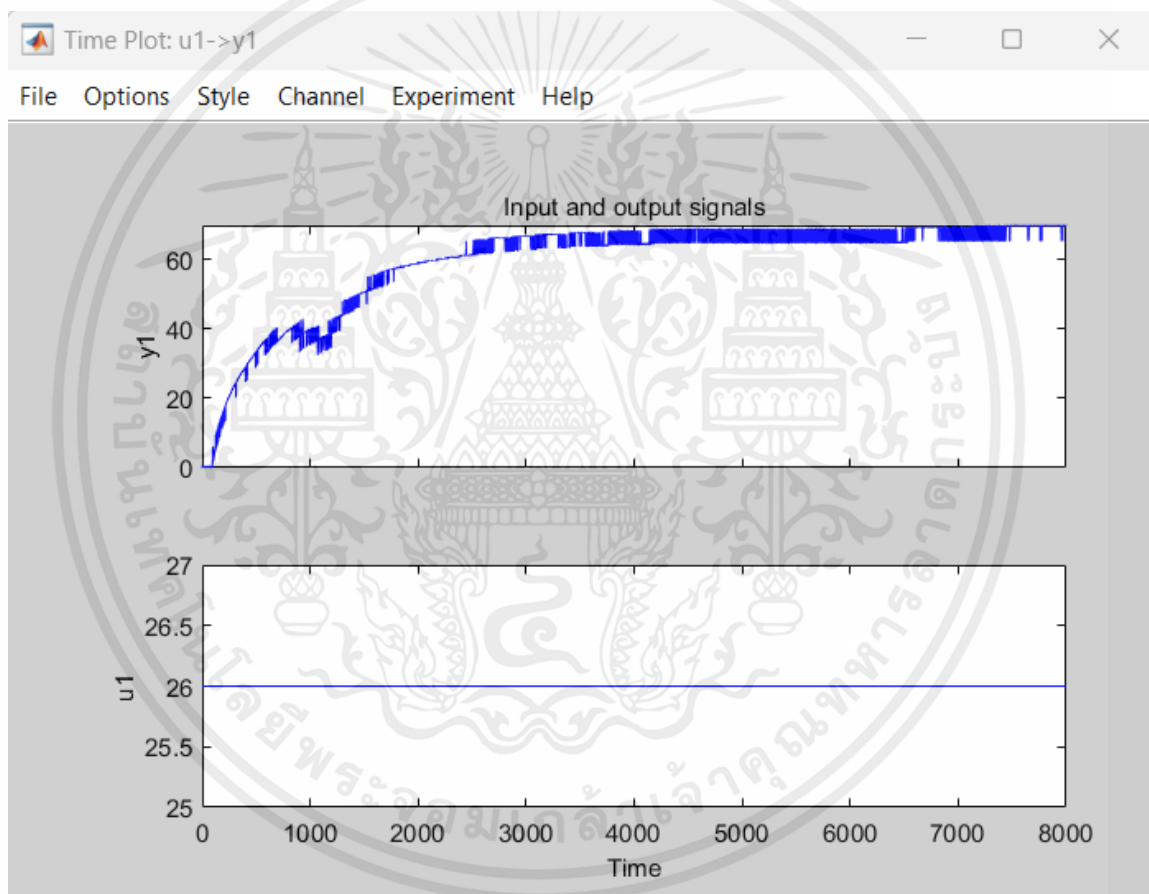


รูปที่ 3.12 ตั้งค่าข้อมูลที่จะได้รับแบบละเอียด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

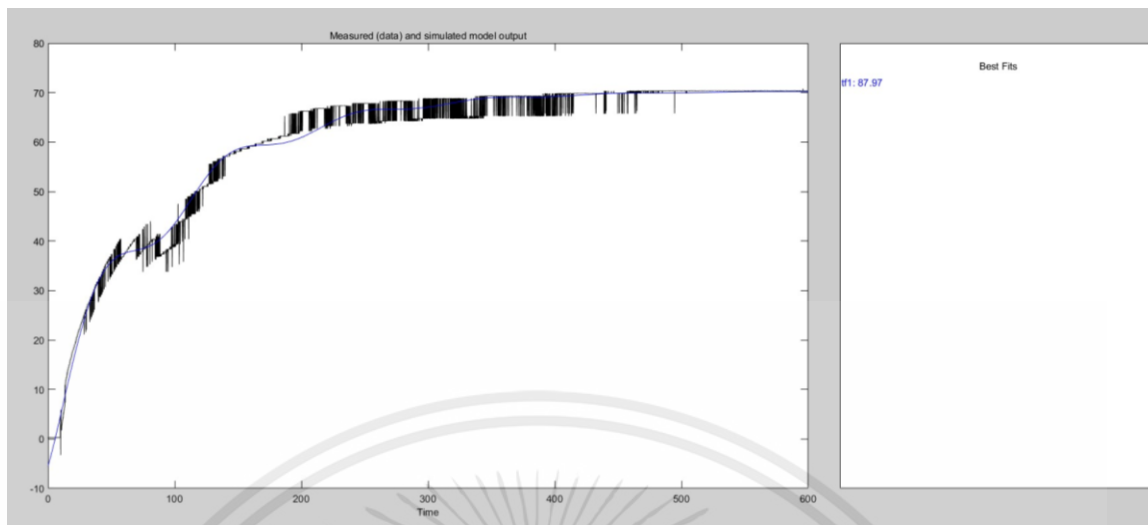
5) หลังจากการประมวลผลของโปรแกรมจะได้กราฟที่แสดงเอกลักษณ์โมเดลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังรูปที่ 3.15 ซึ่งจะมีค่า Best fit หรือค่าความใกล้เคียงกับระบบจริงอยู่ที่ 87.97 % และนอกเหนือจากนี้ยังได้สมการ Transfer Function ออกมาดังนี้และจะแสดงขึ้นมาดังรูปที่ 3.15 จากสมการ (2.20)

$$\frac{H_3(s)}{F_1(s)} = \frac{0.0001115}{s^3 + 0.03034s^2 + 0.004095s + 4.121e-05} \cdot e^{-10s} \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.13 กราฟผลการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกราฟของสัญญาณควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ผลการจำลองและกราฟเปรียบเทียบความเหมือนของการจำลอง

Data/model Info: tf1

Model name: tf1

Color: [0,0,1]

From input "u1" to output "y1":

$$\exp(-10s) \cdot \frac{0.0001115}{s^3 + 0.03034 s^2 + 0.004095 s + 4.121e-05}$$

Name: tf1
 Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
 Number of poles: 3 Number of zeros: 0

Diary and Notes

```
% Details about Estimation Data
% Import data

% Transfer function estimation
Options = tfestOptions;
Options.EnforceStability = true;

np = 3;
nz = 0;
num = arrayfun(@(x)NaN(1,x), nz+1, 'UniformOutput', false);
```

Show in LTI Viewer

Present Export Close Help

รูปที่ 3.15 โมเดลจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบน้ำ 3 ถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 PID Tuning

นำโมเดลจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบน้ำ 3 ถังของระบบที่ได้มาทำการปรับค่าด้วยวิธีการ Self-Oscillation จะได้ค่าของการควบคุม PI เพื่อหาค่าสูงสุดจากกราฟ ได้ผลเป็นค่า $k = 0.6$ และค่า $P_{cr} = 107.85$ และนำผลที่ได้ไปใช้ในการหาค่าต่อไปนี้ โดยมีตารางที่ เป็นตารางอ้างอิงในการคำนวณค่าซึ่งค่า P_{cr} จะสามารถหาได้จากการนำค่าพิกของกราฟทั้ง 2 ค่า ดังรูปที่ 3.17 มาหาผลต่างซึ่ง P_{cr} ที่ได้มีค่าเท่ากับ 107.85 ได้ค่า P_{cr} จะนำมาหาค่า K_p, T_i จะได้ค่า $K_p = 0.27$ และ $K_i = 0.00300417$ และเมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมตามทฤษฎีแล้ว จึงนำไปสร้าง Closed loop Block Diagram เพื่อจำลองการควบคุมและเก็บค่าสัญญาณตัวควบคุมได้ดังรูปที่ 3.16, 3.19 ตามลำดับโดยสัญญาณตัวควบคุมที่เป็นจะมี 3 ประเภท คือ Error, Derivative of error และ Control signal และได้ค่าของผลตอบสนองการควบคุมแบบ PI controller เป็นดังรูปที่ 3.18

ตารางที่ 3.1 Self-Oscillation Tuning Mode

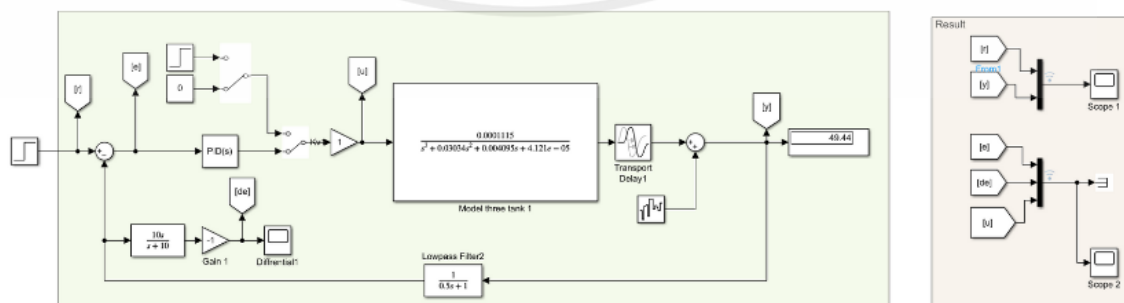
| Control type | K_p | T_i | T_d |
|----------------|--------------|----------------|---------------|
| P Controller | $0.5K_{cr}$ | - | - |
| PI Controller | $0.45K_{cr}$ | $P_{cr} / 1.2$ | - |
| PID Controller | $0.6K_{cr}$ | $0.5P_{cr}$ | $0.125P_{cr}$ |

$$P_{cr} = 107.85$$

$$K_p \text{ จากสมการ } k_p = 0.45k \text{ ได้ค่าเท่ากับ } 0.27$$

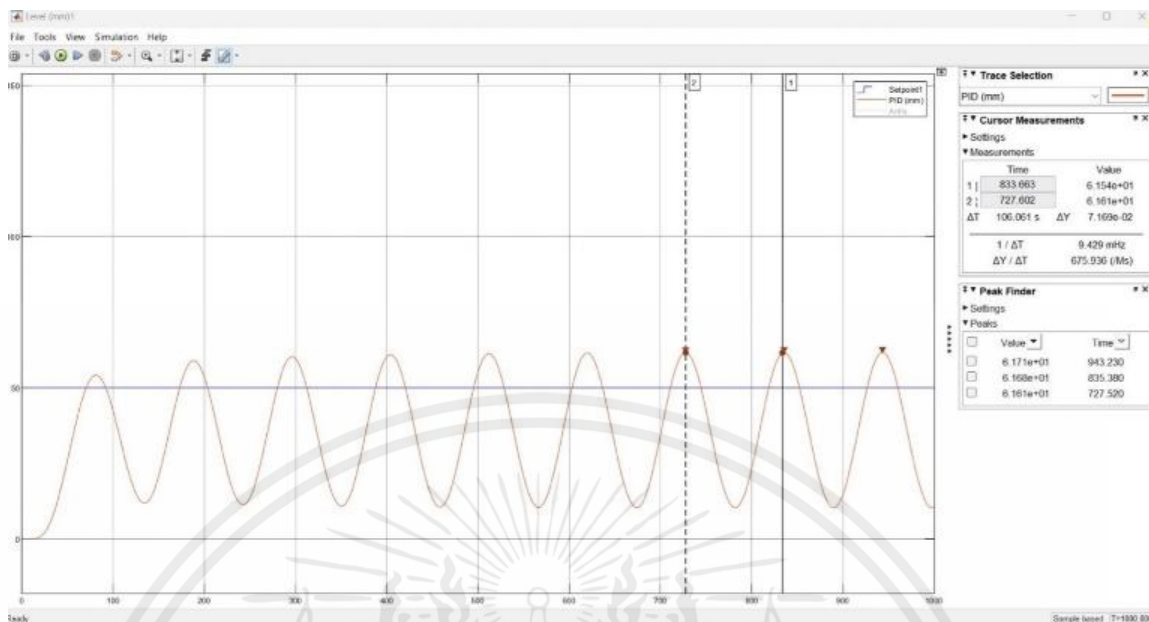
$$T_i \text{ จากสมการ } T_i = \frac{P_{cr}}{1.2} \text{ ได้ค่าเท่ากับ } 89.875$$

$$K_i \text{ จากสมการ } k_i = \frac{k_p}{\tau_i} \text{ ได้ค่าเท่ากับ } 0.00300417$$

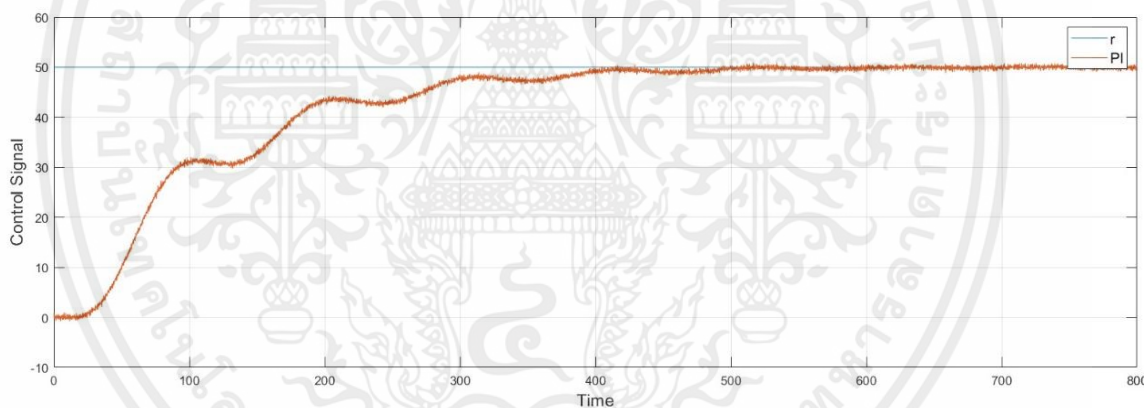


รูปที่ 3.16 Block Diagram Simulation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

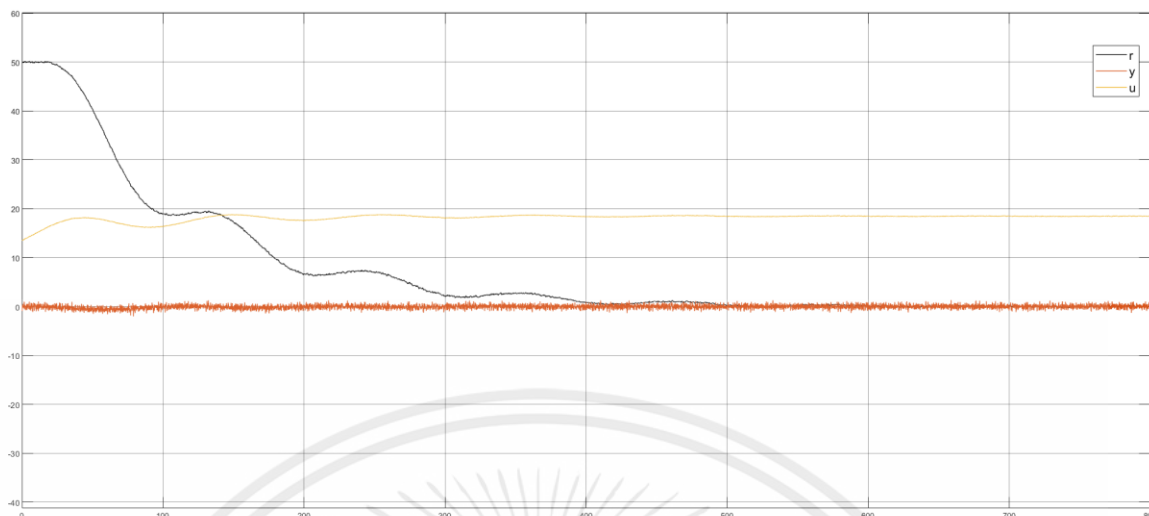


รูปที่ 3.17 กราฟแสดงผลตอบสนองขณะกระบวนการ Oscillation



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงผลตอบสนองระบบปิดของตัวควบคุม PI ด้วยวิธี Self-oscillation

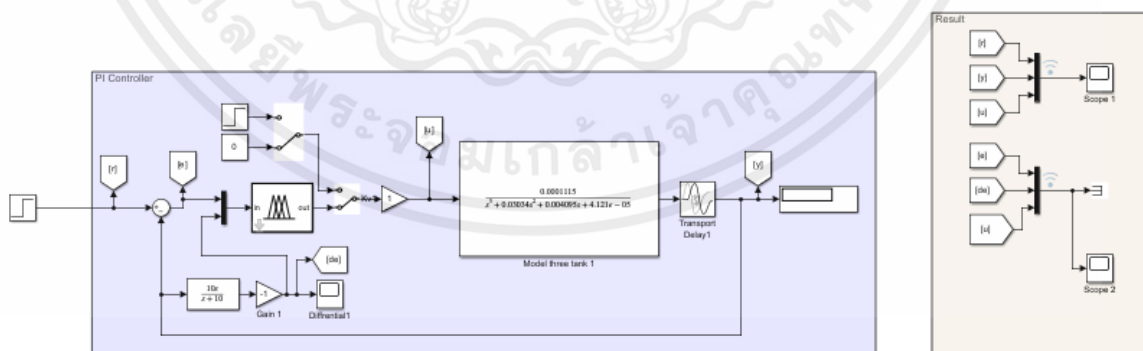
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



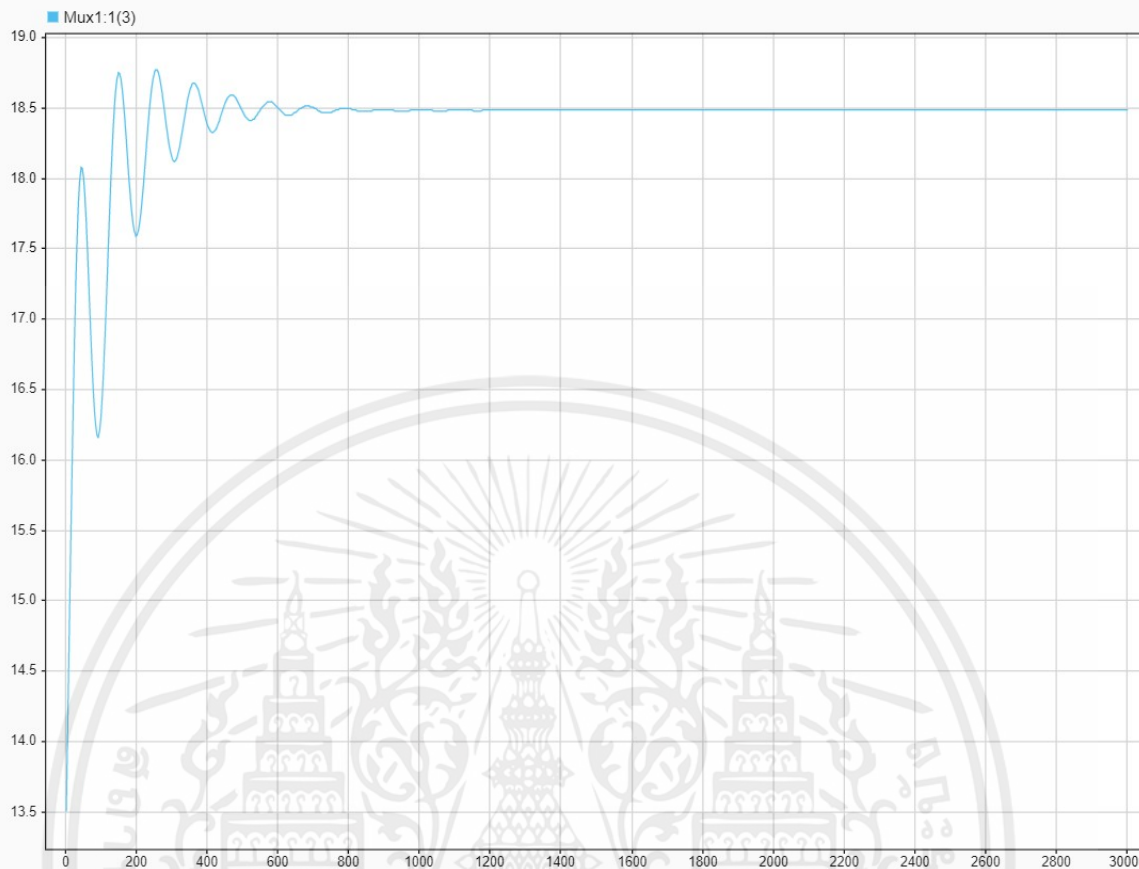
รูปที่ 3.19 กราฟการเก็บข้อมูล Error, Derivative of error, Control signal

3.4.2 ANFIS

เมื่อได้ค่าของพารามิเตอร์ PID มาแล้วจากนั้นจะทำการเก็บค่า Input ของ PID ตามรูปที่ 3.13 มาเก็บค่าใน Workspace และนำมาทำการเข้า App Neuro-Fuzzy Designer เพื่อทำการโปรแกรมให้ตัวควบคุมมีการเรียนรู้ค่าโดยจะมีการเลือก Membership ของ Input ที่ 5 กับ 3 และมีการเลือกกฎในการใช้วิเคราะห์เงื่อนไขแบบสามเหลี่ยมตาม รูปที่ 3.26 จากนั้นทำการโหลดข้อมูลจาก Workspace และทำการ Epochs 100 ครั้งจะได้ Error ออกมาเท่ากับ 0.27665 ดังรูปที่ 3.24 หลังจากนั้นสร้าง Block Diagram เพื่อทำการ Simulation จะได้ผลออกมาเป็นกราฟดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.20 Block Diagram การควบคุมและเก็บค่าของการจำลองการควบคุมแบบปิดของตัวควบคุม ANFIS

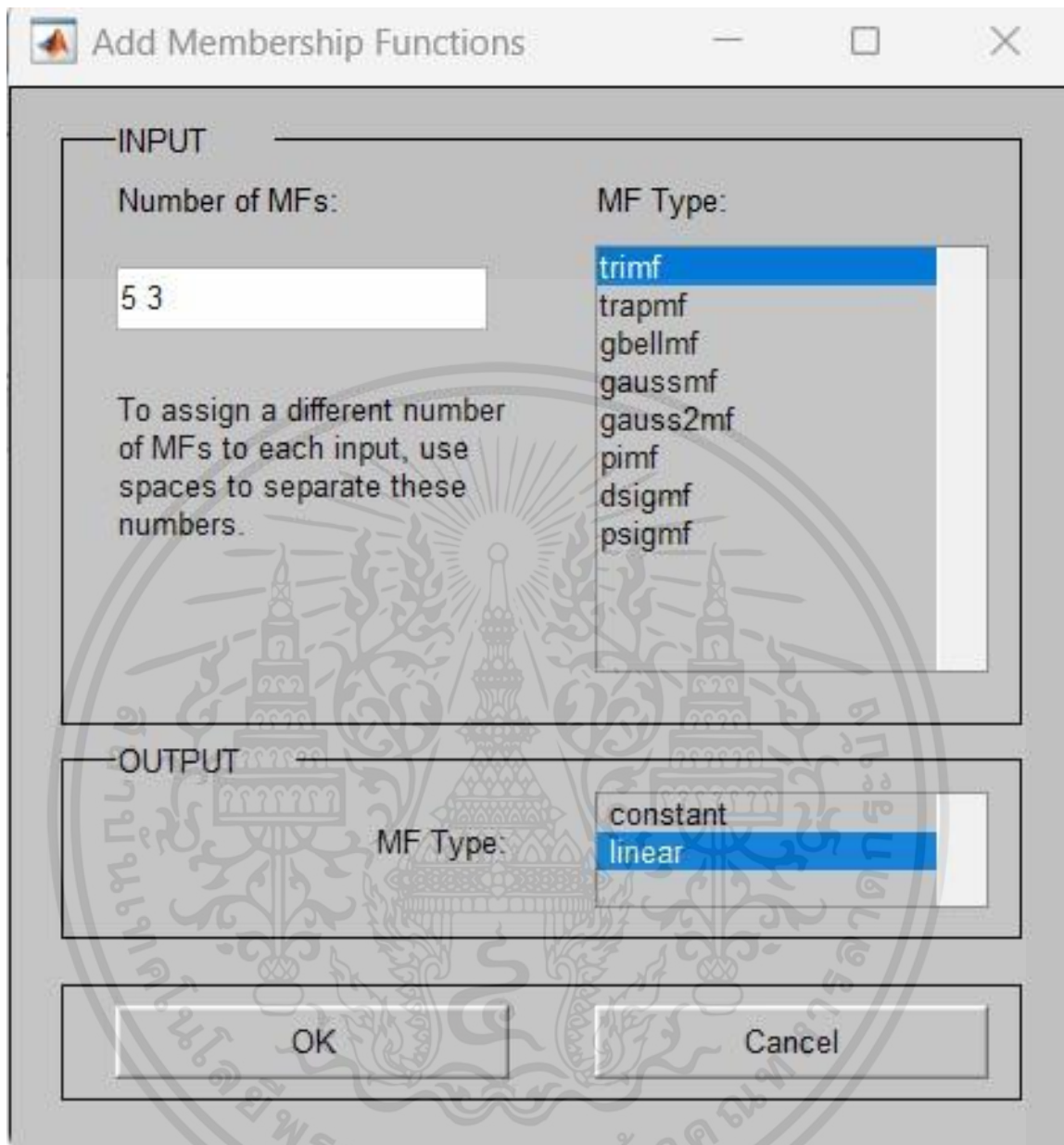


รูปที่ 3.21 กราฟแสดงสัญญาณตัวควบคุม

| | Name | Value |
|---|---------------------------------|----------------------------------|
| 1 | <code>e=data.data(:,1);</code> | <code>1x1 double times...</code> |
| 2 | <code>de=data.data(:,2);</code> | <code>30001x1 double</code> |
| 3 | <code>u=data.data(:,3);</code> | <code>30001x1 double</code> |
| 4 | <code>dataset=[e de u]</code> | <code>30001x3 double</code> |
| 5 | | |

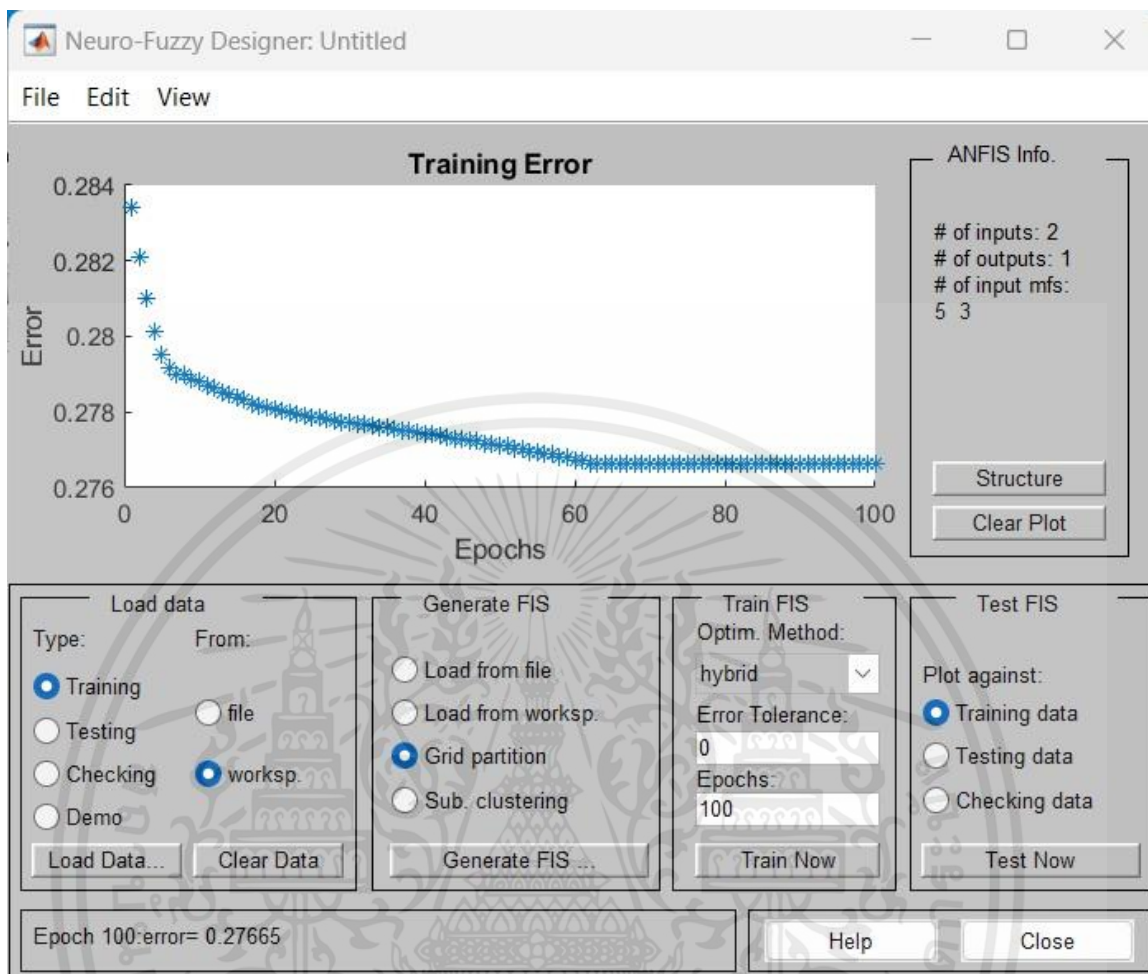
รูปที่ 3.22 การแสดงโค้ดและไฟล์ที่ซึ่บนหน้าต่าง Workspace

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

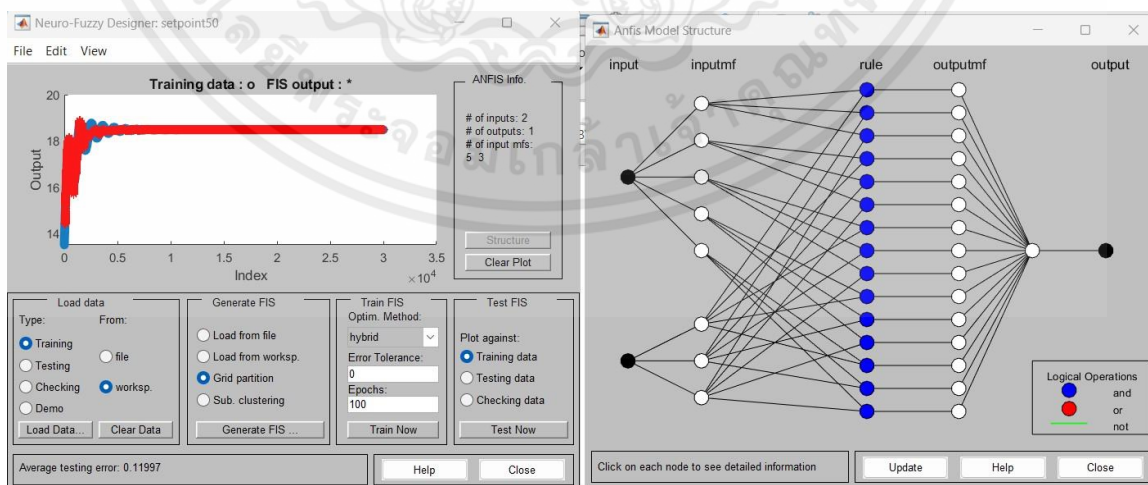


รูปที่ 3.23 Training and checking curves of data

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

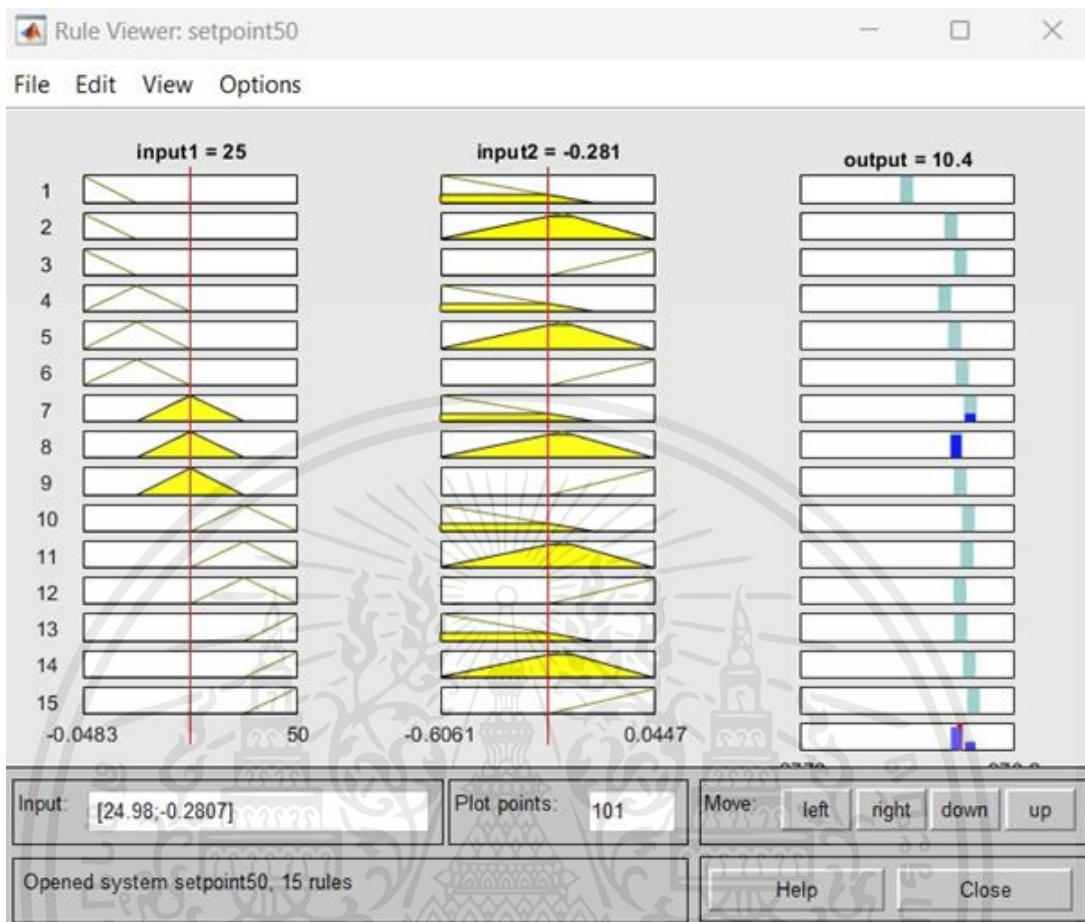


รูปที่ 3.24 ANFIS Tri model

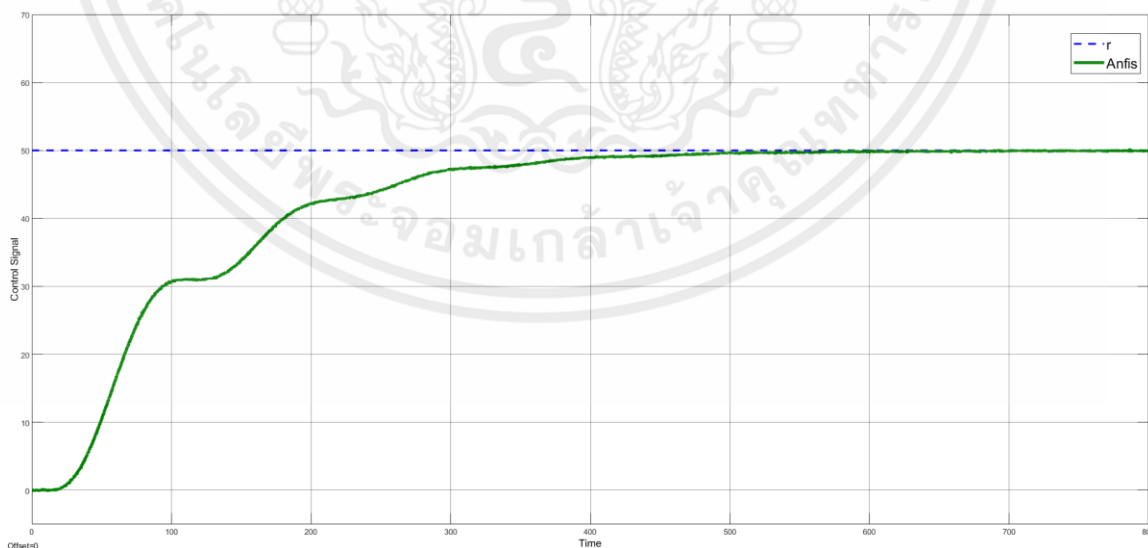


รูปที่ 3.25 App Neuro-Fuzzy Designer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

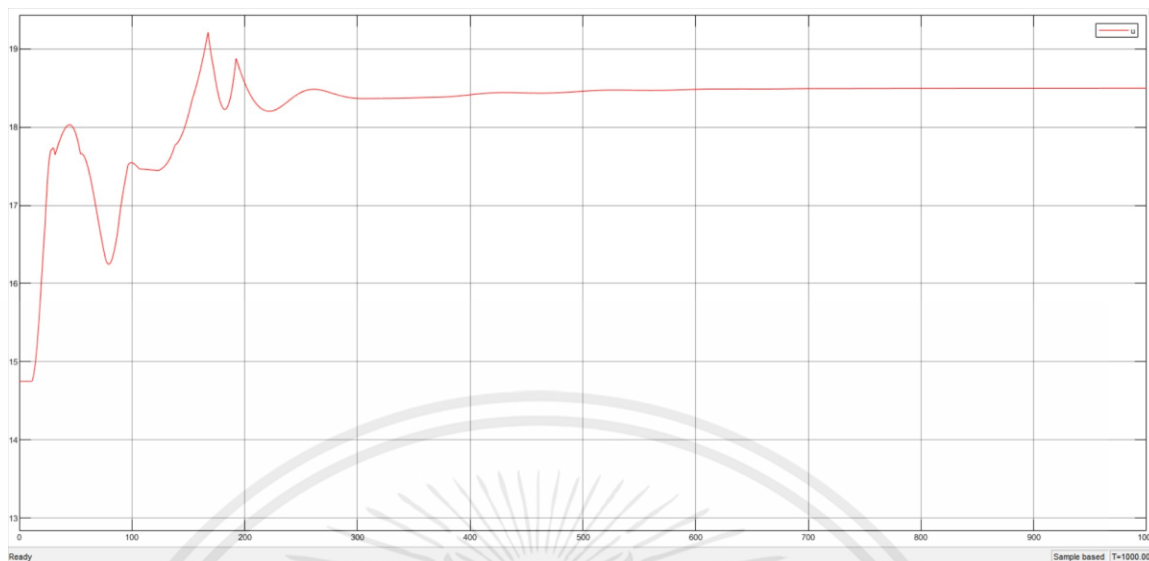


รูปที่ 3.26 ANFIS rules structure



รูปที่ 3.27 กราฟแสดงผลของระบบควบคุม ANFIS บน MATLAB/SIMULINK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

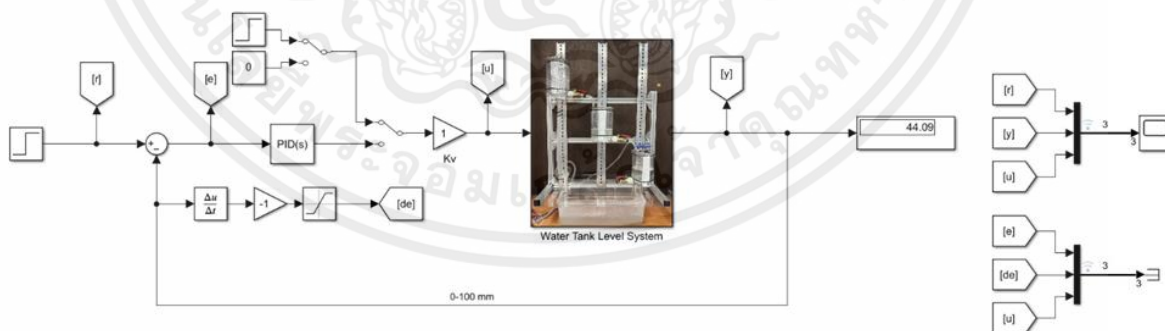


รูปที่ 3.28 กราฟแสดงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม ANFIS ในการจำลองบน MATLAB/SIMULINK

3.5 การจำลองตัวควบคุมกับกระบวนการจริง

3.5.1 การจำลองตัวควบคุม PID กับกระบวนการจริง

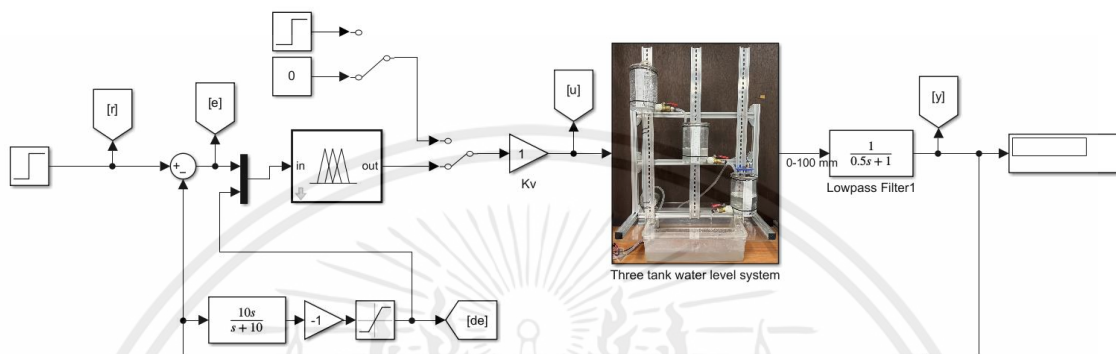
จากรูปที่ 3.29 จะเป็นแบบจำลองระบบปิดของฮาร์ดแวร์แบบวนซ้ำของตัวควบคุม PI ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PI จะได้มาจากการคำนวณตามทฤษฎีของ Self-Oscillation จากรูปจะมีการเก็บข้อมูลของสัญญาณควบคุมเพื่อนำไปใช้เป็นตัวแบบสำหรับตัวควบคุม ANFIS



รูปที่ 3.29 แบบจำลองระบบปิดของฮาร์ดแวร์แบบวนซ้ำของตัวควบคุม PI

3.5.2 การจำลองตัวควบคุม ANFIS กับกระบวนการจริง

จากรูปที่ 3.31 จะเป็นแบบจำลองระบบปิดของฮาร์ดแวร์แบบวนซ้ำของตัวควบคุม ANFIS โดยจะมีการนำสัญญาณของ Error และ Derivative of error มาใช้เป็น Input ของตัวควบคุม



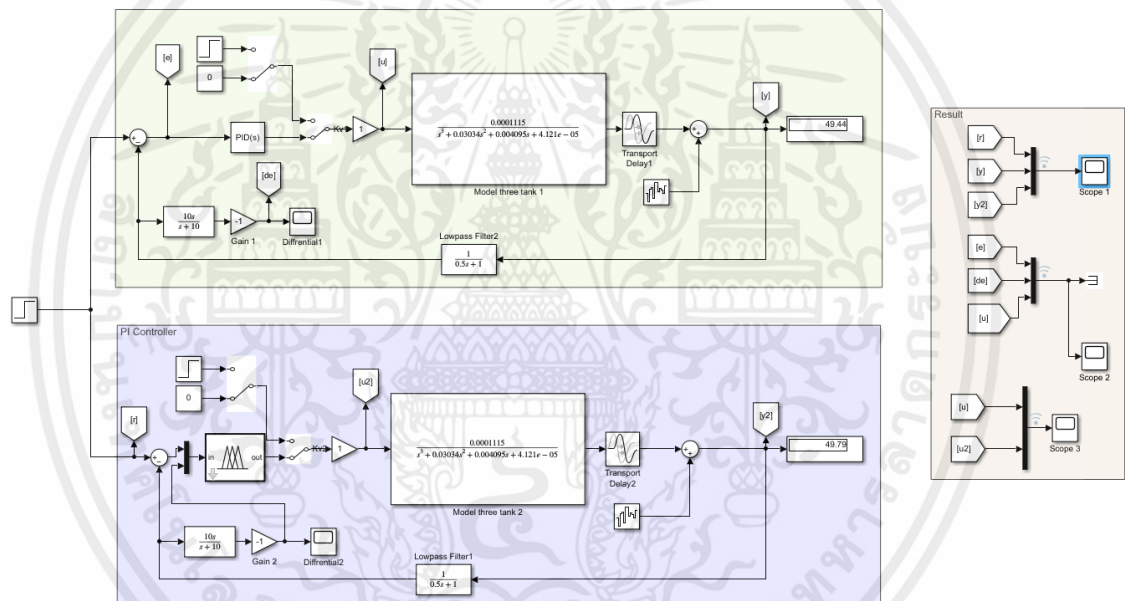
รูปที่ 3.30 แบบจำลองระบบปิดของฮาร์ดแวร์แบบวนซ้ำของตัวควบคุม ANFIS

บทที่ 4

การนำเสนอผลของข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการทดลองระบบควบคุมระดับน้ำด้วยการควบคุมแบบ PID และ ANFIS

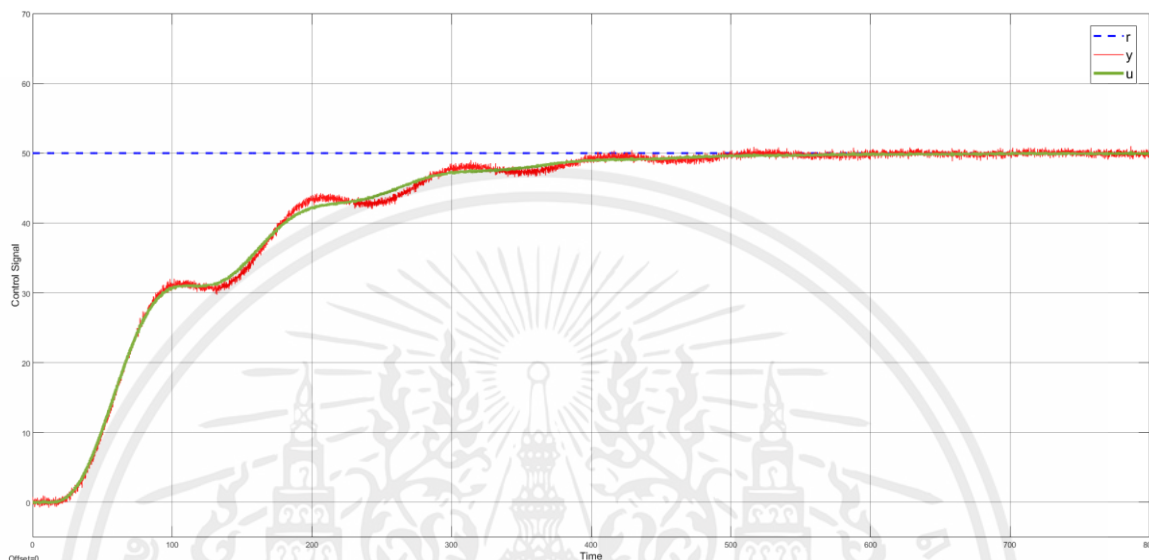
จากการทดลองจำลองระบบควบคุมระดับน้ำด้วยโปรแกรม MATLAB/SIMULINK ได้มีการสร้างการจำลองระบบปิดโดยมีการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้เปรียบเทียบตัวควบคุม PI และตัวควบคุม ANFIS ได้ออกมาดังรูปที่ 4.1



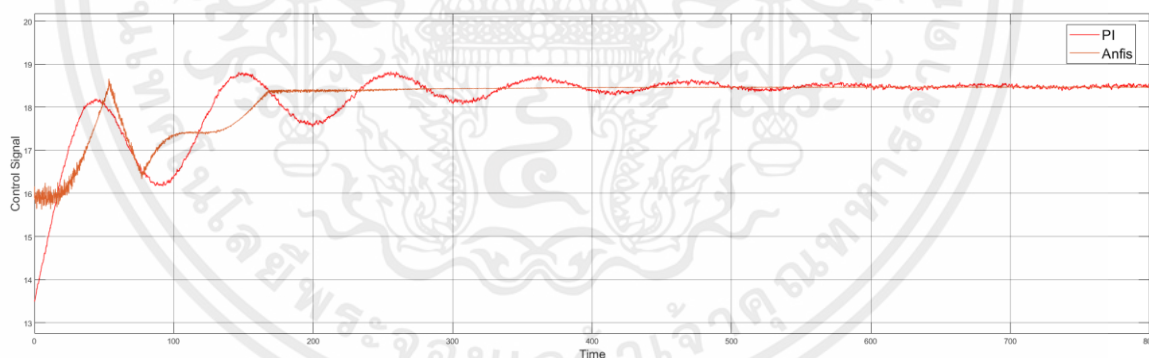
รูปที่ 4.1 Block Diagram Simulation

จากรูปที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของตัวควบคุม PI เปรียบเทียบกับ ANFIS โดยกราฟเส้นสีแดงเป็นผลตอบสนองของตัวควบคุม PI และเส้นสีเขียวเป็นผลตอบสนองของตัวควบคุม ANFIS และจากรูปที่ 4.3 จะเป็นการผลของสัญญาณควบคุม PI เปรียบเทียบกับ ANFIS โดยจากผลการจำลองจะเห็นว่าผลตอบสนองของตัวควบคุม ANFIS จะมีค่าของ Settling time เท่ากับ 786 s ค่า %Overshoot เท่ากับ 2% ซึ่งมีค่าเท่ากับตัวควบคุมแบบ PI แต่จะมีค่า Rise time ที่แตกต่างกันโดยตัวควบคุมแบบ

ANFIS มีค่าเท่ากับ 217 s และ PI มี Rise time เท่ากับ 228 s ทำให้ตัวควบคุม ANFIS มีค่าของ Rise time น้อยกว่าตัวควบคุมแบบ PI ดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลตอบสนองของตัวควบคุม PID เปรียบเทียบกับ ANFIS



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลของสัญญาณควบคุม PID เปรียบเทียบกับ ANFIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

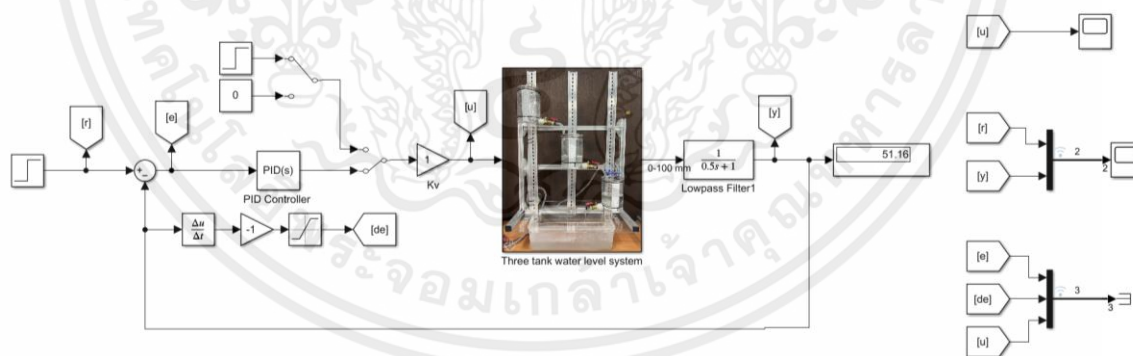
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบ Performance ของตัวควบคุม PI เทียบกับตัวควบคุม ANFIS

| Performance | PI | ANFIS |
|---------------|-----|-------|
| Rise time | 228 | 217 |
| Settling time | 786 | 786 |
| %Overshoot | 2 | 2 |

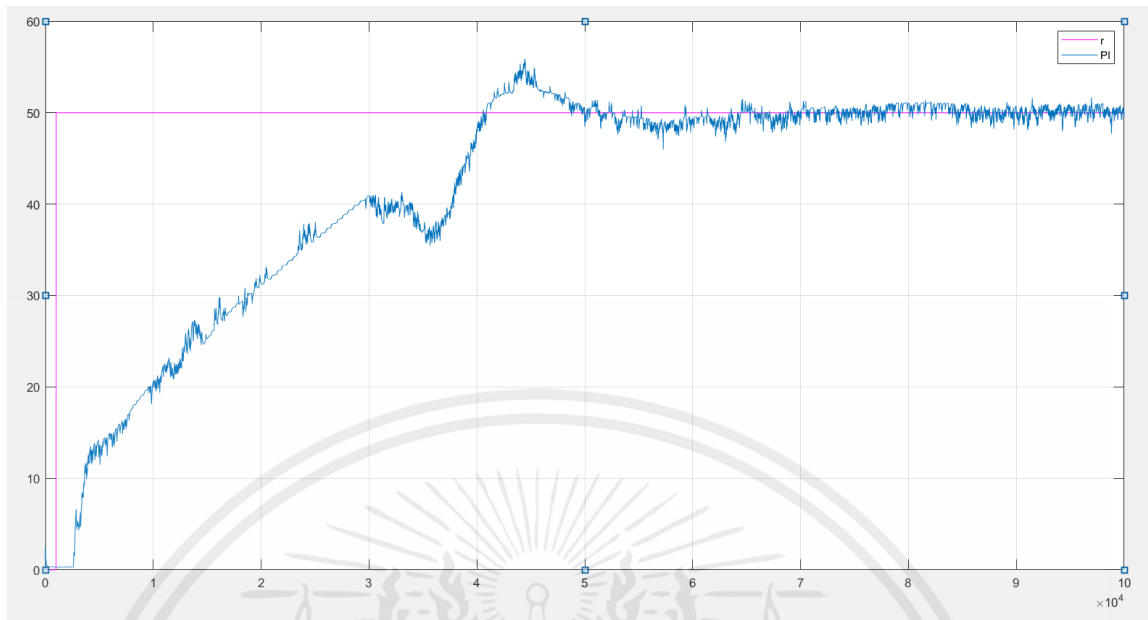
4.2 ผลการทดลองระบบควบคุมระดับน้ำด้วยการควบคุมแบบ PID และ ANFIS ในระบบจริง

4.2.1 ผลการทดลองการควบคุมระบบด้วยตัวควบคุม PI

จากรูปที่ 4.4 จะเป็นแบบจำลองระบบปิดของระบบควบคุมแบบ PI บนแบบจำลองจริง ซึ่งในการทดลองนำตัวควบคุม PI มาทำการควบคุมระดับน้ำนั้นได้มีการตั้งค่าการเก็บผลตอบสนองของตัวควบคุมที่ 1000 s โดยการควบคุมในครั้งนี้ได้ทำการตั้งค่าเป้าหมายของการควบคุมระดับน้ำอยู่ที่ 50 mm เมื่อเริ่มทำการทดลองจนครบเวลาจะได้กราฟที่แสดงผลตอบสนองของตัวควบคุม PI ดังรูปที่ 4.5 ซึ่งจะมีค่า Rise time เท่ากับ 289 s ค่า Settling time เท่ากับ 564 s และ %Overshoot เท่ากับ 11% แสดงดังตารางที่ 4.2



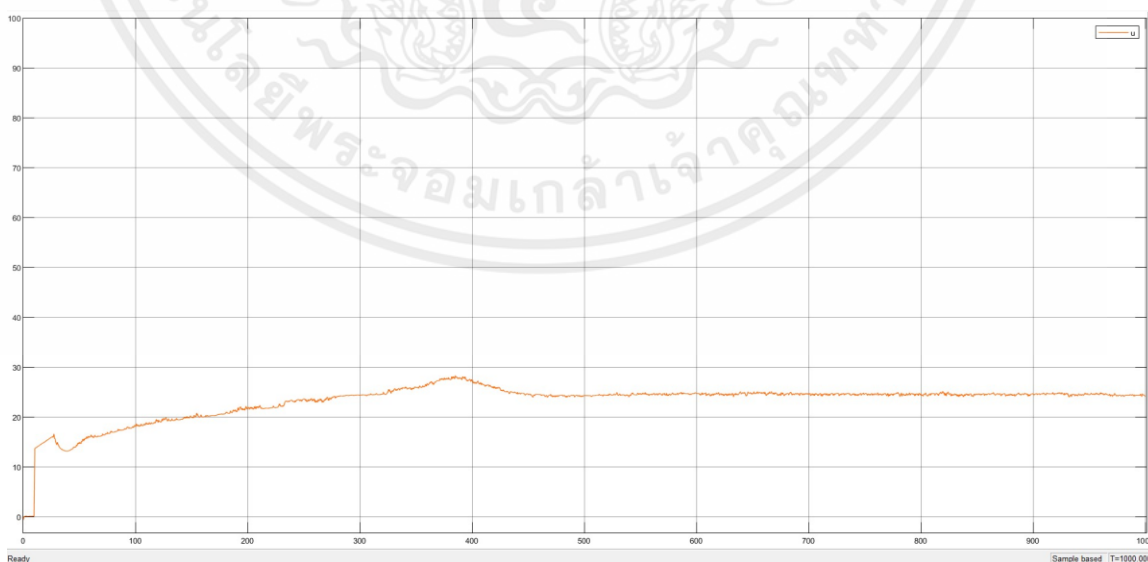
รูปที่ 4.4 แบบจำลองระบบปิดของระบบควบคุมแบบ PI บนแบบจำลองจริง



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลของระบบควบคุม PI บนแบบจำลองจริง

ตารางที่ 4.2 ตาราง Performance ของตัวควบคุม PI ทดลองกับระบบจริง

| Performance | PI |
|---------------|-----|
| Rise time | 289 |
| Settling time | 564 |
| %Overshoot | 11 |

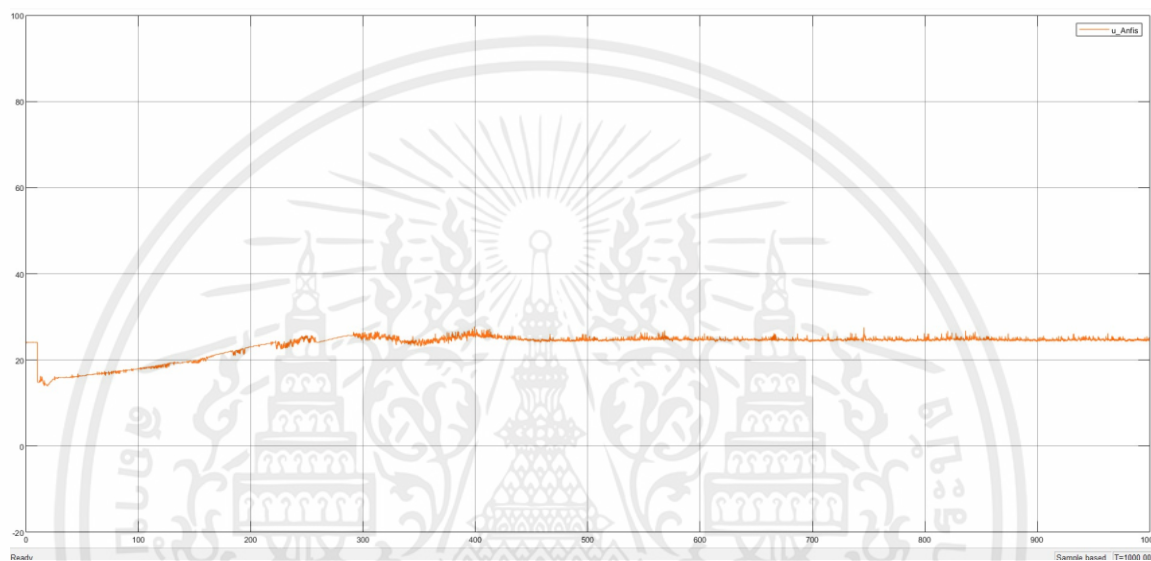


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงสัญญาณควบคุมของตัวควบคุม PI บนแบบจำลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 Performance ของตัวควบคุม ANFIS ทดลองกับระบบจริง

| Performance | ANFIS |
|---------------|-------|
| Rise time | 252 |
| Settling time | 397 |
| %Overshoot | 3 |



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงสัญญาณควบคุมของ ANFIS controller บนแบบจำลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการจำลองการศึกษาระบบอนุกรมพีซซีแบบปรับตัวได้กับระบบควบคุมระดับน้ำ 3 ถึง สามารถทำการโมเดลระบบควบคุมระดับน้ำจากการเก็บค่าอินพุตและเอาต์พุต แล้วนำข้อมูลที่เก็บได้ไปใส่ใน App system Identification ใน MATLAB พบว่าสามารถทำการหาแบบจำลองของระบบที่มีความใกล้เคียงกับระบบจริงได้ และนำแบบจำลองนี้ไปทำการทดลองกับตัวควบคุมแบบ PI เพื่อทำการเก็บข้อมูลตัวอย่างเพื่อเป็นต้นแบบในการนำไปสอนให้กับตัวควบคุม ANFIS ซึ่งหลังจากการสอนให้กับตัวควบคุม ANFIS แล้ว พบว่าตัวควบคุมแบบ ANFIS สามารถควบคุมระดับได้ตามที่ต้องการ แต่ยังมีข้อผิดพลาด จึงสรุปว่าการออกแบบตัวควบคุมแบบ ANFIS นั้นจำเป็นต้องมีการสอนให้ตัวควบคุมรู้จักกรณีหรือข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบให้มากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการควบคุม โดยครั้งนี้ตัวควบคุม ANFIS สามารถควบคุมได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบ PI ที่ Overshoot และ setting time เปรี่เช่นค่าพุ่งเกิน และเวลาเข้าสู่สมดุล

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. ตัวควบคุมแบบ Adaptive Neuro-Fuzzy นั้นมีความยากในการศึกษาและทดลองซึ่งการนำไปเขียนลงบน Raspberry Pi Pico w นั้นต้องมีความรู้ความเข้าใจในระดับหนึ่ง
2. ในการสร้างฮาร์ดแวร์เพื่อสร้างชุดจำลองนั้นต้องทำให้เซ็นเซอร์นิ่งเพื่อการตอบสนองที่มีประสิทธิภาพ
3. พบปัญหาการควบคุมค่าที่ทำการป้อนในตัวควบคุมแบบ Adaptive Neuro-Fuzzy อาจจะทำให้ระบบเรียนรู้น้อยเกินไปทำให้ค่าผลการควบคุมไม่เข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้
4. ปัญหาจากการใช้ MATLAB ในการเก็บค่าซึ่งมีความยุ่งยากและซับซ้อน หลายขั้นตอนจึงทำให้เกิดความขัดข้องทางโปรแกรม
5. ในการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมกับกระบวนการจริง มีความยากในระดับหนึ่ง จึงทำให้การศึกษานี้ได้ผลไม่ตรงตามวัตถุประสงค์ตามที่ตั้งไว้
6. เมื่อการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมกับกระบวนการจริงไม่เป็นผลสำเร็จ จึงทำให้ในการออกแบบส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (Graphical User Interface, GUI) ไม่สามารถดำเนินการต่อไปได้

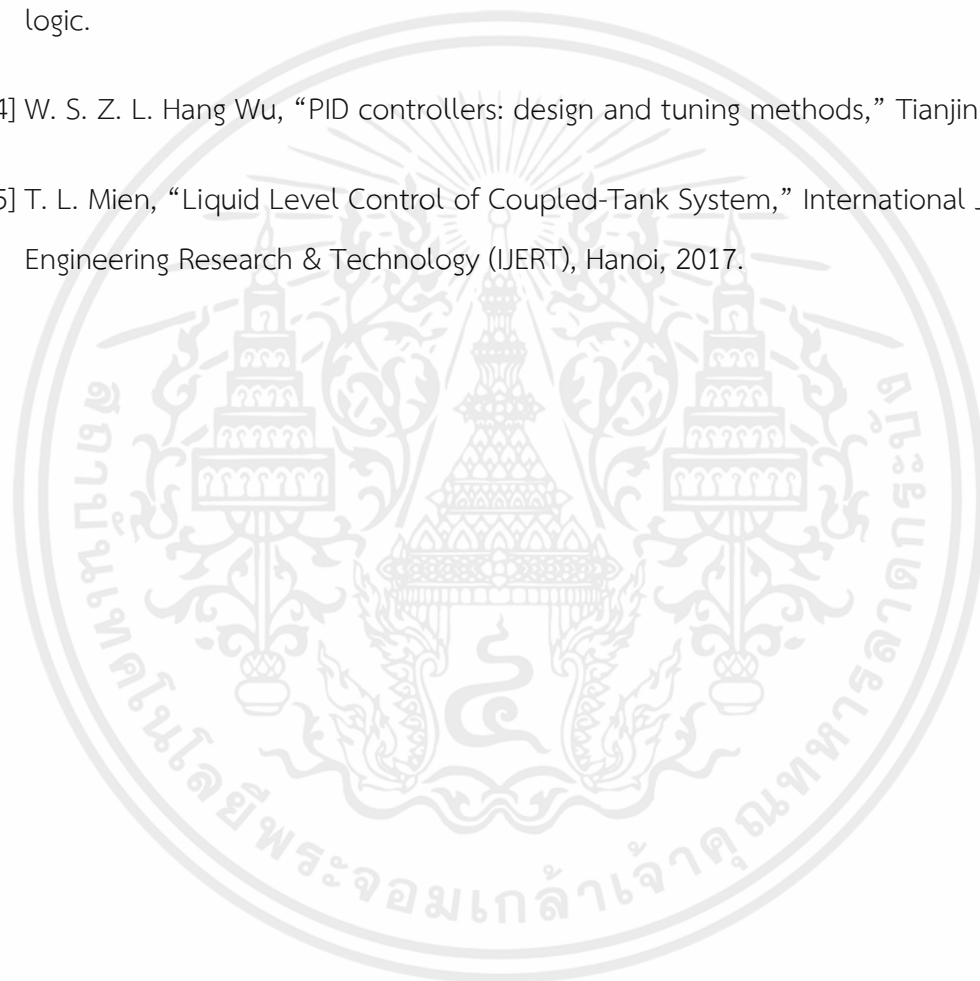
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] L. A. ZADEH, "Fuzzy sets," California, 1965.
- [2] Geeksforgeeks, "Fuzzy Logic | Introduction," [ออนไลน์]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/fuzzy-logic-introduction/>.
- [3] V. A. a. S. Riyadi, "Comparison of Different Rule Base Matrix in Fuzzy," 2020.
- [4] teamques10, "Explain Defuzzification and its methods," ques10, [ออนไลน์]. Available: <https://www.ques10.com/p/47718/explain-defuzzification-and-its-methods-1/>.
- [5] J.-S. R. Jang, "ANFIS : Adaptive-Ne twork-Based Fuzzy," IEEE, 1993.
- [6] L. Hardesty, "Explained: Neural networks," MIT News Office, 14 April 2017. [ออนไลน์]. Available: <https://news.mit.edu/2017/explained-neural-networks-deep-learning-0414>.
- [7] "PID controller," 9engineer, [ออนไลน์]. Available: http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2311.
- [8] G. Ellis, "The Ziegler–Nichols Method," ใน *Control System Design Guide (Fourth Edition)*, 2012, p. 111.
- [9] "MATLAB," scholarpedia, [ออนไลน์]. Available: <http://www.scholarpedia.org/article/MATLAB>.
- [10] Maruthai Suresh, Gunna Jeersamy Srinivasan, Ranganathan Rani Hemamalini, "Integrated Fuzzy Logic Based," SERBIAN JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, 2009.
- [11] C. K. Thirupura Sundari, "Optimal Controller tuning of a PI controller for a three tank non-interacting Process," *International Conference on Power, Energy, Control and*

Transmission Systems, 2020.

- [12] “Ziegler Nichols Method,” sciencedirect, [ออนไลน์]. Available:
<https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/ziegler-nichols-method>.
- [13] G. Scott, “Investopedia,” [ออนไลน์]. Available:
<https://www.investopedia.com/terms/f/fuzzy-logic.asp#toc-understanding-fuzzy-logic>.
- [14] W. S. Z. L. Hang Wu, “PID controllers: design and tuning methods,” Tianjin, 2008.
- [15] T. L. Mien, “Liquid Level Control of Coupled-Tank System,” International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Hanoi, 2017.



ที่มาของรูป <https://datasheets.raspberrypi.com/picow/pico-w-datasheet.pdf>

คุณสมบัติและข้อมูลจำเพาะ

- Raspberry Pi Pico เวอร์ชันที่สามารถเชื่อมต่อเครือข่ายไร้สายได้
- บอร์ด Microcontroller สำหรับนักพัฒนาบอร์ดแรก จาก Raspberry Pi Foundation
- Silicon (IC), RP2040 MCU ที่ออกแบบโดยวิศวกรจาก Raspberry Pi Foundation
- Dual-Core, 32-bit ARM Cortex M0+ Processor
- ความเร็วสัญญาณนาฬิกาพื้นฐานที่ 48MHz และความเร็ว สูงสุดที่ 133MHz(ต้องมีการตั้งค่าเพิ่มเติม)
- สามารถใช้งาน USB Micro B ในการจ่ายไฟและโอนถ่ายโปรแกรมได้
- รองรับ USB 1.1 Host และ Device
- เมื่อเชื่อมต่อกับ PC ผ่าน USB Port จะปรากฏเป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูล USB Mass Storage โดยไม่ต้องใช้ Driver
- รองรับภาษา MicroPython, C และ C++ ในการเขียนโค้ดเพื่อโปรแกรมตัวบอร์ด
- โหลดโปรแกรมลงตัวบอร์ดได้อย่างง่ายดายด้วยการ Drag and Drop ลงในตัวบอร์ดเหมือนคัดลอกข้อมูลลงแฟลชไดร์
- มาพร้อมกับ 40-pin 21x51 ‘DIP’ ความหนา PCB 1 มม. และรูสำหรับติดตั้ง male header pin ระยะห่างระหว่าง pin 0.1” จึงทำให้สามารถใช้งานร่วมกับ breadboard ได้
- มาพร้อมกับขอบ PCB บริเวณ Pin แบบ edge castellations PCB จึงทำให้สามารถติดตั้งได้บนแผ่น PCB อื่นแบบโดยวิธี SMD โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์อื่นเพิ่มเติม
- ตัวบอร์ดไม่ได้ทำการบัดกรี male header pin มาด้วย
- ความสามารถอื่นๆเพิ่มเติม :
 - 26 x multifunction 3.3V General Purpose I/O (GPIO)
 - 23 x digital GPIO เท่านั้น
 - 3 x 12-bit ADC ที่ความถี่แซมเปิลที่ 500Ksps, Analog to Digital Converter
 - 2 x UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)
 - 2 x SPI (Serial Peripheral Interface)
 - 2 x I2C (Inter IC)
 - 16 x PWM (Pulse Width Modulation)
 - 1 x Timer พร้อมกับ 4 alarms
 - 1 x Real Time Counter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2 x Programmable IO (PIO) ที่สามารถจำลองการทำงานเป็นอุปกรณ์ high-speed interfaces ต่างๆ อาทิ SD card หรือ VGA
- Built-in 12-bit ADC temperature sensor
- 3-pin ARM Serial Wire Debug (SWD) port
- Onboard Programmable LED, GP25
- รองรับแหล่งจ่ายพลังงานอย่างยืดหยุ่น
 - รองรับการจ่ายไฟผ่าน USB Port, external power supply หรือแบตเตอรี่
- SDK ที่ครอบคลุมการพัฒนาในด้านต่างๆ, ตัวอย่างซอฟต์แวร์ และเอกสารประกอบอื่นๆ
- ผลิตภัณฑ์อย่างเป็นทางการจาก Raspberry Pi Foundation
- รองรับการทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ที่มีพอร์ต USB และใช้ OS ที่เป็น Windows, macOS, Linux
- ทำงานกับ Raspberry Pi 4 Model B หรือ Raspberry Pi 400 และ Raspberry Pi OS ได้อย่างราบรื่นไร้รอยต่อ
- ขนาด: 51 มม. x 21 มม. X 1 มม.
- บอร์ด Microcontroller สำหรับนักพัฒนาบอร์ดแรก จาก Raspberry Pi Foundation
- Silicon (IC), RP2040 MCU ที่ออกแบบโดยวิศวกรจาก Raspberry Pi Foundation
- Dual-Core, 32-bit ARM Cortex M0+ Processor
- ความเร็วสัญญาณนาฬิกาพื้นฐานที่ 48MHz และความเร็ว สูงสุดที่ 133MHz(ต้องมีการตั้งค่าเพิ่มเติม)
- สามารถใช้งาน USB Micro B ในการจ่ายไฟและโอนถ่ายโปรแกรมได้
- รองรับ USB 1.1 Host และ Device
- เมื่อเชื่อมต่อกับ PC ผ่าน USB Port จะปรากฏเป็นอุปกรณ์เก็บข้อมูล USB Mass Storage โดยไม่ต้องใช้ Driver
- รองรับภาษา MicroPython, C และ C++ ในการเขียนโค้ดเพื่อโปรแกรมตัวบอร์ด
- โหลดโปรแกรมลงตัวบอร์ดได้อย่างง่ายดายด้วยการ Drag and Drop ลงในตัวบอร์ดเหมือนคัดลอกข้อมูลลงแฟลชไดร์
- มาพร้อมกับ 40-pin 21x51 'DIP' ความหนา PCB 1 มม. และรูสำหรับติดตั้ง male header pin
- ระยะห่างระหว่าง pin 0.1" จึงทำให้สามารถใช้งานร่วมกับ breadboard ได้
- มาพร้อมกับขอบ PCB บริเวณ Pin แบบ edge castellations PCBจึงทำให้สามารถติดตั้งได้บนแผ่น PCB อื่นแบบโดยวิธี SMD โดยไม่ต้องใช้อุปกรณ์อื่นเพิ่มเติม
- ตัวบอร์ดไม่ได้ทำการบัดกรี male header pin มาด้วย
- ความสามารถอื่นๆเพิ่มเติม:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 26 x multifunction 3.3V General Purpose I/O (GPIO)
 - 23 x digital GPIO เท่านั้น
 - 3 x 12-bit ADC ที่ความถี่แซมเปิลที่ 500Ksps, Analog to Digital Converter
 - 2 x UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)
 - 2 x SPI (Serial Peripheral Interface)
 - 2 x I2C (Inter IC)
 - 16 x PWM (Pulse Width Modulation)
 - 1 x Timer พร้อมกับ 4 alarms
 - 1 x Real Time Counter
 - 2 x Programmable IO (PIO) ที่สามารถจำลองการทำงานเป็นอุปกรณ์ high-speed interfaces ต่างๆ อาทิ SD card หรือ VGA
 - Built-in 12-bit ADC temperature sensor
 - 3-pin ARM Serial Wire Debug (SWD) port
 - Onboard Programmable LED, GP25
 - รองรับแหล่งจ่ายพลังงานอย่างยืดหยุ่น
 - รองรับการจ่ายไฟผ่าน USB Port, external power supply หรือแบตเตอรี่
 - SDK ที่ครอบคลุมการพัฒนาในด้านต่างๆ, ตัวอย่างซอฟต์แวร์ และเอกสารประกอบอื่นๆ
 - ผลิตภัณฑ์อย่างเป็นทางการจาก Raspberry Pi Foundation
 - รองรับการทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ที่มีพอร์ต USB และใช้ OS ที่เป็น Windows, macOS, Linux
 - ทำงานกับ Raspberry Pi 4 Model B หรือ Raspberry Pi 400 และ Raspberry Pi OS
- ได้อย่างราบรื่นไร้รอยต่อ
- ขนาด: 51 มม. x 21 มม. X 1 มม.

RP2040 Microcontroller

ความหมายของรหัส “RP2040”

- RP = Raspberry Pi
- 2 = Dual Core
- 0 = Arm Cortex M0+
- 4= $\text{floor}(\log_2(264 \text{ KB}/16 \text{ KB}))$ — 264KB SRAM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $0 = \text{floor}(\log_2(0 / 16\text{KB}))$ — no on-chip Flash memory

CYW43439 Wifi 4 (802.11n)

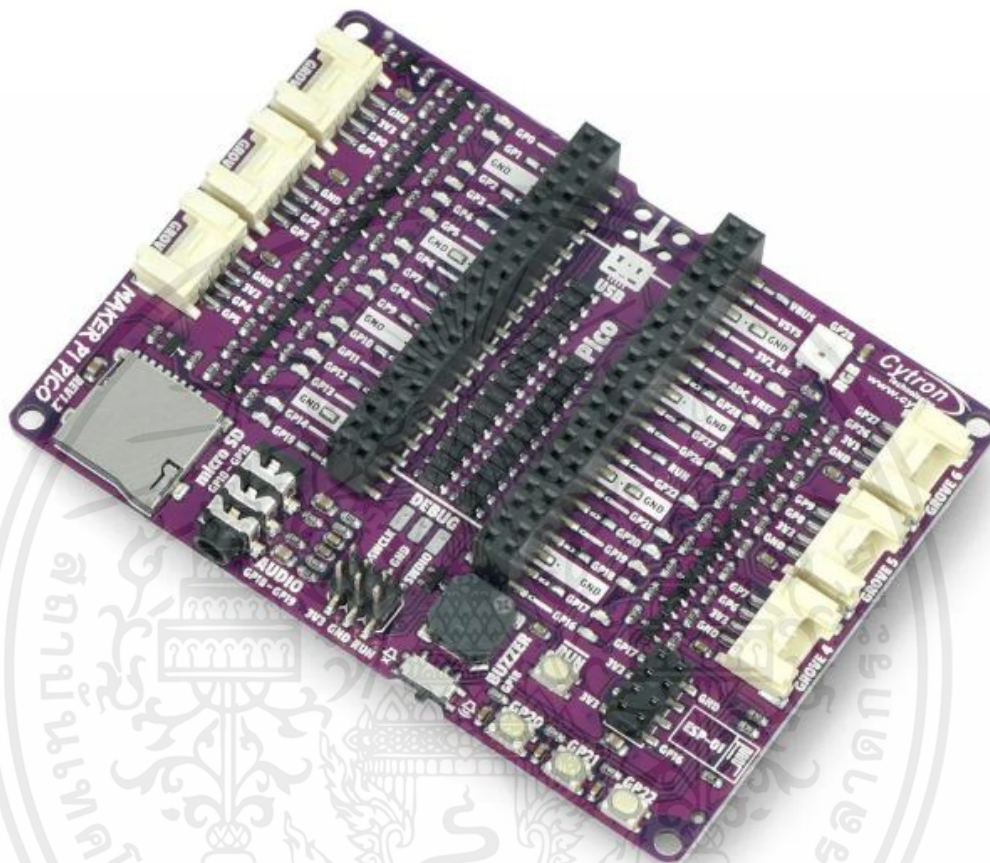
CYW43439 เพิ่มความสามารถ Bluetooth® ที่อัปเดต, WPA3, DPP สำหรับ Wi-Fi Easy Connect™, Soft AP ที่ปรับปรุงแล้ว และอินเทอร์เฟซไฮสปีด SDIO ที่ใช้ร่วมกันสำหรับ Wi-Fi + Bluetooth®

ตารางที่ 3 1.1ก รายละเอียดของบอร์ด Raspberry Pi Pico W

| | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Parametrics | CYW43439 |
| Antenna Configuration | 1x1 |
| Bluetooth Interface | UART/PCM/SDIO |
| Bluetooth Specification | Bluetooth 5.2 |
| CPU | N/A |
| Family | AIROC™ Wi-Fi + Bluetooth® Combos |
| Memory | N/A |
| Operating Temperature min max | -30 °C 70 °C |
| Operating system support | Linux, RTOS |
| Partner Module | Y |
| Product Description | Wi-Fi 4 combo |
| Software Support | ModusToolbox™ |
| Wi-Fi Interface | SDIO/SPI |
| Wi-Fi Band | 2.4 GHz |
| Wi-Fi PHY Data Rate ((Mbit/s)) | upto 96Mbps |
| Wi-Fi Specification | Wi-Fi 4 (802.11n) |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2ก Maker Pi Pico Base (without Pico) : Simplifying Pi Pico for Beginners



รูปที่ 1.2ก Maker Pi Pico Base (without Pico) : Simplifying Pi Pico for Beginners

ที่มาของรูป <https://botland.store/raspberry-pi-pico-hat-extendings-findings/19297-maker-pi-pico-base-simplifying-pi-pico-for-beginners-5904422360917.html>

รายละเอียด

Maker Pi Pico Base รวมปุ่มรีเซ็ตที่ต้องการมากที่สุดสำหรับ Raspberry Pi Pico และเข้าถึงพิน GPIO ทั้งหมดบน pin-headers 20 วิธีพร้อมป้ายกำกับที่ชัดเจน GPIO แต่ละตัวมาพร้อมกับไฟแสดงสถานะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LED เพื่อการทดสอบรหัสและการแก้ไขปัญหาที่สะดวก ชั้นล่างสุดของบอร์ดนี้ยังมาพร้อมกับไดอะแกรม pinout ที่ครอบคลุมซึ่งแสดงการทำงานของแต่ละ pin

คุณสมบัติ

- Work out-of-the-box. No soldering!
- Access to all Raspberry Pi Pico's pins on two 20 ways pin headers
- LED indicators on all GPIO pins
- 3x programmable push button (GP20-22)
- 1x RGB LED - NeoPixel (GP28)
- 1x Piezo buzzer (GP18)
- 1x 3.5mm stereo audio jack (GP18-19)
- 1x Micro SD card slot (GP10-15)
- 1x ESP-01 socket (GP16-17)
- 6x Grove port

1.3ก ปัมป์เกียร์ Greylor PQ-24DC

ปั๊มเกียร์ PQ-24 มีขนาดกะทัดรัดเป็นพิเศษ ออกแบบประสงค์ ทนทานต่อสารเคมี และมีประสิทธิภาพที่น่าประทับใจเมื่อเทียบกับปั๊มเกียร์ขนาดใหญ่และมีราคาแพงกว่า ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 1.3ก ปั๊มเกียร์ Greylor PQ-24DC

ที่มาของรูป <https://www.greylor.com/pumps/detail/pq24>

ตารางที่ 1.3ก รายละเอียดของปั๊มเกียร์ Greylor PQ-24DC

| | |
|--------------------|----------------------------|
| Inlet Requirements | Flooded inlet |
| Fluid Types | Mobile and/or Non-abrasive |
| Dry Run Capability | no |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|-------------------------------|--|
| Submersible? | no |
| Maximum Pressure | 20 PSIG (or 12 PSIG with optional AC adapter) |
| Maximum Flow Rate | 2200 ml per min |
| Fluid Temperatures Supported | Maximum of 180 degrees F |
| Mounting Requirements | Horizontal orientation |
| Primary Power Source | 12V |
| Alternate Power Source | Two AC to DC converters are available. Single Speed Power Pack 1 (generates 9V DC) Variable Speed Power Pack 2 (generates 3, 4.5, 6, 7.5, 9 or 12V DC) Both are listed in the section below titled Additional Parts for Purchase |
| Variable Flow Rate? | Enabled with the Variable Speed Power Pack 2 |
| Dimensions (in inches) | 1 1/2" W x 3 1/2" D x 2" H |
| Weight | 10 oz. |
| Inlet/Outlet Fitting Diameter | 3/16 inch MHB (male hose barb) |
| Other Features | Materials that come into contact with the pumped liquid are Molded Delrin pump body Delrin gears Stainless steel motor shaft Teflon diaphragm Elastomer lip seal Elastomer lip seals come in Buna-N, AFLAS, EPDM, and Viton. Gears available in HDPE for corrosive chemicals. UL Certified |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| | |
|--|--|
| | Available in none, 2-holes, and 4-holes. Hole dimensions are here. |
|--|--|



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4ก สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแหล่งจ่ายไฟ 24V 5A (Switching Power Supply)



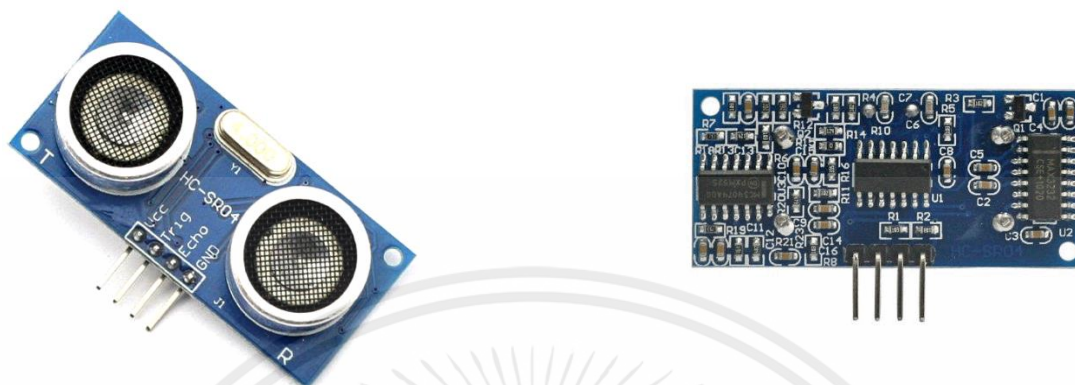
รูปที่ 1.4ก สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายแหล่งจ่ายไฟ 24V 5A (Switching Power Supply)

ที่มาของรูป <https://www.lazada.co.th/products/24v-5a-switching-power-supply-24-i838462431.html>

ข้อมูลจำเพาะ

- ระบบตัดไฟอัตโนมัติ เมื่อมีการช้อตวงจร
- 1 x Switching power supply AC 100-240V to DC 24V 5A 120W module
- แหล่งจ่ายไฟแบบสวิตชิง
- แรงดันอินพุต 100-240V AC
- แรงดันเอาต์พุต 24V DC
- กระแสเอาต์พุต 5A
- กำลังเอาต์พุต 120W
- ขนาด 98 x 160 x 44mm

1.5ก เซ็นเซอร์วัดระยะทาง Ultrasonic Module HC-SC04



รูปที่ 1.5ก เซ็นเซอร์วัดระยะทาง Ultrasonic Module HC-SC04

ที่มาของรูป <https://commandronestore.com/products/bo300.php>

เซ็นเซอร์วัดระยะทาง Ultrasonic Module HC-SC04 ใช้เสียงสะท้อนกลับในการคำนวณระยะทาง แม่นยำที่ 2-400 cm ใช้งานง่าย มีไลบรารีมาตรฐาน

คุณสมบัติของโมดูล

- แรงดันที่ใช้ในการทำงาน 5V
- กระแสไฟฟ้าที่ใช้ 15mA
- คลื่นความถี่ในการทำงาน 40kHz
- ระยะสูงสุดที่สามารถวัดได้ 4m (400cm)
- ระยะต่ำสุดที่สามารถวัดได้ 0.02m (2cm)
- ความแม่นยำ $\pm 3\text{mm}$
- องศาในการวัด 15 องศา
- Trigger Input Signal 10 us TTL Pulse

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6ก MD13S 13Amp DC Motor Driver



รูปที่ 1.6ก MD13S 13Amp DC Motor Driver

ที่มาของรูป <https://www.thaieasyelec.com/product/496/cytron-13amp-6v-30v-dc-motor-driver-grove-compatible>

MD13S ได้รับการออกแบบมาเพื่อขับมอเตอร์ DC แบบ brushed ที่มีกระแสสูงถึง 13A อย่างต่อเนื่อง มีการปรับปรุ้งหลายประการ เช่น รองรับสัญญาณ PWM ทั้งแบบ locked-antiphase. และสัญญาณ-ขนาด สัญญาณ PWM เนื่องจากใช้ส่วนประกอบโซลิดสเตตเต็มรูปแบบ ซึ่งสามารถให้เวลาตอบสนองที่เร็วขึ้นและจัดการสีกหรือของรีเลย์เชิงกล

ความสามารถและคุณสมบัติ

- การควบคุมแบบสองทิศทางสำหรับมอเตอร์ DC แบบแปร่งถ่านหนึ่งตัว
- รองรับแรงดันมอเตอร์ตั้งแต่ 6V ถึง 30V
- กระแสสูงสุดถึง 13A ต่อเนื่อง (ไม่มีฮีทซิงค์ที่ 25°C) และสูงสุด 30A (10 วินาที)
- จำกัดกระแสที่ 30A.
- อินพุตระดับลอจิก 3.3V และ 5V
- คอนเนคเตอร์ที่เข้ากันได้กับ GROVE
- ส่วนประกอบโซลิดสเตตให้เวลาตอบสนองที่เร็วขึ้นและจัดการสีกหรือของรีเลย์เชิงกล
- NMOS H-Bridge เต็มรูปแบบเพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นและไม่จำเป็นต้องใช้แผ่นระบายความร้อน
- ควบคุมความเร็วความถี่ PWM สูงสุด 20KHz (ความถี่เอาต์พุตจริงเหมือนกับความถี่อินพุต)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รองรับการ ทำงานของ PWM ทั้งแบบ ล็อคแอนติเฟสและขนาดสัญญาณ
- รองรับ TTL PWM จาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ ไม่ใช่ PWM จากเครื่องรับ RC..
- รองรับ SMD
- ขนาด 61mm. x 33mm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้