สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง

THE COUPLED-TANK PROCESS LABORATORY

T 061423

นายสุระศักดิ์ พลค้อ

นายอนุชา วระแสน

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 61423
วัน,เดือน,ปี 17 ก.ค. 2549

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE COUPLED-TANK PROCESS LABORATORY

SURASAK PONKOR

ANUCHA WARASAEN

A THESIS SUBMITED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECNOLOGY LADKREBANG

2004

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์ ชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง

THE COUPLED-TANK PROCESS LABORATORY

นักศึกษาผู้จัดทำ นายสุระศักดิ์ พลค้อ **รหัสประจำตัว** 45015583

นายอนุชา วระแสน **รหัสประจำตัว** 45015585

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม

ปีการศึกษา 2547

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.อาจินต์ น่วมสำราญ	
รศ.วิริยะ กองรัตน์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดี ที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2548

สถานที่สอบ ณ ห้องสอบปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชารับรองแล้ว

(รศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	ชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง
	THE COUPLED-TANK PROCESS LABORATORY
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายสุระศักดิ์ พลค้อ
	นายอนุชา วระแสน
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.อาจินต์ น่วมสำราญ
	รศ.วิริยะ กองรัตน์
ปีการศึกษา	2547

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและการสร้างชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง เราจึงสามารถใช้ชุดทดลองที่ได้สร้างขึ้นนี้ในการทดลองควบคุมกระบวนการ เนื่องจากโรงงานส่วนใหญ่จะใช้วิธีการควบคุมที่เป็นแบบอัตโนมัติ เพื่อนำไปควบคุมกระบวนการผลิตสินค้า ดังนั้น เราจึงจำเป็นต้องมีความชำนาญในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์พีไอดี ตัวควบคุมกระบวนการ กระบวนการส่วนใหญ่ในประเทศไทยปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ในขณะที่เครื่องจักรหยุดทำงานแล้วใช้วิธีการลองผิดลองถูก (Trial & Error) ชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังนั้นได้ถูกสร้างขึ้นให้มีการทำงาน หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมือนกระบวนการควบคุมระดับจริง และสามารถสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมการทำงานด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดี (PID) ด้วยการใช้โปรแกรม MATLAB และการสื่อสารผ่านการ์ดรุ่น PCL-818 และสามารถแสดงผลที่ได้จากการควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์ในเวลาเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	TheCoupled-Tank Process Laborator
Authers	Mr.Surasuk Ponkoo
	Mr.Anucha Warasaen
Thesis Advisor	Asst.Prof. Arjin Numsomran
	Assoc.Prof. viriya Kongrat
Year	2004

ABSTRACT

This thesis is represent about design and building the coupled tank process laboratory. We can use coupled tank process laboratory to experiment controlling process. Because most of industrials are used automatic controller to controlled production, so we should experienced to setting a parameter PID of controller for control process. Most of process in Thailand set controller parameter by off-line setting and method of this is Trial and Error. The coupled tank process laboratory was built by same operating or same mathematics model with real level control process. It can operate by a computer to control a process variable by tuning parameter PID control. The computer program was built by Matlab and show a process parameter in the same time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับคำปรึกษา และความอนุเคราะห์ที่ดีจาก ผศ.อาจินต์ น่วมสำราญ และ รศ.วิริยะ กองรัตน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอย่างสูงที่ได้ให้การสนับสนุน และคำปรึกษาที่ดีที่เกี่ยวกับงานวิจัยจนสำเร็จตามจุดประสงค์

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง และทุก ๆ ความช่วยเหลือ

ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกท่านที่ได้อยู่ร่วมกันทำงานและให้กำลังใจพร้อมทั้งความช่วยเหลือมา โดยตลอดขอบคุณพี่เทียนชัย สุขศรี กับคำแนะนำในด้านการเขียนโปรแกรม MATLAB และการเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมกับการใช้งาน

และที่มิเคยลืม ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อและคุณแม่ ที่ให้การสนับสนุนมาโดยตลอดมาจนปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	**1**
1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์	1
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	2
บทที่ 2 โครงสร้างและส่วนประกอบของชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง	**3**
2.1 แบบจำลองชุดทดลองของกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง	3
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	3
2.3 การออกแบบวงจรที่ใช้ทดลองกับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง	5
2.3.1 กระบวนการระดับน้ำ 2 ถัง	5
2.3.2 เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ	6
2.3.3 วงจรปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ	8
2.3.4 ปั๊มน้ำ	10
2.3.5 วงจรออปแอมป์ที่ใช้ขับมอเตอร์ (Drive Motor)	11
2.3.6 แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์	12
2.3.7 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A	13
2.3.7.1 ส่วนแปลงสัญญาณ A/D	14
2.3.7.2ส่วนแปลงสัญญาณ D/A	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการหาแบบจำลองของกระบวนการและโปรแกรม MATLAB	**15**
3.1 วิธีการหาแบบจำลองของกระบวนการโดยใช้วิธีการหาค่าสะสมของผลตอบสนอง	15
3.2 ทฤษฎี Simulink	18
3.2.1 Simulink Block ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบควบคุม	19
3.2.1.1 ส่วน Continuous	19
3.2.2.2 ส่วน Source	20
3.2.2.3 ส่วน Sink	20
3.2.2.4 ส่วน Math Operations และ Signal Routing	20
3.2.3 การสร้างแบบจำลองตัวควบคุม	21
3.2.4 การสร้าง Subsystem Block	22
3.2.5 การใช้ตัวแปรใน MATLAB ทำงานร่วมกับ Simulink	22
3.2.6 การจำลองการทำงานระบบควบคุม	23
3.2.7 การกำหนดพารามิเตอร์ในการป้อนสัญญาณอินพุท	23
3.2.8 การกำหนดพารามิเตอร์ในการดูสัญญาณเอาท์พุท	24
3.2.9 การกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน	24
บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี	**26**
4.1 ระบบควบคุม	26
4.2 ประเภทของการควบคุม	26
4.3 ชนิดของการควบคุม	27
4.3.1 ตัวควบคุมแบบ Proportional (P)	28
4.3.2 ตัวควบคุมแบบ Proportional Derivative (PD)	28
4.2.3 ตัวควบคุมแบบ Proportional Integral (PI)	28
4.2.4 ตัวควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID)	28
4.2.4.1 รูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID	29
4.2.5 ผลของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบกับกระบวนการ	31
4.2.6 การปรับค่าของตัวควบคุม PID	34
4.2.6.1 การปรับค่าของตัวควบคุม PID โดยวิธีของ Ziegler-Nichols	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 การทดลองหาแบบจำลองของกระบวนการ และการทดลองควบคุมกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง	**39**
5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง	39
5.2 การทดลองหาผลตอบสนองของถังใบที่ 1	39
5.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำของถังใบที่ 1	40
5.3 การทดลองหาผลตอบสนองของถังใบที่ 2	44
5.4 การทดลองควบคุมกระบวนการแบบ Single Input Single Output และการทดลองควบคุมกระบวนการแบบ Two Input Two Output	47
5.4.1 วิธีการหาแบบจำลองของกระบวนการโดยวิธีการ สะสมผลตอบสนอง	48
5.4.2 การออกแบบตัวควบคุม	52
5.4.3 การทดลองควบคุมกระบวนการแบบ Single Input Single Output	53
5.4.3.1 การทดลองควบคุมกระบวนการแบบ SISO เมื่อกระบวนการถูกรบกวน	53
5.4.4 การทดลองควบคุมกระบวนการแบบ Two Input Two Output	55
บทที่ 6 สรุปผลการทำวิจัยและข้อเสนอแนะ	**58**
6.1 บทสรุป	58
6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา	58
6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา	59
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก	61
ภาคผนวก ก	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงแบบจำลองของระบบสองถัง(Coupled-Tank)	3
2.2 ชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง	5
2.3 ถังน้ำที่ใช้ในการทดลอง	6
2.4 เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดระดับน้ำ	6
2.5 วงจรปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ	8
2.6 อุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ	8
2.7 ปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลอง	10
2.8 วงจรออปแอมป์แบบไม่กลับเฟส(Noninverting)ที่ใช้ขับมอเตอร์	11
2.9 อุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำ	12
2.10 วงจรแหล่งแหล่งจ่ายไฟขนาด ± 15 V, 3 A	12
2.11 อุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟขนาด ± 15 V, 3 A	13
2.12 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A	14
3.1 ผลตอบสนองของกระบวนการ	16
3.2 ไดอะล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์สำหรับบล็อก Scope	24
3.3 ไดอะล็อกที่ใช้สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน	25
4.1 พื้นฐานระบบควบคุม	26
4.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบเปิด	27
4.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปิด	27
4.4 รูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดี	29
4.5 ผลของ Proportional Band ต่อกระบวนการควบคุมแบบ PID	31
4.6 ผลของ Integral Time ที่มีต่อผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมแบบพีไอดี	32
4.7 แสดงผลของ Derivative Action	33
5.1 เป็นผลตอบสนองของกระบวนการ	38
5.2 เป็นผลตอบสนองของถังใบที่ 1	39
5.3 เป็นผลตอบสนองของถังใบที่ 1 เมื่อมีการปล่อยน้ำให้ไหลออกจากถัง	39
5.4 การใช้ simulink ในการจำลองกระบวนการ	40
5.5 เป็นผลตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการจำลอง	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการ	41
5.7 ผลตอบสนองของกระบวนการ โดยต้องการควบคุมระดับน้ำที่ 50 %	41
5.8 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการ	42
5.9 เป็นผลตอบสนองของกระบวนการจริงโดยต้องการควบคุมระดับน้ำที่ 50 %	42
5.10 ผลตอบสนองของระบบที่ระดับต่างๆ	43
5.11 ผลตอบสนองของกระบวนการ Single Tank#2	43
5.12 เป็นผลตอบสนององถังใบที่ 2	44
5.13 เป็นผลตอบสนองของถังใบที่ 2 เมื่อมีการปล่อยน้ำให้ไหลออกจากถัง	44
5.14 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการ	45
5.15 ผลตอบสนองของกระบวนการ	45
5.16 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการ	46
5.17 ผลตอบสนองของกระบวนการ	46
5.18 การใช้ simulink ป้อนอินพุทแบบ unit step	47
5.19 ผลตอบสนองของกระบวนการ	47
5.20 เมื่อเพิ่มการอินติเกรทเข้าไป	48
5.21 ผลตอบสนองของกระบวนการ	48
5.22 แบบจำลอง simulink	49
5.23 ผลตอบสนองของกระบวนการ	49
5.24 การเปรียบเทียบกระบวนการจริงกับแบบจำลอง	50
5.25 ผลตอบสนองของกระบวนการจริงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง	50
5.26 ผลตอบสนองของกระบวนการ	51
5.27 การใช้โปรแกรม Simulink ในการควบคุมกระบวนการ	51
5.28 ผลตอบสนองของกระบวนการ	52
5.29 แบบจำลองกระบวนการถูกรบกวน	52
5.30 ผลตอบสนองของกระบวนการที่ถูกรบกวน	53
5.31 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการ	53
5. 32 ผลตอบสนองของกระบวนการที่ถูกรบกวนหลังจากการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดี	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.33 โปรแกรม Simulink ในการทดลองควบคุมกระบวนการแบบ (TITO)	54
5.34 ผลตอบสนองของกระบวนการในถังใบที่ 1	55
5.35 ผลตอบสนองของกระบวนการในถังใบที่ 2	55
5.36 ผลตอบสนองของกระบวนการของถังใบที่ 1 และ 2	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รายละเอียดทางเทคนิคของปั้มน้ำ	10
5.1 แสดงสมรรถนะของกระบวนการในแต่ละการทดลอง	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของงานวิจัย

ในปัจจุบันวงการอุตสาหกรรมมีความก้าวหน้าอย่างมาก ทำให้กระบวนการควบคุมต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เป็นกระบวนการที่มีความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้น ดังนั้น การทำงานในการควบคุมกระบวนการจึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งต่อผู้ควบคุมเครื่องจักร (Operator) การที่มีความเข้าใจในกระบวนการควบคุมจะทำให้มีประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้น ส่วนมากเรามีความจำเป็นอย่างมาก ที่ต้องทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory) แต่อุปกรณ์ที่ใช้ในส่วนของห้องปฏิบัติการล้วนแล้ว แต่มีขนาดใหญ่มีน้ำหนักมาก อีกทั้งยังมีราคาแพง และในการทำงานแต่ละครั้งยังใช้เวลามากและมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงได้นำเอาชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง นำมาใช้เพื่อแทนกระบวนการจริง เนื่องจากว่าแบบชุดทดลองการควบคุมกระบวนการนั้นสามารถที่จะทำการทดลองแบบลองผิดลองถูก (Trial and Error) ได้ โดยไม่ทำให้ระบบเสียหาย รวมถึงความสะดวกในการใช้เกี่ยวกับงานออกแบบได้ง่าย ราคาถูก และมีขนาดเล็ก สามารถนำกลับไปทำการทดลองที่บ้าน เพื่อที่จะเพิ่มความชำนาญได้ เพียงแต่แค่มีคอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ประกอบ

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษา และการออกแบบ รวมถึงการสร้างแบบจำลองการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับ (Level Control) โดยให้มีการควบคุมและการแสดงผลด้วยคอมพิวเตอร์ สามารถปรับแต่ง (Tune) ค่าพารามิเตอร์พีไอดี ของตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) เพื่อให้เกิดความชำนาญในการควบคุมกระบวนการควบคุมระดับยิ่งขึ้น มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง
2. เพื่อศึกษาถึงทฤษฎี หลักการทำงาน และโครงสร้างของกระบวนการควบคุม
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล และการเปลี่ยนแปลงระดับของของเหลวภายในถัง
4. ศึกษาเกี่ยวกับตัวตรวจจับ (Sensor) ที่ใช้ในการตรวจจับ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับของของเหลวภายในถัง
5. ศึกษาการควบคุมและออกแบบตัวควบคุมเพื่อควบคุมระดับของของเหลวภายในถัง
6. นำตัวควบคุมที่ออกแบบมาใช้กับชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1. สร้างชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง
2. ออกแบบวงจรที่ใช้เกี่ยวกับการควบคุม
3. สามารถออกแบบตัวควบคุมเพื่อใช้ในการควบคุมได้อย่างเหมาะสม
4. เขียนโปรแกรมโดยใช้ MATLABในการสร้างตัวควบคุม
5. สามารถที่จะควบคุมระดับของของเหลวของกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง แบบที่มีหนึ่งอินพุทหนึ่งเอาท์พุท (SISO) ได้
6. สามารถที่จะควบคุมระดับของของเหลวของกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง แบบที่มีสองอินพุทสองเอาท์พุท(TITO)ได้

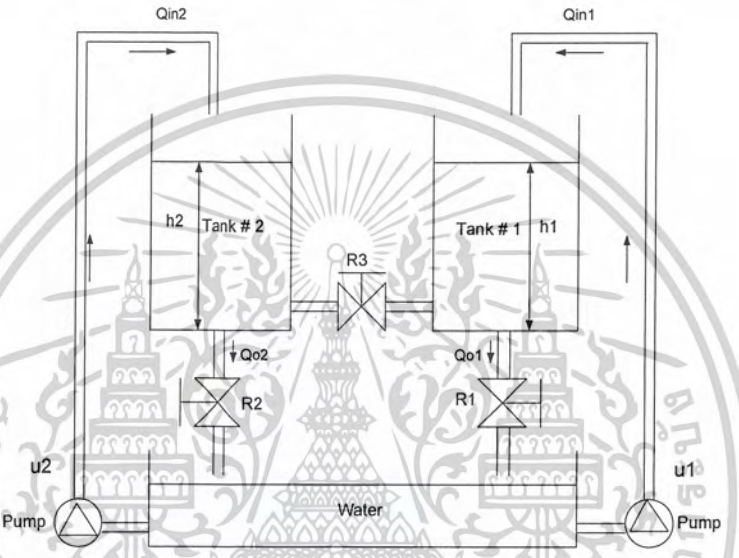
1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ในการศึกษาถึงปริญญานิพนธ์เล่มนี้ เริ่มจากการศึกษาถึงการทำงานของกระบวนการควบคุมจากกระบวนการจริง ๆ โดยศึกษาหลักการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัว จากนั้นก็ศึกษาถึงทฤษฎีและหลักการทำงานของอุปกรณ์ที่นำมาสร้างชุดทดลอง โดยชุดทดลองที่จะออกแบบและสร้างได้แก่ ชุด Instrument Amp , วงจรขยาย , วงจรภาคจ่ายไฟ ซึ่งเป็นส่วนของ Hardware และในส่วนของ Solfware ก็ทำการศึกษาถึงส่วนของการใช้ Matlab ในการสร้างการควบคุมแบบพีไอดีที่ผู้ใช้สามารถปรับค่า ได้ด้วยตัวเอง เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และสามารถควบคุมกระบวนจริงให้มีการทำงานและแสดงค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
โครงสร้างและส่วนประกอบของชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง

2.1 แบบจำลองชุดทดลองของกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองของระบบสองถัง (Coupled-Tank)

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง ดังที่แสดงอยู่ในรูปแบบจำลองไม่เป็นเชิงเส้น(Non-linier state equations) ดังสมการที่ 2.1

$$A1\frac{dH1}{dt} = K1u1 - R1a1\sqrt{2gH1} - R3a3\sqrt{2gH1 - H2}$$

$$A2\frac{dH2}{dt} = K2u2 - R2a2\sqrt{2gH2} + R3a3\sqrt{2gH1 - H2} \quad (2.1)$$

โดย

H1 คือ ระดับน้ำในถังที่ 1;cm.

H2 คือ ระดับน้ำในถังที่ 2 ;cm

a1 คือ พื้นที่หน้าตัดของรูน้ำด้านออกของถังที่ 1 ;cm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a2 คือ พื้นที่หน้าตัดของรูน้ำด้านออกของถังที่ 2 ;cm^2

a3 คือ พื้นที่หน้าตัดของรูน้ำด้านออกระหว่างถังที่ 1 และ2 ;cm^2

R1 คือ ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อด้านออกจากถังที่ 1

R2 คือ ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อด้านออกจากถังที่ 2

R3 คือ ค่าตำแหน่งวาล์วที่ต่อด้านออกระหว่างถังที่ 1และ2

K1 คือ ค่าอัตราขยายของปั้มตัวที่ 1 ;$cm^3/V.s$

K2 คือ ค่าอัตราขยายของปั้มตัวที่ 2 ;$cm^3/V.s$

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก ;$981cm/s^2$

u1 คือ แรงดันที่จ่ายให้กับปั้มตัวที่ 1 ;V

u2 คือ แรงดันที่จ่ายให้กับปั้มตัวที่ 2 ;V

แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบการควบคุมในระดับอันดับหนึ่งซึ่งเป็นระบบที่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตกับตัวแปรเอาท์พุต

Transfer Function ของระบบอันดับหนึ่ง (First Order) คือ

$$\frac{h_1(s)}{q_1(s)} = \frac{K}{(\tau s + 1)}$$

เมื่อ K คือ ค่า Gain ของระบบ

τ คือ ค่า Time Constant

สำหรับระบบอันดับสอง (Second Order) จะได้ Transfer Function คือ

$$\frac{h_2(s)}{q_1(s)} = \frac{K(s+\beta)}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega n^2}$$

เมื่อ

K คือ ค่า Gain ของระบบ

ω_n คือ ความถี่ธรรมชาติแบบไม่หน่วง (Undemped natural frequency)

ξ คือ อัตราการหน่วง (damping ratio)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การออกแบบวงจรที่ใช้ทดลองกับกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง

ในการควบคุมการทำงานของกระบวนการระดับน้ำ 2 ถัง เพื่อให้สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการนั้น ต้องใช้อุปกรณ์ต่างมากมายหลายชนิดมาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนั้นสามารถแบ่งเป็น 7 ส่วนด้วยกัน ซึ่งประกอบไปด้วย

1. กระบวนการระดับน้ำ 2 ถัง
2. เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดระดับน้ำ
3. วงจรปรับแต่งสัญญาณแรงดันที่ได้รับจากเซ็นเซอร์
4. วงจรขับกระแส
5. ปั๊มน้ำ
6. การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A
7. แหล่งจ่ายไฟ

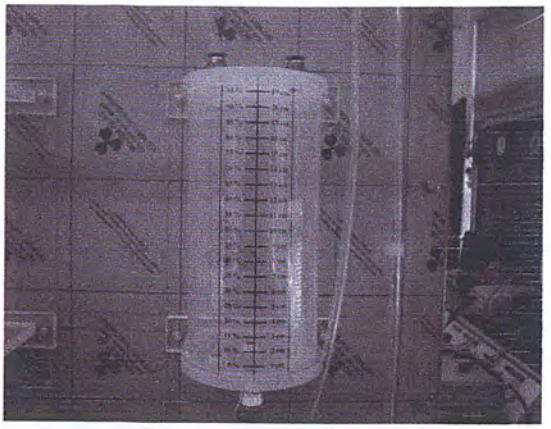
โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองนั้นสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.3.1 กระบวนการระดับน้ำ 2 ถัง

กระบวนการระดับน้ำ 2 ถังนั้นจะประกอบไปด้วยถังน้ำ 2 ใบด้วยกัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.2 ถังน้ำแต่ละใบนั้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกคือ 10 เซนติเมตร ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในคือ 9.4 เซนติเมตร และสูง 20 เซนติเมตร แสดงได้ดังรูปที่ 2.2

รูปที่ 2.2 ชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ถังน้ำที่ใช้ในการทดลอง

2.3.2 เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ

เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำที่เลือกใช้สำหรับกระบวนการนี้จะเลือกใช้ ตัวเซ็นเซอร์แบบความดันของบริษัท Motorolla รุ่น MPX 2010 DP ซึ่งใช้หลักการวัดแบบความดันแตกต่าง โดยจะมีช่วงการวัดเท่ากับ 0-10 KPa และความไวในการวัดคือ 2.5 mV/KPa รูปของตัวเซ็นเซอร์แสดงดังรูปที่ 2.4

รูปที่ 2.4 เซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดระดับน้ำ

การต่อเซ็นเซอร์เพื่อใช้ในการวัดระดับน้ำนั้นจะใช้สายยางขนาด 6 มิลลิเมตร ที่ต่อมาจากด้านก้นถังของถังน้ำแต่ละใบ ต่อเข้าทางด้านความดันสูงของตัวเซ็นเซอร์และทางด้านความดันต่ำของตัวเซ็นเซอร์จะเปิดไว้เพื่อให้เจอกับบรรยากาศ เนื่องจากถังน้ำที่ใช้ในกระบวนการเป็นถังน้ำแบบเปิด จึงทำให้ความดันแตกต่างนั้นขึ้นอยู่กับระดับน้ำเพียงอย่างเดียว โดยความดันแตกต่างที่เข้าสู่ตัวเซ็นเซอร์คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเปิด จึงทำให้ความดันแตกต่างนั้นขึ้นอยู่กับระดับน้ำเพียงอย่างเดียว โดยความดันแตกต่างที่เข้าสู่ตัวเซ็นเซอร์คือ

$$\Delta P = P_{high} - P_{low}$$
$$= (\rho gh + P_{atm}) - P_{atm}$$
$$\Delta P = \rho gh$$

โดย

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ 1000 kg/cm^3

g คือ แรงโน้มถ่วงของโลก 9.81 m/s^2

h คือ ระดับน้ำที่วัด m

ΔP คือ ความดันแตกต่าง KPa

เนื่องจากถังน้ำแต่ละใบสูง 20 เซนติเมตร ดังนั้นความดันแตกต่างสูงสุดที่ตัวเซ็นเซอร์จะได้รับคือ

$$\Delta P = (1000 \times 9.81 \times 0.2)/1000$$
$$= 1.962 \text{ KPa}$$

ดังนั้นจะได้ช่วงความดันแตกต่างเท่ากับ

$$\Delta P = 0 - 1.962 \text{ KPa}$$

และเนื่องจากความไวในการวัดของตัวเซ็นเซอร์คือ 2.5 mV/KPa ดังนั้นตัวเซ็นเซอร์นี้จะให้เอาท์พุตออกมาสูงสุดเท่ากับ

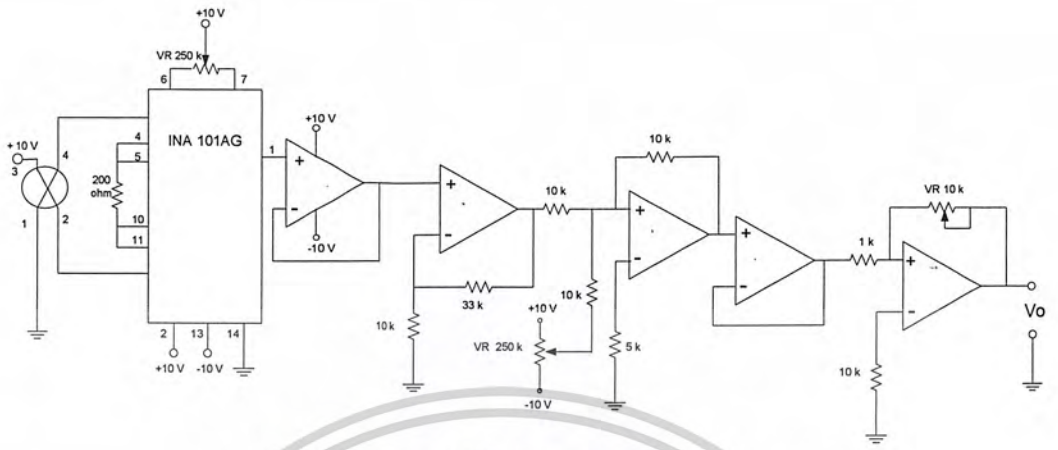
$$V_{out} = (2.5 \times 10^{-3} \times 1.962) + \text{offset}$$
$$= 4.905 \text{ mV} + \text{offset}$$

โดย offset คือ ค่าแรงดันคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากการจ่ายแรงดันไฟเลี้ยงให้กับตัวเซ็นเซอร์ที่มากกว่าหรือน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งเซ็นเซอร์นี้ต้องการไฟเลี้ยงขนาด + 10 Vdc แต่ในการทดลองได้ใช้ไฟเลี้ยงขนาด +15 Vdc จ่ายให้กับตัวเซ็นเซอร์ จึงทำให้เกิดแรงดัน offset ขึ้น

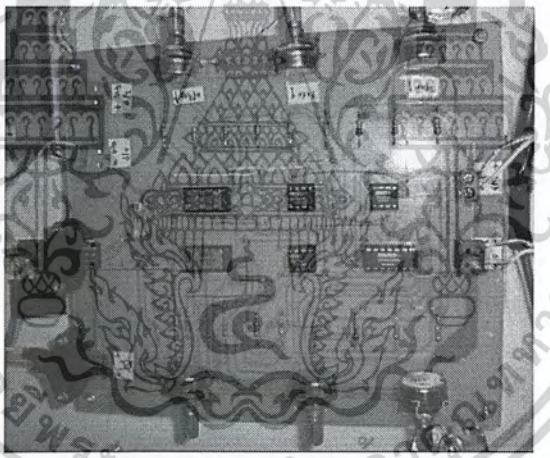
ในการสร้างวงจรจำลองกระบวนการในโครงงานนี้ใช้ออปแอมป์ เป็นอุปกรณ์หลักในการสร้างวงจร ซึ่งมีวงจรดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 วงจรปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ



รูปที่ 2.5 วงจรปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำ

การทำงานของวงจรปรับแต่งสัญญาณนี้จะประกอบไปด้วย 3 ภาคด้วยกัน ซึ่งต่อเรียงกันไป เริ่มตั้งแต่รับสัญญาณแรงดันมาจากตัวเซ็นเซอร์คือ

1. ภาค Instrument Amplifier
2. ภาค Zero
3. ภาค Span

ซึ่งการทำงานของแต่ละภาคอธิบายได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาค Instrument Amplifier

ภาคนี้จะทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณแรงดันที่ได้รับมากจากตัวเซ็นเซอร์ ให้มีขนาดของสัญญาณที่มากขึ้น ก่อนที่จะเข้าสู่ภาค Zero เพื่อให้สามารถปรับแต่งสัญญาณได้ง่ายขึ้น โดยจะเลือกใช้ไอซี เบอร์ INA 101 ของบริษัท Burr-Brown เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการดังนี้

- มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณตามอุณหภูมิต่ำมาก คือ $0.25\mu V/^{\circ}C$
- มีค่าออฟเซ็ตของสัญญาณต่ำ คือ $0.25\mu V$
- มีคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นหรือช่วงการทำงานสูง
- มีค่าซีเอ็มอาร์อาร์สูง คือ 106 *dB* ที่ความถี่ 60 H_z
- มีค่าความต้านทานที่ด้านอินพุตสูง คือ $10^{10}\Omega$

สำหรับอัตราขยายของไอซีเบอร์นี้มีค่าเท่ากับ $\left[1+\frac{40\times10^3}{R_G}\right]$

โดยในการทดลองนี้กำหนดให้ R_G =20Ω ซึ่งจะทำให้ได้อัตราขยายเท่ากับ 201 เท่า ซึ่งอัตราขยายขนาดนี้ จะทำให้สัญญาณแรงดันที่ได้รับมาจากตัวเซ็นเซอร์มีขนาดของสัญญาณที่มากเพียงพอก่อนที่จะเข้าสู่ภาค Zero ต่อไป

ภาค Zero

ภาคนี้จะทำหน้าที่ในการกดขนาดสัญญาณแรงดันที่ได้รับมาจากภาค Instrument Amplifier ให้มีค่าเป็น 0 V โดยใช้หลักการของการบวกลบสัญญาณที่อินพุตของ Op-Amp ซึ่ง Op-Amp ที่ใช้นั้นเลือกใช้ ไอซีเบอร์ OPA 4228 และต่อ Op-Amp แบบ Inverting-Amplifier

ภาค Span

ภาคนี้จะทำหน้าที่ในการขยายสัญญาณแรงดันที่ได้รับมาจากภาค Zero ให้มีค่าเป็น 10 V โดย Op-Amp ที่ใช้นั้นก็จะใช้ไอซีเบอร์ OPA 4228 เช่นเดียวกับภาค Zero และต่อ Op-Amp แบบ Inverting-Amplifier

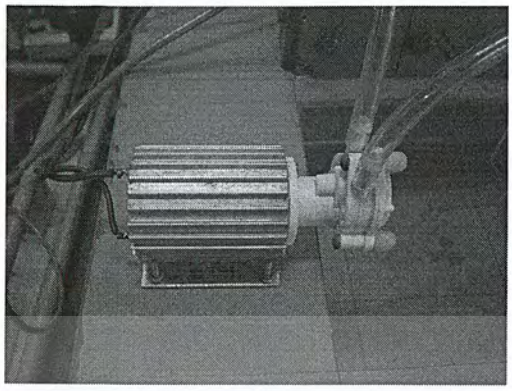
การ Calibrate สัญญาณ

ในการ Calibrate สัญญาณแรงดันสำหรับวงจรปรับแต่งสัญญาณนี้ จะ Calibrate แรงดันให้อยู่ในช่วง 0-10 V โดยวิธีในการ Calibrate คือ

1. ที่ระดับน้ำ 0 % ปรับภาค Zero เพื่อให้สัญญาณแรงดันที่เอาท์พุตมีค่าเป็น 0 V
2. ที่ระดับน้ำ 100% ปรับภาค Span เพื่อให้สัญญาณแรงดันที่เอาท์พุตมีค่าเป็น 10 V
3. ทำซ้ำข้อ1-2ไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้สัญญาณแรงดันเอาต์พุตตามที่ต้องการซึ่งในการ Calibrate จริงๆนั้น จะต้องทำประมาณ 3-5 ครั้ง จึงจะได้ช่วงของสัญญาณแรงดันตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 ปั๊มน้ำ



รูปที่ 2.7 ปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลอง

ปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลองทั้ง 2 ตัวนั้นจะใช้ของบริษัท API Instruments รุ่น P6 10.0006 ซึ่งจะเป็นปั๊มน้ำแบบเกียร์ปั๊ม โดยรูปของปั๊มน้ำที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 ส่วนข้อมูลคุณสมบัติและรายละเอียดของปั๊มน้ำแสดงได้ดังตารางที่ 1

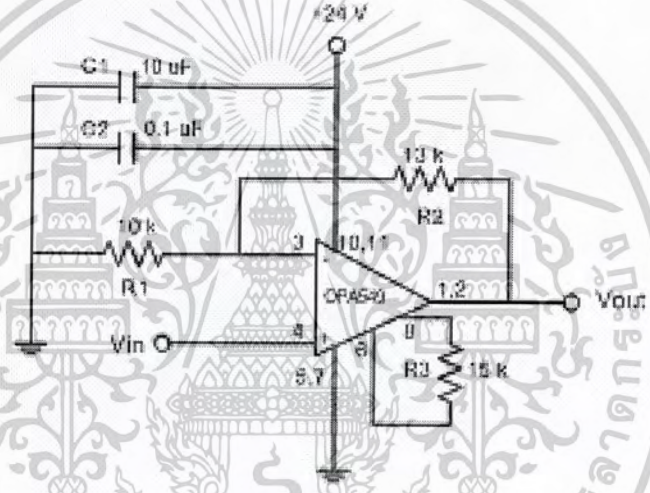
ตารางที่ 2.1 รายละเอียดทางเทคนิคของปั๊มน้ำ

Max Flow rate	2200 ml/min (Vdc)
Max. Suction	10 ft. H_2O wet, 4" dry
Max. Pressure	20 psig (46 ft. H_2O)
Port Size (OD)	4.8 mm (0.18") hose barb
Power Require (Vdc)	24 Vdc (up to 28W)
Max Operating Temp	93^{0}C (200^{0}F)
Ambient Fluid Temp	0 to 93^{0}C (32 to 200^{0}F)
Particulates	No
Run dry	No
Max. Viscosity	200 cps
Dimensions	88×81×92 mm (4×1.75×2.63)
Weight	1.4 kg (3 lb.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 วงจรออปแอมป์ (Operation Amplifier) ที่ใช้ขับมอเตอร์ (Drive Motor)

ออปแอมป์สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรแบบอินเวอร์ทติ้ง (Inverting),แบบนอนอิเวอร์ทติ้ง (Non-inverting) หรือดิฟเฟอเร็นเชียล แอมปลิฟลายเออร์ (Differential Amplifier) ได้โดยใช้การป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback) เพื่อให้ได้อัตราการขยายที่เสถียรและเพิ่มช่วงการใช้งาน (Bandwidth) ของวงจร จากคุณสมบัติทางอุดมคติของออปแอมป์ คือความต้านทานด้านอินพุตสูง ความต้านทานด้านเอาท์พุตต่ำ อัตราการขยายสูงและช่วงใช้งานกว้าง แต่ในการนำวงจรออปแอมป์ไปใช้งานจริงอาจจะได้ผลไม่ตรงกับคุณสมบัติทางอุดมคติ โดยอาจจะมีเอาท์พุตออฟเซทโวลเตท (Output Offset Voltage) คือความต่างศักย์ทางด้านเอาท์พุตเมื่ออินพุตทั้ง 2 ขา (บวกและลบ) ต่อลงกราวด์ ซึ่งเราสามารถใช้วงจรชดเชยเพื่อให้ออปแอมป์มีคุณสมบัติใกล้เคียงอุดมคติ



รูปที่ 2.8 วงจรออปแอมป์แบบไม่กลับเฟส (Noninverting) ที่ใช้ขับมอเตอร์

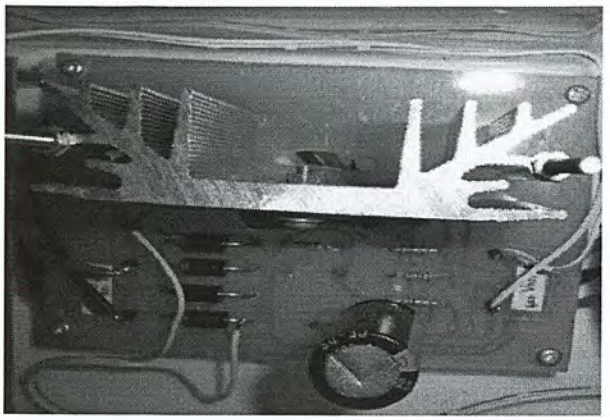
อัตราการขยายของวงจร

$$\frac{Vo}{Vin} = 1+\frac{R2}{R1}$$

$$= 1+\frac{13k}{10k}$$

$$= 2.4 \text{ เท่า}$$

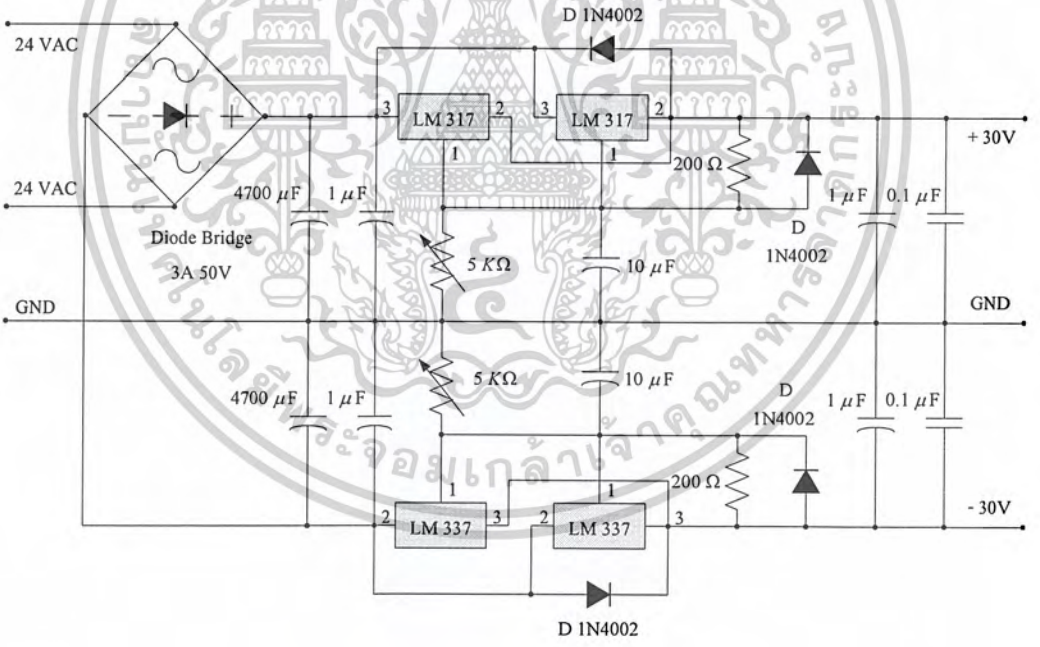
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำ

2.3.6 แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์

แหล่งจ่ายไฟสำหรับอุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำนั้นจะใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด ± 15 V, 3 A โดยรูปของวงจรแหล่งจ่ายไฟแสดงดังรูปที่2.10และรูปอุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟแสดงดังรูปที่ 2.11

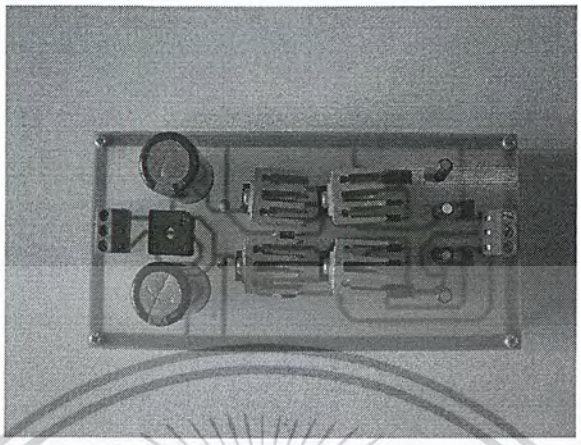


รูปที่ 2.10 วงจรแหล่งแหล่งจ่ายไฟขนาด ± 15 V, 3 A

เนื่องจากไอซีเรกกูเลเตอร์ที่ใช้ในการรักษาระดับแรงดันอ้างอิงให้คงที่ขนาด ± 30 V นั้นไม่มี ดังนั้นในการทดลองนี้จึงใช้ไอซีเรกกูเลเตอร์เบอร์ LM 317 และ LM 337 ซึ่งเป็นไอซีเรกกูเลเตอร์แบบปรับค่าแรงดันได้ แต่เนื่องจากไอซีนี้สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุดเพียง 1.5 A ดังนั้นเพื่อให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมในการใช้งานกับอุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำ จึงนำเอาไอซีเรกกูเลเตอร์นี้มาต่อขนานกัน เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสได้มากขึ้นถึง 3 A



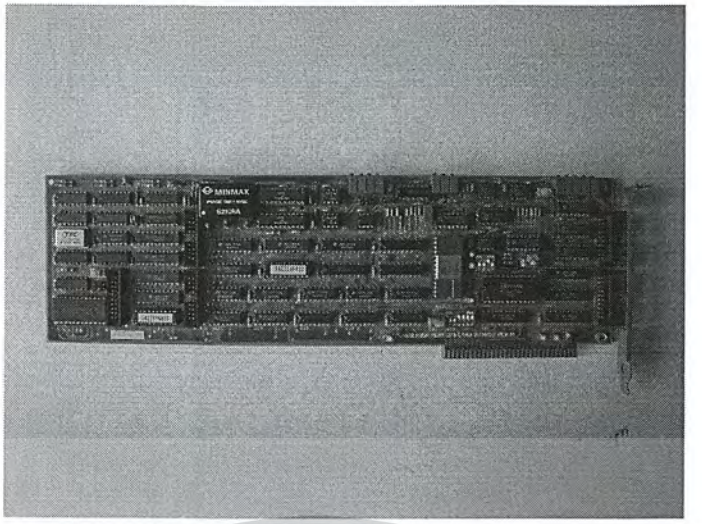
รูปที่ 2.11 อุปกรณ์แหล่งจ่ายไฟขนาด ± 15 V, 3 A

2.3.7 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A

การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A ที่ใช้ในการทดลองนี้จะใช้การ์ดรุ่น PCL-818 ของบริษัท Advantech ซึ่งจะเป็นการ์ดที่มีลักษณะการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบ ISA การ์ดนี้จะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม กับอุปกรณ์ขับกระแสของปั๊มน้ำและอุปกรณ์กรองความถี่ต่ำ โดยรูปของการ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 และการ์ดจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังนี้

- ส่วนแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D)
- ส่วนแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อก (D/A)
- ส่วนดิจิตอลอินพุต (D Input)
- ส่วนดิจิตอลเอาท์พุต (D Output)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การ์ดแปลงสัญญาณ A/D และ D/A

2.3.7.1 ส่วนแปลงสัญญาณ A/D

ส่วนแปลงสัญญาณ A/Dนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณแรงดันจากอุปกรณ์กรองความถี่และแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณดิจิตอล เพื่อส่งให้กับคอมพิวเตอร์หรือตัวควบคุมต่อไป โดยส่วนแปลงสัญญาณ A/D นี้จะมีจำนวนช่องในการรับสัญญาณถึง 16 ช่อง, มีความละเอียดสูงถึง 12 บิท, มีความเที่ยงตรงสูงถึง ± 0.01 % หรือ ± 1บิท, มีความเป็นเชิงเส้นมากถึง ± 1บิท, และมีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูงสุดถึง 100 KH_z นอกจากนั้นยังสามารถเลือกช่วงของสัญญาณอินพุตที่จะรับเข้ามาได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับการเลือกที่สวิทช์หรือเลือกทางซอฟต์แวร์

2.3.7.2 ส่วนแปลงสัญญาณ D/A

ส่วนแปลงสัญญาณ D/Aนี้จะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์หรือตัวควบคุม และแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณอนาล็อกเพื่อส่งให้กับชุดขับกระแสของปั๊มน้ำต่อไป โดยส่วนแปลงสัญญาณ D/A นี้จะมีจำนวนช่องในการส่งสัญญาณ 2 ช่อง, มีความละเอียดสูงถึง 12 บิท, มีความเป็นเชิงเส้นมากถึง ± 0.5 บิท และมีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูงถึง $5\,\mu s$ นอกจากนั้นยังสามารถเลือกช่วงของสัญญาณเอาท์พุตที่จะส่งออกไปได้หลายแบบ ขึ้นอยู่กับการเลือกที่สวิทช์หรือเลือกทางซอฟต์แวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการหาแบบจำลองของกระบวนการและโปรแกรม MATLAB

3.1 วิธีการหาแบบจำลองของกระบวนการโดยใช้วิธีการหาค่าสะสมของผลตอบสนอง

วิธีหาแบบจำลองของกระบวนการ โดยใช้วิธีการหาค่าสะสมของผลตอบสนองเป็นวิธีใหม่ ซึ่งทรานเฟอร์ฟังก์ชันของกระบวนการที่อยู่ในรูปทั่วไปคือ

$$G(S) = \frac{K_0 \prod_{i=1}^{2}(1+\gamma_i s)}{\prod_{i=1}^{3}(1+\tau_i s)}$$

$$= \frac{K_0(1+(\gamma_1+\gamma_2)s+\gamma_1\gamma_2 s^2)}{1+(\tau_1+\tau_2+\tau_3)s+(\tau_1\tau_2+\tau_1\tau_3+\tau_2\tau_3)s^2+(\tau 1\tau 2\tau 3)s^3)}$$

$$= \frac{K_0+b_1 s+b_2 s^2}{1+a_1 s+a_2 s^2+a_3 s^3}$$

เมื่อ

$$b_1 = (k_0\gamma_1+\gamma_2)$$
$$b_2 = k_0\gamma_1\gamma_2$$
$$a_1 = \tau_1+\tau_2+\tau_3$$
$$a_2 = \tau_1\tau_2+\tau_1\tau_3+\tau_2\tau_3$$
$$a_3 = \tau_1\tau_2\tau_3$$

ผลตอบสนองของระบบ ที่มีอินพุทแบบ unit step คือ

$$y_u(t) = \int_0^{\infty} g(t-\tau)1(\tau)d\tau$$

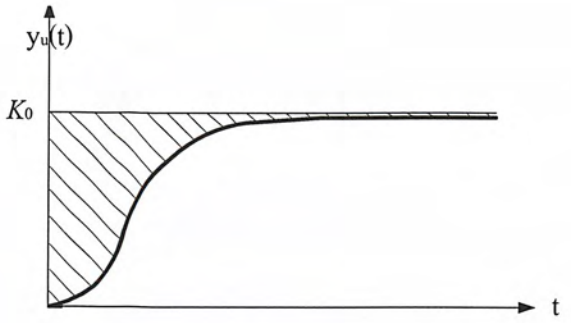
$$\lim_{t\to\infty} y_u(t) = \lim_{t\to\infty} s\frac{G(s)}{s}$$

$$= \lim_{s\to 0} G(s)$$

$$= \lim_{s\to 0} \frac{K_0+b_1 s+b_2 s}{1+a_1 s+a_2 s^2+a_3 s^3}$$

$$= K_0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ผลตอบสนองของกระบวนการ

$$y_1(t) = \int_0^t [K_0 - y_u(\tau)]d\tau$$

$$Y_{1(s)} = \frac{1}{s}\left[\frac{K_0}{s} - Y_u(s)\right]$$

$$= \frac{1}{s}\left[\frac{K_0}{s} - \frac{G(s)}{s}\right]$$

$$= \frac{1}{s^2}[K_0 - G(s)]$$

$$\lim_{t\to\infty} y_1(t) \triangleq K_1$$

$$= \lim_{s\to 0} sY_1(s)$$

$$= \lim_{s\to} \frac{1}{s}[K_0 - G(s)]$$

$$K_0 - G(s) = K_0 - \frac{K_0 + b_1 s + b_2 s^2}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$

$$= \frac{a_1 K_0 + a_1 K_0 s + a_2 K_0 s^2 + a_3 K_0 s^3 - K_0 - b_1 s - b_2 s^2}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$

$$= \frac{(a_1 K_0 - b_1 s) + (a_2 k_0 - b_2)s^2 + a_3 K_0 s^3}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$

$$\lim_{s\to 0} \frac{1}{s}[K_0 - G(s)] = \lim_{s\to 0} \frac{1}{s} \frac{(K_0 - b_1 s) + (a_2 k_0 - b_2)s^2 + a_3 K_0 s^3}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$

$$= a1K0 - b1$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$K_0 = \lim_{s\to 0} G(s)$$
$$K_1 = K_0 a_1 - b_1$$

ถ้า b_1=0

$$G(s) = \frac{K_0}{1+\tau s}$$

$$K_0 - G(s) = \frac{(K_0 - b_1 s) + (a_2 k_0 - b_2)s^2 + a_3 K_0 s^3}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$
$$= \frac{K_1 s + (a_2 k_0 - b_2)s^2 + a_3 K_0 s^3}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$
$$= G_1(s)$$
$$y_2(t) = \int_0^t [K_1 - y_1(\tau)]d\tau$$

เมื่อ

$$Y_2(t) = \frac{1}{s}\left[\frac{K_1}{s} - Y_1(s)\right]$$
$$= \frac{1}{s}\left[\frac{K_1}{s} - \frac{G_1(s)}{s^2}\right]$$
$$= \frac{1}{s^2}\left[K_1 - \frac{G_1(s)}{s}\right]$$

$$K_1 - \frac{G_1(s)}{s} = K_1 - \frac{K_1 s + (a_2 k_0 - b_2)s^2 + a_3 K_0 s^3}{s(1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3)}$$
$$= K_1 - \frac{K_1 + (a_2 k_0 - b_2)s + a_3 K_0 s^2}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$
$$= \frac{K_1 + a_1 K_1 s + a_2 K_1 s^2 + a_3 K_1 s^3 - K_1 - (a_2 k_0 - b_2)s + a_3 K_0 s^2}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$
$$= \frac{(a_1 K_1 - a_2 K_0 + b_2)s + (a_2 K_1 - a_3 K_0)s^2 - a_3 K_1 s^3}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$

$$\lim_{t\to\infty} y_2(t) = K_2$$
$$= \lim_{s\to 0} s\left[\frac{1}{s^2}\frac{(a_1 K_1 - a_2 K_0 + b_2)s + (a_2 K_1 - a_3 K_0)s^2 - a_3 K_1 s^3}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}\right]$$
$$= \lim_{s\to 0}\left[\frac{1}{s}\frac{(a_1 K_1 - a_2 K_0 + b_2)s + (a_2 K_1 - a_3 K_0)s^2 - a_3 K_1 s^3}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}\right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
61423

$$= \lim_{s\to 0}\left[\frac{(a_1K_1 - a_2K_0 + b_2) + (a_2K_1 - a_3K_0)s - a_3K_1s^2}{1 + a_1s + a_2s^2 + a_3s^3}\right]$$
$$= a_1K_1 - a_2K_0 + b_2$$

$$K_0 = \lim_{s\to 0} G(s)$$
$$K_1 = K_0a_1 - b_1$$
$$K_2 = a_1K_1 - a_2K_0 + b_2$$

เมื่อ $b_1 = b_2 = 0$

เพราะฉะนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ K0, K1, K2 ดังสมการที่3.1

$$K_0 = \lim_{s\to 0} G(s) = a_0$$
$$K_1 = K_0a_1 \qquad (3.1)$$
$$K_2 = a_1K_1 - a_2K_0$$

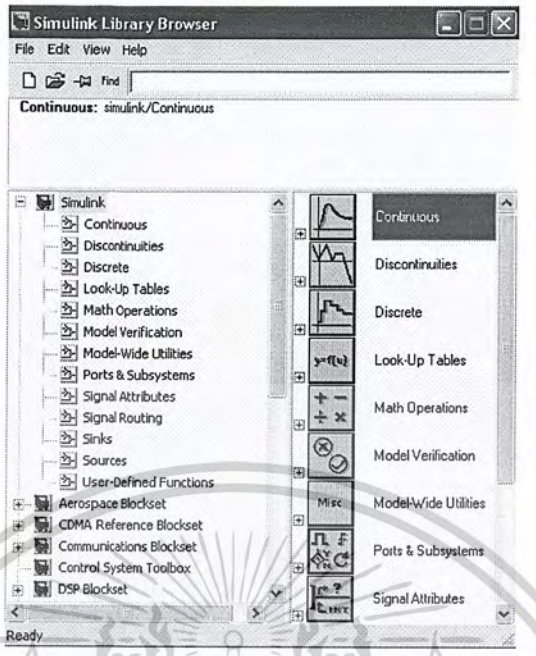
$$G(s) = \frac{K_0}{(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)}$$

$$y_1(t_n) \approx \sum_{i=1}^{n}\left[K_0 - y_u(t_i)\Delta t\right]$$

3.2 ทฤษฎี Simulink

Simulink คือโปรแกรมหนึ่งที่อยู่ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความสำคัญมาก โดยโปรแกรม Simulink นี้สามารถใช้ในการสร้างแบบจำลองทางกายภาพของระบบต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ใช้ในการจำลองการทำงาน และ วิเคราะห์ผลการตอบสนองของระบบ ซึ่งระบบต่าง ๆ เหล่านั้นก็คือระบบทางพลศาสตร์นั้นเอง โปรแกรม Simulink สามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของระบบทางพลศาสตร์ต่าง ๆ ได้อย่างมากมาย เช่น ระบบไฟฟ้า,ระบบทางกล, ระบบของกระบวนการ ฯลฯ การจำลองการทำงานของระบบทางพลศาสตร์ โดยใช้ Simulink สามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกันคือขั้นแรก ทำการสร้างแบบจำลองของระบบโดยแบบจำลองของระบบนั้นจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง อินพุต , เอาต์พุต และสเตทของระบบ ขั้นที่สอง จำลองการทำงานของระบบเพื่อดูพฤติกรรมการตอบสนองของระบบภายในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งในการเริ่มใช้งานในโปรแกรม Simulink ให้ทำการพิมพ์คำว่า Simulink ในส่วน command window ของโปรแกรม MATLAB หรือคลิกปุ่ม Simulink จะแสดงขึ้นมาดังรูปที่ 1 ซึ่งแนะนำลักษณะองค์ประกอบที่สำคัญในหน้าต่างการใช้งานในแต่ละส่วนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



1. Menu Bar คือ เมนูบาร์เกี่ยวกับคำสั่งในการจัดการหน้าต่างของโปรแกรม
2. Simulink Block Library คือหน้าต่างแสดงบล็อกที่มีในโปรแกรม **Simulink**

3.2.1 Simulink Block ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบควบคุม

บล็อกที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองระบบควบคุมส่วนใหญ่แล้วจะอยู่ใน Library ที่ชื่อว่า Simulink โดยในที่นี้จะอธิบายเฉพาะที่ใช้งานบ่อย ๆ ในทางการสร้างแบบจำลองระบบควบคุมซึ่งจะประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ๆ คือ

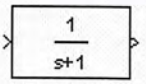
1. Continuous ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองของกระบวนการ
2. Source ใช้เป็นสัญญาณอินพุท แบบต่าง ๆ ที่ป้อนเข้าระบบควบคุม
3. Sinks ใช้เป็นส่วนแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม
4. Math Operations และ Signal Routing คือส่วนกระทำทางคณิตศาสตร์และสัญญาณต่างๆ

3.2.1.1 ส่วน Continuous

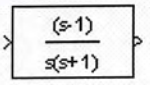
ส่วน Continuous จะใช้ในการสร้างแบบจำลองของระบบโดยบล็อกของส่วน Continuous สามารถอธิบายได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

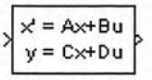
Transfer Fcn Block



Zero-Pole Block



State-Space Block



Derivative Block

ใช้สำหรับทำการอนุพันธ์

Integrator Block

ใช้สำหรับการอินทิเกรท

3.2.2.2 ส่วน Source

ส่วน Source จะใช้เป็นสัญญาณอินพุทแบบต่าง ๆ ที่ป้อนให้กับระบบควบคุม โดยบล็อกของส่วน Source สามารถอธิบายได้ ดังนี้

Constant Block

ใช้สำหรับป้อนสัญญาณที่เป็นค่าคงที่

Integrator Block

ใช้สำหรับป้อนสัญญาณขั้นบันได

Sine Wave Block

ใช้สำหรับป้อนสัญญาณคลื่นไซน์

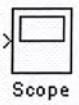
Ramp Block

ใช้สำหรับป้อนสัญญาณแบบ ramp

3.2.2.3 ส่วน Sink

ส่วน Sink จะใช้เป็นส่วนแสดงผลตอบสนองของระบบควบคุม โดยบล็อกของส่วนSink สามารถอธิบายได้ ดังนี้

Scope Block



ใช้สำหรับแสดงผลตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.4 ส่วน Math Operations และ Signal Routing

ส่วน Math Operations จะใช้สำหรับการกระทำการทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ เช่น การบวก การลบ สัญญาณ ฯลฯ และส่วน Signal Routing จะใช้สำหรับการจัดสัญญาณให้เป็นไปตามที่ต้องการ เช่น การรวมสัญญาณ (Multiplex), การแยกสัญญาณ (Demultiplex)

Gain Block

ใช้สำหรับเป็นอัตราขยายของสัญญาณ

Sum Block

ใช้สำหรับการบวก , ลบสัญญาณ

Multiplex Block

ใช้สำหรับการรวมสัญญาณ

Demultiplex Block

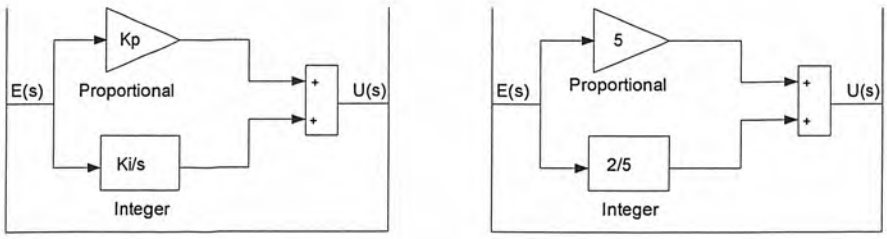
ใช้สำหรับการแยกสัญญาณ

3.2.3 การสร้างแบบจำลองตัวควบคุม

การสร้างแบบจำลองตัวควบคุมในโปรแกรม Simulink นั้นทำได้โดยทำให้ตัวควบคุมนั้นอยู่ในรูปแบบทรานเฟอร์ฟังก์ชันและใช้บล็อก Transfer Fcn แสดงแทนตัวควบคุมจากนั้นก็นำค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมใส่ในบล็อก

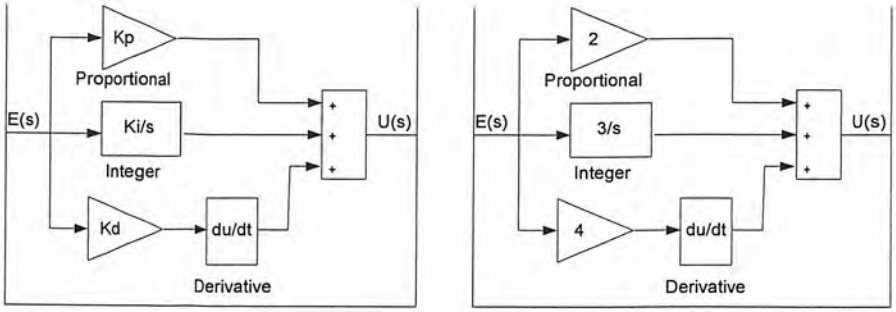
ตัวอย่างการสร้างแบบจำลองตัวควบคุมแบบ P, PI และ PID โดยกำหนดให้ตัวควบคุมแบบ P มีค่า Kp=10, ตัวควบคุมแบบ PI มีค่า Kp=5,Ki=2 และตัวควบคุมแบบ PID มีค่า Kp=2,Ki=3,Kd=4

ตัวควบคุมแบบ P



ตัวควบคุมแบบ PI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตัวควบคุมแบบ PID

3.2.4 การสร้าง Subsystem Block

การสร้างแบบจำลองของกระบวนการ บ่อยครั้งมักพบว่าแบบจำลองของกระบวนการมีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจจะทำให้เปลืองพื้นที่ของหน้าต่างสร้างแบบจำลองหรือมีความไม่สะดวกต่อการประยุกต์ใช้งาน แต่เราสามารถทำให้แบบจำลองของกระบวนการมีขนาดที่เล็กลงได้ โดยทำการสร้าง Subsystem Block ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

1. คลิกแล้วลากเส้นล้อมรอบบล็อกที่จะทำการสร้าง Subsystem Block แล้วปล่อยปุ่ม
2. คลิกขวาในกลุ่มที่เลือกจะสร้าง Subsystem Block จากนั้นเลือกไปที่ Create Subsystem
3. หลังจากนั้นจะปรากฏ Subsystem Block ที่ทำการสร้างขึ้นมา
4. ถ้าต้องการที่จะแก้ไขหรือต้องการที่จะเปลี่ยนแปลงบล็อกที่อยู่ภายใน Subsystem Block ก็สามารถทำได้ โดยคลิกที่ Subsystem Block แล้วเลือกคำว่า Open Block จะปรากฏหน้าต่างขึ้นมา

3.2.5 การใช้ตัวแปรใน MATLAB ทำงานร่วมกับ Simulink

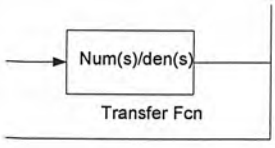
ตัวแปรที่ทำการสร้างขึ้นในส่วน Command Window ของ MATLAB หรือตัวแปรที่ทำสร้างขึ้นใน Script ที่มีนามสกุลเป็น .m นั้น โดยปกติแล้วจะอยู่ในหน้าต่าง Workspace ของโปรแกรม MATLAB โดยโปรแกรม MATLAB จะทำการจำตัวแปรต่าง ๆ นี้ไว้ จนกว่าจะใช้คำสั่ง Clear หรือ ออกจากโปรแกรม ตัวแปรที่อยู่ในหน้าต่าง Workspace นั้นสามารถนำมาใช้งานภายในโปรแกรม Simulink ได้ โดยการใช้งานก็เพียงแต่นำชื่อตัวแปรไปใส่ในบล็อกที่ต้องการ

ตัวอย่างการนำตัวแปรใน Workspace มาใช้งานภายในบล็อก Transfer Fcn กำหนดตัวแปร num=[1 10]; และ den=[1 9 45 87 50]; ในหน้าต่าง Command Window ของ โปรแกรม MATLAB

```
>>num=[1 10];
>>den=[1 9 45 87 50];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดตัวแปร num และ den ให้ numerator และ Denominator ในบล็อก Transfer Fcn ตามลำดับ หลังจากนั้น บล็อก Transfer Fcn จะปรากฏตัวแปรในส่วน Numerator และ Denominator เป็น num() และ den() ตามลำดับ

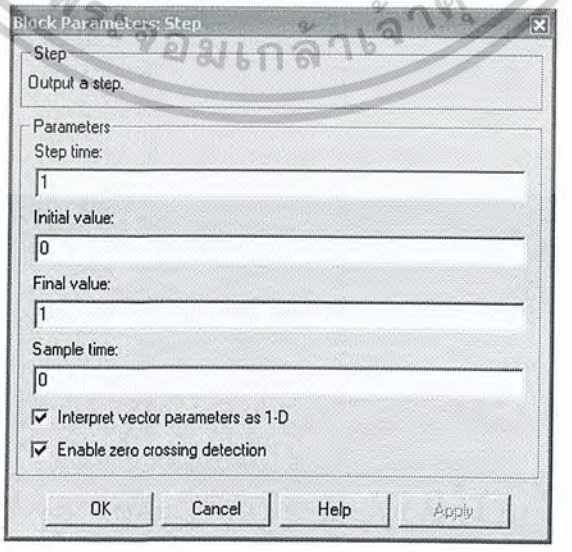


3.2.6 การจำลองการทำงานระบบควบคุม

แบบระบบควบคุมที่ทำการสร้างขึ้นมาใน Simulink นั้นสามารถจำลองการทำงานของระบบเพื่อดูผลตอบสนองได้ โดยก่อนการจำลองการทำงานต้องทำการกำหนดพารามิเตอร์ของบล็อกในการป้อนสัญญาณอินพุท,พารามิเตอร์ของการดูสัญญาณเอาท์พุท และพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานให้เหมาะสมก่อน

3.2.7 การกำหนดพารามิเตอร์ในการป้อนสัญญาณอินพุท

สัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับแบบจำลองระบบควบคุมนั้นจะอยู่ใน Library Simulink ซึ่งอยู่ในส่วน Source โดยสัญญาณอินพุทที่ใช้ในทางวิศวกรรมระบบควบคุมส่วนมากจะประกอบด้วยสัญญาณอินพุทแบบ step,sine,ramp และ constant ซึ่งสัญญาณส่วนใหญ่แล้วสัญญาณแบบ step จะถูกใช้เพื่อทดสอบผลตอบสนองของกระบวนการมากที่สุด ดังนั้นในที่นี้จะอธิบายเพียงการกำหนดพารามิเตอร์ของบล็อกสัญญาณอินพุทแบบ step เท่านั้น ไดอะล็อกที่ใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ของบล็อก Step แสดงดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบที่สำคัญในการกำหนดพารามิเตอร์บล็อก Step อธิบายได้ดังนี้

1. Step time คือเวลาที่สัญญาณ Step จะเริ่มเปลี่ยนค่า Initial Value ไปสู่ค่า Final Value
2. Initial Value คือค่าเริ่มต้นของสัญญาณ Step
3. Final Value คือค่าสุดท้ายของสัญญาณ Step

3.2.8 การกำหนดพารามิเตอร์ในการดูสัญญาณเอาท์พุท

การดูผลตอบสนองของแบบจำลองระบบควบคุม ทำได้โดยดับเบิ้ลคลิก Scope โดยในบล็อก Scope นั้นจะมีปุ่มให้เลือกเพื่อดูผลตอบสนองของระบบแบบต่าง ๆ นอกจากนั้นยังสามารถกำหนดจำนวนสัญญาณที่จะแสดงบนบล็อกได้

ใช้สำหรับทำการพิมพ์รูปภาพในบล็อก Scope

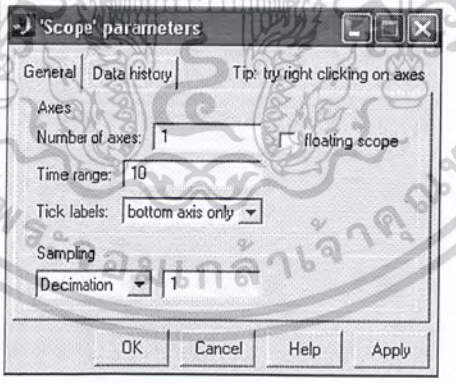
ใช้สำหรับทำการซูมแกน X และแกน Y

ใช้สำหรับทำการซูมแกน X

ใช้สำหรับทำการซูมแกน Y

ใช้สำหรับทำการซูมแบบ auto

ใช้สำหรับกำหนดพารามิเตอร์ให้กับบล็อก Scope เมื่อกดปุ่มนี้จะปรากฏไดอะล็อกขึ้นมาดังรูปที่ 3.2

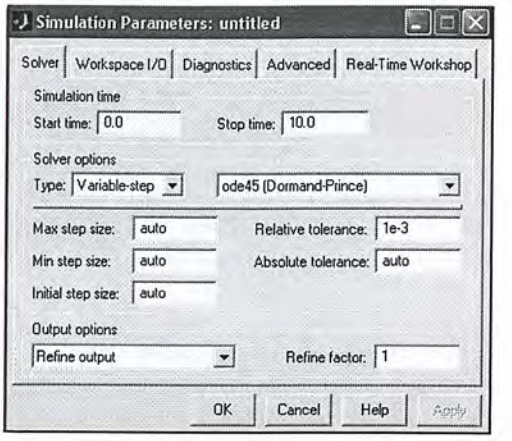


รูปที่ 3.2 ไดอะล็อกใส่ค่าพารามิเตอร์สำหรับบล็อก Scope

3.2.9 การกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน

การกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุม ทำได้โดยทำการคลิกที่คำว่า Simulation ที่ตรงเมนูบาร์ของหน้าต่างที่ใช้สร้างแบบจำลอง และทำการคลิกเลือกที่คำว่า Simulation parameter หลังจากนั้นจะปรากฏไดอะล็อกสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานขึ้นมา แสดงดังรูปที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ไดอะล็อกที่ใช้สำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงาน

ส่วนประกอบที่สำคัญที่ใช้ในการกำหนดพารามิเตอร์ ในการจำลองการทำงานของระบบควบคุม สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. Start time คือเวลาเริ่มต้น(หน่วยเป็นวินาที) ในการจำลองการทำงานระบบควบคุมส่วนมากแล้วค่านี้จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์

2. Stop time คือเวลาสิ้นสุด (หน่วยเป็นวินาที) ในการจำลองการทำงานระบบควบคุมค่านี้ต้องกำหนดให้เหมาะสมกับระบบควบคุมที่จำลองการทำงาน

3. Solver คือวิธีการอินทิเกรทของแบบจำลองระบบควบคุม ซึ่งจะมี 2 แบบด้วยกันคือ การอินทิเกรทแบบ Variable-step และ Fixed-step โดยแต่ละแบบก็จะมีวิธีการอินทิเกรทแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้การอินทิเกรทแบบ Variable-step Ode

4. Max step size Min step size คือขนาดของความละเอียดในการอินทิเกรทที่มากที่สุดและน้อยที่สุด (หน่วยเป็นวินาที) ค่านี้จะมีให้เลือกในกรณีที่เลือกการอินทิเกรทแบบ Variable-step โดยส่วนใหญ่แล้วค่านี้จะกำหนดให้เป็น auto

หลังจากที่ทำการกำหนดพารามิเตอร์ในการจำลองการทำงานแล้ว สามารถทำการจำลองการทำงานของระบบได้โดยทำการคลิกที่ปุ่ม ▶ ในส่วนเมนูบาร์ของหน้าต่างโดยระหว่างการจำลองการทำงานนั้น เราสามารถยกเลิกการจำลองการทำงานได้โดยการคลิกที่ปุ่ม ■ หลังจากสิ้นสุดเวลาจำลองการทำงานของระบบแล้ว สามารถดูผลตอบสนองของระบบได้โดยทำการดับเบิ้ลคลิกที่บล็อก Scope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การออกแบบตัวควบคุมพีไอดี

4.1 ระบบควบคุม

ระบบควบคุม คือ รูปแบบของระบบใด ๆ ก็ตามที่มีการจัดองค์ประกอบต่างๆ ภายในระบบเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบที่เป็นไปตามต้องการ ซึ่งส่วนมากอาศัยพื้นฐานทฤษฎีระบบเชิงเส้นมาช่วยในการวิเคราะห์พิจารณาถึงความสัมพันธ์ ระหว่างเหตุผลของแต่ละองค์ประกอบของระบบ ไม่ว่าระบบควบคุมนี้จะมีความซับซ้อนเพียงไรก็ตาม พื้นฐานของระบบควบคุม จะมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วนดังนี้

- วัตถุประสงค์ของการควบคุม (Input)
- กระบวนการ, ขั้นตอน, หลักที่ใช้ในการควบคุม (Process)
- ค่าที่ได้รับจริง (Output)

จากองค์ประกอบต่างๆข้างต้น สามารถนำมาเขียนแทนด้วยภาพบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 พื้นฐานระบบควบคุม

4.2 ประเภทของการควบคุม

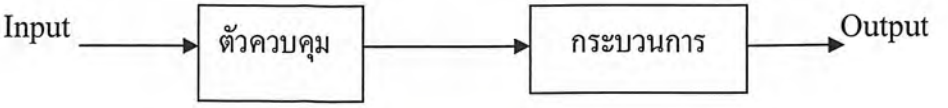
ลักษณะการควบคุมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ คือ

1. ระบบการควบคุมแบบเปิด (Open–loop control system)
2. ระบบควบคุมแบบปิด (Closed-loop control system)

4.2.1 ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop)

ระบบควบคุมแบบเปิดหรือเรียกอีกอย่างว่า ระบบควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับระบบนี้ค่าเอาท์พุตที่ได้ จะไม่มีผลต่อการควบคุมขบวนการของระบบ หมายความว่าไม่มีการนำเอาท์พุตที่ได้กลับมาเปรียบเทียบกับค่าของอินพุต (อ้างอิง) ที่ป้อนไปให้กับระบบ ซึ่งสามารถที่จะแสดงลักษณะบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบเปิด

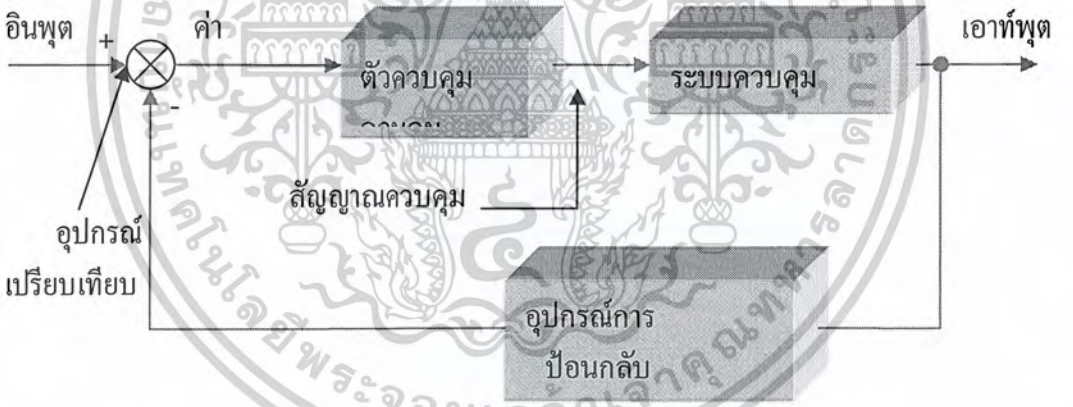
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบเปิด

4.2.2 ระบบควบคุมแบบปิด (Closed loop)

เมื่อระบบควบคุมแบบเปิดไม่สามารถจะให้ความแม่นยำในการควบคุมได้ ดังนั้นจึงมีการพิจารณาที่จะนำสัญญาณเอาท์พุตซึ่งมีผลโดยตรงกับระบบควบคุมนำมาใช้งาน โดยการนำสัญญาณจากเอาท์พุตของระบบป้อนกลับมาเปรียบเทียบให้กับสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบนั้น จะเป็นสัญญาณค่าผิดพลาด (error) เพื่อที่จะใช้เป็นสัญญาณป้อนเข้าตัวควบคุม (Controller) ให้ตัวควบคุมนำไปสร้างสัญญาณควบคุมใหม่ เพื่อจะลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ และทำให้เอาท์พุตของระบบเข้าสู่ค่าที่เราต้องการ (set point) ดังแสดงในบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบปิด

4.3 ชนิดของการควบคุม

จุดประสงค์ของการเพิ่มตัวควบคุมเข้าไปในกระบวนการนั้นก็เพื่อต้องการควบคุมให้ได้ผลตามที่ต้องการที่จะศึกษาถึงคุณสมบัติของการควบคุมทำให้ทราบถึงพฤติกรรมของตัวควบคุมที่มีต่อระบบ เพื่อให้สามารถเลือกใช้ตัวควบคุมให้มีความเหมาะสม กับกระบวนการแต่ละแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพตัวควบคุมที่สำคัญและนิยมนำมาใช้ในกระบวนการมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 ตัวควบคุมแบบ Proportional (P)

เป็นแบบของการควบคุมที่ง่ายที่สุดของตัวควบคุม เนื่องจากมีค่าที่ปรับเพียงค่าเดียวคือค่าอัตราขยายของตัวควบคุม (RC) หรือค่า RB (Proportional band) ซึ่งเป็นข้อดีของการควบคุมชนิดนี้ การเพิ่มตัวควบคุม P เข้าไปในระบบจะทำให้ได้ค่าช่วงเวลาไต่ขึ้น (Rise time) ของระบบลดแต่พบว่าจะมีค่า Off Set หรือค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว(steady-stage error-ess) เกิดขึ้นทำให้ผลการตอบสนองต่อสถานะอยู่ตัวไม่เข้าสู่ค่าของ Set Point ตามที่ต้องการแต่ก็สามารถทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัวนี้ลดได้โดยการเพิ่มค่า อัตราขยาย(KC) (หรือลดค่าPB) ซึ่งก็มีผลกระทบทำให้ค่าพุ่งเกิน(Over Shoot) ของระบบมีค่ามากขึ้นจากคุณสมบัติดังกล่าวจึงมักจะใช้ตัวควบคุมแบบ P ร่วมกับตัวควบคุมชนิดอื่นเพื่อให้ได้การควบคุมที่ดีขึ้น

4.3.2 ตัวควบคุมแบบ Proportional Derivative (PD)

เป็นแบบของการควบคุมกระบวนการที่สามารถใช้ตัวควบคุมแบบ Proportional ได้อยู่แล้วโดยการเพิ่มส่วนของตัวควบคุมอนุพันธ์ (D) เข้าไปซึ่งคุณสมบัติของตัวควบคุม PD นี้จะคล้ายกับตัวควบคุมแบบ P คือยังคงมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะอยู่ตัวอยู่ในระบบแต่ถ้าให้ค่าอัตราขยายของ Proportional มีค่าสูงๆแล้ว (หรือค่าRBต่ำๆ) พบว่าตัวควบคุม PD มีค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัวกว่าตัวควบคุมแบบ (P)

4.2.3 ตัวควบคุมแบบ Proportional Integral (PI)

สำหรับกระบวนการที่ไม่ต้องให้มีความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัว จะทำให้การควบคุมมีผลเสียหายควรใช้ตัวควบคุมชนิดนี้ เนื่องจากผลของตัวควบคุมอินทริกรัล (I) นั้นจะทำให้ไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่สถานะคงตัวนั้นในระบบควบคุม ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวควบคุมชนิดนี้แต่อาจจะ ทำให้ระบบควบคุมมีการทำงานช้าลง

4.2.4 ตัวควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID)

นิยมใช้กับกระบวนการที่มีค่าคงตัวเวลา (Time Constant) มีค่ามากหรือกระบวนการที่มีค่าเวลาไร้ผลตอบสนอง (Dead Time) หรือในกระบวนการที่ผลตอบสนองช้าอย่างเช่นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมอุณหภูมิสำหรับกระบวนการที่มีผลตอบสนองเร็ว อย่างเช่นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการไหลของของไหล ตัวควบคุมแบบ PID อาจจะไม่เหมาะสมที่จะใช้งานเนื่องจากผลของอนุพันธ์ในตัวควบคุมจะทำให้ระบบควบคุมต่อสิ่งรบกวน แต่จะทำให้ลดค่าพุ่งเกินของระบบได้ดี

สำหรับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (D) หรือตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (I) อย่างใดอย่างหนึ่งจะไม่ถูกนำมาใช้ในการควบคุมกระบวนการใดๆ และเนื่องจากว่าตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นั้นจะให้ค่า

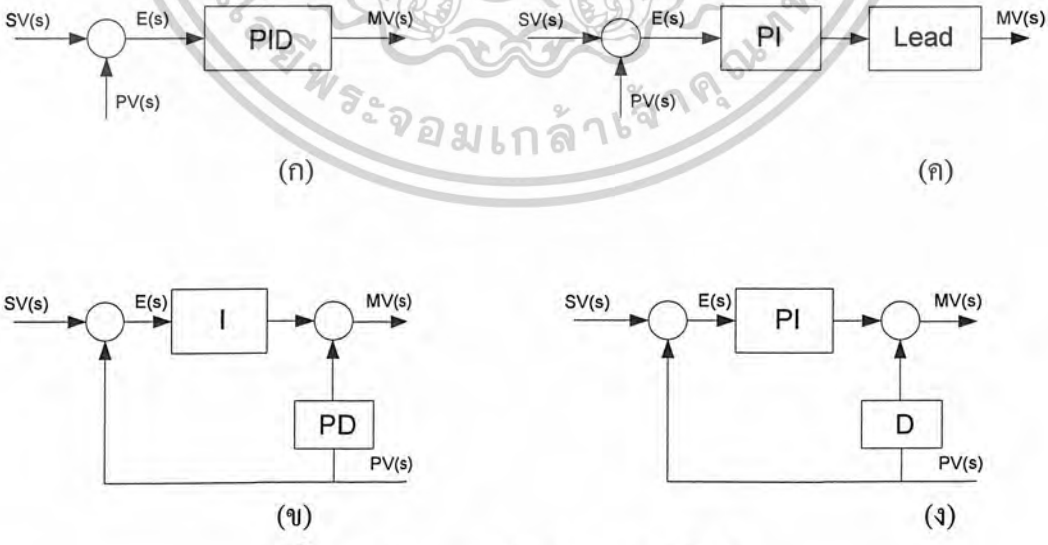
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวเป็น 100% อีกทั้งยังพุ่งเกินสูง สำหรับตัวควบคุมแบบอินทิกรัล จะทำให้ระบบมีอันดับสูงขึ้น และอาจจะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพได้ เนื่องจากผลของการอินทิกรัลจะไปลดค่าอัตราการหน่วง (Damping Ratio) ของระบบ

ในกรณีที่ตัวควบคุมที่กล่าวมาไม่สามารถควบคุมระบบตามที่ต้องการได้นั้น ก็สามารถเพิ่มอุปกรณ์ที่เรียกว่าตัวชดเชย (Compensator) เข้าไปในระบบได้เช่นตัวชดเชยแบบ Lead ซึ่งจะทำให้ระบบมีการตอบสนองเร็วขึ้นตัวชดเชยแบบ Lag ซึ่งจะทำให้ระบบมีพฤติกรรมตรงกันข้ามกับตัวชดเชยแบบ Lead ในการเพิ่มตัวควบคุมและตัวชดเชยให้แก่ระบบนั้น จะต้องพิจารณาด้วยว่ามีการเชื่อมต่ออย่างไรเข้ากับระบบที่ถูกควบคุมถ้าต่อตัวควบคุมเป็นแบบอนุกรม (Series) กับระบบที่ถูกควบคุมจะเรียกว่าการควบคุมหรือชดเชยแบบอนุกรม ในบางครั้งเรียกการต่อแบบนี้ว่า Cascade ถ้าต่ออยู่ในลักษณะการป้อนกลับนั้นจะเรียกว่าการควบคุมหรือชดเชยแบบขนาน (Parallel) หรือแบบป้อนกลับ (Feed Back) นอกจากนั้นยังอาจต่ออยู่ในลักษณะที่เรียกว่าการควบคุม หรือชดเชยแบบ Forward หรืออาจจะนำแบบต่างๆเหล่านี้มาต่อร่วมกันก็ได้ การเพิ่มตัวควบคุมหรือชดเชยเข้าไปในระบบนั้น ต้องพิจารณาพฤติกรรมของระบบระดับสัญญาณที่จุดต่างๆ รูปแบบในการต่อตลอดจนต้องสามารถหาอุปกรณ์ทางกายภาพ ที่มีฟังก์ชันถ่ายโอนตรงกับฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมหรือตัวชดเชยที่ต้องการให้ได้

4.2.4.1 รูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID

ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) พอที่จะแบ่งรูปแบบของตัวควบคุมตามกฎเกณฑ์ของการควบคุมออกแบบได้ 4 แบบ ตามรูปที่4.4



รูปที่ 4.4 รูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

SV(s) = จุดปรับตั้ง(Set Point หรือ Set Value)

PV(s) = สัญญาณตัวแปรกระบวนการ (Process Variable)

E(s) = ผลต่างระหว่างจุดปรับตั้งและสัญญาณป้อนกลับ มีค่าเท่ากับ SV(s) – PV(s)

MV(s) = สัญญาณตัวแปรปรับกระบวนการ (Manipulated Signal)

รูปแบบตามรูปที่ 4.4 ก) นั้นเป็นรูปแบบที่ใช้มากในการอธิบายเพื่อความเข้าใจตามหนังสือต่างๆแต่เป็นรูปแบบที่ไม่ค่อยได้ใช้ในการควบคุมกระบวนการควบคุมการผลิตจริงๆ ดังนั้นพารามิเตอร์แต่ละตัวจะไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน ดังนั้นในการปรับค่าพารามิเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง จะไม่มีผลของพารามิเตอร์ตัวอื่นไปเกี่ยวข้อง สมการของตัวควบคุมใน s-Domain แสดงได้ด้วยสมการที่ 4.1

$$MV = \left(\frac{100}{PB}\right) * \left(1 + \frac{1}{Tis} + Tds\right) * e(t) \tag{4.1}$$

รูปแบบตามรูปที่ 4.4 ข) นั้นจะเป็นรูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในตัวควบคุมพีไอดี(PID) แบบเชิงอุปมาน(Analog) ทั้งนี้เนื่องจากว่าง่ายในการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แต่ในปัจจุบันไม่ค่อยได้พบเห็นกันมากนัก เนื่องจากการปรับค่า PB, Ti และ Td นั้นจะมีผลกระทบต่อกัน (Mutual Interference) สมการของการควบคุมใน s-Domain แสดงได้ด้วยสมการที่ 4.2

$$MV(s) = \left(\frac{100}{PB}\right) * \left(1 + \frac{1}{T.is}\right) * (1 + Tds) * e(s) * \frac{1}{\left(1 + \frac{Tds}{N}\right)} \tag{4.2}$$

สำหรับตัวควบคุมแบบ PID ตามรูปที่ 4.4 ค) และรูปที่ 4.4 ง) เป็นรูปแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในเครื่องควบคุม PID ชนิดเชิงเลข (Digital PID Controller) ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน โดยที่รูปแบบตามรูปบล็อกที่ 4.4 ค) นั้นจะเป็นรูปแบบที่ดีเหมาะ สำหรับการควบคุมที่กระบวนการมีการรบกวนจากภายนอก (Load หรือ Supply Disturbance) แต่กระบวนการนั้นจะปรับตัวได้ไม่ค่อยดีเมื่อได้มีการเปลี่ยนแปลงจากค่า Set Point เนื่องจากค่า Proportional Band มีผลกับสัญญาณตัวแปรกระบวนการ ส่วนรูปแบบที่ 4.4 ง) นั้นเป็นรูปแบบที่เหมาะสำหรับการควบคุมที่มีการเปลี่ยนค่าของ Set Point แต่กระบวนการจะปรับตัวได้ไม่ค่อยดีถ้ามีสัญญาณรบกวนจากภายนอกทั้งนี้เนื่องจากค่า Proportional Band นั้น มีผลกับค่าผลต่างระหว่างค่า Set Point กับตัวแปรกระบวนการ สำหรับรูปแบบทั้งสองที่กล่าวมานี้นั้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า Derivative Term นั้นจะมีผลเฉพาะค่าตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรกระบวนการ ทั้งนี้ มีข้อดีคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่า Set Point อย่างทันทีทันใดจะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของกระบวนการ สมการคณิตศาสตร์ใน s-Domain ของรูปแบบที่ 4.4 ค) แสดงได้ตามสมการที่ 4.3 และสมการคณิตศาสตร์ใน s-Domain ของรูปแบบที่4.4 ง) แสดงได้ตามสมการที่4.4

$$MV(s) = \frac{100}{PB}\left[PV(s) + \frac{E(s)}{Tid} + Tds * \frac{PV(s)}{1 + \frac{Tds}{n}} \right] \tag{4.3}$$

$$MV(s) = \frac{100}{PB}\left[EV(s) + \frac{E(s)}{Tid} + Tds * \frac{PV(s)}{1 + \frac{Tds}{n}} \right] \tag{4.4}$$

4.2.5 ผลของพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบกับกระบวนการ

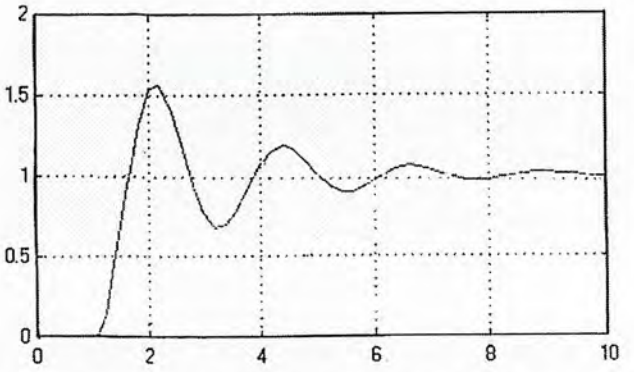
4.2.5.1 ผลของ Proportional Band (PB) กับกระบวนการ

ผลของ Proportional Band (PB) กับการควบคุมกระบวนการ Proportional Band จะเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าอัตราขยายของกระบวนการ โดยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราขยายกับค่า Proportional Band สามารถแสดงได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 4.5

$$GAIN = \frac{100}{PB} \tag{4.5}$$

สำหรับผลของ Proportional Band ที่ใช้กับการควบคุมแบบ P-Control นั้นค่า Proportional Band จะมีผลกับขนาดของผลตอบสนองรวมไปถึงเรื่องความไว (Sensitivity) และออฟเซต (Offset) หรือค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (Steady State Error) ผลของ Proportional Band ที่มากเกินไปจะมีผลทำให้เกิดค่าผิดพลาด (Error) ในสถานะคงตัวมากขึ้นและจะทำให้ความไวของผลตอบสนอง ในทางกลับกันค่าของ Proportional Band ที่น้อยเกินไปนั้น จะทำให้กระบวนการเกิดการแกว่งขึ้น หรือเข้าใกล้จุดไร้เสถียรภาพ (Unstable) มากขึ้น รูปที่ 4.5 แสดงผลของการเพิ่มหรือลดค่า Proportional Band ต่อกระบวนการกำลังสอง

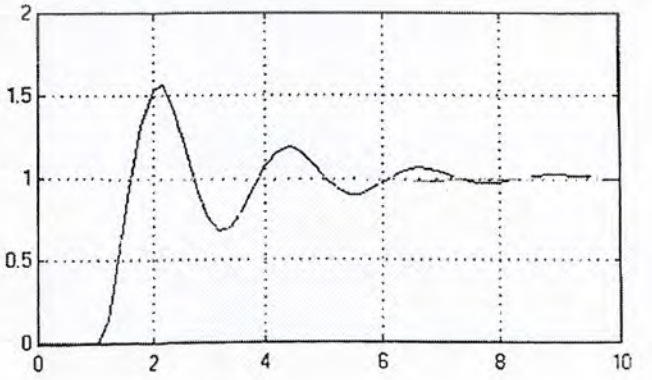
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ผลของ Proportional Band ต่อกระบวนการควบคุมแบบ PID

4.2.5.2 ผลของการ Integral Time กับกระบวนการ

สำหรับ Integral Action นั้นจะมีผลกับผลตอบสนองของค่าสะสม แต่จะไม่มีผลกับผลตอบสนองในลักษณะทันทีทันใด การลดค่า Integral Time จะมีผลทำให้ออฟเซตหรือค่าผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัวของกระบวนการลดลง ทั้งนี้เนื่องจากเรื่อง Integral Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับขนาดของความผิดพลาดสะสมของผลตอบ แต่ถ้า Integral Time ที่ตั้งให้กระบวนการนั้นมีค่าน้อยเกินไป (Integral Action มากเกินไป) ก็จะทำให้ผลตอบของกระบวนการเกิดการแกว่งมากขึ้น (การพุ่งเกินมากขึ้น) เวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สภาวะคงตัวนานมากขึ้นได้ ในทำนองกลับกันการเพิ่มค่า Integral Time จะมีผลในทางตรงกันข้ามกับที่กล่าวมาแล้ว คือจะเพิ่มค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวของผลตอบของกระบวนการ ถ้าผลตอบสนองของกระบวนการนั้นเป็นผลตอบสนองที่มีค่าผิดพลาดในสถานะคงตัวอยู่ แต่ในขณะเดียวกัน ก็จะเป็นการลดการแกว่ง หรือค่าพุ่งเกินของการตอบสนองของกระบวนการ ในกรณีที่กระบวนการนั้นมีค่า Integral Time เดิมน้อยเกินไป เมื่อมีการเริ่มเดินเครื่องอย่างอัตโนมัติ (Automatic Starting) ด้านการควบคุมของตัวควบคุม PID Integral Action จะทำให้เกิด Integral Windup เนื่องจากขณะเริ่มเดินเครื่อง ความผิดพลาดจะเกิดขึ้นเป็นเวลานาน ทำให้เทอมของ Integral มีค่าเกิน 100% รูปที่ 4.6 แสดงผลของการเพิ่มหรือลดค่า Integral Time ในการควบคุมแบบ พีไอดี

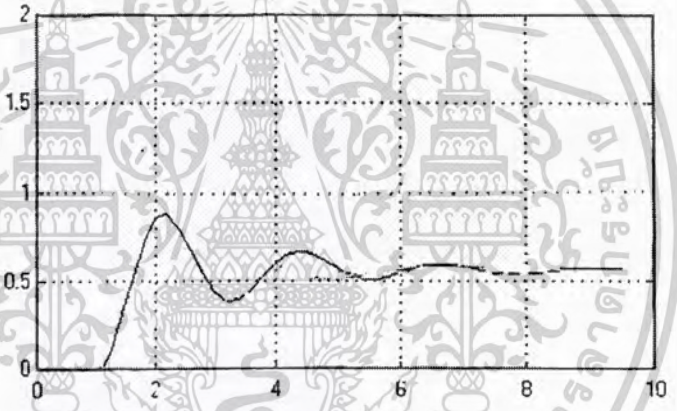


รูปที่ 4.6 ผลของ Integral Time ที่มีต่อผลตอบสนองของกระบวนการควบคุมแบบพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5.3 ผลของ Derivative Time กับผลตอบสนองของกระบวนการ

ผลของ Derivative Action จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุท ซึ่งมีผลทำให้กระบวนการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้น สำหรับตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่มีรูปแบบตามสมการที่ 4.3 และ 4.4 นั้นค่าของ Derivative Action จะมีผลกับการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรที่เกี่ยวกับกระบวนการ โดยจะทำให้กระบวนการมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเร็วขึ้นแต่ Derivative Action จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Set Point แต่อย่างใด อย่างไรก็ตาม Derivative Action จะมีผลเสียในการควบคุมกระบวนการที่มีสัญญาณรบกวนมาก ทั้งนี้เนื่องจาก Derivative Action จะไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่เข้ามาอย่างมาก ดังนั้นกระบวนการที่มีสัญญาณรบกวน ตัวอย่างเช่น กระบวนการควบคุมอัตราการไหล หรือกระบวนการควบคุมความดัน Derivative Control อาจมีผลทำให้กระบวนการไม่มีเสถียรภาพ (Unstable) ได้ดังรูปที่ 4.7 แสดงผลการเปลี่ยนแปลงของ Derivative Action ต่อการควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 4.7 แสดงผลของ Derivative Action

สำหรับผลของค่าพารามิเตอร์ทั้งสามตัวที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น จะเป็นการพิจารณาผลตอบสนองของกระบวนการอย่างไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน หรือใช้เป็นการพิจารณาทางทฤษฎีเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติจริง ๆ แล้วความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ทั้งสามกับผลตอบสนองของกระบวนการยังเกี่ยวพันธ์กับสิ่งอื่น ๆ อีก เช่น รูปแบบของการควบคุมนั้น จะใช้การควบคุมในลักษณะใด และยังเกี่ยวพันธ์กับสภาพแวดล้อม สัญญาณรบกวนที่กระบวนการได้รับอีกด้วย ดังนั้นในการปรับค่าของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม โดยปกติต้องอาศัยความคุ้นเคยและความชำนาญกับกระบวนการหรือตัวควบคุมแบบนั้น ๆ เป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 การปรับค่าของตัวควบคุม PID

การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม PID เป็นสิ่งที่จำเป็นเพื่อให้ได้การควบคุมที่ดีที่สุด ซึ่งทำได้หลายวิธี บางวิธีจะพิจารณาจากผลตอบสนองของระบบและอาศัยประสบการณ์ บางวิธีจะอาศัยคณิตศาสตร์ และส่วนใหญ่จะพิจารณาจากเงื่อนไขในโดเมนเวลามากกว่าในโดเมนความถี่

พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ PID ดังนี้

$$Gc(s) = Kp\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$$

โดยที่ Kp Proportional Gain

Ti Integral Time

Td Derivative Time

เมื่อ e(t) และ u(t) คืออินพุทและเอาท์พุทของตัวควบคุม จะได้ว่า

$$u(t) = Kp\left[e(t) + \frac{1}{T_i}\int_{-\infty}^{t} e(t)dt + T_d \frac{de)(t)}{dt}\right]$$

นอกจากนี้ ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบ PID อาจจะเขียนในรูปของ

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

โดยที่ Kp Proportional Gain

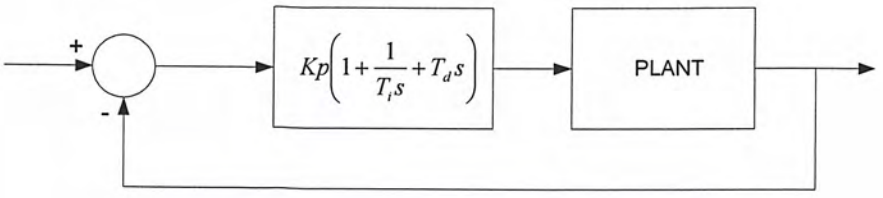
Ti Integral Gain

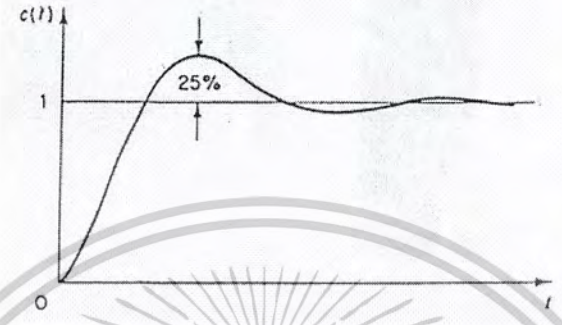
Td Derivative Gain

4.2.6.1 การปรับค่าของตัวควบคุม PID โดยวิธีของ Ziegler-Nichols

วิธีของ Ziegler-Nichols ในการหาค่า Kp , Ti และ Td จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของผลตอบสนองชั่วครู่ของระบบที่ถูกควบคุม ซึ่งมีอยู่ 2 วิธี แต่ละวิธีมีจุดมุ่งหมายที่จะทำให้ผลตอบสนองเวลาของระบบต่ออินพุทแบบ Unit Step มีค่าของ Maximum Overshoot ไม่เกิน 25% ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



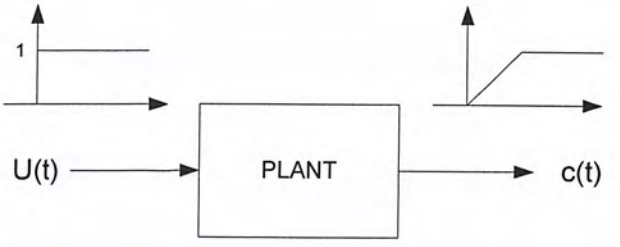


วิธีที่ 1 Process Reaction Curve

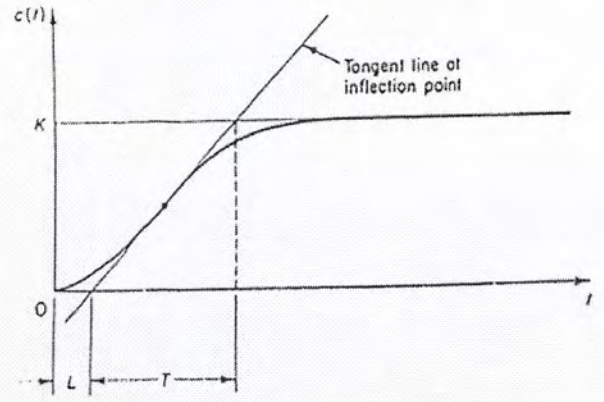
วิธีนี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี จากผลตอบสนองเวลาของระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุมต่ออินพุทแบบ Step โดยที่ระบบหรือกระบวนการในกรณีนี้จะไม่มี Pole ที่จุด Origin หรือไม่มี Domiunant Complex-Conjugate Poles และไม่มีตัวควบคุมต่อร่วมอยู่ ดังนั้นผลตอบสนองเวลาจะเป็นรูปตัว S ดังในรูป (ถ้าผลตอบสนองเวลาไม่เป็นรูปตัว S วิธีนี้จะใช้ไม่ได้) ซึ่งจะแยกพิจารณาเป็นค่าคงที่ 2 ตัวคือ ค่าของ Delay Time L และ เวลาคงที่ T (Time Constant) จากนั้นให้ลากเส้นสัมผัสกับจุดที่มีอัตราการเบี่ยงเบนสูงสุด ซึ่งเส้นนี้จะตัดกับแกนเวลาและเส้นตรงของเอาท์พุท c(t) ที่ c(t)= K

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนจะประมาณได้ด้วยระบบอันดับหนึ่งที่มี Transport lag คือ

$$\frac{C(s)}{U(s)}=\frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Ziegler-Nichols ได้กำหนดค่าของ Kp , Ti และ Td สำหรับตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ดังนี้

1. ตัวควบคุมแบบ P

   Kp = T/L

2. ตัวควบคุมแบบ PI

   Kp = 0.9T/L

   Ti = L/0.3

3. ตัวควบคุมแบบ PID

   Kp = 1.2T/L

   Ti = 2L

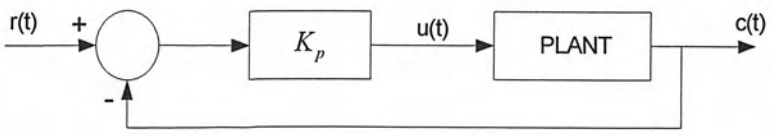
   Td = 0.5L

วิธีที่ 2 Ultimate Method

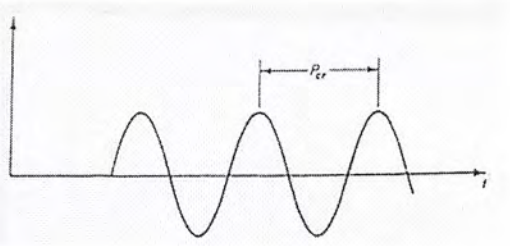
วิธีนี้จะหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดี จากผลตอบสนองเวลาของระบบหรือกระบวนการที่ถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบ P ต่ออินพุทแบบ Unit Step โดยปรับค่าของ Kp ไปเรื่อย ๆ จนกว่าผลตอบสนองทางเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง (Sustained Oscillations) ดังในรูป (ถ้าผลตอบสนองเวลาไม่เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง วิธีจะใช้ไม่ได้) จากนั้นหาค่าของ

Kcr (critical Gain) เป็นอัตราการขยายที่ทำให้ผลตอบสนองเวลาเกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง

Pcr (Oscillation Period) เป็ยคาบเวลาของการแกว่งอย่างต่อเนื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Ziegler-Nichols ได้กำหนดค่าของ Kp , Ti และ Td สำหรับตัวควบคุมแบบต่าง ๆ ดังนี้

1. ตัวควบคุมแบบ P

   Kp = 0.5Kcr

2. ควบคุมแบบ PI

   Kp = 0.45Kcr

   Ti = Pcr/1.2

3. ตัวควบคุมแบบ PD

   Kp = 0.6Kcr

   Td = 0.125Pcr

4. ตัวควบคุมแบบ PID

   Kp = 0.6Kcr

   Ti = 0.5Pcr

   Td = 0.125Pcr

วิธีที่ 3 การปรับค่าของตัวควบคุม PID โดยวิธี Damped Oscillation

วิธีนี้ปรับปรุงมาจาก Ultimate Method โดย Harriott เพื่อใช้ในกรณีที่การปรับค่าของ Kp ไปอย่างไรก็ตาม แต่ผลตอบสนองเวลาไม่เกิดการแกว่งอย่างต่อเนื่อง

วิธี Damped Oscillation นี้จะปรับค่าของ Kp ไปจนผลตอบสนองเวลาของระบบควบคุมแบบลูปปิดมีอัตราการเสื่อม 1/4 ดังรูป จากนั้นวัดค่าของ P และใช้ค่าของ Kp(1/4) เพื่อคำนวณหาค่า Kp , Ti และ Td

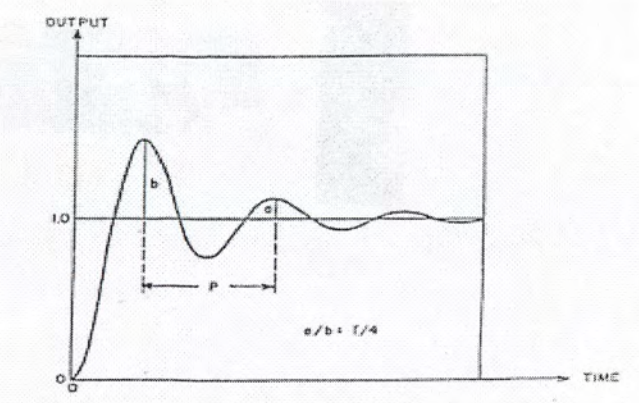
ดังรูป

Kp = Kp(1/4)

Ti = P/1.5

Td = P/6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



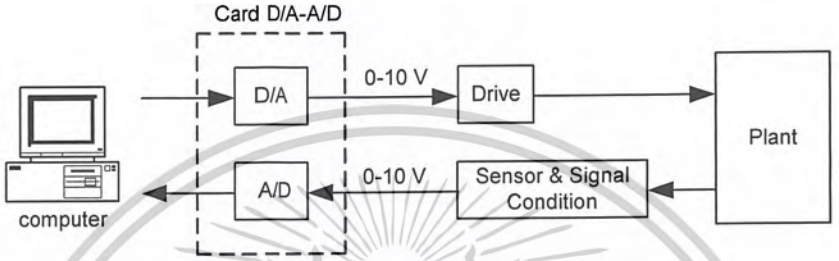
จะต้องระลึกอยู่เสมอว่า การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของ PID โดยวิธีของ Ziegler-Nichols นั้น ไม่ใช้เป็นค่าที่เที่ยงตรงที่จะนำไปใช้งานได้ทันที และมี Maximum Overshoot 25% ตามที่กล่าวไว้แต่จะเป็นเพียงค่าที่ใกล้เคียงเท่านั้น ผู้ควบคุมจะต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์เหล่านี้แบบละเอียด (Fine Tuning) อีกครั้งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

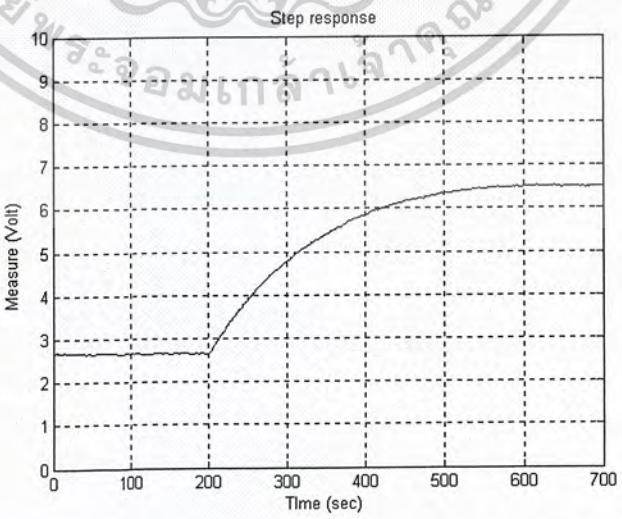
การทดลองหาแบบจำลองของกระบวนการและการทดลองควบคุมกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง

5.1 โครงสร้างระบบควบคุมของชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง



5.2 การทดลองหาผลตอบสนองของถังใบที่ 1 (Single Tank#1)

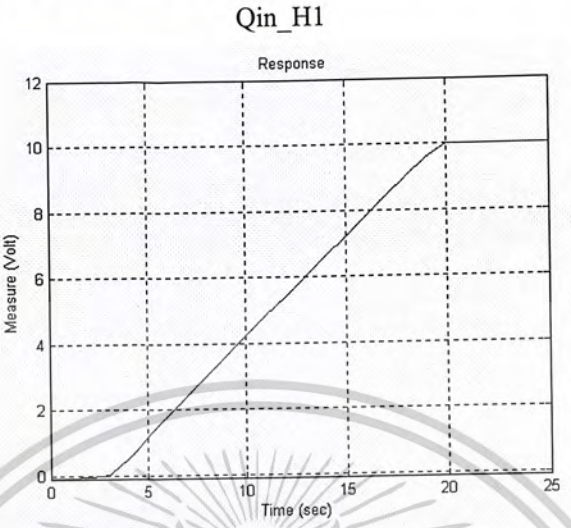
จากรูปที่ 5.1 เป็นกราฟแสดงผลตอบสนองของกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง ที่ได้จากการทดลองเมื่อมีการป้อนอินพุทแบบขั้นบันได (Step) โดยป้อนอินพุทแบบ Step ให้กับถังใบที่ 1 โดยให้ค่าของ MV ป้อนให้กับกระบวนการไว้ค่าที่เหมาะสมค่า ๆ หนึ่งภายหลังจากนั้นเมื่อพบว่าผลตอบสนองของกระบวนการคงที่แล้ว จึงเริ่ม Step ป้อนค่าของ MV ค่าใหม่ที่เวลา 200 วินาที เมื่อผลการตอบสนองของกระบวนการคงที่อีกครั้ง แล้วก็จะทำให้ได้ผลตอบสนองต่ออินพุทแบบ Step ของถังใบที่ 1



รูปที่ 5.1 เป็นผลตอบสนองของกระบวนการ

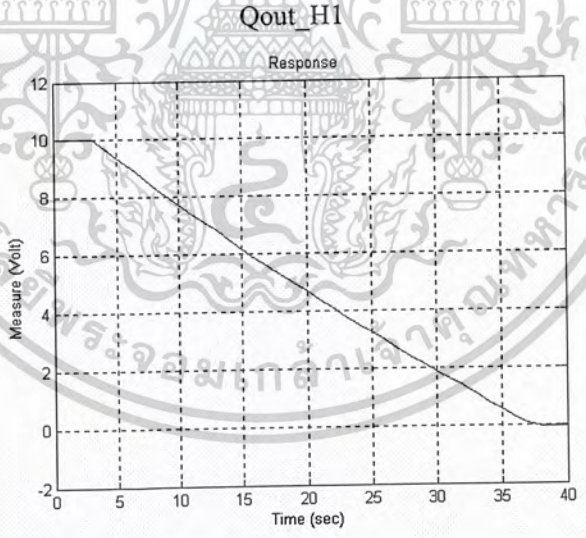
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.2 เป็นผลตอบสนองของถังใบที่ 1 เมื่อให้ Qin1 ซึ่งก็คืออัตราการปั้มน้ำสูงสุด ที่จ่ายเข้าถังใบที่ 1 จากระดับ 0% ถึง 100% ซึ่งใช้เวลาประมาณ 20 sec



รูปที่ 5.2 เป็นผลตอบสนองของถังใบที่ 1

จากรูปที่ 5.3 เป็นผลตอบสนองของถังใบที่ 1 เมื่อมีการปล่อยน้ำให้ไหลออกจากถัง ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 35 วินาที



รูปที่ 5.3 เป็นผลตอบสนองของถังใบที่ 1 เมื่อมีการปล่อยน้ำให้ไหลออกจากถัง

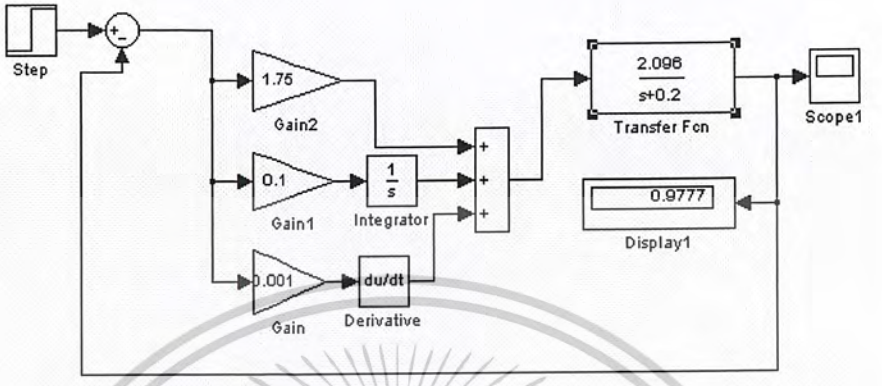
5.2.1 ค่าพารามิเตอร์ของชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำของถังใบที่ 1

ค่า Time constance = 7 sec

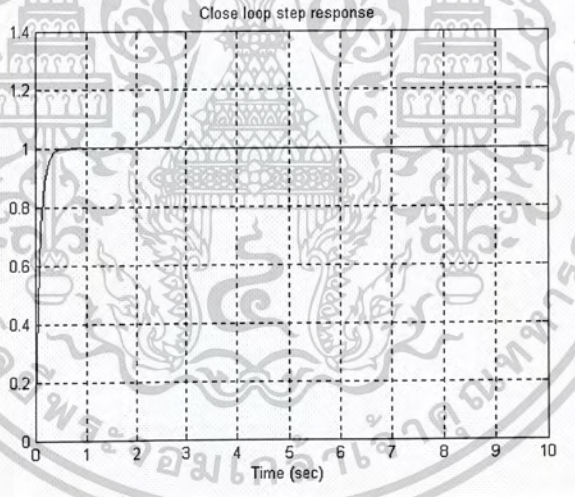
ค่า R1= 6.944 sec/m² , ค่า C1=0.144 m²

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.4 เป็นโปรแกรม Simulink ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการโดยป้อนอินพุทแบบขั้นบันไดซึ่งใช้ตัวควบคุมแบบ PID โดยที่มีค่าพารามิเตอร์ Kp=1.75, Ki=0.1, Kd=0.001



รูปที่ 5.4 การใช้ simulink ในการจำลองกระบวนการ

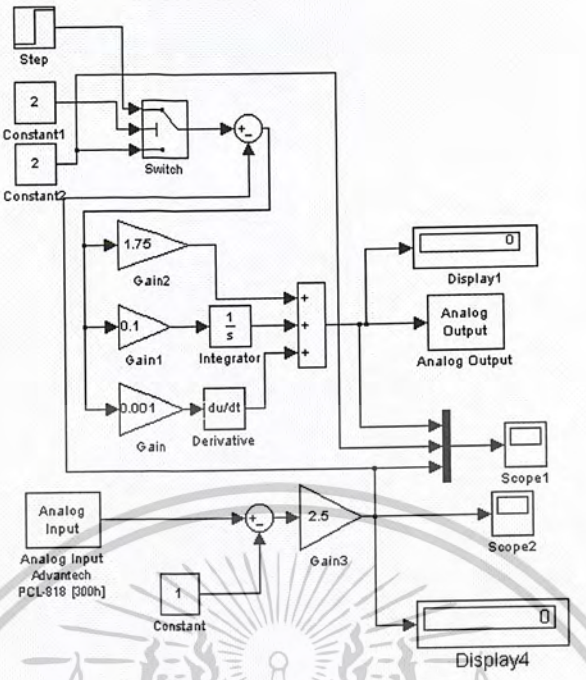


รูปที่ 5.5 เป็นผลตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการจำลอง

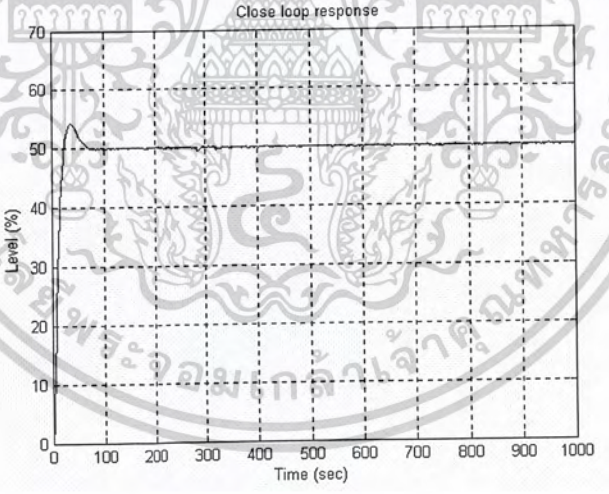
จากรูปที่ 5.5 จะเป็นผลตอบสนองของกระบวนการที่ได้จากการจำลอง หลังจากนั้นนำค่าพีไอดีที่ได้จากการจำลองมาควบคุมกระบวนการจริง โดยต้องการควบคุมระดับน้ำไว้ที่ 50 %

รูปที่ 5.6 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการจริง โดยต้องการควบคุมระดับน้ำที่ 50 % ซึ่งใช้ตัวควบคุมแบบ PID โดยที่มีค่าพารามิเตอร์ Kp=1.75, Ki=0.1, Kd=0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการ

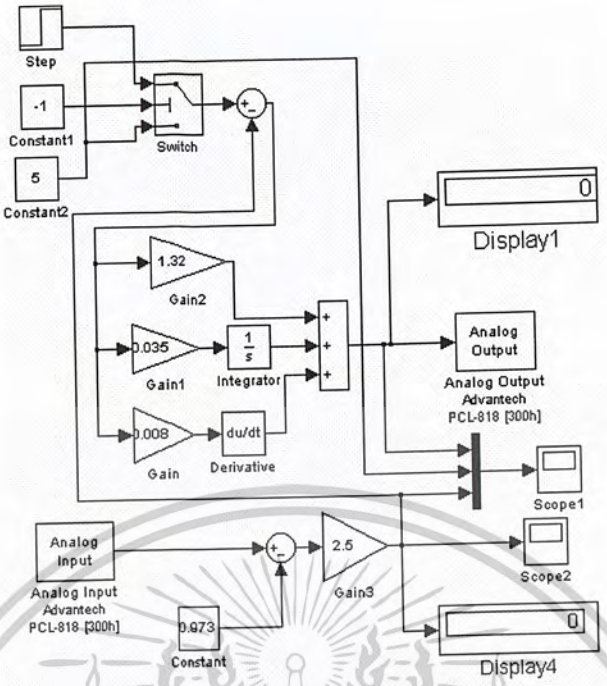


รูปที่ 5.7 ผลตอบสนองของกระบวนการโดยต้องการควบคุมระดับน้ำที่ 50 %

จากรูปที่ 5.7 ผลตอบสนองของกระบวนการโดยต้องการควบคุมระดับน้ำที่ 50 % ซึ่งผลที่ได้จากกระบวนการจริงจะมีค่า Percent Over shoot

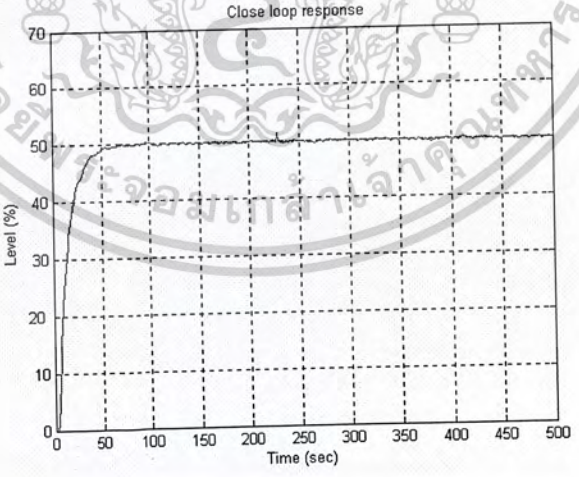
หลังจากนั้นปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดีให้ละเอียดขึ้น โดยให้ Kp=1.32, Ki=0.035, Kd=0.008 แล้วใช้โปรแกรม Simulink ในการออกแบบตัวควบคุมตัวใหม่ดังรูปที่ 5.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการ

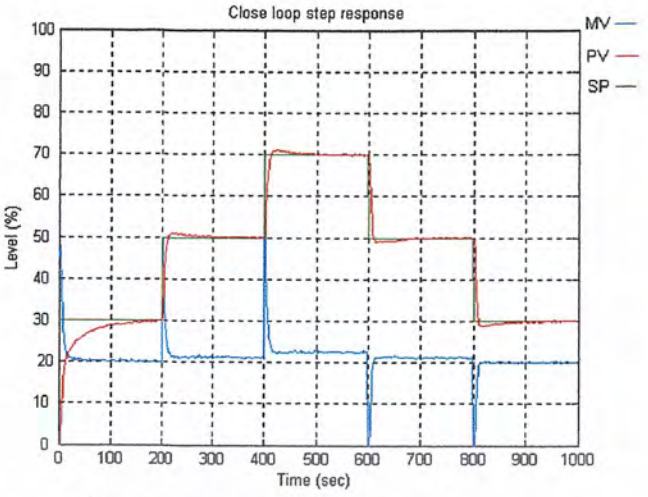
จากรูปที่ 5.9 เป็นกราฟผลตอบสนองของกระบวนการจริงโดยต้องการควบคุมระดับน้ำที่ 50 % หลังจากที่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ซึ่งทำให้ Over shoot มีค่าลดลง



รูปที่ 5.9 เป็นผลตอบสนองของกระบวนการจริงโดยต้องการควบคุมระดับน้ำที่ 50 %

การทดลองเมื่อต้องการควบคุมระดับน้ำที่ระดับต่างๆซึ่งจะได้ผลตอบสนองของระบบที่ระดับต่างๆตามรูปที่ 5.10 โดยเริ่มควบคุมระดับที่ 30%, 50%, 70% ตามลำดับ

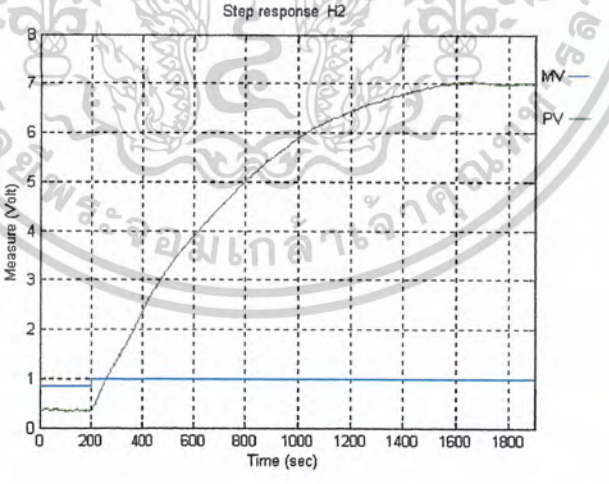
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 ผลตอบสนองของระบบที่ระดับต่างๆ

5.3 การทดลองหาผลตอบสนองของถังใบที่ 2 (Single Tank#2)

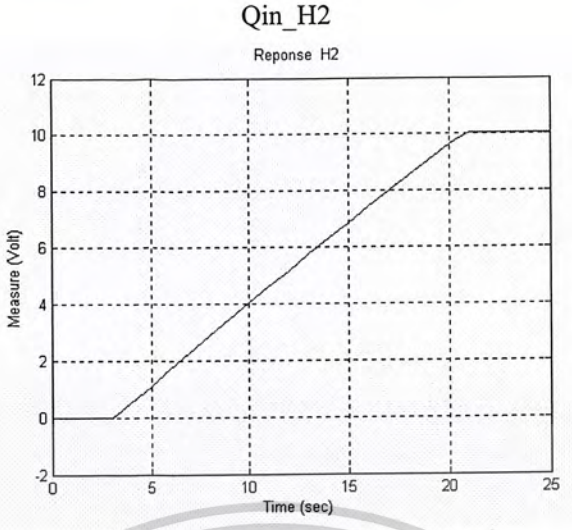
จากรูปที่ 5.11 จะเป็นกราฟผลตอบสนองของกระบวนการ เมื่อป้อนอินพุทแบบขั้นบันได (Step) โดยการป้อนอินพุทแบบ Step ให้กับถังน้ำใบที่ 2 โดยให้ MV กับกระบวนการไว้ค่า ๆ หนึ่ง จากนั้นเมื่อผลตอบสนองของกระบวนการเริ่มที่จะคงที่แล้ว จึงเริ่มทำการป้อนอินพุท Step ป้อนค่า MV ค่าใหม่จะเริ่มที่เวลา 200 วินาที เมื่อผลตอบสนองของกระบวนการเริ่มที่จะคงที่อีกครั้งก็จะได้ผลตอบสนองต่ออินพุทแบบ Step ของถังใบที่ 2



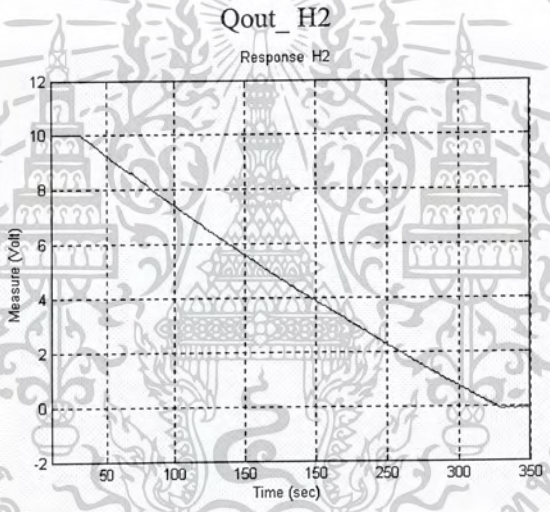
รูปที่ 5.11 ผลตอบสนองของกระบวนการ Single Tank#2

จากรูปที่ 5.12 เป็นผลตอบสนองของถังใบที่ 2 เมื่อให้ Qin2 ซึ่งก็คืออัตราการปั๊มน้ำสูงสุด ที่จ่ายให้ถังใบที่ 2 จากระดับ 0% ถึง 100% ใช้เวลาประมาณ 20 sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.12 เป็นผลตอบสนององถังใบที่ 2



รูปที่ 5.13 เป็นผลตอบสนองของถังใบที่ 2 เมื่อมีการปล่อยน้ำให้ไหลออกจากถัง

จากรูปที่ 5.13 เป็นผลตอบสนองของถังใบที่ 2 เมื่อมีการปล่อยน้ำให้ไหลออกจากถัง ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 300 วินาที

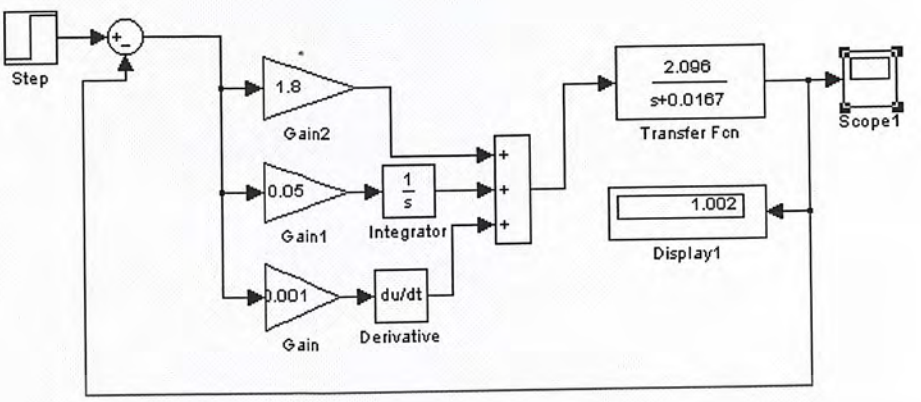
5.3.1 ค่าพารามิเตอร์ของชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำของถังใบที่ 2

ค่า Time constance = 60 sec

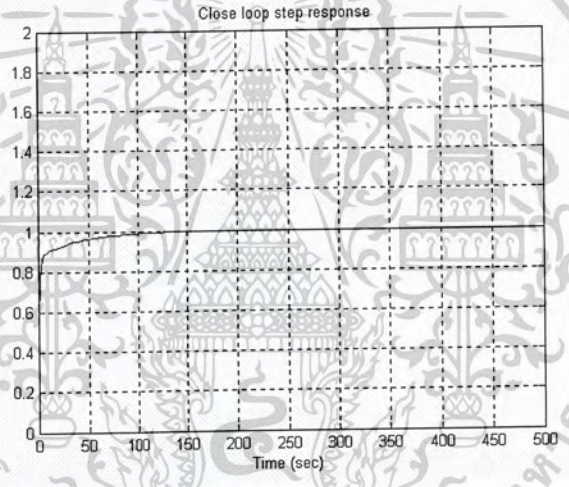
ค่า R1= 0.4771 sec/m² , ค่า C1=0.4771 m²

โปรแกรม Simulink ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการโดยป้อนอินพุทแบบขั้นบันไดซึ่งใช้ตัวควบคุมแบบ PID โดยที่มีค่าพารามิเตอร์ Kp=1.8, Ki=0.05, Kd=0.001 แสดงดังรูปที่ 5.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.14 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการ



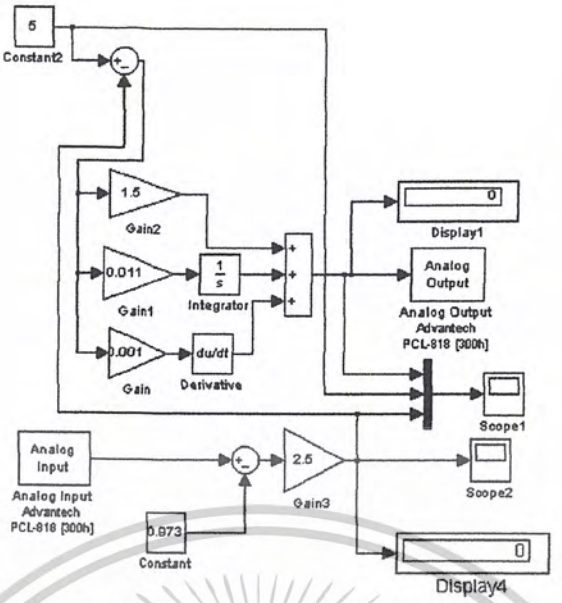
รูปที่ 5.15 ผลตอบสนองของกระบวนการ

หลังจากนั้นนำค่าพีไอดี (PID) ที่ได้จากการจำลองมาควบคุมกระบวนการจริงโดยได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์พีไอดี(PID) ที่ได้จากการจำลองมาใช้กับกระบวนการจริงให้มีค่าแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย

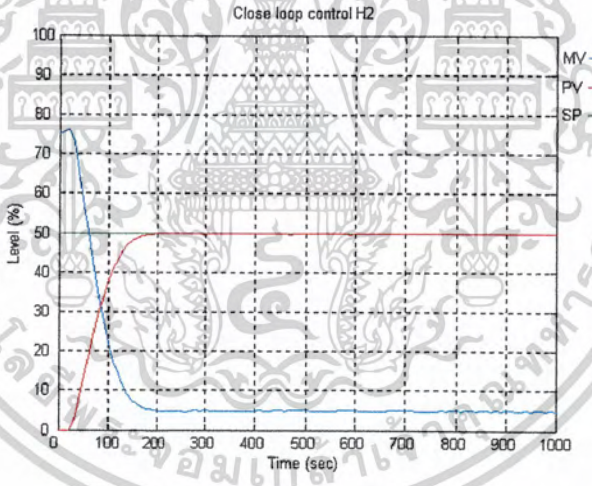
จากรูปที่ 5.16 นั้นโปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการแบบ Single Tank#2 การทดลองโดยต้องการควบคุมระดับน้ำไว้ที่ระดับ 50%

รูปที่ 5.16 เป็นโปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการ โดยต้องการควบคุมระดับน้ำที่ 50 % ซึ่งใช้ตัวควบคุมแบบ PID โดยที่มีค่าพารามิเตอร์ Kp=1.5, Ki=0.011, Kd=0.001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการ



รูปที่ 5.17 ผลตอบสนองของกระบวนการ

จากรูปที่ 5.17 เป็นผลตอบสนองของกระบวนการ Single Tank#2 โดยทดลองเมื่อต้องการควบคุมระดับน้ำที่ระดับ 50%

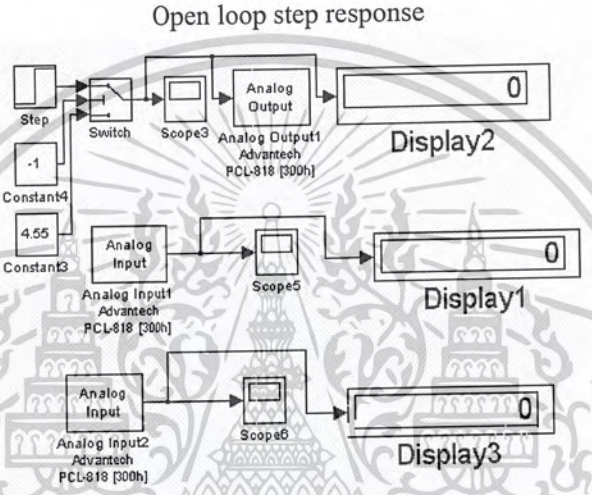
5.4 การทดลองควบคุมกระบวนการระดับน้ำแบบ Single Input Single Output (SISO) Interacting Process และการทดลองควบคุมกระบวนการแบบ Two Input Two Output (TITO) Interacting Process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

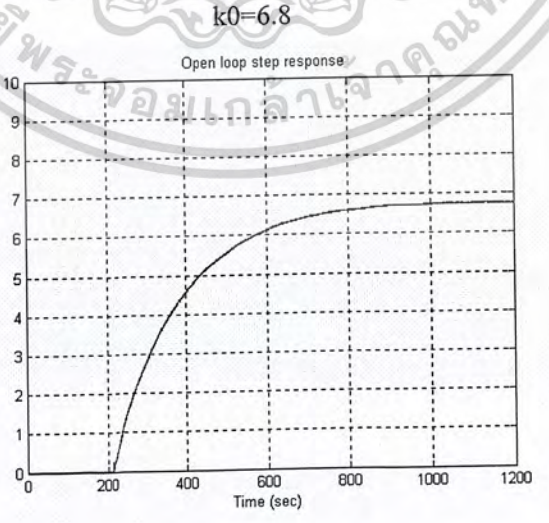
5.4.1 วิธีหาแบบจำลองของกระบวนการ โดยวิธีการสะสมผลตอบสนอง (Integrate step)

วิธีการหาแบบจำลองของกระบวนการโดยใช้วิธี Integrat step โดยการใช้งาน simulink ในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ k0, k1, k2 โดยการป้อนอินพุทแบบ unit step ให้กับกระบวนการจริง แล้วดูว่าผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้ว จากรูปที่ 5.19 ค่า k0=6.8 คือค่าที่กระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัว

วิธีการหาค่าของพารามิเตอร์ K0,K1,K2 ของกระบวนการโดยการใช้ simulink ดังรูปที่ 5.18 โดยการป้อนอินพุทแบบ unit step แล้วดูผลตอบสนองที่ได้จากกระบวนการ



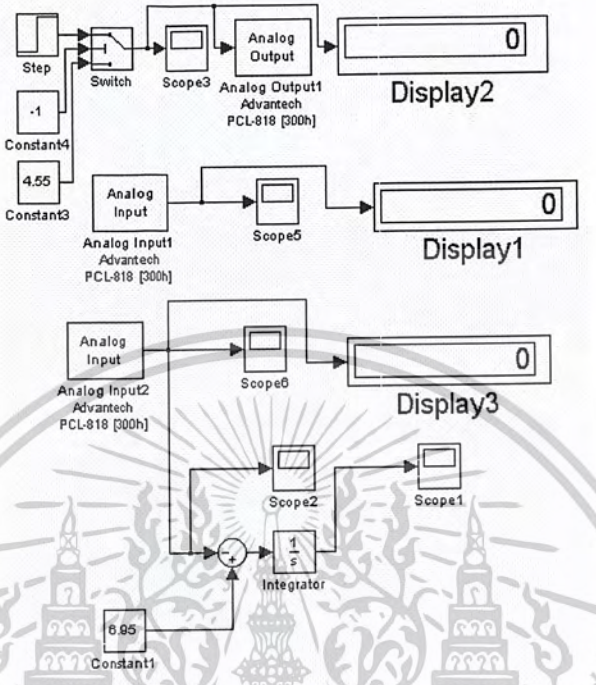
รูปที่ 5.18 การใช้ simulink ป้อนอินพุทแบบ unit step



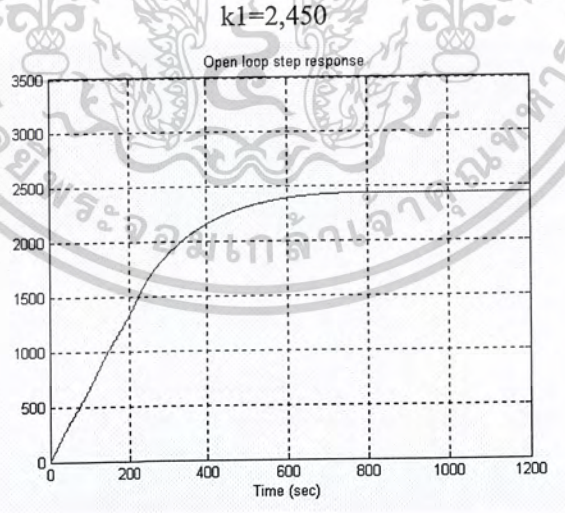
รูปที่ 5.19 ผลตอบสนองของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ค่า k0 แล้วทำการหาค่า k1 โดยป้อนอินพุทแบบ unit step ที่มีค่าเท่ากันกับที่หาค่า k0 แล้วเพิ่มการอินติเกรทเข้าไป ซึ่งจากรูปที่ 5.21จะได้ค่า ค่า k1 เมื่อกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงที่



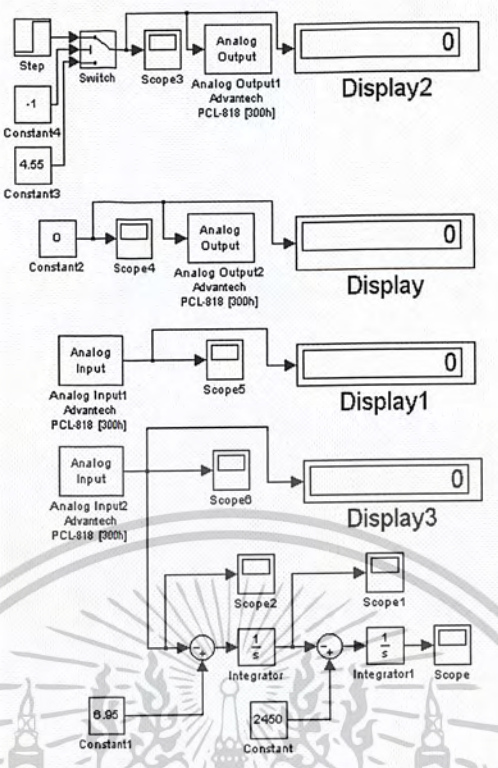
รูปที่ 5.20 เมื่อเพิ่มการอินติเกรทเข้าไป



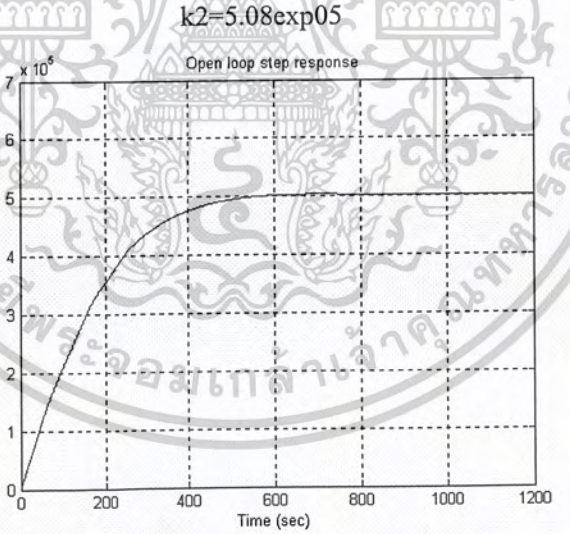
รูปที่ 5.21 ผลตอบสนองของกระบวนการ

จากรูปที่ 5.23 เป็นการหาค่าพารามิเตอร์ k2 ซึ่งวิธีการก็เหมือนกันกับการหาค่า k1 เพียงแต่เพิ่มการอินติเกรทเข้าไปเป็นสองครั้ง จะได้ค่า k2 เมื่อกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.22 แบบจำลอง simulink



รูปที่ 5.23 ผลตอบสนองของกระบวนการ

หลังจากที่ได้ค่า K0,K1,K2 แล้วหาทรานสเฟอร์ ฟังก์ชันของกระบวนการจากสมการที่ 5.1

$$K0=a0$$

$$K1=a1/K0 \qquad (5.1)$$

$$a1K1=a2K0+K2$$

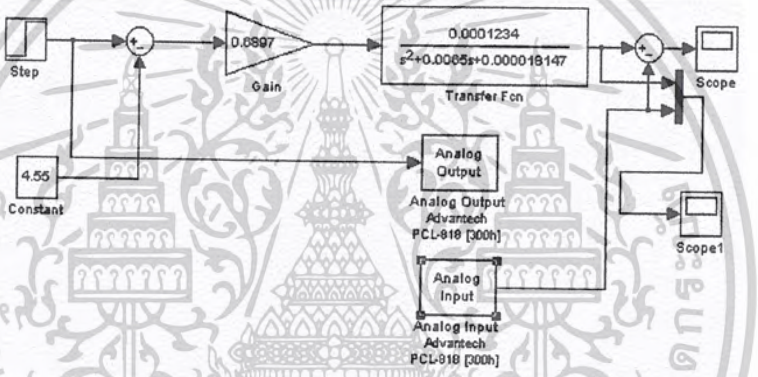
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชัน

Transfer function:

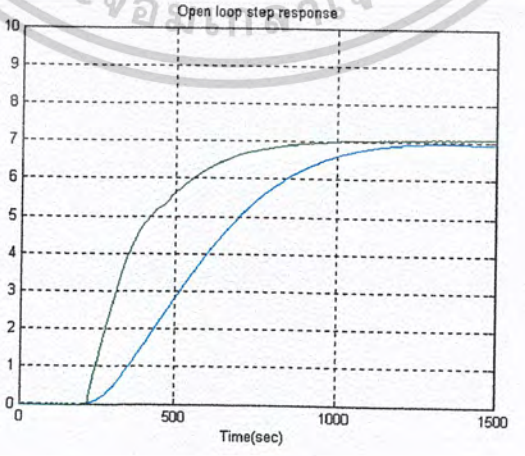
$$\frac{0.0001234}{s^2 + 0.0065\,s + 1.815e\text{-}005}$$

จากรูปที่ 5.24 และรูปที่ 5.25 จะเป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองของแบบจำลองที่ได้กับกระบวนการจริงนั้น เพื่อที่จะหาความผิดพลาดของกระบวนการ ซึ่งจากรูปที่ 5.25 นั้นจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของกระบวนการจริงเร็วกว่าแบบจำลองซึ่งเป็นความผิดพลาดแบบ Dynamics error



รูปที่ 5.24 การเปรียบเทียบกระบวนการจริงกับแบบจำลอง

จากรูปที่ 5.25 จะพบว่าเส้นสีเขียวนั้น คือผลตอบสนองของกระบวนการจริง ส่วนสีน้ำเงินคือผลตอบสนองที่ได้จากแบบจำลอง ซึ่งผลตอบสนองของกระบวนการจริงจะเร็วกว่าแบบจำลอง

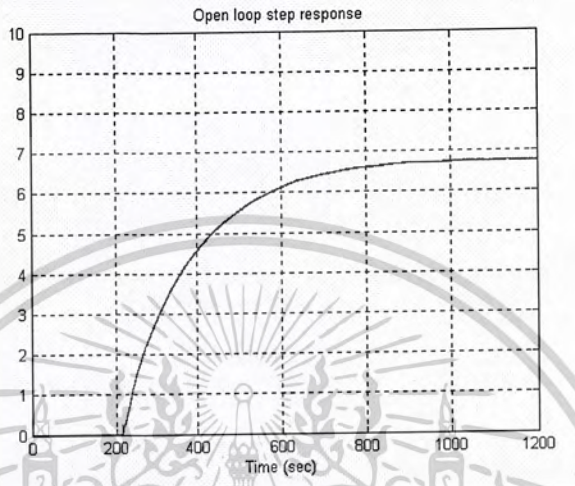


รูปที่ 5.25 ผลตอบสนองของกระบวนการจริงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.2 การออกแบบตัวควบคุม

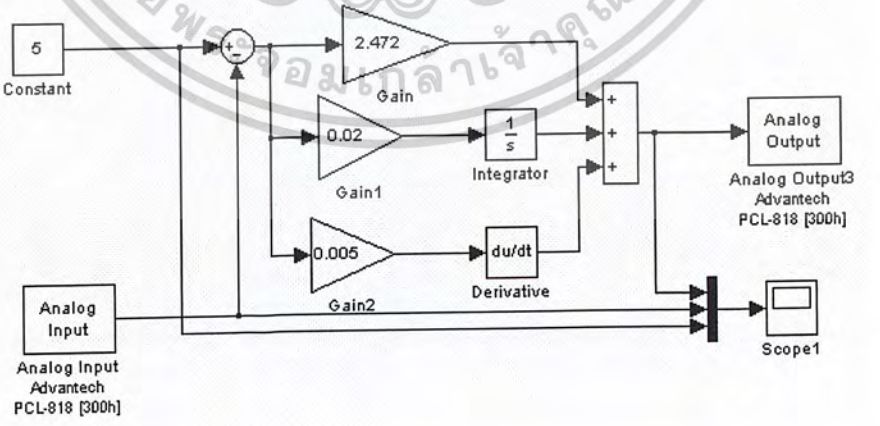
การหาตัวควบคุมกระบวนการโดยใช้วิธีการของ Ziegler-Nichols แบบ Process reaction curve เพื่อที่จะออกแบบตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ โดยที่ผลตอบสนองของกระบวนการเมื่อป้อนอินพุทแบบขั้นบันได (Step) แสดงดังรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 ผลตอบสนองของกระบวนการ

ผลที่ได้จากกราฟทำให้ทราบค่าของ L=0.001 และค่า T=0.0201 ซึ่งจะได้ตัวควบคุมสำหรับกระบวนการ คือ

Kp=2.472,Ti=0.02,Td=0.005

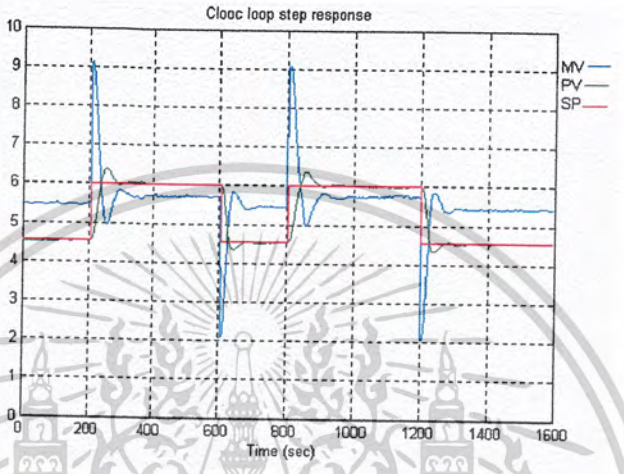


รูปที่ 5.27 การใช้โปรแกรม Simulink ในการควบคุมกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 การทดลองควบคุมกระบวนการระดับน้ำแบบ Single Input Single Output (SISO) Interacting Process

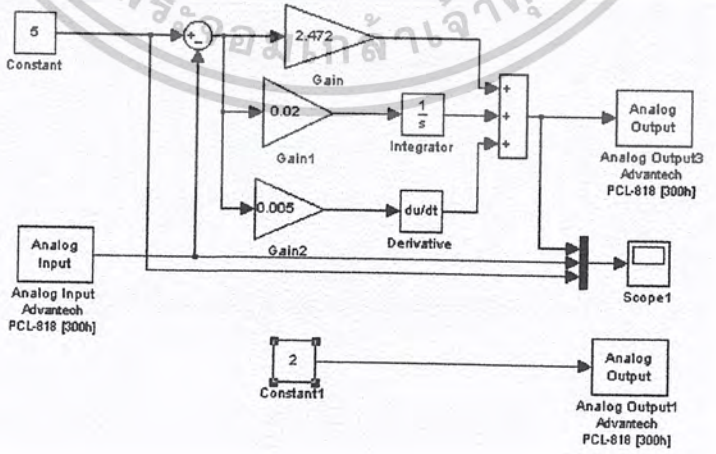
การควบคุมกระบวนการโดยตั้ง Set point ไว้ที่ค่า 4.5 และที่ค่า 6 จะได้ผลตอบสนองของกระบวนการดังรูปที่ 5.28 ซึ่งจะเห็นว่ามีค่า Percent over shoot อยู่บ้าง การลดค่า Percent over shoot สามารถทำได้โดยการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดีให้ละเอียดกว่าค่าเดิมอีกครั้ง



รูปที่ 5.28 ผลตอบสนองของกระบวนการ

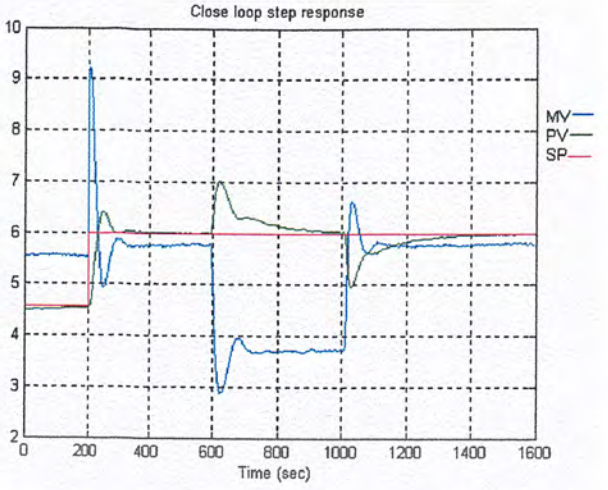
5.4.3.1 การทดลองควบคุมกระบวนการแบบ SISO เมื่อกระบวนการถูกรบกวน

จากรูปที่ 5.29 นั้นเป็นการใช้งานของโปรแกรม Simulink ในการทดลองควบคุมกระบวนการเมื่อกระบวนการถูกรบกวน โดยการจ่าย Qin2 เป็นตัวรบกวนกระบวนการ



รูปที่ 5.29 แบบจำลองกระบวนการถูกรบกวน

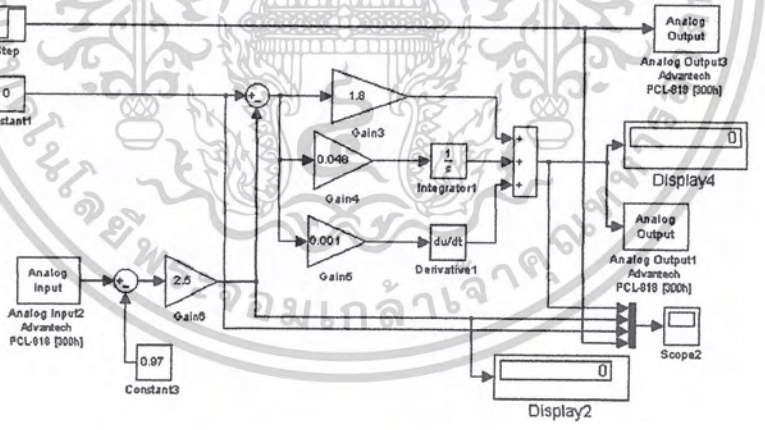
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.30 ผลตอบสนองของกระบวนการที่ถูกรบกวน

จากรูปที่ 5.30 นั้นจะเป็นผลตอบสนองของกระบวนการที่มีการถูกรบกวน ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระบวนการสามารถกลับเข้าสู่สภาวะเดิมได้

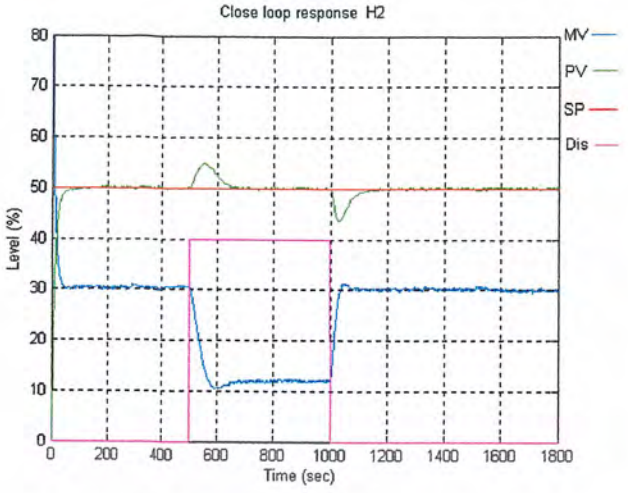
ทดลองปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดี(PID)ให้เหมาะสมแล้วควบคุมระดับไว้ที่ 50 % และทำให้กระบวนการถูกรบกวนอีกครั้ง



รูปที่ 5.31 โปรแกรม Simulink ที่ใช้ควบคุมกระบวนการ

จากรูปที่ 5.32 นั้นเป็นผลตอบสนองของกระบวนการที่มีการถูกรบกวน หลังจากการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดีแล้วจะเห็นได้ว่าสามารถที่จะลดค่า Percent over shoot ให้ลดลงได้

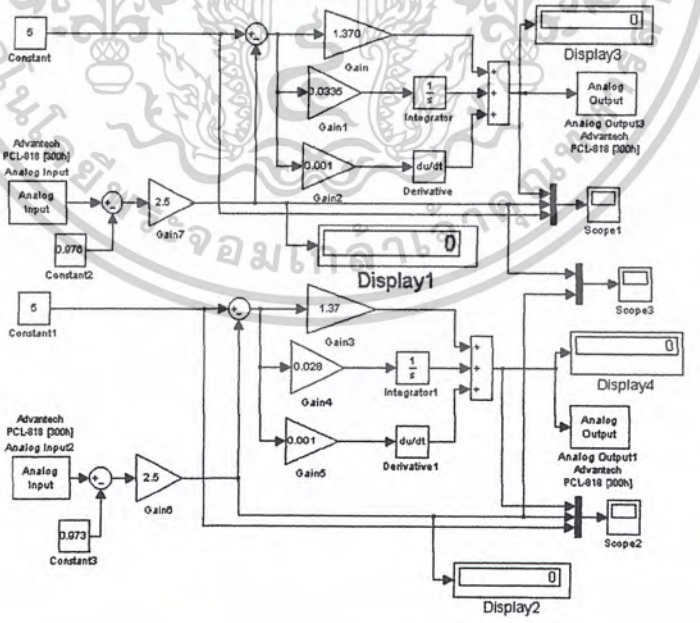
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5. 32 ผลตอบสนองของกระบวนการที่ถูกรบกวนหลังจากการปรับค่าพารามิเตอร์พีไอดี

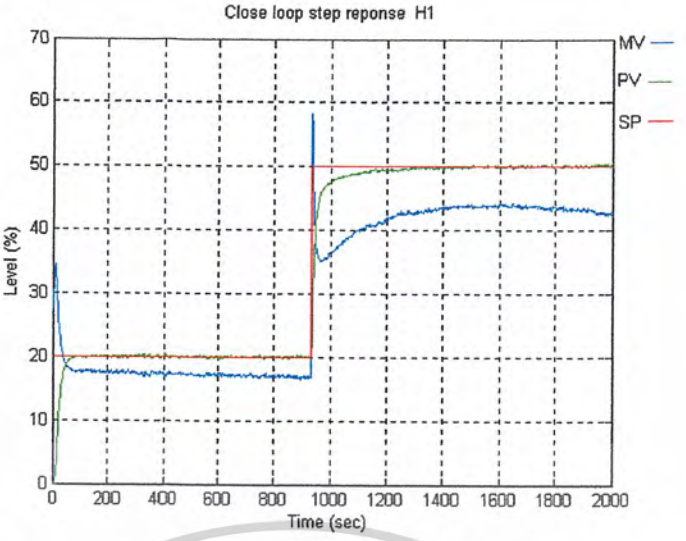
5.4.4 การทดลองควบคุมกระบวนการแบบ Two Input Two Output (TITO)

จากรูปที่ 5.33 การใช้โปรแกรม Simulink สำหรับการทดลองควบคุมกระบวนการเป็นแบบ Two Input Two Output (TITO) โดยต้องการควบคุมระดับน้ำในถังใบที่ 1 และถังใบที่ 2 ให้อยู่ที่ระดับ 20% กับ 70% เมื่อระดับของถังทั้งสองใบคงที่แล้ว หลังจากนั้นจึงควบคุมระดับของถังทั้งสองใบให้อยู่ที่ 50 % เท่ากัน



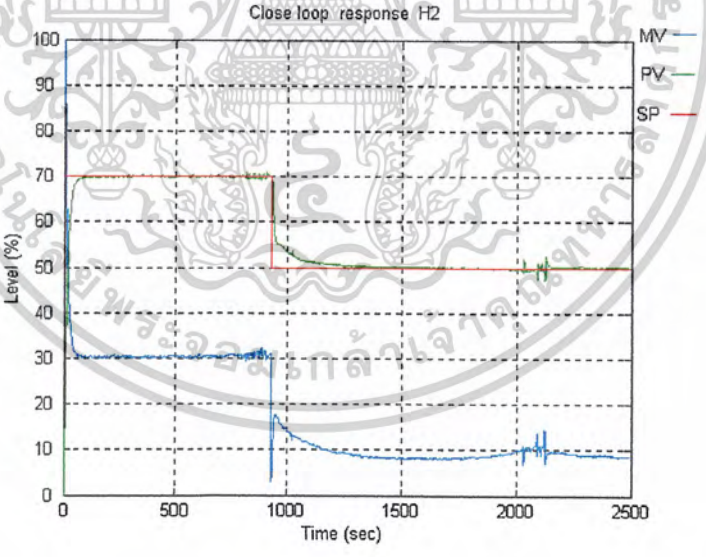
รูปที่ 5.33 โปรแกรม Simulink ในการทดลองควบคุมกระบวนการแบบ (TITO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



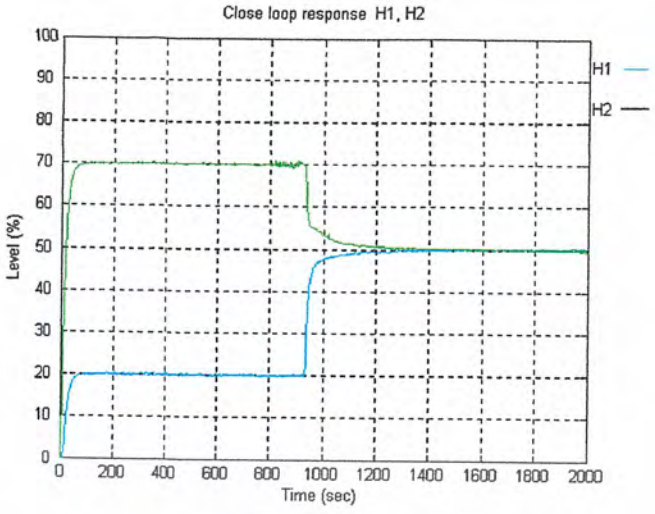
รูปที่ 5.34 ผลตอบสนองของกระบวนการในถังใบที่ 1

จากรูปที่ 5.34 เป็นผลตอบสนองของกระบวนการในถังใบที่ 1 ซึ่งมีการควบคุมระดับน้ำไว้ที่ 20% และเพิ่มขึ้นที่ระดับ 50% และจากรูปที่ 5.35 เป็นผลตอบสนองของกระบวนการในถังใบที่ 2 ซึ่งมีการควบคุมระดับน้ำไว้ที่ 70% และลดลงมาที่ระดับ 50%



รูปที่ 5.35 ผลตอบสนองของกระบวนการในถังใบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.36 ผลตอบสนองของกระบวนการของถังใบที่ 1 และ 2

รูปที่ 5.36 เป็นการเปรียบเทียบผลตอบสนองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังจากผลที่ได้จากการทดลองเมื่อออกแบบตัวควบคุมแล้วสามารถที่จะควบคุมกระบวนการแบบ TITO ให้เข้าสู่ค่า Set point ได้

ตารางที่ 5.1 แสดงสมรรถนะของกระบวนการในแต่ละการทดลอง

การทดลอง	Percenrt Over Shoot P.O. (%)	Stedy State Time (ts) (sec)
การทดลองควบคุมระดับของ H1 ตามรูปที่ 5.7	7.4	80
การทดลองควบคุมระดับของ H1 ตามรูปที่ 5.9	0	90
การทดลองควบคุมระดับของ H2 ตามรูปที่ 5.17	0	200
การทดลองควบคุมระดับแบบ SISO ตามรูปที่ 5.32	5.51	100
หลังจากการปรับค่า PID	0	150
การทดลองควบคุมระดับแบบ TITO ตามรูปที่ 5.36	0	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการทำวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถัง ที่มีผลต่อกันเพื่อใช้ทดลองควบคุมระดับของของเหลวภายในถัง โดยในการออกแบบตัวควบคุมนั้นเราจะต้องรู้สมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้นของกระบวนการก่อน ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังนั้น สามารถหาได้หลายวิธี ซึ่งปริญญานิพนธ์นี้ได้หาสมการทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปไม่เป็นเชิงเส้น แล้วการแปลงลาปลาสจะได้ทรานสเฟอร์ฟังก์ชันที่เป็นแบบจำลองเชิงเส้น,

การหาแบบจำลองของกระบวนการระดับน้ำ โดยมีวิธีการหาค่าสะสมของผลตอบสนอง (Integrate step response) และการหาแบบจำลองโดยวิธีของ Ziegler-Nichols เพื่อนำไปออกแบบตัวควบคุม หลังจากที่เราได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม แล้วก็นำไปจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB และทดลองกับกระบวนการจริง

การจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม และการทดลองกับกระบวนการจริงนั้น ผลที่ได้อาจมีความใกล้เคียงหรือแตกต่างกันอยู่บ้าง ซึ่งในวิธีการหาผลตอบสนองของกระบวนการทำได้โดยการป้อนอินพุทแบบ unit step แล้วดูผลตอบสนองของกระบวนการจากกราฟ

จากการที่ใช้โปรแกรม simulink ในการสร้างตัวควบคุมโดยจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีทดลองกับกระบวนการจริงนั้น ตัวควบคุมสามารถที่จะควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่ค่า Set point ได้ตามที่ต้องการ โดยผลตอบสนองที่ได้จากกระบวนการนั้นอาจจะมีค่าผิดพลาดเล็กน้อย ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของอุปกรณ์ที่ทดลองเช่น ปั๊มน้ำและวาล์ว

ในส่วนของกราฟการเปรียบเทียบผลตอบสนองของกระบวนการ ที่ได้จากแบบจำลองกับการทดลองกับกระบวนการจริงนั้นผลตอบของกระบวนการจริงนั้นจะเร็วกว่าแบบจำลอง ทั้งนี้เป็นความผิดพลาดแบบ Dynamics error ส่วนความผิดพลาดแบบ Static error นั้นมีค่าน้อย

6.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

ปัญหาที่พบในการทดลองนั้นมีด้วยกันหลายปัญหาโดยแต่ละปัญหานั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. เมื่อจ่ายแรงดันคงที่ค่าหนึ่งให้กับปั๊มน้ำ อัตราการไหลของน้ำที่ได้จากปั๊มน้ำนั้นจะไม่คงที่ ซึ่งเหตุที่อัตราการไหลของปั๊มน้ำไม่คงที่นั้น เกิดจากลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของปั๊มน้ำและกระแสที่ขับ เพื่อให้ปั๊มน้ำทำงานนั้นไม่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางในการแก้ไขปัญหาคือ ใช้ตัวควบคุมอีกตัวหนึ่งเพื่อทำหน้าที่ในการควบคุมอัตราการไหล ของปั๊มน้ำให้คงที่

2. ในการดูดน้ำของปั๊มน้ำนั้น บ่อยครั้งมักจะมีเศษของอุปกรณ์เล็ก ๆ น้อย ๆ ที่อยู่ในน้ำ เช่นเศษพลาสติก, เศษโลหะ ฯลฯ ถูกดูดเข้าไปด้วย ทำให้เกิดการอุดตันในตัวปั๊มน้ำ และเป็นสาเหตุให้อัตราการไหล ของปั๊มน้ำลดลง

แนวทางในการแก้ไขปัญหาคือ ใช้อุปกรณ์ในการกรองน้ำเพื่อกรองเศษวัสดุเล็กๆน้อยๆ ที่อยู่ในน้ำก่อนที่จะดูดเข้าปั๊ม

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับกระแสของปั๊มน้ำนั้นเมื่อใช้เวลาในการทดลองนาน ๆ ก็จะเกิดความร้อนสะสมที่ตัวไอซีมาก ถึงแม้ว่าจะมีตัวระบายความร้อนติดอยู่ที่ตัวไอซีก็ตาม ทำให้การขับกระแสของปั๊มน้ำนั้นไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แรงดันและกระแสที่เข้าสู่ปั๊มน้ำจะลดลง แม้ว่าแรงดันที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ขับกระแสจะคงที่ จึงเป็นสาเหตุทำให้อัตราการไหลของปั๊มน้ำลดลง

แนวทางในการแก้ไขปัญหาคือ ใช้ไอซีที่สามารถทนกระแสได้สูงมากขึ้น หรือเปลี่ยนตัวระบายความร้อนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

4. สัญญาณแรงดันที่ได้จากอุปกรณ์ปรับแต่งสัญญาณของตัวเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำนั้น จะมีความแปรปรวนสูง เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าความดันที่เข้าสู่เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำนั้นไม่คงที่ทำให้สัญญาณเอาต์พุตจากเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำไม่คงที่ไปด้วย และเนื่องจากแรงดันเอาต์พุตจากเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำนั้นมีค่าน้อยมาก ทำให้ต้องใช้อัตราขยายในการขยายที่สูงมาก ดังนั้นสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำเมื่อผ่านวงจรขยายสัญญาณแล้ว สัญญาณแรงดันที่ได้จะมีความแปรปรวนสูงมาก

แนวทางในการแก้ไขปัญหาคือ ใช้เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำแบบอื่น เช่นการเลือกใช้เซ็นเซอร์วัดระดับน้ำแบบคาปาซิทีฟ หรือแบบอุลตร้าโซนิค

6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

ปริญญานิพนธ์นี้ ได้เสนอชุดทดลองกระบวนการระดับน้ำแบบสองถังที่มีผลต่อกัน โดยมีการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมด้วยแบบอื่น ๆ เช่น State-Space รวมทั้งการออกแบบตัวชดเชยสำหรับกระบวนการ เช่น ใช้ตัวชดเชยแบบสแตติกดีคับปลิ้ง (Static decoupling) หรือ ตัวชดเชยแบบไดนามิกดีคับปลิ้ง(Dynamic decoupling) ก็เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. John Dorsey, **Continuous and Discrete Control System**, Modeling, Identification, Design and Implementation, Georgia Institute of Technology Atlanta, Georgia.
2. Katsuhiko Ogata, **Modern Control Engineering**, Third Edition, University Of Minnesota, Prentice Hall Internationnal, Inc. 1997
3. Carlos A. Smith, Ph.D.,P.E, University of South Florida, Armando B. Corripio, Ph.D., P.E., Louisiana State University, Principles and Practice of Automatic Process Control, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc.
4. รศ.กิตติ ตีรเศรษฐม, รศ.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร, **วิศวกรรมระบบควบคุม Control System Engineering และ ระบบควบคุมป้อนกลับ Feedback Control System**, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. นาย เทียนชัย สุขศรี, การควบคุมระดับน้ำด้วยตัวควบคุมแบบนิวโรฟัซซี Neuro Fuzzy For Level Control Application, ปริญญานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10 kPa On-Chip Temperature Compensated & Calibrated Silicon Pressure Sensors

MPX2010
MPXV2010G
SERIES

Motorola Preferred Device

COMPENSATED PRESSURE SENSOR
0 to 10 kPa (0 to 1.45 psi)
FULL SCALE SPAN: 25 mV

The MPX2010/MPXV2010G series silicon piezoresistive pressure sensors provide a very accurate and linear voltage output — directly proportional to the applied pressure. These sensors house a single monolithic silicon die with the strain gauge and thin–film resistor network integrated on each chip. The sensor is laser trimmed for precise span, offset calibration and temperature compensation.

Features

- Temperature Compensated over 0°C to +85°C
- Ratiometric to Supply Voltage
- Differential and Gauge Options

Application Examples

- Respiratory Diagnostics
- Air Movement Control
- Controllers
- Pressure Switching

Figure 1 shows a block diagram of the internal circuitry on the stand–alone pressure sensor chip.

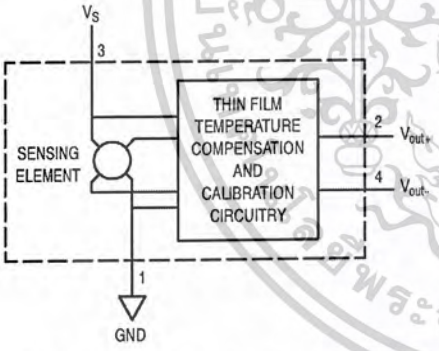


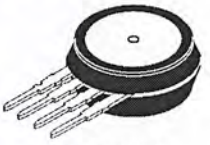
Figure 1. Temperature Compensated and Calibrated Pressure Sensor Schematic

VOLTAGE OUTPUT versus APPLIED DIFFERENTIAL PRESSURE

The output voltage of the differential or gauge sensor increases with increasing pressure applied to the pressure side (P1) relative to the vacuum side (P2). Similarly, output voltage increases as increasing vacuum is applied to the vacuum side (P2) relative to the pressure side (P1).

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

UNIBODY PACKAGE

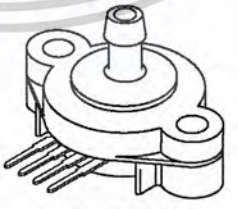


MPX2010D
CASE 344

MPX2010GP
CASE 344B

MPX2010DP
CASE 344C

MPX2010GS
CASE 344E

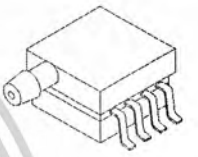


MPX2010GSX
CASE 344F

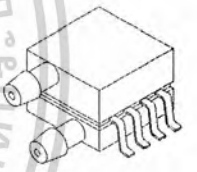
PIN NUMBER			
1	Gnd	3	V_S
2	$+V_{out}$	4	$-V_{out}$

NOTE: Pin 1 is noted by the notch in the lead.

SMALL OUTLINE PACKAGE
SURFACE MOUNT



MPXV2010GP
CASE 1369



MPXV2010DP
CASE 1351

PIN NUMBER			
1	Gnd	5	N/C
2	$+V_{out}$	6	N/C
3	V_S	7	N/C
4	$-V_{out}$	8	N/C

NOTE: Pin 1 is noted by the notch in the lead.

REV 9

© Motorola, Inc. 2002

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Freescale Semiconductor, Inc.

MAXIMUM RATINGS(NOTE)

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Pressure (P1 > P2)	P_{max}	75	kPa
Storage Temperature	T_{stg}	–40 to +125	°C
Operating Temperature	T_A	–40 to +125	°C

NOTE: Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

OPERATING CHARACTERISTICS (V_S = 10 Vdc, T_A = 25°C unless otherwise noted, P1 > P2)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range(1)	P_{OP}	0	—	10	kPa
Supply Voltage(2)	V_S	—	10	16	Vdc
Supply Current	I_o	—	6.0	—	mAdc
Full Scale Span(3)	V_{FSS}	24	25	26	mV
Offset(4)	V_{off}	–1.0	—	1.0	mV
Sensitivity	$\Delta V/\Delta P$	—	2.5	—	mV/kPa
Linearity(5)	—	–1.0	—	1.0	$\%V_{FSS}$
Pressure Hysteresis(5) (0 to 10 kPa)	—	—	±0.1	—	$\%V_{FSS}$
Temperature Hysteresis(5) (–40°C to +125°C)	—	—	±0.5	—	$\%V_{FSS}$
Temperature Effect on Full Scale Span(5)	TCV_{FSS}	–1.0	—	1.0	$\%V_{FSS}$
Temperature Effect on Offset(5)	TCV_{off}	–1.0	—	1.0	mV
Input Impedance	Z_{in}	1000	—	2550	Ω
Output Impedance	Z_{out}	1400	—	3000	Ω
Response Time(6) (10% to 90%)	t_R	—	1.0	—	ms
Warm–Up	—	—	20	—	ms
Offset Stability(7)	—	—	±0.5	—	$\%V_{FSS}$

NOTES:
1. 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
2. Device is ratiometric within this specified excitation range. Operating the device above the specified excitation range may induce additional error due to device self–heating.
3. Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
4. Offset (V_{off}) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
5. Accuracy (error budget) consists of the following:
   - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure, using end point method, over the specified pressure range.
   - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
   - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at 25°C.
   - TcSpan: Output deviation at full rated pressure over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
   - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of 0 to 85°C, relative to 25°C.
6. Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
7. Offset stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ON–CHIP TEMPERATURE COMPENSATION and CALIBRATION

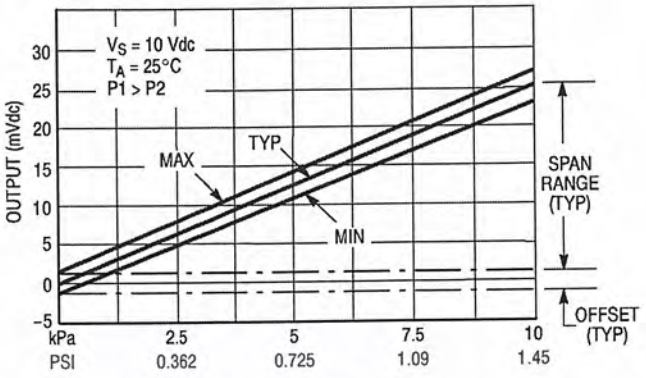


Figure 2. Output versus Pressure Differential

Figure 2 shows the output characteristics of the MPX2010/MPXV2010G series at 25°C. The output is directly proportional to the differential pressure and is essentially a straight line.

The effects of temperature on full scale span and offset are very small and are shown under Operating Characteristics.

This performance over temperature is achieved by having both the shear stress strain gauge and the thin–film resistor circuitry on the same silicon diaphragm. Each chip is dynamically laser trimmed for precise span and offset calibration and temperature compensation.

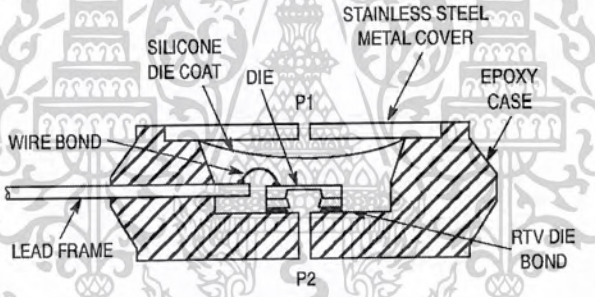


Figure 3. Unibody Package — Cross–Sectional Diagram (not to scale)

Figure 3 illustrates the differential/gauge die in the basic chip carrier (Case 344). A silicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the silicon diaphragm.

The MPX2010/MPXV2010G series pressure sensor operating characteristics and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media other than dry air may have adverse effects on sensor performance and long term reliability. Contact the factory for information regarding media compatibility in your application.

For More Information On This Product,
Go to: www.freescale.com
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BURR - BROWN®

OPA549

For most current data sheet and other product information, visit www.burr-brown.com

High-Voltage, High-Current OPERATIONAL AMPLIFIER

FEATURES

- HIGH OUTPUT CURRENT:
  8A Continuous
  10A Peak
- WIDE POWER SUPPLY RANGE:
  Single Supply: +8V to +60V
  Dual Supply: ±4V to ±30V
- WIDE OUTPUT VOLTAGE SWING
- FULLY PROTECTED:
  Thermal Shutdown
  Adjustable Current Limit
- OUTPUT DISABLE CONTROL
- THERMAL SHUTDOWN INDICATOR
- HIGH SLEW RATE: 9V/µs
- CONTROL REFERENCE PIN
- 11-LEAD POWER ZIP PACKAGE

APPLICATIONS

- VALVE, ACTUATOR DRIVER
- SYNCHRO, SERVO DRIVER
- POWER SUPPLIES
- TEST EQUIPMENT
- TRANSDUCER EXCITATION
- AUDIO POWER AMPLIFIER

DESCRIPTION

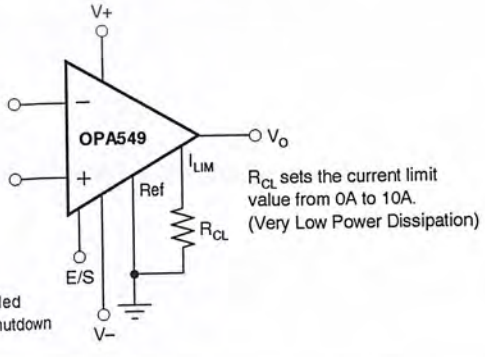
The OPA549 is a low-cost, high-voltage/high-current operational amplifier ideal for driving a wide variety of loads. This laser-trimmed monolithic integrated circuit provides excellent low-level signal accuracy, and high output voltage and current.

The OPA549 operates from either single or dual supplies for design flexibility. The input common-mode range extends below the negative supply.

The OPA549 is internally protected against over-temperature conditions and current overloads. In addition, the OPA549 provides an accurate, user-selected current limit. Unlike other designs which use a "power" resistor in series with the output current path, the OPA549 senses the load indirectly. This allows the current limit to be adjusted from 0A to 10A with a resistor/potentiometer, or controlled digitally with a voltage-out or current-out DAC.

The Enable/Status (E/S) pin provides two functions. It can be monitored to determine if the device is in thermal shutdown, and it can be forced low to disable the output stage and effectively disconnect the load.

The OPA549 is available in an 11-lead power ZIP package. Its copper tab allows easy mounting to a heat sink for excellent thermal performance. Operation is specified over the extended industrial temperature range, –40°C to +85°C.



International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111
Twx: 910-952-1111 • Internet: http://www.burr-brown.com/ • Cable: BBRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

©1999 Burr-Brown Corporation
PDS-1450A
Printed in U.S.A. November, 1999

SPECIFICATIONS: V_S = ±2.25V to ±18V

Boldface limits apply over the specified temperature range, T_A = –40°C to +85°C

At T_{CASE} = +25°C, V_S = ±30V, Ref = 0V, and E/S pin open, unless otherwise noted.

PARAMETER		CONDITION	OPA549T MIN	OPA549T TYP	OPA549T MAX	UNITS
OFFSET VOLTAGE	V_{OS}	V_{CM} = 0V, I_O = 0		±1	±5	mV
Input Offset Voltage		**T_{CASE} = –40°C to +85°C**		**±20**		µV/°C
vs Temperature	dV_{OS}/dT	V_S = ±4V to ±30V, Ref = V–		25	100	µV/V
vs Power Supply	PSRR					
INPUT BIAS CURRENT(1)						
Input Bias Current(2)	I_B	V_{CM} = 0V		–100	–500	nA
vs Temperature		**T_{CASE} = –40°C to +85°C**		**±0.5**		nA/°C
Input Offset Current	I_{OS}	V_{CM} = 0V		±5	±50	nA
NOISE						
Input Voltage Noise Density	e_n	f = 1kHz		70		nV/√Hz
Current Noise Density	i_n	f = 1kHz		1		pA/√Hz
INPUT VOLTAGE RANGE						
Common-Mode Voltage Range: Positive	V_{CM}	Linear Operation	(V+) – 3	(V+) – 2.3		V
Negative	V_{CM}	Linear Operation	(V–) – 0.1	(V–) – 0.2		V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	V_{CM} = (V–) – 0.1V to (V+) – 3V	80	95		dB
INPUT IMPEDANCE						
Differential				10^7 || 6		Ω || pF
Common-Mode				10^9 || 4		Ω || pF
OPEN-LOOP GAIN						
Open-Loop Voltage Gain	A_{OL}	V_O = ±25V, R_L = 1kΩ	100	110		dB
		V_O = ±25V, R_L = 4Ω		100		dB
FREQUENCY RESPONSE						
Gain Bandwidth Product	GBW			0.9		MHz
Slew Rate	SR	G = 1, 50Vp-p Step, R_L = 4Ω		9		V/µs
Full Power Bandwidth				See Typical Curve		
Settling Time: ±0.1%		G = –10, 50V Step		20		µs
Total Harmonic Distortion + Noise(3)	THD+N	f = 1kHz, R_L = 4Ω, G = +3, Power = 25W		0.015		%
OUTPUT						
Voltage Output, Positive		I_O = 2A	(V+) – 3.2	(V+) – 2.7		V
Negative		I_O = –2A	(V–) + 1.7	(V–) + 1.4		V
Positive		I_O = 8A	(V+) – 4.8	(V+) – 4.3		V
Negative		I_O = –8A	(V–) + 4.6	(V–) + 3.9		V
Negative		R_L = 8Ω to V–	(V–) + 0.3	(V–) + 0.1		V
Maximum Continuous Current Output: dc(4)			±8			A
ac(4)		Waveform Cannot Exceed 10A peak	8			Arms
Output Current Limit				0 to ±10		A
Current Limit Range						A
Current Limit Equation				I_{LIM} = 15800 • 4.75V/(7500Ω + R_{CL})		
Current Limit Tolerance(1)		R_{CL} = 7.5kΩ (I_{LIM} = ±5A), R_L = 4Ω		±200	±500	mA
Capacitive Load Drive (Stable Operation)	C_{LOAD}			See Typical Curve		
Output Disabled						
Leakage Current		Output Disabled		See Typical Curve		
Output Capacitance		Output Disabled		750		pF
OUTPUT ENABLE /STATUS (E/S) PIN						
Shutdown Input Mode						
$V_{E/S}$ High (output enabled)		E/S Pin Open or Forced High	(Ref) + 2.4			V
$V_{E/S}$ Low (output disabled)		E/S Pin Forced Low			(Ref) + 0.8	V
$I_{E/S}$ High (output enabled)		E/S Pin Indicates High		–50		µA
$I_{E/S}$ Low (output disabled)		E/S Pin Indicates Low		–55		µA
Output Disable Time				1		µs
Output Enable Time				3		µs
Thermal Shutdown Status Output						
Normal Operation		Sourcing 20µA	(Ref) + 2.4	(Ref) + 3.5		V
Thermally Shutdown		Sinking 5µA, T_J > 160°C		(Ref) + 0.2	(Ref) + 0.8	V
Junction Temperature, Shutdown				+160		°C
Reset from Shutdown				+140		°C
Ref (Reference Pin for Control Signals)						
Voltage Range			V–		(V+) – 8	V
Current(2)				–3.5		mA
POWER SUPPLY						
Specified Voltage	V_S			±30		V
Operating Voltage Range, (V+) – (V–)			8		60	V
Quiescent Current	I_Q	I_{LIM} Connected to Ref I_O = 0		±26	±35	mA
Quiescent Current in Shutdown Mode		I_{LIM} Connected to Ref		±6		mA
TEMPERATURE RANGE						
Specified Range			–40		+85	°C
Operating Range			–40		+125	°C
Storage Range			–55		+125	°C
Thermal Resistance, θ_{JC}				1.4		°C/W
Thermal Resistance, θ_{JA}		No Heat Sink		30		°C/W

NOTES: (1) High-speed test at T_J = +25°C. (2) Positive conventional current is defined as flowing into the terminal. (3) See "Total Harmonic Distortion + Noise vs Frequency" in the Typical Performance Curves section for additional power levels. (4) See "Safe Operating Area" (SOA) in the Typical Performance Curves section.

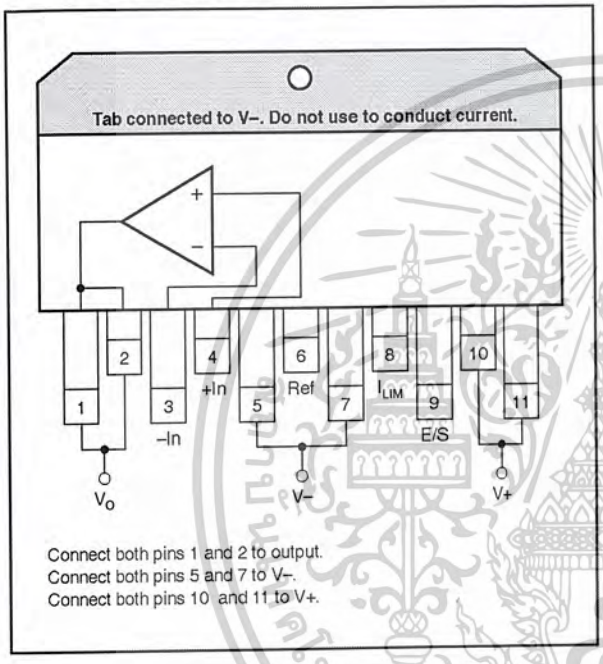
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS(1)

Output Current	See SOA Curve (Figure 6)
Supply Voltage, V+ to V–	60V
Input Voltage Range	(V–) – 0.5V to (V+) + 0.5V
Input Shutdown Voltage	Ref – 0.5 to V+
Operating Temperature	–40°C to +125°C
Storage Temperature	–55°C to +125°C
Junction Temperature	150°C
Lead Temperature (soldering, 10s)	300°C
ESD Capability (Human Body Model)	2000V

NOTE: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may degrade device reliability.

CONNECTION DIAGRAM



Connect both pins 1 and 2 to output.
Connect both pins 5 and 7 to V–.
Connect both pins 10 and 11 to V+.

PACKAGE/ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER	TEMPERATURE RANGE
OPA549T	11-Lead Power ZIP	242	–40°C to +85°C

ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

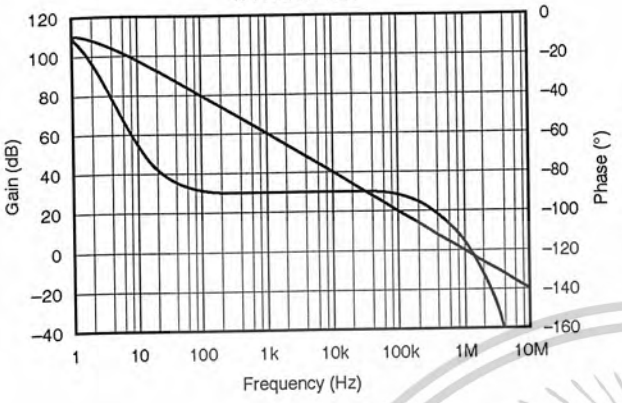
The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

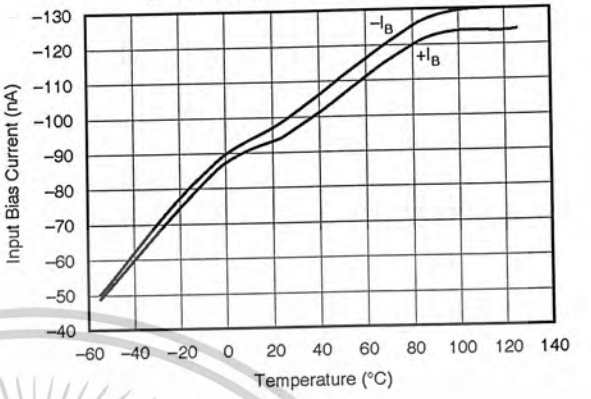
TYPICAL PERFORMANCE CURVES

At T_{CASE} = +25°C, V_S = ±30V and E/S pin open, unless otherwise noted.

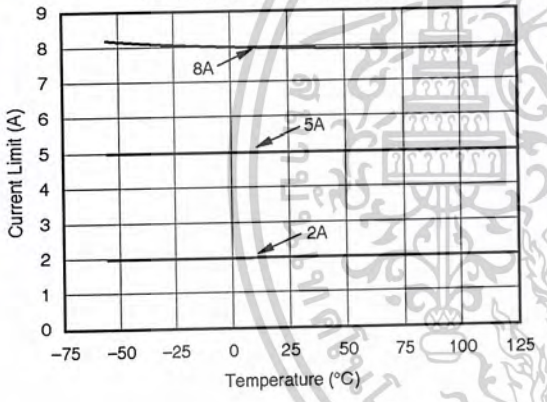
OPEN-LOOP GAIN AND PHASE vs FREQUENCY



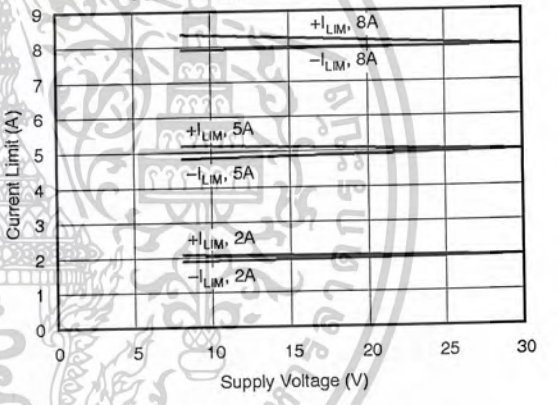
INPUT BIAS CURRENT vs TEMPERATURE



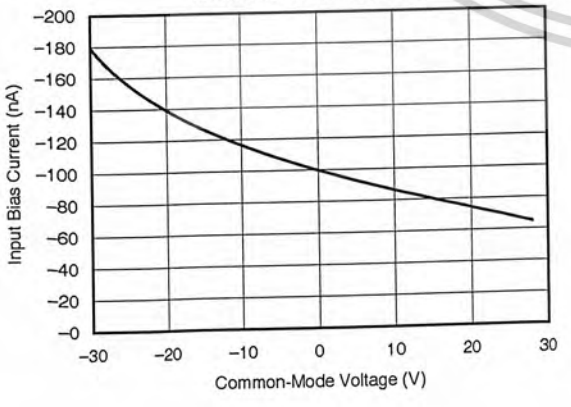
CURRENT LIMIT vs TEMPERATURE



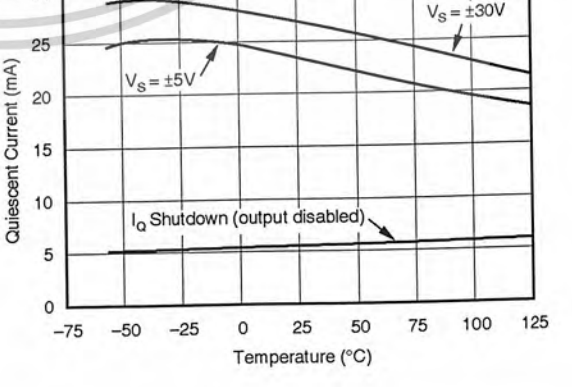
CURRENT LIMIT vs SUPPLY VOLTAGE



INPUT BIAS CURRENT vs COMMON-MODE VOLTAGE

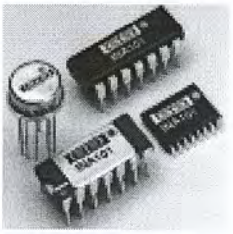


QUIESCENT CURRENT vs TEMPERATURE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BURR - BROWN®



INA101

High Accuracy INSTRUMENTATION AMPLIFIER

FEATURES

- LOW DRIFT: 0.25µV/°C max
- LOW OFFSET VOLTAGE: 25µV max
- LOW NONLINEARITY: 0.002%
- LOW NOISE: 13nV/√Hz
- HIGH CMR: 106dB AT 60Hz
- HIGH INPUT IMPEDANCE: $10^{10}\Omega$
- 14-PIN PLASTIC, CERAMIC DIP, SOL-16, AND TO-100 PACKAGES

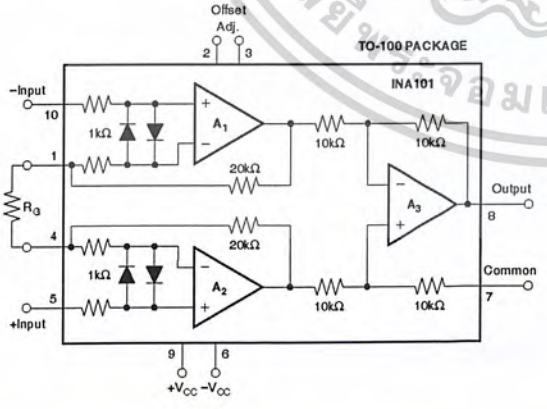
APPLICATIONS

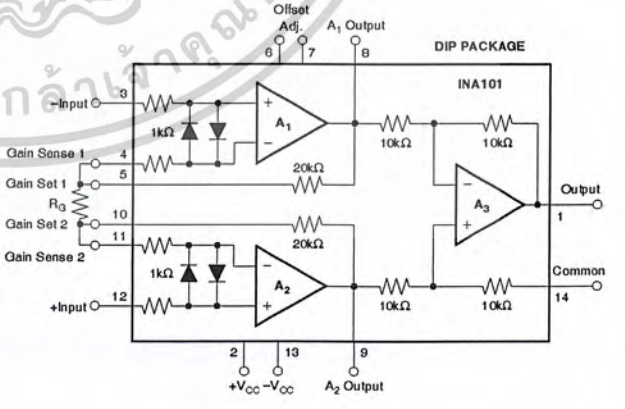
- STRAIN GAGES
- THERMOCOUPLES
- RTDs
- REMOTE TRANSDUCERS
- LOW-LEVEL SIGNALS
- MEDICAL INSTRUMENTATION

DESCRIPTION

The INA101 is a high accuracy instrumentation amplifier designed for low-level signal amplification and general purpose data acquisition. Three precision op amps and laser-trimmed metal film resistors are integrated on a single monolithic integrated circuit.

The INA101 is packaged in TO-100 metal, 14-pin plastic and ceramic DIP, and SOL-16 surface-mount packages. Commercial, industrial and military temperature range models are available.





International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111 • Twx: 910-952-1111
Internet: http://www.burr-brown.com/ • FAXLine: (800) 548-6133 (US/Canada Only) • Cable: BBRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

©1981 Burr-Brown Corporation
PDS-454K
Printed in U.S.A. July, 1998

ไม่วากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS

ELECTRICAL

At +25°C with ±15VDC power supply and in circuit of Figure 1, unless otherwise noted.

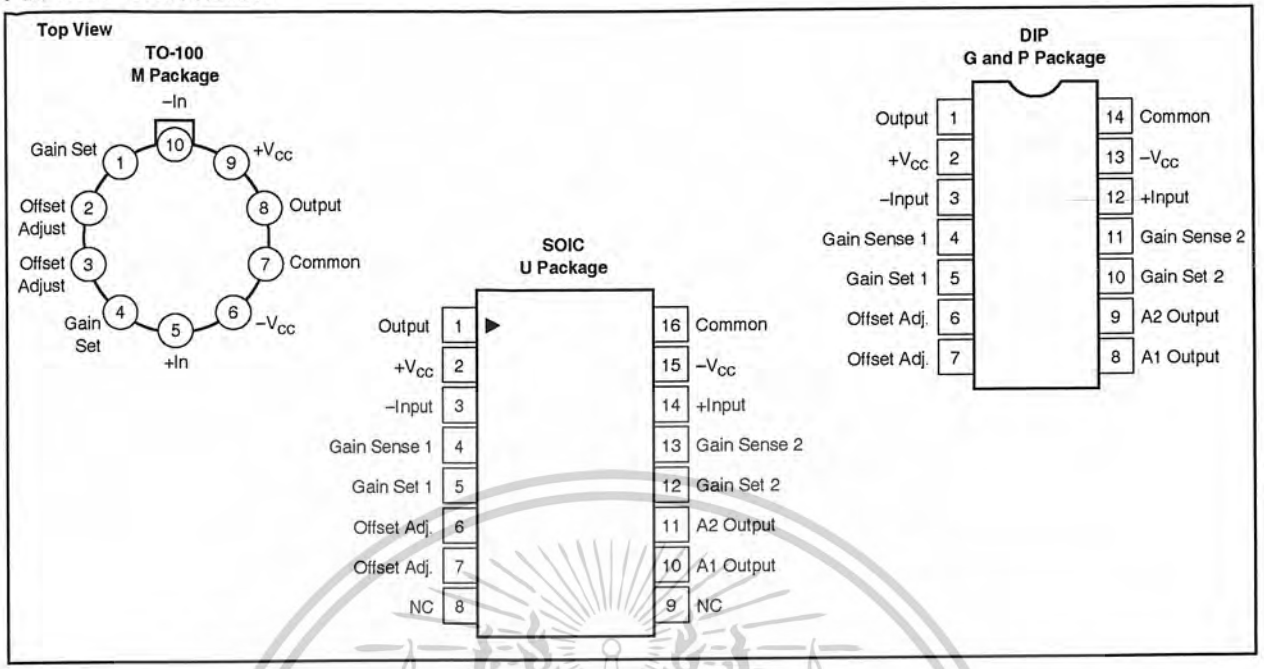
PARAMETER	INA101AM, AG			INA101SM, SG			INA101CM, CG			INA101HP, KU			UNITS
	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
GAIN													
Range of Gain	1		1000										V/V
Gain Equation		G = 1 + (40k/R_G)											V/V
Error from Equation, DC[1]		±(0.04 + 0.00016G −0.02/G)	±(0.1 + 0.0003G −0.05/G)								±(0.1 + 0.00015G) −0.05/G	±(0.3 + 0.0002G) −0.10/G	%
Gain Temp. Coefficient[3]													
G = 1		2	5					10					ppm/°C
G = 10		20	100					11					ppm/°C
G = 100		22	110					11					ppm/°C
G = 1000		22	110										ppm/°C
Nonlinearity, DC[2]		±(0.002 + 10^{-5} G)	±(0.005 + 2 x 10^{-5} G)		±(0.001 + 10^{-5} G)	±(0.002 + 10^{-5} G)		±(0.001 + 10^{-5} G)	±(0.002 + 10^{-5} G)				% of p-p FS
RATED OUTPUT													
Voltage	±10	±12.5											V
Current	±5	±10											mA
Output Impedance		0.2											Ω
Capacitive Load		1000											pF
INPUT OFFSET VOLTAGE													
Initial Offset at +25°C		±(25 + 200/G)	±(50 + 400/G)		±10+ 100/G)	±(25 +200/G)		±(10+ 100/G)	±(25 + 200/G)		±(125 + 450/G)	±(250 + 900/G)	µV
			±(2 + 20/G)			±(0,75 + 10/G)			±(0,25 + 10/G)		±(2 + 20/G)		µV/°C
vs Temperature													
vs Supply		±(1 + 20/G)											µV/V
vs Time		±(1 + 20/G)											µV/mo
INPUT BIAS CURRENT													
Initial Bias Current		±15	±30		±10			±5	±20				nA
(each input)		±0.2											nA/°C
vs Temperature		±0.1											nA/V
vs Supply		±15	±30		±10			±5	±20				nA
Initial Offset Current		±0.5											nA/°C
vs Temperature													
INPUT IMPEDANCE													
Differential		10^{10} || 3											Ω || pF
Common-mode		10^{10} || 3											Ω || pF
INPUT VOLTAGE RANGE													
Range, Linear Response	±10	±12											V
CMR with 1kΩ Source Imbalance										65	85		dB
DC to 60Hz, G = 1	80	90								90	95		dB
DC to 60Hz, G = 10	96	106								100	105		dB
DC to 60Hz, G = 100 to 1000	106	110											
INPUT NOISE													
Input Voltage Noise													µV, p-p
f_B = 0.01Hz to 10Hz		0.8											
Density, G = 1000													nV/√Hz
f_O = 10Hz		18											nV/√Hz
f_O = 100Hz		15											nV/√Hz
f_O = 1kHz		13											
Input Current Noise													pA, p-p
f_B = 0.01Hz to 10Hz		50											
Density													pA/√Hz
f_O = 10Hz		0.8											pA/√Hz
f_O = 100Hz		0.46											pA/√Hz
f_O = 1kHz		0.35											
DYNAMIC RESPONSE													
Small Signal, ±3dB Flatness													kHz
G = 1		300											kHz
G = 10		140											kHz
G = 100		25											kHz
G = 1000		2.5											
Small Signal, ±1% Flatness													kHz
G = 1		20											kHz
G = 10		10											kHz
G = 100		1											Hz
G = 1000		200											kHz
Full Power, G = 1 to 100		6.4											V/µs
Slew Rate, G = 1 to 100	0.2	0.4											
Settling Time (0.1%)													µs
G = 1		30	40										µs
G = 100		40	55										µs
G = 1000		350	470										
Settling Time (0.01%)													µs
G = 1		30	45										µs
G = 100		50	70										µs
G = 1000		500	650										
POWER SUPPLY													
Rated Voltage		±15											V
Voltage Range	±5		±20										V
Current, Quiescent[2]		±6.7	±8.5										mA
TEMPERATURE RANGE[5]													
Specification	−25		+85	−55		+125				0		+70	°C
Operation	−55		+125							−25		+85	°C
Storage	−65		+150							−40		+85	°C

* Specifications same as for INA101AM, AG.

NOTES: (1) Typically the tolerance of R_G will be the major source of gain error. (2) Nonlinearity is the maximum peak deviation from the best straight-line as a percentage of peak-to-peak full scale output. (3) Not including the TCR of R_G. (4) Adjustable to zero at any one gain. (5) θ_{JC} output stage = 113°C/W, θ_{JC} quiescent circuitry = 19°C/W, θ_{CA} = 83°C/W.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN CONFIGURATIONS



ORDERING INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	TEMPERATURE RANGE
INA101AM	10-Pin Metal TO-100	–25°C to +85°C
INA101CM	10-Pin Metal TO-100	–25°C to +85°C
INA101AG	14-Pin Ceramic DIP	–25°C to +85°C
INA101CG	14-Pin Ceramic DIP	–25°C to +85°C
INA101HP	14-Pin Plastic DIP	0°C to +70°C
INA101KU	SOL-16 Surface-Mount	0°C to +70°C
INA101SG	14-Pin Ceramic DIP	–55°C to +125°C
INA101SM	10-Pin Metal TO-100	–55°C to +125°C

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage	±20V
Power Dissipation	600mW
Input Voltage Range	±V_{CC}
Output Short Circuit (to ground)	Continuous
Operating Temperature M, G Package	–55°C to +125°C
P, U Package	–25°C to +85°C
Storage Temperature M, G Package	–65°C to +150°C
P, U Package	–40°C to +85°C
Lead Temperature (soldering, 10s) M, G, P Package	+300°C
Lead Temperature (wave soldering, 3s) U Package	+260°C

PACKAGE INFORMATION

PRODUCT	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER(1)
INA101AM	10-Pin Metal TO-100	007
INA101CM	10-Pin Metal TO-100	007
INA101AG	14-Pin Ceramic DIP	169
INA101CG	14-Pin Ceramic DIP	169
INA101HP	14-Pin Plastic DIP	010
INA101KU	SOL-16 Surface-Mount	211
INA101SG	14-Pin Ceramic DIP	169
INA101SM	10-Pin Metal TO-100	007

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix D of Burr-Brown IC Data Book.

ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BURR - BROWN®

OPA227
OPA2227
OPA4227
OPA228
OPA2228
OPA4228

For most current data sheet and other product information, visit www.burr-brown.com

High Precision, Low Noise OPERATIONAL AMPLIFIERS

FEATURES

- LOW NOISE: 3nV/√Hz
- WIDE BANDWIDTH:
  OPA227: 8MHz, 2.3V/µs
  OPA228: 33MHz, 10V/µs
- SETTLING TIME: 5µs
  (significant improvement over OP-27)
- HIGH CMRR: 138dB
- HIGH OPEN-LOOP GAIN: 160dB
- LOW INPUT BIAS CURRENT: 10nA max
- LOW OFFSET VOLTAGE: 75µV max
- WIDE SUPPLY RANGE: ±2.5V to ±18V
- OPA227 REPLACES OP-27, LT1007, MAX427
- OPA228 REPLACES OP-37, LT1037, MAX437
- SINGLE, DUAL, AND QUAD VERSIONS

APPLICATIONS

- DATA ACQUISITION
- TELECOM EQUIPMENT
- GEOPHYSICAL ANALYSIS
- VIBRATION ANALYSIS
- SPECTRAL ANALYSIS
- PROFESSIONAL AUDIO EQUIPMENT
- ACTIVE FILTERS
- POWER SUPPLY CONTROL

SPICE Model available for OPA227 at www.burr-brown.com

DESCRIPTION

The OPA227 and OPA228 series op amps combine low noise and wide bandwidth with high precision to make them the ideal choice for applications requiring both ac and precision dc performance.

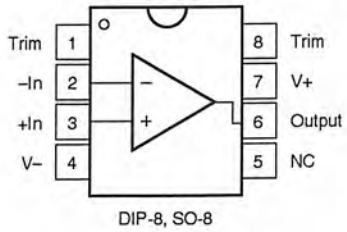
The OPA227 is unity gain stable and features high slew rate (2.3V/µs) and wide bandwidth (8MHz). The OPA228 is optimized for closed-loop gains of 5 or greater, and offers higher speed with a slew rate of 10V/µs and a bandwidth of 33MHz.

The OPA227 and OPA228 series op amps are ideal for professional audio equipment. In addition, low quiescent current and low cost make them ideal for portable applications requiring high precision.

The OPA227 and OPA228 series op amps are pin-for-pin replacements for the industry standard OP-27 and OP-37 with substantial improvements across the board. The dual and quad versions are available for space savings and per-channel cost reduction.

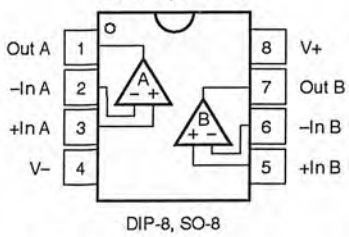
The OPA227, OPA228, OPA2227, and OPA2228 are available in DIP-8 and SO-8 packages. The OPA4227 and OPA4228 are available in DIP-14 and SO-14 packages with standard pin configurations. Operation is specified from –40°C to +85°C.

OPA227, OPA228



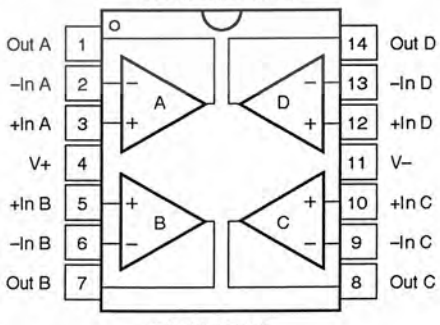
DIP-8, SO-8

OPA2227, OPA2228



DIP-8, SO-8

OPA4227, OPA4228



DIP-14, SO-14

International Airport Industrial Park • Mailing Address: PO Box 11400, Tucson, AZ 85734 • Street Address: 6730 S. Tucson Blvd., Tucson, AZ 85706 • Tel: (520) 746-1111
Twx: 910-952-1111 • Internet: http://www.burr-brown.com/ • Cable: BBRCORP • Telex: 066-6491 • FAX: (520) 889-1510 • Immediate Product Info: (800) 548-6132

© 1998 Burr-Brown Corporation
PDS-1494B Printed in U.S.A. May, 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS: V_S = ±5V to ±15V

OPA227 Series

At T_A = +25°C, and R_L = 10kΩ, unless otherwise noted.
Boldface limits apply over the specified temperature range, T_A = –40°C to +85°C.

PARAMETER	CONDITION	OPA227P, U OPA2227P, U			OPA227PA, UA OPA2227PA, UA OPA4227PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
OFFSET VOLTAGE								
Input Offset Voltage V_{OS}			±5	±75		±10	±200	µV
T_A = –40°C to +85°C				**±100**			**±200**	µV
vs Temperature dV_{OS}/dT			**±0.1**	**±0.6**		**±0.3**	**±2**	µV/°C
vs Power Supply PSRR	V_S = ±2.5V to ±18V		±0.5	±2		□	□	µV/V
T_A = –40°C to +85°C				**±2**				µV/V
vs Time			0.2			□		µV/mo
Channel Separation (dual, quad)	dc		0.2			□		µV/V
	f = 1kHz, R_L = 5kΩ		110			□		dB
INPUT BIAS CURRENT								
Input Bias Current I_B			±2.5	±10		□	□	nA
T_A = –40°C to +85°C				**±10**				nA
Input Offset Current I_{OS}			±2.5	±10		□		nA
T_A = –40°C to +85°C				**±10**			□	nA
NOISE								
Input Voltage Noise, f = 0.1Hz to 10Hz			90			□		nVp-p
			15			□		nVrms
Input Voltage Noise Density, f = 10Hz e_n			3.5			□		nV/√Hz
f = 100Hz			3			□		nV/√Hz
f = 1kHz			3			□		nV/√Hz
Current Noise Density, f = 1kHz i_n			0.4			□		pA/√Hz
INPUT VOLTAGE RANGE								
Common-Mode Voltage Range V_{CM}		(V–)+2		(V+)–2	□			V
Common-Mode Rejection CMRR	V_{CM} = (V–)+2V to (V+)–2V	120	138		□			dB
T_A = –40°C to +85°C		**120**			□			dB
INPUT IMPEDANCE								
Differential			10^7 || 12			□		Ω || pF
Common-Mode	V_{CM} = (V–)+2V to (V+)–2V		10^9 || 3			□		Ω || pF
OPEN-LOOP GAIN								
Open-Loop Voltage Gain A_{OL}	V_O = (V–)+2V to (V+)–2V, R_L = 10kΩ	132	160		□			dB
T_A = –40°C to +85°C		**132**			□			dB
	V_O = (V–)+3.5V to (V+)–3.5V, R_L = 600Ω	132	160		□			dB
T_A = –40°C to +85°C		**132**			□			dB
FREQUENCY RESPONSE								
Gain Bandwidth Product GBW			8			□		MHz
Slew Rate SR			2.3			□		V/µs
Settling Time: 0.1%	G = 1, 10V Step, C_L = 100pF		5			□		µs
0.01%	G = 1, 10V Step, C_L = 100pF		5.6			□		µs
Overload Recovery Time	V_{IN} • G = V_S		1.3			□		µs
Total Harmonic Distortion + Noise THD+N	f = 1kHz, G = 1, V_O = 3.5Vrms		0.00005			□		%
OUTPUT								
Voltage Output	R_L = 10kΩ	(V–)+2		(V+)–2	□			V
T_A = –40°C to +85°C	R_L = 10kΩ	**(V–)+2**		**(V+)–2**	□			V
	R_L = 600Ω	(V–)+3.5		(V+)–3.5	□			V
T_A = –40°C to +85°C	R_L = 600Ω	**(V–)+3.5**		**(V+)–3.5**	□			V
Short-Circuit Current I_{SC}			±45			□		mA
Capacitive Load Drive C_{LOAD}			See Typical Curve			□		
POWER SUPPLY								
Specified Voltage Range V_S		±5		±15	□			V
Operating Voltage Range		±2.5		±18	□			V
Quiescent Current (per amplifier) I_Q	I_O = 0		±3.7	±3.8		□		mA
T_A = –40°C to +85°C	I_O = 0			**±4.2**			□	mA
TEMPERATURE RANGE								
Specified Range		–40		+85	□			°C
Operating Range		–55		+125	□			°C
Storage Range		–65		+150	□			°C
Thermal Resistance θ_{JA}								
SO-8 Surface Mount			150			□		°C/W
DIP-8			100			□		°C/W
DIP-14			80			□		°C/W
SO-14 Surface Mount			100			□		°C/W

□ Specifications same as OPA227P, U.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPECIFICATIONS: V_S = ±5V to ±15V

OPA228 Series

At T_A = +25°C, and R_L = 10kΩ, unless otherwise noted.
Boldface limits apply over the specified temperature range, T_A = –40°C to +85°C.

PARAMETER	CONDITION	OPA228P, U OPA2228P, U			OPA228PA, UA OPA2228PA, UA OPA4228PA, UA			UNITS
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
OFFSET VOLTAGE								
Input Offset Voltage V_{OS}			±5	±75		±10	±200	µV
T_A = –40°C to +85°C				**±100**			**±200**	µV
vs Temperature dV_{OS}/dT			**±0.1**	**±0.6**		**±0.3**	**±2**	µV/°C
vs Power Supply PSRR	V_S = ±2.5V to ±18V		±0.5	±2		□	□	µV/V
T_A = –40°C to +85°C				**±2**				µV/V
vs Time			0.2			□		µV/mo
Channel Separation (dual, quad)	dc		0.2			□		µV/V
	f = 1kHz, R_L = 5kΩ		110			□		dB
INPUT BIAS CURRENT								
Input Bias Current I_B			±2.5	±10		□		nA
T_A = –40°C to +85°C				**±10**			□	nA
Input Offset Current I_{OS}			±2.5	±10		□		nA
T_A = –40°C to +85°C				**±10**			□	nA
NOISE								
Input Voltage Noise, f = 0.1Hz to 10Hz			90			□		nVp-p
			15			□		nVrms
Input Voltage Noise Density, f = 10Hz e_n			3.5			□		nV/√Hz
f = 100Hz			3			□		nV/√Hz
f = 1kHz			3			□		nV/√Hz
Current Noise Density, f = 1kHz i_n			0.4			□		pA/√Hz
INPUT VOLTAGE RANGE								
Common-Mode Voltage Range V_{CM}		(V–)+2		(V+)–2	□			V
Common-Mode Rejection CMRR	V_{CM} = (V–)+2V to (V+)–2V	120	138		□			dB
T_A = –40°C to +85°C		**120**			□			dB
INPUT IMPEDANCE								
Differential			10^7 || 12			□		Ω || pF
Common-Mode	V_{CM} = (V–)+2V to (V+)–2V		10^9 || 3			□		Ω || pF
OPEN-LOOP GAIN								
Open-Loop Voltage Gain A_{OL}	V_O = (V–)+2V to (V+)–2V, R_L = 10kΩ	132	160		□			dB
T_A = –40°C to +85°C		**132**			□			dB
	V_O = (V–)+3.5V to (V+)–3.5V, R_L = 600Ω	132	160		□			dB
T_A = –40°C to +85°C		**132**			□			dB
FREQUENCY RESPONSE								
Minimum Closed-Loop Gain			5			□		V/V
Gain Bandwidth Product GBW			33			□		MHz
Slew Rate SR			11			□		V/µs
Settling Time: 0.1%	G = 5, 10V Step, C_L = 100pF, C_F =12pF		1.5			□		µs
0.01%	G = 5, 10V Step, C_L = 100pF, C_F =12pF		2			□		µs
Overload Recovery Time	V_{IN} • G = V_S		0.6			□		µs
Total Harmonic Distortion + Noise THD+N	f = 1kHz, G = 5, V_O = 3.5Vrms		0.00005			□		%
OUTPUT								
Voltage Output	R_L = 10kΩ	(V–)+2		(V+)–2	□			V
T_A = –40°C to +85°C	R_L = 10kΩ	**(V–)+2**		**(V+)–2**	□			V
	R_L = 600Ω	(V–)+3.5		(V+)–3.5	□			V
T_A = –40°C to +85°C	R_L = 600Ω	**(V–)+3.5**		**(V+)–3.5**	□			V
Short-Circuit Current I_{SC}			±45			□		mA
Capacitive Load Drive C_{LOAD}			See Typical Curve			□		
POWER SUPPLY								
Specified Voltage Range V_S		±5		±15	□			V
Operating Voltage Range		±2.5		±18	□			V
Quiescent Current (per amplifier) I_Q	I_O = 0		±3.7	±3.8		□		mA
T_A = –40°C to +85°C	I_O = 0			**±4.2**			□	mA
TEMPERATURE RANGE								
Specified Range		–40		+85	□			°C
Operating Range		–55		+125	□			°C
Storage Range		–65		+150	□			°C
Thermal Resistance θ_{JA}								°C/W
SO-8 Surface Mount			150			□		°C/W
DIP-8			100			□		°C/W
DIP-14			80			□		°C/W
SO-14 Surface Mount			100			□		°C/W

□ Specifications same as OPA228P, U.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS[1]

Supply Voltage	±18V
Signal Input Terminals, Voltage	(V–) –0.7V to (V+) +0.7V
Current	20mA
Output Short-Circuit[2]	Continuous
Operating Temperature	–55°C to +125°C
Storage Temperature	–65°C to +150°C
Junction Temperature	150°C
Lead Temperature (soldering, 10s)	300°C

NOTE: (1) Stresses above these ratings may cause permanent damage. Exposure to absolute maximum conditions for extended periods may degrade device reliability. (2) Short-circuit to ground, one amplifier per package.

ELECTROSTATIC DISCHARGE SENSITIVITY

This integrated circuit can be damaged by ESD. Burr-Brown recommends that all integrated circuits be handled with appropriate precautions. Failure to observe proper handling and installation procedures can cause damage.

ESD damage can range from subtle performance degradation to complete device failure. Precision integrated circuits may be more susceptible to damage because very small parametric changes could cause the device not to meet its published specifications.

PACKAGE/ORDERING INFORMATION

PRODUCT	OFFSET VOLTAGE max, µV	OFFSET VOLTAGE DRIFT max, µV/°C	PACKAGE	PACKAGE DRAWING NUMBER[1]	TEMPERATURE RANGE	ORDERING NUMBER[2]	TRANSPORT MEDIA
OPA227 Series							
Single							
OPA227PA	±200	±2	DIP-8	006	–40°C to +85°C	OPA227PA	Rails
OPA227P	±75	±0.6	DIP-8	006	–40°C to +85°C	OPA227P	Rails
OPA227UA	±200	±2	SO-8 Surface Mount	182	–40°C to +85°C	OPA227UA	Rails
"	"	"	"	"	"	OPA227UA/2K5	Tape and Reel
OPA227U	±75	±0.6	SO-8 Surface Mount	182	–40°C to +85°C	OPA227U	Rails
"	"	"	"	"	"	OPA227U/2K5	Tape and Reel
Dual							
OPA2227PA	±200	±2	DIP-8	006	–40°C to +85°C	OPA2227PA	Rails
OPA2227P	±75	±0.6	DIP-8	006	–40°C to +85°C	OPA2227P	Rails
OPA2227UA	±200	±2	SO-8 Surface Mount	182	–40°C to +85°C	OPA2227UA	Rails
"	"	"	"	"	"	OPA2227UA/2K5	Tape and Reel
OPA2227U	±75	±0.6	SO-8 Surface Mount	182	–40°C to +85°C	OPA2227U	Rails
"	"	"	"	"	"	OPA2227U/2K5	Tape and Reel
Quad							
OPA4227PA	±200	±2	DIP-14	010	–40°C to +85°C	OPA4227PA	Rails
OPA4227UA	±200	±2	SO-14 Surface Mount	235	–40°C to +85°C	OPA4227UA	Rails
"	"	"	"	"	"	OPA4227UA/2K5	Tape and Reel
OPA228 Series							
Single							
OPA228PA	±200	±2	DIP-8	006	–40°C to +85°C	OPA228PA	Rails
OPA228P	±75	±0.6	DIP-8	006	–40°C to +85°C	OPA228P	Rails
OPA228UA	±200	±2	SO-8 Surface Mount	182	–40°C to +85°C	OPA228UA	Rails
"	"	"	"	"	"	OPA228UA/2K5	Tape and Reel
OPA228U	±75	±0.6	SO-8 Surface Mount	182	–40°C to +85°C	OPA228U	Rails
"	"	"	"	"	"	OPA228U/2K5	Tape and Reel
Dual							
OPA2228PA	±200	±2	DIP-8	006	–40°C to +85°C	OPA2228PA	Rails
OPA2228P	±75	±0.6	DIP-8	006	–40°C to +85°C	OPA2228P	Rails
OPA2228UA	±200	±2	SO-8 Surface Mount	182	–40°C to +85°C	OPA2228UA	Rails
"	"	"	"	"	"	OPA2228UA/2K5	Tape and Reel
OPA2228U	±75	±0.6	SO-8 Surface Mount	182	–40°C to +85°C	OPA2228U	Rails
"	"	"	"	"	"	OPA2228U/2K5	Tape and Reel
Quad							
OPA4228PA	±200	±2	DIP-14	010	–40°C to +85°C	OPA4228PA	Rails
OPA4228UA	±200	±2	SO-14 Surface Mount	235	–40°C to +85°C	OPA4228UA	Rails
"	"	"	"	"	"	OPA4228UA/2K5	Tape and Reel

NOTE: (1) For detailed drawing and dimension table, please see end of data sheet, or Appendix C of Burr-Brown IC Data Book. (2) Products followed by a slash (/) are only available in Tape and Reel in the quantities indicated (e.g. /2K5 indicates 2500 devices per reel). Ordering 2500 pieces of "OPA227UA/2K5" will get a single 2500 piece Tape and Reel. For detailed Tape and Reel mechanical information, refer to Appendix B of Burr-Brown IC Data Book.

The information provided herein is believed to be reliable; however, BURR-BROWN assumes no responsibility for inaccuracies or omissions. BURR-BROWN assumes no responsibility for the use of this information, and all use of such information shall be entirely at the user's own risk. Prices and specifications are subject to change without notice. No patent rights or licenses to any of the circuits described herein are implied or granted to any third party. BURR-BROWN does not authorize or warrant any BURR-BROWN product for use in life support devices and/or systems.

เอกสารนี้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้