

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างระบบควบคุมระดับน้ำโดยวิธีพีไอดี

DESIGN AND FABRICATION OF WATER LEVEL CONTROL SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างระบบควบคุมระดับน้ำโดยวิธีพีไอดี  
DESIGN AND FABRICATION OF WATER LEVEL CONTROL SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

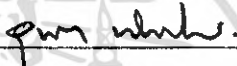
เรื่อง การออกแบบและสร้างระบบควบคุมระดับน้ำโดยวิธีพีไอดี

**Design and fabrication of water level control system**

ผู้จัดทำ

1. นายกิตติพันธ์ ไตรพิสุทธิ รหัสประจำตัว 46010044

2. นายกุลพล วรธรรณาดุล รหัสประจำตัว 46010058

  
(ศศ.ดร.อนันต์ พิมโสถม)

อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบและสร้างระบบควบคุมระดับน้ำโดยวิธีพีไอดี

นาย กิตติพันธ์ ไตรพิสุทธิ 46010044

นาย กุศล วรรณธนาคุณ 46010058

ผศ.ดร. อุนนัต พิณโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้เป็นเรื่องของการควบคุมระดับของของเหลวโดยวิธีพีไอดี (PID, Proportional Integral Derivative) โดยการรับรู้ระดับของของเหลวนั้นสามารถรับรู้ได้จากเซนเซอร์วัดความดันของน้ำ เพื่อแปลงเป็นระดับความสูงของของเหลว และเปลี่ยนค่าระดับของของเหลวให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า สัญญาณที่ได้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณดิจิทัล ก่อนที่จะถูกส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลและส่งสัญญาณควบคุมออกมา จากนั้นสัญญาณควบคุมก็จะถูกส่งเข้าวงจร เพื่อขยายสัญญาณ และไปควบคุมวาล์วอัตโนมัติให้เปิดมากน้อยตามขนาดของสัญญาณ เพื่อให้ได้ระดับของของเหลวตามค่าที่เราต้องการ

## Design and fabrication of water level control system

Kittipun Traipisut

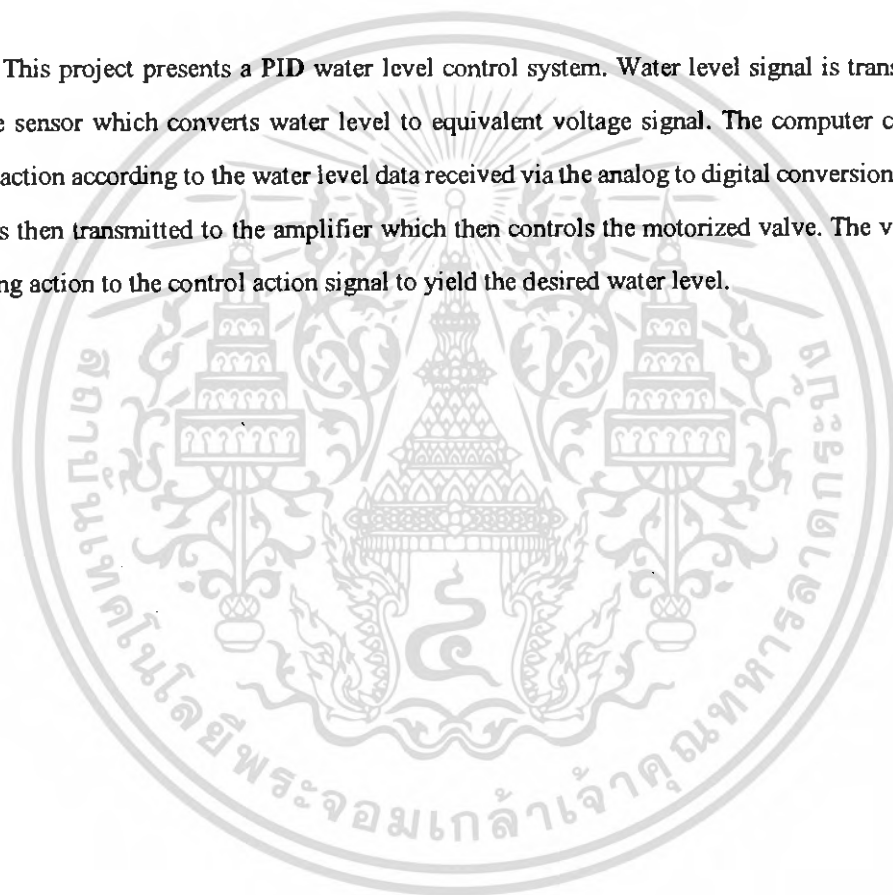
Kuson Wattnadhulha

Unnat Pinsophol

Advisor

### Abstract

This project presents a PID water level control system. Water level signal is transmitted from pressure sensor which converts water level to equivalent voltage signal. The computer calculates the control action according to the water level data received via the analog to digital conversion. The control action is then transmitted to the amplifier which then controls the motorized valve. The valve actuates according action to the control action signal to yield the desired water level.



### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การออกแบบและสร้างระบบควบคุมระดับน้ำโดยวิธีพีไอดี ไม่อาจเสร็จได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลายๆฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกคือ ผศ.ดร.อุณหัต พินโสภณ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ด้วยดี ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือมาโดยตลอด ซึ่งต้องขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และบุคลากรของภาควิชาเครื่องกล รวมทั้งผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิทยา ปานนิล จากภาควิชาวิศวกรรมวัดคุม คุณมณฑา คุณณัฐพันธ์ และคุณทวารศ ที่คอยให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่ให้คำแนะนำ คิ-ชม ความช่วยเหลือ และกำลังใจให้ผู้จัดทำมาโดยตลอด และท้ายที่สุดนี้ ขอขอบคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนและเป็นแรงบันดาลใจในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ขอพระคุณมา ณ ที่นี้

กิตติพันธ์ ไตรพิศุทธิ์  
ฤศล วรธรรณาคูล

## สารบัญ

## หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
I.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำปริญญาโท	1
I.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท	1
I.3 ขอบเขตของปริญญาโท	2
I.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ	2
I.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 การควบคุมกระบวนการอัตโนมัติ	3
2.2 ประเภทของการควบคุม	4
2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการควบคุมแบบป้อนกลับ	5
2.4 รูปแบบการควบคุม	9
2.5 ระบบเกี่ยวกับระดับของเหลว	13
2.6 Transfer Function	15
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบสร้าง	17
3.1 การออกแบบส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware)	18
3.2 การออกแบบส่วนของซอฟต์แวร์ (Software)	26
3.3 หลักการทำงานของโปรแกรม	36
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	39
4.1 ผลการทดลองโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	39
4.2 การทดลองอุปกรณ์วัดระดับน้ำ	41
4.3 การทดลองวาล์วควบคุม	42
4.4 ระบบควบคุม	44
4.5 การทดลองหาค่า $K_p$ , $K_i$	45

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและแนวทางในการพัฒนา	62
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	62
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข	63
5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ	63
บรรณานุกรม	64
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก	65
ภาคผนวก ข	67
ภาคผนวก ค	68
ภาคผนวก ง	69



## สารบัญรูปภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2.1 แสดงการควบคุมกระบวนการ	3
รูปที่ 2.2 แสดงระบบควบคุมแบบ Open Loop	4
รูปที่ 2.3 แสดงระบบควบคุมแบบปิด	4
รูปที่ 2.4 แสดงการควบคุมระดับน้ำในถังแบบ Manual Control	5
รูปที่ 2.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมระดับน้ำในถังแบบ Manual Control	5
รูปที่ 2.6 แสดงการควบคุมระดับน้ำในถังด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติ	6
รูปที่ 2.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป	6
รูปที่ 2.8 แสดงกริยาการควบคุมแบบ ON-OFF	9
รูปที่ 2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบทั่วไปที่มีตัวควบคุม	10
รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต (Error) และเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ P-Control	11
รูปที่ 2.11 แสดงกราฟตอบสนองตามเวลาเทียบกับระหว่าง เอาต์พุตของตัวควบคุม (รูปบน) และอินพุตของตัวควบคุม Error (รูปล่าง)	12
รูปที่ 2.12 แสดงระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียว	13
รูปที่ 2.13 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและอัตราการไหล	14
รูปที่ 2.14 แสดงระบบควบคุมระดับน้ำแบบสองถังที่มีปฏิริยาต่อกัน	15
รูปที่ 3.1 แสดงชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำ	17
รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองของวาล์วควบคุม	20
รูปที่ 3.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมวาล์ว	20
รูปที่ 3.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรที่สร้างขึ้น	20
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรวินโดว์ดีเทก (Window Detect)	21
รูปที่ 3.6 แสดงวงจร PID	21
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรเซอร์โวแอมพลิไฟร์ ชนิดควบคุมกระแส	22
รูปที่ 3.8 แสดงวงจรปรับ Zero-Span ของ Potentiometer	22
รูปที่ 3.9 แสดงวาล์วควบคุมที่สร้างขึ้น	23
รูปที่ 3.10 แสดงแผงวงจรของวาล์วควบคุมที่สร้างขึ้น	23
รูปที่ 3.11 แสดง Sensor ที่ใช้งาน	24
รูปที่ 3.12 แสดงแผงวงจรของการวัดระดับที่สร้างขึ้น	24
รูปที่ 3.13 แสดงการ์ดรับและประมวลผลสัญญาณรุ่น เอ็มซีซีซี เอ็นไอ 6221 (DAQ Card M Series Multifunction NI 6221)	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

## หน้าที่

รูปที่ 3.14 แสดงพอร์ตเชื่อมต่อสัญญาณรุ่น CB-68LP	25
รูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่าง Front Panel ของ โปรแกรม LabVIEW	27
รูปที่ 3.16 แสดง Controls Palette ในส่วนของ Front Panel	28
รูปที่ 3.17 แสดง Operate Value Tool	29
รูปที่ 3.18 แสดง Position/Size/Select tool	29
รูปที่ 3.19 แสดง Edit Text Tool	29
รูปที่ 3.20 แสดง Edit Text Tool	29
รูปที่ 3.21 แสดง Object Shortcut Menu Tool	29
รูปที่ 3.22 แสดง Scroll Window Tool	29
รูปที่ 3.23 แสดง Object Shortcut Menu Tool	30
รูปที่ 3.24 แสดง Numeric Function	30
รูปที่ 3.25 แสดง Change to Indicator / Control	31
รูปที่ 3.26 แสดง Digital Display	32
รูปที่ 3.27 แสดง Formula Node	32
รูปที่ 3.28 แสดง Boolean Data type	33
รูปที่ 3.29 แสดง While Loop	33
รูปที่ 3.30 แสดง Wait (ms)	34
รูปที่ 3.31 แสดง Wait until Next ms Multiple	34
รูปที่ 3.32 แสดง Shift Register	34
รูปที่ 3.33 แสดง Feedback Node	34
รูปที่ 3.34 แสดง For Loop	34
รูปที่ 3.35 แสดง Case Structure	35
รูปที่ 3.36 แสดง File I/O	35
รูปที่ 3.37 แสดงไฟล်ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมแลปวิว	37
รูปที่ 3.38 แสดง Front Panel ของ โปรแกรมควบคุมที่สร้างขึ้น	38
รูปที่ 3.39 แสดงชุดทดลองที่สร้างขึ้น	38
รูปที่ 4.1 แสดงกราฟผลตอบสนองของระบบแบบ 1 <sup>st</sup> Order	39
รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองของระบบแบบ Open Loop	40
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสูงของระดับน้ำกับแรงดัน ไฟฟ้า	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

## หน้าที่

รูปที่ 4.4 แสดงกราฟระหว่างอัตราการใช้พลังงานไฟฟ้า	43
รูปที่ 4.5 แสดง Block-Diagram ของระบบควบคุมระดับน้ำแบบกึ่งเดียว	44
รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.00001$	46
รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.00001$ และ $K_i = 1e-6$	46
รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.00005$	47
รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.00005$ และ $K_i = 1e-6$	47
รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.00005$ และ $K_i = 1e-7$	48
รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.00005$ และ $K_i = 1e-8$	48
รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.0001$	49
รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.0001$ และ $K_i = 1e-6$	49
รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.0001$ และ $K_i = 1e-7$	50
รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.0001$ และ $K_i = 1e-8$	50
รูปที่ 4.16 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.0005$	51
รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.001$	51
รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.001$ และ $K_i = 1e-6$	52
รูปที่ 4.19 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.001$ และ $K_i = 1e-7$	52
รูปที่ 4.20 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.001$ และ $K_i = 1e-8$	53
รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.01$ และ $K_i = 1e-6$	53
รูปที่ 4.22 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.001$ และ $K_i = 1e-7$	54
รูปที่ 4.23 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.001$ และ $K_i = 1e-8$	54
รูปที่ 4.24 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.000005$	55
รูปที่ 4.25 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.000025$	55
รูปที่ 4.26 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.00001$	56
รูปที่ 4.27 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.000025$	57
รูปที่ 4.28 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.00005$	57
รูปที่ 4.29 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.00005$ และ $K_i = 1e-6$	58
รูปที่ 4.30 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.00005$ และ $K_i = 1e-7$	58
รูปที่ 4.31 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.00005$ และ $K_i = 1e-8$	59
รูปที่ 4.32 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.0001$	59
รูปที่ 4.33 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.0005$	60
รูปที่ 4.34 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.001$	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองอุปกรณ์วัดระดับน้ำ	41
ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลผลการทดลองวาล์วควบคุม	43
ตารางที่ 4.3 แสดงค่า $K_p$ และ $K_i$ ที่ใช้ในการทดลองที่ 1	45
ตารางที่ 4.4 แสดงค่า $K_p$ และ $K_i$ ที่ใช้ในการทดลองที่ 2	56



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจในการทำปริญญานิพนธ์

ระบบควบคุมอัตโนมัติเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ซึ่งอาศัยพื้นฐานของการวัด และการควบคุมเป็นหลัก โดยมีจุดประสงค์เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตให้ได้ผลผลิตสูงสุด และคุณภาพดีที่สุด โดยใช้ต้นทุนต่ำที่สุด ลดการใช้พลังงานและลดจำนวนของอุปกรณ์ รวมทั้งการประหยัดวัตถุดิบ การนำระบบควบคุมอัตโนมัติมาใช้ในกระบวนการผลิตทำให้ลดการใช้แรงงานของผู้ปฏิบัติงานด้วย หลักการของระบบควบคุมอัตโนมัติส่วนใหญ่จะใช้การป้อนกลับจากค่าที่วัดได้มาควบคุมกระบวนการ เรียกว่าการควบคุมป้อนกลับ (Feedback Control) กล่าวได้ว่าระบบควบคุมอัตโนมัติคือการควบคุมปริมาณผลผลิตของระบบให้ได้ตามค่าที่ต้องการ โดยการอาศัยปริมาณการวัดจากผลผลิตที่ได้แล้ว นำมาเทียบกับค่าที่ต้องการ โดยผ่านระบบป้อนกลับ

ในอุตสาหกรรมการผลิตได้นำเอาระบบควบคุมอัตโนมัติในแบบต่างๆมาใช้ในกระบวนการผลิตมานานแล้ว โดยเฉพาะระบบควบคุมอัตโนมัติที่ใช้ตัวควบคุมแบบ PID เนื่องจากรูปแบบของตัวควบคุมแบบ PID เป็นรูปแบบที่สามารถควบคุมกระบวนการต่างๆได้อย่างกว้างขวาง ไม่ว่าจะการตอบสนองของกระบวนการนั้นจะเร็วหรือช้าอย่างไรก็ตาม ตัวควบคุมแบบ PID ก็สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้เป็นอย่างดี

ในโรงงานอุตสาหกรรมมีกระบวนการต่างๆมากมาย ซึ่งการควบคุมกระบวนการเหล่านี้จะใช้ตัวควบคุมหลายๆตัวมาควบคุมกระบวนการหลายๆส่วน ทำให้การแยกแยะกระบวนการเพื่อศึกษาเป็นไปด้วยความยากลำบาก ซึ่งอาจเกิดการผิดพลาดได้ง่าย อีกทั้งยังให้ผลตอบสนองที่ล่าช้าในกรณีที่กระบวนการมีขนาดใหญ่ และทางภาควิชามีแบบจำลองกระบวนการเพื่อให้ศึกษาน้อย ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่จะจัดทำแบบจำลองกระบวนการเพิ่มเติม โดยจะจำลองกระบวนการควบคุมระดับน้ำและอัตราการไหลขนาดเล็กเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาและให้ผลตอบสนองที่รวดเร็ว อีกทั้งกระบวนการที่สร้างขึ้นมาสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก เพื่อให้ผู้ที่เริ่มศึกษามีความรู้ความเข้าใจในก่อนที่จะเริ่มปฏิบัติงานกับกระบวนการที่มีความซับซ้อนต่อไป

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาและออกแบบระบบควบคุมระดับน้ำและอัตราการไหลใน ถังน้ำแนวตั้ง

1.2.2 ชุดทดลองนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนในวิชา Automatic control และ Mechanical measurement เพื่อให้นักศึกษาเข้าใจในทฤษฎีมากยิ่งขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์

- 1.3.1 ระบบควบคุมที่ใช้ในการทดลองคือระบบควบคุมพีไอดี
- 1.3.2 ชุดทดลองนี้ออกแบบและสร้างเป็นระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียว
- 1.3.3 การควบคุมอัตราการไหลของน้ำจะกระทำเฉพาะทางเข้าถึงน้ำ โดยให้อัตราการไหลออกของน้ำในถังคงที่

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาการทำงานและออกแบบกระบวนการโดยรวม
- 1.4.2 ศึกษาการทำงาน และการใช้งานของเครื่องควบคุมที่มีใช้ในปัจจุบัน
- 1.4.3 ออกแบบกระบวนการ ในส่วนของฮาร์ดแวร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้
  - 1.4.3.1 แท็งก์น้ำจำนวน 2 แท็งก์ต่อกันแบบ Interact
  - 1.4.3.2 นำบอลวาล์วที่มีโดยทั่วไปมาใช้ในการควบคุมการไหลโดยสร้าง Actuator ขึ้นเอง
  - 1.4.3.3 ศึกษา และเลือก ใช้ Pressure Sensor วัดความดันสำหรับวัดระดับของเหลว
  - 1.4.3.4 สร้างชุดทดลอง
  - 1.4.3.5 ศึกษาและออกแบบกระบวนการควบคุม โดยใช้โปรแกรม LabVIEW เป็นตัวประมวลผล
  - 1.4.3.6 ทดสอบสมรรถภาพของกระบวนการควบคุม และตัวควบคุมที่สร้างขึ้น
  - 1.4.3.7 สรุปผลและทำการเขียนรายงานการจัดทำโครงการ พร้อมทั้งนำเสนอผลงาน

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เพื่อให้ชุดทดลองสามารถทำงานได้ตามขอบเขตของโครงการ
- 1.5.2 เพิ่มประสบการณ์ และความรู้ด้านต่างๆแก่นักศึกษา

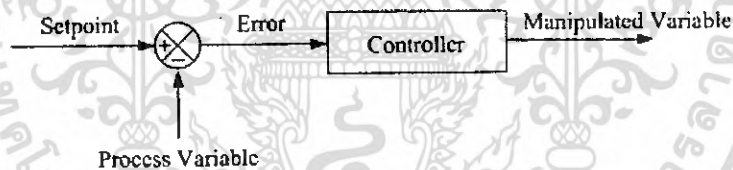
## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 การควบคุมกระบวนการอัตโนมัติ

การควบคุมกระบวนการแบบอัตโนมัติ เป็นการควบคุมที่มีการรับค่าตัวแปรกระบวนการ (Process variable) เช่น อุณหภูมิ (Temperature), ความดัน (Pressure), อัตราการไหล (Flows) และค่าตำแหน่งต่างๆ (Composition) ในการควบคุมกระบวนการให้เป็นผลสำเร็จได้นั้น เราต้องหาความคลาดเคลื่อน (Error) โดยการวัดค่าตัวแปรเหล่านี้ แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้ (Set point) แล้วตัดสินใจว่าทำอย่างไรกับค่าความแตกต่างนี้เพื่อให้ได้ค่าที่เราต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยผู้ปฏิบัติการ (Operator) แต่ในโรงงานส่วนใหญ่แล้วจะมีตัวแปรต่างๆเหล่านี้มากมาย ทำให้ต้องใช้คนมากตามไปด้วย

ในการทำงานเช่นนี้ ระบบควบคุมดังรูปที่ 2.1 จะต้องได้รับการออกแบบมาให้มีส่วนประกอบที่สำคัญสำหรับการควบคุม 4 อย่างดังนี้

1. ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) เป็นอุปกรณ์ตัวแรก (Primary element)
2. ตัวส่งผ่านสัญญาณ (Transmitter) เป็นอุปกรณ์ตัวที่สอง (Secondary element)
3. ตัวควบคุม (Controller) เป็นสมองของระบบควบคุม
4. อุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย (Final control element) เป็นตัวส่งสัญญาณไปที่ระบบ



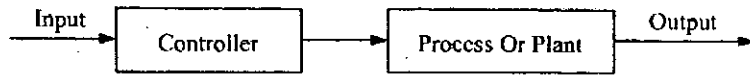
รูปที่ 2.1 แสดงการควบคุมกระบวนการ

การปฏิบัติการ 3 อย่างที่ต้องมีในระบบควบคุมคือ

1. การวัด (Measurement) เป็นการวัดค่าตัวแปรที่ถูกควบคุม ที่กระทำโดยตัวตรวจจับสัญญาณ และตัวส่งผ่านสัญญาณ
2. การตัดสินใจ (Decision) ขึ้นอยู่กับการวัดตัวควบคุมต้องตัดสินใจว่าจะทำอย่างไรเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรตามที่เรากำหนด
3. การกระทำ (Action) เป็นผลงานการตัดสินใจของตัวควบคุมจะต้องถูกกระทำโดยอุปกรณ์ควบคุมตัวสุดท้าย

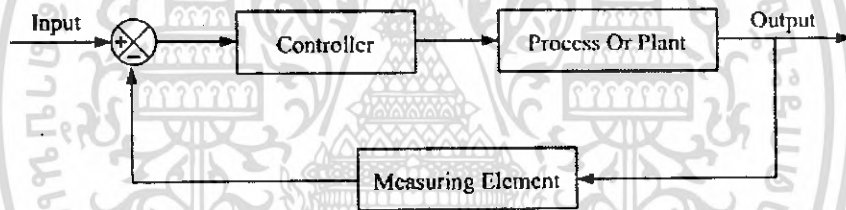
ระบบควบคุมอาจแบ่งอย่างง่าย ๆ ออกเป็น 2 แบบคือ ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop) และระบบควบคุมแบบปิด (Closed loop)

ระบบควบคุมแบบเปิด (Open loop) เป็นระบบควบคุมเอาต์พุตของระบบ จะไม่มีผลต่อการควบคุม นั่นคือเอาต์พุตของระบบจะไม่ถูกส่งกลับหรือป้อนกลับเพื่อมาเปรียบเทียบกับอินพุตดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงระบบควบคุมแบบ Open Loop

ระบบควบคุมแบบปิด (Closed loop) เป็นระบบควบคุมซึ่งสัญญาณเอาต์พุตจะส่งผลโดยตรงต่อการควบคุม ดังนั้นระบบควบคุมแบบปิด ก็คือระบบควบคุมแบบป้อนกลับนั่นเอง สัญญาณค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งเป็นสัญญาณความแตกต่างระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณการป้อนกลับ เพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยลง และทำให้เอาต์พุตของระบบมีค่าที่ต้องการ สัญญาณการป้อนกลับนี้อาจเป็นสัญญาณจากเอาต์พุตโดยตรง หรือเป็นสัญญาณที่อยู่ในรูปของฟังก์ชันก็ได้ ระบบควบคุมแบบปิดแสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงระบบควบคุมแบบปิด

## 2.2 ประเภทของการควบคุม

### 2.2.1 การควบคุมแบบไปข้างหน้า (Feed forward control)

จุดประสงค์ของการควบคุมแบบไปข้างหน้า คือ การวัดการรบกวนกระบวนการและการชดเชยให้กับมัน ก่อนที่ค่าตัวแปรที่ถูกควบคุมจะเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ตั้งไว้ ถ้าหากเราประยุกต์ใช้ได้ ค่าตัวแปรที่ถูกควบคุมจะไม่เบี่ยงเบนไปจากค่าที่ตั้งไว้ และนำมาประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้อง ค่าตัวแปรที่ถูกควบคุมจะไม่เบี่ยงเบนไปจากค่าเป้าหมาย

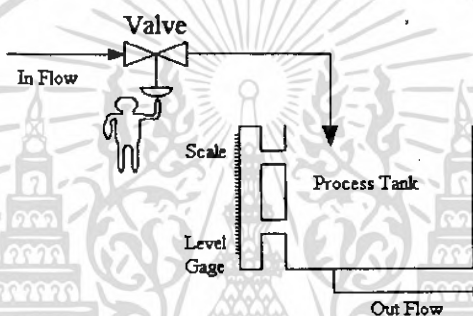
### 2.2.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feed back control)

การควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นวิธีการที่ง่ายที่ชดเชยการรบกวนกระบวนการทุกชนิด ตัวรบกวนกระบวนการทุกๆตัวจะมีผลต่อตัวแปรที่ถูกควบคุมและเมื่อค่าตัวแปรเบี่ยงเบนไปจากค่าที่ตั้งไว้ ตัวควบคุมจะเปลี่ยนแปลงค่าเอาต์พุตให้กลับเข้าสู่ค่าเป้าหมาย แต่มันสามารถชดเชยการรบกวนได้เพียงหลังจากที่ตัวแปรที่ถูกควบคุม เบี่ยงเบนไปจากค่าที่ตั้งไว้แล้วเท่านั้น นั่นคือ การรบกวนจะกระจายไปยังกระบวนการทั้งหมด ก่อนที่การควบคุมแบบป้อนกลับจะชดเชยให้มัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

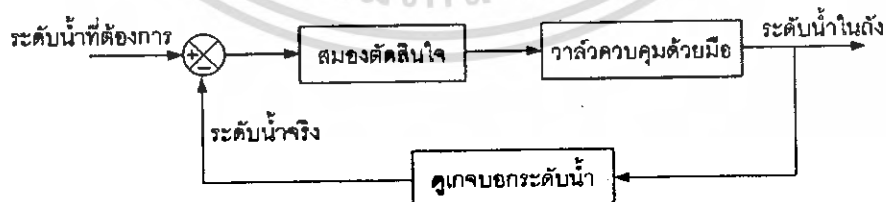
### 2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการควบคุมแบบป้อนกลับ

โดยทั่วไปเป้าหมายของระบบควบคุมกระบวนการต่างๆ ในอุตสาหกรรมนั้น คือการรักษาปริมาณทางฟิสิกส์ อันได้แก่ ค่าอุณหภูมิ (Temperature), ค่าความดัน (Pressure), ค่าอัตราการไหล (Flow rate), ค่าระดับ (Levels), ค่าความเป็นกรดค่าด่าง (PH) และค่าอื่นๆ ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมาย (Set point) หรือค่าที่ต้องการมากที่สุด แม้ว่าสภาวะการทำงานและสภาพแวดล้อมอาจเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาซึ่งการควบคุมที่ดีย่อมเริ่มจากการเลือกแบบการควบคุมที่เหมาะสมในอคิด การควบคุมกระบวนการต่างๆ จะเลือกใช้การควบคุมแบบง่ายๆ ด้วยมือ (Manual control) ซึ่งอาศัยพนักงานควบคุม (Operator) ซึ่งจะคอยทำหน้าที่เกี่ยวกับการตรวจวัดและปรับแต่งการควบคุม ผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ ยกตัวอย่างเช่น การควบคุมระดับน้ำในถังดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการควบคุมระดับน้ำในถังแบบ Manual Control

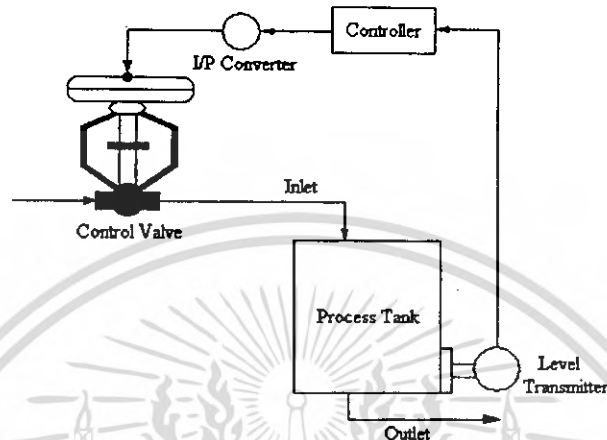
จากรูป การควบคุมระดับน้ำในถังจะอาศัยพนักงานคอยทำหน้าที่ในการตรวจวัดระดับน้ำในถังว่าได้ที่ต้องการหรือไม่โดยใช้สายตาจากเกจวัดระดับ (Level gauge) จากนั้นสมองจะตัดสินใจสั่งการให้มือทำหน้าที่เปิด หรือ ปิดวาล์ว เพื่อให้ระดับน้ำเป็นไปตามที่ต้องการ ซึ่งขั้นตอนของการควบคุมสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการควบคุมระดับน้ำในถังแบบ Manual Control

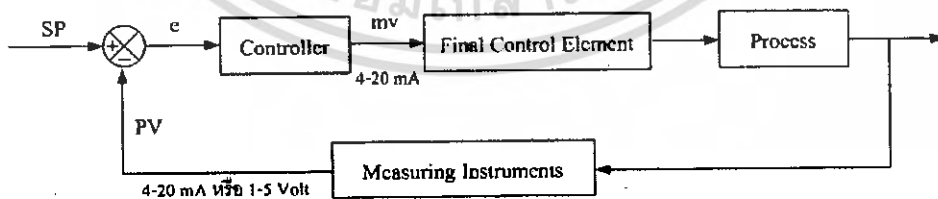
จะเห็นว่าการควบคุมแบบนี้ จำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์ และความชำนาญของพนักงานผู้ควบคุมเป็นหลัก ซึ่งในการปฏิบัติงานตามความจริงแล้ว มนุษย์ หรือพนักงานควบคุมนั้น ไม่สามารถทำงานให้ได้ดีเท่ากันตลอดเวลา จึงทำให้ประสิทธิภาพของการควบคุมลดลง ดังนั้นปัจจุบัน โรงงานที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการการควบคุมที่มีความแม่นยำและประสิทธิภาพสูง จำเป็นต้องนำการควบคุมแบบอัตโนมัติ (Automatic Control) มาใช้งาน ซึ่งจากกระบวนการควบคุมระดับน้ำที่เป็นแบบ Manual Control ตามรูปที่ 2.4 ถ้านำมาทำการควบคุมอัตโนมัติ สามารถแสดงการควบคุมได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการควบคุมระดับน้ำในถังด้วยการควบคุมแบบอัตโนมัติ

จากรูปที่ 2.6 ระดับน้ำในถังกระบวนการจะถูกวัดโดยเครื่องวัดระดับ (Level transmitter) และส่งสัญญาณในการวัดให้กับเครื่องควบคุม (Controller) ซึ่งเครื่องควบคุมจะนำไปใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจสั่งให้วาล์วควบคุมเปิดหรือปิด เพื่อให้ระดับน้ำเป็นไปตามต้องการ โดยเครื่องควบคุมจะเป็นตัวที่ทำหน้าที่หลักในการคำนวณหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมตามกฎเกณฑ์การควบคุม (Control law) ที่พนักงานได้กำหนดไว้ล่วงหน้า สำหรับระบบควบคุมอัตโนมัติที่เราพบเห็นกันอยู่บ่อยๆ ในโรงงานอุตสาหกรรมคือ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control system) โดยรูปแบบการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรมแบบป้อนกลับ โดยทั่วไปแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบป้อนกลับโดยทั่วไป

จากบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 2.7 จะสังเกตเห็นว่า ระบบควบคุมทางอุตสาหกรรมแบบป้อนกลับทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์ 4 ส่วนคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 อุปกรณ์วัด (Measuring Instruments)

อุปกรณ์วัด หมายถึง ตัวตรวจจับสัญญาณ(Sensor), ตัวทรานสดิวเซอร์(Transducer), หรืออุปกรณ์แปลง (Transmitter) หรือเครื่องวัดสัญญาณอื่นๆ ในกระบวนการเพื่อนำสัญญาณที่ได้ไปใช้เป็นตัวแปรในการควบคุม โดยสัญญาณขาออกของอุปกรณ์วัดตามทั่วไปจะเป็นสัญญาณมาตรฐานทางอุตสาหกรรม เช่น สัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์ สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 0 ถึง 5 โวลต์ หรือสัญญาณลมขนาด 3-15 ปอนด์/ตารางนิ้ว เป็นต้น

อุปกรณ์วัดจะเป็นตัววัดปริมาณทางฟิสิกส์ เชิงกล และเชิงไฟฟ้าของตัวแปรกระบวนการ ส่วนอุปกรณ์ส่งสัญญาณจะทำหน้าที่เปลี่ยนปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นสัญญาณที่สามารถส่งออกมา ซึ่งสัญญาณที่ได้นั้นจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปร ในกระบวนการ อุปกรณ์วัดและอุปกรณ์ส่งสัญญาณจะมีทอมสำคัญประกอบกัน 3 ทอมคือ พิกัด (Range) ของเครื่องมือวัด ถูกกำหนดโดยค่าสูงสุด และค่าต่ำสุดของตัวแปรกระบวนการที่ทำการวัด โดยพิจารณาอุปกรณ์วัดและส่งสัญญาณที่ถูกเปรียบเทียบไว้แล้ว ให้มีการวัดระหว่าง 20 psig และ 50psig นั่นคืออุปกรณ์วัดแรงดัน และส่งสัญญาณดังกล่าวมีพิกัด 20 ถึง 50 psig ช่วงการวัด (Span) ของเครื่องมือวัด คือความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของพิกัด (Range) นั่นคืออุปกรณ์วัดแรงดันและส่งสัญญาณนี้มีช่วงการวัดเท่ากับ 30 psig ส่วนซีโร (Zero) ของเครื่องมือวัดคือค่าต่ำสุดของพิกัดซึ่งมีค่า 20 psig

ในบางครั้งที่เป็นสิ่งสำคัญ สำหรับการวิเคราะห์ระบบที่จะรู้ถึงพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งบอกในพฤติกรรมของอุปกรณ์วัดและส่งสัญญาณ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การควบคุมกระบวนการต่างๆทางอุตสาหกรรมของอุปกรณ์วัดและส่งสัญญาณแบบอัตโนมัติ นั้น เป็นการรักษารูปแบบในการทำงานทางฟิสิกส์ ซึ่งรูปแบบการควบคุมจะใช้ตัวควบคุมที่ทำงานด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นเครื่องควบคุมกระบวนการแทนมนุษย์ ดังนั้น ในการทำงานจึงจะเป็นต้องมีเครื่องมือหรืออุปกรณ์วัดที่ทำหน้าที่ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการต่างๆที่ควบคุม โดยสัญญาณที่วัดได้จะนำไปใช้ในการตัดสินใจสร้างลักษณะควบคุมไปที่เหมาะสมต่อไป อุปกรณ์เหล่านี้อาจจะได้แก่ ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor), ทรานสดิวเซอร์ (Transducer), หรืออุปกรณ์วัดสัญญาณอื่นๆที่ทำหน้าที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการ หรือตัวแปรกระบวนการ และส่งสัญญาณที่วัดได้ให้กับตัวควบคุมเพื่อใช้เป็นเกณฑ์เลือกสัญญาณควบคุมที่เหมาะสม

ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) ในระบบอัตโนมัติใดๆตัวตรวจจับสัญญาณเป็นตัวเชื่อมอันดับแรกในสายงานของงานควบคุมเพื่อตรวจสอบดูว่า อะไรจะเกิดขึ้นเหมือนกับการตรวจสอบไม่ให้มีการหักเหไปจากข้อกำหนด

เครื่องมือวัด(Measuring instrument) คือการรวมตัวของตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) และตัวแสดงค่า (Indicator) การวัดสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ วิธีแรก คุณสมบัติทางฟิสิกส์บางประการ ของตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensors) สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยตรงหรือเปลี่ยนแปลงโดยให้เปรียบเทียบกับสิ่งที่เรารู้แล้วแต่ปรับค่าให้มีคุณรูปที่แท้จริงเหมือนกัน ในวิธีที่ 2 นี้กรรมวิธี ของการวัดเกี่ยวกับการกำหนดค่าที่แน่นอนให้เท่ากันระหว่างปริมาณค่า 2 ค่าที่คล้ายกัน

ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) ต้องมีพื้นฐานที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. ต้องรู้ว่าผลอะไรจะเกิดขึ้นเมื่อ ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) กำลังวัดปริมาณค่าอันหนึ่ง ในกรณีที่ดีที่สุด ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensors) ไม่ควรจะเปลี่ยนสถานะที่ดำรงอยู่ก่อนที่จะทำการวัด ในทางปฏิบัติจะกระทำได้ยากมาก

2. ตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) บางชนิดผลตอบสนองต่อคุณสมบัติอื่นเสียบมากกว่าสิ่งพื้นฐานที่ต้องการเช่น โวลท์มิเตอร์จะมีผลตอบสนอง (Response) ต่อค่าเฉลี่ย (Average) ของสัญญาณกระแสสลับหรือค่าพีค (Peak) ดังนั้นมีความสำคัญในการเลือกตรวจจับสัญญาณ (Sensor) จะต้องให้มั่นใจว่ามันจะมีผลตอบสนอง (Response) ต่อคุณสมบัติที่เราต้องการเท่านั้น

3. ความเร็วของผลตอบสนอง (Response) ซึ่งตัวตรวจจับสัญญาณ (Sensor) จะต้องตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนสถานะของกระบวนการ

### 2.3.2 ตัวควบคุม (Controller)

เป็นเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณควบคุม เพื่อทำหน้าที่ควบคุมและสั่งการด้วยการสร้างสัญญาณสำหรับควบคุมกระบวนการต่างๆให้ระบบหรือกระบวนการที่ต้องการจะควบคุม มีเอาต์พุตหรือให้เกิดผลตอบสนองเป็นไปตามต้องการ ซึ่งสัญญาณดังกล่าวจะเป็นไปตามกฎและรูปของการควบคุมที่ผู้ควบคุมได้เลือกและกำหนดไว้ล่วงหน้า ค่าเป้าหมายและตัวแปรของกระบวนการนั่นเอง

ปัจจุบันเครื่องควบคุมสามารถแบ่งตามโครงสร้างการทำงานได้ ชนิดคือ เครื่องควบคุมแบบนิวมติกส์ ที่ทำงานโดยใช้สัญญาณลม เครื่องควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์ทำงานโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์เชิงเส้น (Linear circuits) ในการสร้างสัญญาณควบคุม และเครื่องควบคุมแบบดิจิทัลทำงานโดยใช้วงจรตรรก (Logic circuits) หรือไมโคร โปรเซสเซอร์สร้างสัญญาณควบคุม

### 2.3.3 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (Final control element)

อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ปรับสถานะของกระบวนการ ด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรกระบวนการ ตามคำสั่งหรือสัญญาณควบคุมที่ได้รับจากตัวควบคุม อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายนั้นมีอยู่หลายอย่างด้วยกัน เช่น วาล์วควบคุม (Control valve) ในบางครั้งที่เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ระบบที่จะรู้ถึงพารามิเตอร์ที่เป็นตัวบ่งบอกในพฤติกรรมของอุปกรณ์วัดและส่งสัญญาณ ในทอมของอัตราขยายนั้นเป็นสิ่งง่ายมากถ้ารู้เพียงช่วงของการวัดโดยพิจารณาอุปกรณ์วัดแรงดัน และส่งสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพิคเป็น 0 ถึง 200 psig จากอัตราขยายนั้นได้ถูกกำหนดให้เป็นการเปลี่ยนแปลงของทางออกหรือตัวแปรผลตอบสนองหารด้วยการเปลี่ยนแปลงของทางเข้าหรือฟังก์ชันออกในกรณี ทางออกของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์คือ สัญญาณกระแส 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์

วาล์วควบคุมโดยทั่วไปแล้วใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์ควบคุมขั้นสุดท้าย จะพบในกระบวนการที่ควบคุมอัตราการไหล วาล์วควบคุมมีการทำงานคล้ายกับตัวต้านทานการไหลที่ปรับค่าได้ (Variable Restriction) โดยการเปลี่ยนแปลงการเปิดปิดและจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณเพื่อควบคุมอัตราการไหล

### 2.3.4 กระบวนการ (Plant or Process)

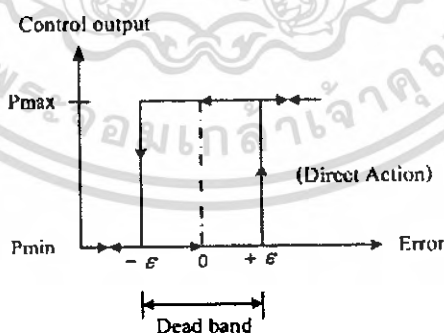
กระบวนการ หมายถึงระบบหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ที่ต้องการควบคุมให้มีสถานะเป็นไปตามต้องการเช่นกระบวนการเกี่ยวกับการควบคุมระดับของเหลว กระบวนการเกี่ยวกับการควบคุมอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งสถานะของกระบวนการแสดงด้วยตัวแปรกระบวนการ (Process variable : Pv)

การควบคุมแบบอัตโนมัติจากรูปที่ 2.7 มีขั้นตอนการทำงานคือ อุปกรณ์วัดหรือเครื่องวัดจะวัดค่าตัวแปรกระบวนการ (Pv) เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และระดับของของเหลว เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงหรือค่าเป้าหมาย (Sp) และตัวควบคุมจะนำค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ในการควบคุมมาใช้ในการคำนวณ เพื่อหาสัญญาณควบคุมที่เหมาะสมที่จะไปควบคุมกระบวนการให้เข้าสู่ค่าเป้าหมายที่ต้องการ จะเห็นว่าก่อนที่จะทำการควบคุมกระบวนการใดๆนั้น จะต้องศึกษาถึงชนิดและการทำงานของอุปกรณ์วัด ตัวควบคุมและอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย รวมถึงวิธีการปรับแต่งต่างๆเสียก่อน เพื่อที่จะได้เลือกใช้อุปกรณ์และรูปแบบของการควบคุมได้อย่างถูกต้องในอันที่จะทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพสูงสุด

## 2.4 รูปแบบการควบคุม

### 2.4.1 ฏิกิริยาการควบคุมแบบ On-Off

การควบคุมแบบ เป็นการควบคุมที่ง่ายที่สุดและนิยมใช้ในการควบคุมกระบวนการที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรงสูง โดยจะพบเห็นค่อนข้างมากในอุปกรณ์ที่ใช้ภายในบ้าน เช่น ถ่าน้ำร้อน หรือการควบคุมระดับน้ำในแทงก์น้ำ เป็นต้น โดยการควบคุมจะทำงานเพียง สถานะ คือ เปิด(100%) กับปิด (0%) ลักษณะของระบบควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงฏิกิริยาการควบคุมแบบ ON-OFF

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่าถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าค่าวิกฤต ( $+\epsilon$ ) ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 0% เป็น 100% เมื่อค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่าวิกฤต ( $-\epsilon$ ) ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมจะเปลี่ยนจาก 100% เป็น 0% ค่าเอาต์พุตที่อยู่ในช่วงเดธแบนด์ (Dead band) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจจะเป็นผลมาจากการเสียดทานที่ไม่ได้คาดไว้ก่อน หรือบางครั้งก็จำเป็นต้องทำให้เกิดช่วงเขตแบนด์ขึ้นเพื่อป้องกันการ On-Off บ่อยเกินไปอันจะทำให้อุปกรณ์ควบคุม หรือกระบวนการ ได้รับความเสียหาย แต่ช่วงเขตแบนด์นี้ต้องไม่กว้างนัก เพราะจะทำให้ค่าความเที่ยงตรงของกระบวนการควบคุมลดลง กริยาการควบคุมแบบ On-Off สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$U(t) = \begin{cases} 0\% & , e < -\varepsilon \\ 100\% & , e > +\varepsilon \end{cases} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $U(t)$  = สัญญาณควบคุมหรือเอาต์พุทของตัวควบคุม  
 $e(t)$  = ค่าความคลาดเคลื่อน  
 $\varepsilon$  = ของค่าเขตแบนด์

#### 2.4.2 กริยาการควบคุมแบบ Proportional (P)

กริยาการควบคุมแบบ Proportional นั้น เป็นการควบคุมแบบเป็นสัดส่วน กล่าวคือค่าเอาต์พุทที่ได้ออกมาจะเป็นสัดส่วนกับค่าอินพุทที่รับมาจากกระบวนการ หมายถึง ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากขึ้น ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมก็จะมีค่ามากขึ้นตาม และถ้าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยลง ค่าเอาต์พุทของตัวควบคุมก็จะมีค่าน้อยลงตาม ตามความสัมพันธ์

$$\text{output} \propto \text{input} \quad (2.2)$$

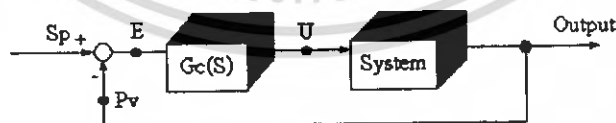
โดย  $U$  คือ Output ที่ออกจากตัวควบคุม

$E$  คือ Input ที่ออกจากตัวควบคุม

จะได้  $U \propto E$  (2.3)

โดย  $K_p$  คือ ค่าคงที่ เรียกว่า อัตราขยาย (Proportional Gain)

$$U = K_p E \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบทั่วไปที่มีตัวควบคุม

จากความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.9 จะได้ว่า

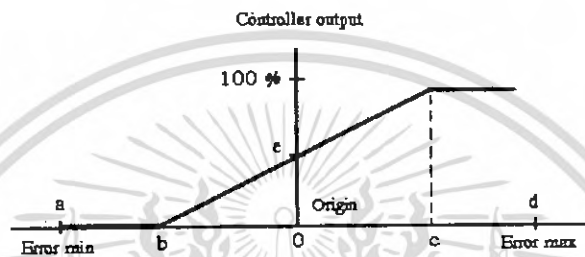
$$G_c = U/E \quad (2.5)$$

$$G_c = K_p \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในที่นี้อินพุตที่รับมาจะเป็นค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของกระบวนการ ส่วนค่าเอาต์พุตที่ส่งออกไปนั้น จะเป็นสัญญาณ ไปป้อนให้กับระบบทำงานต่อไป

จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.10 โดยแกนอนเป็นค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ส่วนแกนตั้งคือ ค่าตั้งที่ออกจากตัวควบคุม จะพบว่าเมื่อค่า Error (แกนอน) มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่าตั้งที่ออกจากตัวควบคุม (แกนตั้ง) ก็จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนตามกัน จะสังเกตได้ว่าแม้มีค่า Error เป็นศูนย์ค่าตั้งที่ออกจากตัวควบคุมกลับไม่ได้เป็นศูนย์ด้วยเนื่องจากโดยปกติตัวควบคุมจะต้องส่งเอาต์พุตออกมาสั่งการทิ้งไว้ค่าหนึ่งเสมอ



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต (Error) และเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบ P-Control

#### 2.4.3 กริยาการควบคุมแบบ Integral (I)

หลักการการทำงานของตัวควบคุมแบบ Integral Control คือการให้ค่าเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปเรื่อยๆ ถ้าค่าอินพุตยังไม่เป็นศูนย์ โดยค่าเอาต์พุตจะแปรผันตามค่าปฏิยานุพันธ์ของอินพุตตามสมการ

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

$$U(t) = K_I \int_0^t e(t) \quad (2.8)$$

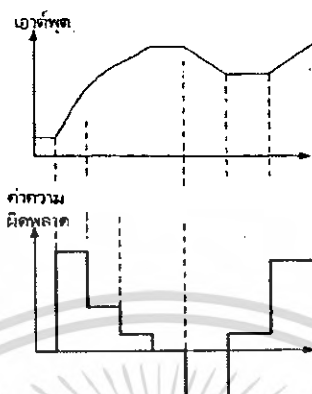
ทำการ Take Laplace จะได้

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

$$G_c(s) = \frac{K_I}{s} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ 2.10 ในตัวควบคุมแบบ I-Control นั้น Gain ของตัวควบคุมจะเท่ากับ  $K_I/s$  โดยที่  $K_I$  เป็นค่าคงที่ ตัวควบคุมแบบ Integral จะทำงานปรับค่าเอาต์พุตเพิ่มขึ้นหรือลดลงเรื่อยๆ ถ้าค่าจากกระบวนการยังไม่เท่ากับค่าที่ตั้งไว้หรือค่า Error ยังไม่เท่ากับศูนย์ วิธีนี้จะช่วยให้สามารถทำให้ค่าที่ออกจากกระบวนการมีค่าเท่ากับที่ตั้งไว้พอดี เป็นการแก้ค่า Error ได้หมด เมื่อดูจากรูปที่ 2.11 แสดงการตอบสนองของระบบจะเห็นว่าถ้าค่า Error ยังมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ ค่าเอาต์พุตก็จะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น หรือลดลงตามไปด้วย แต่โดยทั่วไปเราจะไม่ใช่ใช้วิธีควบคุมแบบ I-Control เพียงอย่างเดียวเนื่องจากระบบจะใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลานานในการเข้าสู่สถานะคงตัว (Steady State) จึงต้องใช้วิธี P-Control เข้ามาควบคุมร่วมด้วยเพื่อช่วยให้ระบบทำงานเร็วขึ้น



รูปที่ 2.11 แสดงกราฟตอบสนองตามเวลาเทียบกับระหว่าง อนุพัทธ์ของตัวควบคุม (รูปบน) และอนุพัทธ์ของตัวควบคุม Error (รูปล่าง)

#### 2.4.4 การควบคุมแบบ Derivative (D)

การควบคุมแบบ D เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การควบคุมแบบอัตราส่วน (Rate Action) โดยสัญญาณอนุพัทธ์ของตัวควบคุมจะขึ้นอยู่กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความคลาดเคลื่อนต่อเวลา จะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีโอกาสเป็นศูนย์ได้ และค่าอนุพัทธ์ก็สามารถเปลี่ยนแปลงให้มีค่าสูงขึ้น เมื่อความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกการกระทำดังกล่าวว่า อัตราการกระทำ (Rate Action) ดังสมการต่อไปนี้

$$U_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.11)$$

เมื่อ	$U_D(t)$	=	ค่าอนุพัทธ์ของตัวควบคุมแบบ Derivative
	$K_D$	=	อัตราขยายของตัวควบคุมแบบ Derivative
	$\frac{de(t)}{dt}$	=	ค่าความคลาดเคลื่อนที่เวลา t

การควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้ ส่วนมากแล้วจะใช้ร่วมกับตัวควบคุมตัวอื่นเช่น ใช้ร่วมกับการควบคุมเชิงสัดส่วน ซึ่งจะเรียกว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์หรือ พีดี (PD-Control) ถ้าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนใช้ร่วมกับอินทิกรัลจะเรียกว่า ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัล หรือพีไอ (PI-Control) และถ้าใช้ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วนและตัวควบคุมแบบอินทิกรัลเราจะเรียกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-Control)

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยให้เราปรับค่าความหน่วง (Damping) ในระบบที่จะควบคุมให้มีค่ามากขึ้น นั่นก็คือทำให้ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มขึ้น แต่โดยทั่วไปแล้วตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้จะไม่ทำให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์ได้ ในขณะที่เดียวกันจะเห็นว่าสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจากตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้เป็นสัญญาณที่เกิดจากการหาอนุพันธ์ของสัญญาณผิดพลาด ดังนั้นถ้าสัญญาณผิดพลาดนี้มีสัญญาณรบกวนมาก สัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาจากตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้จะกระเพื่อม (fractuate) ค่อนข้างมาก ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมของเราไม่มีเสถียรภาพได้

#### 2.4.5 กิริยาการควบคุมแบบ Proportional Integral Derivative (PID)

พีไอดี-คอนโทรล คือการรวมระหว่างการควบคุมแบบ พี-คอนโทรล ไอ-คอนโทรล และดี-คอนโทรล ดังนั้นสมการของ  $U_{PID}(t)$  สามารถหาได้ดังนี้

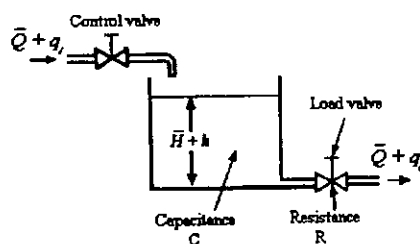
$$U_{PID}(t) = K_p e + K_I \int e dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $U_{PID}(t)$  = ค่าเอาต์พุตของตัวควบคุมแบบพีไอดี การคอนโทรลแบบพีไอดี สามารถแก้ข้อเฟสของปรีอปรอร์ชันแนลคอนโทรล และลดโอเวอร์ชูทที่จะทำให้เกิดการออสซิลเลทเนื่องจากอินทิกรัลคอนโทรล และจะให้ผลตอบสนองได้รวดเร็ว ตามคุณสมบัติของคิรีเวทิฟคอนโทรล

#### 2.5 ระบบเกี่ยวกับระดับของเหลว

ในการพิจารณาการไหลของของเหลว จะต้องคำนึงถึงค่าความต้านทาน (Resistance) และค่าความจุ (Capacitance) เพื่อที่จะอธิบายถึงคุณลักษณะทางพลศาสตร์ของระบบเกี่ยวกับระดับของของเหลว โดยจะพิจารณาจากการไหลผ่านท่อสั้นๆ ที่ต่ออยู่ระหว่างภาชนะบรรจุสองใบ ค่าความต้านทานการไหลของของเหลวจะกำหนดได้ว่าเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงของความแตกต่างระดับของเหลวในภาชนะบรรจุทั้งสอง อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหล นั่นคือ

$$R = \frac{\Delta H}{\Delta Q} \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.12 แสดงระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

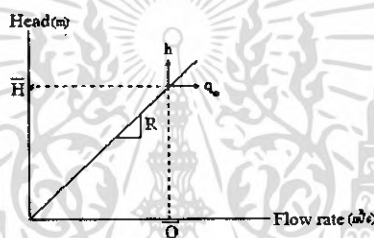
เมื่อพิจารณาระบบควบคุมระดับของเหลวในรูป 3 ในระบบนี้ของเหลวจะไหลผ่านวาล์วออกจากภาชนะ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลที่สถานะคงตัว (Steady state) และความสูง (Head) เมื่อกำหนดให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไหลควาล์วคงที่ จะกำหนดได้จาก

$$Q = K\sqrt{H} \tag{2.14}$$

และค่าความต้านทานของไหลควาล์ว (R) จะหาได้ดังนี้

$$R = \frac{dH}{dQ} = \frac{h}{q_i} \tag{2.15}$$

ในทางปฏิบัติเราจะไม่ทราบค่าของสัมประสิทธิ์การไหล (K) ดังนั้นการหาค่าของความต้านทานจึงอาจทำได้โดยการสร้างกราฟ ระหว่างระดับความสูงของน้ำและอัตราการไหลจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองและทำการวัดความชันของแผนภูมิแสดงตัวอย่างได้ในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภูมิความสัมพันธ์ระหว่างความสูงและอัตราการไหล

ค่าความจุ C (Capacitance) ของภาชนะบรรจุนี้กล่าวได้ว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของของเหลวที่สะสมอยู่เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความสูง นั่นคือ

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta H} \tag{2.16}$$

สังเกตว่าความจุ (Capacity; m<sup>3</sup>) นั้นต่างกับค่าความจุ m<sup>2</sup> ค่าความจุของภาชนะบรรจุจะมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของภาชนะบรรจุ ถ้าพื้นที่ หน้าตัดของภาชนะบรรจุมีค่าคงที่ ค่าความจุก็จะมีค่าคงที่ตลอดทุกระดับความสูง

เนื่องจากอัตราการไหลเข้าลบด้วยอัตราการไหลออกในช่วงเวลาสั้นๆ (dt) นั้นจะเท่ากับจำนวนของของเหลวที่ไปเพิ่มในภาชนะบรรจุ จึงได้ว่า

$$C \frac{dh}{dt} = q_i - q_o \tag{2.17}$$

จากนิยามของค่าความต้านทาน ความสัมพันธ์ระหว่าง q<sub>o</sub> และ h คือ

$$q_o = \frac{h}{R} \tag{2.18}$$

แทนค่า q<sub>o</sub> ลงในสมการ สมการดิฟเฟอเรนเชียลของระบบเมื่อ R มีค่าคงที่จึงเป็นดังนี้

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ 2.19 เป็นสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเมื่อกำหนดค่าให้ค่าอินพุตคือระดับความสูงของน้ำในถัง และเอาต์พุตคือค่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเข้าของน้ำในถัง หากเราต้องการควบคุมอัตราการไหลออกจากถังโดยให้เป็นอินพุตแทนระดับความสูงของน้ำในถัง จะสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่ได้ดังนี้

$$h = Rq_o \tag{2.20}$$

แทนค่า  $h$  ลงในสมการ 2.19 จะได้

$$RC \frac{dq_o}{dt} + q_o = q_i \tag{2.21}$$

สมการ 2.21 แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่รับอินพุตจากการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลออกจากถัง และให้เอาต์พุตออกมาควบคุมการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลเข้าของน้ำในถัง

### 2.6 Transfer Function

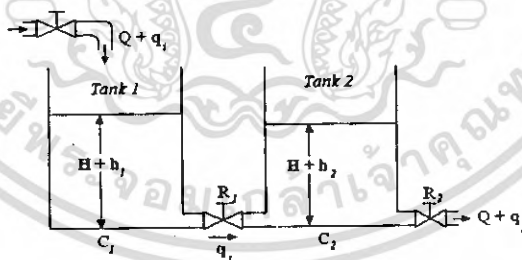
#### 2.6.1 เมื่อทำการทดลองแบบดังเดี่ยว

จากสมการ 2.19 เมื่อ Take Laplace และให้ initial condition มีค่าเท่ากับ 0 จะได้

$$RCsH(s) + H(s) = RQ_i(s) \tag{2.22}$$

$$\frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{R}{RCs + 1} \tag{2.23}$$

เมื่อ  $Q_i$  เป็น Input และ  $H$  เป็น Output



รูปที่ 2.14 แสดงระบบควบคุมระดับน้ำแบบสองถังที่มีปฏิริยาต่อกัน

#### 2.6.2 เมื่อทำการทดลองแบบสองถังที่มีปฏิริยาต่อกัน

จากรูป 5 และนิยามของค่าความต้านทานของวาล์ว จะได้ว่า

$$q_1 = \frac{h_1 - h_2}{R_1} \tag{2.24}$$

$$q_2 = \frac{h_2}{R_2} \tag{2.25}$$

จาก Continuity equation จะได้

$$C_1 \frac{dh_1}{dt} = q - q_1 \quad (2.26)$$

$$C_2 \frac{dh_2}{dt} = q_1 - q_2 \quad (2.27)$$

เมื่อแทนค่าสมการ 2.24 ลงในสมการ 2.26 จะได้

$$R_1 C_1 \frac{dh_1}{dt} = R_1 q - h_1 + h_2 \quad (2.28)$$

และแทนสมการ 2.24 และ 2.25 ลงในสมการ 2.27 จะได้

$$R_1 R_2 C_2 \frac{dh_2}{dt} = R_2 (h_1 - h_2) - h_2 R_2 \quad (2.29)$$

ทำการ Take Laplace และแทนค่าสมการ 2.29 ลงในสมการ 2.28 จะได้

$$\frac{H_1(s)}{Q(s)} = \frac{(R_1 C_2 R_2)s + (R_1 + R_2)}{(C_1 R_1 C_2 R_2)s^2 + (C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_1 R_2)s + 1} \quad (2.30)$$

และ

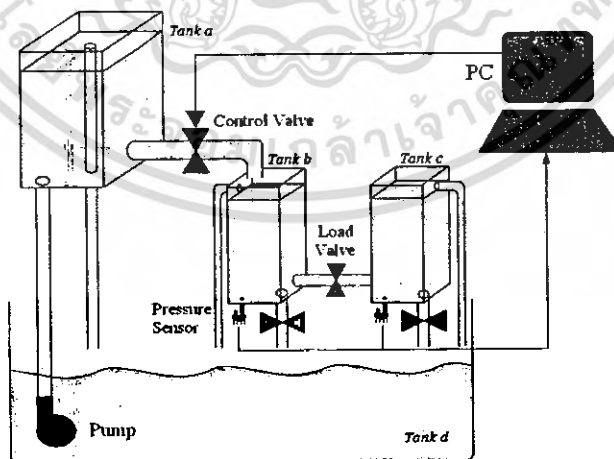
$$\frac{H_2(s)}{Q(s)} = \frac{R_2}{(C_1 R_1 C_2 R_2)s^2 + (C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_1 R_2)s + 1} \quad (2.31)$$

บทที่ 3

การคำนวณและการออกแบบสร้าง

ชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำโดยวิธีพีไอดี ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware) และส่วนของซอฟต์แวร์ (Software) ซึ่งส่วนของซอฟต์แวร์ คือ โปรแกรมแล็บวิว (LabVIEW) สำหรับควบคุมการทำงาน โดยรับค่าระดับความสูงของน้ำในถังที่ต้องการ และควบคุมค่าเป้าหมายให้เป็นไปตามที่ต้องการ และส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์นั้น ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ และวงจรต่างๆดังต่อไปนี้

1. ปั๊มน้ำขนาด 2,800 ลิตรต่อชั่วโมง
2. ถังน้ำขนาด 10 x 10 x 35 เซนติเมตร จำนวน 2 ใบ
3. ถังน้ำขนาด 15 x 15 x 35 เซนติเมตร จำนวน 1 ใบ
4. ถังน้ำขนาด 30 x 30 x 30 เซนติเมตร จำนวน 1 ใบ
5. เซนเซอร์วัดความดัน Motorola MPX 2101
6. อุปกรณ์แปลงสัญญาณ A/D และ D/A
7. คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
8. อุปกรณ์ขยายสัญญาณ
9. วาล์วขนาด 1/2 นิ้ว จำนวน 4 อัน
10. เฟืองขนาด 60 ฟัน จำนวน 1 ชิ้น
11. เฟืองขนาด 20 ฟัน จำนวน 1 ชิ้น
12. เฟืองขนาด 15 ฟัน จำนวน 1 ชิ้น



รูปที่ 3.1 แสดงชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำ

### 3.1 การออกแบบส่วนของฮาร์ดแวร์ (Hardware)

#### 3.1.1 ขนาดของถังน้ำ

เริ่มต้นกำหนดให้

1. ความสูงของถังพักน้ำด้านบน = 0.3 เมตร
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Load valve = 0.5 นิ้ว = 0.0127 เมตร
3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Control valve = 0.5 นิ้ว = 0.0127 เมตร

จากสมการหาอัตราการไหล

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

และ Control Valve เมื่อเปิดมากที่สุดจะมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ

$$\frac{\pi}{4} \times 0.5^2 \text{ ตารางนิ้ว} = \frac{\pi}{4} \times 0.0127^2 \text{ ตารางเมตร}$$

#### 3.1.2 การหาขนาดของถังพักน้ำด้านล่าง

ปริมาตร ถัง a =  $15 \times 15 \times 30 = 6750$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

ปริมาตร ถัง b =  $10 \times 10 \times 30 = 3000$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

ปริมาตร ถัง c =  $10 \times 10 \times 30 = 3000$  ลูกบาศก์เซนติเมตร

รวมปริมาตรทั้ง 3 ถัง เท่ากับ 12,750 ลูกบาศก์เซนติเมตร

ดังนั้นจะเลือกใช้ขนาดของถังพัก B =  $30 \times 30 \times 30$  เซนติเมตร

ซึ่งจะให้ปริมาตร 27,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร

#### 3.1.3 การหาขนาดปั๊ม

กำหนดให้ เมื่อระบบเริ่มสูบน้ำเข้าสู่ถัง A จะเต็มภายในเวลา 10 วินาที และท่อน้ำล้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง = 0.5 นิ้ว = 1.27 เซนติเมตร

จากปริมาตรถัง A = 6750 ลูกบาศก์เซนติเมตร - ปริมาตรของท่อน้ำล้น

$$= 6750 - \left( \frac{\pi}{4} \times 1.27^2 \times 30 \right) = 6712 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\therefore Q_m = \frac{6712}{10} = 671.2 \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$= 2416 \text{ l/hr}$$

$$\text{และ } Q_a = \sqrt{2 \times 9.81 \times 0.3} \times \left( \frac{\pi}{4} \times 0.00635^2 \right) = 7.68 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$= 27.71 \text{ l/hr}$$

ดังนั้น เลือกใช้ปั๊มที่มีขนาด 2800 ลิตรต่ออนาที ซึ่งมีขายในท้องตลาด

### 3.1.4 วาล์วควบคุม (Control Valve)

เนื่องจากวาล์วควบคุมที่มีขายทั่วไปจะเป็นแบบ Solenoid Valve ซึ่งให้กิริยาการควบคุมเป็นแบบ เปิด-ปิด (On-Off Control) ส่วนวาล์วควบคุมที่ให้กิริยาการควบคุมแบบ PID นั้นจะมีราคาแพงมาก จึงเลือกวิธีการสร้างวาล์วควบคุมขึ้นเอง โดยใช้ Ball Valve ที่มีขายโดยทั่วไป ขนาด 1/2 นิ้ว มาสร้างเป็น วาล์วควบคุม โดยสร้างชุด Actuator ขึ้นมา ซึ่ง Actuator จะประกอบไปด้วย motor ที่ใช้ในการขับเคลื่อน โดยรับสัญญาณควบคุมมาจากส่วน Controller โดยจะใช้ตัวต้านทานซึ่งสามารถปรับค่าได้มาใช้ในการวัด ตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปของวาล์ว

เนื่องจากการเปิด-ปิดของวาล์ว ใช้การหมุนเพียง 90 องศา ถ้าใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนวาล์วโดยตรง มอเตอร์ก็จะหมุนเพียง 90 องศาด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องใช้เฟืองมาช่วยทดรอบเพื่อให้อัตราการหมุนได้ จำนวนรอบมากขึ้น และการหมุนมีความนิ่งขึ้น ณ ตำแหน่งสมดุล โดยที่การหมุนของวาล์วก็ยังเป็น 90 องศาตามเดิม

จากสมการอัตราเฟืองทด

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{\theta_2}{\theta_1} \quad (3.2)$$

โดยที่  $N_1$  คือ จำนวนฟันของเฟืองที่ต่อกับมอเตอร์

$N_2$  คือ จำนวนฟันของเฟืองที่ต่อกับวาล์ว

$\theta_1$  คือ ระยะแทนที่เชิงมุม ของเพลามอเตอร์

$\theta_2$  คือ ระยะแทนที่เชิงมุม ของเพลาวาล์ว

ในกรณีนี้ต้องการให้อัตราการหมุนของวาล์ว 2 รอบ ต่อการหมุนของวาล์ว 1/2 รอบ และให้จำนวนฟันเฟืองของ มอเตอร์เท่ากับ 15 ฟัน จะได้

$$\frac{15}{N_2} = \frac{1/2}{1}$$

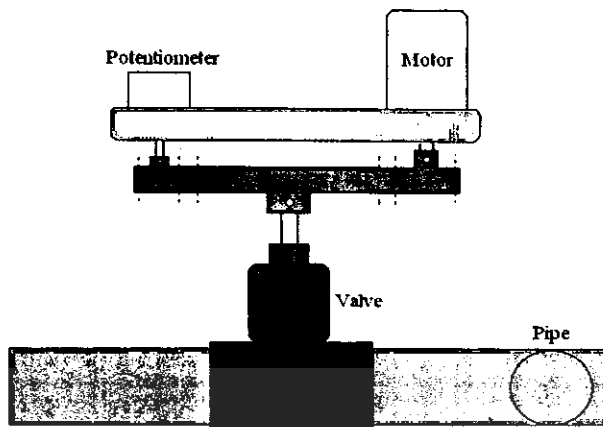
$$\therefore N_2 = \frac{(2)(15)}{1/2} = 60 \text{ ฟัน}$$

สำหรับตัวต้านทานปรับค่าได้จะสามารถหมุนได้ 270 องศา ในขณะที่วาล์วหมุนได้ 90 องศา เมื่อแทน ค่าลงในสมการ 3.2 จะได้

$$\frac{60}{N_3} = \frac{270}{90}$$

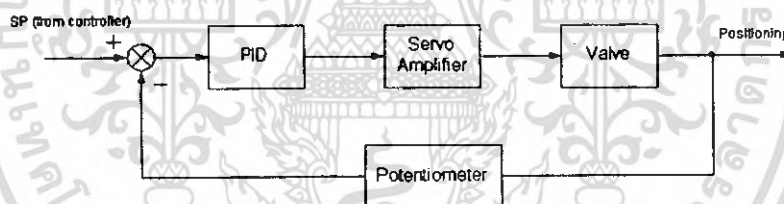
$$\therefore N_3 = \frac{(60)(90)}{270} = 20 \text{ ฟัน}$$

โดย  $N_3$  คือ จำนวนฟันของเฟืองที่ต่อกับตัวต้านทานปรับค่าได้



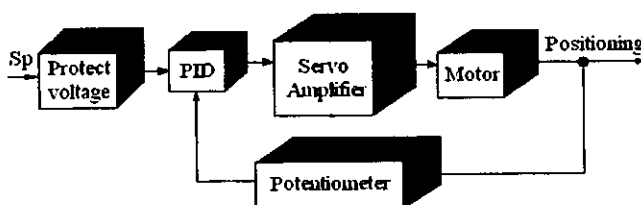
รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองของวาล์วควบคุม

ในส่วนของการควบคุมจะรับค่า Manipulate (mv) มาจากตัวควบคุม ซึ่งค่า mv จะเป็นค่า Set Point ของการควบคุมตำแหน่งของวาล์ว ค่าที่ได้จากวงจร PID จะส่งไปที่ขั้ววงจรเซอร์โวแอมพลิไฟร์ (Servo Amplifier) ชนิดควบคุมกระแสในการขับเคลื่อนมอเตอร์ และใช้ Potentiometer ในการวัดตำแหน่งของวาล์ว เพื่อนำมาป้อนกลับให้แก่การควบคุมตำแหน่งวาล์ว บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมวาล์ว แสดงดังในรูปที่ 3.3



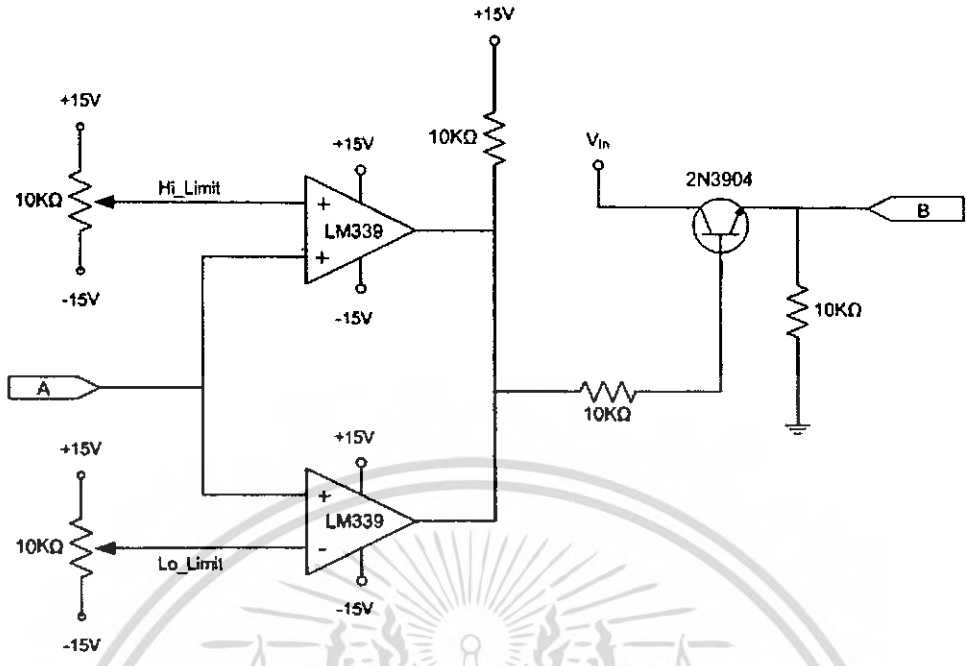
รูปที่ 3.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมวาล์ว

จากบล็อกไดอะแกรม วงจรที่สร้างขึ้นเพื่อควบคุม จะรับค่าแรงดันไฟฟ้า 1.5-4 V จากนั้นจึงผ่านวงจรวินโดว์ดีเทค ซึ่งจะป้องกันในช่วงแรงดันเกิน 4 โวลต์ หรือต่ำกว่า 1.5 โวลต์ ซึ่งถ้าแรงดันเกินหรือน้อยกว่า วงจรจะตัดสัญญาณที่จะเข้าสู่วงจร PID ถ้าสัญญาณอยู่ในช่วงที่กำหนดสัญญาณจะผ่านเข้าสู่วงจร PID สัญญาณที่ออกจาก PID จะผ่านไปยังวงจรเซอร์โวแอมพลิไฟร์ เพื่อขับเคลื่อนวาล์ว และใช้ Potentiometer เป็นตัวตรวจจับตำแหน่งของวาล์วเพื่อทำการป้อนกลับ

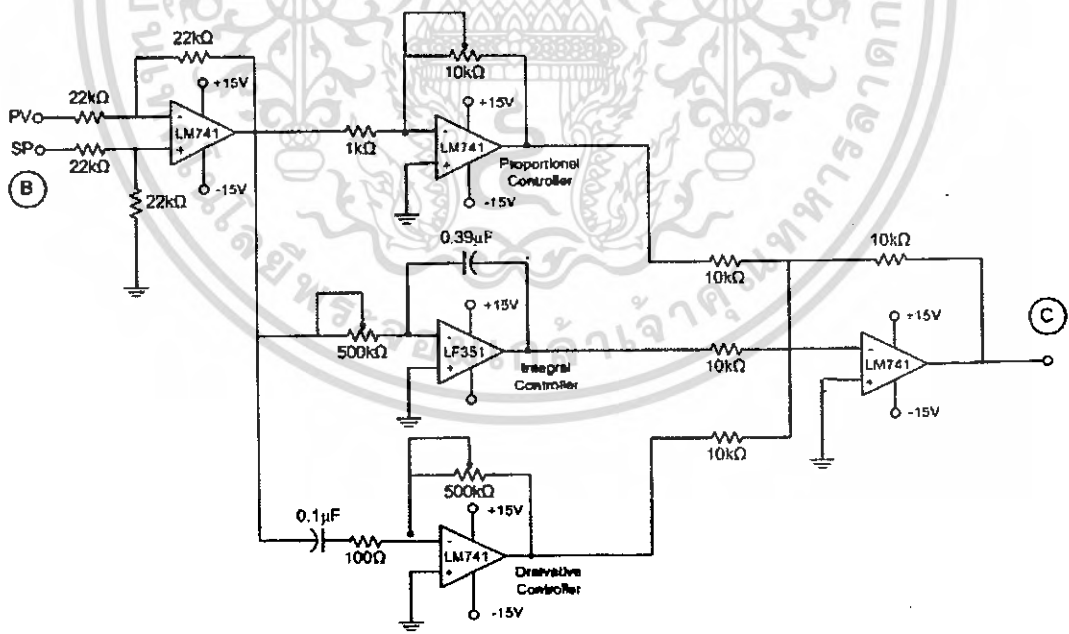


รูปที่ 3.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

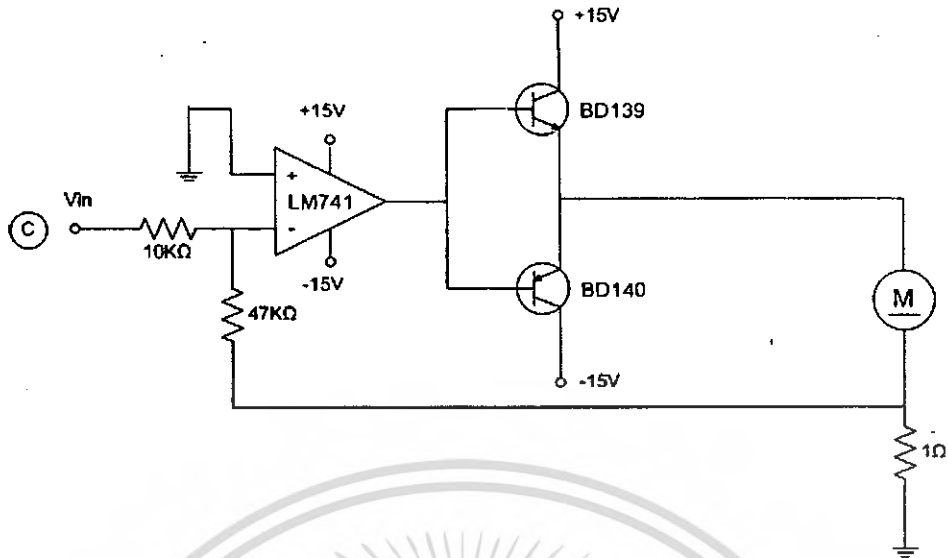


รูปที่ 3.5 แสดงวงจรวินโดว์ดีเทก (Window Detect)

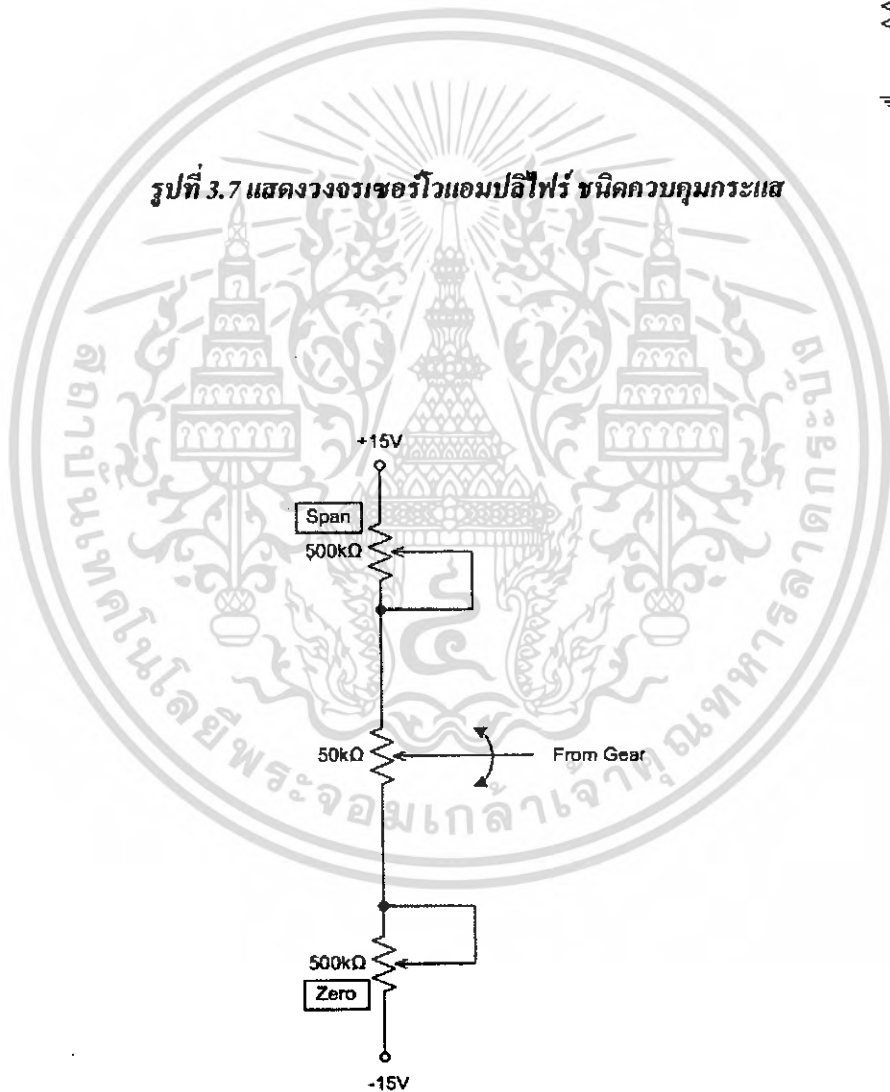


รูปที่ 3.6 แสดงวงจร PID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

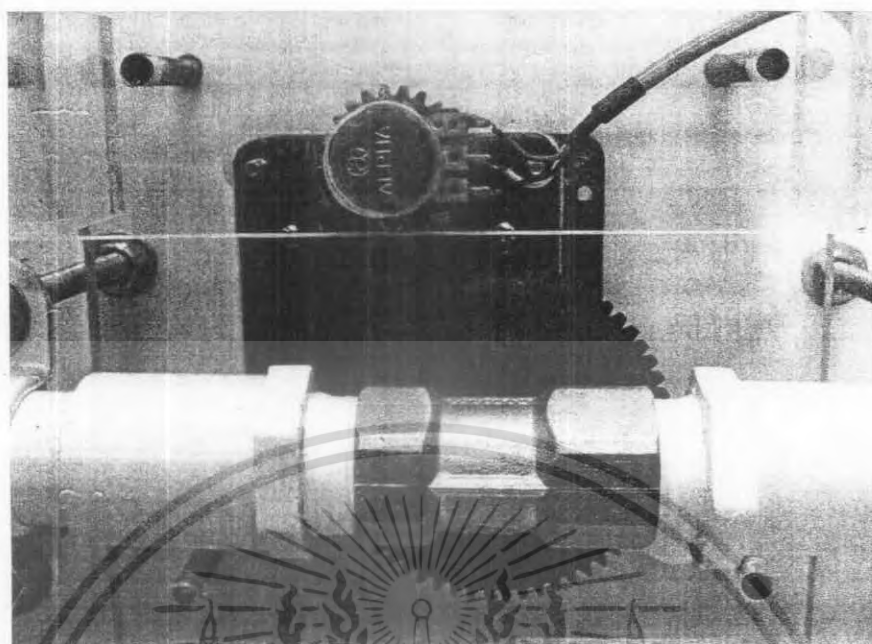


รูปที่ 3.7 แสดงวงจรเซอร์โวแอมป์ไฟร์ ชนิดควบคุมกระแส

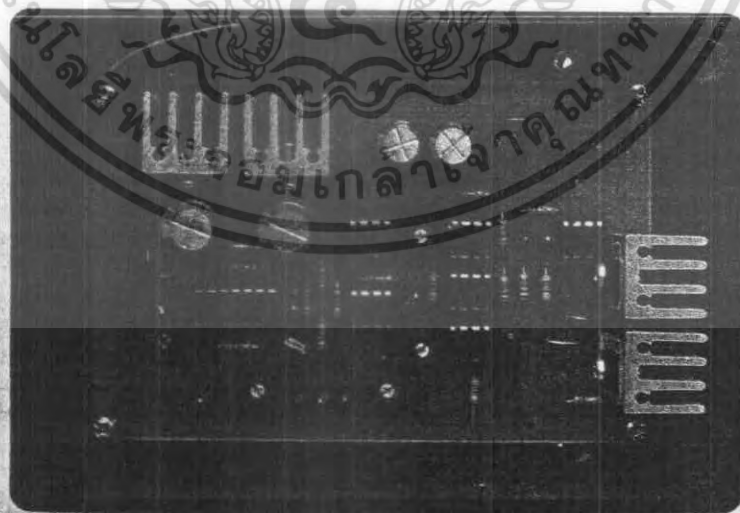


รูปที่ 3.8 แสดงวงจรปรับ Zero-Span ของ Potentiometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงวาล์วควบคุมที่สร้างขึ้น



รูปที่ 3.10 แสดงแผงวงจรของวาล์วควบคุมที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.5 ชุดอุปกรณ์การวัดระดับ

อุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับน้ำ เลือกใช้ Sensor รุ่น MPX 2101 DP CASE 344C-01 ของบริษัท Motorola ซึ่งสามารถวัดความดันได้สูงถึง 10 kPa โดยจะให้เอาต์พุต (Output) ออกมาในรูปของผลต่างของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ และ การนำค่าแรงดันที่ได้ไปใช้งานต้องผ่านวงจร Instrument Amplifier จากนั้นจึงผ่านวงจร Zero-Span เพื่อให้ได้แรงดัน 4-9 โวลต์

การต่อเซ็นเซอร์เพื่อใช้ในการวัดระดับน้ำจะใช้สายยางขนาด 6 มิลลิเมตร ที่ต่อมาจากด้านก้นถึงน้ำ ต่อเข้าทางด้านความดันสูงของตัวเซ็นเซอร์ และทางด้านความดันต่ำของตัวเซ็นเซอร์จะเปิดไว้เพื่อให้เจอกับบรรยากาศ เนื่องจากถึงน้ำที่ใช้ในกระบวนการเป็นถึงน้ำแบบเปิด จึงทำให้ความดันแตกต่างกันขึ้นอยู่กับระดับน้ำเพียงอย่างเดียว โดยความดันแตกต่างที่เข้าสู่ตัวเซ็นเซอร์คือ

$$\begin{aligned}\Delta P &= P_{high} - P_{low} \\ &= (\rho gh + P_{atm}) - P_{atm}\end{aligned}\quad (3.3)$$

$$\Delta P = \rho gh$$

โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของน้ำ 1000 kg/cm<sup>3</sup>

$g$  คือ แรงโน้มถ่วงโลก 9.81 m/s<sup>2</sup>

$h$  คือ ระดับน้ำที่วัด m.

$\Delta P$  คือ ความดันแตกต่าง kPa

รูปที่ 3.11 แสดง Sensor ที่ใช้งาน

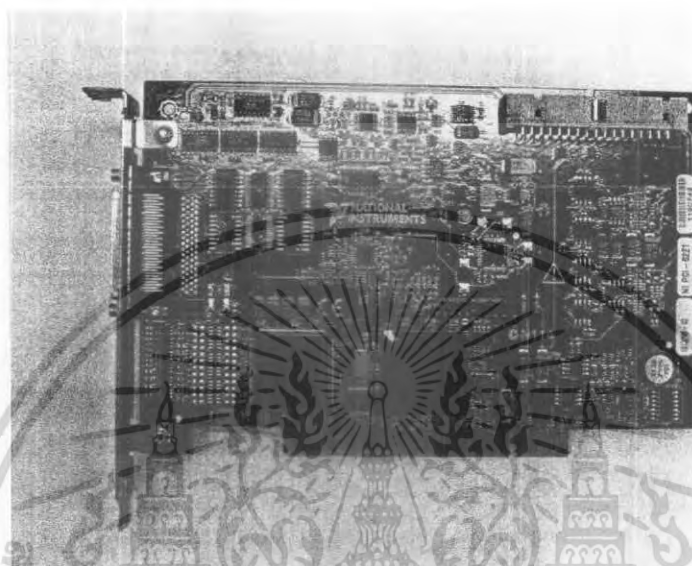


รูปที่ 3.12 แสดงแผงวงจรของการวัดระดับที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

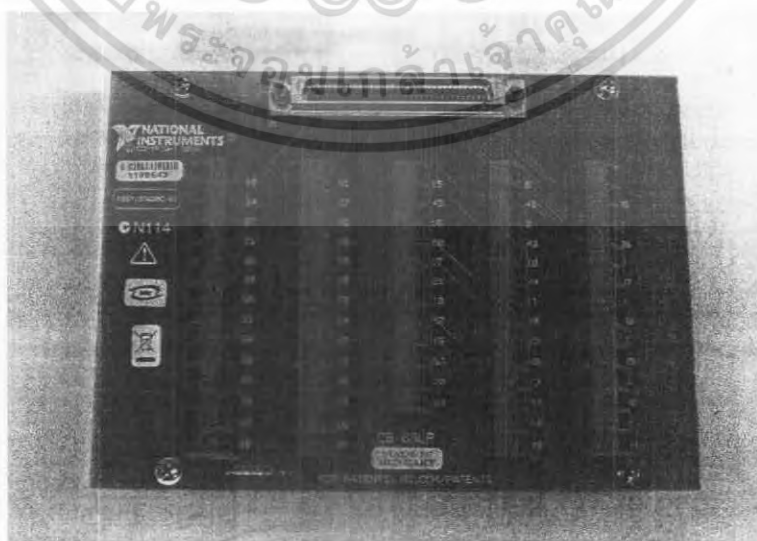
### 3.1.6 ชุดอินเตอร์เฟซ (Interface)

สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล และส่งสัญญาณออกไปสู่วาล์วควบคุม จะเลือกใช้ การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณรุ่น เอ็มซีซีเอ็ม เอ็นไอ 6221 (DAQ Card M Series Multifunction NI 6221)



รูปที่ 3.13 แสดงการ์ดรับและประมวลผลสัญญาณรุ่น เอ็มซีซีเอ็ม เอ็นไอ 6221 (DAQ Card M Series Multifunction NI 6221)

การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณรุ่นเอ็นไอ 6221 ดังแสดงในรูปที่ 3.13 จะใช้ร่วมกับพอร์ตเชื่อมต่อสัญญาณรุ่น CB-68LP ซึ่งมีช่องเชื่อมต่อแบบขนานจำนวน 68 ช่องดังแสดงในรูปที่ 3.14 รองรับการรับส่งสัญญาณ ทั้งแบบอนาลอกและดิจิทัล



รูปที่ 3.14 แสดงพอร์ตเชื่อมต่อสัญญาณรุ่น CB-68LP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณจะทำหน้าที่ในการรับสัญญาณขาเข้า ซึ่งจะส่งมาจากเซนเซอร์ที่จะแปลงสัญญาณแรงดันของน้ำในถังเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และจะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าออกไปควบคุมวาล์วควบคุมผ่านทางมอเตอร์

การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณรุ่นเอ็นไอ 6221 สามารถรับสัญญาณขาเข้าได้พร้อมกัน 16 ช่องทาง และสามารถส่งสัญญาณขาออกได้พร้อมกัน 2 ช่องทาง รองรับการรับส่งสัญญาณทั้งแบบอนาล็อกและดิจิทัล สื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพีซีไอบัส (PCI Bus) โดยมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังต่อไปนี้

ช่วงอุณหภูมิการใช้งาน	:	0 ถึง 50 องศาเซลเซียส
ช่วงอุณหภูมิในการเก็บรักษา	:	-20 ถึง 70 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	:	10 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีการกลั่นตัว (10-90%, noncondensing)
กำลังไฟหลัก	:	+5 VDC ( $\pm 5\%$ ) 0.5 ถึง 1.5A
กำลังไฟที่ช่องต่อสัญญาณเข้าออก	:	+4.65 to +5.25 VDC, 1A
ช่องทางในการติดต่อ	:	PCI BUS
จำนวนบิต	:	32 บิต
ช่วงสัญญาณสูงสุดในการรับเข้าและส่งออก	:	$\pm 10$ VDC
ความถี่ของแหล่งกำเนิดสูงสุด	:	80 MHz

### 3.2 การออกแบบส่วนของซอฟต์แวร์ (Software)

LabVIEW คือ เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนา Application (โปรแกรมประยุกต์) ชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับ Visual Basic แต่จะเป็นการเขียนโปรแกรมโดยใช้รูปในการพัฒนา (Graphical-based Programming) ซึ่งจะแตกต่างจากแนวคิด Text base Programming เช่น Text-base จะทำงานจากบนลงล่าง แต่ LabVIEW จะทำงานแบบ Dataflow

LabVIEW สามารถเขียนเป็นสมการต่างๆที่ซับซ้อนได้เหมือน Text base เช่นภาษา C โดยใช้ Formula Node และ LabVIEW การทำงานจะเน้นทางการติดต่อกับเครื่องมือหรือทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ที่ใช้วัดสัญญาณทางกายภาพต่างๆ และนอกจากนั้นสามารถนำประโยชน์จาก Computer Technology และ Network Technology มาประยุกต์ใช้งาน เช่น การเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูล หรือส่งข้อมูลผ่านทาง Internet ทำให้หลายอุตสาหกรรมได้นำเอา LabVIEW มาประยุกต์ใช้งานกับงานวัดคุม และ ออโตโมชัน (Automation)

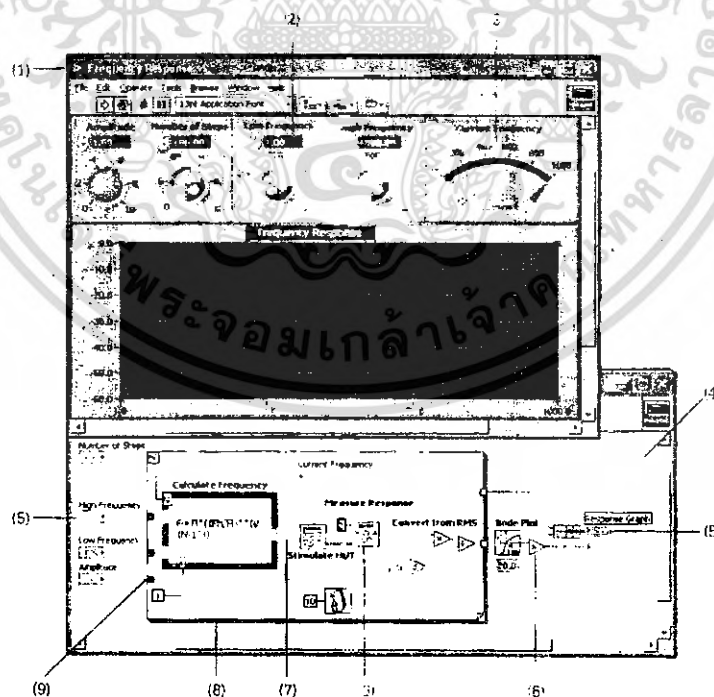
#### 3.2.1 หลักการทำงานของโปรแกรม LabVIEW

LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ LabVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument หรือเรียกย่อๆว่า VI ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดเสมือน ดังตัวอย่างจากรูปที่ 3.15 เป็น Oscilloscope ที่ได้ทำการสร้างขึ้นบนหน้าจอกอมพิวเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LabVIEW จะมี Front Panel ซึ่งเปรียบเสมือนได้กับสิ่งที่ผู้ใช้จะเห็นและควบคุมการทำงาน ผู้ใช้สามารถสร้างรูปแบบขึ้นได้เองอย่างรวดเร็วเพราะ LabVIEW มีส่วนประกอบต่างๆที่ใช้สำหรับออกแบบหน้าจอมากมาย เช่น จอแสดงผลแบบออสซิลโลสโคป, ปุ่มหมุน (Dial) และสวิตช์ เป็นต้น โดย LabVIEW จะแสดงผลและควบคุมการทำงานผ่านทางคอมพิวเตอร์ พื้นที่ส่วนที่เขียนโปรแกรมจะเรียกว่า Block Diagram เปรียบเสมือนกับ Hardware ภายในเครื่องมือวัด โดย LabVIEW จะเขียนโปรแกรมโดยอาศัยรูปภาพ

LabVIEW อาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัด หรือการวัดคุม ทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบรูปแบบโปรแกรมตามที่ต้องการ หลักการดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆคือ

1. Acquisition ซึ่งเป็นส่วนที่รับข้อมูล (Input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบ ในที่นี้คือคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้อาจจะมาจาก การ์ดDAQ(สำหรับสัญญาณทางไฟฟ้า), การ์ดIMAQ(สำหรับข้อมูลประเภทรูป) หรือ GPIB(สำหรับควบคุมเครื่องมือวัด)
2. Analysis หลังจากที่ได้รับข้อมูลแล้ว อาจจะผ่านฟังก์ชันการทำ Analysis หรือวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบที่สื่อความหมายในสิ่งที่ผู้ใช้งานสามารถนำไปแสดงแทนสื่อที่วัดได้และใช้งานได้
3. Presentation คือการแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โดยอาจแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ทั้งในรูปแบบที่วัดได้โดยไม่จำเป็นต้องรู้ความสัมพันธ์กับเวลาหรือ สัมพันธ์กับเวลาก็ได้ จะสามารถแสดงสัญญาณในรูปแบบความถี่หรือการพิมพ์ออกมาเป็นรายงาน หรือการเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่าง Front Panel ของโปรแกรม LabVIEW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ส่วนประกอบต่างๆใน LabVIEW

อธิบายรูปตามหมายเลขดังนี้

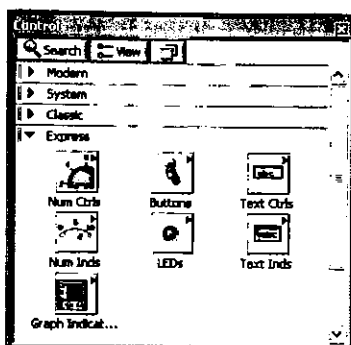
1. Front Panel คือส่วนที่จะติดต่อกับผู้ใช้งาน ซึ่งส่วนนี้จะประกอบด้วย หรือ (รับข้อมูลจากผู้ใช้งาน และ หรือ (แสดงผลให้ผู้ใช้งานเห็น)
2. Control คือ สิ่งที่ผู้ใช้งานจะป้อนค่าหรือเปลี่ยนค่าได้ ซึ่งก็คือ Input เข้าสู่ระบบในรูปแบบ Numeric Control (ตัวรับข้อมูลแบบตัวเลข)
3. Indicator คือสิ่งที่โปรแกรมแสดงผลออกมาให้ผู้ใช้งานเห็นซึ่งก็คือ Output ที่ออกมาจากระบบ หรือ Application ที่เราพัฒนา ในรูปแบบตัวอย่างของ Numeric Indicator (ตัวแสดงผลแบบตัวเลข)
4. Block Diagram คือส่วนที่ผู้พัฒนาใช้ในการเขียนโปรแกรม หรือส่วนของ Source Code
5. Terminal จะมีสองรูปแบบ คือ จุดกำเนิด (Source) หรือ (Output Terminal) และจุดรับ (Sink) หรือ (Input Terminal)
6. Icons คือส่วนที่มีการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่ง เมื่อโปรแกรมทำงาน เช่น ฟังก์ชันซึ่งเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่มีอยู่แล้วใน LabVIEW ได้แก่ Add, Subtract หรือ SubVI ซึ่งหมายถึง VI ที่ถูกเรียกอ่านจากอีก VI หนึ่ง
7. Wires คือเส้นทางของข้อมูลที่ส่งผ่านจุดกำเนิดข้อมูล (Source) ไปจุดรับข้อมูล/จุดสิ้นสุด (Sink)
8. Structures คือส่วนที่ควบคุมขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมเช่น
9. Nodes คือจุดเชื่อมต่อระหว่างข้อมูลกับ SubVI, Function หรือ Structures

### 3.2.3 การใช้งานโปรแกรมที่สร้างขึ้นจาก LabVIEW

โปรแกรมที่สร้างขึ้น โดย LabVIEW จะเรียกว่า VI ซึ่งข้อมากจาก Virtual Instrument จะมีส่วนที่ควบคุม (Control) และส่วนแสดงผล (Indicator) คล้ายคลึงกับเครื่องมือวัดโดยทั่วไปเช่น มีปุ่มรับค่า, ปุ่มเปิดปิด และกราฟแสดงผลเป็นต้น

### 3.2.4 เครื่องมือที่ใช้ออกแบบ Front Panel

เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel จะใช้ Controls Palette และ Tools Palette มี Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน User Interface โดยจะจัดเป็นกลุ่มต่างๆ เช่น กลุ่มของตัวเลข (Numeric) ซึ่งภายในกลุ่มจะมี Control และ Indicator ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับตัวเลข



รูปที่ 3.16 แสดง Controls Palette ในส่วนของ Front Panel

### 3.2.5 Tools Palette สำหรับการออกแบบ Front Panel

Tools Palette คือ เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมซึ่งจะใช้ทั้งการออกแบบ Front Panel และ Block Diagram ในส่วนนี้จะกล่าวถึง Tools Palette สำหรับออกแบบ Front Panel

Tools Palette ที่ใช้บ่อยๆ ในการออกแบบ Front Panel

1. Operate Value Tool ใช้เปลี่ยนแปลงค่าของ Controls หรือ Indicators โดยการ Click Operating Tool แล้วเปลี่ยนไปที่ค่าของ Controls หรือ Indicators ที่เราต้องการเปลี่ยนแปลงค่า แล้ว Click เพื่อเปลี่ยนค่า ดังแสดงในรูปที่ 3.17
2. Position/Size/Select tool ใช้สำหรับเลือก (Select) หรือจัดวางตำแหน่ง (Position) ใหม่ หรือการปรับขนาด (Size) ของ Controls หรือ Indicators ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 แสดง Operate Value Tool



รูปที่ 3.18 แสดง Position/Size/Select tool

3. Edit Text Tool ใช้ในการแก้ไขข้อความที่เป็นตัวอักษร หรือเพิ่มข้อความลงบน Front Panel ดังแสดงในรูปที่ 3.19
4. Edit Text Tool ใช้ในการเปลี่ยนแปลงสีของสิ่งที่เราต้องการเปลี่ยนสี ซึ่งสามารถเปลี่ยนสีทั้งสีด้านบนของสิ่งใดๆ และสีพื้น ถ้าสิ่งนั้นมี Background ดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 แสดง Edit Text Tool



รูปที่ 3.20 แสดง Edit Text Tool

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แสดง Object Shortcut Menu Tool

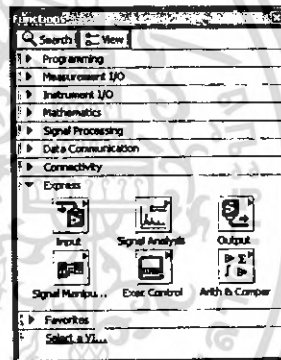


รูปที่ 3.22 แสดง Scroll Window Tool

5. Object Shortcut Menu Tool ใช้สำหรับแสดงและเลือก Menu ที่เกี่ยวข้องกับสิ่งต่างๆบน Front Panel และ Block Diagram ซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะคลิกขวาแทนการเลือกนี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.21
6. Scroll Window Tool ใช้สำหรับการเลื่อน (Scroll Window) ทั้ง Front Panel และ Block Diagram ดังแสดงในรูปที่ 3.22
7. Get Color เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการคัดลอก (Copy) สีที่เราเลือกจากวัตถุหนึ่งเพื่อที่จะนำไปใช้ในการเปลี่ยนสีของอีกวัตถุหนึ่งให้มีสีเหมือนกับที่เรา Copy สีมา โดยใช้ Color tool ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดง Object Shortcut Menu Tool



รูปที่ 3.24 แสดง Numeric Function




### 3.2.6 เครื่องมือที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมบน Block Diagram

LabVIEW ใช้ Function Palette ซึ่งจะมี Function และ SubVI ต่างๆที่มีอยู่แล้วให้ผู้ใช้เลือกใช้ โดย Function และ SubVI จัดเป็นกลุ่มๆเช่น จะมี ต่างๆเกี่ยวกับตัวเลข เช่น Numeric Function จะมี Function บวก ลบ คูณ หาร ดังแสดงในรูปที่ 3.22






### 3.2.7 Front Panel Toolbar

- โปรแกรมสามารถ Run ได้เมื่อ Click ปุ่มนี้บน Toolbar
- โปรแกรมกำลัง Run อยู่
- โปรแกรม Error ถ้า Click จะแสดงรายการ Error List
- โปรแกรมสามารถ Run แบบต่อเนื่อง (Continuous) เมื่อ Click ปุ่มนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้






-  กำลัง Run อย่างต่อเนื่องจนกระทั่ง Click ปุ่ม Start/Pause
-  เมื่อ โปรแกรมกำลัง Run อยู่สามารถหยุดการทำงานโปรแกรมโดยการ Click ปุ่ม Stop
-  หยุดชั่วคราว เพื่อตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม ซึ่งสามารถ Run ต่อไปได้เมื่อ Click ปุ่ม หรือคลิกปุ่มอีกครั้ง

13pt Application Font | เลือกหรือแก้ไขรูปแบบอักษรที่ต้องการ

-  จัดแนวของสิ่งต่างๆ (Objects)
-  จัดระยะทางระหว่างสิ่งต่างๆ (Objects)
-  ปรับขนาดสิ่งต่างๆที่อยู่บน Front Panel หลายๆสิ่งซ้อนกัน
-  จัดลำดับของ Objects ที่วางซ้อนกัน
-  แสดง Context Help

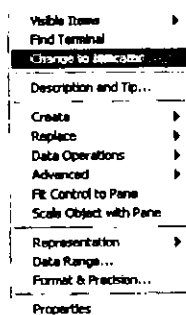
### 3.2.8 Block Diagram Toolbar

สิ่งทีเพิ่มเติมจาก Front Panel Toolbar ในส่วนของ Block Diagram มีดังต่อไปนี้

-  Highlight Execution เมื่อ Click แล้วในการ Run Program จะทำให้โปรแกรม Run ช้าลงเพื่อให้เราเห็นถึงการไหลของข้อมูล และทำงานของโปรแกรม
-  เมื่อ Click แล้วจะออกจาก โหมด (Mode) ที่โปรแกรม Run ซ้ำ (Highlight Execution)
-  เป็นการ Run Program แบบทีละคำสั่ง และจะลงไปถึงคำสั่งของ SubVI
-  เป็นการ Run Program โปรแกรมแบบทีละคำสั่ง แต่จะไม่ลงไปถึงคำสั่งของ SubVI
-  ให้ Run จนออกจาก Loop และ SubVI

### 3.2.9 Numeric Data types

LabVIEW จะมีรูปแบบการรับข้อมูลเข้า (Input=Control) และแสดงผล (Output=Indicator) ชนิดแบบตัวเลขหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละตัวถูกกำหนดเป็น Control หรือ Indicator ไว้แล้ว แต่เราสามารถเปลี่ยนจาก Control เป็น Indicator หรือจาก Indicator เป็น Control ได้โดยการ Right-Click ที่ Numeric Control หรือ Indicator นั้นแล้วเลือก Cbange to Control หรือ Change to Indicator ดังแสดงในรูปที่ 3.23

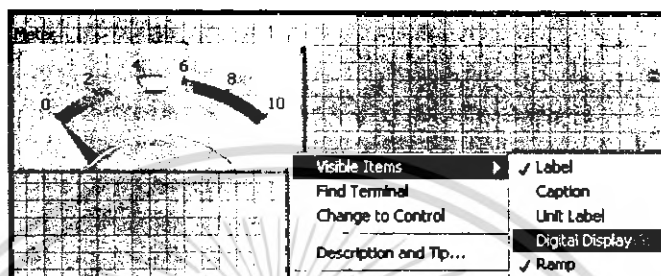


รูปที่ 3.25 แสดง Change to Indicator / Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นยังมีคุณสมบัติอื่นๆอีกที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการ Right-Click ที่สิ่งนั้น แล้วเลือก จาก Shortcut Menu ของนั้นๆ หรือเลือกจากเมนู Property ซึ่งเริ่มมีใน LabVIEW ตั้งแต่เวอร์ชัน 7.0 ขึ้นไป คุณสมบัติที่สำคัญคือ

1. Visible Item>>Digital Display เพิ่มการแสดงผลเป็นตัวเลข เช่น แสดงตัวเลขของค่า Meter Indicator



รูปที่ 3.26 แสดง Digital Display

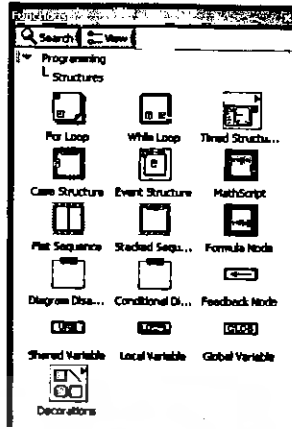
2. Change to Control / Change to Indicator เป็นการเปลี่ยนจาก Control เป็น Indicator หรือ Indicator เป็น Control การเลือกรูปแบบความละเอียดของตัวเลขในการใช้งานดังต่อไปนี้
  - 2.1 Data range เป็นการกำหนดช่วงค่าที่จะใช้งาน เช่น สามารถกำหนดค่าต่ำสุดและสูงสุดที่จะให้ผู้ใช้ป้อนอยู่ระหว่าง 0.00-100.0
  - 2.2 Scale ปรับรูปแบบสเกลตามความเหมาะสมในการใช้งาน
  - 2.3 Format และ Precision เป็นการกำหนดรูปแบบการแสดงผลแบบ และจำนวนตัวเลขทศนิยม ซึ่งสามารถเลือกให้แสดงผลแบบตัวเลขดังต่อไปนี้ ซึ่งขึ้นอยู่กับรูปแบบ Representation ของตัวเลขที่ใช้งานด้วย
 

รูปแบบของตัวเลขมีให้เลือกแสดงผลหลายรูปแบบ

    - Decimal: เลขฐานสิบ
    - Hexadecimal: เลขฐาน16
    - Octal: เลขฐาน8
    - Binary: เลขฐาน2
    - Time and Date: รูปแบบเวลา

### 3.2.10 Formula Node

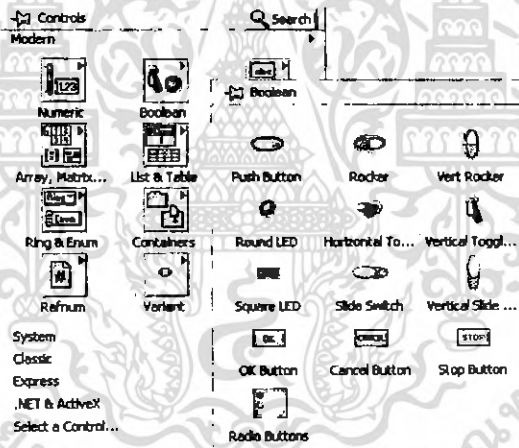
ในกรณีที่สมการคำนวณซับซ้อนมากขึ้น การใช้ฟังก์ชันตัวเลข (Numeric Function) หลายๆตัวมาต่อกันอาจทำให้ความเข้าใจการทำงานของสมการต่างๆมากขึ้น หรือเขียน โปรแกรมเร็วขึ้น ถ้าเราเขียนเป็นสมการแบบ Text-Base ใช้ Formula Node ในการเขียนสมการแบบ Text-Base



รูปที่ 3.27 แสดง Formula Node

3.2.11 Boolean Data type

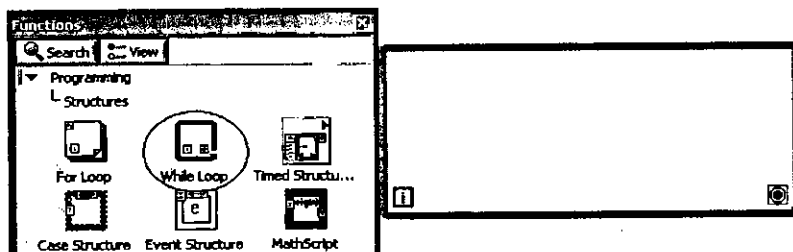
Boolean Controls และ Indicators เป็นรูปแบบ Input และ Output ซึ่งมีสองสถานะ คือ เปิดกับปิด (On หรือ Off) หรือ จริงกับเท็จ (True/False) นอกเหนือจากค่าจริงกับเท็จหรือปิดกับเปิดแล้ว LabVIEW สามารถกำหนดการทำงานของ Switch Control ให้มีการทำงานทางกลศาสตร์คล้ายกับสวิตช์จริง ดังแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.28 แสดง Boolean Data type

3.2.12 While Loop

While Loop คือการกำหนดให้ Code หรือ Program ใน Loop ทำงานซ้ำจนกระทั่งเงื่อนไขของ While Loop เป็นไปตามที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.29 แสดง While Loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.13 Wait (ms) และ Wait until Next ms Multiple

ฟังก์ชันที่ใช้บ่อยใน While Loop หรือ For Loop คือ ฟังก์ชันที่กำหนดเวลาให้วนซ้ำทุกๆ มิลลิวินาที (Millisecond/ms) คือ Wait (ms) และ Wait until Next ms multiple ความแตกต่างระหว่างฟังก์ชัน กับ นี้คือ

ฟังก์ชัน Wait (ms) จะรอตามจำนวนมิลลิวินาที (ms) ที่ป้อนเข้าไป เช่น จากรูปหลังจากทำงานในส่วนของ Code ใช้เวลา 10 ms แล้วจะรออีก 500 ms แล้วจึงจะวน Loop ใหม่ ทำให้แต่ละ Loop จะใช้เวลา 10 ms + 500 ms ดังแสดงในรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.30 แสดง Wait (ms)

ส่วนฟังก์ชัน Wait until Next ms Multiple จากรูปสมมุติว่า Code ใน Loop ใช้เวลา 10 ms เช่นเดียวกัน แต่การรอจริงๆ จะใช้เวลา 490 ms ก่อนที่จะวน Loop ใหม่ทำให้ในแต่ละ Loop ใช้เวลา 500 ms หรือ 10 ms ใน Code และ 490 ms สำหรับ Wait until Next ms Multiple ดังแสดงในรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.31 แสดง Wait until Next ms Multiple

### 3.2.14 Shift Register

Shift Register หรือ Feedback Node ใช้ร่วมกับ While Loop หรือ For Loop สำหรับการเก็บค่าไว้เพื่อใช้ขึ้นการวนซ้ำครั้งต่อไป Shift Register สามารถสร้างได้โดย Right-Click ที่ขอบของ For Loop หรือ While Loop ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.32 แสดง Shift Register

### 3.2.15 Feedback Node

Feedback Node จะคล้ายกับ Shift Register แต่จะใช้แทนกันในกรณีที่จะลดการลากสายที่ยาวและซับซ้อน และไม่มี Stack ของ Shift Register สามารถเปลี่ยน Feedback เป็น Shift Register ได้โดยการ Right-Click ที่ Feedback Node แล้วเลือก Replace with Shift Register ดังแสดงในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.33 แสดง Feedback Node

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.16 For Loop

For Loop คล้ายกับ While Loop แต่ว่าจะใช้กำหนดว่า ให้วนซ้ำจำนวนกี่ครั้ง ดังแสดงในรูปที่

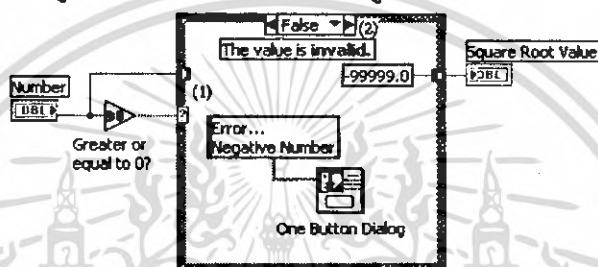
3.32



รูปที่ 3.34 แสดง For Loop

### 3.2.17 Case Structure

Case Structure ใช้ในการเลือกการทำงานเฉพาะ Code ที่อยู่ในแต่ละกรณีโดยการเปรียบเทียบค่าว่าค่าที่เข้ามาในตัวเลือก ((1) ในรูป) เท่ากันกับค่ากรณี ((2) ในรูป)



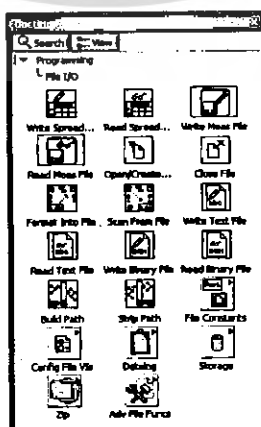
รูปที่ 3.35 แสดง Case Structure

ค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบตัวเลือก ในรูป และกรณี ในรูป อาจเป็นค่าตรรกะ (Boolean) ตัวเลข (Numeric) ตัวอักษร (String) หรืออื่นๆก็ได้ไม่จำเป็นต้องเป็นค่า (Boolean) เสมอไป ซึ่งค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบอาจเป็นค่าเดียวหรือช่วงของค่าหรือหลายค่าได้

ช่วงของค่าสามารถใช้ “..” เป็นตัวกำหนดเช่น 1..100 หมายถึงช่วงค่าระหว่าง 1 ถึง 100 หรือ ..1 หมายถึงน้อยกว่า 1 เป็นต้น ถ้ามีหลายค่าสามารถใช้ “,” ในการกำหนดค่า เช่น 1,5,7 หมายถึงค่า 1,5 หรือ 7 เป็นต้น

### 3.2.18 File I/O

ฟังก์ชัน File I/O ใช้สำหรับการเขียนข้อมูลลงในไฟล์หรืออ่านข้อมูลจากไฟล์



รูปที่ 3.36 แสดง File I/O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LabVIEW แบ่งกลุ่มฟังก์ชันสำหรับ File I/O ออกเป็น 3 ระดับคือ

ระดับสูง (High Level) ซึ่งใช้งานง่าย แต่ไม่ยืดหยุ่นหรืออ่านไฟล์ได้ไม่รวดเร็วเมื่อเปรียบเทียบกับระดับต่ำกว่า

ระดับต่ำ (Low Level) ซึ่งส่วนใหญ่ของการใช้งาน File I/O ส่วนใหญ่สามารถใช้ฟังก์ชันระดับ Low Level ได้ เพราะทำงานได้เร็วและยืดหยุ่นสูง

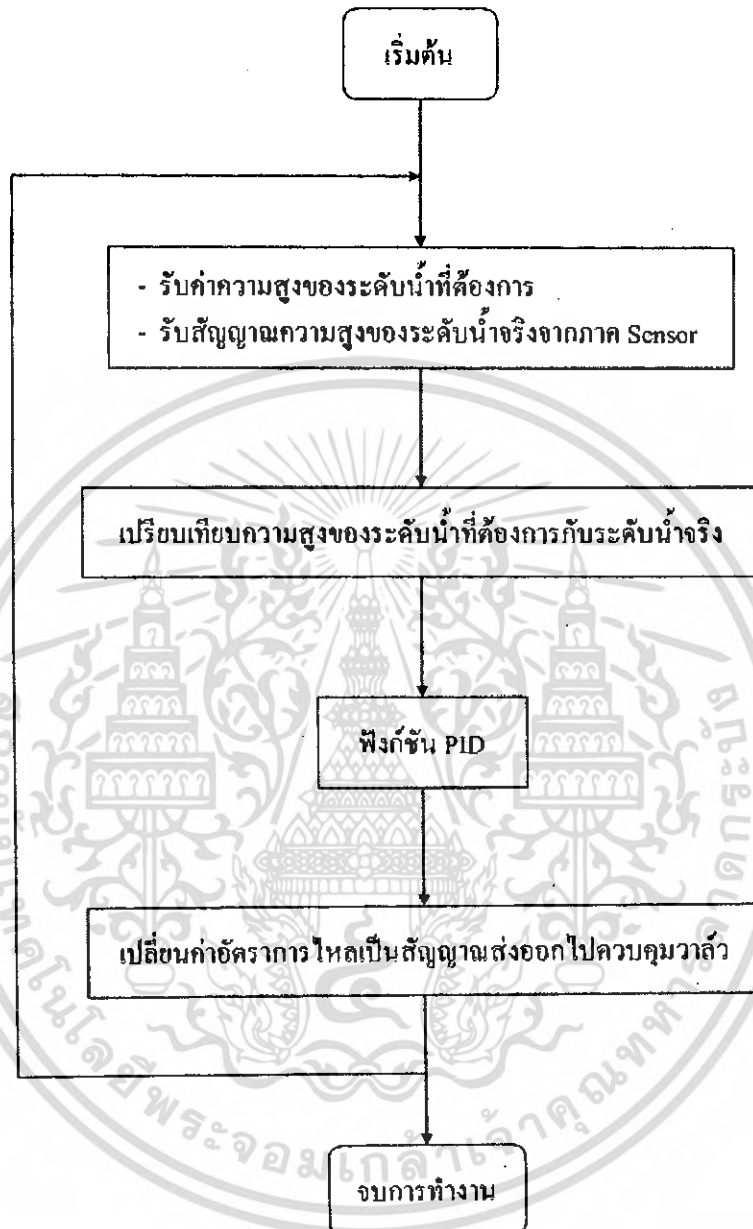
และแบบ Express VI ซึ่งเป็นการ Config การเขียนหรืออ่านไฟล์ใช้งานง่าย และสามารถเปลี่ยนเป็น Code สำหรับเปลี่ยนแปลงแก้ไข เพื่อให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นได้

หลักการของการอ่านหรือเขียนข้อมูลลงไฟล์มี 4 ขั้นตอนใหญ่ๆคือ การเปิดไฟล์ แล้วทำการอ่านข้อมูลหรือเขียนข้อมูลลงไฟล์ เมื่อเสร็จสิ้นการอ่านหรือเขียนลงไฟล์แล้ว จึงทำการเปิดไฟล์ ถ้ามีความผิดพลาดขึ้นขั้นตอนใดให้แสดงข้อผิดพลาด ซึ่งในฟังก์ชันไฟล์ระดับสูง (High Level) จะรวมเอาทุกขั้นตอนตั้งแต่เปิดไฟล์อ่านหรือเขียน ปิดไฟล์ และแสดง Error ในไอคอนเดียว แต่ถ้าเราทำการวนซ้ำ (Loop) จะมีความซ้ำซ้อนในการเปิดและปิดไฟล์ ทำให้โปรแกรมจะทำงานได้ไม่เร็วเท่ากับการใช้ Low Level ซึ่งเราสามารถเขียนโปรแกรมให้เปิดและปิดเพียงครั้งเดียว แต่แบบ High Level ช่วยให้เราสามารถทดสอบการทำงานของโปรแกรมได้เร็ว แล้วจึงค่อยลงไปใช้ Low Level ได้ภายหลัง

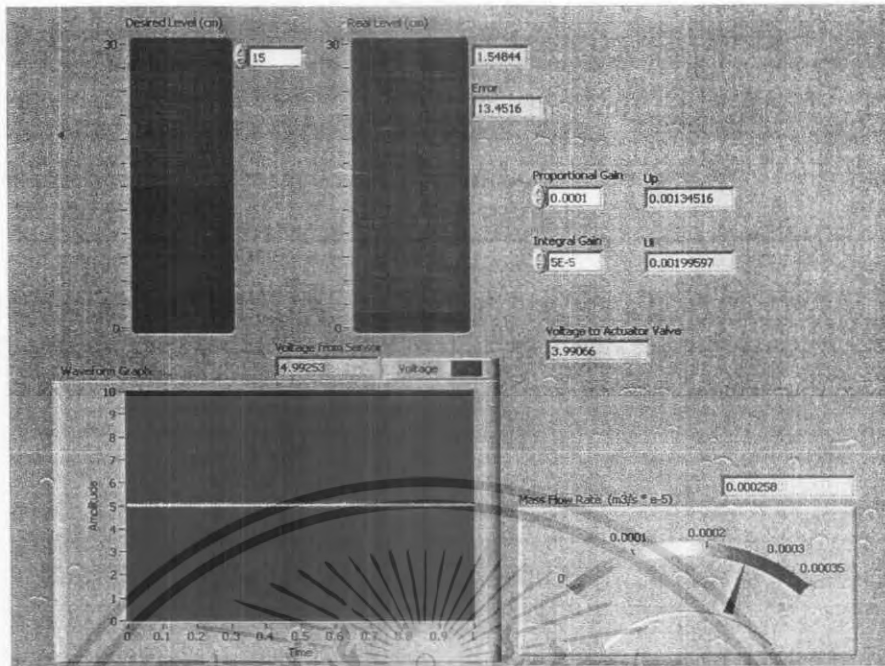
รูปแบบบันทึกข้อมูลลงใน File แบ่งออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ๆคือ การอ่าน / เขียนข้อมูลแบบตัวอักษร และการอ่าน / เขียนข้อมูลแบบไบนารี ซึ่งจะแตกต่างกันตรงที่ การอ่าน / เขียนข้อมูลแบบตัวอักษร จะใช้งานง่ายกว่า เพราะข้อมูลที่เขียนหรืออ่านจากไฟล์สามารถใช้เป็นโปรแกรมที่อ่านข้อมูลแบบ Text File ทำการตรวจสอบความถูกต้องได้ เช่น โปรแกรม Notepad แต่ไฟล์จะใหญ่กว่าแบบ Binary และการเขียนลงใน File จะช้ากว่าแบบ Binary

### 3.3 หลักการทำงานของโปรแกรม

หลักการทำงานของโปรแกรมที่ได้ออกแบบขึ้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.37 โดยเริ่มต้นโปรแกรมจะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาจากส่วนของเซนเซอร์วัดความดันน้ำผ่านไอคอน DAQ Assistant สัญญาณนี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นระดับความสูงของน้ำหน่วยเป็นเซนติเมตร จากนั้นผู้ใช้จะทำการป้อนระดับความสูงของน้ำที่ต้องการเข้าไป โปรแกรมจะทำการเปรียบเทียบระดับความสูงที่ต้องการกับระดับความสูงจริง ค่าที่ได้ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาด (Error) ค่านี้จะถูกส่งไปเข้ากระบวนการพีโอ ซึ่งจะให้ค่าออกมาเป็นอัตราการไหลที่ต้องการ จากนั้นจะถูกแปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเพื่อส่งออกไปควบคุมวาล์วควบคุมผ่านทางมอเตอร์ เซนเซอร์วัดความดันน้ำก็จะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากลับมาอีกเพื่อทำการคำนวณต่อ โดยโปรแกรมจะหยุดเมื่อระดับความสูงของน้ำจริงมีค่าเท่ากับระดับความสูงของระดับความสูงของน้ำที่ต้องการ เมื่อนั้นค่าความผิดพลาด (Error) จะมีค่าเป็นศูนย์ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกไปควบคุมวาล์วควบคุมก็จะมีค่าคงที่



รูปที่ 3.37 แสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมแลปวิว



รูปที่ 3.38 แสดง Front Panel ของโปรแกรมควบคุมที่สร้างขึ้น



รูปที่ 3.39 แสดงชุดทดลองที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

## การทดลองและผลการทดลอง

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 เกี่ยวกับการสร้างและการออกแบบทางด้านฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ ในบทนี้จะเป็นการทดลองและผลการทดลองที่ได้ทำการออกแบบไว้ ดังนั้นผลการทดลองจึงแยกออกได้เป็นดังนี้

## 4.1 ผลการทดลองโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการทดลองระบบควบคุมนั้น เราสามารถจำลองการทำงานของระบบได้จากกราฟแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อดูแนวโน้มการตอบสนองของระบบต่อคำสั่งของผู้ควบคุมซึ่งในระบบควบคุมระดับน้ำเราสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหัวข้อ 2.5 ได้ดังนี้

ค่าความต้านทานการไหลของของเหลวเมื่อกำหนดให้ระดับน้ำเริ่มต้นที่ 0 เซนติเมตร และเปลี่ยนแปลงไปที่ระดับ 15 เซนติเมตร โดยมีอัตราการไหลเท่ากับ  $8.16 \times 10^{-6}$  ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

$$R = \frac{\Delta H}{\Delta Q} = \frac{0.15 - 0}{(8.16 \times 10^{-6}) - 0} \frac{m}{m^3/s} = 18,382.353 \frac{s}{m^2}$$

ค่าความจุ (Capacitance) ของภาชนะบรรจุ

$$C = 0.01 \frac{m^2}{s}$$

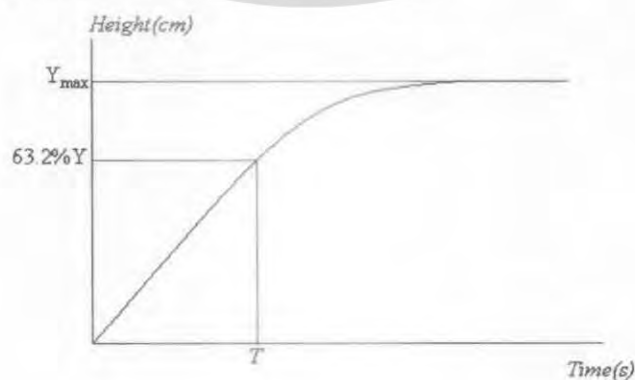
จากสมการ Transfer Function (2.23) เมื่อยกพจน์ที่ตรงที่ค้างค้างไปเราจะได้

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = \frac{R}{RCs + 1} = \frac{18,382.353}{183.82s + 1}$$

โดยพื้นฐานของระบบแบบ 1<sup>st</sup> Order จะมีสมการ Transfer Function แบบ

$$\frac{Output(s)}{Input(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

ค่า  $\tau$  เรียกว่าค่า Time Constant เป็นค่าของเวลาที่ทำให้ระบบส่งผลตอบสนองออกมาเป็น 63.2% ของผลตอบสนองสูงสุดของระบบดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟผลตอบสนองของระบบแบบ 1<sup>st</sup> Order

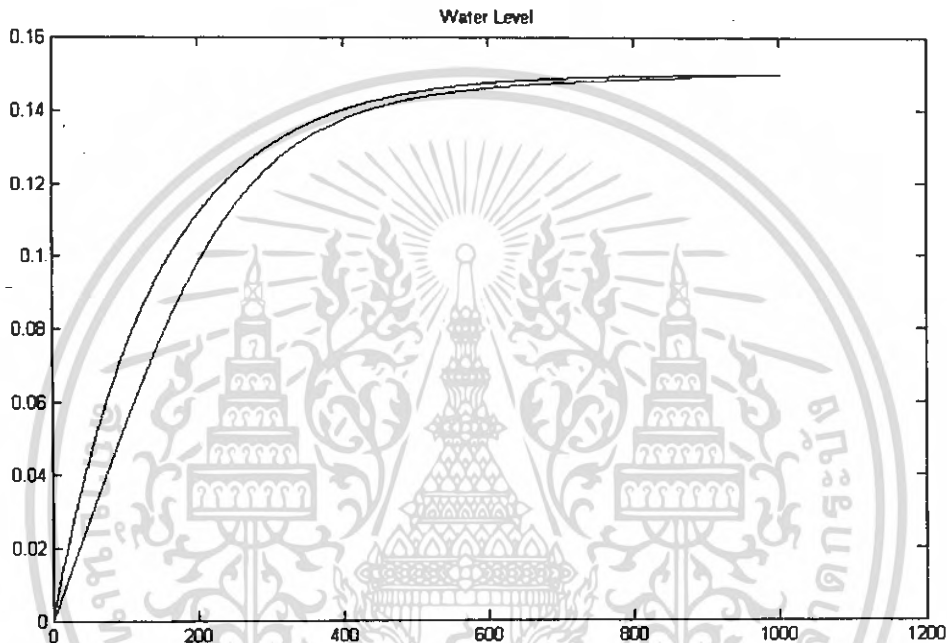
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.19 เราสามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำเทียบกับเวลาได้ดังนี้

$$RC \frac{dh}{dt} + h = Rq_i$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Rq_i - h}{RC}$$

เมื่อเรานำค่าความต้านทานการไหลของของเหลว, ค่าความจุของภาชนะบรรจุ, อัตราการไหล และค่าระดับความสูงเริ่มต้น ไปแทนในสมการแล้วเราสามารถเขียนกราฟระหว่างการเปลี่ยนแปลงระดับความสูงเทียบกับเวลาได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองของระบบแบบ Open Loop

จากรูปที่ 4.2 แสดงผลการทดลองของระบบแบบ Open Loop โดยเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงผลตอบของสนองของระบบที่ได้จากการจำลองในโปรแกรม Matlab ส่วนเส้นสีแดงแสดงถึงผลตอบของสนองของระบบที่ได้จากการทดลองจริง โดยค่า  $\tau$  ที่ได้จากการจำลองในสมการทางคณิตศาสตร์มีค่า 183.82 วินาที ส่วนค่า  $\tau$  ที่ได้จากการทดลองมีค่าประมาณ 204 วินาทีจะเห็นว่ามีความแตกต่างอยู่ประมาณ 10% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากการที่ในสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ใช้ค่าความต้านทานการไหลเป็นค่าคงที่ ซึ่งในความจริงค่าความต้านทานการไหลจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อระดับความสูงเปลี่ยนไปด้วย

#### 4.2 การทดลองอุปกรณ์วัดระดับน้ำ

การทดลองการวัดระดับน้ำ จะทำการเปรียบเทียบระดับน้ำที่ค่าต่างๆ และวัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้ ผลการวัดแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองอุปกรณ์วัดระดับน้ำ

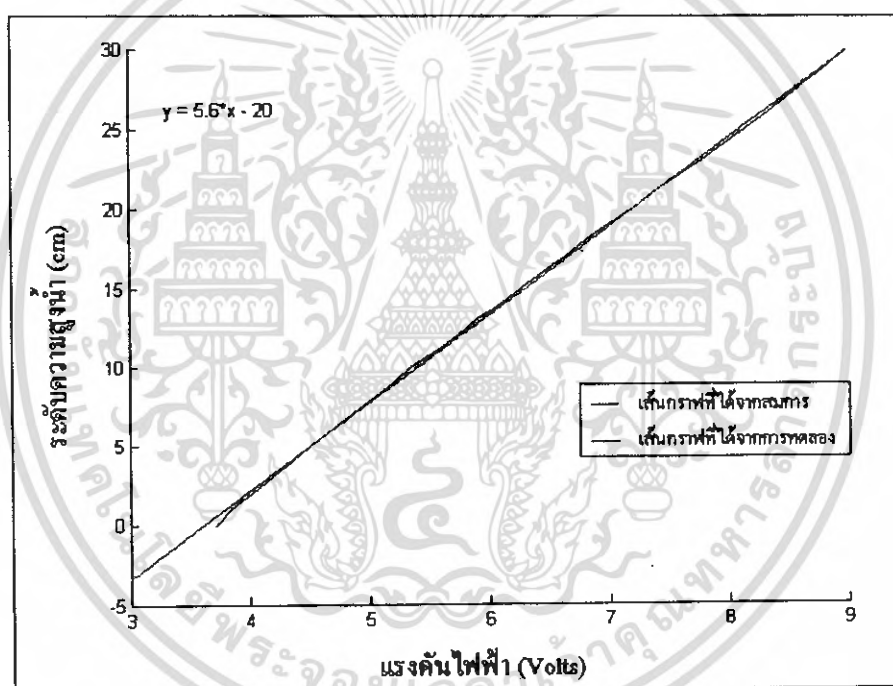
ระดับน้ำ (cm)	แรงดันไฟฟ้า (V)
0	3.72
1	3.85
2	4.02
3	4.19
4	4.36
5	4.51
6	4.70
7	4.86
8	5.04
9	5.21
10	5.31
11	5.57
12	5.74
13	5.91
14	6.11
15	6.27
16	6.45
17	6.64
18	6.82
19	7.00
20	7.21
21	7.39
22	7.59
23	7.79
24	7.97
25	8.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1(ต่อ)

ระดับน้ำ (cm)	แรงดันไฟฟ้า (V)
26	8.34
27	8.51
28	8.68
29	8.85
30	9.00

จากข้อมูลในตารางที่ 4.1 นำมาเขียนกราฟแสดงผลระหว่างความสูงของระดับน้ำ เทียบกับแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสูงของระดับน้ำกับแรงดันไฟฟ้า จากข้อมูลในตารางที่ 4.1

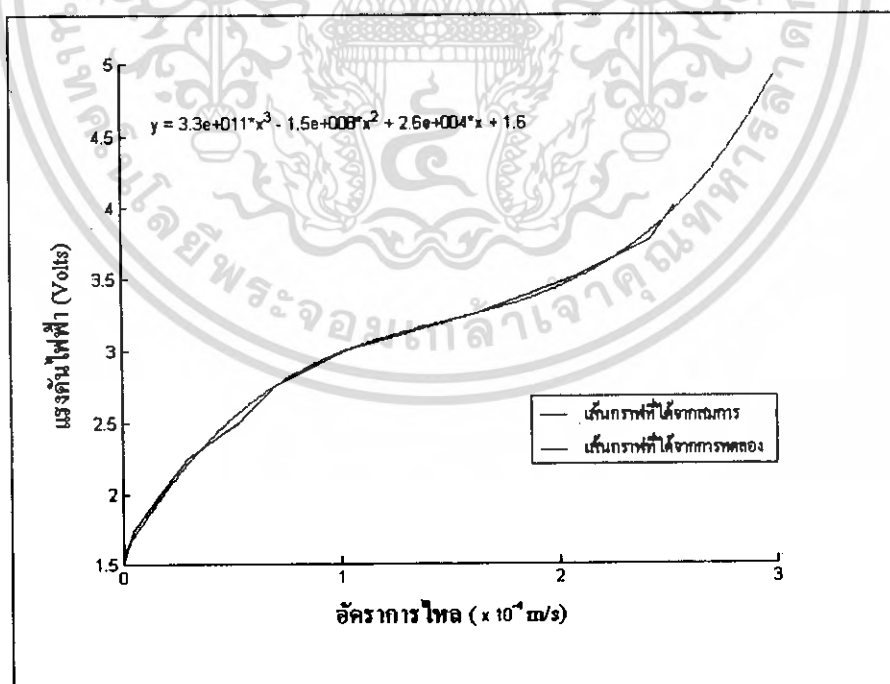
#### 4.3 การทดลองวาล์วควบคุม

การทดลองในส่วนของวาล์วควบคุมจะเป็นการทดสอบคุณลักษณะของวาล์ว ทำการทดลองโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ค่าต่างๆ แล้ววัดอัตราการไหลที่ได้

ตารางที่ 4.2 แสดงข้อมูลผลการทดลองวาล์วควบคุม

แรงดันไฟฟ้า (Volts)	อัตราการไหล ( $\times 10^4$ m/s)	อัตราการไหล (%Flow)
1.50	0	0.0000
1.75	5.667	0.2236
2.00	17	6.7061
2.25	30	11.8343
2.50	53	21.0387
2.75	70	27.6134
3.00	102	40.2367
3.25	163	64.2998
3.50	207	81.6568
3.75	242	95.4635
4.00	253.5	100.0000

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 นำมาเขียนกราฟแสดงผลระหว่างอัตราการไหล เทียบกับแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟระหว่างอัตราการไหลกับแรงดันไฟฟ้า จากข้อมูลดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ที่ได้ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากับอัตราการไหลคือสมการ Valve Transform

$$VDC = (3.3 \times 10^{11}) Q^3 - (1.5 \times 10^8) Q^2 + (2.6 \times 10^4) Q + 1.6 \quad (4.1)$$

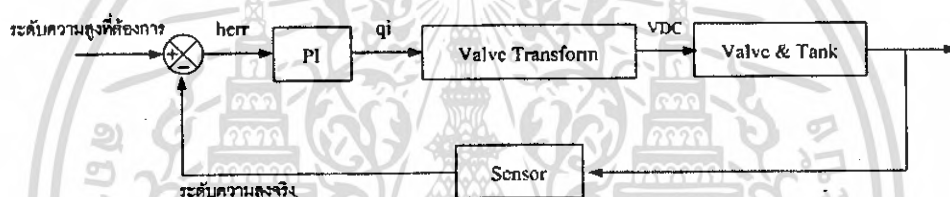
เมื่อ  $VDC$  คือ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จะส่งออกไปควบคุมวาล์ว  $(VDC)$

$Q$  คือ อัตราการไหลที่ได้จากกระบวนการ  $PI$   $(m^3/s)$

สมการ Valve Transform ที่ได้จะถูกนำไปใช้ในการเปลี่ยนค่าอัตราการไหลที่ได้จากกระบวนการ  $PI$  ไปเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่จะส่งออกไปควบคุมวาล์ว

#### 4.4 ระบบควบคุม

ระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดี่ยวนั้นสามารถอธิบายการทำงานได้โดยแสดงแบบ Block Diagram ได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดง Block-Diagram ของระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดี่ยว

โดยการทำงานของชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำแบบถังเดี่ยวจะเริ่มต้นเมื่อโปรแกรมควบคุมจะรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามาจากส่วนของเซนเซอร์วัดความดันน้ำ สัญญาณนี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นระดับความสูงของน้ำหน่วยเป็นเซนติเมตร จากนั้นผู้ใช้จะทำการป้อนระดับความสูงของน้ำที่ต้องการเข้าไป ระบบจะทำการเปรียบเทียบระดับความสูงที่ต้องการกับระดับความสูงจริง ค่าที่ได้ซึ่งเป็นค่าความผิดพลาด (Error) ค่านี้จะถูกส่งไปเข้ากระบวนการพีไอ ซึ่งจะให้ค่าออกมาเป็นอัตราการไหลที่ต้องการ จากนั้นจะถูกแปลงเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผ่านทางสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลกับสัญญาณแรงดันควบคุม (Valve Transform) จากสมการที่ 4.1 เพื่อส่งออกไปควบคุมวาล์วควบคุมผ่านทางมอเตอร์ และเมื่อระดับความสูงของน้ำในถังเปลี่ยนแปลงไป เซนเซอร์วัดความดันน้ำก็จะส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากลับมาอีกเพื่อทำการคำนวณต่อ โดยระบบจะหยุดเมื่อระดับความสูงของน้ำจริงมีค่าเท่ากับระดับความสูงของระดับความสูงของน้ำที่ต้องการ เมื่อนั้นค่าความผิดพลาด (Error) จะมีค่าเป็นศูนย์ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกไปควบคุมวาล์วควบคุมก็จะมีค่าคงที่

#### 4.5 การทดลองหาค่า $K_p$ , $K_i$

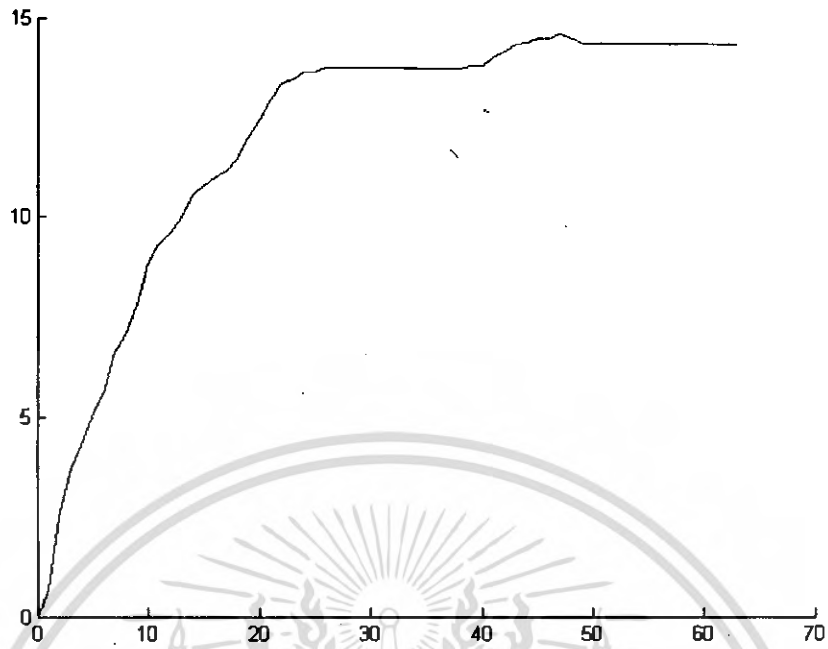
การทดลองที่ 1 จะทำการเปลี่ยนค่า Proportional Gain ( $K_p$ ) และ Integral Gain ( $K_i$ ) แล้วทำการเก็บข้อมูลระหว่างเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป กับระดับความสูงของน้ำ โดยการทดลองจะกำหนดระดับความสูงของน้ำเริ่มต้นคือ 0 ซม. ระดับน้ำเป้าหมายคือ 15 ซม. และให้ Load Valve ด้านล่างเปิด 30 องศา โดยค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ที่ทดลองมีค่าดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ที่ใช้ในการทดลองที่ 1

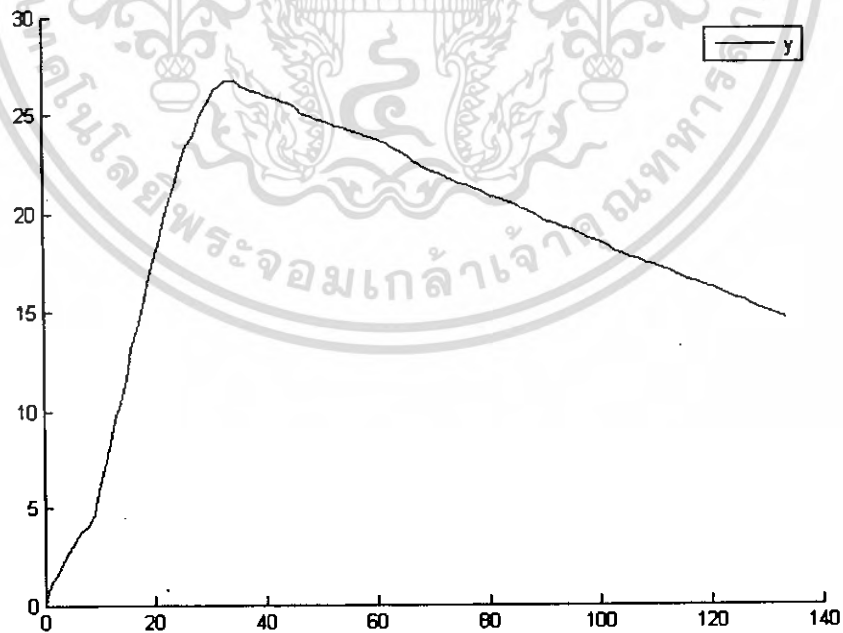
Proportional Gain ( $K_p$ )	Integral Gain ( $K_i$ )
0.000005	-
0.00001	$10^{-6}$
0.000025	-
0.00005	-
	$10^{-6}$
	$10^{-7}$
0.0001	$10^{-8}$
	-
	$10^{-6}$
0.0005	$10^{-7}$
	$10^{-8}$
	-
0.001	$10^{-6}$
	$10^{-7}$
	$10^{-8}$
0.01	$10^{-6}$
	$10^{-7}$
	$10^{-8}$

เมื่อทดลองใช้ค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ที่ค่าต่างๆแล้วนำมาเขียนกราฟ โดยให้แกน X แทนเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป และให้แกน Y แทนระดับความสูงของน้ำในถัง ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

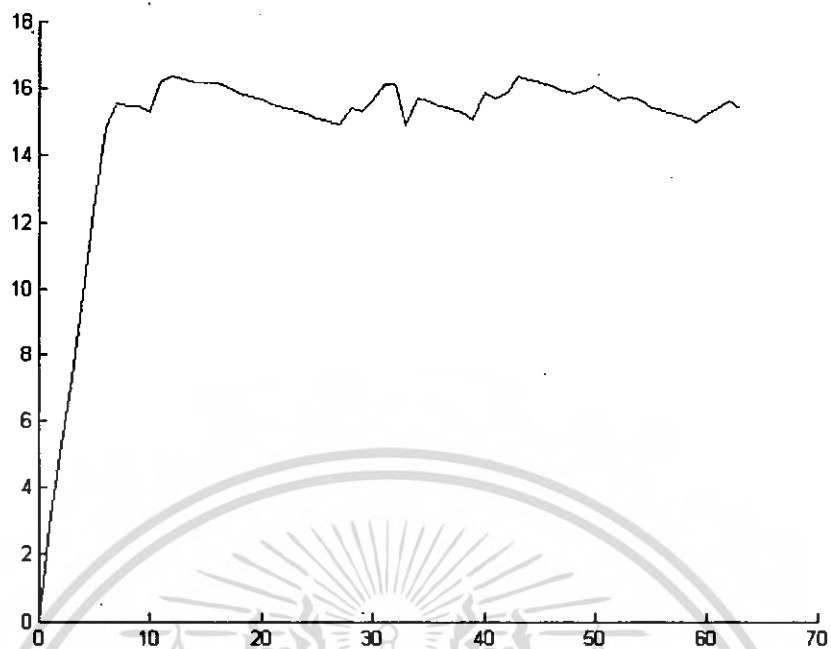


รูปที่ 4.6 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.00001$

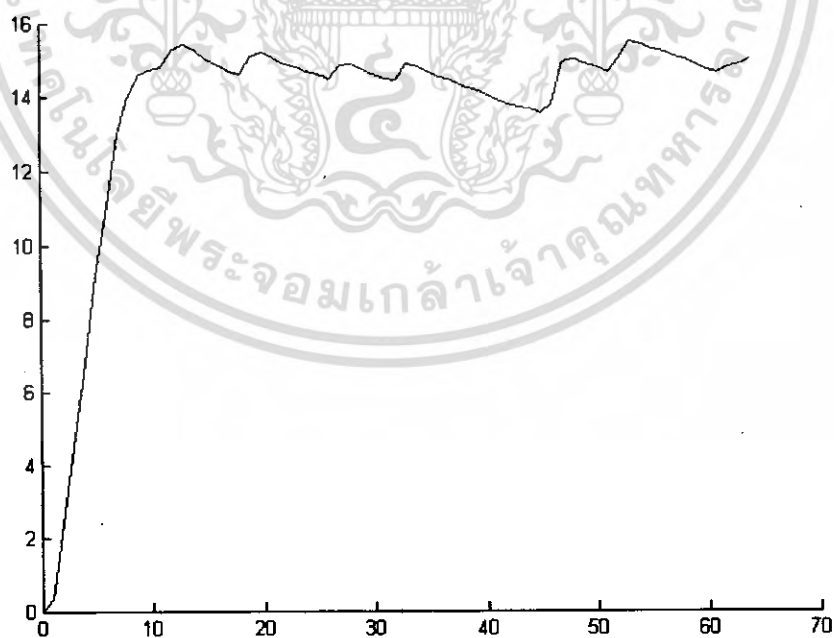


รูปที่ 4.7 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.00001$  และ  $K_i = 10^{-6}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

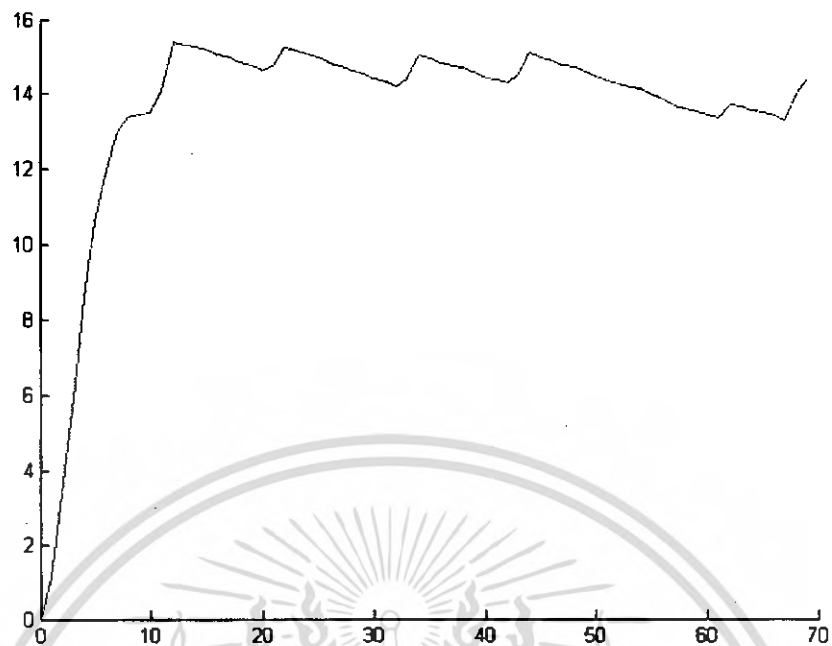


รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.00005$

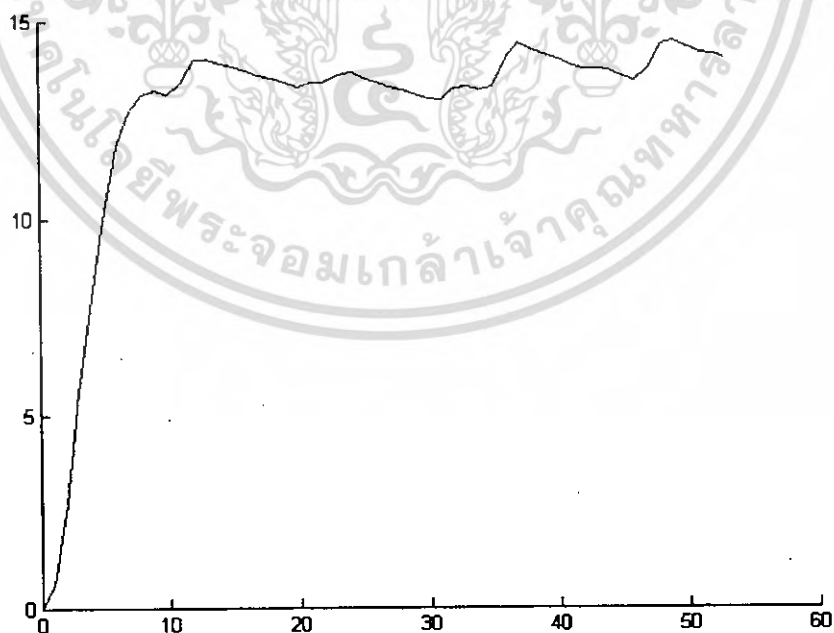


รูปที่ 4.9 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.00005$  และ  $K_i = 10^{-6}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

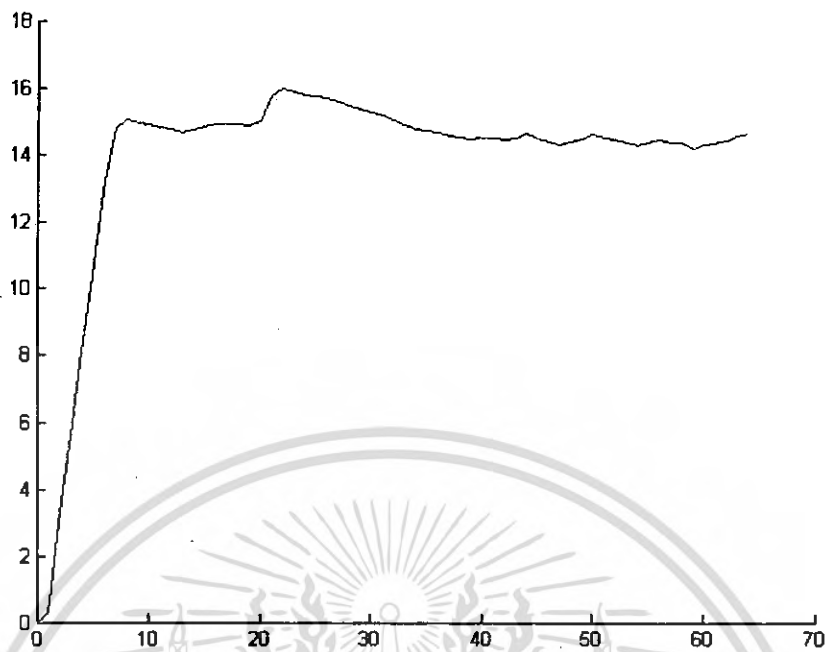


รูปที่ 4.10 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.00005$  และ  $K_i = 10^{-7}$

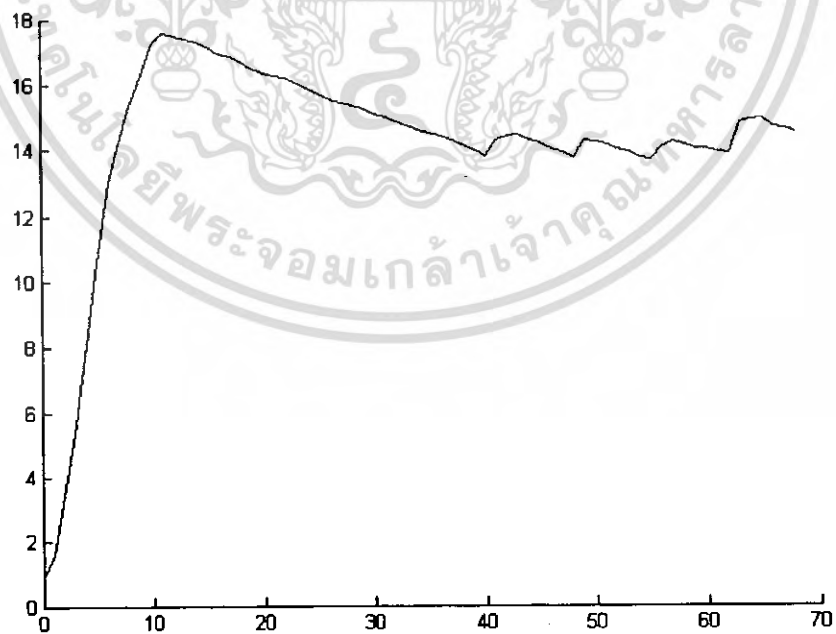


รูปที่ 4.11 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.00005$  และ  $K_i = 10^{-8}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

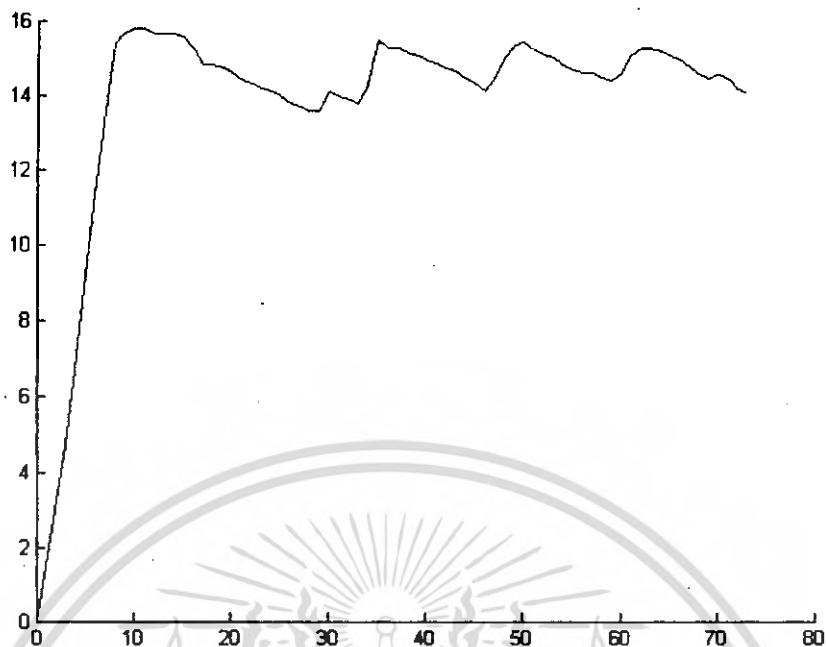


รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.0001$

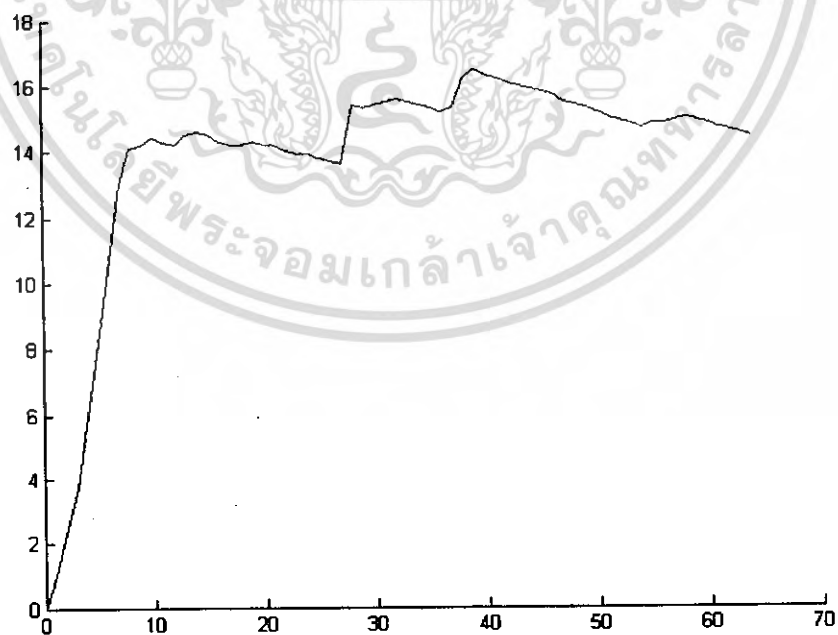


รูปที่ 4.13 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.0001$  และ  $K_i = 10^{-6}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

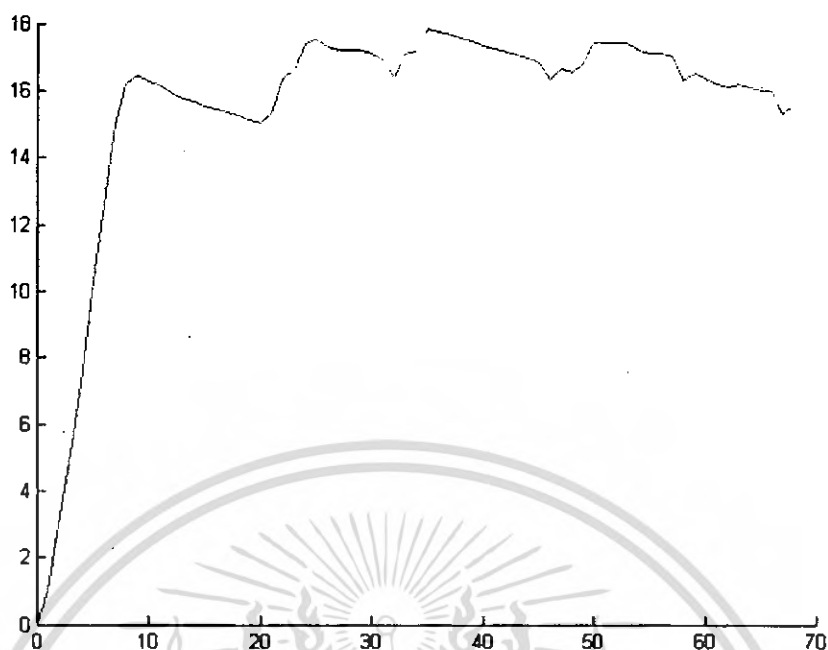


รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.0001$  และ  $K_i = 10^{-7}$

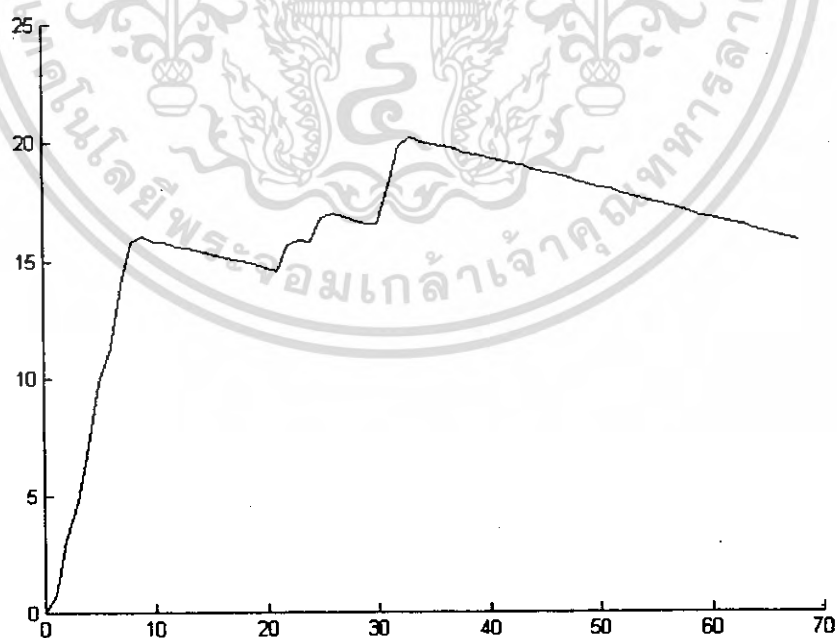


รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.0001$  และ  $K_i = 10^{-8}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

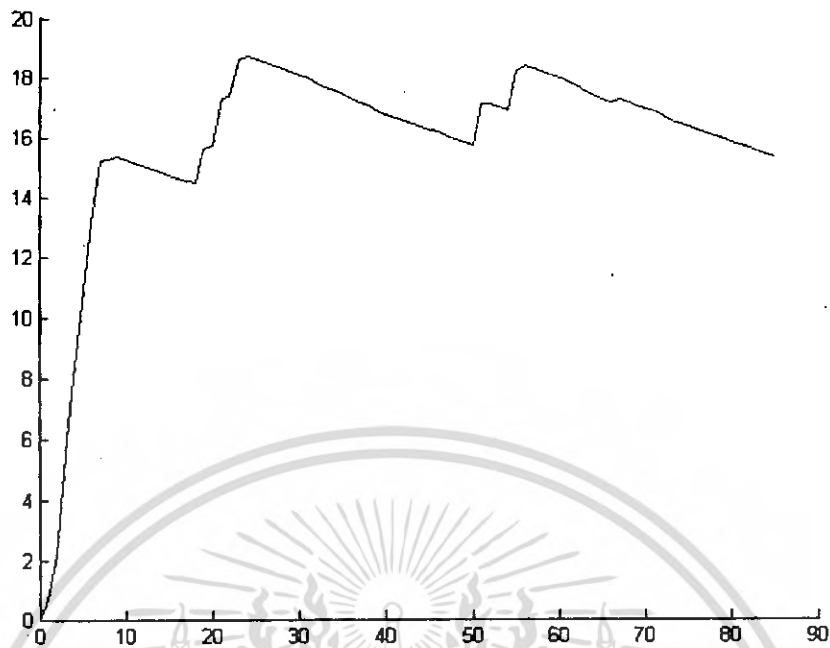


รูปที่ 4.16 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.0005$

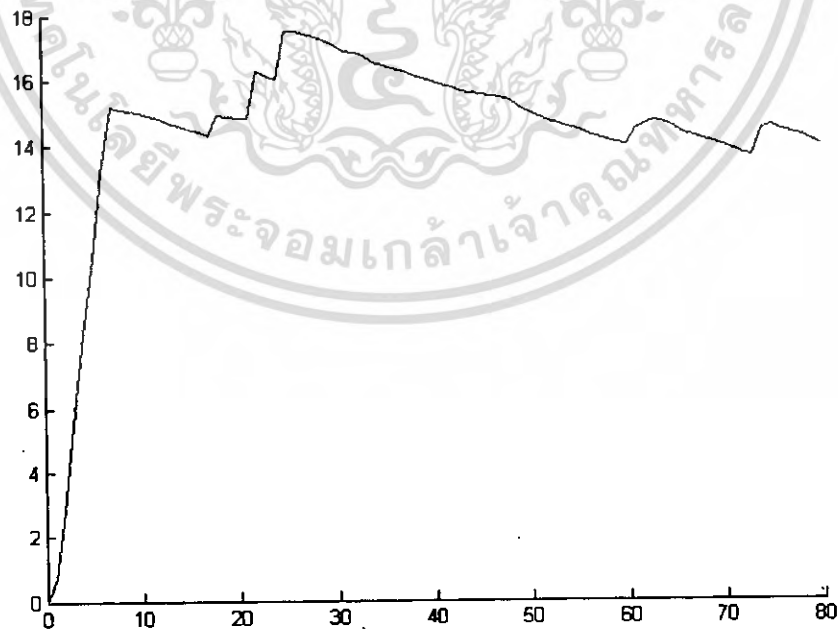


รูปที่ 4.17 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.001$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

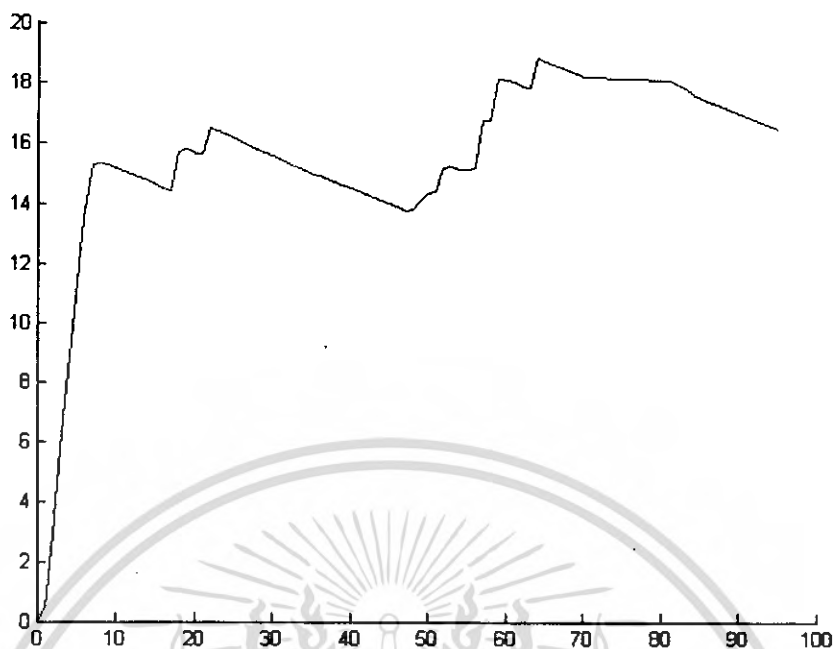


รูปที่ 4.18 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.001$  และ  $K_i = 10^{-6}$

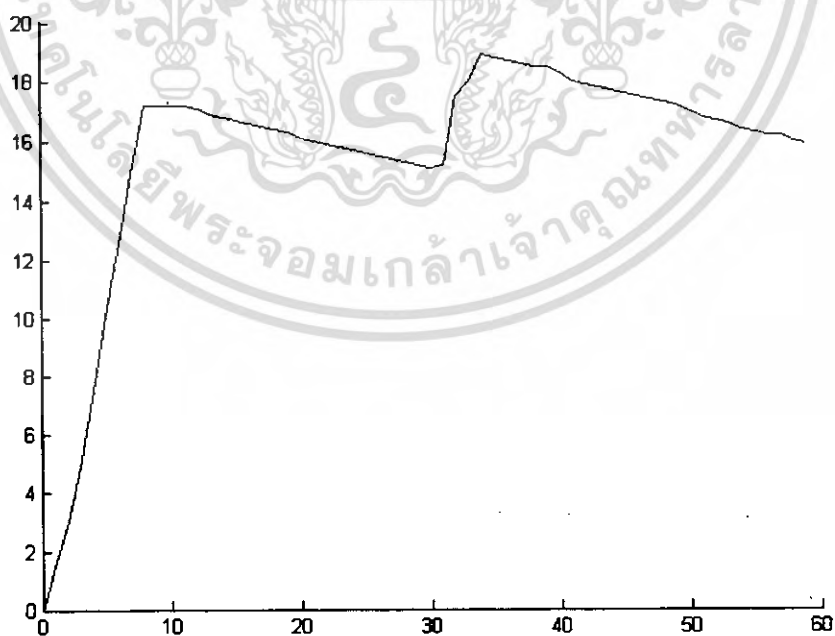


รูปที่ 4.19 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.001$  และ  $K_i = 10^{-7}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

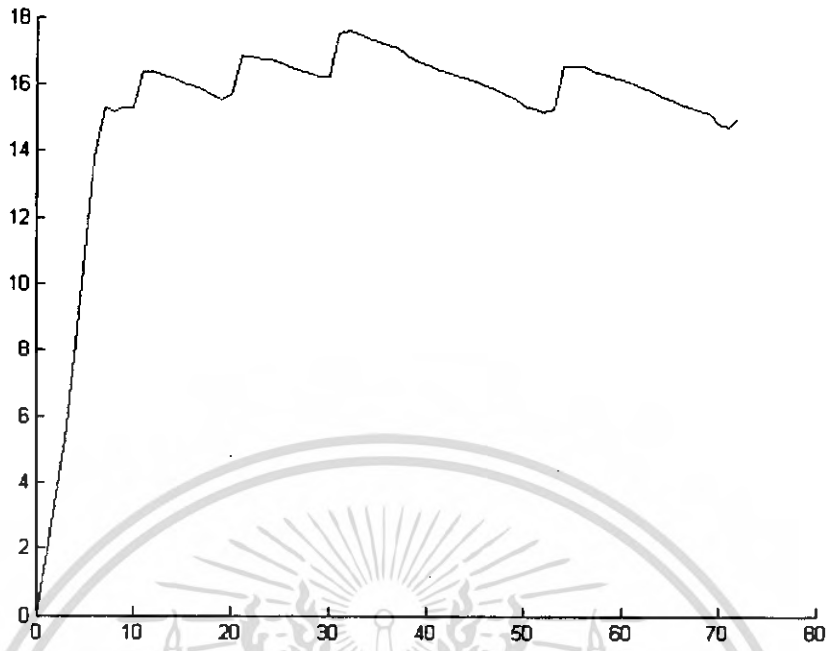


รูปที่ 4.20 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.001$  และ  $K_i = 10^{-8}$

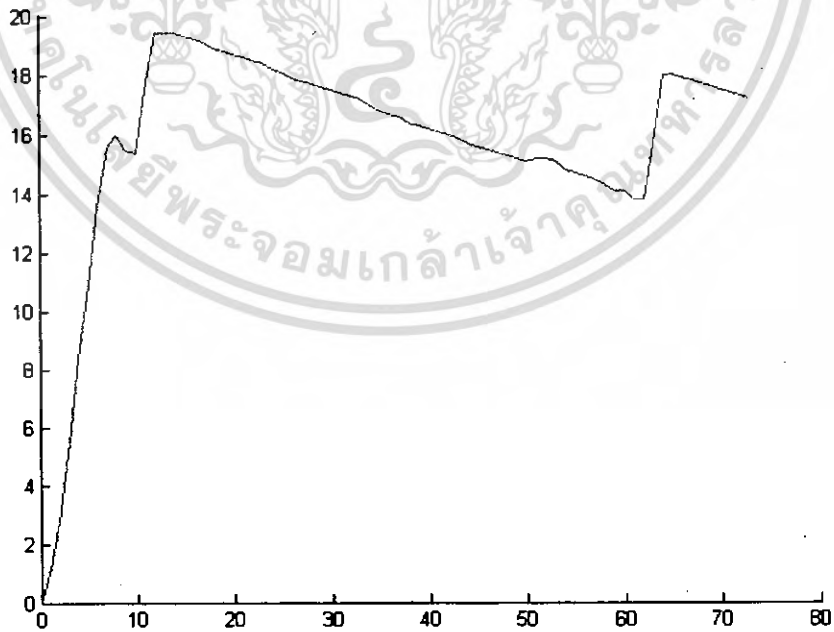


รูปที่ 4.21 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.01$  และ  $K_i = 10^{-6}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

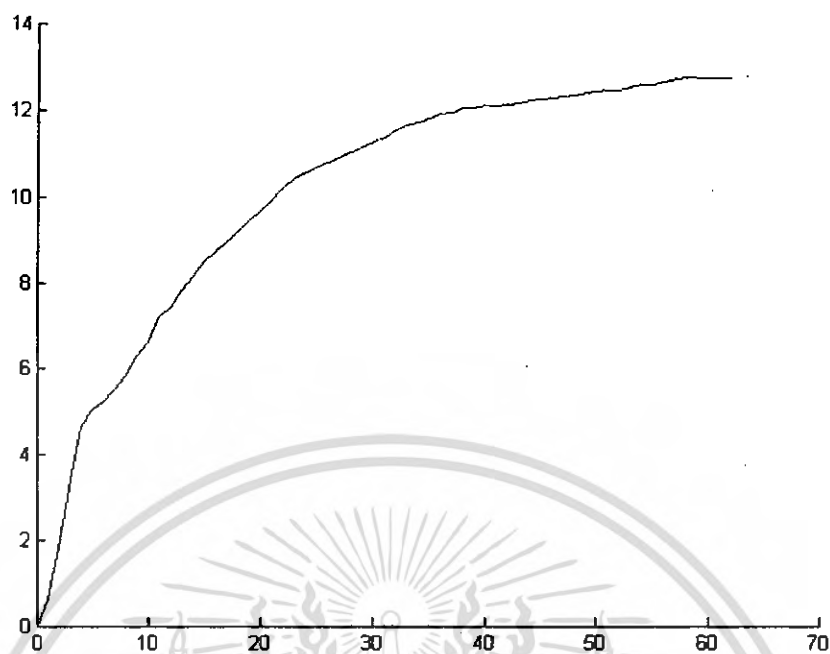


รูปที่ 4.22 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.01$  และ  $K_i = 10$  <sup>-7</sup>

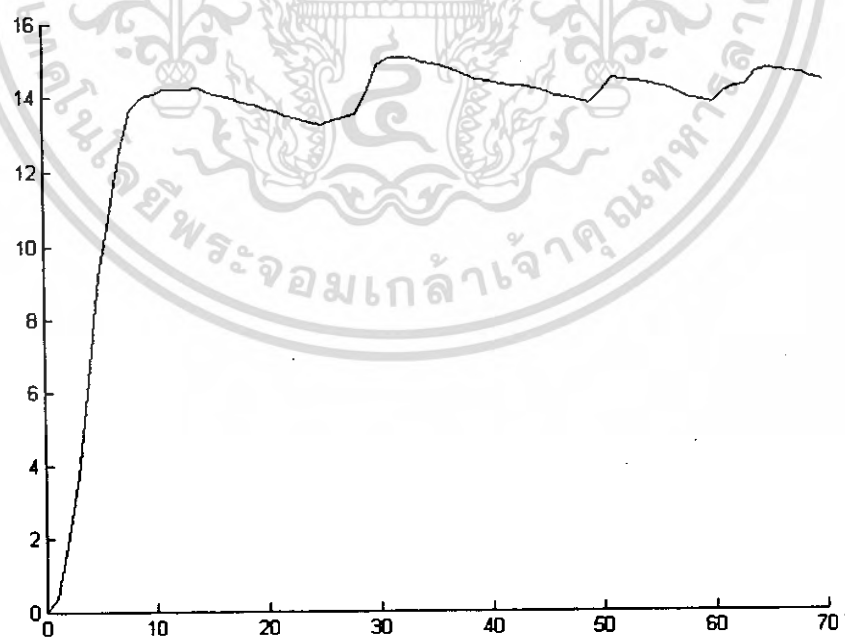


รูปที่ 4.23 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.01$  และ  $K_i = 10^{-8}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.000005$



รูปที่ 4.25 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.000025$

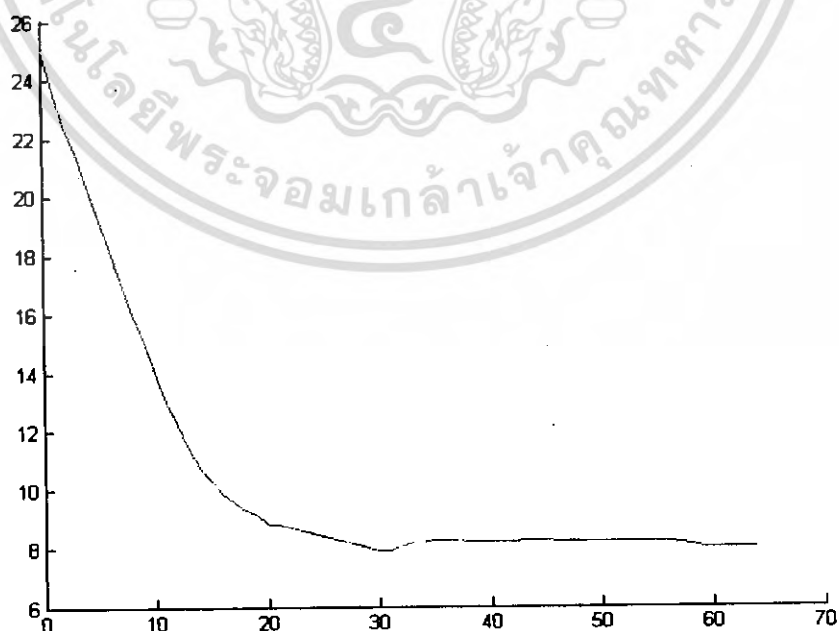
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 2 จะทำการเปลี่ยนค่า Proportional Gain ( $K_p$ ) และ Integral Gain ( $K_i$ ) แล้วทำการเก็บข้อมูลระหว่างเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป กับระดับความสูงของน้ำ โดยการทดลองจะกำหนดระดับความสูงของน้ำเริ่มต้นคือ 25 ซม. ระดับน้ำเป้าหมายคือ 15 ซม. และให้ Load Valve ด้านล่างเปิด 60 องศา โดยค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ที่ทดลองมีค่าดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ที่ใช้ในการทดลองที่ 2

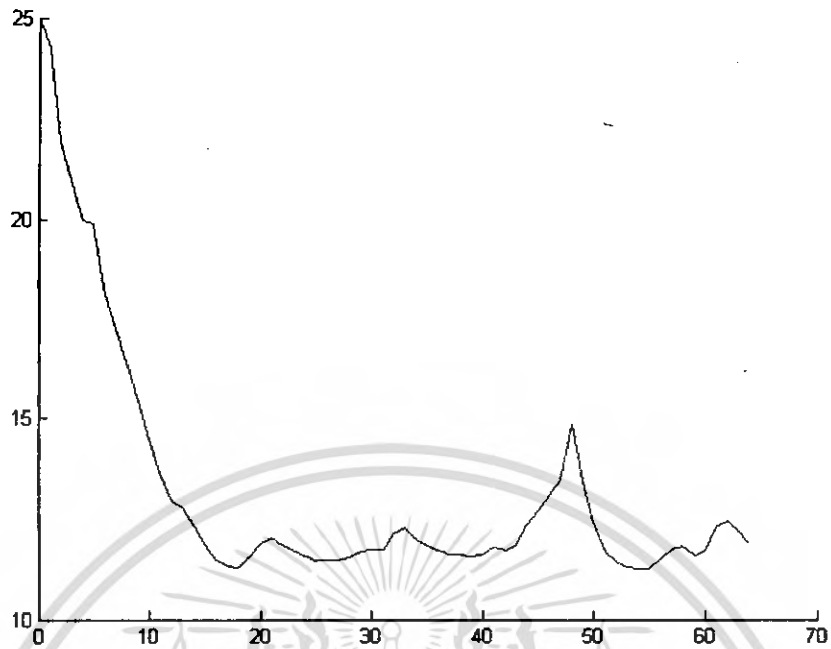
Proportional Gain ( $K_p$ )	Integral Gain ( $K_i$ )
0.00001	-
0.000025	-
0.00005	-
	$10^{-6}$
	$10^{-7}$
	$10^{-8}$
0.0001	-
0.0005	-
0.001	-

เมื่อทดลองใช้ค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ที่ค่าต่างๆแล้วนำมาเขียนกราฟ โดยให้แกน X แทนเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป และให้แกน Y แทนระดับความสูงของน้ำในถัง ได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

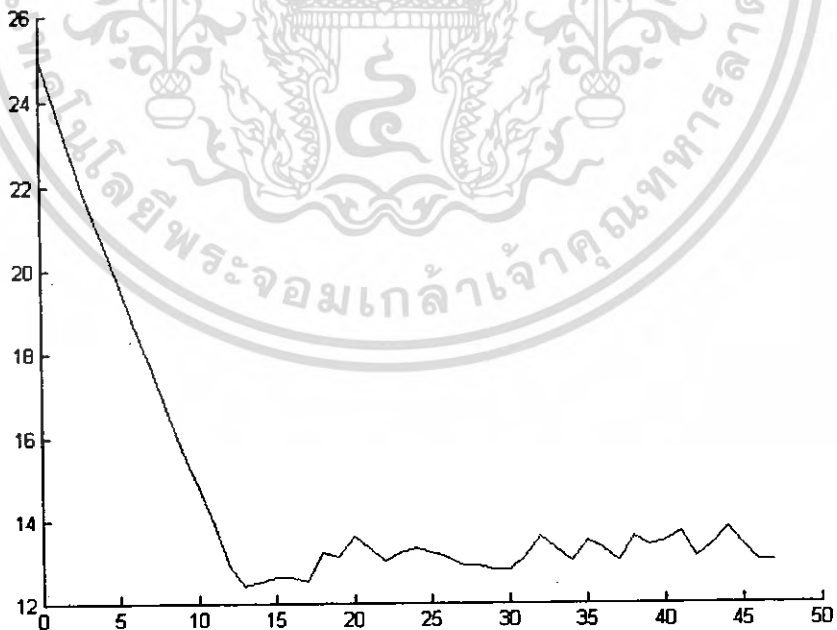


รูปที่ 4.26 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.00001$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

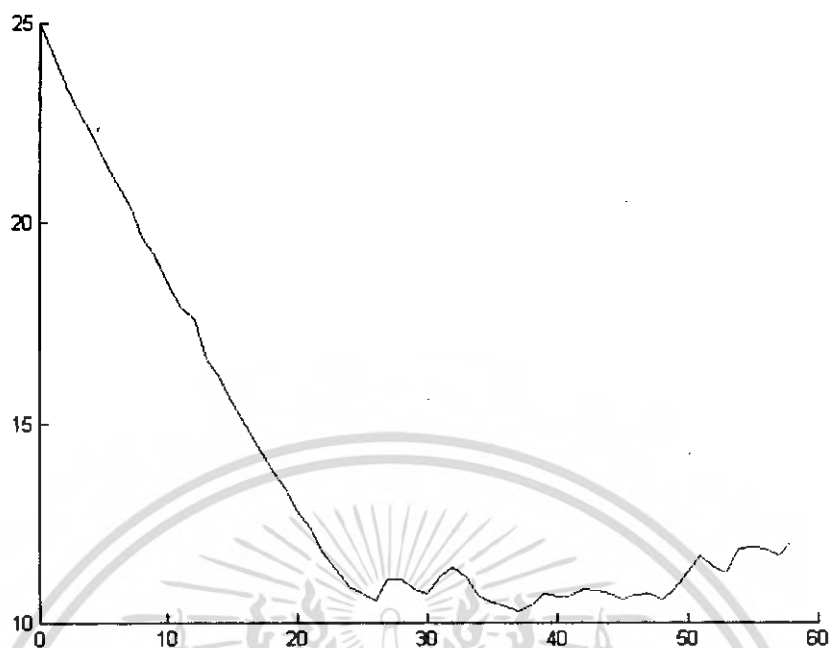


รูปที่ 4.27 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.000025$

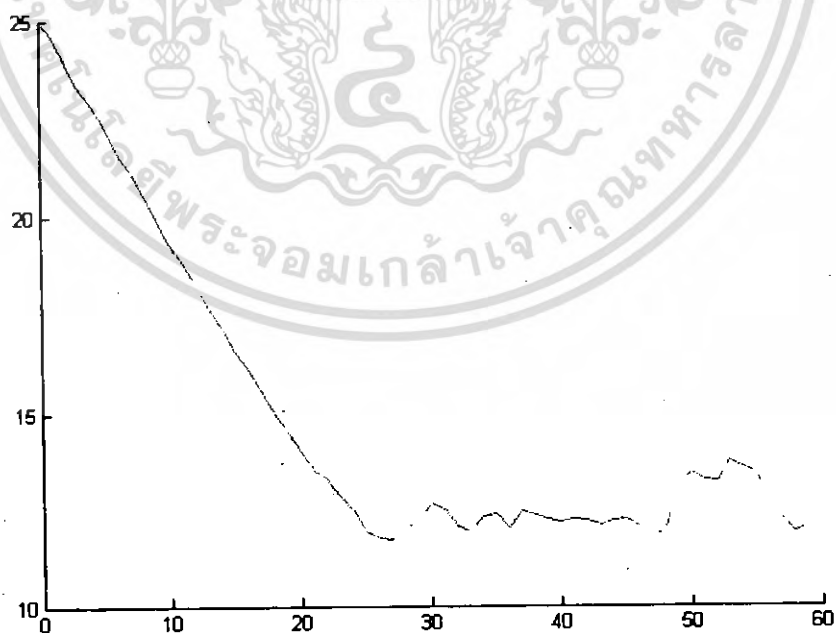


รูปที่ 4.28 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.00005$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

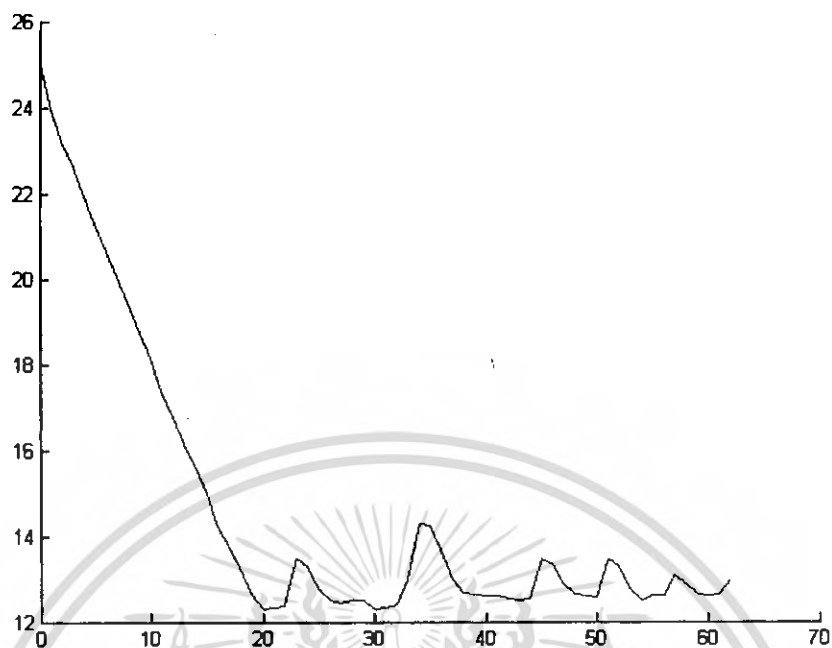


รูปที่ 4.29 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.00005$  และ  $K_i = 10^{-6}$

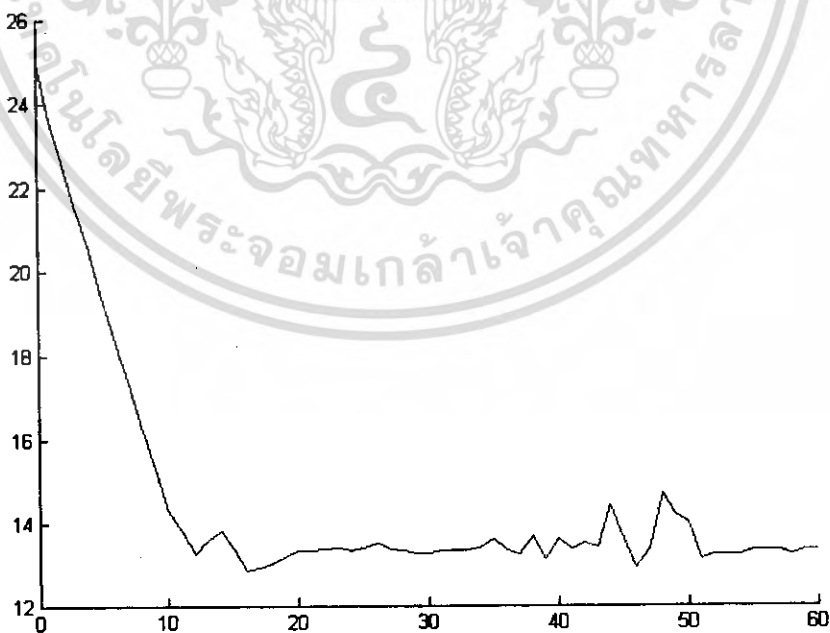


รูปที่ 4.30 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.00005$  และ  $K_i = 10^{-7}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

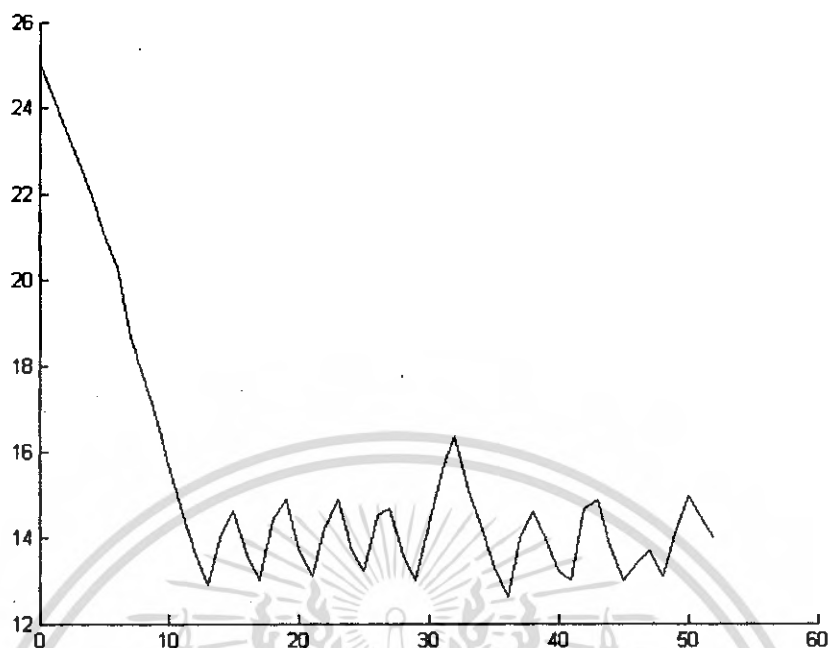


รูปที่ 4.31 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.00005$  และ  $K_i = 10^{-8}$

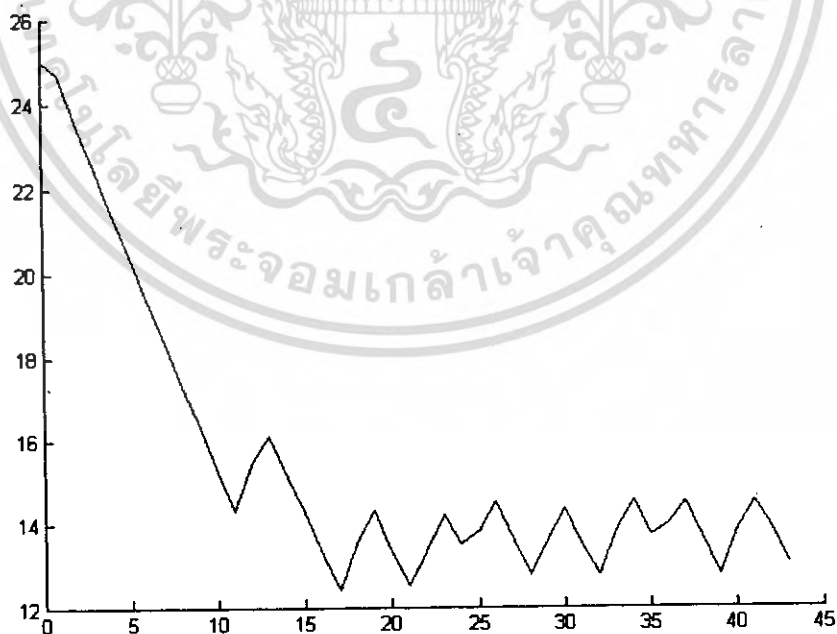


รูปที่ 4.32 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.0001$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.0005$



รูปที่ 4.34 แสดงผลการทดลองเมื่อใช้ค่า  $K_p = 0.001$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 วิจารณ์ผลการทดลอง

การทดลองที่ผ่านมาได้ทำการทดลองโดยให้สถานะเริ่มต้นต่างกันแบ่งออกเป็นสถานะเริ่มต้น (0 เซนติเมตร) ต่ำกว่าระดับที่ต้องการ (15 เซนติเมตร) และสถานะเริ่มต้น (25 เซนติเมตร) สูงกว่าระดับที่ต้องการ (15 เซนติเมตร) เพื่อศึกษาผลการตอบสนองของระบบที่มีสถานะเริ่มต้นต่างกัน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าทั้งสองระบบให้ผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่า  $K_p$  และ  $K_i$  ใกล้เคียงกัน โดยการทดลองเมื่อใช้การควบคุมแบบ Proportional (P-Control) ผลตอบสนองของระบบจะกลายเป็นระบบแบบ On-Off เมื่อใช้ค่า  $K_p$  มากเกินไป ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.16, 4.17, 4.33 และ 4.34 โดยหากใช้ค่า  $K_p$  น้อยเกินไปจะเกิด ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว (Steady-State Error) ขึ้นอย่างชัดเจน ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.24 และ 4.26

ส่วนการทดลองการควบคุมแบบ Proportional-Integral (PI-Control) โดยให้ค่า  $K_i$  คงที่ไว้ และใช้ค่า  $K_p$  ต่างๆกันพบว่าผลการตอบสนองของระบบจะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการควบคุมแบบ Proportional (P-Control) คือระบบจะตอบสนองเป็นระบบแบบ On-Off เมื่อใช้ค่า  $K_p$  มากเกินไปดังรูปที่ 4.20, 4.21 และ 4.22 และเมื่อให้ค่า  $K_p$  คงที่ และเปลี่ยนเฉพาะค่า  $K_i$  จะพบว่าเมื่อใช้ค่า  $K_i$  มากเกินไประบบจะไม่เสถียรดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.7 และถ้าใช้ค่า  $K_i$  น้อยเกินไประบบจะใช้เวลานานในการเข้าสู่สถานะคงตัวดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.11 และ 4.30

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและแนวทางในการพัฒนา

ในการดำเนินงานโครงการออกแบบและสร้างระบบควบคุมระดับน้ำด้วยวิธีพีไอดี ได้ทำการสร้างชุดทดลองระบบควบคุมระดับน้ำ โดยกำหนดให้มีการควบคุมวาล์วเฉพาะที่ทางเข้า ส่วนวาล์วในทางออกจะเป็นไหลควาล์ว ที่สามารถปรับมุมมองขาของการเปิด-ปิดวาล์ว ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อระบบ ทั้งในแง่ของเวลาที่ระบบใช้ในการรักษาสมดุลของระดับน้ำ และระดับน้ำสูงสุดที่จะสามารถตอบสนองต่อคำสั่งได้

ในส่วนของวาล์วควบคุม ซึ่งถือเป็นอุปกรณ์หลักของโครงการงานชิ้นนี้ได้มีการศึกษาถึงทางเลือกในการใช้วาล์วหลากหลายแบบ โดยคำนึงถึงประสิทธิภาพในการใช้งานรวมถึงความเป็นไปได้ในการนำมาใช้จริง ทางผู้จัดทำได้เลือกที่จะสร้างวาล์วควบคุมขึ้นเองโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาเป็นตัวขับเคลื่อนวาล์วควบคุมดังที่ได้ให้รายละเอียดไว้ในบทที่ 3 ในขณะที่อุปกรณ์วัดระดับน้ำนั้นก็ก็ได้เลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความดัน โดยดูจากความเหมาะสมในการใช้งาน เมื่อพิจารณาจากปริมาณของระดับน้ำที่ต้องการวัดในถังควบคุม ส่วนในด้านของโปรแกรมควบคุมก็ได้ใช้ โปรแกรมแลปวิว (LabVIEW) เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลและควบคุมระบบ จากการที่โปรแกรมนี้มีแนวคิดแบบใช้รูปในการพัฒนา (Graphical-based Programming) ทำให้มีข้อดีตรงที่เป็นโปรแกรมที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจและพัฒนาต่อ รวมไปถึงง่ายต่อการเชื่อมต่อข้อมูลทั้งรับเข้าและส่งออกสัญญาณต่ออุปกรณ์ภายนอก

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ในส่วนของการออกแบบและสร้างระบบควบคุมระดับน้ำด้วยวิธีพีไอดี ได้ทำการทดลองการควบคุมระดับความสูงของน้ำในถังเดียวแนวตั้ง โดยที่ให้สภาวะเริ่มต้นต่างกันรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลออก ผ่านทางการควบคุมองศาในการเปิด-ปิดไหลควาล์ว โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองแบบคือ การควบคุมแบบ Proportional (P-Control) และการควบคุมแบบ Proportional-Integral (PI-Control) โดยพบว่า การควบคุมแบบ P-Control นั้นจะให้ระดับความสูงของน้ำใกล้เคียงกับระดับที่ต้องการเมื่อค่า Proportional Gain มีค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่งซึ่งจากผลการทดลองพบว่า มีค่าเท่ากับ 0.0001 ดังเห็นได้จากรูปที่ 4.9 และ 4.29 ซึ่งเมื่อใช้ค่า Proportional Gain มากกว่านี้ระบบจะตอบสนองคล้ายคลึงกับระบบควบคุมแบบ เปิด- ปิด (On-Off Control) และหากใช้ค่า Proportional Gain น้อยกว่านี้ ระบบจะเกิดค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว (Steady State Error) สูง

ส่วนการทดลองโดยใช้การควบคุมแบบ Proportional-Integral (PI-Control) นั้นค่า Proportional Gain ที่เหมาะสมคือ 0.00005 ซึ่งใช้ร่วมกับค่า Integral Gain ระหว่าง 0.000001-0.0000001 จะให้ค่าที่ไม่ต่างกันมากนัก ดังเห็นได้จากรูปที่ 4.6 ถึง 4.8 และรูปที่ 4.26 ถึงรูปที่ 4.28 โดยความเร็วของระบบจะขึ้นอยู่กับค่า Proportional Gain เป็นหลัก หากใช้ค่า Proportional Gain มากกว่านี้ระบบจะตอบสนองคล้ายคลึงกับระบบควบคุมแบบ เปิด- ปิด (On-Off Control) และหากใช้ค่า Proportional Gain น้อยกว่านี้ ระบบจะเกิดค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว (Steady State Error) สูง ทั้งนี้ระบบควบคุมระดับน้ำแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Proportional-Integral (PI-Control) นั้นจะช่วยในการลดค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว (Steady State Error) จากการใช้ระบบควบคุมแบบ Proportional (P-Control) เพียงอย่างเดียวได้

## 5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

ปัญหาที่พบในระหว่างการทดลองพบว่า เมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลาาน แสงวงจรควบคุมมอเตอร์ที่สร้างขึ้นจะเกิดความร้อนขึ้น ซึ่งเสี่ยงต่อการที่จะทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเปราะบางเกิดความเสียหายได้ โดยเฉพาะ ไอซีเบอร์ BD139 และ BD140 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการจ่ายไฟ เพื่อให้มอเตอร์หมุนในทิศทางที่ต้องการนั้นจะเกิดความร้อนขึ้นได้โดยง่าย ทางผู้จัดทำได้แก้ปัญหาโดยการติดครีบบระบายความร้อน ซึ่งก็ช่วยระบายความร้อนได้ส่วนหนึ่ง

ส่วนของวาล์วควบคุมที่ใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนและมีตัวต้านทานแบบปรับค่าได้มาเป็นตัวจับการเคลื่อนไหวของมอเตอร์นั้น พบว่ายังมีลักษณะของการรักษาสมดุลที่ยังไม่เพียงพอ ทำให้ตอบสนองต่อสัญญาณที่ได้รับจากส่วนของโปรแกรมประมวลผลได้ไม่เต็มที่ ส่งผลให้ระดับความสูงของน้ำในถังมีค่าคลาดเคลื่อนไปจากระดับที่ต้องการ ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้หลายแนวทาง ทั้งการเพิ่มจำนวนของฟันเฟืองที่อยู่ระหว่างตัวมอเตอร์กับตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ เพื่อให้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้สามารถจับการเคลื่อนไหวของตัวมอเตอร์ได้ละเอียดขึ้น หรือการเปลี่ยนลักษณะของตัวต้านทานปรับค่าได้ไปใช้แบบที่มีความละเอียดมากขึ้น รวมถึงการเปลี่ยนตัวขับเคลื่อนวาล์วควบคุมไปใช้มอเตอร์แบบอื่น ซึ่งอาจจะเปลี่ยนเป็นเซอร์โวมอเตอร์ที่มีตัวเอนโคเดอร์ คอยจับการเคลื่อนไหวที่อยู่ภายในตัวเอง ก็จะช่วยแก้ปัญหานี้ได้เช่นกัน

สำหรับส่วนของการวัดระดับน้ำนั้น ตัวเซนเซอร์ที่ใช้วัดเป็นลักษณะวัดแรงดันเปรียบเทียบกับความดันบรรยากาศ ซึ่งเมื่อวาล์วควบคุมเปิดจนสุด อัตราการไหลของน้ำจะมากจนส่งผลให้ระดับของน้ำในถังควบคุมเกิดการสั่น ซึ่งส่งผลต่อสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งออกไปเข้าสู่โปรแกรมประมวลผล รวมไปถึงการเกิดสัญญาณรบกวนจากสภาวะแวดล้อมภายนอก ทำให้ไม่สามารถวัดระดับความสูงของน้ำได้อย่างแม่นยำนัก โดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ส่งเข้าสู่คอมพิวเตอร์นั้นเป็นส่วนสำคัญของการคำนวณหาอัตราการไหลเข้าสู่ถังควบคุมระดับน้ำ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดค่าความผิดพลาดที่ทำให้ระบบไม่สามารถควบคุมให้ระดับน้ำมีค่าตรงกับระดับที่ต้องการได้

## 5.3 แนวทางในการพัฒนาต่อ

ในโครงการออกแบบและสร้างระบบควบคุมระดับน้ำด้วยวิธีพีไอดี ทางผู้จัดทำได้ทำการสร้างส่วนของฮาร์ดแวร์ไว้เพื่อรองรับการพัฒนาต่อสำหรับกระบวนการควบคุมระดับน้ำแบบสองถังที่มีปฏิริยาต่อกัน รวมทั้งการหาสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการควบคุมระดับน้ำแบบสองถังที่มีปฏิริยาต่อกันไว้เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับผู้พัฒนาต่อ ส่วนในด้านวาล์วควบคุมก็สามารถพัฒนาประสิทธิภาพให้ดีขึ้นได้ตามแนวทางที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น รวมถึงการพัฒนาในส่วนของโปรแกรมควบคุมให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการควบคุมระดับน้ำแบบสองถัง

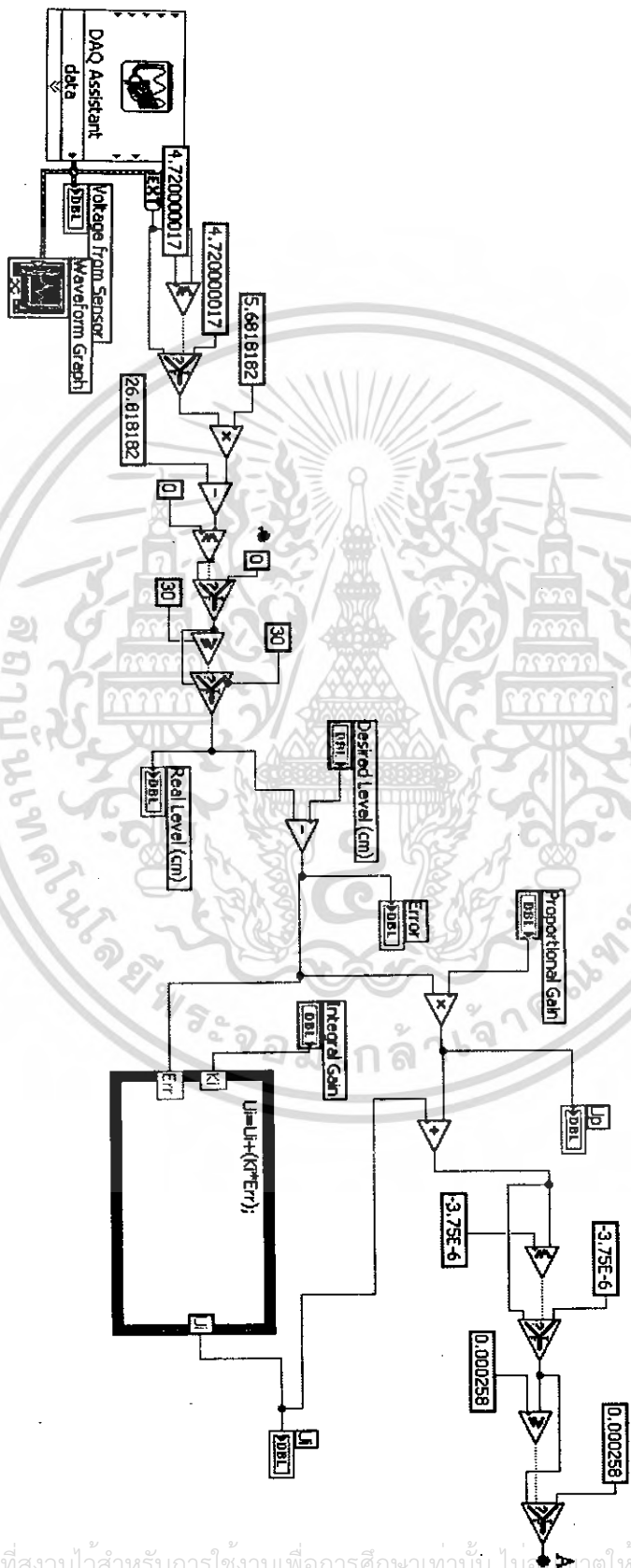
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บรรณานุกรม

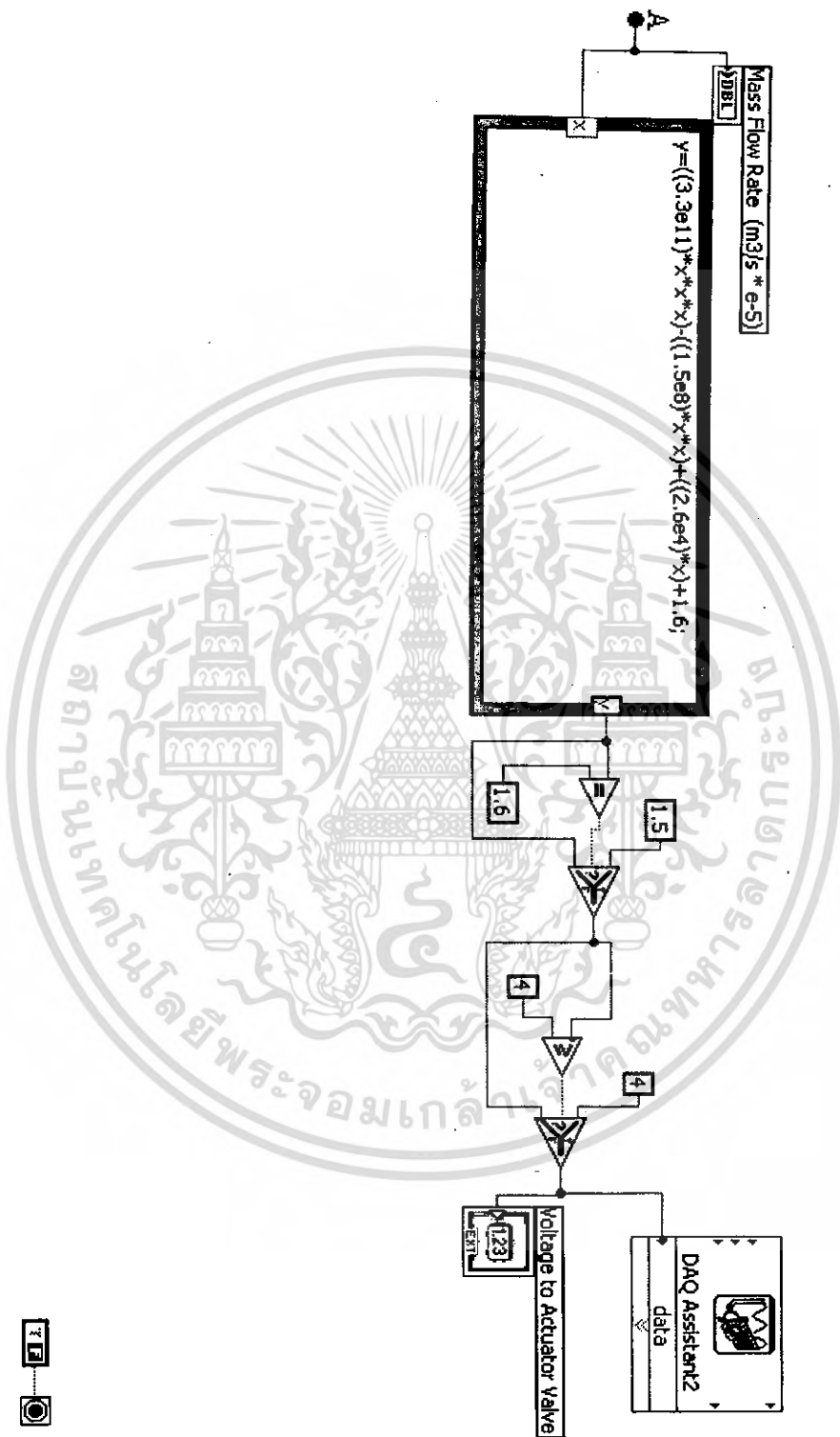
- [1] โคม ศิริศักดิ์โสภิต, สุมิร เจนจิรโฆนิต, อดุลย์ พัฒนถักดี, การควบคุมระดับของไหลในท่อสองท่อที่ต่อถึงกันโดยใช้คอมพิวเตอร์, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2534
- [2] กิตติ ตีรเศรษฐ, พื้นฐานวิศวกรรมระบบควบคุม, พิมพ์ครั้งที่ 5, ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2539
- [3] รศ.สุมาลี อุณหวิชัย, ระบบควบคุม, ว.เพ็ชรสกุล จำกัด. 2545
- [4] รศ.ธีรศิลป์ ทุมวิภาต, สุภาพร จำปาทอง, เรียนรู้พีแอลซีด้วยตนเอง, ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 2547
- [5] เจริญ เพชรมณี, เรียนลัด LabVIEW, ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 2547
- [6] Ogata K, System Dynamics, 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice-Hall Inc, 1998
- [7] Richard C. Dorf, Modern Control Systems, 10<sup>th</sup> Edition., Pearson Educational Inc. 2003
- [8] Jeffrey Travis, Jim Kring, LabVIEW For Everyone, 3<sup>rd</sup> Edition, Prentice-Hall Inc.2007



ภาคผนวก ก  
การเขียนโปรแกรมการควบคุมโดยโปรแกรม LabVIEW



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ACCELERATION SENSORS

### Low g Consumer Acceleration Sensors

Product	Sensing Range (g)	Sensing Axis	Sensitivity (mV/g)	I <sub>DD</sub> (Typ) (mA)	Sleep Mode I <sub>DD</sub> (Typ) (µA)	Sleep Mode Response Time (Typ) (ms)	Start Up Response Time (Typ) (ms)	Rolloff Frequency (Hz)	V <sub>DD</sub> Supply Voltage (V)	Zero g Output (Typ) (V)	Packaging
MMA7260QT	1.5/2/4/8	XYZ	800/600/300/200	0.8	3.0	0.8	1.0	350 (XY)/150 (Z)	2.2 - 3.8	1.65	8 x 8 x 1.45 mm QFN
MMA7281QT	2.5/3.3/6.7/10	XYZ	450/380/180/120	0.5	3.0	0.5	1.0	350 (XY)/150 (Z)	2.2 - 3.8	1.65	8 x 8 x 1.45 mm QFN
MMA8280QT	1.5/2/4/8	XZ	800/600/300/200	0.5	3.0	0.5	1.0	350 (X)/150 (Z)	2.2 - 3.8	1.68	8 x 8 x 1.45 mm QFN
MMA8281QT	2.5/3.3/6.7/10	XZ	450/380/180/120	0.5	3.0	0.5	1.0	350 (X)/150 (Z)	2.2 - 3.8	1.65	8 x 8 x 1.45 mm QFN
MMA8270QT	1.5/2/4/8	XY	800/600/300/200	0.5	3.0	0.5	1.0	350 (XY)	2.2 - 3.8	1.65	8 x 8 x 1.45 mm QFN
MMA8271QT	2.5/3.3/6.7/10	XY	450/380/180/120	0.5	3.0	0.5	1.0	350 (XY)	2.2 - 3.8	1.65	8 x 8 x 1.45 mm QFN
MMA8260QT	1.5	XY	800	1.2	N/A	N/A	14	50 (XY)	2.7 - 3.8	1.65	8 x 8 x 1.98 mm QFN
MMA8261QT	1.5	XY	800	1.2	N/A	N/A	2.0	300 (XY)	2.7 - 3.8	1.65	8 x 8 x 1.98 mm QFN
MMA8262QT	1.5	XY	800	2.2	N/A	N/A	4.0	150 (XY)	2.7 - 3.8	1.65	8 x 8 x 1.98 mm QFN
MMA8263QT	1.5	XY	800	2.2	N/A	N/A	0.7	900 (XY)	2.7 - 3.8	1.65	8 x 8 x 1.98 mm QFN
MMA8231QT	10	XY	120	1.2	N/A	N/A	2.0	300 (XY)	2.7 - 3.8	1.65	8 x 8 x 1.98 mm QFN
MMA8233QT	10	XY	120	2.2	N/A	N/A	0.7	900 (XY)	2.7 - 3.8	1.65	8 x 8 x 1.98 mm QFN

### Low g Industrial Acceleration Sensors

Product	Sensing Range (g)	Sensing Axis	Sensitivity (mV/g)	Rolloff Frequency (Hz)	V <sub>DD</sub> Supply Voltage (Typ) (V)	Zero g Output (Typ) (V)	Packaging
MMA3260EG	1.5	X	1200	50	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA1280EG	1.5	Z	1200	80	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA1270EG	2.5	Z	780	50	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA1260EG	5.0	Z	400	50	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA1220EG	8.0	Z	250	250	5.0	2.5	18-pin SOIC

### Medium g Acceleration Sensors

Product	Sensing Range (g)	Sensing Axis	Sensitivity (mV/g)	Rolloff Frequency (Hz)	V <sub>DD</sub> Supply Voltage (Typ) (V)	Zero g Output (Typ) (V)	Packaging
MMA3201EG	40/40	XY	50/50	400	5.0	2.5	20-pin SOIC
MMA2201EG	40	X	50	400	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA2202EG	50	X	40	400	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA3204EG	100/30	XY	20/68.87	400	5.0	2.5	20-pin SOIC
MMA3202EG	100/50	XY	50/100	400	5.0	2.5	20-pin SOIC
MMA2204EG	100	X	20	400	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA1213EG	50	Z	40	400	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA1210EG	100	Z	20	400	5.0	2.5	18-pin SOIC

### High g Acceleration Sensors

Product	Sensing Range (g)	Sensing Axis	Sensitivity (mV/g)	Rolloff Frequency (Hz)	V <sub>DD</sub> Supply Voltage (Typ) (V)	Zero g Output (Typ) (V)	Packaging
MMA1211EG	150	Z	13	400	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA2301EG	200	X	10	400	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA1212EG	200	Z	10	400	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA2300EG	250	X	8.0	400	5.0	2.5	18-pin SOIC
MMA1200EG	250	Z	8.0	400	5.0	2.5	18-pin SOIC

A change bar appears in the left margin to mark the location of new or revised information.

# PRESSURE SENSORS

## Integrated Pressure Sensors

Product Family	Pressure Rating Maximum (PSI)	Pressure Rating Maximum (kPa)	Pressure Rating Maximum (in H <sub>2</sub> O)	Pressure Rating Maximum (cm H <sub>2</sub> O)	Pressure Rating Maximum (mm Hg)	Full Scale Span (Typ) (Vdc)	Sensitivity (mV/kPa)	Accuracy 0°C to 85°C (% of VFSS)	Pressure Type <sup>2</sup>
MPX4080	11.8	80	321	815	600	4.3	84	±3.0	A
MPX4100	15.2	106	422	1070	788	4.6	84	±1.8	D
MPX4101	14.8	102	410	1040	765	4.6	84	±1.8	D
MPX4101	14.8	102	410	1040	765	4.6	84	±1.8	D
MPX4105	15.2	106	422	1070	788	4.6	81	±1.8	D
MPX4115	16.7	115	452	1174	883	4.8	48	±1.5	D
MPX4115	16.7	115	452	1174	883	4.0	38	±1.5	D
MPX6115	16.7	115	452	1174	883	4.6	45	±1.5	D
MPX4200	29	200	803	2040	1500	4.6	28	±1.5	D
MPX4200	29	200	803	2040	1500	4.7	20	±1.5	D
MPX4250	38	260	1000	2550	1880	4.7	19	±1.4	D
MPX4250	38	260	1000	2550	1880	4.7	19	±1.5	D
MPX4008	0.87	6.0	24	61	45	4.8	788	±6.0	D
MPX4004	1.45	10	40	102	75	4.5	1000	±2.5	D
MPX6010	7.25	50	201	510	375	4.5	90	±2.5	D
MPX6050	14.5	100	401	1020	750	4.5	45	±2.5	D
MPX6100	18.7	115	452	1174	883	4.5	45	±2.5	D
MPX6500	72.8	500	2000	5100	3750	4.5	9.0	±2.5	D
MPX6700	102	700	2810	7140	5250	4.5	8.0	±2.5	D
MPX6998	150	1000	4180	10548	7757	4.5	6.0	±2.5	D
MPX46300	4.4	300	1200	3060	2250	4.7	18	±1.8	D
MPX46400	6.0	400	1600	4000	3000	4.7	12	±1.5	D
MPX7002	±0.3	±2	±28	±70	±53	4.8	1000	±2.5	D
MPX7007	±1.0	±7	±100	±254	±190	4.5	90	±5.0	D
MPX7025	±3.5	±25	±100	±254	±190	4.5	90	±5.0	D

## Compensated Pressure Sensors

Product Family	Pressure Rating Maximum (PSI)	Pressure Rating Maximum (kPa)	Pressure Rating Maximum (in H <sub>2</sub> O)	Pressure Rating Maximum (cm H <sub>2</sub> O)	Pressure Rating Maximum (mm Hg)	Full Scale Span (Typ) (mV)	Sensitivity (mV/kPa)	Linearity Minimum (% of VFSS)	Linearity Maximum (% of VFSS)	Pressure Type <sup>2</sup>
MPX2010	1.45	10	40	102	75	25	2.5	-1.0	1.0	A
MPX2053	7.0	50	201	510	375	40	0.8	-0.5	0.4	D
MPX2102	14.5	100	400	1020	750	40	0.4	-1.0	1.0	D
MPX2202	29	200	800	2040	1500	40	0.4	-0.8	0.4	D
MPX2060	7.0	50	201	510	375	40	0.2	-1.0	1.0	D
MPX2100	14.5	100	400	1020	750	40	0.2	-0.8	0.4	D
MPX2200	29	200	800	2040	1500	40	0.2	-0.3	-0.3	D
MPX2200	29	200	800	2040	1500	40	0.2	-1.0	-1.0	D
MPX2200	29	200	800	2040	1500	40	0.2	-0.3	-0.3	D

## Compensated Medical Grade Pressure Sensors

Product Family <sup>1</sup>	Pressure Rating Maximum (PSI)	Pressure Rating Maximum (kPa)	Pressure Rating Maximum (in H <sub>2</sub> O)	Pressure Rating Maximum (cm H <sub>2</sub> O)	Pressure Rating Maximum (mm Hg)	Supply Voltage (Typ) (Vdc)	Offset (Typ) (mV)	Linearity Minimum (% of VFSS)	Linearity Maximum (% of VFSS)	Pressure Type <sup>2</sup>
MPXG2011	1.45	10	40	102	75	10.0	1.0	-1.0	1.0	A
MPXG300	5.8	40	161	408	300	6.0	0.75	-2.0	2.0	D

## Uncompensated Pressure Sensors

Product Family	Pressure Rating Maximum (PSI)	Pressure Rating Maximum (kPa)	Pressure Rating Maximum (in H <sub>2</sub> O)	Pressure Rating Maximum (cm H <sub>2</sub> O)	Pressure Rating Maximum (mm Hg)	Full Scale Span (Typ) (mV)	Sensitivity (mV/kPa)	Linearity Minimum (% of VFSS)	Linearity Maximum (% of VFSS)	Pressure Type <sup>2</sup>
MPX10	1.45	10	40	102	75	35	3.5	-1.0	1.0	A
MPX12	1.45	10	40	102	75	55	3.5	-1.0	1.0	D
MPX53	7.0	50	200	510	375	60	1.2	-0.8	0.4	D

<sup>1</sup>The primary care pressure sensor families are listed above. For orderable parts, please see page 7 or [www.freescale.com/sensors](http://www.freescale.com/sensors)

<sup>2</sup>A = Absolute, D = Differential, G = Gauge, V = Vacuum, \* = Available

A change bar appears in the left margin to mark the location of new or revised information.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ELECTRIC FIELD SENSING

Product	Description	Main Characteristics	No. of Channels	5 V Reg. Current Limit (mA)	Max Voltage (V)	Operating Temp Range (°C)	Communications	Packaging	Status
MC33794DWR2	Electric Field Imaging Device	120 kHz generator, shield driver, 9 electrodes + 2 V <sub>REG</sub> outputs, 5 V regulator, MCU support	11	75	40	-40 - 85	ISO-9141	84-pin SOICW	EVB Available
MC33941EGR2	Electric Field Imaging Device	Selectable from 60 kHz to 240 kHz generator, shield driver, 7 electrodes, 5 V regulator	7	75	40	0 - 110	N/A	24-pin SOICW	EVB Available
MC34940EGR2	Electric Field Imaging Device	Selectable from 60 kHz to 240 kHz generator, shield driver, 7 electrodes	7	N/A	40	0 - 90	N/A	24-pin SOICW	EVB Available

## ZIGBEE™-COMPLIANT PLATFORM

### ZigBee-Compliant and Proprietary RF Transceivers

Product	Data Rate (kbps)	Operating Voltage (V)	Band (MHz)	MCU Interface	Packaging	Status	Additional Information
MC13193FCR2	250 (max)	2.0 to 3.4	2.4 - 2.5 GHz	SPI	32-pin QFN 5x5	Available	2.4 GHz RF transceiver data modem for ZigBee™ applications (tape and reel)
MC13192FCR2	250 (max)	2.4 to 3.4	2.4 GHz	SPI	32-pin QFN 5x5	Available	2.4 GHz RF transceiver data modem for ZigBee™ applications
MC13191FCR2	250 (max)	2.4 to 3.4	2.4 GHz	SPI	32-pin QFN 5x5	Available	2.4 GHz Proprietary RF transceiver data modem for Point-to-Point and Star applications

## SAFETY AND ALARM INTEGRATED CIRCUITS

### Smoke Ion

Product	Operating Voltage (V)	Horn Tone	Interconnectable	Primary Power Source	Ordering Suffix Note
MC14467	6 to 12	Continuous - Old Tone - 4/8	No	DC	P1
MC14468	6 to 12	Continuous - Old Tone - 4/8	Yes	AC/DC	P
MC14688	6 to 12	Continuous - Old Tone - 4/8	Yes	AC/DC	P
MC145017	6 to 12	Temporal - New Tone - NFPA Tone	No	DC	P
MC145018	6 to 12	Temporal - New Tone - NFPA Tone	Yes	AC/DC	P

### Smoke Photo

Product	Operating Voltage (V)	Horn Tone	Interconnectable	Primary Power Source	Ordering Suffix Note
MC145010	6 to 12	Continuous - Old Tone - 4/8	Yes	AC/DC	P, DW, DWR2
MC145011	6 to 12	Continuous - Old Tone - 4/8	Yes	AC	P, DW, DWR2
MC148012	6 to 12	Temporal - New Tone - NFPA Tone	Yes	AC/DC	P, DW, DWR2

### Comparator

Product	Description	Operating Voltage (V)	Horn Modulation	Primary Power Source	Ordering Suffix Note
MC14578	Micro-Power Comparator Plus Voltage Follower	3.5 to 14	No Horn Driver	AC/DC	P
MC14568	Low Power CMOS Ionization Smoke Detector with Interconnect and Timer	6.0-12	Continuous	AC/DC	ED

Note: ED, P or P1 = 18-pin DIP, DW = SOIC 16-pin, DWR2 = SOIC 18-pin tape & reel

A change bar appears in the left margin to mark the location of new or revised information.

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

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

## Features

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

## Typical Applications

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

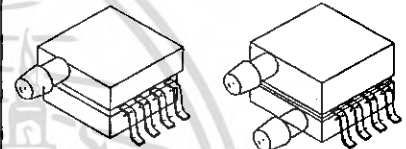
## ORDERING INFORMATION

Device Type	Options	Case No.	MPX Series Order No.	Packing Options	Device Marking
<b>SMALL OUTLINE PACKAGE (MPXV2010G SERIES)</b>					
Ported Elements	Gauge, Side Port, SMT	1369	MPXV2010GP	Trays	MPXV2010G
	Differential, Dual Port, SMT	1351	MPXV2010DP	Trays	MPXV2010G
<b>UNIBODY PACKAGE (MPX2010 SERIES)</b>					
Basic Element	Differential	344	MPX2010D	—	MPX2010D
Ported Elements	Differential, Dual Port	344C	MPX2010DP	—	MPX2010DP
	Gauge	344B	MPX2010GP	—	MPX2010GP
	Gauge, Axial	344E	MPX2010GS	—	MPX2010D
	Gauge, Axial PC Mount	344F	MPX2010GSX	—	MPX2010D

## MPX2010 MPXV2010G SERIES

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

## SMALL OUTLINE PACKAGES



MPXV2010GP  
CASE 1369-01

MPXV2010DP  
CASE 1351-01

## SMALL OUTLINE PACKAGE PIN NUMBERS

1	GND <sup>(1)</sup>	5	N/C
2	+V <sub>OUT</sub>	6	N/C
3	V <sub>S</sub>	7	N/C
4	-V <sub>OUT</sub>	8	N/C

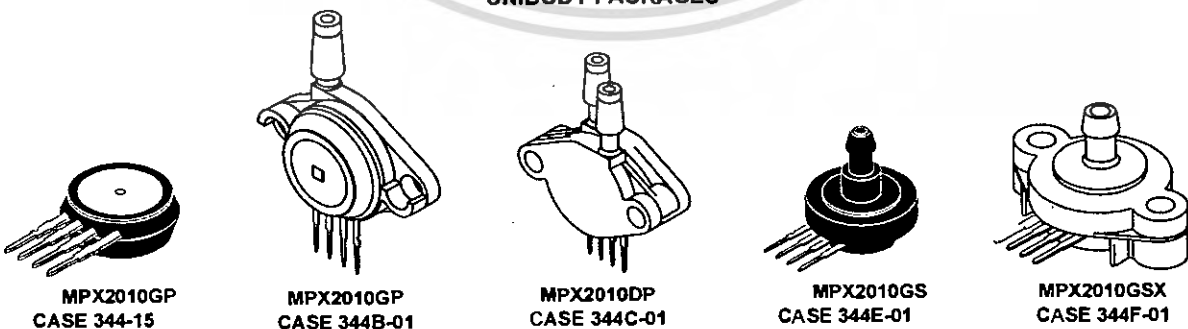
1. Pin 1 in noted by the notch in the lead.

## UNIBODY PACKAGE PIN NUMBERS

1	GND <sup>(1)</sup>	3	V <sub>S</sub>
2	+V <sub>OUT</sub>	4	-V <sub>OUT</sub>

1. Pin 1 in noted by the notch in the lead.

## UNIBODY PACKAGES



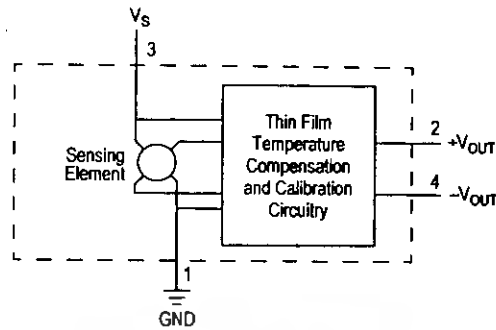


Figure 1. Temperature Compensated and Calibrated Pressure Sensor Schematic

### VOLTAGE OUTPUT VERSUS APPLIED DIFFERENTIAL PRESSURE

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

voltage increases as increasing vacuum is applied to the vacuum side (P2) relative to the pressure side (P1).

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

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

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

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

**Table 2. Operating Characteristics** ( $V_S = 10 V_{DC}$ ,  $T_A = 25^\circ C$  unless otherwise noted,  $P1 > P2$ )

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 <sup>(5)</sup>	—	-1.0	—	1.0	% $V_{FSS}$
Pressure Hysteresis <sup>(5)</sup> (0 to 50 kPa)	—	—	$\pm 0.1$	—	% $V_{FSS}$
Temperature Hysteresis <sup>(5)</sup> ( $-40^\circ C$ to $+125^\circ C$ )	—	—	$\pm 0.5$	—	% $V_{FSS}$
Temperature Effect on Full Scale Span <sup>(5)</sup>	$TCV_{FSS}$	-1.0	—	1.0	% $V_{FSS}$
Temperature Effect on Offset <sup>(5)</sup>	$TCV_{OFF}$	-1.0	—	1.0	mV
Input Impedance	$Z_{IN}$	1000	—	2550	$\Omega$
Output Impedance	$Z_{OUT}$	1400	—	3000	$\Omega$
Response Time <sup>(6)</sup> (10% to 90%)	$t_R$	—	1.0	—	ms
Warm-Up Time	—	—	2.0	—	ms
Offset Stability <sup>(7)</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 above the specified excitation 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 related pressure.
- Offset ( $V_{OFF}$ ) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
  - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
  - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
  - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from the minimum or maximum rated pressure, at  $25^\circ C$ .
  - TcSpan: Output deviation over the temperature range of  $0^\circ$  to  $85^\circ C$ , relative to  $25^\circ C$ .
  - TcOffset: Output deviation with minimum rated pressure applied, over the temperature range of  $0^\circ$  to  $85^\circ C$ , relative to  $25^\circ C$ .
  - Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of  $V_{FSS}$ , at  $25^\circ C$ .
- Response Time is defined as the time from 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.

MPX2010

Sensors

Freescale Semiconductor

ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ON-CHIP TEMPERATURE COMPENSATION AND CALIBRATION

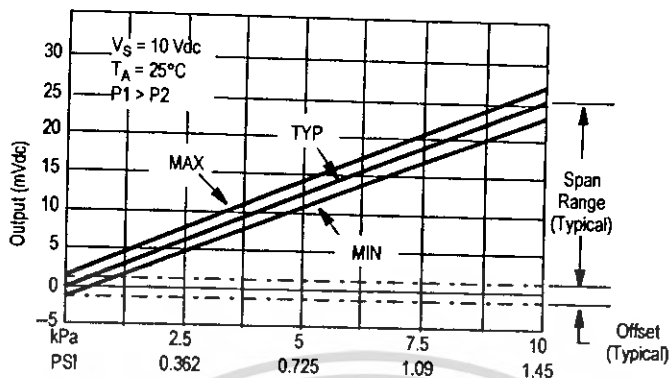


Figure 2. Output vs. Pressure Differential

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

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

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

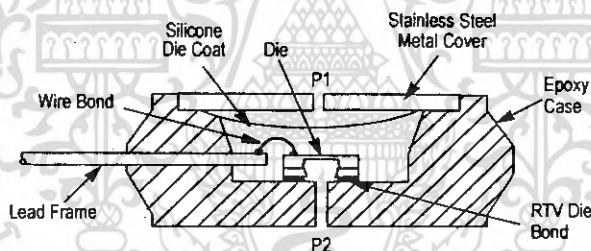


Figure 3. Unibody Package: Cross Sectional Diagram (Not to Scale)

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

The MPX2010/MPXV2010G series pressure sensor operating characteristics and internal reliability and

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

## 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.

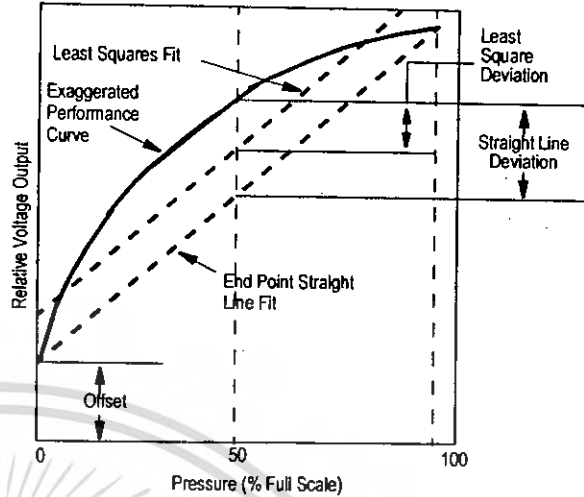


Figure 4. Linearity Specification Comparison

## 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 Freescale MPX 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 Steep 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

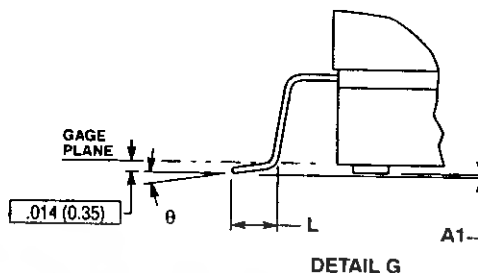
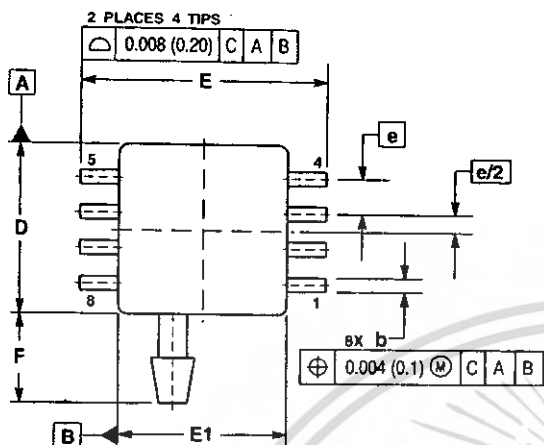
MPX2010

Sensors

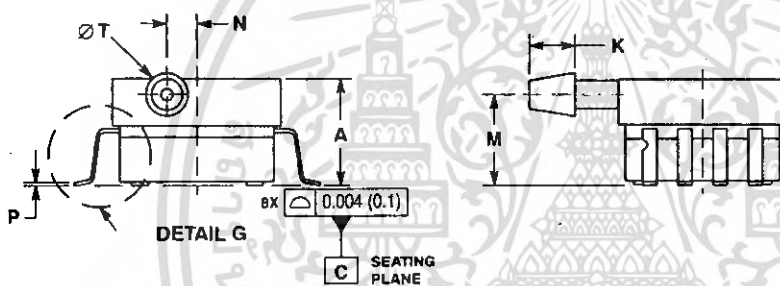
Freescale Semiconductor ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการ 5

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PACKAGE DIMENSIONS



- NOTES:
1. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
  2. INTERPRET DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M, 1994.
  3. DIMENSIONS "D" AND "E1" DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSIONS. MOLD FLASH OR PROTRUSIONS SHALL NOT EXCEED 0.006 (0.152) PER SIDE.
  4. DIMENSION "b" DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.008 (0.203) MAXIMUM.

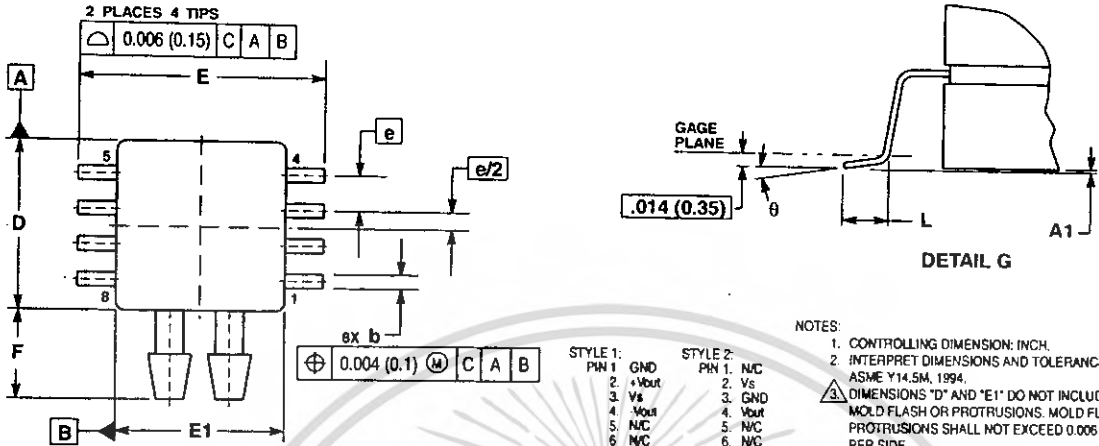


DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.300	0.330	7.11	7.62
A1	0.002	0.010	0.05	0.25
b	0.038	0.042	0.96	1.07
D	0.465	0.485	11.81	12.32
E	0.717 BSC		18.21 BSC	
E1	0.465	0.485	11.81	12.32
e	0.100 BSC		2.54 BSC	
F	0.245	0.255	6.22	6.47
K	0.120	0.130	3.05	3.30
L	0.061	0.071	1.55	1.80
M	0.270	0.290	6.86	7.36
N	0.080	0.090	2.03	2.28
P	0.009	0.011	0.23	0.28
T	0.115	0.125	2.92	3.17
$\theta$	0°	7°	0°	7°

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

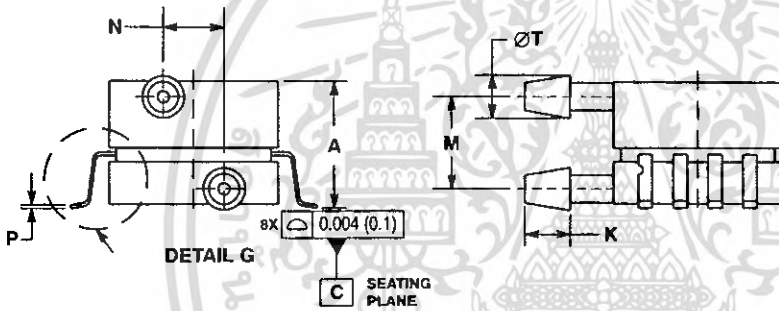
MPX2010

## PACKAGE DIMENSIONS



- NOTES:
- CONTROLLING DIMENSION: INCH.
  - INTERPRET DIMENSIONS AND TOLERANCES PER ASME Y14.5M, 1994.
- $\Delta$  DIMENSIONS "D" AND "E1" DO NOT INCLUDE MOLD FLASH OR PROTRUSIONS. MOLD FLASH OR PROTRUSIONS SHALL NOT EXCEED 0.006 (0.152) PER SIDE.
- $\Delta$  DIMENSION "b" DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.008 (0.203) MAXIMUM.

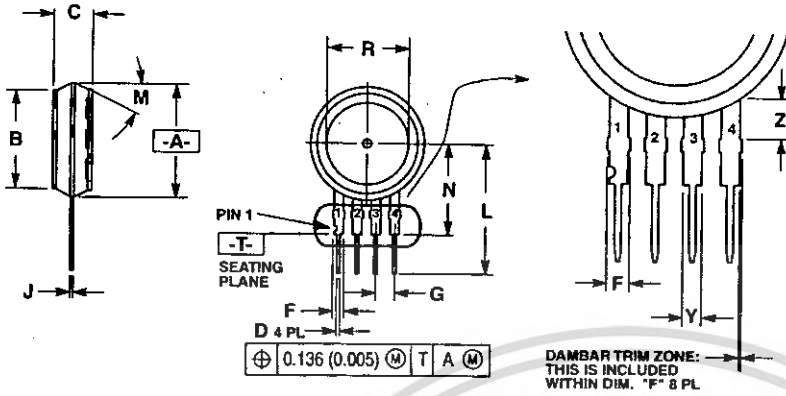
DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.370	0.390	9.39	9.91
A1	0.002	0.010	0.05	0.25
b	0.038	0.042	0.96	1.07
D	0.465	0.485	11.81	12.32
E	0.680	0.700	17.27	17.78
E1	0.465	0.485	11.81	12.32
e	0.100 BSC		2.54 BSC	
F	0.240	0.260	6.10	6.60
K	0.115	0.135	2.92	3.43
L	0.040	0.060	1.02	1.52
M	0.270	0.290	6.86	7.37
N	0.160	0.180	4.06	4.57
P	0.009	0.011	0.23	0.28
T	0.110	0.130	2.79	3.30
$\theta$	0°	7°	0°	7°



**CASE 1351-01  
 ISSUE O  
 SMALL OUTLINE PACKAGE**

**MPX2010**

## PACKAGE DIMENSIONS

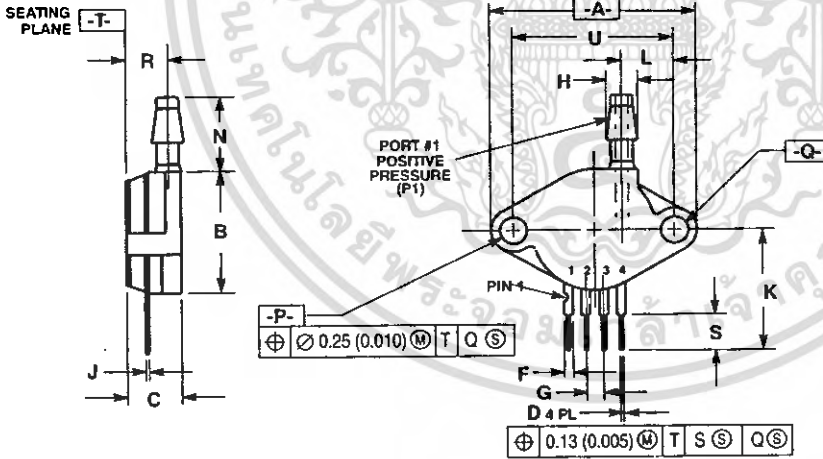


**NOTES:**

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).

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.595	0.630	15.11	16.00
B	0.514	0.534	13.06	13.55
C	0.200	0.220	5.08	5.59
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	
J	0.014	0.016	0.36	0.40
L	0.695	0.725	17.65	18.42
M	30° NOM		30° NOM	
N	0.475	0.495	12.07	12.57
R	0.430	0.450	10.92	11.43
Y	0.048	0.052	1.22	1.32
Z	0.106	0.118	2.68	3.00

**DAMBAR TRIM ZONE:**  
THIS IS INCLUDED  
WITHIN DIM. "F" & PL



**NOTES:**

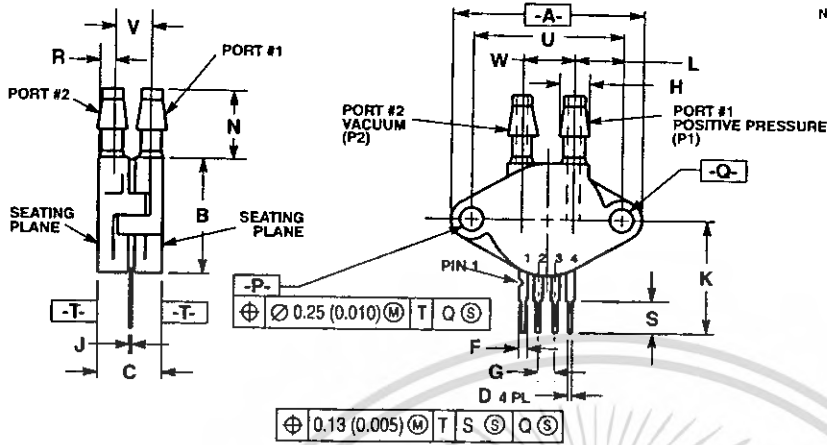
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.145	1.175	29.06	29.85
B	0.685	0.715	17.40	18.16
C	0.305	0.325	7.75	8.26
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	0.230	0.250	5.84	6.35
S	0.220	0.240	5.59	6.10
U	0.010 BSC		23.11 BSC	

**STYLE 1:**

- PIN 1. GROUND
2. + OUTPUT
3. + SUPPLY
4. - OUTPUT

### PACKAGE DIMENSIONS

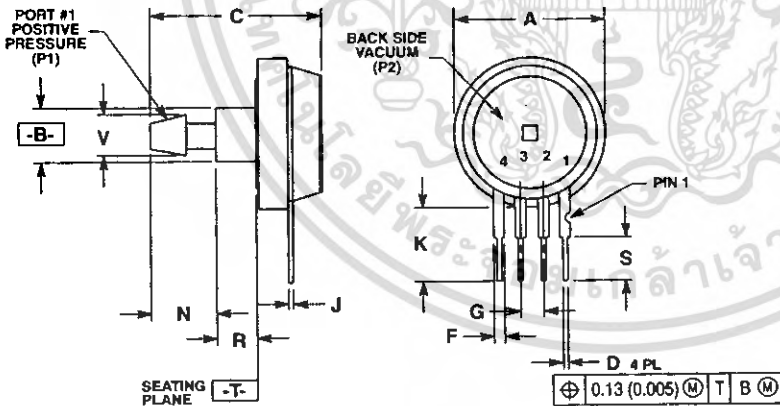


- NOTES:  
 1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.  
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.145	1.175	29.06	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	0.810 BSC		20.11 BSC	
V	0.248	0.278	6.30	7.06
W	0.310	0.330	7.87	8.38

- STYLE 1:  
 PIN 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	0.790	0.820	19.81	20.82
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	
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	0.186	4.52	4.72
S	0.220	0.240	5.59	6.10
V	0.182	0.194	4.62	4.93

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

### CASE 344E-01 ISSUE B UNIBODY PACKAGE

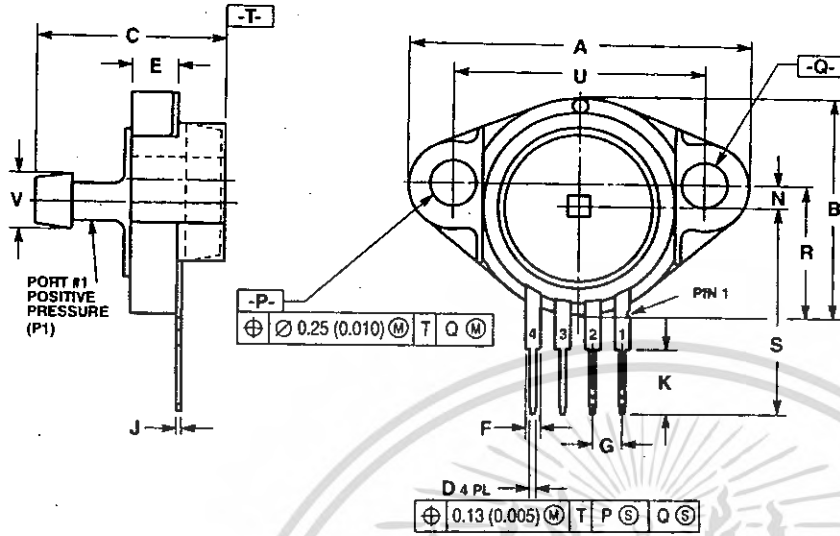
MPX2010

Sensors

Freescale Semiconductor ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## PACKAGE DIMENSIONS



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

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.060	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	0.160	4.06	4.57
F	0.048	0.054	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	0.640	0.660	16.27	16.76
V	0.182	0.194	4.62	4.92

- STYLE 1:
- PIN 1: GROUND
  - 2: V (+) OUT
  - 3: V SUPPLY
  - 4: V (-) OUT

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# NI 6221

The following sections contain information about the PCI/PXI-6221 (68-pin), PCI-6221 (37-pin), and USB-6221 devices.

## PCI/PXI-6221 (68-Pin)

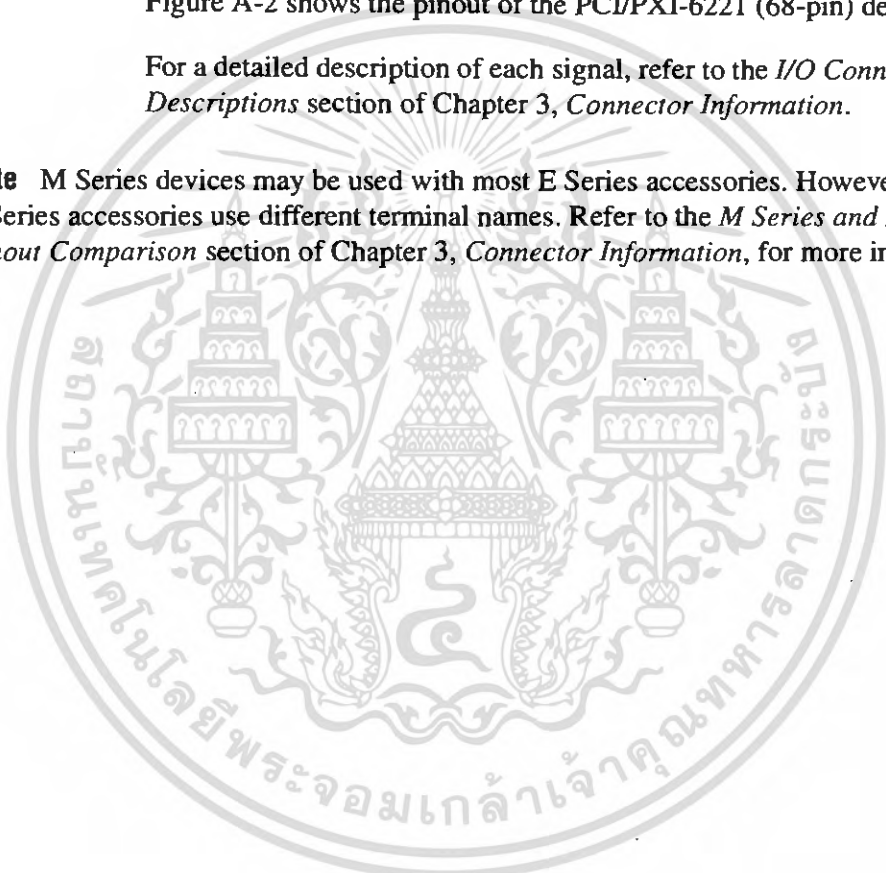
### PCI/PXI-6221 (68-Pin) Pinout

Figure A-2 shows the pinout of the PCI/PXI-6221 (68-pin) device.

For a detailed description of each signal, refer to the *I/O Connector Signal Descriptions* section of Chapter 3, *Connector Information*.



**Note** M Series devices may be used with most E Series accessories. However, some E Series accessories use different terminal names. Refer to the *M Series and E Series Pinout Comparison* section of Chapter 3, *Connector Information*, for more information.



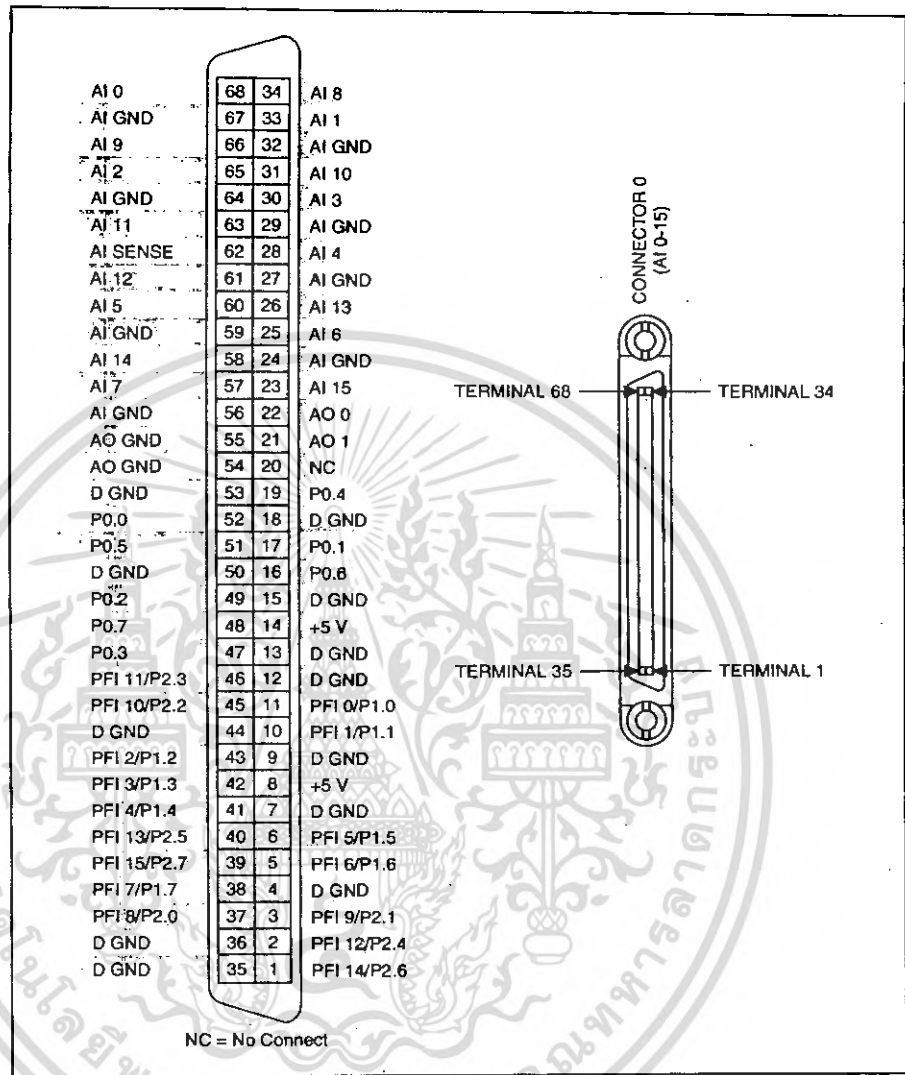


Figure A-2. PCI/PXI-6221 (68-Pin) Pinout

Table A-2. Default NI-DAQmx Counter/Timer Pins

Counter/Timer Signal	Default Pin Number (Name)
CTR 0 SRC	37 (PFI 8)
CTR 0 GATE	3 (PFI 9)
CTR 0 AUX	45 (PFI 10)
CTR 0 OUT	2 (PFI 12)
CTR 0 A	37 (PFI 8)
CTR 0 Z	3 (PFI 9)

**Table A-2.** Default NI-DAQmx Counter/Timer Pins (Continued)

Counter/Timer Signal	Default Pin Number (Name)
CTR 0 B	45 (PFI 10)
CTR 1 SRC	42 (PFI 3)
CTR 1 GATE	41 (PFI 4)
CTR 1 AUX	46 (PFI 11)
CTR 1 OUT	40 (PFI 13)
CTR 1 A	42 (PFI 3)
CTR 1 Z	41 (PFI 4)
CTR 1 B	46 (PFI 11)
FREQ OUT	1 (PFI 14)



**Note** For more information about default NI-DAQmx counter inputs, refer to *Connecting Counter Signals* in the *NI-DAQmx Help* or the *LabVIEW Help* in version 8.0 or later.

## PCI/PXI-6221 (68-Pin) Specifications

Refer to the *NI 622x Specifications* for more detailed information about the PCI/PXI-6221 (68-pin) device.

## PCI/PXI-6221 (68-Pin) Accessory and Cabling Options

This section describes some cable and accessory options for M Series devices with one 68-pin connector, such as the PCI/PXI-6221 (68-pin). Refer to [ni.com](http://ni.com) for other accessory options including new devices.

### SCXI

SCXI is a programmable signal conditioning system designed for measurement and automation applications. To connect your M Series device to an SCXI chassis, use the SCXI-1349 adapter and an SHC68-68-EPM cable.

You also can use an M Series device to control the SCXI section of a PXI/SCXI combination chassis, such as the PXI-1010 or PXI-1011. The M Series device in the rightmost PXI slot controls the SCXI devices. No cables or adapters are necessary.

Refer to the *SCXI Advisor*, available by going to [ni.com/info](http://ni.com/info) and entering the info code `rdscad`, for more information.

## SCC

SCC provides portable, modular signal conditioning to your DAQ system. To connect your M Series device to an SCC module carrier, such as the SC-2345, SC-2350, or SCC-68, use an SHC68-68-EPM shielded cable.

Refer to the *SCC Advisor*, available by going to [ni.com/info](http://ni.com/info) and entering the info code `rdscav`, for more information.

## BNC

You can use the SHC68-68-EPM shielded cable, to connect your DAQ device to BNC accessories, such as the following:

- **BNC-2110**—Provides BNC connectivity to all analog signals, some digital signals, and spring terminals for other digital signals
- **BNC-2111**—Provides BNC connectivity to 16 single-ended analog input signals, two analog output signals, five DIO/PFI signals, and the external reference voltage for analog output
- **BNC-2120**—Similar to the BNC-2110, and also has a built-in function generator, quadrature encoder, temperature reference, and thermocouple connector
- **BNC-2090**—Rack-mountable device with 22 BNCs for connecting analog, digital, and timing signals

## Screw Terminal

National Instruments offers several styles of screw terminal connector blocks. Use an SHC68-68-EPM shielded cable to connect an M Series device to a connector block, such as the following:

- CB-68LP and CB-68LPR unshielded connector blocks
- SCC-68 I/O connector block with screw terminals, general breadboard area, bus terminals, and four expansion slots for SCC signal conditioning modules
- SCB-68 shielded connector block with temperature sensor
- TBX-68 DIN rail-mountable connector block
- TB-2706 front panel mounted terminal block for PXI M Series devices

## RTSI

Use RTSI bus cables to connect timing and synchronization signals among PCI devices, such as M Series, E Series, CAN, and other measurement, vision, and motion devices. Since PXI devices use PXI backplane signals for timing and synchronization, no cables are required.

## Cables

In most applications, you can use the following cables:

- **SHC68-68-EPM<sup>1</sup>**—A high-performance cable designed specifically for M Series devices. It has individual bundles separating analog and digital signals. Each differential analog input channel is routed on an individually shielded twisted pair of wires. Analog outputs are also individually shielded.
- **SHC68-68**—A lower-cost shielded cable with 34 twisted pairs of wire
- **RC68-68**—A highly-flexible unshielded ribbon cable

## Custom Cabling and Connectivity

The CA-1000 is a configurable enclosure that gives user-defined connectivity and flexibility through customized panelettes. Visit [ni.com](http://ni.com) for more information about the CA-1000.

Refer to the *Custom Cabling* section of Chapter 2, *DAQ System Overview*, for more information about custom cabling solutions.

<sup>1</sup> NI recommends that you use the SHC68-68-EPM cable; however, an SHC68-68-EP cable will work with M Series devices.