

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเชื่อมต่อคาปาซิทีฟเซนเซอร์เพื่อใช้วัดระดับของเหลว  
INTERFACING CAPACITIVE SENSOR  
FOR LIQUID LEVEL MEASUREMENT



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน **61975**  
วัน,เดือน,ปี **25 ก.ค. 2549**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่อคาปาซิทีฟเซนเซอร์เพื่อใช้วัดระดับของเหลว  
INTERFACING CAPACITIVE SENSOR  
FOR LIQUID LEVEL MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเชื่อมต่อคาปาซิทิฟเซนเซอร์เพื่อใช้วัดระดับของเหลว

Interfacing Capacitive Sensor for Liquid Level Measurement

ผู้จัดทำ

1. นายกฤษฎา ระยะ เลขประจำตัว 45015308

2. นายเอนกพงศ์ ขุนพิณิจ เลขประจำตัว 45015352

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผศ.ดร.ก้องศักดิ์ อนันตธีรยุทธน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การเชื่อมต่อคาปาซิทิฟเซนเซอร์เพื่อใช้วัดระดับของเหลว

กฤษฎา ระยะเวลา 45015308

เอนกพงศ์ ชุนพินิจ 45015352

ผศ.ดร.คงศักดิ์ อนันตนิรัญรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2547

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการเชื่อมต่อคาปาซิทิฟเซนเซอร์เพื่อใช้วัดและควบคุมระดับของเหลว ระบบการวัดและควบคุมระดับของเหลวประกอบไปด้วย คาปาซิทิฟเซนเซอร์ซึ่งได้ออกแบบขึ้นมาเอง ค่าความจุที่ได้จากเซนเซอร์นำไปใช้ในวงจรสมมูลค่าความจุ โดยจะได้สัญญาณแรงดันออกมาต่างกันเมื่อระดับของเหลวเปลี่ยนแปลงไป นำไปเป็นอินพุทให้กับวงจรขยายอินพุทเมนต์ และปรับให้แรงดันมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นด้วยวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์แรงดันที่ได้นำไปกรองแรงดันให้มีแรงดันเรียบขึ้นด้วยวงจรกรองความถี่ ได้สัญญาณมาตรฐาน 1-5 โวลต์ นำไปเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลและส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของปั้มน้ำและแสดงผลระดับของเหลวด้วยการแสดงผลทางหน้าจอมอนิเตอร์ จากผลการทดลองพบว่าระบบการวัดและควบคุมระดับของเหลวได้ผลเป็นไปตามเป้าหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# INTERFACING CAPACITIVE SENSOR FOR LIQUID LEVEL MEASUREMENT

Kritsada Raya

Anakpong Khungpinit

Assist.Prof.Dr. Kongsak Anuntahirunrat Advisor

2004

## Abstract

This thesis is present the connection of capacitive sensor in order to measure and control the level of liquid. The capacity of this sensor, using with capacitance Bridge that it will display distinctly processing of voltage signal. When the level of liquid has changed, the resulting would have very less. It is amplify by instrument amplifier and it will adapt voltage to linear with zero and span circuit to filter and reduce ripple voltage by low pass filter to the standard signal 1-5 Volts and connect to microcontroller for control the liquid level. To control the level of liquid is connect to the pulse signal with drive motor circuit to pump liquid into the tank to the level that we have been set. The result of process will display on monitor. From this testing, we found that the operation of this system is accurate.

# สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 แนวคิดของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 อุปกรณ์วัดระดับแบบแปลงค่าความจุ	3
2.2 วงจรสมมูลค่าความจุ	6
2.3 วงจรปรับค่าความชื้นและตำแหน่งศูนย์	8
2.4 วงจรขยายอินสทรูเมนต์	11
2.4.1 วงจรขยายอินสทรูเมนต์แบบใช้โอปแอมป์ 3 ตัว	11
2.5 วงจรกรองผ่านความถี่แบบบัทเทอร์เวอร์ท	13
2.5.1 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัทเทอร์เวอร์ท $-40\text{dB/decade}$	14
2.6 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F87x	17
2.6.1 คุณสมบัติทางเทคนิคของ PIC16F877A	18
2.7 การติดต่อกับพอร์ตอนุกรม	19
2.7.1 มาตรฐาน RS-232C	20
2.7.2 ลักษณะของคอนเน็คเตอร์แบบ D-Type	20
2.8 ตัวควบคุม(Controller)	20
2.8.1 ระบบควบคุมแบบพีไอ (PI:Proportional plus Imtegral Control)	21
2.8.6 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Control)	23
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	25
3.1 การออกแบบถังน้ำและอิเล็กทรอนิกส์	25
3.2 การคำนวณหาค่าส่วนประกอบในวงจรสมมูลค่าความจุ	26
3.3 การออกแบบวงจรขยายอินสทรูเมนต์	27
3.4 การออกแบบวงจรปรับค่าความชื้นและตำแหน่งศูนย์	29
3.5 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัทเทอร์เวอร์ท	30
3.6 การออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์	31
3.6.1 การออกแบบด้านฮาร์ดแวร์	31
3.6.2 การออกแบบด้านซอฟต์แวร์	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.7 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของปั้มน้ำ	32
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	34
4.1 การทดลองที่ 1 วัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากวงจรสมมูลค่าความจุ	34
4.2 การทดลองที่ 2 วัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากวงจรขยายอินสทรูเมนต์ ปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์	36
4.3 การทดลองที่ 3 วัดรูปสัญญาณที่ออกมาจากวงจรแปลงสัญญาณ	37
4.4 การทดลองที่ 4 ควบคุมระดับของเหลวด้วยพีไอดีคอนโทรลเลอร์	40
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	44
ภาคผนวก	
กิตติกรรมประกาศ	
เอกสารอ้างอิง	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดง Block Diagram ของระบบการวัดและควบคุมระดับของเหลว	3
2.2 โครงสร้างของมาตรวัดระดับของของเหลวแบบแปลงค่าความจุ	4
2.3 ลักษณะต่างๆของอุปกรณ์วัดระดับของของเหลวแบบแปลงค่าความจุ	5
2.4 การติดตั้งตัวอุปกรณ์วัดระดับแบบแปลงค่าความจุกับแท็งก์	6
2.5 ผลของการปรับความชื้น (span) และตำแหน่งศูนย์ (zero)	10
2.6 วงจรปรับความชื้น และตำแหน่งศูนย์	11
2.7 วงจรขยายสัญญาณอินพุตทรานซิสเตอร์แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว	12
2.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำแบบบัทเทอร์เวิร์ท	14
2.9 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ และผลตอบสนองทางความถี่ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ $-40\text{dB/decade}$	16
2.10 ไดอะแกรมแสดงรูปแบบสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์ดแวร์	17
2.11 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A	18
2.12 ลักษณะของหัวต่อแบบ DB25 และ DB9	20
2.13 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอ	21
2.14 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีไอ	22
2.15 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี	23
3.1 BLOCK DIAGRAM ของระบบการวัดและควบคุมของเหลว	25
3.2 รายละเอียดของถังน้ำและอิเล็กทรอนิกส์	25
3.3 วงจรสมมูลค่าความจุไฟฟ้า	26
3.4 วงจรขยายอินพุตทรานซิสเตอร์	27
3.5 วงจรสมมูลค่าความจุและวงจรขยายอินพุตทรานซิสเตอร์	28
3.6 วงจรปรับค่าความชื้นและตำแหน่งศูนย์	29
3.7 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรปรับค่าความชื้นและตำแหน่งศูนย์	30
3.8 แสดงการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัทเทอร์เวิร์ท	31
3.9 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์	32
3.10 แสดงวงจรควบคุมการทำงานของปั๊มน้ำ	33
4.1 ภาพแสดงการต่อวงจรสมมูลค่าความจุ	34
4.2 แสดงการต่อวงจรขยายอินพุตทรานซิสเตอร์ ปรับค่าความชื้นและตำแหน่งศูนย์	36

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ระดับของเหลว 0 เปอร์เซ็นต์	37
4.4 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ระดับของเหลว 20 เปอร์เซ็นต์	38
4.5 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ระดับของเหลว 40 เปอร์เซ็นต์	38
4.6 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ระดับของเหลว 60 เปอร์เซ็นต์	39
4.7 แสดงการต่อใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์	39
4.8 แสดงค่าที่อ่านได้เมื่อค่า setpoint เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์	40
4.9 แสดงค่าที่อ่านได้เมื่อค่า setpoint เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์	41
4.10 แสดงค่าที่อ่านได้เมื่อค่า setpoint เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์	41
4.11 แสดงค่าที่อ่านได้เมื่อค่า setpoint เท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์	42
4.12 แสดงการเชื่อมต่อวงจรของระบบการวัดและความคุมของเหลว	43

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการงาน

วิทยาการและเทคโนโลยีของเครื่องมือวัดในงานอุตสาหกรรมในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีแนวทางที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างค่อนข้างสังเกตเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากมีอุตสาหกรรมส่วนหนึ่งเปลี่ยนแปลงการผลิต โดยเป็นการผลิตแบบที่ไม่เน้นปริมาณมาก ๆ แต่เน้นคุณสมบัติพิเศษของผลิตภัณฑ์ เฉพาะด้านและสามารถกำหนดราคาขายได้สูง

ในปัจจุบันอุปกรณ์วัดระดับที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายชนิดและมีการใช้งานที่แตกต่างกัน อุปกรณ์วัดระดับแบบหนึ่งที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย คือ อุปกรณ์วัดระดับ โดยการวัดค่าประจุไฟฟ้าซึ่งก็คือ คาปาซิทิฟเซนเซอร์นั่นเอง โดยสามารถที่จะใช้งานได้กับอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ยา อาหาร น้ำ เป็นต้น การวัดแบบนี้ใช้งานได้ง่ายด้วยการเขียนคำสั่งควบคุมจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โครงการนี้เป็น การเสนอการวัดระดับของเหลว โดยการวัดค่าประจุ และสามารถแสดงผล-ควบคุมระดับให้เป็นไปตามที่ต้องการได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานต่อไป

### 1.2 แนวคิดของโครงการงาน

เซนเซอร์วัดระดับของเหลวมีหลักการคือ วัดความเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลว มาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า แต่เนื่องจากสัญญาณที่ได้ที่ค่าน้อยมาก ( $100mV - 350mV$ ) จึงต้องมีวงจรขยายแรงดันเพื่อขยายสัญญาณนี้ให้มีปริมาณมากเพียงพอแล้วนำสัญญาณที่ได้นี้เข้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเป็นตัวทำหน้าที่นำสัญญาณที่เข้ามาแสดงเป็นระดับของของเหลวซึ่งจะติดต่อกับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ต RS-232 ด้วยระบบบัส I<sup>2</sup>C สามารถที่จะทำการรักษาระดับของของเหลวตามที่คุณควบคุมต้องการได้โดยสั่งงานผ่านคีย์บอร์ด

### 1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

1.สามารถนำค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับของเหลวมาใช้ในวงจรกำเนิดสัญญาณได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ออกแบบเครื่องมือวัดระดับแบบวัดค่าประจุไฟฟ้าให้สามารถส่งสัญญาณออกมาเป็นสัญญาณมาตรฐาน 1-5 v, 4-20 mA
3. เขียนโปรแกรมเพื่อใช้แสดงผลของระดับของเหลวให้มีค่าตรงกับความเป็นจริง
4. เขียนโปรแกรมเพื่อใช้ควบคุมระดับของเหลวให้สามารถคงสถานะระดับที่ต้องการได้ภายในย่าน 0 ถึง 10 นิ้วฟุต
5. เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆผ่านทางคีย์บอร์ด

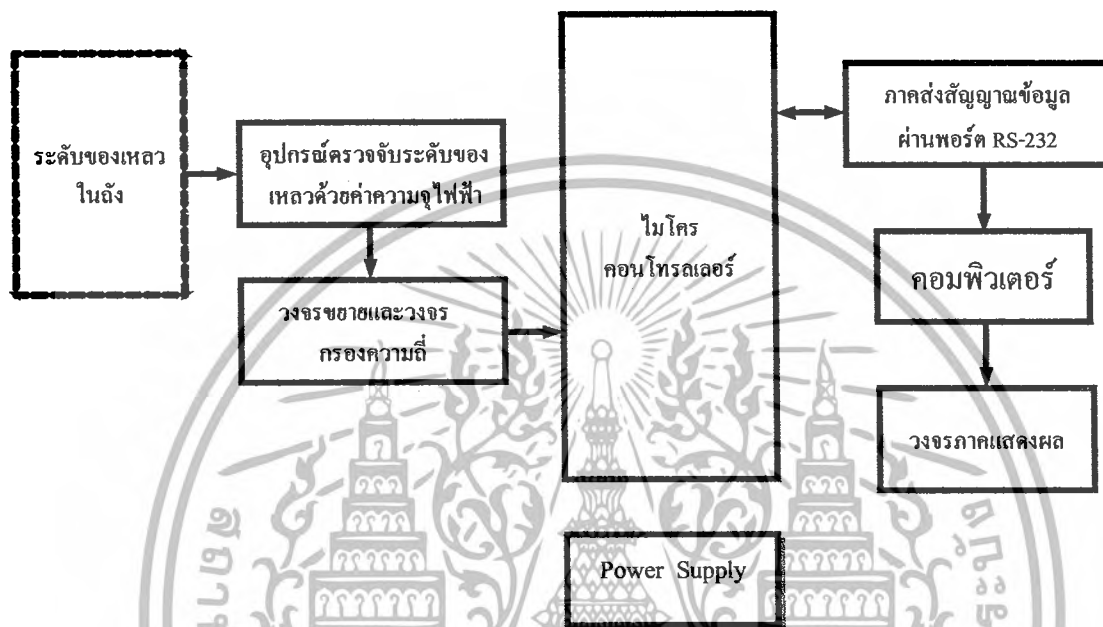
#### 1.4 วิธีดำเนินงาน

1. ศึกษาหลักการของเซนเซอร์วัดค่าความจุไฟฟ้า
2. ศึกษาหลักการใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC
3. ศึกษาวงจรต่างๆที่ต้องนำมาใช้ในโครงการ
4. ออกแบบโครงการ
5. ประกอบชิ้นงานและวิเคราะห์สัญญาณที่ได้
6. ทดสอบการทำงานและปรับปรุงแก้ไข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ



รูปที่ 2.1 แสดง Block Diagram ของระบบการวัดและควบคุมระดับของเหลว

ในโครงการนี้มีทฤษฎีที่นำมาใช้ในโครงการแสดงเป็น Block Diagram ในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีเนื้อหา ดังนี้

#### 2.1 อุปกรณ์วัดระดับแบบแปลงค่าความจุ

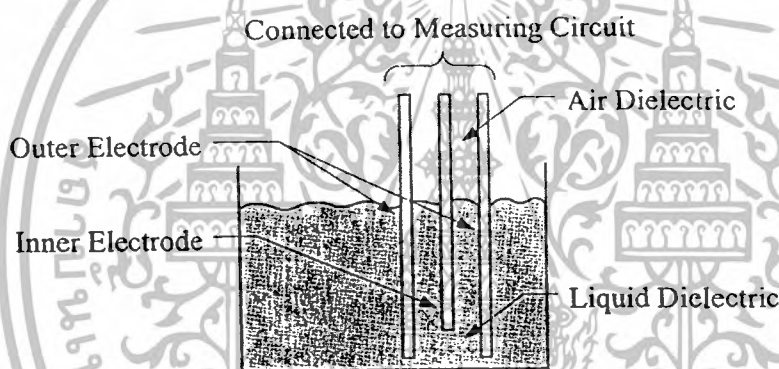
อุปกรณ์วัดระดับของเหลวแบบนี้ จัดว่าเป็นการวัดโดยวิธีทางอ้อม เช่นเดียวกับเครื่องมือวัดระดับของของเหลวในรูปของความดัน โครงสร้างของอุปกรณ์วัดระดับแบบแปลงค่าความจุแบบง่ายๆ ได้แก่การใช้ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) สองอัน จุ่มลงไปในของเหลวที่ต้องการตรวจวัดระดับและทำการวัดค่าความจุ (Capacitance) ระหว่างขั้วไฟฟ้า ดังนั้นจึงเรียกเครื่องมือวัดระดับแบบนี้ว่าแบบแปลงค่าความจุ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องมือวัดแบบนี้ จะใช้ได้ในกรณีที่มีของเหลวเป็น ไดอิเล็กตริก (Dielectrics) เท่านั้น

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าคร่อมแผ่นตัวเก็บประจุจะเกิดมีอิเล็กตรอนวิ่งออกจากเพลท (Plate) หนึ่งไปอีกเพลทหนึ่ง จำนวนของอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทไปนี้ จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแผ่นเพลท พื้นที่ของแผ่นเพลท ลักษณะของไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างแผ่นเพลท และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ เนื่องจากค่าความจุจะแปรค่าโดยตรงกับระดับของเหลว ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความจุของตัวเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามมิให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = K\epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- C = ค่าความจุ (Capacitance)(pF)
  - A = พื้นที่ของแผ่นเพลท ( $m^2$ )
  - d = ระยะห่างระหว่างเพลท (m)
  - K = ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant)
  - $\epsilon_0$  = ค่าความซึมซาบ (Permittivity =  $8.55pF/m$ )



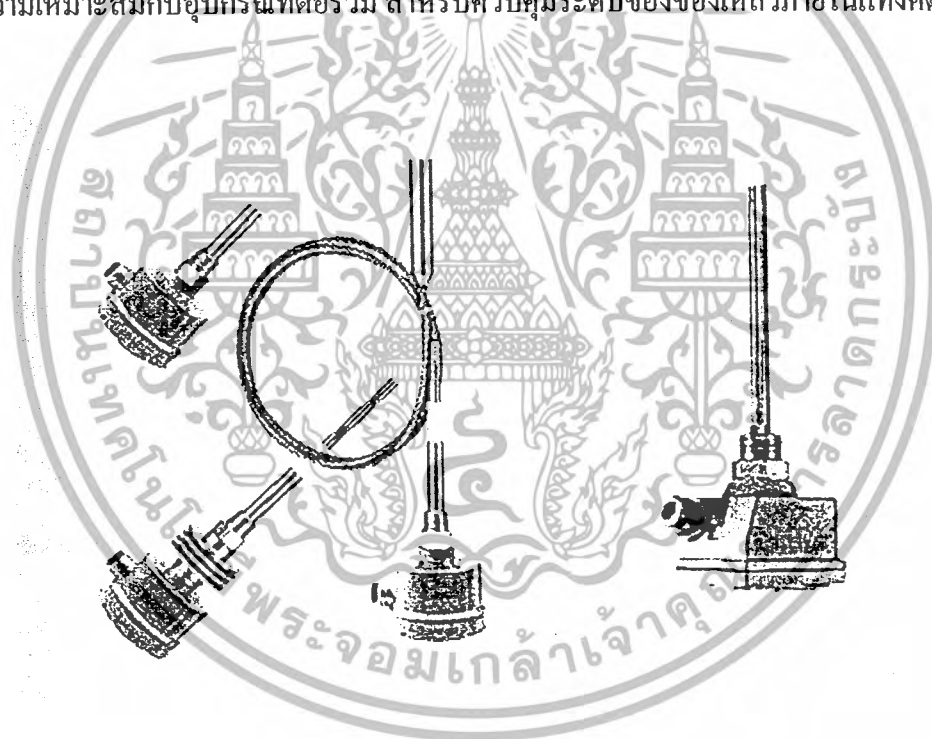
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของมาตรวัดระดับของของเหลวแบบแปลงค่าความจุ

รูปที่ 2.2 แสดงถึงโครงสร้างของมาตรวัดระดับของของเหลวแบบแปลงค่าความจุ ดังกล่าว จากรูป ค่าความจุจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อไม่มีของเหลวอยู่ในภาชนะ และจะมีค่ามากที่สุดเมื่อของเหลวมีระดับสูงจนท่วมขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เนื่องจากเมื่อไม่มีของเหลวอยู่ในภาชนะ ไดอิเล็กตริกที่อยู่ตรงที่ระหว่างแผ่นเพลททั้งสองคืออากาศซึ่งมีค่าคงที่ (K : Dielectric Constant) เท่ากับ 1 แต่เมื่อของเหลวมีระดับที่เพิ่มสูงขึ้น จนท่วมขั้วไฟฟ้าค่าไดอิเล็กตริกจะเปลี่ยนไปตามชนิดของของเหลว เช่น ค่าของไดอิเล็กตริกที่เป็นน้ำจะมีค่าเท่ากับ 80 ,เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) มีค่าไดอิเล็กตริกเท่ากับ 26 , เมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl Alcohol) มีค่าเท่ากับ 37.5 และ แอมโมเนีย (Ammonia) มีค่าเท่ากับ 15.5 ที่อุณหภูมิ 68 °F เท่ากัน เป็นต้น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความจุสูงขึ้นตามสมการที่ (2.1)

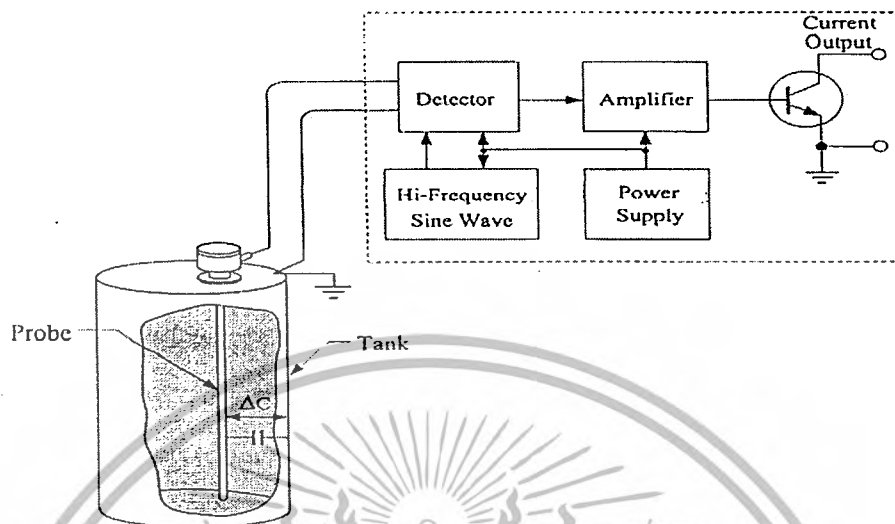
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความจุที่ได้นี้จะจัดโดยใช้วงจรบริดจ์ (Bridge) และปรับเทียบค่าให้เป็นระดับของ  
 เหลว มาตรฐานระดับของของเหลวแบบนี้สามารถใช้ในการวัดระดับที่สูงเป็นร้อยๆ ฟุตได้สำหรับขั้ว  
 ไฟฟ้าที่ใช้นั้น โดยทั่วไปจะใช้โลหะธรรมดา(steel)แต่ถ้าของเหลวที่มีฤทธิ์เป็นกรคนั้น จะต้องใช้  
 เหล็กกล้า (Stainless Steel) เป็นขั้วไฟฟ้าเพราะถ้าใช้โลหะธรรมดาเป็นขั้วไฟฟ้าแล้วอาจจะเกิดการผุ  
 กร่อนหรือเป็นสนิมได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นลักษณะต่างๆของอุปกรณ์วัดระดับของของ  
 เหลวแบบแปลงค่าความจุ ที่ใช้กันอย่างกว้างขวางโรงงานอุตสาหกรรม

ในรูปที่ 2.4 เป็นลักษณะการติดตั้งตัวอุปกรณ์วัดระดับแบบแปลงค่าความจุ กับแท็งก์เพื่อ  
 ทำการวัดระดับของของเหลวภายในแท็งก์ จากนั้นส่งสัญญาณที่ได้ ซึ่งอยู่ในรูปของสัญญาณ ไฟฟ้า  
 เข้ากับวงจรจัดระดับเงื่อนไขของสัญญาณ (Signal Conditioning) เพื่อทำการจัดระดับของสัญญาณที่  
 ได้ให้มีความเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ต่อรวม สำหรับควบคุมระดับของของเหลวภายในแท็งก์ต่อไป



รูปที่ 2.3 ลักษณะต่างๆของอุปกรณ์วัดระดับของของเหลวแบบแปลงค่าความจุ



รูปที่ 2.4 การติดตั้งตัวอุปกรณ์วัดระดับแบบแปลงค่าความจุกับแท่งดี

## 2.2 วงจรสมมูลค่าความจุ

ตัวเก็บประจุแบบอากาศ มีปริมาณของค่าความจุ และ ของเหลวที่ใช้เติมตัวเก็บประจุต่ำ ที่สำคัญมีการสูญเสีย ดูเหมือนเป็นการต่อตัวต้านทานแบบอนุกรม ตัวประกอบทั้งสองตัวนั้นทำให้ความแม่นยำในการวัดค่าของตัวเก็บประจุ มีความยุ่งอยู่ยากเล็กน้อย จะใช้การวัดค่าประจุโดยวงจร Schering Bridge อย่างไรก็ดี มันมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้การวัดค่ามีความไวที่ดี และไม่ขึ้นอยู่กับค่าความจุ และ ค่าความต้านทานสูญเสีย ที่อนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุอากาศ สัญญาณ out-of-balance ในวงจรบริดจ์จะถูกรวักได้โดยใช้ Lock-in Amplifier (or Phase Sensitivity Detector) การวัดนี้ใช้แรงดัน AC เท่านั้นที่ความถี่ออสซิลเลต และสารหาเฟสของแรงดัน out of balance ได้

C1 - ตัวเก็บประจุทดสอบ เป็นค่าตัวเก็บประจุแบบอากาศที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งควรใช้กับแผ่นเพลทซ้อนกันตลอด เพื่อให้ได้ค่าความจุสูงสุด สามารถที่จะเปิดแผ่นเพลท เพื่อใช้สำหรับทำความสะอาด และ ทำให้แห้งหลังจากจุ่มตัวเก็บประจุในถัง ถังควรเก็บไว้ในตู้รวมควันซึ่งแผ่นเพลทนี้ห้ามล้างในน้ำเต็ดขาด

R1 - ในการใช้งานของวงจรบริดจ์นี้ จะมีค่าความต้านทานสูญเสียที่อนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุทดสอบ ในการทดลองใช้ความต้านทานปรับค่าได้เพื่อเพิ่มความต้านทาน ทำให้สามารถได้ค่าที่เหมาะสมกับส่วนประกอบอื่นๆ โดยเฉพาะ R3 สังเกตว่า R1 จะแสดงค่าต่ำกว่าสำหรับเงื่อนไขสมดุล คือ มีค่าความต้านทานสูญเสียรวมกับค่าความต้านทานปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C2 – ต้องมีค่าความต้านทานสูญเสียน้อยมากๆ (เป็นศูนย์ในทางอุดมคติ) ตัวเก็บประจุชนิด mica ขนาด 1500pf

R3 และ R4 เป็นความต้านทานปรับค่าได้ และ C4 เป็นตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้

ในวงจรจะมีทั้งค่าความต้านทานและค่ารีแอคแตนซ์ กระแสไหลผ่านส่วนประกอบของบริดจ์จะมีเฟสไม่ตรงกับแหล่งจ่ายแรงดันออสซิลเลเตอร์ สำหรับความต้านทานอย่างเดียวจะแสดงจะมีเฟสทับกับแรงดัน และ สำหรับความจุอย่างเดียวจะมีเฟสต่างจากแรงดัน 90 องศา ใช้ในการเขียนกระแส และ แรงดัน เป็นเวกเตอร์ที่สัมพันธ์โดยคอมเพล็กซ์อิมพีแดนซ์

$$V=Z.I \quad (2.2)$$

Z=R สำหรับความต้านทาน และ  $Z = \frac{1}{j\omega C}$  สำหรับตัวเก็บประจุ ซึ่ง  $\omega$  คือความถี่เชิงมุม

ในตัวอย่าง Wheatstone bridge เงื่อนไขของสมมูล คือ

$$R1/R3 = R2/R4$$

เป็นส่วนสองข้างของบริดจ์กระทำเป็นโวลต์เตจดิไวเดอร์ด้วยรีแอคแตนซ์แสดงโดย

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (2.3)$$

สำหรับ Schering bridge

$$Z_1=R_1+\frac{1}{j\omega C_1}; Z_2=\frac{1}{j\omega C_2}; Z_3=R_3; Z_4=\left[\frac{1}{R_4}+j\omega C_4\right]^{-1}=\frac{R_4}{1+j\omega C_4 R_4}$$

ใส่ค่าอิมพีแดนซ์นี้ลงในสมการ (2.3) และแสดงเป็น 2 เงื่อนไข

$$\left(\frac{1+\omega^2 C_1 C_4 R_1 R_4}{1+\omega^2 C_4^2 R_4^2}\right) - \frac{C_1 R_3}{C_2 R_4} = 0 \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารและงานวิจัยสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{j\omega(C_1C_4R_1R_4)}{(1+\omega^2C_4^2R_4^2)}=0 \quad (2.5)$$

ตรงกับกรสมมูลแรงดันอินเฟสและต่างเฟส

จาก (2.5)  $C_1R_1=C_4R_4$  (2.6)

นำไปใส่ใน (2.4) เมื่อให้  $C_1R_3=C_2R_4$  (2.7)

(2.6) และ (2.7) ให้เงื่อนไขสมมูลสุดท้าย

$$C_1=\frac{R_4C_2}{R_3} \quad (2.8)$$

และ

$$R_1=\frac{R_3C_4}{C_2} \quad (2.9)$$

ทางที่ดีที่สุดเพื่อสมมูลบริจคือเลือกค่าของ  $R_1$  และ  $R_3$  เพียง 2 - 3 kohm และปรับ  $R_4$  และ  $C_4$  เพื่อให้สมมูล ในตอนเริ่มต้น แรงดันเกือบทั้งหมดผ่าน PSD จะมีเฟสต่างจากแรงดันออกสวิตเลส จนกระทั่งคาร์เรแอกแดนซ์ของ  $C_1$  และ  $C_2$  มีขนาดมาก ดังนั้นเริ่มโดยปรับ  $R_4$  ให้สมมูลกับ PSD การวัดสัญญาณที่  $90^\circ$  ถึงจุดอ้างอิงเมื่อเกิดสมมูลสัญญาณอินเฟส ใช้  $C_4$  ทำซ้ำให้สมมูลด้วย  $R_4$  และ  $C_4$  จนกระทั่งสัญญาณอินเฟสและต่างเฟสมีค่าน้อยที่สุด ข้อสังเกต วงจรบริจจะสมมูลเมื่อมีเตอร์ซีที่ศูนย์

### 2.3 วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ (Zero and Span Circuit)

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์เป็นวงจรมีความสำคัญวงจรหนึ่ง ในระบบเครื่องมือวัดและควบคุมค่ากระบวนการ โดยทำหน้าที่ส่งผ่าน (transmission) และปรับแต่งสัญญาณ (signal conditioner) ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับอินพุต ให้ความสัมพันธ์เป็นไปตามเงื่อนไขที่ระบบต้องการ ซึ่งวงจรนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงความชัน (slope) และปรับตำแหน่งศูนย์ (zero) ของความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุต ดังแสดงในกราฟคุณสมบัติรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ และ กราฟคุณสมบัติระหว่างแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  กับ แรงดันอินพุต  $V_{in}$  ของวงจร แสดงได้ในรูปที่ 2.5 ซึ่งประกอบด้วยวงจรรวมสัญญาณ (summing amplifier) A1 มีค่าเท่ากับ

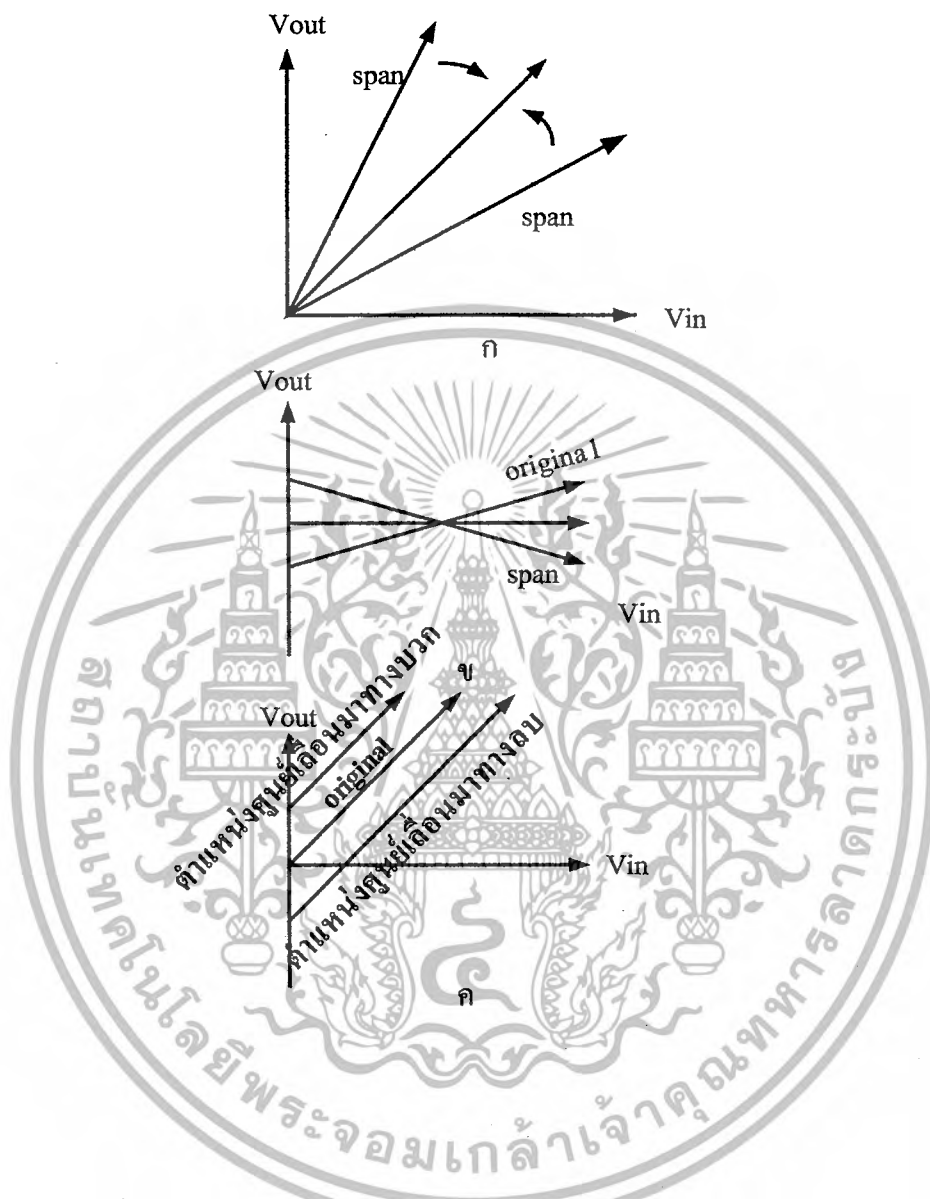
$$V_{01} = \left( \frac{R_f}{R_i} V_{in} + \frac{R_f}{R_{OS}} V \right) \quad (2.10)$$

จากนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก A1 จะถูกป้อนให้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับ A2 ซึ่งต่อเป็นวงจรขยายที่มีอัตราขยายเท่ากับ -1 ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของ A2 มีค่าเท่ากับ

$$V_{out} = V_{02} = (-1)V_{01} = \left( \frac{R_f}{R_i} V_{in} + \frac{R_f}{R_{OS}} V \right) \quad (2.11)$$

สมการที่ (2.11) แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{OUT}$  กับ  $V_{IN}$  ของวงจรมีอยู่ในรูปของสมการเส้นตรง และจากรูปแบบทั่วไปของสมการเส้นตรง

$$y = mx + b \quad (2.12)$$



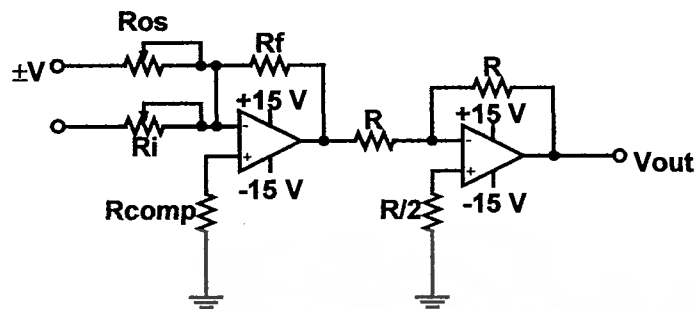
รูปที่ 2.5 : ผลของการปรับความชัน (span) และตำแหน่งศูนย์ (zero)

ก.การเปลี่ยนแปลงความชัน

ข.ความชันเท่ากับ -1

ค.การปรับตำแหน่งศูนย์ (จุดตัดแกน y)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรปรับความชัน และตำแหน่งศูนย์

ดังนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบสมการที่ (10) กับสมการที่ (11) แล้วจะได้ว่า  $m = \frac{R_f}{R_i}$  คือค่าความ

ชันของกราฟ (slope) หรืออัตราขยายของวงจร (gain) (2.13)

และ  $b = \frac{R_f}{R_{os}}(\pm V)$  คือจุดตัดแกน y ของกราฟ หรือตำแหน่งศูนย์ (2.14)

นั่นคือ การปรับค่าความชันสามารถทำการปรับแต่งได้จากค่าความต้านทาน  $R_f$  กับ  $R_i$  ของวงจร ในขณะที่ตำแหน่งศูนย์ของกราฟความสัมพันธ์จะปรับค่าได้ที่ค่าความต้านทาน  $R_{os}$  หรือแรงดันอ้างอิง  $\pm V$

## 2.4 วงจรขยายอินสตรูเมนต์ (Instrumentation Amplifier, IAs)

วงจรขยายอินสตรูเมนต์ หรืออาจจะเรียกว่าวงจร IA นั้นเป็นวงจรทำหน้าที่ขยายสัญญาณผลต่างของสัญญาณอินพุตของวงจร ซึ่งพัฒนามาจากหลักการของวงจรขยายสัญญาณผลต่างพื้นฐาน (difference amplifier) ดังรูป เพื่อปรับปรุงให้สมรรถนะของวงจรให้ดีขึ้น โดยแรงดันเอาต์พุตของวงจรจะมีความสัมพันธ์เป็นไปดังสมการดังนี้คือ

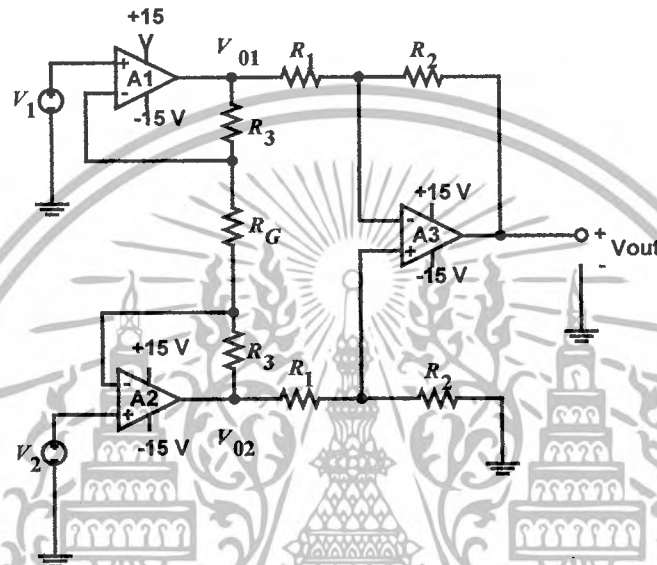
$$V_{out} = A(V_2 - V_1) \quad (2.15)$$

โดยที่ A คืออัตราขยายสัญญาณของวงจร วงจร IA ซึ่งถูกปรับปรุงขึ้นนี้มีข้อดีเมื่อเทียบกับวงจรขยายสัญญาณผลต่างก็คือ มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ อัตราขยายสัญญาณของวงจรและความสามารถในการขจัดสัญญาณรบกวน (Common Mode Rejection Ratio, CMRR) สูงมาก ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าคุณสมบัติของวงจร IA ให้ผลได้ใกล้เคียงกับวงจรขยายสัญญาณผลต่างในทางอุดมคติมากที่สุด วงจรหนึ่ง

### 2.4.1 วงจร IA แบบใช้ออปแอมป์ 3 ตัว (Three OP-Amp IAs Realization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรขยายอินพุตแบบใช้โอปแอมป์ 3 ตัว แสดงดังรูปที่ 6 โดยที่โอปแอมป์ A1 และ A2 ทำหน้าที่เป็นวงจรภาคอินพุตส่วนหน้า (first stage หรือ input stage) ขณะที่โอปแอมป์ A3 จะเป็นวงจรภาคเอาต์พุตส่วนที่สอง (second stage หรือ output stage) ของวงจรถ้าให้  $V_{01}$  และ  $V_{02}$  เป็นแรงดันเอาต์พุตของ A1 และ A2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 : วงจรขยายสัญญาณอินพุตแบบใช้โอปแอมป์ 3 ตัว

ดังนั้นแรงดันเอาต์พุตของ A3 หรือแรงดันเอาต์พุตของวงจร  $V_{out}$  มีค่าเท่ากับ

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1} (V_{02} - V_{01}) \quad (2.16)$$

และเนื่องจากคุณสมบัติของโอปแอมป์ทำให้กระแสที่ไหลผ่าน  $R_3$  และ  $R_G$  มีค่าเท่ากัน ( $I_{R_3} \cong I_{R_G}$ ) ซึ่งจากกฎของโอห์มจะได้

$$V_{01} - V_{02} = (2R_3 + R_G) I_{R_G} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $V_i = 0$  แล้ว กระแสที่ไหลผ่าน  $R_G$  มีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{RG} = \frac{V_1 - V_2}{R_G} \quad (2.18)$$

ทำการแทนค่าสมการ (2.18) ลงในสมการที่ (2.17) และ (2.16) จะได้

$$V_{out} = A(V_2 - V_1) \quad (2.19)$$

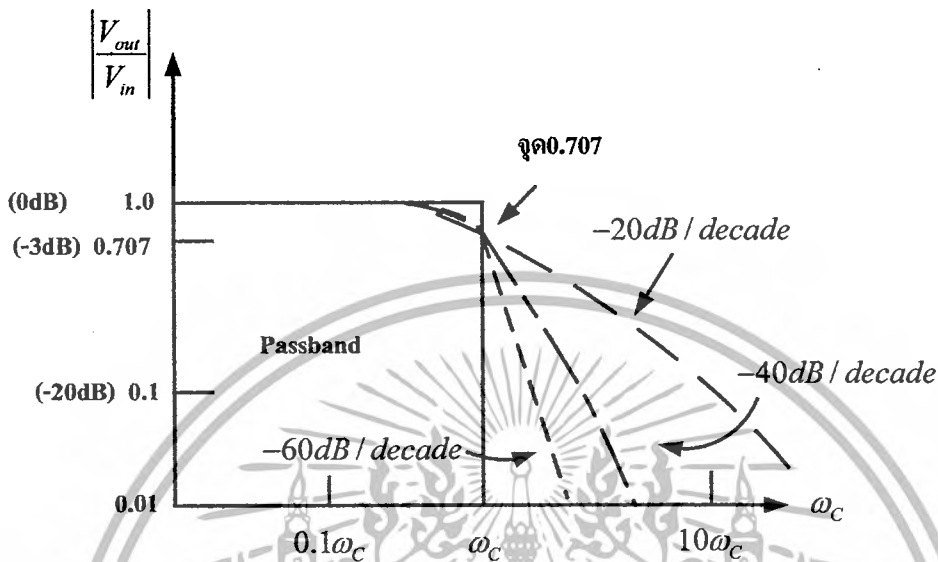
โดยที่

$$A = \left( 1 + \frac{2R_3}{R_G} \right) \left( \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.20)$$

เนื่องจากแรงดันอินพุต  $V_1$  และ  $V_2$  ของวงจรนั้นถูกป้อนโดยตรงเข้าทางขาอินพุตไม่กลับเฟสของออปแอมป์ จึงทำให้วงจร  $IA$  นี้มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ของวงจรสูงมาก (ประมาณเท่ากับอินพุตอิมพีแดนซ์ของวงจรนั่นเอง) นอกจากนี้ อัตราขยายสัญญาณ  $A$  ของวงจรสามารถปรับค่าได้อย่างสะดวกและอิสระด้วยการปรับค่าของ  $R_G$

## 2.5 วงจรกรองผ่านความถี่แบบบัตเทอร์เวิร์ทท์(The Butterworth Filter)

จุดประสงค์หลักในการประยุกต์ใช้งานวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ คือ ความพยายามออกแบบให้วงจรมีอัตราขยายสัญญาณในช่วงแถบผ่านมีค่าใกล้เคียงกับหนึ่งมากที่สุด และวงจรกรองผ่านความถี่แบบบัตเทอร์เวิร์ทท์ เป็นวงจรกรองผ่านความถี่แบบหนึ่งซึ่งสนองต่อความต้องการดังกล่าวได้เป็นอย่างดี วงจรกรองผ่านความถี่แบบบัตเทอร์เวิร์ทท์นี้บางครั้งอาจเรียกว่า “วงจรกรองผ่านความถี่แบบ maximally flat” หรือวงจรกรองผ่านความถี่แบบ flat-flat” ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าวงจรกรองผ่านประเภทนี้จะให้ผลตอบสนองทางความถี่ใกล้เคียงกับในทางทฤษฎีมากที่สุด เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงช่วงความถี่สูง (ความชัน) มีค่าสูงขึ้นดังรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงผลตอบสนองทางความถี่ของ วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำทั้งสามแบบโดยที่กราฟเส้นทึบแทนถึงผลตอบสนองในทางทฤษฎีและกราฟเส้นประจะแทนถึงผลตอบสนองที่ได้จากวงจรในทางปฏิบัติ



รูปที่ 2.8 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัทเทอร์เวิร์ท

**2.5.1 วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัทเทอร์เวิร์ท -40 dB/decade (-40 dB/decade Low-pass Butterworth Filter)**

วงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัทเทอร์เวิร์ท ดังรูปที่ 2.9(ก) จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็น -40dB/decade หลังจากค่าความถี่ตัด ดังผลตอบสนองของวงจรใน รูปที่ 2.9(ข) ออปแอมป์ในวงจรทำหน้าที่เป็นวงจรบัฟเฟอร์ โดยมีตัวต้านทานป้อนกลับ  $R_f$  ต่อไว้เพื่อลดผลของออฟเซตไฟตรงของวงจร กล่าวคือ กรณีสัญญาณไฟตรง ค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ (capacitive reactance) ของตัวเก็บประจุ  $C$  จะมีค่าเป็นอนันต์ (infinite) ทำให้ค่าความต้านทานเทียบเท่าพิจารณาที่ขาอินพุท บวก (ขา3) และขาอินพุทลบ (ขา2) ของออปแอมป์มีค่าเท่ากัน ( $R=R_f$ ) และเป็นผลให้แรงดันไฟตรงที่ขาอินพุททั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน ( $V^+ \cong V^-$ ) หรือนั่นคือแรงดันอินพุทออฟเซตมีค่าประมาณศูนย์ เนื่องจากแรงดันผลต่างระหว่างขา 2 กับขา 3 มีค่าประมาณ 0 V และวงจรออปแอมป์ต่อเป็นวงจรบัฟเฟอร์ ดังนั้นแรงดันไฟสลับตกคร่อม  $C$  จึงมีค่าประมาณแรงดันเอาต์พุท  $V_{out}$  ของวงจรอาศัยกฎแบ่งแรงดันหาค่าแรงดันตกคร่อม  $C$  จะได้เท่ากับ

$$V_{out} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega C}\right)}{R + \left(\frac{1}{j\omega C}\right)} V_{in} \tag{2.21}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\omega$  คือค่าความถี่ของแรงดันอินพุต  $V_{in}$  ในหน่วยของเรเดียนต่อวินาที (radian per second, rad/s) มีค่าเท่ากับ  $2\pi f$  และ  $j$  คือค่าจินตภาพ มีค่าเท่ากับ  $\sqrt{-1}$  จากสมการที่(2.21)นำมาเขียนใหม่ในรูปของ อัตราขยายแรงดันลูปปิด  $A_{CL}$  (close-loop voltage gain) ของวงจร จะได้เป็น

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1+j\omega C} \quad (2.22)$$

หากทำการพิจารณาอัตราขยายแรงดันลูปปิด  $A_{CL}$  จากสมการที่ (2.13) โดยแปรค่าความถี่จากความถี่ต่ำ ( $\omega \rightarrow 0$ ) จนถึงความถี่สูง ( $\omega \rightarrow \infty$ ) จะได้ว่า

ณ.ความถี่ต่ำ ( $\omega \rightarrow 0$ ) จะได้  $|A_{CL}| \cong 1$  หรือ 0 dB

ณ.ที่ความถี่สูง ( $\omega \rightarrow \infty$ ) จะได้  $|A_{CL}|$  ดังนี้

$$|A_{CL}| \cong \frac{1}{j\omega RC}$$

หรือ

$$|A_{CL}|_{dB} \cong 20 \log \left| \frac{1}{j\omega RC} \right| = -20 \log(\omega RC)$$

ถ้า  $\omega = \frac{1}{RC}$  ทำให้  $|A_{CL}| \cong 0 \text{ dB}$

ถ้า  $\omega = \frac{10}{RC}$  ทำให้  $|A_{CL}| \cong -20 \text{ dB}$

ถ้า  $\omega = \frac{100}{RC}$  ทำให้  $|A_{CL}| \cong -40 \text{ dB}$

ถ้า  $\omega = \frac{1000}{RC}$  ทำให้  $|A_{CL}| \cong -60 \text{ dB}$

ดังนั้นแรงดันเอาต์พุต  $V_{out}$  ของวงจรก็คือแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ  $C_1$  นั่นเอง เมื่อกำหนดให้  $R_1=R_2=R$  แล้ว ขั้นตอนการออกแบบวงจรสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

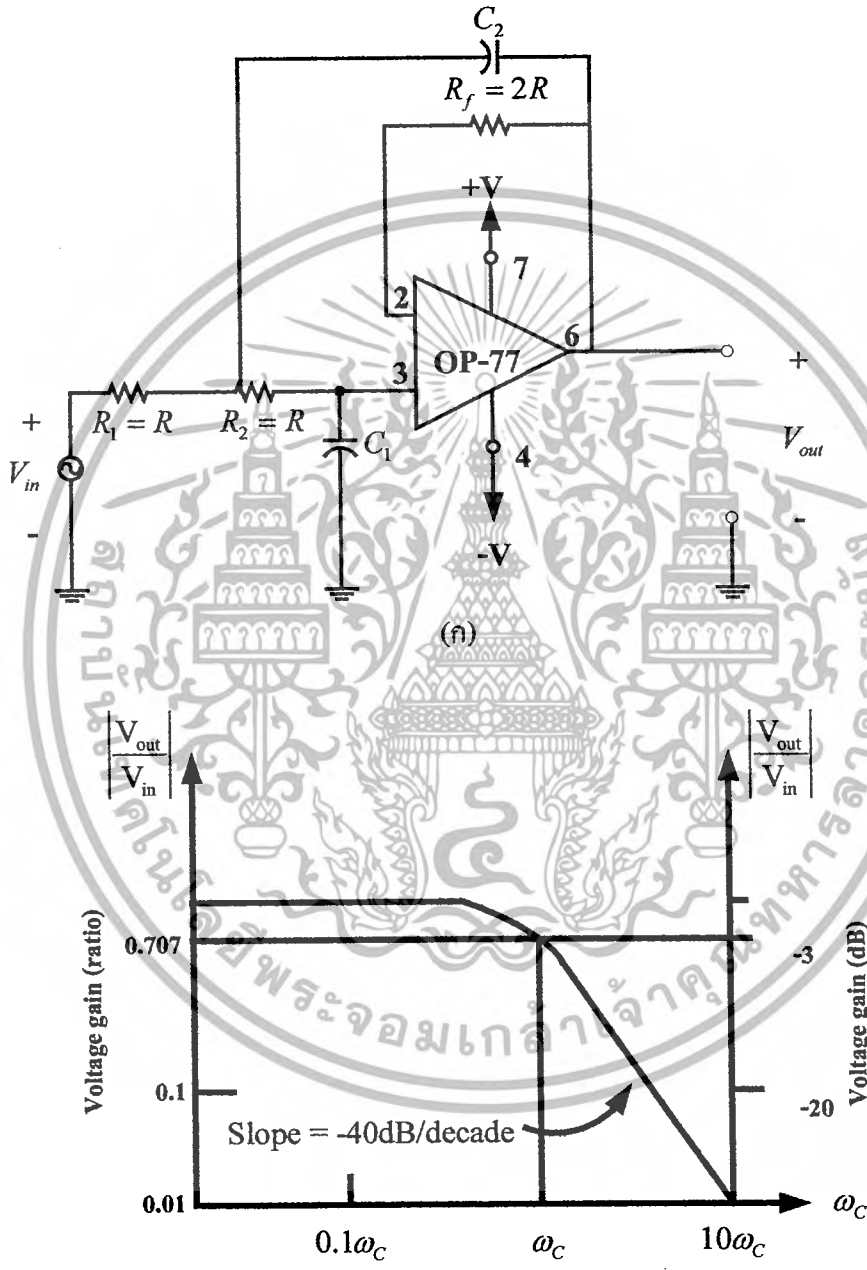
สรุปขั้นตอนการออกแบบ วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำดังรูปที่ 2.9(ก) จะได้ 5 ขั้นตอน ดังนี้คือ

- 1) เลือกค่าความถี่ตัด  $\omega_c$  หรือ  $f_c$  ของวงจร
- 2) ทำการเลือกค่า  $C_1$  ที่ใช้ในวงจร โดยทั่วไปควรมีค่าระหว่าง 100pF ถึง 0.1uF
- 3) เลือกค่า  $C_2=2C_1$
- 4) คำนวณหาค่า  $R$  จากสมการที่ (4.3) ต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R = \frac{0.707}{\omega_c C_1} \tag{2.23}$$

5) เลือกค่า  $R_f = 2R$



รูปที่ 2.9 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ และผลตอบสนองทางความถี่ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงเท่ากับ  $-40\text{dB/decade}$

(ก) วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ  $-40\text{dB/decade}$

(ข) ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F87x

ในหัวข้อนี้มีรายละเอียดเกี่ยวไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877 ในส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงงานนี้เท่านั้น โดยจะพูดถึงคุณสมบัติที่นำมาใช้งาน ผู้อ่านท่านใดที่ต้องการทราบข้อมูลที่ละเอียดกว่านี้แนะนำให้หาหนังสืออื่นมาศึกษาเพิ่มเติมด้วย

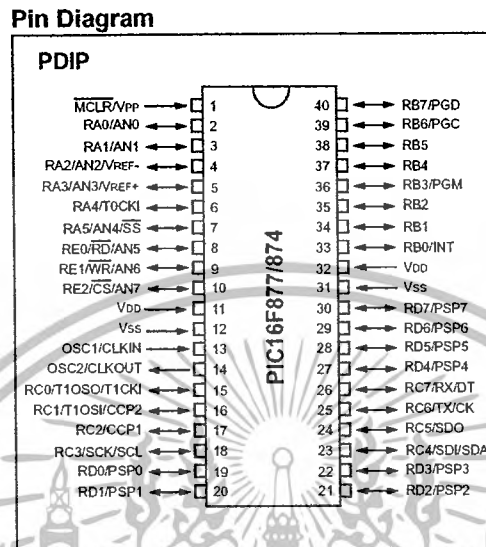
ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC มีสถาปัตยกรรมแบบฮาร์วาร์ด (Harvard architecture) กล่าวคือมีการแยกหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลออกจากกัน โดยมีบัสสำหรับต่อแยกกันด้วย ซีพียูภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมด้วยบัสแอดเดรส 13 บิต และบัสข้อมูลหน่วยความจำโปรแกรม 14 บิต ในขณะที่บัสสำหรับติดต่อกับหน่วยความจำข้อมูลและรีจิสเตอร์ภายในเป็นแบบ 8 บิต ทั้งบัสแอดเดรสและบัสข้อมูล

นอกจากนี้การจัดสถาปัตยกรรมแบบนี้แล้ว การกระทำคำสั่งของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ยังใช้กระบวนการที่เรียกว่า ไปป์ไลน์ (pipeline) ทำให้สามารถเฟตคำสั่งถัดไปในขณะที่กำลังเอ็กเซคิวต์คำสั่งในปัจจุบัน ส่งผลให้ความเร็วในการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์เพิ่มมากขึ้น นั่นจึงเป็นที่มาของความสามารถในการกระทำคำสั่ง 1 คำสั่งภายในสัญญาณนาฬิกา 1 ลูก (เฟตซ์ : fetch เป็นกระบวนการเรียกคำสั่งออกจากหน่วยความจำโปรแกรมแล้วแปลเป็นเลขฐานสิบหกเพื่อให้ซีพียูเข้าใจส่วนกระบวนการเอ็กเซคิวต์ (execute) เป็นการกระทำคำสั่งให้เกิดผลลัพธ์ตามที่คำสั่งนั้น ๆ กำหนด)



รูปที่ 2.10 ไคอะแกรมแสดงรูปแบบสถาปัตยกรรมของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบฮาร์วาร์ด

## 2.6.1 คุณสมบัติทางเทคนิคของ PIC16F877A



รูปที่ 2.11 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A

### คุณสมบัติหลัก

- ซึ่พียูเป็นแบบ RISC (Reduced Instruction-Set Computer) มีคำสั่งใช้งานเพียง 35 คำสั่งใช้งานเพียง 35 คำสั่ง
- สามารถกระทำคำสั่ง โดยใช้สัญญาณเพียงหนึ่งลูก ยกเว้นคำสั่งการกระโดด
- ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ตั้งแต่ไฟตรงถึง 20 MHz
- หน่วยความจำโปรแกรม 8 กิโลเวิร์ด
- หน่วยความจำข้อมูลแรมหรือรีจิสเตอร์ 368 ไบต์
- ขนาดหน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม 256 ไบต์
- ตอบสนองแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์สูงสุดถึง 14 แหล่ง
- มีแอสตค 8 ระดับ
- มีวงจรเพาเวอร์เวอร็อนรีเซต (POR)
- มีเพาเวอร์อัปไทเมอร์ (PWRT) และออสซิลเลเตอร์สตาร์ทอัปไทเมอร์ (OST)
- มีวงจรวอตช์ดีด็อกไทเมอร์ (WDT) ที่มีวงจรออสซิลเลเตอร์ในตัว ทำให้มีความเชื่อถือในการทำงานสูง
- เพื่อป้องกันข้อมูลทั้งในหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีโหมดประหยัดพลังงาน
- สามารถโปรแกรมโดยใช้แรงดัน +5 โวลต์ได้
- แก้ไขข้อมูลในหน่วยความจำโปรแกรมด้วยกระบวนการ ICD (In-Circuit Debugger) ผ่านพอร์ตเพียง 2 ขา
- สามารถอ่านและเขียนหน่วยความจำโปรแกรมได้
- ไฟเลี้ยง +2 ถึง +5.5 โวลต์
- กระแสซิงค์และกระแสซอร์สของพอร์ต 25 mA
- การใช้พลังงานไฟฟ้าในกรณีไม่ขับโหลด  
น้อยกว่า 2 mA ที่ไฟเลี้ยง +5V และสัญญาณนาฬิกา 4MHz  
20 uA ที่ไฟเลี้ยง +3V และสัญญาณนาฬิกา 32kHz  
น้อยกว่า 1uA ในโหมดประหยัดพลังงานหรือสแตนด์บาย

#### คุณสมบัติพิเศษเพิ่มเติม

- ไทมเมอร์ 3 ตัว คือ ไทมเมอร์ 0 ขนาด 8 บิต มีปริสเกลเลอร์ขนาด 8 บิตในตัว , ไทมเมอร์ 1 ขนาด 16 บิต พร้อมปริสเกลเลอร์ และ ไทมเมอร์ 2 ขนาด 8 บิต มีปริสเกลเลอร์, โปสต์สเกลเลอร์และริจิสเตอร์คาบเวลา ขนาด 8 บิต 1 ตัว
- มีโมดูล CCP 2 ชุด โดยส่วนตรงจับสัญญาณหรือแคปเจอร์ มีขนาด 16 บิต และความละเอียดสูงสุด 12.5 นาโนวินาที ส่วนเปรียบเทียบสัญญาณ มีขนาด 16 บิต ความละเอียดสูงสุด 200 นาโนวินาที วงจร PWM มีความละเอียดสูงสุด 10 บิต
- มีวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ขนาด 10 บิต จำนวน 8 ช่อง
- วงจรเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมทั้ง SPI และ I<sup>2</sup>C
- วงจรสื่อสารข้อมูลอนุกรม USART พร้อมการตรวจจับแอดเดรส 9 บิต

## 2.7 การติดต่อกับพอร์ตอนุกรม (Series Port)

ในการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์เชื่อมต่อนั้น ได้มีการใช้งานพอร์ตคอมพิวเตอร์เชื่อมต่อไม่ว่าจะเป็นพอร์ตขนานหรือเรียกกันทั่วไปว่าพอร์ตพริ้นเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่บนเมนบอร์ดของคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องอยู่แล้ว นอกจากนี้ก็ยังมีอีกพอร์ตหนึ่งที่สามารถใช้งานทางด้านนี้เช่นกัน นั่นคือพอร์ตอนุกรม ซึ่งประกอบไปด้วยรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.1 มาตรฐาน RS-232C

มาตรฐาน RS-232C เป็นมาตรฐานที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อที่จะทำให้อุปกรณ์ต่อพ่วงจากผู้ผลิตต่างกันสามารถทำงานร่วมกันได้ มาตรฐานหลายชนิดได้รับการออกแบบขึ้นมา แต่มาตรฐานที่ได้รับความนิยมและใช้กันกว้างขวาง คือ มาตรฐาน RS-232C ซึ่งถูกประกาศใช้ในปี 1969 โดยสมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ในยุคแรกการอินเตอร์เฟซแบบ RS-232C ถูกออกแบบสำหรับเชื่อมต่อเทอร์มินอลกับโมเด็ม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการส่งข้อมูลบนสายเส้นเดียวกัน

มาตรฐาน RS-232C ได้แบ่งอุปกรณ์ออกเป็น 2 ประเภท ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองประเภทนี้ก็คือ

1. อุปกรณ์ DTE (Data Terminal Equipment) เป็นอุปกรณ์สำหรับส่งข้อมูล (เอาต์พุต)
2. อุปกรณ์ DCE (Data Communication Equipment) เป็นอุปกรณ์สำหรับรับข้อมูล (อินพุต)

ตามมาตรฐาน RS-232C แล้วคอนเน็กเตอร์ของ DTE จะเป็นตัวผู้ ส่วนคอนเน็กเตอร์ของ DCE จะเป็นตัวเมีย ซึ่งคอนเน็กเตอร์ที่นิยมใช้กันอยู่จะเป็นชนิด D-Type แบบ 9 ขา และแบบ 25 ขา โดยจะติดตั้งอยู่หลังเครื่องคอมพิวเตอร์ ระดับแรงดันจะมีค่าระหว่าง  $-3V$  ถึง  $-15V$

สำหรับลอจิก High และลอจิก Low จะมีระดับแรงดันระหว่าง  $+3V$  ถึง  $+15V$  สามารถรับส่งข้อมูลได้ด้วยความยาวของสายสัญญาณสูงสุด 50 ฟุต หรือ 150 เมตร แต่ถ้าต้องการสื่อสารกับอุปกรณ์อื่นที่อยู่ห่างกันมาก ๆ จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์อื่น ๆ เข้าช่วย เช่น การใช้โมเด็ม เป็นต้น

### 2.7.2 ลักษณะของคอนเน็กเตอร์แบบ D-Type

หัวต่อแบบ D-Type ที่ใช้ในการสื่อสารแบบอนุกรมของเครื่องคอมพิวเตอร์นั้น จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ แบบ 9 ขา และแบบ 25 ขา บางครั้งเรียกว่า DB9 และ DB25 ซึ่งหัวต่อทั้งสองชนิดจะมีลักษณะการทำงานของสัญญาณเหมือนกัน แต่การจัดเรียงไม่เหมือนกัน



ภาพที่ 2.12 ลักษณะของหัวต่อแบบ DB25 และ DB9 ตามลำดับ

### 2.8 ตัวควบคุม (Controller)

ตัวควบคุม เป็นส่วนประกอบหนึ่งในระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งมีสัญญาณความผิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของ บริษัท อีทีเอส จำกัด ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบควบคุมแบบป้อนกลับและวิธีการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุม โดยที่ ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของตัวควบคุม นิยมเรียก กฎการควบคุม (control Law) โดยจะมี 3 รูปแบบ คือ

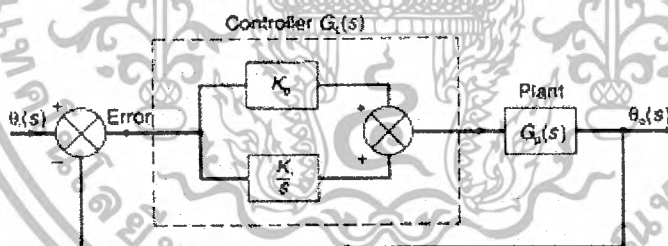
1. Proportional Control
2. Integral Control
3. Derivative Control

ในระบบบางประเภท มีความจำเป็นที่ต้องปรับปรุงสมรรถนะของระบบควบคุม ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ส่วนประกอบอื่นเพิ่มเติมเข้ากับระบบควบคุม การที่ปรับเปลี่ยนสมรรถนะของระบบควบคุมป้อนกลับแบบนี้เรียกว่า การชดเชย (compensation)

ในโครงการนี้ใช้ตัวควบคุมในการทำงานเพียง 2 แบบ คือ ระบบควบคุมแบบ PI และระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.8.1 ระบบควบคุมแบบพีไอ (PI: Proportional plus Integral Control)

การที่ระบบควบคุมมีความเสถียรสัมพัทธ์ลดลง เมื่อใช้การควบคุมแบบไอ สามารถที่จะแก้ไขได้ในระดับหนึ่ง โดยการใช้การควบคุมแบบพีร่วมกับแบบไอ ซึ่งลักษณะของระบบควบคุมเป็นตามรูปที่ 2.13

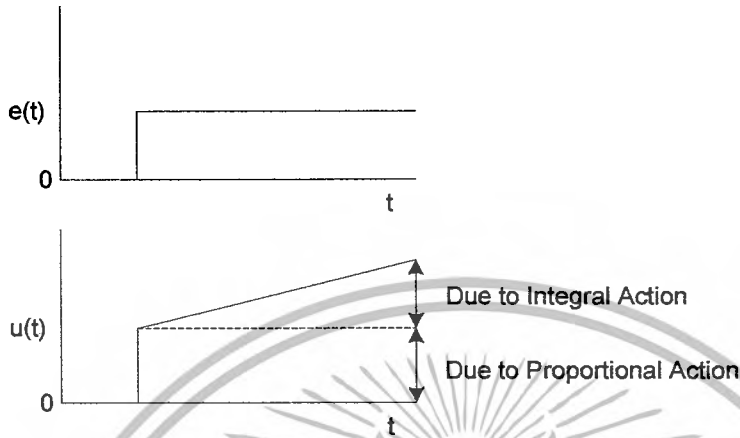


รูปที่ 2.13 บล็อกไคอะแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอ

สำหรับระบบดังกล่าวจะมีเอาต์พุตของตัวควบคุมเป็น

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 การตอบสนองของระบบควบคุมแบบพีไอ

รูปที่ 2.14 แสดงเอาต์พุตของตัวควบคุมที่ได้รับเมื่อมีอินพุตเป็นแบบ step ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมแบบพีไอ เป็น

$$\begin{aligned}
 G_o(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} \\
 &= \frac{s K_p + K_i}{s} \\
 &= K_p \frac{(s + K_i/K_p)}{s}
 \end{aligned}
 \tag{2.25}$$

ให้ integral time constant เป็น

$$\tau_i = \frac{K_p}{K_i}
 \tag{2.26}$$

ดังนั้นจะได้

$$G_c(s) = \frac{K_p [s + (1/\tau_i)]}{s}
 \tag{2.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจะทำให้ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบเปิดเป็น

$$G_o(s) = G_c(s) G_p(s) \quad (2.28)$$

$$= \frac{K_p [s + (1/\tau_i) G_p(s)]}{s}$$

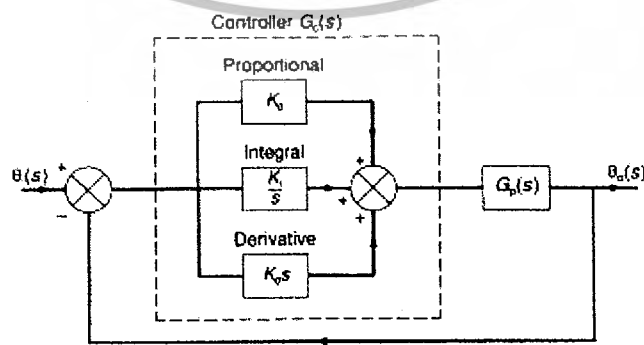
จะเห็นว่ามีซีโรที่  $s = -1/\tau_i$  และโพลที่  $s = 0$  เพิ่มให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบเมื่อใช้การควบคุมแบบพีไอ การที่เพิ่มตัวประกอบ  $s$  เข้ากับเทอมส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนก็เสมือนกับเพิ่มแบบของระบบขึ้นไป 1 จึงทำให้ระบบนี้ไม่มีความผิดพลาดที่สภาพคงตัวสำหรับอินพุทแบบ step นอกจากนั้นการที่เพิ่มซีโรให้กับระบบไปพร้อม ๆ กัน ก็ทำให้ความแตกต่างระหว่างจำนวนโพล  $n$  และจำนวนซีโร  $m$  มีค่าคงที่ ดังนั้นมุมของ asymptote สำหรับทางเดินของรากมีค่าคงเดิม เพราะอย่างไรก็

$$\text{Intersection/point} = (\text{ผลรวมของโพล} - \text{ผลรวมของศูนย์}) / (n - m)$$

ตามจุดตัดของเส้น asymptotes บนแกนจริง จะเคลื่อนที่เข้าหาจุดกำเนิดมากขึ้น ส่งผลให้ความเสถียรภาพของระบบลดลง

การเพิ่มโพลที่  $s = 0$  และซีโรที่  $s = -1/\tau_i$  ทำให้จุดเปลี่ยนไปเท่ากับ  $\pm(1/\tau_i)/(n-m)$  ซึ่งทำให้มีค่าเป็นบวกมากขึ้น และจุดตัดจะเคลื่อนที่มาทางขวามือเข้าใกล้จุดกำเนิดมากขึ้น อย่างไรก็ตามการลดลงของความเสถียรสัมพันธ์นี้จะน้อยกว่าการที่ใช้การควบคุมแบบไอเพียงอย่างเดียว ค่าของ  $K_p$  และ  $K_i$  จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดตำแหน่งของซีโรและโพลของระบบ โดยตำแหน่งของซีโรกำหนดด้วยค่า  $K_p$  ในขณะที่  $K_i$  จะเป็นค่าที่ใช้กำหนดโพลระบบแบบปิด

### 2.8.2 ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Control)



รูปที่ 2.15 บล็อกโคแอมแกรมของระบบควบคุมแบบพีไอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมโดยใช้แบบพืรวมกับแบบไอและรวมกับแบบดี หรือ ที่เรียก การควบคุมแบบ 3 เทอม (tree-term control) ระบบจะมีลักษณะตามรูปที่ 2.15 ทำให้เอาท์พุทของตัวควบคุมเมื่อรับอินพุทเป็นความผิดพลาด  $e(t)$  ดังนี้

$$u(t)=K_p e(t)+K_i \int_0^t e(t) dt+K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.29)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม จะเป็น

$$G_c(s)=K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.30)$$

ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็น

$$G_c(s)=K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right) \quad (2.31)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนระบบแบบเปิดของระบบควบคุมแบบพีไอดี ที่แสดงในรูปที่ 2.15 จะเป็น

$$G_o(s)=G_c(s) G_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right) G_p(s) \quad (2.32)$$

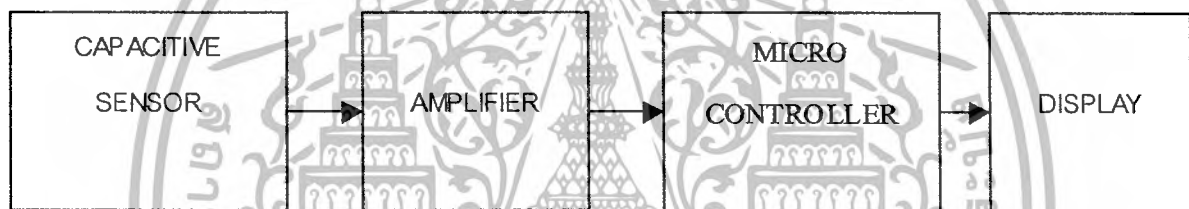
$$G_o(s) = \frac{K_p (\tau_i s + 1 + \tau_i \tau_d s^2)}{\tau_i s} G_p(s)$$

ดังนั้นการควบคุมแบบพีไอดี จะเพิ่มจำนวนซีโรให้กับระบบเท่ากับ 2 ตัวและเพิ่มจำนวนโพล 1 ตัว และทำให้ชนิด ชนิด ระบบเพิ่มขึ้น 1

## บทที่ 3

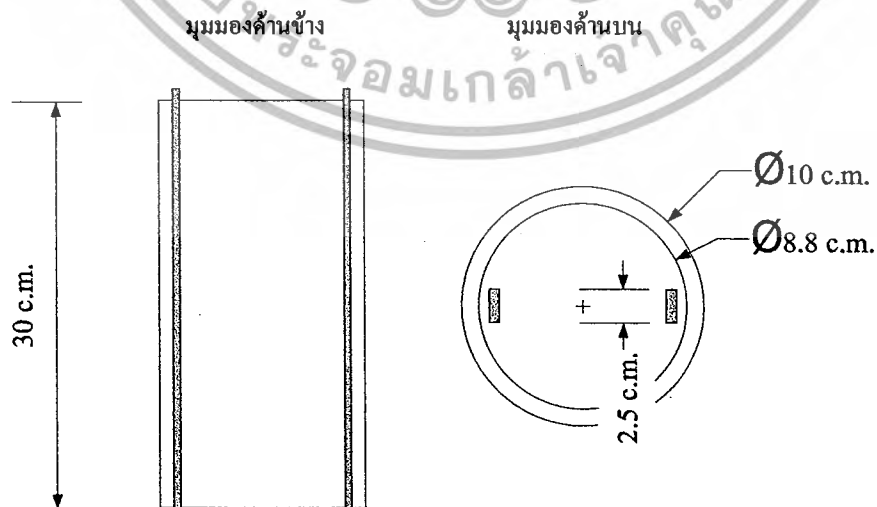
### การออกแบบและการสร้าง

การออกแบบได้นำหลักความคิดที่จะใช้ระดับของเหลวที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการบีบของเหลวเข้าสู่ถัง โดยระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลงทำให้มีการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์คาปาซิทีฟเซนเซอร์ทำให้ได้แรงดันไฟฟ้าออกมาที่เอาต์พุตของคาปาซิทีฟเซนเซอร์ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะส่งเข้าวงจรขยายเพื่อขยายแรงดันให้มีขนาดสูงพอที่จะใช้ในวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อจะนำไปแสดงผลบนจอคอมพิวเตอร์ผ่าน RS-232 PORT ต่อไป



รูปที่ 3.1 BLOCK DIAGRAM ระบบการวัดและควบคุมระดับของเหลว

#### 3.1 การออกแบบถังน้ำและอิเล็กโทรด

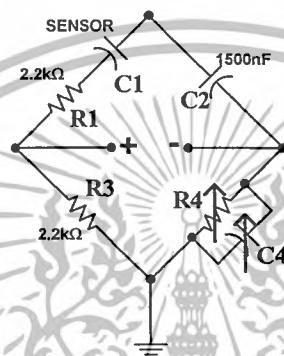


รูปที่ 3.2 รายละเอียดของถังน้ำและอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลอง เซนเซอร์ใช้แผ่นอลูมิเนียมยาว 25 ซม. กว้าง 2.5 ซม.หนา 1 มม. ให้ค่าแรงดันเอาต์พุตออกมา  $100mV - 350mV$  ซึ่งจะได้นำแรงดันเอาต์พุตที่ได้ไปเป็นสัญญาณเพื่อที่จะนำไปแสดงผลต่อไป โดยจะนำไปขยายสัญญาณในภาคขยายสัญญาณ (Amplifier)

### 3.2 การคำนวณหาค่าส่วนประกอบในวงจรสมมูลค่าความจุ



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลค่าความจุ

เลือกค่า  $R_1$  กับ  $R_3$  เท่ากับ  $2.2k\Omega$   $C_2 = 1500nF$

จากสูตร

$$C_1 = R_4 \frac{C_2}{R_3} \quad (3.1)$$

และ

$$R_1 = R_3 \frac{C_4}{C_2} \quad (3.2)$$

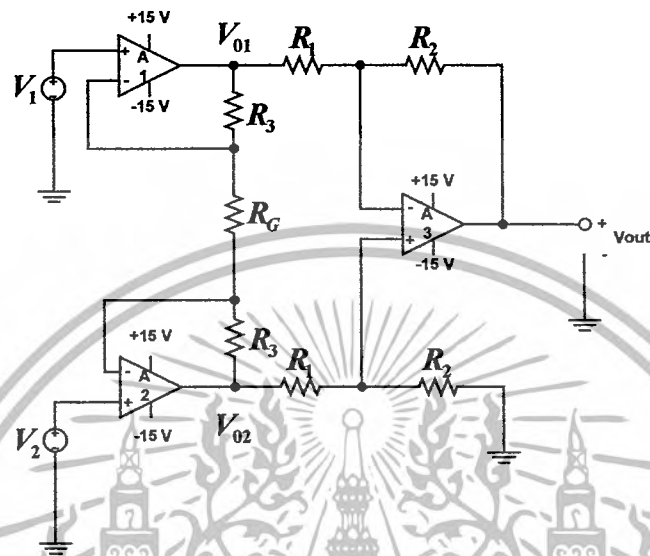
หาค่าของ  $R_4$  และ  $C_4$  เมื่อ

$C_1 = 2.591nF$  (ค่าความจุของ capacitive sensor เมื่อของเหลวมีระดับเท่ากับ 100%)

$$R_4 = \frac{C_1 R_3}{C_2} = \frac{2.591nF \times 2.2k\Omega}{1500nF} = 3.45k\Omega, C_4 = \frac{R_1 C_2}{R_3} = \frac{(2.2k\Omega)(1500pF)}{2.2k\Omega} = 1500pF$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบวงจรขยายอินสทรูเมนต์



รูปที่ 3.4 วงจรขยายอินสทรูเมนต์

ต้องการออกแบบวงจรขยายอินสทรูเมนต์ ให้ได้อัตราขยายในย่าน  $2\text{V/V} \leq A \leq 10^3 \text{V/V}$  โดยให้ความต้านทานปรับค่าได้  $= 50\text{k}\Omega$  ต่อความต้านทานปรับค่าได้  $= 50\text{k}\Omega$  ให้เป็น  $R_G$  (ดังรูป) โดยที่  $A_1 > 2\text{V/V}$ ,  $A_2 < 2\text{V/V}$

$$\text{จากสูตร } A = A_1 \times A_2 = \left(1 + \frac{2R_3}{R_G}\right) \times \left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$\text{จาก } A_2 = \frac{R_2}{R_1} = 1\text{V/V} \text{ ใช้ } R_1 = 10\text{k}\Omega \text{ และ } R_2 = 10\text{k}\Omega$$

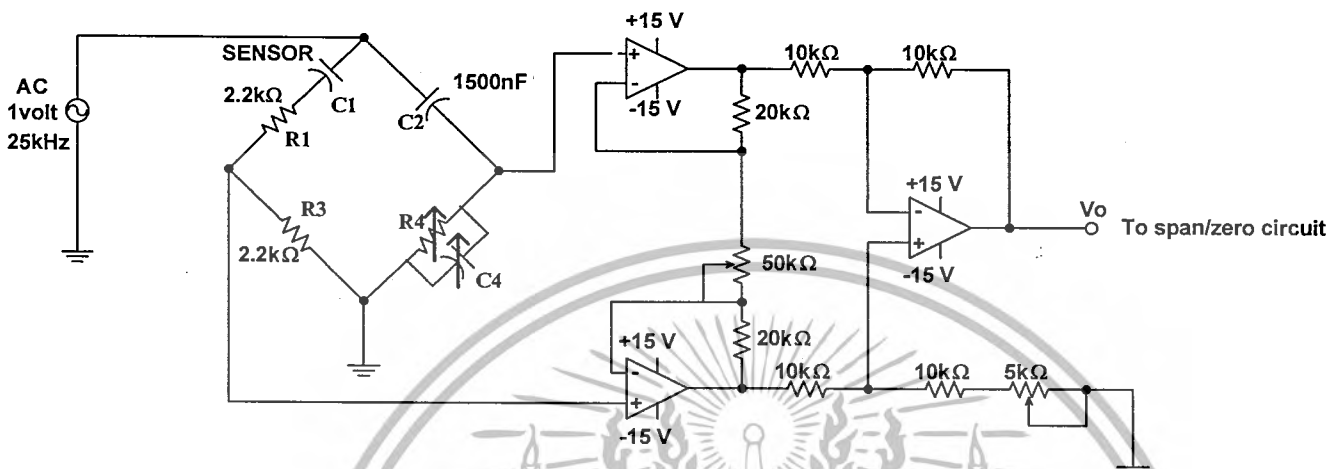
ดังนั้น  $A_1$  สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่  $2\text{V/V}$  ถึง  $1000\text{V/V}$

$$\text{จาก } A_1 = \left(1 + 2\frac{R_3}{R_G}\right) \text{ จะได้สมการมา 2 สมการ}$$

$$2 = 1 + \frac{2R_3}{R_G}, 1000 = 1 + \frac{2R_3}{R_G}$$

เลือกใช้ค่า  $R_3 = 20\text{k}\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



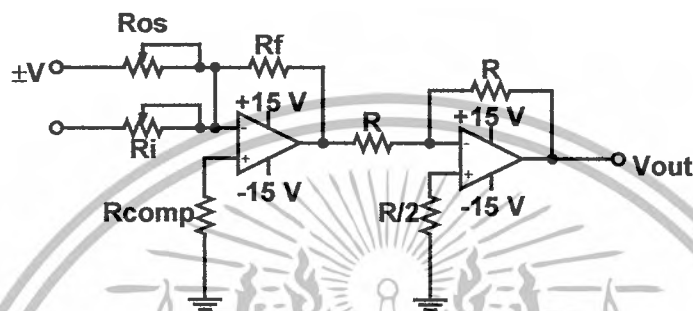
รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลค่าความจุ และ วงจรขยายอินสทรูเมนต์

ระดับของเหลว(%)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
0	0.400
20	0.622
40	0.844
60	1.067
80	1.180
100	1.243

ตารางที่ 1 ค่า แรงดันไฟฟ้า ที่ได้จาก วงจรสมมูลค่าความจุ และ วงจรขยายอินสทรูเมนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์



รูปที่ 3.6 วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

$$m = \frac{V_{OUT(max)} - V_{OUT(min)}}{V_{IN(max)} - V_{IN(min)}}$$

$$m = \frac{5V - 1V}{1.248 - 0.400}$$

$$m = 4.744$$

หรือ  $m = \frac{R_f}{R_i} = 4.744$  เลือก  $R_f = 10k\Omega$  จะได้  $R_i = 2.1k\Omega$

ที่  $V_{IN} = 0.400$  แล้ว  $V_{OUT} = 1V$  นั่นคือ

$$1V = (4.744)(0.400V) + b$$

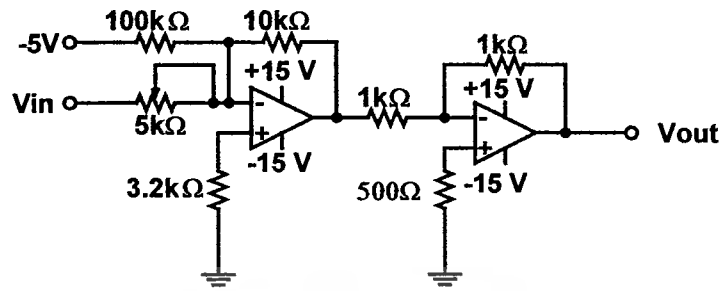
$$b = -0.897$$

แต่  $b = \frac{R_f}{R_{os}}(\pm V) = -0.897$  ดังนั้นต้องเลือกไฟลอป  $V = -5V$  จะได้

$$R_{os} = \frac{R_f}{b}(\pm V) = \frac{(10k\Omega)(-5V)}{-0.897} = 55.7k\Omega, R_{comp} = R_f // R_i // R_{os} = 3.2k\Omega$$

ดังนั้นเลือก  $R_f = 10k\Omega, R_i = 5k\Omega, R_{os} = 100k\Omega, R = 1k\Omega, R_{comp} = 3.2k\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ค่าพารามิเตอร์ของวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์

ระดับของเหลว(%)	Vo
0	1.204
20	1.71
40	2.414
60	3.123
80	3.6
100	3.82

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์

### 3.5 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัทเทอร์เวิร์ท

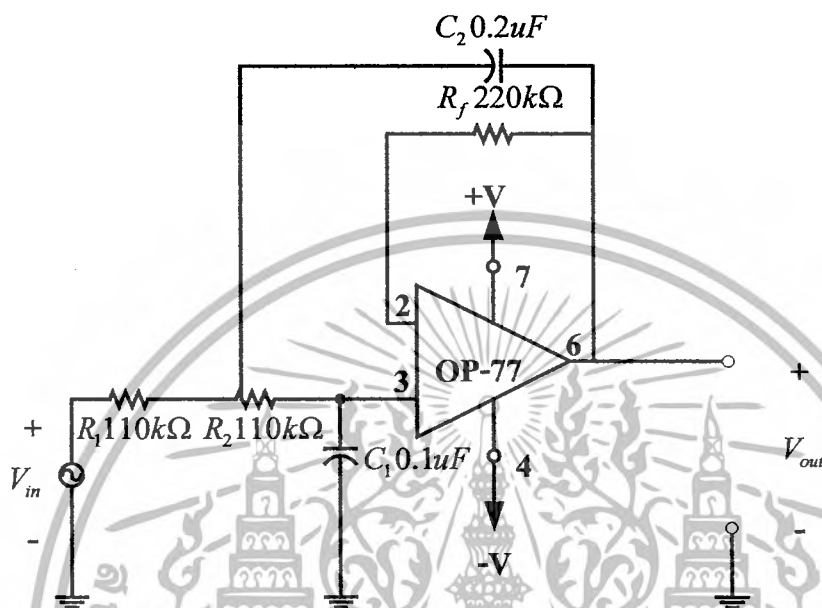
ต้องการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำเพื่อให้มีค่าความถี่ตัดของวงจรเท่ากับ 10Hz โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

1. เลือกค่าความถี่ตัดเท่ากับ 10Hz
2. ทำการเลือกค่า  $C_1$  ที่ใช้ในวงจร ในที่นี้เลือกค่า  $C_1$  เท่ากับ 0.1 $\mu$ F
3. เลือกค่า  $C_2 = 2C_1 = 0.2\mu$ F
4. คำนวณหาค่า R จากสมการ  $R = \frac{0.707}{\omega_c C_1} = \frac{0.707}{2\pi \times 10 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 112522\Omega$  เลือกใช้

R เท่ากับ 110k $\Omega$

5. เลือกค่า  $R_f = 2R = 220k\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



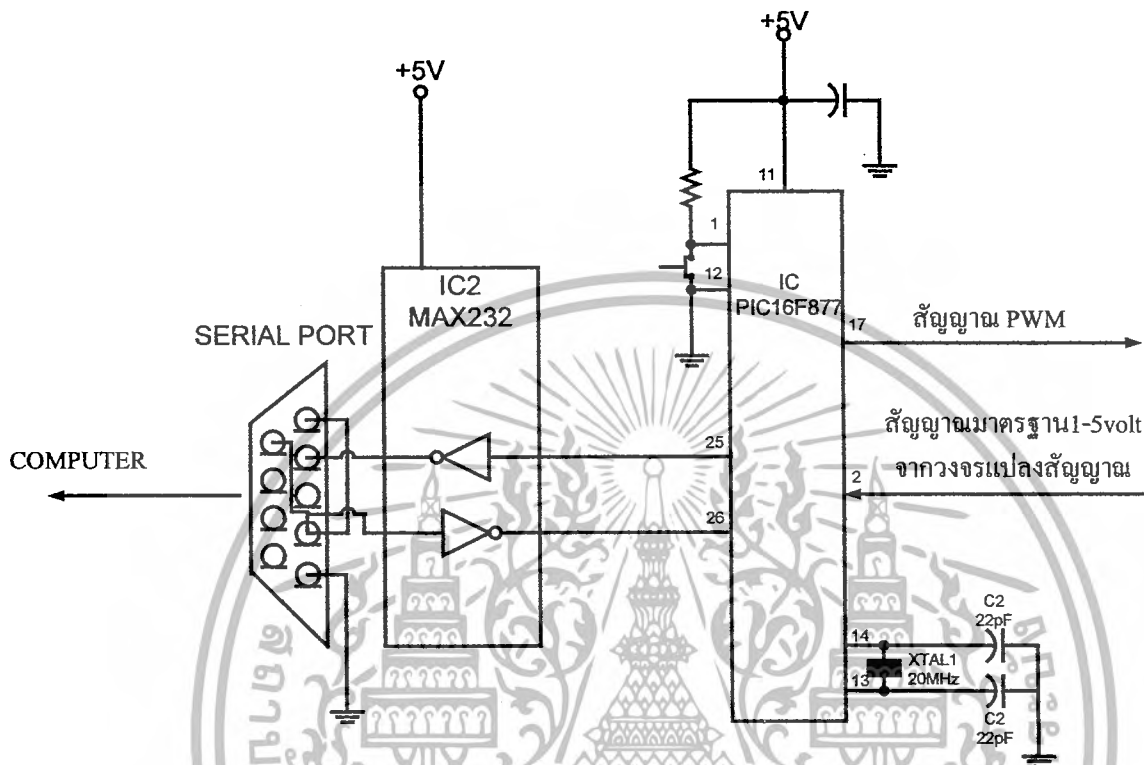
รูปที่ 3.8 แสดงการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำแบบบัพเทอร์เวอร์ธ

### 3.6 การออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์

#### 3.6.1 การออกแบบด้านฮาร์ดแวร์

ในภาคนี้จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ของ Micro Chip เบอร์ PIC 16F877A ซึ่งจะมียังจรแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลภายในตัวของ PIC 16F877A ซึ่งเหมาะแก่การใช้งานและในตัว PIC 16F877A จะมีการ interface กับคอมพิวเตอร์ผ่าน Port RS-232 ซึ่งสะดวกแก่การใช้งาน

การทำงานของ IC PIC 16F877A จะทำการเชื่อมต่อ RS-232 PORT ผ่านขา 25 และ 26 จะต่อเข้ากับคอนเนคเตอร์ DB-9 สัญญาณที่ได้จากภาคขยายจะส่งมายังขา 2 เพื่อทำการเชื่อมต่อมาแสดงผลที่คอมพิวเตอร์



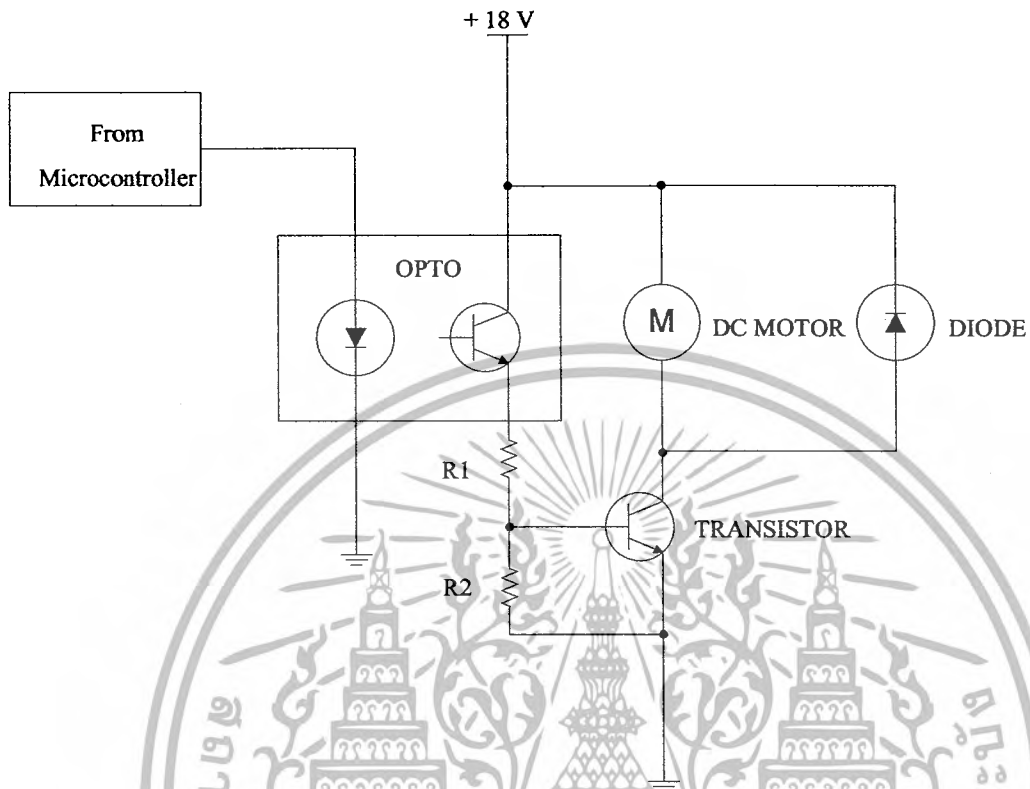
รูปที่ 3.9 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.6.2 การออกแบบด้านซอฟต์แวร์

รายละเอียดของโปรแกรมควบคุมการทำงานทั้งหมดของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F877A แสดงในภาคผนวก ข

### 3.7 การออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของปั้มน้ำ

เนื่องจากกระแสที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่เพียงพอในการขับปั้มน้ำให้ทำงานจึงใช้อุปกรณ์ที่ทรานซิสเตอร์มาต่อใช้งานร่วมกันในการขับกระแสโดยใช้สัญญาณพัลส์จากไมโครคอนโทรลเลอร์เข้าขาแอมป์ของออปโตไดโอดของออปโตไดโอดคือสามารถแยกภาครับกับภาคส่งออกจากกันเพื่อไม่ให้มีสัญญาณรบกวนจากภาครับมาทำการรบกวนในภาคส่ง



รูปที่ 3.10 แสดงวงจรควบคุมการทำงานของปั๊มน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

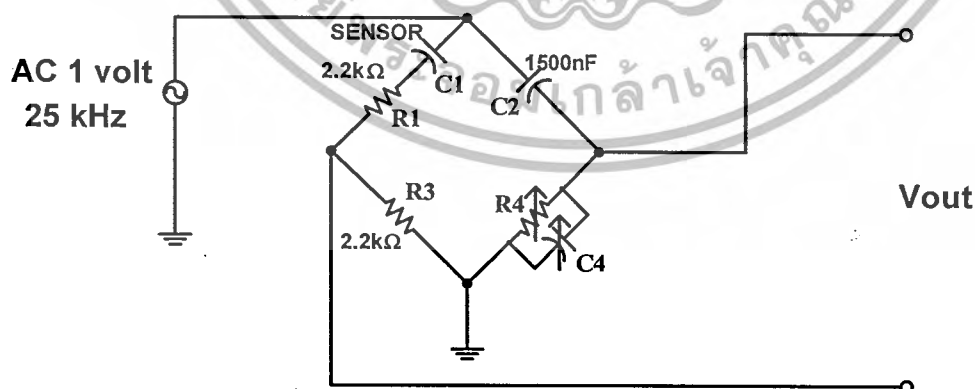
### การทดลองและผลการทดลอง

จากการที่ได้ออกแบบและสร้าง ถังน้ำและขั้วตัวนำไฟฟ้า วงจรสมมูลค่าความจุ วงจรขยาย อินสทรูเมนต์ วงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ระบบควบคุมอัตโนมัติ นำวงจรและอุปกรณ์ของระบบการวัดและควบคุมระดับของเหลวทั้งหมด มาทำการทดลองควบคุมและวัดระดับของเหลวว่าสามารถที่จะควบคุมได้มีประสิทธิภาพเท่าไร

#### 4.1 การทดลองที่ 1 วัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากวงจรสมมูลค่าความจุ

ขั้นตอนการทดลอง

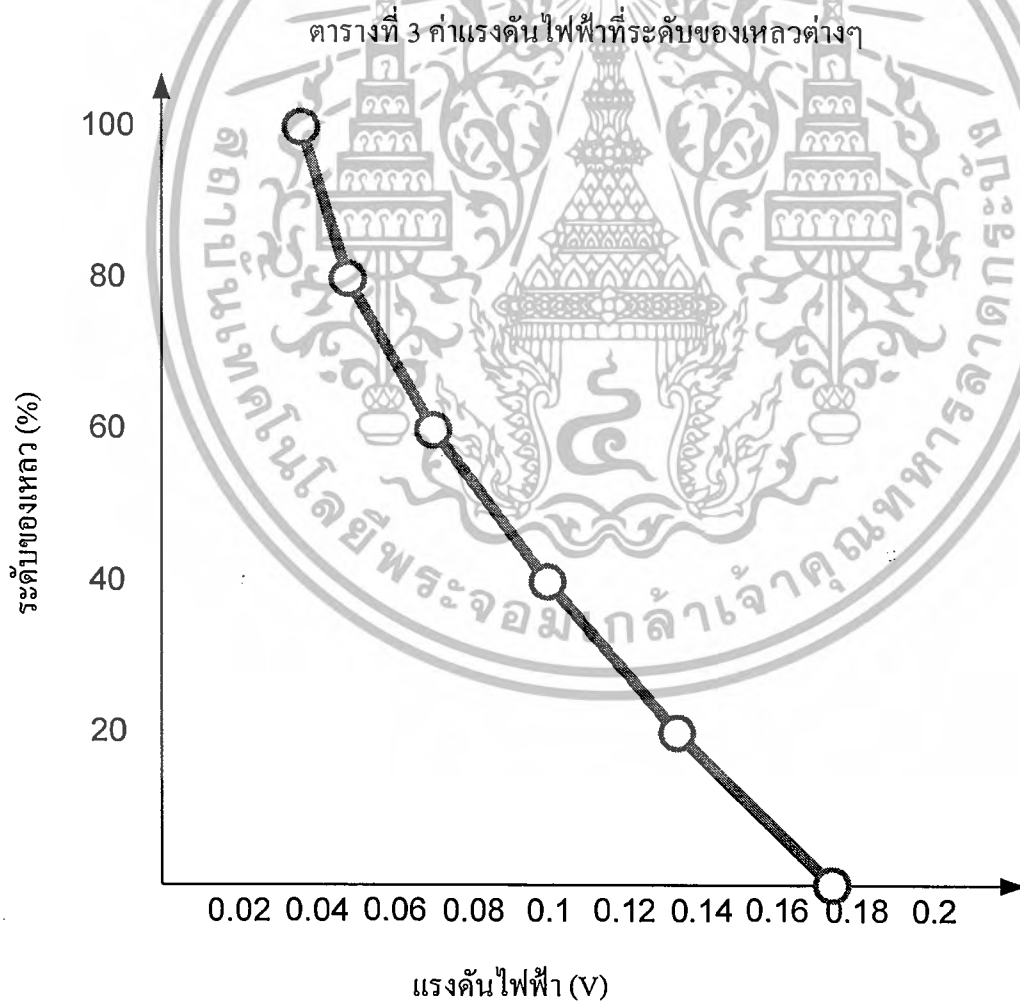
- 1.ต่อวงจรสมมูลค่าความจุไฟฟ้าตามรูปที่ 4.1
- 2.ทำการเติมของเหลวลงในถังให้ได้ระดับของเหลวที่ 0 เปอร์เซ็นต์
- 3.วัดค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_{OUT}$  ของวงจรสมมูลค่าความจุ
- 4.บันทึกผลการทดลองในตารางที่ 3
- 5.ทำซ้ำขั้นตอนการทดลองที่ 2,3,4 โดยเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวในถังเป็น 20,40,60,80 และ 100 เปอร์เซ็นต์
- 6.พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับระดับของเหลว



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงการต่อวงจรสมมูลค่าความจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับของเหลวในถัง (%)	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ (V)
0	0.175
20	0.134
40	0.1
60	0.068
80	0.048
100	0.039

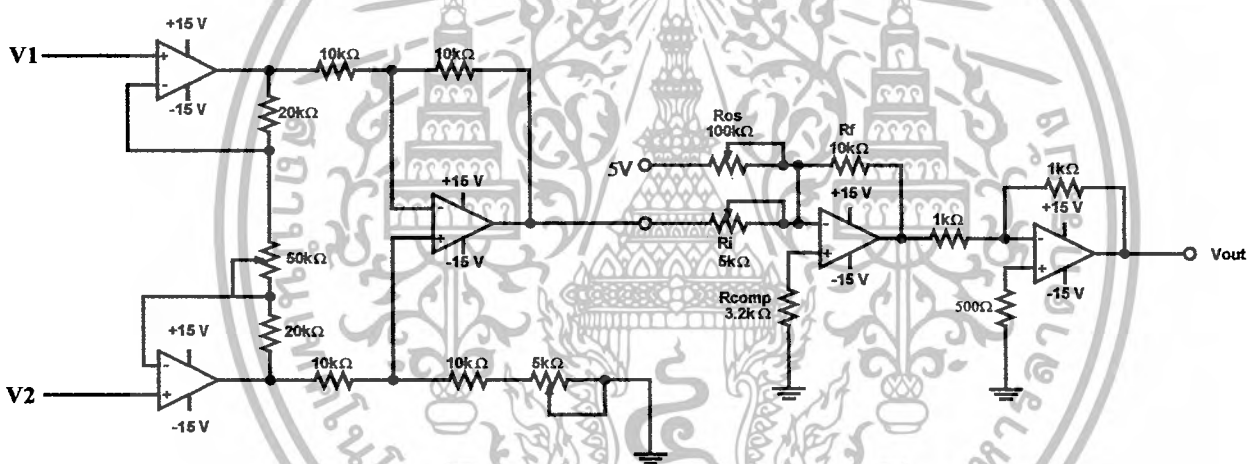


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ ห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดลองที่ 2 วัดค่าแรงดันไฟฟ้าจากวงจรขยายอินสทรูเมนต์ ปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์

### ขั้นตอนการทดลอง

1. ต่อวงจรขยายอินสทรูเมนต์ปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ตามรูปที่ 4.2
2. นำค่า  $V_{OUT}$  ที่ได้จากการทดลองที่ 1 ต่อเข้ากับวงจรถ่ายอินสทรูเมนต์ปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ที่ขา  $V_1$  และ  $V_2$
3. วัดค่าแรงดันไฟฟ้า  $V_{OUT}$  ของวงจรถ่ายอินสทรูเมนต์ปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์
4. บันทึกผลการทดลองในตารางที่ 4



รูปที่ 4.2 แสดงการต่อวงจรขยายอินสทรูเมนต์ ปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์

ระดับของเหลวในถัง (%)	ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ (V)
0	1.204
20	1.71
40	2.414
60	3.123
80	3.6
100	3.82

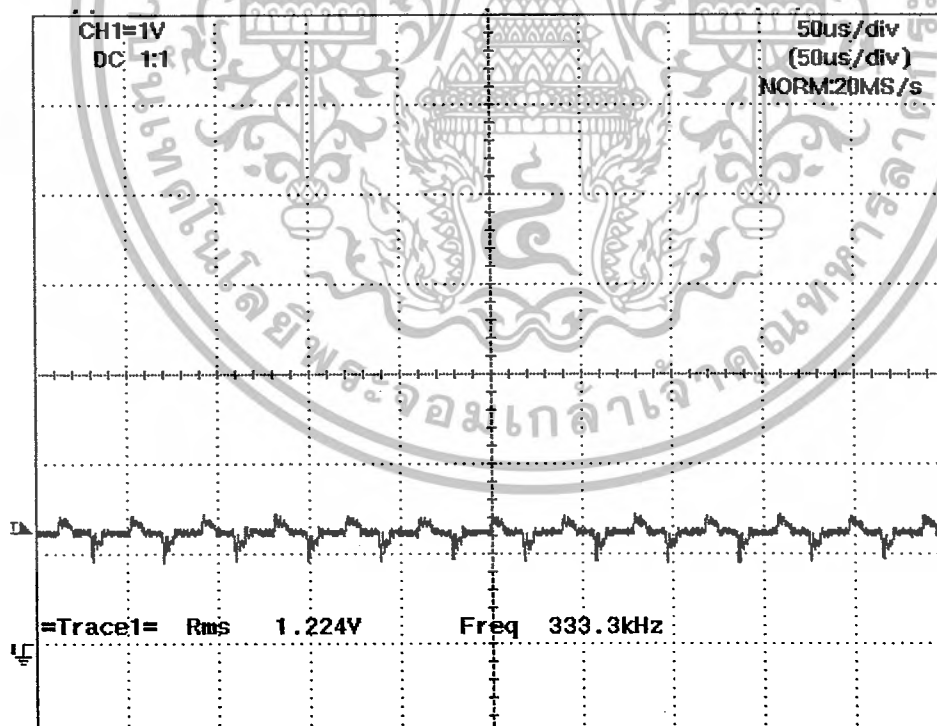
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนและเพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาและการวิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกจากวงจรอินสทรูเมนต์ปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การทดลองที่ 3 วัฏรูปสัญญาณที่ออกมาจากวงจรแปลงสัญญาณ

ในการทดลองนี้ได้ทำการต่อวงจรสมมูลค่าความจุ วงจรขยายอินพุตที่ปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยนำมาต่อรวมกันในที่นี้เรียกว่า “วงจรแปลงสัญญาณ” ทำการทดลองวัฏรูปสัญญาณที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณเพื่อดูว่าสัญญาณที่ออกมามีลักษณะเป็นเช่นไร สามารถที่จะนำไปใช้กับระบบควบคุมได้หรือไม่

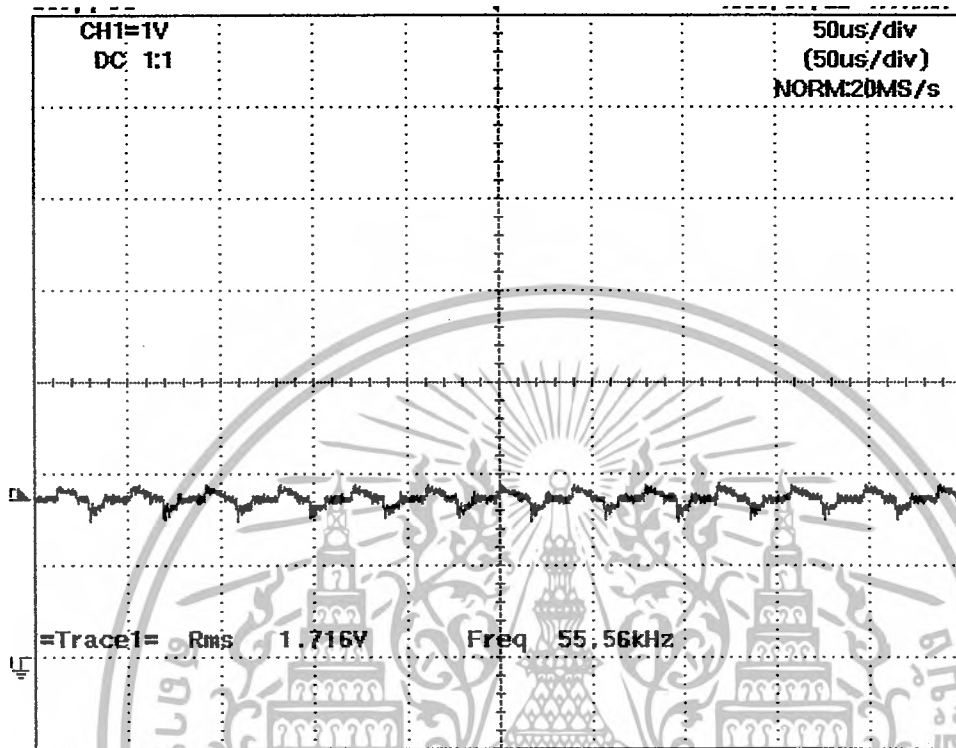
ขั้นตอนการทดลอง

- 1.ต่อวงจรแปลงสัญญาณ
- 2.ใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรแปลงสัญญาณ
- 3.บันทึกผลการทดลอง
- 4.ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3,4.4,4.5และ4.6

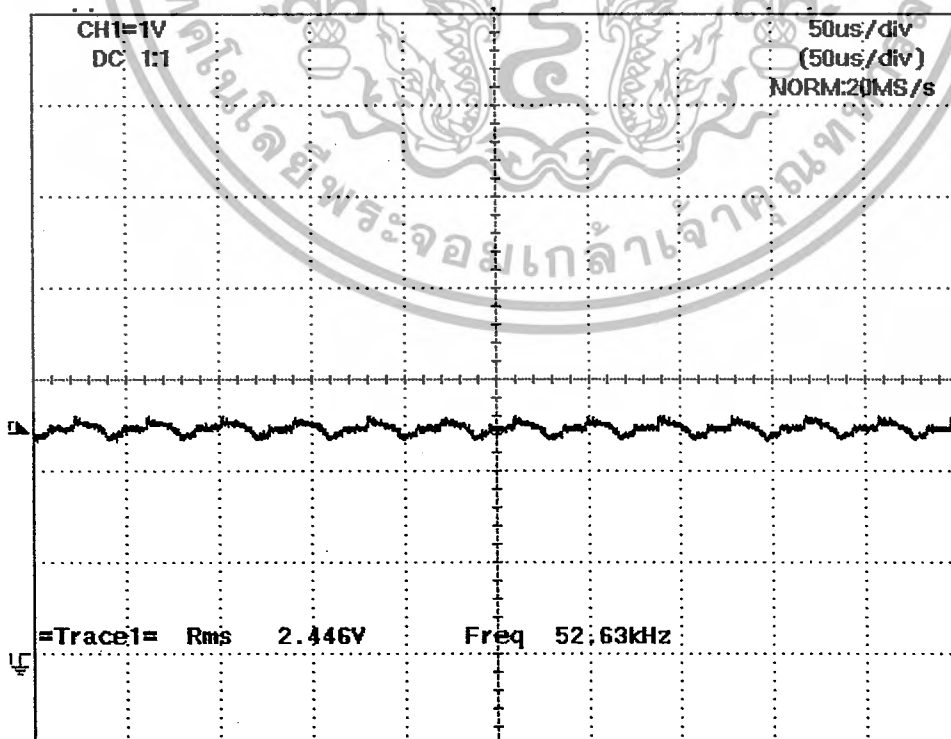


รูปที่ 4.3 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ระดับของเหลว 0 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

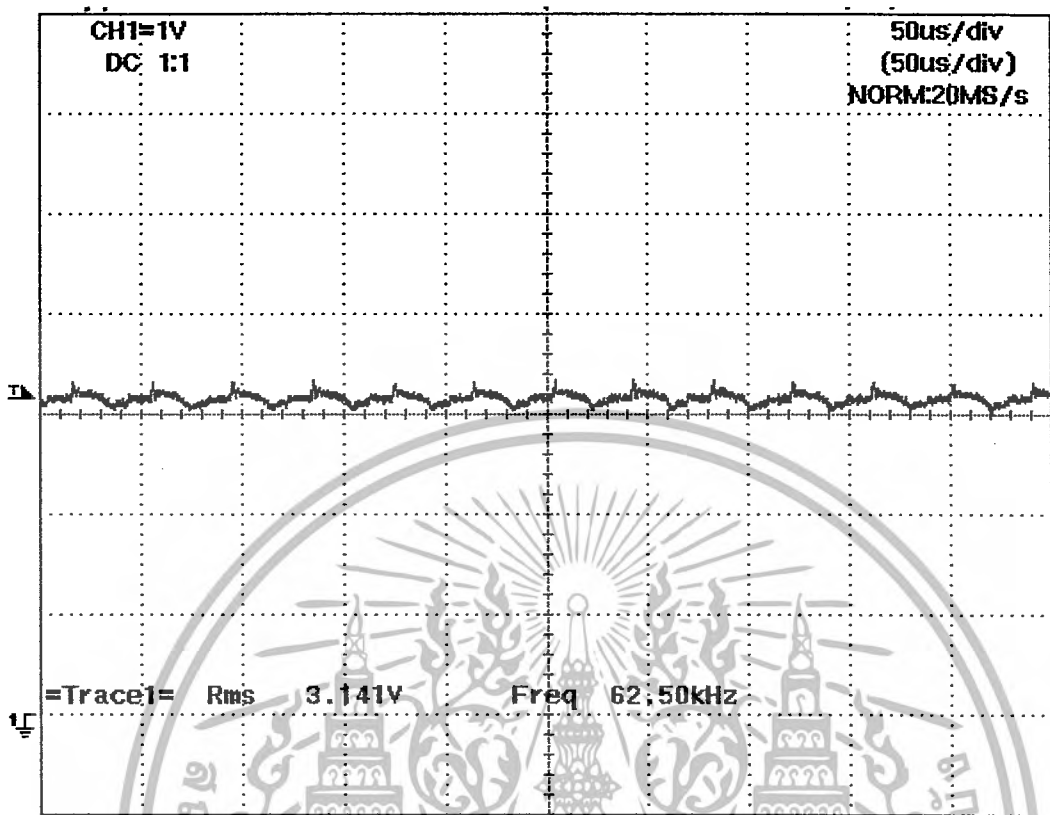


รูปที่ 4.4 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ระดับของเหลว 20 เปอร์เซ็นต์

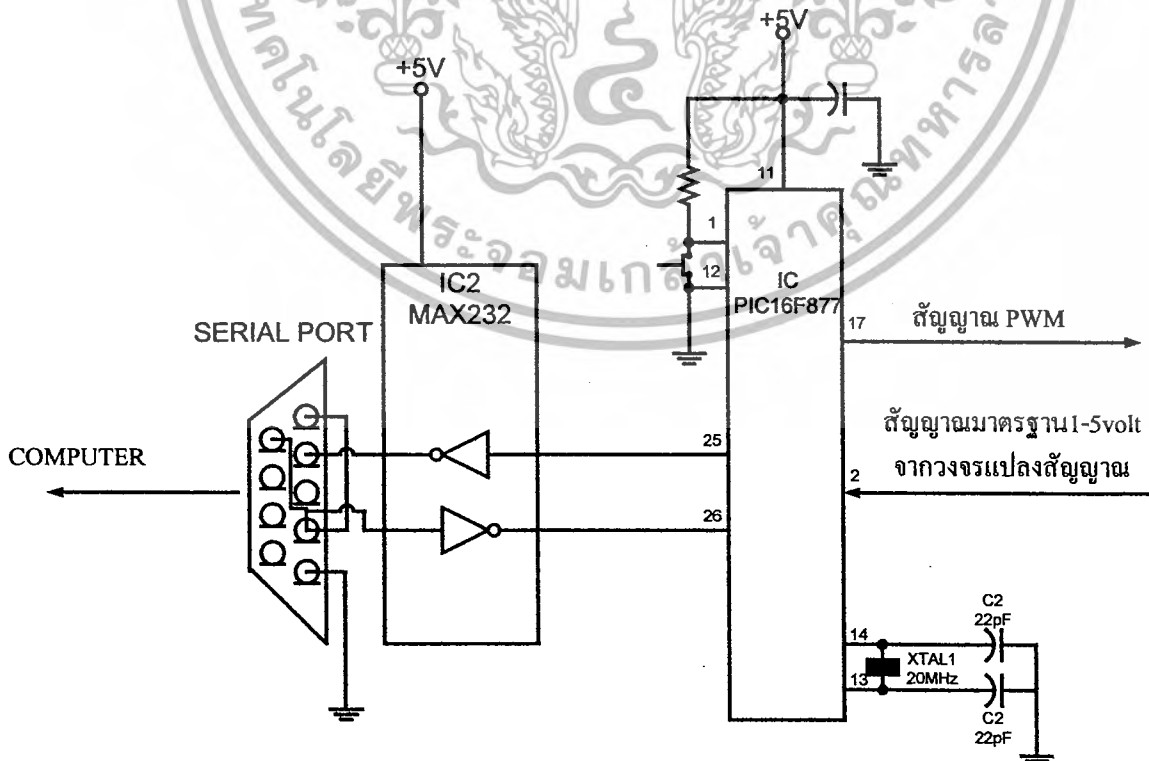


รูปที่ 4.5 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ระดับของเหลว 40 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงรูปสัญญาณแรงดันที่ระดับของเหลว 60 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 4.7 แสดงการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ภายใต้เงื่อนไขการดำเนินงานด้านการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำออกเผยแพร่ได้ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง

#### 4.4 การทดลองที่ 4 ควบคุมระดับของเหลวด้วยพีไอดีคอนโทรลเลอร์

ในการทดลองนี้ได้ทำการเชื่อมต่อวงจรแปลงสัญญาณเข้ากับวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเขียน โปรแกรมควบคุมและแสดงผลระดับของเหลวผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยทำการทดลอง ที่ระดับของเหลวต่างกันเพื่อดูความเที่ยงตรงและแม่นยำ

##### ขั้นตอนการทดลอง

1. เชื่อมต่อวงจรแปลงสัญญาณเข้ากับวงจร ไมโครคอนโทรลเลอร์
2. ป้อนค่าระดับของเหลวที่ต้องการภายในถัง
3. ป้อนค่าพารามิเตอร์ของระบบควบคุมพีไอดี
4. บันทึกผลการทดลองในตารางที่ 5
5. ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8, 4.9, 4.10 และ 4.11

ทดลองอ่านค่าและควบคุมของเหลวที่ระดับต่างๆ ( $K_p = 4, K_i = 0.004, K_d = 0$ )

SV =	.000000PV	=	9.437927pwm	=	0
SV =	.000000PV	=	8.826978pwm	=	0
SV =	.000000PV	=	8.949169pwm	=	0
SV =	.000000PV	=	9.071358pwm	=	0
SV =	.000000PV	=	6.871944pwm	=	0
SV =	.000000PV	=	7.727272pwm	=	0
SV =	.000000PV	=	15.791788pwm	=	0
SV =	.000000PV	=	14.569891pwm	=	0
SV =	.000000PV	=	12.614857pwm	=	0
SV =	.000000PV	=	12.248288pwm	=	0
SV =	.000000PV	=	9.437927pwm	=	0
SV =	.000000PV	=	15.303029pwm	=	0

รูปที่ 4.8 แสดงค่าที่อ่านได้เมื่อค่า setpoint เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์

SV = 19.999999PV = 18.968719pwm = 51
SV = 19.999999PV = 18.357770pwm = 75
SV = 19.999999PV = 20.801563pwm = 0
SV = 19.999999PV = 19.335288pwm = 36
SV = 19.999999PV = 19.946235pwm = 11
SV = 19.999999PV = 19.213098pwm = 41
SV = 19.999999PV = 24.345063pwm = 0
SV = 19.999999PV = 19.946235pwm = 11
SV = 19.999999PV = 23.856303pwm = 0
SV = 19.999999PV = 19.579667pwm = 26
SV = 19.999999PV = 25.444770pwm = 0
SV = 19.999999PV = 21.168132pwm = 0

รูปที่ 4.9 แสดงค่าที่อ่านได้เมื่อค่า setpoint เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์

SV = 39.999999PV = 43.773216pwm = 0
SV = 39.999999PV = 40.351905pwm = 2
SV = 39.999999PV = 37.174975pwm = 129
SV = 39.999999PV = 39.985336pwm = 17
SV = 39.999999PV = 44.872924pwm = 0
SV = 39.999999PV = 39.740958pwm = 27
SV = 39.999999PV = 38.152492pwm = 90
SV = 39.999999PV = 40.718474pwm = 0
SV = 39.999999PV = 41.451614pwm = 0
SV = 39.999999PV = 39.863147pwm = 22
SV = 39.999999PV = 42.062560pwm = 0
SV = 39.999999PV = 38.763442pwm = 66

รูปที่ 4.10 แสดงค่าที่อ่านได้เมื่อค่า setpoint เท่ากับ 40 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

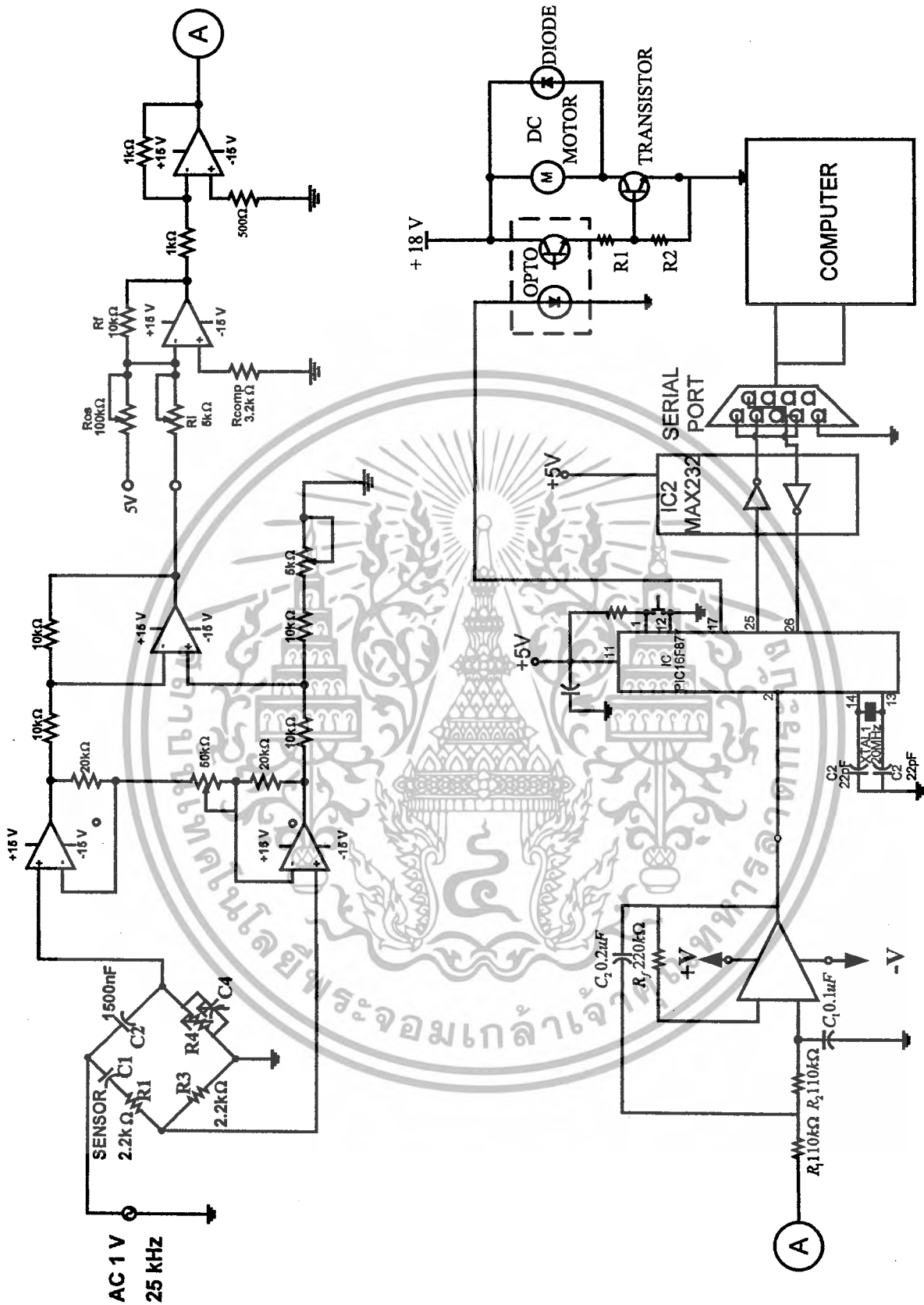
SV = 59.999999PV = 64.056701pwm = 0  
 SV = 59.999999PV = 59.413493pwm = 35  
 SV = 59.999999PV = 64.423270pwm = 0  
 SV = 59.999999PV = 54.892474pwm = 216  
 SV = 59.999999PV = 56.358752pwm = 157  
 SV = 59.999999PV = 59.780063pwm = 20  
 SV = 59.999999PV = 66.867064pwm = 0  
 SV = 59.999999PV = 63.445750pwm = 0  
 SV = 59.999999PV = 65.767356pwm = 0  
 SV = 59.999999PV = 60.268821pwm = 0  
 SV = 59.999999PV = 60.146632pwm = 5  
 SV = 59.999999PV = 58.802543pwm = 59

รูปที่ 4.11 แสดงค่าที่อ่านได้เมื่อค่า setpoint เท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์

ค่าระดับของเหลวที่ต้องการ (%)	ค่าระดับของเหลวจริง (%)	ค่าระดับของเหลวที่อ่านได้ (%)
0	0	0
20	20	20
40	38	40
60	55	59
80	70	79
100	88	98

ตารางที่ 5 แสดงค่าระดับของเหลวที่อ่านได้กับระดับของเหลวจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงระบบการวัดและควบคุมระดับของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

**การทดลองที่ 1** จากผลการทดลองจะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากวงจรสมมูลค่าความจุมีการเปลี่ยนแปลงตามระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไป โดยค่าระดับแรงดันไฟฟ้าที่ออกมามีค่าน้อย จากกราฟการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าจะพบว่า แรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นในช่วงระดับของเหลว 0 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ตั้งแต่ช่วง 60 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไปเซนเซอร์จะมีผลตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงระดับของเหลวแบบไม่เป็นเชิงเส้น

**การทดลองที่ 2** เป็นการนำแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรสมมูลค่าความจุ ทำการขยายแรงดันกับปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์ เพื่อจะนำค่าแรงดันไปใช้ในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์ จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ผ่านวงจรขยายอินสทรูเมนต์แล้วมีค่าที่เพิ่มมากขึ้น แต่ค่าแรงดันไฟฟ้ายังคงมีความเป็นเชิงเส้นในช่วง 0 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ถึงแม้ว่าจะทำการปรับด้วยวงจรปรับค่าความชันและตำแหน่งศูนย์แล้วก็ตาม

**การทดลองที่ 3** จากผลการทดลองรูปที่ 4.3-4.6 จะเห็นว่า แรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากวงจรแปลงสัญญาณนั้น มีรูปสัญญาณที่ไม่เรียบ เพราะมีแรงดันระลอกคลื่นปนอยู่ด้วย ถึงแม้ว่าจะทำการลดทอนแรงดันระลอกคลื่นด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแล้วก็ตาม

**การทดลองที่ 4** จากผลการทดลองรูปที่ 4.8-4.11 จะเห็นว่า ค่าระดับของเหลวที่อ่านได้จะมีค่าแกว่ง เนื่องจากผลของรูปสัญญาณที่มีแรงดันระลอกคลื่นปนอยู่ด้วยทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านค่าสัญญาณอนาล็อกของแรงดันระลอกคลื่นเข้าไปประมวลด้วย

ทำการวัดและควบคุมระดับของเหลวด้วย PID Controller ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถอ่านค่าระดับของเหลวและควบคุมระดับของเหลวได้ จากตารางที่ 5 จะเห็นว่า ค่าระดับของเหลวที่อ่านได้ซึ่งแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์จะมีค่าความผิดพลาดมากขึ้นเมื่อระดับของเหลวมีระดับที่สูงขึ้น สาเหตุเนื่องมาจากเซนเซอร์มีผลตอบสนองที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว

## ภาคผนวก ก

### ข้อมูลไอซีต่างๆ



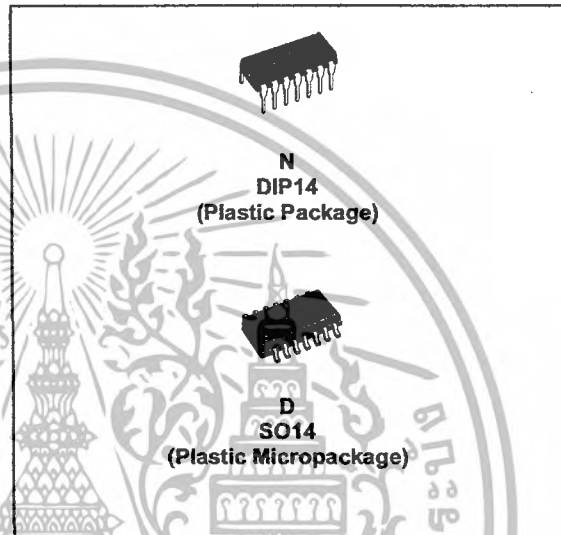
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# TL074 TL074A - TL074B

## LOW NOISE J-FET QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE COMMON-MODE (UP TO  $V_{CC}^+$ ) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- LOW NOISE  $e_n = 15\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  (typ)
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- LOW HARMONIC DISTORTION : 0.01% (typ)
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE :  $13\text{V}/\mu\text{s}$  (typ)



### DESCRIPTION

The TL074, TL074A and TL074B are high speed J-FET input quad operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

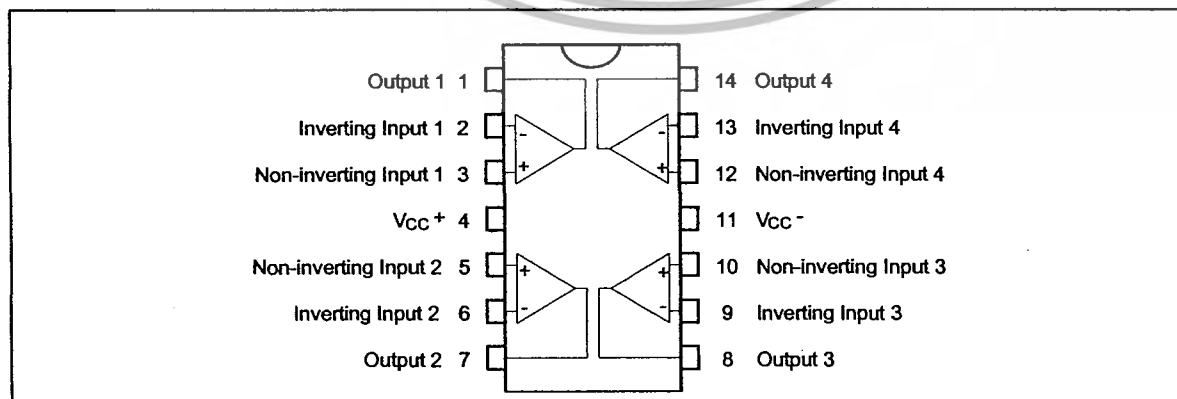
### ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
TL074M/AM/BM	-55°C, +125°C	•	•
TL074I/AI/BI	-40°C, +105°C	•	•
TL074C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•

Example : TL074IN

N = Dual In Line Package (DIP)  
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)

### PIN CONNECTIONS (top view)



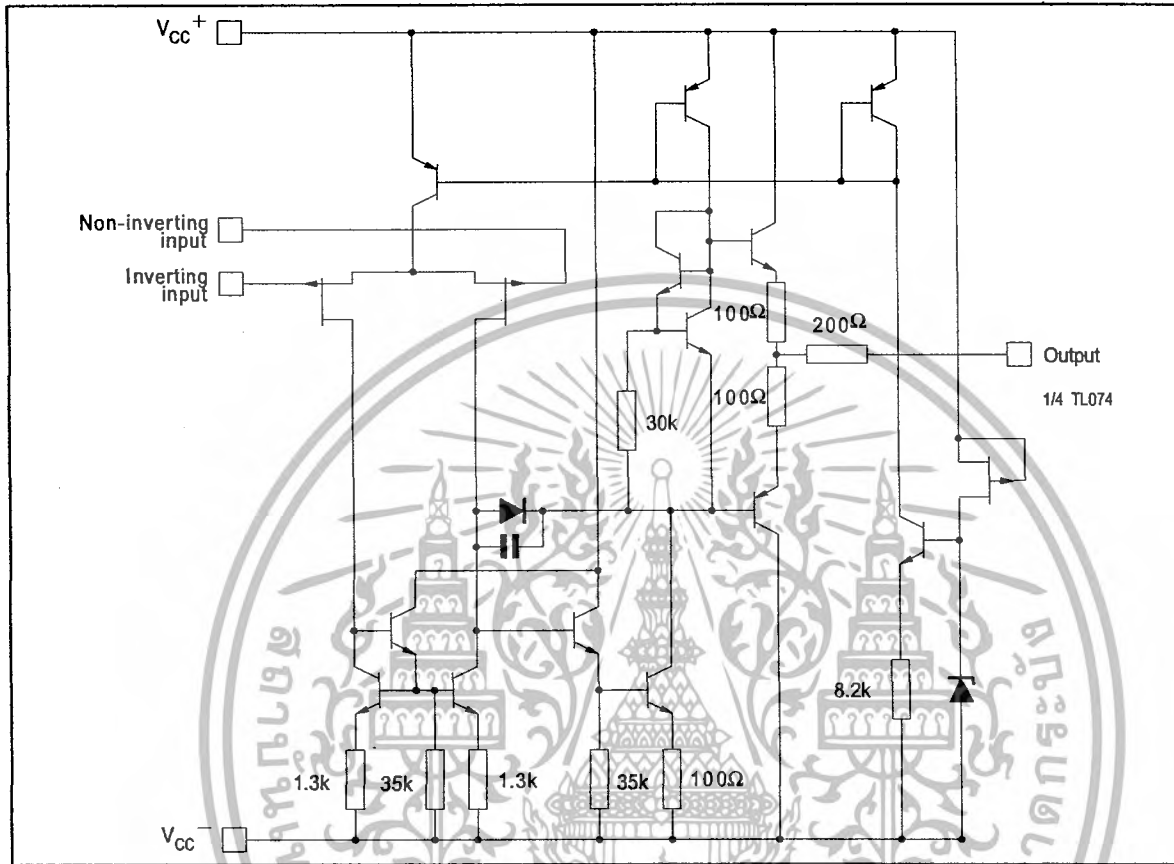
March 2001

1/11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TL074- TL074A - TL074B**

**SCHEMATIC DIAGRAM**



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Symbol	Parameter	TL074M, AM, BM	TL074I, AI, BI	TL074C, AC, BC	Unit
$V_{CC}$	Supply voltage - note 1)		$\pm 18$		V
$V_I$	Input Voltage - note 2)		$\pm 15$		V
$V_{id}$	Differential Input Voltage - note 3)		$\pm 30$		V
$P_{tot}$	Power Dissipation		680		mW
	Output Short-circuit Duration - note 4)		Infinite		
$T_{oper}$	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	$^{\circ}C$
$T_{stg}$	Storage Temperature Range		-65 to +150		$^{\circ}C$

1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between  $V_{CC}^+$  and  $V_{CC}^-$ .
2. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
3. Differential voltages are the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

$V_{CC} = \pm 15V$ ,  $T_{amb} = +25^{\circ}C$  (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	TL074I,M,AC,AI,AM, BC,BI,BM			TL074C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
$V_{io}$	Input Offset Voltage ( $R_S = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	TL074	3	10		3	10	mV
		TL074A	3	6				
		TL074B	1	3				
		TL074		13			13	
		TL074A		7				
		TL074B		5				
$DV_{io}$	Input Offset Voltage Drift		10		10		$\mu V/^{\circ}C$	
$I_{io}$	Input Offset Current - note 1) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		5	100		5	100	pA nA
				4		10		
$I_{ib}$	Input Bias Current - note 1 $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		20	200		30	200	pA nA
				20		20		
$A_{vd}$	Large Signal Voltage Gain ( $R_L = 2k\Omega$ , $V_o = \pm 10V$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		50	200		25	200	V/mV
			25			15		
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_S = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		80	86		70	86	dB
			80			70		
$I_{CC}$	Supply Current, no load, per amplifier $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.4	2.5		1.4	2.5	mA
				2.5		2.5		
$V_{icm}$	Input Common Mode Voltage Range	$\pm 11$	+15 -12		$\pm 11$	+15 -12	V	
CMR	Common Mode Rejection Ratio ( $R_S = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		80	86		70	86	dB
			80			70		
$I_{os}$	Output Short-circuit Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	40		10	40	mA
			10	60		10	60	
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	$R_L = 2k\Omega$	10	12		10	12	V
		$R_L = 10k\Omega$	12	13.5		12	13.5	
		$R_L = 2k\Omega$	10			10		
		$R_L = 10k\Omega$	12			12		
SR	Slew Rate ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 10V$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity gain		8	13		8	13	V/ $\mu s$
$t_r$	Rise Time ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 20mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity gain			0.1			0.1	$\mu s$
$K_{ov}$	Overshoot ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 20mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity gain			10			10	%
GBP	Gain Bandwidth Product ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 10mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , $f = 100kHz$		2	3		2	3	MHz
$R_i$	Input Resistance			$10^{12}$			$10^{12}$	$\Omega$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

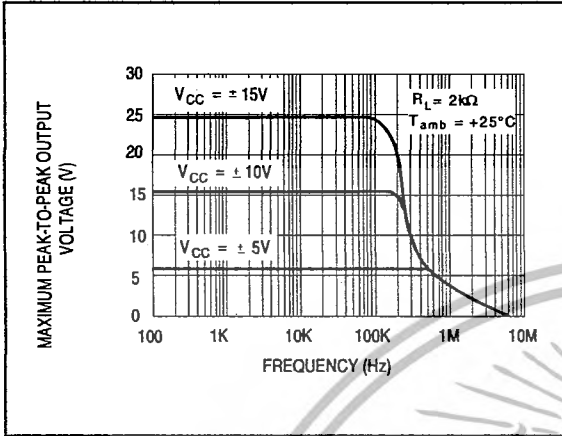
**TL074- TL074A - TL074B**

Symbol	Parameter	TL074I,M,AC,AI,AM, BC,BI,BM			TL074C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
THD	Total Harmonic Distortion ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $f = 1kHz, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF, A_v = 20dB,$ $V_o = 2V_{pp}$		0.01			0.01		%
$e_n$	Equivalent Input Noise Voltage $R_S = 100\Omega, f = 1KHz$		15			15		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
$\phi_m$	Phase Margin		45			45		degrees
$V_{o1}/V_{o2}$	Channel separation $A_v = 100$		120			120		dB

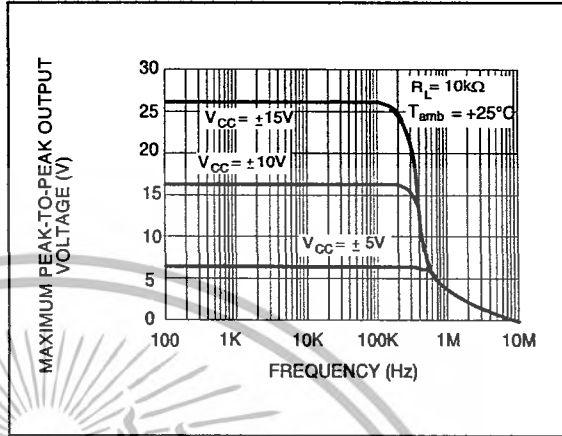
1. The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature.



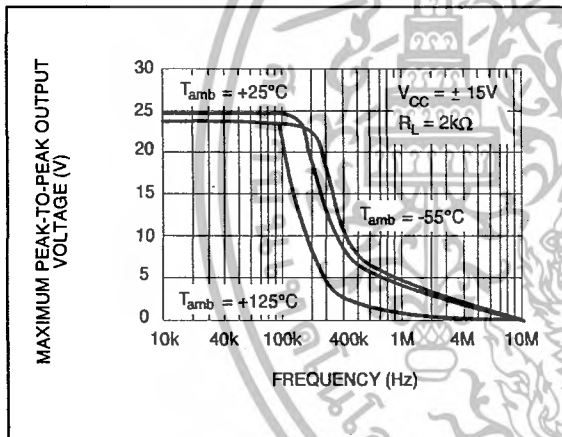
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREQUENCY**



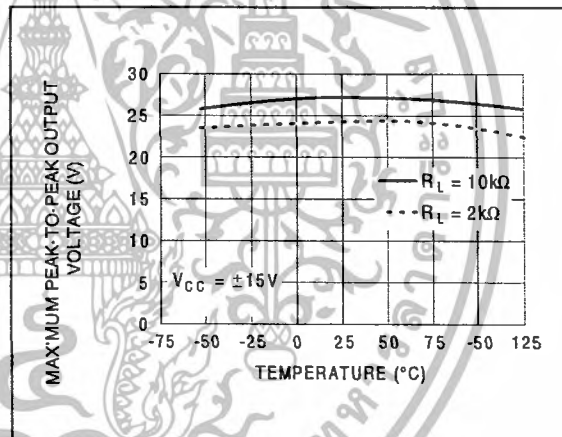
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREQUENCY**



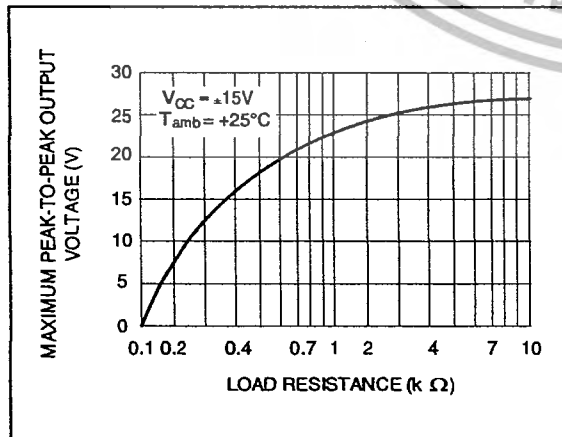
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREQUENCY**



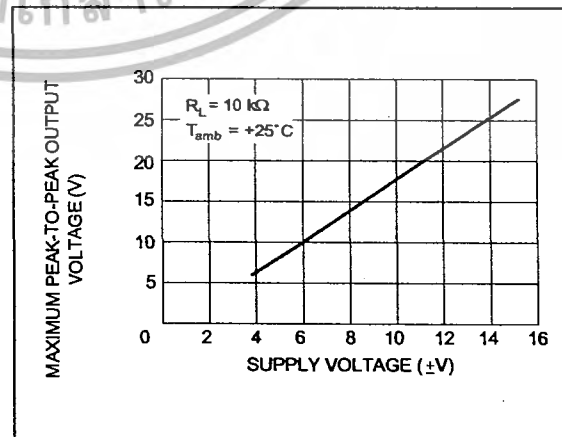
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREE AIR TEMP.**



**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus LOAD RESISTANCE**



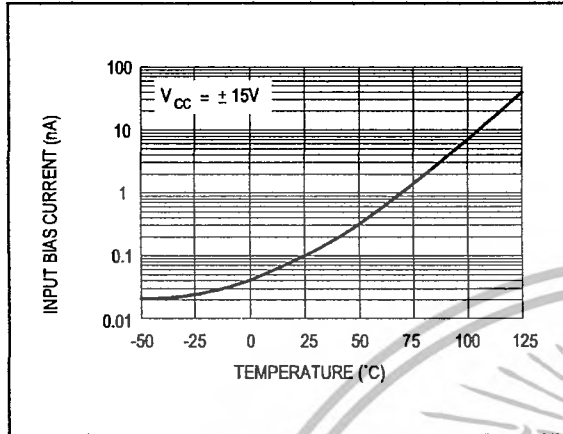
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus SUPPLY VOLTAGE**



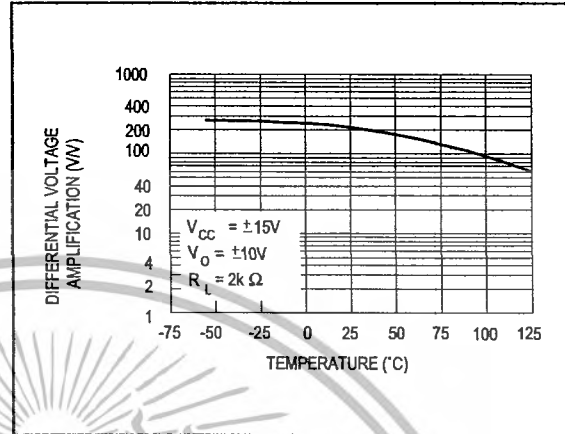
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**TL074- TL074A - TL074B**

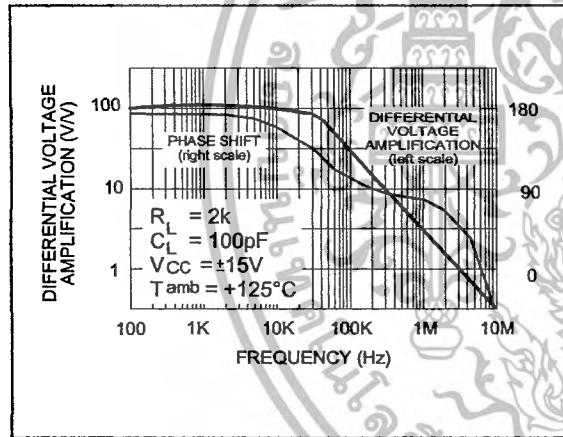
**INPUT BIAS CURRENT versus FREE AIR TEMPERATURE**



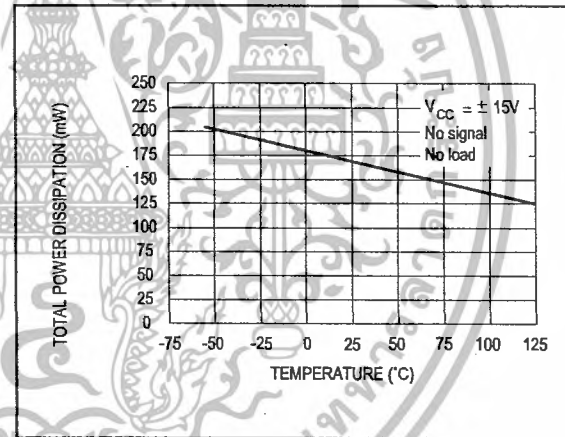
**LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION versus FREE AIR TEMP.**



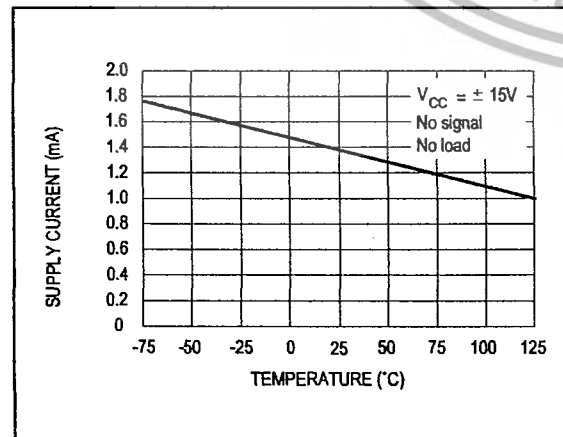
**LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION AND PHASE SHIFT versus FREQUENCY**



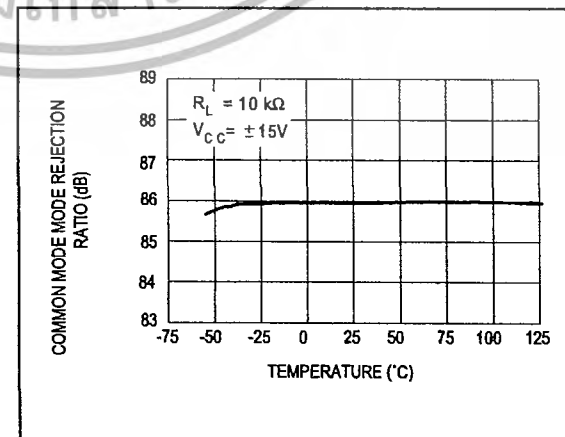
**TOTAL POWER DISSIPATION versus FREE AIR TEMPERATURE**



**SUPPLY CURRENT PER AMPLIFIER versus FREE AIR TEMPERATURE**

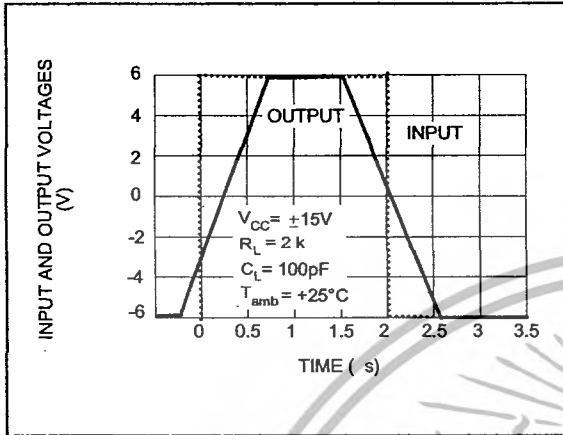


**COMMON MODE REJECTION RATIO versus FREE AIR TEMPERATURE**

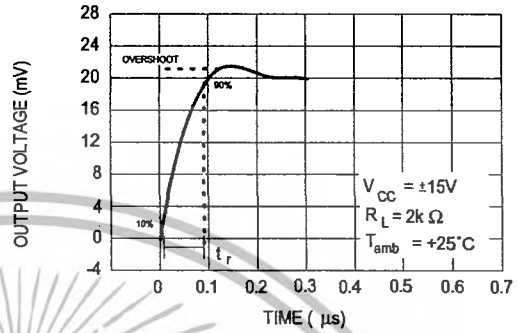


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

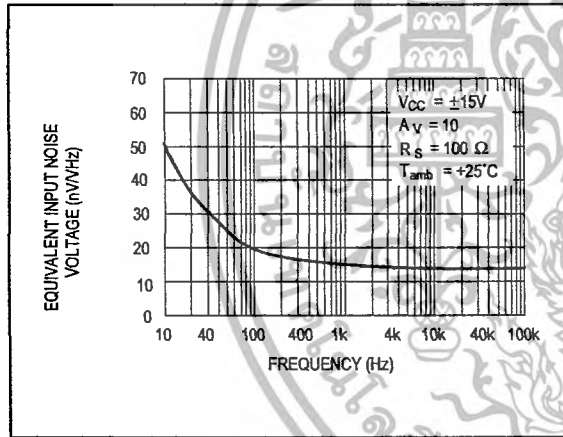
**VOLTAGE FOLLOWER LARGE SIGNAL PULSE RESPONSE**



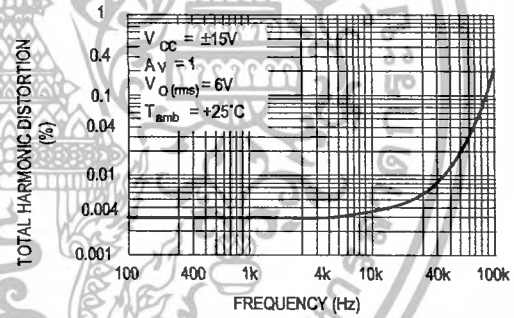
**OUTPUT VOLTAGE versus ELAPSED TIME**



**EQUIVALENT INPUT NOISE VOLTAGE versus FREQUENCY**



**TOTAL HARMONIC DISTORTION versus FREQUENCY**



PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION

Figure 1 : Voltage Follower

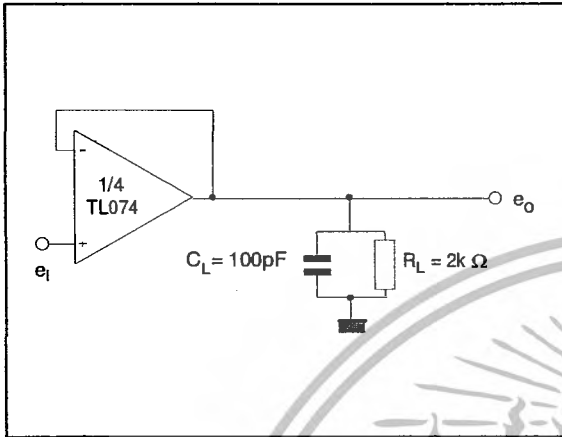
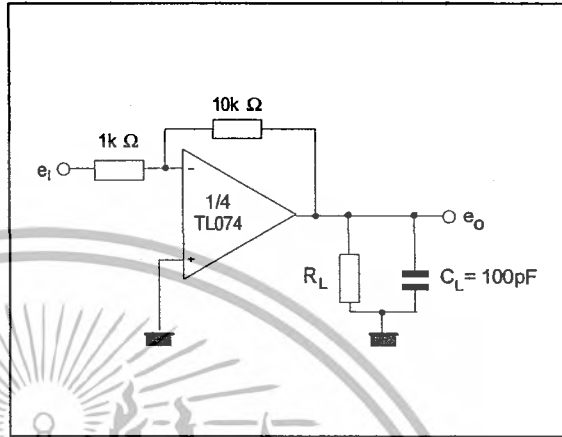
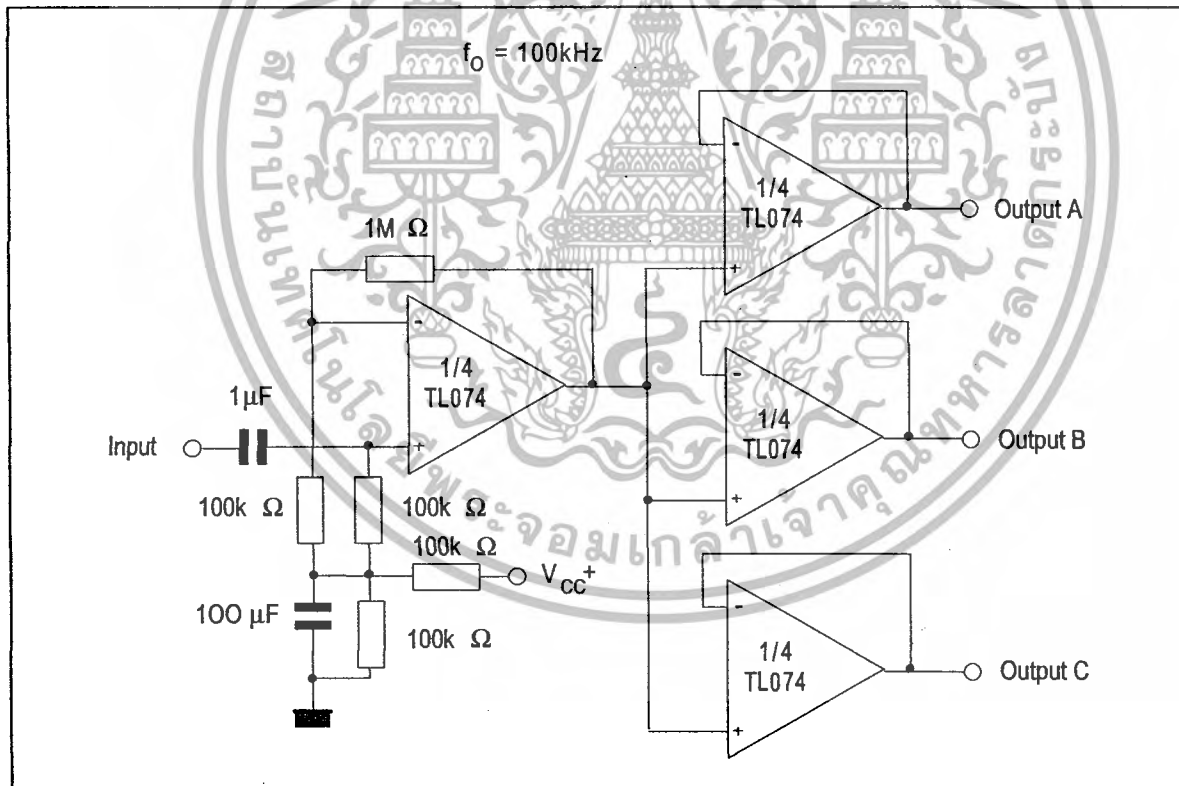


Figure 2 : Gain-of-10 Inverting Amplifier

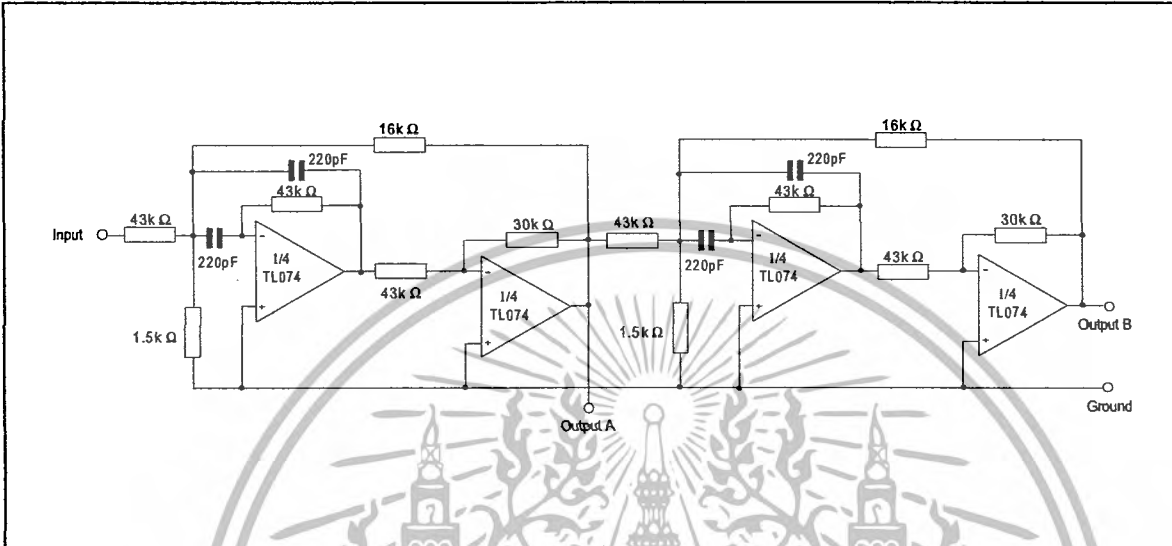


TYPICAL APPLICATIONS  
AUDIO DISTRIBUTION AMPLIFIER

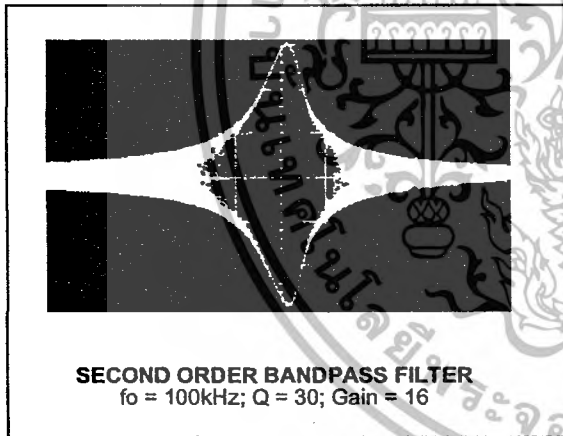


TYPICAL APPLICATIONS (continued)

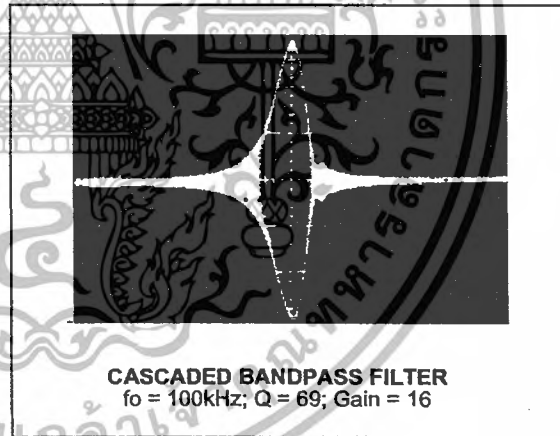
POSITIVE FEEDBACK BANDPASS FILTER



OUTPUT A



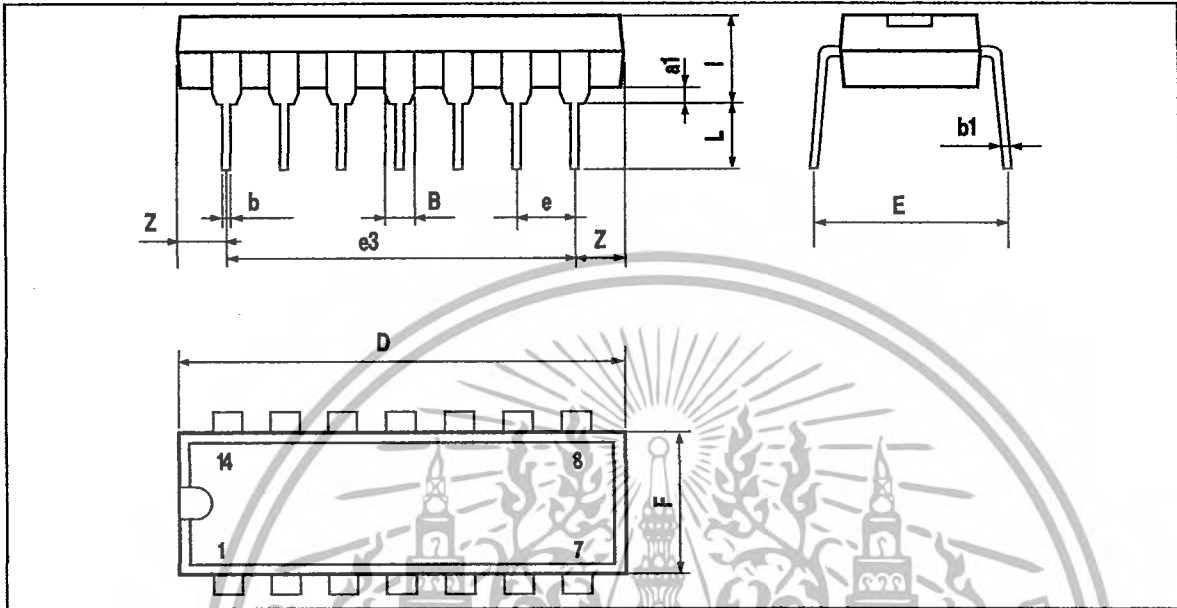
OUTPUT B



**TL074- TL074A - TL074B**

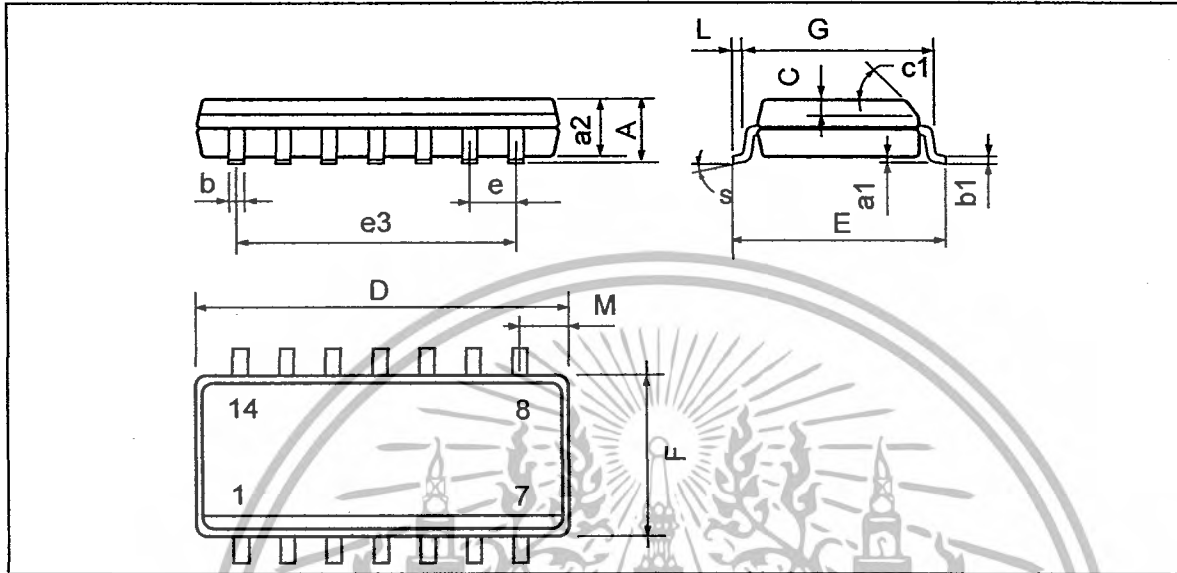
**PACKAGE MECHANICAL DATA**

14 PINS - PLASTIC DIP



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
a1	0.51			0.020		
B	1.39		1.65	0.055		0.065
b		0.5			0.020	
b1		0.25			0.010	
D			20			0.787
E		8.5			0.335	
e		2.54			0.100	
e3		15.24			0.600	
F			7.1			0.280
i			5.1			0.201
L		3.3			0.130	
Z	1.27		2.54	0.050		0.100

**PACKAGE MECHANICAL DATA**  
**14 PINS - PLASTIC MICROPACKAGE (SO)**



Dim.	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.75			0.069
a1	0.1		0.2	0.004		0.008
a2			1.6			0.063
b	0.35		0.46	0.014		0.018
b1	0.19		0.25	0.007		0.010
C		0.5			0.020	
c1			45° (typ.)			
D (1)	8.55		8.75	0.336		0.344
E	5.8		6.2	0.228		0.244
e		1.27			0.050	
e3		7.62			0.300	
F (1)	3.8		4.0	0.150		0.157
G	4.6		5.3	0.181		0.208
L	0.5		1.27	0.020		0.050
M			0.68			0.027
S			8° (max.)			

Note : (1) D and F do not include mold flash or protrusions - Mold flash or protrusions shall not exceed 0.15mm (.066 inc) ONLY FOR DATA BOOK.

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

© The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics

© 2001 STMicroelectronics - Printed in Italy - All Rights Reserved  
**STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES**

Australia - Brazil - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Italy - Japan - Malaysia - Malta - Morocco  
 Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom  
 © <http://www.st.com>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

## โปรแกรม PID CONTROLLER



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
/******
```

```
* File : PID.c
```

```
* Purpose : RS232 I/O Control
```

```
* Release : PCW Compiler 3.180
```

```
*****/
```

```
#include <16F877.h> // Standard Header file for the PIC16F877 device
```

```
#define TxD PIN_C6 // Define Transmitted Data
```

```
#define RxD PIN_C7 // Define Received Data
```

```
#define CLOCK_SP 2000000 // Clock Speed(Hz)
```

```
// Device Specification
```

```
#fuses HS // Oscillator mode HS
```

```
#fuses NOLVP, NOWDT // No Low Voltage Program, No Watchdog timer
```

```
#fuses NOPROTECT // Code no protection
```

```
#device ADC=10 // ADC 10 Bit
```

```
#use delay (clock=CLOCK_SP) // Use built-in function: delay_ms() & delay_us()
```

```
#use rs232(baud=9600, xmit=TxD,rcv=RxD) // Use serial I/O port (RS232)
```

```
#priority TIMER1,RDA
```

```
#byte portb = 6
```

```
#include <math.h>
```

```
#include <stdlib.h>
```

```
#include "input.c"
```

```
/******
```

```
* Global variables
```

```
*****/
```

```
int16 value,overflow; // Bit ADC
```

```
int8 manual,aorm;
```

```
float PV,SV,P,I,D,Kp,Ki,Kd,SumPID,Error1,Error2,Out,z; //Calculate Equ PID
```

```
long Pwm;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
char input1;
```

```
/******
```

```
* FUNCTION: RTCC Interrupt function
```

```
* DESCRIPTION:
```

```
* PARAMETERS: nothing
```

```
* RETURNED: nothing
```

```
*****/
```

```
#INT_TIMER1
```

```
void InfTMR1_isr(void)
```

```
{
```

```
    overflow++;
```

```
}
```

```
/******
```

```
* FUNCTION: RS232 Interrupt function
```

```
* DESCRIPTION:
```

```
* PARAMETERS: nothing
```

```
* RETURNED: nothing
```

```
*****/
```

```
#int_rda
```

```
void rs232_isr(void)
```

```
{
```

```
    input1 = getchar();
```

```
    if (input1 == 'a')
```

```
    {
```

```
        printf("\n\rsetpoint value:");
```

```
        SV = get_float();
```

```
        printf("\n\rproportionalgain value:");
```

```
        Kp = get_float();
```

```
        printf("\n\rintegral value:");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    Ki = get_float();

    printf("\n\nderivative value:");

    Kd = get_float();
}
if(input1 == 's')
{
    printf("\n\rsetpoint value:");
    SV = get_float();
}
}

/*****
* FUNCTION: Main
* DESCRIPTION: This is the main entry point for the program.
* PARAMETERS: nothing
* RETURNED: nothing
*****/
void main(void)
{
    set_tris_b(0x00);
    portb=0x00;
    enable_interrupts(GLOBAL);
    enable_interrupts(INT_TIMER1);
    enable_interrupts(INT_RDA);
    setup_timer_1(T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_4); // Timer1 Delay 2mS
    set_timer1(0);
    setup_port_a(ALL_ANALOG); // A0 A1 A2 A3 A5 E0 E1 E2 Ref=Vdd
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL); // Clock 20 MHz
    set_adc_channel(0); // Read Analog input RA0(channel=0)
    setup_ccp1(CCP_PWM); // Configure CCP1 as a PWM

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

setup_timer_2(T2_DIV_BY_1, 240, 1);
aorm=0; Kp=0; Ki=0; Kd=0;
P=0 ; I=0 ; D=0 ;
while(TRUE)
{
output_low(PIN_B1);
if (overflow > 3) // Condition Overflow>3 Becuase Timer = 0.2 Sec
{
overflow=0;
output_high(PIN_B1);
value = Read_ADC();
PV = (((value - 204.6) / 8.184)+10);

// Calculate Control Signal //
Error1 = SV - PV;
P = Kp * Error1;
I = Ki * (0.2 / 2) * (Error1 + Error2) + I;
D = Kd * ((Error1 - Error2) / (0.2));
SumPID = P + I + D;
Error2 = Error1;
Out = SumPID;

//Open Output Signal//
if (Kp==0 && Ki==0 && Kd==0)
{ Out = 0;}

// Protect Motor //
If (Out > 100)
{Out = 100;}

Else if (Out < 0)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
{Out = 0;}

// send data to pwm //
//Pwm = ((Out * 8.184) + 204.6);
Pwm = Out * (1024/100);
set_pwm1_duty(Pwm);
z = PV + 8;
printf("SV = %f",SV);
printf("PV = %f",PV);
printf("\pwm = %ld\r\n",Pwm);
}
}
}
```



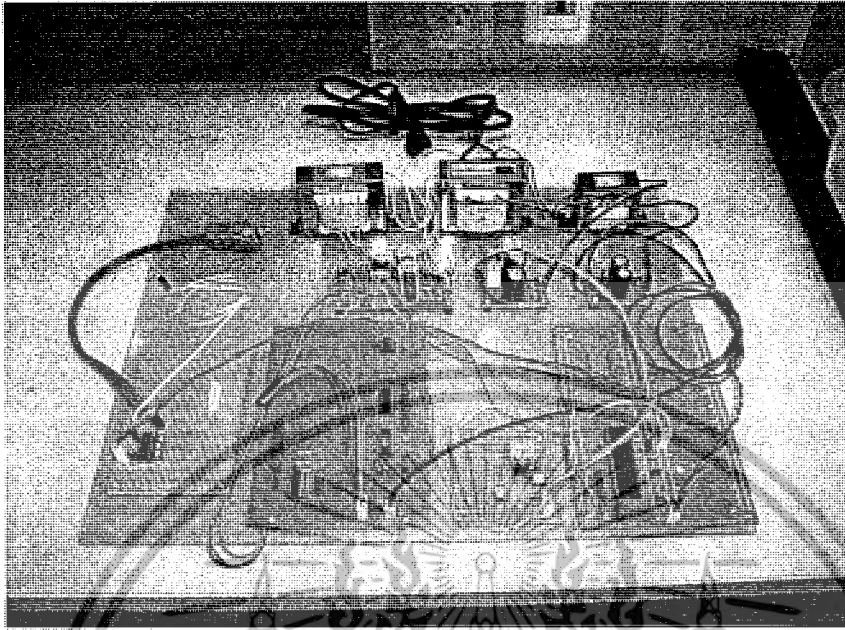
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

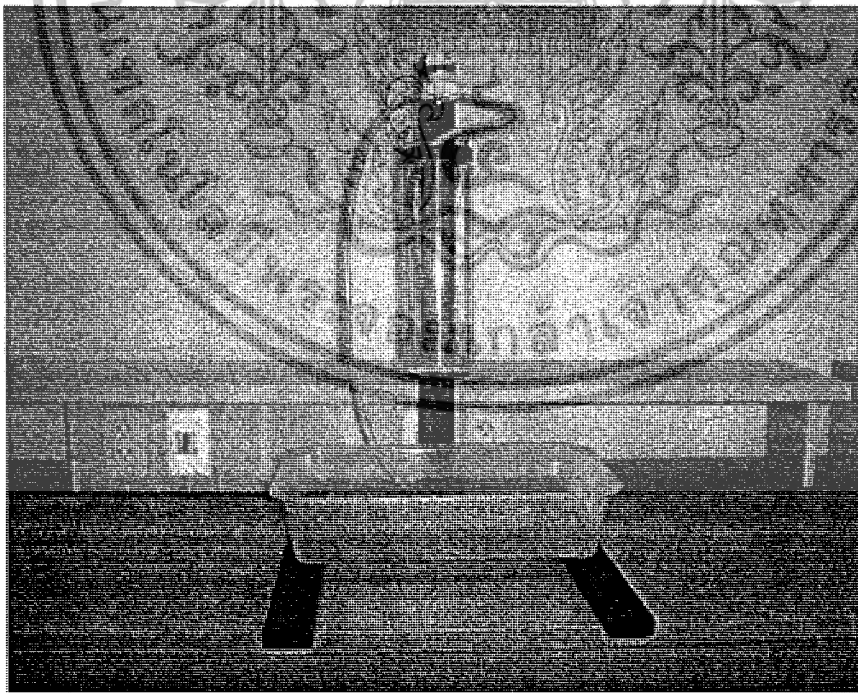
## ภาพถ่ายงานปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

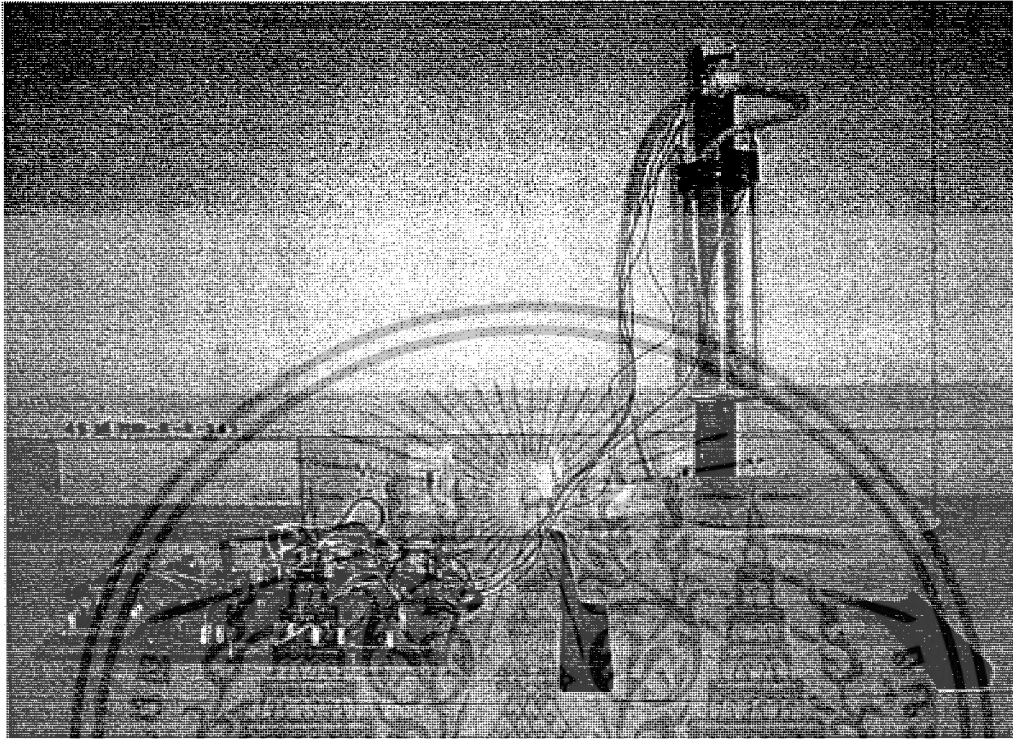


รูปที่ ค.1 รูปแสดงวงจรที่ประกอบสำเร็จแล้ว



รูปที่ ค.2 รูปแสดงถังบรรจุของเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ค.3 ภาพแสดงโครงงานทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.คงศักดิ์ อนันตหิรัญรัตน์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ ตลอดจนข้อคิดเห็นและแนวทางในการปฏิบัติงานและการแก้ไขปัญหาที่เป็นอุปสรรคต่างๆ เกี่ยวกับโครงการนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้เกี่ยวกับการทำงาน คุณสมบัติของอุปกรณ์ รวมทั้งการประยุกต์ในการใช้งานด้านต่างๆ ซึ่งช่วยให้ผู้จัดทำสามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้งานได้ และทำให้การจัดทำโครงการฉบับนี้ลุล่วงไปด้วยดี ผู้จัดทำโครงการฉบับนี้ขอระลึกถึงด้วยความ  
ขอบพระคุณยิ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. ประจัน พลังตันติกุล, “เรียนรู้และใช้งาน CCS C คอมไพเลอร์เขียนโปรแกรมภาษา C ความคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC”, บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์, กรุงเทพฯ
2. วรพงศ์ ตั้งศรีรัตน์, “ออปแอมป์และการประมวลผลสัญญาณอนาลอก”, กรุงเทพฯ ว.เพ็ชรสกุล, 2545
3. Larry K. Baxter, “Capacitive Sensors Design and Applications”, New York The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1997



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้