

ชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำแบบอัตโนมัติ

AUTOMATIC WATER LEVEL CONTROL SYSTEM



เจตริณ กิจไพศาลศักดิ์  
อิสราคม โถหินัง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

ชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำแบบอัตโนมัติ

AUTOMATIC WATER LEVEL CONTROL SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# AUTOMATIC WATER LEVEL CONTROL SYSTEM



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

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำแบบอัตโนมัติ

AUTOMATIC WATER LEVEL CONTROL SYSTEM

ผู้จัดทำ

1. นาย เจตริณ กิจไพศาลศักดิ์ รหัสประจำตัว 56010219
2. นาย อิศราคม โถหิณัง รหัสประจำตัว 56011467

อาจารย์ที่ปรึกษา

( ผศ.ดร. อุन्नัต พิณโสภณ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำแบบอัตโนมัติ

นายเจตริณ กิจไพศาลศักดิ์ 56010219  
นายอิสราคม โภทินัง 56011467  
ผศ.ดร. อุนนัต พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2559

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำแบบอัตโนมัติ โดยใช้การควบคุมแบบพีไอ (PI, Proportional Integral) การสร้างชุดทดลองนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเป็นโปรแกรมควบคุมจะใช้โปรแกรม LabVIEW ในการควบคุม ส่วนที่สองเป็นชุดทดลองซึ่งจะประกอบด้วยปั้มน้ำ ถังน้ำ ชุดควบคุมวาล์ว เซ็นเซอร์ และอื่นๆ ซึ่งทั้งสองส่วนจะสื่อสารผ่าน NI USB-6001 การทำงานของชุดทดลองจะเริ่มต้นโดยที่โปรแกรม LabVIEW จะรับรู้ระดับความสูงของน้ำได้จากเซ็นเซอร์วัดความดันของน้ำจากนั้นโปรแกรม LabVIEW จะทำการประมวลผลแล้วส่งสัญญาณออกมาที่ชุดควบคุมวาล์ว วาล์วจะเปิดปิดมากหรือน้อยตามขนาดของสัญญาณที่ส่งมาเพื่อควบคุมระดับความสูงของระดับน้ำให้ได้ตามที่ต้องการ

การทดลองการควบคุมระดับน้ำจะแบ่งออกเป็นสองกรณี คือ การทดลองควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น และการทดลองควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น การทดลองจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์พีไอ (PI, Proportional Integral) ซึ่งในการหาค่าพารามิเตอร์จะใช้วิธีทางเดินของราก โดยทำการกำหนดค่าฟุงเกิน (% Maximum Overshoot) ไม่เกิน 6 เปอร์เซ็นต์ และค่า Settling time ไม่เกิน 50 วินาที และใช้โปรแกรม MATLAB มาช่วยในการหาค่าพารามิเตอร์ จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์พีไอที่ได้ไปใช้ในการทดลองจริง

ผลที่ได้จากการทดลองที่ใช้การควบคุมแบบระบบเปิดพบว่า เวลาไต่ขึ้น (Rise time) จากการทดลองมีค่าต่างจากที่คำนวณด้วยแบบจำลองทางทฤษฎีคิดเป็นร้อยละ 13 ความสูงของน้ำที่สภาวะคงตัวของการทดลองมีค่าน้อยกว่าแบบจำลองทางทฤษฎีคิดเป็นร้อยละ 30 อันเนื่องมาจากการประมาณค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลข และผลที่ได้จากการทดลองที่ใช้การควบคุมแบบ PI พบว่า เวลาไต่ขึ้น ค่าฟุงเกิน (Maximum overshoot) และเวลาสู่สภาวะคงตัว (Settling time) จากการทดลองมีค่าต่างจากแบบจำลองทางทฤษฎีคิดเป็นร้อยละ 17 24 และ 6.59 ตามลำดับ

## AUTOMATIC WATER LEVEL CONTROL SYSTEM

Jetrin Kijpsaisalsak 56010219  
Issarakhom Thohinung 56011467  
Assis.Prof. Dr.Unnat Pinsophol Advisor  
Year 2559

### ABSTRACT

This project presents an automatic water level control system using proportional and integral control. The construction of the experimental setup is divided into two parts: part I is the LabVIEW program used to control the system and part II is the hardware system which consists of water pump, water tanks, control valves, sensors and others. Both parts communicate each other via NI USB-6001 DAQ. The computer receives signal from pressure sensor and calculates the control action in the LabVIEW program. The control action will be sent to operate the control valve to yield the desired water level.

Water level control experiments are divided into two cases. First, experiment in controlling water level in a single tank without any interaction with other tank. Second, experiment in controlling water level in a single tank with interaction with other tank. PI parameters would be specified before the experiment by using root locus method in MATLAB. The control criteria are: less than 6 % overshoot and less than 50 seconds settling time. The obtained PI parameters will then be used in actual experiments.

For the open loop control system, the rise time and the steady state value of the water level obtained from the experiments differ from the simulation results by 13 and 30 percent, respectively. This is due to the numerical estimation of system parameters. For the closed loop control system, the rise time, the maximum overshoot and the settling time obtained from the experiments differ from the simulation results by 17, 24 and 6.59 percent, respectively.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ด้วยคำแนะนำ และการช่วยเหลือในด้านต่างๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.อุนนต์ พิณโสภณ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้ให้ข้อมูลที่สำคัญในการทำโครงงานตลอดจนให้ คำปรึกษา และ ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เดไปวาที่ให้คำปรึกษาและข้อมูลเพิ่มเติมในด้านต่างๆ รวมถึงรุ่นพี่ และ เพื่อนๆที่ไม่ได้เอ่ยนามไว้ที่นี้ที่คอยให้ความช่วยเหลือ และคอยเป็นกำลังใจให้แก่พวกข้าพเจ้า

และสุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่ เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังคงคอยให้ กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายเจตริณ

กิจไพศาลศักดิ์

นายอิสราคม

โกหิณัง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำปริญญานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และหลักการ.....	4
2.1 การควบคุมกระบวนการอัตโนมัติ.....	4
2.2 ประเภทของการควบคุม.....	5
2.2.1 การควบคุมแบบไปข้างหน้า.....	5
2.2.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ.....	6
2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการควบคุมแบบป้อนกลับ.....	6
2.3.1 อุปกรณ์วัด.....	8
2.3.2 ตัวควบคุม.....	9
2.3.3 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย.....	9
2.3.4 กระบวนการ.....	10
2.4 รูปแบบการควบคุม.....	10
2.4.1 กิริยาการควบคุมแบบ Proportional (P).....	10
2.4.2 กิริยาการควบคุมแบบ Integral (I).....	11
2.4.3 กิริยาการควบคุมแบบ Derivative (D).....	12
2.4.4 กิริยาการควบคุมแบบ Proportional Integral (PI).....	12

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 ระบบเกี่ยวกับระดับของเหลว .....	13
2.5.1 ค่าความต้านทานการไหลของของเหลว .....	13
2.5.2 ค่าความจุ.....	16
2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	16
2.6.1 การทดลองการควบคุมระดับน้ำแบบถึงเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น.....	16
2.6.2 การทดลองการควบคุมระดับน้ำแบบถึงเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น.....	18
บทที่ 3 การคำนวณ และการออกแบบสร้าง.....	21
3.1 การออกแบบส่วนของฮาร์ดแวร์.....	23
3.1.1 การออกแบบส่วนที่ไม่ได้มีการควบคุมของระบบ.....	23
3.1.2 การออกแบบส่วนการควบคุมระบบ.....	24
3.2 ซอฟต์แวร์.....	40
3.3 หลักการทำงานโปรแกรม.....	42
บทที่ 4 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินของรอก .....	44
4.1 บทนำ.....	44
4.2 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินของรอก .....	44
4.3 การออกแบบระบบควบคุมของระบบ .....	45
4.3.1 ระบบควบคุมของถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น.....	45
4.3.2 ระบบควบคุมของถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น.....	53
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	61
5.1 ผลการทดลองชุดวาล์วควบคุม.....	61
5.2 การทดลองอุปกรณ์วัดระดับน้ำ.....	63
5.3 ผลการทดลองไหลวาล์ว.....	64
5.4 ผลการทดลองการควบคุมระดับน้ำ .....	65
5.4.1 ผลการทดลองการควบคุมระดับน้ำแบบถึงเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น .....	66

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.4.2 ผลการทดลองการควบคุมระดับน้ำแบบถังเด็ยมมีปฏิริยาต่อถังอื่น.....	69
บทที่ 6 สรุปผลการดำเนินงาน และแนวทางการพัฒนา.....	73
6.1 สรุปผลการดำเนินงาน .....	73
6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางการแก้ไข.....	74
บรรณานุกรม.....	75
ภาคผนวก ก.....	76
ภาคผนวก ข.....	94
ภาคผนวก ค.....	108
ภาคผนวก ง.....	112



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการควบคุมกระบวนการ .....	4
2.2 แสดงระบบควบคุมแบบ Open loop .....	5
2.3 แสดงระบบควบคุมแบบ Closed loop .....	5
2.4 แสดงการควบคุมระดับน้ำในถังแบบ Manual control.....	6
2.5 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมระดับน้ำในถังแบบ Manual control .....	7
2.6 แสดงการควบคุมระดับน้ำในถังด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติ .....	7
2.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป .....	8
2.8 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบทั่วไปที่มีตัวควบคุม .....	11
2.9 แสดงถึงทั้งสองใบที่ต่อกันด้วยท่อสั้นๆโดยมีวาล์วเป็นตัวต้านทาน.....	13
2.10 แสดงระบบควบคุมระดับน้ำ .....	14
2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของน้ำ และอัตราการไหล .....	16
2.12 ระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิริยาต่อถังอื่น .....	17
2.13 ระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวมีปฏิริยาต่อถังอื่น .....	18
3.1 แสดงชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำ .....	21
3.2 อุปกรณ์การทำงานในระบบควบคุม .....	25
3.3 รายละเอียดในส่วนการทำงานของคอมพิวเตอร์ .....	25
3.4 บล็อกไดอะแกรมการเปรียบเทียบคำสั่งความสูงอ้างอิง ( $H_i$ ) และความสูงป้อนกลับ ( $H_f$ ).....	26
3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความสูงของระดับน้ำของอุปกรณ์วัดความดันตัวที่ 1..	27
3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความสูงของระดับน้ำของอุปกรณ์วัดความดันตัวที่ 2..	27
3.7 บล็อกไดอะแกรมในส่วนระบบควบคุมความสูง .....	28
3.8 บล็อกไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงค่าความสูง( $H_{act}$ )เป็นอัตราการไหล ( $Q_{act}$ ).....	28
3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง (H) และอัตราการไหล (Q).....	29
3.10 บล็อกไดอะแกรมในการเปลี่ยนค่าอัตราการไหล ( $Q_{act}$ ) เป็นแรงดันไฟฟ้า ( $V_{sp}$ ).....	30
3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) และแรงดันไฟฟ้า (V) .....	30
3.12 บล็อกไดอะแกรมในส่วนของ Arduino .....	31
3.13 ArduinoMEGA2560 .....	32
3.14 แสดงบล็อกไดอะแกรมในส่วนของเซอร์โวมอเตอร์.....	32

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 เซอร์โวมอเตอร์.....	32
3.16 บล็อกไดอะแกรมในส่วนของวาล์วควบคุม .....	33
3.17 แสดงชุดวาล์วควบคุมที่สร้างขึ้น.....	33
3.18 บล็อกไดอะแกรมชุดควบคุมวาล์ว .....	34
3.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า $V_{sp}$ และอัตราการไหลของน้ำ $Q_i$ .....	34
3.20 บล็อกไดอะแกรมในส่วนของชุดวัดความสูง.....	35
3.21 เซ็นเซอร์วัดความดันของระดับน้ำ.....	35
3.22 แสดงลักษณะการทำงานของ Zero-Span.....	36
3.23 แสดงวงจร Zero-Span ของเซ็นเซอร์.....	37
3.24 แสดงลักษณะการทำงานของ Zero-Span.....	37
3.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง และแรงดันไฟฟ้าที่หลังจากการปรับ Zero - Span .....	39
3.26 แสดงอุปกรณ์รับ และประมวลผลสัญญาณรุ่นเอ็นไอ ยูเอสพี-6001 .....	39
3.27 แสดงตัวอย่าง Front panel ของโปรแกรม LabVIEW .....	41
3.28 แสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม LabVIEW.....	42
3.29 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรม LabVIEW .....	43
4.1 ระบบควบคุมน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น .....	45
4.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $Q_i(s)$ และ $H(s)$ .....	46
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่สภาวะคงที่ $\bar{Q}$ และความสูงที่สภาวะคงที่ $\bar{H}$ .....	46
4.4 บล็อกไดอะแกรมระหว่าง $H_i(s)$ และ $Q_i(s)$ .....	47
4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต $H_i(s)$ และเอาต์พุต $H(s)$ .....	47
4.6 การยุบบล็อกไดอะแกรมของความสัมพันธ์ระหว่าง $H_i(s)$ และ $H(s)$ .....	47
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $H_i(s)$ และ $H(s)$ เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ แล้ว.....	48
4.8 แสดงกราฟการตอบสนองต่อ Step input ที่ค่าความสูง 15 เซนติเมตรของระบบถังเดียวไม่มี ปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบระบบเปิด .....	48
4.9 แสดงการใช้ระบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น .....	49
4.10 บล็อกไดอะแกรมควบคุมแบบ PI.....	49
4.11 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบควบคุมแบบ PI.....	49

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบควบคุมแบบ PI แบบระบบเปิด.....	50
4.13 บล็อกไดอะแกรมเมื่อแทนค่า R,C และ Zero .....	50
4.14 แสดงทางเดินของรากเมื่อระบบใช้ตัวควบคุมแบบ PI.....	51
4.15 การเลือกหาค่าตำแหน่งโพล และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องจากวิธีทางเดินของราก .....	52
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $H_i(s)$ และ $H(s)$ เมื่อแทนค่า $k_p$ แล้ว.....	52
4.17 แสดงกราฟการตอบสนองต่อ Step input ที่ค่าความสูง 5 เซนติเมตรของระบบถังเดียวไม่มี ปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI.....	53
4.18 ระบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น.....	54
4.19 แสดงบล็อกไดอะแกรมระหว่าง $Q_i(s)$ และ $H_1(s)$ .....	54
4.20 บล็อกไดอะแกรมระหว่าง $H_i(s)$ และ $Q_i(s)$ .....	55
4.21 บล็อกไดอะแกรมระหว่าง $H_i(s)$ และ $H_1(s)$ .....	55
4.22 การยุบบล็อกไดอะแกรมระหว่าง $H_i(s)$ และ $H_1(s)$ .....	55
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง $H_i(s)$ และ $H_1(s)$ เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้ว .....	56
4.24 แสดงกราฟการตอบสนองต่อ step input ที่ค่าความสูง 15 เซนติเมตรของระบบถังเดียวมีปฏิกิริยา ต่อถังอื่นแบบระบบเปิด .....	56
4.25 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น.....	57
4.26 แสดงบล็อกไดอะแกรมหลังการใส่ระบบควบคุมแบบ PI.....	57
4.27 แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุม PI เป็นแบบระบบเปิด.....	57
4.28 บล็อกไดอะแกรมเมื่อแทนค่า R, C และZero .....	57
4.29 การเลือกหาค่าตำแหน่งโพลและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องจากวิธีทางเดินของราก .....	59
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง $H_1(s)$ และ $H_i(s)$ เมื่อแทนค่า $k_p$ แล้ว.....	59
4.31 แสดงกราฟการตอบสนองต่อ Step input ที่ค่าความสูง 5 เซนติเมตรของระบบถังเดียวมีปฏิกิริยา ต่อถังอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI.....	60
5.1 แสดงชุดการทดลองระบบควบคุมระดับน้ำ .....	61
5.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของชุดควบคุมวาล์ว .....	62
5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และอัตราการไหล .....	62
5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความสูงของน้ำของอุปกรณ์วัดความดันตัวที่ 1 .....	63

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความสูงของน้ำของอุปกรณ์วัดความดันตัวที่ 2.....	64
5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล และระดับความสูงของน้ำที่สถานะคงที่.....	65
5.7 แสดงลักษณะระบบการควบคุมแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น.....	66
5.8 แสดงลักษณะระบบการควบคุมแบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น.....	66
5.9 แสดงลักษณะระบบการควบคุมแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น.....	66
5.10 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง และผลที่ได้จากทางทฤษฎีต่อการตอบสนองของถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบระบบเปิดที่ความสูง 10 เซนติเมตร.....	67
5.11 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง และผลที่ได้จากการตอบสนองของระบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI ที่ความสูง 5 เซนติเมตร.....	68
5.12 แสดงลักษณะระบบการควบคุมแบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น.....	69
5.13 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง และจากการทดลองและจากแบบจำลองทางทฤษฎีต่อการตอบสนองของระบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบระบบเปิดที่ความสูง 15 เซนติเมตร.....	70
5.14 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง และผลที่ได้จากทฤษฎีการตอบสนองของระบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI ที่ความสูง 5 เซนติเมตร.....	71

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำปริญญานิพนธ์

ระบบควบคุมอัตโนมัติเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ซึ่งอาศัยพื้นฐานการวัด และการควบคุมเป็นหลัก โดยมีจุดประสงค์เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้ผลผลิตสูงสุด และคุณภาพดีที่สุดในต้นทุนต่ำที่สุด ลดการใช้พลังงาน และลดจำนวนของอุปกรณ์รวมทั้งการประหยัดวัตถุดิบ การนำระบบควบคุมอัตโนมัติมาใช้ในกระบวนการผลิตสามารถลดการใช้แรงงานของผู้ปฏิบัติงานด้วย หลักการของระบบควบคุมอัตโนมัติส่วนใหญ่จะใช้การป้อนกลับจากค่าที่วัดได้มาควบคุมกระบวนการ เรียกว่าการควบคุมป้อนกลับหรือแบบปิด (Feedback Control or Closed Loop) กล่าวได้ว่าระบบควบคุมอัตโนมัติคือการควบคุมปริมาณผลผลิตของระบบให้ได้ตามที่ต้องการ โดยการอาศัยปริมาณการวัดจากผลผลิตที่ได้แล้ว นำมาเทียบเคียงกับค่าที่ต้องการโดยผ่านระบบป้อนกลับ

ในอุตสาหกรรมการผลิตได้นำเอาระบบควบคุมอัตโนมัติในแบบต่างๆมาใช้ในกระบวนการผลิตมานานแล้ว โดยเฉพาะระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ควบคุมแบบพีไอ (PI, Proportional Integral) เนื่องจากรูปแบบของตัวควบคุมแบบพีไอ เป็นรูปแบบที่สามารถควบคุมกระบวนการได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว ไม่ว่าจะการตอบสนองของระบบจะเร็วหรือช้าอย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมแบบพีไอก็สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดี

ในโรงงานอุตสาหกรรมมีกระบวนการต่างๆมากมายซึ่งการควบคุมกระบวนการเหล่านี้จะใช้ตัวควบคุมหลายๆตัวมาควบคุมกระบวนการหลายๆส่วน ทำให้การแยกแยะกระบวนการเพื่อศึกษาเป็นไปด้วยความยากลำบาก ซึ่งอาจเกิดการผิดพลาดได้ง่าย อีกทั้งยังให้ผลตอบสนองที่ล่าช้าในกรณีที่กระบวนการมีขนาดใหญ่ ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่จะจัดทำแบบจำลองกระบวนการ โดยจะจำลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำและอัตราการไหลขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาและให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว อีกทั้งแบบจำลองกระบวนการที่สร้างขึ้นสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก เพื่อให้ผู้ที่สนใจศึกษามีความรู้ความเข้าใจก่อนที่จะเริ่มปฏิบัติงานกับกระบวนการที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนกว่า

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปฏิญานิพนธ์

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำแบบอัตโนมัติ

1.2.2 เพื่อศึกษาระบบควบคุมระดับน้ำถึงเดียวแบบไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น และมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น

1.2.3 เพื่อศึกษาวิธีการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินของราก (Root Locus Techniques)

1.2.4 เพื่อเป็นอุปกรณ์การทดลองในวิชา System Dynamics and Control และ วิชา Mechanical Engineering Laboratory

## 1.3 ขอบเขตของปฏิญานิพนธ์

1.3.1 ระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลองคือระบบควบคุมแบบพีไอ (PI, Proportional Integral)

1.3.2 ชุดทดลองนี้ออกแบบและสร้างเป็นระบบควบคุมระดับน้ำแบบถึงเดียว และแบบสองถัง

1.3.3 การควบคุมอัตราการไหลของน้ำนั้นจะเฉพาะด้านทางเข้าของถังน้ำ โดยไหลควาล์วขาออกออกจะคงที่

1.3.4 ในการควบคุมระดับน้ำนั้น จะควบคุมความสูงของระดับน้ำถังใดถังหนึ่งในสองถังเท่านั้น

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษารูปแบบการควบคุมและออกแบบกระบวนการ

1.4.2 ศึกษาการทำงาน และการใช้งานของเครื่องควบคุมที่มีใช้ในปัจจุบัน

1.4.3 ออกแบบกระบวนการในส่วนของฮาร์ดแวร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

(1) ถังน้ำจำนวน 2 ถังต่อกันแบบ Interact

(2) นำวาล์วน้ำแบบบอลวาล์วที่ใช้กันทั่วไปมาดัดแปลงให้สามารถต่อกับเซอร์โวมอเตอร์

(Servo Motor) เพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำ

(3) ศึกษาอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการวัดความสูงของระดับน้ำ และเลือกใช้ Pressure

Sensor

(4) ศึกษาอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับการวัดอัตราการไหล

(5) สร้างชุดทดลอง

(6) ศึกษาและออกแบบกระบวนการควบคุม โดยใช้โปรแกรม LabVIEW เป็นตัว

ประมวลผล

(7) ทดสอบสมรรถภาพของกระบวนการควบคุม และตัวควบคุมที่สร้างขึ้น

(8) สรุปผลและเขียนรายงานการจัดทำโครงการ พร้อมทั้งนำเสนอผลงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อให้ชุดทดลองสามารถทำงานตามขอบเขตของโครงการได้ตามที่ต้องการ

1.5.2 เพื่อให้นักศึกษาได้เรียนรู้และเข้าใจถึงหลักการการทำงานของระบบควบคุม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 การควบคุมกระบวนการอัตโนมัติ

การควบคุมกระบวนการแบบอัตโนมัติ เป็นการควบคุมค่าต่างๆที่มีการรับค่าตัวแปรกระบวนการ (Process variable) เช่น อุณหภูมิ (Temperature), ความดัน (Pressure), อัตราการไหล (Flows) และค่าตำแหน่งต่างๆ (Composition) เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดและเป็นไปตามเป้าหมาย ในการควบคุมกระบวนการให้เป็นตามเป้าหมายนั้น เราต้องหาค่าความคลาดเคลื่อน (Error) โดยการวัดค่าตัวแปรเหล่านี้ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้ (Set point) แล้วตัดสินใจว่าจะทำอย่างไรกับค่าความแตกต่างนี้เพื่อให้ได้ค่าที่เราต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยผู้ปฏิบัติการ (Operator)

ในการทำงานของระบบควบคุมดังรูป 2.1 จะมีส่วนประกอบที่สำคัญควบคุม 4 อย่างดังนี้

- (1) ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับปริมาณทางฟิสิกส์ แล้วเปลี่ยนปริมาณที่ได้จากการตรวจวัดในอีกรูปแบบหนึ่ง
- (2) ตัวส่งผ่านสัญญาณ (Transmitter) เป็นอุปกรณ์ที่แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าในด้านเอาต์พุตให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน
- (3) ตัวควบคุม (Controller) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมระบบ
- (4) อุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย (Final control element) เป็นตัวส่งสัญญาณไปที่ระบบ



รูปที่ 2.1 แสดงการควบคุมกระบวนการ

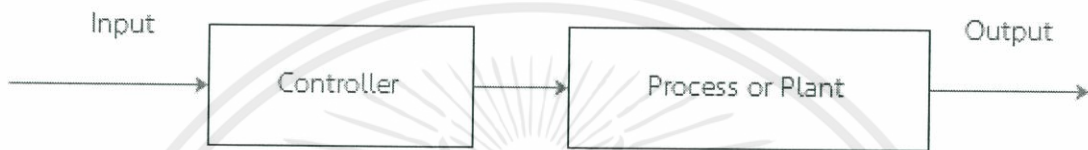
ระบบควบคุมจะต้องมีการปฏิบัติการ 3 อย่างนี้

- (1) การวัด (Measurement) เป็นการวัดค่าตัวแปรที่ถูกควบคุม กระทำโดยตัวตรวจจับสัญญาณและตัวส่งผ่านสัญญาณ
- (2) การตัดสินใจ (Decision) การวัดตัวควบคุมต้องตัดสินใจว่าจะทำอย่างไรเพื่อให้ค่าตัวแปรตามที่เราต้องการ

(3) การกระทำ (Action) ผลจากการตัดสินใจของตัวควบคุมจะต้องถูกกระทำโดยอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย

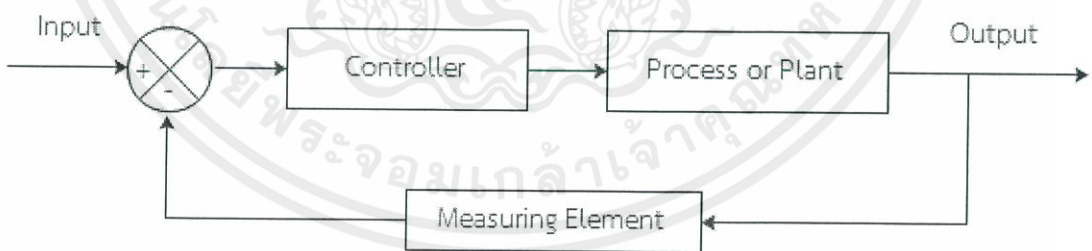
ระบบควบคุมแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือระบบการควบคุมแบบเปิด (Open loop) และระบบการควบคุมแบบปิด (Closed loop)

ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop) เป็นระบบควบคุมตัวเอาต์พุตของระบบอย่างเดียว โดยเอาต์พุตของระบบจะไม่ส่งกลับ หรือป้อนกลับเพื่อมาเปรียบเทียบกับอินพุต ระบบนี้จะไม่ค่อยมีความซับซ้อน แต่ค่าที่ได้จะไม่ค่อยแม่นยำ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงระบบควบคุมแบบ Open loop

ระบบควบคุมแบบปิด (Closed loop) เป็นระบบควบคุมซึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะส่งผลโดยตรงต่อการควบคุม ดังนั้นระบบควบคุมแบบปิดก็คือระบบควบคุมแบบป้อนกลับนั่นเอง สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นสัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณการป้อนกลับเพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง และทำให้เอาต์พุตของระบบเป็นค่าที่ต้องการ สัญญาณการป้อนกลับนี้อาจเป็นสัญญาณอินพุตโดยตรง หรือเป็นสัญญาณที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงระบบควบคุมแบบ Closed loop

## 2.2 ประเภทของการควบคุม

### 2.2.1 การควบคุมแบบไปข้างหน้า (Feed forward control)

จุดประสงค์ของการควบคุมแบบไปข้างหน้า คือการวัดการรบกวนกระบวนการและการชดเชยให้กับมัน ก่อนที่ค่าตัวแปรที่ถูกควบคุมจะเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ตั้งไว้ ถ้าหากเราประยุกต์ใช้ได้ ค่าตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

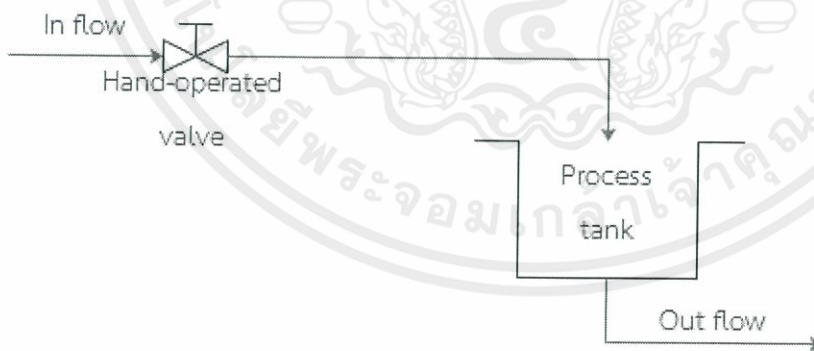
แปรที่ถูกควบคุมจะไม่เบี่ยงเบนไปจากค่าที่ตั้งไว้ เมื่อนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้อง ค่าตัวแปรที่ถูกควบคุมจะไม่เบี่ยงเบนไปจากค่าเป้าหมาย

### 2.2.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control)

การควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นวิธีการที่ง่ายสำหรับชดเชยการรบกวนกระบวนการทุกชนิด ตัวรบกวนกระบวนการทุกอย่างตัวจะมีผลต่อตัวแปรที่ถูกควบคุมและเมื่อค่าตัวแปรเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตให้กลับเข้าสู่ค่าเป้าหมาย แต่ไม่สามารถชดเชยการรบกวนได้เพียงหลังจากที่ตัวแปรที่ถูกควบคุมเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ตั้งไว้แล้วเท่านั้น นั่นคือ การรบกวนจะกระจายไปยังกระบวนการทั้งหมด ก่อนที่การควบคุมแบบป้อนกลับจะชดเชยให้กับมัน

### 2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการควบคุมแบบป้อนกลับ

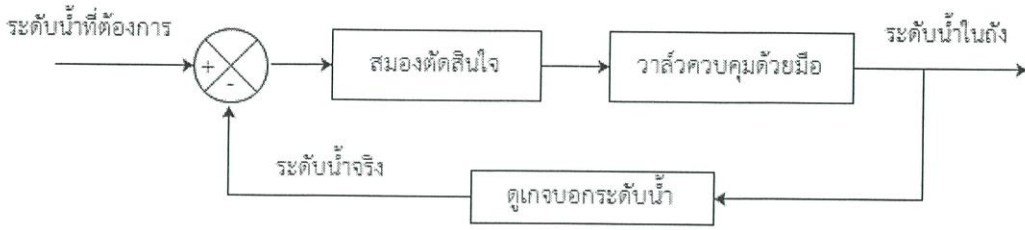
โดยทั่วไปเป้าหมายของระบบควบคุมกระบวนการต่างๆในอุตสาหกรรมนั้น คือการรักษาปริมาณทางฟิสิกส์ได้แก่ ค่าอุณหภูมิ (Temperature), ค่าความดัน (Pressure), อัตราการไหล (Flow rate), ระดับความสูง (Levels), และค่าอื่นๆให้มีค่าใกล้เคียงค่าเป้าหมาย (Set point) หรือค่าที่ต้องการมากที่สุด แม้ว่าในสภาวะการทำงานและสภาพแวดล้อมอาจเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งการควบคุมที่ดีย่อมเกิดจากการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสม ในอดีตจะใช้การควบคุมแบบง่ายๆ ด้วยมือ (Manual control) ซึ่งอาศัยพนักงานควบคุม (Operator) ซึ่งจะคอยทำหน้าที่เกี่ยวกับการตรวจวัดและปรับแต่งการควบคุม ผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ เช่นการควบคุมปริมาณน้ำในถัง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการควบคุมระดับน้ำในถังแบบ Manual control

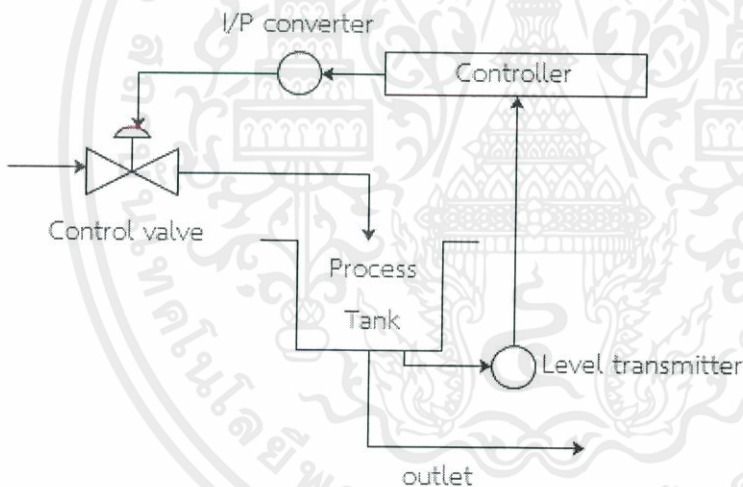
จากรูป การควบคุมปริมาณน้ำในถังจะอาศัยพนักงานคอยทำหน้าที่ในการตรวจวัดความสูงของระดับน้ำในถังว่าได้ตามที่ต้องการหรือไม่ โดยใช้สายตาวัดดูจากเครื่องมือวัดระดับ (Level gauge) จากนั้นสมองจะตัดสินใจ และใช้มือทำหน้าที่เปิด หรือ ปิดวาล์ว เพื่อให้ระดับน้ำเป็นไปตามที่ต้องการ ขั้นตอนการควบคุมสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



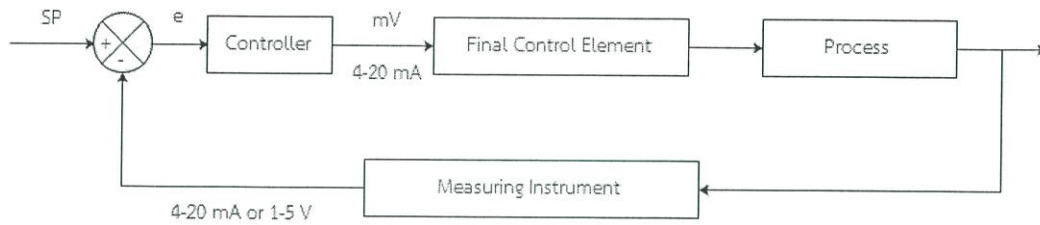
รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมระดับน้ำในถังแบบ Manual control

จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบนี้จำเป็นต้องใช้พนักงานที่มีประสบการณ์ และความชำนาญงานเป็นหลัก ซึ่งในการปฏิบัติงานตามความจริงแล้ว พนักงานที่ควบคุมนั้นจะไม่สามารถทำงานได้ประสิทธิภาพตลอดเวลา จึงทำให้มีประสิทธิภาพของการควบคุมลดลง ไม่ได้ค่าที่ต้องการอย่างแม่นยำ ดังนั้นปัจจุบันงานที่ต้องการการควบคุมที่มีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องนำการควบคุมแบบอัตโนมัติมาใช้งาน เมื่อนำกระบวนการการควบคุมระดับน้ำที่เป็นแบบ Manual มาทำการควบคุมแบบอัตโนมัติ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการควบคุมระดับน้ำในถังด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติ

จากรูปที่ 2.6 ระดับน้ำในถังจะถูกวัดโดยเครื่องวัดระดับ (Level transmitter) และส่งการวัดให้กับเครื่องควบคุม (Controller) ซึ่งเครื่องควบคุมจะนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจสั่งให้เปิดหรือปิดวาล์ว เพื่อให้ระดับน้ำเป็นไปตามที่ต้องการ โดยเครื่องควบคุมจะเป็นตัวทำหน้าที่หลักในการคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมตามกฎเกณฑ์การควบคุม (Control law) ที่พนักงานได้กำหนดไว้ล่วงหน้า สำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติที่เราพบเห็นกันอยู่บ่อยๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมคือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control system) โดยรูปแบบการควบคุมกระบวนการสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป

จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2.7 จะสังเกตเห็นว่า ระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมแบบป้อนกลับทั่วไปจะประกอบด้วยอุปกรณ์ 4 ส่วนคือ

### 2.3.1 อุปกรณ์วัด (Measuring Instrument)

อุปกรณ์วัด หมายถึง ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor), ตัวทรานสดิวเซอร์ (Transducer), อุปกรณ์แปลง (Transmitter) หรือเครื่องวัดสัญญาณอื่นๆในกระบวนการเพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปใช้เป็นตัวแปรในการควบคุม โดยสัญญาณขาออกของอุปกรณ์วัดตามทั่วไปจะเป็นสัญญาณมาตรฐานทางอุตสาหกรรม เช่น สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0 ถึง 5 โวลต์ เป็นต้น

อุปกรณ์วัดจะเป็นตัววัดปริมาณทางฟิสิกส์เชิงกล และเชิงไฟฟ้าของตัวแปรกระบวนการส่วน อุปกรณ์ส่งสัญญาณจะทำหน้าที่เปลี่ยนปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นสัญญาณที่สามารถส่งออกมา ซึ่งสัญญาณที่ได้นั้นจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรในกระบวนการ อุปกรณ์วัดและอุปกรณ์ส่งสัญญาณจะมีเทอมสำคัญประกอบกัน 3 เทอมคือ พิกัด (Range) ของเครื่องมือวัด ถูกกำหนดโดยค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของตัวแปรกระบวนการที่ทำการวัด โดยพิจารณาอุปกรณ์วัด และส่งสัญญาณที่ถูกเปรียบเทียบไว้แล้ว

ในบางครั้งที่เป็นสิ่งที่สำคัญ สำหรับการวิเคราะห์ระบบที่จะรู้ถึงพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งบอกในพฤติกรรมของอุปกรณ์การวัด และส่งสัญญาณแบบอัตโนมัติ นั้น เป็นการรักษามาตรฐานในการทำงานทางฟิสิกส์ ซึ่งรูปแบบการควบคุมจะใช้ตัวควบคุมที่ทำงานด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นเครื่องควบคุมกระบวนการแทนมนุษย์ ดังนั้นในการทำงานจึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือ หรืออุปกรณ์วัดที่ทำหน้าที่ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการต่างๆที่ควบคุม โดยสัญญาณที่วัดได้จะนำไปใช้ในการตัดสินใจสร้างลักษณะควบคุมที่เหมาะสมต่อไป

ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) ในระบบอัตโนมัติใดๆตัวตรวจจับสัญญาณเป็นตัวเชื่อมอันดับแรกในกระบวนการของการควบคุมเพื่อตรวจสอบไม่ให้ผิดเพี้ยนไปจากข้อกำหนด

เครื่องมือวัด (Measuring instrument) คือการรวมตัวของตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) และตัวแสดงค่า (Indicator) การวัดสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ

วิธีที่ 1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของตัวตรวจจับสัญญาณ สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยตรงหรือเปลี่ยนแปลงโดยให้เปรียบเทียบกับสิ่งที่เรารู้แล้วปรับค่า

วิธีที่ 2 กำหนดค่าที่แน่นอนให้เท่ากันระหว่างปริมาณ 2 ค่าที่คล้ายกัน

ตัวตรวจจับสัญญาณต้องมีพื้นฐานที่สำคัญดังต่อไปนี้

(1) ต้องรู้ว่าผลอะไรจะเกิดขึ้นเมื่อ ตัวตรวจจับสัญญาณกำลังวัดปริมาณค่าอันหนึ่งในกรณีที่ดีที่สุด

(2) ตัวตรวจจับสัญญาณไม่ควรเปลี่ยนสภาวะที่ดำรงอยู่ก่อนที่จะทำการวัด

(3) ตัวตรวจจับสัญญาณบางชนิดผลตอบสนองต่อคุณสมบัติอื่นเสียมากกว่าสิ่งพื้นฐานที่ต้องการเช่น โวลต์มิเตอร์จะมีผลตอบสนอง (Response) ต่อค่าเฉลี่ย (Average) ของสัญญาณกระแสสลับ หรือค่าพีค (Peak) ดังนั้นมีความสำคัญต่อการเลือกตัวตรวจจับสัญญาณ จะต้องให้มั่นใจว่าจะมีผลตอบสนองต่อคุณสมบัติที่เราต้องการเท่านั้น

(4) ความเร็วของผลตอบสนอง (Response) ซึ่งตัวตรวจจับสัญญาณอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนสภาวะของกระบวนการ

### 2.3.2 ตัวควบคุม (controller)

เป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุม เพื่อทำหน้าที่ควบคุมและสั่งการด้วยการสร้างสัญญาณสำหรับควบคุมกระบวนการต่างๆ ให้ระบบหรือกระบวนการที่ต้องการจะควบคุม มีเอาต์พุทหรือให้เกิดผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะเป็นไปตามกฎและรูปของการควบคุมที่ผู้ควบคุมได้เลือกและกำหนดไว้ล่วงหน้า ค่าเป้าหมายและตัวแปรของกระบวนการนั่นเอง

ปัจจุบันเครื่องควบคุมสามารถแบ่งตามโครงสร้างการทำงานได้ ชนิดคือ เครื่องควบคุมแบบนิวมิติกส์ ที่ทำงานโดยใช้สัญญาณลม เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ทำงานโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้น (Linear circuits) ในการสร้างสัญญาณควบคุม และเครื่องควบคุมแบบดิจิทัลทำงานโดยใช้วงจรตรรก (Logic circuits) หรือไมโครโปรเซสเซอร์สร้างสัญญาณควบคุม

### 2.3.3 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final control element)

อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสภาวะของกระบวนการ ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการตามคำสั่ง หรือสัญญาณควบคุมที่ได้รับจากตัวควบคุม อุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้ายนั้นมีอยู่หลายอย่างด้วยกันเช่น วาล์วควบคุม (Control valve)

วาล์วควบคุมโดยทั่วไปแล้วใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้าย จะพบในกระบวนการที่ควบคุมอัตราการไหล วาล์วควบคุมทำหน้าที่คล้ายกับตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ (Variable resistance)

### 2.3.4 กระบวนการ (Plant or Process)

กระบวนการ หมายถึงระบบหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ที่ต้องการควบคุมให้มีสถานะเป็นไปตามที่ต้องการ เช่นกระบวนการเกี่ยวกับการควบคุมระดับของเหลว กระบวนการเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งสถานะของกระบวนการแสดงตัวแปรกระบวนการ (PV : Process variable)

การควบคุมแบบอัตโนมัติจากรูปที่ 2.7 มีขั้นตอนการทำงาน คืออุปกรณ์วัดหรือเครื่องวัดจะวัดค่าตัวแปรกระบวนการ (PV) เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และระดับของเหลว เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย (SP) และตัวควบคุมจะนำค่าความคลาดเคลื่อนในการควบคุมมาใช้ในการคำนวณ เพื่อหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่จะไปควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ จะเห็นว่าก่อนที่จะทำการควบคุมกระบวนการใดๆนั้น จะต้องศึกษาถึงชนิดและการทำงานของอุปกรณ์วัด อุปกรณ์ควบคุม และอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย รวมถึงวิธีการปรับแต่งค่าต่างๆก่อนเพื่อที่จะได้เลือกใช้ใช้อุปกรณ์และรูปแบบของการควบคุมได้อย่างถูกต้องในอันที่จะทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพสูงสุด

## 2.4 รูปแบบการควบคุม

### 2.4.1 กิริยาการควบคุมแบบ Proportional (P)

กิริยาการควบคุมแบบ Proportional นั้น เป็นการควบคุมแบบเป็นสัดส่วน กล่าวคือค่าเอาต์พุตที่ได้ออกมาจะเป็นสัดส่วนกับค่าอินพุตที่รับมาจากกระบวนการ หมายถึงถ้าค่าคลาดเคลื่อนมีค่ามากขึ้น ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมก็จะมีค่ามากขึ้นตาม และถ้าค่าคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลง ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมก็จะมีค่าน้อยลงตาม ตามความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.8

$$\text{output} \propto \text{input} \quad (2.1)$$

โดย U คือเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุม

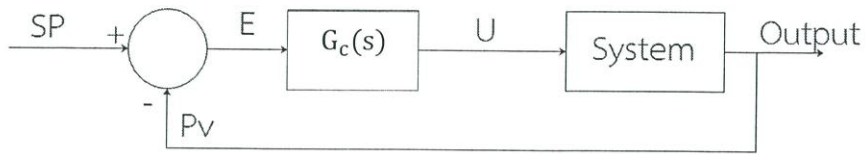
E คืออินพุตที่ออกจากตัวควบคุม

จะได้

$$U \propto E \quad (2.2)$$

โดย  $K_p$  คือค่าคงที่ เรียกว่า อัตราขยาย (Proportional)

$$U = K_p E \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบทั่วไปที่มีตัวควบคุม

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.8 จะได้ว่า

$$G_c = U/E \quad (2.4)$$

$$G_c = K_p \quad (2.5)$$

โดยในที่นี้อินพุตที่รับมาจะเป็นค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของกระบวนการ ส่วนค่า เอาต์พุตที่ส่งออกไปนั้น จะเป็นสัญญาณไปป้อนให้กับระบบทำงานต่อไป

#### 2.4.2 กริยาการควบคุมแบบ Integral (I)

หลักการการทำงานของตัวควบคุมแบบ Integral Control คือการให้ค่าเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปเรื่อยๆถ้าค่าอินพุตยังไม่เป็นศูนย์ โดยค่าเอาต์พุตจะแปรผันตามค่าปริยานุพันธ์ของอินพุตตามสมการ

$$U(t) \propto \int_0^t e(t) \quad (2.6)$$

$$U(t) \propto K_I \int_0^t e(t) \quad (2.7)$$

ทำการ Take Laplace จะได้

$$U(s) = \frac{K_I E(s)}{s} \quad (2.8)$$

$$G_c(s) = \frac{K_I}{s} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.9 ในตัวควบคุมแบบ I-Control นั้น Gain ของตัวควบคุมจะเท่ากับ  $K_I/s$  โดยที่  $K_I$  เป็นค่าคงที่ ตัวควบคุมแบบ Integral จะทำงานปรับค่าเอาต์พุตเพิ่มขึ้นหรือลดลงเรื่อยๆถ้าค่าจากกระบวนการยังไม่เท่ากับค่าที่ตั้งไว้หรือค่าความคลาดเคลื่อนยังไม่เท่ากับศูนย์ วิธีนี้จะช่วยให้สามารถทำให้ค่าคงที่ออกจากกระบวนการมีค่าเท่ากับที่ตั้งไว้พอดี เป็นการแก้ค่าความคลาดเคลื่อนได้หมด แต่

โดยทั่วไปเราจะไม่ใช่ใช้วิธีควบคุมแบบ I-control เพียงอย่างเดียวเนื่องจากระบบจะใช้เวลานานในการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าสู่สถานะคงตัว (Steady State) จึงต้องใช้วิธี P-control เข้ามาควบคุมเพื่อช่วยให้ระบบทำงานเร็วขึ้น

### 2.4.3 การควบคุมแบบ Derivative (D)

การควบคุมแบบ D เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การควบคุมแบบอัตราส่วน (Rate Action) โดยสัญญาณเอาต์พุตของตัวควบคุมขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลาจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีโอกาสเป็นศูนย์ได้ แต่ค่าเอาต์พุตก็สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีค่าสูงขึ้นเมื่อความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลงซึ่งเรียกการกระทำดังกล่าวว่า อัตราการกระทำ (Rate Action) ดังสมการที่ 2.10

$$U_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $U_D(t)$  = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุม Derivative

$K_D$  = อัตราการขยายของตัวควบคุมแบบ Derivative

$\frac{de(t)}{dt}$  = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t

การควบคุมอนุพันธ์นี้ส่วนมากแล้วจะใช้ร่วมกับตัวควบคุมตัวอื่น เช่น ใช้ร่วมกับการควบคุมเชิงสัดส่วน ซึ่งจะเรียกว่า ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ หรือ พีดี (PD-control) ถ้าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนใช้ร่วมกับอินทิกรัลจะเรียกว่า ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลหรือ พีไอ (PI-Control) และถ้าใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนและตัวควบคุมแบบอินทิกรัลเราจะเรียกว่า การควบคุมแบบพีไอดี (PID-Control)

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยให้เราปรับค่าความหน่วง (Damping) ในระบบที่จะควบคุมให้มีความมากยิ่งขึ้น นั่นก็คือทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์จะไม่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์ได้ ในขณะเดียวกันจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้เป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณผิดพลาด ดังนั้น ถ้าสัญญาณผิดพลาดนี้มีสัญญาณรบกวนมาก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้จะกระเพื่อม (Fractuate) ค่อนข้างมาก ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมของเราไม่มีเสถียรภาพได้

### 2.4.4 การควบคุมแบบ Proportional Integral (PI)

พีไอ-คอนโทรล คือการรวมระหว่างการควบคุม พี-คอนโทรล ไอ-คอนโทรล ดังนั้นสมการของ  $U_{PI}(t)$  สามารถหาได้ดังนี้

$$U_{PI}(t) = K_p e + K_I \int e dt \quad (2.11)$$

ทำการ Take laplace จะได้

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_I E(s)}{s} \quad (2.12)$$

Transfer function ของตัวควบคุมแบบพีไอ

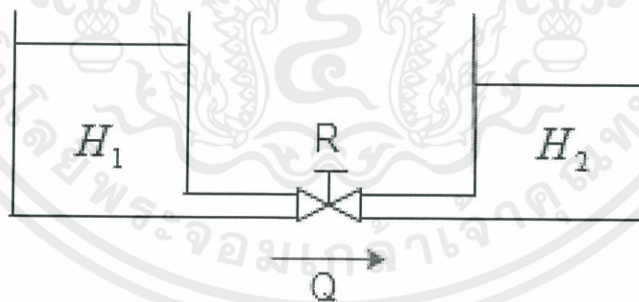
$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (2.13)$$

เมื่อ  $U_{PI}(t) =$  ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีไอ

การควบคุมแบบพีไอ สามารถแก้ค่าเริ่มต้นของ Proportional control และ ลด (% Maximum Overshoot) ที่จะทำให้เกิดการ Oscillate เนื่องจากอินทิกรัลคอนโทรล

## 2.5 ระบบเกี่ยวกับระดับของเหลว

ในการพิจารณาการไหลของของเหลว จะต้องคำนึงถึงค่าความต้านทาน (Resistance) และค่าความจุ (Capacitance) เพื่อที่จะอธิบายถึงคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของระบบเกี่ยวกับระดับของเหลว โดยจะพิจารณาจากการไหลผ่านท่อสั้นๆ ที่ต่ออยู่ระหว่างภาชนะบรรจุสองใบดังรูปที่ 2.9



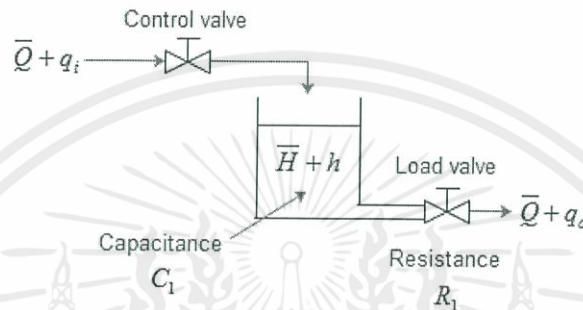
รูปที่ 2.9 แสดงถึงทั้งสองใบที่ต่อกันด้วยท่อสั้นๆ โดยมีวาล์วเป็นตัวต้านทาน

### 2.5.1 ค่าความต้านทานการไหลของของเหลว

เมื่อพิจารณาการไหลของน้ำผ่านท่อสั้นๆ โดยมีวาล์วต่อถึงทั้งสองเข้าด้วยกัน ดังในรูปที่ 2.9 ค่าความต้านทานจะถูกกำหนดได้ว่าเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระดับของเหลวในภาชนะบรรจุทั้งสอง อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล นั่นคือ

$$R = \frac{\text{change in level difference}}{\text{change in flow rate}} = \frac{\Delta H}{\Delta Q}$$

ระบบควบคุมความสูงระดับน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบถังเดียวไม่มีปฏิกริยาต่อถังอื่นโดยที่  $\bar{Q}$  และ  $q_i$  เป็นอัตราการไหลทางด้านขาเข้าผ่านวาล์วควบคุมที่สามารถเปลี่ยนอัตราการไหลได้ และลงไปยังถังโดยควบคุมความสูงจากอัตราการไหลเข้า และไหลควาล์วมีค่าคงที่จะได้  $\bar{Q}$  และ  $q_o$  เป็นอัตราการไหลทางฝั่งขาออก ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงระบบควบคุมระดับน้ำ

จากรูปที่ 2.10 กำหนดให้

$\bar{Q}$  = อัตราการไหลที่สภาวะคงที่ก่อนการเปลี่ยนแปลง (Steady-state flow rate)

$\bar{H}$  = ความสูงของระดับน้ำที่สภาวะคงที่ก่อนการเปลี่ยนแปลง (Steady-state head)

$q_i$  = อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ถังที่เปลี่ยนแปลงจากอัตราการไหลในสภาวะคงที่

$q_o$  = อัตราการไหลของน้ำออกจากถังที่เปลี่ยนแปลงจากอัตราการไหลสภาวะคงที่

$h$  = ความสูงที่เปลี่ยนจากสภาวะคงที่

$C_1$  = ความจุของถังน้ำ (Capacitance) ของถังที่ 1

$R_1$  = ค่าความต้านทานทางด้านน้ำออก (Resistance) ของวาล์ว  $R_1$

เมื่อพิจารณาการควบคุมระดับของเหลวในรูป 2.10 ในระบบนี้ของเหลวจะไหลผ่านวาล์วออกจากภาชนะซึ่งแบ่งการไหลได้สองแบบ คือ

(1) การไหลเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow)

เมื่อเป็นการไหลแบบราบเรียบ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่มีสถานะคงตัว (Steady state,  $\bar{Q}$ ) และความสูงคงที่ (Head,  $\bar{H}$ ) เมื่อกำหนดเส้นผ่าศูนย์กลางของวาล์วคงที่จะมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.14

$$\bar{Q} = K_1 \bar{H} \quad (2.14)$$

โดยที่  $K_1$  เป็นค่าคงที่ การไหลแบบราบเรียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความต้านทานของไหลดวาล์ว ( $R_1$ ) ก็คืออัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงความสูงจากสภาวะคงที่ ( $\Delta H$ ) กับการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลจากสภาวะคงที่ ( $\Delta Q$ ) ของถังกักน้ำจะหาได้ดังนี้ จากนิยามค่าความต้านทานการไหล

$$R_1 = \frac{dH}{dQ} \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.14 จะได้ว่า

$$dQ = K_1 dH \quad (2.16)$$

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{1}{K_1} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.15 และจากสมการที่ 2.17 จะได้ว่า

$$R_1 = \frac{1}{K_1} = \frac{H}{Q} \quad (2.18)$$

(2) การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

ในกรณีที่การไหลผ่านสิ่งกีดขวางเป็นแบบปั่นป่วน อัตราการไหลที่สภาวะคงที่จะหาได้จาก

$$Q = K_t \sqrt{H} \quad (2.19)$$

โดยที่  $K_t$  คือค่าคงที่การไหลแบบปั่นป่วนและค่าความต้านทานในกรณีของการไหลแบบปั่นป่วนหาได้ดังนี้

จากสมการที่ 2.19 จะได้ว่า

$$dH = K_t \frac{1}{2\sqrt{H}} dH \quad (2.20)$$

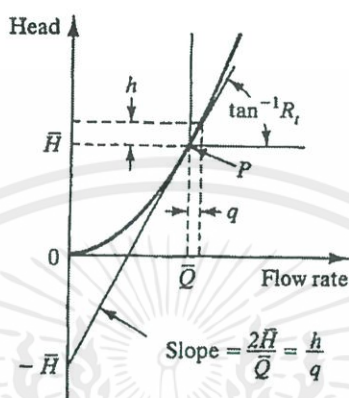
$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K_t} \quad (2.21)$$

จากนิยามค่าความต้านทานการไหล  $R_1 = \frac{dH}{dQ}$  และ ค่าคงที่การไหลแบบปั่นป่วน  $K_t = \frac{Q}{\sqrt{H}}$  จะ  
ได้

$$R_1 = \frac{2\sqrt{H}}{K_t} = \frac{2H}{Q} \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ว่าในทางปฏิบัติการหาค่าความต้านทานจากสมการที่ 2.18 หรือสมการที่ 2.22 นั้นหาไม่ได้ เนื่องจากเราไม่ทราบค่าคงที่การไหล  $K_1$  และ  $K_2$  ดังนั้นในทางปฏิบัติการหาค่าความต้านทานการไหล เราจะใช้วิธีการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงที่สภาวะคงที่ ( $\bar{H}$ ) และอัตราการไหลคงที่ ( $\bar{Q}$ ) ที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปตัวอย่างที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของน้ำ และอัตราการไหล

### 2.5.2 ค่าความจุ C (Capacitance) ของภาชนะบรรจุ

ค่าความจุ C (Capacitance) ของภาชนะบรรจุ หรือถังน้ำ นั้นกล่าวได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของของเหลวที่สะสมอยู่อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความสูง นั่นคือ

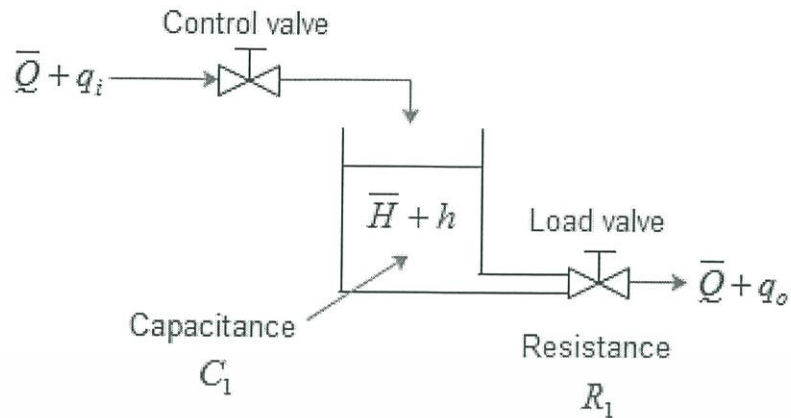
$$C = \frac{\Delta V}{\Delta H} \quad (2.23)$$

สังเกตว่าความจุ (Capacity ;  $m^3$ ) นั้นต่างกับค่าความจุ  $m^2$  ค่าความจุของภาชนะบรรจุจะมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของภาชนะบรรจุ ถ้าพื้นที่ หน้าตัดของภาชนะบรรจุมีค่าคงที่ ค่าความจุก็จะมีค่าคงที่ตลอดทุกระดับความสูง

## 2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 2.6.1 การทดลองการควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น

ระบบควบคุมความสูงระดับน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นโดยที่  $\bar{Q}$  และ  $q_i$  เป็นอัตราการไหลทางด้านขาเข้าผ่านวาล์วควบคุมที่สามารถเปลี่ยนอัตราการไหลได้ และลงไปยังถังโดยควบคุมความสูงจากอัตราการไหลเข้า และไหลดวาล์วมีค่าคงที่จะได้  $\bar{Q}$  และ  $q_o$  เป็นอัตราการไหลทางฝั่งขาออกดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น

จากรูปกำหนดให้

$\bar{Q}$  = อัตราการไหลที่สภาวะคงที่ก่อนการเปลี่ยนแปลง (Steady-state flow rate)

$\bar{H}$  = ความสูงของระดับน้ำที่สภาวะคงที่ก่อนการเปลี่ยนแปลง (Steady-state head)

$q_i$  = อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ถังที่เปลี่ยนแปลงจากอัตราการไหลสภาวะคงที่

$q_o$  = อัตราการไหลของน้ำออกจากถังที่เปลี่ยนแปลงจากอัตราการไหลสภาวะคงที่

$h$  = ความสูงที่เปลี่ยนแปลงจากสภาวะคงที่

$C_1$  = ค่าความจุของถังน้ำ (Capacitance) ของถังที่ 1

$R_1$  = ค่าความต้านทานการไหลทางด้านน้ำออก (Resistance) ของไหลตัว  $R_1$

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.12 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรในถังในช่วงเวลาสั้นๆ ( $dt$ ) มีค่าเท่ากับ การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำในระบบ มีความสัมพันธ์คือ

$$C_1 dh = (q_i - q_o) dt \quad (2.24)$$

$$d\bar{H} = h \quad (2.25)$$

$$d\bar{Q} = q_o \quad (2.26)$$

จาก  $R_1 = \frac{d\bar{H}}{d\bar{Q}}$  จะได้

$$R_1 = \frac{h}{q_o} \quad (2.27)$$

แทนค่า  $q_o$  จากสมการที่ 2.27 ลงในสมการที่ 2.24 จะได้

$$C_1 \frac{dh}{dt} = q_i - \frac{h}{R_1} \quad (2.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_1 R_1 \frac{dh}{dt} + h = R_1 q_i \quad (2.29)$$

จากสมการที่ 2.29 เมื่อ take laplace และให้ initial condition มีค่าเท่ากับ 0 จะได้

$$L\{C_1 R_1 \frac{dh}{dt} + h\} = L\{R_1 q_i\} \quad (2.30)$$

$$C_1 R_1 s H(s) + H(s) = R_1 Q_i(s) \quad (2.31)$$

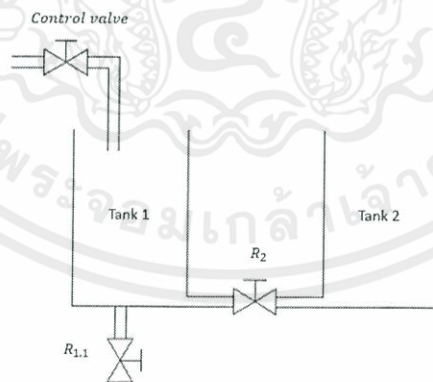
$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_1}{R_1 C_1 s + 1} \quad (2.32)$$

โดยที่  $Q_i(s)$  เป็นอินพุต และ  $H(s)$  เป็นเอาต์พุตเมื่อกำหนดให้  $Q_i(s)$  เป็น Step input เมื่อนำไปแก้ในสมการที่ 2.32 จะได้สมการที่ 2.33

$$h(t) = R_1 q_i (1 - e^{-\frac{t}{RC_1}}) \quad (2.33)$$

### 2.6.2 การทดลองการควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น

ระบบควบคุมความสูงระดับน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่นโดยที่  $\bar{Q}$  และ  $q_i$  เป็นอัตราการไหลทางด้านขาเข้าผ่านวาล์วควบคุมที่สามารถเปลี่ยนอัตราการไหลได้ และลงไปยังถังโดยควบคุมความสูงจากอัตราการไหลเข้า และไหลควาล์วมีค่าคงที่ 2 ตัวคือ  $R_{1,1}$  และ  $R_2$  จะได้  $\bar{Q}$  และ  $q_o$  เป็นอัตราการไหลทางฝั่งขาออก ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น

โดยกำหนดให้

$\bar{Q}$  = อัตราการไหลที่สภาวะคงที่ก่อนการเปลี่ยนแปลง (Steady-state flow rate)

$\bar{H}$  = ความสูงของระดับน้ำที่สภาวะคงที่ก่อนการเปลี่ยนแปลง (Steady-state head)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$h_1$  = ความสูงที่เปลี่ยนแปลงจากสภาวะคงที่ของถังที่ 1

$h_2$  = ความสูงที่เปลี่ยนแปลงจากสภาวะคงที่ของถังที่ 2

$C_1$  = ค่าความจุของถังน้ำ (Capacitance) ถังที่ 1

$C_2$  = ค่าความจุของถังน้ำ (Capacitance) ถังที่ 2

$R_1$  = ค่าความต้านทานทางด้านน้ำออก (Resistance) ของโหลดวาล์ว  $R_1$

$R_2$  = ค่าความต้านทานการไหลระหว่างถัง (Resistance) ของโหลดวาล์ว  $R_2$

$q_i$  = อัตราการไหลของน้ำเข้าสู่ถังที่เปลี่ยนแปลงจากอัตราการไหลสภาวะคงที่

$q_o$  = อัตราการไหลของน้ำออกจากถังที่เปลี่ยนแปลงจากอัตราการไหลสภาวะคงที่

$q_2$  = อัตราการไหลของน้ำระหว่างสองถัง

การทดลองการควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวมีปฏิกริยาต่อถังอื่น ดังรูปที่ 2.13 จะทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดย  $q_i$  คืออัตราการไหลของน้ำเข้าถัง  $h_1$  คือระดับน้ำที่ต้องการควบคุมสำหรับถังที่ 2 จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.34

$$C_2 dh_2 = (q_2)dt \quad (2.34)$$

$$q_2 = \frac{h_1 - h_2}{R_2} \quad (2.35)$$

$$\frac{h_1}{R_1} = q_o \quad (2.36)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.35 ลงในสมการที่ 2.34

$$C_2 R_2 dh_2 = h_1 - h_2 dt \quad (2.37)$$

สำหรับถังที่ 1 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรคือ

$$C_1 dh_1 = (q_i - q_o - q_2)dt \quad (2.38)$$

เมื่อแทนสมการที่ 2.35 และสมการที่ 2.36 ลงในสมการที่ 2.38 จะได้

$$C_1 R_1 \frac{dh_1}{dt} + \frac{R_1}{R_2} h_1 + h_1 = R_1 q_i + \frac{R_1}{R_2} h_2 \quad (2.39)$$

จากสมการที่ 2.39 เมื่อ take laplace และให้ initial condition มีค่าเท่ากับ 0 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_1 R_1 s H_1(s) + \frac{R_1}{R_2} H_1(s) + H_1(s) = R_1 Q_i + \frac{R_1}{R_2} H_2(s) \quad (2.40)$$

จากสมการ 2.37 ที่ เมื่อ take laplace และให้ initial condition มีค่าเท่ากับ 0 จะได้

$$C_2 R_2 H_2(s) + H_2(s) = H_1(s) \quad (2.41)$$

$$H_2(s) = \left( \frac{1}{R_2 C_2 s + 1} \right) H_1(s) \quad (2.42)$$

แทนค่าสมการที่ 2.42 ลงในสมการที่ 2.40 จะได้ว่า

$$\frac{H_1(s)}{Q_i} = \frac{R_1 (R_2 C_2 s + 1)}{R_2 C_2 R_1 R s^2 + (C_1 C_1 + C_2 R_2 + C_2 R_1) s + 1} \quad (2.43)$$

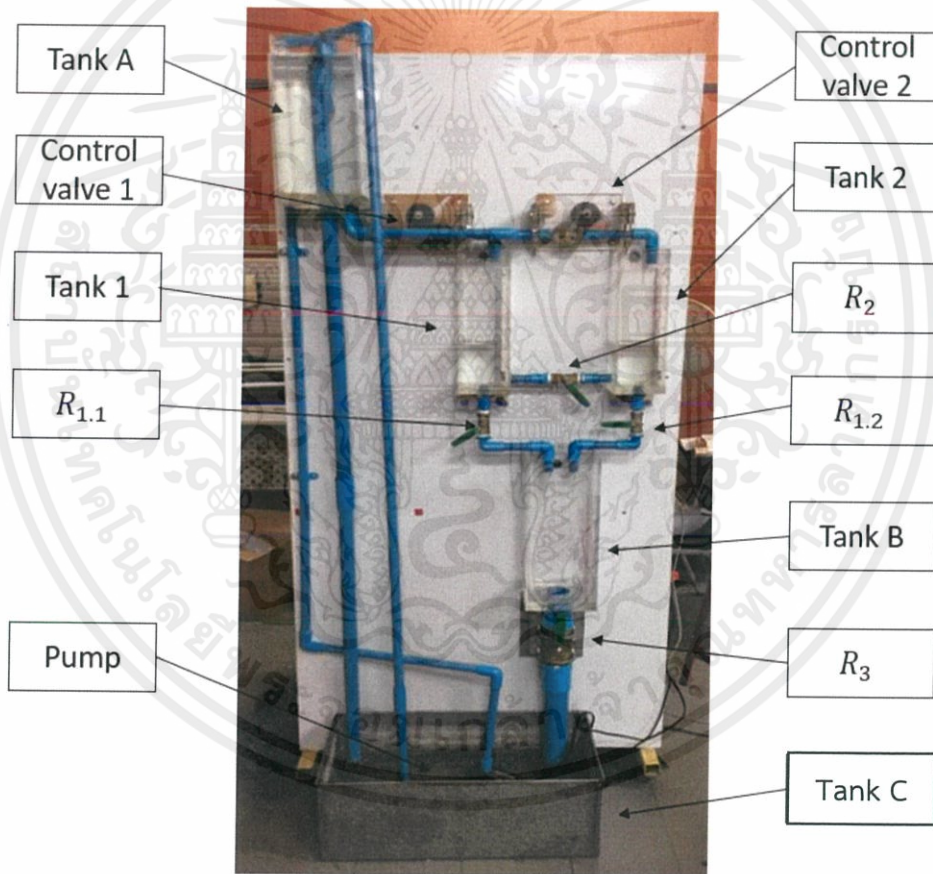
โดยที่  $Q_i(s)$  เป็นอินพุต และ  $H_1(s)$  เป็นเอาต์พุต



### บทที่ 3

## การคำนวณและการออกแบบสร้าง

ชุดทดลองควบคุมระดับน้ำโดยวิธีพีไอ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนของฮาร์ดแวร์ (hardware) และส่วนของซอฟต์แวร์ (Software) ซึ่งส่วนของซอฟต์แวร์ คือโปรแกรม LabVIEW สำหรับการควบคุมการทำงาน โดยใช้รับค่าระดับความสูงของน้ำในถังที่ต้องการ และควบคุมค่าเป้าหมายให้เป็นไปตามที่ต้องการ และส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์นั้น จะประกอบด้วยชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่างๆดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำ

การทำงานของชุดการทดลองระบบควบคุมระดับน้ำเริ่มจากคอมพิวเตอร์ประมวลผล และส่งสัญญาณไปสั่งการทำงานผ่านทาง Arduino เพื่อสั่งงานเซอร์โวมอเตอร์ในการปรับองศาของวาล์ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุม โดยถัง A เป็นถังควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้คงที่ มีการทำทางน้ำล้นเพื่อให้ความสูงของน้ำในถังคงที่

น้ำไหลผ่านท่อออกจากถัง A ไปยังวาล์วควบคุมที่ปรับองศาได้ จากนั้นวาล์วควบคุมเปิดตามการสั่งงานจากคอมพิวเตอร์ เพื่อปล่อยน้ำลงในถัง 1 หรือ 2 ตามที่การทดลองกำหนด มีไหลดวาล์ว  $R_{1.1}$ ,  $R_{1.2}$  และ  $R_2$  อยู่ที่ด้านล่าง และระหว่างถังที่ 1 และถังที่ 2 ดังรูปที่ 5.1

จากนั้นน้ำไหลผ่านไหลดวาล์วลงมายังถังวัดอัตราการไหล หรือถัง B ด้านล่าง จากนั้นน้ำจะผ่านไหลดวาล์ว  $R_3$  แล้วลงไปยังถัง C หรือถังพักน้ำที่อยู่ด้านล่างสุด จากนั้นปั้มน้ำในถังพักจะทำการปั้มน้ำขึ้นไปถัง A

รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์มีดังต่อไปนี้

- (1) ถังที่ใช้ในการทดสอบของการทำงาน กำหนดให้มีขนาด  $9.6 \times 9.6 \times 40$  เซนติเมตร จำนวน 2 ใบ (Tank 1 & Tank 2)
- (2) ถังที่ใช้ในการกำหนดอัตราการไหลโดยทำทางน้ำล้นเพื่อให้ความสูงของระดับน้ำคงที่ที่ 30 เซนติเมตร กำหนดให้มีขนาด  $15 \times 15 \times 35$  เซนติเมตร จำนวน 1 ใบ (Tank A)
- (3) ถังที่ใช้ในการวัดอัตราการไหลของน้ำจากถังที่ 1 และถังที่ 2 กำหนดให้มีขนาด  $15 \times 15 \times 40$  เซนติเมตร จำนวน 1 ใบ (Tank B)
- (4) ถังพักน้ำด้านล่างกำหนดให้มีขนาด  $20 \times 30 \times 50$  เซนติเมตร จำนวน 1 ใบ (Tank C)
- (5) วาล์วขนาด 2 นิ้ว จำนวน 1 อัน ( $R_3$ ) ใช้ในการปิดเปิดน้ำของถัง B
- (6) ปั้มน้ำขนาด 3,000 ลิตรต่อชั่วโมง ใช้ในการสูบน้ำเข้าถัง A
- (7) เซ็นเซอร์วัดความดัน นำมาใช้เป็นเครื่องมือในการวัดระดับความสูงของน้ำ
- (8) เซอร์โวมอเตอร์ ควบคุมองศาที่วาล์วควบคุม
- (9) ArduinoMega2560 ใช้ในการแปลงสัญญาณ
- (10) คอมพิวเตอร์ ใช้ในการประมวลผลข้อมูล
- (11) อุปกรณ์ขยายสัญญาณ ใช้ในการขยายสัญญาณจากเซ็นเซอร์วัดความดัน
- (12) วาล์วขนาด ½ นิ้ว จำนวน 2 อัน นำมาดัดแปลงเพื่อเป็นวาล์วควบคุม
- (13) วาล์วขนาด ½ นิ้ว จำนวน 3 อัน ( $R_{1.1}$ ,  $R_{1.2}$ ,  $R_2$ ) นำมาใช้เป็นไหลดวาล์ว
- (14) NI USB 6001 คือ อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ

### 3.1 การออกแบบส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware)

#### 3.1.1 การออกแบบส่วนที่ไม่ได้มีการควบคุมของระบบ

##### (1) ถังน้ำ

##### (1.1) การขนาดของถัง B

เริ่มต้นกำหนดให้

(1) ความสูงของระดับน้ำในถังพักน้ำด้านบน (Tank A) = 0.3 เมตร

(2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Load valve = 0.5 นิ้ว = 0.0127 เมตร

(3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Control valve = 0.5 นิ้ว = 0.0127 เมตร

จากสมการการหาอัตราการไหล

$$Q = \sqrt{2ghA} \quad (3.1)$$

และ Control Valve เมื่อเปิดมากที่สุดจะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ

$$Q = A\sqrt{2gh}$$

$$Q = \frac{\pi}{4} \times (0.0127)^2 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.3}$$

$$Q = 307.3318 \text{ cm}^3/\text{s}$$

เมื่อทำการจับเวลา 10 วินาที และมีอัตราการไหลของน้ำมากที่สุด คือ 307.3318 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที และปริมาตรของน้ำที่อยู่ในถังจะมีค่าเท่ากับ  $307.3318 \times 10 = 3073.318$  ลูกบาศก์เซนติเมตร จึงทำการออกแบบถัง B ให้มีขนาดเท่ากับ  $15 \times 15 \times 30$  เซนติเมตร

##### (1.2) การหาขนาดของถังพักน้ำด้านล่าง (C)

ปริมาตร ถัง A (Tank A) =  $15 \times 15 \times 30 = 6750$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

ปริมาตร ถัง 1 (Tank 1) =  $9.6 \times 9.6 \times 30 = 2764.8$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

ปริมาตร ถัง 2 (Tank 2) =  $9.6 \times 9.6 \times 30 = 2764.8$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

ปริมาตร ถัง B (Tank B) =  $15 \times 15 \times 30 = 6750$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

ปริมาตรน้ำที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด 4 ถัง เท่ากับ 19,029.6 ลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นจึงเลือกใช้ถังน้ำขนาด 30,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร กำหนดขนาดเท่ากับ  $20 \times 30 \times 50$  เซนติเมตร

## (1.3) การคำนวณวาล์วสำหรับอุปกรณ์วัดอัตราการไหล

$$Q_{in} = 3.0733 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta Q = 0$$

$$Q_{in} = 307.33 \text{ cm}^3/\text{s}$$

เลือกใช้วาล์วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.04 m

$$Q_{out} = A\sqrt{2gh}$$

$$Q_{out} = (0.04)^2 \times \frac{\pi}{4} \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 30}$$

$$Q_{out} = 30487 \text{ cm}^3/\text{s}$$

ซึ่งอัตราการไหลออกมากกว่าอัตราการไหลเข้าดังนั้นน้ำจึงไม่เหลือในถัง

## (2) ป้อนน้ำ

จากการคำนวณหาขนาดของถังน้ำ ที่ถัง A มีความสูงของระดับน้ำที่ 30 เซนติเมตรซึ่งจากสมการที่ 3.1 เราสามารถคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำจากในถัง A ได้จากการสมมุติอัตราการไหลของน้ำออกจากถัง A ซึ่งมีอัตราการไหลเท่ากับการสูบน้ำกลับเข้าถัง A ของปั้มน้ำ จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อน้ำที่มีขนาด 1.75 เซนติเมตรดังนั้น อัตราการสูบน้ำเข้าถัง A ของปั้มน้ำคือ

$$Q = \pi r^2 \sqrt{2gh} \times 2 \text{ valve}$$

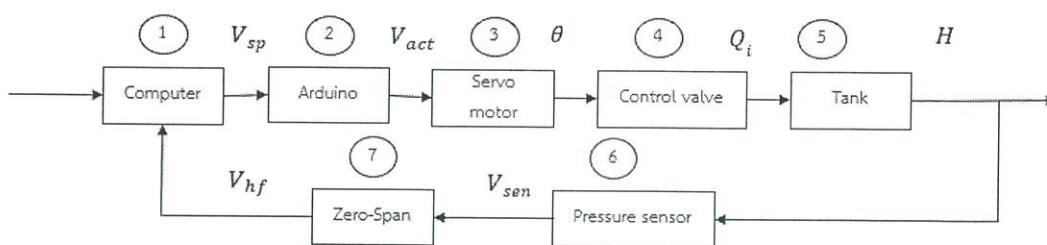
$$Q = \frac{\pi}{4} (0.0127^2) \times 2 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.3}$$

$$Q = 6.1466 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

ขนาดของปั้มน้ำ ประมาณ 2212.7887 ลิตรต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงกำหนดให้ใช้ปั้มน้ำที่มีขนาด 3000 ลิตรต่อชั่วโมงซึ่งมีขายในท้องตลาด

## 3.1.2 การออกแบบส่วนการควบคุมระบบ

ส่วนการควบคุมระบบ คือ ส่วนที่อุปกรณ์ทำงานตามคำสั่งควบคุม โดยอุปกรณ์วัดความดันส่งสัญญาณไปที่ Zero-Span แล้วนำไปเทียบกับค่าที่ต้องการออกมาเป็นสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนเข้าสู่ Arduino หลังจากนั้นทำการปรับองศาของวาล์วควบคุมเพื่อที่จะควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่เข้าถังดังรูปที่ 3.2

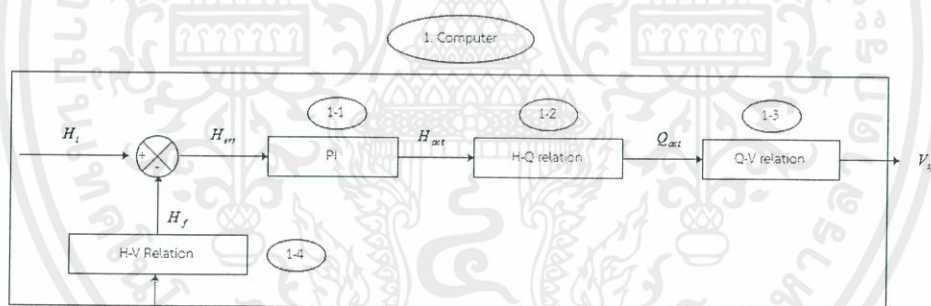


รูปที่ 3.2 อุปกรณ์การทำงานในระบบควบคุม

จากรูปที่ 3.2 สามารถแยกรายละเอียดอุปกรณ์ได้ดังนี้

(1) คอมพิวเตอร์

ส่วนของคอมพิวเตอร์ คือส่วนของบล็อกไดอะแกรมที่ 1 ในรูป 3.2 ซึ่งคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่รับสัญญาณป้อนกลับจากระบบมาทำการประมวลผลและส่งสัญญาณควบคุมไปสั่งงานการทำงานของระบบ โดยคอมพิวเตอร์จะมีการสร้างระบบควบคุมเพื่อควบคุมการทำงาน โดยมีรายละเอียดของบล็อกไดอะแกรมการทำงานของคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รายละเอียดในส่วนการทำงานของคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 3.3 กำหนดให้

$H_i$  = ความสูงอ้างอิงที่ต้องการ

$H_f$  = ความสูงป้อนกลับ

$V_{hf}$  = แรงดันป้อนกลับจาก Pressure sensor

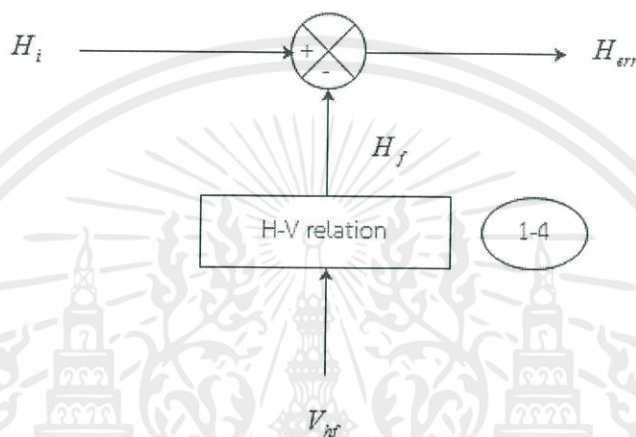
$H_{err}$  = ค่าความสูงควบคุมที่เกิดจากการประมวลผลจาก Controller

$Q_{act}$  = ค่าอัตราการไหลควบคุมที่ถูกแปลงมาจาก  $H_{act}$  ผ่านความสัมพันธ์ของอัตราการไหลและความสูง

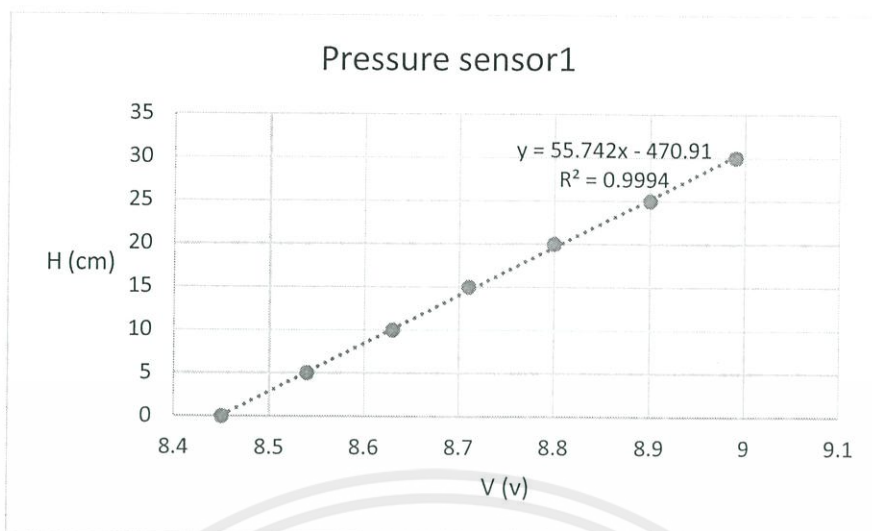
$V_{sp}$  = ค่าแรงดันไฟฟ้าควบคุมที่แปลงจากค่าอัตราการไหล  $Q_{act}$  ผ่านความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล และแรงดันไฟฟ้า

การทำงานของคอมพิวเตอร์สามารถแยกรายละเอียดในขั้นตอนการทำงานได้ดังนี้

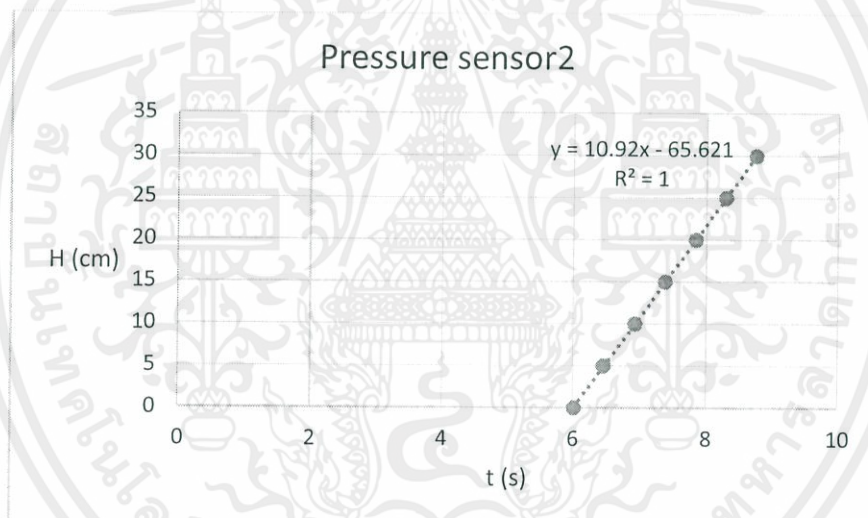
(1.1) เป็นขั้นตอนที่ทำหน้าที่เปรียบเทียบคำสั่งความสูงอ้างอิงที่ต้องการ ( $H_i$ ) และความสูงป้อนกลับ ( $H_f$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 บล็อกไดอะแกรมการเปรียบเทียบคำสั่งความสูงอ้างอิง ( $H_i$ ) และความสูงป้อนกลับ ( $H_f$ ) โดยการทำงานตามรูปที่ 3.4 เริ่มต้นจากการส่งค่าความสูงอ้างอิงที่ต้องการ ( $H_i$ ) จากนั้นความสูง ( $H_i$ ) นั้นจะถูกเปรียบเทียบกับความสูงที่ป้อนกลับ ( $H_f$ ) แล้วให้ผลต่างมาเป็นความคลาดเคลื่อนของความสูง ( $H_{err}$ ) จะถูกส่งเข้าไปที่ระบบควบคุมแบบ PI ในขั้นตอนต่อไป ซึ่งความสูงป้อนกลับ ( $H_f$ ) นั้นถูกแปลงมาจากแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับ ( $V_{Hf}$ ) ผ่านบล็อกไดอะแกรม 1-4 (H-V relation) ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งในบล็อกไดอะแกรมนี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับน้ำ ( $H$ ) ในถังน้ำ และแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ที่สภาวะคงที่ (steady state) ที่เซ็นเซอร์ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าผ่าน Zero-Span ออกมาซึ่งความสัมพันธ์นี้ได้จากการทดลองในบทที่ 5 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความสูงของระดับน้ำของอุปกรณ์วัดความดันตัวที่ 1



รูปที่ 3.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความสูงของระดับน้ำของอุปกรณ์วัดความดันตัวที่ 2

สามารถหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับน้ำ ( $H_f$ ) และแรงดันไฟฟ้า ( $V_{hf}$ ) ซึ่งสมการความสัมพันธ์นี้จะได้มาจากการทดลองในบทที่ 5 และนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรม LabVIEW

เมื่อทราบค่าความสูงป้อนกลับ ( $H_f$ ) แล้วก็สามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนของความสูง ( $H_{err}$ ) ได้ดังสมการที่ 3.2

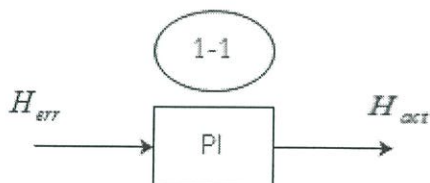
$$H_{err} = H_i - H_{hf} \quad (3.2)$$

ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนความสูง ( $H_{err}$ ) จะถูกส่งเข้าไปในระบบควบคุมแบบ PI ในขั้นตอน

ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

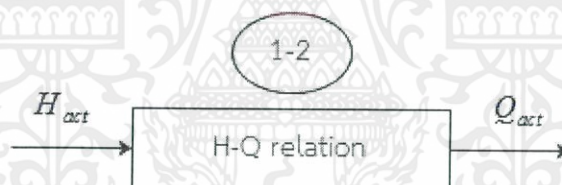
(1.2) ขั้นตอนการประมวลผลความคลาดเคลื่อน ( $H_{err}$ ) โดยระบบการควบคุมแบบ PI ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 บล็อกไดอะแกรมในส่วนระบบควบคุมความสูง

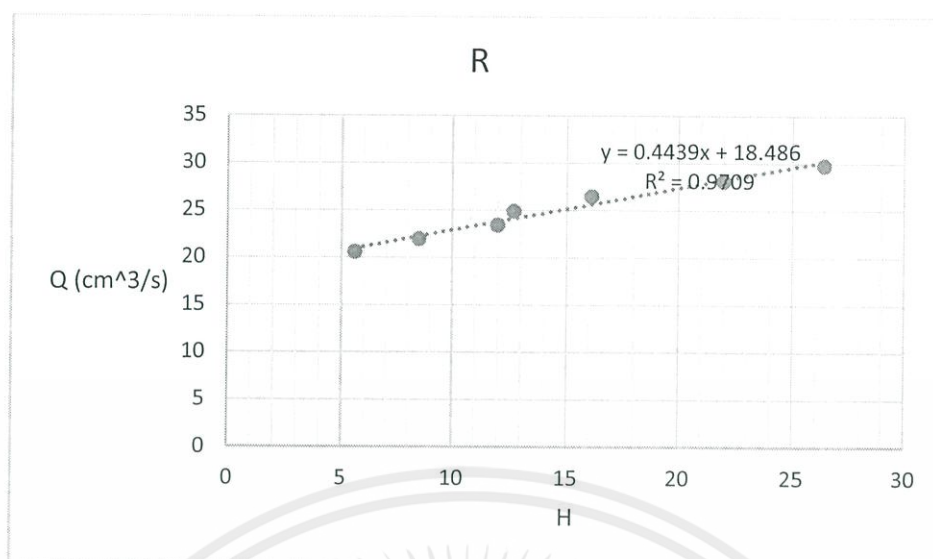
จากรูปที่ 3.7 ระบบควบคุมแบบ PI เป็นส่วนที่อยู่ในบล็อกไดอะแกรมที่ 1-1 ในรูปที่ 3.3 โดยระบบควบคุมแบบ PI ทำหน้าที่รับค่าความคลาดเคลื่อนของความสูง ( $H_{err}$ ) เข้ามาทำการประมวลผลแล้วส่งสัญญาณควบคุมความสูง ( $H_{act}$ ) ออกไปสั่งงานในขั้นตอนต่อไป

(1.3) เป็นขั้นทำหน้าที่เปลี่ยนค่าความสูงควบคุม ( $H_{act}$ ) เป็นอัตราการไหลควบคุม ( $Q_{act}$ ) ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมการเปลี่ยนแปลงค่าความสูง ( $H_{act}$ ) เป็นอัตราการไหล ( $Q_{act}$ )

จากรูปที่ 3.8 บล็อกไดอะแกรมในส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงควบคุม ( $H_{act}$ ) เป็นอัตราการไหลควบคุม ( $Q_{act}$ ) เป็นบล็อกไดอะแกรมที่ 1-2 (H-Q relation) ของรูปที่ 3.3 โดยค่าความสูง ( $H_{act}$ ) จะถูกเปลี่ยนเป็นค่าอัตราการไหล  $Q_{act}$  ผ่านความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ( $Q$ ) และความสูงของระดับน้ำในถัง (H) ที่สภาวะคงที่ (Steady state) ที่ได้จากการทดลองในบทที่ 5 ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง (H) และอัตราการไหล (Q)

โดยรูปที่ 3.9 เป็นการทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1 และอัตราการไหลในสถานะคงที่โดยมีไหลดวาล์ว  $R_1$  เป็นตัวต้านทานการไหลซึ่งเป็นการทดลองแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของไหลดวาล์ว  $R_1$  และสามารถอนุมานเป็นกราฟเส้นตรงซึ่งสามารถหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ( $Q$ ) และความสูงของระดับน้ำ ( $H$ ) ได้ดังสมการที่ 3.3

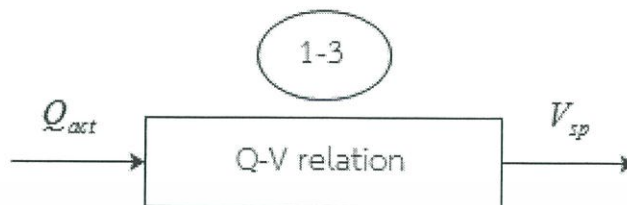
$$Q = 0.4439H + 18.486(\text{cm}^3/\text{s}) \quad (3.3)$$

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ( $Q$ ) และความสูงของระดับน้ำ ( $H$ ) จะนำไปใช้กับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลควบคุม ( $Q_{act}$ ) และความสูงควบคุม ( $H_{act}$ ) ตามบล็อกไดอะแกรม 1-2 ของรูปที่ 3.3 ดังสมการที่ 3.4

$$Q_{act} = 0.4439H_{act} + 18.486(\text{cm}^3/\text{s}) \quad (3.4)$$

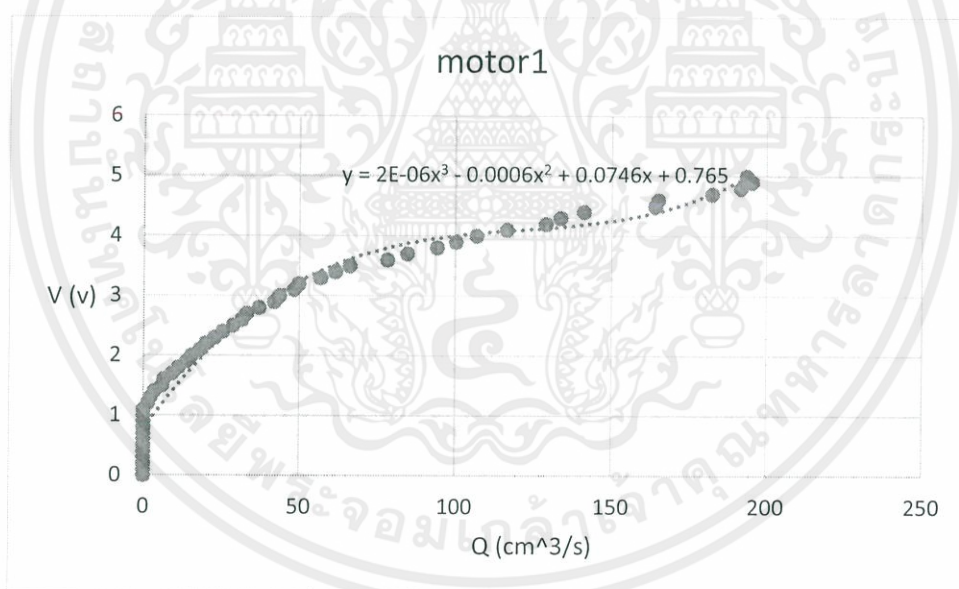
ค่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความสูงของระดับน้ำในสถานะคงที่ที่ได้จากการทดลองแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นนี้จะนำไปใช้ในระบบที่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นด้วยเนื่องจากแบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่นจะมีตัวต้านทานการไหลของน้ำ  $R_1$  ทางด้านน้ำออกทางเดียว และเป็นตัวเดียวกันกับระบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น

(1.4) เป็นขั้นที่เปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลควบคุม ( $Q_{act}$ ) เป็นแรงดันไฟฟ้าควบคุม ( $V_{sp}$ ) ส่งสัญญาณแรงดัน ( $V_{sp}$ ) ไปที่ Arduino ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 บล็อกไดอะแกรมในการเปลี่ยนค่าอัตราการไหล ( $Q_{act}$ ) เป็นแรงดันไฟฟ้า ( $V_{sp}$ )

ในส่วนของการเปลี่ยนค่าอัตราการไหลควบคุม ( $Q_{act}$ ) เป็นแรงดันไฟฟ้าควบคุม ( $V_{sp}$ ) เป็นบล็อกไดอะแกรมที่ 1-3 (Q-V relation) ของรูปที่ 3.3 ซึ่งการทำงานของบล็อกนี้เป็นดังรูปที่ 3.10 โดยค่าอัตราการไหล ( $Q_{act}$ ) จะถูกเป็นแรงดันไฟฟ้า ( $V_{sp}$ ) ผ่านความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) และอัตราการไหล ( $Q$ ) ที่ได้จากการทดลองในบทที่ 5 ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ( $Q$ ) และแรงดันไฟฟ้า ( $V$ )

โดยรูปที่ 3.11 เป็นผลการทดลองการหาค่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ที่สั่งให้เซอร์โวมอเตอร์ทำงานขับวาล์วทำให้เกิดอัตราการไหล ( $Q$ ) และได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ( $Q$ ) และแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) ได้ดังสมการที่ 3.5

$$V = 2 \times 10^{-6} Q^3 - 0.0006 Q^2 + 0.0746 Q + 0.765 \text{ (volt)} \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า ( $V$ ) และอัตราการไหล ( $Q$ ) ในสมการที่ 3.5 จะนำไปใช้กับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าควบคุม ( $V_{sp}$ ) และ อัตราการไหล ( $Q_{act}$ ) ตามบล็อกไดอะแกรมที่ 1-3 ของรูปที่ 3.3

$$V_{sp} = 2 \times 10^{-6} Q_{act}^3 - 0.0006 Q_{act}^2 + 0.0746 Q_{act} + 0.765 \text{ (volt)} \quad (3.6)$$

แรงดันไฟฟ้า ( $V_{sp}$ ) เป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จะถูกส่งออกจากคอมพิวเตอร์ แล้วส่งเข้าไปที่ Arduino โดยจะไปควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ให้ทำการปิดเปิดวาล์วให้เกิด อัตราการไหล ตามการทำงานของระบบควบคุม

## (2) Arduino

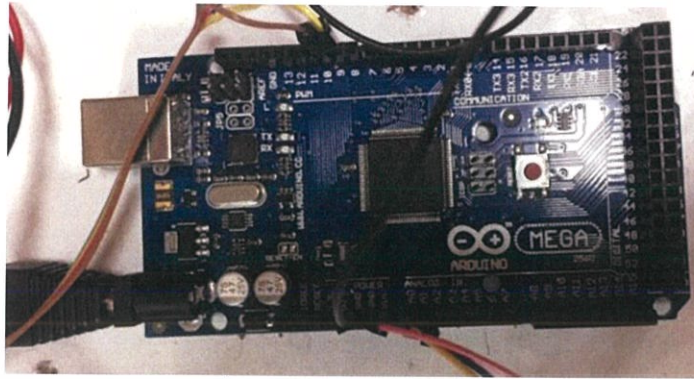
Arduino คือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ คือส่วนที่ 2 ของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.2 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจาก  $V_{sp}$  เป็น  $V_{act}$  ดังรูปที่ 3.12 โดยสัญญาณขาเข้าจะเป็นแอนะล็อก แล้วขาออกเป็นสัญญาณพัลส์วidthมอดูเลชั่น (Pulse Width Modulation) ดิจิทัล

โดยบอร์ดดังรูปที่ 3.13 มีคุณสมบัติต่อไปนี้

กำลังไฟหลัก	:	7-12	โวลต์
ความจำ	:	256	กิโลไบต์
ช่องสัญญาณแอนะล็อกขาเข้า	:	16	ช่อง
ช่องสัญญาณพัลส์วidthมอดูเลชั่นขาออก	:	14	ช่อง



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมในส่วนของ Arduino



รูปที่ 3.13 ArduinoMEGA2560

### (3) เซอร์โวมอเตอร์

ส่วนของเซอร์โวมอเตอร์ คือส่วนที่ 3 ของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.2 ลักษณะมอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ DC มอเตอร์ขนาดแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 6.6 โวลต์ ซึ่งเซอร์โวมอเตอร์ดังรูปที่ 3.15 จะทำหน้าที่ขับวาล์วควบคุมเพื่อทำการเปิดปิดวาล์วควบคุม โดยทำงานตามสัญญาณ  $V_{act}$  ที่ส่งมาจาก Arduino แล้วหมุนวาล์วเป็นมุม  $\theta$  ที่องศาต่างๆที่ทำให้น้ำไหลตามการเปิดปิดของวาล์วดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงบล็อกไดอะแกรมในส่วนของเซอร์โวมอเตอร์

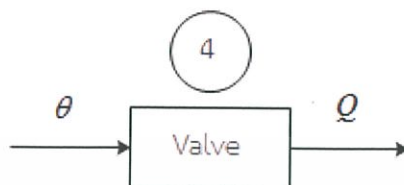


รูปที่ 3.15 เซอร์โวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## (4) วาล์วควบคุม

ส่วนของวาล์วควบคุม คือส่วนที่ 4 ของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.2 จะทำหน้าที่เปลี่ยนจากองศาของวาล์วเป็นอัตราการไหลดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 บล็อกไดอะแกรมในส่วนของวาล์วควบคุม

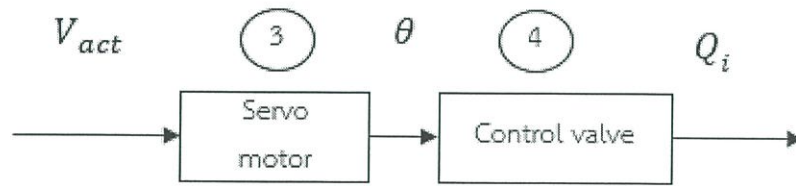
เนื่องจากวาล์วควบคุมที่มีขายทั่วไปจะเป็น Solenoid Valve ซึ่งให้กิริยาควบคุมเป็นแบบเปิด-ปิด (On-Off Control) ส่วนวาล์วควบคุมที่ตอบสนองต่อการควบคุมแบบ PI นั้นจะมีราคาสูงมาก จึงเลือกวิธีการสร้างวาล์วควบคุมขึ้นเอง โดยใช้ Ball Valve ที่มีขายโดยทั่วไป ขนาด 1/2 นิ้ว มาดัดแปลงเป็นวาล์วควบคุม โดยสร้างชุด Actuator ขึ้นมาดังรูปที่ 3.17 ซึ่งชุด Actuator จะประกอบไปด้วย Servo motor ที่ใช้ในการขับเคลื่อน โดยรับสัญญาณควบคุมมาจาก Arduino Mega 2560 ซึ่งสามารถปรับค่าได้มาใช้ในการวัดตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปของวาล์วซึ่งรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 5 ชุดการควบคุมวาล์ว



รูปที่ 3.17 แสดงชุดวาล์วควบคุมที่สร้างขึ้น

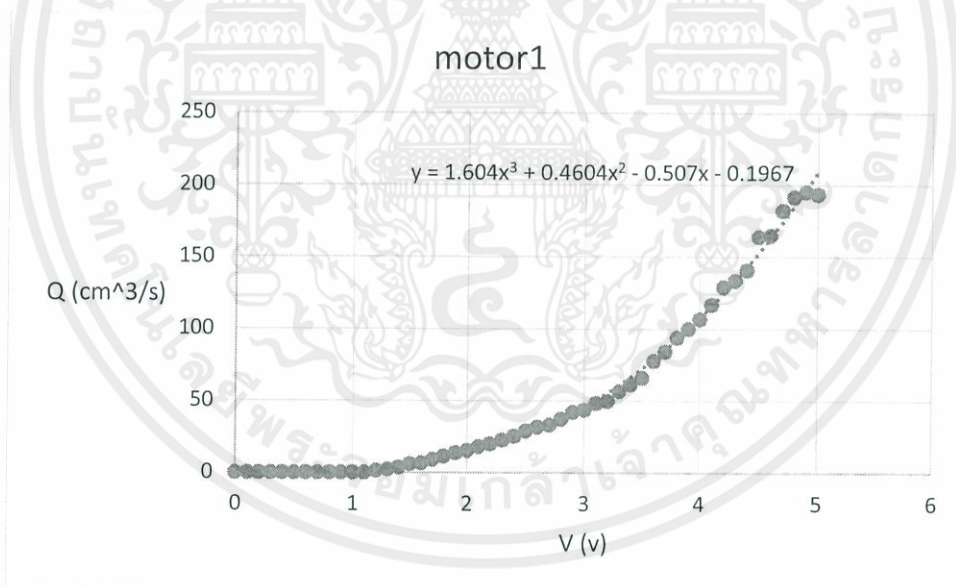
## (5) ชุดการควบคุมวาล์ว

ชุดการควบคุมวาล์วนั้นจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นเซอร์โวมอเตอร์ และวาล์ว ซึ่งก็คือส่วนที่ 3 และ 4 ของรูปที่ 3.2 ประกอบกันเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 บล็อกไดอะแกรมชุดควบคุมวาล์ว

จากการทำงานของชุดควบคุมวาล์วดังแสดงในรูปที่ 3.18 ที่รับสัญญาณ  $V_{sp}$  ที่มาจากคอมพิวเตอร์ และผลลัพธ์ที่ได้ก็คืออัตราการไหลของน้ำ  $Q_i$  ที่เกิดจากการเปิดวาล์ว ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า  $V_{sp}$  และอัตราการไหล  $Q_i$  ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะถูกนำไปเขียนในโปรแกรม LabVIEW ซึ่งจะทำการควบคุมอัตราการไหล  $Q_i$  ผ่านการป้อนแรงดันไฟฟ้า  $V_{sp}$  จากคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากผลการทดลองในบทที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า  $V_{sp}$  และอัตราการไหลของน้ำ  $Q_i$  ดังรูปที่ 3.19

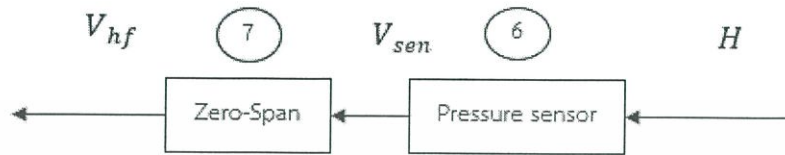


รูปที่ 3.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า  $V_{sp}$  และอัตราการไหลของน้ำ  $Q_i$

ส่วนของการออกแบบชุดเกียร์ควบคุมวาล์วนั้น ได้ใช้ Ball valve โดยที่มีการปิดสุด และการเปิดสุดอยู่ที่มุมระหว่าง 0-90 องศา โดยมีการดัดแปลงด้วยการใช้เกียร์มาติดตั้งตรงแกนหมุนของวาล์วเนื่องจากข้อจำกัดของขนาดเกียร์ที่มีอยู่ตามท้องตลาดเราจึงเลือกใช้ที่ขนาด 60 ฟันเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร

## (6) ชุดวัดความสูงของระดับน้ำ

ส่วนของชุดวัดความสูง คือส่วนที่ 6 และ 7 ของบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.2 ทำหน้าที่วัดความดัน และขยายแรงดันไฟฟ้าดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 บล็อกไดอะแกรมในส่วนของชุดวัดความสูง

ชุดวัดความสูงประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

(6.1) Pressure Sensor อยู่ในส่วนที่เป็นบล็อกไดอะแกรมที่ 6 ในรูปที่ 3.2 โดยเลือกใช้ Sensor รุ่น MPX 2010 DP CASE 334C-01 ซึ่งสามารถวัดความดันได้สูงถึง 10 kPa ดังแสดงในรูปที่ 3.21 โดยจะให้เอาต์พุตออกมาในรูปของผลต่างของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์



รูปที่ 3.21 เซ็นเซอร์วัดความดันของระดับน้ำ

การต่อเซ็นเซอร์เพื่อใช้ในการวัดระดับน้ำจะใช้สายยางขนาด 6 มิลลิเมตร ที่ต่อมาจากด้านล่างถึงน้ำ ต่อเข้าทางด้านความดันสูงของตัวเซ็นเซอร์ และทางด้านความดันต่ำของตัวเซ็นเซอร์จะเปิดไว้เพื่อให้เจอกับบรรยากาศ เนื่องจากถึงน้ำที่ใช้ในกระบวนการเป็นถึงน้ำแบบเปิด จึงทำให้ความดันแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระดับน้ำเพียงอย่างเดียว โดยความดันแตกต่างที่เข้าสู่ตัวเซ็นเซอร์ คือ

$$\Delta P = P_{high} - P_{low} \quad (3.7)$$

$$= (\rho gh + P_{atm}) - P_{atm}$$

$$\Delta P = \rho gh \quad (3.8)$$

$$h = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $\rho$  คือความหนาแน่นของน้ำ  $1000 \text{ kg/cm}^3$

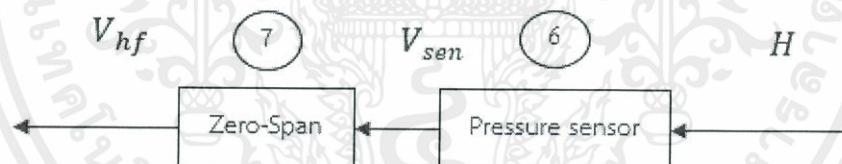
$g$  คือแรงโน้มถ่วงโลก  $9.81 \text{ m/s}^2$

$h$  คือระดับน้ำที่วัด  $\text{m}$ .

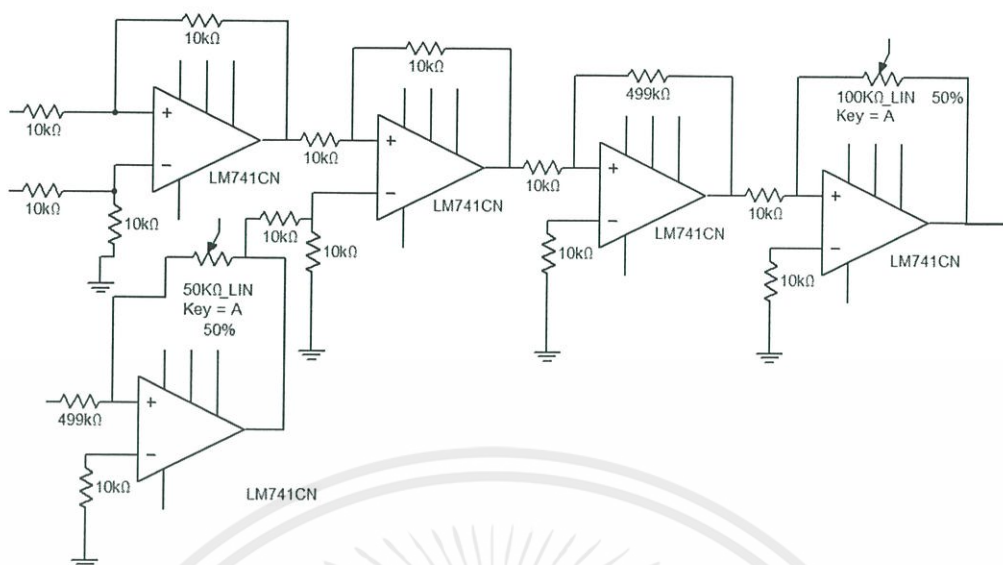
$\Delta P$  คือความดันแตกต่าง  $\text{kPa}$

เซ็นเซอร์จะวัดค่าความแตกต่างของความดันออกน้ำออกมาในรูปแบบเป็นแรงดันไฟฟ้าเป็นระดับมิลลิโวลต์ และจากที่ค่าของความสูงนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าความแตกต่างของความดันน้ำ ซึ่งทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความสูงระดับน้ำ และแรงดันไฟฟ้าได้

(6.2) Zero-Span อยู่ในส่วนของบล็อกไดอะแกรมที่ 7 ในรูปที่ 3.2 เนื่องจากสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์ให้ออกมาดังรูปที่ 3.2 นั้นอยู่ในระดับมิลลิโวลต์ซึ่งน้อยมาก ทำให้การนำไปใช้นั้นยาก และเกิดสัญญาณรบกวนจากภายนอกค่อนข้างง่าย จึงต้องมีตัวทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดัน และปรับค่าศูนย์ที่ตำแหน่งอ้างอิงเพื่อให้สัญญาณที่ออกมาสามารถใช้งานได้ง่ายยิ่งขึ้นการทำงานของ Zero-Span เป็นดังรูปที่ 3.22 โดยรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่มาจากเซ็นเซอร์  $V_{sen}$  มาทำการปรับและขยายโดยวงจรออปแอมป์แล้วส่งแรงดันไฟฟ้า  $V_{hf}$  ออกมาเพื่อเป็นสัญญาณที่ส่งเข้าไปยังคอมพิวเตอร์ และแสดงวงจร Zero-Span ของเซ็นเซอร์ในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.22 แสดงลักษณะการทำงานของ Zero-Span



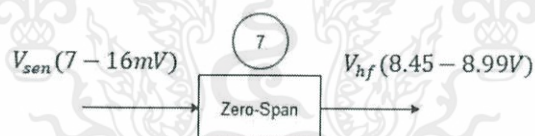
รูปที่ 3.23 แสดงวงจร Zero-Span ของเซ็นเซอร์

โดย

$V_{sen}$  = แรงดันไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์ให้ออกมา

$V_{hf}$  = แรงดันไฟฟ้าหลังจากการปรับ Zero-Span

การปรับ Zero-Span ที่ต้องการดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะการทำงานของ Zero-Span

แรงดันไฟฟ้าที่เซ็นเซอร์ส่งออกมา  $V_{sen}$  ที่ความสูงของระดับน้ำในถังที่ 0 เซนติเมตรคือ 7 มิลลิโวลต์ และที่ 30เซนติเมตร คือ 16 มิลลิโวลต์ ดังนั้นความสัมพันธ์ของ  $V_{sen}$  และ  $V_{hf}$  หาได้โดยความสัมพันธ์ตามสมการที่ 3.10

$$V_{hf} = MV_{sen} + V_{bias} \quad (3.10)$$

$M$  = อัตราการขยาย(เท่า)

$V_{bias}$  = แรงดันที่ต้องชดเชยในการปรับค่าศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถแก้สมการได้ดังนี้

ที่ 0 เซนติเมตร คือ  $V_{sen} = 7$  มิลลิโวลต์  $V_{hf} = 8.45$  โวลต์

$$\begin{aligned} 8.45 &= 7 \times 10^{-3} M + V_{bias} \\ V_{bias} &= -7 \times 10^{-3} M + 8.45 \end{aligned} \quad (3.11)$$

ที่ 30 เซนติเมตร คือ  $V_{sen} = 16$  มิลลิโวลต์  $V_{hf} = 8.99$  โวลต์

$$8.99 = 16 \times 10^{-3} M + V_{bias} \quad (3.12)$$

จากสมการ 3.11 และ 3.12 จะได้

$$M = 60 \text{ (เท่า)}$$

$$V_{bias} = 8.03 \text{ โวลต์}$$

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{sen}$  และ  $V_{hf}$  ตามสมการ 3.10

$$V_{hf} = 60 V_{sen} - 8.03 \quad (3.13)$$

$$V_{hf} = 60 (V_{sen} - 0.1338) \quad (3.14)$$

จากสมการที่ 3.9 เราจึงนำไปออกแบบวงจรขยายแรงดันโดยใช้ออปแอมป์ได้โดยมีการชดเชยแรงดันไฟฟ้าที่ 7 มิลลิโวลต์ตามสมการที่ 3.14 และให้มีการขยายเป็น 60 เท่าแต่ในความเป็นจริงนั้น การสร้างวงจรต้องมีความยืดหยุ่นสามารถที่จะปรับเปลี่ยนการรับค่าศูนย์ (Zero) และการขยาย (Span) เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ ซึ่งวงจร Zero-Span ที่สร้างขึ้น

โดยเซ็นเซอร์จะให้สัญญาณแรงดันไฟฟ้าออกมาที่ขา 2 และขา 4 โดยที่ขา 2 จะให้แรงดันไฟฟ้าออกมาเป็นค่าบวก และขาที่ 4 จะให้แรงดันไฟฟ้าออกมาเป็นค่าลบ และแรงดันไฟฟ้าจะออกจากวงจรเป็นแรงดันไฟฟ้า  $V_{hf}$  ที่จะป้อนกลับไปควบคุมระบบต่อไป

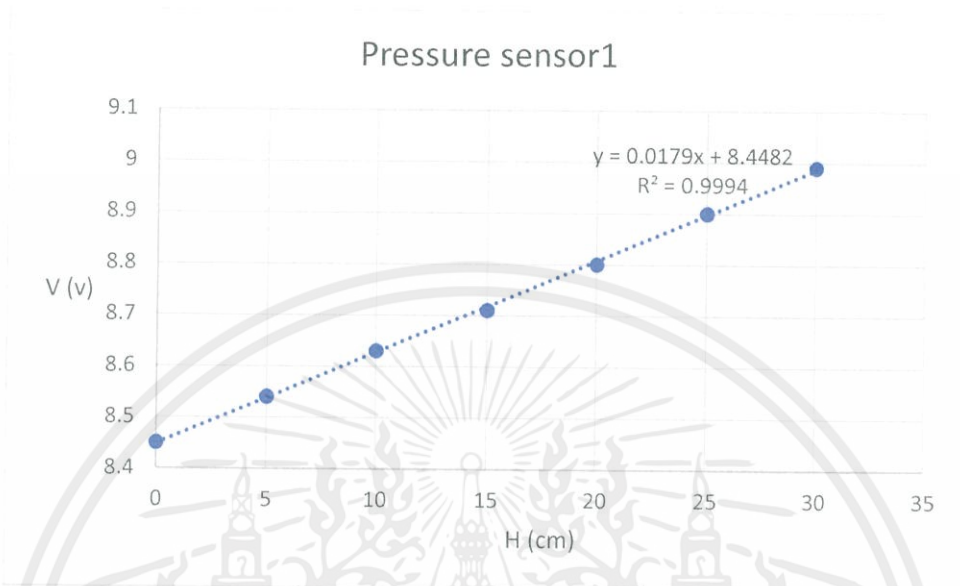
การปรับค่า Zero-Span เราจะขยายแรงดันไปที่ช่วงของแรงดันไฟฟ้าที่ 0 – 10 โวลต์ ซึ่งเหมาะที่จะเป็นสัญญาณที่ส่งเข้าคอมพิวเตอร์ที่สามารถรับแรงดันไฟฟ้าที่ 0 – 10 โวลต์

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความสูงหลังจากการปรับค่า Zero – Span แล้วทำการทดลองวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความสูงต่าง ๆ ในบอทที่ 5 สามารถนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.25 ซึ่งเราสามารถหาความสัมพันธ์ของสมการได้โดยตรงจากกราฟที่ได้จากการทดลองในสมการที่ 3.10 และนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรม LabVIEW

$$V = 0.0179(H) + 8.4482$$

H = ความสูง

V = แรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 3.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูง และแรงดันไฟฟ้าที่หลังจากการปรับ Zero – Span

#### (7) ชุดอินเตอร์เฟส (Interface)

สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล และส่งสัญญาณออกไปสู่วาล์วควบคุม จะเลือกใช้อุปกรณ์รับ และประมวลผลสัญญาณรุ่น เอ็นไอ ยูเอสบี-6001 (Bus-Powered Multifunction DAQ NI USB-6001 Device) ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 แสดงอุปกรณ์รับ และประมวลผลสัญญาณรุ่นเอ็นไอ ยูเอสบี-6001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์รับและประมวลผลรุ่น เอ็นไอ ยูเอสบี-6001 ดังแสดงในรูป 3.25 มีช่องเชื่อมต่อแบบ  
 ขั้วจำนวน 32 ช่องรองรับการส่งสัญญาณ ทั้งแบบแอนะล็อก และแบบดิจิทัล

อุปกรณ์รับ และประมวลผลสัญญาณจะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณขาเข้า ซึ่งส่งมาจาก  
 เซ็นเซอร์ ที่จะแปลงสัญญาณแรงดันของน้ำในถังเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และจะส่ง  
 สัญญาณแรงดันไฟฟ้าออกไปควบคุมวาล์วผ่านทางเซอร์โวมอเตอร์

อุปกรณ์รับและประมวลผลสัญญาณรุ่น เอ็นไอ ยูเอสบี-6001 สามารถรับสัญญาณขาเข้าได้  
 พร้อมกัน 16 ช่องทาง และสามารถส่งสัญญาณขาออกได้พร้อมกัน 2 ช่องทาง รองรับารรับสัญญาณ  
 ทั้งแบบแอนะล็อก และแบบดิจิทัล สื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทาง USB โดยมีคุณสมบัติ  
 ดังต่อไปนี้

ช่วงอุณหภูมิการใช้งาน	:	0 ถึง 45 องศาเซลเซียส
ช่วงอุณหภูมิในการเก็บรักษา	:	-40 ถึง 85 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์การใช้งาน	:	5-95 เปอร์เซ็นต์ไม่มีการกลั่นตัว
การเก็บ	:	5-90 เปอร์เซ็นต์ไม่มีการกลั่นตัว
กำลังไฟหลัก	:	5V $\pm$ 3%
		150mA
ช่องทางในการติดต่อ	:	USB
จำนวนบิต	:	14 บิต
ช่องในการรับส่งสัญญาณเข้า	:	$\pm$ 10V
ออก	:	$\pm$ 10v

### 3.2 ซอฟต์แวร์ (Software)

LabVIEW คือเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ชนิดหนึ่งเกี่ยวกับ Visual Basic  
 แต่จะเป็นการเขียนโปรแกรมโดยใช้รูปในการพัฒนา (Graphical-based Programming) ซึ่งแตกต่าง  
 จากแนวคิด Text base Programming เช่น Text-base จะทำงานจากบนลงล่าง แต่ LabVIEW จะ  
 ทำงานแบบ Dataflow

LabVIEW สามารถเขียนเป็นสมการต่างๆที่ซับซ้อนได้เหมือนกับ Text-base เช่น ภาษาซี โดย  
 ใช้ Formula Node และ LabVIEW การทำงานจะเน้นติดต่อกับทางเครื่องมือ หรือทรานสดิวเซอร์  
 (Transducer) ที่ใช้วัดสัญญาณทางกายภาพต่าง ๆ และนอกจากนั้นสามารถนำประโยชน์จาก  
 Computer technology และ Network technology มาประยุกต์ใช้งาน เช่น การเก็บข้อมูลลงใน  
 ฐานข้อมูล หรือส่งข้อมูลผ่านทาง Internet ทำให้หลายอุตสาหกรรมได้นำเอา LabVIEW มา  
 ประยุกต์ใช้งานกับงานวัดคุม และอัตโนมัติ (Automation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

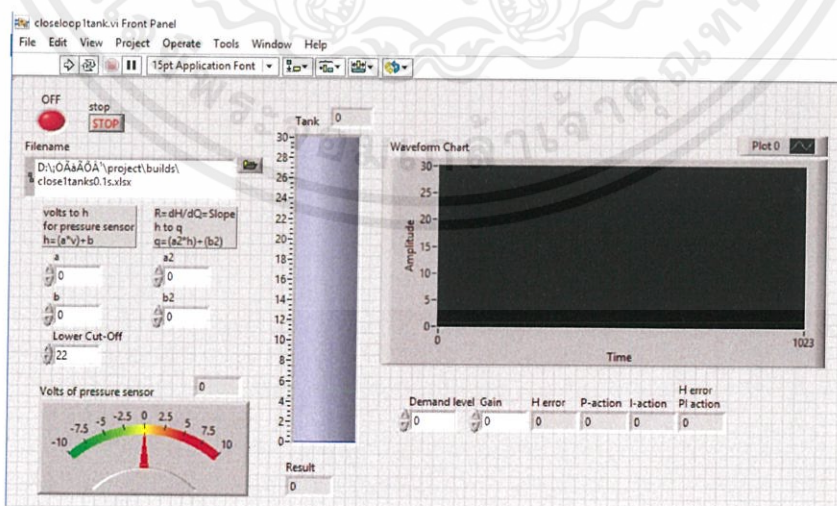
LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ LabVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument หรือเรียกย่อ ๆ ว่า VI ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดเสมือนที่ทำการสร้างขึ้นมาบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ LabVIEW จะมี Front Panel ซึ่งเปรียบเสมือนผู้ใช้ได้เห็น และควบคุมการทำงาน ผู้ใช้สามารถสร้างรูปแบบขึ้นได้เองอย่างรวดเร็ว เพราะ LabVIEW มีส่วนประกอบต่างๆที่ใช้สำหรับออกแบบหน้าจอได้มากมาย เช่น จอแสดงผลอสซิลโคป, ปุ่มหมุน และสวิตช์ เป็นต้น โดย LabVIEW จะแสดงผล และควบคุมการทำงานผ่านทางคอมพิวเตอร์ พื้นที่ส่วนที่เขียนโปรแกรมจะเรียกว่าบล็อกไดอะแกรมเปรียบเสมือนกับ Hardware ภายในเครื่องมือวัดโดย LabVIEW จะเขียนโปรแกรมโดยอาศัยรูปภาพ

LabVIEW อาศัยหลักการการทำงานของเครื่องมือวัด หรือการวัดคุม ทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบรูปแบบโปรแกรมตามที่ใช้ต้องการ หลักการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

(1) Acquisition ซึ่งเป็นส่วนที่รับข้อมูลอินพุตจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบ ในที่นี้คือคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้อาจจะมาจากการ์ดDAQ, IMAQ และ GPIB

(2) Analysis หลังจากการได้รับข้อมูลแล้ว อาจจะผ่านฟังก์ชันการทำ Analysis หรือวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปแสดงแทนสื่อที่วัดได้และใช้งานได้

(3) Presentation คือการแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งานโดยอาจแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ทั้งในรูปแบบสัญญาณที่วัดโดยไม่รู้ความสัมพันธ์กับเวลาหรือสัมพันธ์กับเวลาก็ได้ จะแสดงในรูปแบบความถี่หรือการพิมพ์ออกมาเป็นรายงานหรือการเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ ดังตัวอย่างรูปที่ 3.27

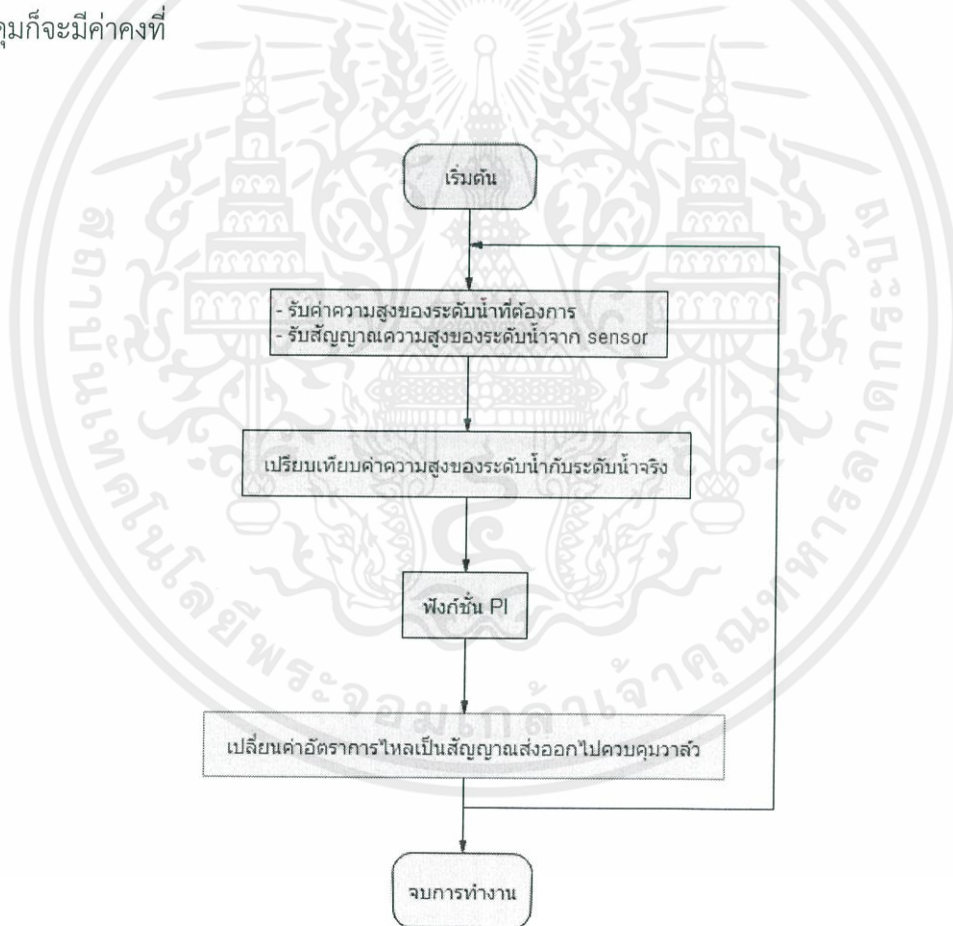


รูปที่ 3.27 แสดงตัวอย่าง Front panel ของโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 หลักการทำงานโปรแกรม

หลักการทำงานของโปรแกรมที่ได้ออกแบบขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.28 โดยเริ่มต้นโปรแกรมจะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาจากส่วนของเซ็นเซอร์วัดความดันน้ำผ่านไอคอน DAQ Assistant สัญญาณนี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นระดับความสูงของน้ำในหน่วยเซนติเมตร จากนั้นผู้ใช้จะทำการป้อนระดับความสูงของน้ำที่ต้องการเข้าไป โปรแกรมดังรูปที่ 3.29 จะเปรียบเทียบระดับของความสูงที่ต้องการกับระดับความสูงจริงค่าที่ได้ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาด ค่านี้จะถูกส่งไปเข้ากระบวนการ PI ซึ่งจะให้ค่าเป็นอัตราการไหลที่ต้องการ จากนั้นถูกแปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งถูกส่งไปควบคุมวาล์วผ่านทางเซอร์โวมอเตอร์ เซ็นเซอร์วัดความดันน้ำก็จะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากลับมาอีกเพื่อทำการคำนวณต่อ โดยโปรแกรมจะหยุดเมื่อความสูงของน้ำจริงมีค่าเท่ากับระดับความสูงของน้ำที่ต้องการ เมื่อนั้นค่าความผิดพลาดจะมีค่าเป็นศูนย์ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกไปควบคุมก็จะมีค่าคงที่



รูปที่ 3.28 แสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรม LabVIEW



## บทที่ 4

# การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางของเดินราก (Root locus technique)

### 4.1 บทนำ

ในการออกแบบตัวควบคุมพีไออนั้น ในปัจจุบันมีวิธีการหาค่าได้หลายวิธี ซึ่งจำแนกออกได้สองประเภท ประเภทที่หนึ่งคือ ประเภทไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ ส่วนประเภทที่สองจำเป็นต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ ซึ่งทราบได้จากการประมาณค่าของกระบวนการ ซึ่งในการประมาณค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของกระบวนการ ก็มีอยู่หลายวิธีในปัจจุบัน

สิ่งแรกที่ต้องการในการออกแบบระบบควบคุมในกระบวนการอุตสาหกรรม คือตัวแปรที่ต้องการควบคุมเข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ นอกจากเวลาเข้าที่ (Settling time  $T_s$ ) และค่าพุ่งเกิน (% Maximum Overshoot) ก็เป็นส่วนหนึ่งในการที่ต้องการให้ระบบมีผลตอบสนองตามวัตถุประสงค์ ซึ่งขอยินยอมในส่วนนี้ว่าข้อกำหนดของระบบ

### 4.2 การออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีทางเดินของราก

จากข้อกำหนดของผลตอบสนองในสภาวะชั่วขณะ คือค่าพุ่งเกินและเวลาเข้าที่ที่ต้องการนั้นจะใช้ในการคำนวณหาค่าของอัตราการหน่วง (Damping ratio  $\xi$ ) ความถี่ธรรมชาติที่ไม่มีการหน่วง (Undamped natural frequency  $\omega_n$ ) และหาตำแหน่งของรากที่สำคัญ (Dominant closed-loop poles  $S_d$ ) ของระบบควบคุมแบบวงจรปิด จากสมการที่ 4.1 ,4.2 และ4.3

$$P. O. = 100e^{\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}\% \quad (4.1)$$

$$T_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (4.2)$$

$$S_d = -\xi\omega_n \pm j\sqrt{1-\xi^2} \quad (4.3)$$

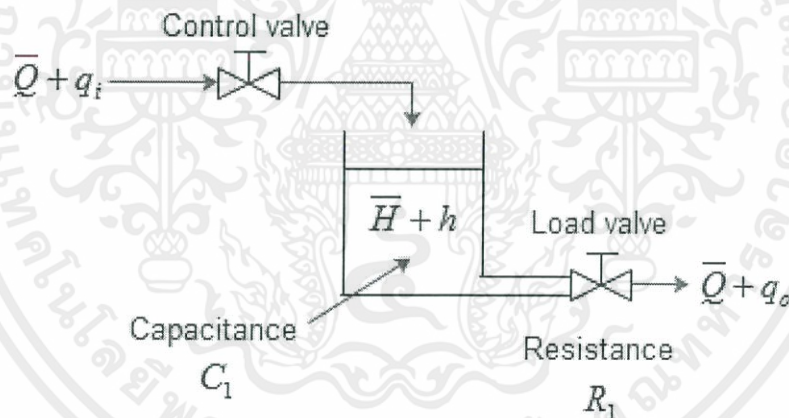
ซึ่งค่าพ่วงเกินและค่าเวลาเข้าที่นั้นจะเป็นสิ่งที่ต้องการ หรือข้อกำหนดในการออกแบบระบบซึ่งจะใช้ในการทดลองนี้ และสามารถหาค่าต่างๆได้จากวิธีทางเดินของราก (Root locus) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการสร้างกราฟ

### 4.3 การออกแบบระบบควบคุมของระบบ

#### 4.3.1 ระบบควบคุมของถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น

(1) รูปแบบและการตอบสนองเมื่อระบบเป็นแบบระบบเปิด

ระบบควบคุมความสูงระดับน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นโดยที่  $\bar{Q}$  และ  $q_i$  เป็นอัตราการไหลทางด้านขาเข้าผ่านวาล์วควบคุมที่สามารถเปลี่ยนอัตราการไหลได้ และลงไปยังถังโดยควบคุมความสูงจากอัตราการไหลเข้า และไหลควาล์วมีค่าคงที่จะได้  $\bar{Q}$  และ  $q_o$  เป็นอัตราการไหลทางฝั่งขาออกดังรูปที่ 4.1



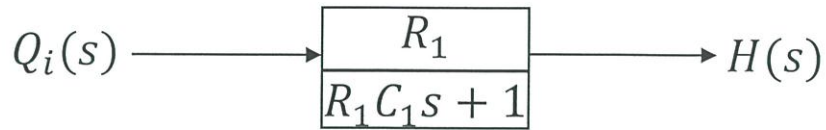
รูปที่ 4.1 ระบบควบคุมน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น

จากทฤษฎีระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นตามบทที่ 2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบคือสมการที่ 4.4

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_1}{R_1 C_1 s + 1} \quad (4.4)$$

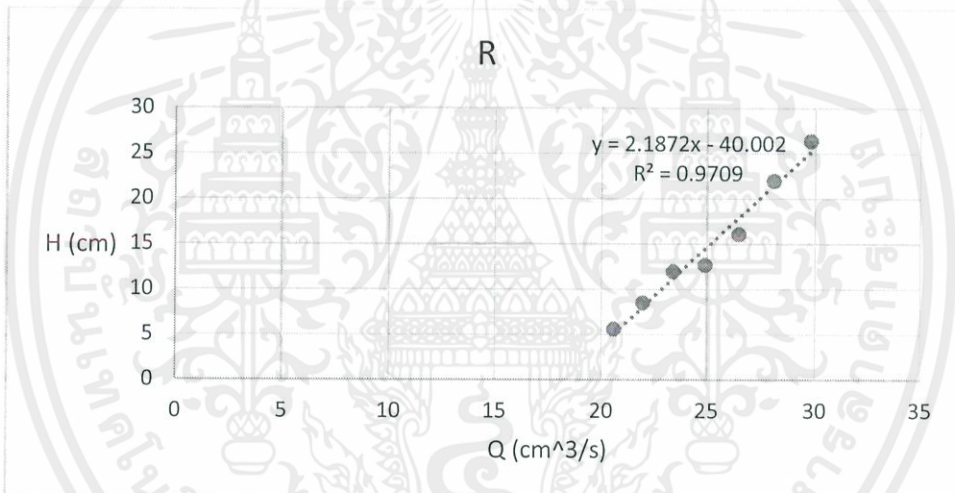
จากสมการที่ 4.4 สามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 บล็อกไดอะแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $Q_i(s)$  และ  $H(s)$

โดยที่อัตราการไหลน้ำเข้าถัง  $Q_i(s)$  คืออินพุต และความสูงของถังคือ  $H(s)$  คือเอาต์พุต แต่เนื่องจากตัวแปรที่จะทำการสั่งให้เป็น input ของระบบคือความสูง  $H_i(s)$  ผ่านความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่สภาวะคงที่  $\bar{Q}$  และความสูงของระดับน้ำที่สภาวะคงที่  $\bar{H}$  ที่ได้จากการทดลองในบทที่ 5 ดังรูปที่ 4.3

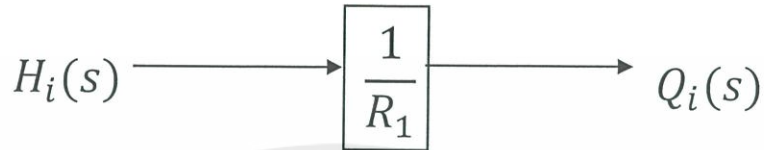


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่สภาวะคงที่  $\bar{Q}$  และความสูงที่สภาวะคงที่  $\bar{H}$

โดยความสัมพันธ์ระหว่าง  $\bar{Q}$  และ  $\bar{H}$  คือค่าความชันทานการไหลซึ่งเป็นความชันของกราฟ  $\bar{Q}$  และ  $\bar{H}$  จากรูปที่ 4.3 ความชันกราฟที่จุดใด ๆ บนเส้นกราฟก็คือค่าความชันทานการไหลของวาล์ว  $R_1$  ที่จุดทำงานนั้น ๆ

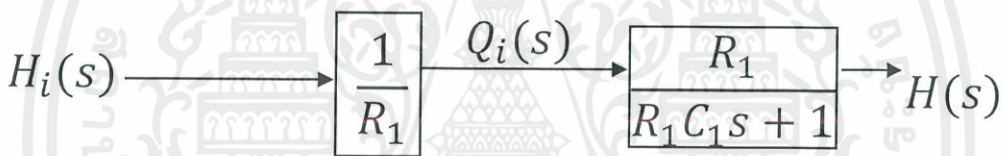
$$R_1 = \frac{dH}{dQ} = \frac{\Delta H}{\Delta Q} = \text{Slope} \quad (4.5)$$

จากความสัมพันธ์ของกราฟในรูป 4.3 เราสามารถเปลี่ยนอินพุตเป็นอัตราการไหล  $Q_i(s)$  ให้เป็นอินพุตที่เป็นความสูง  $H_i(s)$  ในระบบถังเดียวไม่มีปฏิกริยาต่อถังอื่นผ่านความสัมพันธ์ของ  $\bar{Q}$  และ  $\bar{H}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.4



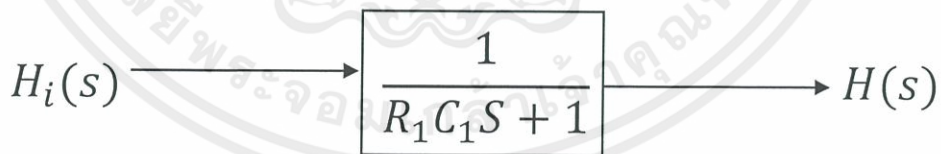
รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมระหว่าง  $H_i(s)$  และ  $Q_i(s)$

โดยที่  $H_i(s)$  คือคำสั่งอินพุตเป็นความสูงระดับน้ำ เมื่อทำการรวมบล็อกไดอะแกรมจากในรูปที่ 4.2 และ 4.4 จะได้ตามรูปที่ 4.5



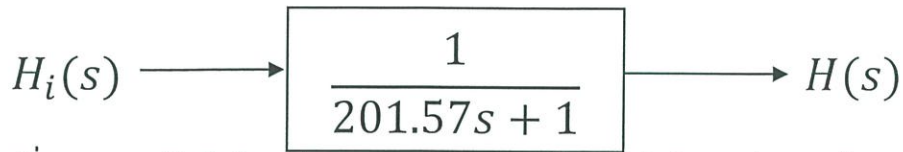
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต  $H_i(s)$  และเอาต์พุต  $H(s)$

เมื่อยุบบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.5 จะได้รูปที่ 4.6



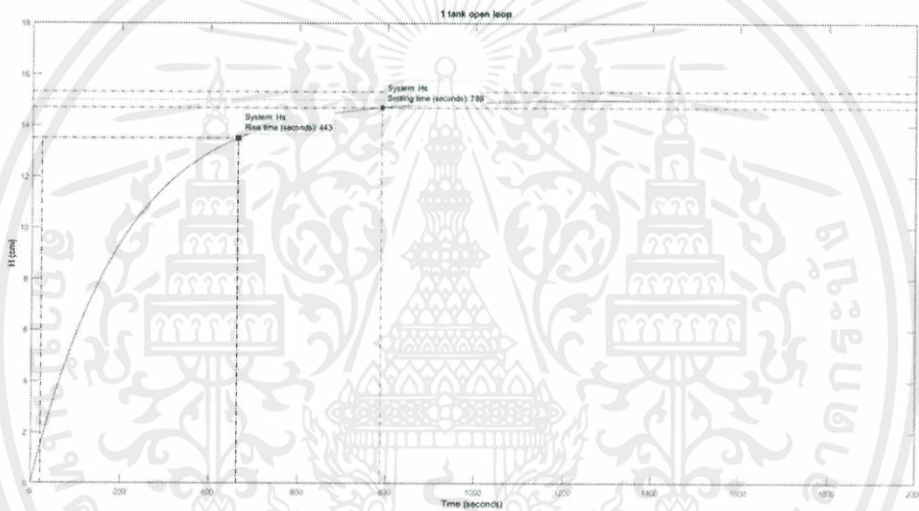
รูปที่ 4.6 การยุบบล็อกไดอะแกรมของความสัมพันธ์ระหว่าง  $H_i(s)$  และ  $H(s)$

จากการทดลองในบทที่ 5 สามารถหาค่าความต้านทาน  $R = 2.1872 \text{ s/cm}^3$  และค่าความจุ  $C = 92.16 \text{ cm}^2$  ซึ่งจะได้ค่า  $RC = 201.57$  แล้วแทนค่า  $RC$  ในบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.6 ได้บล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $H_i(s)$  และ  $H(s)$  เมื่อแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ แล้ว

ผลการตอบสนองต่อ Step input ที่มีค่าความสูง  $H=15$  เซนติเมตร ระบบดังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถึงอินแบบระบบเปิดในทางทฤษฎีโดยใช้โปรแกรม MATLAB เป็นดังรูปที่ 4.8



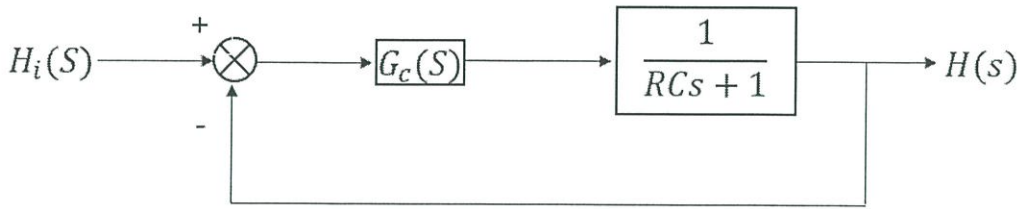
รูปที่ 4.8 แสดงกราฟการตอบสนองต่อ Step input ที่ค่าความสูง 15 เซนติเมตรของระบบดังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถึงอินแบบระบบเปิด

จากรูปที่ 4.8 จะได้ค่า Settling time ( $\pm 2\%$ ) เท่ากับ 789 วินาที และค่า Rise time (10 – 90%) เท่ากับ 443 วินาที

## (2) การออกแบบระบบควบคุม (Controller)

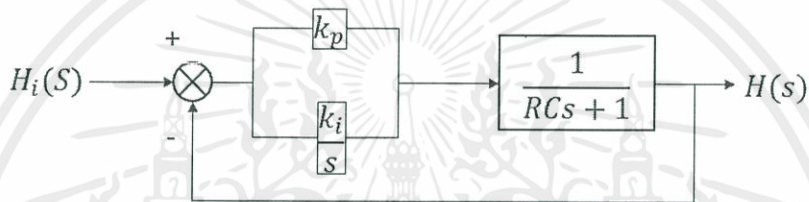
ตัวควบคุมที่ใช้กับระบบนี้จะเป็นแบบ PI ที่จะทำการรับสัญญาณเป็นค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ที่มาจากเซนเซอร์ที่แปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นความสูงกับความสูงที่ต้องการแล้วก็ทำการประมวลผลค่าความคลาดเคลื่อนเพื่อใช้ในการควบคุมระบบซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมระบบนี้แบบดังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถึงอินดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงการใช้ระบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น

ระบบควบคุมแบบ PI มีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 บล็อกไดอะแกรมควบคุมแบบ PI

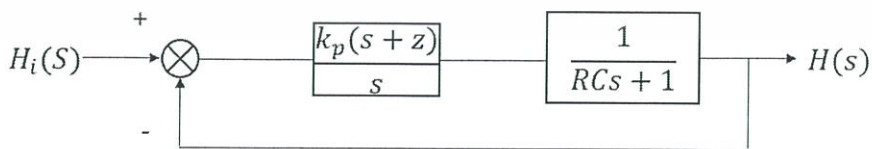
ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบ PI เป็นดังนี้

$$G_s(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \tag{4.6}$$

$$G_s(s) = k_p \left( \frac{s + k_i/k_p}{s} \right) \tag{4.7}$$

$$G_s(s) = \frac{k_p(s+z)}{s} \text{ เมื่อ } z = \frac{k_i}{k_p} \tag{4.8}$$

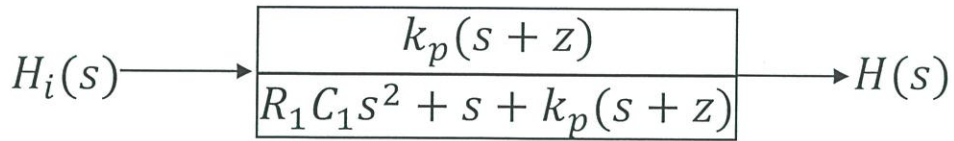
เขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบควบคุมแบบ PI

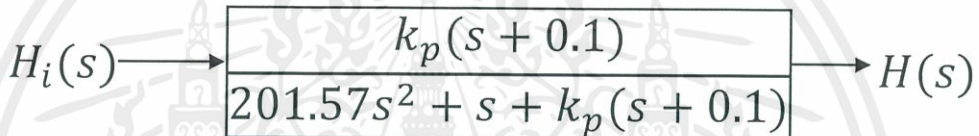
ทำการยุบบล็อกไดอะแกรมจากรูปที่ 4.11 เพื่อทำให้เป็นแบบระบบเปิดได้ดังรูปที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 บล็อกไดอะแกรมแสดงระบบควบคุมแบบ PI แบบระบบเปิด

จากฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้จากการยุบบล็อก ค่า  $Z$  เป็นอัตราส่วนของ  $\frac{k_i}{k_p}$  และเป็นตำแหน่งของ Zero ของระบบด้วย และในการออกแบบระบบนี้จะทำการออกแบบให้ค่า  $k_p$  มีค่าเป็น 10 เท่าของ  $k_i$  ซึ่งจะได้ค่า  $Z = 0.1$  และเมื่อนำค่า  $Z$  ไปแทนจะได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 บล็อกไดอะแกรมเมื่อแทนค่า R,C และ Zero

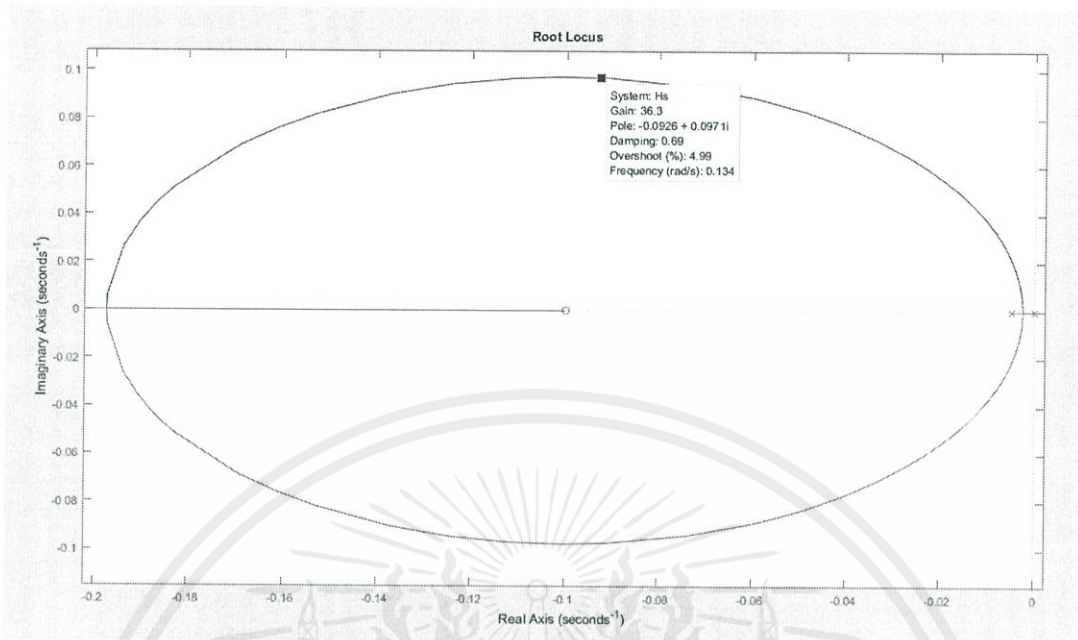
ขั้นตอนต่อไปทำการออกแบบหาค่า  $k_p$  โดยวิธีทางเดินของรากด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านสมการ Characteristic equation ซึ่งในที่นี้ก็คือ

$$201.57s^2 + s + k_p(s + 0.1) = 0 \quad (4.9)$$

เขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$1 + \frac{k_p(s+0.1)}{201.57s^2+s} = 0 \quad (4.10)$$

จากสมการสามารถนำไปหาตำแหน่ง Pole และ Zero ด้วยวิธีทางเดินของรากด้วยโปรแกรม MATLAB ได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงทางเดินของรากเมื่อระบบใช้ตัวควบคุมแบบ PI

ในการออกแบบเราสามารถหาค่าตัวแปรได้แก่ ค่า Gain (K), ค่าความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ) ค่าอัตรา  
การหน่วง ( $\xi$ ) , ค่าพุ่งเกิน (% Maximum Overshoot) และตำแหน่งโพลและซีโร จากกราฟที่ได้จาก  
โปรแกรม MATLAB ได้เลย

ข้อกำหนดในการออกแบบในที่นี้คือ

ค่าพุ่งเกิน (% Maximum Overshoot) <20%

เวลาเข้าที่ settling time  $T_s < 50$  วินาที

จากสมการ  $T_s = \frac{4}{\xi\omega_n}$  จะต้องทำการหาค่า  $\xi\omega_n$  จากกราฟแล้วนำมาหาค่า  $T_s$  ซึ่งสามารถหา  
ได้จากกราฟดังรูปที่ 4.15

จากการเลือกตำแหน่งกราฟค่าตัวแปรที่ได้คือ

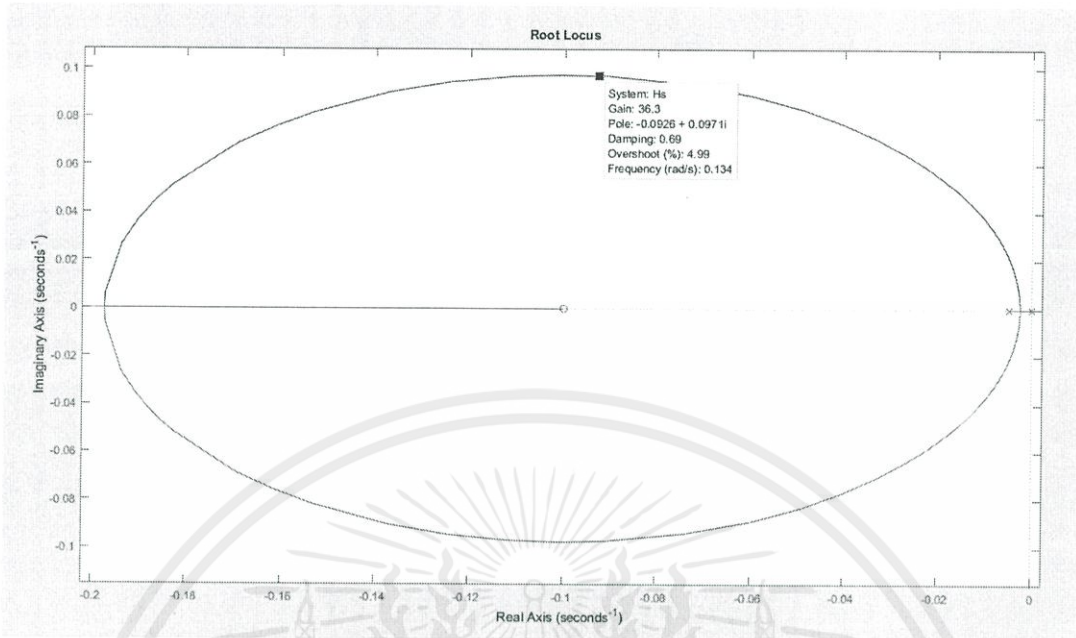
ตำแหน่งโพล คือ  $s_d = -0.0926 \pm 0.0971i$

ค่าพุ่งเกิน (% Maximum Overshoot) =4.99%

ค่า Gain ( $k_p$ )=36.3

ค่า  $\xi = 0.69$  ,  $\omega_n = 0.134$  ( $\frac{\text{rad}}{\text{sec}}$ )

จะได้เวลาเข้าที่ ( $T_s$ ) = 43.26 วินาที ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขข้อกำหนด

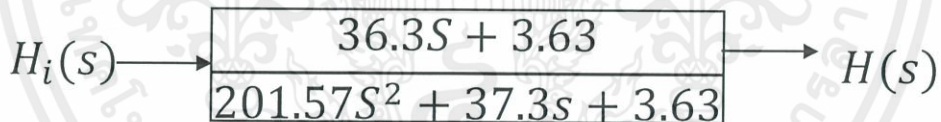


รูปที่ 4.15 การเลือกหาค่าตำแหน่งโพล และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องจากวิธีทางเดินของราก

(3) การตอบสนองทางทฤษฎี

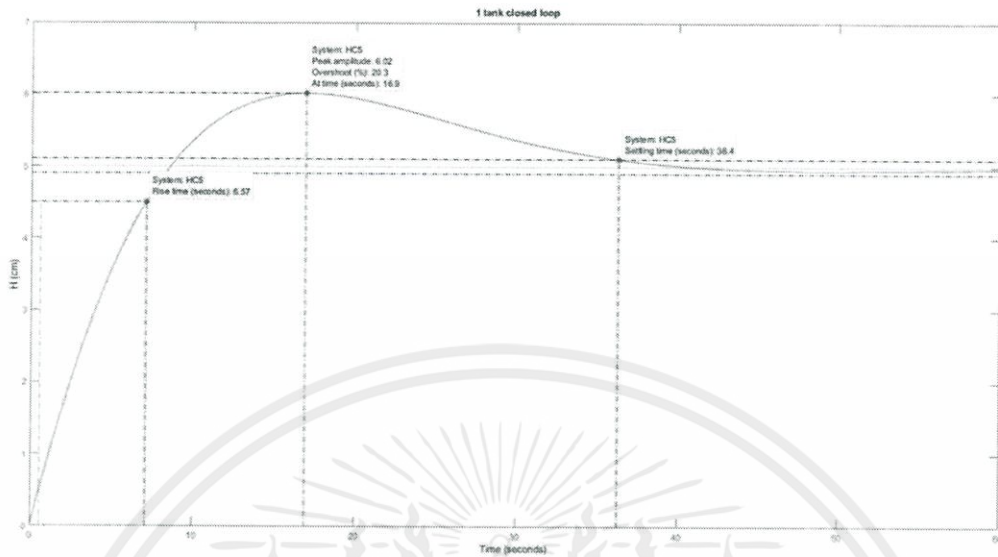
เมื่อทำการหาค่า  $k_p$  ได้เท่ากับ 36.3 ก็จะทำให้การแทนลงในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.13 จะได้เป็น

รูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $H_i(s)$  และ  $H(s)$  เมื่อแทนค่า  $k_p$  แล้ว

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.16 สามารถหาค่าการตอบสนองของอินพุตทางทฤษฎีเป็นความสูงของระดับน้ำ  $H(s)$  ต่อดินพุตที่เป็นความสูงที่ต้องการ  $H_i(s)$  ที่เป็น step input ที่ความสูง 5 เซนติเมตร เมื่อมีการใช้ระบบควบคุมแบบ PI โดยโปรแกรม MATLAB



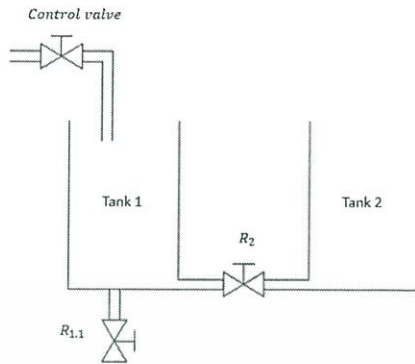
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟการตอบสนองต่อ Step input ที่ค่าความสูง 5 เซนติเมตรของระบบถังเดี่ยวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI

จากรูปที่ 4.17 จะได้ค่า Settling time ( $\pm 2\%$ ) เท่ากับ 36.4 วินาที ค่า Rise time (10-90%) เท่ากับ 6.57 วินาที และค่า (% Maximum Overshoot) เท่ากับ 20.3 % ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด

#### 4.3.2 ระบบควบคุมของถังเดี่ยวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น

(1) รูปแบบและการตอบสนองเมื่อระบบเป็นแบบระบบเปิด

ระบบควบคุมความสูงระดับน้ำที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบถังเดี่ยวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่นโดยที่  $\bar{Q}$  และ  $q_i$  เป็นอัตราการไหลทางด้านขาเข้าผ่านวาล์วควบคุมที่สามารถเปลี่ยนอัตราการไหลได้ และลงไปยังถังโดยควบคุมความสูงจากอัตราการไหลเข้า และไหลตวาล์วมีค่าคงที่ 2 ตัวคือ  $R_{1.1}$  และ  $R_2$  จะได้  $\bar{Q}$  และ  $q_o$  เป็นอัตราการไหลทางฝั่งขาออก ดังรูปที่ 4.18

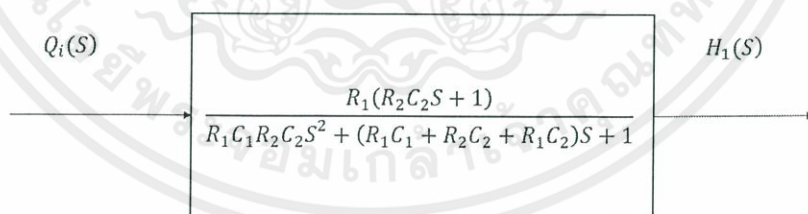


รูปที่ 4.18 ระบบถังเดียวที่มีปฏิกริยาต่อถังอื่น

จากทฤษฎีระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวที่มีปฏิกริยาต่อถังอื่นตามบทที่ 2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบตามสมการที่ 4.11

$$\frac{H_1(S)}{Q_i(S)} = \frac{R_1(R_2C_2S + 1)}{R_1C_1R_2C_2S^2 + (R_1C_1 + R_2C_2 + R_1C_2)S + 1} \quad (4.11)$$

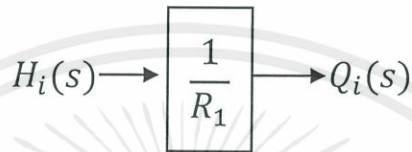
โดยอินพุตเป็นอัตราการไหลของน้ำเข้าถัง  $Q_i(s)$  และอินพุตเป็นความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1  $H_1(s)$  ซึ่งเมื่อนำมาเขียนบล็อกไดอะแกรมจะได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 แสดงบล็อกไดอะแกรมระหว่าง  $Q_i(s)$  และ  $H_1(s)$

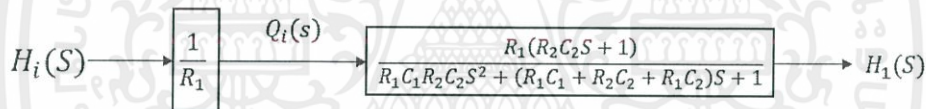
เช่นเดียวกับกับระบบควบคุมของถังเดียวไม่มีปฏิกริยาต่อถังอื่น คือจะเปลี่ยนอินพุตที่เป็นอัตราการไหลเข้า  $Q_i(s)$  มาเป็นอินพุตของความสูง  $H_1(s)$  นั้นจะต้องใช้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลในสถานะคงที่  $\bar{Q}$  และความสูงคงที่  $\bar{H}$

เนื่องจากว่าระบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น นั้นมีทางน้ำออกทางเดียวกับระบบแรก คือไหลดวาล์ว  $R_1$  และที่สภาวะคงที่นั้นความสูงของถังที่ 1 และถังที่ 2 มีความสูงเท่ากันซึ่งไม่มีการไหลผ่านไหลดวาล์ว  $R_2$  ซึ่งจะไม่มีค่าความต้านทานการไหลในขณะที่อยู่ในสภาวะคงที่ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและอัตราการไหลนั้นยังเหมือนเดิมกับที่ใช้ในระบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.20



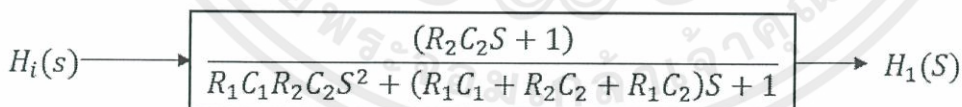
รูปที่ 4.20 บล็อกไดอะแกรมระหว่าง  $H_i(s)$  และ  $Q_i(s)$

ดังนั้นเราสามารถเปลี่ยนอินพุตที่เป็นอัตราการไหลให้เป็นความสูงได้ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 บล็อกไดอะแกรมระหว่าง  $H_i(s)$  และ  $H_1(s)$

เมื่อยุบบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.21 จะได้ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 การยุบบล็อกไดอะแกรมระหว่าง  $H_i(s)$  และ  $H_1(s)$

เมื่อ  $H_i(s)$  คือความสูง (อินพุต),  $H_1(s)$  คือความสูงระดับน้ำของถังที่ 1 (เอาต์พุต) โดยที่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} C_1 &= C_2 = 92.16 \text{ cm}^2 \\ R_1 &= R_2 = 2.1872 \text{ cm}^2 \\ R_1C_1 &= 201.57 \text{ s} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_1 C_1 R_2 C_2 = 40630 \text{ s}^2$$

$$R_1 C_1 + R_2 C_2 + R_3 C_3 = 604.71 \text{ s}$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 4.22 จะได้

$$H_i(s) \rightarrow \frac{201.57s + 1}{40630s^2 + 604.71s + 1} \rightarrow H_1(s)$$

รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $H_i(s)$  และ  $H_1(s)$  เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆแล้ว

ผลการตอบสนองต่อ step input ที่ค่าความสูง  $H = 15$  เซนติเมตรของระบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถึงอื่นแบบระบบเปิดในทางทฤษฎีตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.23 โดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 4.24

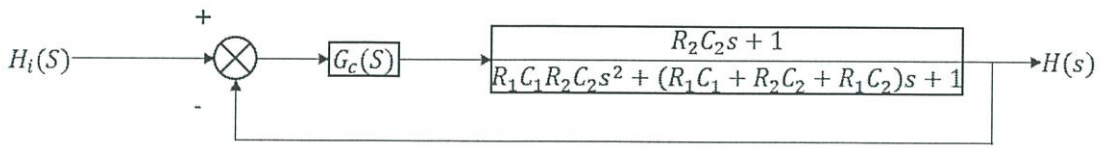


รูปที่ 4.24 แสดงกราฟการตอบสนองต่อ step input ที่ค่าความสูง 15 เซนติเมตรของระบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถึงอื่นแบบระบบเปิด

จากรูปที่ 4.24 จะได้ค่า Settling time ( $\pm 2\%$ ) เท่ากับ 1890 วินาที และค่า Rise time (10 – 90%) เท่ากับ 1020 วินาที

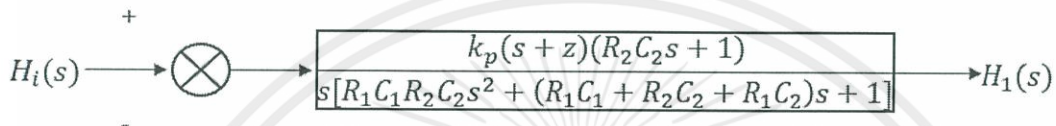
(2) การออกแบบระบบควบคุม สำหรับระบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถึงอื่น ตัวควบคุมที่ใช้กับระบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถึงอื่นจะเป็นแบบ PI ซึ่งสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 4.25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



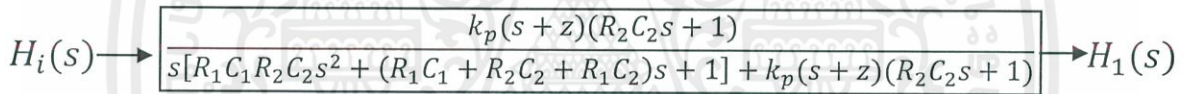
รูปที่ 4.25 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น

ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบ PI เป็นดังในรูปที่ 4.26



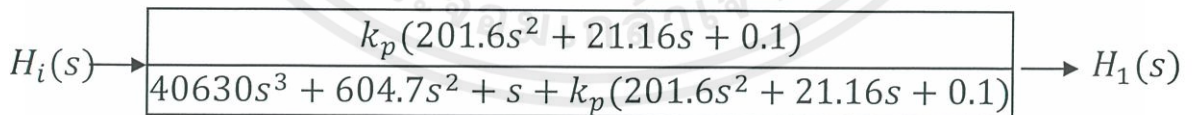
รูปที่ 4.26 แสดงบล็อกไดอะแกรมหลังการใส่ระบบควบคุมแบบ PI

ทำการยุบบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.26 เพื่อให้เป็นระบบเปิดได้ดังในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบควบคุม PI เป็นแบบระบบเปิด

จากฟังก์ชันถ่ายโอนในรูปที่ 4.27 ที่ได้จากการยุบบล็อก ค่า Z เท่ากับ 0.1 เมื่อนำค่า Z และค่าอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องไปแทนจะได้ดังในรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 บล็อกไดอะแกรมเมื่อแทนค่า R, C และ Zero

ต่อไปก็ทำการออกแบบหาค่า  $k_p$  โดยวิธีทางเดินของรากด้วยโปรแกรม MATLAB ผ่านสมการ Characteristic Equation ซึ่งในที่นี้ก็คือ

$$40630s^3 + 604.75s^2 + s + k_p(201.6s^2 + 21.165s + 0.1) = 0$$

เขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$1 + k_p \frac{(201.6s^2 + 21.16s + 0.1)}{40630s^3 + 604.7s^2 + s} = 0$$

จากสมการสามารถนำไปหาดำแหน่งโพลและซีโรด้วยวิธีทางเดินของรากโดยโปรแกรม MATLAB ในการออกแบบเราสามารถหาค่าพารามิเตอร์อื่นได้แก่ ค่า Gain (K), ค่าความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ), ค่าอัตราการหน่วง ( $\xi$ ), ค่าฟุงเกิน (% Maximum Overshoot) และค่าตำแหน่งโพลและซีโร จากกราฟที่ได้จากโปรแกรม MATLAB ได้เลย

ข้อกำหนดในการออกแบบในนี้คือ

ค่าฟุงเกิน (% Maximum Overshoot) < 20%

เวลาเข้าที่ settling time  $T_s < 50$  วินาที

จากสมการ  $T_s = \frac{4}{\xi\omega_n}$  จะต้องทำการหาค่า  $\xi\omega_n$  จากกราฟแล้วนำมาหาค่า  $T_s$  ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟดังรูป 4.29

จากการเลือกตำแหน่งในกราฟ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้คือ

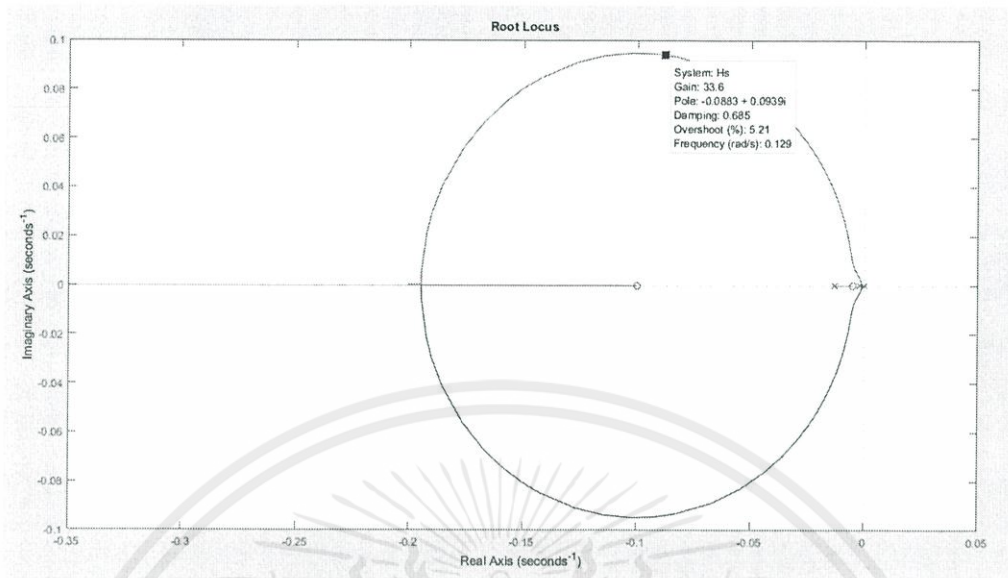
ตำแหน่งโพลคือ  $S_d = -0.0883 \pm 0.0939i$

ค่าฟุงเกิน (% Maximum Overshoot) = 5.21%

ค่า Gain ( $k_p$ ) = 33.6

ค่า  $\xi = 0.685$ ,  $\omega_n = 0.129$  (rad/sec)

จะได้เวลาเข้าที่  $T_s = 45.26$  วินาที ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขตามข้อกำหนด



รูปที่ 4.29 การเลือกหาค่าตำแหน่งโพลและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องจากวิธีทางเดินของราก

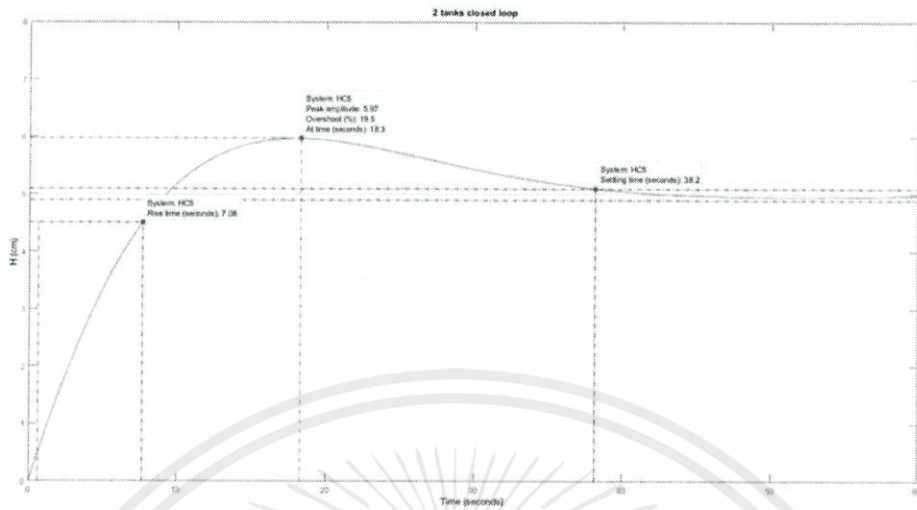
### (3) การตอบสนองของระบบทางทฤษฎี

เมื่อทำการหาค่า  $k_p$  ได้เท่ากับ 33.6 ก็จะทำให้การแทนค่าลงในบล็อกไดอะแกรมที่แสดงฟังก์ชันถ่ายโอนดังรูปที่ 4.30

$$H_i(s) \longrightarrow \frac{6772.752s^2 + 710.88s + 3.36}{40630s^3 + 7377.462s^2 + 711.8752s + 3.36} \longrightarrow H_1(s)$$

รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $H_1(s)$  และ  $H_i(s)$  เมื่อแทนค่า  $k_p$  แล้ว

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.30 สามารถหาการตอบสนองของเอาต์พุตทางทฤษฎีที่เป็นความสูงของระดับน้ำในถังที่ 1  $H_1(s)$  ต่ออินพุตที่เป็นความสูงที่ต้องการ  $H_1(s)$  ที่เป็น Step input ที่ความสูง 5 เซนติเมตร เมื่อใช้ระบบควบคุมแบบ PI โดยใช้โปรแกรม MATLAB ได้ดังรูป 4.31



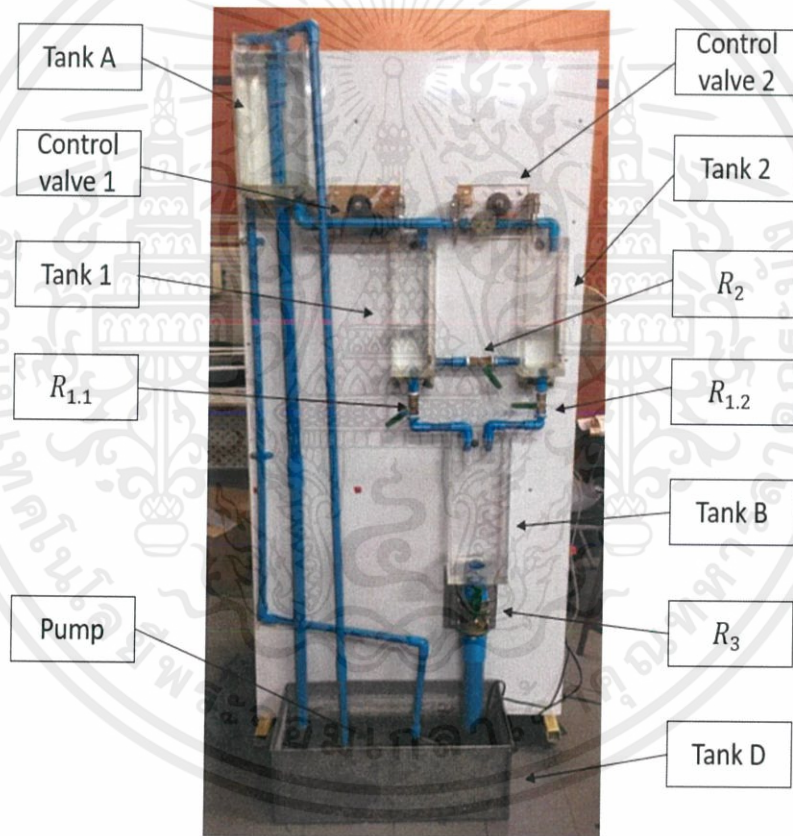
รูปที่ 4.31 แสดงกราฟการตอบสนองต่อ Step input ที่ค่าความสูง 5 เซนติเมตรของระบบถังเดียวมี ปฏิกริยาต่อถังอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI

จากรูปที่ 4.31 จะได้ค่า Settling time คิดที่  $\pm 2\%$  มีค่าเท่ากับ 38.2 วินาที ค่า Rise time คิดที่ 10-90% มีค่าเท่ากับ 2.08 วินาที และค่า (% Maximum Overshoot) มีค่าเท่ากับ 19.5 % ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 เกี่ยวกับทฤษฎีและหลักการ และบทที่ 4 ที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์ และการออกแบบระบบด้วยวิธีทางเดินของรากซึ่งในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีต่างๆที่ศึกษาได้จากการทดลองในบทที่ 2 และบทที่ 4 มาทำการทดลองกับชุดกระบวนกรดังรูปที่ 5.1 และการแสดงผลการทดลองที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี ดังนั้นผลการทดลองที่จึงได้เป็นดังนี้

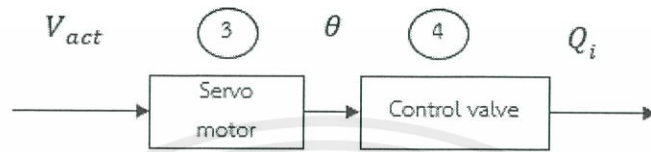


รูปที่ 5.1 แสดงชุดการทดลองระบบควบคุมระดับน้ำ

#### 5.1 ผลการทดลองชุดวาล์วควบคุม (control Valve)

การทดลองของวาล์วควบคุมนั้นเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ถึง  $Q_i$  และ แรงดันไฟฟ้า  $V_{sp}$  ที่ถูกป้อนให้กับเซอร์โวมอเตอร์ ดังในรูปที่ 5.2 เพื่อที่จะนำไปเป็นค่าความสัมพันธ์ใน

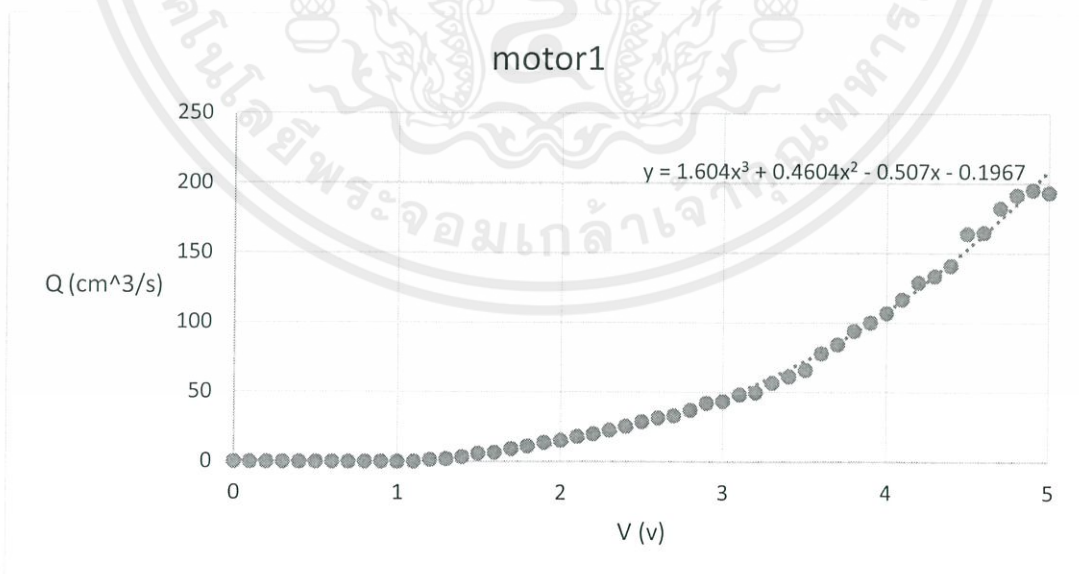
การเขียนโปรแกรมควบคุม LabVIEW ในส่วนของการแปลงค่าระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับอัตราการไหลตั้ง  
หัวข้อที่ 3.1.2 การออกแบบในส่วนของระบบควบคุมระบบ ส่วนการทำงานของคอมพิวเตอร์ในบทที่ 2 ที่ได้  
กล่าวไว้แล้ว



รูปที่ 5.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของชุดควบคุมวาล์ว

การทดลองในส่วนของวาล์วควบคุมนั้นจะส่งแรงดันไฟฟ้า  $V_{sp}$  ผ่านเข้าตัว Arduino จากนั้นส่ง  
 $V_{PWM}$  ไปยังตัวเซอร์โวมอเตอร์ แล้วเซอร์โวมอเตอร์ก็จะทำการหมุนวาล์วไปตามองศาต่างๆที่ทำให้น้ำไหล  
จากนั้นจะได้ข้อมูลผลการทดลองระหว่างแรงดันไฟฟ้า และอัตราการไหล แล้วนำมาเขียนกราฟ  
ความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.3

เมื่อได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และอัตราการไหลดังกล่าวแล้ว ผลการทดลองนี้จะนำมา  
เป็นข้อมูลเพื่อควบคุมอัตราการไหลกับแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ



รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และอัตราการไหล

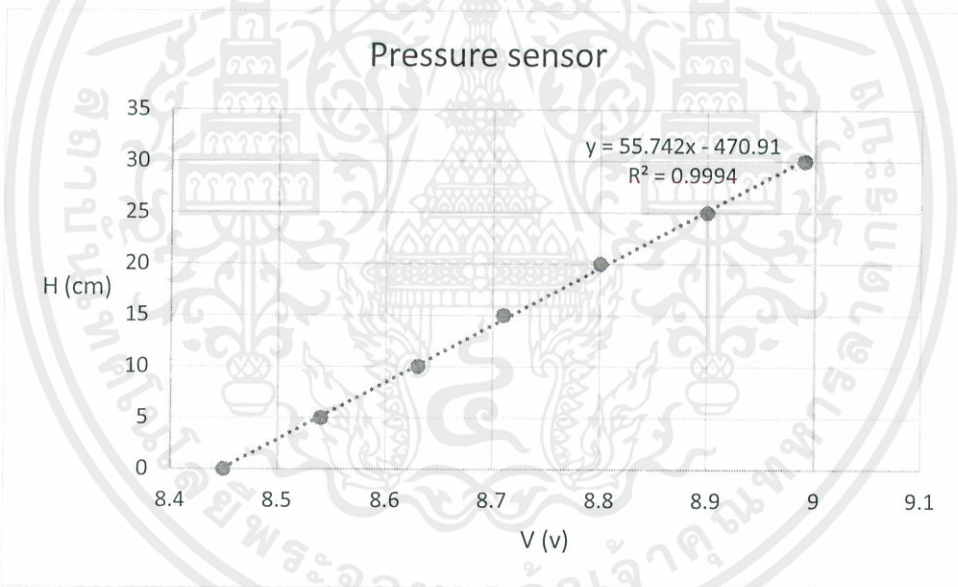
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การทดลองอุปกรณ์วัดระดับน้ำ

การทดลองวัดระดับน้ำนั้นเพื่อที่จะดูความสัมพันธ์ของความสูง และแรงดันไฟฟ้าส่งออกมาจากตัวเซ็นเซอร์ที่ 1 ซึ่งได้ทำการปรับค่าที่ตำแหน่งความสูง 0 เซนติเมตรให้มีแรงดันไฟฟ้า 8.45 โวลต์ และที่ตำแหน่ง 30 เซนติเมตรให้มีแรงดันไฟฟ้า 8.99 โวลต์ จากนั้นก็จะทำการปรับตำแหน่งความสูงของระดับน้ำโดยเริ่มที่ 0 เซนติเมตรแล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งนั้น จากนั้นทำการปรับเพิ่มทีละ 5 เซนติเมตรจนครบ 30 เซนติเมตร ซึ่งจะได้ผลการทดลองแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.4 ซึ่งมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น โดยมีความสัมพันธ์คือ

$$\text{ความสูง (H)} = 55.742 \times \text{แรงดันไฟฟ้า (V)} - 470.91$$

โดยความสัมพันธ์นี้จะใช้ในการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่คอมพิวเตอร์รับมาจากเซ็นเซอร์เป็นความสูงเพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุม LabVIEW



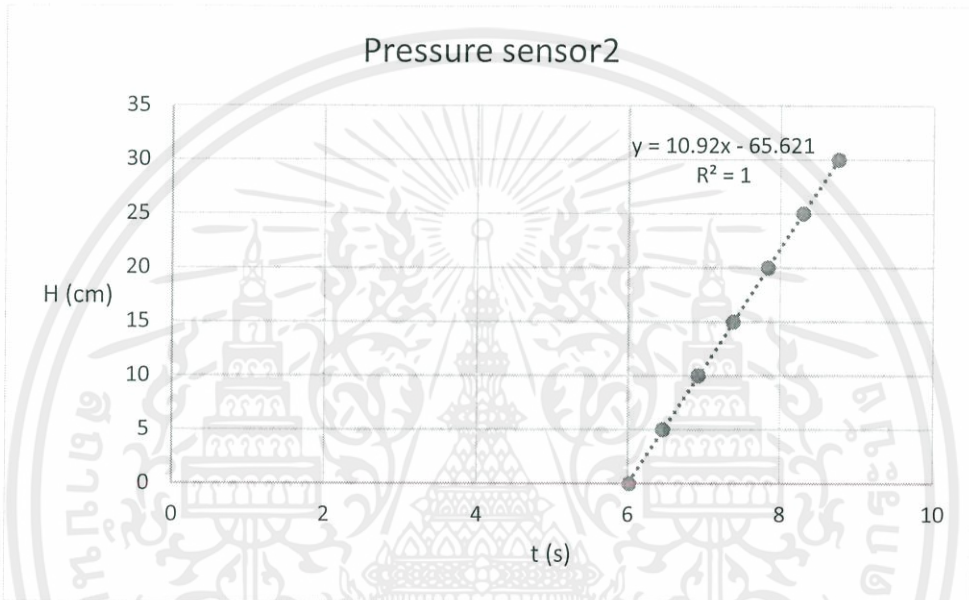
รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความสูงของน้ำของอุปกรณ์วัดความดันตัวที่ 1

การทดลองวัดระดับน้ำนั้นเพื่อที่จะดูความสัมพันธ์ของความสูง และแรงดันไฟฟ้าส่งออกมาจากตัวเซ็นเซอร์ที่ 2 ซึ่งได้ทำการปรับค่าที่ตำแหน่งความสูง 0 เซนติเมตรให้มีแรงดันไฟฟ้า 6.02 โวลต์ และที่ตำแหน่ง 30 เซนติเมตรให้มีแรงดันไฟฟ้า 8.76 โวลต์ จากนั้นก็จะทำการปรับตำแหน่งความสูงของระดับน้ำโดยเริ่มที่ 0 เซนติเมตรแล้ววัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตำแหน่งนั้น จากนั้นทำการปรับเพิ่มทีละ 5 เซนติเมตร

จนครบ 30 เซนติเมตร ซึ่งจะได้ผลการทดลองแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น โดยมีความสัมพันธ์คือ

$$\text{ความสูง (H)} = 10.92 \times \text{แรงดันไฟฟ้า (V)} - 65.621$$

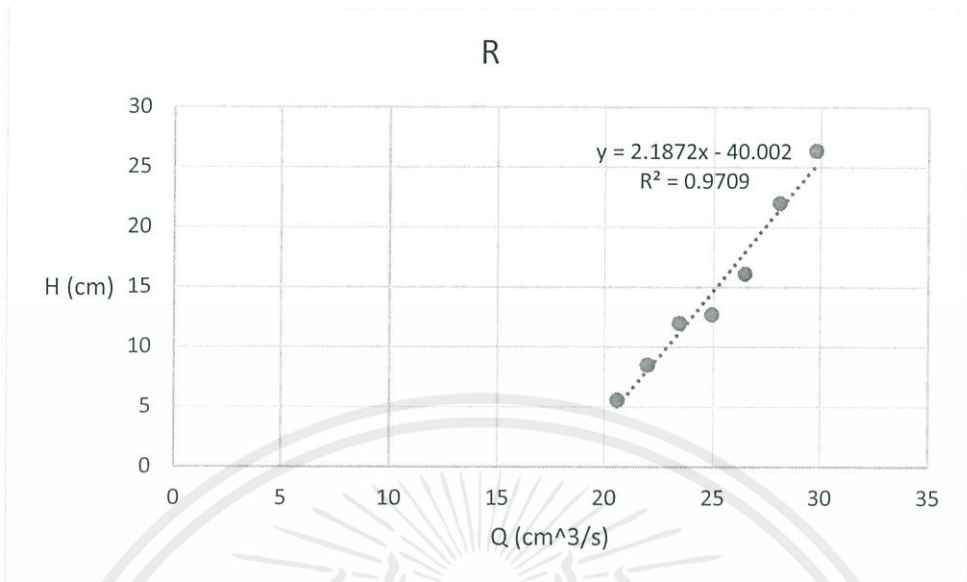
โดยความสัมพันธ์นี้จะใช้ในการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่คอมพิวเตอร์รับมาจากเซ็นเซอร์เป็นความสูงเพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุม LabVIEW



รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า และความสูงของน้ำของอุปกรณ์วัดความดันตัวที่ 2

### 5.3 ผลการทดลองไหลดวาล์ว

ไหลดวาล์วในที่นี้ก็คือวาล์วในส่วนที่อยู่ทางด้านน้ำไหลออกจากถังน้ำตามรูปที่ 5.1 ได้แก่  $R_{1.1}$ ,  $R_{1.2}$  และ  $R_2$  แต่ในการทดลองจะใช้แค่  $R_{1.1}$  และ  $R_2$  ซึ่งไหลดวาล์วจะทำหน้าที่ต้านทานการไหลของน้ำ หรือมีคุณสมบัติต้านทานการไหลโดยการทดลองนั้นจะทำการหาค่าความต้านทานการไหลของ  $R_{1.1}$  โดยการปรับวาล์วไปที่ตำแหน่ง 45 องศา แล้วทำการทดลองโดยการส่งอัตราการไหลค่าต่างๆจากแรงดันไฟฟ้า แล้วหาระดับน้ำที่อยู่ในสภาวะคงที่โดยที่ผลการทดลองนั้นสามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล และระดับความสูงของน้ำที่สภาวะคงที่

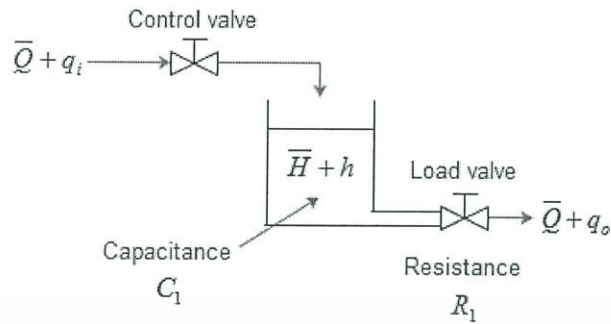
จากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและความสูงดังสมการ

$$R = \frac{dH}{dQ}$$

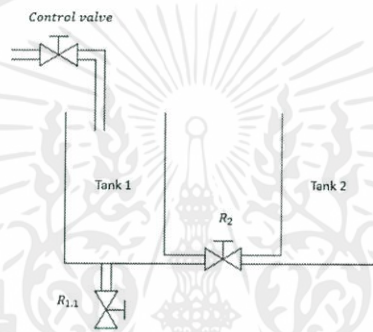
จากรูปที่ 5.6 ค่าความชันของกราฟคือค่าความต้านทานการไหล  $R_{1,1}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.1872 s/cm<sup>3</sup> และค่าความต้านทานการไหลนี้จะนำไปใช้ในฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบน้ำ ส่วนค่าความต้านทานของวาล์ว  $R_2$  นั้นจะประมาณให้มีค่าเท่ากับ  $R_{1,1}$  เนื่องจากว่าหากต้องการทดสอบหาค่า  $R_2$  โดยตรงนั้นจะต้องปิดวาล์ว  $R_{1,1}$  ทำให้เมื่อปรับวาล์วมายังตำแหน่งเดิมอาจคลาดเคลื่อนได้เพื่อให้ง่ายแก่การทดลอง จะทำการปรับตำแหน่งวาล์ว  $R_2$  ไปที่เท่ากันกับ  $R_{1,1}$

#### 5.4 ผลการทดลองการควบคุมระดับน้ำ

ไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมระดับน้ำนั้นเป็นดังบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.2 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 แล้วนั้น ในการทดลองจะทดลองควบคุมระดับน้ำด้วยกันอยู่ 2 แบบ กล่าวคือ การควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิริยาต่อถังอื่นดังรูปที่ 5.7 และการควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวมีปฏิริยาต่อถังอื่นดังรูปที่ 5.8

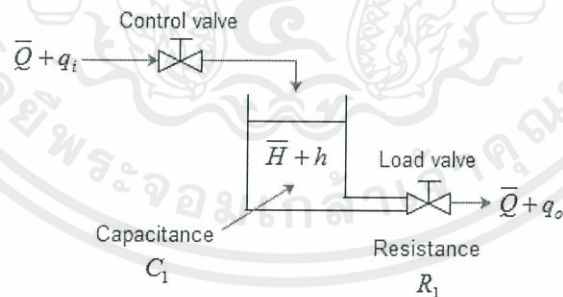


รูปที่ 5.7 แสดงลักษณะระบบการควบคุมแบบถังเดียวไม่มีปฏิกริยาต่อถังอื่น



รูปที่ 5.8 แสดงลักษณะระบบการควบคุมแบบถังเดียวมีปฏิกริยาต่อถังอื่น

#### 5.4.1 ผลการทดลองการควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกริยาต่อถังอื่น



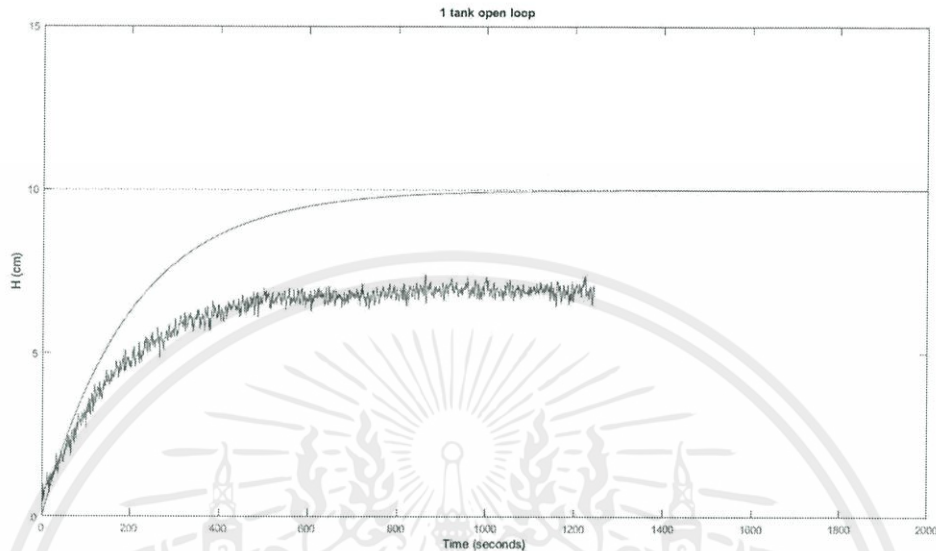
รูปที่ 5.9 แสดงลักษณะระบบการควบคุมแบบถังเดียวไม่มีปฏิกริยาต่อถังอื่น

##### (1) การทดลองระบบเปิด (Open loop)

การทดลองแบบระบบเปิดเป็นการทดลองที่ไม่มีการควบคุมแบบป้อนกลับ เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางทฤษฎีในบทที่ 4 โดยกำหนดความสูงที่ต้องการ 10 เซนติเมตรมีลักษณะดังรูปที่ 5.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้  $R = 2.1872 \text{ s/cm}^3$   
 $C = 92.16 \text{ cm}^2$



รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง และผลที่ได้จากทางทฤษฎีต่อการตอบสนองของถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบระบบเปิดที่ความสูง 10 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.10 กำหนดความสูงของน้ำจากทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 10 เซนติเมตร มีค่า Rise time เท่ากับ 443 วินาที แต่จากในทางการทดลองมีค่าความสูงจริง 7 เซนติเมตร มีค่า Rise time เท่ากับ 395 วินาที ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความสูงเท่ากับ 30% และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ Rise time เท่ากับ 10.8%

ซึ่งจากการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าสถานะคงตัวของความสูงที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากทางทฤษฎี อาจเนื่องมาจากตัวแปรที่มีค่าไม่แม่นยำได้แก่

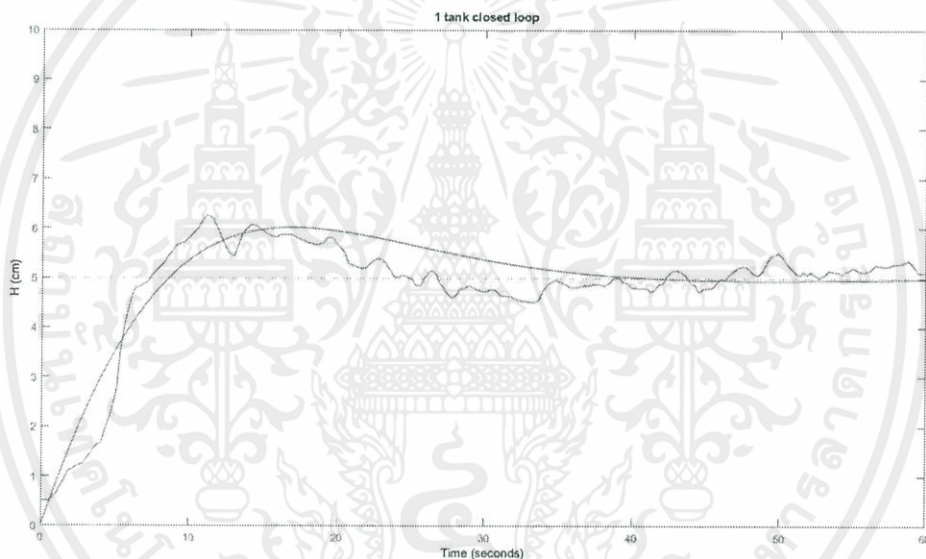
(1) ค่าความต้านทานของไหลดวาล์ว  $R_{1,1}$  ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 5.3 มีค่าเท่ากับ  $2.1872 \text{ s/cm}^3$  ซึ่งได้จากการประมาณความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเส้นตรงซึ่งอาจไม่ใช่ค่าที่แท้จริงเมื่อนำค่า  $R_{1,1}$  ไปแทนค่าในบล็อกไดอะแกรมต่างๆจะทำให้ค่าความสัมพันธ์คลาดเคลื่อนได้

(2) ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า  $V_{sp}$  ที่ป้อนให้กับชุดควบคุมวาล์วกับอัตราการไหล  $Q_i$  ของน้ำไหลเข้าถังจากการทดลองที่ 5.1 อาจมีความคลาดเคลื่อนเพราะความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมาจากการประมาณค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลข (Least square regression)

## (2) การทดลองแบบป้อนกลับ (Feedback control)

เป็นการทดลองที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PI มาใช้ในการควบคุม เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางทฤษฎีในบทที่ 4 โดยกำหนดความสูงที่ต้องการ 5 เซนติเมตรมีลักษณะดังรูปที่ 5.11

โดยกำหนดให้	$R = 2.1872 \text{ s/cm}^3$	$k_p = 36.3$
	$C = 92.16 \text{ cm}^2$	$\frac{k_i}{k_p} = 0.1$
	$\%O.S. < 20\% = 20.3\%$	$T_s < 50 \text{ วินาที} = 43.26 \text{ วินาที}$



รูปที่ 5.11 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง และผลที่ได้จากการตอบสนองของระบบถึงเดียว ไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI ที่ความสูง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.11 กำหนดค่า % Maximum Overshoot จากทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 20.3% มีค่า Rise time เท่ากับ 6.57 วินาที และมีค่า Settling time เท่ากับ 36.4 วินาที แต่จากในทางการทดลองมีค่า % Maximum Overshoot เท่ากับ 25.2 % มีค่า Rise time เท่ากับ 5.43 วินาที และค่า Settling time เท่ากับ 34 วินาที

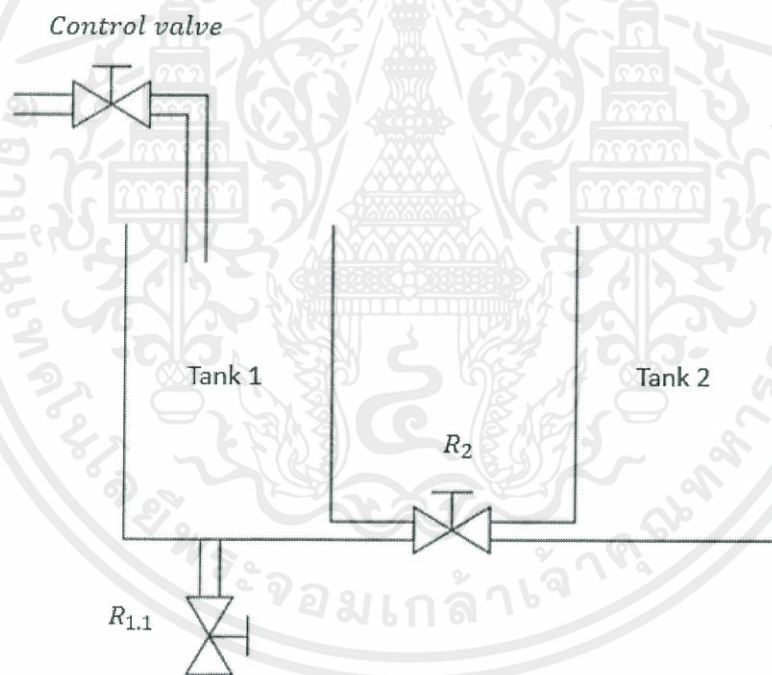
จากกราฟในรูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นว่าผลที่ได้จากการทดลองใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองทางทฤษฎี และแสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมแบบ PI นั้นมีประสิทธิภาพต่อการควบคุมระดับน้ำให้อยู่ใน

ระดับที่ต้องการเป็นอย่างดี และใช้เวลาในการเข้าสู่เป้าหมายน้อยลง ส่วนสาเหตุที่เกิดความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเกิดจาก

(1) ค่าความต้านทานของไหลตัวลว  $R_{1.1}$  ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 5.3 มีค่าเท่ากับ  $2.1872 \text{ s/cm}^3$  ซึ่งได้จากการประมาณความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเส้นตรงซึ่งอาจไม่ใช่ค่าที่แท้จริงเมื่อนำค่า  $R_{1.1}$  ไปแทนค่าในบล็อกไดอะแกรมต่างๆจะทำให้ค่าความสัมพันธ์คลาดเคลื่อนได้

(2) ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า  $V_{sp}$  ที่ป้อนให้กับชุดควบคุมวาล์วกับอัตราการไหล  $Q_i$  ของน้ำไหลเข้าถังจากการทดลองที่ 5.1 อาจมีความคลาดเคลื่อนเพราะความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมาจากการประมาณค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลข (Least square regression)

#### 5.4.2 ผลการทดลองการควบคุมระดับน้ำถังเดียวมีปฏิริยาต่อถังอื่น



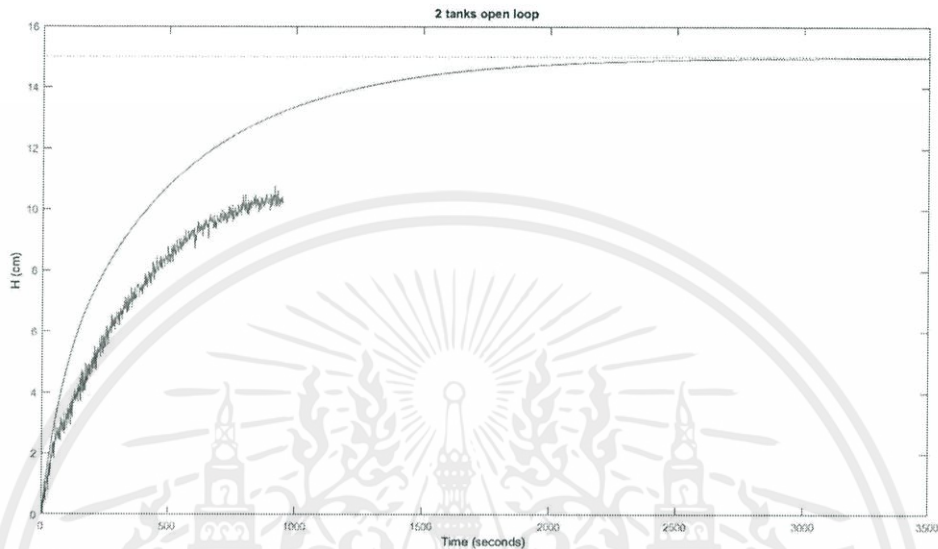
รูปที่ 5.12 แสดงลักษณะระบบการควบคุมแบบถังเดียวมีปฏิริยาต่อถังอื่น

##### (1) การทดลองแบบระบบเปิด (Open loop)

จากการทดลองการตอบสนองของระบบถังเดียวมีปฏิริยาต่อถังอื่นเมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางทฤษฎีในบทที่ 4 โดยกำหนดความสูงที่ต้องการ 15 เซนติเมตร มีลักษณะดังรูปที่ 5.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำหนดให้  $R_1 = R_2 = 2.1872 \text{ s/cm}^3$   
 $C_1 = C_2 = 92.16 \text{ cm}^2$



รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง และจากแบบจำลองทางทฤษฎีต่อการตอบสนองของระบบถังเดียวมีปฏิกริยาต่อถังอื่นแบบระบบเปิดที่ความสูง 15 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.13 กำหนดความสูงของน้ำจากทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 15 เซนติเมตร มีค่า Rise time เท่ากับ 1020 วินาที แต่จากในทางการทดลองมีความสูงจริง 10.2 เซนติเมตร มีค่า Rise time เท่ากับ 555 วินาที ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความสูงเท่ากับ 32% และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ Rise time เท่ากับ 45.6%

จากกราฟในรูปที่ 5.15 จะพบว่าผลที่ได้จากการทดลองมีความสูงที่สภาวะคงตัวต่ำกว่าความสูงที่สภาวะคงตัวของแบบจำลองทางทฤษฎี อาจเนื่องจากจากสาเหตุดังนี้

- (1) ค่าความต้านทานของไหลดวาล์ว  $R_{1,1}$  ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 5.3 มีค่าเท่ากับ  $2.1872 \text{ s/cm}^3$  ซึ่งได้จากการประมาณความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเส้นตรงซึ่งอาจไม่ใช่ค่าที่แท้จริงเมื่อนำค่า  $R_{1,1}$  ไปแทนค่าในบล็อกไดอะแกรมต่างๆจะทำให้ค่าความสัมพันธ์คลาดเคลื่อนได้
- (2) ค่าความต้านทานของไหลดวาล์ว  $R_2$  นั้นถูกประมาณให้มีค่าเท่ากับ  $R_{1,1}$  ซึ่งความคลาดเคลื่อนจากค่าที่แท้จริงเป็นไปได้สูง เมื่อนำค่า  $R_2$  ไปแทนค่าในบล็อกไดอะแกรมต่างๆจะทำให้ความสัมพันธ์นั้นคลาดเคลื่อนได้

(3) ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า  $V_{sp}$  ที่ป้อนให้กับชุดควบคุมวาล์วกับอัตราการไหล  $Q_i$  ของน้ำไหลเข้าถังจากการทดลองที่ 5.1 อาจมีความคลาดเคลื่อนเพราะความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมาจากการประมาณค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลข (Least square regression)

(2) การทดลองแบบป้อนกลับ (Feedback control)

การทดลองแบบป้อนกลับโดยใช้ระบบควบคุมแบบ PI ของระบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการทดลองและจากแบบจำลองทางทฤษฎีในบทที่ 4 โดยกำหนดความสูงที่ต้องการ 5 เซนติเมตรมีลักษณะดังรูปที่ 5.14

$$\begin{aligned} \text{โดยกำหนดให้ } R_1 = R_2 &= 2.1872 \text{ s/cm}^3 & k_p &= 33.6 \\ C_1 = C_2 &= 92.16 \text{ cm}^2 & \frac{k_i}{k_p} &= 0.1 \\ \%O.S. < 20\% &= 19.5\% & T_s < 50 \text{ วินาที} &= 45.26 \text{ วินาที} \end{aligned}$$



รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง และผลที่ได้จากทฤษฎีการตอบสนองของระบบถังเดียวมีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI ที่ความสูง 5 เซนติเมตร

จากรูปที่ 5.14 กำหนดค่า % Maximum Overshoot จากทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 19.5% มีค่า Rise time เท่ากับ 7.08 วินาที และมีค่า Settling time เท่ากับ 38.2 วินาที แต่จากในทางการทดลองมีค่า

% Maximum Overshoot เท่ากับ 39% มีค่า Rise time เท่ากับ 5.9 วินาที และค่า Settling time เท่ากับ 40 วินาที

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองกับแบบจำลองทางทฤษฎีตามรูปที่ 5.14 จะพบว่ามีความใกล้เคียงกันแต่ว่าการตอบสนองจากการทดลองช้ากว่าทางทฤษฎีอาจเนื่องมาจากการใช้ตัวกรองสัญญาณรบกวนออก แต่แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมแบบ PI นั้นจะทำให้ระบบมีการตอบสนองที่ดีขึ้นกว่าระบบเปิด ส่วนสาเหตุของความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองเกิดจาก

(1) ค่าความต้านทานของไหลดวาล์ว  $R_{1.1}$  ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 5.3 มีค่าเท่ากับ  $2.1872 \text{ s/cm}^3$  ซึ่งได้จากการประมาณความสัมพันธ์ของกราฟเป็นเส้นตรงซึ่งอาจไม่ใช่ค่าที่แท้จริงเมื่อนำค่า  $R_{1.1}$  ไปแทนค่าในบล็อกไดอะแกรมต่างๆจะทำให้ค่าความสัมพันธ์คลาดเคลื่อนได้

(2) ค่าความต้านทานของไหลดวาล์ว  $R_2$  นั้นถูกประมาณให้มีค่าเท่ากับ  $R_{1.1}$  ซึ่งความคลาดเคลื่อนจากค่าที่แท้จริงเป็นไปได้สูง เมื่อนำค่า  $R_2$  ไปแทนค่าในบล็อกไดอะแกรมต่างๆจะทำให้ความสัมพันธ์นั้นคลาดเคลื่อนได้

(3) ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า  $V_{sp}$  ที่ป้อนให้กับชุดควบคุมวาล์วกับอัตราการไหล  $Q_i$  ของน้ำไหลเข้าถังจากการทดลองที่ 5.1 อาจมีความคลาดเคลื่อนเพราะความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมาจากการประมาณค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลข (Least square regression)

## บทที่ 6

# สรุปผลการดำเนินงานและแนวทางการพัฒนา

ในการดำเนินงานโครงการออกแบบ และสร้างระบบควบคุมระดับน้ำด้วยวิธี PI ได้ทำการสร้างชุดการทดลองควบคุมระดับน้ำ โดยกำหนดการควบคุมวาล์วเฉพาะที่ทางเข้า ส่วนวาล์วในทางออกจะเป็นไหลดวาล์ว ที่สามารถปรับมุมมองศาของการเปิด-ปิดวาล์ว ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อระบบทั้งในแง่ของเวลาที่ใช้ในการรักษาสมดุลของระดับน้ำ และระดับน้ำสูงสุดที่สามารถตอบสนองต่อคำสั่งได้

ในส่วนของวาล์วควบคุม ซึ่งถือเป็นอุปกรณ์หลักของโครงการงานชิ้นนี้ได้มีการศึกษาถึงทางเลือกในการใช้วาล์วหลากหลายแบบ โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพในการใช้งานรวมถึงความเป็นไปได้ในการใช้งาน ทางผู้จัดทำได้เลือกที่จะสร้างวาล์วควบคุมขึ้นมาเองโดยใช้ เซอร์โวมอเตอร์ในการขับเคลื่อนวาล์วดังที่ได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 ในขณะที่อุปกรณ์วัดระดับน้ำได้เลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความดันโดยดูจากความเหมาะสมในการใช้งานเมื่อพิจารณาจากปริมาณของระดับน้ำในถังที่ต้องการควบคุม ส่วนในด้านของโปรแกรมควบคุมก็ได้ใช้โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้ประมวลผลในการควบคุมระบบจากการที่โปรแกรมนี้มีรูปแบบแนวคิดจากการพัฒนา (Graphical-base Programming) ทำให้มีข้อดีตรงที่เป็นโปรแกรมที่ง่ายต่อการเข้าใจและพัฒนาต่อ รวมไปถึงง่ายต่อการเชื่อมต่อข้อมูลรับเข้าและส่งออกสัญญาณต่ออุปกรณ์ภายนอก

### 6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

จากการทดลองควบคุมระดับน้ำด้วยวิธีพีไอ (PI, Proportional Integral) จะแบ่งการทดลองเป็น 2 กรณีคือการทดลองวัดระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่น และถังเดียวแบบมีปฏิกิริยาต่อถังอื่น ซึ่งในการทดลองทั้ง 2 กรณีจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์พีไอของแต่ละกรณี ซึ่งในการหาค่าพารามิเตอร์พีไอจะทำการหาค่าด้วยวิธีทางเดินของราก (Root locus technique) บนโปรแกรม MATLAB โดยจะกำหนดค่าฟุงเกิน (Percent overshoot) และค่า Settling time หลังจากการหาค่าพารามิเตอร์พีไอแล้ว จะทำการหาค่าพารามิเตอร์พีไอในแต่ละกรณี จากนั้นนำค่าที่ได้ไปป้อนลงโปรแกรมควบคุมที่เราสร้างขึ้นจากการทดลองโดยใช้ค่าพารามิเตอร์พีไอที่ได้จากการหาค่านั้นมาควบคุมระดับความสูงของน้ำให้อยู่ในระดับที่ต้องการได้ทั้ง 2 กรณี จากนั้นนำผลการทดลองมาทำกราฟเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี เมื่อนำมา

เทียบกันแล้วจะเห็นได้ว่าการทดลองมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับทางทฤษฎีแต่ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่เนื่องมาจากสาเหตุดังนี้

- (1) ค่าความต้านทานของโหลดวาล์ว  $R_1$  นั้นอาจจะไม่ใช่ค่าที่ถูกต้อง เพราะในการทดลองนั้นความชันของกราฟนั้นมีค่าประมาณให้เป็นเส้นตรงและให้มีค่าคงที่ตลอด ซึ่งในความเป็นจริงนั้นค่าความต้านทานนั้นเปลี่ยนแปลงตลอดขึ้นอยู่กับความสูงและอัตราการไหลของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย และค่าความต้านทานของโหลดวาล์ว  $R_2$  นั้นถูกประมาณให้มีค่าเท่ากับ  $R_1$  เมื่อนำค่าที่ได้ไปแทนในบล็อกไดอะแกรมจะทำให้ผลการตอบสนองเกิดความคลาดเคลื่อนได้
- (2) เนื่องจากการควบคุมตำแหน่งวาล์วโดยเซอร์โวมอเตอร์นั้นมีการตอบสนองแบบอันดับสอง ซึ่งไม่ได้มีการนำมามีค่าความถี่ด้วย จึงเกิด Percent overshoot เล็กน้อยอาจส่งผลกระทบต่อฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ
- (3) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า  $V_{sp}$  ที่ป้อนให้ และชุดควบคุมวาล์วกับอัตราการไหล  $Q_i$  ของน้ำไหลเข้าถังอาจมีความคลาดเคลื่อนเพราะความสัมพันธ์ที่ได้นั้นมาจากการประมาณค่าความสัมพันธ์เชิงตัวเลข (Least square regression)
- (4) สัญญาณที่รับจากตัวเซ็นเซอร์มีการรบกวนสูง จึงต้องมีการใช้ตัวกรองสัญญาณ ซึ่งทำให้สัญญาณมีการหน่วง (Delay) มีผลกระทบต่อผลการควบคุมได้

## 6.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางการแก้ไข

เกิด Hysteresis ขึ้นที่ท่อน้ำบริเวณวาล์วควบคุมเนื่องจากเมื่อวาล์วเปิดสุดได้รับภาระจากน้ำจะมีพลังงานสะสมอยู่ภายใน เมื่อทำการปิดวาล์วพลังงานที่สะสมยังคงเหลืออยู่ เช่น ความเสียดทานภายในหรือ แรงกระทำจากภายนอก

ในส่วนของการวัดระดับน้ำนั้นตัวเซ็นเซอร์ที่ใช้มีลักษณะการวัดแรงดันแบบเปรียบเทียบกับความดันบรรยากาศซึ่งเมื่อวาล์วเปิดจนสุด อัตราการไหลของน้ำมากจึงทำให้น้ำในถังควบคุมเกิดอาการสั่น ซึ่งส่งผลกระทบต่อแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกไปสู่โปรแกรมประมวลผล รวมไปถึงการเกิดสัญญาณรบกวนจากสภาวะแวดล้อมภายนอกทำให้ไม่สามารถวัดระดับความสูงของน้ำได้อย่างแม่นยำซึ่งเป็นสาเหตุของความผิดพลาดที่ทำให้ระบบไม่สามารถควบคุมระดับน้ำตามที่ต้องการได้

## บรรณานุกรม

- กนต์ธร ขำนิประศาสน์ และโศรฎา แข็งการ. การใช้ MATLAB สำหรับงานทางวิศวกรรม.  
ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 2. : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- กิจไพบูลย์ ชิวพันธุ์ศรี. 2550. การออกแบบแอปพลิเคชันในระบบกราฟฟิกด้วย LabVIEW. กรุงเทพฯ :  
ซีเอ็ดยูเคชั่น
- กิตติ ตีระเศรษฐ์. 2539. พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุม. พิมพ์ครั้งที่ 5. : ภาควิชาวิศวกรรมระบบ  
ควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- รศ.สุมาลี อุณหวนิชย์. 2545. ระบบควบคุม. : ว.เพ็ชรสกุล จำกัด.
- ประสิทธิ์ บุญจ่าย และสมศักดิ์ อธิวัฒน์ประชากร. 2550. ระบบควบคุมระดับน้ำโดยวิธีพีไอ. :  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง.
- Ogata K. System Dynamics. 4<sup>th</sup> ED. Prentice-Hall Inc. 2004



ภาคผนวก ก  
อุปกรณ์วัดระดับน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Freescale Semiconductor

 MPX2010  
 Rev 13, 10/2008

## 10 kPa On-Chip Temperature Compensated and Calibrated Silicon Pressure Sensors

The MPX2010 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. 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
- Available in Easy-to-Use Tape & Reel

## MPX2010 Series

0 to 10 kPa (0 to 1.45 psi)  
 25 mV Full Scale  
 (Typical)

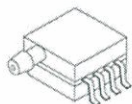
### Application Examples

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

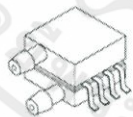
### ORDERING INFORMATION

Device Name	Package Options	Case No.	# of Ports			Pressure Type			Device Marking
			None	Single	Dual	Gauge	Differential	Absolute	
<b>Small Outline Package (MPXV2010 Series)</b>									
MPXV2010GP	Tray	1369		•		•			MPXV2010GP
MPXV2010DP	Tray	1351			•		•		MPXV2010DP
<b>Unibody Package (MPX2010 Series)</b>									
MPX2010D	Tray	344	•				•		MPX2010D
MPX2010DP	Tray	344C			•		•		MPX2010DP
MPX2010GP	Tray	344B		•		•			MPX2010GP
MPX2010GS	Tray	344E		•		•			MPX2010D
MPX2010GSX	Tray	344F		•		•			MPX2010D
<b>MPAK Package (MPXM2010 Series)</b>									
MPXM2010D	Rail	1320	•				•		MPXM2010D
MPXM2010DT1	Tape and Reel	1320	•				•		MPXM2010D
MPXM2010GS	Rail	1320A		•		•			MPXM2010GS
MPXM2010GST1	Tape and Reel	1320A		•		•			MPXM2010GS

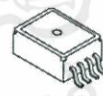
### SMALL OUTLINE PACKAGES



MPXV2010GP  
CASE 1369-01



MPXV2010DP  
CASE 1351-01

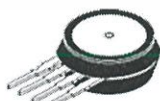


MPXM2010D/DT1  
CASE 1320-02

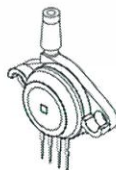


MPXM2010GS/GST1  
CASE 1320A-02

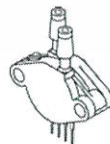
### UNIBODY PACKAGES



MPX2010D  
CASE 344-15



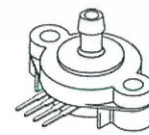
MPX2010GP  
CASE 344B-01



MPX2010DP  
CASE 344C-01



MPX2010GS  
CASE 344E-01



MPX2010GSX  
CASE 344F-01

## Operating Characteristics

**Table 1. Operating Characteristics** ( $V_S = 10 V_{DC}$ ,  $T_A = 25^\circ C$  unless otherwise noted,  $P_1 > P_2$ )

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Units
Pressure Range <sup>(1)</sup>	$P_{OP}$	0	—	10	kPa
Supply Voltage <sup>(2)</sup>	$V_S$	—	10	16	$V_{DC}$
Supply Current	$I_O$	—	6.0	—	mAdc
Full Scale Span <sup>(3)</sup>	$V_{FSS}$	24	25	26	mV
Offset <sup>(4)</sup>	$V_{OFF}$	-1.0	—	1.0	mV
Sensitivity	$\Delta V/\Delta P$	—	2.5	—	mV/kPa
Linearity	—	-1.0	—	1.0	% $V_{FSS}$
Pressure Hysteresis (0 to 10 kPa)	—	—	$\pm 0.1$	—	% $V_{FSS}$
Temperature Hysteresis (-40°C to +125°C)	—	—	$\pm 0.5$	—	% $V_{FSS}$
Temperature Coefficient on Full Scale Span	$TCV_{FSS}$	-1.0	—	1.0	% $V_{FSS}$
Temperature Coefficient on Offset	$TCV_{OFF}$	-1.0	—	1.0	mV
Input Impedance	$Z_{IN}$	1300	—	2550	$\Omega$
Output Impedance	$Z_{OUT}$	1400	—	3000	$\Omega$
Response Time <sup>(5)</sup> (10% to 90%)	$t_R$	—	1.0	—	ms
Warm-Up Time	—	—	20	—	ms
Offset Stability <sup>(6)</sup>	—	—	$\pm 0.5$	—	% $V_{FSS}$

- 1.0 kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
- Device is ratiometric within this specified excitation range. Operating the device at a different range may induce additional error due to device self-heating.
- 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.
- Offset ( $V_{OFF}$ ) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- 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.
- Offset stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

## Maximum Ratings

Table 2. Maximum Ratings<sup>(1)</sup>

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Pressure (P1 > P2)	$P_{MAX}$	75	kPa
Burst Pressure (P1 > P2)	$P_{BURST}$	100	kPa
Storage Temperature	$T_{STG}$	-40 to +125	°C
Operating Temperature	$T_A$	-40 to +125	°C

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

## 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).

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

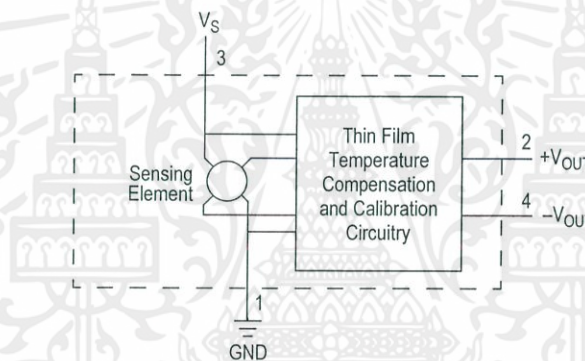


Figure 1. Temperature Compensated and Calibrated Pressure Sensor Schematic

## On-Chip Temperature Compensation and Calibration

Figure 2. shows the output characteristics of the MPX2010 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. 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 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.

### LINEARITY

Linearity refers to how well a transducer's output follows the equation:  $V_{out} = V_{off} + \text{sensitivity} \times P$  over the operating pressure range. There are two basic methods for calculating nonlinearity: (1) end point straight line fit (see Figure 4.) or (2) a least squares best line fit. While a least squares fit gives the "best case" linearity error (lower numerical value), the calculations required are burdensome.

Conversely, an end point fit will give the "worst case" error (often more desirable in error budget calculations) and the calculations are more straightforward for the user. Freescale's specified pressure sensor linearities are based on the end point straight line method measured at the midrange pressure.

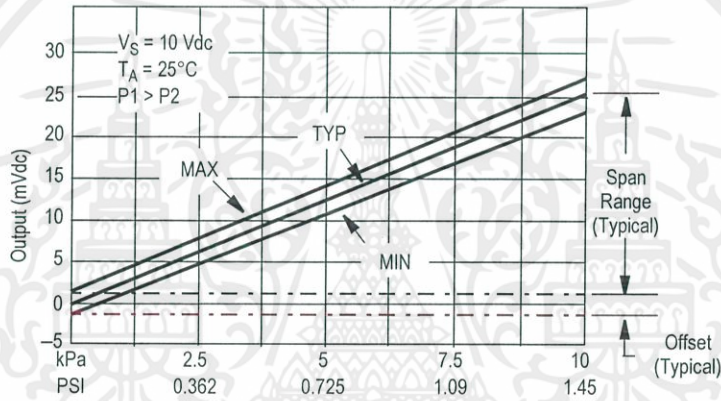


Figure 2. Output vs. Pressure Differential

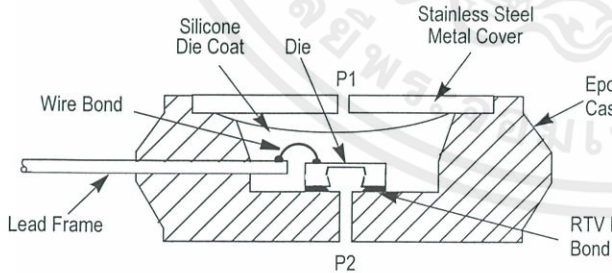


Figure 3. Unibody Package: Cross Sectional Diagram (not to scale)

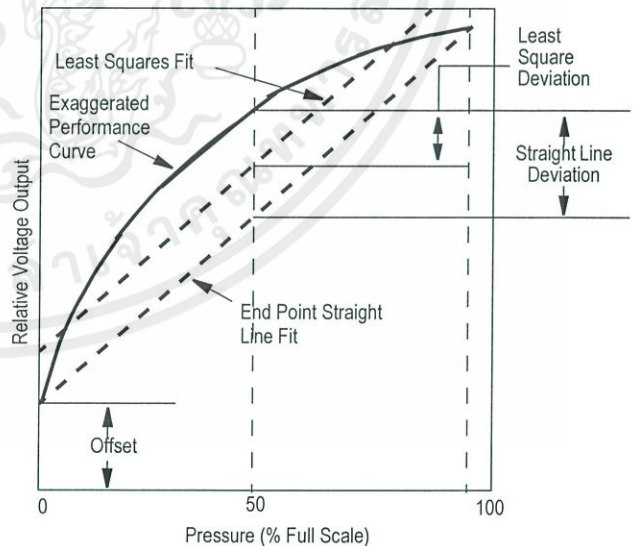


Figure 4. Linearity Specification Comparison

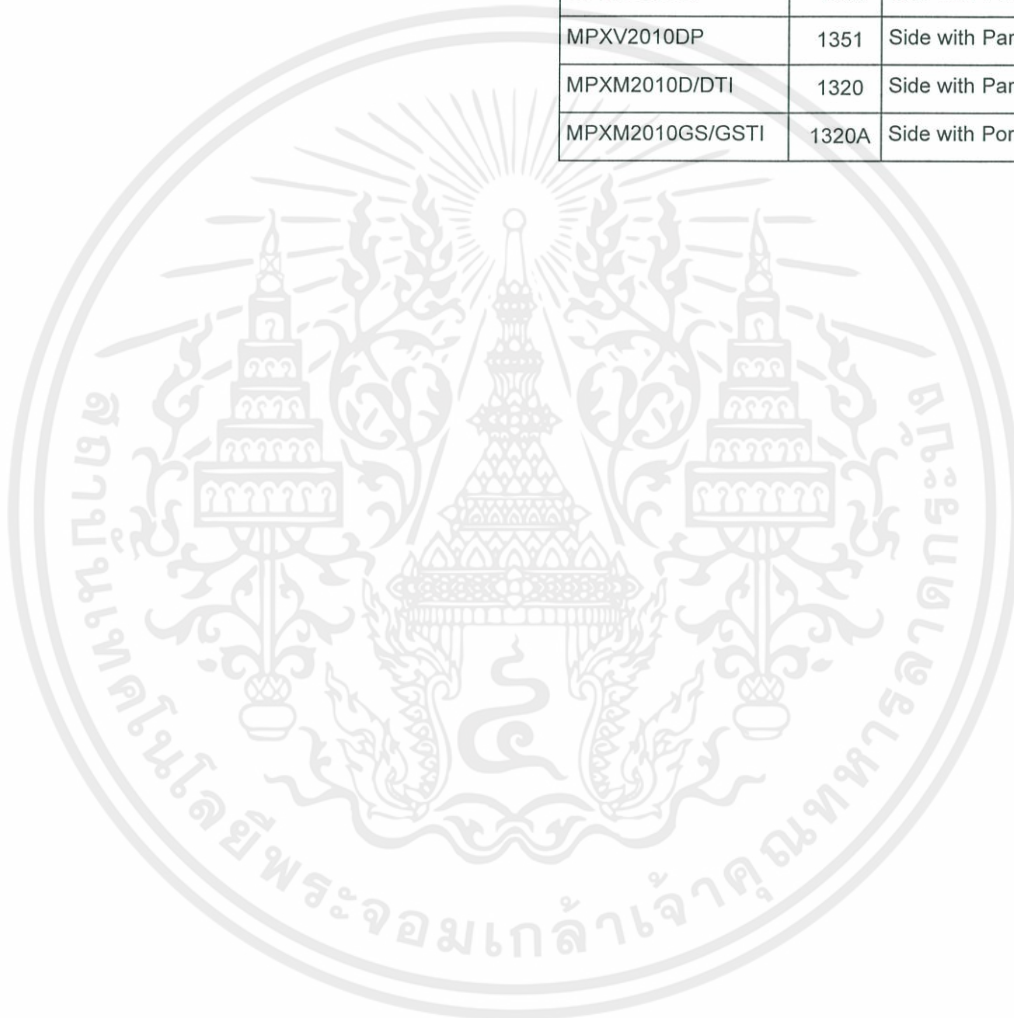
## PRESSURE (P1)/VACUUM (P2) SIDE IDENTIFICATION TABLE

Freescale designates the two sides of the pressure sensor as the Pressure (P1) side and the Vacuum (P2) side. The Pressure (P1) side is the side containing silicone gel which isolates the die from the environment. The pressure sensor is designed to operate with positive differential pressure applied,  $P1 > P2$ .

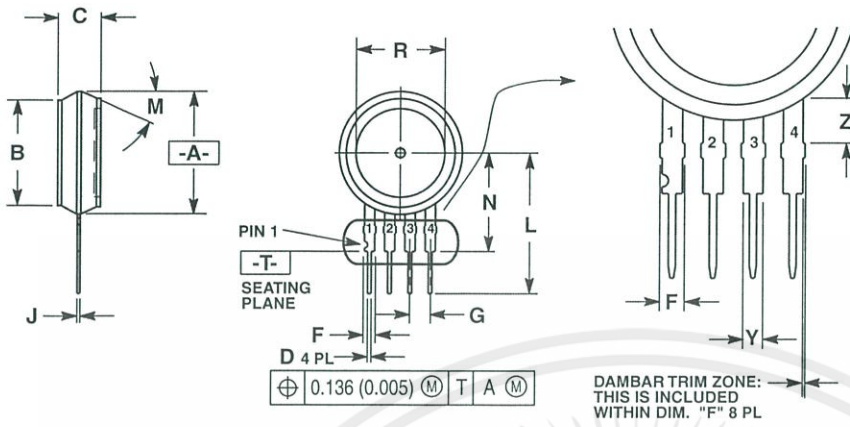
The Pressure (P1) side may be identified by using the following table.

Table 3. Pressure (P1) Side Delineation

Part Number	Case Type	Pressure (P1) Side Identifier
MPX2010D	344	Stainless Steel Cap
MPX2010DP	344C	Side with Part Marking
MPX2010GP	344B	Side with Port Attached
MPX2010GS	344E	Side with Port Attached
MPX2010GSX	344F	Side with Port Attached
MPXV2010GP	1369	Side with Port Attached
MPXV2010DP	1351	Side with Part Marking
MPXM2010D/DTI	1320	Side with Part Marking
MPXM2010GS/GSTI	1320A	Side with Port Attached

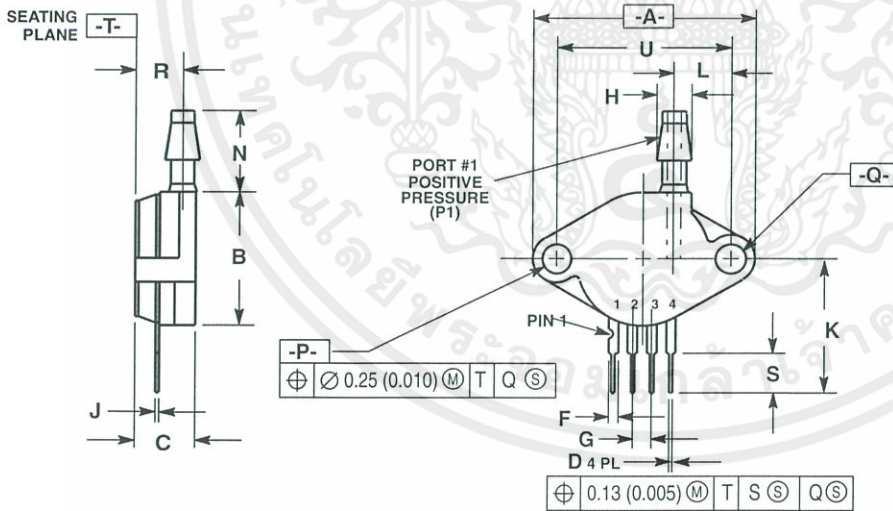


**PACKAGE DIMENSIONS**



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
  2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
  3. DIMENSION -A- IS INCLUSIVE OF THE MOLD STOP RING. MOLD STOP RING NOT TO EXCEED 16.00 (0.630).

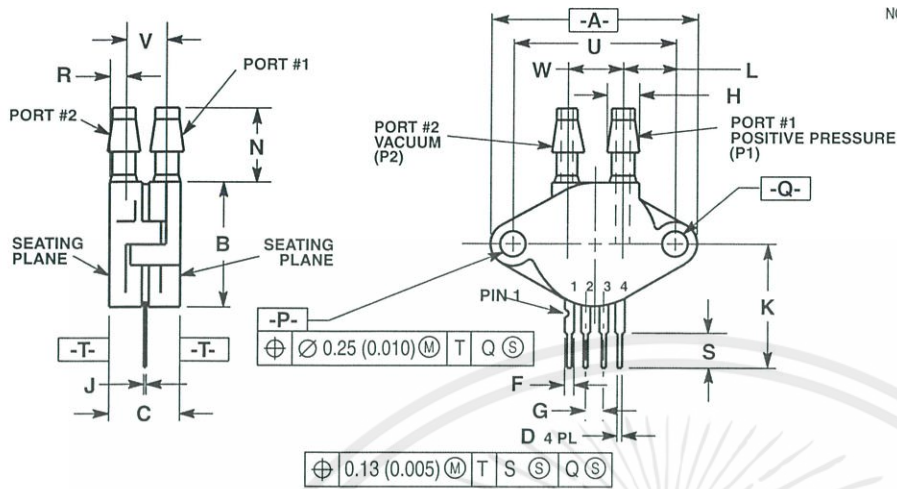
**CASE 344-15  
ISSUE AA  
UNIBODY PACKAGE**



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
  2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

**CASE 344B-01  
ISSUE B  
UNIBODY PACKAGE**

## PACKAGE DIMENSIONS

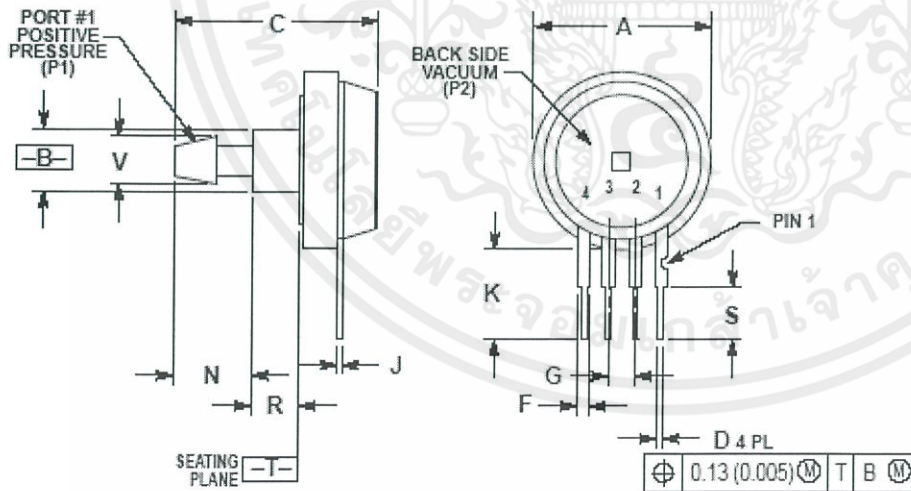


- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
  2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.145	1.175	29.08	29.85
B	0.685	0.715	17.40	18.16
C	0.405	0.435	10.29	11.05
D	0.016	0.020	0.41	0.51
F	0.048	0.064	1.22	1.63
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
H	0.182	0.194	4.62	4.93
J	0.014	0.016	0.36	0.41
K	0.695	0.725	17.65	18.42
L	0.290	0.300	7.37	7.62
N	0.420	0.440	10.67	11.18
P	0.153	0.159	3.89	4.04
Q	0.153	0.159	3.89	4.04
R	0.063	0.083	1.60	2.11
S	0.220	0.240	5.59	6.10
U	0.910 BSC		23.11 BSC	
V	0.248	0.278	6.30	7.06
W	0.310	0.330	7.87	8.38

- STYLE 1:
1. GROUND
  2. + OUTPUT
  3. + SUPPLY
  4. - OUTPUT

CASE 344C-01  
 ISSUE B  
 UNIBODY PACKAGE



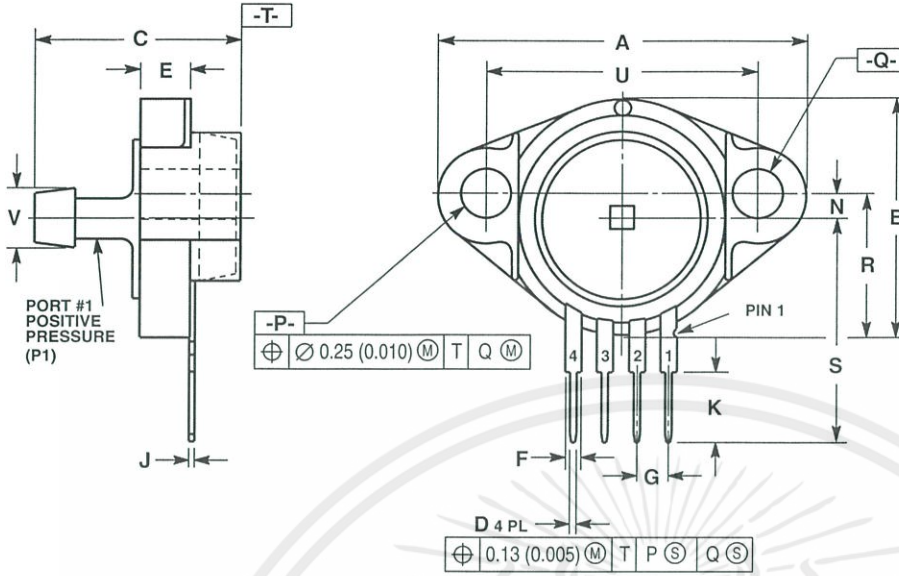
- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
  2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.690	0.720	17.53	18.28
B	0.245	0.255	6.22	6.48
C	0.750	0.820	19.81	20.82
D	0.018	0.020	0.41	0.51
F	0.048	0.064	1.22	1.63
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
J	0.014	0.016	0.36	0.41
K	0.345	0.375	8.76	9.53
N	0.300	0.310	7.62	7.87
R	0.178	0.188	4.52	4.72
S	0.220	0.240	5.59	6.10
V	0.182	0.194	4.62	4.93

- STYLE 1:
1. GROUND
  2. + OUTPUT
  3. + SUPPLY
  4. - OUTPUT

CASE 344E-01  
 ISSUE B  
 UNIBODY PACKAGE

PACKAGE DIMENSIONS



NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

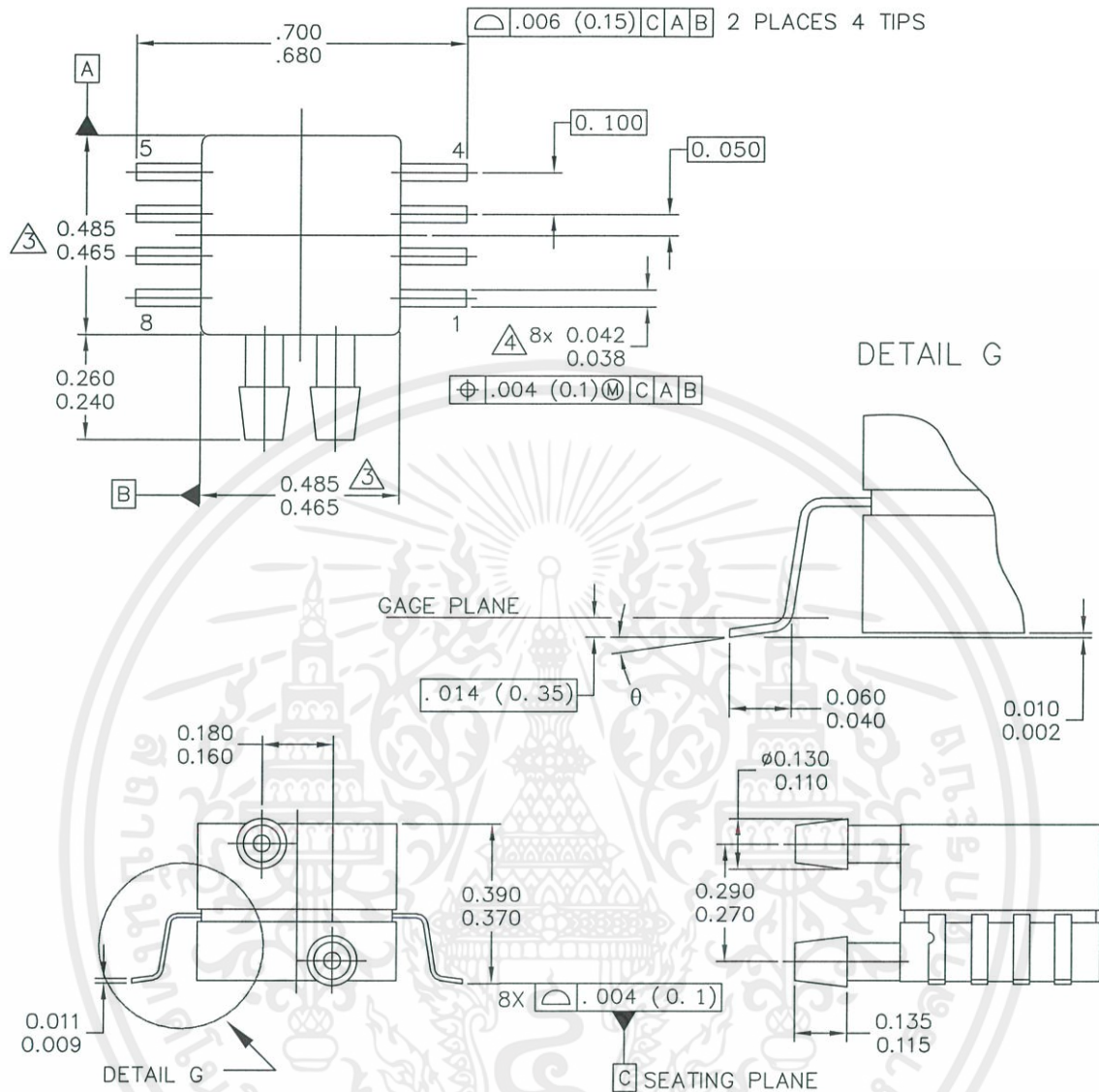
DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.080	1.120	27.43	28.45
B	0.740	0.760	18.80	19.30
C	0.630	0.650	16.00	16.51
D	0.016	0.020	0.41	0.51
E	0.160	0.180	4.06	4.57
F	0.048	0.064	1.22	1.63
G	0.100 BSC		2.54 BSC	
J	0.014	0.016	0.36	0.41
K	0.220	0.240	5.59	6.10
N	0.070	0.080	1.78	2.03
P	0.150	0.160	3.81	4.06
Q	0.150	0.160	3.81	4.06
R	0.440	0.460	11.18	11.68
S	0.695	0.725	17.65	18.42
U	0.840	0.860	21.34	21.84
V	0.182	0.194	4.62	4.92

STYLE 1:

1. GROUND
2. V (+) OUT
3. V SUPPLY
4. V (-) OUT

CASE 344F-01  
ISSUE B  
UNIBODY PACKAGE

## PACKAGE DIMENSIONS



© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	<b>MECHANICAL OUTLINE</b>	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE:  8 LD SNSR, DUAL PORT	DOCUMENT NO: 98ASA99255D	REV: A	
	CASE NUMBER: 1351-01	27 JUL 2005	
	STANDARD: NON-JEDEC		

PAGE 1 OF 2

**CASE1351-01**  
**ISSUE A**  
**SMALL OUTLINE PACKAGE**

**PACKAGE DIMENSIONS**

NOTES:

1. CONTROLLING DIMENSION: INCH
2. INTERPRET DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M-1994.
3. DIMENSIONS DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSIONS. MOLD FLASH AND PROTRUSIONS SHALL NOT EXCEED .006 PER SIDE.
4. DIMENSION DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE .008 MAXIMUM.

STYLE 1:

PIN 1: GND  
 PIN 2: +Vout  
 PIN 3: Vs  
 PIN 4: -Vout  
 PIN 5: N/C  
 PIN 6: N/C  
 PIN 7: N/C  
 PIN 8: N/C

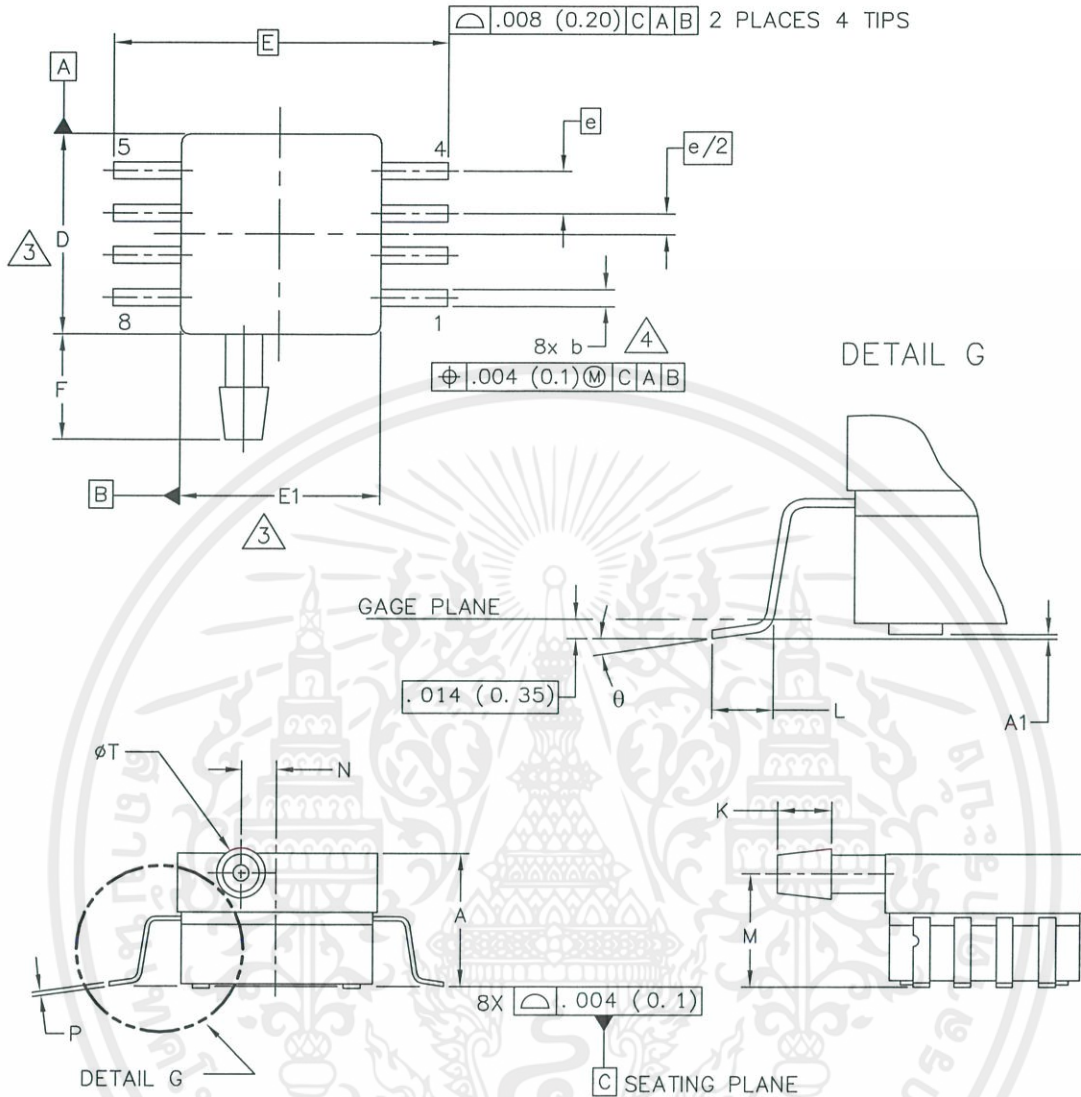
STYLE 2:

PIN 1: N/C  
 PIN 2: Vs  
 PIN 3: GND  
 PIN 4: Vout  
 PIN 5: N/C  
 PIN 6: N/C  
 PIN 7: N/C  
 PIN 8: N/C

© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	<b>MECHANICAL OUTLINE</b>	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE:  8 LD SNSR, DUAL PORT	DOCUMENT NO: 98ASA99255D	REV: A	
	CASE NUMBER: 1351-01	27 JUL 2005	
	STANDARD: NON-JEDEC		

**CASE1351-01  
 ISSUE A  
 SMALL OUTLINE PACKAGE**

PACKAGE DIMENSIONS



© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	<b>MECHANICAL OUTLINE</b>	PRINT VERSION NOT TO SCALE
TITLE:  8 LD SOP, SIDE PORT	DOCUMENT NO: 98ASA99303D	REV: B
	CASE NUMBER: 1369-01	24 MAY 2005
	STANDARD: NON-JEDEC	

CASE 1369-01  
ISSUE B  
SMALL OUTLINE PACKAGE



## PACKAGE DIMENSIONS

## NOTES:

1. CONTROLLING DIMENSION: INCH

2. INTERPRET DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M-1994.

3. DIMENSIONS DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSIONS.  
MOLD FLASH AND PROTRUSIONS SHALL NOT EXCEED .006 (0.152) PER SIDE.

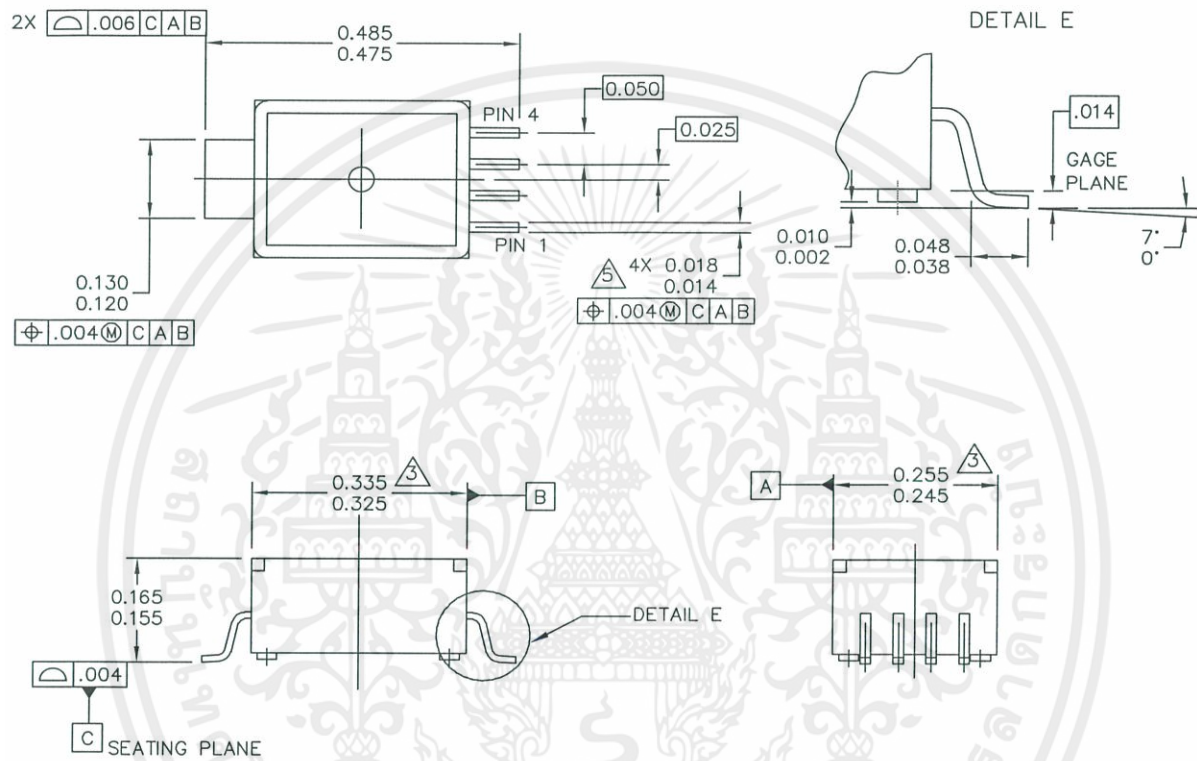
4. DIMENSION DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR  
PROTRUSION SHALL BE .008 (0.203) MAXIMUM.

DIM	INCHES		MILLIMETERS		DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX		MIN	MAX	MIN	MAX
A	.300	.330	7.11	7.62	θ	0°	7°	0°	7°
A1	.002	.010	0.05	0.25	-	---	---	---	---
b	.038	.042	0.96	1.07	-	---	---	---	---
D	.465	.485	11.81	12.32	-	---	---	---	---
E	.717 BSC		18.21 BSC		-	---	---	---	---
E1	.465	.485	11.81	12.32	-	---	---	---	---
e	.100 BSC		2.54 BSC		-	---	---	---	---
F	.245	.255	6.22	6.47	-	---	---	---	---
K	.120	.130	3.05	3.30	-	---	---	---	---
L	.061	.071	1.55	1.80	-	---	---	---	---
M	.270	.290	6.86	7.36	-	---	---	---	---
N	.080	.090	2.03	2.28	-	---	---	---	---
P	.009	.011	0.23	0.28	-	---	---	---	---
T	.115	.125	2.92	3.17	-	---	---	---	---
© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.			<b>MECHANICAL OUTLINE</b>			PRINT VERSION NOT TO SCALE			
TITLE: 8 LD SOP, SIDE PORT					DOCUMENT NO: 98ASA99303D			REV: B	
					CASE NUMBER: 1369-01			24 MAY 2005	
					STANDARD: NON-JEDEC				

PAGE 2 OF 2

**CASE 1369-01  
ISSUE B  
SMALL OUTLINE PACKAGE**

## PACKAGE DIMENSIONS



© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	<b>MECHANICAL OUTLINE</b>	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE:  5 LD M-PAC	DOCUMENT NO: 98ARH99088A	REV: B	
	CASE NUMBER: 1320-02	22 JUL 2005	
	STANDARD: NON-JEDEC		

**CASE 1320-02**  
**ISSUE B**  
**MPAK**

**PACKAGE DIMENSIONS**

NOTES:

1. DIMENSIONS ARE IN INCHES.
2. INTERPRET DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M-1994.
3. DIMENSION DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSION. MOLD FLASH OR PROTRUSION SHALL NOT EXCEED .006" PER SIDE.
4. ALL VERTICAL SURFACES TO BE 5° MAXIMUM.
5. DIMENSION DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE .008 MAXIMUM.

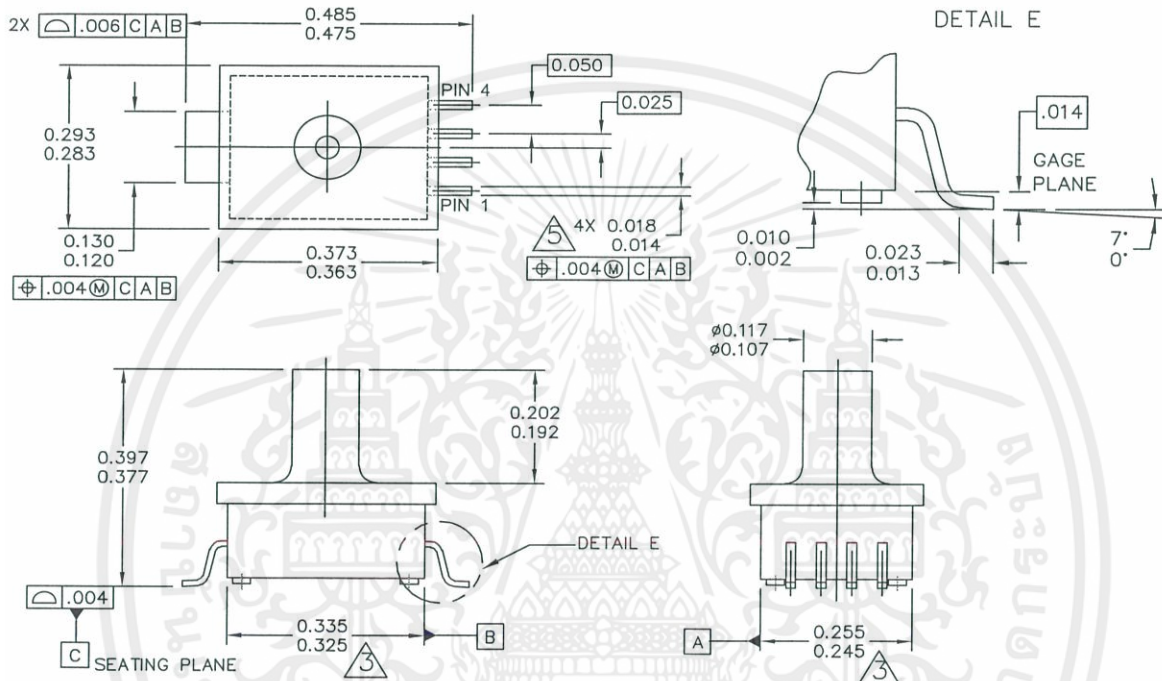
PIN 1: GND  
 PIN 2: +Vout  
 PIN 3: Vs  
 PIN 4: -Vout



© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	<b>MECHANICAL OUTLINE</b>	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE:  5 LD M-PAC	DOCUMENT NO: 98ARH99088A		REV: B
	CASE NUMBER: 1320-02		22 JUL 2005
	STANDARD: NON-JEDEC		

**CASE 1320-02  
 ISSUE A  
 MPAK**

PACKAGE DIMENSIONS



© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	<b>MECHANICAL OUTLINE</b>	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE:  5 LD M-PAC, PORTED	DOCUMENT NO: 98ARH99087A	REV: A	
	CASE NUMBER: 1320A-02	22 JUL 2005	
	STANDARD: NON-JEDEC		

**CASE 1320A-02  
ISSUE A  
MPAK**

**PACKAGE DIMENSIONS**

NOTES:

1. DIMENSIONS ARE IN INCHES.

2. INTERPRET DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M-1994.

3. DIMENSIONS DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSION. MOLD FLASH OR PROTRUSION SHALL NOT EXCEED .006" PER SIDE.

4. ALL VERTICAL SURFACES TO BE 5" MAXIMUM.

5. DIMENSION DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE .008 MAXIMUM.



© FREESCALE SEMICONDUCTOR, INC. ALL RIGHTS RESERVED.	<b>MECHANICAL OUTLINE</b>	PRINT VERSION NOT TO SCALE	
TITLE:  5 LD M-PAC, PORTED	DOCUMENT NO: 98ARH99087A	REV: A	
	CASE NUMBER: 1320A-02	22 JUL 2005	
	STANDARD: NON-JEDEC		

**CASE 1320-02  
ISSUE A  
MPAK**

## How to Reach Us:

### Home Page:

[www.freescale.com](http://www.freescale.com)

### Web Support:

<http://www.freescale.com/support>

### USA/Europe or Locations Not Listed:

Freescale Semiconductor, Inc.  
Technical Information Center, EL516  
2100 East Elliot Road  
Tempe, Arizona 85284  
1-800-521-6274 or +1-480-768-2130  
[www.freescale.com/support](http://www.freescale.com/support)

### Europe, Middle East, and Africa:

Freescale Halbleiter Deutschland GmbH  
Technical Information Center  
Schatzbogen 7  
81829 Muenchen, Germany  
+44 1296 380 456 (English)  
+46 8 52200080 (English)  
+49 89 92103 559 (German)  
+33 1 69 35 48 48 (French)  
[www.freescale.com/support](http://www.freescale.com/support)

### Japan:

Freescale Semiconductor Japan Ltd.  
Headquarters  
ARCO Tower 15F  
1-8-1, Shimo-Meguro, Meguro-ku,  
Tokyo 153-0064  
Japan  
0120 191014 or +81 3 5437 9125  
[support.japan@freescale.com](mailto:support.japan@freescale.com)

### Asia/Pacific:

Freescale Semiconductor China Ltd.  
Exchange Building 23F  
No. 118 Jianguo Road  
Chaoyang District  
Beijing 100022  
China  
+86 010 5879 8000  
[support.asia@freescale.com](mailto:support.asia@freescale.com)

### For Literature Requests Only:

Freescale Semiconductor Literature Distribution Center  
P.O. Box 5405  
Denver, Colorado 80217  
1-800-441-2447 or +1-303-675-2140  
Fax: +1-303-675-2150  
[LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com](mailto:LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com)

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use Freescale Semiconductor products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits or integrated circuits based on the information in this document.

Freescale Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Freescale Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Freescale Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters that may be provided in Freescale Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals", must be validated for each customer application by customer's technical experts. Freescale Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Freescale Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Freescale Semiconductor product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Freescale Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Freescale Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Freescale Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part.

Freescale™ and the Freescale logo are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc. All other product or service names are the property of their respective owners.

© Freescale Semiconductor, Inc. 2008. All rights reserved.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# RobotShop

www.robotshop.com

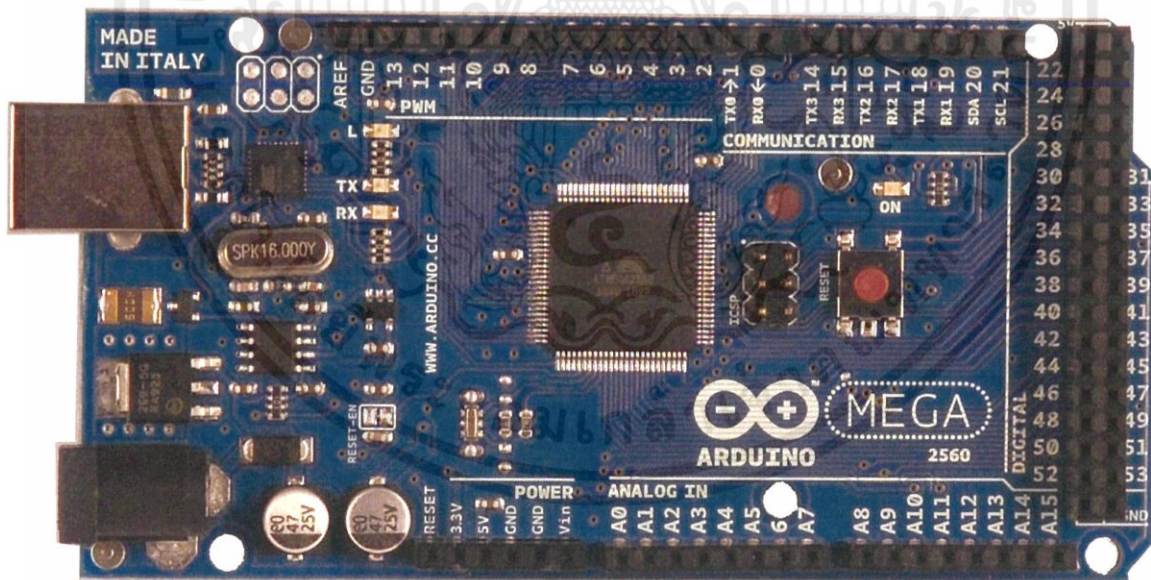


La robotique à votre service! - Robotics at your service!

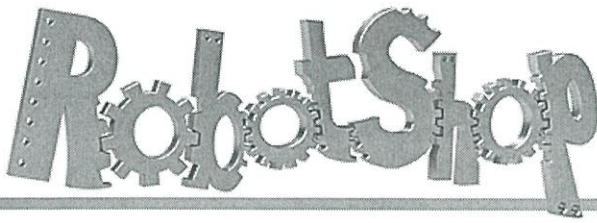


ARDUINO

## Arduino Mega 2560 Datasheet



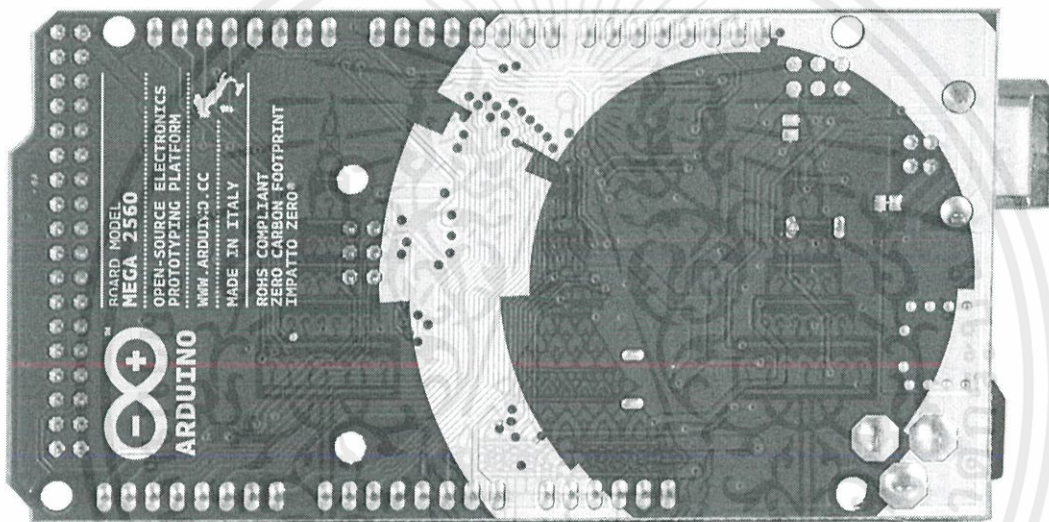
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



www.robotshop.com



La robotique à votre service! - Robotics at your service!



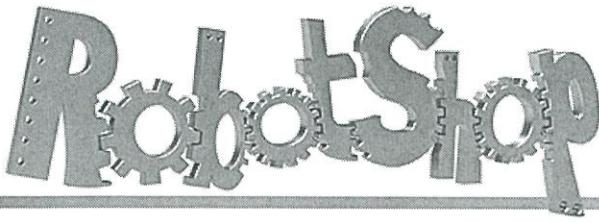
## Overview

The Arduino Mega 2560 is a microcontroller board based on the ATmega2560 ([datasheet](#)). It has 54 digital input/output pins (of which 14 can be used as PWM outputs), 16 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Mega is compatible with most shields designed for the Arduino Duemilanove or Diecimila.

## Schematic & Reference Design

EAGLE files: [arduino-mega2560-reference-design.zip](#)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



www.robotshop.com



La robotique à votre service! - Robotics at your service!

Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

## Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

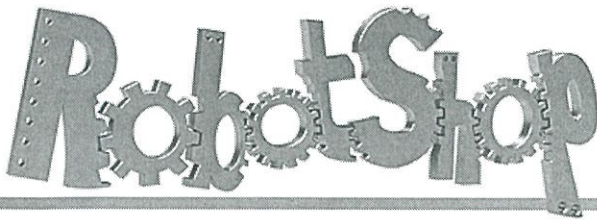
## Power

The Arduino Mega can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The Mega2560 differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega8U2 programmed as a USB-to-serial converter.



www.robotshop.com



La robotique à votre service! - Robotics at your service!

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** The regulated power supply used to power the microcontroller and other components on the board. This can come either from VIN via an on-board regulator, or be supplied by USB or another regulated 5V supply.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

## Memory

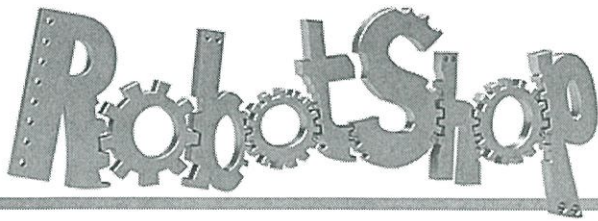
The ATmega2560 has 256 KB of flash memory for storing code (of which 8 KB is used for the bootloader), 8 KB of SRAM and 4 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

## Input and Output

Each of the 54 digital pins on the Mega can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial: 0 (RX) and 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) and 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) and 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) and 14 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. Pins 0 and 1 are also connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip.
- **External Interrupts: 2 (interrupt 0), 3 (interrupt 1), 18 (interrupt 5), 19 (interrupt 4), 20 (interrupt 3), and 21 (interrupt 2).** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- **PWM: 0 to 13.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.
- **SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS).** These pins support SPI communication using the [SPI library](#). The SPI pins are also broken out on the ICSP header, which is physically compatible with the Uno, Duemilanove and Diecimila.
- **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



www.robotshop.com



La robotique à votre service! - Robotics at your service!

value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.

- **I<sup>2</sup>C: 20 (SDA) and 21 (SCL).** Support I<sup>2</sup>C (TWI) communication using the [Wire library](#) (documentation on the Wiring website). Note that these pins are not in the same location as the I<sup>2</sup>C pins on the Duemilanove or Decimila.

The Mega2560 has 16 analog inputs, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though it is possible to change the upper end of their range using the AREF pin and `analogReference()` function.

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with `analogReference()`.
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

## Communication

The Arduino Mega2560 has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega2560 provides four hardware UARTs for TTL (5V) serial communication. An ATmega8U2 on the board channels one of these over USB and provides a virtual com port to software on the computer (Windows machines will need a .inf file, but OSX and Linux machines will recognize the board as a COM port automatically. The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the ATmega8U2 chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

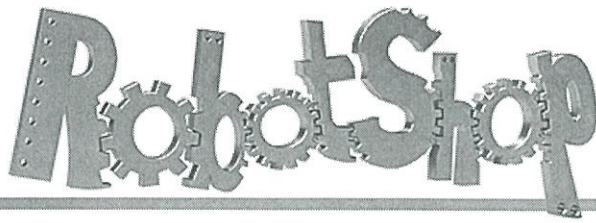
A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Mega2560's digital pins.

The ATmega2560 also supports I<sup>2</sup>C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a [Wire library](#) to simplify use of the I<sup>2</sup>C bus; see the [documentation on the Wiring website](#) for details. For SPI communication, use the [SPI library](#).

## Programming

The Arduino Mega can be programmed with the Arduino software ([download](#)). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega2560 on the Arduino Mega comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It



www.robotshop.com



La robotique à votre service! - Robotics at your service!

communicates using the original STK500 protocol ([reference](#), [C header files](#)).

You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

## Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Mega2560 is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2 is connected to the reset line of the ATmega2560 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload. This setup has other implications. When the Mega2560 is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Mega2560. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data.

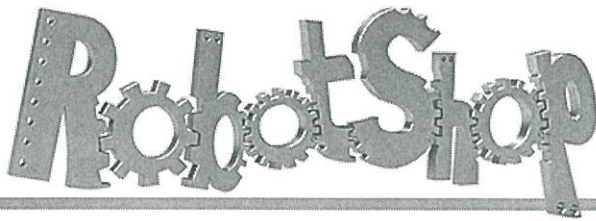
The Mega2560 contains a trace that can be cut to disable the auto-reset. The pads on either side of the trace can be soldered together to re-enable it. It's labeled "RESET-EN". You may also be able to disable the auto-reset by connecting a 110 ohm resistor from 5V to the reset line; see [this forum thread](#) for details.

## USB Overcurrent Protection

The Arduino Mega2560 has a resettable polyfuse that protects your computer's USB ports from shorts and overcurrent. Although most computers provide their own internal protection, the fuse provides an extra layer of protection. If more than 500 mA is applied to the USB port, the fuse will automatically break the connection until the short or overload is removed.

## Physical Characteristics and Shield Compatibility

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



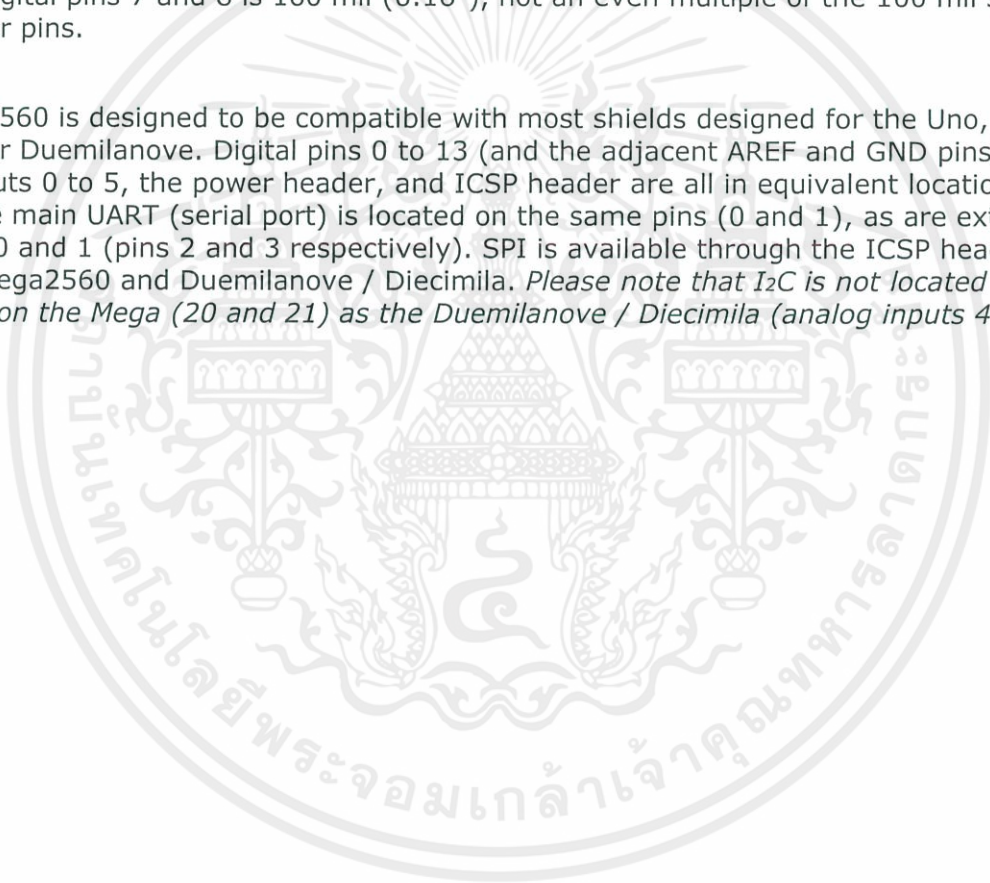
[www.robotshop.com](http://www.robotshop.com)



**La robotique à votre service! - Robotics at your service!**

The maximum length and width of the Mega2560 PCB are 4 and 2.1 inches respectively, with the USB connector and power jack extending beyond the former dimension. Three screw holes allow the board to be attached to a surface or case. Note that the distance between digital pins 7 and 8 is 160 mil (0.16"), not an even multiple of the 100 mil spacing of the other pins.

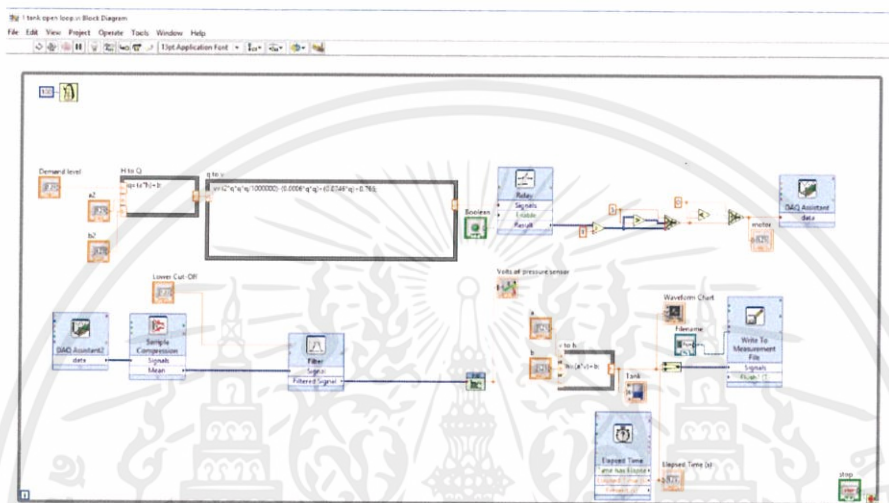
The Mega2560 is designed to be compatible with most shields designed for the Uno, Diecimila or Duemilanove. Digital pins 0 to 13 (and the adjacent AREF and GND pins), analog inputs 0 to 5, the power header, and ICSP header are all in equivalent locations. Further the main UART (serial port) is located on the same pins (0 and 1), as are external interrupts 0 and 1 (pins 2 and 3 respectively). SPI is available through the ICSP header on both the Mega2560 and Duemilanove / Diecimila. *Please note that I2C is not located on the same pins on the Mega (20 and 21) as the Duemilanove / Diecimila (analog inputs 4 and 5).*



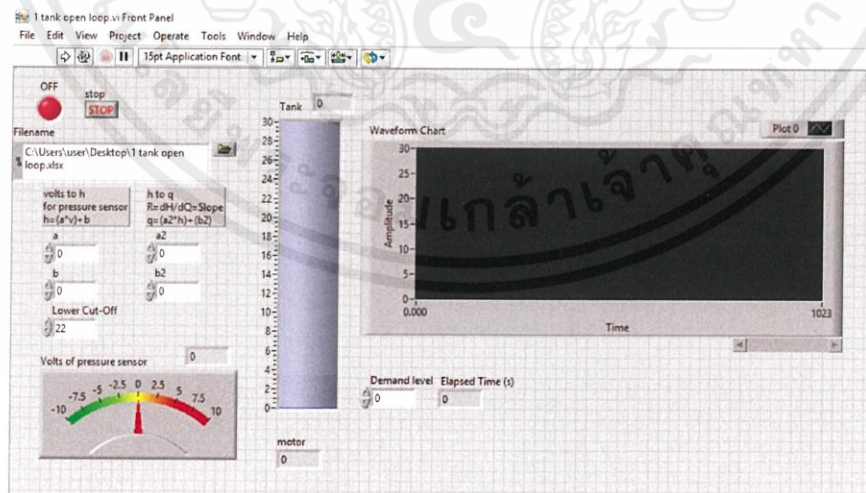
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การเขียนโปรแกรมการควบคุมโดยโปรแกรม LabVIEW

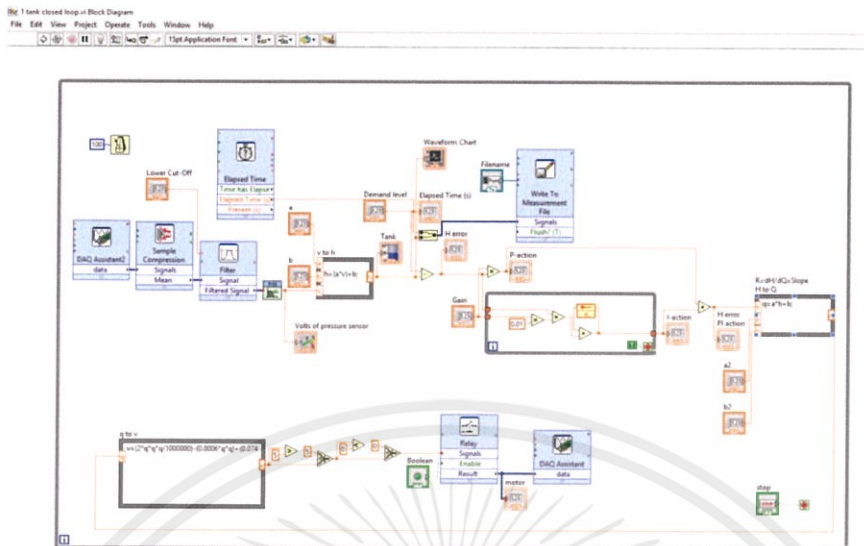


รูปที่ ค-1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของโปรแกรมควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบระบบเปิดที่สร้างขึ้น

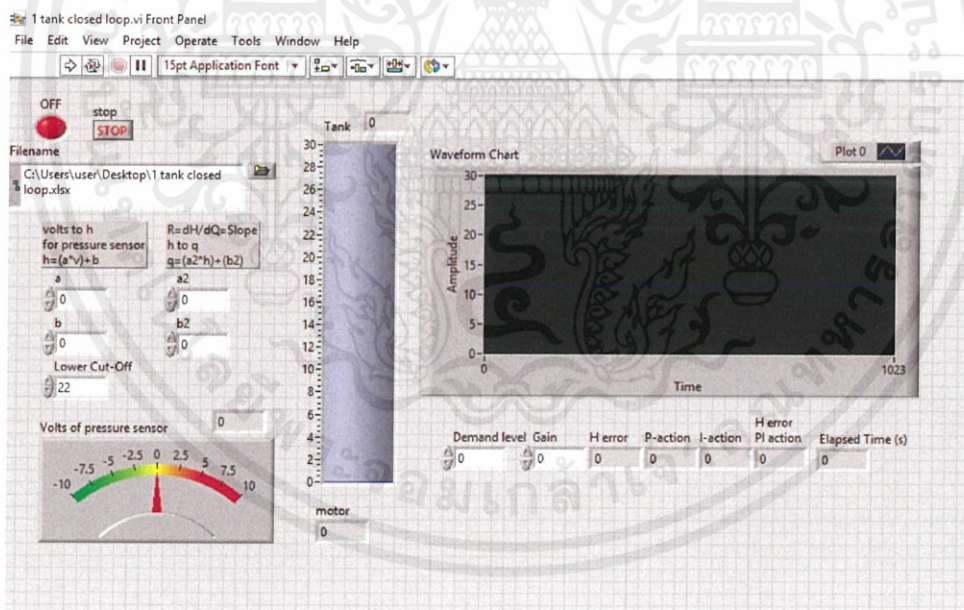


รูปที่ ค-2 แสดง Front Panel ของโปรแกรมควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบระบบเปิดที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

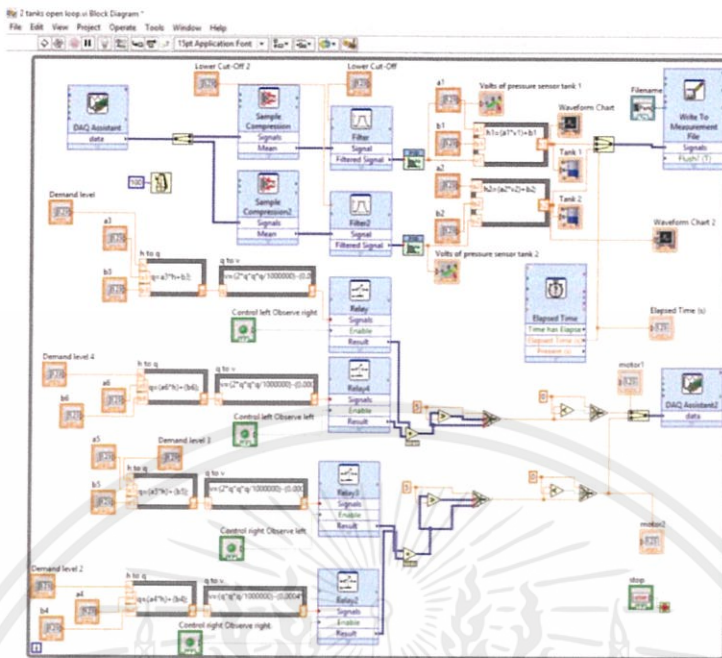


รูปที่ ค-3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของโปรแกรมควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI ที่สร้างขึ้น

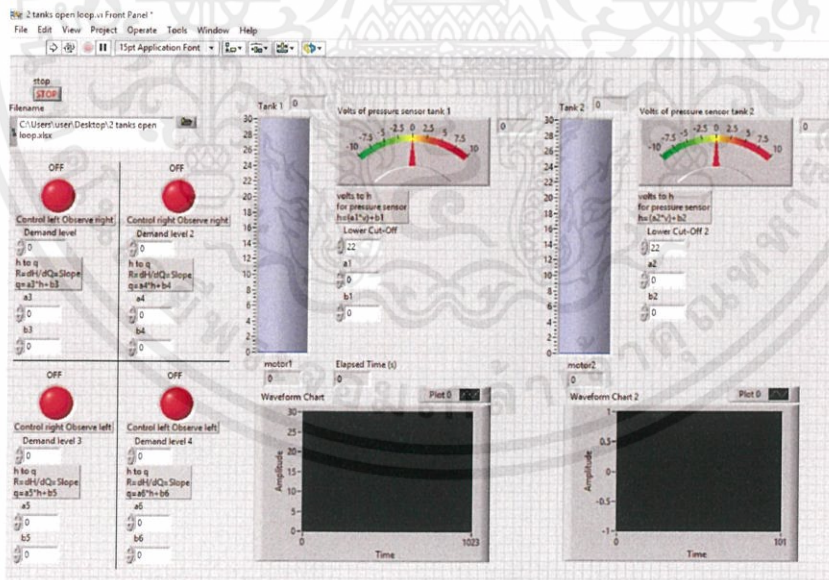


รูปที่ ค-4 แสดง Front Panel ของโปรแกรมควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวไม่มีปฏิกิริยาต่อถังอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

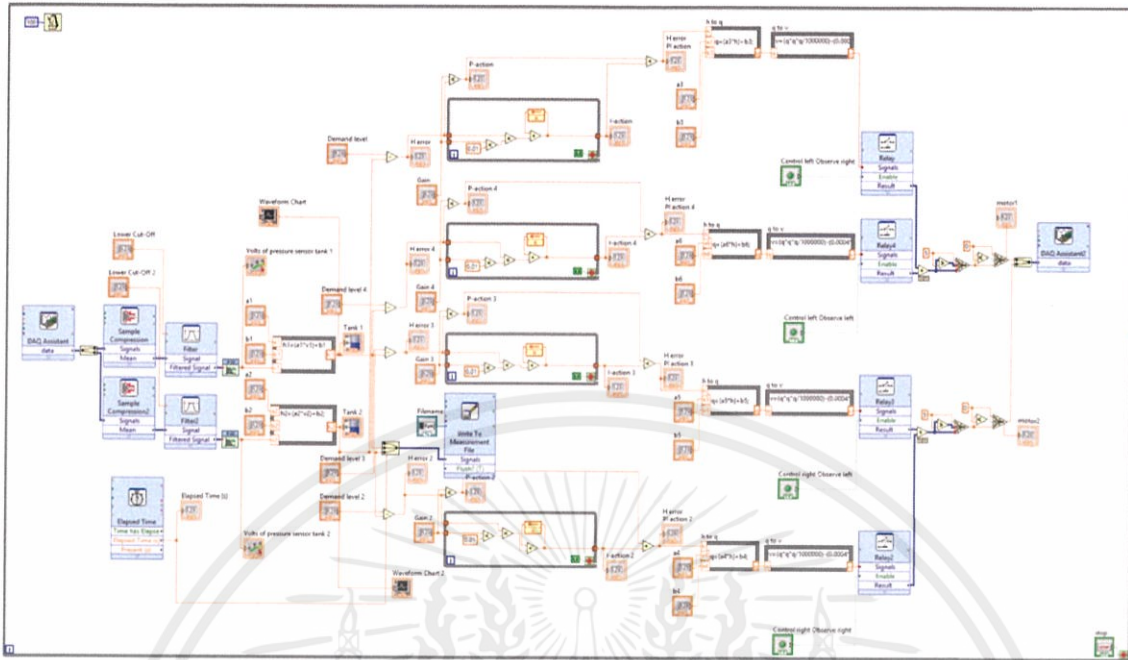


รูปที่ ค-5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของโปรแกรมควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวมีปฏิริยาต่อถังอื่นแบบระบบเปิดที่สร้างขึ้น

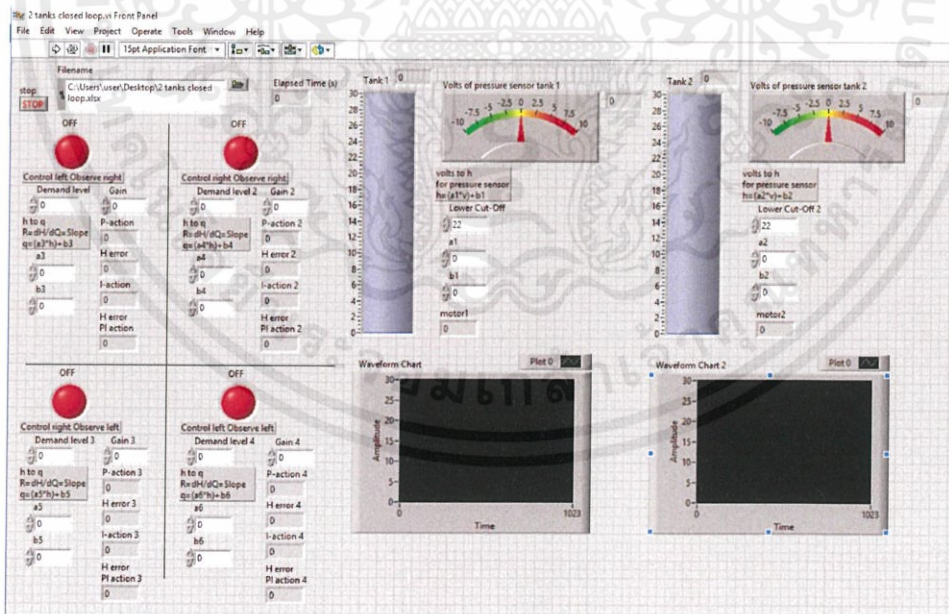


รูปที่ ค-6 แสดง Front Panel ของโปรแกรมควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียวมีปฏิริยาต่อถังอื่นแบบระบบเปิดที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค-7 แสดงบล็อกโตะแกรมของโปรแกรมควบคุมระดับน้ำแบบถึงเดียมมีปฏิกริยาต่อถึงอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI ที่สร้างขึ้น



รูปที่ ค-8 แสดง Front Panel ของโปรแกรมควบคุมระดับน้ำแบบถึงเดียมมีปฏิกริยาต่อถึงอื่นแบบใช้การควบคุมแบบ PI ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SPECIFICATIONS

# NI USB-6001

## Low-Cost DAQ USB Device

The following specifications are typical at 25 °C, unless otherwise noted. For more information about the NI USB-6001, refer to the *NI USB-6001/6002/6003 User Guide* available at [ni.com/manuals](http://ni.com/manuals).

## Analog Input

---

Number of channels	
Differential.....	4
Single-ended.....	8
ADC resolution.....	14-bit
Maximum sample rate (aggregate).....	20 kS/s
Converter type.....	Successive approximation
AI FIFO.....	2,047 samples
Trigger sources.....	Software, PFI 0, PFI 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


Input range.....	±10 V
Working voltage.....	±10 V
Overvoltage protection	
Powered-on.....	±30 V
Powered-off.....	±20 V
Input impedance.....	>1 GΩ
Input bias current.....	±200 pA
Absolute accuracy	
Typical at full scale.....	6 mV
Maximum over temperature,.....	26 mV
full scale	
System noise.....	0.7 mVrms
DNL.....	14-bit, no missing codes
INL.....	±0.5 LSB
CMRR.....	56 dB (DC to 5 kHz)
Bandwidth.....	300 kHz

## Analog Output

Analog outputs.....	2
DAC resolution.....	14-bit
Output range.....	±10 V
Maximum update rate.....	5 kS/s simultaneous per channel, hardware-timed
AO FIFO.....	2,047 samples
Trigger sources.....	Software, PFI 0, PFI 1
Output current drive.....	±5 mA
Short circuit current.....	±11 mA
Slew rate.....	3 V/μs
Output impedance.....	0.2 Ω

Absolute accuracy (no load)	
Typical at full scale.....	9.1 mV
Maximum over temperature, full scale.....	34 mV
DNL.....	14-bit, no missing codes
INL.....	±1 LSB
Power-on state.....	0 V
Startup glitch.....	-7 V for 10 $\mu$ s

## Timebase

 **Note** The following specifications apply to the sampling accuracy for hardware-timed analog input and analog output.

Timebase frequency.....	80 MHz
Timebase accuracy.....	±100 ppm
Timing resolution.....	12.5 ns

## Digital I/O

### 13 digital lines

Port 0.....	8 lines
Port 1.....	4 lines
Port 2.....	1 lines

### Function

P0.<0..7>.....	Static digital input/output
P1.0.....	Static digital input/output
P1.1/PFI 1.....	Static digital input/output, counter source or digital trigger

P1.<2..3>.....	Static digital input/output
P2.0/PFI 0.....	Static digital input/output, counter source or digital trigger
Direction control.....	Each channel individually programmable as input or output
Output driver type.....	Each channel individually programmable as open collector or active drive
Absolute maximum voltage range.....	-0.3 V to 5.5 V with respect to D GND
Pull-down resistor.....	47.5 k $\Omega$ to D GND
Power-on state.....	Input

## Digital Input

Input voltage range (powered on).....	0 to 5 V
Input voltage range (powered off).....	0 to 3.3 V
Input voltage protection.....	$\pm 20$ V on two lines per port (maximum of five lines for all ports) for up to 24 hours



**Caution** Do not leave a voltage above 3.3 V connected on any DIO line for extended periods of time when the device is powered off. This may lead to long term reliability issues.

Minimum $V_{IH}$ .....	2.3 V
Maximum $V_{IL}$ .....	0.8 V
Maximum input leakage current	
At 3.3 V.....	0.8 mA
At 5 V.....	4.5 mA

## Digital Output (Active Drive)

Maximum $V_{OL}$ (4 mA).....	0.7 V
Maximum $V_{OL}$ (1 mA).....	0.2 V
Minimum $V_{OH}$ (4 mA).....	2.1 V
Minimum $V_{OH}$ (1 mA).....	2.8 V
Maximum $V_{OH}$ .....	3.6 V
Maximum output current per line.....	$\pm 4$ mA

## Digital Output (Open Collector)

Maximum  $V_{OL}$  (4 mA).....0.8 V

Maximum  $V_{OL}$  (1 mA).....0.2 V



**Note** Minimum  $V_{OH}$  dependent on user-provided pull-up resistor and voltage source. Recommended pull-up resistor is 1 k $\Omega$ .

Using a 1 k $\Omega$  pull-up resistor and 5 V voltage source:

Minimum  $V_{OH}$ .....3.5 V

Typical  $V_{OH}$ .....4.5 V

Maximum output (sinking) current per line.....4 mA

Maximum pull-up voltage.....5 V

Maximum leakage current

At 3.3 V.....0.8 mA

At 5 V.....4.5 mA

## Counter

Number of counters.....1

Resolution.....32-bit

Counter measurements.....Edge counting, rising or falling

Counter direction.....Count up

Counter source.....PFI 0 or PFI 1

Maximum input frequency.....5 MHz

Minimum high pulse width.....100 ns

Minimum low pulse width.....100 ns

## +5 V Power Source

---

Output voltage.....	+5 V, ±3%
Maximum current.....	150 mA
Overcurrent protection.....	200 mA
Short circuit current.....	50 mA
Overvoltage protection.....	±20 V

## Bus Interface

---

USB specification.....	USB Full Speed
USB bus speed.....	12 Mb/s

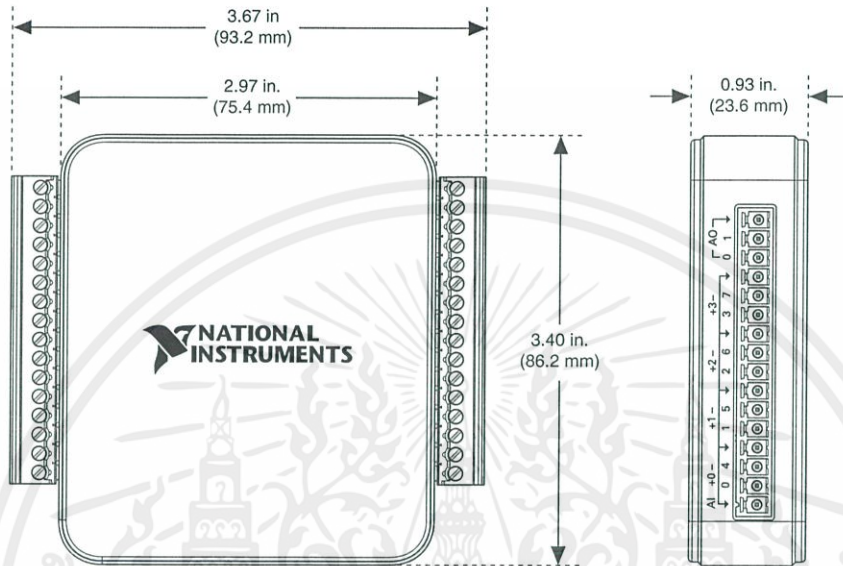
## Physical Characteristics

---

### Dimensions

Without screw terminal connector plugs....	75.4 mm × 86.2 mm × 23.6 mm, (2.97 in. × 3.40 in. × 0.93 in.)
With screw terminal connector plugs.....	93.2 mm × 86.2 mm × 23.6 mm, (3.67 in. × 3.40 in. × 0.93 in.)

Figure 1. NI USB-6001 Dimensions



**Weight**

- Without screw terminal connector plugs....83 g (2.93 oz)
- With screw terminal connector plugs.....105 g (3.70 oz)

I/O connectors: USB Micro-B receptacle, (1)

16-position screw terminal plugs

Screw-terminal wiring.....1.31 to 0.08 mm<sup>2</sup> (16 to 28 AWG)

Torque for screw terminals.....0.22 - 0.25 N · m (2.0 - 2.2 lb · in.)

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

## Environmental

Temperature (IEC 60068-2-1 and IEC 60068-2-2)

- Operating.....0 to 45 °C
- Storage.....-40 to 85 °C

Humidity (IEC 60068-2-56)

- Operating.....5 to 95% RH, noncondensing
- Storage.....5 to 90% RH, noncondensing

Pollution Degree (IEC 60664).....2  
Maximum altitude.....2,000 m  
Indoor use only.

## Safety

This product meets the requirements of the following standards of safety for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- IEC 61010-1, EN 61010-1
- UL 61010-1, CSA 61010-1



**Note** For UL and other safety certifications, refer to the product label or the *Online Product Certification* section.

## Electromagnetic Compatibility

This product meets the requirements of the following EMC standards for sensitive electrical equipment for measurement, control, and laboratory use:

- EN 61326-1 (IEC 61326-1): Class A emissions; Basic immunity
- EN 55011 (CISPR 11): Group 1, Class A emissions
- EN 55022 (CISPR 22): Class A emissions
- EN 55024 (CISPR 24): Immunity
- AS/NZS CISPR 11: Group 1, Class A emissions
- AS/NZS CISPR 22: Class A emissions
- FCC 47 CFR Part 15B: Class A emissions
- ICES-001: Class A emissions



**Note** In the United States (per FCC 47 CFR), Class A equipment is intended for use in commercial, light-industrial, and heavy-industrial locations. In Europe, Canada, Australia, and New Zealand (per CISPR 11) Class A equipment is intended for use only in heavy-industrial locations.



**Note** Group 1 equipment (per CISPR 11) is any industrial, scientific, or medical equipment that does not intentionally generate radio frequency energy for the treatment of material or inspection/analysis purposes.



**Note** For EMC declarations and certifications, and additional information, refer to the *Online Product Certification* section.

## CE Compliance

This product meets the essential requirements of applicable European Directives, as follows:

- 2006/95/EC; Low-Voltage Directive (safety)
- 2004/108/EC; Electromagnetic Compatibility Directive (EMC)

## Online Product Certification

To obtain product certifications and the DoC for this product, visit [ni.com/certification](http://ni.com/certification), search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

## Environmental Management

NI is committed to designing and manufacturing products in an environmentally responsible manner. NI recognizes that eliminating certain hazardous substances from our products is beneficial to the environment and to NI customers.

For additional environmental information, refer to the *Minimize Our Environmental Impact* web page at [ni.com/environment](http://ni.com/environment). This page contains the environmental regulations and directives with which NI complies, as well as other environmental information not included in this document.

## Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)



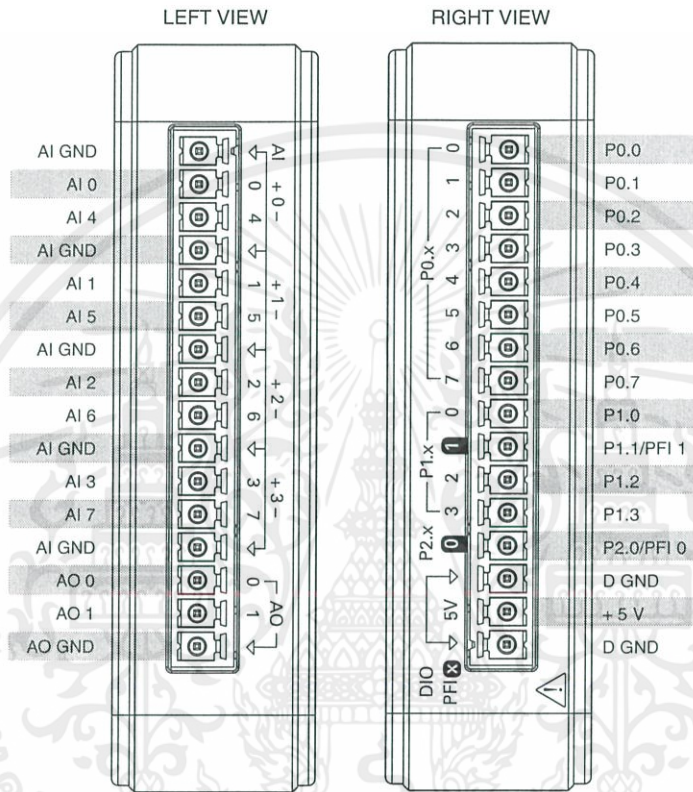
**EU Customers** This symbol indicates that waste products should be disposed of separately from municipal household waste according to WEEE Directive 2002/96/EC of the European Parliament and the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE). All products at the end of their life cycle must be sent to a WEEE collection and recycling center. Proper WEEE disposal reduces environmental impact and the risk to human health due to potentially hazardous substances used in such equipment. Your cooperation in proper WEEE disposal will contribute to the effective usage of natural resources. For information about the available collection and recycling scheme in a particular country, go to [ni.com/environment/weee](http://ni.com/environment/weee).

## 电子信息产品污染控制管理办法（中国 RoHS）



**中国客户** National Instruments 符合中国电子信息产品中限制使用某些有害物质指令 (RoHS)。关于 National Instruments 中国 RoHS 合规性信息，请登录 [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china)。(For information about China RoHS compliance, go to [ni.com/environment/rohs\\_china](http://ni.com/environment/rohs_china).)

# Device Pinout



Refer to the *NI Trademarks and Logo Guidelines* at [ni.com/trademarks](http://ni.com/trademarks) for information on National Instruments trademarks. Other product and company names mentioned herein are trademarks or trade names of their respective companies. For patents covering National Instruments products/technology, refer to the appropriate location: **Help»Patents** in your software, the `patents.txt` file on your media, or the *National Instruments Patent Notice* at [ni.com/patents](http://ni.com/patents). You can find information about end-user license agreements (EULAs) and third-party legal notices in the readme file for your NI product. Refer to the *Export Compliance Information* at [ni.com/legal/export-compliance](http://ni.com/legal/export-compliance) for the National Instruments global trade compliance policy and how to obtain relevant HTS codes, ECCNs, and other import/export data. NI MAKES NO EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES AS TO THE ACCURACY OF THE INFORMATION CONTAINED HEREIN AND SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY ERRORS. U.S. Government Customers: The data contained in this manual was developed at private expense and is subject to the applicable limited rights and restricted data rights as set forth in FAR 52.227-14, DFAR 252.227-7014, and DFAR 252.227-7015.

© 2014 National Instruments. All rights reserved.

374369A-01 May14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้