

การระบุเอกลักษณ์ของระบบเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับแบบจำลอง
ควบคุมระดับน้ำที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย

SYSTEM IDENTIFICATION BASED PID CONTROLLER DESIGN FOR
A LEVEL PLANT SUBJECTED TO WIRELESSHART COMMUNICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2562

KMITL-2019-EN-M-060-077

การระบุเอกลักษณ์ของระบบเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับแบบจำลอง
ควบคุมระดับน้ำที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย

SYSTEM IDENTIFICATION BASED PID CONTROLLER DESIGN FOR
A LEVEL PLANT SUBJECTED TO WIRELESS HART COMMUNICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2562
KMITL-2019-EN-M-060-077

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYSTEM IDENTIFICATION BASED PID CONTROLLER DESIGN FOR
A LEVEL PLANT SUBJECTED TO WIRELESSHART COMMUNICATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

KMITL-2019-EN-M-060-077

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การระบุเอกลักษณ์ของระบบเพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอ
ดีสำหรับแบบจำลองควบคุมระดับน้ำที่มีการสื่อสารฮาร์ท
แบบไร้สาย

ชื่อนักศึกษา

นายพงศกร สมคะเน

รหัสประจำตัว

60601002

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมการวัดคุม

พ.ศ.

2562

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.วิริยะ กองรัตน์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.นภศุลา วงษ์วานิช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของโมเดลทางกายภาพของระบบที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายของแบบจำลองการควบคุมระดับ ซึ่งมีการหน่วงเวลาในการส่งข้อมูลที่ 8 วินาที โดยใช้โมเดลทางกายภาพที่เป็นเชิงเส้น และโมเดลที่เพิ่มการหน่วงเวลาของการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายเข้าไปในโมเดล ทำการเปรียบเทียบวิธีดังกล่าวกับการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ ทูลบ็อกซ์ใน MATLAB ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์ที่ใช้โมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายนั้น มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าจริงกับโมเดลน้อยที่สุด แสดงว่าโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายนั้นใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด จากนั้นออกแบบตัวควบคุมพีไอดี โดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ซึ่งให้ผลตอบสนองด้วยตัวควบคุมพีไอดีต่อค่าเป้าหมาย โดยเกิดค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินเล็กน้อย จากนั้นเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างมีเสถียรภาพ และตัวควบคุมพีไอดีสามารถคงทนการรบกวนต่อระบบได้อย่างมีเสถียรภาพ แสดงให้เห็นว่าโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงส่งผลให้สามารถออกแบบตัวควบคุมอย่างง่าย เพื่อควบคุมกระบวนการที่มีการหน่วงเวลาของการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย ให้มีสมรรถนะที่ดีและเหมาะสมกับกระบวนการ

Thesis	System Identification Based PID Controller Design for A Level Plant Subjected to WirelessHART Communication
Student	Mr.Pongsakorn Somkane
Student ID.	60601002
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Viriya Kongratana
Thesis Co-Advisor	Dr.Napasool Wongvanich

ABSTRACT

This thesis presents the integral-based system identification methodology for parameter identification of the physical model of wirelessHART communication in a level control plant with data transmission delay of 8 seconds. A linear physical model and model with delay of wirelessHART communication factor were compared to system identification by using a toolbox in MATLAB. Results show that a mathematical model of wirelessHART communication derived from system identification by integral-based method had the least absolute mean error between the actual value and model, and hence the model represented an actual process most. A PID controller was then designed based on the mathematical model derived from system identification. A response to the set point from the PID controller shows the percent overshoot which slightly exceeded the set point and then steadily returned to the set point, and the PID controller could firmly withstand disturbance to the system. These results indicated that the mathematical model was close to the actual process, thereby enabling an efficient design of simple controllers, which appropriately manage a process with the presence of wirelessHART communication delays.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจาก รองศาสตราจารย์วิริยะ กองรัตน์ และ ดร.นภศูล วงษ์วานิช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือแก้ปัญหาในการทำวิจัย รวมทั้งให้ความรู้ประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์และขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์จากสาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนในสาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่ให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ในการศึกษาแก่ข้าพเจ้า และให้กำลังใจในการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ได้ให้กำลังใจและคอยสนับสนุน ตลอดจนให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ทั้งหมด ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง และครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน

พงศกร สมคะเน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ระบบควบคุม (Control System).....	4
2.2 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification).....	5
2.2.1 White Box Identification.....	5
2.2.2 Gray Box Identification.....	6
2.2.3 Black Box Identification.....	6
2.3 ปริพันธ์ (Integral).....	6
2.3.1 กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Rule).....	7
2.3.2 กฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบหลายช่วง.....	8
2.4 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method).....	9
2.5 ตัวควบคุม (Controller).....	11
2.5.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller).....	11
2.5.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Controller).....	11
2.5.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Controller).....	12
2.5.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller).....	12
2.6 ฮาร์ทโพรโตคอล (HART Protocol).....	13
2.6.1 ฮาร์ทแบบไร้สาย (WirelessHART).....	14
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ.....	19
3.1 แบบจำลองการควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย.....	19

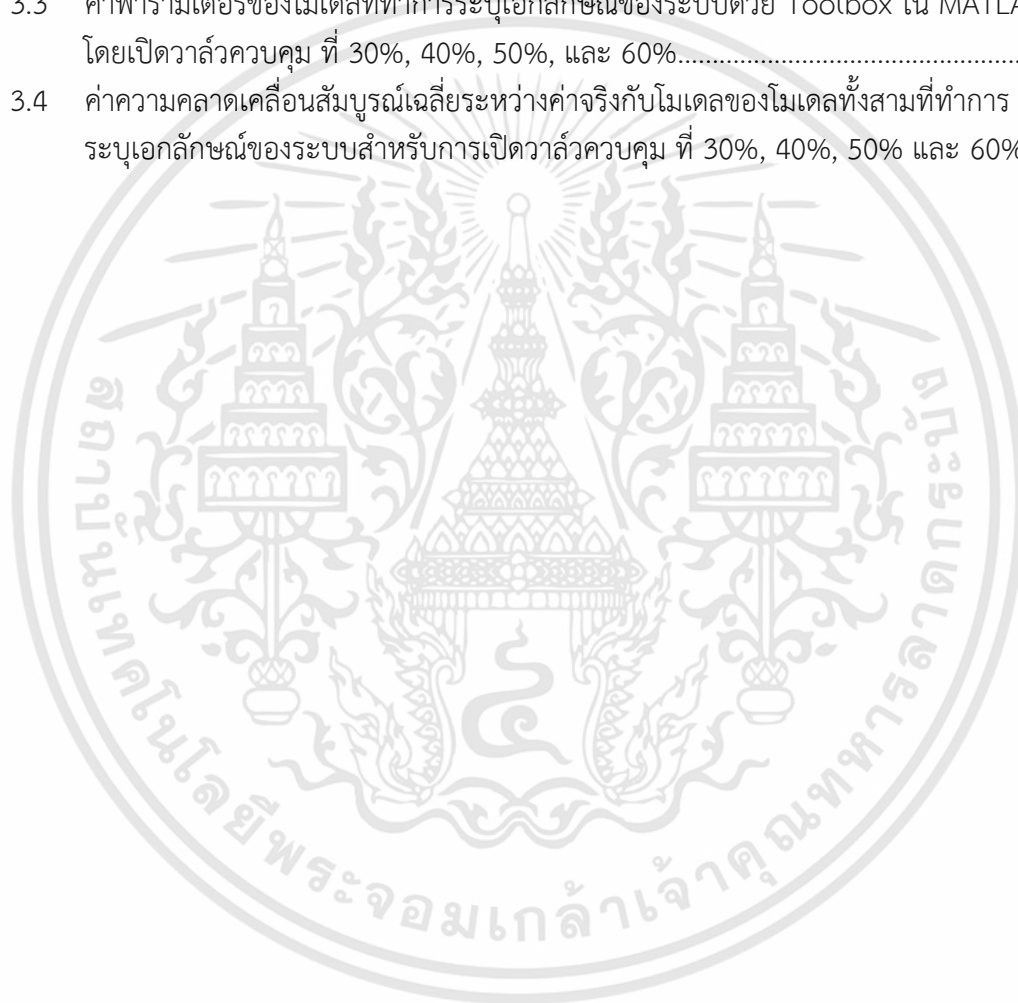
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีปริพันธ์.....	21
3.2.1 การระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้น.....	21
3.2.2 การระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย.....	26
3.3 การระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ Toolbox ใน MATLAB.....	30
บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี.....	36
4.1 การตรวจสอบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ.....	36
4.2 การเขียนโปรแกรม LabVIEW เป็นตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมระดับน้ำ.....	38
4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมระดับน้ำ.....	41
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
เอกสารอ้างอิง.....	48
ภาคผนวก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	50
ประวัติผู้เขียน.....	65

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการปรับเพิ่มค่าพารามิเตอร์ K_p , K_I และ K_D ของตัวควบคุมพีไอดี.....	13
3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้นโดยเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%, 40%, 50%, และ 60%.....	25
3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย โดยเปิดวาล์วควบคุม ที่ 30%, 40%, 50%, และ 60%.....	30
3.3 ค่าพารามิเตอร์ของโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB โดยเปิดวาล์วควบคุม ที่ 30%, 40%, 50%, และ 60%.....	34
3.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าจริงกับโมเดลของโมเดลทั้งสามที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับการเปิดวาล์วควบคุม ที่ 30%, 40%, 50% และ 60%.....	35



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แผนผังของระบบควบคุม..... 4
2.2	แผนผังระบบควบคุมแบบเปิด..... 4
2.3	แผนผังระบบควบคุมแบบปิด..... 5
2.4	แผนผังการระบุเอกลักษณ์ของระบบ..... 5
2.5	แผนผังโมเดลในรูปแบบของกล่อง..... 5
2.6	การอินทิเกรตโดยรวมพื้นที่หลาย ๆ ส่วนเข้าด้วยกัน..... 6
2.7	การอินทิเกรตโดยรวมพื้นที่หลาย ๆ ส่วนเข้าด้วยกันเมื่อค่า dx มีค่าเข้าใกล้ศูนย์..... 7
2.8	การอินทิเกรตโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู..... 7
2.9	การอินทิเกรตโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบหลายช่วง..... 8
2.10	เส้นแนวโน้มที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดในรูปแบบเส้นตรง..... 10
2.11	ตัวควบคุมแบบสัดส่วน..... 11
2.12	ตัวควบคุมแบบปริพันธ์..... 12
2.13	ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์..... 12
2.14	ตัวควบคุมแบบพีไอดี..... 13
2.15	การมอดูเลตทางความถี่ของฮาร์ทโปรโตคอล..... 14
2.16	การส่งสัญญาณของฮาร์ทโปรโตคอล..... 14
2.17	โครงสร้างของฮาร์ทแบบไร้สาย..... 15
2.18	การส่งสัญญาณแบบจุดต่อจุด..... 15
2.19	การส่งสัญญาณแบบหลายจุด..... 16
2.20	การเชื่อมต่อระบบควบคุมหรือคอมพิวเตอร์กับสมาร์ตเกตเวย์ไร้สาย..... 16
2.21	การแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน..... 17
3.1	แบบจำลองการควบคุมระดับ..... 19
3.2	P&ID ของการควบคุมระดับมีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย..... 20
3.3	แผนผังการติดต่อระหว่างอุปกรณ์การวัดและควบคุมกับคอมพิวเตอร์..... 20
3.4	สองแท่งต่อแบบไม่ปฏิสัมพันธ์กัน..... 21
3.5	ขั้นตอนสำหรับการระบุค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีปริพันธ์..... 23
3.6	ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้นที่ทำการเปิด วาล์วควบคุมที่ 30%..... 24
3.7	ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้นที่ทำการเปิด วาล์วควบคุมที่ 40%..... 24
3.8	ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้นที่ทำการเปิด วาล์วควบคุมที่ 50%..... 25
3.9	ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้นที่ทำการเปิด วาล์วควบคุมที่ 60%..... 25

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%.....	28
3.11 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 40%.....	29
3.12 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50%.....	29
3.13 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 60%.....	29
3.14 Toolbox System Identification ใน MATLAB.....	31
3.15 Polynomial Models ใน MATLAB.....	32
3.16 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB ที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%.....	33
3.17 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB ที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 40%.....	33
3.18 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB ที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50%.....	33
3.19 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB ที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 60%.....	34
4.1 แผนผังสมการสแตสเปซ.....	36
4.2 การจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์ในสมการสแตสเปซใน Simulink/MATLAB.....	37
4.3 ผลตอบสนองของโมเดลจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีปริพันธ์สำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50%.....	37
4.4 ผลจากการเก็บค่าจากกระบวนการจริงที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50%.....	38
4.5 ฟังก์ชันตัวควบคุมพีไอดีของโปรแกรม LabVIEW.....	38
4.6 Differential Pressure Transmitter วัดระดับของแทงค์เปิด.....	39
4.7 โปรแกรม LabVIEW ในส่วนของ Block Diagram โดยใช้ฟังก์ชันตัวควบคุมพีไอดี.....	40
4.8 Human Machine Interface (HMI).....	40
4.9 การจำลองควบคุมระดับน้ำใน Simulink/MATLAB.....	43
4.10 ผลตอบสนองการจำลองควบคุมระดับน้ำใน Simulink/MATLAB.....	43
4.11 ผลตอบสนองด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่ค่าเป้าหมาย 80%.....	44
4.12 ผลตอบสนองด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่เปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 80% ไป 50%.....	45
4.13 ผลตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนมากกระทำต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำโดยการปิดปั๊มน้ำเป็นเวลา 10 วินาทีที่ค่าเป้าหมาย 80%.....	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรม ได้นำการสื่อสารมาตรฐานฮาร์ทโพรโตคอล มาใช้กันมากขึ้นในอุปกรณ์การวัด และ ควบคุม เนื่องจากสามารถตั้งค่าหรือแก้ไข ค่าพารามิเตอร์ใน อุปกรณ์การวัดและควบคุมได้ ที่หน้าตู้คอนโทรล โดยไม่ต้องไปตั้งค่าที่ตัวอุปกรณ์ เช่นการตั้งค่าต่ำสุด ค่าสูงสุดในย่านการวัด หรือ แก้ไขหน่วยวัด ในอุปกรณ์การวัด เป็นต้น ต่อมาได้มีการพัฒนาการสื่อสาร มาตรฐานฮาร์ทโพรโตคอลเวอร์ชัน 7 ซึ่งสามารถสื่อสารแบบไร้สายได้ [1] การสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย ยังเป็นการสื่อสารแบบไร้สายที่นิยมใช้กันในโรงงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน การสื่อสารฮาร์ทแบบไร้ สายสามารถตั้งค่าหรือแก้ไขได้เหมือนแบบมีสาย โดยสามารถทำได้โดยผ่านฮาร์ทเกตเวย์ ข้อดีของการ สื่อสารแบบไร้สายคือ ลดค่าสายสัญญาณ, ไม่มีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสายสัญญาณ และสามารถส่ง ข้อมูลเชิงลึกของอุปกรณ์การวัดได้โดยไม่ต้องไปเช็คที่หน้างานได้อีกด้วย แม้ว่าการสื่อสารฮาร์ทแบบ ไร้สาย ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรม แต่การหน่วงเวลาในการส่งข้อมูลยังเป็น ประเด็นสำคัญในการสื่อสารแบบไร้สาย Chung et al. [2-3] ใช้เวลาในการส่งข้อมูลของการสื่อสาร ฮาร์ทแบบไร้สายเป็นเวลา 8 วินาที ซึ่งยืดอายุการใช้งานแบตเตอรี่ได้ถึง 46% เมื่อเทียบกับการส่ง ข้อมูลที่เวลา 1 วินาที อัตราการส่งข้อมูลนี้ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลง โดยเฉพาะ การเกิดค่าพุ่งเกิน (Overshoot) ซึ่งการส่งข้อมูลทุก 8 วินาทีเป็นการหน่วงเวลาที่คล้าย กับ กระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้ผลตอบสนอง (First Order Plus Dead Time : FOPDT) ที่พบได้ ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมทั่วไป วิธีการทั่วไปในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของระบบ FOPDT คือการใช้วิธีหาค่าอัตราขยายจากกราฟผลตอบสนองของระบบจากค่าความชันที่ 63% ของผลตอบ สอนงทั้งหมด ซึ่งวิธีนี้มีแนวโน้มที่จะเกิดสัญญาณรบกวน [4]

งานวิจัยที่หาค่าพารามิเตอร์โมเดลของระบบของ Christopher E. Hann et al. [5] ได้พัฒนา วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้วิธีปริพันธ์ (Integral) เพื่อระบุโมเดลของระบบ กลูโคส-อินซูลิน และ Napasool [6] ได้พัฒนาวิธีการระบุเอกลักษณ์คล้ายกันสำหรับระบบของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน ซึ่งวิธีนี้สามารถให้โมเดลใกล้เคียงกับกระบวนการจริง และสามารถกำจัดสัญญาณรบกวน ของระบบที่เกิดขึ้นได้ Bi et al. [7] ใช้วิธีลาปลาซเพื่อสร้างสมการสำหรับการระบุเอกลักษณ์ของระบบ สำหรับกระบวนการอันดับหนึ่งที่มีเวลาไร้ผลตอบสนอง แม้ว่าวิธีการนี้จะทำงานได้ดีแต่วิธีนี้จะต้อง เขียนสมการลาปลาซ ในโดเมนของเวลา ก่อนถึงจะได้สมการสำหรับการระบุเอกลักษณ์ของระบบได้ ซึ่งจะต้องทำการแปลงลาปลาซผกผันก่อนจะเสียเวลาและยุ่งยากในการวิเคราะห์

การใช้งานการสื่อสารแบบไร้สายในการควบคุม ถือว่าเป็นความท้าทายในด้านเทคนิคหลาย อย่าง การวัดโดยใช้อุปกรณ์ที่มีการสื่อสารแบบไร้สายจะมีเวลาการอัปเดตข้อมูลเป็นเวลา 5 - 15 วินาทีขึ้นอยู่กับเครือข่ายที่ใช้ ซึ่งเครือข่ายนี้ก่อให้เกิดความล่าช้าในการทำงานของระบบควบคุมแบบ วงปิดส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง โดยเฉพาะการเพิ่มขึ้นของเกิดค่าพุ่งเกิน [3] Blevins et al. [8] ได้ พัฒนาตัวควบคุม PIDPlus ซึ่งมีเครือข่ายการส่งข้อมูลแบบย้อนกลับเชิงบวก (Positive Feedback Network) เพื่ออัปเดตข้อมูลที่ถูกรวบรวมได้ และ Abdullah et al. [9] ได้ทำการปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดี โดยทำการกรองข้อมูลของการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย ด้วย Dynamically Filtering งานวิจัยที่กล่าว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาทั้งหมดนั้นมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาตัวควบคุมอย่างเดียวนั้นเพื่อให้สามารถควบคุมกระบวนการได้ โดยที่ไม่สนใจโมเดลของระบบเลยว่ามี ความถูกต้องใกล้เคียงกับกระบวนการจริงหรือไม่

งานวิจัยนี้จึงนำเสนอ การระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์ของแบบจำลองการควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย เพื่อหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) นั้นให้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด อีกทั้งยังเปรียบเทียบกับ การระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ Toolbox ใน MATLAB ด้วยวิธีหาแบบ ARMAX (Autoregressive Moving Average with exogenous Inputs) ที่เป็นวิธีโดยทั่วไปในการระบุเอกลักษณ์ของระบบ เพื่อหาโมเดลที่ดีที่สุดแล้วนำไปออกแบบตัวควบคุมพีไอดีที่สามารถควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สายได้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อหาโมเดลทางกายภาพ (Physical Model) ให้เหมาะสมกับระบบที่ห้วงเวลา
2. เพื่อหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ด้วยการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์ จากการหาค่าพารามิเตอร์ของโมเดลทางกายภาพ
3. เพื่อเปรียบเทียบโมเดลทางคณิตศาสตร์ ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์และใช้ Toolbox ใน MATLAB ด้วยวิธีหาแบบ ARMAX
4. เพื่อออกแบบตัวควบคุมพีไอดีให้เหมาะสมกับโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของโมเดลทางกายภาพของระบบได้อย่างถูกต้อง
2. การระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์สามารถหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากกว่าใช้ Toolbox ใน MATLAB ด้วยวิธีหาแบบ ARMAX
3. ตัวควบคุมพีไอดีที่ออกแบบจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ ที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบแล้วสามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างเหมาะสม

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาแบบจำลองการควบคุมระดับน้ำที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย
2. ศึกษาโมเดลทางกายภาพของแบบจำลองการควบคุมระดับ
3. ศึกษาการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์
4. ศึกษาการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ Toolbox ใน MATLAB ด้วยวิธีหาแบบ ARMAX
5. เปรียบเทียบ ผลของการระบุเอกลักษณ์ของระบบระหว่างวิธีปริพันธ์ และ ใช้ Toolbox ใน MATLAB ด้วยวิธีหาแบบ ARMAX
6. ออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้เข้าใจถึงการสื่อสารฮาร์ดแวร์ไร้สาย
2. ทำให้เข้าใจถึงการหาโมเดลทางกายของระบบ
3. สามารถระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์
4. สามารถระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ Toolbox ใน MATLAB ด้วยวิธีหาแบบ ARMAX
5. สามารถออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ได้

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ขอบเขตการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และ รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีปริพันธ์ โดยใช้โมเดลเชิงเส้นและโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแวร์ไร้สาย และ ใช้ Toolbox ใน MATLAB ด้วยวิธีหาแบบ ARMAX

บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีโดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีปริพันธ์

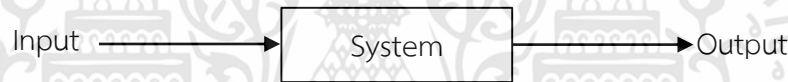
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงหลักการของระบบควบคุม ประเภทของระบบควบคุมประกอบด้วย ระบบควบคุมแบบเปิด, ระบบควบคุมแบบปิด และ หลักการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ในส่วนของทฤษฎีของการระบุเอกลักษณ์ของระบบประกอบด้วย การปรับพินิจโดยกฎสี่เหลี่ยมคางหมู และวิธีกำลังสองน้อยที่สุด รวมไปถึงหลักการของตัวควบคุมและชนิดของตัวควบคุม และหลักการฮาร์ทโปรดคอคอล และฮาร์ทแบบไร้สายที่เป็นมาตรฐานการสื่อสารของอุปกรณ์การวัดและควบคุม สุดท้ายคืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ทั้งการระบุเอกลักษณ์ของระบบ และการออกแบบตัวควบคุม

2.1 ระบบควบคุม (Control System)

ระบบควบคุม คือ หน่วยที่รวมเอาส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันให้เชื่อมต่อขึ้นเป็นระบบ เพื่อให้ระบบทำงานอยู่ภายใต้การควบคุม โดยจะมีการควบคุมเอาต์พุตของระบบให้เหมาะสมตามต้องการด้วยการปรับค่าและมอเตอร์ระบบ ซึ่งอาศัยการป้อนอินพุตที่เหมาะสม เพื่อให้ได้เอาต์พุตที่ถูกต้องเป็นไปตามความต้องการของผู้ควบคุม ดังรูปที่ 2.1 [10]



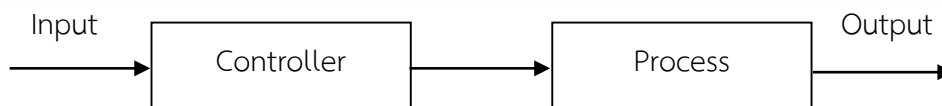
รูปที่ 2.1 แผนผังของระบบควบคุม

2.1.2 ประเภทของระบบควบคุม

ระบบควบคุมแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System) และระบบควบคุมแบบปิด (Close Loop Control System) [10]

2.1.2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open Loop Control System)

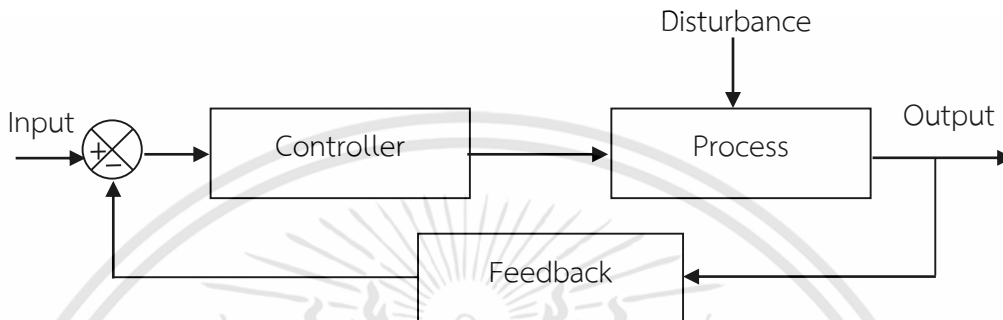
ระบบควบคุมแบบเปิด คือการควบคุมแบบเปิดเอาต์พุตของระบบจะไม่ถูกวัดหรือป้อนกลับมา เพื่อเปรียบเทียบกับอินพุต เป็นระบบที่เอาต์พุตจะไม่มีผลต่อการควบคุมเลยในทางปฏิบัติแล้วจะสามารถใช้การควบคุมแบบเปิดได้ ถ้าทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต และเอาต์พุตของระบบโดยที่จะต้องไม่มีการรบกวนต่อระบบเท่านั้น ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แผนผังระบบควบคุมแบบเปิด

2.1.2.2 ระบบควบคุมแบบปิด (Close Loop Control System)

ระบบควบคุมแบบปิด หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นระบบควบคุมที่เอาต์พุตส่งสัญญาณป้อนกลับ (Feedback Signal) ซึ่งจะมาเปรียบเทียบกับอินพุตเป็นค่าความคลาดเคลื่อนของระบบ (Error) ที่ส่งให้กับตัวควบคุม (Controller) เพื่อสร้างสัญญาณกระตุ้นเพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งระบบจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady Error) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนผังระบบควบคุมแบบปิด

2.2 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification)

การระบุเอกลักษณ์ของระบบ เป็นวิธีการหาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งเกิดจากชุดข้อมูลที่สามารถวัดได้หรืออินพุต และผลตอบสนองของระบบหรือเอาต์พุตที่เกิดจากการทดลองเก็บข้อมูล โดยที่โมเดลนั้นเป็นความสัมพันธ์กันระหว่างอินพุต และเอาต์พุตดังรูปที่ 2.4 [11]



รูปที่ 2.4 แผนผังการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

การสร้างโมเดลจะอยู่ในรูปแบบของกล่อง (Box) ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งมี 3 ชนิดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 แผนผังโมเดลในรูปแบบของกล่อง

2.2.1 White Box Identification

White Box เป็นการหาโมเดลโดยที่สามารถรู้ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของระบบได้ทั้งหมด ซึ่งโมเดลที่ถูกหาได้ด้วย White Box จะสามารถอธิบายตัวแปรในโมเดลได้ว่ามีความสัมพันธ์อย่างไรกับระบบ และโมเดลที่หาได้จะมีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด

2.2.2 Gray Box Identification

Gray Box เป็นการหาโมเดลโดยที่สามารถรู้ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของระบบได้แค่บางส่วนเท่านั้น ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์บางชนิดที่ไม่สามารถหาค่าได้ การที่จะรู้ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดนั้นจะต้องวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากระบบ

2.2.3 Black Box Identification

Black Box เป็นการหาโมเดลโดยที่ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของระบบเลย หรือระบบที่ไม่สามารถหาทฤษฎีไหนมารองรับได้ ซึ่งการจะหาโมเดลด้วยวิธีนี้จะเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต กับ เอาท์พุทของระบบออกมาด้วยวิธีลองผิดลองถูก

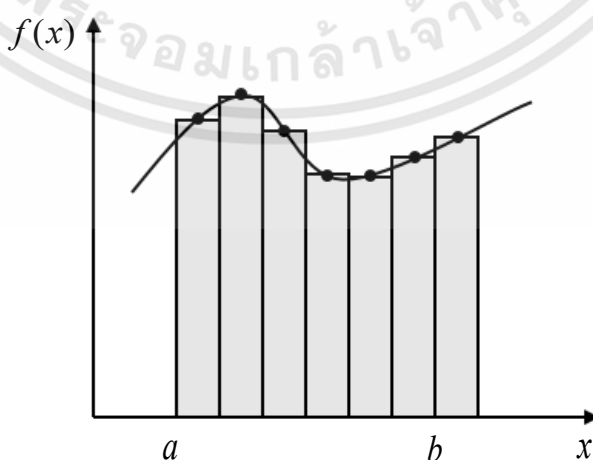
2.3 ปริพันธ์ (Integral)

ปริพันธ์ หรือ อินทิกรัล เป็นการหาพื้นที่ใต้กราฟ ปริมาณ หรือผลรวมต่าง ๆ ซึ่งการหาปริพันธ์ หรือ อินทิเกรต (Integration) เป็นการนำส่วนย่อย ๆ มารวมกันจนเป็นก้อนใหญ่ หรือ ประกอบขึ้นเป็นส่วนรวมของทั้งหมด การอินทิเกรตเขียนอยู่ในรูปสมการที่ (2.1) [12]

$$I = \int_a^b f(x) dx \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 นั่นคือค่าอินทิกรัลเกิดจาก ฟังก์ชัน f ที่ตำแหน่ง x ด้วยระยะ dx แล้วทำการรวมผลคูณที่อยู่ในช่วง $x = a$ ถึง $x = b$ ซึ่งกระบวนการทั้งหมดเรียกว่าการหาปริพันธ์หรือการอินทิเกรต จะสังเกตได้ว่าเครื่องหมายอินทิกรัล \int จะคล้ายตัว S ที่มาจากคำว่า Summation ซึ่งหมายความว่า การรวม คือการรวมส่วนย่อย ๆ เข้าด้วยกัน

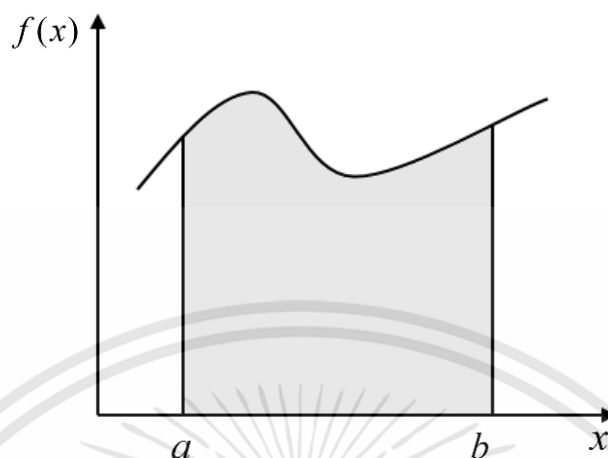
การอินทิเกรต คือ การนำความสูงที่ตำแหน่ง x ของฟังก์ชันคูณด้วยความกว้าง dx ที่เท่าๆ กันจะเกิดเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมพื้นผ้าหลายแท่ง จากนั้นนำพื้นที่สี่เหลี่ยมพื้นผ้ามารวมกัน เพื่อที่จะได้ค่าอินทิกรัลของฟังก์ชันใด ๆ โดยการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันนั้น ๆ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การอินทิเกรตโดยรวมพื้นที่หลาย ๆ ส่วนเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

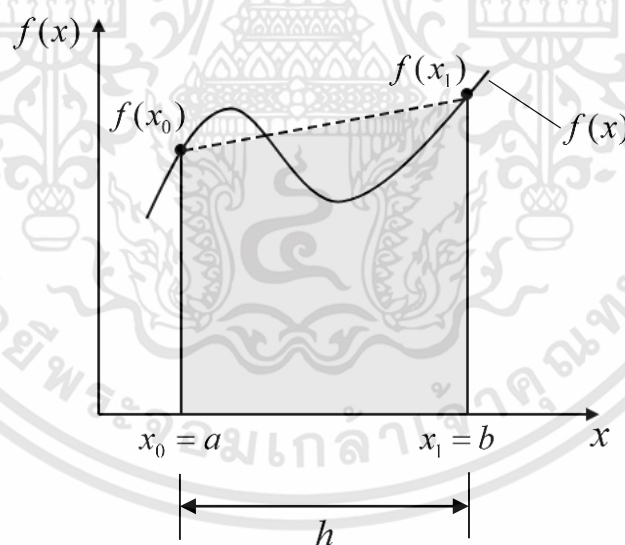
เมื่อค่า dx มีค่าเข้าใกล้ศูนย์จะสามารถหาค่าอินทิกรัลหรือพื้นที่ใต้กราฟที่ถูกต้องที่สุดของฟังก์ชันนั้นได้ ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การอินทิเกรตโดยรวมพื้นที่หลาย ๆ ส่วนเข้าด้วยกันเมื่อค่า dx มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

2.3.1 กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Rule)

การหาค่าอินทิกรัลโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Rule) คือ ค่าอินทิกรัลของฟังก์ชันหาได้จากพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมู ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวก



รูปที่ 2.8 การอินทิกรัลโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู

จากรูปที่ 2.8 ฟังก์ชัน $f(x)$ ใด ๆ ในช่วง $a \leq x \leq b$ ต้องการหาค่าอินทิกรัลตั้งแต่ช่วง a ถึง b จะได้

$$I = \int_a^b f(x) dx \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอินทิกรัล คือพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชัน $f(x)$ โดยที่จะประมาณค่าอินทิกรัลด้วยพื้นที่สี่เหลี่ยม ดังสมการที่ 2.3

$$I \approx (x_1 - x_0) \frac{f(x_0) + f(x_1)}{2} \quad (2.3)$$

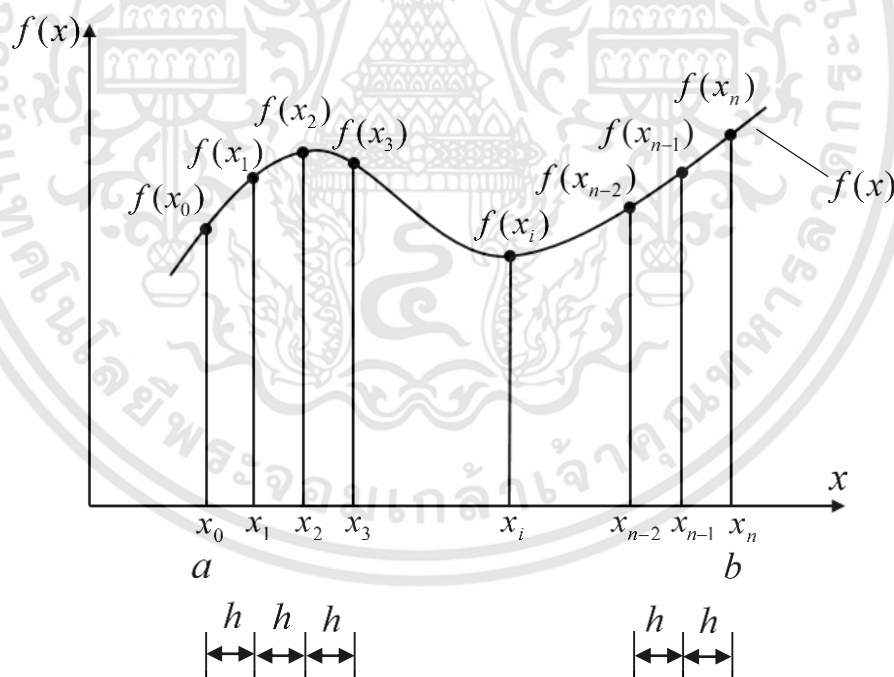
$$I = \frac{h}{2} [f(x_0) + f(x_1)] \quad (2.4)$$

เมื่อ $x_1 - x_0 = b - a = h$

จะเห็นได้จากสมการที่ 2.4 ค่าอินทิกรัลจะเป็นการหาพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูนั่นเอง

2.3.2 กฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบหลายช่วง

กฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบหลายช่วง ทำให้ค่าอินทิกรัลมีความถูกต้องมากขึ้น เนื่องจากการแบ่งช่วง a ถึง b ออกเป็นช่วงย่อย ๆ แล้วทำการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูจากช่วงย่อย ๆ จากนั้นรวมพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูทั้งหมดเข้าด้วยกันจะได้ค่าอินทิกรัลที่มีความถูกต้องมากขึ้น ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การอินทิกรัลโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูแบบหลายช่วง

จากรูปที่ 2.9 ฟังก์ชัน $f(x)$ ใด ๆ ในช่วง $a \leq x \leq b$ จะแบ่งช่วง a ถึง b ออกเป็น n ช่วง จะได้ความกว้าง h ของแต่ละช่วง คือ

$$h = \frac{b-a}{n} \quad (2.5)$$

โดยที่จุดโคออร์ดิเนตที่จุดปลายทั้งสองในแต่ละช่วง คือ

$$x_i = x_0 + ih \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

การหาค่าอินทิกรัลของฟังก์ชัน $f(x)$ ในช่วง $a \leq x \leq b$ จากนั้นหาค่าอินทิกรัลออกเป็น n ช่วง โดยเริ่มจากช่วง $x_0 \leq x \leq x_1, x_1 \leq x \leq x_2$ เรื่อย ๆ ไปจนถึง $x_{n-1} \leq x \leq x_n$ ได้ดังนี้

$$I = \int_a^b f(x) dx \quad (2.7)$$

$$I = \int_{x_0}^{x_1} f(x) dx + \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx + \dots + \int_{x_{n-1}}^{x_n} f(x) dx \quad (2.8)$$

จากนั้นใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมูหาพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูในแต่ละช่วงความกว้าง h ซึ่งให้ค่าอินทิกรัลโดยประมาณจากช่วง a ถึง b ดังนี้

$$I \approx \frac{h}{2}(f(x_0) + f(x_1)) + \frac{h}{2}(f(x_1) + f(x_2)) + \dots + \frac{h}{2}(f(x_{n-1}) + f(x_n)) \quad (2.9)$$

$$I = \frac{h}{2}(f(x_0) + 2f(x_1) + \dots + 2f(x_{n-1}) + f(x_n)) \quad (2.10)$$

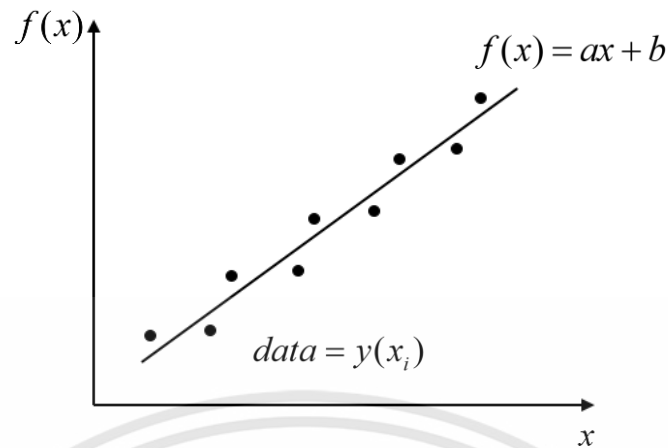
$$I = \frac{h}{2} \left(f(x_0) + f(x_n) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) \right) \quad (2.11)$$

ความถูกต้องของค่าอินทิกรัลที่ได้ ขึ้นอยู่กับจำนวนช่วง n ยิ่งมีช่วงที่มากค่ายิ่งมีความถูกต้องตามด้วย

2.4 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Method)

วิธีกำลังสองน้อยที่สุด คือ วิธีการสร้างเส้นแนวโน้ม ที่ใช้วิธีทำให้ผลรวมกำลังสองของผลต่างระหว่างค่าแนวโน้มกับข้อมูลที่เก็บมาให้มีค่าน้อยที่สุด (Least Squares Error) วิธีนี้เป็นวิธีที่น่าเชื่อถือในการหาเส้นที่เหมาะสมที่สุด (Line of Best Fit) ที่เป็นตัวแทนของข้อมูลที่เก็บมา ซึ่งสามารถใช้สร้างเส้นแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงหรือไม่เป็นเส้นตรงก็ได้ เส้นแนวโน้มที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดในรูปแบบเส้นตรง ดังรูปที่ 2.10 [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 เส้นแนวโน้มที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดในรูปแบบเส้นตรง

ผลรวมกำลังสองของผลต่างระหว่างค่าแนวโน้มกับข้อมูลเขียนได้ดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^n (y(x_i) - (ax_i + b))^2 \quad (2.12)$$

คำนวณหาค่า a และ b โดยหาอนุพันธ์บางส่วน (Partial Derivative) เทียบกับ a และ b จะได้

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n (y(x_i) - (ax_i + b)) \cdot (-x_i) = 0 \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n (y(x_i) - (ax_i + b)) \cdot (-1) = 0 \quad (2.14)$$

จะพบว่าสมการที่ 2.13 เมื่อหารด้วย x_i จะทำให้ได้สมการเดียวกันกับสมการที่ 2.14 ซึ่งค่า a และ b หาได้จากผลรวมของสมการที่ 2.14 จะได้

$$y(x_1) + y(x_2) + \dots + y(x_n) = (ax_1 + b) + (ax_2 + b) + \dots + (ax_n + b) \quad (2.15)$$

เขียนสมการที่ 2.15 เป็นสมการเมทริกซ์ Overdetermined System ดังนี้

$$AX = B \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(x_1) \\ y(x_2) \\ \vdots \\ y(x_n) \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.16 ต้องการหาเวกเตอร์ X เนื่องจากมิติไม่เท่ากันจึง A^{-1} ไม่ได้ ต้องทำการ A^T จะได้ดังนี้

$$A^T AX = A^T B \quad (2.18)$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (2.19)$$

ซึ่งเวกเตอร์ X คือการคำนวณด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดในการหาค่า a และ b

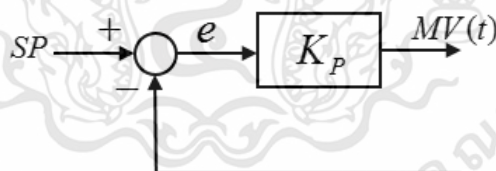
2.5 ตัวควบคุม (Controller)

ตัวควบคุมที่ใช้ในกระบวนการควบคุมจะเป็นตัวควบคุมแบบป้อนกลับ โดยปกติสัญญาณจากอุปกรณ์การวัดจะถูกคำนวณปรับค่าให้เหมาะสมโดยตัวควบคุม ซึ่งตัวควบคุมรับค่ามาจากค่าความผิดพลาด (Error) ของความแตกต่างระหว่างค่าตัวแปรของระบบกับสัญญาณอ้างอิง [14]

2.5.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Controller)

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน คือ ตัวควบคุมที่นำค่าสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิง หรือ ค่าเป้าหมาย กับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม จากนั้นตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณกระตุ้น (Manipulated Variable) ด้วยการขยายค่าสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวด้วยค่าเกนของตัวควบคุม ทำให้เพิ่มความเร็วในการตอบสนองของระบบ ลดค่าความผิดพลาดที่สถานะคงที่ของระบบการทำงาน

$$MV(t) = K_P e(t) \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.11 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

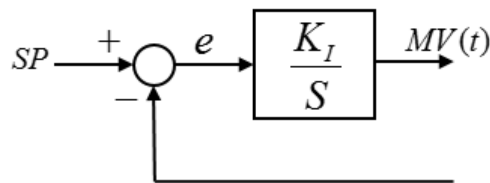
2.5.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral Controller)

ตัวควบคุมแบบปริพันธ์ คือ ตัวควบคุมที่นำค่าสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิง หรือ ค่าเป้าหมาย กับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณกระตุ้นด้วยการอินทิเกรตค่าสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว และคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม โดยจะทำให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงที่ของระบบลดต่ำลงจนสามารถกลับสู่สถานะปกติ มีผลให้ความเร็วในการตอบสนองของระบบลดลง ทำให้เสถียรภาพของระบบลดลงตามสมการที่ 2.21 และ อยู่ในเทอมของค่าเวลาคงที่ของอัตราขยายปริพันธ์ (T_i) หน่วยวินาที ดังสมการที่ 2.22

$$MV(t) = K_I \int e(t) dt \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$MV(t) = \frac{K_P}{T_i} \int e(t) dt \quad (2.22)$$



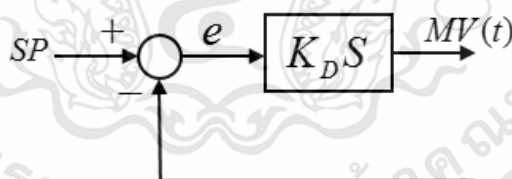
รูปที่ 2.12 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์

2.5.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Controller)

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ คือ ตัวควบคุมที่นำเอาค่าสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย กับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณกระตุ้น ด้วยการอนุพันธ์ค่าสัญญาณความผิดพลาดข้างต้น แล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม ทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพมากขึ้น และเพิ่มค่าอัตราส่วนความหน่วงให้กับระบบการทำงานตามสมการที่ 2.23 และ อยู่ในเทอมของค่าเวลาคงที่ของอัตราขยายอนุพันธ์ (T_d) หน่วยวินาที ดังสมการที่ 2.24

$$MV(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.23)$$

$$MV(t) = K_P T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.13 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

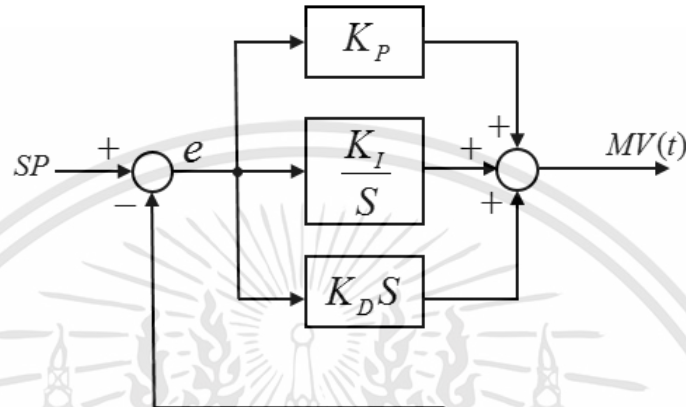
2.5.4 ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller)

ตัวควบคุมแบบพีไอดี คือ ตัวควบคุมย่อยทั้งหมด 3 ตัว คือตัวควบคุมแบบสัดส่วนเป็นส่วนปฏิบัติการต่อค่าความผิดพลาด ณ ขณะนั้น ตัวควบคุมแบบปริพันธ์จะเป็นส่วนปฏิบัติการที่เกิดจากผลรวมของค่าความผิดพลาดในเวลาที่ผ่านมา ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์เป็นส่วนปฏิบัติการที่เกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด ซึ่งสามารถปรับแต่งค่าคงที่ K_P , K_I และ K_D หรือในเทอมค่าเวลาคงที่ของอัตราขยายปริพันธ์ (T_i) หน่วยวินาที และค่าเวลาคงที่ของอัตราขยายอนุพันธ์ (T_d) หน่วยวินาทีเพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ต้องการ ซึ่งตัวควบคุมนี้จะพบได้มากในงานอุตสาหกรรมทั่วไป เนื่องจากเป็นตัวควบคุมที่สามารถใช้งานได้ง่าย การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมไม่ได้ซับซ้อนอะไรมาก ก็สามารถให้ผลตอบสนองเป็นที่ยอมรับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนเนื้อหาสำหรับการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$MV(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.25)$$

$$MV(t) = K_P e(t) + \frac{K_P}{T_i} \int e(t) dt + K_P T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.26)$$



รูปที่ 2.14 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดีที่ทำการปรับค่าพารามิเตอร์ K_P , K_I และ K_D เพิ่มจะมีผลต่อผลตอบสนองของตัวควบคุมพีไอดีตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลการปรับเพิ่มค่าพารามิเตอร์ K_P , K_I และ K_D ของตัวควบคุมพีไอดี

ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุม	ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time)	ค่าพุ่งเกิน (Overshoot)	เวลาเข้าสู่สมดุล (Settling time)	ความผิดพลาด ณ สภาวะอยู่ตัว (Steady State Error)
K_P	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลดลง
K_I	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ลดลงจนหมด
K_D	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลดลง	ลดลง	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย

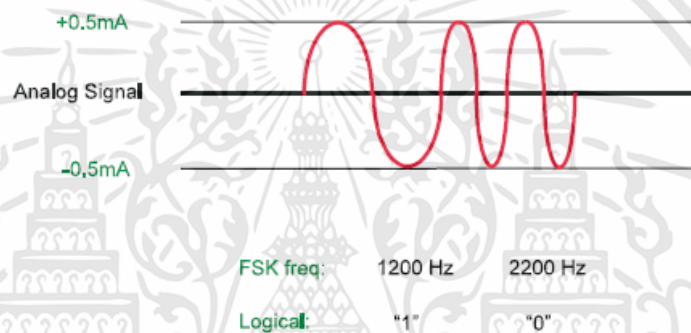
2.6 ฮาร์ทโปรโตคอล (HART Protocol)

HART (Highway Addressable Remote Transducer) เป็นโปรโตคอลที่ใช้สื่อสารในอุตสาหกรรมชนิดหนึ่ง ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ซึ่งการสื่อสารจะส่งสัญญาณเป็นอนาล็อก 4 – 20 mA พร้อมด้วยสัญญาณดิจิทัลไปพร้อมกัน

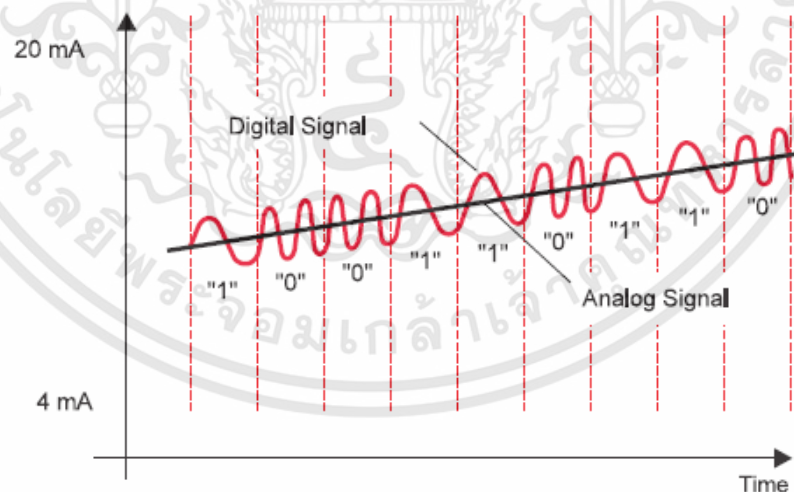
ฮาร์ทโปรโตคอล มีพื้นฐานมาจากมาตรฐานของการสื่อสารทางโทรศัพท์ (Bell 202) โดยใช้หลักการมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Shift Keying : FSK) เพื่อให้สัญญาณข้อมูลของค่าทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิจิตอลเปลี่ยนเป็นสัญญาณความถี่รูปคลื่นไซน์ด้วยแอมพลิจูดของสัญญาณคงที่ ทำให้สัญญาณข้อมูลเปลี่ยนไปตามความถี่ที่แน่นอนด้วยโมเด็ม (Modem) โดยการสร้างสัญญาณข้อมูลจะถูกปรับให้มีความถี่สองย่านคือ 1200 เฮิรตซ์และ 2200 เฮิรตซ์ จากการมอดูเลตทางความถี่ซึ่งจะสามารถเปรียบด้วยค่าข้อมูลดิจิตอล 1 และ 0 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 2.15 คลื่นสัญญาณข้อมูลรูปไซน์ทั้งสองความถี่จะถูกนำเข้าสู่สายส่งสัญญาณ ซึ่งสัญญาณจะถูกทำให้ทับซ้อนอยู่บนสัญญาณคลื่นพาหะ (Signal Carrier) อนุบาลอกมาตรฐาน 4-20 mA ซึ่งจะช่วยให้อุปกรณ์มีการสื่อสารข้อมูลแบบสองทิศทางเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งสัญญาณการสื่อสารเป็นแบบรูปไซน์ที่ถูกนำมาเข้าสู่สายส่งจะไม่มีผลกระทบต่อสัญญาณอนุบาลอก ช่วยให้อุปกรณ์มีการใช้ฮาร์ทโปรโตคอล สื่อสารค่าข้อมูลดิจิตอลพร้อมกับการส่งสัญญาณอนุบาลอกเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ทำให้สามารถแก้ไขหรือการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สนามได้อย่างสะดวกรวดเร็วยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการตั้งค่าย่านการวัด การเปลี่ยนหน่วยการวัดหรือการสอบเทียบ การส่งสัญญาณของฮาร์ทโปรโตคอลแสดงดังรูปที่ 2.16 [15]



รูปที่ 2.15 การมอดูเลตทางความถี่ของฮาร์ทโปรโตคอล



รูปที่ 2.16 การส่งสัญญาณของฮาร์ทโปรโตคอล

2.6.1 ฮาร์ทแบบไร้สาย (WirelessHART)

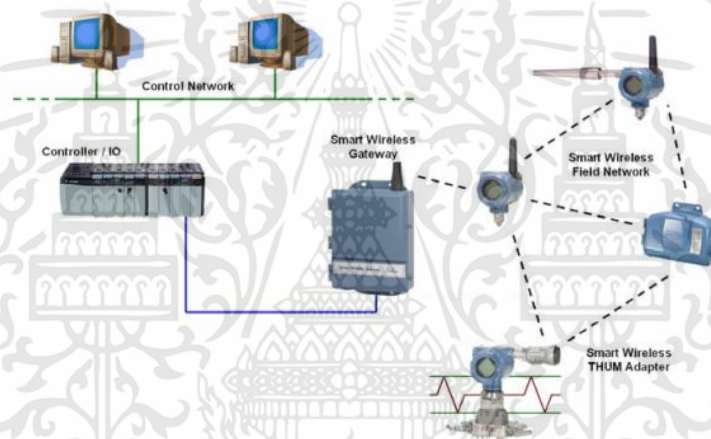
Wireless HART หรือ มาตรฐาน IEC62591-1 เป็นการสื่อสารที่อยู่บนพื้นฐานฮาร์ทโปรโตคอล แต่เป็นการสื่อสารแบบไร้สายอุปกรณ์การวัดที่จะใช้เทคโนโลยีไร้สายได้นั้นจะต้องเป็น Smart Device สามารถให้ข้อมูลของอุปกรณ์การวัดเชิงลึกได้มากขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการควบคุมให้ดีขึ้น อุปกรณ์การวัดที่ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายมีการใช้งานมากขึ้น เนื่องจาก ประหยัดค่าสายสัญญาณ และ ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง [16]

2.6.1.1 การส่งสัญญาณของฮาร์ทแบบไร้สาย

การส่งสัญญาณของฮาร์ทแบบไร้สาย ในงานอุตสาหกรรมแบ่งได้เป็น 2 ระดับ คือ 1) Wireless Plant Network ที่มีการรับส่งข้อมูลแบบจุดเชื่อมต่อและการกระจายข้อมูลทำงานเป็นโครงข่ายทำหน้าที่เชื่อมโยงหรือส่งผ่านข้อมูลจากอุปกรณ์การวัดเข้าสู่ระบบควบคุม ซึ่งอุปกรณ์แต่ละตัวมีความสามารถกระจายสัญญาณ เพื่อสร้างเครือข่ายจากระบบออกไปสู่ลูกข่ายที่อยู่ในรัศมีการกระจายสัญญาณของอุปกรณ์ที่กำหนดในวงสื่อสารเดียวกัน 2) Wireless Field Network ใช้เทคโนโลยีแบบไร้สายในย่านความถี่ 2.4 GHz ที่มีเสถียรภาพต้านงานสื่อสารด้วยเทคโนโลยีโครงข่าย (Mesh Topology) ทำให้อุปกรณ์ส่งสัญญาณนั้นสามารถหาเส้นทางที่ดีที่สุดได้ด้วยตัวเอง โดยมี HART Gateway เป็นตัวกลางในการสื่อสารกับระบบควบคุมหรือคอมพิวเตอร์

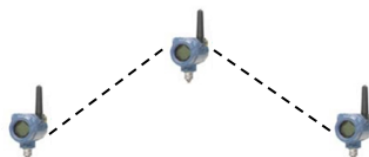


รูปที่ 2.17 โครงสร้างของฮาร์ทแบบไร้สาย

ประเภทของการส่งข้อมูลเชื่อมต่อเครือข่าย มี 2 ลักษณะคือ แบบจุดต่อจุด (Point-to-Point) และแบบหลายจุด (Multipoint) ดังนี้

2.6.1.1.1 แบบจุดต่อจุด (Point-to-Point)

การสื่อสารกันของอุปกรณ์สองอุปกรณ์ ซึ่งมีช่องทางในการสื่อสารเพียงช่องทางเดียว โดยไม่มีการใช้ช่องทางร่วมกับอุปกรณ์อื่น จึงทำให้เหมาะสมกับการใช้งานที่มีการรับส่งสัญญาณที่ต่อเนื่องและจำนวนมาก

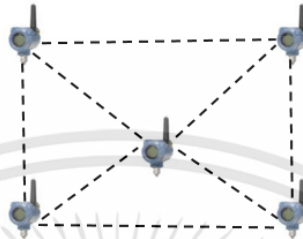


รูปที่ 2.18 การส่งสัญญาณแบบจุดต่อจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.1.2 แบบหลายจุด (Multipoint)

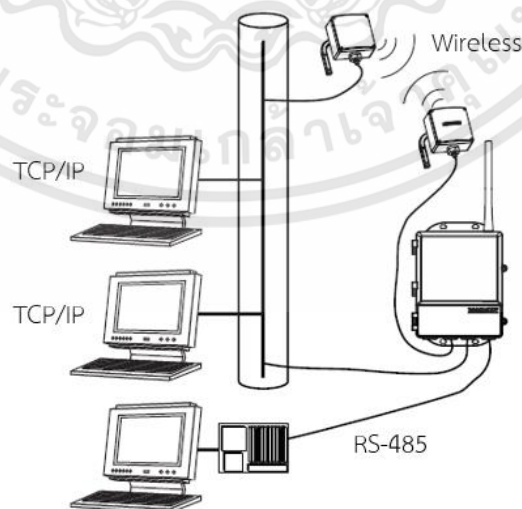
การสื่อสารเชื่อมโยงข้อมูลกับอุปกรณ์หลายอุปกรณ์ โดยแต่ละจุดเชื่อมต่อสามารถเก็บข้อมูลก่อนทำการส่งข้อมูลได้ และถ้าไม่มีการส่งข้อมูลสามารถใช้เป็นช่องทางการสื่อสารได้ ถ้ามีข้อมูลส่งมาพร้อมกันอาจเกิดความเสียหายขึ้นกับข้อมูลได้ ทำให้ต้องมีศูนย์กลางในการจัดการข้อมูล ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานที่มีการรับส่งสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องและมีจำนวนไม่มาก



รูปที่ 2.19 การส่งสัญญาณแบบหลายจุด

2.6.1.2 สมาร์ทเกตเวย์ไร้สาย (Smart Wireless Gateway)

สมาร์ทเกตเวย์ไร้สาย คือ อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อเครือข่ายของการสื่อสารฮาร์ดแวร์แบบไร้สาย เพื่อจัดการข้อมูลของอุปกรณ์การวัดและควบคุมที่ใช้การสื่อสารฮาร์ดแวร์แบบไร้สายกับระบบควบคุมหรือคอมพิวเตอร์ สมาร์ทเกตเวย์ไร้สายสามารถสื่อสารข้อมูลกับอุปกรณ์ภาคสนามที่มีการสื่อสารฮาร์ดแวร์แบบไร้สายในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้อย่างดี เนื่องจากสมาร์ทเกตเวย์ไร้สายสามารถจัดการเครือข่ายได้อัตโนมัติในการหาเส้นทางที่ดีที่สุด และไม่จำเป็นต้องกำหนดค่าเส้นทางในการสื่อสาร ซึ่งคุณสมบัตินี้ยังช่วยให้มั่นใจว่าอุปกรณ์ภาคสนามมีการสื่อสารฮาร์ดแวร์แบบไร้สายมีเส้นทางที่น่าเชื่อถือที่สุดในการส่งข้อมูล โดยสื่อสารกับอุปกรณ์สนามในย่านความถี่ 2.4 GHz การเชื่อมต่อระบบควบคุมหรือคอมพิวเตอร์เข้ากับสมาร์ทเกตเวย์ไร้สาย จะใช้การสื่อสารที่เป็น Modbus ผ่าน RS-485 หรือ Ethernet LAN TCP/IP ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลและมีประสิทธิภาพมากในระบบการวัดและควบคุม ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.20 [17]



รูปที่ 2.20 การเชื่อมต่อระบบควบคุมหรือคอมพิวเตอร์กับสมาร์ทเกตเวย์ไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Chung et al. [2] ได้นำเสนอการวิเคราะห์เวลาในการส่งข้อมูลของการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ในอุปกรณ์ที่ใช้การสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย ซึ่งพบว่าเวลาในการส่งข้อมูลที่ 8 วินาที สามารถยืดอายุของแบตเตอรี่ได้ 46% เมื่อเทียบกับการส่งข้อมูลที่ 1 วินาที โดยที่การเพิ่มเวลาในการส่งข้อมูลนี้ ผลที่ตามมา คือ ทำให้ประสิทธิภาพการควบคุมลดลง

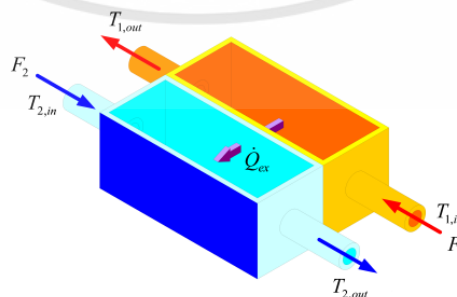
Chung et al. [3] ได้นำเสนอการวัดและควบคุมโดยมีการหน่วงเวลาโดยตรงของกระบวนการที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบ ซึ่งผลกระทบของการหน่วงเวลานั้นทำให้เปอร์เซ็นต์ของค่าพุ่งเกินเพิ่มมากขึ้น เวลาเข้าสู่สมดุลมากขึ้น และสุดท้ายเพิ่มอัตราความผิดพลาดของกระบวนการมากขึ้น

Christopher E. Hann et al. [5] ได้นำเสนอการพัฒนาวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้วิธีปริพันธ์เพื่อระบุระบบของ กลูโคส-อินซูลิน โดยเก็บค่ากลูโคส-อินซูลินจากผู้ป่วยในโรงพยาบาลซึ่งใช้โมเดลทางกายภาพดังนี้

$$\dot{G} = -p_G G - S_I (G + G_E) \frac{Q}{1 + \alpha_G Q} + P(t) \quad (2.27)$$

วิธีการนี้ช่วยให้สามารถระบุค่าพารามิเตอร์ที่แปรผันตามเวลาด้วยการคำนวณขั้นต่ำ ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้นสำหรับการระบุโมเดลโดยใช้ข้อมูลระยะยาว โมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสามารถจับความผิดพลาดที่เกิดจากเซ็นเซอร์ได้ถึง 7% โมเดลนี้สามารถคาดการณ์ผลล่วงหน้าได้ 1 ชั่วโมง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ระหว่างค่าจริงกับโมเดลอยู่ที่ 2 ถึง 11 % ซึ่งเป็นที่ยอมรับได้ในการควบคุมทางการแพทย์

Napasool Wongvanich และ Viriya Kongratana [5] ได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้วิธีปริพันธ์เพื่อระบุระบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยทำการเก็บค่าอุณหภูมิขาเข้าและขาออกทั้งฝั่งน้ำร้อนและน้ำเย็น ดังรูปที่ 2.21 และมีโมเดลทางกายภาพดังนี้



รูปที่ 2.21 การแลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_1 \dot{T}_{hot,out}(t) + T_{hot,out}(t) = k_1 T_{hot,in}(t) + (1 - k_1) T_{cold,out}(t) \quad (2.28)$$

$$\tau_2 \dot{T}_{cold,out}(t) + T_{cold,out}(t) = k_2 T_{cold,in}(t) + (1 - k_2) T_{hot,out}(t) \quad (2.29)$$

งานวิจัยนี้มีสัญญาณรบกวนจากการเก็บค่าจากกระบวนการจริง ซึ่งเกิดจากการเข้ารหัสในการรับส่งค่าของอุปกรณ์รับค่าสัญญาณรบกวนนี้ไม่มีผลต่อโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ผลลัพธ์โมเดลที่ได้เป็นข้อพิสูจน์ว่าการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้วิธีปริพันธ์ ที่นำเสนอนี้สามารถทนทานต่อการเกิดสัญญาณรบกวนได้ทุกประเภท

Bi et al. [7] ได้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้วิธีลาปลาซเพื่อสร้างสมการสำหรับการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้โมเดลของกระบวนการ First Order Plus Dead Time ทดสอบแบบ Step Test ผลลัพธ์โมเดลที่ได้จะเป็นสมการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนในการวัด และสามารถนำไปใช้กับการคำนวณตัวควบคุมพีไอดีได้

Blevins et al. [8] ได้นำเสนอตัวควบคุมพีไอดีแบบไร้สาย หรือ PIDPlus คือตัวควบคุมพีไอดีกับตัวกรองคาลมาน และ ตัวควบคุมพีไอดีกับตัวทำนายของสมิธ โดยใช้การวัดแบบไร้สาย และมีการหน่วงเวลาในการส่งข้อมูลในการสื่อสาร มีเครือข่ายการส่งข้อมูลแบบย้อนกลับเชิงบวก (Positive Feedback Network) เพื่ออัปเดตข้อมูลที่ถูกรวบรวมได้ ซึ่งสามารถควบคุมกระบวนการได้

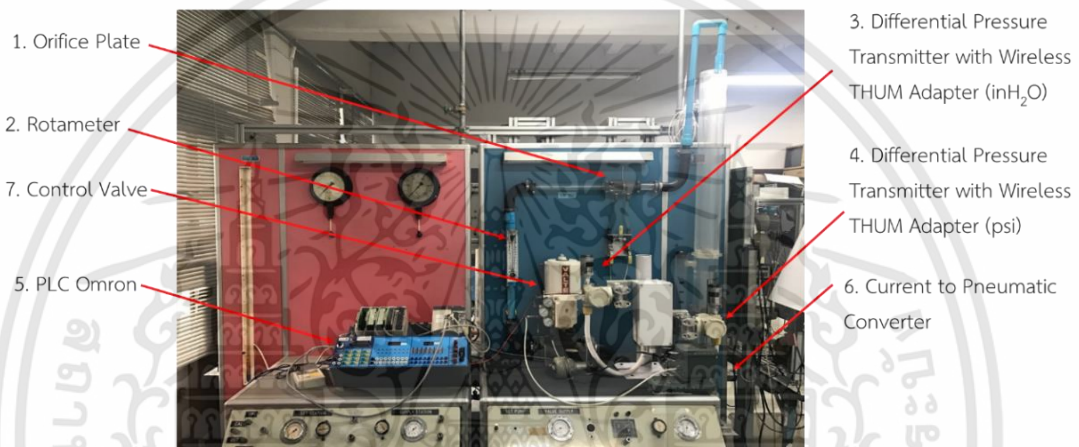
Abdullah et al. [9] ได้นำเสนอการปรับแต่งตัวควบคุมพีไอดี โดยทำการกรองข้อมูลของการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายด้วย Dynamically Filtering เพื่อให้การควบคุมราบรื่นขึ้น วิธีการที่นำเสนอสามารถนำไปใช้สำหรับการใช้งานในเครือข่าย ลูบเดี่ยว, สตาร์ และตาข่าย ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าตัวควบคุมพีไอดีทั่วไป

P. Somkane et al. [18] นำเสนอการควบคุมระดับของเหลว โดยจัดวงจรการควบคุมให้เป็นแบบคาสเคด ซึ่งตัวแปรควบคุมหลักเป็นระดับของเหลว และตัวแปรควบคุมรองเป็นอัตราการไหล ใช้อุปกรณ์วัดระดับ และอัตราการไหลเป็นแบบความดันแตกต่างกันที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างการควบคุมแบบคาสเคด และการควบคุมแบบวงรอบเดี่ยว โดยใช้โปรแกรม LabVIEW เป็นตัวควบคุมพีไอดีโหมดปรับจูนอัตโนมัติ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการควบคุมแบบคาสเคดนั้นมีสมรรถนะที่ดีกว่าการควบคุมแบบวงรอบเดี่ยว

บทที่ 3 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ

บทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองการควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย ที่ใช้ในการวิจัย และการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีปริพันธ์ (Integral) โดยใช้โมเดลเชิงเส้นและโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย อีกทั้งการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ Toolbox ใน MATLAB

3.1 แบบจำลองการควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย



รูปที่ 3.1 แบบจำลองการควบคุมระดับ

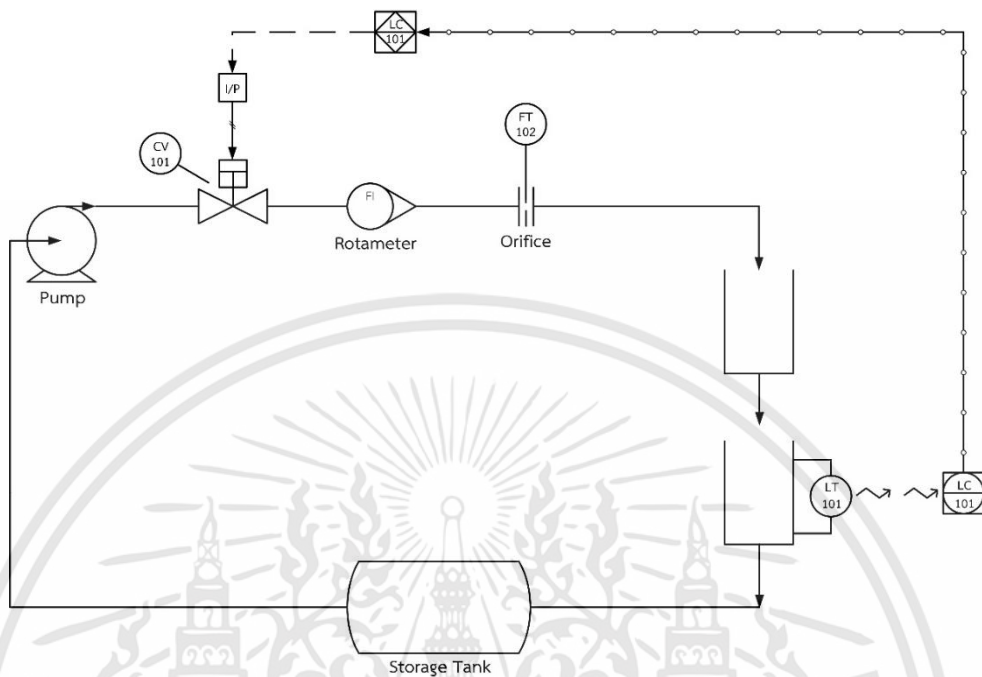
จากรูปที่ 3.1 ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ อุปกรณ์การวัดและชุดอุปกรณ์ควบคุม มีดังนี้

- | | | |
|--|---|-----------------------|
| 1. Orifice Plate | } | อุปกรณ์วัดอัตราการไหล |
| 2. Rotameter | | |
| 3. Differential Pressure Transmitter with Wireless THUM Adapter หน่วย inH ₂ O | } | อุปกรณ์วัดระดับ |
| 4. Differential Pressure Transmitter with Wireless THUM Adapter หน่วย psi | | |
| 5. PLC Omron with Digital to Analog Module | } | ชุดอุปกรณ์ควบคุม |
| 6. Current to Pneumatic Converter | | |
| 7. Control Valve | | |

การวัดระดับจะใช้ Differential Pressure Transmitter with Wireless THUM Adapter หน่วย psi การวัดอัตราการไหลจะใช้ Differential Pressure Transmitter with Wireless THUM Adapter หน่วย inH₂O เชื่อมต่อกับแผ่นออริฟิส ส่วนชุดควบคุมจะใช้ PLC Omron with Digital to Analog Module, Current to Pneumatic Converter และ Control Valve

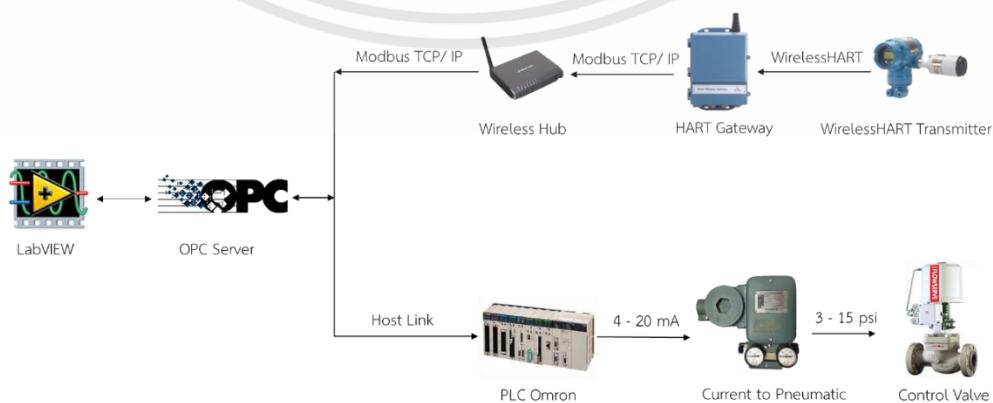
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและควบคุมของกระบวนการจะแสดงอยู่ในรูป P&ID (Piping and Instrumentation Diagram) แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 P&ID ของการควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย

การติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ กับ คอมพิวเตอร์จะใช้โปรแกรม LabVIEW เขียนเป็นโปรแกรมเก็บค่า และเป็นตัวควบคุมพีไอดี โดยผ่านซอฟต์แวร์ OPC Server อุปกรณ์การวัดมีการติดต่อสื่อสารจาก WirelessHART Transmitter มายัง HART Gateway เป็นการติดต่อสื่อสารแบบ WirelessHART จากนั้นทำการเชื่อมต่อ HART Gateway กับ Hub Wireless ด้วยสาย LAN เป็นการติดต่อสื่อสารแบบ Modbus TCP/IP เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อแบบไร้สายกับคอมพิวเตอร์ได้ ส่วนของชุดอุปกรณ์ควบคุมมีการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับ PLC Omron ด้วยพอร์ตอนุกรม RS-232 เป็นการติดต่อสื่อสารแบบ Host Link จากนั้นทำการเชื่อมต่อ PLC Omron กับ I/P Converter ผ่าน D/A Module เป็นสัญญาณไฟฟ้ามาตรฐาน 4-20 mA และสุดท้ายจาก I/P Converter ไปที่ Control Valve เป็นสัญญาณลมมาตรฐาน 3-15 psi ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังการติดต่อระหว่างอุปกรณ์การวัดและควบคุมกับคอมพิวเตอร์

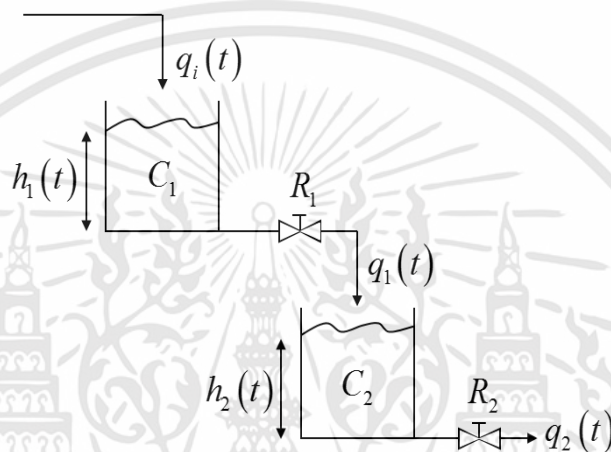
เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิชาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีปริพันธ์

การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีปริพันธ์จะทำการระบุค่าพารามิเตอร์ของระบบ โดยใช้โมเดลเชิงเส้น และโมเดลที่ปรับให้เข้ากับการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย เพื่อเปรียบเทียบหาโมเดลที่เหมาะสมกับระบบนี้มากที่สุด

3.2.1 การระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้น

พิจารณากระบวนการควบคุมของเหลวที่สองแท่งต่อแบบไม่ปฏิสัมพันธ์กัน ซึ่งทั้งสองแท่งเป็นแท่งเปิดจากแบบจำลองการควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 สองแท่งต่อแบบไม่ปฏิสัมพันธ์กัน

จากรูปที่ 3.4 เมื่อพิจารณาสมการแบร์นูลลีทั้งสองแท่ง จะได้สมการดังต่อไปนี้

แท่งที่ 1 :

$$q_i(t) - q_1(t) = C_1 \frac{dh_1(t)}{dt} \quad (3.1)$$

แท่งที่ 2 :

$$q_1(t) - q_2(t) = C_2 \frac{dh_2(t)}{dt} \quad (3.2)$$

พิจารณาที่แท่งสองจึงทำการหาโมเดลทางกายภาพของแท่งสองเท่านั้น เนื่องจากต้องการควบคุมระดับที่แท่ง 2 จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ของ $q_1(t)$ กับ $q_i(t)$ เนื่องจาก $q_i(t)$ สามารถรู้ค่าได้จากการวัดอัตราการไหลเข้าแท่ง 1 และหาความสัมพันธ์ของ $q_2(t)$ กับ $h_2(t)$ เนื่องจาก $h_2(t)$ สามารถรู้ค่าจากการวัดระดับในแท่ง 2 จะหาความสัมพันธ์ทั้ง 2 ได้ดังนี้

$$q_1(t) = \tau_1 q_i(t) \quad (3.3)$$

$$q_2(t) = \frac{h_2(t)}{R_2} \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

τ_1 คือ ค่าคงที่ที่ทำให้ $q_i(t)$ หน่วงขึ้น

R_2 คือ ค่าความต้านทานของวาล์ว

นำสมการที่ 3.3 และสมการที่ 3.4 แทนค่าในสมการที่ 3.2 จะได้

$$h_2'(t) = \frac{\tau_1}{C_2} q_i(t) - \frac{1}{R_2 C_2} h_2(t) \quad (3.5)$$

สมการที่ได้จะเป็นโมเดลทางกายภาพของแทงค์ 2 ที่เป็นโมเดลเชิงเส้น จะเห็นว่าในสมการจะมีอินพุตคือ $q_1(t)$ และเอาต์พุต คือ $h_2(t)$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันในการสร้างโมเดลทางกายภาพดังสมการที่ 3.6

$$h_2'(t) = a_1 q_i(t) - a_2 h_2(t) \quad (3.6)$$

$$\text{เมื่อ } a_1 = \frac{\tau_1}{C_2}, \quad a_2 = \frac{1}{R_2 C_2}$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.6 เทียบกับเวลา

$$h_2(t) - h_2(0) = a_1 \int_0^t q_i(t) dt - a_2 \int_0^t h_2(t) dt \quad (3.7)$$

$$h_2(t) = h_2(0) + a_1 \int_0^t q_i(t) dt - a_2 \int_0^t h_2(t) dt \quad (3.8)$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.7 จะถูกหาค่าโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Rule) แล้วแทน $h_{2,data}(t) = h_2(t)$ และ $q_{i,data}(t) = q_i(t)$ สำหรับ $t = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ในสมการที่ 3.8 จากนั้นเขียนสมการที่ 3.8 ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์จะได้

$$Ax = b \quad (3.9)$$

เมื่อ

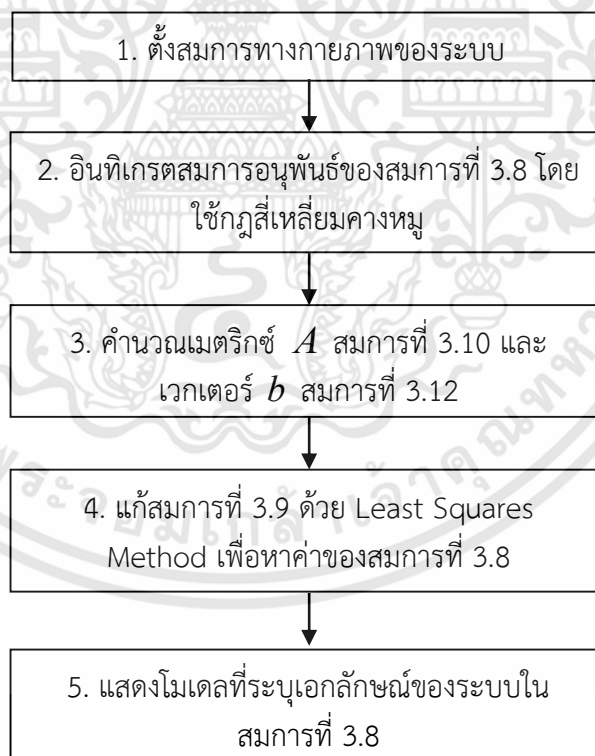
$$A = \begin{bmatrix} 1 & + \int_0^{t_1} q_{i,data}(t) dt & - \int_0^{t_1} h_{2,data}(t) dt \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & + \int_0^{t_N} q_{i,data}(t) dt & - \int_0^{t_N} h_{2,data}(t) dt \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$x = \begin{bmatrix} h_2(0) \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$b = \begin{bmatrix} h_2(t_0) \\ h_2(t_1) \\ \vdots \\ h_2(t_n) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

แก้สมการที่ 3.9 ถึง สมการที่ 3.12 โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด หรือ Least Squares Method เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ a_1 และ a_2 ซึ่ง $h_2(0)$ เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น หรือค่าระดับน้ำเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ กระบวนการระบุโมเดลสำหรับระดับของของเหลว $h_2(t)$ ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่วัดได้ ขั้นตอนทั้งหมดสรุปในแผนผัง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนสำหรับการระบุค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีปริพันธ์

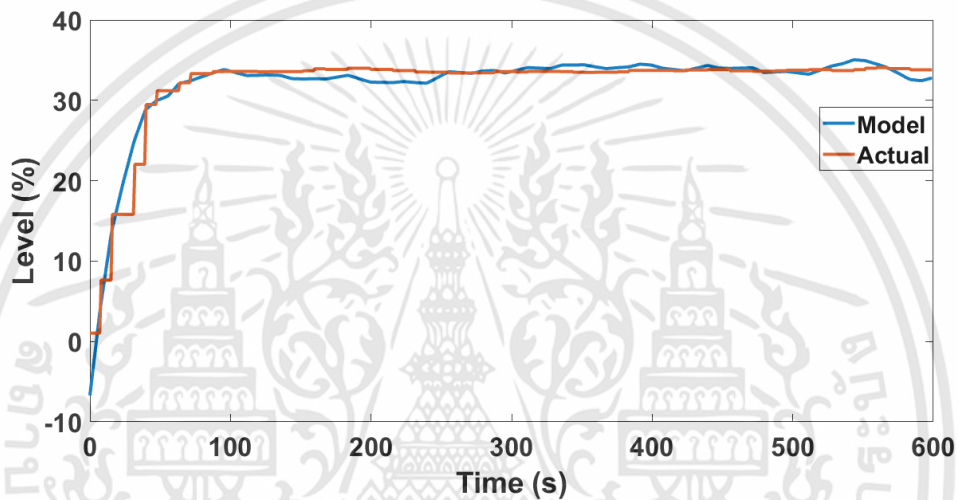
3.2.1.1 ขั้นตอนการทดลอง

ทำการทดสอบผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันได เพื่อทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ซึ่งจะทำการทดลองโดยเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%, 40%, 50%, 60% เพื่อทำการเก็บค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

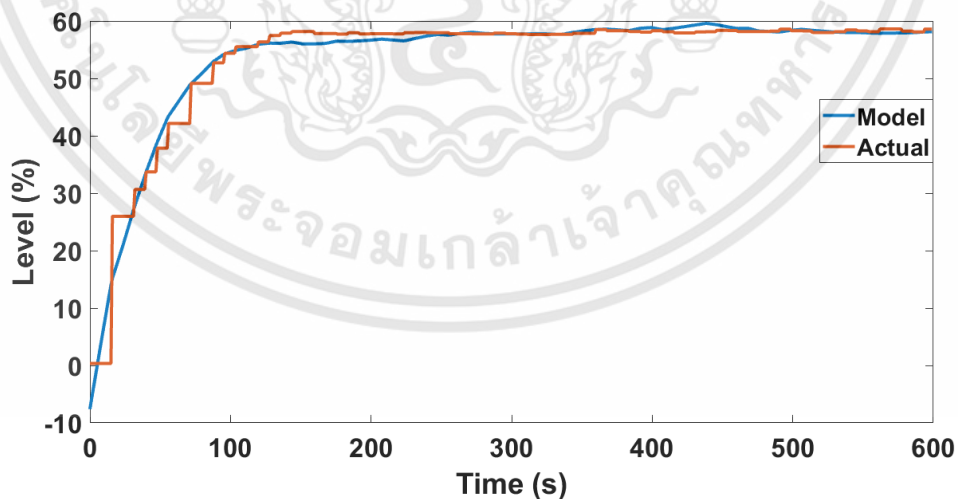
อัตราการไหล และค่าของระดับน้ำในแทงค์ที่วัดได้จากทรานสมิตเตอร์ที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเก็บค่าจากกระบวนการ โดยมีอัตราการส่งข้อมูลอยู่ที่ 8 วินาที เก็บข้อมูลเป็นเวลา 600 วินาทีในทุกการทดลอง การทดสอบผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดนี้เป็นการทดสอบแบบวงรอบเปิด ซึ่งให้การตอบสนองทั้งหมดที่จำเป็นสำหรับการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

3.2.1.2 ผลการทดลองการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้น

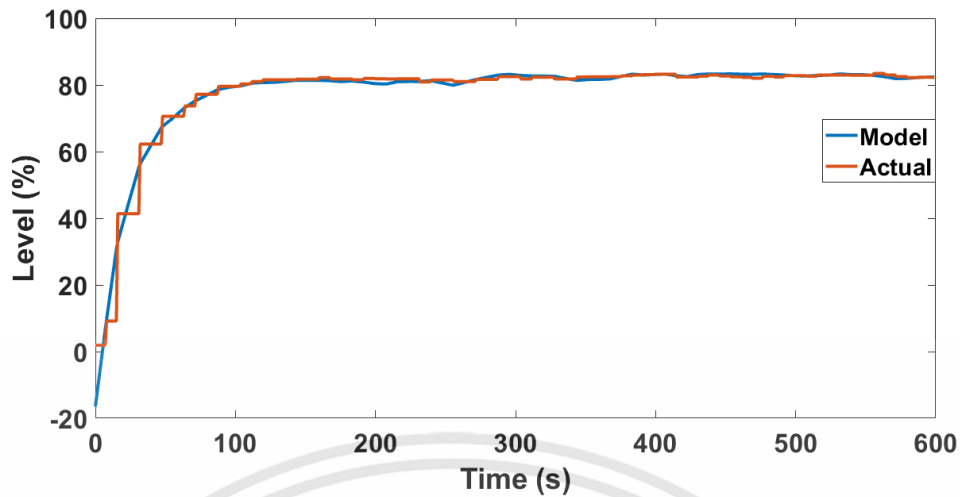
เมื่อทำการเก็บค่าอัตราการไหล และค่าของระดับน้ำแล้วจากนั้นจะทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบตามขั้นตอนในรูปที่ 3.5 ขั้นตอนสำหรับการระบุค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีสปริงค์นส์ เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการที่ 3.8 จะได้โมเดลดังนี้



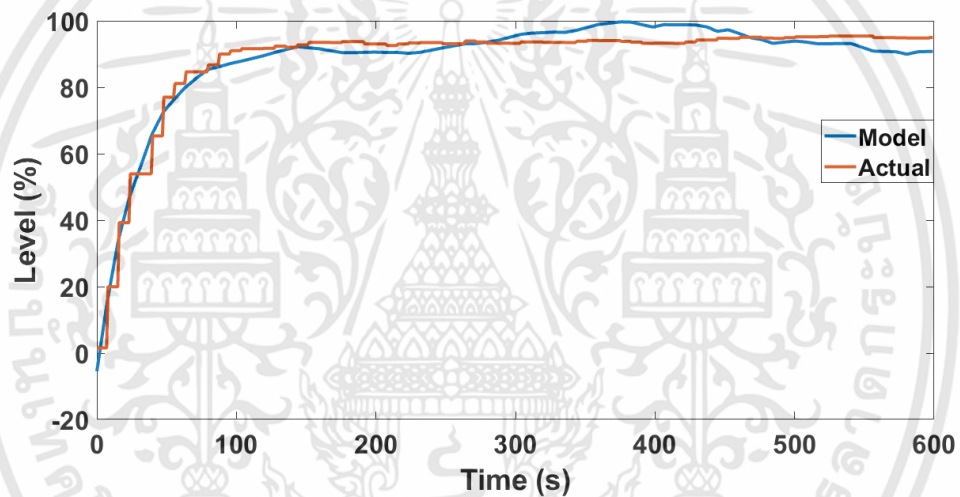
รูปที่ 3.6 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้นที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%



รูปที่ 3.7 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้นที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 40%



รูปที่ 3.8 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้นที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50%



รูปที่ 3.9 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้นที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 60%

$$\text{จากสมการที่ 3.8 } h_2(t) = h_2(0) + a_1 \int_0^t q_i(t) dt - a_2 \int_0^t h_2(t) dt$$

จะได้ค่าพารามิเตอร์ a_1 และ a_2 ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลเชิงเส้นโดยเปิดวาล์วควบคุม ที่ 30%, 40%, 50%, และ 60%

% เปิดวาล์วควบคุม / ค่าพารามิเตอร์	30%	40%	50%	60%
a_1	0.2036	0.1306	0.2061	0.1901
a_2	0.0427	0.0257	0.0356	0.0313

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยในการจับคู่ระหว่างค่าจริงกับโมเดล (Matching Error) เพื่อประเมินความเหมาะสมของโมเดลเชิงเส้น ดังสมการที่ 3.13

$$\text{Matching Error} = \text{mean}|Model - Actual| \quad (3.13)$$

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าจริงกับโมเดล สำหรับการเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%, 40%, 50%, 60% มีค่าเท่ากับ 0.8234, 1.0504, 1.0112 และ 2.9234 ตามลำดับ ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าโมเดลเชิงเส้นสามารถใช้ กับกระบวนการที่มีการหน่วงเวลาจากการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายได้ แม้ว่าโมเดลนี้ยังไม่ได้คิดการหน่วงเวลาจากการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย

3.2.2 การระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย

จากโมเดลเชิงเส้น จะพิจารณาเวลาหน่วงของการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายเข้าไปในโมเดลเชิงเส้นทำการสุ่มข้อมูลทุก 8 วินาทีจากกระบวนการจริงโดยให้ $t_H = t_{HART}$ นำไปแทน ในสมการที่ 3.5 จะได้

$$h'_2(t-t_H) = \frac{\tau_1}{C_2} q_i(t-t_H) - \frac{1}{R_2 C_2} h_2(t-t_H) \quad (3.14)$$

จากอนุกรมเทย์เลอร์ของฟังก์ชัน $h_2(t-t_H)$ และ $q_i(t-t_H)$ พิจารณาพจน์ที่สอง จะได้ว่า

$$h_2(t-t_H) = h_2(t) - t_H h'_2(t) \quad (3.15)$$

$$h'_2(t-t_H) = h'_2(t) - t_H h''_2(t) \quad (3.16)$$

$$q_i(t-t_H) = q_i(t) - t_H q'_i(t) \quad (3.17)$$

การประมาณนี้ใช้ได้สำหรับ กระบวนการที่มีการหน่วงเวลาไม่มากเมื่อเทียบกับพลวัตของกระบวนการ ซึ่งเป็นวิธีการประมาณเพื่อลดความซับซ้อนของรูปแบบและการคำนวณ จากนั้นแทนสมการที่ 3.15 ถึง สมการที่ 3.17 ในสมการที่ 3.14 ซึ่งจะได้

$$h''_2(t) = \left(\frac{1}{t_H} - \frac{1}{R_2 C_2} \right) h'_2(t) + \frac{1}{t_H R_2 C_2} h_2(t) + \frac{\tau_1}{C_2} q'_i(t) - \frac{\tau_1}{t_H C_2} q_i(t) \quad (3.18)$$

โมเดลที่เกิดขึ้นจากการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายนี้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง ซึ่งค่าคงที่อาจเปลี่ยนแปลงตามเวลา และเป็นโมเดลไม่เป็นเชิงเส้น จัดรูปสมการที่ 3.18 ใหม่จะได้

$$h''_2(t) = a_1 h'_2(t) + a_2 h_2(t) + b_1 q'_i(t) - b_2 q_i(t) \quad (3.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{เมื่อ } a_1 = \frac{1}{t_H} - \frac{1}{R_2 C_2}, \quad a_2 = \frac{1}{t_H R_2 C_2}, \quad b_1 = \frac{\tau_1}{C_2} \quad \text{และ} \quad b_2 = \frac{\tau_1}{t_H C_2}$$

อินทิเกรตสองชั้นสมการที่ 3.19 เทียบเวลา จะได้

$$\begin{aligned} \int_0^t h_2'(t) dt - \int_0^t h_2'(0) dt &= \int_0^t a_1 [h_2(t) - h_2(0)] dt + a_2 \int_0^t \int_0^t h_2(t) dt dt \\ &+ \int_0^t b_1 [q_i(t) - q_i(0)] dt - b_2 \int_0^t \int_0^t q_i(t) dt dt \end{aligned} \quad (3.20)$$

จัดสมการให้อยู่ในโมเดลของแท่งค 2 จะได้

$$\begin{aligned} h_2(t) &= h_2(0) + a_0(t - t_0) + a_1 \int_0^t h_2(t) dt + a_2 \int_0^t \int_0^t h_2(t) dt dt \\ &+ b_1 \int_0^t q_i(t) dt - b_2 \int_0^t \int_0^t q_i(t) dt dt \end{aligned} \quad (3.21)$$

เมื่อ $a_0 = [h_2'(0) - a_1 h_2(0) - b_1 q_i(0)]$ จากนั้นทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.21 ซึ่งจะถูกหาค่าโดยใช้กฎสี่เหลี่ยมคางหมู แล้วแทน $h_{2,data}(t) = h_2(t)$ และ $q_{i,data}(t) = q_i(t)$ สำหรับ $t = \{t_0, t_2, \dots, t_n\}$ ในสมการที่ 3.21 จากนั้นเขียนสมการที่ 3.21 ให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์จะได้

$$Fx = b \quad (3.22)$$

เมื่อ

$$F = \begin{bmatrix} 1 & +(t_1 - t_0) & + \int_{t_0}^{t_1} h_{2,data}(t) dt & + \int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_1} h_{2,data}(t) dt dt & + \int_{t_0}^{t_1} q_{i,data}(t) dt & - \int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_1} q_{i,data}(t) dt dt \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & +(t_N - t_0) & + \int_{t_0}^{t_N} h_{2,data}(t) dt & + \int_{t_0}^{t_N} \int_{t_0}^{t_N} h_{2,data}(t) dt dt & + \int_{t_0}^{t_N} q_{i,data}(t) dt & - \int_{t_0}^{t_N} \int_{t_0}^{t_N} q_{i,data}(t) dt dt \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$x = \begin{bmatrix} h_2(0) \\ a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$b = \begin{bmatrix} h_2(t_0) \\ h_2(t_1) \\ \cdot \\ \cdot \\ h_2(t_n) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

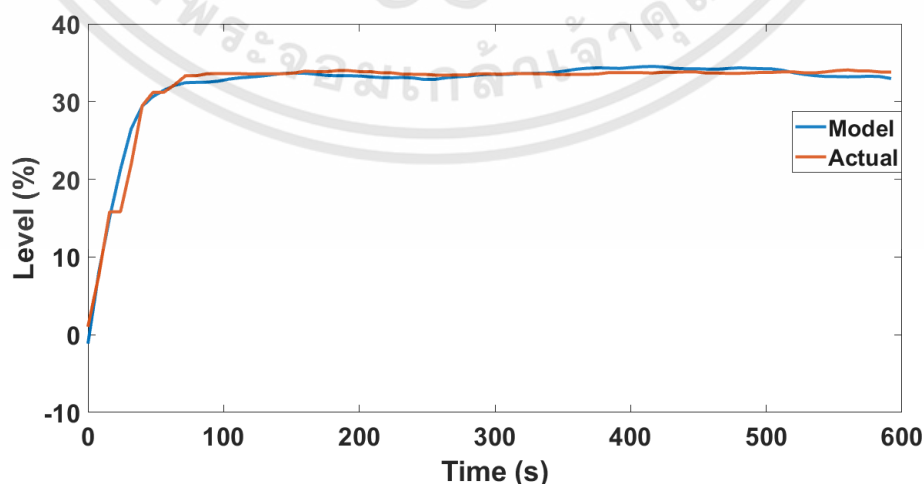
แก้สมการที่ 3.22 ถึงสมการที่ 3.25 โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด หรือ Least Squares Method เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ a_0, a_1, a_2, b_1 และ b_2 ซึ่ง $h_2(0)$ เป็นเงื่อนไขเริ่มต้นหรือค่าระดับน้ำเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ กระบวนการระบุโมเดลสำหรับระดับของของเหลว $h_2(t)$ ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่วัดได้ ขั้นตอนทั้งหมดสรุปในแผนผัง ดังรูปที่ 3.5 ขั้นตอนสำหรับการระบุค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีปริพันธ์

3.2.2.1 ขั้นตอนการทดลอง

ทำการทดสอบผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันได เพื่อทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ซึ่งจะทำการทดลองโดยเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%, 40%, 50%, 60% เพื่อทำการเก็บค่าอัตราการไหล และค่าของระดับน้ำในแท่งค้ำที่วัดได้จากทรานสมิตเตอร์ที่มีการสื่อสารฮาร์ดแวร์แบบไร้สาย ใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเก็บค่าจากกระบวนการ โดยมีอัตราการส่งข้อมูลอยู่ที่ 8 วินาที เก็บข้อมูลเป็นเวลา 600 วินาทีในทุกการทดลอง การทดสอบผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดนี้เป็น การทดสอบแบบวงรอบเปิด ซึ่งให้การตอบสนองทั้งหมดที่จำเป็นสำหรับการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

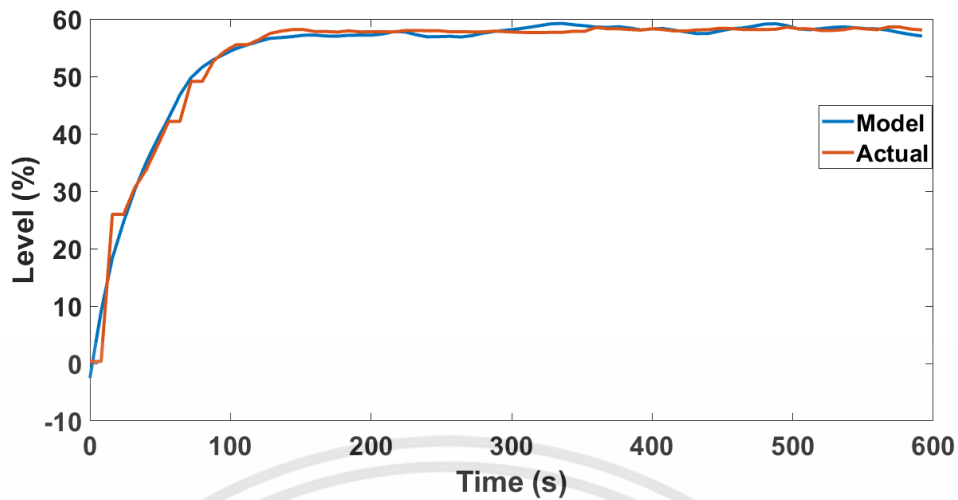
3.2.2.2 ผลการทดลองการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแวร์แบบไร้สาย

เมื่อทำการเก็บค่าอัตราการไหลและค่าของระดับน้ำแล้ว จากนั้นจะทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบตามขั้นตอนในรูปที่ 3.5 ขั้นตอนสำหรับการระบุค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีปริพันธ์ เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ของสมการที่ 3.21 จะได้โมเดลดังนี้

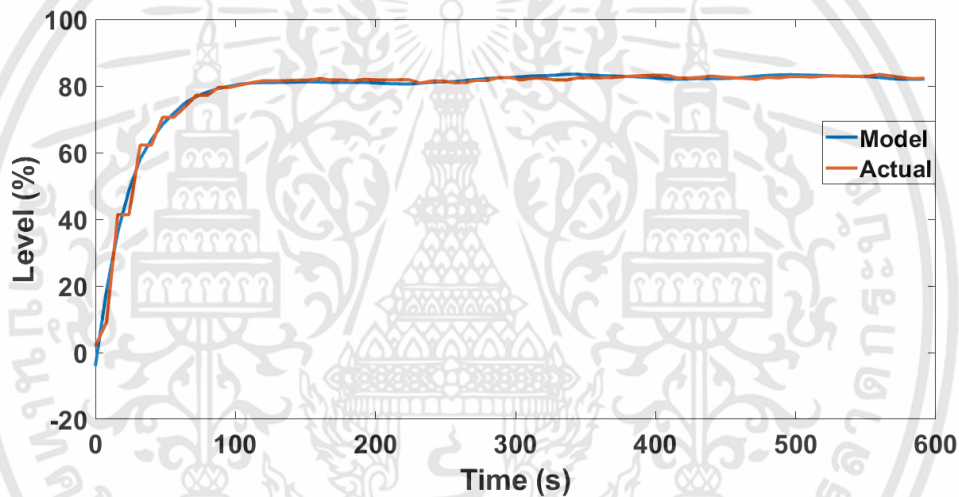


รูปที่ 3.10 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแวร์แบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%

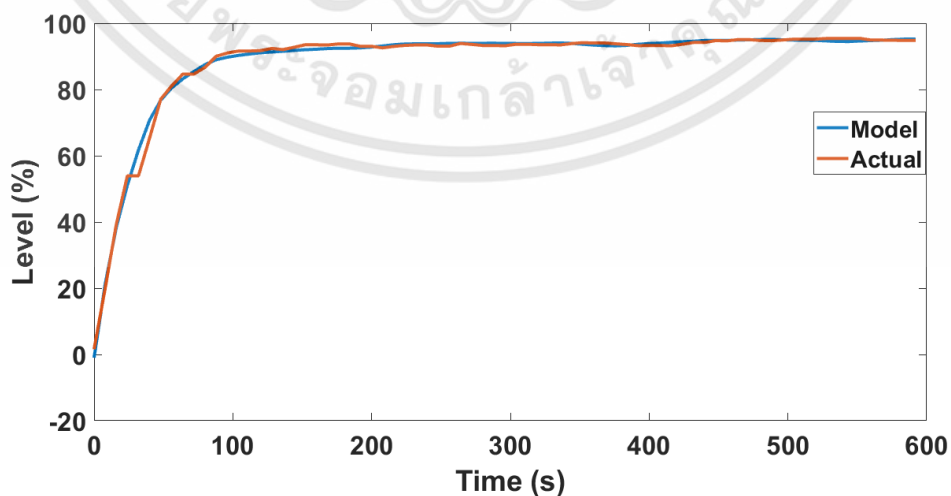
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 40%



รูปที่ 3.12 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50%



รูปที่ 3.13 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 60%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมเดลสำหรับการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย จากการทดลองเปิดวาล์วทั้งสี่ตำแหน่งในการระบุค่าพารามิเตอร์ จากรูปที่ 3.10 ถึง รูปที่ 3.13 แสดงค่าจริงกับโมเดลสำหรับการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย จะเห็นได้จากผลการทดลองว่าการจับคู่ระหว่างข้อมูลจริง กับโมเดลสำหรับการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายนั้นใกล้เคียงกว่าโมเดลเชิงเส้นอย่างมาก โดยเฉพาะข้อมูลที่เริ่มต้น โมเดลสำหรับการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายมีประสิทธิภาพดีกว่าโมเดลเชิงเส้น ในระบบนี้

$$\text{จากสมการที่ 3.21} \quad h_2(t) = h_2(0) + a_0(t - t_0) + a_1 \int_0^t h_2(t) dt + a_2 \int_0^t \int_0^t h_2(t) dt dt \\ + b_1 \int_0^t q_i(t) dt - b_2 \int_0^t \int_0^t q_i(t) dt dt$$

จะได้ค่าพารามิเตอร์ a_0, a_1, a_2, b_1 และ b_2 ตามตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย โดยเปิดวาล์วควบคุม ที่ 30%, 40%, 50%, และ 60%

% เปิดวาล์วควบคุม / ค่าพารามิเตอร์	30%	40%	50%	60%
a_0	1.8898	3.4802	3.0047	3.8404
a_1	-0.0465	-0.0306	-0.0636	-0.0310
a_2	-0.0003	-0.0002	-0.0010	0.0001
b_1	-0.0778	-0.1847	-0.0089	-0.0459
b_2	-0.0014	-0.0009	-0.0055	0.0005

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าจริงกับโมเดล สำหรับการเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%, 40%, 50%, 60% มีค่าเท่ากับ 0.8220, 0.8998, 0.7902, 0.8253 ตามลำดับสำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความผิดพลาดลดลง 25% เมื่อเทียบกับโมเดลเชิงเส้น โมเดลนี้เหมาะสมกับระบบ ภายใต้การหน่วงเวลาของการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย

3.3 การระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ Toolbox ใน MATLAB

การระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ Toolbox ใน MATLAB จะเป็นการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Black Box เนื่องจากไม่รู้ค่าพารามิเตอร์โครงสร้างของระบบเลย และเป็นการสุ่มค่าพารามิเตอร์ในการหาโมเดลจะใช้โมเดลคือ Polynomial Models ซึ่งใช้วิธีหาแบบ ARMAX (Autoregressive Moving Average with eXogenous Inputs) สมการ ARMAX แสดงดังนี้

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) = b_1 u(t-n_k) + \dots + b_{n_b} u(t-n_k-n_b+1) \\ + c_1 e(t-1) + \dots + c_{n_c} e(t-n_c) + e(t) \quad (3.26)$$

- เมื่อ $y(t)$ คือ Output
 $u(t)$ คือ Input
 $e(t)$ คือ สัญญาณรบกวน (Disturbance)
 n_a คือ จำนวนโพล
 n_b คือ จำนวนซีโรบวก 1
 n_c คือ ค่าสัมประสิทธิ์ C
 n_k คือ จำนวนค่าของ Input

สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + C(q)e(t) \quad (3.27)$$

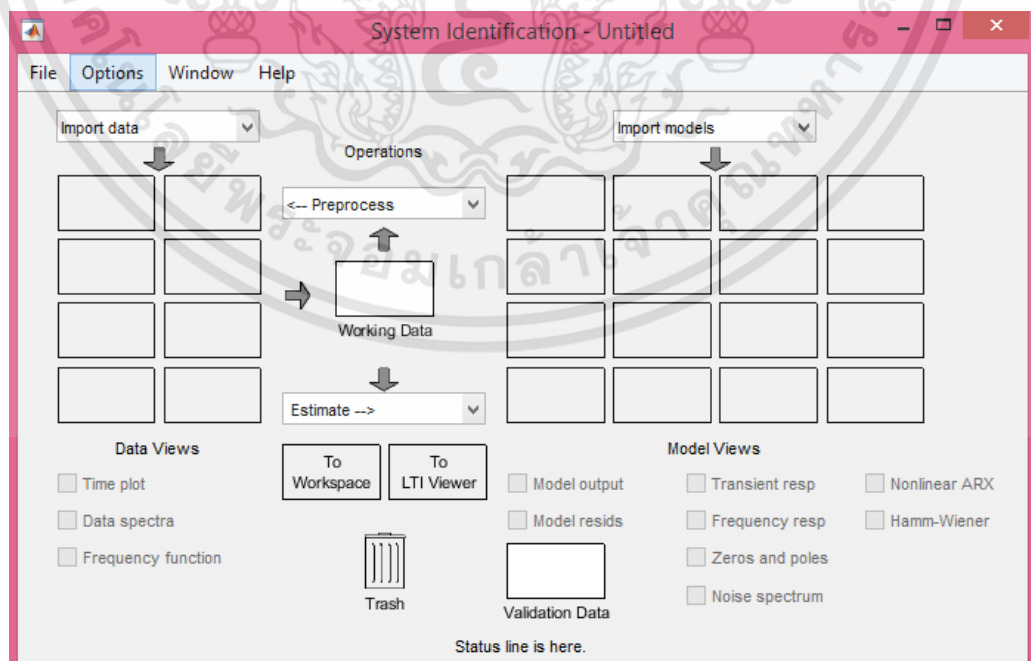
ค่าพารามิเตอร์ n_a , n_b , n_c , n_k คือค่าพารามิเตอร์ที่เกิดจากการสุ่มขึ้นมา เมื่อทำการระบุค่าเอกลักษณ์ของระบบจาก MATLAB คำตอบที่ได้จะเป็นสมการ $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ ดังนี้

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \quad (3.28)$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b+1} \quad (3.29)$$

$$C(q) = 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{n_c}q^{-n_c} \quad (3.30)$$

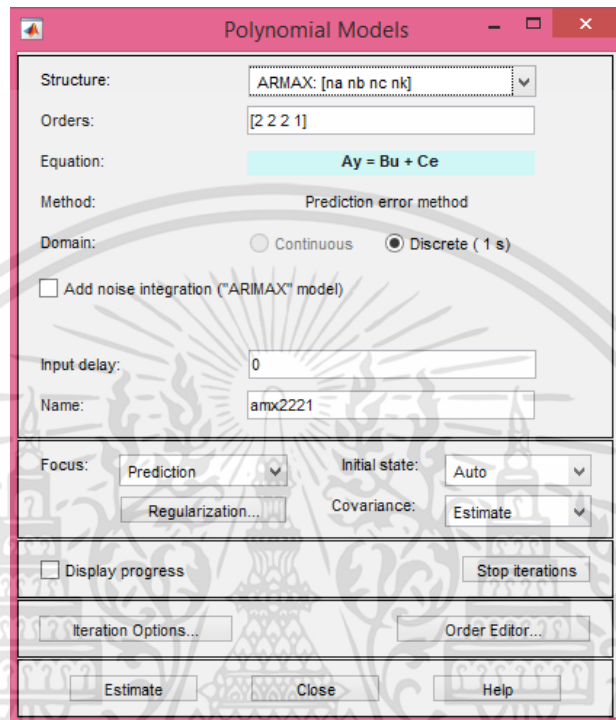
Toolbox System Identification ใน MATLAB แสดงดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 Toolbox System Identification ใน MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการเลือก Import Data เป็น Time Domain Data แล้วทำการ Import Data ซึ่ง Input คือ Flow และ Output คือ Level จากนั้น เลือก Estimate Polynomial Models เพื่อสร้างโมเดลที่เป็นพหุนาม ทำการเลือก Structure เป็น ARMAX แล้วสุ่มเลข Order หรือก็คือ ค่าพารามิเตอร์ n_a, n_b, n_c, n_k จากวิธีสุ่มลองผิดลองถูก ดังรูป 3.15



รูปที่ 3.15 Polynomial Models ใน MATLAB

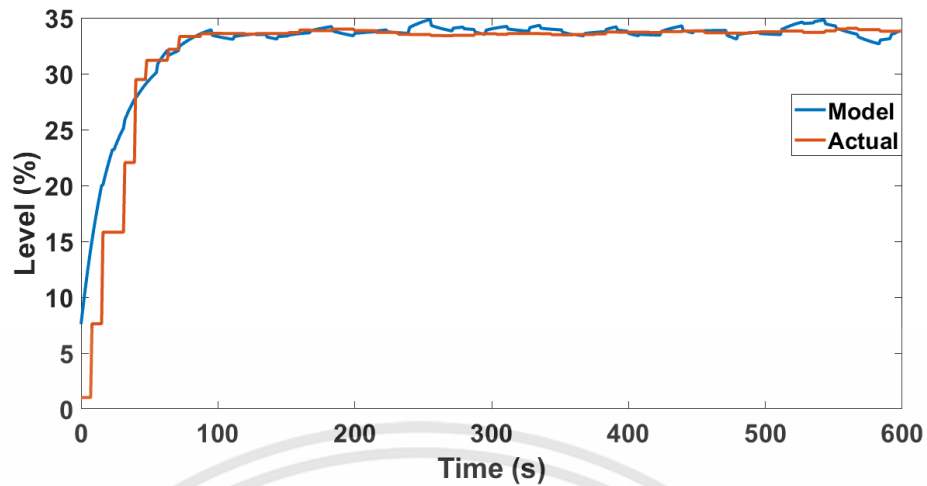
3.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

ทำการทดสอบผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันได เพื่อทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB จะใช้โมเดลคือ Polynomial Models ใช้วิธีหาแบบ ARMAX ซึ่งจะทำการทดลองโดยเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%, 40%, 50%, 60% เพื่อทำการเก็บค่าอัตราการไหล และค่าของระดับน้ำในแท่งที่วัดได้จากทรานสมิตเตอร์ที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สาย โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ในการเก็บค่าจากกระบวนการ โดยมีอัตราการส่งข้อมูลอยู่ที่ 8 วินาที เก็บข้อมูลเป็นเวลา 600 วินาทีในทุกการทดลอง การทดสอบผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดนี้เป็นการทดสอบแบบวงรอบเปิด ซึ่งให้การตอบสนองทั้งหมดที่จำเป็นสำหรับการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

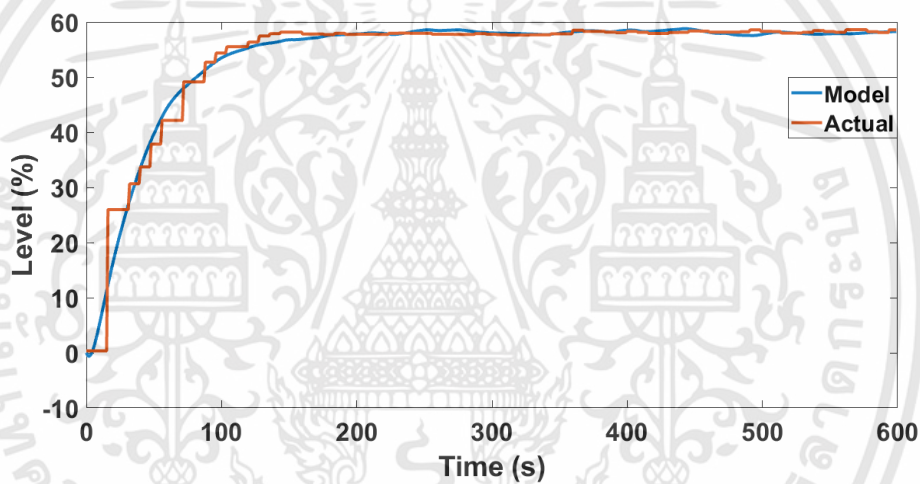
3.3.2 ผลการทดลองระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ Toolbox ใน MATLAB

เมื่อทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB ที่ใช้โมเดลคือ Polynomial Models ด้วยวิธีหาแบบ ARMAX ซึ่งจะทำการทดลองโดยเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%, 40%, 50%, 60% จะได้โมเดล และสมการพารามิเตอร์ของ ARMAX ดังนี้

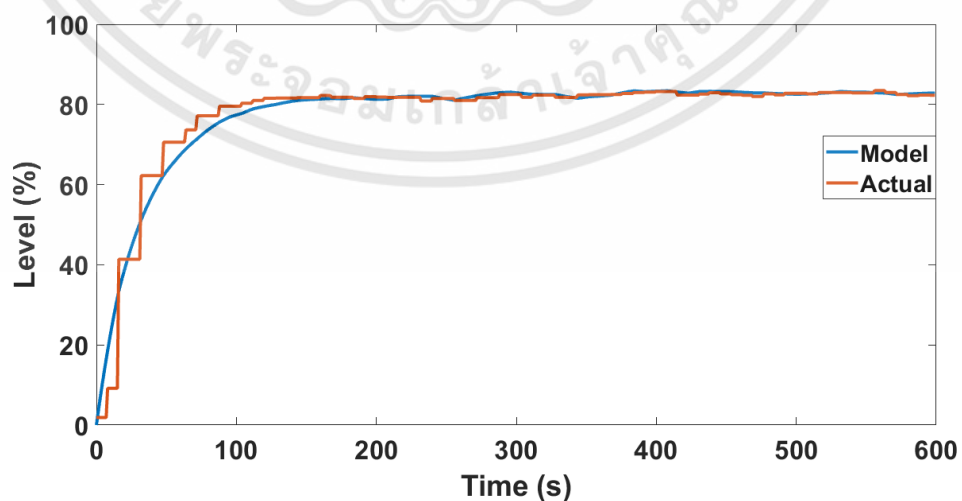
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB ที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%

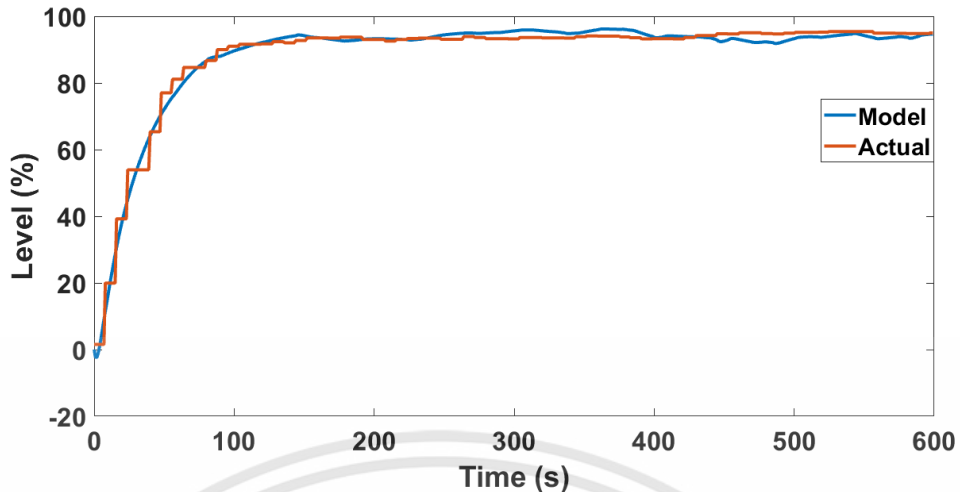


รูปที่ 3.17 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB ที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 40%



รูปที่ 3.18 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB ที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ค่าจริงกับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB ที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 60%

จากสมการที่ 3.27 $A(q)y(t) = B(q)u(t - n_k) + C(q)e(t)$ ซึ่งจะได้คำตอบของสมการ $A(q)$, $B(q)$, $C(q)$ เป็นค่าพารามิเตอร์ของโมเดล ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์ของโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB โดยเปิดวาล์วควบคุม ที่ 30%, 40%, 50%, และ 60%

ค่าพารามิเตอร์ / % เปิดวาล์วควบคุม	$A(q)$	$B(q)$	$C(q)$
30%	$1 - 1.8160z^{-1} + 0.8232z^{-2}$	$0.3603z^{-1} - 0.3278z^{-2}$	$1 - 1.0090z^{-1} + 0.0284z^{-2}$
40%	$1 - 1.7850z^{-1} + 0.7901z^{-2}$	$-0.0468z^{-1} + 0.0725z^{-2}$	$1 - 0.9562z^{-1} - 0.0438z^{-2}$
50%	$1 - 1.3730z^{-1} + 0.3945z^{-2}$	$0.0844z^{-1} + 0.0426z^{-2}$	$1 - 0.7268z^{-1} - 0.1702z^{-2}$
60%	$1 - 1.5310z^{-1} + 0.5450z^{-2}$	$-0.1563z^{-1} + 0.2436z^{-2}$	$1 - 0.7980z^{-1} - 0.0834z^{-2}$

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าจริงกับโมเดล สำหรับการเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%, 40%, 50%, 60% มีค่าเท่ากับ 1.0337, 1.0048, 1.3405, 1.5619 ตามลำดับ สำหรับโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วย Toolbox ใน MATLAB ค่าพารามิเตอร์ไม่สามารถบ่งชี้ว่าเกี่ยวข้องกับกระบวนการจริงอย่างไร เนื่องจากตัวแปรต้นเป็นค่าที่สุ่มมาจากการลองผิดลองถูก ซึ่งการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ด้วยวิธีปริพันธ์นั้นค่าพารามิเตอร์นั้นเกี่ยวข้องกับโมเดลทางกายภาพของระบบโดยตรงจากการตั้งโมเดลทางกายภาพ

ทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าจริงกับโมเดลของโมเดลทั้งสามที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับการเปิดวาล์วควบคุม ที่ 30%, 40%, 50%, 60% เพื่อหาโมเดลที่ดีที่สุดที่จะนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีต่อไป แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าจริงกับโมเดลของโมเดลทั้งสามที่ทำการ
ระบุเอกลักษณ์ของระบบสำหรับการเปิดวาล์วควบคุม ที่ 30%, 40%, 50% และ 60%

% เปิดวาล์วควบคุม / โมเดลที่ทำการระบุ เอกลักษณ์ของระบบ	30%	40%	50%	60%
การระบุเอกลักษณ์ของ ระบบด้วยวิธีปริพันธ์สำหรับ โมเดลเชิงเส้น	0.8234	1.0504	1.0112	2.9234
การระบุเอกลักษณ์ของ ระบบด้วยวิธีปริพันธ์สำหรับ โมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ด แบบไร้สาย	0.8220	0.8998	0.7902	0.8253
การระบุเอกลักษณ์ของ ระบบโดยใช้ Toolbox ใน MATLAB	1.0337	1.0048	1.3405	1.5619

จะเห็นว่าการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ด้วยวิธีปริพันธ์สำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบ
ไร้สาย จะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าจริงกับโมเดลน้อยที่สุด ทุกการเปิดวาล์ว
ควบคุมที่ 30%, 40%, 50% และ 60% เมื่อเทียบกับโมเดลทั้งสาม ที่การเปิดวาล์วควบคุม 50%
ของการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีปริพันธ์สำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย จะมีค่า
ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าจริงกับโมเดลคือ 0.7902 ซึ่งน้อยที่สุด แสดงว่าโมเดลนี้มี
ความใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากที่สุด

บทที่ 4

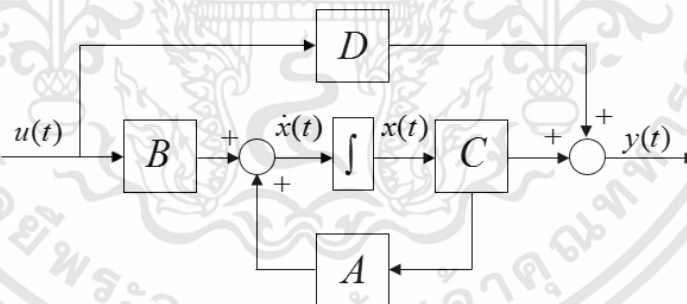
การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

ในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจสอบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50% ซึ่งได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบต่อฟังก์ชันขั้นบันได และการเขียนโปรแกรม LabVIEW เป็นตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมระดับน้ำ อีกทั้งการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมระดับน้ำที่มีการสื่อสารฮาร์ดแวร์แบบไร้สาย โดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50% ซึ่งทำการทดลองเพื่อตรวจสอบการจำลองควบคุมระดับน้ำใน Simulink/MATLAB และผลตอบสนองด้วยตัวควบคุมพีไอดีกับกระบวนการควบคุมระดับจริง และผลตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวน

4.1 การตรวจสอบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ

ทำการตรวจสอบโมเดลทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบต่อฟังก์ชันขั้นบันได โดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีปริพันธ์สำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแวร์แบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50% เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าจริงกับโมเดลมีค่าน้อยที่สุด

จากสมการที่ 3.19 $h_2''(t) = a_1 h_2'(t) + a_2 h_2(t) + b_1 q_i'(t) - b_2 q_i(t)$ ที่เป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์หรือสมการเชิงอนุพันธ์ จะเขียนให้อยู่ในรูปของสมการสเปซ (State Space Equation) หรือ โมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบทางกายภาพที่บอกถึงเวกเตอร์ของอินพุต, เอาท์พุต และ ตัวแปรสแตต เพื่อหาผลตอบสนองของกระบวนการ สมการสแตตเขียนได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 แผนผังสมการสเปซ

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.1)$$

$$y = Cx + Du \quad (4.2)$$

เมื่อ

$x(t)$ คือ เวกเตอร์ตัวแปรสแตต

$y(t)$ คือ เวกเตอร์ตัวแปรเอาท์พุต

$u(t)$ คือ เวกเตอร์ตัวแปรอินพุต

A คือ เมทริกซ์ของระบบ (System Matrix)

B คือ เมทริกซ์ของอินพุต (Input Matrix)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C คือ เมทริกซ์ของเอาต์พุต (Output Matrix)

D คือ เมทริกซ์ Feed Forward (Direct Feed Forward Matrix)

จากสมการที่ 3.19 $h_2''(t) = a_1 h_2'(t) + a_2 h_2(t) + b_1 q_i'(t) - b_2 q_i(t)$

กำหนดให้ $x_1(t) = h_2(t)$ (4.3)

$$\dot{x}_1(t) = h_2'(t) = x_2(t) + b_1 q_i(t) \quad (4.4)$$

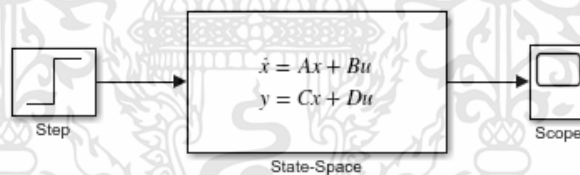
และ $x_2(t) = h_2'(t) - b_1 q_i(t)$ (4.5)

$$\dot{x}_2(t) = h_2''(t) - b_1 q_i'(t) = a_1 x_2(t) + a_2 x_1(t) + (a_1 b_1 - b_2) q_i(t) \quad (4.6)$$

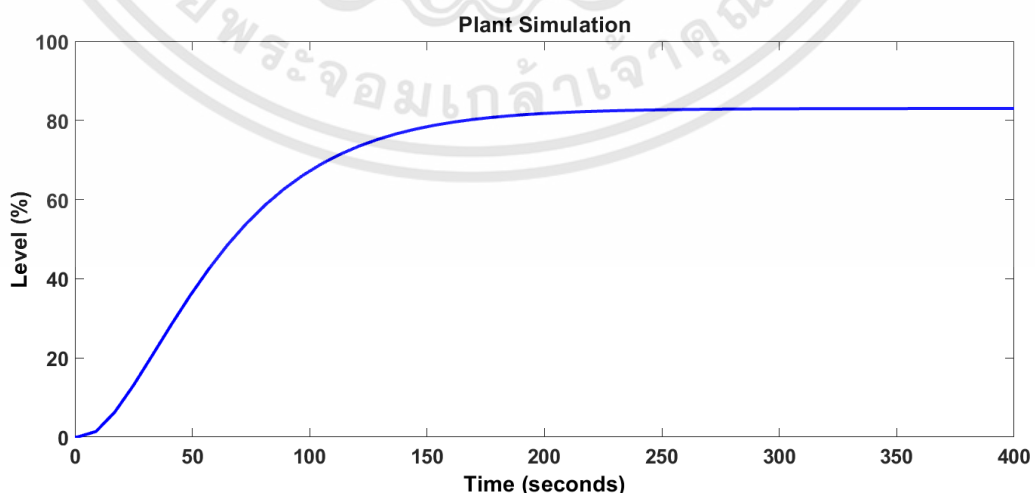
จะได้สมการสแตตสเปซ
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_2 & a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ a_1 b_1 - b_2 \end{bmatrix} u \quad (4.7)$$

$$y = [1 \quad 0]x + [0]u \quad (4.8)$$

แทนค่า $a_1 = -0.0636$, $a_2 = -0.0010$, $b_1 = -0.0089$ และ $b_2 = -0.0055$ จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ด้วยวิธีปริพันธ์สำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารอาร์ทแบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50% จากนั้นทำการ Simulink ใน MATLAB เพื่อหาผลตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันได ดังรูปที่ 4.2



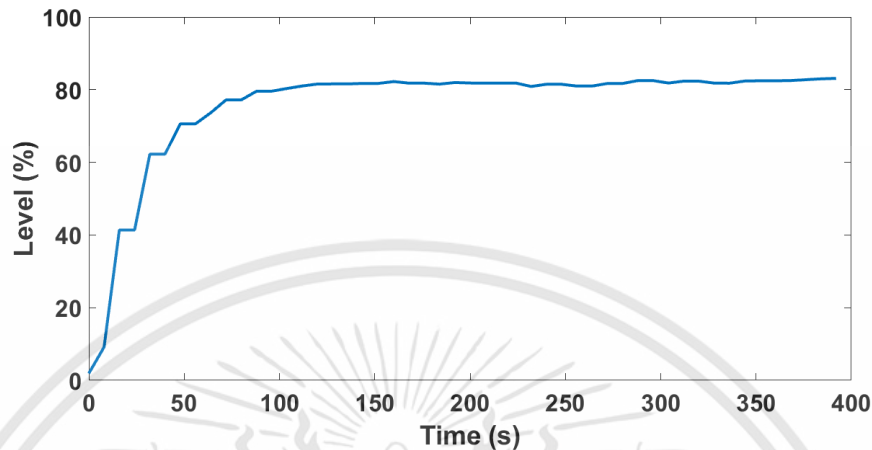
รูปที่ 4.2 การจำลองโมเดลทางคณิตศาสตร์ในสมการสแตตสเปซใน Simulink/MATLAB



รูปที่ 4.3 ผลตอบสนองของโมเดลจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีปริพันธ์สำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารอาร์ทแบบไร้สายโดยทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลตอบสนองจากโมเดลที่มาจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ด้วยวิธีปริพันธ์สำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50% มีค่าใกล้เคียงกับผลจากการเก็บค่าจากกระบวนการจริงที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50 % ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลจากการเก็บค่าจากกระบวนการจริงที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50 %

แสดงว่าโมเดลนี้ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงจึงเหมาะสมในการออกแบบตัวควบคุม เพื่อใช้ในการควบคุมแบบจำลองการควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายได้

4.2 การเขียนโปรแกรม LabVIEW เป็นตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมระดับน้ำ

การเขียนโปรแกรม LabVIEW เป็นตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมระดับน้ำ โดยใช้ฟังก์ชันตัวควบคุมพีไอดีของโปรแกรม LabVIEW เป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการ ซึ่งใช้งานง่าย สามารถใส่ค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีเพื่อใช้ควบคุมกระบวนการได้เลย โดยฟังก์ชันตัวควบคุมพีไอดีของโปรแกรม LabVIEW แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ฟังก์ชันตัวควบคุมพีไอดีของโปรแกรม LabVIEW

ฟังก์ชันตัวควบคุมพีไอดีของโปรแกรม LabVIEW มีสมการเอาต์พุตของตัวควบคุมดังนี้

$$Output = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.9)$$

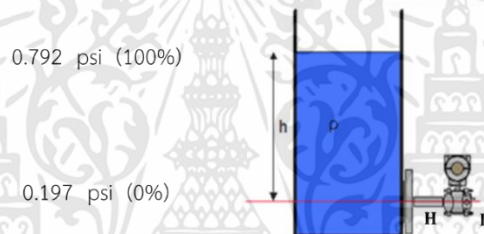
องค์ประกอบที่สำคัญของฟังก์ชันตัวควบคุมพีไอดี ประกอบด้วย

1. Set Point คือค่าเป้าหมายของตัวแปรกระบวนการ
2. Process Variable คือตัวแปรกระบวนการ ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จากกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. PID Gains คือค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี ประกอบด้วย
- Proportional Gain คือค่าอัตราขยายสัดส่วน (K_p)
 - Integral Time คือค่าเวลาที่ของอัตราขยายปริพันธ์ (T_i) หน่วยนาที
 - Derivative Time คือค่าเวลาที่ของอัตราขยายอนุพันธ์ (T_d) หน่วยนาที
4. Output คือค่าสัญญาณกระตุ้น หรือ Manipulated ที่ออกจากตัวควบคุมพีไอดี
5. Output Range คือค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดของเอาต์พุทของตัวควบคุมพีไอดี คือ 0 ถึง 100

ในการวัดระดับของแทงค์เปิดนั้นจะใช้ Differential Pressure Transmitter with WirelessHART THUM Adapter หน่วย psi จะใช้การวัดค่าความดันที่กั้นแทงค์เทียบกับความดันบรรยากาศโดยที่ด้าน ความดันสูงจะต่อเข้ากับกั้นแทงค์เปิด และด้านความดันต่ำจะต่อกับความดันบรรยากาศ โดยค่าที่วัดได้จะเป็นหน่วย psi ซึ่งต้องทำการ เปลี่ยนสเกล ให้เป็นค่า 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์เสียก่อน ซึ่งความสูงของแทงค์เปิดจาก 0 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์คือ 0 ถึง 45 เซนติเมตร



รูปที่ 4.6 Differential Pressure Transmitter วัดระดับของแทงค์เปิด

ทำการคำนวณ เพื่อหาค่า 0 ถึง 100 % ดังนี้

$$\begin{aligned}
 0 \% &>> 0.197 - 0.197 = 0 \% \\
 100 \% &>> 0.792 - 0.197 = 0.595 \\
 &0.595 \times 168 = 100 \%
 \end{aligned}$$

จากนั้นทำการเขียนโปรแกรม LabVIEW ในส่วนของ Block Diagram โดยใช้ฟังก์ชันตัวควบคุมพีไอดี จะทำงานร่วมกับ While Loop เพื่อรันโปรแกรมไปเรื่อยๆจนกว่าจะมีเงื่อนไขหยุดการรันโปรแกรมนั้นคือปุ่ม Stop ในการเขียนโปรแกรมจะแบ่งเป็นการรับ Process Variable และส่ง Manipulated Variable สุดท้ายทำการปรับคาบเวลาการควบคุม ซึ่งจะแสดงได้ 3 ส่วนดังนี้

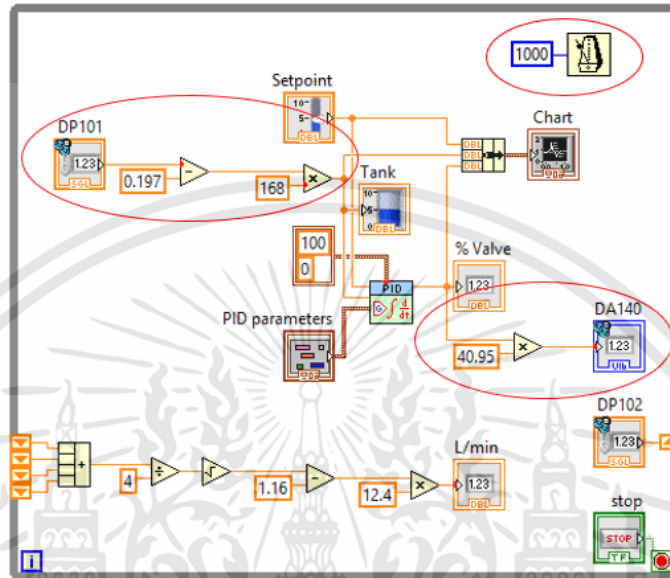
1. ในการรับตัวแปรกระบวนการ มาจาก DP101 โดยที่ลบด้วยค่าคงที่ 0.197 และคูณด้วยค่าคงที่ 168 เพื่อทำการเปลี่ยนสเกล ให้ตัวแปรกระบวนการ เป็นค่า 0 ถึง 100 %

2. เอาต์พุทของตัวควบคุมหรือ ตัวแปรกระตุ้น จะเป็นสัญญาณควบคุมที่จะไปสั่งให้อุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายจะต้องผ่าน Digital to Analog Module ของ PLC มีค่าการแปลงเลขจาก 0 - 4095 เป็น 4 - 20 mA แต่เอาต์พุทของตัวควบคุมมีช่วงอยู่ที่ 0 - 100 เพราะฉะนั้นจะต้องแปลงเป็นเลข 0 - 4095 จึงต้องทำการคูณด้วยค่าคงที่ 40.95 กับค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมก่อนจะส่งไปที่ DA140 ซึ่งเป็น Digital to Analog Module ของ PLC เชื่อมต่อเพื่อส่งสัญญาณควบคุมไปยังวาล์วควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

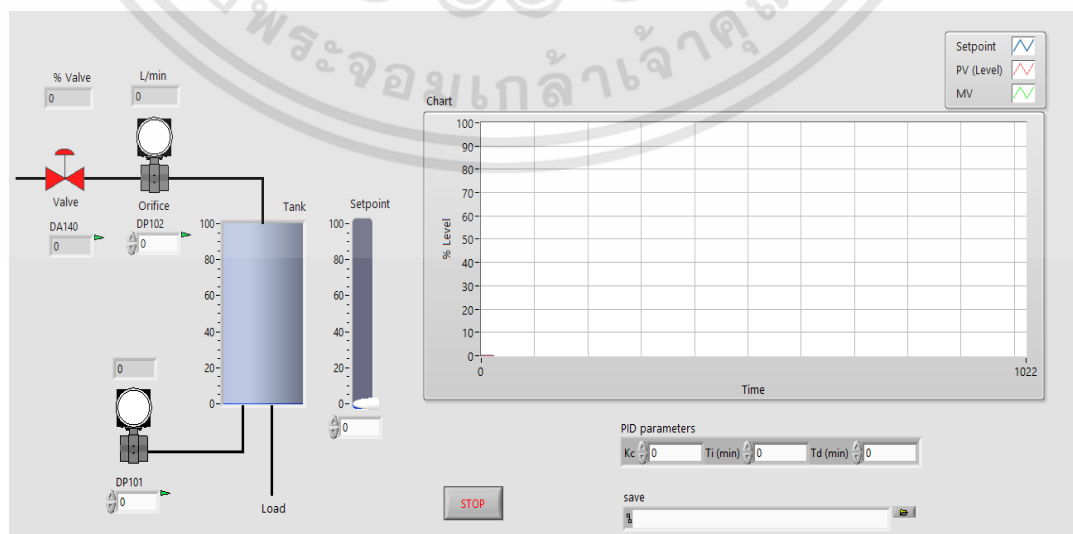
3. การปรับคาบเวลาการควบคุมทำได้โดยตั้งค่าช่วงเวลาใน While Loop ของการทำงานแต่ละครั้ง การตั้งค่าช่วงเวลาตั้งให้อยู่ที่ 1000 มิลลิวินาทีหรือ 1 วินาที

โปรแกรม LabVIEW ในส่วนของ Block Diagram โดยใช้ฟังก์ชันตัวควบคุมพีเอ็ดี้ แสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โปรแกรม LabVIEW ในส่วนของ Block Diagram โดยใช้ฟังก์ชันตัวควบคุมพีเอ็ดี้

เขียนโปรแกรม LabVIEW ในส่วน Front Panel เป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้งาน (Human Machine Interface : HMI) เพื่อป้อนค่าเป้าหมายของกระบวนการ และแสดงค่าต่าง ๆ ในกระบวนการไม่ว่าจะเป็นอัตราการไหลในหน่วยลิตรต่อนาที หรือระดับในหน่วยเปอร์เซ็นต์ของระดับน้ำในแทงค์เปิด และเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วควบคุมมีการแสดงกราฟของค่าตัวแปรกระบวนการ และค่าเป้าหมายเพื่อดูแนวโน้มของกระบวนการ เพื่อการปรับปรุงกระบวนการต่อไป และสามารถเก็บค่าจากกระบวนการเพื่อนำวิเคราะห์กระบวนการได้ แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 Human Machine Interface (HMI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสำหรับควบคุมระดับน้ำ

ออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยวิธีวงรอบเปิด (Open Loop) โดยเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปค่าระดับน้ำให้เท่ากับความผิดพลาด $e(t)$ จะได้ [19]

$$e''(t) = a_1 e'(t) + a_2 e(t) + b_1 q_i'(t) - b_2 q_i(t) \quad (4.10)$$

กำหนดให้ $x_1 = \int e(t)$ (4.11)

$$\dot{x}_1 = e(t) = x_2 \quad (4.12)$$

และ $x_2 = e(t)$ (4.13)

$$\dot{x}_2 = e'(t) = x_3 + b_1 q_i(t) \quad (4.14)$$

และ $x_3 = e'(t)$ (4.15)

$$\dot{x}_3 = e''(t) - b_1 q_i'(t) = a_1 x_3 + a_2 x_2 + (a_1 b_1 - b_2) q_i(t) \quad (4.16)$$

จะได้สมการสเตตสเปซ $\dot{x} = A_{open} x + B_{open} u$ (4.17)

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_2 & a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ a_1 b_1 - b_2 \end{bmatrix} u \quad (4.18)$$

จากนั้นทำการหาสมการ Close Loop ของระบบ หรือ A_{close} [20] จะได้

$$A_{close} = A_{open} - B_{open} K \quad (4.19)$$

กำหนดให้ $K = [K_I \quad K_P \quad K_D]$ (4.20)

ซึ่งเป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี

จะได้ $A_{close} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_2 & a_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ a_1 b_1 - b_2 \end{bmatrix} [K_I \quad K_P \quad K_D]$ (4.21)

$$A_{close} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -b_1 K_I & -b_1 K_P & 1 - b_1 K_D \\ -(a_1 b_1 - b_2) K_I a_2 & -(a_1 b_1 - b_2) K_P a_1 & -(a_1 b_1 - b_2) K_D \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นกำหนดให้สมการพหุนามลักษณะเฉพาะ (Characteristic Polynomial) สำหรับสมการ Close Loop ของระบบ [20] คือ

$$\Delta(s) = |sI - A_{close}| = 0 \quad (4.23)$$

จะได้

$$s^3 - (-K_D a_1 b_1 + K_D b_2 - K_P b_1 + a_1) s^2 - (-K_D a_2 b_1 - K_I b_1 + K_P b_2 + a_2) s - K_I b_2 = 0 \quad (4.24)$$

รูปแบบทั่วไปของสมการพหุนามลักษณะเฉพาะของระบบอันดับสาม [21] คือ

$$(s + \xi \omega_n)(s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2) = 0 \quad (4.25)$$

จะได้

$$s^3 + 3\xi \omega_n s^2 + (2\xi^2 \omega_n^2 + \omega_n^2) s + \xi \omega_n^3 = 0 \quad (4.26)$$

ทำการเทียบสัมประสิทธิ์ s^3 , s^2 , s^1 , s^0 ระหว่างสมการที่ 4.24 กับสมการที่ 4.26 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี K_I , K_P , K_D ซึ่งจะทำให้การกำหนดสเปคของตัวควบคุมคือช่วงเวลาขึ้น (Rise Time, t_r) และเวลาเข้าสู่สมดุล (Settling Time, t_s) ดังนี้

$$t_r = \frac{4}{\omega_n \xi} \quad (4.27)$$

$$t_s = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} = \frac{\pi - \arctan\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right)}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (4.28)$$

เมื่อ

$$\beta = \arctan\left(\frac{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}}{\omega_n \xi}\right) \quad (4.29)$$

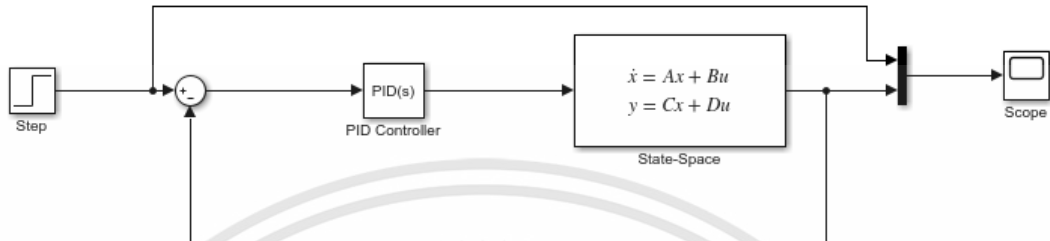
กำหนดให้ ช่วงเวลาขึ้น (Rise Time, t_r) = 50 วินาที

เวลาเข้าสู่สมดุล (Settling Time, t_s) = 200 วินาที

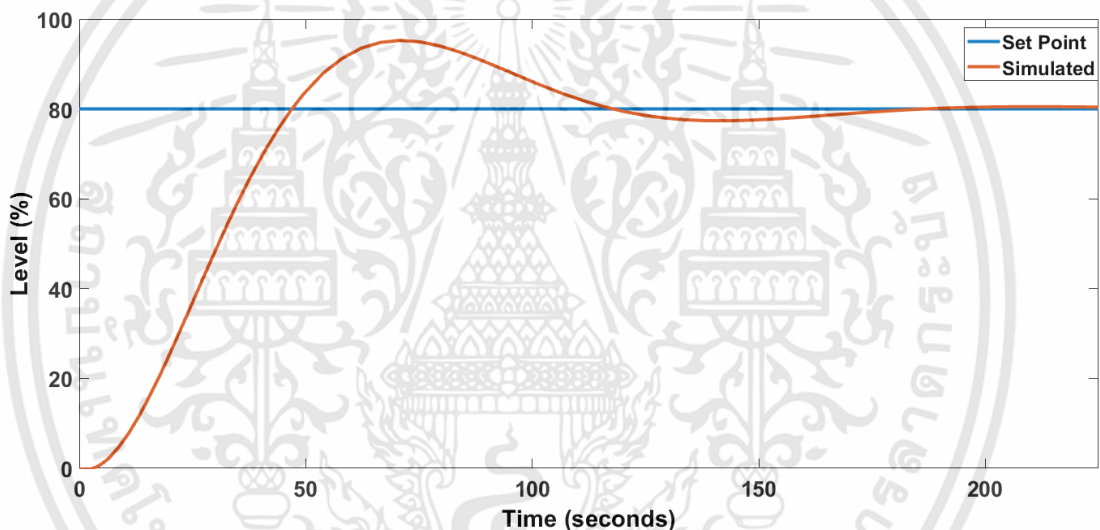
จะได้ $\omega_n = 0.033$ และ $\xi = 0.605$ แทนค่าลงในสมการที่ 4.25 แล้วทำการเทียบสัมประสิทธิ์ s^3 , s^2 , s^1 , s^0 กับสมการที่ 4.24 จะได้ $K_P = 0.4730$, $K_I = 0.0093$ และ $K_D = 0.3864$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีใน Simulink/MATLAB กับโมเดลจากการระบุเอกลักษณ์ของระบบ ด้วยวิธีปริพันธ์สำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ทแบบไร้สายที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50% เพื่อตรวจสอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นบันไดหรือค่าเป้าหมายที่ 80% ดังรูปที่ 4.9 และได้ผลตอบสนองดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 การจำลองควบคุมระดับน้ำใน Simulink/MATLAB



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองการจำลองควบคุมระดับน้ำใน Simulink/MATLAB

จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าผลตอบสนองมีค่าใกล้เคียงกับสเปคของตัวควบคุมที่ทำการกำหนดไว้ซึ่งผลตอบสนองนี้สามารถสรุปว่าค่าพารามิเตอร์นี้สามารถควบคุมระดับน้ำได้

จากค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี $K_p = 0.4730$, $K_I = 0.0093$, $K_D = 0.3864$ ที่ได้มาจากการออกแบบ จากนั้นหาให้อยู่ในเทอมของค่าเวลาคงที่ของอัตราขยายปริพันธ์ (T_i) หน่วยวินาที และค่าเวลาคงที่ของอัตราขยายอนุพันธ์ (T_d) หน่วยวินาที จะได้

$$T_i = \frac{K_p}{K_I} \quad (4.30)$$

$$T_d = \frac{K_D}{K_p} \quad (4.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

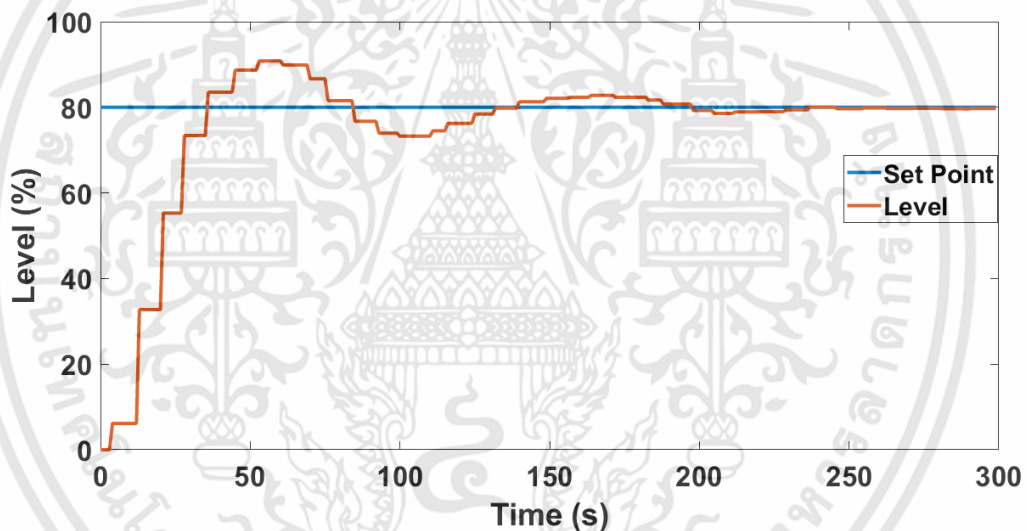
จะได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดีคือ $K_p = 0.4730$, $T_i = 50.8602$ วินาที, $T_d = 0.8169$ วินาที ซึ่งฟังก์ชันตัวควบคุมพีไอดีในโปรแกรม LabVIEW ค่าเวลาคงที่ของอัตราขยายปริพันธ์ และค่าเวลาคงที่ของอัตราขยายอนุพันธ์เป็นหน่วยนาฬิกาจะได้ $T_i = 0.8476$ นาที, $T_d = 0.0136$ นาที

4.3.1 ขั้นตอนการทดลอง

ทำการทดลองควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย โดยใช้ค่าเป้าหมาย 80% และทำการทดลองเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 80% เป็น 50% เพื่อดูผลตอบสนอง และทำการทดลองเพื่อดูผลตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนมากระทำต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำ โดยการปิดปั้มน้ำเป็นเวลา 10 วินาที ที่ค่าเป้าหมาย 80%

4.3.2 ผลการทดลองควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย

ทำการทดลองควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย โดยใช้ค่าเป้าหมาย 80% เพื่อดูผลตอบสนองของตัวแปรกระบวนการ กับค่าเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.11



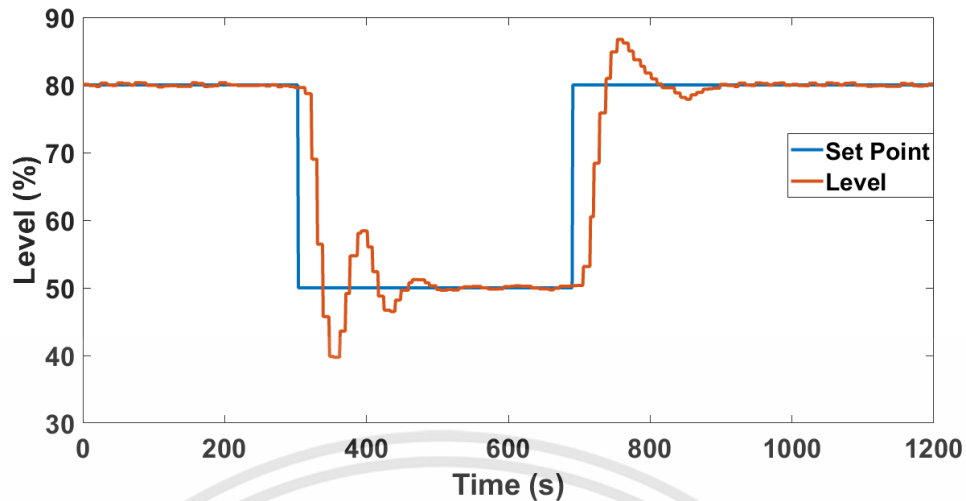
รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่ค่าเป้าหมาย 80%

จากการทดลองพบว่าผลตอบสนองด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่ค่าเป้าหมาย 80% มีช่วงเวลาขึ้น (Rise Time) เท่ากับ 50 วินาที ใกล้เคียงกับสเปคของตัวควบคุมที่กำหนด แต่เวลาเข้าสู่สมดุล (Settling Time) ใช้เวลามากกว่าสเปคที่กำหนดหรือเท่ากับ 235 วินาที อีกทั้งผลตอบสนองมีค่าเปอร์เซ็นต์พุ่งเกิน (Percent Overshoot) เท่ากับ 12.35% เกิดการแกว่งเล็กน้อย แต่ผลตอบสนองสามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างมีเสถียรภาพ

P. Somkane et al. [18] ใช้ตัวควบคุมพีไอดีโหมดปรับจูนอัตโนมัติ ให้ผลตอบสนองด้วยตัวควบคุมพีไอดีสำหรับการควบคุมระดับน้ำที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สายมีเวลาเข้าสู่สมดุลนาน แต่ไม่มีค่าเปอร์เซ็นต์พุ่งเกิน ถึงแม้ในอุตสาหกรรมจะมีโหมดปรับจูนอัตโนมัติ แต่บางระบบก็ไม่เหมาะสม เช่นระบบนี้ที่มีการหน่วงเวลา หรือระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

จากนั้นทดลองเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 80% ไปเปลี่ยน 50% เพื่อดูผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนค่าเป้าหมาย ดังรูปที่ 4.12

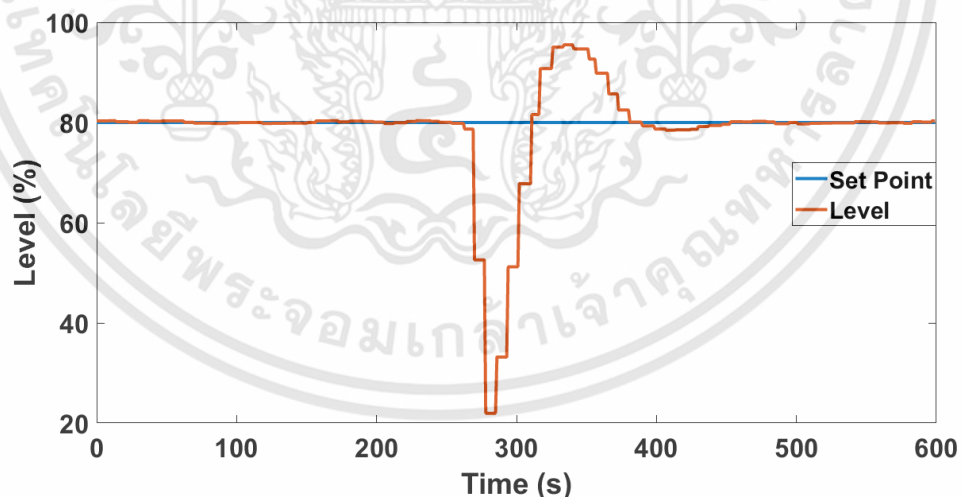
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองด้วยตัวควบคุมพีไอดีที่เปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 80% ไป 50%

จากการทดลองพบว่าผลตอบสนองด้วยตัวควบคุมพีไอดี เมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 80% เป็น 50% มีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินเท่ากับ 16.80% และมีเวลาเข้าสู่สมดุล 220 วินาที เกิดการแกว่งเล็กน้อย แต่สามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างมีเสถียรภาพ เมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 50% เป็น 80% มีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินเท่ากับ 8.37% และมีเวลาเข้าสู่สมดุล 215 วินาที เกิดการแกว่งเล็กน้อย แต่สามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างมีเสถียรภาพ

ทำการทดลอง เพื่อดูผลตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนมากระทำต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำโดยการปิดปั๊มน้ำเป็นเวลา 10 วินาทีที่ค่าเป้าหมาย 80% ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนมากระทำต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำโดยการปิดปั๊มน้ำเป็นเวลา 10 วินาทีที่ค่าเป้าหมาย 80%

จากการทดลอง พบว่าผลตอบสนองเมื่อมีสัญญาณรบกวนมากระทำต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำโดยการปิดปั๊มน้ำเป็นเวลา 10 วินาทีที่ค่าเป้าหมาย 80% ผลตอบสนองมีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินเท่ากับ 19.37% และมีเวลาเข้าสู่สมดุล 210 วินาทีเกิดการแกว่งเล็กน้อย แต่สามารถเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้อย่างมีเสถียรภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของโมเดลทางกายภาพของระบบที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สายของแบบจำลองการควบคุมระดับ ซึ่งมีการหน่วงเวลาในการส่งข้อมูลที่ 8 วินาที โดยใช้โมเดลทางกายภาพที่เป็นเชิงเส้น และโมเดลที่เพิ่มการหน่วงเวลาของการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สายเข้าไปในโมเดล และทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้ Toolbox ใน MATLAB โมเดลคือ Polynomial Models ด้วยวิธีหาแบบ ARMAX โดยทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 30%, 40%, 50%, 60% เพื่อเก็บค่าอินพุต คืออัตราการไหล และเอาต์พุตคือระดับของน้ำ จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลการระบุเอกลักษณ์ของระบบทั้งสามโมเดล พบว่าโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์สำหรับโมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยระหว่างค่าจริงกับโมเดลที่ทำการเปิดวาล์วควบคุมที่ 50% คือ 0.7902 แสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ทำการระบุเอกลักษณ์ ของระบบโดยวิธีปริพันธ์ที่ใช้โมเดลที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย เหมาะสมกับกระบวนการที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย เพื่อใช้หาโมเดลทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การระบุเอกลักษณ์ของระบบ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในโมเดลทางกายภาพของกระบวนการจริงได้ ทำให้สามารถออกแบบระบบควบคุมให้เหมาะสมกับกระบวนการนั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพที่ดี เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ในสมการทางกายภาพเป็นตัวบ่งบอกคุณลักษณะของกระบวนการนั้นจริง ๆ ซึ่งค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวสามารถหาได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนของแต่ละอุปกรณ์ เมื่อแต่ละอุปกรณ์มารวมกันจนเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการนั้น ๆ ค่าที่ได้เป็นค่าตามหลักการทางทฤษฎี แต่ในความเป็นจริงอุปกรณ์ทุกตัวมีการเชื่อม การล่าของอุปกรณ์ทำให้ค่าที่คิดตามทฤษฎีมีค่าที่เปลี่ยนไป ซึ่งวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบจะเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของทั้งระบบของกระบวนการนั้น ๆ ไม่ว่าจะอุปกรณ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องแม่นยำตามการเปลี่ยนแปลงของอุปกรณ์ในกระบวนการได้ รวมถึงการหน่วงเวลาของการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี ด้วยโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่หาได้จากการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์ พบว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมพีไอดี $K_p = 0.4730$, $T_i = 0.8476$ นาที, $T_d = 0.0136$ นาที ในโปรแกรม LabVIEW สามารถควบคุมระดับน้ำที่ค่าเป้าหมายเท่ากับ 80% โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินเท่ากับ 12.35% และมีเวลาเข้าสู่สมดุล 235 วินาที เมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 80% เป็น 50% มีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินเท่ากับ 16.80% และมีเวลาเข้าสู่สมดุล 220 วินาที เมื่อเปลี่ยนค่าเป้าหมายจาก 50% เป็น 80% มีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินเท่ากับ 8.37% และมีเวลาเข้าสู่สมดุล 215 วินาที สุดท้ายเมื่อมีสัญญาณรบกวนกระทำต่อกระบวนการควบคุมระดับน้ำโดยการปิดปั้มน้ำเป็นเวลา 10 วินาทีที่ค่าเป้าหมาย 80% มีค่าเปอร์เซ็นต์ฟุงเกินเท่ากับ 19.37% และมีเวลาเข้าสู่สมดุล 210 วินาที จากการทดลองพบว่าค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดีนี้เหมาะสมกับกระบวนการควบคุมระดับที่มีการสื่อสารฮาร์ดแบบไร้สาย แสดงว่าโมเดลที่หามาได้นั้นตรงกับกระบวนการจริง ตัวควบคุมจึงไม่จำเป็นต้องเป็นตัวควบคุมขั้นสูงหรือตัวควบคุมที่มีความซับซ้อนมากมาย แต่เป็นตัวควบคุมอย่างง่ายคือตัวควบคุมพีไอดีก็สามารถควบคุมกระบวนการที่มีการหน่วงเวลาได้เพียงพอแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

โมเดลทางกายภาพของระบบที่ต้องการระบุเอกลักษณ์ของระบบโดยวิธีปริพันธ์ ควรเริ่มจากโมเดลอย่างง่าย หรือเป็นเชิงเส้นของระบบนั้น ๆ ก่อนแล้วค่อยใส่ผลกระทบที่ตามมาของระบบลงไป ในโมเดลเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลตอบสนองในขั้นต้น และดูแนวโน้มของผลตอบสนองว่าโมเดลทางกายภาพอย่างง่ายนั้น ใกล้เคียงกับกระบวนการจริงมากน้อยแค่ไหน

ในส่วน of ตัวควบคุมถ้าต้องการให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น หรือเสถียรภาพที่มากขึ้น เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยต่อสามารถออกแบบตัวควบคุมขั้นสูงที่มีความซับซ้อนขึ้น เพื่อให้ผลตอบสนองต่อตัวควบคุมดีมากยิ่งขึ้น และใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ปรับปรุงระบบควบคุมต่อไป

แนวทางในการวิจัยต่อในอนาคต คือการควบคุมแบบคาสเคดของกระบวนการนี้โดยออกแบบให้ตัวควบคุมหลักเป็นตัวควบคุมระดับ และตัวควบคุมรองเป็นตัวควบคุมอัตราการไหล โดยใช้การระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยวิธีปริพันธ์ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป



เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Mok, D. Chen and M. Nixon. **WirelessHART™ : Real-Time Mesh Network for Industrial Automation**. Springer. Inc.2010.
- [2] T. D. Chung, R. Ibrahim, V. S. Asirvadam, N. Saad and S. M. Hassan. “Energy Consumption Analysis of WirelessHART Adaptor for Industrial Wireless Sensor Actuator Network.” **Procedia Computer Science.**, vol. 105, 2017. pp. 227-234.
- [3] T. D. Chung, R. Ibrahim, V. S. Asirvadam, N. Saad and S. M. Hassan. “Effect of Network Induced Delays on WirelessHART Control System.” **6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS).**, 2016.
- [4] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp and F. J. Doyle. **Process Dynamics and Control**. 3rd Ed. New Jersey : John Wiley & Sons. Inc.2011.
- [5] C. E. Hann, J. G. Chase, J. Lina, T. Lot, C. V. Doran and G. M. Shaw. “Integral-Based Parameter Identification for Long-Term Dynamic Verification of A Glucose-Insulin System Model.” **Computer Methods and Programs in Biomedicine.**, Vol 77, 2005. pp. 259-270.
- [6] N. Wongvanich and V. Kongratana. “Integral-Based Algorithm for Parameter Identification of The Heat Exchanger.” **the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS).**, Vol II, 2018.
- [7] Q. Bi., W. Cai, E. Lee, Q. Wang, C. Hang and Y. Zhang. “Robust Identification of First-Order Plus Dead-Time Model From Step Response.” **Control Engineering Practice.**, vol. 7, no.1, 1999. pp. 71-77.
- [8] T. Blevins, M. Nixon, and W. Wojsznis. “PID Control Using Wireless Measurements.” **American Control Conference (ACC).**, 2014. pp. 790-795.
- [9] H. Abdullah, R. Ibrahim, S.M. Hassan and T. D. Chung. “Filtered Feedback PID Control for WirelessHART Networked Plant.” **6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS).**, 2016.
- [10] วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์. **การวัดและควบคุมกระบวนการ**. กรุงเทพมหานคร : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2550.
- [11] Lennart Ljung. **System Identification : Theory for the User**. 2nd Edition. New Jersey : Prentice Hall, Inc.1998.
- [12] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, นิพนธ์ วรรณโสภาคย์. **ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2557.
- [13] ศิริลักษณ์ สุวรรณวงศ์. **การวิเคราะห์อนุกรมเวลา**. กรุงเทพมหานคร : สุวีริยาสาส์น. 2535.
- [14] สุขชาติ จันทร์จรมานิตย์. **ระบบควบคุม**. เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา. 2555.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] Smar. “**Tutorial HART.**” [Online]. Available : www.smar.com/PDFs/catalogues/HARTTUTCE.pdf . 2019.
- [16] FieldComm Group. “**HART Application Guide HART APPLICATION GUIDE.**” [Online]. Available : https://www.fieldcommgroup.org/sites/default/files/technologie/hart/ApplicationGuide_r7.1.pdf. 2019.
- [17] Emerson. “**Manual: Smart Wireless Gateway.**” [Online]. Available : <https://www.emerson.com/documents/automation/manual-smart-wireless-gateway-en-87246.pdf>. 2019.
- [18] P. Somkane, V.Kongratana, S.Gulpanich V.Tipsuwanporn and N.Wongvanich. “A Study of Flow-Level Cascade Control with WirelessHART™ Transmitter Using LabVIEW.” **17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS),** 2017. pp. 856-861.
- [19] V. Kumar, J. Jerome. “LQR Based Optimal Tuning of PID Controller for Trajectory Tracking of Magnetic Levitation System.” **Procedia Engineering,** Vol. 64, 2013. pp. 254-264.
- [20] V. Kumar, J. Jerome, K. Srikanth. “Algebraic Approach for Selecting The Weighting Matrices of Linear Quadratic Regulator.” **International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE),** 2014.



ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ICCAS 2018



2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems

► PROCEEDINGS

October 17(WED)~20(SAT), 2018
YongPyong Resort, PyeongChang, Korea

IEEE Catalog Number: CFP1810D-USB
ISBN: 978-89-93215-15-1
ISSN: 2093-7121

<http://2018.iccas.org>

Welcome Message

Conference Organization

Conference Information

Plenary Lectures & Mini-symposiums

Table of Contents

Author Index

Reviewers

Financial Contribution

E-proceeding Search

Exit

Copyright © 2018 Institute of Control, Robotics and Systems (ICROS)
Tel: +82-2-6949-5801 / Fax: +82-2-6949-5807 / E-mail: conference@icros.org



System Identification Of the Two Tanks System Subjected to WirelessHART Delays

Napasool Wongvanich^{1†}, Pongsakorn Somkane¹, and Viriya Kongratana¹

¹Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand (napasool.wo@kmitl.ac.th)

[†]Corresponding author

Abstract: This paper proposes an integral-based method for parameter identification of the coupled tank model used in level control. The plant uses WirelessHART communication protocol to interact between devices in the system, which has a data update rate of 8 seconds, causing time delay impacting the stability of the control system. Two models are considered. The first model is the simple linear model where the delay from the WirelessHART is assumed to be negligible. The second model extends this first model, and introduces nonlinearity from the WirelessHART delay into the model. Results showed that although the both the linear and non linear models provides a good match to the WirelessHART-affected plant responses, the nonlinear model provides on average a 25% better match than the linear model. This model and method can be used to design a more effective controller to combat the WirelessHART induced delay systems.

Keywords: System Identification, WirelessHART, Level Control Plant

1. INTRODUCTION

The HART protocol is widely used in control systems in factories due to convenience in adjustment of measurement and control device parameter, since the control itself could be conducted from afar without having to physically be in the field. The release of version 7 of the HART protocol known as WirelessHART [1] offers the possibility for each device in the network to be a router, thereby saving cable expenses, transmitting deep information without having to go on-site, whilst allowing greater reliability.

Although the WirelessHART protocol has received a lot interests in the industry, delay continues to be the key issue surrounding the performances of the WirelessHART network. The update rate of 8 s is determined by Chung et al [2-3] to provide up to 46% of battery life elongation, compares to the update rate of 1 s. This update rate deteriorates the system performance, especially with overshoots.

Common industrial processes are usually of the type of first order plus dead time (FOPDT) systems. A typical approach to estimate FOPDT system parameters is to use simple graphical method, where engineers estimate the gain of the system from the slope of the 63% value of the response. This method is prone to the presence of noise [4]. Hann et al. [5] developed an integral-based method to identify the glucose insulin system. Wongvanich and Kongratana [6] developed a similar method for use in the heat exchanger system. Bi et al. [7] used a Laplace-based method to form an integral equation for identification. Although this method work well, the inverse Laplace Transform must be performed which is analytically complicated. Furthermore, investigations into the mathematical modeling and identification of the WirelessHART affected FOPDT systems has not been conducted.

This paper therefore uses a simpler integral-based

algorithm for system identification of level control plant that is affected by WirelessHART induced delays. This paper will be presented as follows: Section 2 presents the main methodology of the research; Section 3 describes the plant and as well as experiments conducted; Section 4 describes the results and discussions. The paper is concluded in Section 5.

2. METHODOLOGY

2.1 Identification of the linear model

This paper considers the two tank non-interacting level process control. Figure 1 shows the schematics of the plant, which is open to atmosphere.

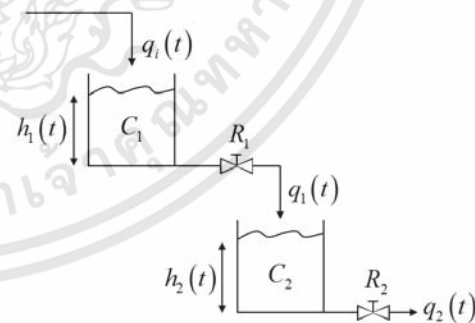


Fig. 1 Two tanks of noninteracting system

Applying the Bernoulli equations to the two tank system of Figure 1 yields:

Tank 1:

$$q_i(t) - q_1(t) = C_1 \frac{dh_1(t)}{dt} \quad (1)$$

Tank 2:

$$q_1(t) - q_2(t) = C_2 \frac{dh_2(t)}{dt} \quad (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where $q_i(t)$ is the inlet flow of Tank 1, $q_1(t)$ the outlet flow of Tank 1, and $q_2(t)$ the outlet flow of Tank 2. The relationships between $q_1(t)$ and $q_i(t)$; and $q_2(t)$ and the level of Tank 2, $h_2(t)$, are thus defined:

$$q_1(t) = \tau_1 q_i(t) \quad (3)$$

$$q_2(t) = \frac{h_2(t)}{R_2} \quad (4)$$

where:

τ_1 is time constants of delay time for $q_i(t)$

R_1 is valve resistance

Substituting Equations (3) and (4) into Equations (2) gives:

$$h_2'(t) = \frac{\tau_1}{C_2} q_i(t) - \frac{1}{R_2 C_2} h_2(t) \quad (5)$$

Note also that the definitions of Equations (3) and (4) simplifies the modelling of the coupled tank system. The resulting differential equation model describing the dynamics of Tank 2 is now in the form of linear first order equation with constant coefficients. The signal $q_i(t)$ is considered inputs of the systems and the signals, while $h_2(t)$ is considered the output. For convenience Equation (5) is rewritten:

$$h_2'(t) = a_1 q_i(t) - a_2 h_2(t) \quad (6)$$

where: $a_1 = \frac{\tau_1}{C_2}$, $a_2 = \frac{1}{R_2 C_2}$ (7)

Integrating Equation (6) once with respect to time yields:

$$h_2(t) - h_2(0) = a_1 \int_0^t q_i(t) dt - a_2 \int_0^t h_2(t) dt$$

$$h_2(t) = h_2(0) + a_1 \int_0^t q_i(t) dt - a_2 \int_0^t h_2(t) dt \quad (8)$$

where the integrals in Equation (7) are evaluated using the trapezium rule. Substituting $h_{2,data}(t) = h_2(t)$ for $t \in \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ into Equation (8) yields N equations in 3 unknowns which is set into the matrix form:

$$Ax = b \quad (9)$$

where:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \int_0^{t_1} q_i(t) dt & - \int_0^{t_1} h_{2,data}(t) dt \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & - \int_0^{t_N} q_i(t) dt & - \int_0^{t_N} h_{2,data}(t) dt \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$x = \begin{bmatrix} h_2(0) \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$b = \begin{bmatrix} h_2(t_0) \\ h_2(t_1) \\ \vdots \\ h_2(t_n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Solving Equations (8) – (11) by linear least squares yields the parameters $h_2(0)$, a_1 , a_2 . This process determines the identified model for the level liquid signal $h_2(t)$ based on the measured data. The algorithm is summarized in a flowchart of Figure 2.

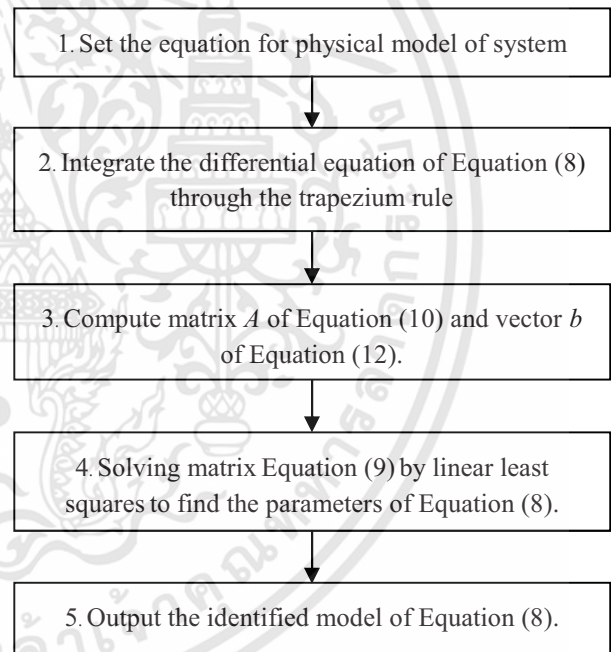


Fig. 2 Algorithm for identifying the parameters of the linear model

3. PLANT DESIGN AND EXPERIMENTAL PROCEDURES

3.1 Level control plant

The liquid level plant uses a measuring devices which is communicated through the WirelessHART communication. A differential pressure transmitter is used to measure the flow rate as well as the liquid level. The final control element being the control valve, is installed to constrict the flow. LabView is used for data acquisition and for viewing the signals online.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fig. 3 Level control plant

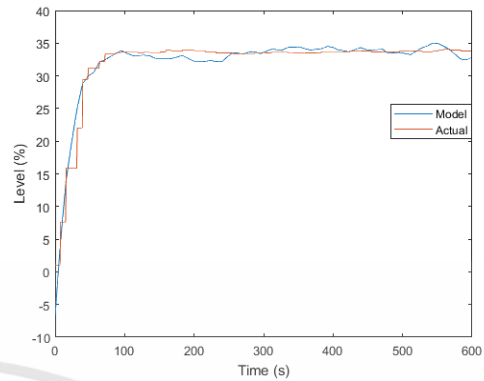


Fig. 4 The Identified model response of open valve at 30%

3.2 Experimental Procedures

To provide a step response test so that the system identification of the plant can be conducted, four valve positions of 30%, 40%, 50% and 60% are set. The flow rate and liquid levels are measured through the WirelessHART transmitter. Data is read through the use of LabView and are stored for 600 seconds in all experiments. Note that this step response test is an open loop test providing all the responses necessary for the system identification.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Application of the proposed algorithm

The algorithm of Figure 2 is applied to all the four valve position data. Table 1 tabulates the identified parameters of the linear model.

Table 1 The parameters from system identification for the four valve positions of 30%, 40%, 50% and 60%

% Valve open /Parameters	30%	40%	50%	60%
$h_2(0)$	-	-	-	-
a_1	0.2036	0.1306	0.2061	0.1901
a_2	0.0427	0.0257	0.0356	0.0313

Figures 4-7 show the results of applying the proposed algorithm to the measured data.

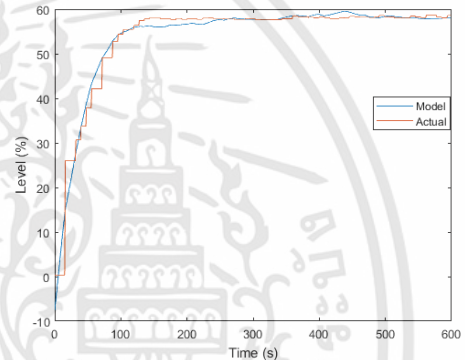


Fig. 5 The Identified model response of open valve at 40%

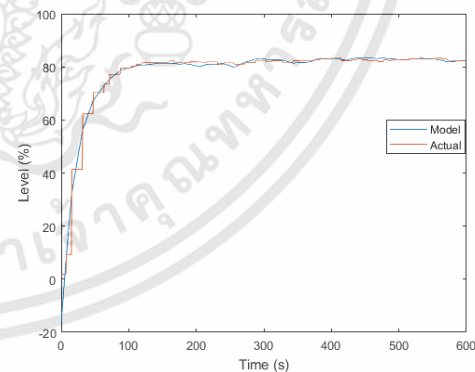


Fig. 6 The Identified model response of open valve at 50%

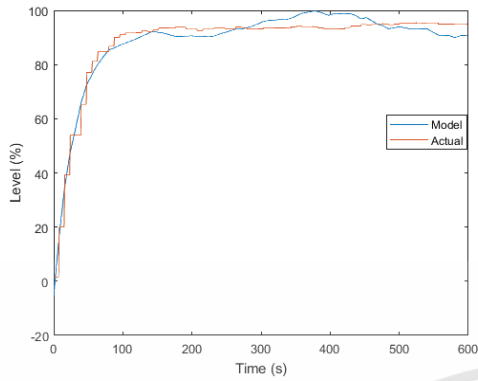


Fig. 7 The Identified model response of open valve at 60%

To evaluate the fit of the linear model, define the matching error between the data and the model:

$$\text{Matching Error} = \text{mean} | \text{Model} - \text{Actual} | \quad (13)$$

The mean absolute error between the modelled response to the data for the case of 30%, 40%, 50% and 60% valve positions were 0.8034, 1.0504, 1.0112 and 2.9234 respectively. This result shows that although the model provides an adequate fit to the data in general, the linear model does not capture the time delay characteristics induced by the WirelessHART. This failure does not impact the valve positions of less than 50%, but induces a significant matching error at the 60% valve position. This assessment is also validated with the 200% matching error increment for the case of 60% valve position, in comparison to the other valve positions.

4.2 Extending the model

To extend the linear model so that the effect of the WirelessHART communication is captured, the data sampling from the actual process is incorporated into the model. In this respect substituting $t_H = t_{HART}$ into Equation (5) yields:

$$h_2'(t-t_H) = \frac{\tau_1}{C_2} q_i(t-t_H) - \frac{1}{R_2 C_2} h_2(t-t_H) \quad (14)$$

The first order Taylor series approximations of the functions $h_2(t-t_H)$, $q_i(t-t_H)$ and their associated derivatives are defined:

$$h_2(t-t_H) = h_2(t) - t_H h_2'(t) \quad (15)$$

$$h_2'(t-t_H) = h_2'(t) - t_H h_2''(t) \quad (16)$$

$$q_i(t-t_H) = q_i(t) - t_H q_i'(t) \quad (17)$$

Note that this approximation is valid for the process at hand since the delay itself is small compared to the

dynamics of the process. Here first order approximations are used to simplify the model and computations. Substituting Equations (15) – (17) into Equation (14) yields:

$$h_2''(t) = \left(\frac{1}{t_H} - \frac{1}{R_2 C_2} \right) h_2'(t) + \frac{1}{t_H R_2 C_2} h_2(t) + \frac{\tau_1}{C_2} q_i'(t) - \frac{\tau_1}{t_H C_2} q_i(t) \quad (18)$$

This WirelessHART induced model is now a second order differential equation where the constants could be time varying. For convenience Equation (17) is rewritten:

$$h_2''(t) = a_1 h_2'(t) + a_2 h_2(t) + b_1 q_i'(t) - b_2 q_i(t) \quad (19)$$

where: $a_1 = \frac{1}{t_H} - \frac{1}{R_2 C_2}$, $a_2 = \frac{1}{t_H R_2 C_2}$, $b_1 = \frac{\tau_1}{C_2}$ and

$$b_2 = \frac{\tau_1}{t_H C_2}$$

Double integrating Equation (18) with respect to time yields:

$$\int_0^t h_2''(t) dt - \int_0^t h_2''(0) dt = \int_0^t a_1 [h_2'(t) - h_2'(0)] dt + a_2 \int_0^t \int_0^t h_2(t) dt dt + \int_0^t b_1 [q_i(t) - q_i(0)] dt - b_2 \int_0^t \int_0^t q_i(t) dt dt \quad (20)$$

Define the following function to model the level of Tank 2:

$$h_2(t) = h_2(0) + a_0(t-t_0) + a_1 \int_0^t h_2(t) dt + a_2 \int_0^t \int_0^t h_2(t) dt dt + b_1 \int_0^t q_i(t) dt - b_2 \int_0^t \int_0^t q_i(t) dt dt \quad (21)$$

Where $a_0 = h_2'(0) - a_1 h_2(0) - b_1 q_i(0)$. Substituting $h_{2,data}(t) = h_2(t)$ for $t \in \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ into Equation (21) yields N equations in 6 unknowns. This set of equation can again be written in to the matrix equation:

$$F x = b \quad (22)$$

Where:

$$F = [(1/T - t_0) | I^{(1)} h_2(t) | I^{(2)} h_2(t) | I^{(1)} q_i(t) | I^{(2)} q_i(t)] \quad (23)$$

$$x = \begin{bmatrix} h_2(0) \\ a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$b = \begin{bmatrix} h_2(t_0) \\ h_2(t_1) \\ \vdots \\ h_2(t_n) \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$T \equiv \begin{bmatrix} t_0 \\ \vdots \\ t_N \end{bmatrix} \quad (26)$$

The integral operator of Equation (23) is defined:

$$I^{(k)} X = \underbrace{\int \int \int \dots \int}_k X dt dt \dots dt \quad (27)$$

The extended model and method is now applied to the data. Table 2 tabulates the identified parameters of the extended linear model. Figures 8-11 plot the matching comparisons between the data and the extended linear model. It is seen by inspection that the matches between the modelled responses to the data is a lot closer than that provided by the pure linear model, particularly at the beginning of the data. This observation is visibly seen in Figure 11, where the extended linear model markedly outperforms the linear model.

Table 2 The parameters from the system identification of four valve positions from the extended linear model

% Valve open /Parameters	30%	40%	50%	60%
$h_2(0)$	-	-	-	-
a_0	1.1490	2.5420	4.0343	0.9898
a_1	0.0465	0.0306	0.0636	0.0310
a_2	0.0003	0.002.0	0.0010	0.0001
b_1	0.0778	1847.0	0.0089	0.0459
b_2	0.0014	0.009.0	0.0055	0.0005

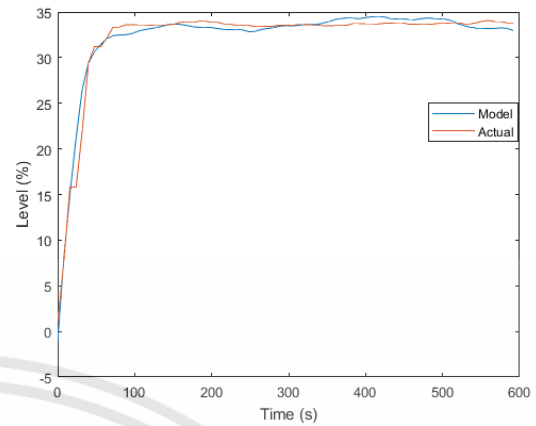


Fig. 8 The Identified model response of open valve at 30% for non-linear model

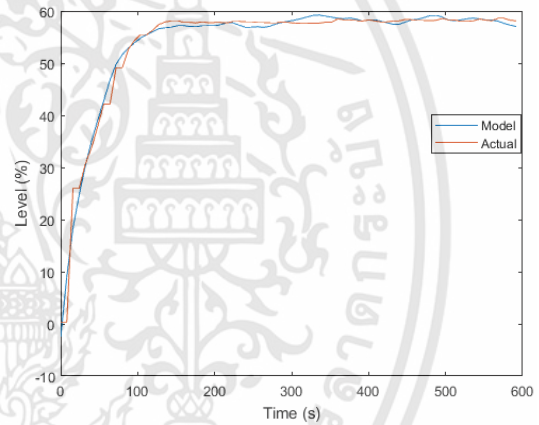


Fig. 9 The Identified model response of open valve at 40% for non-linear model

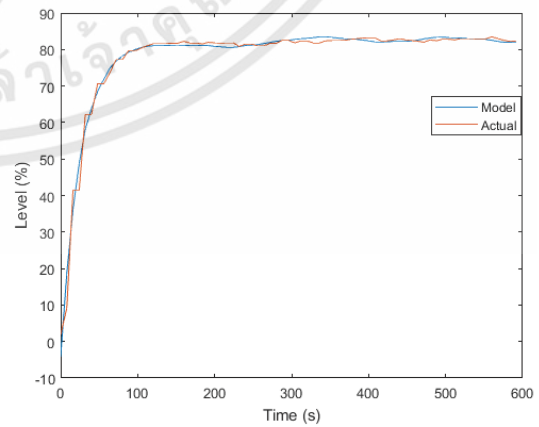


Fig. 10 The Identified model response of open valve at 50% for non-linear model

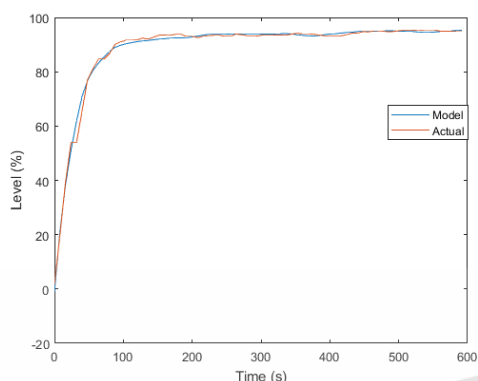


Fig. 11 The Identified model response of open valve at 60% for non-linear model

The mean absolute error between the modelled response to the data for the case of 30%, 40%, 50% and 60% valve positions were 0.8034, 1.0504, 1.0112 and 2.9234 respectively for the extended linear model. These number represents an average of 25% decrement in the errors, compared to the linear model. This model now provides an appropriate basis for the control design of the two-tank system subjected to WirelessHART delays. Note that the approach presented in this paper is to first formulate a simple model, then extend this simple model to capture the important dynamics of the data as required. This is in stark contrast to the approaches normally taken in the literatures, which is to start with an already complicated model, then try to fit this model to the given data. The approach taken here provides an engineers with a chance to uncover the underlying dynamics of the plant, resulting in a better and simpler controller.

5. CONCLUSION

System identification is used to determine parameters in physical model of the actual process, and consequentially designing of suitable control system becomes possible with good effectiveness and stability, as parameters in the physical model indicate actual characteristics of the process. Each parameter can be obtained by using transfer function of each instrument. After combining enough instruments, transfer function of the entire process can be formulated. However, the obtained value is theoretical and many factors, such as wear and tear, are not included. Identification thus determines the parameters of the system that are not affected by alteration in the hardware, therefore the obtained parameters will be highly accurate and adaptable to hardware alteration.

Experiment of level control plant affected by WirelessHART showed that the extended linear model yielded closer matches to the data than the linear model. For this process, the use of non-linear model is more suitable. Matching error of both models showed that non-linear model had lower error value, and thus more accuracy, than the linear model counterpart. It can be

concluded that more accuracy of physical model to the actual process model more effectiveness of system identification, more accurate physical model parameters, and more usability of the physical model for design control system.

It is emphasized that the approach taken in this paper is to start with a simple model first, then adapt this model to the given phenomenon at hand. This is in contrast to the typical approaches in the literatures where complicated models are directly fitted to the data. The approach taken here provides a chance for the control engineer to design a more effective and simpler controller.

REFERENCES

- [1] A. Mok, D. Chen and M. Nixon, *Why WirelessHART* in WirelessHART. Springer, 2010, pp. 195-199
- [2] T. D. Chung et al. "Energy Consumption Analysis of WirelessHART Adaptor for Industrial Wireless Sensor Actuator Network." *Procadia Com. Sci.*, vol. 105, 2017, pp 227-234.
- [3] T. D. Chung et al., "Effect of network induced delays on WirelessHART control system", in 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, pp. 1-5.
- [4] D. E. Seborg et al., *Process Dynamics and Control*, 3rd Ed. , John Wiley & Sons. NJ, USA; 2011.
- [5] Christopher E. Hann, J. Geoffrey Chase, Jessica Lina, Thomas Lot, Carmen V. Doran, Geoffrey M. Shaw. 2005. "Integral-based parameter identification for long-term dynamic verification of a glucose-insulin system model," *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 2005.
- [6] Napasool Wongvanich and Viriya Kongratana. 2018. "Integral-based Algorithm for Parameter Identification of the Heat Exchanger," the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2018 Vol II (IMECS 2018).
- [7] Qiang Bi, Wen-Jian Cai, Eng-Lock Lee, Qing-Guo Wang, Chang-Chieh Hang and Yong Zhang. 1999. "Robust identification of first-order plus dead-time model from step response," *Control Engineering Practice*. vol. 7, no.1, 1999, pp 71-77.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ICCAS 2017



2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems

▶ PROCEEDINGS

October 18~21, 2017
Ramada Plaza, Jeju, Korea

IEEE Catalog Number: CFP1710D-USB
ISBN: 978-89-93215-13-7
ISSN: 2093-7121

<http://2017.iccas.org>



Welcome Message

Conference Organization

Conference Information

Plenary Lectures & Special Sessions

Table of Contents

Author Index

Reviewers

Financial Contribution

E-proceeding Search

Exit

Copyright © 2017 Institute of Control, Robotics and Systems (ICROS)
Tel: +82-2-6949-5801 / Fax: +82-2-6949-5807 / E-mail: conference@icros.org



A Study of Flow-Level Cascade Control with WirelessHART™ Transmitter using LabVIEW

Pongsakorn Somkane, V.Kongratana*, S.Gulpanich, V.Tipsuwanporn and N.Wongvanich
Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand (kkviriya@gmail.com)

*Corresponding author

Abstract: This work presents a cascade control architecture to combat network induced delays in Wireless network controlled systems. Specifically a flow-level cascade control system is considered whereby the primary process variable is liquid level, and the secondary process variable is the flow rate. The flow-level process variables are measured by Wireless HART differential Pressure (DP) transmitter and sent through a WirelessHART gateway. Control actions are provided by a control valve actuator which is manipulated through a PLC. The PLC and the WirelessHART gateway are managed by an OPC server providing a medium of communication. The PID controller gains are designed through the LabView software, in which the network induced delays is offset by adjusting the controller interval until the responses are satisfactory. Results show that cascade control outperformed the single loop control, in both handling network induced delays and coping with disturbances.

Keywords: WirelessHART, Cascade Control, OPC.

1. INTRODUCTION

The advent of wireless communication technology has heightened process control to an entirely new level. These new breeds of measuring devices are smart devices, facilitating a more in-depth data acquisition that increases the performances of the control process, at a much lower cost than that provided by wired devices. The most popular industrial wireless sensor network technology in use today is the WirelessHART technology, which is based on the HART protocol [4]. In various industries, although the measurement and control devices are of different types, each device communicates through the same communication standard, thereby eliminating the interoperability issue. In the field of industrial control processes, however, there may be devices with different communication standards. One way to ensure interoperability between devices is to use a more expensive device that match the communication standard with the rest of the devices in the control process, though this comes at a much more expensive cost. A cheaper solution would be to use an OPC Server to communicate between the devices to ensure interoperability and successfully deliver data in the control process. [3]

The use of wireless transmitters in a closed loop control system represents many technical challenges. The measurements provided by these devices are usually updated on a much slower basis (5-15 seconds depending on the network topology). This network induced delay deteriorates the

performance of a closed loop control system, particularly with severe overshoot increments [9]. Blevins *et al.* developed a PIDPlus method that uses a positive feedback network to update the derivative action upon receiving measurements [11]. Abdullah *et al.* modified the traditional PID controller by dynamically filtering the wireless communication stack. Although these methods work well in combating the network induced delays, they concentrated primarily on single loop control. This work thus designs a wireless cascade control system whereby the gains are automatically tuned to adjust the control responses to achieve satisfactory responses. In particular, the paper investigates liquid flow-level cascade control. It is presented as follows: Section 2 briefly reviews the background; Section 3 outlines the experimental procedures; Section 4 presents the experimental results. This paper is concluded in Section 5.

2. BACKGROUND

2.1 Single loop control

Single loop control is a closed or feedback control system in which the controller input signal is a function of the difference between the reference or set point and the feedback signal (error signal). The goal of the control is to equate the output signal to a desired value. The feedback signal can either be a direct output signal or a function of the output signal. Fig. 1 shows a block diagram of signal loop control [1].

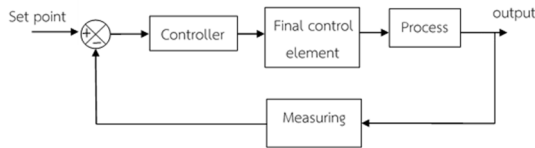


Fig. 1 Block diagram of single loop control.

2.2 Cascade Control

Cascade control is an architecture that can be used to improve control system performance over a single-loop controller [1]. This controller architecture designates an output from the primary controller the set point of the secondary controller. This can significantly reduce the effect of disturbances on the primary control variables than that of a single loop controller. A block diagram of a cascade controller is shown in Fig. 2.

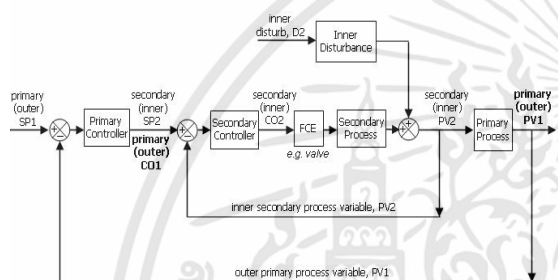


Fig. 2 Block diagram of a cascade controller.

Advantages of Cascade Control

- Control the process to achieve the set point faster when interfering with the process.
- Reduce the impact of disturbances on the main control variables better than a single loop control
- Can improve the performance of dynamic control process.

Disadvantages of Cascade Control

- Parameter adjustments in the controller are more difficult than single closed loop control.
- Controller designs are more complicated than a single closed loop control.
- Expensive because it requires more device.

2.3 HART Protocol

HART (Highway Addressable Remote Transducer) is a protocol that communicates in one type of control [4]. HART uses frequency shift keying (FSK) to simultaneously communicate analogue and digital signals, enabling to communicate with devices using analogue 4-20 mA signals. This feature makes it easier to modify the parameters of the field equipments. Fig. 3 shows an example of the HART protocol in use.

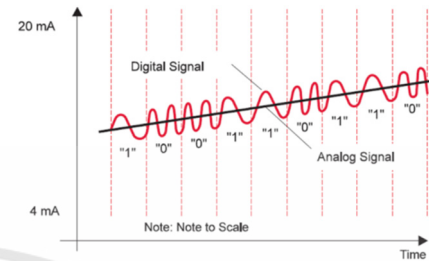


Fig. 3 HART protocol communication.

2.4 WirelessHART Protocol

WirelessHART or IEC62591-1 is a HART-based communication protocol with wireless technology, typically through a stable 2.4 GHz frequency band [4-5]. The wireless measuring devices are capable of providing a more in-depth gauge data, and are typically connected in a mesh topology, enabling the transmitters to find the best route to transmit data on their own, thus provide a significant cable and installation costs savings.

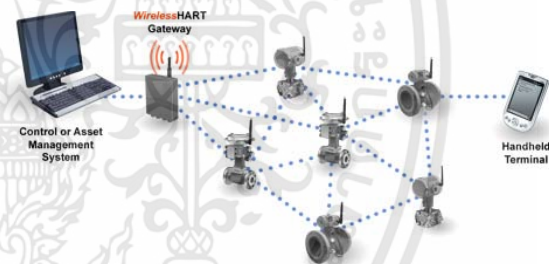


Fig. 4 WirelessHART communication topology.

2.5. Flow rate measurement using a DP transmitter

Measurement of the Fluid through the DP transmitter is done via an orifice plate. The plate measures a differential pressure, where the high pressure is connected to the inlet side, and the lower pressure connected to the outlet side as shown in Fig. 5. Equation (1) gives the relationship between the flow rate Q and the pressure gradient ΔP [1].

$$Q = K \sqrt{\bar{P}} \quad (1)$$

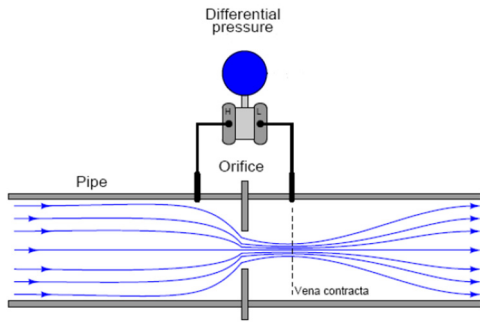


Fig. 5 DP transmitter with Orifice Plate.

2.6. Open tank level measurement

A DP transmitter is used to measure pressure difference between the tank pressure and the atmospheric pressure in case of open tank by connecting the high pressure side of DP Transmitter to the side bottom of the tank. The lower pressure of the DP transmitter in comparison to the atmospheric pressure can be determined through the Bernoulli equation [6], where the height of the fluid varies with the difference in pressure.

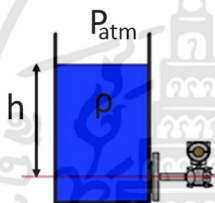


Fig. 6 DP Transmitter with liquid level tank.

2.7. OPC Server

OPC Server is the an OLE (Object Linking and Embedding) based standard for communication between measuring devices and controllers on Windows operating systems such as SCADA, HMI, or Remote Unit with different communication standards [3]. This makes it possible to communicate data in the same standard format, making OPC a standard for the use of different information devices. Fig. 7 shows an OPC server diagram.

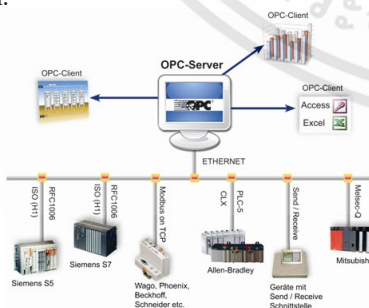


Fig. 7 The OPC Server schematic.

2.8. LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering) is a visual programming language platform developed by National Instruments (NI) for data acquisition, instrument control and industrial

automation [2]. Armed with a wide range of mathematical functions, its graphical interface, combined with the ability to interact with other hardware and software, LabVIEW is used extensively in automation and process control researches to develop new technology.

3. DESIGN AND IMPLEMENTATION

3.1 Apparatus setup

Consider the following flow-level cascade control block diagram in which the level controller is designated the primary controller, with the flow rate controller the secondary controller as shown in Fig. 8.

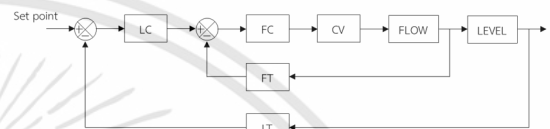


Fig. 8 Flow-level cascade control block diagram.

Fig. 9 shows the flow-level cascade controller equipments which are used in this study. Figure 10 shows the piping and instrumentation diagram of the flow-level cascade control, which includes the following devices: a DP Transmitter (Tx) with WirelessHART; a DP flow rate Tx with WirelessHART in H₂O; a concentric orifice plate; a pneumatic control valve with positioned; a current to pneumatic converter; an Omron PLC with RS-232 to USB connection, and a liquid pump.



Fig. 9 The flow-level cascade controller.

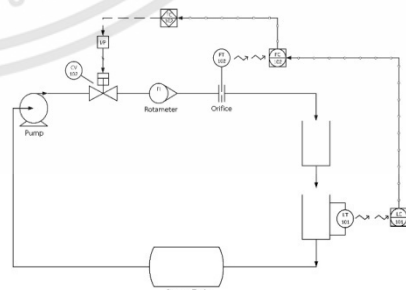


Fig. 10 The Piping and Instrumentation Diagram (P&ID) of the flow-level cascade controller.

3.2 Software Implementations

3.2.1 Measurement and control devices connection

Data acquisition from the DP transmitter to a computer workstation is done via WirelessHART by connecting the transmitter to a wireless hub. The WirelessHART gateway is then accessed through a standard web browser using the IP address 192.168.0.10. PLC connection from the workstation is through a RS-232 serial cable to the USB port of the workstation. Fig. 11 shows the WirelessHART gateway which is accessed through a web browser. Note that the Wireless THUM Adapter has a data rate of 8 seconds.

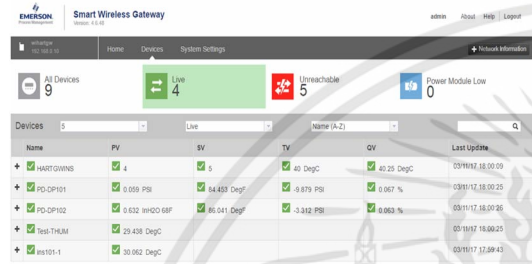


Fig. 11 WirelessHART gateway web browser

3.2.2 Communication of control devices configuration

OPC Server software is used as a medium for communication between multi-standard devices and the LabVIEW program, which is used as platform for configuring the PID controller via auto tuning. Specifically, the OPC Server receives the process variables and in turn sends the manipulated variables to the PLC via an RS-232 serial port. The PLC is in turn connected to a pneumatic converter, which converts a 4-20 mA current signal into a 3-15 psi control actuator valve signal. The measuring devices communicate with the WirelessHART transmitter, which is connected to the wireless gateway and the OPC Server through Modbus TCP/IP protocol. Fig.12 shows the schematic of the instrumentation devices communication.

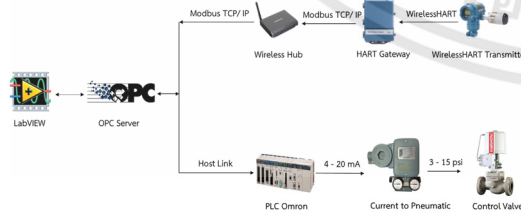


Fig.12 Schematic of the instrumentation devices communication.

3.2.3 OPC Server Settings

OPC Server setting is divided into two parts, namely, the connection with the WirelessHART gateway through Modbus TCP/IP, and the establishment of a Host Link connection to the PLC which requires setting an OPC tag for both set of

communications. Fig. 13 shows the setting up of an OPC tag.

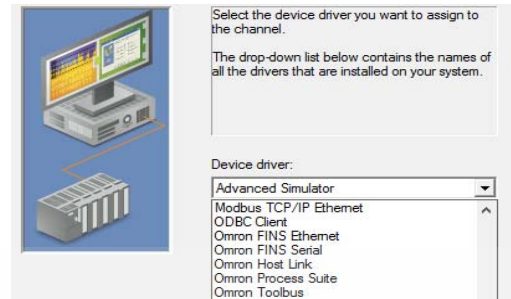


Fig. 13 Creating an OPC Tag.

3.3 LabVIEW programming settings

The OPC Tag is used in the LabVIEW program for measurement and process control. This is done by creating an I/O Server and then connecting to the OPC Server.

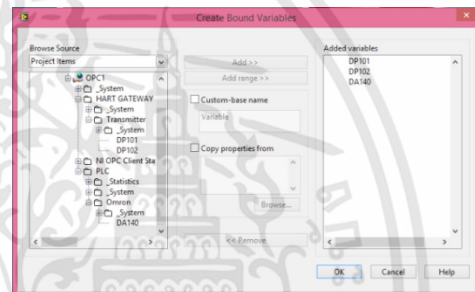


Fig. 14 Creating I/O Server.

3.4 A LabVIEW program to control

LabVIEW can be programmed as a Human Machine Interface (HMI). The process variable profiles in comparison to the target can easily be viewed. LabVIEW also offers an auto tuning mode that allows for customizing the controller parameters. The process can also be saved for further analysis.

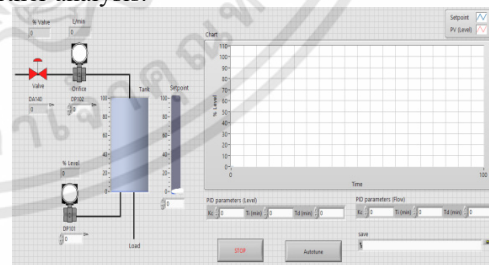


Fig. 15 Human Machine Interface: HMI.

3.5 Experimental Procedures

To investigate wireless control of the schematic shown in Fig. 10, three sets of experiments are considered: single loop level control; single loop flow control, and cascade control. For each experimental set, the same conditions are applied, namely, auto tuning in LabVIEW is programmed in the same way. The level target of 60% is fixed for each of the three experimental set.

3.6 PID gains determination algorithm

To determine the set of PID gains for both single loop and cascade loop control, the controller performance is quantified in terms of the integrated time absolute error (ITAE) as follows:

$$ITAE(p) = \int_0^{t_f} |t e(t; p)| dt \quad (2)$$

The goal of the PID tuning is to thus seek the PID gains in such a way that minimizes the ITAE function of Equation (2). In this respect an algorithm similar to Ref. [12] was used to determine the PID gains. This algorithm was numerically implemented in a PID Auto Tuning Mode in LabVIEW.

4. EXPERIMENTAL RESULTS

4.1 Experimental results of single loop control

For the single loop level control, the parameters of the controller obtained from PID were $k_p = 0.276966$, $k_i = 1.950046$, and $k_d = 0.390009$. Fig. 16 shows the response of the process variable against the set point level of 60 percent. The settling time was found to be 1600 seconds. Fig. 17 shows the disturbance case where the liquid source disappears for the time period of 10 s, with the same PID gains being used. In this case the settling time was found to be 817 s.

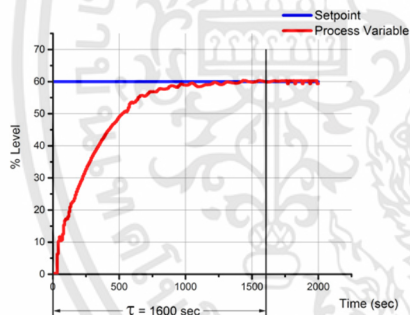


Fig. 16 Single-loop level control response.

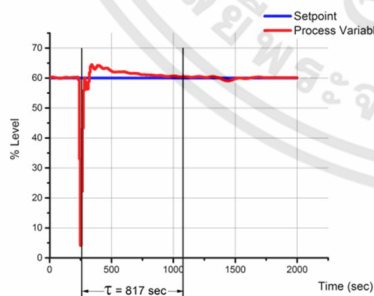


Fig. 17 Single-loop level control response when liquid supply is lost for 10 seconds disturbance.

For the case of single loop flow control, the parameters of the controller were $k_p = 0.283693$, $k_i = 1.719439$, and $k_d = 0.343888$. Fig. 18 shows the response of the process variable against the set point level. The settling time was found to be 1400 s. Both these results show that the designed

controller is able to cope with the network induced delay of the WirelessHART system.

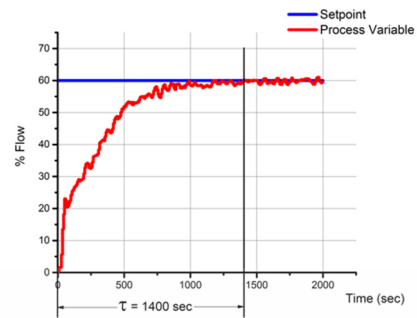


Fig. 18 Single-loop flow control response.

4.2 Experimental results of the cascade control

The parameters of the main controller were found to be $k_p = 0.487904$, $k_i = 2.602657$, and $k_d = 0.520531$; the parameters of the secondary control were $k_p = 0.283693$, $k_i = 1.719439$, and $k_d = 0.343888$. The single clock cycle is set to 1560 seconds and the response time is 10 seconds. Fig. 19 shows the cascade control level response against the level set point of 60%. The settling time was found to be 1560 s. Fig. 20 plots the manipulated variable (Level) against the process variable (Flow). It is seen that the two plots coincide with one another around the settling time of 1560s. Fig. 21 depicts the case where the liquid source disappears for 10 s, with the same PID gains still being used. The settling time was found to be 730 s.

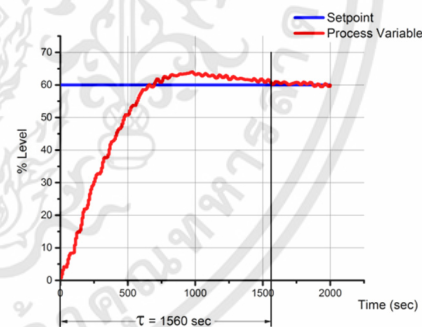


Fig. 19 Cascade Control response.

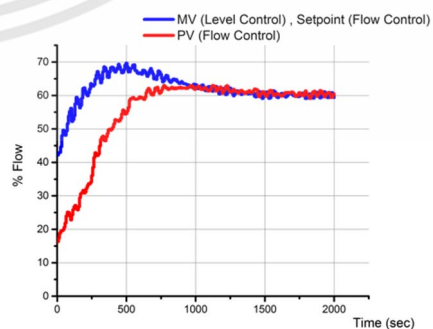


Fig. 20 MV (Level) against PV (Flow) responses.

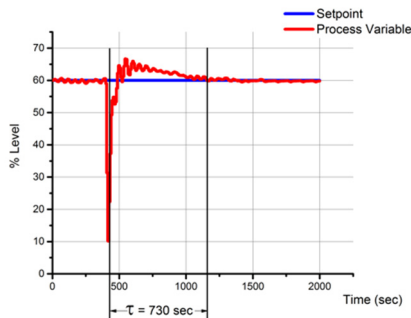


Fig. 21 Cascade control response when the liquid supply is missing for 10 seconds.

5. CONCLUSION

This paper presents cascade control architecture for dealing with wireless networked control systems. Specifically, a flow-level cascade control design was investigated, in which the process variables were obtained through a Wireless THUM adaptor having a data transmission rate of 8 s. Three experiments were conducted. Each experiment sets a target level of 60%. The PID gains for each set of experiment were determined by auto tuning. A single loop controller was found to have a settling time of 1600 s, while the cascade loop controller yielded a 1560 s settling time. A further disturbance test was also conducted where the liquid source is turned off for 10 s. In this case the single loop controller yielded a 810 s settling time, whereas the settling time was only 730 s for the cascade controller. These results show that the proposed cascade controller design is more capable than a single loop controller to not only handling the induced network delays, but to also cope with significant disturbances to the system.

REFERENCES

- [1] Carlos A .Smith, Armando B .Corripio. 1997. Principles and Practice of Automation Process Control. 2nd ed .New York .John & Sons.
- [2] Jeffrey Travis .2002. LabVIEW for Everyone. 2nd ed .Prentice-Hall.
- [3] Thitikarn Chotklang, Viriya Kongratana. ,2015 .An Application of OPC Server with Wireless HART Transmitter for Pressure Process Control by LabVIEW .The 11th PSU-Engineering Conference) PEC-11 (June, 19-20, 2015.
- [4] HART Communication Foundation .2013. HART Communication Protocol Application Guide (HCF LIT 039).
- [5] SMART Industrial Automation. 2017. Tutorial HART. <http://www.smar.com/en/hart>.
- [6] Differential Pressure Flow meters [Online]Available:<http://www.electricalidea.com/2016/12/12/differential-pressure-flow-meters/>.
- [7] A few important concepts about Pressure Transmitters <http://www.smar.com/en/technical-article/a-few-important-concepts-about-pressure-transmitters>.
- [8] The Cascade Control Architecture <http://controlguru.com/the-cascade-control-architecture/>.
- [9] T.D. Chung, R. Ibrahim and V.S. Asirvadam. 2016. Effect of Network Induced Delays on WirelessHART Control System. 2016 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS'16)
- [10] T. Blevins, M. Nixon, and W. Wojsznis, 2014. PID control using Wireless Measurements. American Control Conference (ACC).
- [11] H. Abdullah, R. Ibrahim and S.M. Hassan, Filtered feedback PID control for WirelessHART networked plant. 2016 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS'16).
- [12] S.J. Blassi, M.K. Mishra and E.E. Omizegba. 2011. Automatic tuning of proportional-integral-derivative (PID) controller using particle swarm optimization algorithm. Int. J. Artif. Intel. Appl. 2(4)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายพงศกร สมคะเน
 วัน เดือน ปีเกิด 3 พฤศจิกายน 2536
 ที่อยู่ 16/2 หมู่ 5 ตำบลบ้านใหม่ อำเภอเมือง
 จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

ประวัติการศึกษา
 พ.ศ. 2556-2559 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับ 2)
 สาขาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) System Identification
 2.) HART Protocol
 3.) Instrumentation and Control System

ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย

พ.ศ. 2561-ปัจจุบัน วิศวกรเดินเครื่อง
 บริษัท กัลฟ์ เจพี เคพี 2 จำกัด

พ.ศ. 2561 N. Wongvanich, P. Somkane, and V. Kongratana. "System Identification Of the Two Tanks System Subjected to WirelessHART Delays." 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)., 2018. pp. 363-368.

พ.ศ. 2560 P. Somkane, V. Kongratana, S. Gulpanich V. Tipsuwanporn and N. Wongvanich. "A Study of Flow-Level Cascade Control with WirelessHARTTM Transmitter Using LabVIEW." 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)., 2017. pp. 856-861.