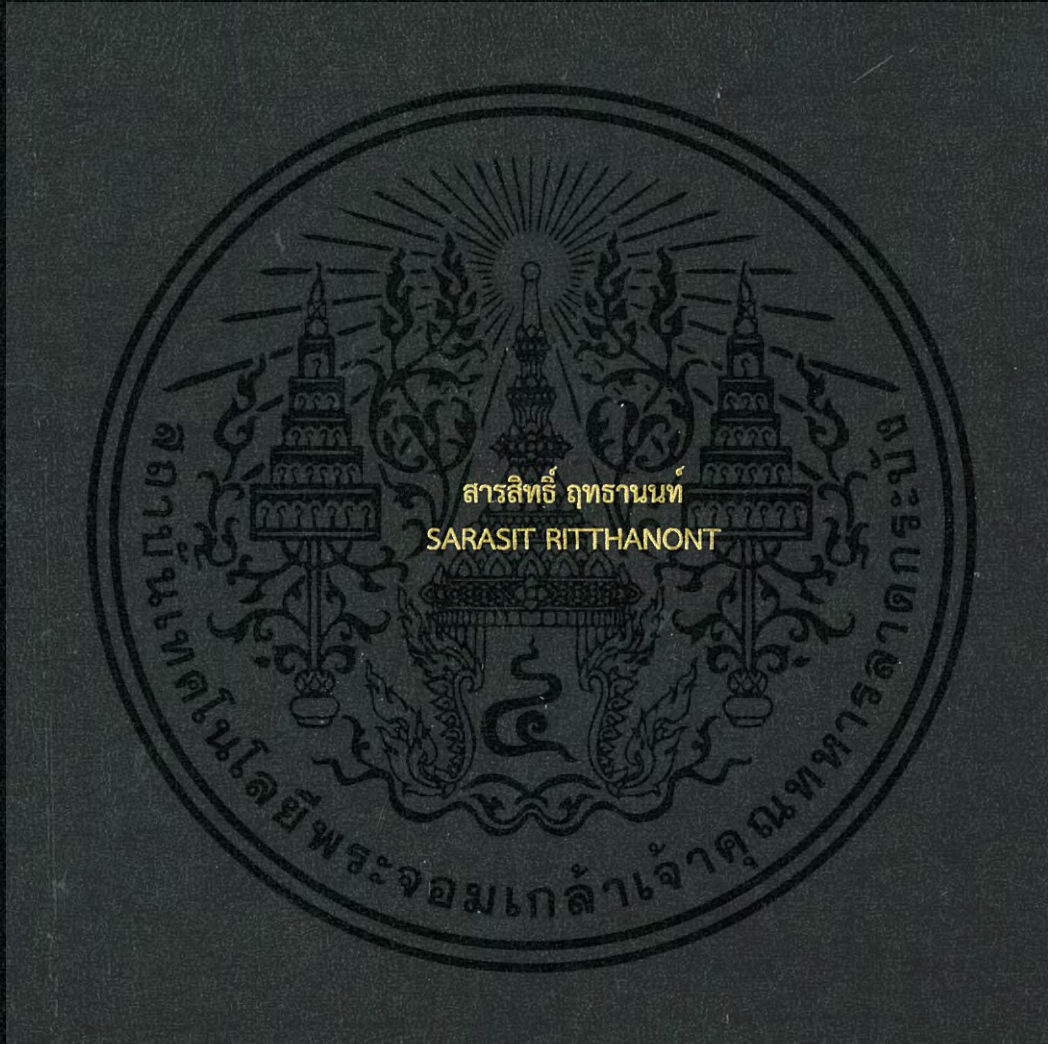


การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน
สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

THE DESIGN OF 2-DOF FRACTIONAL ORDER $PI^{\lambda}D^{\mu}$ CONTROLLER
FOR COUPLED-TANK PROCESS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560
KMITL-2017-EN-M-060-165

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน
สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

THE DESIGN OF 2-DOF FRACTIONAL ORDER $PI^{\lambda}D^{\mu}$ CONTROLLER
FOR COUPLED-TANK PROCESS



T148819

สารสิทธิ์ ฤทธานนท์
SARASIT RITTHANONT

เลขหมู่.....148819
เลขทะเบียน.....
พิมพ์เดือนปี 23 พ.ย. 2560

00266933

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-060-165

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE DESIGN OF 2-DOF FRACTIONAL ORDER $PI^\lambda D^\mu$ CONTROLLER
FOR COUPLED-TANK PROCESS



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

2017

KMITL-2017-EN-M-060-165

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน
สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

Thesis Title The Design of 2-DOF Fractional Order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controller for Coupled-Tank Process

นักศึกษา นายสารสิทธิ์ ฤๅชานนท์



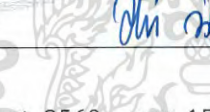

รหัสประจำตัว 55611759

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-060-165

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.เสถียร	ฉัญญศิริรัตน์	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.ดร.สุพรรณ	กุลพานิชย์	
รศ.วิริยะ	กองรัตน์	
รศ.อาจินต์	น่วมสำราญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 27 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 15.30-17.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวน เศษส่วน สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน
นักศึกษา	นายสารสิทธิ์ ฤทธานนท์
รหัสประจำตัว	55611759
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน อันเนื่องด้วยค่าความไม่แน่นอนจากองค์ประกอบและลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน จึงเป็นสิ่งท้าทายเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ และวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน การจำลอง ตรวจสอบ แสดงการวิเคราะห์จากทางทฤษฎี และการแสดงผลจากการทดลองเพื่อให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีขึ้นของตัวควบคุมแบบอันดับจำนวนเศษส่วน สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน เมื่อเทียบกับตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	The Design of 2-DOF Fractional Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller For Coupled-Tank Process
Student	Mr.Sarasit Ritthanont
Student ID.	55611759
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Arjin Numsomran

ABSTRACT

This thesis describes the design of two degrees of freedom (2-DOF) fractional order $PI^\lambda D^\mu$ controller for coupled-tank process. Due to uncertainty, nonlinear characteristic of coupled-tank process, it is challenged plant for testing performance of the controller. By using the proposed method, the mathematical model of process is estimated from experimental data for model identification. Then, the 2-DOF fractional order $PI^\lambda D^\mu$ controller is designed and optimized by minimizing the function of integral square error (ISE) performance index. Simulation validates theoretical analysis, and demonstrates the enhanced performance of the fractional order $PI^\lambda D^\mu$ controller for coupled-tank process compared with integer order PID controller.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.อาจินต์ น่วมสำราญ ที่ให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด ให้คำชี้แนะ ช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนให้ความรู้และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า และในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ข้อชี้แนะระเบียบข้อกำหนดต่าง ๆ ในการดำเนินการทำงานวิจัย และให้ความเมตตาช่วยเหลือข้าพเจ้าอยู่เสมอ

โดยเฉพาะอย่างยิ่งบุคคลอันเป็นที่รัก ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ มารดาและน้อง ที่เข้าใจคอยเป็นห่วงใยอยู่เสมอ และให้กำลังใจเป็นอย่างดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณทุกท่านที่ไม่ได้เอ่ยนามมาในโอกาสนี้ ในความช่วยเหลือ ให้การสนับสนุน ทั้งโดยตรงหรือโดยอ้อม ในทุก ๆ ด้าน ที่ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลงได้ด้วยดี

คุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแทนพระคุณแต่บิดรมารดาผู้ให้กำเนิดซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า และผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารสิทธิ์ ฤทธานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษาและส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 กระบวนการระดับน้ำสองถึงที่มีผลต่อกัน.....	5
2.1 กระบวนการระดับน้ำสองถึงที่มีผลต่อกัน.....	5
2.2 การระบุตัวแบบและการตรวจสอบ.....	7
2.3 การวิเคราะห์ในโดเมนความถี่.....	8
บทที่ 3 แคลคูลัสอันดับจำนวนเศษส่วน และ การออกแบบตัวควบคุม.....	9
3.1 นิยามของคณิตศาสตร์แคลคูลัสอันดับจำนวนเศษส่วนที่ใช้ในการออกแบบ.....	9
3.2 วิธีการประมาณค่าละเอียดของ Oustaloup.....	10
3.3 ตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วน.....	10
3.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วน.....	11
3.5 ตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 องค์ประกอบกระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน.....	13
4.1 กระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน	13
4.1.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน	13
4.1.2 ชุดขับปั๊มน้ำ	13
4.1.3 มอเตอร์ปั๊มน้ำ	13
4.1.4 เซนเซอร์.....	13
4.1.5 อุปกรณ์ Data Acquisition.....	13
4.1.6 คอมพิวเตอร์.....	13
4.2 ส่วนประกอบของกระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน.....	14
4.2.1 ถังน้ำ	15
4.2.2 วาล์ว	15
4.3 ระบบการวัดระดับด้วยวิธีการวัดความดันแตกต่างสำหรับถังเปิด	16
4.3.1 ความดัน.....	17
4.3.2 การวัดระดับด้วยวิธีวัดความดันแตกต่าง	19
4.3.3 เครื่องมือวัดความดันแตกต่าง	21
4.3.4 Current Loop Power and Signal Converter.....	23
4.4 มอเตอร์ปั๊มน้ำ และการขับมอเตอร์ปั๊มน้ำ.....	23
4.4.1 มอเตอร์ปั๊มน้ำ	23
4.4.2 แผงวงจรขับมอเตอร์ปั๊ม	25
4.4.3 Pulse Width Modulation	27
4.4.4 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	28
4.4.5 การเขียนโปรแกรมลงในไมโครคอนโทรลเลอร์.....	30
4.4.6 แหล่งจ่ายไฟฟ้า	36
4.5 การอ่าน/แปลงสัญญาณและส่งผ่านข้อมูล	37
4.6 โปรแกรม MATLAB / SIMULINK	39
4.6.1 การใช้งาน MATLAB.....	39
4.6.2 การใช้งาน SIMULINK	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การจำลอง และ การทดลอง.....	49
5.1 การจำลอง.....	49
5.1.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง IO PID และ FO PID	49
5.1.2 การหาค่าเหมาะสมของอันดับจำนวนเศษส่วน.....	52
5.1.3 ตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระอันดับจำนวนเศษส่วน	53
5.1.4 ความทนทานต่อการรบกวนระบบจากค่าอัตราขยายของระบบ	55
5.2 การทดลองบนกระบวนการจริง	56
5.2.1 Simulink ควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเต็ม.....	56
5.2.2 Simulink ควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมพีไอดี แบบสององศาอิสระ อันดับจำนวนเศษส่วน.....	57
5.2.3 ผลตอบสนองกระบวนการของ 2-DOF Fractional-Order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controller	57
5.2.4 เปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่าง IO PID controller กับ 2 DOF Fractional Order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controller.....	58
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	59
6.1 สรุปผลการวิจัย	59
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก.....	62
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	63
ประวัติผู้เขียน	73

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง Rosemount รุ่น 3051CD.....	21
4.2 ข้อมูลทางเทคนิคของดีซีมอเตอร์ปั๊ม Greylor รุ่น pq-12 dc.....	24
4.3 ข้อมูล Pump Performance Data.....	25
4.4 ข้อมูลทางเทคนิคของแผงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ดีซี.....	26
4.5 แสดงโหมดการตั้งค่า การควบคุมทิศทาง ของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์.....	27
4.6 ข้อมูลทางเทคนิคของแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-BASE ARM7024.....	29
4.7 ข้อมูลทางเทคนิค NI USB 6008 Multifunction DAQ.....	38
5.1 แสดงค่าทดสอบการเกิดการรบกวนระบบของค่าอัตราขยายของระบบ.....	55
5.2 แสดงผลการควบคุมของ 2-DOF Fractional-Order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controller.....	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แบบจำลองฟังก์ชันการตอบสนองระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน	5
2.2 กระบวนการตอบสนองระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันที่ใช้ทำการวิจัยทดลอง	6
2.3 ผลตอบสนองระบบเปิดเปรียบเทียบกับระหว่างโมเดลจริงและจากการประมาณค่า.....	8
2.4 แผนภาพโพล (Bode Diagram) ของระบบ	8
3.1 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วน	11
3.2 โครงสร้าง Set-Point Filter ของตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน ..	12
3.3 ตัวอย่างลักษณะโครงสร้างระบบควบคุมแบบอันดับจำนวนเต็มและแบบเศษส่วน	12
4.1 องค์ประกอบของกระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน	13
4.2 แผนผังการใช้งานถังน้ำสองถัง และกระบวนการถังน้ำสองถังจริง	14
4.3 ถังน้ำอะคริลิค	15
4.4 วาล์วที่เชื่อมต่อระหว่างถัง และ วาล์วทางออก	15
4.5 ตัวอย่างการวัดและติดตั้งเครื่องมือวัดความดันแตกต่างกันสำหรับถังปิด และ ถังเปิด	16
4.6 ความรู้พื้นฐานเรื่องความดัน	17
4.7 ความดันที่เกิดจากของเหลว	18
4.8 ประเภทของความดัน	19
4.9 รูปแบบการวัดด้วย Diff. Pressure Transmitter สำหรับถังเปิดที่ใช้ในการวิจัยทดลอง.....	19
4.10 Differential Pressure Transmitter ที่ใช้ในการวัดระดับในการวิจัยทดลอง	20
4.11 เครื่องมือวัดความดันแตกต่างของ Rosemount รุ่น 3051CD	21
4.12 แสดงตำแหน่งปุ่มเพื่อปรับ 0 และ Span ของ Rosemount รุ่น 3051CD	22
4.13 Current Loop Power และ Signal Converter	23
4.14 มอเตอร์ปั๊มน้ำ	25
4.15 แผงวงจรขับมอเตอร์ดีซี H-Bridge รุ่น SE-HB40-1	26
4.16 แสดงวิธีการต่อใช้งานแผงวงจรขับมอเตอร์ดีซี	27
4.17 แสดงลักษณะรูปคลื่นของ PWM	28
4.18 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-BASE ARM7024	29
4.19 หน้าต่างโปรแกรม Keil uVision3 เมื่อเปิดใช้งาน	30
4.20 หน้าต่างโปรแกรมตรงส่วนกำหนดค่าของโปรแกรม Keil uVision3.....	31
4.21 ตัวอย่างหน้าต่างการสร้างโปรเจคไฟล์	32
4.22 การเลือกบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตามต้องการ	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา VIII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 การกำหนดค่าเริ่มต้นของหน้า Target.....	33
4.24 การกำหนดค่าเริ่มต้นของหน้า Output	33
4.25 ตัวอย่างหน้าต่างที่ทำการเขียน Source Code	34
4.26 การ Add file ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการแปลโปรแกรม.....	35
4.27 ตัวอย่างหน้าต่างผลลัพธ์การแปลโปรแกรม.....	35
4.28 Switching Power Supply 12V 12A	36
4.29 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ปั้มน้ำที่ใช้ทำวิจัยทดลอง	36
4.30 NI USB-6008 Multifunction DAQ	37
4.31 หน้าต่างเริ่มต้นการใช้งานโปรแกรม MATLAB	39
4.32 ตัวอย่างการสร้างอาร์เรย์ เมทริกซ์.....	40
4.33 ตัวอย่างการดำเนินการกับอาร์เรย์ และ เมทริกซ์.....	40
4.34 ตัวอย่างการใช้งาน workspace.....	41
4.35 การทำงานกับ ตัวอักษร หรือ ข้อความ.....	41
4.36 ตัวอย่างการเรียกใช้ฟังก์ชัน	42
4.37 ตัวอย่างการพล็อตกราฟเส้น	42
4.38 ตัวอย่างการพล็อตกราฟ 3 มิติ.....	43
4.39 ตัวอย่างการพล็อตกราฟ 3 มิติ รูปย่อ.....	43
4.40 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม สคริปต์.....	44
4.41 ตัวอย่างการเข้าถึงความช่วยเหลือของโปรแกรม.....	45
4.42 หน้าต่างใช้งาน SIMULINK	45
4.43 หน้าต่างสร้างโมเดลใหม่ใน SIMULINK	46
4.44 หน้าต่าง Simulink Library ใน SIMULINK	46
4.45 การจัดวางฟังก์ชันบล็อกตามต้องการ.....	47
4.46 การสร้างการเชื่อมต่อระหว่างบล็อก	47
4.47 ตัวอย่างหน้าต่างการใส่ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันบล็อกที่เลือก	48
4.48 ตัวอย่างหน้าต่างแสดงผลการจำลอง ผ่านฟังก์ชันบล็อก Scope.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 แผนภาพโบลด์ของตัวควบคุม.....	50
5.2 Simulink ของ 1 DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller.....	50
5.3 ผลตอบสนองสเต็ป ของ FO $PI^\lambda D^\mu$ เปรียบเทียบกับ IO PID	51
5.4 สัญญาณควบคุมของ FO $PI^\lambda D^\mu$ เปรียบเทียบกับ IO PID Controller.....	51
5.5 กราฟ ISE ค่าเหมาะสมของ λ และ μ	52
5.6 Simulink ของ 2-DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller.....	53
5.7 ผลตอบสนองสเต็ปของ (1DOF, 2DOF) FO $PI^\lambda D^\mu$ เปรียบเทียบกับ (1DOF) IO PID	54
5.8 สัญญาณควบคุมของ (1DOF, 2DOF) FO $PI^\lambda D^\mu$ เปรียบเทียบกับ (1DOF) IO PID	54
5.9 ผลตอบสนองสเต็ป 2-DOF FO $PI^\lambda D^\mu$ ที่พิจารณาการเกิดผลกระทบจากการรบกวนระบบ ...	55
5.10 Simulink ของ Integer-Order PID controller ที่ใช้ควบคุมกระบวนการจริง.....	56
5.11 Simulink ของ 2-DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ ที่ใช้ควบคุมกระบวนการจริง.....	56
5.12 ผลตอบสนองกระบวนการของ 2-DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller.....	57
5.13 ผลตอบสนองสเต็ป 2-DOF FO $PI^\lambda D^\mu$ Controller เทียบกับ IO PID Controller.....	58

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม มีการควบคุมตัวแปรและกระบวนการ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและประสิทธิผลที่ดีในการผลิต การวัดและควบคุมระดับถือเป็นหนึ่งในตัวแปรซึ่งมีความสำคัญมากในกระบวนการอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมหรือกระบวนการทางเคมี ซึ่งต้องการสมรรถนะในการควบคุมที่ดี โดยปัจจัยที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการควบคุมระดับของของเหลวในกระบวนการนั้น ประกอบด้วย เสถียรภาพ สมรรถนะ และความคงทนต่อสิ่งรบกวนทั้งภายในและภายนอก เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการควบคุมดังกล่าวเป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการ

ตัวควบคุมพีไอดีแบบดั้งเดิมได้มีการศึกษาและใช้งานกันแพร่หลายตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน ซึ่งนักศึกษา นักวิจัยและพัฒนา ได้พยายามที่จะศึกษาหาทางพัฒนาศักยภาพของตัวควบคุมมาโดยตลอด เพื่อพยายามเพิ่มศักยภาพให้กับตัวควบคุมให้มากยิ่งขึ้น [1]~[13] ตัวควบคุมแบบอันดับจำนวนเศษส่วนก็เป็นตัวควบคุมที่ได้มีการเริ่มศึกษามากขึ้น [1]~[4], [7], [10] ~[13] โดยเฉพาะการพัฒนาชุดโปรแกรมประยุกต์เรื่องตัวควบคุมแบบอันดับจำนวนเศษส่วนที่ใช้บนโปรแกรม MATLAB ก็ทำให้ช่วยในส่วนการจำลองและการทดลองได้เป็นอันมาก [2] แต่การศึกษาและการทดลองเพื่อการนำไปใช้หรือการประยุกต์ใช้กับกระบวนการต่าง ๆ หรือแม้กระทั่งข้อมูลผลการวิจัยทดลองของตัวควบคุมแบบนี้ นั้นยังมีอยู่จำนวนน้อยมาก

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน ซึ่งกระบวนการควบคุมระดับน้ำแบบสองถังเป็นที่นิยมในการนำมาทดสอบประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบพีไอดีในห้องปฏิบัติการพื้นฐานทางวิศวกรรม เนื่องจากกระบวนการนี้จะมีลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้นและความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สูง จึงเป็นความท้าทายในการนำมาทดสอบสมรรถนะของตัวควบคุม ซึ่งการวิจัยทดลองนี้ได้นำเสนอวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการแบบอันดับจำนวนเศษส่วน และ วิธีการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน เพื่อศึกษาการออกแบบและปรับสมรรถนะของผลตอบสนองของระบบควบคุม ในการดำเนินการวิจัย จะทำการสร้างระบบควบคุมการทำงานและวิเคราะห์ระบบ ผ่านโปรแกรม MATLAB และทำการจำลองและทดลองกับกระบวนการจริงตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาโครงสร้างและลักษณะของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

1.2.2 ศึกษาการควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

1.2.3 ศึกษาการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน

1.2.4 ศึกษาและเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมของตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเต็ม กับตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

1.2.5 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในงานด้านวิศวกรรมการควบคุม

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังศึกษาเพื่อวิจัยทดลองตัวควบคุมที่ถูกพัฒนาจากตัวควบคุมแบบดั้งเดิม ได้เลือกศึกษาทดลองกับแอปพลิเคชันที่เป็นการควบคุมระดับ ซึ่งการควบคุมตัวแปรนี้ก็เป็นตัวแปร ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วนสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันในการทำงานวิจัยนี้ เพื่อแสดงให้เห็นถึงสมรรถนะที่ดี เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเต็มดั้งเดิม และตัวควบคุมที่ออกแบบสามารถมีความทนทานเมื่อมีสิ่งรบกวนเข้ามาในระบบ ยังคงทำการควบคุม เข้าสู่ค่าควบคุม (Set-Point) ที่เป็นเป้าหมายได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

สมการที่ (1.1) เป็นสมการที่แสดงให้เห็นลักษณะตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเต็ม หรือแบบดั้งเดิม (Integer-Order PID, IO PID) และ สมการที่ (1.2) เป็นสมการที่แสดงให้เห็นลักษณะตัวควบคุมแบบอันดับจำนวนเศษส่วน (Fractional-Order PID, FO PID)

ลักษณะสำคัญที่แสดงความแตกต่างระหว่างตัวควบคุมสองแบบนี้ ก็คือ อันดับกำลังของ s ซึ่งเป็นไปตามการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์ ตามตัวอย่างต่าง ๆ ที่มีใน [1]~[10] หากพิจารณาในเทอมของตัวควบคุมดังสมการดังกล่าว เมื่อ λ, μ เป็นอันดับกำลังของ s และเมื่อมีค่าเป็น 1 ก็คือ ตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเต็มหรือแบบดั้งเดิม (IO PID) แต่หากกำลังของ s ดังกล่าว เป็นจำนวนเศษส่วน จึงถูกเรียกว่า ตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วน (FO PID)

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s \quad (1.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s^\mu \quad (1.2)$$

โดย $k_p, k_i, k_d \in \mathbb{R}$ และ $\lambda, \mu \in \mathbb{R}^+$

ตัวควบคุมที่ทำการออกแบบ ลักษณะฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบก็สามารถเป็นได้ทั้งสองลักษณะ คือ อันดับกำลังที่เป็นทั้งจำนวนเต็มและอันดับที่เป็นเศษส่วน ตัวควบคุมที่ใช้งานส่วนมากยังเป็นลักษณะของตัวควบคุมแบบอันดับจำนวนเต็ม ซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนโดยปกติจะต้องถูกนำมาพิจารณาเป็นองค์ประกอบหลักในการออกแบบตัวควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพและสมรรถนะที่ดี การประยุกต์ลักษณะของตัวควบคุมที่มีลักษณะอันดับเป็นจำนวนเศษส่วน เข้าไปในการออกแบบตัวควบคุมกระบวนการ เพื่อให้ได้การตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่ต้องการมากขึ้น การออกแบบที่ใช้หลักการและทฤษฎีดังกล่าวมาประยุกต์ใช้จะทำให้ได้ผลลัพธ์การควบคุมที่ดีขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ตามลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนที่โดยปกติต้องการค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่เป็นค่าเหมาะสมที่สุดในตอนทำการออกแบบตัวควบคุม หากมีค่าอันดับที่เป็นจำนวนเศษส่วนซึ่งมีค่าละเอียดมากกว่าจำนวนเต็ม สามารถเป็นค่าที่สอดคล้องและเป็นค่าเหมาะสมที่สุดในการทำการออกแบบตัวควบคุมได้มากขึ้น ก็จะส่งผลทำให้การออกแบบ ได้ตัวควบคุมที่ผลลัพธ์การควบคุมมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น จากลักษณะตามที่กล่าวอธิบายข้างต้น

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 ศึกษาโครงสร้างและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

1.5.2 ทำการออกแบบ ตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

1.5.3 นำตัวควบคุมที่ออกแบบมา ทำการจำลองการทำงาน จากนั้น ทดลองการควบคุมกับกระบวนการจริง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษาและส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

ขั้นตอนในการทำการศึกษา ได้อธิบายและเรียงลำดับแบ่งตามบทและเป็นส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงเรื่อง ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา, ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา, สมมุติฐานของการศึกษา, ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย, ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 กระบวนการระดับน้ำสองถึงที่มีผลต่อกัน อธิบายถึงลักษณะของกระบวนการ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การระบุตัวแบบและการตรวจสอบ

บทที่ 3 แคลคูลัสอันดับจำนวนเศษส่วน และการออกแบบตัวควบคุม ซึ่งได้กล่าวถึงคณิตศาสตร์ แคลคูลัสสำหรับอันดับที่เป็นจำนวนเศษส่วน รวมถึงวิธีการประมาณค่า ที่เป็นแนวทางมาใช้ในการทำการออกแบบ และ กล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน พร้อมทั้งแสดงลักษณะโครงสร้างระบบและกระบวนการ

บทที่ 4 องค์กรประกอบกระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถึงที่มีผลต่อกัน ซึ่งได้กล่าวอธิบายองค์กรประกอบต่าง ๆ หน้าที่และหลักการทำงานของแต่ละส่วน พร้อมทั้งอธิบายถึงวิธีใช้วิธีปฏิบัติการ

บทที่ 5 การจำลอง และการทดลอง เป็นส่วนของการแสดงผลการจำลอง และการทดลองระบบควบคุมกระบวนการระดับน้ำสองถึงที่มีผลต่อกันด้วยตัวควบคุมที่ออกแบบ ซึ่งได้แสดงถึงผลจากการศึกษาตามบทที่ 2, 3 และ องค์กรประกอบตามบทที่ 4 นำมาจำลองการทำงาน และ ทดลองกับกระบวนการจริง

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ได้กล่าวถึงบทสรุปผลการวิจัยทดลอง พร้อมกับข้อเสนอแนะต่าง ๆ



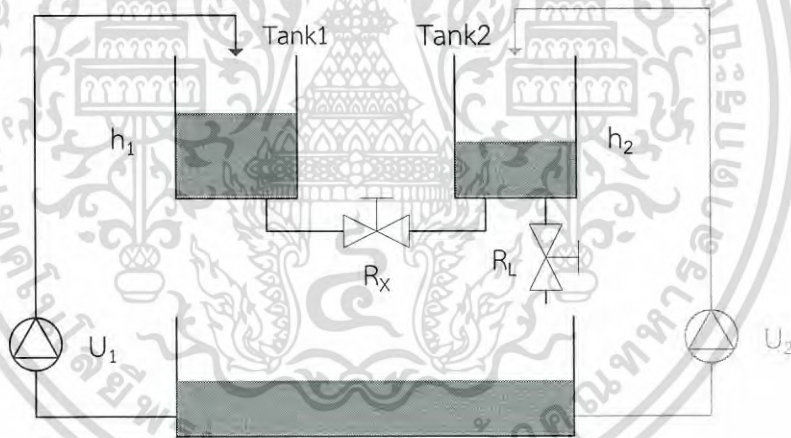
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

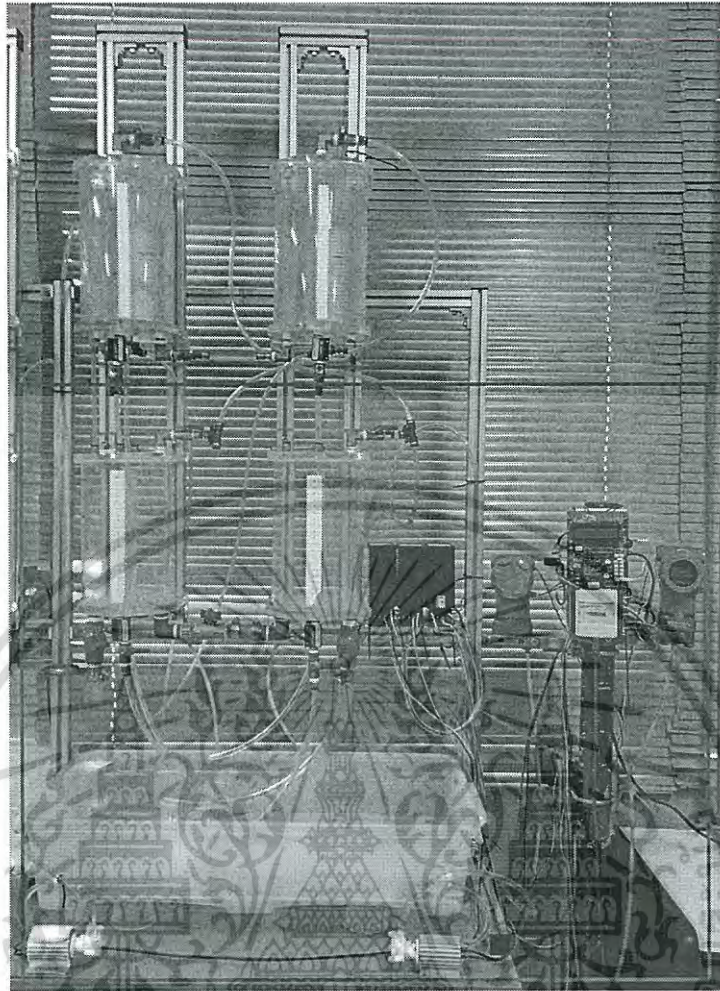
2.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน (Coupled-Tank Process)

จากรูปที่ 2.1 คือ ลักษณะกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันที่ใช้ทำการวิจัยทดลอง ได้ทำการกำหนดลักษณะกระบวนการเป็นแบบ หนึ่งอินพุต หนึ่งเอาต์พุต (Single Input Single Output, SISO) โดยเป้าหมายการควบคุม คือ การควบคุมระดับน้ำ $h_2(t)$ ในถังที่ 2 (Tank 2) โดยการป้อนแรงดันอินพุตให้กับปั๊ม U_1 เพื่อเป็นอินพุตของกระบวนการ มีวาล์ว R_x เป็นวาล์วที่เชื่อมต่อระหว่าง Tank 1 กับ Tank 2 ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ทำให้มีผลต่อกัน (Interaction) และมีวาล์ว R_L เป็นวาล์วทางออก สมการไม่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการสามารถหาได้จากสมการสมดุลมวลและกฎของเบอร์นูลลี ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.1 แบบจำลองผังกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันที่ใช้ทำการวิจัยทดลอง

$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= -\frac{\beta_{12}a_{12}}{A_1} \sqrt{2g(h_1(t)-h_2(t))} + \frac{k}{A_1} u(t) \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= -\frac{\beta_2 a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2(t)} + \frac{\beta_{12}a_{12}}{A_2} \sqrt{2g(h_1(t)-h_2(t))} \end{aligned} \quad (2.1)$$

- โดย
- A_1 คือ พื้นที่หน้าตัดของถัง 1 (cm^2)
 - A_2 คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อทางออกของถังที่ 2 (cm^2)
 - a_{12} คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อที่เชื่อมต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 (cm^2)
 - β_2 คือ ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อทางด้านออกของถังที่ 2
 - β_{12} คือ ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2
 - g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (cm/s^2)
 - k คือ ค่าอัตราการขยายของปั๊มน้ำ ($\text{cm}^3/\text{V}\cdot\text{s}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.1) เมื่อทำให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นจะได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\begin{aligned}\frac{dH_1(t)}{dt} &= \frac{1}{T_{12}}(-H_1(t) + H_2(t)) + \frac{k}{A_1}U(t) \\ \frac{dH_2(t)}{dt} &= -\frac{1}{T_2}H_2(t) + \frac{1}{T_{12}}(H_1(t) - H_2(t))\end{aligned}\quad (2.2)$$

โดย $T_{12} = \frac{A_1}{\beta_{12}a_1} \sqrt{\frac{2(\bar{h}_1 - \bar{h}_2)}{g}}, s$ $T_2 = \frac{A_2}{\beta_2 a_2} \sqrt{\frac{2\bar{h}_2}{g}}, s$

\bar{h}_1 และ \bar{h}_2 คือ ระดับน้ำ ณ จุดทำงานของกระบวนการ

T_{12} คือ ค่าคงตัวเวลาระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2

T_2 คือ ค่าคงตัวเวลาของถังที่ 2

จากสมการที่ (2.2) ทำให้อยู่ในรูปแบบจำลองเชิงเส้นจะได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\frac{H_2(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{K}{T_{12}T_2s^2 + (T_{12} + 2T_2)s + 1} \quad (2.3)$$

โดย $K = \frac{kT_2}{A_2}, \text{cm/V}$

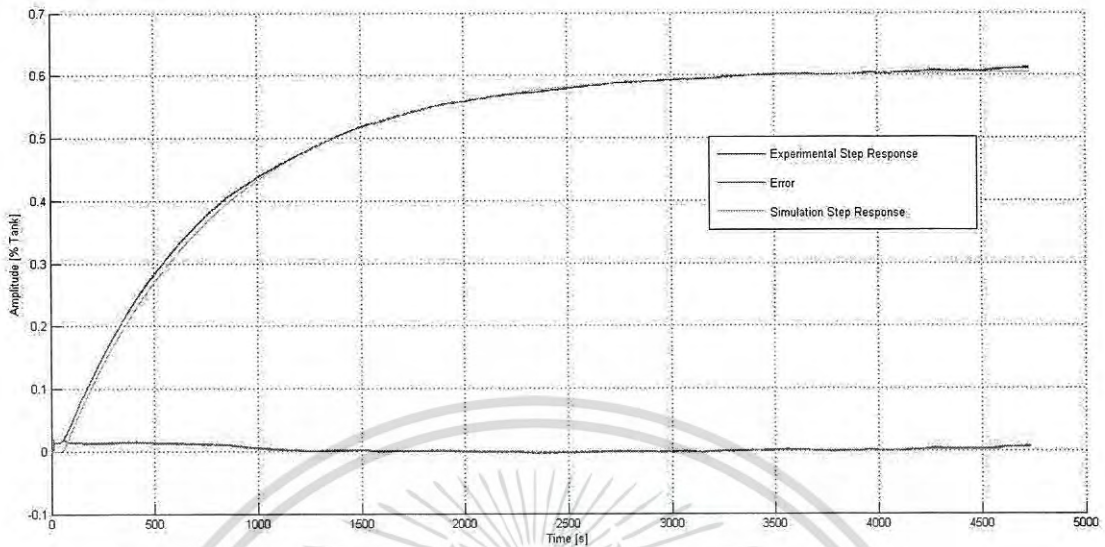
สมการที่ (2.3) นี้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุม

2.2 การระบุตัวแบบและการตรวจสอบ (Model Identification and Validation)

ในรูปที่ 2.3 แสดงผลตอบสนองของระบบเปิด (Open Loop) ที่ไม่มีตัวควบคุม ของกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน จากโมเดลจริงและการประมาณค่า โดยการระบุรูปแบบกระบวนการเป็นแบบอันดับสองที่เกิดช่วงเวลาไม่ตอบสนองชั่วขณะ (Second Order Plus Dead Time, SOPDT) ซึ่งถูกใช้ในการประมาณค่าของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (Transfer Function, TF) และจากข้อมูลจากการทดลองระบบเปิดที่แสดงในรูปที่ 2.3 ผลที่ได้ของสมการตัวแทนระบบเป็นไปดังสมการที่ (2.4) โดยมีรูปแบบจากตัวแบบโมเดลจริงและการประมาณค่า เข้ากันได้ถึง 98.97% ที่ค่าผิดพลาด 0.543%

$$G(s) = \frac{1.212}{2345s^2 + (759.8)s + 1} e^{-52.7s} \quad (2.4)$$

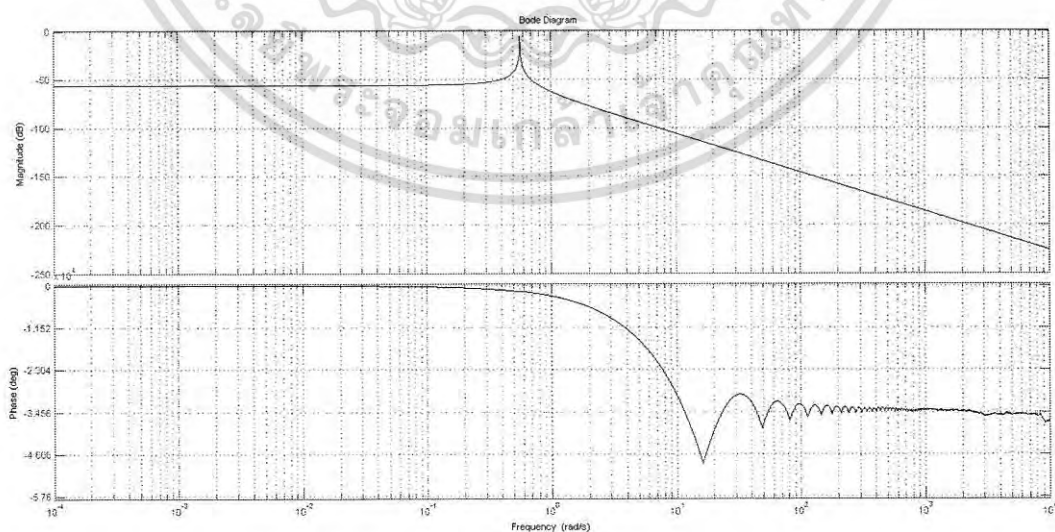
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในของหน่วยงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ผลตอบสนองระบบเปิดเปรียบเทียบระหว่างโมเดลจริงและจากการประมาณค่า

2.3 การวิเคราะห์ในโดเมนความถี่

แผนภาพโบด (Bode Diagram) ในรูป 2.4 แสดงถึงการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ของ กระทบกร ที่สถานะเสถียรภาพ โดยมี ขอบเขตอัตราขยาย (Gain Margin) 28.1 dB ที่ความถี่ 0.445 rad/s และ ขอบเขตมุม (Phase Margin) ที่ 144 deg. ที่ความถี่ 0.00971 rad/s



รูปที่ 2.4 แผนภาพโบด (Bode Diagram) ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

แคลคูลัสอันดับจำนวนเศษส่วน และ การออกแบบตัวควบคุม

3.1 นิยามของคณิตศาสตร์แคลคูลัสอันดับจำนวนเศษส่วนที่ใช้ในการออกแบบ

นิยามตัวกระทำ อนุพันธ์-ปริพันธ์ ที่ใช้ในแคลคูลัสอันดับจำนวนเศษส่วน คือ

$${}_a D_t^q = \begin{cases} \frac{d^q}{dt^q} & q > 0 \\ 1 & q = 0 \\ \int_a^t (dt)^{-q} & q < 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

โดย q คือ อันดับจำนวนเศษส่วน q
 a, t คือ ขอบเขตของตัวดำเนินการปริพันธ์

นิยามสำหรับอนุพันธ์อันดับจำนวนเศษส่วน โดย Grunwald-Letnikov แสดงดังต่อไปนี้

$${}_a D_t^q f(t) = \frac{d^q f(t)}{d(t-a)^q} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{t-a}{N} \right]^{-q} \sum_{j=0}^{N-1} (-1)^j \binom{q}{j} f\left(t - j \left[\frac{t-a}{N} \right]\right) \quad (3.2)$$

โดย N จำนวนเต็มมีค่าไม่น้อยกว่า q , $N-1 \leq q < N$

สำหรับฟังก์ชัน $f(t)$ มี N เป็นอนุพันธ์ต่อเนื่อง สำหรับ $t > 0$ เมื่อ $N-1 \leq q < N$ การแปลง ลاپราซของปริพันธ์และอนุพันธ์อันดับจำนวนเศษส่วน จะได้ดังต่อไปนี้

$$\mathcal{L} \{ {}_a D_t^q f(t) \} = s^q F(s) \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการประมาณค่าละเอียดของ Oustaloup

ในการวิจัยทดลองนี้จะใช้วิธีการประมาณค่าละเอียดของ Oustaloup (Refined Oustaloup's Approximate Realization Method) สำหรับการประมาณค่าอนุพันธ์อันดับจำนวนเศษส่วน (s^α) ที่กำหนดในช่วงความถี่ที่ระบุ (ω_b, ω_h) เพื่อเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนต่อเนื่องที่สมเหตุผล ซึ่งเขียนได้เป็น

$$s^\alpha \approx \left(\frac{d\omega_h}{b} \right)^\alpha \left(\frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1-\alpha)s^2 + b\omega_h s + d\alpha} \right) \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k} \quad (3.4)$$

โดย $\omega'_k = \left(\frac{d\omega_b}{b} \right)^{\frac{\alpha-2k}{2N+1}}, \omega_k = \left(\frac{b\omega_h}{d} \right)^{\frac{\alpha+2k}{2N+1}}, b=10, d=9$

3.3 ตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วน

ตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วน (FOPID) คือ รูปแบบของ PID control ที่อันดับของตัวกระทำ อนุพันธ์ และ ปริพันธ์ เป็นจำนวนเศษส่วน ซึ่ง Oustaloup ได้นำเสนอวิธีการควบคุมกระบวนการไดนามิก (Dynamic) โดยนำเสนอไว้ใน CRONE (Commande Robuste d'Ordre Non Entier) [9] ตัวควบคุม FOPID ได้รับการศึกษา และ นำไปประยุกต์ใช้งานดังตัวอย่าง เช่น Chengbin Ma และ Yoichi Hori ได้นำเสนอผลงาน Design of Robust Fractional Order $PI^\alpha D$ Speed Control for Two-inertia System [11] , F.Merrikh-Bayat และ M. Karimi-Ghartemani ได้นำเสนอผลงาน Method for designing $PI^\alpha D^\mu$ stabilizers for minimum-phase fractional-order systems [12] , Y. Luo, H. Chao, L. Di และ Y. Q. Chen ได้นำเสนอผลงาน Lateral directional fractional order PI^α control of a small fixed-wing unmanned aerial vehicles [13] , K. Erenturk ได้นำเสนอ Fractional-Order & Active Disturbance Rejection Control of Nonlinear Two-Mass Drive System [7] , Aleksei Tepljakov, Eduard Petlenkov และ Juri Belikov ได้ศึกษาและพัฒนา MATLAB Toolbox ที่ช่วยในการศึกษาเรื่อง Fractional order สำหรับการวัดและควบคุมกระบวนการ ใน FOMCON: a MATLAB Toolbox for Fractional-order System Identification and Control [2]

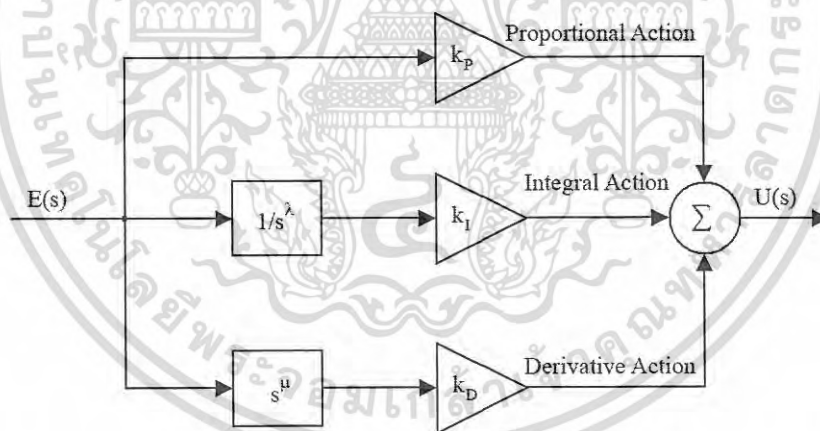
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วน

ตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วน เป็นตัวควบคุมที่เกี่ยวข้องกับ ตัวกระทำปริพันธ์ อันดับ λ และ ตัวกระทำอนุพันธ์ อันดับ μ ฟังก์ชันการถ่ายโอนข้อมูลของตัวควบคุมสามารถแสดง ได้ดังนี้

$$G_{FOPID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + k_I \frac{1}{s^\lambda} + k_D s^\mu, \quad (\lambda, \mu > 0) \quad (3.5)$$

โดย $G_{FOPID}(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม
 $E(s)$ คือ ค่าผิดพลาด
 $U(s)$ คือ ค่าเอาต์พุตของระบบ
 λ, μ คือ จำนวนจริง



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างของตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วน

จากรูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพบล็อกของตัวควบคุมอันดับจำนวนเศษส่วน ซึ่งตัวควบคุมที่ได้ ออกแบบ วิเคราะห์ในโดเมนความถี่ แสดงไว้โดยแผนภาพโบทในรูปที่ 5.1 จุดเด่นของตัวควบคุม อันดับเศษส่วนคือสมรรถนะการควบคุมระบบเชิงพลวัต (Dynamic) นอกจากนี้ยังมีความทนทานใน การรับมือกับการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่ควบคุม

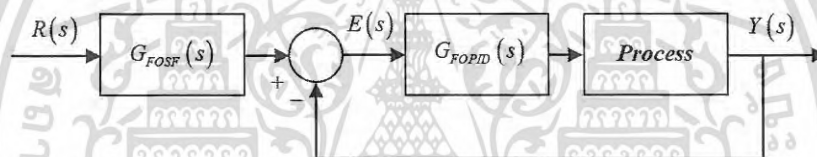
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน

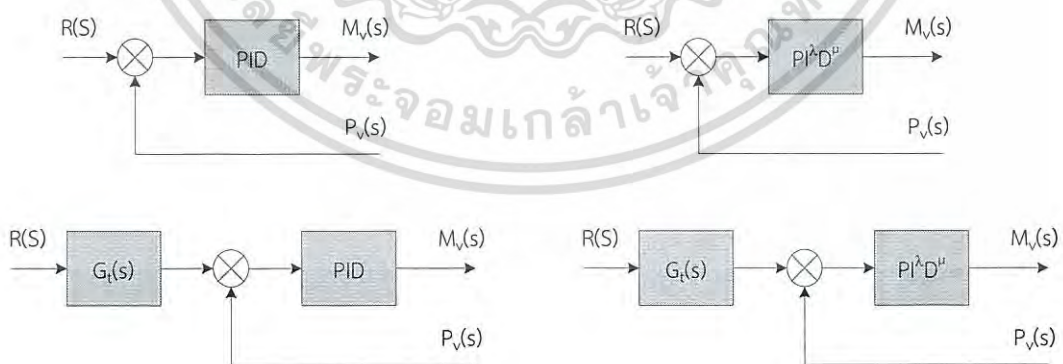
ตัวกรองค่าที่ต้องการควบคุม (Set-Point Filter) ของตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน แสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งตัวควบคุมประกอบด้วยตัวชดเชย (Compensator) 2 ตัว และ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม Set-Point Filter ที่ทำการออกแบบ ได้จากฟังก์ชันการถ่ายโอน ที่แสดงไว้ดังสมการ (3.6)

$$G_{FOSF}(s) = \frac{(1-\beta)(k_d/k_i)s^\mu + (1-\alpha)(k_p/k_i)s^\lambda}{1 + (k_p/k_i)s^\lambda + (k_d/k_i)s^\mu} \tag{3.6}$$

โดย $\lambda, \mu > 0, \beta = 0.7555, \alpha = 2.1217$



รูปที่ 3.2 โครงสร้าง Set-Point Filter ของตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างลักษณะโครงสร้างระบบควบคุมแบบอันดับจำนวนเต็มและแบบเศษส่วน

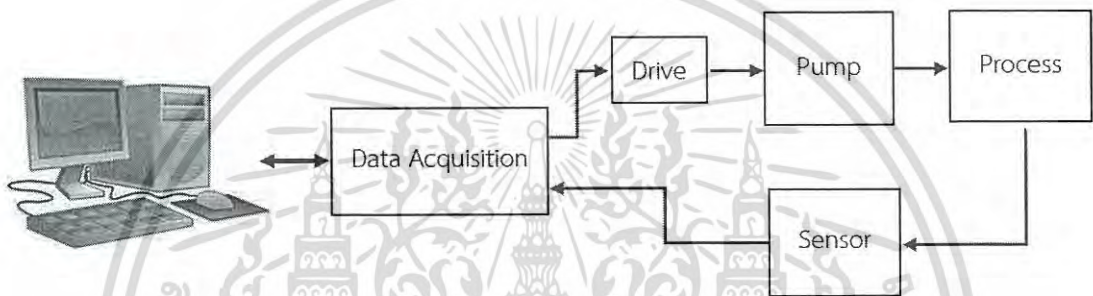
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

องค์ประกอบกระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

4.1 กระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

กระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันในการทำวิจัยทดลองนี้ มีโครงสร้างองค์ประกอบตามรูปที่ 4.1 โดยมีส่วนประกอบคือ



รูปที่ 4.1 องค์ประกอบของกระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน

4.1.1 กระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน (Process)

คือ ตัวกระบวนการระดับน้ำ 2 ถัง ที่จะเข้าทำการควบคุม

4.1.2 ชุดขับปั๊มน้ำ (Drive)

คือ ชุดขับปั๊มน้ำที่จะควบคุมการทำงานของปั๊มให้สูบน้ำมากน้อยตามที่ต้องการ

4.1.3 มอเตอร์ปั๊มน้ำ (Pump)

คือ ปั๊มน้ำที่ทำหน้าที่สูบน้ำเข้าสู่อุปกรณ์และเป็นตัว Actuator ของระบบ

4.1.4 เซนเซอร์ (Sensor)

คือ ตัวตรวจวัดระดับน้ำที่อยู่ใต้น้ำเพื่อป้อนข้อมูลกลับมายังตัวควบคุม

4.1.5 อุปกรณ์ Data Acquisition

คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับระบบที่ทำการทดลอง

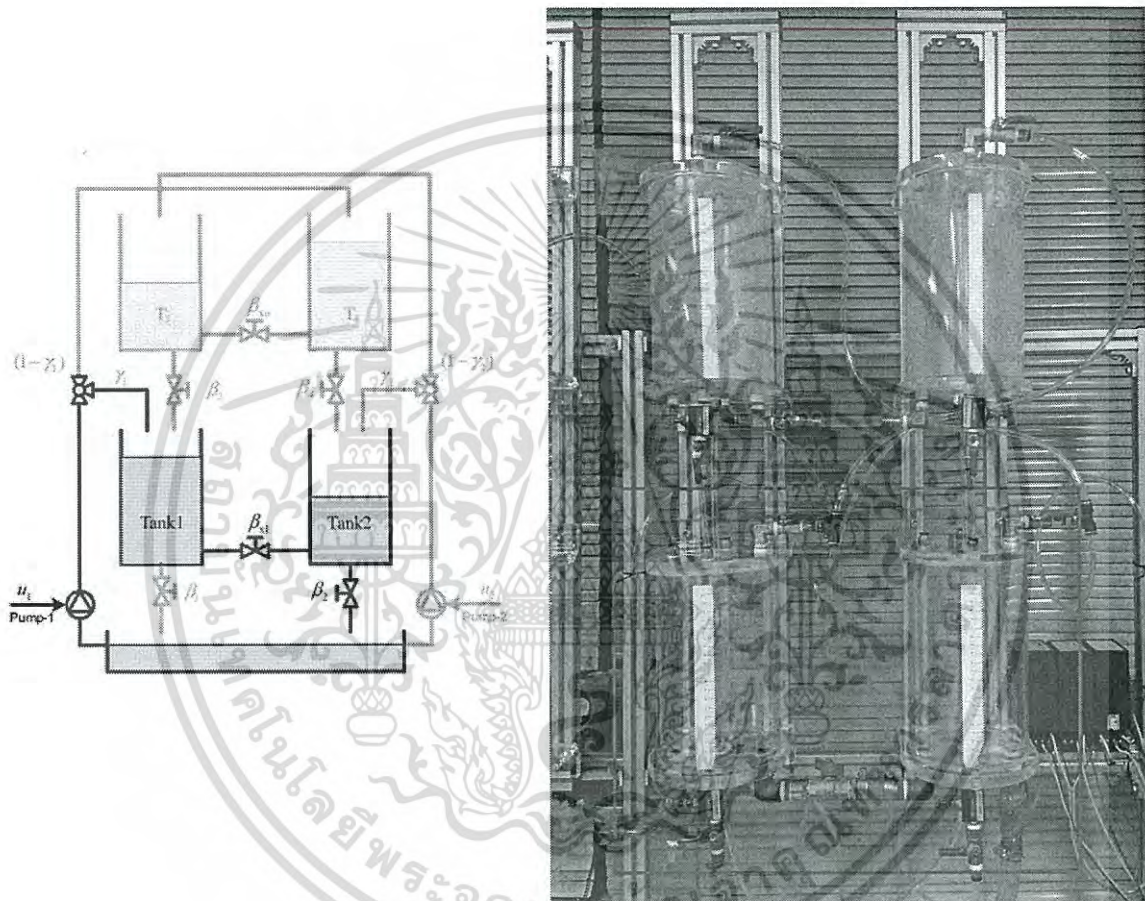
4.1.6 คอมพิวเตอร์

คือ คอมพิวเตอร์ที่ลงโปรแกรม MATLAB ที่ใช้ออกแบบและทำตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ส่วนประกอบของกระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน (Process)

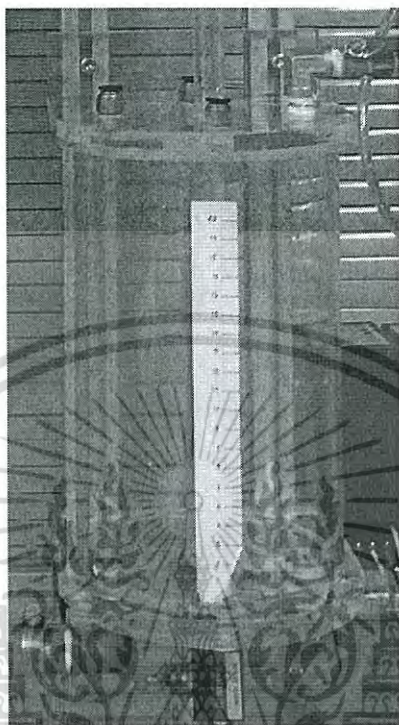
เนื่องด้วยกระบวนการระดับน้ำสองถังใช้ในการวิจัยทดลองในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นงานวิจัยที่ศึกษาพัฒนาอยู่ในกลุ่มของกระบวนการระดับน้ำ จึงใช้ส่วนประกอบที่อยู่ในชุดกระบวนการระดับน้ำ 4 ถังที่มีอยู่แล้วเดิม โดยทำการเลือกใช้เฉพาะ 2 ถังในส่วนล่าง และทำการกำหนดเป็นเงื่อนไขให้มีผลต่อกัน โดยมีวาล์วระหว่างถังเป็นตัวที่ทำให้เป็นเงื่อนไขมีผลต่อกัน (Interacting)



รูปที่ 4.2 แผนผังการใช้งานถังน้ำสองถัง และกระบวนการถังน้ำสองถังจริง

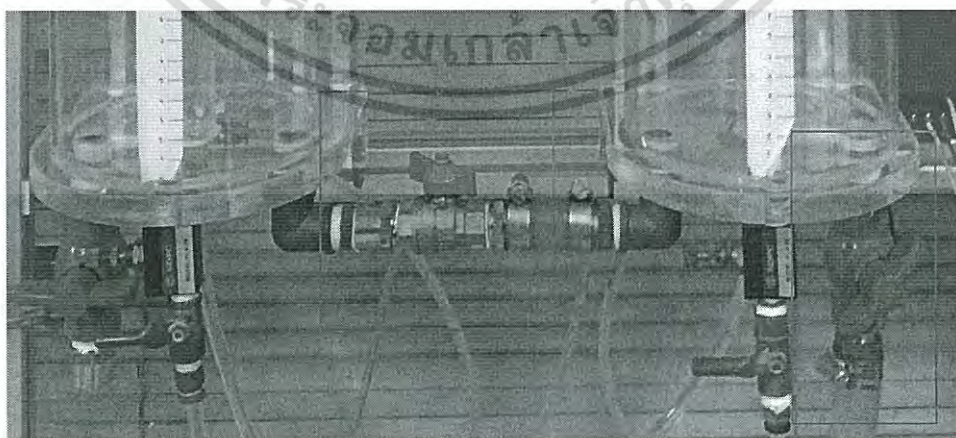
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 ถังน้ำ ประกอบด้วยถังน้ำทำจาก อะคริลิกใส จำนวน 2 ถัง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร ความสูงโดยประมาณ 24 เซนติเมตร และระดับน้ำที่ทำการควบคุมอยู่ในย่านความสูง 0 – 20 เซนติเมตร



รูปที่ 4.3 ถังน้ำอะคริลิก

4.2.2 วาล์ว ประกอบด้วยวาล์ว 2 ตัว วาล์วที่เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างถังทั้งสองที่ทำให้เกิดเป็นเงื่อนไขระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน (Interacting) และ วาล์วทางออกอีก 1 ตัว

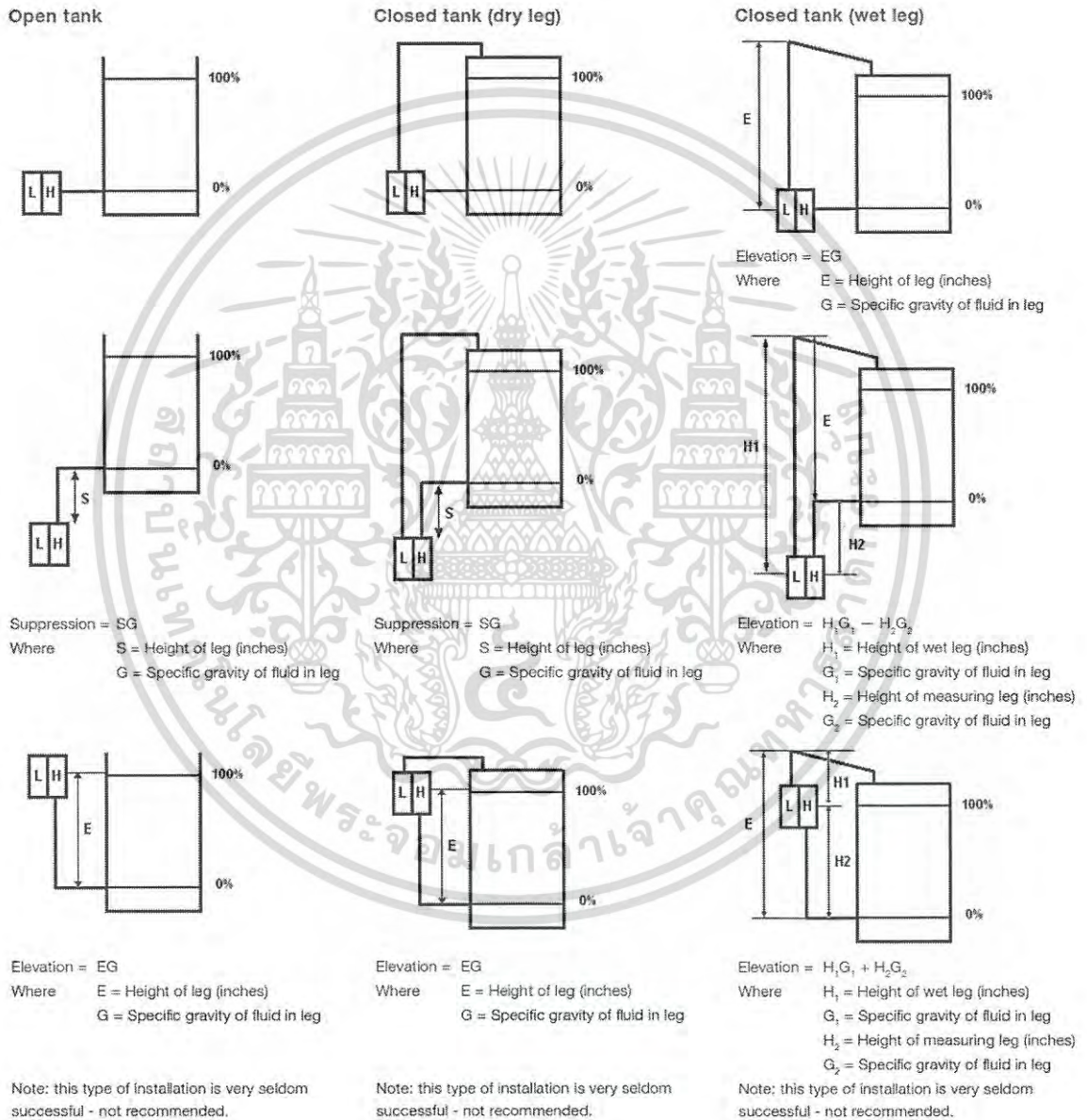


รูปที่ 4.4 วาล์วที่เชื่อมต่อระหว่างถัง และ วาล์วทางออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ระบบการวัดระดับด้วยวิธีการวัดความดันแตกต่างสำหรับถังเปิด

การวัดระดับมีวิธีการและเครื่องมือวัดหลายแบบ การวัดความดันแตกต่างก็เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก โดยสามารถแยกได้เป็นการวัดสำหรับถังปิด และ ถังเปิด เนื่องจากลักษณะถังเป็นแบบเปิด กระบวนการวัดระดับในวิทยานิพนธ์นี้ จึงเลือกเป็นแบบการวัดระดับโดยใช้หลักการวัดความดันแตกต่างแบบถังเปิด



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการวัดและติดตั้งเครื่องมือวัดความดันแตกต่างสำหรับถังปิด และ ถังเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ความดัน

ความดัน คือ แรงกระทำต่อพื้นที่

$$p = \frac{F}{A} \tag{4.1}$$

โดย F คือ แรงกระทำซึ่งอาจเกิดจากของแข็ง ของเหลว

หรือก๊าซ มีหน่วยมาตรฐาน เป็น Newton : N

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ถูกแรงกระทำ หน่วยมาตรฐานเป็น ตารางเมตร



รูปที่ 4.6 ความรู้พื้นฐานเรื่องความดัน

ความดันที่เกิดจากของเหลว (Liquid Pressure)

$$p = \rho gh \tag{4.2}$$

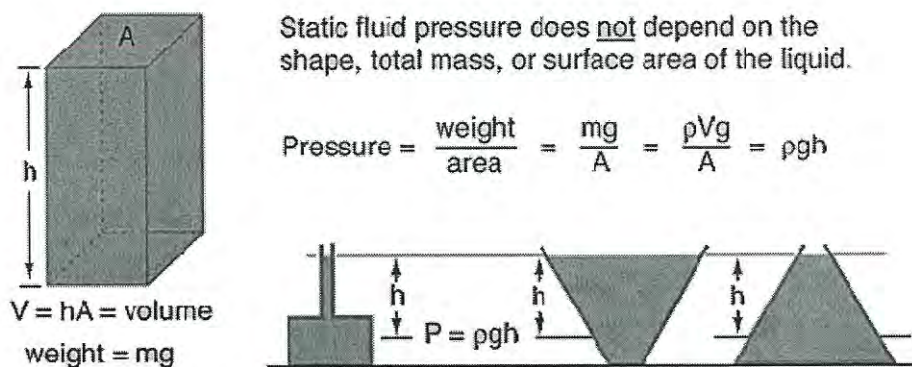
โดย p คือ ความดัน (N/m^2) ซึ่งเป็น Static Head

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

h คือ ความสูงของของเหลว (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ความดันที่เกิดจากของเหลว (Liquid Pressure)

ความดันที่เกิดจากก๊าซ หรือ ความดันอากาศ (Gas Pressure)

$$p = \frac{1}{3}nmv^3$$

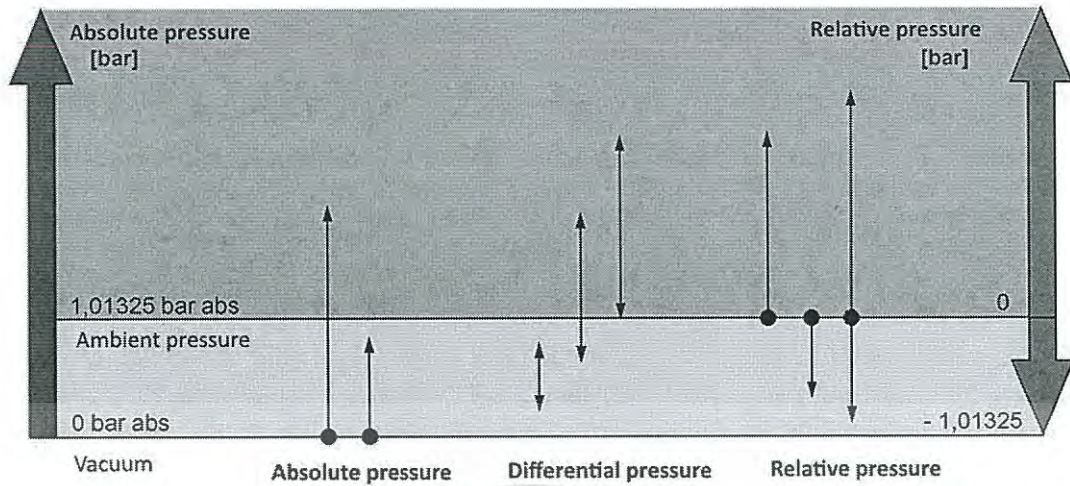
(4.3)

โดย p คือ ความดัน (N/m^2) n คือ จำนวนโมเลกุลของก๊าซใน 1 m^3 m คือ มวลโมเลกุลของก๊าซ (kg) v คือ ความเร็วเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ของโมเลกุลก๊าซ (m/s)

ประเภทของความดัน (Types of Pressure) มี 4 ประเภท คือ

- 4.3.1.1 ความดันเกจ (Gauge Pressure)
- 4.3.1.2 ความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure)
- 4.3.1.3 ความดันแตกต่าง (Differential Pressure)
- 4.3.1.4 สภาวะสุญญากาศ (Vacuum Pressure)

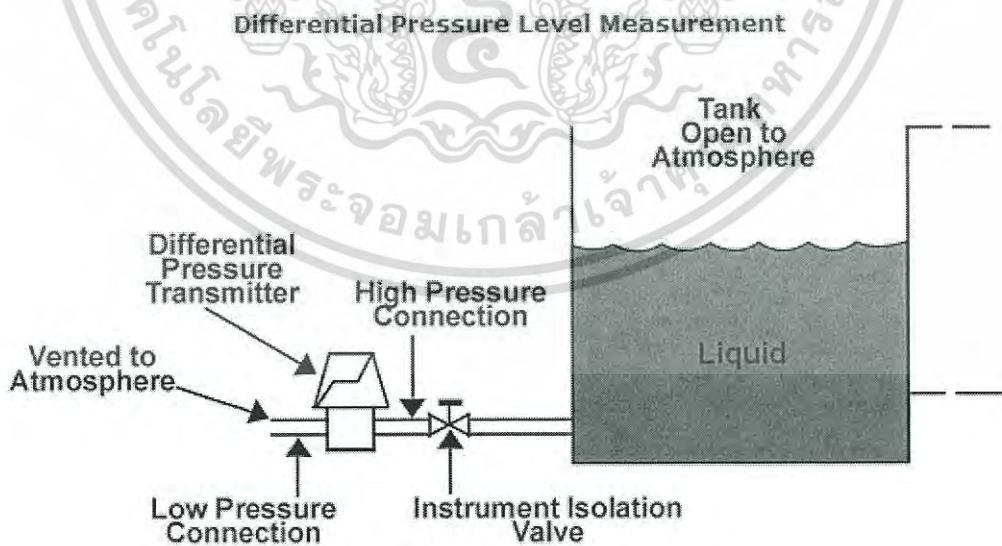
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ประเภทของความดัน

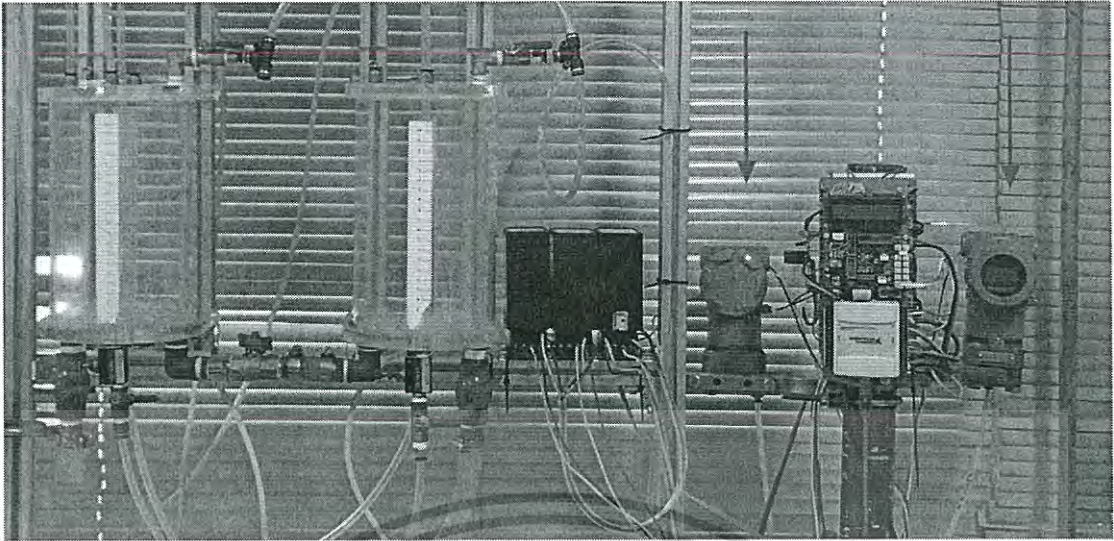
4.3.2 การวัดระดับด้วยวิธีวัดความดันแตกต่าง

วิธีการวัดความดันแตกต่างที่นำมาใช้ เป็นหลักการวัดที่อาศัยหาความแตกต่างระหว่างความดันที่เกิดขึ้นในระบบแบบถังเปิด เปรียบเทียบกับความดันบรรยากาศ (P_{atm}) ณ บริเวณนั้น นั่นก็คือ ความดันแตกต่างที่เกิดจากน้ำหนักของน้ำรวมกับความดันที่อยู่เหนือระดับน้ำกดลงที่บริเวณกันถึงเทียบกับ ความดันบรรยากาศ ณ บริเวณกันถึงนั้น จึงได้ความดันแตกต่างเพื่อคำนวณหาระดับต่อไป



รูปที่ 4.9 รูปแบบการวัดด้วย Diff. Pressure Transmitter สำหรับถังเปิดที่ใช้ในการวิจัยทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 Differential Pressure Transmitter ที่ใช้ในการวัดระดับในการวิจัยทดลอง

สมการพื้นฐานสำหรับการหาความดันแตกต่างสำหรับถังเปิด แสดงในสมการที่ (4.4)

$$\Delta p = p_{high} - p_{low} \quad (4.4)$$

โดย $p_{low} = p_{atm}$ และ $p_{high} = p_{atm} + \rho gh$

p_{low} คือ ค่า Pressure ด้าน Low ของ Diff. Pressure Transmitter

p_{high} คือ ค่า Pressure ด้าน High ของ Diff. Pressure Transmitter

p_{atm} คือ ค่าความดันบรรยากาศ ณ บริเวณนั้น

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

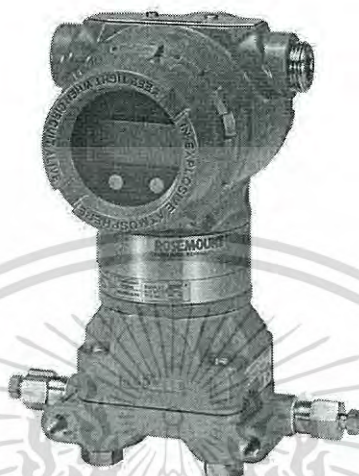
g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

h คือ ความสูงของของเหลว (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 เครื่องมือวัดความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter)

เครื่องมือวัดความดันแตกต่าง (Differential Pressure Transmitter) ที่ใช้เป็นของ Rosemount รุ่น 3051CD โดยมีคุณสมบัติของอุปกรณ์ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.11 เครื่องมือวัดความดันแตกต่างของ Rosemount รุ่น 3051CD

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดความดันแตกต่าง Rosemount รุ่น 3051CD

Measurement Type	Differential, Gage, Absolute
Accuracy	$\pm 0.04\%$ of span
Stability	$\pm 0.2\%$ of URL for 10 years
Warranty	Up to 5-year limited warranty
Range down	150:1
Communication Protocol	4-20 mA HART, WirelessHART, FOUNDATION fieldbus, Profibus, 1-5 V Low Power HART
Measurement Range	Up to 2000psi (137,89 bar) Differential, Up to 2000psig (137,89 bar) Gage, Up to 4000psia (275,79 bar) Absolute
Process Wetted Material	316L SST, Alloy C-276, Alloy 400, Tantalum, Gold-plated Alloy 400, Gold-plated 316L SST
Diagnostics	Basic Diagnostics, Power Advisory Diagnostics
Certifications/Approvals	SIL 2/3 certified to IEC 61508 by an independent 3rd party, NSF, NACE, hazardous location, see full specs for complete list of certifications

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในองค์กรของคุณเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชนโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับตั้งช่วงการวัด ในการทำระบบการวัดระดับ ต้องทำการตั้งค่า 0 และ Span (ช่วงการวัด) ของทรานสมิตเตอร์ เพื่อทำการตั้งค่าย่านการวัดให้เป็นไปตามที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องทำการตั้งค่า 0 และค่า Span (ช่วงการวัด) ให้ถูกต้อง ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่เลือกทำนี้เพื่อเป็นการเจาะจงอย่างชัดเจน และปรับเทียบช่วงการวัดตามจุดวัดจริงที่ต้องการ

วิธีการปรับตั้งค่า 0 สำหรับ Rosemount รุ่น 3051CD โดยการทำให้ระดับของกระบวนการที่ต้องการวัดอยู่ที่จุดต่ำสุดตามที่ต้องการ จากนั้นกดปุ่ม Zero Adjustment บนตัวอุปกรณ์ค้างไว้ 2 วินาที หน้าจอแสดงผลคำว่า Pass หมายถึงปรับตั้ง 0 ที่ตำแหน่งการวัดระดับต่ำสุดตามที่ต้องการสำเร็จ (Output 4 mA)

วิธีการปรับตั้งค่า Span สำหรับ Rosemount รุ่น 3051CD ทำลักษณะเช่นเดียวกับการตั้ง 0 โดยการทำให้ระดับของกระบวนการที่ต้องการวัดอยู่ที่จุดสูงสุดตามที่ต้องการ จากนั้นกดปุ่ม Span Adjustment บนตัวอุปกรณ์ค้างไว้ 2 วินาที หน้าจอแสดงผลคำว่า Pass หมายถึงปรับตั้งค่าช่วงการวัด Span ที่ตำแหน่งที่การวัดระดับสูงสุด ตามที่ต้องการสำเร็จ (Output 20 mA)



A. Span and zero adjustment buttons

รูปที่ 4.12 แสดงตำแหน่งปุ่มเพื่อปรับ 0 และ Span ของ Rosemount รุ่น 3051CD

4.3.4 Current Loop Power and Signal Converter

เป็นอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งจ่ายทำให้เครื่องมือวัดความดันแตกต่างทำงานได้ และสามารถรับส่งระดับสัญญาณอนาล็อกอินพุต/เอาต์พุตมาตรฐาน 4-20 mA / 0 -10 V ไปยังอุปกรณ์ที่ต่อกันได้



รูปที่ 4.13 Current Loop Power และ Signal Converter

4.4 มอเตอร์ปั๊มน้ำ และการขับมอเตอร์ปั๊มน้ำ

มอเตอร์ปั๊มน้ำและการขับมอเตอร์ปั๊มน้ำ ก็คือส่วนที่ใช้ควบคุมการสูบน้ำของปั๊มน้ำที่จะป้อนเป็นอินพุตเข้าสู่กระบวนการ โดยใช้การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ปั๊มเพื่อให้สามารถควบคุมปริมาณน้ำที่จะสูบเข้าไปในระบบเพื่อเลี้ยงระดับน้ำให้เข้าสู่ค่าเป้าหมาย (Set-Point) ตามที่ต้องการควบคุม ซึ่งมีส่วนประกอบคือ มอเตอร์ปั๊มน้ำ , วงจรขับปั๊มน้ำ , แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ , เพาเวอร์ซัพพลาย รายละเอียดดังนี้

4.4.1 มอเตอร์ปั๊มน้ำ

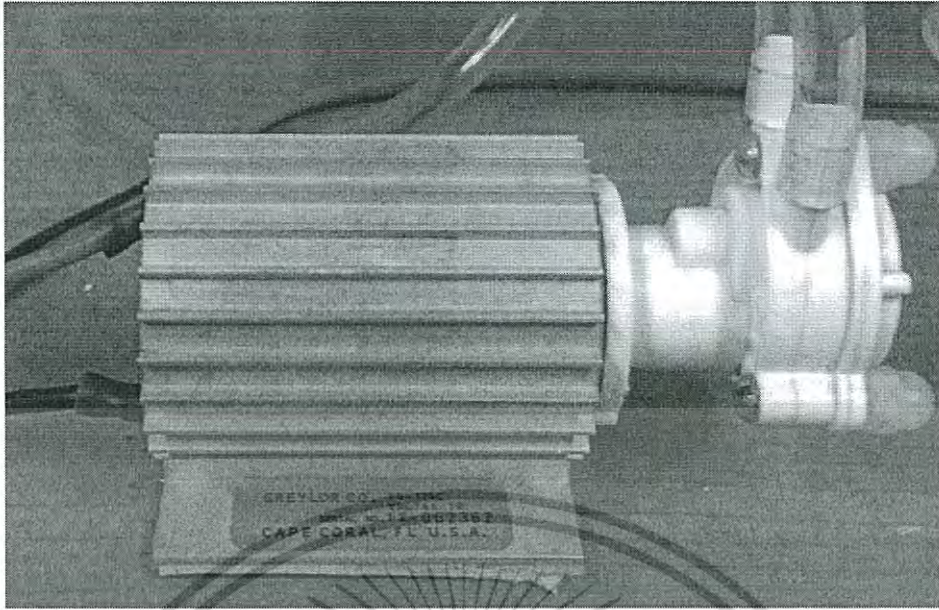
มอเตอร์ปั๊มน้ำที่ใช้เป็นดีซีมอเตอร์ แบบ Gear Pump ของ Greylor รุ่น pq-12 dc

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลทางเทคนิคของดีซีมอเตอร์ปั๊ม Geylor รุ่น pq-12 dc

Inlet Requirements	Flooded inlet
Fluid Types	Mobile and/or Non-abrasive
Dry Run Capability	no
Submersible?	no
Maximum Pressure	20 PSIG (or 12 PSIG with optional AC adapter)
Maximum Flow Rate	2200 ml per min
Fluid Temp. Supported	Maximum of 180 degrees F
Mounting Requirements	Horizontal orientation
Primary Power Source	12V or 24V Brush DC motor
Alternate Power Source	Two AC to DC converters are available. <ul style="list-style-type: none"> • Single Speed Power Pack 1 (generates 9V DC) • Variable Speed Power Pack 2 (generates 3, 4.5, 6, 7.5, 9 or 12V DC) Both are listed in the section below titled <i>Additional Parts for Purchase</i>
Variable Flow Rate?	Enabled with the Variable Speed Power Pack 2
Dimensions (in inches)	1.5W x 3.5D x 2.0H
Weight	10 oz.
Inlet/Outlet Fitting Dia.	$\frac{3}{16}$ inch MHB (male hose barb)
Other Features	Materials that come into contact with the pumped liquid are <ul style="list-style-type: none"> • Molded Delrin pump body • Delrin gears • Stainless steel motor shaft • Teflon diaphragm • Elastomer lip seal Elastomer lip seals come in Buna-N, AFLAS, EPDM, and Viton. Gears available in HDPE for corrosive chemicals. UL Certified Available in none, 2-holes, and 4-holes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 มอเตอร์ปั๊มน้ำ

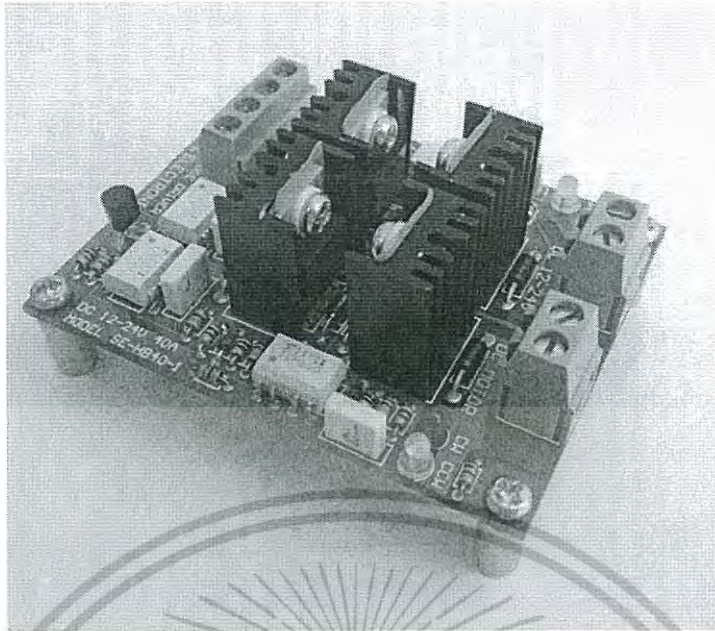
ตารางที่ 4.3 ข้อมูล Pump Performance Data

PQ-12 DC Pump Performance Data				
Total PSI	FT of Water	OZ/Min	ML/Min	AMPs
0	0	78	2200	1.5
5	12	75	2100	1.6
10	23	63	1750	1.8
15	35	45	1250	1.9
20	46	13	350	2.0

4.4.2 แผงวงจรขับมอเตอร์ปั๊ม

ชุดแผงวงจรที่เลือกใช้ในการขับมอเตอร์ปั๊ม เป็นวงจรแบบ H-Bridge รุ่น SE-HB40-1 โดยเลือกการทำงานอยู่ในโหมดควบคุมความเร็ว (Speed Control) โดยใช้สัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) ที่แปรผันตรงกับสัญญาณควบคุมที่ได้รับมาในการขับให้มอเตอร์ปั๊มทำงานสูบช้าเร็วเป็นไปตามสัญญาณควบคุมที่ได้รับจากตัวควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

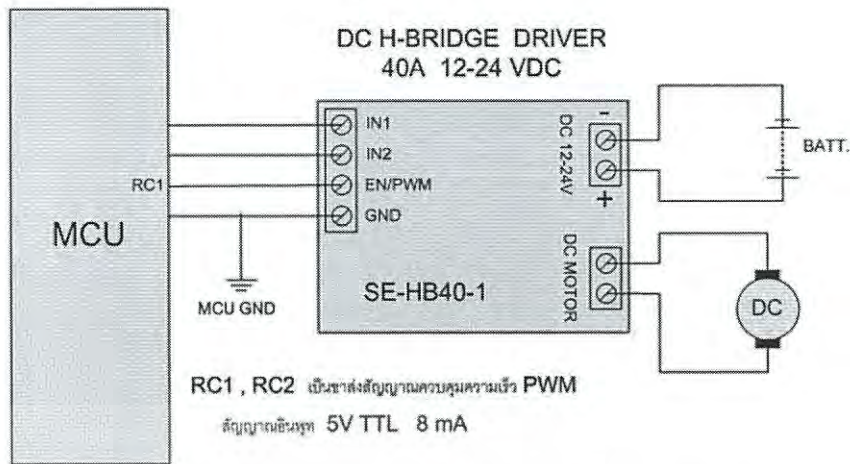


รูปที่ 4.15 แผงวงจรขับมอเตอร์ดีซี H-Bridge รุ่น SE-HB40-1

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลทางเทคนิคของแผงวงจรขับมอเตอร์ดีซี

Input :	<ul style="list-style-type: none"> - Full Opto-isolated input interface signals - 5V 8 mA TTL – Level
Output :	<ul style="list-style-type: none"> - Motor DC Supply 12-24 V 40A (Max.) - Full-Complementary Power MOSFET Driver With ultra-fast reverse recovery protection diodes
Drive Mode :	<ul style="list-style-type: none"> - ON – OFF Control - Direction Control - Speed Control (PWM Drives)
PWM Frequency :	400 Hz - 1000 Hz (800 Hz Recommend)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงวิธีการต่อใช้งานแผงวงจรขับมอเตอร์ดีซี

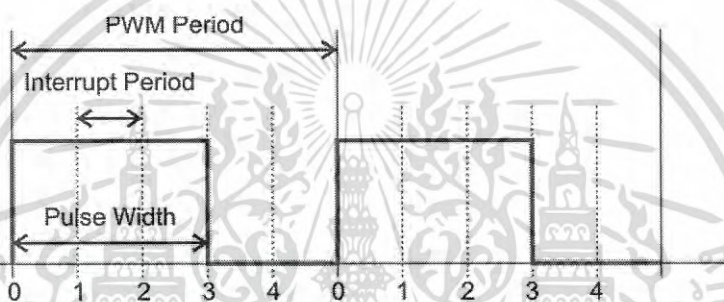
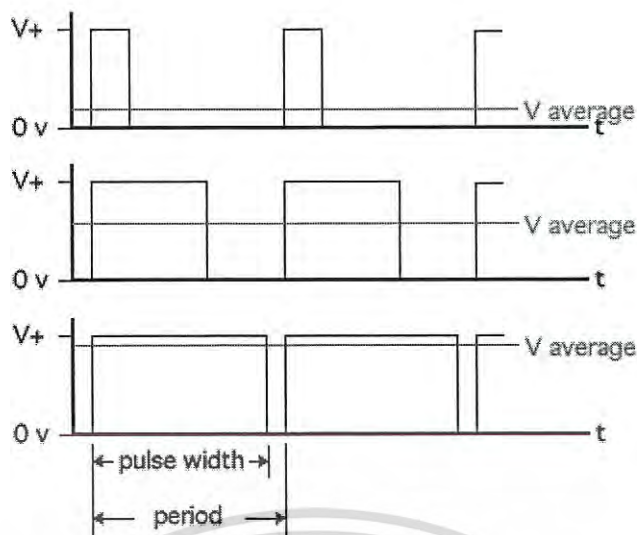
ตารางที่ 4.5 แสดงโหมดการตั้งค่า การควบคุมทิศทาง ของวงจรถับมอเตอร์

EN/PWM	IN1	IN2	การทำงานของมอเตอร์
0V	X	X	Free Run Stop (หยุดเมื่อหมดแรงเฉื่อย)
5V	0V	5V	หมุนเดินหน้า
5V	5V	0V	หมุนกลับทาง
5V	5V	5V	Fast Stop หรือ Brake
5V	0V	0V	

4.4.3 Pulse Width Modulation (PWM)

PWM เป็นเทคนิคในการจ่ายเอาต์พุต แบบรักษาระดับแรงดันคงที่ไว้ (Amplitude) แต่ทำการเปิดปิดตัวพัลส์ของสัญญาณ ให้มีจังหวะความถี่มากน้อยตามที่ต้องการ จึงทำให้เกิดสภาวะการที่ได้แรงดันเฉลี่ยเพิ่มขึ้นหรือลดลง เทคนิค PWM คือการกำหนดความกว้างและความถี่ของคลื่นสัญญาณ ในส่วนความกว้างของคลื่นทำการปรับเปลี่ยนความกว้างของลูกคลื่นในแต่ละคาบ โดยถ้าลูกคลื่นกว้างน้อยก็จะทำให้แรงดันเฉลี่ยที่ออกมาค่าน้อย และถ้าลูกคลื่นกว้างมากแรงดันเฉลี่ยก็จะมีค่ามากขึ้น จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นแรงดันเฉลี่ย ที่มีค่าสูงหรือต่ำนั้นแปรเปลี่ยนตามความกว้างของลูกคลื่น ซึ่งความกว้างของลูกคลื่นนี้เรียกว่า pulse width

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

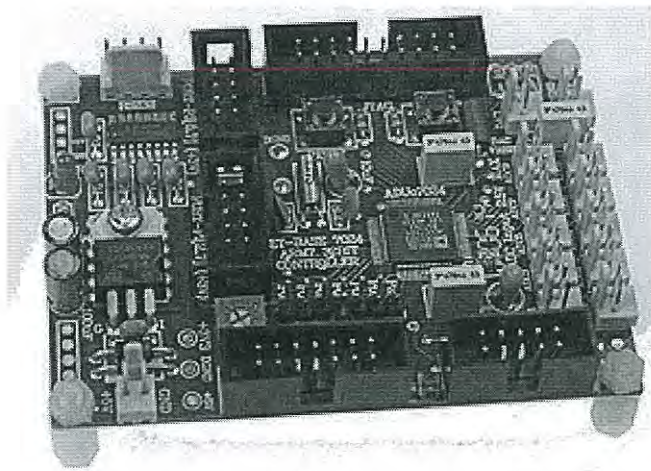


รูปที่ 4.17 แสดงลักษณะรูปคลื่นของ PWM

4.4.4 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ในการวิจัยทดลองนี้ ทำหน้าที่รับอินพุตที่ได้จากอุปกรณ์ Data Acquisition แล้วทำการแปลงเป็นสัญญาณ PWM ที่เป็นสัดส่วนแปรผันตรงกับสัญญาณควบคุมที่ได้รับมา เพื่อที่จะป้อนให้กับแผงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ดีซีทำการขับเคลื่อนปั๊มเพื่อสูบน้ำตามปริมาณที่สั่งควบคุม แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นรุ่น ET-BASE ARM7024 ซึ่งเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล ARM7 เบอร์ ADUC7024 ของบริษัท ANALOG DEVICE

โดยที่ผู้วิจัยจะต้องทำการเขียนโปรแกรมควบคุม (Firmware) ใส่เข้าไปในตัวคอนโทรลเลอร์ เพื่อสั่งการให้ตัวแผงวงจรคอนโทรลเลอร์นี้ทำการอ่านค่าสัญญาณที่ได้รับจากอุปกรณ์ USB-6008 DAQ แล้วทำการแปลงเป็นสัญญาณเอาต์พุตที่เป็น PWM เพื่อไปขับแผงวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ดีซีในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ซึ่งส่งผลในการสูบน้ำได้มากน้อยตามที่ต้องการ



รูปที่ 4.18 แผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-BASE ARM7024

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลทางเทคนิคของแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-BASE ARM7024

MCU	ใช้ MCU เบอร์ ADUC7024 ขนาด 64 PIN LQFP TYPE มีหน่วยความจำแบบ FLASH 62KBYTE, RAM 8KBYTE
A to D	A TO D ขนาด 12 BIT 10 ช่อง (0 - 2.5V)
D to A	D TO A ขนาด 12 BIT 2 ช่อง (0 - 2.5V)
I/O pin voltage	I/O PIN สามารถต่อกับ I/O ระดับสัญญาณ 5V ได้
Clock	RUN X' TAL 32.768KHz สามารถกำหนดการทำงานร่วมกับ PHASE LOCK LOOP ให้สามารถทำงานได้ถึง 41.78MHz ได้
PORT	3 PORT I/O 10PIN ET
RS232	จำนวน 1 ช่อง
Programing	20 PIN ขั้วต่อ ARM - JTAG
Display port	14 PIN LCD PORT แบบ CHARACTER TYPE
Functions	TIMER/COUNTER , SPI , 16 BIT PWM , WATCHDOG
Power Supply	ใช้ POWER SUPPLY 5VDC
ขนาด	PCB 6.2 x 8.1 cm.
อื่น ๆ	สามารถ DOWNLOAD โปรแกรมเข้าหน่วยความจำภายในแบบ FLASH ได้ โดยตรงจากเครื่องคอมพิวเตอร์ พีซี ผ่านทาง RS232 PORT ร่วมกับโปรแกรม ARMWSD ทำงานได้บน WINDOWS 98/ME/XP/2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 การเขียนโปรแกรมลงในไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการเขียนโปรแกรมควบคุมเพื่อฝังตัวโปรแกรมลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถพัฒนาได้โดยใช้คอมไพเลอร์หรือภาษาสำหรับการเขียนโปรแกรมได้หลายภาษา ซึ่งภาษาซี ก็เป็นที่รู้จักและใช้งานกันแพร่หลาย ในส่วนแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-BASE ARM7024 ทางผู้ผลิตจำหน่าย ได้แนะนำโปรแกรม Keil uVision3 เพื่อใช้งาน

วิธีการใช้งาน โปรแกรม Keil uVision3 เพื่อเขียนโปรแกรม ขั้นตอนดังนี้

4.4.5.1 การใช้งานโปรแกรม Keil uVision3

เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมาจะพบหน้าต่างใช้งานดังรูปที่ 4.19

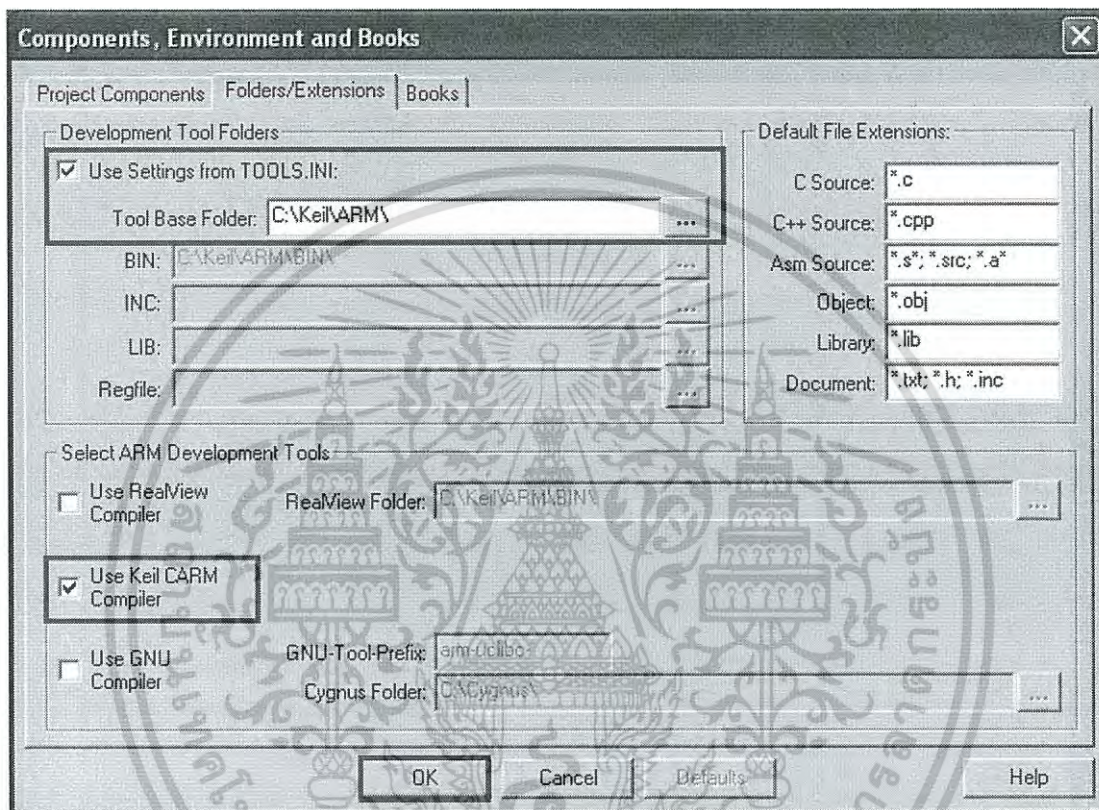


รูปที่ 4.19 หน้าต่างโปรแกรม Keil uVision3 เมื่อเปิดใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5.2 การกำหนดค่าตัวเลือกในการแปลคำสั่งของโปรแกรม Keil uVision3

ทำการกำหนดตัวเลือกในการแปลคำสั่งของ uVision3 ไปที่เมนู คำสั่ง Project
 → Components... และใส่ค่าดังรูปที่ 4.20 และกำหนดตำแหน่ง Folder สำหรับเก็บค่าตัวเลือก
 การทำงานของโปรแกรม ค่าเริ่มต้นคือ "C:\Keil\ARM\"

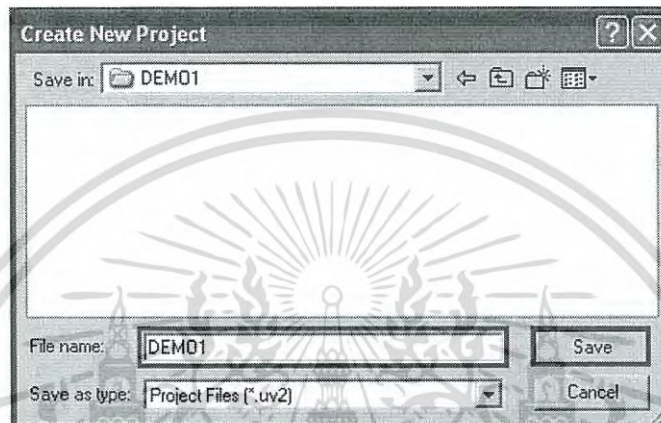


รูปที่ 4.20 หน้าต่างโปรแกรมตรงส่วนกำหนดค่าของโปรแกรม Keil uVision3

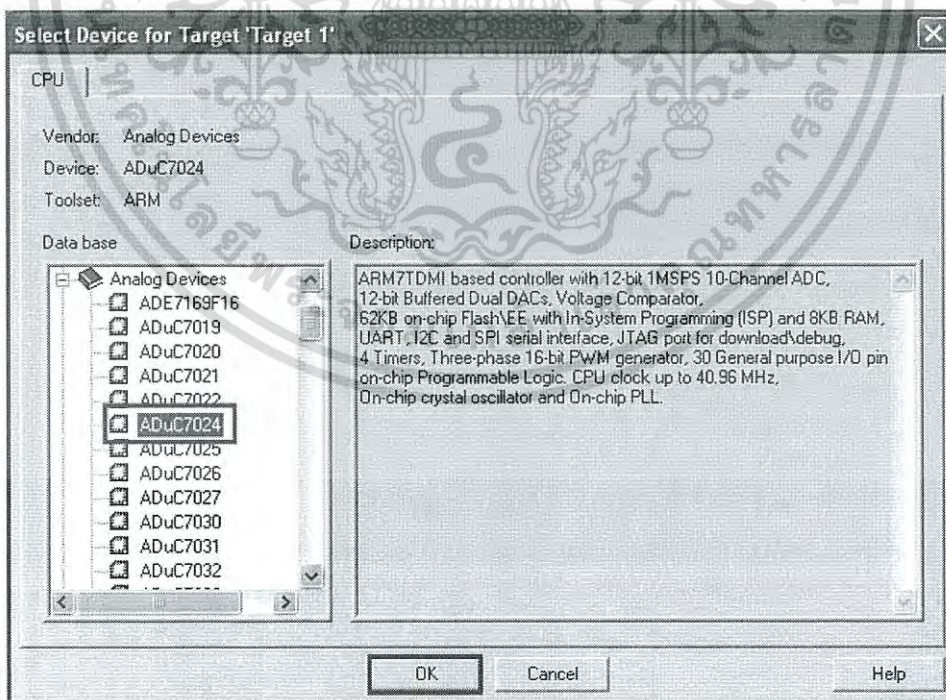
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5.3 การสร้างโปรเจคไฟล์

สร้างไฟล์โปรเจคขึ้นมาใหม่ โดยเลือก Project → New Project แล้วเลือกที่จัดเก็บไฟล์ได้ตามต้องการ แล้วทำการบันทึก (save) หลังจากนั้นโปรแกรมจะให้เลือกเบอร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ดังตัวอย่าง รูปที่ 4.22 ต่อจากนั้น ให้ทำการ copy ไฟล์ “Startup.s” ไปเก็บไว้ในโฟลเดอร์โปรเจคที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.21 ตัวอย่างหน้าต่างการสร้างโปรเจคไฟล์

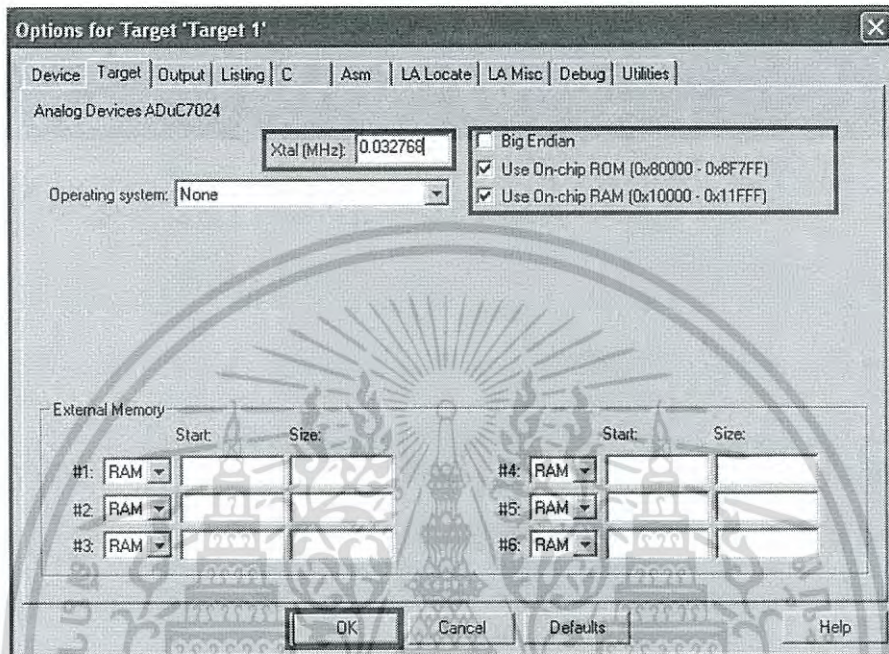


รูปที่ 4.22 การเลือกเบอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ตามต้องการ

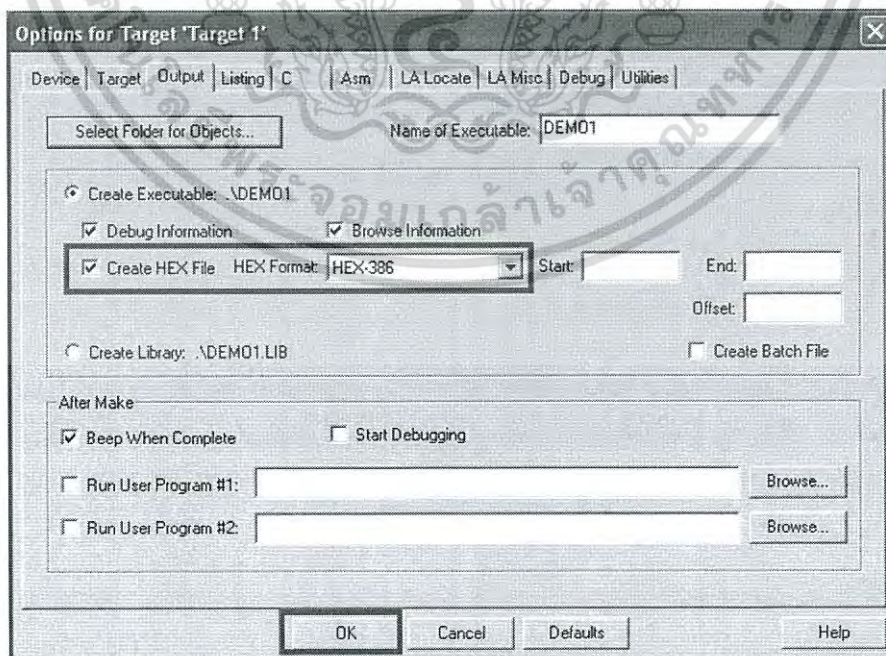
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5.4 การกำหนดค่าออฟชั่นของโปรเจคไฟล์

ให้ทำการกำหนดค่าออฟชั่นของโปรเจค เพื่อเป็นค่าเริ่มต้น ตามตัวอย่างดังรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 ซึ่งเป็นค่าตั้งต้นสำหรับบอร์ด ADuC7024 ที่ใช้งาน



รูปที่ 4.23 การกำหนดค่าเริ่มต้นของหน้า Target

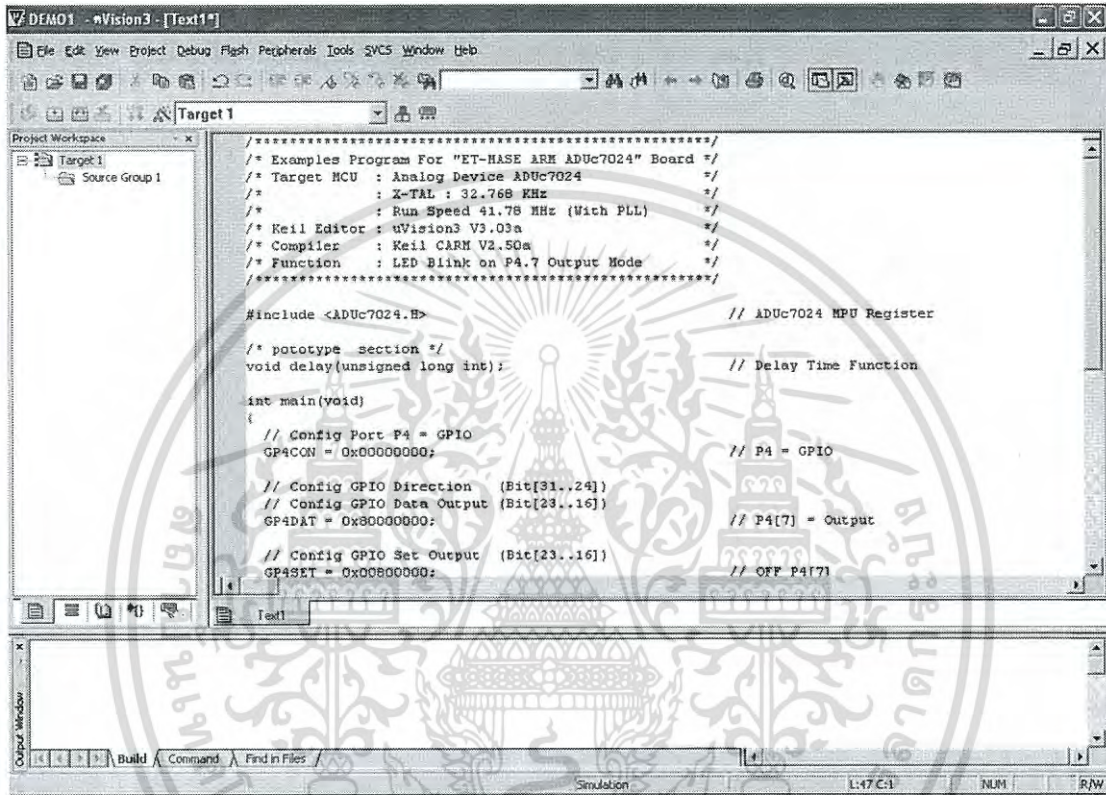


รูปที่ 4.24 การกำหนดค่าเริ่มต้นของหน้า Output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5.4 การเขียนโปรแกรม Source Code

เมื่อกำหนดค่าต่าง ๆ แล้ว ก็เปิดไฟล์ สำหรับเขียน Source Code โดยเลือกไปที่ File → New แล้วเมื่อเขียน Source Code เสร็จ ให้เลือก save เป็นไฟล์นามสกุล .c โดยมากนิยม save เป็นไฟล์ชื่อ main.c เพราะง่ายต่อความเข้าใจว่าเป็นตัวโปรแกรมหลักที่เขียนขึ้น



```

*****
/* Examples Program For "ET-HASE ARM ADUC7024" Board */
/* Target MCU : Analog Device ADUC7024 */
/*      : X-TAL : 32.768 KHz */
/*      : Run Speed 41.78 MHz (With PLL) */
/* Keil Editor : uVision3 V3.03a */
/* Compiler : Keil CARM V2.50a */
/* Function : LED Blink on P4.7 Output Mode */
*****

#include <ADUC7024.H> // ADUC7024 MPU Register

/* prototype section */
void delay(unsigned long int); // Delay Time Function

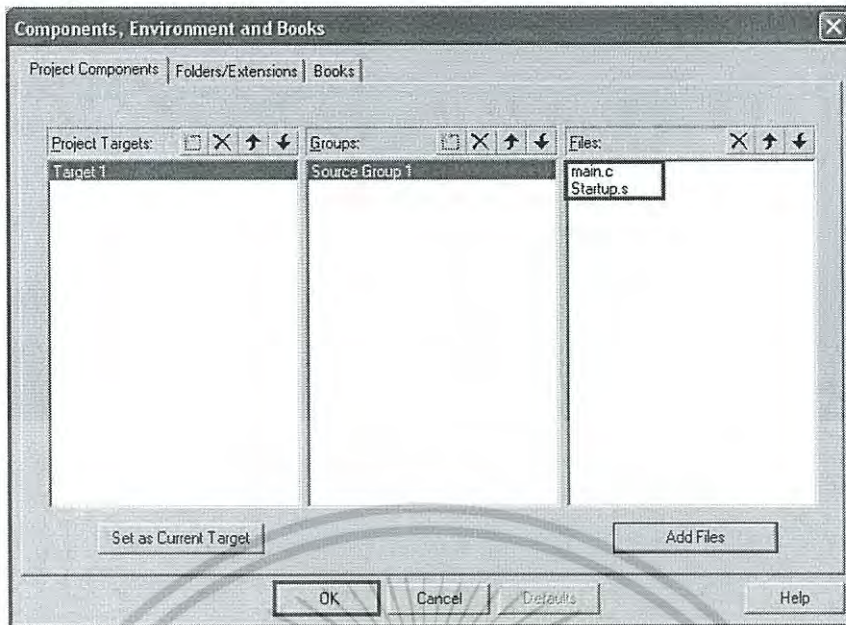
int main(void)
{
    // Config Port P4 = GPIO
    GP4CON = 0x00000000; // P4 = GPIO

    // Config GPIO Direction (Bit[31..24])
    // Config GPIO Data Output (Bit[23..16])
    GP4DAT = 0x80000000; // P4[7] = Output

    // Config GPIO Set Output (Bit[23..16])
    GP4SET = 0x00800000; // OFF P4[7]
}
  
```

รูปที่ 4.25 ตัวอย่างหน้าต่างที่ทำการเขียน Source Code

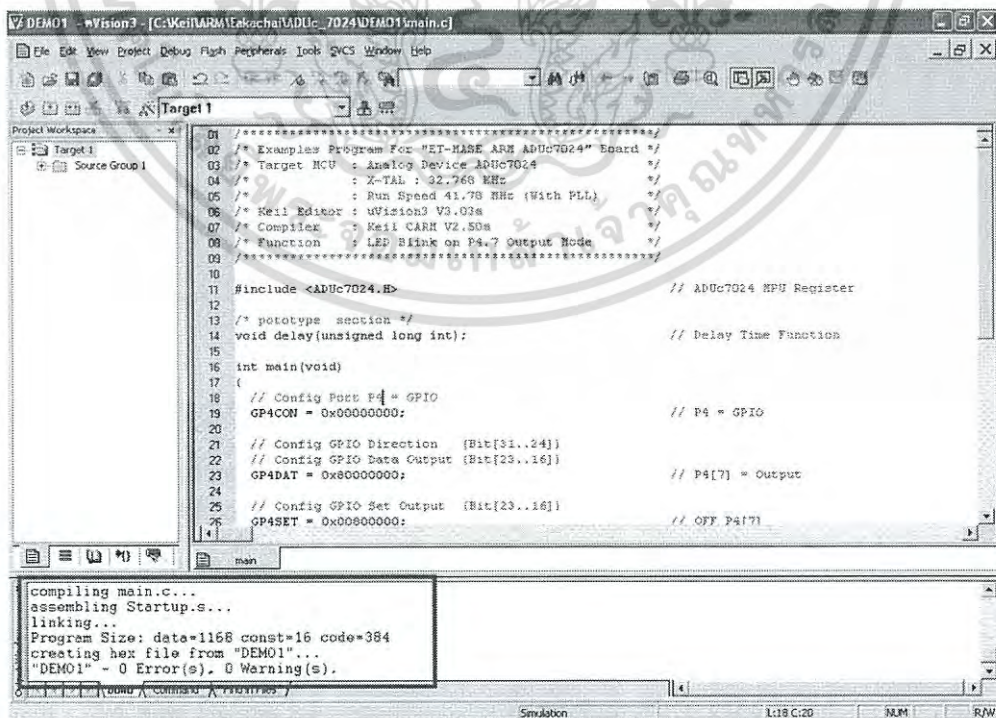
จากนั้นให้ทำการ add file ที่ต้องใช้ร่วมกันในโปรเจก เพื่อใช้ในตอนแปลโปรแกรม ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.26 ได้ทำการ add file ที่จะใช้ตอนแปลโปรแกรมเข้ามาแล้ว



รูปที่ 4.26 การ Add file ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการแปลโปรแกรม

4.4.5.4 การแปลโปรแกรม (Compile)

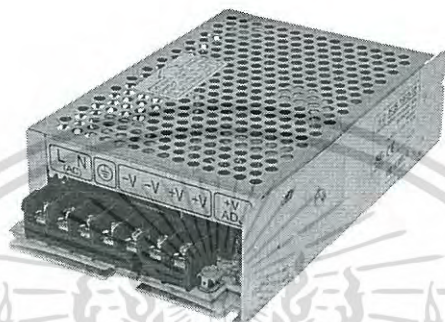
เลือกไปที่เมนู Project → Rebuild all target files แล้วโปรแกรมจะทำการแปลคำสั่ง จากนั้นจะได้ไฟล์นามสกุล .hex เพื่อไปโหลดใส่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ต่อไป



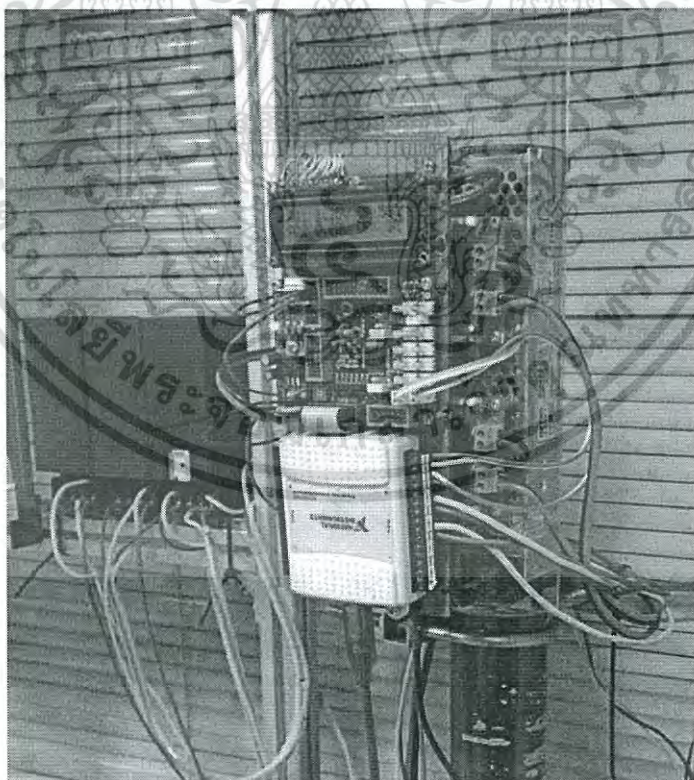
รูปที่ 4.27 ตัวอย่างหน้าต่างผลลัพธ์การแปลโปรแกรม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6 แหล่งจ่ายไฟฟ้า

เป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับแผงวงจรและอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งการเลือกใช้เพาเวอร์ซัพพลาย ต้องคำนึงถึงขนาดแรงดันที่ถูกต้องในการใช้งาน และ กำลังการจ่ายกระแสที่เพียงพอ เช่น มอเตอร์ปั๊มที่ใช้ในการวิจัยทดลอง มีการใช้ไฟที่ 12 V และกินกระแส 2 A จึงต้องเลือกแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้เพียงพอ



รูปที่ 4.28 Switching Power Supply 12V 12A

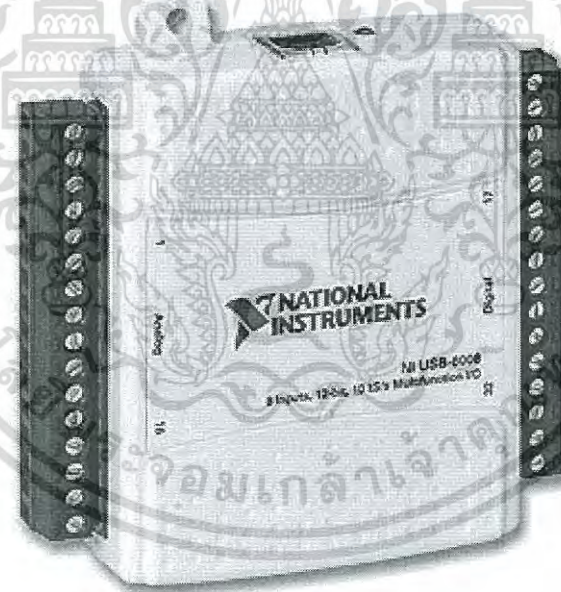


รูปที่ 4.29 ชุดขับมอเตอร์ปั๊มน้ำที่ใช้ทำวิจัยทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การอ่าน/แปลงสัญญาณและส่งผ่านข้อมูล (Data Acquisition, DAQ)

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาและทำการออกแบบ สร้างตัวควบคุมอยู่บนคอมพิวเตอร์โดยผ่านกรรมวิธีอำนวยความสะดวกโดยซอฟต์แวร์เป็นหลัก ฉะนั้นการสื่อสารหรือการอ่านค่าพร้อมทั้งแปลงสัญญาณส่งผ่านข้อมูลไปกลับ ระหว่างตัวอุปกรณ์ที่ทำการวิจัยทดลองกับตัวซอฟต์แวร์ที่ทำการควบคุม จึงเป็นแกนหลักของการทำงาน ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์ Data Acquisition, DAQ ของบริษัท NI รุ่น USB-6008 ซึ่งเป็น Multifunction DAQ เพื่อทำหน้าที่อ่านสัญญาณที่ป้อนกลับมาจากตัววัดความดันแตกต่าง เพื่อแปลงค่าส่งเข้าไปในโปรแกรม MATLAB ให้ตัวโปรแกรมที่ออกแบบเป็นตัวควบคุมทำการประมวลผลและสั่งการคำสั่งควบคุมออกมาผ่านตัว USB-6008 เพื่อแปลงออกเป็นสัญญาณไฟฟ้าอนาล็อกส่งไปเป็นอินพุตให้กับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์บีเอ็ม เพื่อทำงานในขั้นการสั่งการควบคุมความเร็วมอเตอร์บีเอ็มต่อไป และจุดสำคัญคือ ชุดไดรเวอร์ที่สามารถทำให้ตัว NI USB-6008 ทำงานร่วมกับ MATLAB โดยปกติจะเป็นการเรียกใช้ ซอฟต์แวร์ NI-DAQmx ของทาง NI เพื่อเป็นไดรเวอร์ตัวกลาง ที่สามารถทำให้ MATLAB เรียกใช้ NI USB-6008 ได้



รูปที่ 4.30 NI USB-6008 Multifunction DAQ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลทางเทคนิค NI USB 6008 Multifunction DAQ

Product Family	Multifunction DAQ
Measurement Type	Voltage
Form Factor	USB
Operating System / Target	Linux , Mac OS , Pocket PC , Windows
Product Family	Multifunction DAQ
Analog Input	
Single-Ended Channels	8
Differential Channels	4
Analog Input Resolution	12 bits
Maximum Voltage Range	
Range	-10 V - 10 V
Accuracy	7.73 mV
Minimum Voltage Range	
Range	-1 V - 1 V
Accuracy	37.5 mV
Number of Ranges	8
Simultaneous Sampling	No
Analog Output	
Number of Channels	2
Resolution	12 bits
Maximum Voltage Range	
Range	0 V - 5 V
Accuracy	7 mV
Minimum Voltage Range	
Range	0 V - 5 V
Accuracy	7 mV
Update Rate	150 S / s
Current Drive Single	5 mA
Current Drive All	10 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

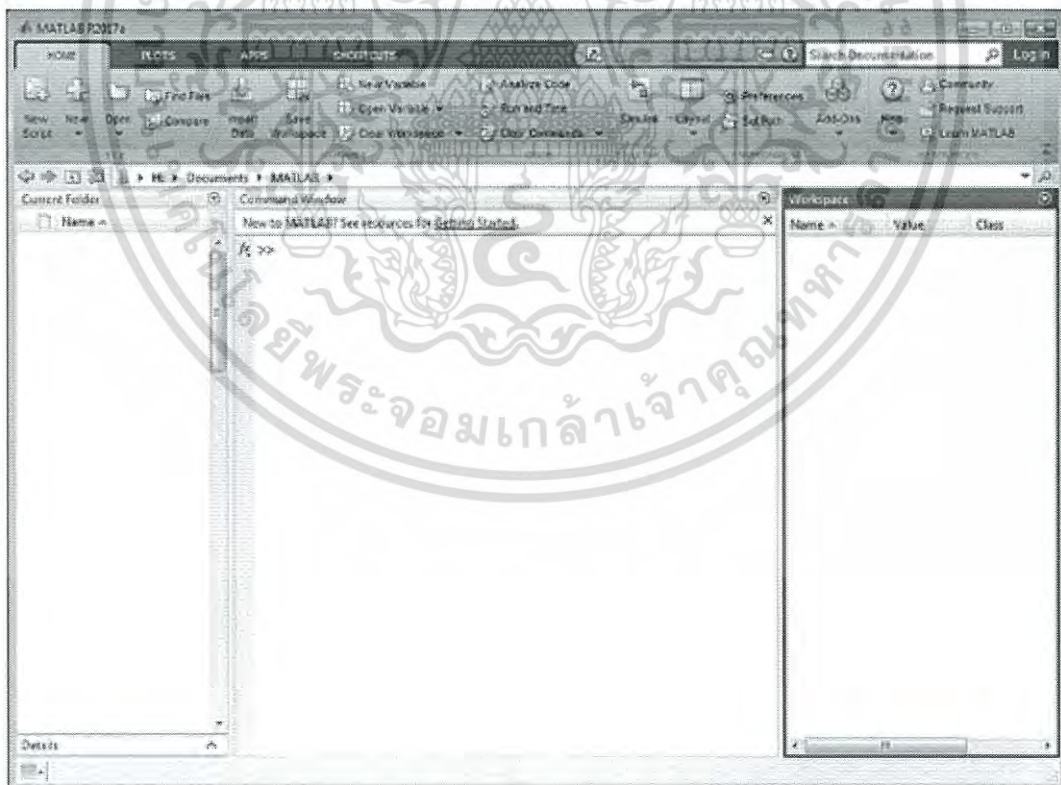
4.6 โปรแกรม MATLAB / SIMULINK

โปรแกรม MATLAB และ โปรแกรม SIMULINK เป็นชุดโปรแกรมของ MATHWORKS ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้นักศึกษานักวิจัย วิศวกรแต่ละสาขา หรือสาขาอาชีพอื่น ๆ ที่ต้องการโปรแกรมช่วยในการทำงานทางด้านคณิตศาสตร์ เพื่อประหยัดเวลา และ มีความถูกต้อง แม่นยำมากขึ้น เป็นต้น ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้ก็ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการทำคำนวณ และ SIMULINK ช่วยในการจำลองระบบสำหรับทดสอบ และได้ใช้ทำเป็นตัวควบคุมในการติดต่อกับตัวอุปกรณ์ตามระบบที่ออกแบบไว้เพื่อทำการควบคุมจริงผ่านกระบวนการจริง

4.6.1 การใช้งาน MATLAB

4.6.1.1 หน้าต่างเริ่มต้นการใช้งานโปรแกรม MATLAB

ในหน้าต่างเริ่มต้นเมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมาใช้งาน จะประกอบไปด้วยหน้าต่าง 3 ส่วนคือ Current Folder สำหรับการเข้าถึงไฟล์ใช้งาน , Command Window ไว้สำหรับพิมพ์คำสั่งป้อนเข้าไปสั่งให้โปรแกรมทำงาน สิ่งที่เกิดขึ้นที่เครื่องหมาย >> คือพร้อมรับคำสั่ง , Workspace เป็นหน้าต่างที่แสดงถึงข้อมูลต่าง ๆ ที่ถูกดึงเข้ามาเพื่อใช้งาน



รูปที่ 4.31 หน้าต่างเริ่มต้นการใช้งานโปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MATLAB เป็นคำย่อของ "ห้องปฏิบัติการเมทริกซ์" ในขณะที่ภาษาโปรแกรมอื่น ๆ ส่วนใหญ่ทำงานกับตัวเลขที่ละตัว แต่ MATLAB ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้งานกับเมทริกซ์ และ อาร์เรย์ ตัวแปร MATLAB ทั้งหมดเป็นอาร์เรย์หลายมิติไม่ว่าจะเป็นข้อมูลประเภทใดก็ตาม เมทริกซ์ เป็นอาร์เรย์สองมิติที่มักใช้สำหรับพีชคณิตเชิงเส้น

4.6.1.2 การสร้างอาร์เรย์

ในการสร้างอาร์เรย์ที่แถวเดียว ให้แยกค่าแต่ละตัวด้วยเครื่องหมายจุลภาค หรือ เว้นช่องว่าง ตัวอย่างคำสั่ง `>> a = [1 3 5]`

ในการสร้างเมทริกซ์ ให้แยกชุดข้อมูลด้วยเครื่องหมาย ; ตัวอย่างคำสั่ง เช่น `>> a = [1 2 3; 4 5 6; 7 8 10]` หรือสร้างเมทริกซ์ โดยการใช้คำสั่ง function ต่างๆเช่น `zeros`

<code>a = [1 2 3 4]</code>	<code>a = [1 2 3; 4 5 6; 7 8 10]</code>	<code>z = zeros(5,1)</code>
<code>a =</code>	<code>a =</code>	<code>z =</code>
1 2 3 4	1 2 3	0
	4 5 6	0
	7 8 10	0
		0
		0

รูปที่ 4.32 ตัวอย่างการสร้างอาร์เรย์ เมทริกซ์

4.6.1.3 การดำเนินการกับ เมทริกซ์ และ อาร์เรย์

MATLAB ช่วยให้ประมวลผลค่าทั้งหมดในเมทริกซ์โดยใช้ตัวดำเนินการเลขคณิต หรือเรียกใช้ฟังก์ชัน เช่น ตัวอย่างดังรูปที่ 4.33

<code>a + 10</code>	<code>sin(a)</code>	<code>a'</code>
<code>ans =</code>	<code>ans =</code>	<code>ans =</code>
11 12 13	0.8415 0.9093 0.1411	1 4 7
14 15 16	-0.7568 -0.9589 -0.2794	2 5 8
17 18 20	0.6570 0.9894 -0.5440	3 6 10

รูปที่ 4.33 ตัวอย่างการดำเนินการกับอาร์เรย์ และ เมทริกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.4 ตัวแปรใน Workspace

ตัวอย่างการใช้งาน workspace แสดงในรูปที่ 4.34

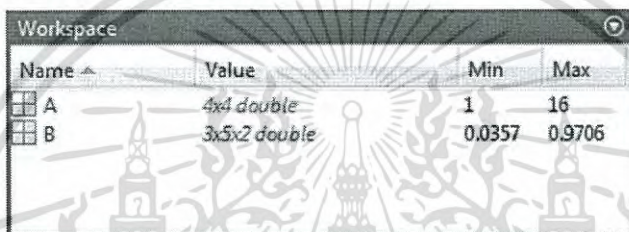
```
A = magic(4);
B = rand(3,5,2);
```

You can view the contents of the workspace using whos.

```
whos
```

Name	Size	Bytes	Class	Attributes
A	4x4	128	double	
B	3x5x2	240	double	

The variables also appear in the Workspace pane on the desktop.



Name	Value	Min	Max
A	4x4 double	1	16
B	3x5x2 double	0.0357	0.9706

รูปที่ 4.34 ตัวอย่างการใช้งาน workspace

4.6.1.5 การทำงานกับ ตัวอักษร หรือ ข้อความ

```
myText = 'Hello, world';
```

```
otherText = 'You're right'
```

```
otherText =
'You're right'
```

```
whos myText
```

Name	Size	Bytes	Class	Attributes
myText	1x12	24	char	

```
longText = [myText, ' - ',otherText]
```

```
longText =
'Hello, world - You're right'
```

รูปที่ 4.35 การทำงานกับ ตัวอักษร หรือ ข้อความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.6 การเรียกใช้ฟังก์ชัน

```
A = [1 3 5];
max(A)
```

```
ans = 5
```

```
B = [10 6 4];
max(A,B)
```

```
ans =
```

```
10 6 5
```

```
maxA = max(A)
```

```
maxA = 5
```

```
[maxA,location] = max(A)
```

```
maxA = 5
```

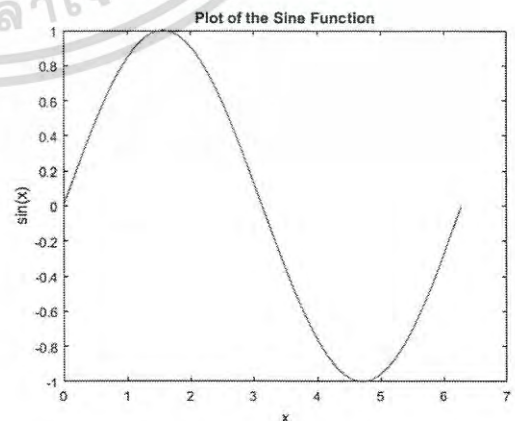
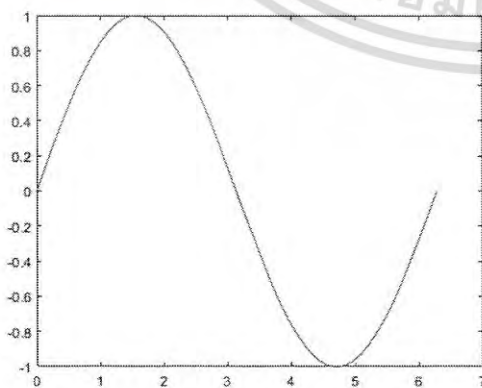
```
location = 3
```

รูปที่ 4.36 ตัวอย่างการเรียกใช้ฟังก์ชัน

4.6.1.7 การวาดกราฟ 2 มิติ, 3 มิติ

```
x = 0:pi/100:2*pi;
y = sin(x);
plot(x,y)
```

```
xlabel('x')
ylabel('sin(x)')
title('Plot of the Sine Function')
```



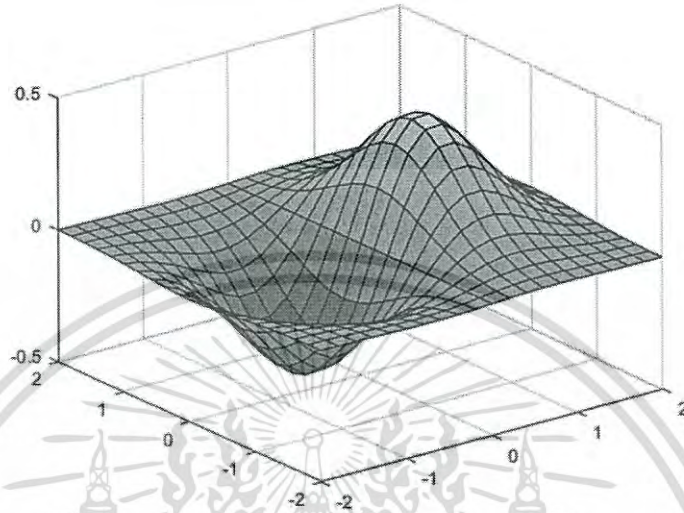
รูปที่ 4.37 ตัวอย่างการพล็อตกราฟเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
[X,Y] = meshgrid(-2:2:2);
Z = X .* exp(-X.^2 - Y.^2);
```

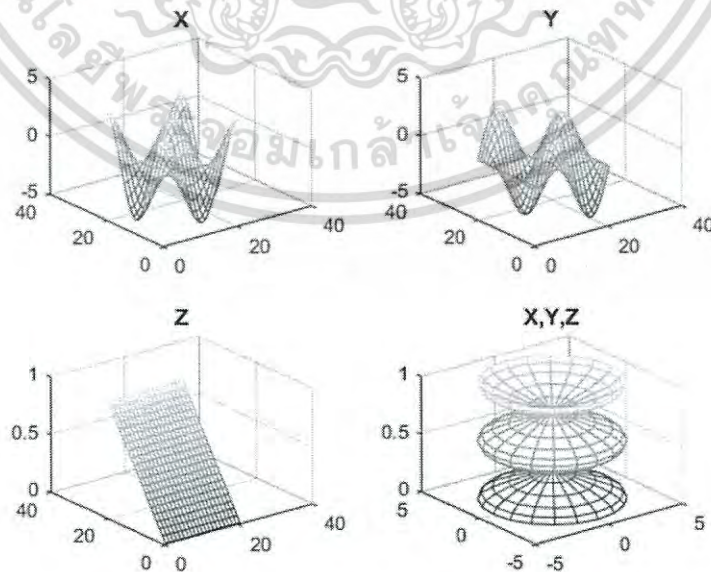
Then, create a surface plot.

```
surf(X,Y,Z)
```



รูปที่ 4.38 ตัวอย่างการพล็อตกราฟ 3 มิติ

```
t = 0:pi/10:2*pi;
[X,Y,Z] = cylinder(4*cos(t));
subplot(2,2,1); mesh(X); title('X');
subplot(2,2,2); mesh(Y); title('Y');
subplot(2,2,3); mesh(Z); title('Z');
subplot(2,2,4); mesh(X,Y,Z); title('X,Y,Z');
```



รูปที่ 4.39 ตัวอย่างการพล็อตกราฟ 3 มิติ รูปย่อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.8 การเขียนโปรแกรม , สคริปต์

Sample Script

To create a script, use the `edit` command,

```
edit plotrand
```

This opens a blank file named `plotrand.m`. Enter some code that plots a vector

```
n = 50;
r = rand(n,1);
plot(r)
```

Next, add code that draws a horizontal line on the plot at the mean:

```
m = mean(r);
hold on
plot([0,n],[m,m])
hold off
title('Mean of Random Uniform Data')
```

Whenever you write code, it is a good practice to add comments that describe the code, using the percent (%) symbol.

```
% Generate random data from a uniform distribution
% and calculate the mean. Plot the data and the mean.

n = 50;           % 50 data points
r = rand(n,1);
plot(r)

% Draw a line from (0,m) to (n,m)
m = mean(r);
hold on
plot([0,n],[m,m])
hold off
title('Mean of Random Uniform Data')
```

Save the file in the current folder. To run the script, type its name at the command line:

```
plotrand
```

You can also run scripts from the Editor by pressing the **Run** button, .

รูปที่ 4.40 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม สคริปต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.9 เอกสารและความช่วยเหลือ

MATLAB มีเอกสารสนับสนุน การใช้งานคำสั่งต่าง ๆ พร้อมตัวอย่าง และคำอธิบาย มีหลายวิธีในการดูคำอธิบายหรือข้อมูลเหล่านี้ เช่น จากบรรทัดแล้วพิมพ์คำสั่ง

- Open the function documentation in a separate window using the `doc` command.

```
doc mean
```

- Display function hints (the syntax portion of the function documentation) in the Command Window

```
mean(
```

- View an abbreviated text version of the function documentation in the Command Window using the `help` command.

```
help mean
```

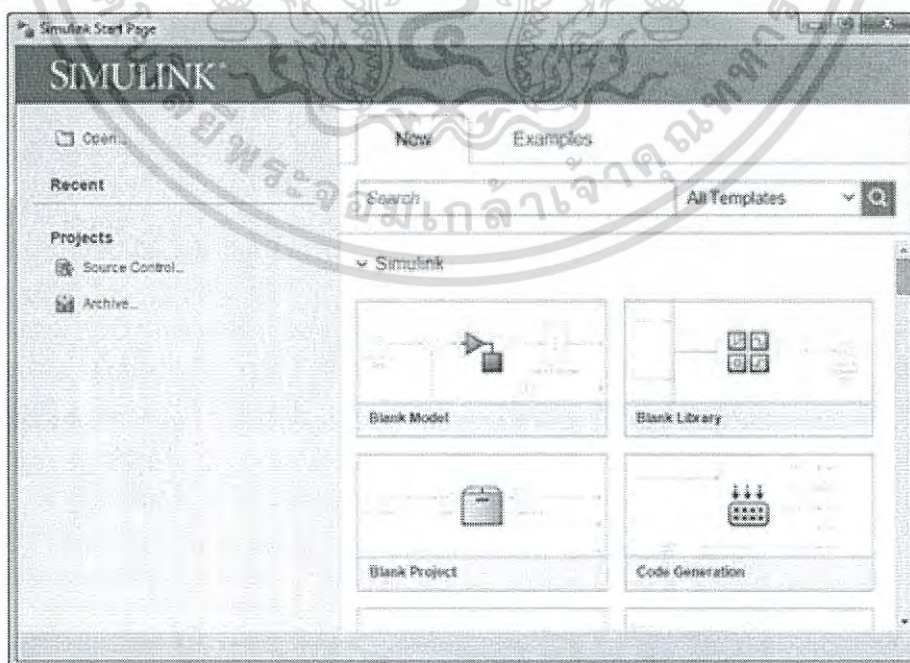
Access the complete product documentation by clicking the help icon .

รูปที่ 4.41 ตัวอย่างการเข้าถึงความช่วยเหลือของโปรแกรม

4.6.2 การใช้งาน SIMULINK

4.6.2.1 การเปิด SIMULINK เพื่อใช้งาน

สามารถเรียก SIMULINK ขึ้นมาใช้งานโดยกดที่ปุ่ม 

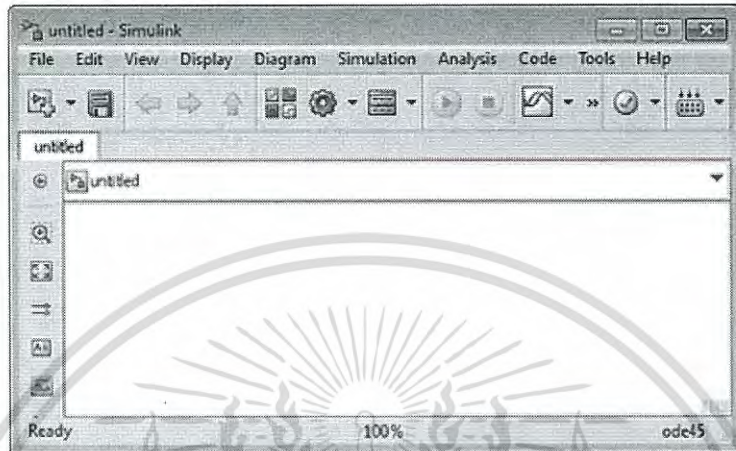


รูปที่ 4.42 หน้าต่างใช้งาน SIMULINK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2.2 การสร้างโมเดลใหม่ใน SIMULINK

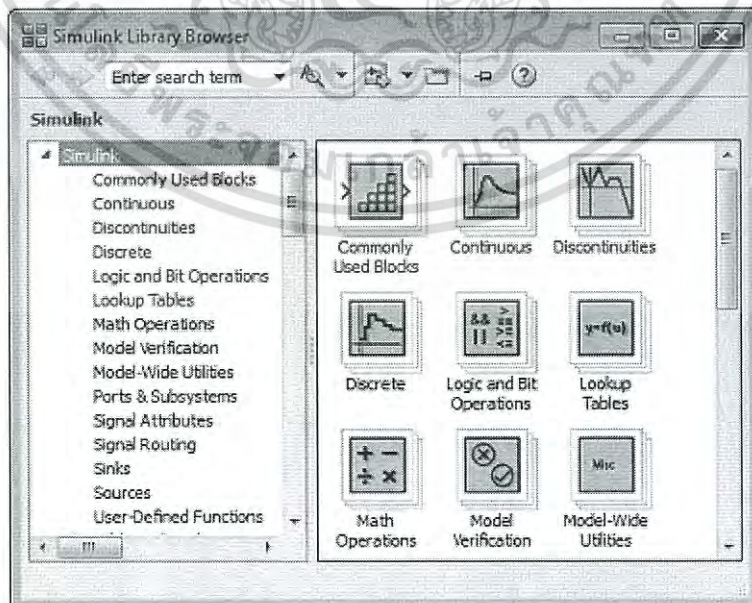
การสร้างไฟล์หรือการเซฟมีพื้นฐานเดียวกับการใช้งานโปรแกรมทั่วไป คือ การสร้างใหม่ก็เลือก create new เมื่อต้องการเซฟ ก็เลือกกด save



รูปที่ 4.43 หน้าต่างสร้างโมเดลใหม่ใน SIMULINK

4.5.2.3 การค้นหาและเลือกฟังก์ชันบล็อกที่ต้องการใช้งาน

ฟังก์ชันบล็อกต่างๆ จะอยู่ในส่วน Simulink Library และสามารถ เรียกตัว browser ขึ้นมาเพื่อค้นหา บล็อกที่ต้องการได้

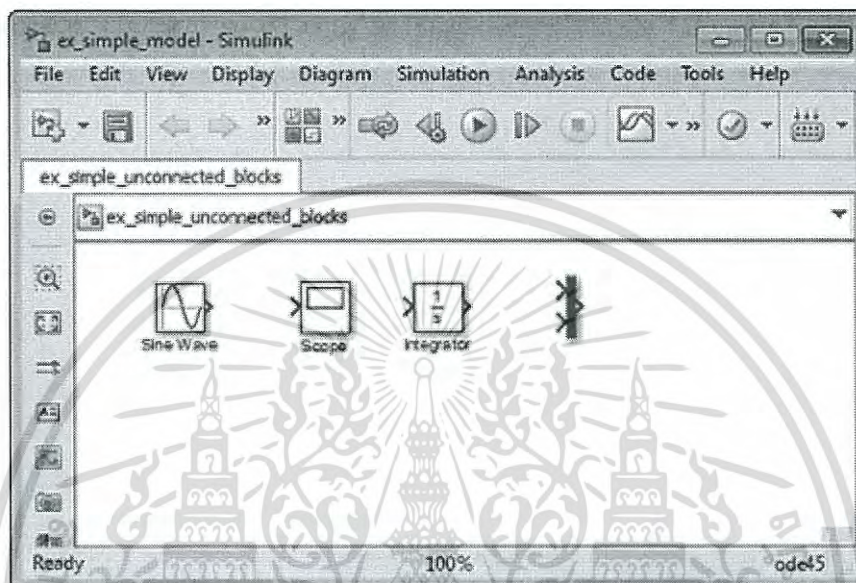


รูปที่ 4.44 หน้าต่าง Simulink Library ใน SIMULINK

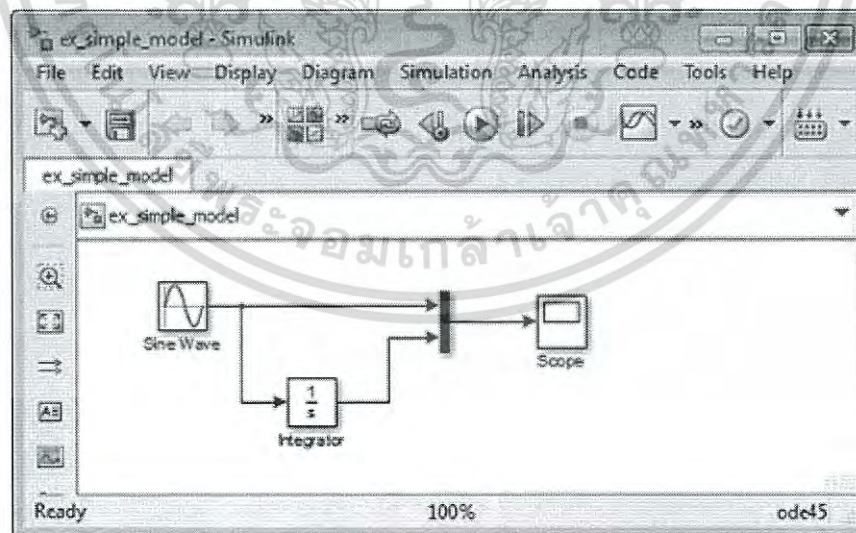
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2.4 การวางฟังก์ชันบล็อก และการสร้างการเชื่อมต่อ

เมื่อได้ฟังก์ชันบล็อกที่ต้องการแล้ว ก็สามารถใช้วิธี Drag-Drop เม้าส์ (ลากแล้ววาง) จากนั้นก็ใส่เส้นการเชื่อมต่อด้วยการลากเส้นเชื่อมต่อไปให้ตรงจุดเชื่อมต่อ โปรแกรมก็จะทำการผูกเส้นเชื่อมต่อนั้นไว้



รูปที่ 4.45 การจัดวางฟังก์ชันบล็อกตามต้องการ

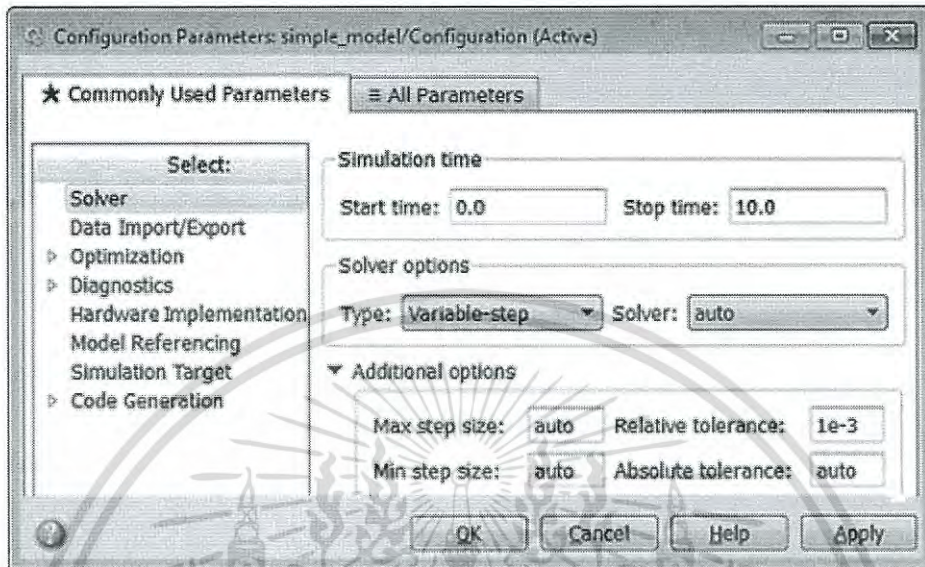


รูปที่ 4.46 การสร้างการเชื่อมต่อระหว่างบล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันบล็อก



สามารถดับเบิลคลิกที่บล็อกๆนั้น เพื่อใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องได้

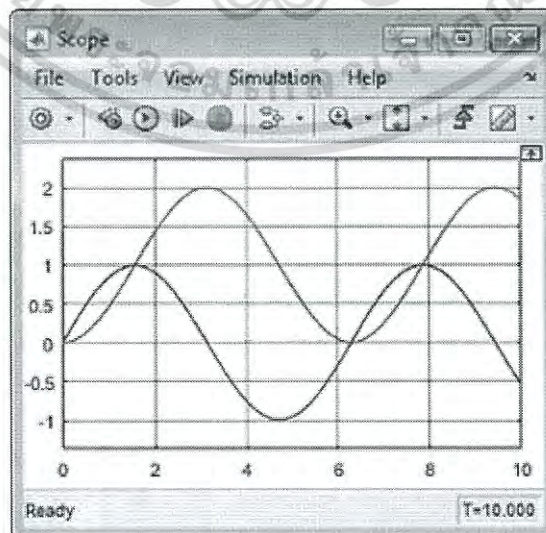


รูปที่ 4.47 ตัวอย่างหน้าต่างการใส่ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันบล็อกที่เลือก

4.5.2.5 การสั่งการจำลองการทำงาน

เมื่อสร้างโมเดลที่ต้องการได้แล้ว เมื่อต้องการทำการจำลองการทำงาน สามารถ

กดปุ่ม  เพื่อเริ่มการจำลอง และ ปุ่ม  เพื่อหยุดชั่วคราว



รูปที่ 4.48 ตัวอย่างหน้าต่างแสดงผลการจำลอง ผ่านฟังก์ชันบล็อก Scope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การจำลอง และ การทดลอง

5.1 การจำลอง

5.1.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง IO PID และ FO PID

การออกแบบตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วนสำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน ตามสมการที่ (2.4) โดยใช้ชุดเครื่องมือในโปรแกรม MATLAB ทำการคำนวณโดยค่าพีไอดีพารามิเตอร์เริ่มต้นเป็น $K_p = K_i = K_d = 1$, $\lambda = \mu = 0.5$ ขอบเขต $K = [-100; 100]$ และ อัตราขยาย $\lambda = [1.01; 1.90]$, $\mu = [0.01; 0.90]$ โดยกำหนดขอบเขตอัตราขยาย (Gain Margin) เท่ากับ 10 dB และ ขอบเขตมุม (Phase Margin) ที่ 65 องศา โดยการใช้การปรับค่า อินทิกรัลของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Integral Squared Error, ISE) ด้วยค่าดังกล่าวจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม ดังนี้

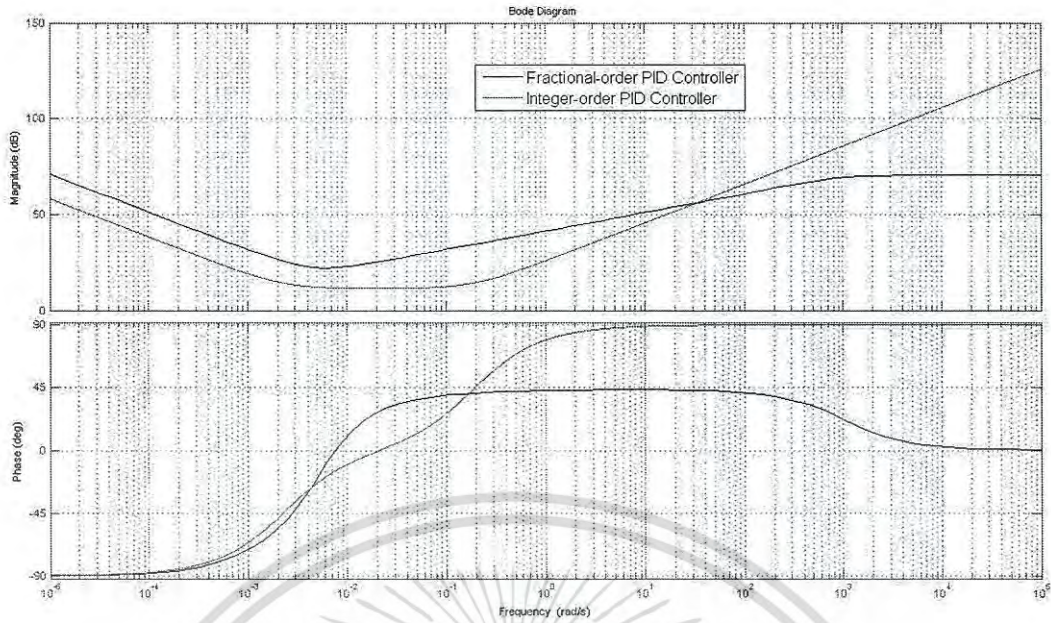
ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเต็ม

$$G_{PID}(s) = 3.7282 + 0.00837 \frac{1}{s} + 19.2407s \quad (5.1)$$

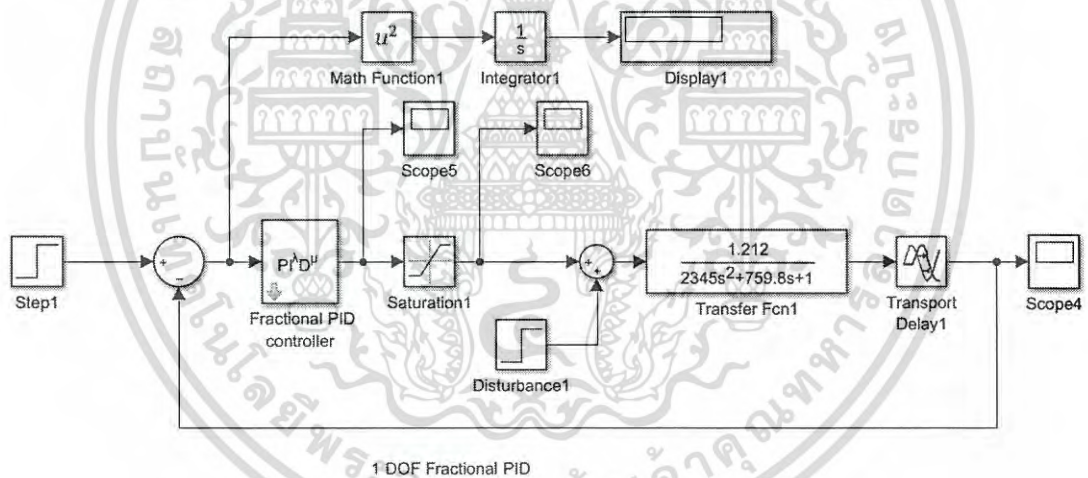
ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วน

$$G_{FOPID}(s) = 3.72823 + 0.00837 \frac{1}{s^{1.55}} + 19.240797s^{0.49} \quad (5.2)$$

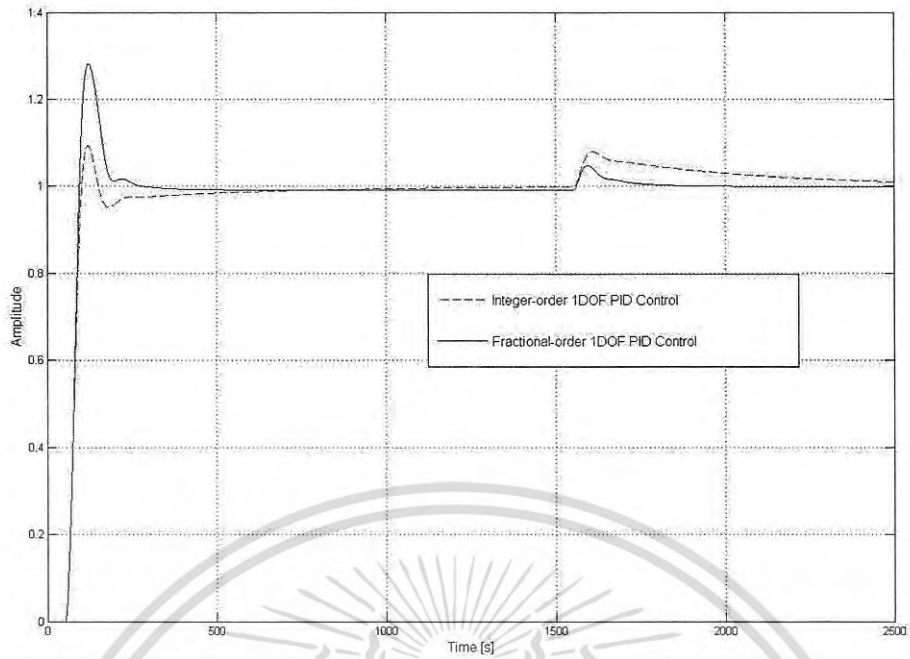
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



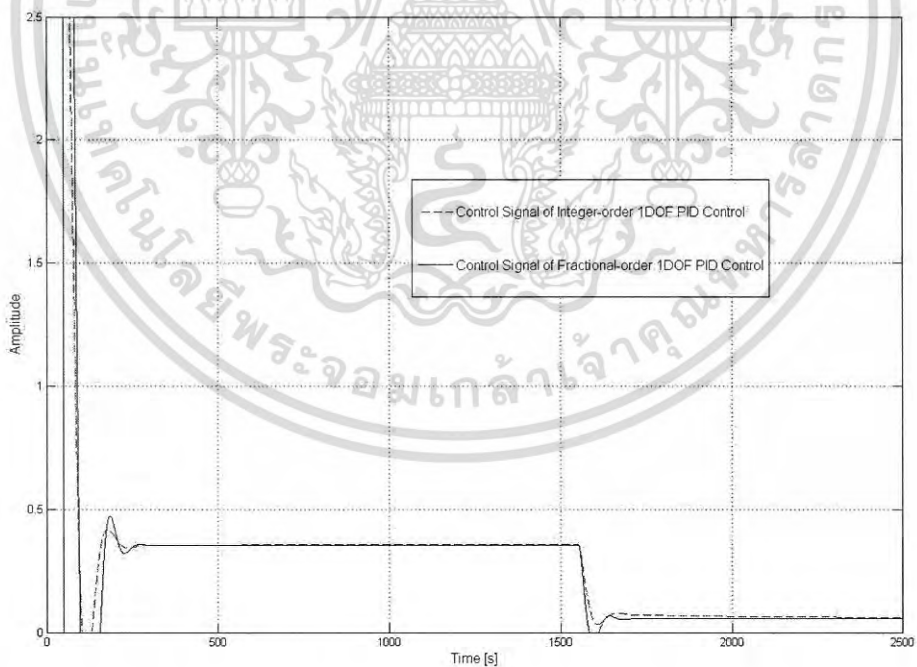
รูปที่ 5.1 แผนภาพโบดของตัวควบคุม

รูปที่ 5.2 Simulink ของ 1 DOF Fractional-Order PI^2D^μ Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 ผลตอบสนองของสแต็ป (Step Response) ของ Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller เปรียบเทียบกับ Integer-Order PID Controller



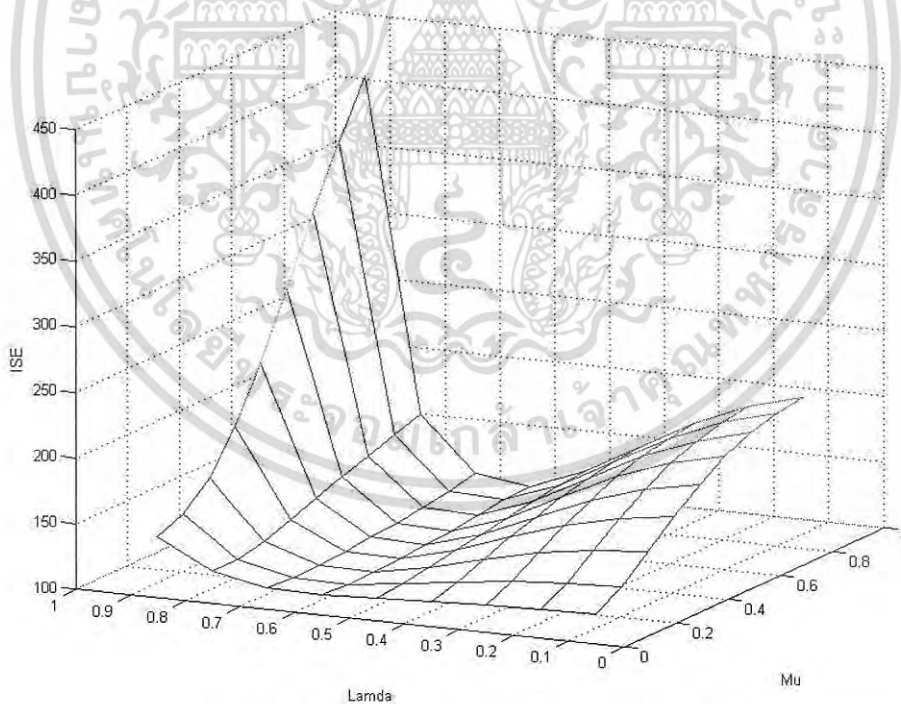
รูปที่ 5.4 สัญญาณควบคุมของ Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller เปรียบเทียบกับ Integer-Order PID Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการเปรียบเทียบผลตอบสนองสเต็ป (Step Response) ของระบบควบคุมแบบอันดับจำนวนเศษส่วน กับระบบควบคุมแบบอันดับจำนวนเต็ม แสดงในรูปที่ 5.3 พบว่าการตอบสนองของการควบคุมพีไอดีแบบอันดับเศษส่วนมีค่าเกิน (Over Shoot) มากกว่า แต่ค่าเวลาสู่สมดุลย์ (Settling Time) น้อยกว่า ที่ 254 วินาที และ ค่าความคลาดเคลื่อนสู่สภาวะคงตัว (Steady State Error) ที่เป็นศูนย์

5.1.2 การหาค่าเหมาะสมของอันดับจำนวนเศษส่วน (λ, μ)

เพื่อตรวจสอบหาค่าที่เหมาะสมของอันดับจำนวนเศษส่วนสำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกันนี้ ได้ทำการพล็อตกราฟผลของ อินทิกรัลของค่าผิดพลาดยกกำลังสอง (Integral Square Error, ISE) โดย λ และ μ แจกแจงอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.5 ถึง 1.9 ด้วยการปรับเพิ่มครั้งละ 0.1 หน่วย และ การประมาณอันดับที่ $N = 5$ ในรูปที่ 5.5 ได้แสดงผังกราฟ 3 มิติ ISE ของระบบควบคุมที่แจกแจงค่าของ λ และ μ จะพบค่าที่เหมาะสมของอันดับจำนวนเศษส่วน อยู่ในช่วงของ $\lambda = [1.55; 1.68]$ และ $\mu = [0.49; 0.57]$ ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 กราฟ ISE ค่าเหมาะสมของ λ และ μ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

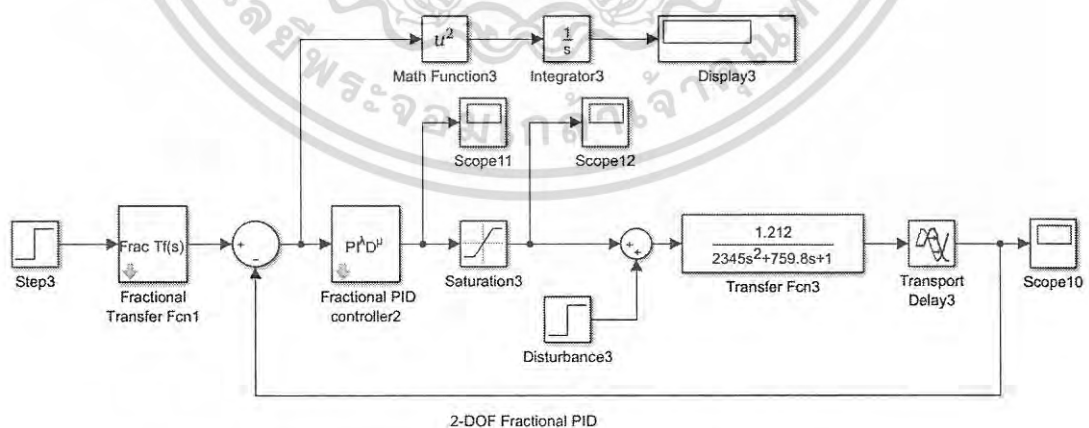
5.1.3 ตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระอันดับจำนวนเศษส่วน (2-DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller)

โครงสร้างกระบวนการที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระอันดับจำนวนเศษส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นวิธีการที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการจำกัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าที่ต้องการควบคุม (Set-Point) ช่วยให้กระบวนการสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดค่าเกิน (Over Shoot) ขนาดใหญ่ ในระบบที่มีผลตอบสนองเชิงไดนามิกได้

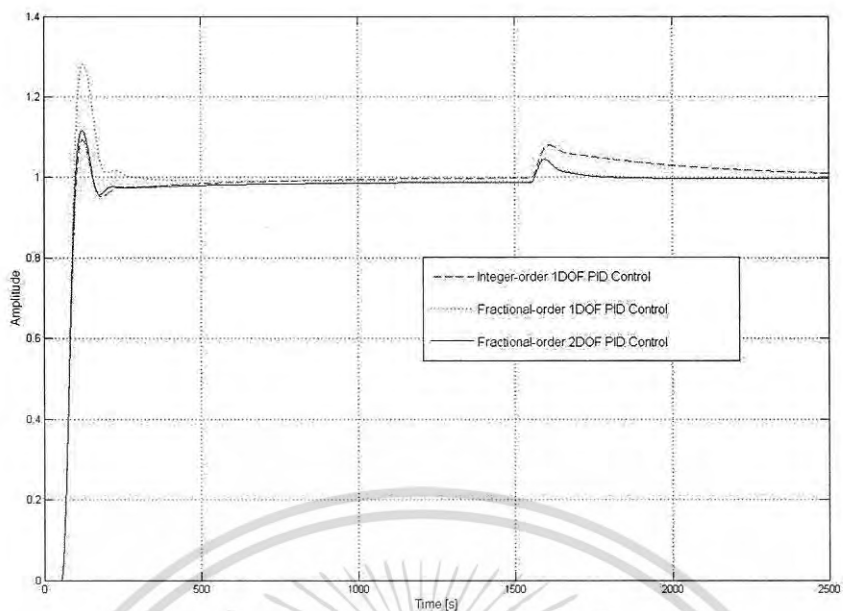
จากฟังก์ชันการถ่ายโอนของ ตัวกรองค่าที่ต้องการควบคุม (Set-Point Filter, SF) ในสมการที่ (3.6) ค่าตัวแปรของตัวควบคุมอันดับจำนวนเศษส่วน และ ค่าตัวแปรเหมาะสมของ ตัวกรองค่าที่ต้องการควบคุม SF ได้เป็น $[k_p = 3.7282, k_i = 0.00837, k_d = 19.2407, \lambda = 1.55, \mu = 0.49, \alpha = 0.45, \beta = 0.45]$ จะได้ $G_{FOSF}(s)$ เป็น

$$G_{FOSF}(s) = \frac{(1-0.45)(19.2407/0.00837)s^{0.49} + (1-0.45)(3.7282/0.00837)s^{1.55}}{1 + (3.7282/0.00837)s^{1.55} + (19.2407/0.00837)s^{0.49}} \quad (5.3)$$

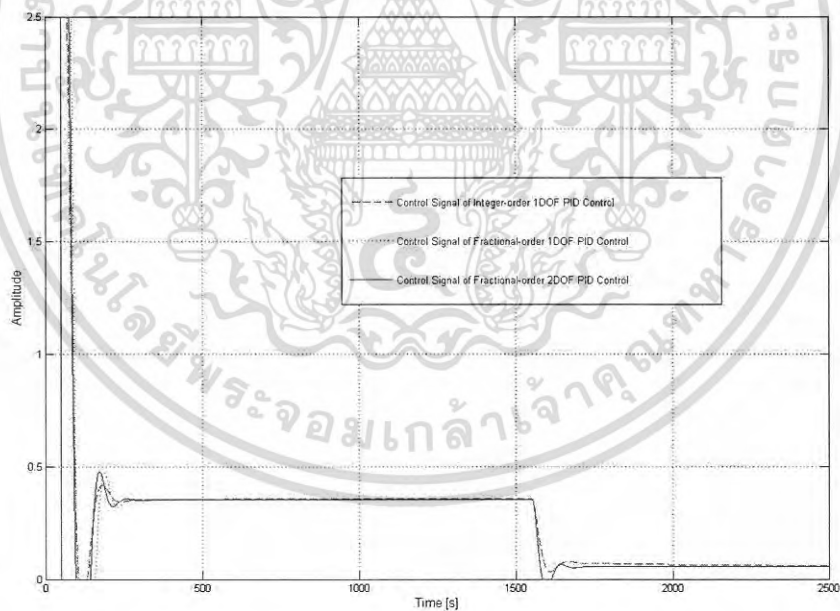
ผลเปรียบเทียบการตอบสนองสเต็ป (Step Response) ของ 1DOF, 2DOF ของตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเศษส่วน และ ตัวควบคุมพีไอดีแบบอันดับจำนวนเต็ม แสดงในรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่าค่าเกินในระบบ (Over Shoot) ถูกทำให้ลดลงในการตอบสนองแบบไดนามิกของตัวควบคุมแบบอันดับจำนวนเศษส่วน และ ค่าเวลาสู่สมดุลย์ (Settling Time) ลดลงเหลือ 198 วินาที



รูปที่ 5.6 Simulink ของ 2-DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller



รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองสเต็ป (Step Response) ของ (1DOF , 2DOF) Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller เปรียบเทียบกับ (1DOF) Integer-Order PID Controller



รูปที่ 5.8 สัญญาณควบคุมของ (1DOF , 2DOF) Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller เปรียบเทียบกับ (1DOF) Integer-Order PID Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

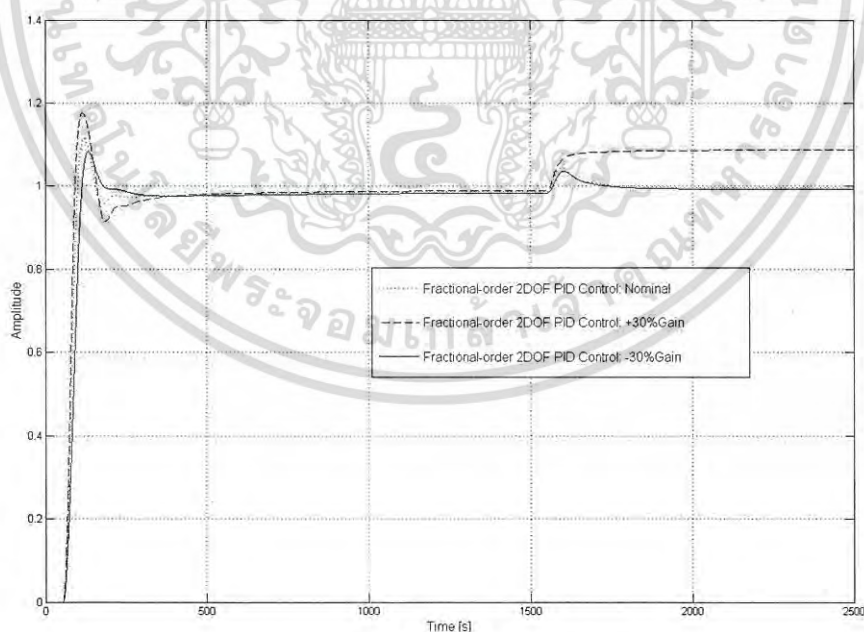
5.1.4 ความทนทานต่อการรบกวนระบบจากค่าอัตราขยายของระบบ

เพื่อประเมินลักษณะของตัวควบคุม จึงได้พิจารณา การแปรปรวนของค่าอัตราขยาย (K) ของกระบวนการที่เกิดจากประสิทธิภาพของปั๊มที่เกิดความแปรปรวนจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น กำหนดค่าความผันผวนของพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าทดสอบการเกิดการรบกวนระบบของค่าอัตราขยายของระบบ

	ค่าระบุ	เมื่อเกิดการรบกวนระบบ +30%	เมื่อเกิดการรบกวนระบบ -30%
Process Gain	1.212	1.5756	0.8484

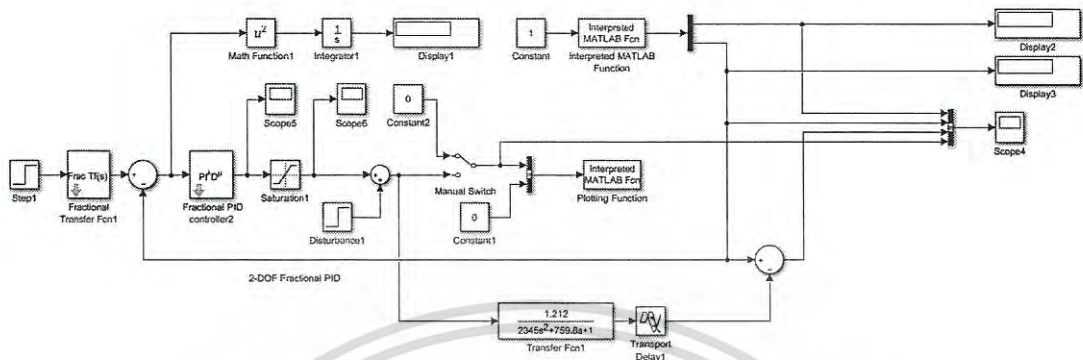
การจำลองการควบคุมที่ประเมินการเกิดการรบกวน ของตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน แสดงดังรูปที่ 5.9 ได้ทำการพิจารณาเพื่อตรวจสอบความทนทานของระบบควบคุมที่เกิดผลกระทบจากการรบกวนเกิดขึ้นในกระบวนการ



รูปที่ 5.9 ผลตอบสนององสเต็ม (Step Response) ของ 2-DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller ที่พิจารณาการเกิดผลกระทบจากการรบกวนระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

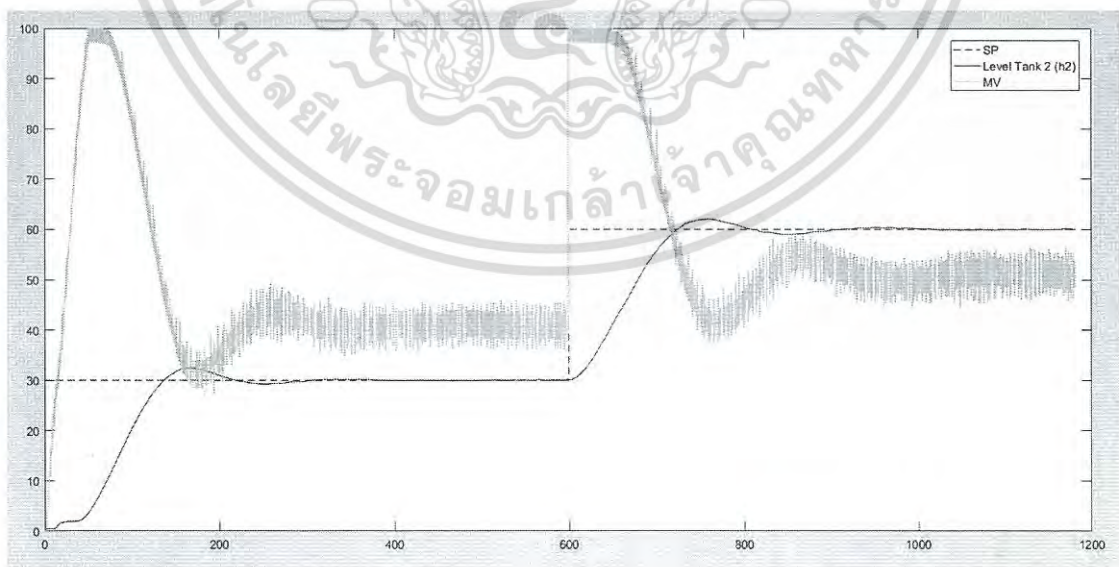
5.2.2 Simulink ควบคุมกระบวนการด้วยตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระอันดับจำนวนเศษส่วน



รูปที่ 5.11 Simulink ของ 2-DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ ที่ใช้ควบคุมกระบวนการจริง

5.2.3 ผลตอบสนองกระบวนการของ 2-DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller

ในการทำการควบคุมการทำงานกับกระบวนการระดับน้ำสองถังจริงนั้น ได้กำหนดจุดทำงานเพื่อทดสอบการควบคุมระบบ 2 จุด คือ $H_2 = 30\%$ และ 60% ตามลำดับ เพื่อเป็นการทดสอบตัวควบคุมที่ได้ทำการออกแบบไว้สามารถควบคุมระบบจริงตามต้องการ ผลตอบสนองของการควบคุมแสดงในรูป 5.12 และผลการควบคุมดังแสดงในตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.12 ผลตอบสนองกระบวนการของ 2-DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller

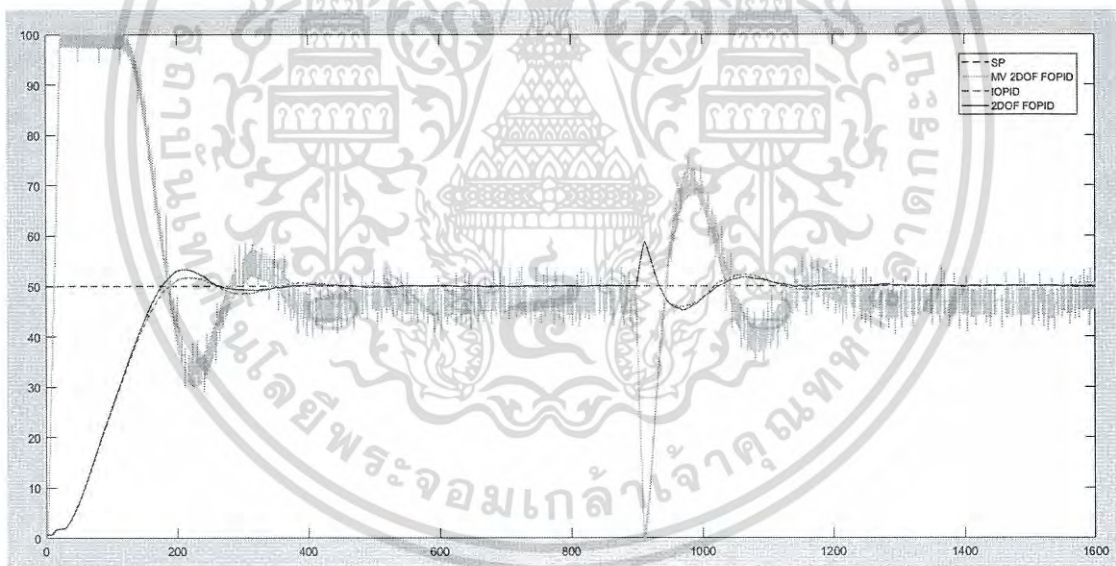
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการควบคุมของ 2-DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller

Set point (SP)	Settling time	Maximum
%	(s)	Overshoot position
30	229	32.41
60	238	62.98

5.2.4 เปรียบเทียบผลตอบสนองระหว่าง IO PID controller กับ 2-DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller

โดยกำหนดจุดทำงานค่าเป้าหมายที่ $h_2 = 50\%$ และทำการควบคุมการทำงาน กระบวนการระดับน้ำสองถังจริง ด้วยตัวควบคุมแบบ Integer Order PID controller กับ ตัวควบคุมแบบ 2 DOF Fractional-Order $PI^\lambda D^\mu$ Controller เปรียบเทียบกัน ผลการควบคุม ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 ผลตอบสนองสเต็ป 2-DOF FO $PI^\lambda D^\mu$ Controller เทียบกับ IO PID Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน สำหรับกระบวนการระดับน้ำสองถังที่มีผลต่อกัน โดยได้ศึกษาตามหลักทฤษฎีคณิตศาสตร์ แคลคูลัสอันดับจำนวนเศษส่วน ซึ่งผลการออกแบบและนำไปทำแบบจำลอง และการทดลอง ก็ให้ผลลัพธ์การควบคุมที่บรรลุเป้าหมายคือ ตัวควบคุมสามารถมีประสิทธิภาพเป็นไปตามที่ออกแบบและมีความคงทนต่อสิ่งรบกวนที่เข้ามาในระบบได้ ซึ่งสรุปได้เป็นสองส่วนคือ

การจำลอง ได้ทำการจำลองผ่านโปรแกรม SIMULINK เพื่อพิสูจน์ข้อสมมติฐานของการศึกษาที่ต้องการออกแบบตัวควบคุมที่มีประสิทธิภาพ และมีความทนทานต่อการรบกวนที่เกิดเข้ามาในระบบ จากผลการจำลองที่แสดงในบทที่ 5 ได้แสดงให้เห็นแล้วว่า ตัวควบคุมพีไอดีแบบสององศาอิสระแบบอันดับจำนวนเศษส่วน ซึ่งผนวกการใช้เทคนิคการเพิ่มตัวกรองค่าที่ต้องการควบคุม (Set-Point Filter) ทำให้มีประสิทธิภาพ มีความทนทานต่อสิ่งรบกวนต่อระบบที่เกิดขึ้น และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมมากยิ่งขึ้น โดยสามารถจัดการค่าเกิน (Over Shoot) สามารถลดค่าเวลาสู่สมดุลย์ (Settling Time) ได้ดีกว่าตัวควบคุมพีไอดีอันดับจำนวนเต็มแบบดั้งเดิม

การทดลองกับกระบวนการจริง ดังผลการทดลองได้แสดงให้เห็นในบทที่ 5 แล้วนั้น พบว่า ในการควบคุมด้วยการกำหนด ค่าควบคุม (Set-Point) จากนั้นทำการควบคุม ตัวควบคุมที่ออกแบบก็ สามารถส่งสัญญาณควบคุมไปควบคุมปั้มน้ำ และสามารถควบคุมให้ระดับน้ำเข้าสู่ค่าควบคุมได้ตามเป้าหมายที่ต้องการ และเมื่อมีสิ่งรบกวนเข้ามาในระบบ ตัวควบคุมก็ยังคงมีความคงทนต่อการรบกวน สามารถควบคุมกระบวนการกลับมาสู่ค่าที่ต้องการควบคุมได้

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

การวิจัยทดลองนี้นั้นทำงานอยู่บนสองส่วนคือ การทำงานบนซอฟต์แวร์ และ ฮาร์ดแวร์ในการทำงานจริง ซึ่งพบขีดจำกัดประสิทธิภาพฮาร์ดแวร์เมื่อทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ แต่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทดลองหากสามารถจัดหาอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงมาใช้ และติดตามซอฟต์แวร์ใหม่ๆที่พัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มความเสถียรและขีดความสามารถในการทดลองศึกษาวิจัย

ในการนำงานทดลองวิจัยนี้ไปต่อยอด ก็สามารถนำไปเป็นข้อมูลในงานวิจัยพัฒนาเกี่ยวกับตัวควบคุม เพื่อประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบอันดับเศษส่วนเป็นตัวควบคุมในระบบต่าง ๆ เช่น การศึกษาเพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับระบบการควบคุมแบบไร้สายซึ่งเริ่มมีการศึกษาและนำมาใช้มากขึ้น หรือการพัฒนาตัวควบคุมแบบอันดับจำนวนเศษส่วนสำหรับกระบวนการไดนามิกแบบอื่น ๆ ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Ates, and C. Yeroglu, "Online Tuning of Two Degrees of Freedom Fractional Order Control Loops", *Balkan Journal Of Electrical & Computer Engineering*, Vol.4 No.1, pp. 5-11, 2016.
- [2] A. Tepljakov, E. Petlenkov and J. Belikov, "FOMCON: Fractional-order modeling and control toolbox for MATLAB," *Proceedings of the 18th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems - MIXDES 2011*, Gliwice, 2011, pp. 684-689.
- [3] D. Xue, Y.Q. Chen, D.P. Atherton, *Linear Feedback Control Analysis and Design with MATLAB*, *Advances in Design and Control*, Siam, 2007.
- [4] I. Podlubny, *Fractional order systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controllers*, *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 44, pp. 208-214, 1999.
- [5] R. Jaisue, J. Chaoraingern, V. Tipsuwanporn, A. Numsomran and P. Pholkeaw, *A design of fuzzy PID controller based on ARM7TDMI for coupled-tanks process*, *Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2012 12th International Conference on, Jeju Island, pp. 610-613, 2012.
- [6] S. Kangwanrat, V. Tipsuwannaporn and A. Numsomran, *Design of PI controller using MRAC techniques for coupled-tanks process*, *Control Automation and Systems (ICCAS)*, 2010 International Conference on, Gyeonggi-dopp. 485-490, 2010.
- [7] K. Erenturk, *Fractional-Order & Active Disturbance Rejection Control of Nonlinear Two-Mass Drive System*, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 3806-3813, 2013.
- [8] Mituhiko Araki and Hidefumi Taguchi, "Tutorial Paper Two-Degree-of-Freedom PID Controllers", *International Journal of Control, Automation, and Systems* Vol. 1, No. 4, pp. 401-411, 2003.
- [9] Oustaloup A., B. Mathieu and P. Lanusse, "The CRONE control of resonant plants: application to a flexible transmission", *European Journal of Control*, Vol. 1 No.2, 1995.
- [10] Y. Chen, I. Petras and D. Xue, "Fractional order control - A tutorial," 2009 *American Control Conference*, St. Louis, MO, 2009, pp. 1397-1411.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] C. Ma and Y. Hori, "Design of Robust Fractional Order $PI^{\alpha}D$ Speed Control for Two-inertia System", Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2004, pp. 1477-1482 Vol.3, 2004.
- [12] F. Merrikh-Bayat and M. Karimi-Ghartemani, "Method for designing $PI^{\lambda}D^{\mu}$ stabilizers for minimum-phase fractional-order systems", in IET Control Theory & Applications, vol. 4, no. 1, pp. 61-70, Jan. 2010.
- [13] Y. Luo, H. Chao, L. Di and Y. Q. Chen, Lateral directional fractional order PI^{α} control of a small fixed-wing unmanned aerial vehicles: controller designs and flight tests in IET Control Theory & Applications, vol. 5, no. 18, pp. 2156-2167, 2011.



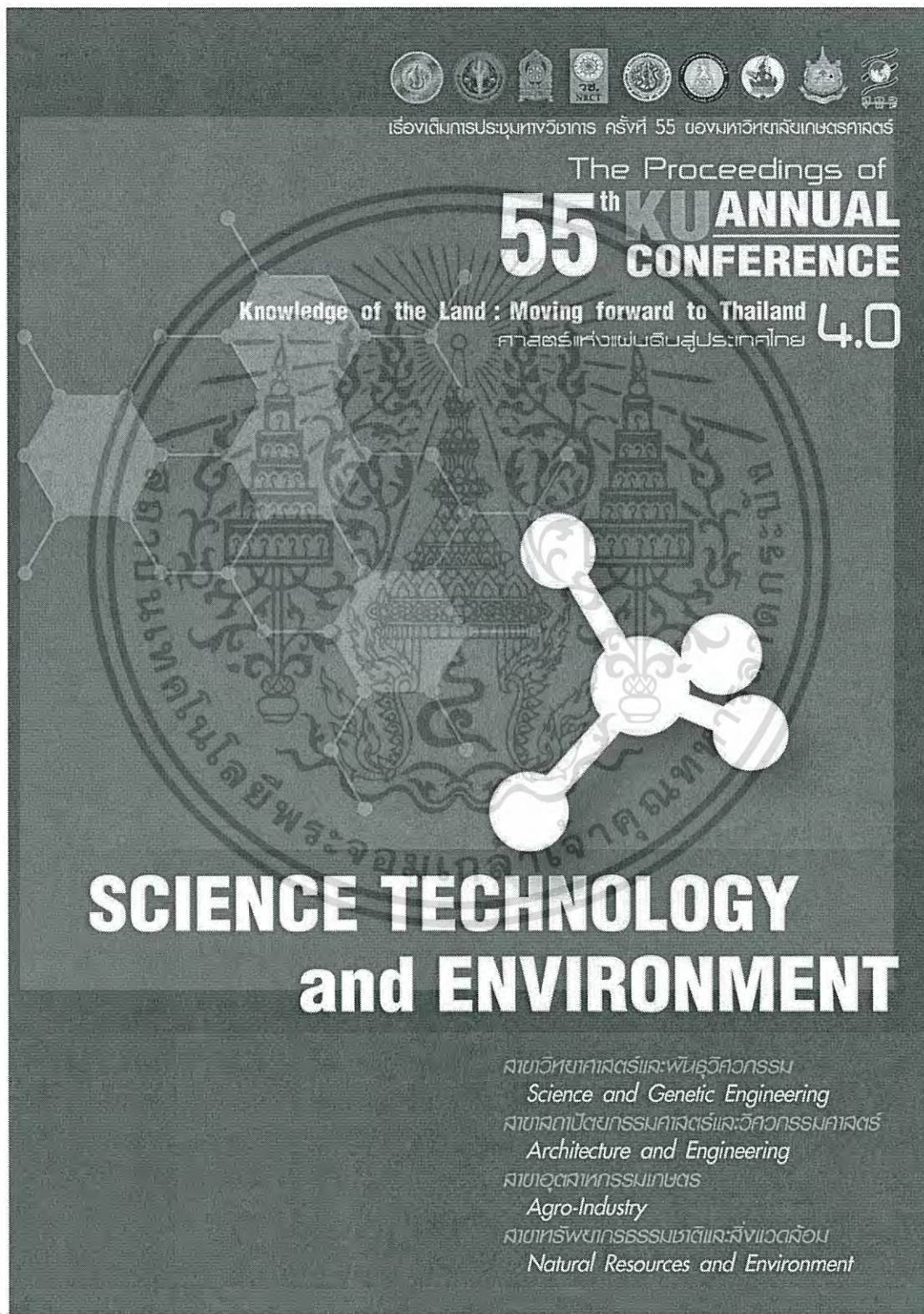
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- S. Ritthanont, J. Chaoraingern, V. Tipsuwanporn and A. Numsomran. 2017 “The Design of 2-DOF Fractional Order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controller For Coupled-Tank Process.” 492-499. In The 55th Kasetsart University Annual Conference, Engineering, Vol.2 Bangkok: Kasetsart University.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อผู้ยืมเพื่อพิมพ์เผยแพร่หรือใช้ในงานอื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24. สด.วศ.35/O162 การศึกษาคุณค่า ความเชื่อ บรรทัดฐาน และพฤติกรรมการเลือกที่อยู่อาศัย โดยคำนึงถึงความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล..... 450
Study of Green Value, Belief, Norm and Behavior of People in Bangkok and Vicinity in Selecting Green Residence
โดย ชุติมา สัจจทอง เบญจพล เวทยิววัฒน์
และปิยนุช เวทยิววัฒน์
25. สด.วศ.37/O164 การฟื้นฟูปูทางชีวภาพดินปนเปื้อนน้ำมันเครื่องที่ใช้แล้ว โดยใช้จุลินทรีย์เฉพาะ...460
Bioremediation of Soil Contaminated with Used Lubricating Oil Using the Specific Microorganism
โดย รัตนาภรณ์ สร้อยผาบ และสุชาติ เหลืองประเสริฐ
26. สด.วศ.39/O171 การเปรียบเทียบการโหลดโมดูลโปรแกรมประยุกต์รูปแบบซีแอลเอฟบนไมโครคอนโทรลเลอร์อาร์มคอร์เท็กซ์เอ็ม 7.....468
Comparison of ELF Application Module Loading on ARM Cortex-M7 Microcontroller
โดย เตชวาท ศรีสายหยุด และณัฐวุฒิชัยญแก้ว
27. สด.วศ.40/O175 การประเมินปริมาณน้ำท่าและองค์ประกอบของสมดุลน้ำ ในลุ่มน้ำเพชรบุรี โดยแบบจำลอง Soil and Water Assessment Tool.....476
Runoff Estimation and Estimation of Water Balance Components of Phetchaburi Basin Using Soil and Water Assessment Tool
โดย วรวัชร เมงสาโม่ง และกอบเกียรติ ผ่องพุฒิ
28. สด.วศ.41/O190 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของปลากะตักแห้งเพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการคัดขนาด..... 484
Study on Physical Property of Dried Anchovy: Criteria for Sizing
โดย อำนวย คุณตะคุ เอกสิทธิ์ ศรีธรรม
เอกพงษ์ ธีวัตโสภณ และสาทิป รัตนภาสกร
29. สด.วศ.42/O191 The Design of 2-DOF Fractional Order PI^1D^d Controller for Coupled-Tank Process..... 492
By Sarasit Ritthanont Jutarut Chaoraingern
Vittaya Tipsuwanporn and Arjin Numsomran

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Design of 2-DOF Fractional Order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controller for Coupled-Tank ProcessSarasit Ritthanon^{1*}, Jutarut Chaoraingern¹, Vittaya Tipsuwanpom¹ and Arjin Numsomran¹

ABSTRACT

This paper describes the design of two degrees of freedom (2-DOF) fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller for coupled-tank process. Due to uncertainty, nonlinear characteristic of coupled-tank process, it is challenged plant for testing performance of the controller. By using the proposed method, the mathematical model of process is estimated from experimental data for model identification. Then, the 2-DOF fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller is designed and optimized by minimizing the function of integral square error (ISE) performance index. Simulation validates theoretical analysis, and demonstrates the enhanced performance of the fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller for coupled-tank process compared with integer order PID controller.

Key words: 2-DOF Fractional-order Control, PID Control, Coupled-Tank Process

*Corresponding author; e-mail address: mr.sarasit@gmail.com

¹Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INTRODUCTION

The control of liquid level is an essential function in a diverse range of industrial process. Controller design several models have been developed and implemented till present. In this paper, an implementable of fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ controller (YangQuan et al., 2009) is developed and evaluated. Main contributions are to test the performance of two degrees of freedom (2-DOF) fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ control on coupled-tank process

Fractional order proportional-integral-derivative (FO PID) control was proposed algorithms for the control of dynamic systems (Oustaloup et al., 1995). This paper focuses on the design of 2-DOF fractional order $PI^\lambda D^\mu$ controller for coupled-tank process. By using the proposed method, the mathematical model of process is estimated from experimental data for model identification. Then, designed and optimized by minimizing the function of ISE performance index. Simulation validates theoretical analysis and demonstrates the enhanced performance of the fractional order $PI^\lambda D^\mu$ controller compared with integer order PID controller.

MATERIALS AND METHODS

1. Coupled-Tank Process

Consider Coupled-tank process configured into single input single output (SISO) system in Fig.1. The performance design in the interacting condition. The target is to control the level height of water in tank2 $h_2(t)$ by input voltages to pump $u_1(t)$. Mass balances and Bernoulli's law yield the linearized dynamics is represented by

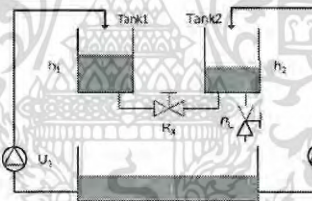


Figure 1 Schematic of Coupled-Tank Process

$$\begin{aligned} \frac{dh_1(t)}{dt} &= -\frac{\beta_s a_{12}}{A_1} \sqrt{2g(h_1(t) - h_2(t))} + \frac{k}{A_1} u(t) \\ \frac{dh_2(t)}{dt} &= -\frac{\beta_s a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2(t)} + \frac{\beta_s a_{12}}{A_2} \sqrt{2g(h_1(t) - h_2(t))} \end{aligned} \quad (1)$$

Where A_1 and A_2 are cross section area of tank1 and tank2 (cm^2), a_2 is a cross section area of outlet of tank2 (cm^2), a_{12} is a cross section area of jointed pipe between tank1 and tank2 (cm^2), β_s is a value ratio at the outlet of tank2, β_s is a value ratio between tank1 and tank2, g is the gravity (cm^2/s) and k is the gain of pump ($\text{cm}^3/\text{V}\cdot\text{s}$) according to (1) is linearized as (2).

$$\begin{aligned} \frac{dH_1(t)}{dt} &= \frac{1}{T_{12}}(-H_1(t) + H_2(t)) + \frac{k}{A_1}U(t) \\ \frac{dH_2(t)}{dt} &= -\frac{1}{T_2}H_2(t) + \frac{1}{T_{12}}(H_1(t) - H_2(t)) \end{aligned} \tag{2}$$

where $T_{12} = \frac{A_1}{\beta_1 a_1} \sqrt{\frac{2(\bar{h}_1 - \bar{h}_2)}{g}}$, s $T_2 = \frac{A_2}{\beta_2 a_2} \sqrt{\frac{2\bar{h}_2}{g}}$, s

\bar{h}_1 and \bar{h}_2 is a water level at operating point of coupled-tank process, T_{12} is a time constant between tank1 and tank2, T_2 is a time constant of tank2 and k is a gain of pump. For the (2) can be modeled as the (3).

$$\frac{H_2(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{K}{T_{12}T_2s^2 + (T_{12} + 2T_2)s + 1}, K = \frac{kT_2}{A_2}, \text{cm/V} \tag{3}$$

2. Model Identification and Validation

In Fig. 2. The open-loop step response of coupled-tank process without controller is presented. The process identification as a second order plus dead time model has been used for approximating the process transfer function (TF). From experimental data, model can provide as (4). The validated result in Fig.2 is showing a performance of the model identification is 98.97% best fit at 0.543% error.

$$G(s) = \frac{1.212}{2345s^2 + (759.8)s + 1} e^{-52.7s} \tag{4}$$

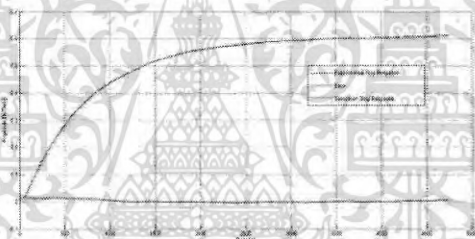


Figure 2 Process Optimization Using Model Fit to Data

3. Frequency-domain Analysis

A bode diagram in Fig. 3. represents a frequency domain analysis as stable process with gain margin is 28.1 dB at frequency 0.445 rad/s and phase margin is 144 deg. at frequency 0.00971 rad/s.

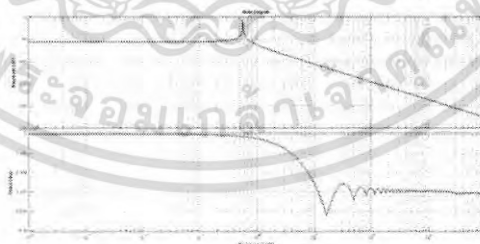


Figure 3 Bode Diagram of Process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. A Definition of Fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ Control

A differentiation- integration operator used in fractional calculus is defined as:

$${}_a D_t^q = \begin{cases} \frac{d^q}{dt^q} & q > 0 \\ 1 & q = 0 \\ \int_a^t (dt)^{-q} & q < 0 \end{cases} \quad (5)$$

where q is the fractional-order. a and t are the limits of the operation.

A definition for fractional derivatives given by Grunwald–Letnikov (D. Xue, 2007) is shown as follows:

$${}_a D_t^q f(t) = \frac{d^q f(t)}{d(t-a)^q} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\frac{t-a}{N} \right]^{-q} \sum_{j=0}^{N-1} (-1)^j \binom{q}{j} f\left(t-j \left[\frac{t-a}{N} \right]\right) \quad (6)$$

where N is the first integer which is not less than q i.e. $n-1 \leq q < n$

For functions $f(t)$ having n continuous derivatives for $t \geq 0$ where $n-1 \leq q < n$, The Laplace transforms of fractional integral and derivative are given as follows:

$$L\left\{{}_a D_t^q f(t)\right\} = s^q F(s) \quad (7)$$

5. Refined Oustaloup's approximate realization method

In this paper, a refined Oustaloup's approximate realization method (D. Xue, 2007) is applied for approximating the fractional-order derivative (s^α) in the specified frequency range (ω_l, ω_h) to a continuous rational transfer function which can be written as

$$s^\alpha \approx \left(\frac{d\omega_h}{b}\right)^\alpha \left(\frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1-\alpha)s^2 + b\omega_h s + d\alpha}\right) \prod_{k=1}^N \frac{s + \omega_k'}{s + \omega_k} \quad (8)$$

$$\text{where } \omega_k' = \left(\frac{d\omega_k}{b}\right)^{\frac{\alpha-2k}{2N+1}}, \omega_k = \left(\frac{b\omega_k}{d}\right)^{\frac{\alpha+2k}{2N+1}}, b = 10, d = 9$$

6. The Fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ Controller Design

A fractional-order PID controller is the $PI^\lambda D^\mu$ controller involving an integrator of order λ and a differentiator of order μ . Fig. 4. depicts a block-diagram of FOPID which has a control characteristic described by bode plot in Fig.6. The transfer function of the $PI^\lambda D^\mu$ controller can be expressed as

$$G_{FOPID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p + k_i \frac{1}{s^\lambda} + k_d s^\mu, \quad (\lambda, \mu > 0) \quad (9)$$

where $G_{FOPID}(s)$ is the transfer function of the controller, $E(s)$ is an error, and $U(s)$ is a controller output, λ and μ are real numbers.

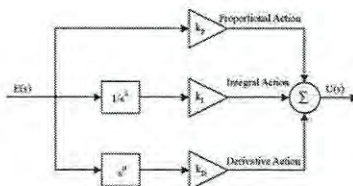


Figure 4 Block-diagram of FOPID

7. 2-DOF Fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ Controller

A set-point filter type (SF) of 2-DOF Fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ control structure is shown in Fig. 5, where the controller consists of two compensators $G_{FOPID}(s)$ and $G_{FOF}(s)$. In order to enhance the control performance, set-point filter $G_{FOF}(s)$ has been designed as a transfer function written in (10). (A. Ates, 2016)

$$G_{FOF}(s) = \frac{(1-\beta)(k_d/k_i)s^\mu + (1-\alpha)(k_p/k_i)s^\lambda}{1 + (k_p/k_i)s^\lambda + (k_d/k_i)s^\mu} \tag{10}$$

where $(\lambda, \mu > 0, \beta = 0.7555, \alpha = 2.1217)$



Figure 5 Set-point filter type 2-DOF Fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ Control Structure

RESULTS AND DISCUSSION

In order to validate the performance of the fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ controller designed for coupled-tank process, a simulation application is developed in SIMULINK, MATLAB. The comparison between the response results from the one degree of freedom (1-DOF), 2-DOF of $PI^\lambda D^\mu$ fractional-order control and integer-order (IO) PID control is made.

1. Comparative Performance between IO PID and FO PID

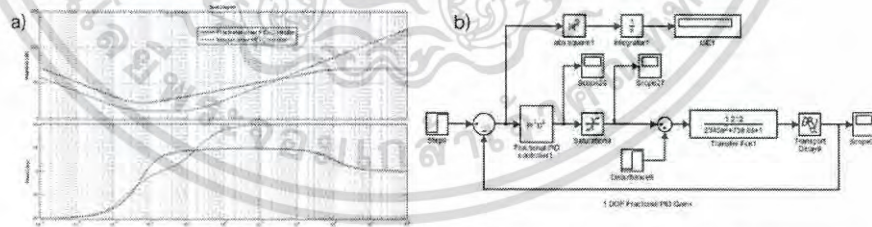


Figure 6 a) Bode diagram of controllers, where a blue line shows bode plot of $PI^\lambda D^\mu$ controller, a green line shows bode plot of PID controller, and b) Simulink of 1-DOF fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Initially the PID parameters are set to $K_p = K_i = K_d = 1$, $\lambda = \mu = 0.5$. Search limits are set to $K = [-100; 100]$ for gains $\lambda = [1.01; 1.90]$ and $\mu = [0.01; 0.90]$. Specifications are as follows. Gain margin is set to 10 dB, phase margin is set to 65 degrees. Using ISE optimization with these settings leads to the following controller TF. IO PID controller (11) and FO PID controller (12)

$$G_{PID}(s) = 3.7282 + 0.00837 \frac{1}{s} + 19.2407s \quad (11)$$

$$G_{FOPI}(s) = 3.72823 + 0.00837 \frac{1}{s^{1.55}} + 19.240797s^{0.49} \quad (12)$$

It can be seen in Fig. 7a that the response of fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ control has more value of overshoot but less settling time at 254 second and the value of steady state error is zero.

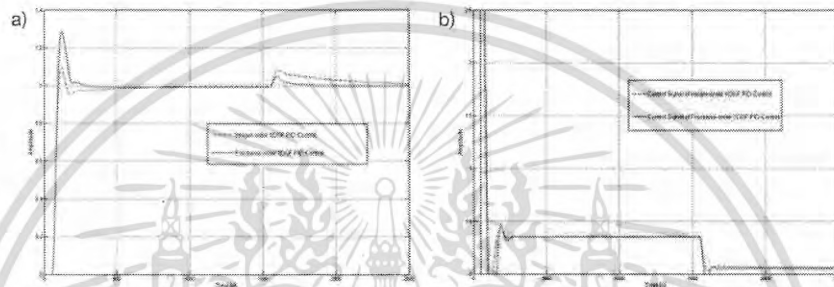


Figure 7 a) Step Responses, and b) Control signal, of FO $PI^\lambda D^\mu$ controller compared with IO PID controller

2. Fractional Parameter (λ, μ) Optimization

To validate appropriate values, we plot results of ISE, with respect to λ and μ which are enumerated from 0.5 to 1.9 with step of 0.1 and approximate order $N = 5$. The proper values of fractional parameter (λ, μ) are in the range of $\lambda = [1.55; 1.68]$ and $\mu = [0.49; 0.57]$ respectively.

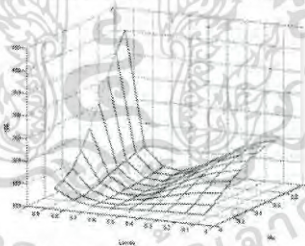


Figure 8 Appropriate values of λ and μ (ISE)

3. 2-DOF Fractional-order $PI^\lambda D^\mu$ Controller

The control structure in fig.5 offers a more powerful means to limit the rate of the change in the set point variable. It enables us to avoid the large overshoot of dynamic response. Due to the set-point

filter TF in (10), parameters and optimized SF parameters are given by $[k_p = 3.7282, k_i = 0.00837, k_d = 19.2407, \lambda = 1.55, \mu = 0.49, \alpha = 0.45, \beta = 0.45]$, we obtain compensators $G_{FOSF}(s)$ as

$$G_{FOSF}(s) = \frac{(1-0.45)(19.2407/0.00837)s^{0.49} + (1-0.45)(3.7282/0.00837)s^{1.55}}{1 + (3.7282/0.00837)s^{1.55} + (19.2407/0.00837)s^{0.49}} \quad (13)$$

A comparison results shown in Fig. 9. It can be seen that the overshoot in the dynamic response of Fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ is suppressed and the settling time has been decreased to 198 sec.

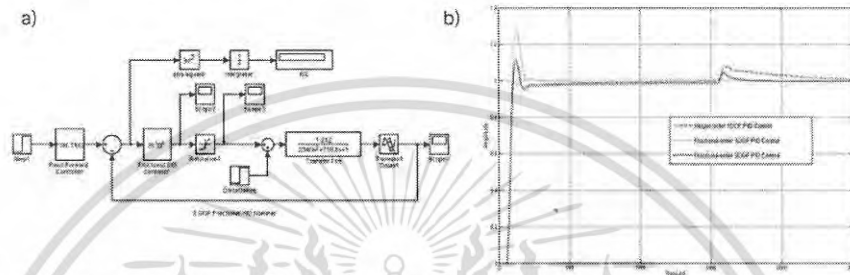


Figure 9 a) Simulink of 2-DOF fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller. b) Step Responses of (1-DOF, 2-DOF) fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller compared with (1-DOF) integer-order PID controller

4. Robustness to Process Perturbations K

This paper considers the perturbation of process gain occurred from changing pump efficiency caused by temperature rising. Nominal parameter process gain 1.212 and $\pm 30\%$ perturbation are 1.5756, 0.8484

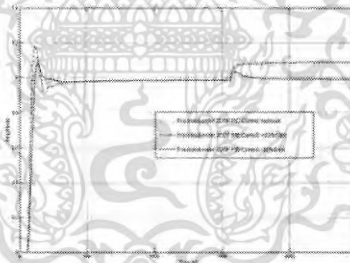


Figure 10 Step Responses of 2-DOF Fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller with process gain perturbation

Resulting time responses are shown in Fig.10 The solid line shows a response of the nominal plant, the dashed line shows a response of the $+30\%$, while the dotted line shows a response of the -30% process gain perturbation. It can be observed that the 2-DOF fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller can achieve robustness evaluation for nominal and perturbed plant. From this results, 2-DOF fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller can achieve both of control performance and robustness evaluation.

CONCLUSION

In this paper, a 2-DOF fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ control is examined on coupled-tank process. The proposed 2-DOF fractional-order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller is implemented to achieve control performance and robustness of control system. The controller design of the proposed system has been derived, and the effective performance has been validated via MATLAB simulation. The results from the evaluation can keep stability and satisfy the performance specification even if the parameters of the plant are perturbed.

REFERENCES

- A. Ates and C. Yeroglu. 2016. Online Tuning of Two Degrees of Freedom Fractional Order Control Loops. *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, Vol.4 No.1: pp. 5-11, 2016.
- A. Tepajakov, E. Petlenkov and J. Belikov, 2011. FOMCON: Fractional-order modeling and control toolbox for MATLAB, pp. 684-689. *In 2011 Proceedings of the 18th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (MIXDES)*, June 16-18, 2011 Gliwice, Poland.
- D. Xue, Y.Q. Chen and D.P. Atherton. 2007. *Linear Feedback Control Analysis and Design with MATLAB*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia
- I. Podlubny. 1999. Fractional-order systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ -controllers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44: pp. 208-214.
- Jaisue, R., Charaingern, J., Tipsuwannorn, V., Numsomran A. and holkeaw, P. 2012. A design of fuzzy PID controller based on ARM7TDMI for coupled-tanks process, pp. 610-613. *In 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Oct. 17-21, 2012, JeJu Island, Korea.
- Kangwanrat, S., Tipsuwannorn V. and Numsomran, A. 2010. Design of PI controller using MRAC techniques for coupled-tanks process, pp. 485-490. *In International Conference on Control Automation and Systems 2010 (ICCAS)*, Oct. 27-30, 2010, Gyeonggi-do, Korea.
- K. Erenturk. 2013. Fractional-Order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and Active Disturbance Rejection Control of Nonlinear Two-Mass Drive System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* vol. 60, no. 9: pp. 3806-3813
- Mituhiko Araki and Hideo Taguchi. 2003. Tutorial Paper Two-Degree-of-Freedom PID Controllers. *International Journal of Control, Automation, and Systems* Vol. 1, No. 4: pp. 401-411.
- Oustaloup A., B. Mathieu and P. Lanusse. 1995. The CRONE control of resonant plants: application to a flexible transmission. *European Journal of Control*, Vol. 1 No.2: pp. 559-576.
- YangQuan Chen, Ivo Petráš and Dingyu Xue. 2009. Fractional Order Control - A Tutorial, pp. 1397-1411. *In American Control Conference 2009*, June 10-12, 2009, St. Louis, MO, USA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายสารสิทธิ์ ฤทธานนท์
ที่อยู่	2018/25 ซ.ประชาสงเคราะห์ 43 ถ.ประชาสงเคราะห์ แขวงดินแดง เขตดินแดง กรุงเทพมหานคร ฯ 10400
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) อุปกรณ์เครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม 2.) การสอบเทียบเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2559-2560	Research Assistant, Control System Laboratory, Department of Instrumentation Engineering, KMITL
พ.ศ.2555-2559	Senior Sales Support Engineer (Measurement product Div.) ABB (Thailand) Lead of Flow & Fields instrument products. ดูแลและให้ข้อมูลทาง เทคนิคต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์ ให้กับทีมงานภายใน และ ลูกค้า
พ.ศ.2554-2555	Production Supervisor Ton-Nam Solution ดูแล Production management , Installation , Commissioning และ งาน After Sales เกี่ยวกับ Application based on Microcontroller Products
พ.ศ.2549-2553	Calibration Service Engineer, Quality Manager Cal. Lab. Metrology ผู้จัดการดูแลระบบคุณภาพตามมาตรฐาน ISO 17025, สอบเทียบเครื่องมือ วัดทางอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้