

# ปริญญาบัตร

เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ

AUTOMATIC WEIGHT AND HEIGHT SCALING MACHINE



เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 51861

วัน,เดือน,ปี- 3 ส.ค. 2547

|        |
|--------|
| b..... |
| i..... |

ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์

ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์วิศวกรรม

คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อ เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ  
Automatic Weight and Height Scaling Machine

ชื่อนักศึกษา 1. นายภาณุวัตร อนันต์แดง รหัสประจำตัว 45035393  
2. นายอภิรักษ์ รอดจินดา รหัสประจำตัว 45035413

หลักสูตร ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.กิตติพงศ์ มะโน  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์สุชิน อางหาญ

| คณะกรรมการสอบปริญญาโท           | ลายมือชื่อ |
|---------------------------------|------------|
| 1. ผศ.วิสุทธิ อธิพรธรรม         |            |
| 2. อาจารย์ไพบุลย์ พวงวงศ์ตระกูล |            |
| 3. ผศ.กิตติพงศ์ มะโน            |            |
| 4. อาจารย์สุชิน อางหาญ          |            |
| 5. อาจารย์อมรชัย ชัยชนะ         |            |

วัน/เดือน/ปีที่สอบ วันจันทร์ที่ 29 มีนาคม พ.ศ. 2547 เวลา 10.00 น.

สถานที่สอบ ห้อง ค.311 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.

ภาควิชารับรองแล้ว

ลงนาม.....

(ผศ.สุรสิทธิ์ ราตรี)



หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์วิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารลับสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น / ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
วันที่.....เดือน.....ปี.....  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ปริญญานิพนธ์

เรื่อง เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ

Automatic Weight And Height Scaling Machine

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โพลดเซตล์และคลื่นอัลตราโซนิคส์
2. เพื่อออกแบบเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ
3. เพื่อสร้างเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ
4. เพื่อทดลองการทำงานของเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ
5. เพื่อนำเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติไปใช้งาน

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ โพลดเซตล์และคลื่นอัลตราโซนิคส์ ระบบการชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูง
2. ได้รูปแบบและโครงสร้างของเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ
3. ได้ชุดต้นแบบเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ
4. ได้ผลการทดลองและประสิทธิภาพการใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ
5. ได้เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|                      |   |
|----------------------|---|
| ชื่อหัวข้อ           | เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ      |
| นักศึกษา             | นายภาณุวัตร อนันต์แดง<br>นายอภิรักษ์ รอดจินดา |
| อาจารย์ที่ปรึกษา     | ผศ.กิติพงษ์ มะโน                              |
| อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม | อาจารย์สุชิน อาจหาญ                           |
| หลักสูตร             | ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต                     |
| สาขาวิชา             | อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์                  |
| ปีการศึกษา           | 2546  |

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการสร้างเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ โดยใช้โพลีคาร์บอเนตในการชั่งน้ำหนักและใช้หลักการของคลื่นอัลตราโซนิกในการวัดส่วนสูง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้ในการประมวลผลเพื่อแสดงค่าผ่านทาง LED แบบเจ็ดส่วน เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัตินี้จะช่วยให้การชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงสามารถกระทำได้อย่างสะดวกขึ้นและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับองค์กร หน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน ได้เป็นอย่างดี

|                        |   |           |
|------------------------|---|-----------|
| <b>Thesis Title</b>    | Automatic Weight And Height Scaling Machine |           |
| <b>Students</b>        | Mr.Panuwat                                  | Anandang  |
|                        | Mr.Apinan                                   | Rodjindar |
| <b>Advisor</b>         | Asst.Prof.Kittipong                         | Mano      |
| <b>Co-Advisor</b>      | Mr.Suchin                                   | Adhan     |
| <b>Education Level</b> | Bachelor of Science in Industrial Education |           |
| <b>Program in</b>      | Electronics and Computer                    |           |
| <b>Academic Year</b>   | 2003  |           |

### ABSTRACT

The project is aimed to study and create an automatic weight and height scaling machine. The weight machine with microcontroller functions by picking up the weight which is composed of load cell. The cell include pre-amplifier circuit to increase signal. The proper signal was converted from analog to digital. The converted signal to the microcontroller. The height scaling machine operated by ultrasonic wave. Transducer wave was transmitted for distance calculation through both wave length and sound speed in the air.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ถูกล่วงไปได้ด้วยดีอันเนื่องมาจากความร่วมมือของสมาชิกภายในกลุ่มทุกท่าน ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์กิติพงศ์ มะโน และคณาจารย์ภาควิชาครุศาสตร์ศึกษาศาสตร์วิทยาลัยครูศรีนครินทร์ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์ รวมทั้งให้คำแนะนำ แนวความคิด ความรู้ต่างๆ แนวทางแก้ไขปัญหาในการจัดทำปริญญาานิพนธ์ ขอขอบคุณห้องสมุดคณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม และหอสมุดกลาง ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการค้นคว้าข้อมูลขอขอบคุณมิตรสหายชาวอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ห้อง 2 ทุกท่านที่คอยเป็นห่วงและให้กำลังใจที่ดีเสมอมา สุดท้ายนี้ ควรระลึกถึงอย่างยิ่งบิดาและมารดาที่เป็นผู้ให้ความสนับสนุนด้านการศึกษาและเป็นผู้ให้กำลังใจด้วยดีตลอดมา ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

| เรื่อง   | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย  | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ  | III  |
| สารบัญ   | IV   |
| สารบัญตาราง  | VI   |
| สารบัญรูป  | VII  |
| บทที่ 1 บทนำ   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ                                 | 1    |
| 1.2 ชี้ความสามารถของโครงการ                                | 1    |
| 1.3 เนื้อหาโดยสังเขป                                       | 1    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ                                    | 3    |
| 2.1 กล่าวนำ  | 3    |
| 2.2 ตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้า                       | 3    |
| 2.2.1 ชั้นส่วนรับน้ำหนัก                                   | 3    |
| 2.2.2 สเตรนเกจแบบค่าความต้านทาน                            | 13   |
| 2.3 การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล                 | 14   |
| 2.3.1 การแปลงสัญญาณแบบแรมป์                                | 14   |
| 2.3.2 การแปลงสัญญาณแบบขนาน                                 | 16   |
| 2.3.3 การแปลงสัญญาณแบบสโโลปคู่                             | 18   |
| 2.3.4 การแปลงสัญญาณแบบเคลด้าซิกม่า                         | 21   |
| 2.3.5 การแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้ง                         | 22   |
| 2.4 ตัวเปลี่ยนระยะทางเป็นสัญญาณพัลส์ด้วยคลื่นอัลตราโซนิคส์ | 24   |
| 2.4.1 คลื่น  | 24   |
| 2.4.2 คลื่นเสียง   | 25   |
| 2.4.3 คลื่นอัลตราโซนิคส์                                   | 28   |
| 2.4.4 ความแรงและคลื่นกำลังของอัลตราโซนิคส์                 | 30   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

| เรื่อง  | หน้า |
|---|------|
| 2.4.5 อัลตราโซนิคส์ ทรานสดิวเซอร์                         | 32   |
| 2.4.6 คุณสมบัติทั่วไปของทรานสดิวเซอร์                     | 34   |
| 2.4.7 คุณสมบัติความถี่ของทรานสดิวเซอร์                    | 34   |
| 2.4.8 เปียโซทรานสดิวเซอร์                                 | 35   |
| 2.4.9 ผลของเปียโซอิเล็กทริก                               | 35   |
| 2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51                        | 36   |
| 2.5.1 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51          | 36   |
| 2.5.2 โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51     | 37   |
| 2.5.3 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51           | 39   |
| บทที่ 3 การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน                    | 40   |
| 3.1 กล่าวนำ   | 40   |
| 3.2 ตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้า                      | 41   |
| 3.3 ภาควิทยาสัญญาณ  | 41   |
| 3.4 ภาคแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล                | 42   |
| 3.5 ภาครับ-ส่งคลื่นอัลตราโซนิคส์                          | 43   |
| บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง                             | 45   |
| 4.1 การทดลองเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล                     | 45   |
| 4.1.1 การทดลองภาควิทยาสัญญาณ                              | 45   |
| 4.1.2 การทดลองภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล | 48   |
| 4.2 การทดลองเครื่องวัดส่วนสูง                             | 50   |
| 4.2.1 การทดลองภาครับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิคส์               | 50   |
| 4.2.2 การทดลองภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องวัดส่วนสูง         | 51   |
| บทที่ 5 บทสรุป  | 55   |
| 5.1 สรุป  | 55   |
| 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข                                   | 55   |
| 5.2 แนวทางการพัฒนา  | 56   |

### บรรณานุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

| เรื่อง  | หน้า |
|---|------|
| ภาคผนวก ก เครื่องต้นแบบ                           | 58   |
| ภาคผนวก ข วงจรและแผ่นวงจรพิมพ์                    | 61   |
| ภาคผนวก ค รายการอุปกรณ์                           | 77   |
| ภาคผนวก ง แผนผังการทำงานและรหัสต้นฉบับของ โปรแกรม | 83   |
| ภาคผนวก จ คู่มือการใช้งาน                         | 103  |
| ภาคผนวก ฉ รายละเอียดและคุณสมบัติอุปกรณ์           | 109  |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ค่าเอาต์พุตของออปแอมป์  | 18   |
| 2.2 การเปรียบเทียบความยาวคลื่น ความถี่และความเร็วของคลื่นที่มีค่าต่างกัน                        | 29   |
| 2.3 ค่าความเร็วและคุณสมบัติทางด้านอิมพีแดนซ์ของคลื่นอัลตราโซนิกส์ในตัวกลางที่เป็นแก๊สและของเหลว | 30   |
| 2.4 คุณสมบัติบางอย่างของสารเซรามิก  | 35   |
| 4.1 ผลแรงของคั้นไฟฟ้าเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณ  | 46   |
| 4.1 (ต่อ) ผลแรงของคั้นไฟฟ้าเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณ  | 47   |
| 4.2 ผลของค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากจากเครื่องชั่งอัตโนมัติ   | 50   |
| 4.3 ผลของค่าส่วนสูงที่อ่านได้จากจากเครื่องวัดส่วนสูง  | 54   |
| ค.1 รายการอุปกรณ์ของวงจรรวมเครื่องชั่งน้ำหนัก   | 78   |
| ค.2 รายการอุปกรณ์ของวงจรรับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์  | 79   |
| ค.2 (ต่อ) รายการอุปกรณ์ของวงจรรับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์  | 80   |
| ค.3 รายการอุปกรณ์ของวงจรควบคุมและแสดงผลเครื่องชั่งน้ำหนัก                                       | 80   |
| ค.4 รายการอุปกรณ์ของวงจรควบคุมและแสดงผลเครื่องวัดส่วนสูง  | 81   |
| ค.5 รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคจ่ายไฟ   | 81   |
| ค.5 (ต่อ) รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคจ่ายไฟ   | 82   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ชั้นส่วนรับน้ำหนักแบบแกน                                      | 5    |
| 2.2 ชั้นส่วนรับน้ำหนักแบบคาน                                      | 8    |
| 2.3 การต่อวงจรแบบแรมปี  | 15   |
| 2.4 กราฟการทำงานแบบแรมปี  | 16   |
| 2.5 การต่อวงจรแบบขนาน   | 17   |
| 2.6 การต่อวงจรแบบสโปลคู่  | 19   |
| 2.7 การต่อวงจรแบบเคลตต้าซิกม่า                                    | 21   |
| 2.8 การต่อวงจรแบบประมาณค่าหลายครั้ง                               | 22   |
| 2.9 กราฟการทำงานของวงจรแบบประมาณค่าหลายครั้ง                      | 24   |
| 2.10 ลักษณะการเกิดคลื่นยาว  | 24   |
| 2.11 ลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง                                    | 25   |
| 2.12 การรวมของคลื่นที่มีความถี่ต่างกันหรือเฟสต่างกัน              | 26   |
| 2.13 ลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง                                       | 27   |
| 2.14 ลักษณะของคลื่นเสียงผ่านช่องแคบๆ จนเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดใหม่  | 27   |
| 2.15 การหักเหของคลื่นเสียงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน        | 28   |
| 2.16 การหน่วงสัญญาณระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นอัลตราโซนิกส์ | 29   |
| 2.17 คุณสมบัติของสารเปียโซอิเล็กทริก                              | 34   |
| 2.18 โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51              | 37   |
| 2.19 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51                    | 39   |
| 3.1 แผนผังเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ                | 40   |
| 3.2 วงจรภาคขยายสัญญาณ   | 41   |
| 3.3 วงจรภาคแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล                    | 42   |
| 3.4 วงจรรวมเครื่องชั่งน้ำหนัก                                     | 43   |
| 3.5 วงจรรับและส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์                              | 44   |
| 4.1 วงจรภาคขยายสัญญาณ   | 45   |
| 4.2 วงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล               | 48   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.3 การประกอบวงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอลเข้ากับวงจรภาคขยายสัญญาณ      | 49   |
| 4.4 วงจรภาครับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิคส์   | 51   |
| 4.5 วงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องวัดส่วนสูง   | 52   |
| 4.6 ประกอบวงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องวัดส่วนสูงเข้ากับวงจรภาครับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิคส์ | 53   |
| ก.1 ด้านหน้าเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ                                      | 59   |
| ก.2 หน้าจอแสดงผล  | 59   |
| ก.3 แสดงการติดตั้งโหลดเซลล์   | 60   |
| ก.4 แสดงการติดตั้งชุดรับ-ส่งอัลตราโซนิคส์   | 60   |
| ข.1 วงจรรวมเครื่องชั่งน้ำหนัก   | 62   |
| ข.2 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรรวมเครื่องชั่งน้ำหนัก  | 62   |
| ข.3 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรรวมเครื่องชั่งน้ำหนัก (ด้านล่าง)                                     | 63   |
| ข.4 ตำแหน่งอุปกรณ์วงจรรวมเครื่องชั่งน้ำหนัก   | 63   |
| ข.5 วงจรรับ-ส่งอัลตราโซนิคส์  | 64   |
| ข.6 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรรับ-ส่งอัลตราโซนิคส์   | 64   |
| ข.7 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรรับ-ส่งอัลตราโซนิคส์ (ด้านล่าง)                                      | 65   |
| ข.8 ตำแหน่งอุปกรณ์วงจรรับ-ส่งอัลตราโซนิคส์  | 65   |
| ข.9 วงจรควบคุมเครื่องชั่งน้ำหนัก  | 66   |
| ข.10 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรควบคุมเครื่องชั่งน้ำหนัก  | 67   |
| ข.11 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรควบคุมเครื่องชั่งน้ำหนัก (ด้านล่าง)                                 | 68   |
| ข.12 ตำแหน่งอุปกรณ์วงจรควบคุมเครื่องชั่งน้ำหนัก   | 69   |
| ข.13 วงจรควบคุมเครื่องวัดส่วนสูง  | 70   |
| ข.14 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรควบคุมเครื่องวัดส่วนสูง   | 71   |
| ข.15 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรควบคุมเครื่องวัดส่วนสูง (ด้านล่าง)                                  | 72   |
| ข.16 ตำแหน่งอุปกรณ์วงจรควบคุมเครื่องวัดส่วนสูง  | 73   |
| ข.17 วงจรภาคจ่ายไฟ  | 73   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| ข.18 แผ่นวงจรพิมพ์ภาคจ่ายไฟ                            | 74   |
| ข.19 แผ่นวงจรพิมพ์ภาคจ่ายไฟ (ด้านล่าง)                 | 75   |
| ข.20 ตำแหน่งอุปกรณ์วงจรภาคจ่ายไฟ                       | 76   |
| ง.1 ผังงานหลักเครื่องชั่งน้ำหนัก                       | 84   |
| ง.2 ผังงานโปรแกรมเครื่องชั่งน้ำหนัก                    | 85   |
| ง.3 ผังงานหลักเครื่องวัดส่วนสูง                        | 86   |
| ง.4 ผังงานโปรแกรมเครื่องวัดส่วนสูง                     | 87   |
| จ.1 ส่วนประกอบเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ | 105  |
| จ. 2 รายละเอียดหน้าจอแสดงผล                            | 106  |
| จ. 3 ค่าเริ่มต้นก่อนการใช้งาน                          | 107  |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบัน เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ ยังต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ราคาแพง ทำให้เกิดการเสียดุลการค้ากับต่างประเทศ เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงที่ใช้อยู่ตาม ศูนย์ที่ออกกำลังกาย โรงเรียน ยังขาดความสะดวกในการชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงหน่วยที่ใช้ในการชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูง ยังมีแค่หน่วยกิโลกรัมและเซนติเมตร ซึ่งบางครั้งจำเป็นที่จะต้องใช้นหน่วยที่เป็นปอนด์ ในการชั่งน้ำหนัก และหน่วยเป็นฟุตในการวัดส่วนสูง จึงมีความจำเป็นที่จะต้องสร้างเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ ที่ครอบคลุมหลักการดังกล่าว

### 1.2 ขีดความสามารถของโครงการ

1. สามารถชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงในครั้งเดียวกัน
2. สามารถแสดงผลการชั่งน้ำหนักเป็นหน่วยกิโลกรัมและปอนด์ โดยใช้ 7 – Segment ขนาด 3.1 หลัก
3. สามารถแสดงผลการวัดส่วนสูงเป็นหน่วยเซนติเมตรและฟุต โดยใช้ 7 – Segment ขนาด 3.1 หลัก
4. สามารถชั่งน้ำหนักได้ระหว่าง 1 ถึง 150 กิโลกรัม
5. สามารถวัดส่วนสูงได้ระหว่าง 80 ถึง 180 เซนติเมตร
6. มีความละเอียดของการชั่งน้ำหนัก 100 กรัมและค่าความผิดพลาดของการชั่งน้ำหนักคิดเป็นร้อยละ 0.5
7. มีความละเอียดของการวัดส่วนสูง 10 มิลลิเมตรและค่าความผิดพลาดของ การวัดส่วนสูงคิดเป็นร้อยละ 0.5

### 1.3 เนื้อหาโดยสังเขป

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วยเนื้อหาส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปฏิญานิพนธ์ มีขีดความสามารถของโครงการ และเนื้อหาในบทต่างๆ โดยสังเขป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการของตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้าการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลตัวเปลี่ยนระยะทางเป็นสัญญาณพัลส์ด้วยคลื่นอัลตราโซนิคส์และการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง กล่าวถึงการสร้างชุดชั่งน้ำหนักชุดวัดส่วนสูงและชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง กล่าวถึงการทดลองและผลทดสอบของวงจรต่างๆที่ใช้ในชุดทดลอง ที่สร้างขึ้นว่ามีผลการทดลองการทำงานเป็นตามที่ออกแบบไว้ และทำการทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ

บทที่ 5 บทสรุปปัญหาแนวทางการแก้ไขและการพัฒนา เป็นการสรุปข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นกับเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ และการทำงานซึ่งรวมไปถึงด้านโปรแกรมด้วยอภิปรายถึงสาเหตุข้อบกพร่อง และแนวทางการแก้ไขและพัฒนาต่อไป

ภาคผนวก แสดงรายละเอียดของ โปรแกรม ชุดชั่งน้ำหนักชุดวัดส่วนสูงชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ และรายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้จัดทำโครงการดังต่อไปนี้

ภาคผนวก ก เครื่องต้นแบบ

ภาคผนวก ข แสดงรายละเอียดวงจรและแผ่นวงจรพิมพ์

ภาคผนวก ค รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละวงจร

ภาคผนวก ง ผังงานและโปรแกรม

ภาคผนวก จ คู่มือการใช้งาน

ภาคผนวก ฉ รายละเอียดและคุณสมบัติของอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับวงจรและอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำมาใช้ในปริญญานิพนธ์ เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ โดยมีทฤษฎีหลักที่สำคัญคือตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้า (Load Cell) การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและตัวเปลี่ยนระยะทางเป็นสัญญาณพัลส์ด้วยตราโซนิกส์

#### 2.2 ตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้า

ตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งต่อไปนี้จะขอเรียกว่า “โหลดเซลล์” เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำหนักของโหลดให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการทางกลศาสตร์และทางไฟฟ้า มาประยุกต์ใช้ร่วมกันกล่าวคือเมื่อน้ำหนักมากระทำต่อ โหลดเซลล์จะเกิดการยืดหรือหดตัวขึ้น ในเนื้อวัสดุตามลักษณะการกระทำของแรงดึงหรือแรงกดจากการยืดหรือหดตัวของวัสดุนี้จะทำให้เกิดความเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) ขึ้นในวัสดุซึ่งเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law) จากนั้นจะใช้สเตรนเกจซึ่งติดอยู่บนตัวรับน้ำหนักทำหน้าที่เปลี่ยนความเครียดในวัสดุให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเมื่อผ่านการขยายและปรับแต่งสัญญาณแล้วจะสามารถแสดงผลออกมาเป็นค่าน้ำหนักโดยตรงและที่สำคัญลักษณะข้อมูลที่อยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ายังง่ายต่อการนำไปใช้งานจากหลักการทำงานของโหลดเซลล์จะเห็นว่าโครงสร้างจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ

##### 2.2.1 ชั้นส่วนรับน้ำหนัก

ชั้นส่วนรับน้ำหนักทำหน้าที่รับน้ำหนักของโหลดที่มากระทำต่อโหลดเซลล์ซึ่งจะเกิดการยืดหรือหดตัวในเนื้อวัสดุทำให้เกิดความเค้นหรือความเครียดขึ้นโดยทั่วๆ ไปแล้วชั้นส่วนรับน้ำหนักต้องไม่มีการยืดหรือหดตัวอย่างถาวรขณะรับ โหลดจากกฎของฮุกจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างแรงหรือน้ำหนักที่มากระทำต่อชั้นส่วนรับน้ำหนักกับค่าความเครียดได้ซึ่งความสัมพันธ์ได้แสดงไว้ดังนี้

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F/A}{\Delta L/L} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $E$  คือ โมดูลัสความยืดหยุ่น (นิวตัน/มม.<sup>2</sup>)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิพนธ์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\sigma$  คือ ความเค้น (นิวตัน/มม.<sup>2</sup>)

$\epsilon$  คือ ความเครียด

$F$  คือ แรงที่กระทำ (นิวตัน)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก (มม.<sup>2</sup>)

$L$  คือ ความยาวเดิมของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก (มม.)

$\Delta L$  คือ ความยาวที่เปลี่ยนไปของชิ้นส่วนรับน้ำหนัก (มม.)

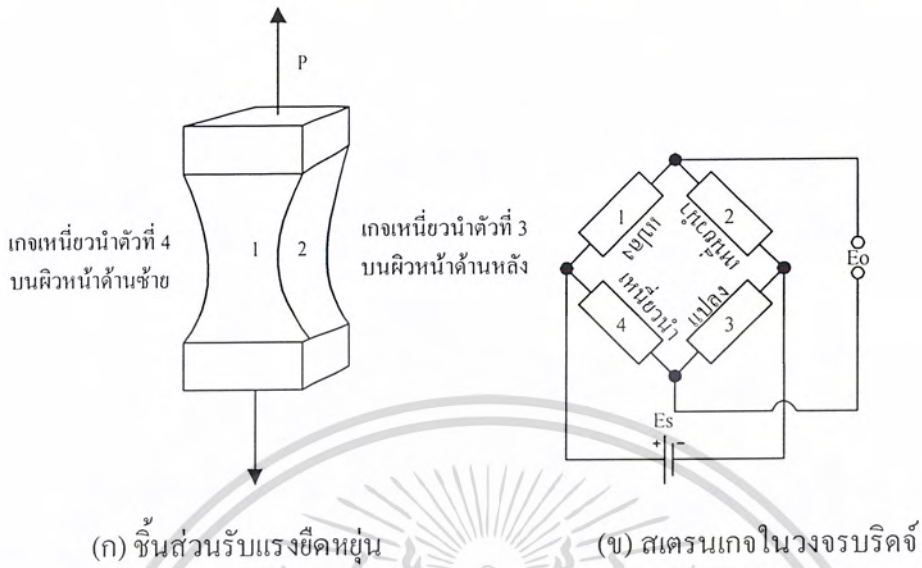
โดยการเลือกรูปปร่างและชนิดของวัสดุที่ใช้ทำชิ้นส่วนรับน้ำหนักให้เหมาะสมแล้วจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาดและแรงในลักษณะเชิงเส้นซึ่งวัสดุที่ใช้ควรมีคุณสมบัติดังนี้

- 1.) เมื่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงกว้างๆ
- 2.) เมื่อสเตรนฮิสเตอร์ (Strain Hyterresis) ต่ำเมื่อรับโหลดซ้ำๆ กัน
- 3.) เมื่อการเปลี่ยนแปลงของความเครียดต่อเวลาต่ำในขณะที่มีความเค้นคงที่.

การวัดแรง (Force Measurments) ตัวแปลงสัญญาณที่ใช้ในการวัดแรงบิดและแรงกดปกติจะประกอบด้วยชิ้นส่วนรับแรงยืดหยุ่นซึ่งจะแปรผันปริมาณ ไปเป็นการวัดการหักเหหรือความเครียดตัวตรวจจับการหักเหสเตรนเกจสามารถที่จะใช้ในการวัดปริมาณของผลที่วัดคุณลักษณะโดยทางอ้อมของตัวแปลงสัญญาณ เช่น ระยะ ภาวะเชิงเส้นและความไวซึ่งจะกำหนดโดยขนาดและตัวตรวจจับ (sensor) เป็นต้นวัสดุที่ใช้ทำเป็นชิ้นส่วนรับน้ำหนักมักจะใช้เหล็กคาร์บอนปานกลางผสม โครเมียมและ โมลิบดีนัมส่วนรูปร่างของชิ้นส่วนรับน้ำหนักที่นิยมใช้กันนั้นจะมีรูปร่างแตกต่างกันออกไปตามขนาดของโหลดที่ใช้รับน้ำหนักซึ่งมีลักษณะใหญ่ๆ ดังนี้

#### 1) แบบแกน

ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบแกนเดี่ยวพร้อมด้วยสเตรนเกจซึ่งจะแสดงในรูปที่ 2.1 น้ำหนักของโหลด (P) สามารถที่จะเป็นน้ำหนักดึงหรือน้ำหนักวัดซึ่งจะมีสเตรนเกจทั้งสี่ตัวติดอยู่กับแกน โดยจะมีสองตัวติดตรงกับแกนและอีกสองตัวจะติดตามขวางของแกนสเตรนเกจทั้งสี่ตัวเป็นขดลวดซึ่งจะอยู่ในวงจรมัดกระแสของสเตรนเกจตัวที่ 1 และตัวที่ 3 จะติดอยู่ตามแกนแขนของสเตรนเกจตัวที่ 2 และตัวที่ 4 จะติดอยู่ตามขวางดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบแกน

เมื่อน้ำหนักของโหลด (P) มากระทำกับแกนความเครียดในแกน ( $\epsilon_s$ ) และความเครียดตามขวาง ( $\epsilon_t$ ) จะมีความสัมพันธ์กับน้ำหนักคือ

$$\epsilon_s = \frac{P}{AE} \text{ และ } \epsilon_t = \frac{\nu P}{AE} \tag{2.2}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ตัดตามขวางของแกน

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของโลหะที่ใช้ทำแกน

$\nu$  คือ อัตราส่วนปัวซองของโลหะที่ใช้ทำแกน

ปฏิกิริยาตอบสนองของสเตรนเกจเมื่อน้ำหนักของโหลดมากระทำเท่ากับ

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = S_g \epsilon_s = \frac{S_g P}{AE} \tag{2.3}$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_4}{R_4} = S_g \epsilon_t = -\frac{\nu S_g P}{AE}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $E_o$  จากวงจรบริดจ์จะแสดงได้ในเทอมของน้ำหนักโหลด ( $P$ ) โดยแทนค่าในสมการที่ (2.3) ถ้าสมมุติให้ตัวสเตรนเกจทั้งสองตัวบนแกนมีค่าเหมือนกัน คือ  $R_1=R_2$  จะได้

$$E_o = \frac{S_g P(1+\nu)E_i}{2AE} \quad (2.4)$$

$$P = \frac{2AE}{S_g(1+\nu)E_i} E_o = CE_o \quad (2.5)$$

ซึ่งจะแสดงให้เห็นรูปของน้ำหนัก  $P$  เป็นสัดส่วนเชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $E_o$  และเป็นสัดส่วนที่คงที่หรือค่าคงที่การตรวจสอบ ( $C$ ) คือ

$$C = \frac{2AE}{S_g(1+\nu)E_i} \quad (2.6)$$

ความไวของวงจรบริดจ์จัดห้โดยให้  $S = E_o/P$  ฉะนั้น

$$S = \frac{E_o}{P} = \frac{1}{C} = \frac{S_g(1+\nu)E_i}{2AE} \quad (2.7)$$

ซึ่งจะแสดงถึงความไวของชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบแกนว่าขึ้นอยู่กับพื้นที่ภาคตัดขวางของแกน ( $A$ ) ค่าคงที่ความยืดหยุ่นของวัสดุที่ใช้ทำสเตรนเกจของแกน ( $E$  และ  $\nu$ ) สเตรนเกจจะใช้เช่นเดียวกับตัวรับ ( $S_g$ ) และแรงดันไฟฟ้าที่ใช้งานของแรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรบริดจ์ ( $E_i$ ) ระยะห่างของชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบแกนได้กำหนดโดยพื้นที่ตัวตั้งฉากกับแกนและความแข็งแรง  $S_f$  ของวัสดุที่ใช้ทำตัวสเตรนเกจ

$$P_{\max} = S_f A \quad (2.8)$$

อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าที่น้ำหนักสูงสุด ( $E_o/E_i$ )<sub>max</sub> สำหรับชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบแกนคือการแทนด้วยสมการที่ (2.8) ในสมการที่ (2.4) ดังนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{S_g S_f (1 + \nu)}{2E} \quad (2.9)$$

ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบแกนส่วนมากวัสดุที่จะนำมาทำสเตรนเกจจะใช้วัสดุ AISI 4340 ( $E = 30,000,000$  psi และ  $\nu = 0.3$ )  $S_f = 80,000$  psi เมื่อ  $S_g = 2$  สำหรับการใส่สเตรนเกจในชิ้นส่วนรับน้ำหนัก สมการ (2.9) แสดงได้คือ

$$\left(\frac{E_o}{E_i}\right)_{\max} = \frac{2(80,000)(1 + 0.3)}{2(30,000,000)} = 3.47 \quad \text{mV/V}$$

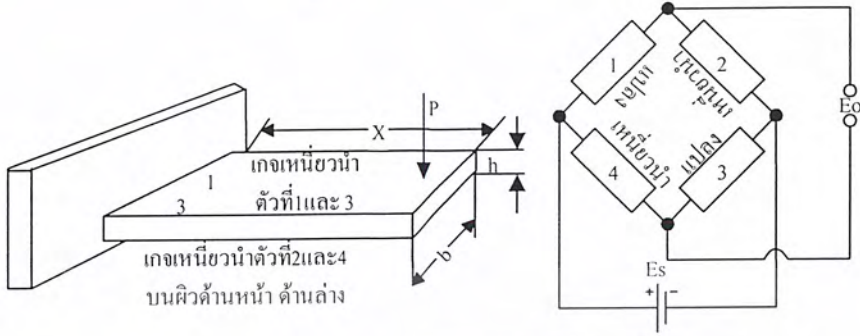
ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบแกนโดยทั่วไปมีค่าสูงสุดของอัตราแรงดันไฟฟ้า  $(E_o/E_i)_{\max} = 3$  มิลลิโวลต์ต่อโวลต์ ค่าน้ำหนักสูงสุด ( $P = P_{\max}$ ) เกี่ยวกับข้อกำหนดค่าสูงสุดของอัตราแรงดันไฟฟ้า  $(E_o/E_i)_{\max}$  ค่าน้ำหนัก  $P$  บนชิ้นส่วนรับน้ำหนักจะแสดงได้โดย

$$P = \frac{E_o/E_i}{(E_o/E_i)_{\max}} P_{\max} \quad (2.10)$$

แรงดัน  $E_i$  นี้เป็นชนิดสำหรับ 10 โวลต์ เพราะฉะนั้นค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบแกนที่มีค่าน้ำหนักสูงสุดจะมีค่าใกล้เคียง 3 มิลลิโวลต์สัญญาณเอาต์พุตสามารถดูได้จากโวลต์มิเตอร์แบบดิจิตอลหรือถ้าสัญญาณเป็นสัญญาณแบบไดนามิกจะสามารถแสดงผลได้บนเครื่องบันทึกออสซิลโลสโคป

## 2) แบบคาน

ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคานจะมีลักษณะการใช้งานเช่นเดียวกันกับการวัดน้ำหนักที่ค้ำแนวเดียวกันเมื่อชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบแกนไม่สามารถทำได้สำหรับชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคานจะแสดงดังรูปที่ 2.2 (ก) ประกอบด้วยตัวสเตรนเกจสองตัวอยู่บนผิวหน้าและตัวสเตรนเกจอีกสองตัวอยู่ที่ด้านใต้ของผิวหน้าวางตามความยาวของคานสเตรนเกจเป็นขดลวดที่อยู่ภายในวงจรบริดจ์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.2 (ข)



(ก) ชิ้นส่วนรับแรงยึดหยุ่น

(ข) สเตรนเกจในวงจรบริดจ์

รูปที่ 2.2 ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคาน

น้ำหนักของโหลด ( $P$ ) ที่กระทำจะเกิดโมเมนต์  $M = Px$  ที่ตำแหน่งเกจ  $x$  ผลลัพธ์ของความเครียดคือ

$$\epsilon_1 = -\epsilon_2 = \epsilon_3 = -\epsilon_4 = \frac{6M}{Ebh^2} = \frac{6Px}{Ebh^2} \tag{2.11}$$

เมื่อ  $b$  คือ ความกว้างหน้าตัดของคาน

$h$  คือ ความสูงหน้าตัดของคาน

การตอบสนองของสเตรนเกจที่ได้รับจากสมการที่ (2.11) ดังนี้

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{6S_g \cdot Px}{Ebh^2} \tag{2.12}$$

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $E_o$  จากวงจรบริดจ์จะทำให้ทราบผลลัพธ์จากน้ำหนัก  $P$  ถ้าสเตรนเกจทั้งสี่ตัวบนคานจะสมมุติให้มีค่า

$$E_o = \frac{6S_g Px E_i}{Ebh^2} \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หรือ } p = \frac{Ebh^2}{6S_g x E_i} E_o = CE_o \quad (2.14)$$

สมการที่ (2.14) แสดงค่าน้ำหนักของ P เป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและค่าคงที่ของสัดส่วนหรือค่าคงที่ของการวัด (C) คือ

$$C = \frac{Ebh^2}{6S_g x E_i} \quad (2.15)$$

ความไวของวงจรวัดโดยให้  $S = E_o/P$  เพราะฉะนั้น

$$S = \frac{E_o}{P} = \frac{1}{C} = \frac{6S_g P x E_i}{Ebh^2} \quad (2.16)$$

สมการที่ (2.16) ได้แสดงว่าความไวของชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคานขึ้นอยู่กับการรูปร่างของภาพตัดขวางของคาน (b และ h) โมดูลัสความยืดหยุ่นของโลหะที่ใช้ทำตัวสเตรนเกจ (E) ตำแหน่งของน้ำหนักที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับเกจ (x) สเตรนเกจ ( $S_g$ ) และการใช้แรงดันไฟฟ้าอินพุตของวงจรวัด ( $E_i$ )

ระยะของชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคานขึ้นอยู่กับขนาดภาพตัดขวางของคานตำแหน่งของจุดที่ใช้ทำงานของน้ำหนักและความแข็งแรงการดัดของโลหะจากวัสดุที่ใช้ทำสเตรนเกจสมมติให้เกจอยู่ใกล้กับจุดรองรับของคาน  $M_{gagc} \approx M_{max}$  และ

$$P_{max} = \frac{S_f bh^2}{6x} \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.15) และสมการที่ (2.16) ได้แสดงระยะทางและความไวของชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคานสามารถที่จะเปลี่ยนได้โดยการเปลี่ยนจุดน้ำหนักที่ใช้ในการใช้งานความไวสูงสุดและระยะที่เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับจุดยอดของน้ำหนักที่กระทำเคลื่อนที่ใกล้กับเกจ

อัตรา ( $E_o/E_i$ ) max แรงดันไฟฟ้าที่น้ำหนักสูงสุดสำหรับชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคานคือ การแทนสมการที่ (2.17) ลงในสมการที่ (2.13) ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{E_o}{E_i}\right)_{\max} = \frac{S_g S_f}{E} \quad (2.18)$$

การเปรียบเทียบสมการที่ (2.18) กับสมการที่ (2.9) แสดงว่าชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคานามีค่าความไวใกล้เคียงร้อยละ 50 มากกว่าชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบแกนโดยทั่วไปแล้วชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคานาจะมีอัตรา ( $E_o/E_i$ ) อยู่ระหว่างที่ 4 ถึง 5 มิลลิโวลต์ต่อโวลต์ (mV/V) ที่ค่าเต็มสเกลของน้ำหนัก

### 3) แบบวงแหวน

ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบวงแหวนสามารถที่จะทำการออกแบบให้มีระยะต่างๆ ได้ตามน้ำหนักโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) ความหนา (t) และความกว้าง (w) ของขนาดวงแหวนทั้งสเตรนเกจหรือหม้อแปลงไฟฟ้าปรับความแตกต่างแบบเชิงเส้น (Linear Variable - DiffentTransformer หรือ LDT) ซึ่งต่อไปนี้จะขอเรียกว่า “LVDT” ซึ่งสามารถที่จะใช้ได้เช่นเดียวกับตัวตรวจจับ (Sensor) ถ้า LVDT เป็นตัวที่ใช้วัดแรงหรือการยืดตัวของวงแหวน ความสัมพันธ์ระหว่างระยะที่เคลื่อนที่และน้ำหนัก P แสดงค่าโดยประมาณค่าจะได้

$$\delta = 1.79 \frac{PR^3}{Ewt^3} \quad (2.19)$$

สมการที่ (2.19) เป็นค่าที่ใกล้เคียงเมื่อพื้นที่ที่เสริมแรงด้านบนด้านล่างของวงแหวนไม่มีน้ำหนักโหลดมากกระทำแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $E_o$  ของ LVDT สามารถแสดงได้โดย

$$E_o = S.\delta.E_i \quad (2.20)$$

การแสดงค่าความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $E_o$  และค่าน้ำหนัก P โดยการแทนสมการที่ (2.19) ในสมการที่ (2.20) ดังนี้จะได้

$$E_o = 1.79 \frac{SPR^3 E_i}{Ewt^3} \quad (2.21)$$

$$P = 0.56 \frac{Ewt^3}{SR^3 E_i} E_o = CE_o \quad (2.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.22) ที่แสดงค่าน้ำหนักเป็นสัดส่วนเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต  $E_o$  หรือค่าสัดส่วนของค่าคงที่และค่าคงที่ของการวัด ( $C$ ) จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ

$$C = 0.56 \frac{Ewt^3}{SR^3 Ei} \quad (2.23)$$

ความไวของวงแหวน LVDT ที่จัดให้  $S_i$  จะได้

$$S_i = \frac{E_o}{P} = \frac{1}{C} = 1.79 \frac{SR^3 E_i}{Ewt} \quad (2.24)$$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความไวของชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบวงแหวนในการในการใช้ตัวรับแบบ LVDT จะขึ้นอยู่กับค่าต่างๆ ของวงแหวน ( $D$   $t$  และ  $w$ ) วัสดุที่นำมาทำเป็นตัวสเตรนเกจ ( $E$ ) และคุณลักษณะของ LVDT ( $S$  และ  $E_i$ )

ระยะของชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบวงแหวนได้ควบคุมโดยใช้ความแข็งแรงของวัสดุที่ใช้ทำเป็นตัวสเตรนเกจถ้าใช้เป็นตัวในการวัดค่าน้ำหนักที่เป็นวัฏจักรความแข็งแรงของการล้าจะมีความสำคัญมากถ้าใช้ในการวัดเฉพาะค่าน้ำหนักคงที่ข้อจำกัดสัดส่วนโลหะสามารถที่จะใช้การจัดตั้งระยะของชิ้นส่วนรับน้ำหนักที่ความดันสูงสุดในชิ้นส่วนของวงแหวนที่เสริมทั้งด้านบนและด้านล่างผิวหน้าด้านในจะมีค่าสูงมากกว่าของแหวนบนเส้นผ่าศูนย์กลางที่ระยะตั้งฉากกับน้ำหนักที่กระทำการประมาณค่าที่ใกล้เคียงสำหรับความเค้นที่ตำแหน่งใดๆ ก็คือ

$$\sigma_\theta = 1.09 \frac{PR}{wt^2} \quad (2.25)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.25) สำหรับการวัดน้ำหนักที่เป็นวัฏจักรจะได้

$$P_{\max} = 0.92 \frac{wt^3 S_f}{R} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราแรงดันไฟฟ้าที่ค่าน้ำหนักสูงสุด  $(E_o/E_i)_{\max}$  คือการแทนสมการที่ (2.25) ลงในสมการที่ (2.1) ดังนั้นจะได้

$$\left(\frac{E_o}{E_i}\right)_{\max} = 1.64 \frac{SR^2 Sf}{Et} \quad (2.27)$$

อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า  $(E_o/E_i)$  สำหรับชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบวงแหวนส่วนมากมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการที่ (2.27) และไม่ทำงานที่ค่าเท่ากับระดับความเค้นความเสียหายของวัสดุ อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า  $(E_o/E_i)$  และน้ำหนักในสมการที่ (2.10) สามารถที่จะทำให้น้ำหนักมีความเท่ากันในการวัดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

$$P = \frac{E_o / E_i}{(E_o / E_i)_{\max}} P_{\max} \quad (2.28)$$

ชนิดของ LVDT ระยะสั้น ( $\pm 1.25$  มิลลิเมตร) จะใช้สำหรับตัวรับซึ่งชิ้นส่วนรับน้ำหนักจะแสดงความไว 250 มิลลิโวลต์ต่อโวลต์มิลลิเมตร (mV/V.mm.) ถ้าชิ้นส่วนของแหวนของชิ้นส่วนรับน้ำหนักจะถูกออกแบบให้มีการหักเห  $\delta_{\max} = 1.25$  มิลลิเมตรที่  $P_{\max}$  ดังนั้นสมการที่ (2.20) แสดงได้ดังนี้

$$\left(\frac{E_o}{E_i}\right)_{\max} = S\delta_{\max} = 250(1.25) = 313 \text{ mV/V}$$

ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบวงแหวนมีอัตรา  $(E_o/E_i) \approx 300$  มิลลิโวลต์ต่อโวลต์คือการใช้ประโยชน์และมีความสามารถในการวัดทั้งแรงดึงและแรงอัดโดยที่อัตราสัญญาณเอาต์พุตของชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบวงแหวนที่ใช้ตัวรับ LVDT จะดีกว่าอัตราสัญญาณเอาต์พุตของชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบวงแหวนที่ใช้สเตรนเกจเป็นตัวตรวจจับ

## 2.2.2 สเตรนเกจแบบค่าความต้านทาน

สำหรับการใช้งานสเตรนเกจแบบค่าความต้านทานจะถูกยึดติดไว้กับผิวของชิ้นส่วนรับน้ำหนักในตำแหน่งที่มีความเครียดมากที่สุดเพื่อที่จะทำให้เกิดค่าความเปลี่ยนแปลงที่ตัวต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากที่สุดอันเนื่องจากการยืดตัวหรือหดตัวของสเตรนเกจซึ่งจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าก่อนนำไปใช้งาน

สเตรนเกจแบบค่าความต้านทานแบ่งออกเป็นสเตรนเกจแบบขดลวด (Wire resistance strain gauge) สเตรนเกจแบบโลหะบาง (Foil resistance strain gauge) และแบบสารกึ่งแผ่นตัวนำ (Semiconductor gauge)

แบบแรกคือสเตรนเกจแบบขดลวดและแบบแผ่นโลหะบางซึ่งจะแสดง โดยมีหลักการทำงานเหมือนกันคือค่าความต้านทานของขดลวดหรือแผ่นโลหะบางจะมีค่าเปลี่ยนไปเพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวขึ้นในสเตรนเกจซึ่งการเปลี่ยนแปลงความยาวนี้จะมีความสัมพันธ์กับความเครียดส่วนค่าความต้านทานของสเตรนเกจนั้นจะเป็นดังนี้

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.29)$$

เมื่อ R คือค่าความต้านทานของสเตรนเกจ (โอห์ม)

$\rho$  คือความต้านทานจำเพาะของโลหะที่ใช้ทำสเตรนเกจ (โอห์ม-มม.)

L คือความยาวเดิมของสเตรนเกจ (มม.)

A คือพื้นที่หน้าตัดของโลหะที่ใช้ทำสเตรนเกจ (มม.<sup>2</sup>)

จากสมการที่ (2.29) จะเห็นว่าค่าความต้านทานจะมากขึ้นหรือลดลงเมื่อความยาวเพิ่มขึ้นหรือลดลงสำหรับค่าความไวของสเตรนเกจหรือเกจแฟกเตอร์ (Gauge factor) นั้นจะเป็นอัตราส่วนของค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วยกับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อหนึ่งหน่วย (ความเครียดของวัสดุ)

ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$G = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R / R}{\epsilon} \quad (2.30)$$

เมื่อ G คือเกจแฟกเตอร์

$\Delta R$  คือค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปของสเตรนเกจ (โอห์ม)

R คือค่าความต้านทานของสเตรนเกจ (โอห์ม)

L คือความยาวที่เปลี่ยนไปของสเตรนเกจ (มม.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L คือความยาวเดิมของสเตรนเกจ (มม.)

$\epsilon$  คือความเครียด (มม./มม.)

โลหะที่ใช้ทำสเตรนเกจจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือจะต้องมีค่าเกจแฟกเตอร์สูงและมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานโลหะที่นิยมใช้ทำสเตรนเกจกันมากในปัจจุบันคือดีบุก ทองแดงและทังสเตน

วัสดุที่ใช้ทำแผ่นรอง (Backing material) จะต้องเป็นวัสดุที่ยืดหยุ่นได้ดีมากและที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน ได้แก่

กระดาษซึ่งบางมากจะนิยมใช้กับสเตรนเกจแบบขดลวด

โพลีไมด์มีความเหนียวและยืดหยุ่นดีใช้กับงานทั่วไป

อีพ็อกซีและแก้วไฟโนลิกจะให้ความถูกต้องและความแม่นยำเป็นเชิงเส้นที่ดีสามารถใช้กับอุณหภูมิได้สูงถึง 400 องศาเซลเซียสแต่มีจุดอ่อนคือค่อนข้างเปราะและแตกหักง่ายจึงต้องให้ความระมัดระวังเป็นอย่างมากในการติดกับชิ้นงาน

อีกแบบหนึ่งคือสเตรนเกจแบบสารกึ่งตัวนำซึ่งมีหลักการทำงานเหมือนกับสเตรนเกจแบบขดลวดและแบบแผ่นโลหะบางแต่สเตรนเกจแบบสารกึ่งตัวนำจะประกอบผลึกเดี่ยวของซิลิกอนซึ่งทำเป็นชิ้นสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่อนข้างจะบางมากติดอยู่บนแผ่นรองเช่นเดียวกับแบบขดลวดและแบบแผ่นโลหะบางซึ่งสเตรนเกจแบบสารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปแล้วค่าเกจแฟกเตอร์ของสเตรนเกจแบบสารกึ่งตัวนำนั้นจะมีค่าสูงกว่าแบบขดลวดและแบบแผ่นโลหะบางและค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานก็จะมีค่าสูงกว่าเช่นกันนอกจากนี้สเตรนเกจแบบสารกึ่งตัวนำยังจะแบ่งออกเป็นชนิดพี (P-type) ซึ่งจะมีค่าเกจแฟกเตอร์เป็นบวกและชนิดเอ็น (N-type) ซึ่งจะมีค่าเกจแฟกเตอร์เป็นค่าลบ

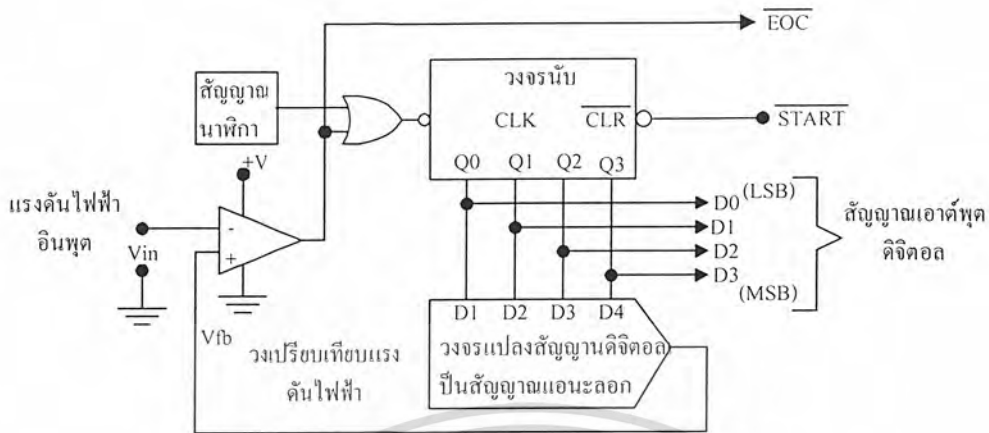
## 2.3 การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธีด้วยกันซึ่งแต่ละวิธีด้วยกันซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไปดังนี้

### 2.3.1 การแปลงสัญญาณแบบแรมป์

การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลแบบนี้จะมีรูปแบบการต่อวงจรตามรูปที่

2.3



รูปที่ 2.3 การต่อวงจรแบบเรมปี

สมมุติว่าขณะนี้วงจรมีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 10 โวลต์ ป้อนแรงดันไฟฟ้าที่อินพุต ( $V_i$ ) เท่ากับ 6.87 โวลต์ จากวงจรสามารถอธิบายได้เป็นข้อๆ ดังต่อไปนี้

1.) เมื่อขา START มีค่าเป็นลอจิก “0” วงจรนั้นก็จะถูกเคลียร์ให้เอาต์พุตเป็น 0000 เพราะฉะนั้นแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบที่ได้จากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกจะมีค่าแรงดันไฟฟ้าเป็น 0 โวลต์

2.) พิจารณาจากวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าขณะนี้แรงดันไฟฟ้าอินพุตจะมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้า เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวเปรียบเทียบที่ค่าเป็นสัญญาณนาฬิกา ระดับต่ำจะผ่านออกเข้าวงจรนับเมื่ วงจรนับได้รับสัญญาณนาฬิกา วงจรนับก็จะนับค่าไปพร้อมทั้งกับส่งเอาต์พุตไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณแอนะล็อกเพื่อเปลี่ยนเอาต์พุตเลขฐานสองเป็นแรงดันไฟฟ้าแล้วนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตซึ่งในขณะนี้ที่ขาควบคุมการทำงานของเอาต์พุต (Enable Output Control หรือ EOC) จะเป็นลอจิก “0”

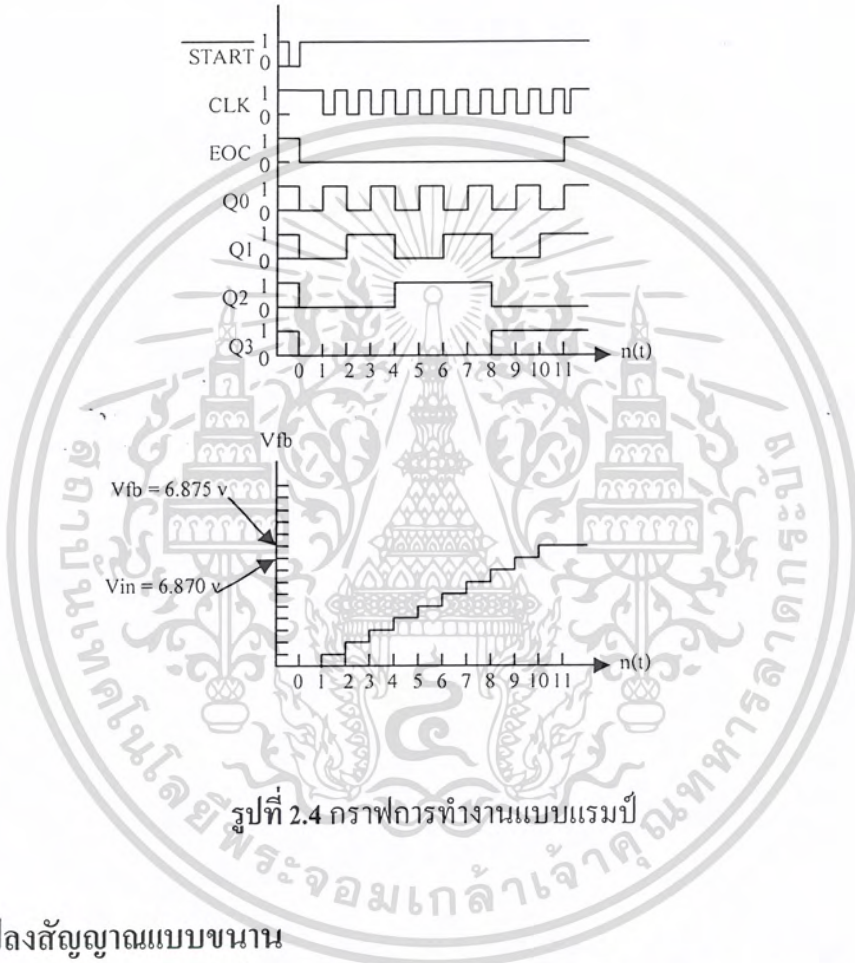
3.) เมื่ วงจรนับมีค่าเอาต์พุตเลขฐานสองมากขึ้นก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบมากขึ้นเมื่อมีค่ามากกว่าแรงดันอินพุตเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าก็จะเป็นสัญญาณนาฬิกา ระดับสูงก็ไม่สามารถผ่านไปสู่ วงจรนับได้ดังนั้นก็ขา EOC ก็จะเป็นลอจิก “1” ซึ่งขณะนี้การแปลงสัญญาณ ได้สิ้นสุดลงแล้วค่าเอาต์พุตเลขฐานสองของวงจรนับก็คือแรงดันอินพุตแต่ถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้วจากนั้นถ้าต้องการจะทำการแปลงสัญญาณใหม่จะต้องทำให้ขา START มีค่าเป็นลอจิก “0” วงจรก็จะเริ่มแปลงสัญญาณใหม่อีกครั้ง

เมื่อพิจารณาจากหลักการการทำงานจะเห็นได้ว่าการแปลงสัญญาณแบบนี้อัตราความเร็วจะขึ้นอยู่กับสัญญาณนาฬิกาและค่าของแรงดันไฟฟ้าอินพุตนั่นเองคือถ้าแรงดันไฟฟ้าอินพุตน้อยก็จะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้เวลาในการแปลงสัญญาณน้อยถ้าแรงดันไฟฟ้าอินพุตมากก็จะใช้เวลาในการแปลงสัญญาณมากขึ้นแต่เวลาที่ใช้ในการแปลงสัญญาณมากสุดจะไม่เกิน 22 สำหรับการแปลงสัญญาณ 1 ครั้ง

โดยที่  $n$  คือจำนวนบิตของการแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

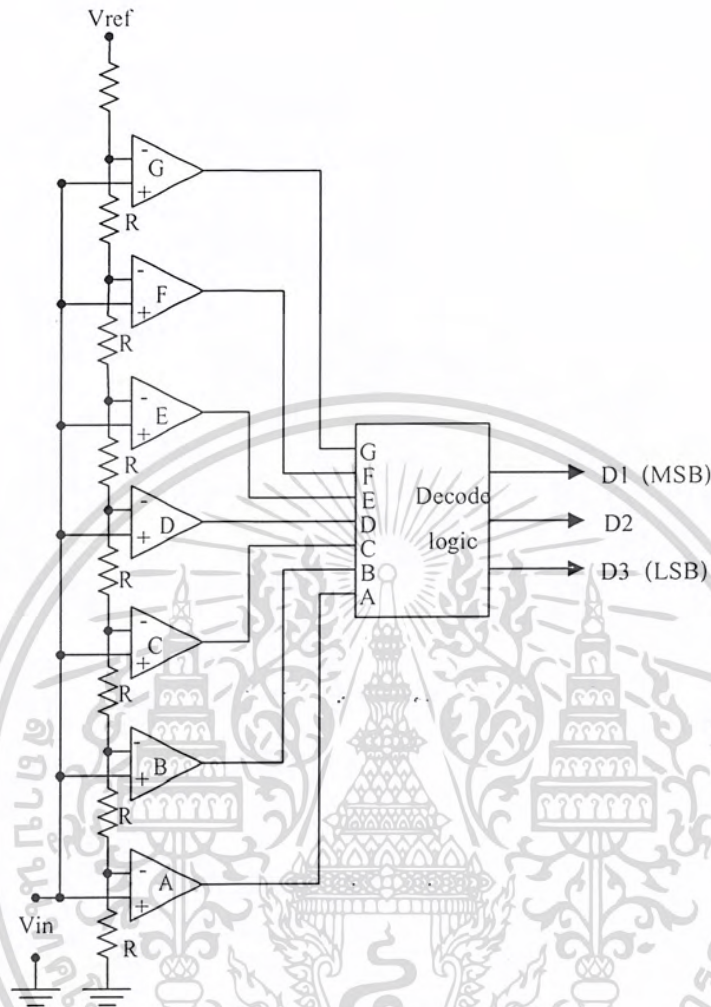
$f$  คือความถี่ของสัญญาณนาฬิกา



รูปที่ 2.4 กราฟการทำงานแบบเรมปี

### 2.3.2 การแปลงสัญญาณแบบขนาน

การแปลงสัญญาณด้วยวิธีนี้เป็นวิธีที่มีความเร็วในการแปลงสัญญาณสูงสุดซึ่งจะมีโครงสร้างดังวงจรในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การต่อวงจรแบบขนาน

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าจะใช้โอปแอมป์ต่อเป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าร่วมกับด้านทานซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าเมื่อมีแรงดันอินพุตป้อนเข้ามาโอปแอมป์ทุกตัวก็จะทำการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าทุกค่าและเอาต์พุตที่ได้ก็จะถูกส่งเข้าไปยังวงจรถอดรหัสเพื่อให้เป็นสัญญาณเอาต์พุตเลขฐานสองซึ่งค่าเอาต์พุตของโอปแอมป์ทั้ง 7 ตัวจะมีค่าแสดงดังตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าการแปลงสัญญาณแบบนี้ถ้าต้องการให้ได้จำนวนบิตเอาต์พุตสูงจะต้องใช้โอปแอมป์และตัวด้านทานเป็นจำนวนมากซึ่งจำนวนของโอปแอมป์และตัวด้านทานจะสัมพันธ์กับจำนวนบิตดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_1 = 2^n - 1 \quad (2.31)$$

$$N_2 = 2^n \quad (2.32)$$

โดยที่  $N_1$  คือ จำนวนของออปแอมป์

$N_2$  คือ จำนวนของตัวต้านทาน

$n$  คือ จำนวนบิต

ตารางที่ 2.1 ค่าเอาต์พุตของออปแอมป์

|     |  | เอาต์พุตของออปแอมป์ |   |   |   |   |   |   |
|-----|--|---------------------|---|---|---|---|---|---|
|     |  | A                   | B | C | D | E | F | G |
| 0   |  | 0                   | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1/8 |  | 1                   | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2/8 |  | 1                   | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3/8 |  | 1                   | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4/8 |  | 1                   | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 5/8 |  | 1                   | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 6/8 |  | 1                   | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 7/8 |  | 1                   | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

↓  
Vin x FSR

การแปลงสัญญาณประเภทนี้มีความเร็วสูงสุดแต่ต้องใช้ออปแอมป์และตัวต้านทานเป็นจำนวนมากถ้าต้องการจำนวนบิตเอาต์พุตสูงดังนั้นการแปลงสัญญาณประเภทนี้จึงมีราคาแพง

### 2.3.3 การแปลงสัญญาณแบบสโโลปลูกู่

จากรูปที่ 2.6 (ก) แสดงผังการทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแบบสโโลปลูกู่ซึ่งวงจรส่วนใหญ่คล้ายกับแบบสโโลปเดี่ยวแต่มีสวิตช์ที่อินพุตเพิ่มขึ้นเพื่อทำการเลือกแรงดันไฟฟ้าระหว่างแรงดันไฟฟ้าอินพุตกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (วงจรเปรียบเทียบกับเอาต์พุตอินพุตเพื่อทำการอินพุตกลับกันแบบสโโลปเดี่ยว)

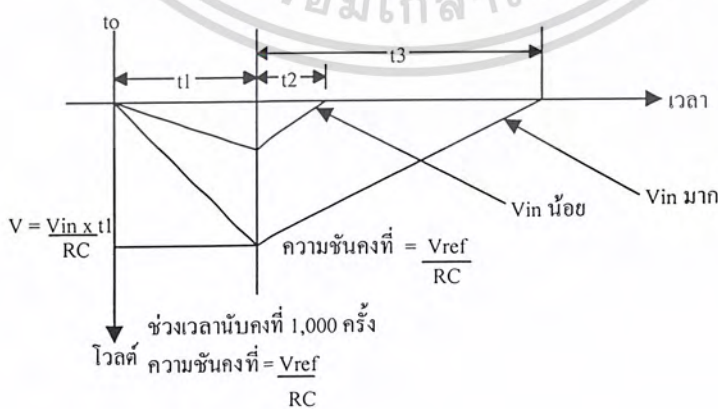
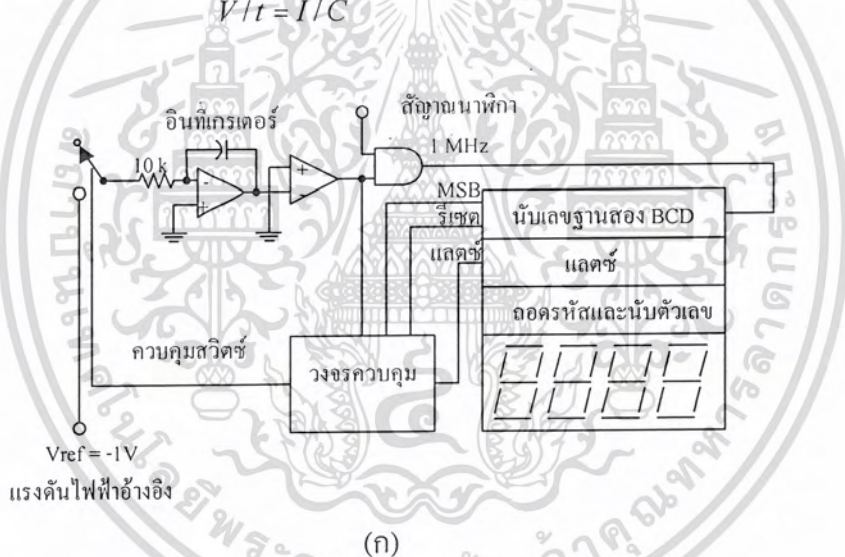
ส่วนแรกของวงจรคือวงจรกำเนิดสัญญาณแรมป์หรือวงจรอินทิเกรเตอร์ที่มีอินพุตแบบกลับของออปแอมป์เป็นสภาพกราวด์เสมือน (Virtual ground) เช่นถ้ามีแรงดันไฟฟ้าอินพุต 2 โวลต์ จะได้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทาน 10 กิโลโอมห์เท่ากับว่ามีกระแส 0.2 มิลลิแอมป์ไหลไปยังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดรวม (Summing point) เนื่องจากค่าความต้านทานอินพุตของออปแอมป์นั้นสูงมากซึ่งตัวเก็บประจุจะเริ่มเก็บประจุแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของออปแอมป์ก็จะมีค่าเป็นลบมากขึ้นเรื่อยๆ เพื่อรักษาระดับกระแสไฟฟ้าให้คงที่แรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวเก็บประจุจึงได้สัญญาณเป็นแรมป์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear ramp) ความชันของสัญญาณแรมป์นั้นสามารถที่จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของประจุ  $q = c \times v$  และ  $q = i \times t$  โดยกำหนดให้สมการทั้งสองมาเท่ากัน

$$V/t = I/C \tag{2.33}$$

เมื่อรู้ว่ากระแสไฟฟ้าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอินพุตหารด้วยค่าความต้านทานดังนั้น

$$V/t = I/C \tag{2.34}$$



(จ)

### รูปที่ 2.6 การต่อวงจรแบบสโลปคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.6 ถ้ากำหนดให้แรงดันไฟฟ้าอินพุตเท่ากับบวก 2 โวลต์ ก็จะได้ความชันของสัญญาณแรมป์ทางเอาต์พุตเท่ากับลบ 2 โวลต์/มิลลิวินาที

อินพุตจากวงจรในรูปที่ 2.6 อธิบายได้คือเมื่อสวิตช์ต่อกับสัญญาณอินพุตจะทำให้แรงดันไฟฟ้าบวกจากอินพุตป้อนเข้าสู่วงจรอินทิเกรเตอร์แล้วทำให้เอาต์พุตเป็นบวกทำการเปิดแอสแตเบิลที่สัญญาณผ่านเข้าสู่วงจรนับได้วงจรนับก็จะนับไปยังค่าที่กำหนดไว้ครั้งที่ (t1) แล้วจะทำการสับสวิตช์ต่อเข้ากับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

ในช่วงที่วงจรนับด้วยค่าคงที่นั้นวงจรอินทิเกรเตอร์ให้ไปที่แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงค่าลบเอาต์พุตของวงจรจึงได้แรมป์ทางบวกคือช่วง t2 รูปที่ 2.6 (ข) พร้อมๆ กับทำการรีเซ็ตค่าของวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าก็จะเป็นค่าลบหรือเป็นศูนย์วงจรควบคุมจับการเปลี่ยนแปลงอันนี้ได้จึงทำการส่งสัญญาณสโตรปให้กับวงจรนับเก็บค่าที่ได้ไว้ในวงจรแลตช์จากนั้นจึงรีเซ็ตค่าให้เป็นศูนย์แล้วจึงทำการสวิตช์ให้อินพุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ต่อกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตเป็นการเริ่มแปลงสัญญาณอีกรอบหนึ่ง

จำนวนที่นับได้ที่เก็บไว้ในวงจรแลตช์ก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าอินพุตสัญญาณแรมป์ทางเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ในช่วงเวลาครั้งที่ t1 จะลดลงสู่แรงดันไฟฟ้า V ดังสมการต่อไปนี้

$$V = (V_{in} / RC) \times t1 \quad (2.35)$$

เพื่อให้กลับไปสู่ระดับศูนย์หน้าทีของวงจรอินทิเกรเตอร์จึงจำเป็นต้องสร้างแรมป์ทั้งทางบวกและทางลบให้เท่าๆ กันในช่วงเวลาที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าอินพุตอ้างอิงแรงดันไฟฟ้า V เท่ากัน

$$V = (V_{ref} / RC) \times t2 \quad (2.36)$$

ซึ่งจะได้เป็น  $(V_{in} / RC) \times t1 = (V_{ref} / RC) \times t2$  ฉะนั้น

$$V_{in} \times t1 = V_{ref} \times t2 \quad (2.37)$$

$$t2 = V_{in} \times (t1 / V_{ref}) \quad (2.38)$$

จะเห็นได้ว่ามีค่าความต้านทานและค่าเก็บประจุ (RC) ปกติอยู่ทั้งสองข้างของสมการจึงสามารถตัดทิ้งออกได้หมายความว่าเมื่อช่วงเวลาอินทิเกรตสัญญาณและช่วงเวลาอินทิเกรตอ้างอิงนั้นจะใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุค่าเดียวกันซึ่งในการเปลี่ยนแปลงค่าทั้งสองนี้ก็จะไม่มีอะไรเป็นอันตรายทั้งสองในเวลาเดียวกันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นว่าเว็บไซต์นี้เป็นการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

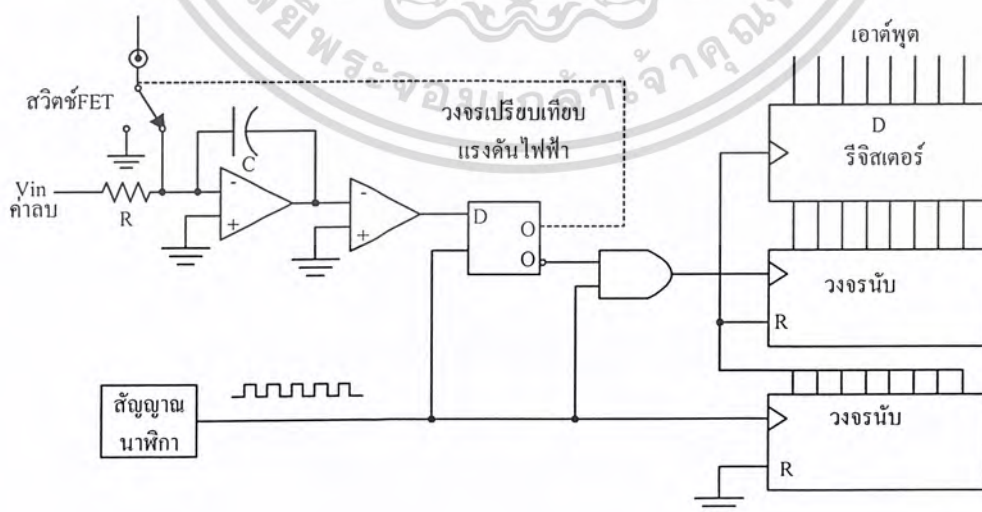
ผลกระทบต่อความถูกต้องของสัญญาณเอาต์พุตซึ่งเป็นข้อดีที่เหนือกว่าแบบสโโลปเดี่ยวคือค่าที่ไม่ได้ขึ้นกับความถี่ของรอบการทำงานซึ่งในสมการสุดท้ายแสดงให้เห็นว่าเอาต์พุตของวงจรมีในช่วงเวลา  $t_2$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) และแรงดันไฟฟ้าอินพุต ( $V_{in}$ ) เมื่อแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและ  $t_1$  คงที่

จากวงจรในรูปที่ 2.6 จะเท่ากับ 1,000 รอบเมื่อป้อนสัญญาณนาฬิกา 1 เมกะเฮิร์ตซ์และแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ( $V_{ref}$ ) มีค่าเท่ากับ 1 โวลต์ถ้าสัญญาณอินพุตมีขนาดเท่ากับ 2 โวลต์จะได้ช่วงเวลา

$$t_2 = (2 \text{ โวลต์} / 1 \text{ โวลต์}) \times 1,000 = 2,000 \text{ รอบ (รอบของการนับ)}$$

สรุปได้คือเมื่อมีแรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ไม่รู้ค่าถูกป้อนเข้าไปในวงจรอินทิเกรเตอร์เมื่อครบช่วงเวลา  $t_1$  วงจรนับถรีเซตให้มีค่าเป็นศูนย์อินพุตของวงจรถรีเซตก็จะถูกสวิตช์ต่อกลับมาที่แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่มีแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้ความชันของสัญญาณแรมป์ที่เพิ่มค่าขึ้นไปจนถึงระดับศูนย์ช่วงเวลา  $t_2$  นี้เป็นสัดส่วน โดยตรงกับสัญญาณอินพุตข้อดีของวงจรแบบนี้คือจะมีความถูกต้องสูงราคาถูกและเสถียรภาพทางด้านอุณหภูมิแต่จะมีข้อเสียคือมีความเร็วต่ำซึ่งเวลาในการแปลงสัญญาณ 1 ครั้งอาจใช้เวลาในการแปลงถึง 100 มิลลิวินาที

### 2.3.4 การแปลงสัญญาณแบบเคลต์ต้าซิกม่า

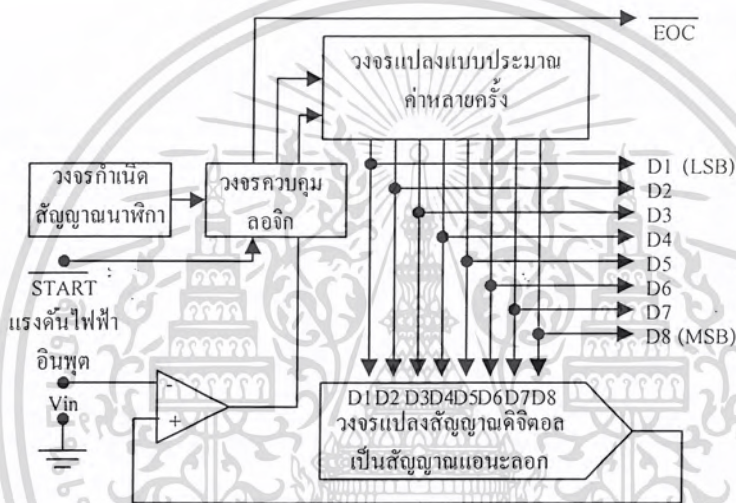


รูปที่ 2.7 การต่อวงจรแบบเคลต์ต้าซิกม่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าอินพุตป้อนเข้าไปที่วงจรอินทิเกรเตอร์ก็จะให้เอาต์พุตไปที่วงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าคงที่ (จากรูปที่ 2.7 คือกราวด์) พัลส์ของกระแสไฟฟ้าที่ได้ขึ้นอยู่กับเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าโดยสวิทช์ที่ทำงานจากเฟสนี้จะทำหน้าที่ควบคุมให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าไปยังจุดรวมหรือลงกราวด์ไปส่วนวงจรนับจะนับจำนวนพัลส์ด้วยหลักการที่เหมือนกัน

### 2.3.5 การแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้ง



รูปที่ 2.8 การต่อวงจรแบบประมาณค่าหลายครั้ง

การแปลงสัญญาณแบบนี้มีรูปแบบการต่อตามวงจรดังรูปที่ 2.8 ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock)
- วงจรควบคุมลอจิก (Control logic)
- วงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณแอนะล็อก (A/D)
- วงจรแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้ง (Successive-Approximation Register หรือ SAR)

หลักการทำงานสามารถเขียนได้เป็นข้อๆ ดังต่อไปนี้ โดยสมมุติกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าอินพุต ( $V_{in}$ ) มีค่าเท่ากับ 5.4 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.) เมื่อ START มีค่าเป็นลอจิก “0” (Active) วงจรแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้งก็จะถูกเคลียร์ให้แรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบ (Vfb) มีค่าเป็น 0 โวลต์ซึ่งในขณะนี้การแปลงสัญญาณได้เริ่มต้นขึ้นแล้ว

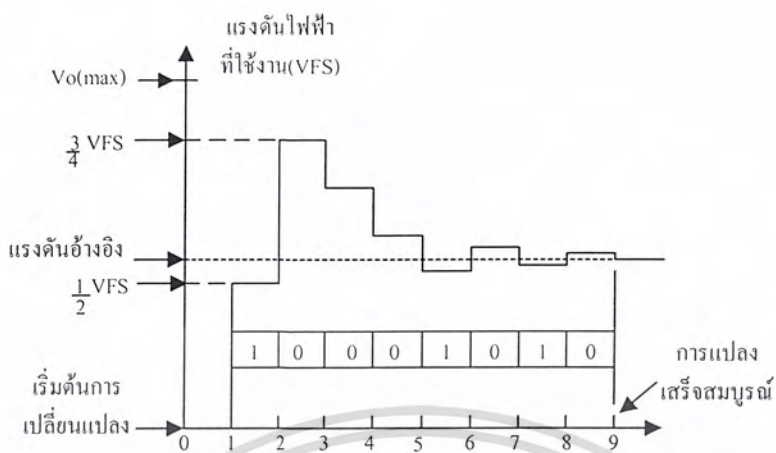
2.) เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาถูกแรกผ่านเข้ามาซึ่งในขณะนี้บิตแรกสุดของวงจรแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้งได้ถูกกำหนดให้เป็นลอจิก “1” ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบจะมีค่าน้อยกว่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลอจิก “0” ซึ่งในขณะนี้วงจรควบคุมลอจิกได้ตรวจสอบพบว่าขา Q7 ของวงจรแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้งเป็นลอจิก “0”

3.) เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาถูกต่อไปผ่านเข้ามาขา Q6 ของวงจรแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้งก็จะถูกกำหนดให้เป็นลอจิก “1” ซึ่งตอนนี้แรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบเท่ากับ 7.5 โวลต์โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบมากกว่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเป็นลอจิก “1” จากนั้นวงจรควบคุมลอจิกก็จะเคลียร์ขา Q6 เพราะว่าตอนนี้วงจรแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้งสุ่มค่ามาเกินแรงดันไฟฟ้าอินพุตนั่นเอง

4.) เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาถูกต่อไปผ่านเข้ามาวงจรแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้งก็จะกำหนดขาของ Q5 ให้เป็นลอจิก “0” และมีแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบเท่ากับ 6.25 โวลต์โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบมากกว่าแรงดันไฟฟ้าอินพุตซึ่งของเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าก็จะเป็นลอจิก “1” และจากนั้นวงจรควบคุมลอจิกก็จะทำการเคลียร์ขาของ Q5 ให้มีลอจิก “0”

5.) เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาถูกต่อไปผ่านเข้ามาวงจรแปลงแบบประมาณค่าหลายครั้งจะกำหนดบิตต่อไปจนกระทั่งเอาต์พุตของวงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าอินพุตแต่การแปลงสัญญาณจะใช้เวลาในการแปลงมากที่สุดตามจำนวนของสัญญาณนาฬิกาซึ่งจากวงจรที่ผ่านมาจะใช้เวลาในการแปลงสัญญาณช้าที่สุดเท่ากับ 8 สัญญาณนาฬิกาซึ่งจากการทำงานจะเขียนเป็นกราฟแสดงการทำงานได้ดังรูปที่ 2.9

จากกราฟการทำงานจะเห็นได้ว่าการแปลงสัญญาณแบบประมาณค่าหลายครั้งนี้มีความเร็วสูงกว่าการแปลงแบบแรมป์เพราะเวลาในการแปลงช้าสุดเท่ากับจำนวนสัญญาณนาฬิกาและถ้าสัญญาณนาฬิกาที่มีความถี่สูงขึ้นความเร็วก็จะมากขึ้นด้วยซึ่งการแปลงสัญญาณประเภทนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะมีความเร็วสูง



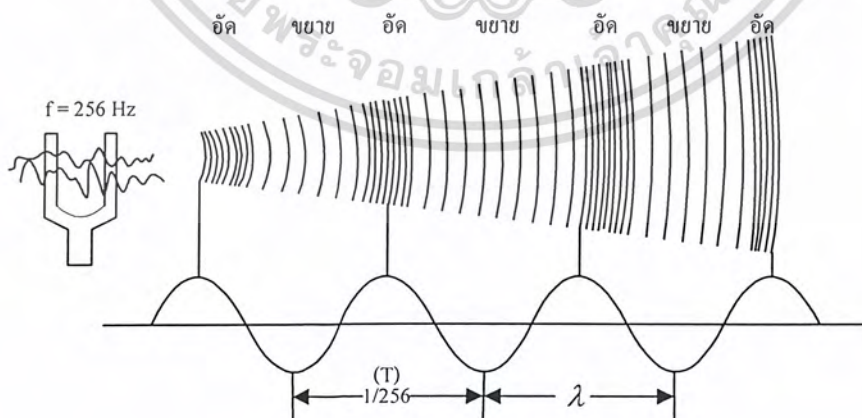
รูปที่ 2.9 กราฟการทำงานของวงจรแบบประมาณค่าหลายครั้ง

## 2.4 ตัวเปลี่ยนระยะทางเป็นสัญญาณพัลส์ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก

### 2.4.1 คลื่น

คลื่นเกิดจากการแกว่งหรือการสั่น (Oscillated) ของวัตถุซึ่งจะเกิดเป็นพลังงานและถ่ายทอดออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นไปยังบริเวณโดยรอบ โดยคลื่นทั่วไปสามารถจำแนกตามระหว่างทิศทางการสั่นของอนุภาคตัวกลางกับทิศทางการเคลื่อนที่ได้สองชนิดคือ

#### 1) คลื่นตามยาว



รูปที่ 2.10 ลักษณะการเกิดคลื่นยาว

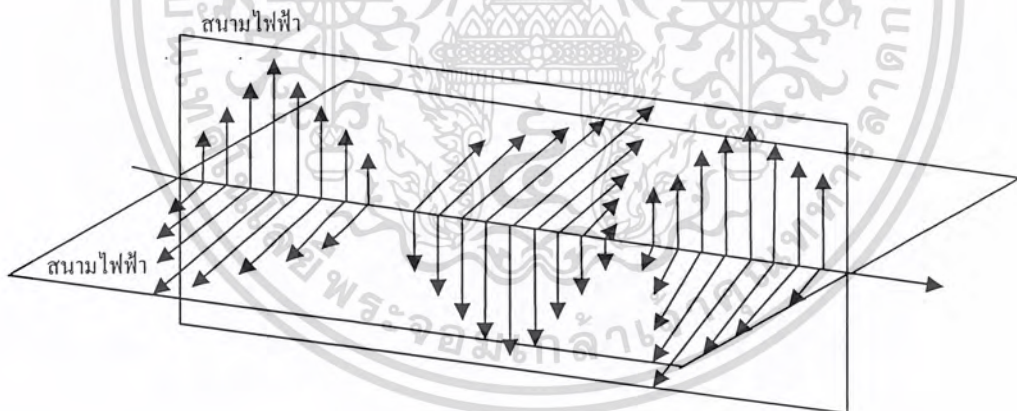
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นตามยาวคือคลื่นที่อนุภาคของตัวกลางมีการเคลื่อนไหวไปในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของคลื่นเช่นคลื่นเสียงเป็นต้นซึ่งแสดงลักษณะของคลื่นตามยาวได้ดังรูปที่ 2.13

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่ามีส่วนเป็นคลื่นอัด (Compression) คลื่นช่วงที่อนุภาคของตัวกลางมีความดันสูงและคลื่นขยาย (Reaction) คือ คลื่นช่วงที่อนุภาคของตัวกลางมีความดันต่ำเมื่อนำค่าของความดัน (P) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางมาเขียนเป็นกราฟก็จะได้เป็นรูปคลื่นไซน์โดยยอดคลื่นจะตรงกับส่วนอัดท้องคลื่นจะตรงกับส่วนขยายระยะทางระหว่างส่วนอัดถึงส่วนอัดหรือส่วนขยายถึงส่วนขยายคือ 1 ความยาวคลื่นและมีคาบเวลาเป็น T ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1/f$  โดยจุดที่เป็นเส้นแกนนั้นมีค่าความดัน 1 บรรยากาศ

## 2) คลื่นตามขวาง

คลื่นตามขวางเป็นคลื่นที่อนุภาคตัวกลางที่มีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเช่นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นน้ำเป็นต้น โดยรูปที่ 2.11 จะเป็นการแสดงถึงลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะเกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) และสนามไฟฟ้า (Electric Field) มีการเคลื่อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นนั่นเอง



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเกิดคลื่นตามขวาง

## 2.4.2 คลื่นเสียง

คลื่นเสียงนั้นจัดอยู่ในรูปคลื่นยาวซึ่งจะมีความสามารถเดินทางผ่านวัตถุตัวกลางในลักษณะของการอัดและการขยายซึ่งจะทำให้เกิดเสียงขึ้นมาโดยแหล่งกำเนิดเสียงนั้นสามารถแบ่งได้ตามวัตถุกำเนิดเสียงได้ 3 ประเภทคือ

1.) เกิดจากการสั่นของสายหรือแท่งได้แก่เครื่องสายต่างๆ ส้อมเสียง ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) เกิดจากการสั่นของแผ่นผิวได้แก่ไดอะเฟรมของลำโพง หนักกลอง ฯลฯ

3.) เกิดจากการสั่นของลำอากาศได้แก่เครื่องเป่าต่างๆ ฯลฯ

เนื่องจากคลื่นเสียงนั้นอาศัยตัวกลางในการเดินทางจึงมีผลทำให้คลื่นเสียงนั้นไม่สามารถผ่านสุญญากาศได้

### 1) ลักษณะของคลื่นเสียง

ลักษณะของคลื่นเสียงความถี่ของคลื่นเสียงในตัวกลางใดๆ คือความถี่ของการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงนั้นความถี่ที่มนุษย์สามารถได้ยินนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ - 20 กิโลเฮิรตซ์ เรียกว่า “Audible Frequency” ความถี่ต่ำกว่าที่มนุษย์ได้ยินเรียกว่า “Infrared Frequency” และความถี่ที่สูงกว่ามนุษย์ได้ยินเรียกว่า “Ultrasonic Frequency”

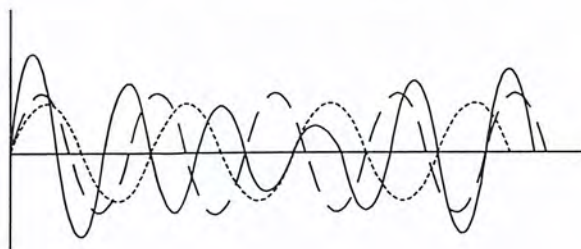
“อัตราเร็วของเสียง” อัตราเร็วของคลื่นเสียงนั้นจะมีการแปรผันตามคุณสมบัติของตัวกลางที่มีเสียงเดินทางผ่านซึ่งตัวแปรที่จำกัดความเร็วของเสียงคือความหนาแน่น (Density) อุณหภูมิ (Temperature) และความยืดหยุ่น (Elasticity)

### 2) คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นเสียง

คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นเสียงแบ่งได้สี่แบบคือ

#### 2.1) การแทรกสอด (Interference)

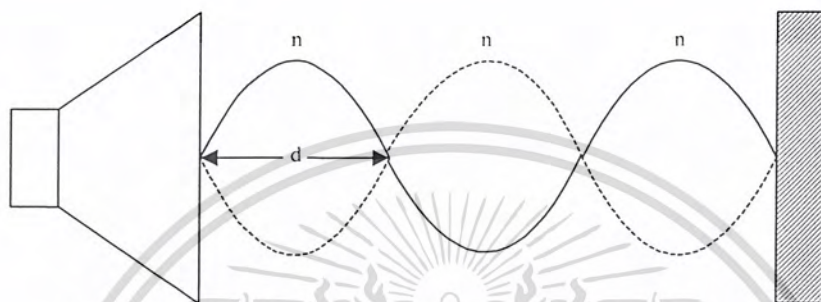
เกิดจากการรวมกันของคลื่นสองคลื่นขึ้นไปขณะเมื่อพบกันในตัวกลาง (Medium) เดียวกันซึ่งทำให้เกิดผลได้หลายลักษณะเช่นการรวมคลื่นที่มีความถี่ต่างกันหรือต่างเฟสกันเคลื่อนที่ไปในตัวกลางเดียวกันแล้วจะรวมเป็นคลื่นใหม่และจะทำให้ขนาดเปลี่ยนไปซึ่งจะเรียกว่า “การบีท” (Beat) จากรูปที่ 2.12 เป็นการแสดงการรวมของคลื่นสองคลื่นซึ่งจะได้คลื่นที่มีขนาดเปลี่ยนไป ประโยชน์ของการรวมคลื่นนั้นจะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบความถี่ของคลื่นให้แสดงผลออกมาในลักษณะของขนาดที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2.12 การรวมของคลื่นที่มีความถี่ต่างกันหรือเฟสต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

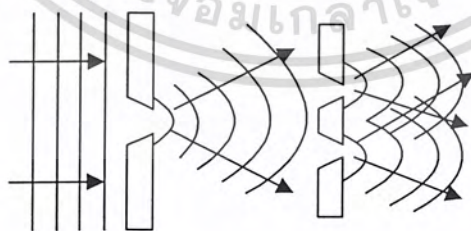
การเกิดคลื่นนิ่ง (Standing Wave) เกิดจากการแทรกสอดของคลื่นซูดที่มีขนาดเท่ากันและความถี่เดียวกันแต่มีทิศทางการเคลื่อนที่ตรงกันข้ามหรือมีเฟสตรงกันข้ามกันซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นนิ่ง



รูปที่ 2.13 ลักษณะการเกิดคลื่นนิ่ง

## 2.2) การเลี้ยวเบนของคลื่นนิ่ง (Diffraction)

คลื่นเสียงจะเลี้ยวเบนอ้อมสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นมุมหรือช่องแคบซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้เราพบอยู่ในชีวิตประจำวันอยู่ตลอดเวลาเช่นในกรณีที่เราได้ยินเสียงแตรรถที่แล่นอยู่คนละถนนของมุมตึกหรือการได้ยินเสียงที่ลอดผ่านช่องเล็กๆ จากอีกห้องหนึ่งเป็นต้นดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ลักษณะของคลื่นเสียงผ่านช่องแคบๆ จนเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3) การสะท้อนของคลื่นเสียง (Reflection)

คลื่นเสียงจะสามารถสะท้อนได้ก็ต่อเมื่อตกกระทบตัวกลางโดยที่มุมกระทบเท่ากับมุมสะท้อนและจะทำให้เกิดเสียงก้อง (Echo) ซึ่งเสียงก้องที่สะท้อนกลับมาในเวลาที่มากกว่า 0.05 วินาทีจะทำให้ได้ยินเสียงนั้นเป็นครั้งที่สอง

### 2.4) การหักเหของคลื่นเสียง (Refraction)

คลื่นเสียงที่เดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันจะเกิดการหักเหของคลื่นซึ่งทำให้ความเร็วของคลื่นเสียงเปลี่ยนไปโดยที่ความถี่ยังคงอยู่ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การหักเหของคลื่นเสียงในตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน

### 2.4.3 คลื่นอัลตราโซนิคส์

คลื่นอัลตราโซนิคส์ (Ultrasonic Wave) เป็นคลื่นที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์ได้ยิน ดังนั้นคำว่า “อัลตราโซนิคส์” จึงหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงมากกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ขึ้นไป สาเหตุที่นำเอาคลื่นย่านอัลตราโซนิคส์มาใช้เพราะว่าเป็นคลื่นที่มีทิศทางทำให้สามารถเล็งคลื่นไปยังเป้าหมายที่ต้องการได้โดยเจาะจงซึ่งเป็นคุณสมบัติของคลื่นอย่างหนึ่งการมีทิศทางของคลื่นเสียงย่านอัลตราโซนิคส์ทำให้สามารถนำไปใช้งานได้หลายอย่าง

คลื่นอัลตราโซนิคส์คือคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่ามนุษย์จะสามารถได้ยินซึ่งจะมีความถี่ตั้งแต่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ - 104 จิกะเฮิร์ตซ์ โดยคลื่นที่มีความถี่มากกว่า 104 จิกะเฮิร์ตซ์และมีค่าขนาดสูงจะเรียกว่า “ไฮเปอร์ซาวด์” (Hypersound) โดยคุณสมบัติของคลื่นอัลตราโซนิคส์จะมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับคลื่นเสียงที่กล่าวมาแล้วคลื่นอัลตราโซนิคส์ส่วนใหญ่จะกำเนิดจากการแกว่งหรือการสั่น (Oscillation) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เป็นคลื่นไซน์ (Sinusoidal) ซึ่งจะทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิคส์และมีความถี่ต่างๆ ซึ่งความยาวคลื่นของคลื่นในแต่ละความถี่จะแตกต่างกันออกไปด้วย

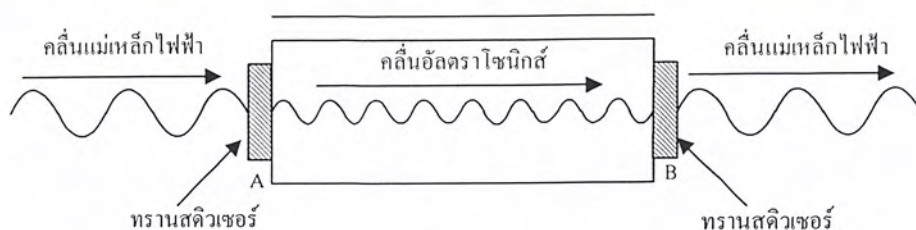
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.2 แสดงค่าที่  $C = 1000$  เมตรต่อวินาที และ  $3000$  เมตรต่อวินาทีซึ่งอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวและเปรียบเทียบกับความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่เดียวกันจะเห็นว่ามีความแตกต่างกันมากโดยความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกส์จะมีค่าต่ำกว่าความเร็วในการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามาก (ในสูญญากาศมีค่าความเร็วประมาณ  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที) จากหลักการนี้มีประโยชน์มากในตัวอย่างของระบบโทรทัศนและระบบดิจิตอลคอมพิวเตอร์ที่ใช้หน่วยเวลา (Delay) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าการเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ไปเป็นคลื่นอัลตราโซนิกส์โดยใช้ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) จะมีหลักการคือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน  $0.001$  วินาทีที่จะสามารถเดินทางได้ระยะทาง  $3 \times 10^8 \times 10^3 = 300$  กิโลเมตรซึ่งมีค่ามากเราจึงสามารถหน่วงสัญญาณนี้ได้โดยเปลี่ยนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นอัลตราโซนิกส์ซึ่งจะใช้อุปกรณ์สายส่งที่มีการสูญเสียน้อยที่สุด (Delay Line) จะแสดงดังรูปที่ 2.20 ซึ่งประกอบด้วยตัวส่งและตัวรับคลื่นอัลตราโซนิกส์โดยคลื่นที่จะเคลื่อนที่ในอุปกรณ์สายส่งที่มีการสูญเสียน้อยที่สุด (Delay Line) ในระยะทาง  $d$  ที่ระยะ  $d$  นี้จะใช้ตัวกลางที่เป็นก๊าซ ของเหลวหรือของแข็งซึ่งจะมีความเร็วที่แตกต่างกันออกไป

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบความยาวคลื่น ความถี่และความเร็วของคลื่นที่มีค่าต่างกัน

| ความถี่                     | ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) |                          |                                      |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|
|                             | ค่าที่ $C = 1000$<br>m/s   | ค่าที่ $C = 3000$<br>m/s | การแผ่รังสีของคลื่น<br>แม่เหล็กไฟฟ้า |
| 20 kHz = $2 \times 10^4$ Hz | 5 cm                       | 15 cm                    | $1.5 \times 10^3$ m                  |
| 100 kHz = $10^5$ Hz         | 1 cm                       | 3 cm                     | $3 \times 10^3$ m                    |
| 1 MHz = $10^6$ Hz           | 1 cm                       | 3 cm                     | 300 m                                |
| 50 MHz = $5 \times 10^7$ Hz | $20 \mu$ m                 | $60 \mu$ m               | 6 m                                  |
| 1 GHz = $10^9$ Hz           | $1 \mu$ m                  | $3 \mu$ m                | 30 m                                 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การหน่วงสัญญาณระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับคลื่นอัลตราโซนิคส์

ตารางที่ 2.3 ค่าความเร็วและคุณสมบัติทางด้านอิมพีแดนซ์ของคลื่นอัลตราโซนิคส์ในตัวกลางที่เป็นแก๊สและของเหลว

| ชนิดของสาร       | อุณหภูมิ<br>(องศาเซลเซียส) | ความหนาแน่น<br>(กิโลเมตรต่อวินาที) | ความเร็วเสียง<br>(เมตรต่อวินาที) | คุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์<br>(นิวตันวินาทีต่อลูกบาศก์เมตร) |
|------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------------|---|
| แก๊ส             |                            |                                    |                                  |   |
| อาร์กอน          | 0                          | 1.783                              | 319                              | 459   |
| ฮีเลียม          | 0                          | 0.178                              | 965                              | 172   |
| ออกซิเจน         | 0                          | 1.429                              | 316                              | 452   |
| ไฮโดรเจน         | 0                          | 0.090                              | 1284                             | 116   |
| คาร์บอนไดออกไซด์ | 0                          | 1.977                              | 259                              | 512   |
| อากาศ            | 0                          | 1.293                              | 331.45                           | 429   |
| ของเหลว          |                            |                                    |                                  | $10^6$  |
| น้ำ              | 20                         | 998                                | 1483                             | 1.48  |
| ปรอท             | 20                         | 13500                              | 1451                             | 19.6  |
| กลีเซอริน        | 20                         | 1228                               | 1895                             | 2.33  |
| อีเธลีนแอลกอฮอล์ | 20                         | 790                                | 1159                             | 0.92  |
| เมทิลีนแอลกอฮอล์ | 20                         | 792                                | 1120                             | 0.89  |
| คาร์บอนไดซัลไฟด์ | 20                         | 1264                               | 1157                             | 1.46  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4.4 ความแรงและคลื่นกำลังของอัลตราโซนิกส์

เมื่อทรานสดิวเซอร์ของอัลตราโซนิกส์ได้ปล่อยคลื่นอัลตราโซนิกส์ออกไปจะทำให้อนุภาคของตัวกลางมีการสั่นสะเทือนดังนั้นอนุภาคนั้นจึงมีพลังงานเนื่องมาจากการสั่นสะเทือนอัตราการไหลของพลังงานจึงเป็นความแรงของลำอัลตราโซนิกส์และอาจกล่าวได้ว่าความแรงของลำอัลตราโซนิกส์ที่จุดๆ หนึ่งเป็นอัตราการไหลของพลังงานผ่านพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรซึ่งวางอยู่ตั้งฉากกับลำอัลตราโซนิกส์ที่จุดนั้นและเมื่อความแรงของลำอัลตราโซนิกส์เพิ่มมากขึ้นจะมีการเพิ่มในขนาดของแรงกดดันขนาดการเคลื่อนที่ของอนุภาคและความเร็วหรือความแรงของอนุภาค

กำลังของอัลตราโซนิกส์จะเป็นอัตราการไหลของพลังงานที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของลำอัลตราโซนิกส์จะ ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{กำลังของอัลตราโซนิกส์} = \text{ความเข้มของอัลตราโซนิกส์} \times \text{พื้นที่หน้าตัดของอัลตราโซนิกส์} \quad (2.39)$$

(วัตต์) (วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

ในการใช้งานคลื่นอัลตราโซนิกส์นั้นเนื่องจากเป็นคลื่นที่มีทิศทางทำให้สามารถส่งคลื่นที่ต้องการไปยังเป้าหมายได้อย่างเจาะจงและถ้าคลื่นมีความถี่สูงขึ้นความยาวคลื่นจะยิ่งสั้นลงโดยความยาวของคลื่นจะมากกว่าช่องเปิดของทรานสดิวเซอร์เช่นคลื่นความถี่ 300 เฮิร์ตซ์เป็นต้นในอากาศมีความยาวคลื่นประมาณ 1 เมตรและยาวกว่าช่องเปิดของตัวทรานสดิวเซอร์จะทำให้คลื่นเสียงที่ออกมาจากตัวกำเนิดเสียงนี้เกิดการหักเหและเลี้ยวเบนที่ขอบด้านนอกของตัวกำเนิดเสียงซึ่งจะทำให้เกิดการกระจายของคลื่นเสียง (Scatter) ไม่มีทิศทางแน่นอนแต่ถ้าจะใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูงขึ้นในยานอัลตราโซนิกส์เช่นความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์จะมีความยาวคลื่นในอากาศเพียง 3 มิลลิเมตรเท่านั้นซึ่งจะเล็กกว่าช่องเปิดของตัวกำเนิดเสียงมากคลื่นเสียงที่ได้จะไม่เลี้ยวเบนที่ขอบจึงพุ่งเป็นลำแคบๆ (Beam) ซึ่งมีทิศทางแน่นอน

คลื่นอัลตราโซนิกส์นั้นเมื่อต้องเดินทางในอากาศความถี่ที่ใช้งานมักจะถูกจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 กิโลเฮิร์ตซ์เพราะถ้าความถี่สูงขึ้นกว่านี้อากาศจะดูดกลืนคลื่นเสียงเพิ่มมากขึ้นทำให้ระดับความแรงของคลื่นอัลตราโซนิกส์ที่ระยะห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็วส่วนการใช้งานในด้านการแพทย์นั้นจะใช้รัศมีทำการสั้นๆ จึงใช้ความถี่ในช่วง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ - 10 เมกะเฮิร์ตซ์ส่วนความถี่ที่เป็นจิกะเฮิร์ตซ์จะมีการใช้งานในตัวกลางที่คลื่นเดินทางนั้นไม่ใช่ในอากาศแต่เป็นตัวกลางชนิดอื่นๆ เช่นน้ำ เป็นต้น

จากการมีทิศทางของคลื่นอัลตราโซนิกส์ทำให้เรานำไปใช้งานได้หลายอย่างเช่นนำไปใช้

ในเครื่องควบคุมระยะไกล (Ultrasonic Remote Control) เครื่องล้างอุปกรณ์ (Ultrasonic Cleaner) เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งคลื่นเสียงสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยให้น้ำหนักที่ความถี่สูงเครื่องวัดความหนาของวัสดุใช้ทดสอบการรั่วของท่อเป็นต้น โดยความถี่ที่ใช้ขึ้นอยู่กับการใช้งานเช่นถ้าคลื่นเสียงต้องเดินทางผ่านอากาศความถี่ที่ใช้มักจะจำกัดอยู่เพียงไม่เกิน 50 กิโลเฮิร์ตซ์เพราะที่ความถี่สูงกว่านี้อากาศจะดูดคลื่นเสียงเพิ่มขึ้นทำให้ระดับความแรงของคลื่นเสียงที่ระยะห่างออกไปลดลงอย่างรวดเร็ว

## 2.4.5 อัลตราโซนิคส์ ทรานสดิวเซอร์

อัลตราโซนิคส์ ทรานสดิวเซอร์คืออุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานกลโดยการสั่นไปมาซึ่งทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิคส์กระจายไปในวัตถุตัวกลางหรือจากพลังงานของคลื่นอัลตราโซนิคส์แปลงเป็นพลังงานกลซึ่งสามารถทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นจากตัวทรานสดิวเซอร์

ทรานสดิวเซอร์ที่ทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิคส์มี 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

- 1) ทรานสดิวเซอร์ทางกล (Mechanical Transducers)
- 2) อิเล็กโตรเมคานิคัลทรานสดิวเซอร์ (Electromechanical Transducers)

อิเล็กโตรเมคานิคัลทรานสดิวเซอร์จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางเสียงที่ใช้กันอยู่มี 3 ชนิดคือ

### 2.1) แบบขดลวดเคลื่อนที่ (Moving Coil)

แบบขดลวดเคลื่อนที่นี้จะคล้ายแบบขดลวดเคลื่อนที่ของลำโพงซึ่งมีประโยชน์ในการใช้เป็นตัวต้นของการทดสอบความแรงของอุปกรณ์แบบขดลวดเคลื่อนที่ชนิดรีบอนซึ่งจะทำด้วยอลูมิเนียมบางๆ วางไว้ระหว่างขั้วทั้งสองของแม่เหล็กมันจะทำงานเสมือนเป็นขดลวดของแบบขดลวดเคลื่อนที่ซึ่งใช้ทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิคส์ในการศึกษาคุณสมบัติในการดูดคลื่นอัลตราโซนิคส์ของก๊าซ

### 2.2) แบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic)

แบบไฟฟ้าสถิตจะใช้หลักการที่ว่าในระหว่างแผ่นขนานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแผ่นโลหะขนาดสองแผ่นพร้อมไดอิเล็กทริกเต็มช่องว่างระหว่างแผ่นเมื่อเราให้ความต่างศักย์ระหว่างแผ่นทั้งสองจะทำให้เกิดแรงขึ้นหลักการใหญ่ของมันจะใช้ทำลำโพงที่มีคุณภาพสูงแต่การทำให้เกิดการสั่นแบบคลื่นอัลตราโซนิคส์ในของแข็งแบบที่ 1 และแบบที่ 2 นั้นไม่ค่อยจะใช้กันส่วนแบบที่ 3 และแบบที่ 4 จะนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

### 2.3) แบบเปียโซอิเล็กทริกและแบบเฟอร์โรอิเล็กทริก

แบบเปียโซอิเล็กทริกและแบบเฟอร์โรอิเล็กทริกในผลึกประกอบไปด้วยโพลาไรซ์โมเลกุลซึ่งจุดศูนย์กลางของความสมมาตรถ้าตัดเอาเพลทอันเนื่องมาจากผลึกนี้แล้วทำให้เกิดการบิดงอด้วยเครื่องมือกลซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นระหว่างผิวหน้าทั้งสองของเพลทและปรากฏการณ์นี้

เรียกว่าผลโดยตรงของเปียโซอิเล็กทริกระหว่างผิวหน้าทั้งสองของเพลทนี้จะเกิดการบิดเบี้ยวไปเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

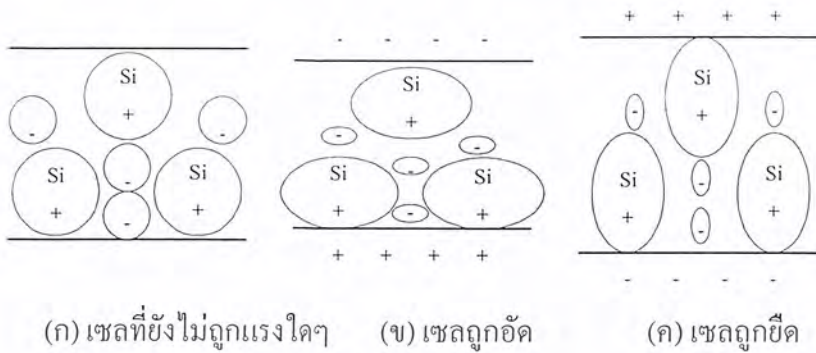
จะเรียกปรากฏการณ์ว่าผลในทางตรงกันข้ามของเป็ยโซอิเล็กทริกตัวอย่างเช่นผลึกควอทซ์เป็นต้น  
 ดังจะเห็นรูปที่ 2.17 ซึ่งแสดงถึงหนึ่งหน่วยเซลล์ที่อยู่ระหว่างเพลทที่ขนานกัน

รูปที่ 2.17 (ก) จะอยู่ในสภาวะปกติจุดศูนย์กลางถ่วงของประจุไฟฟ้าของซิลิคอนกับประจุไฟฟ้า  
 ลบของออกซิเจนอยู่ที่เดียวกันและจำนวนประจุไฟฟ้าทั้งสองเท่ากันจะไม่เกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้น  
 ดังนั้นผลเนื่องจากการกระจายของประจุไฟฟ้าตลอดรอมระนาบทั้งสองที่ขนานกันจึงเป็นศูนย์รูปที่  
 2.17 (ข) ถ้าทำให้มันเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมโดยการจัดให้หดหรือดัดดังรูปที่  
 2.17 (ค) จุดศูนย์กลางถ่วงของประจุไฟฟ้าทั้งสองจะไม่อยู่ที่เดียวกันซึ่งทำให้เกิดการกระจายของประจุ  
 ไฟฟ้าขึ้นระหว่างระนาบทั้งสองการทำให้เปลี่ยนแปลงรูปร่างด้วยการอัดหรือการหดตามรูปร่างนั้นจะเป็น  
 การแยกจุดศูนย์กลางถ่วงผลจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าปรากฏบนระนาบทั้งสองซึ่งในรูปแบบนี้เรียกว่าผล  
 โดยตรงของเป็ยโซอิเล็กทริก

สำหรับผลในทางตรงกันข้ามของเป็ยโซอิเล็กทริกจะเกิดได้โดยให้สนามไฟฟ้าระหว่าง  
 เพลททั้งสองทำให้จุดศูนย์กลางถ่วงของทั้งสองประจุไฟฟ้าเคลื่อนออกจากกันในทิศทางตรงกันข้ามซึ่ง  
 จะทำให้เซลล์บิดเบี้ยวไปถ้ามีแผ่นควอทซ์ซึ่งตัดมาจากผลึกควอทซ์ในทิศทางที่จะทำให้เกิดการ  
 สั่นสะเทือนขนานกับสนามไฟฟ้าที่ใช้เมื่อเราให้สนามไฟฟ้ากระแสสลับเพลทนี้จะขยายและหดตัว  
 ด้วยความถี่เดียวกันของกับสนามไฟฟ้าซึ่งจะเหมือนกับลูกสูบดังนั้นมันจะเป็นตัวกำเนิดคลื่นเสียง  
 ได้

ปัจจุบันมีสารไม่กี่ชนิดที่ให้ปรากฏการณ์เป็ยโซอิเล็กทริก สารไดอิเล็กทริกทุกชนิดเป็น  
 สารอิเล็กโตรสแตติกแต่ปกติผลนี้จะน้อยมาก แต่สารที่ให้ผลมากได้แก่สารไททาเนตสารซีคอนเท  
 และในกรณีเช่นนี้เราเรียกว่าสารเฟอร์โรอิเล็กทริก ปกติแล้วสารเหล่านี้มีมากกว่าสาร  
 เฟอร์โรอิเล็กทริกปกติสารเหล่านี้จะอยู่ในรูปของส่วนผสมเซรามิกซึ่งประกอบไปด้วยโคเมนที่มีขั้ว  
 อิสรระรวมตัวกันหลายๆ ถ้านำสารแบบนี้มาสักหนึ่งชนิดแล้วนำไปเผาให้สูงกว่าอุณหภูมิเคอริกของ  
 มันและทำให้เย็นภายใต้สนามไฟฟ้าสูงๆ ทิศทางของขั้วโคเมนต่างๆ จะวางไปแนวเดียวกับ  
 สนามไฟฟ้าและยังคงอยู่ต่อไปเช่นนั้นแม้ว่าจะเอาสนามไฟฟ้าออกไปนั้นแสดงว่ามันจะแสดง  
 คุณสมบัติเช่นเฟอร์มาเนทอิเล็กทริกเป็นต้นบางทีมันจะเป็นสารเป็ยโซอิเล็กทริกถ้าหากมันเป็นไป  
 ตามสมการของสารเป็ยโซอิเล็กทริกตามธรรมชาติ จะใช้สมการเหล่านี้อธิบายคุณสมบัติของสาร  
 เป็ยโซอิเล็กทริกแท้ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 คุณสมบัติของสารเป็ยโซอิล็กทริก

### 2.4.6 คุณสมบัติทั่วไปของทรานสดิวเซอร์

ทรานสดิวเซอร์ที่ใช้กันทางอตราโซนิคส์นั้นมึคุณสมบัติพิเศษคือผลของเป็ยโซอิล็กทริกและที่ใช้กันมากคือแร่ควอทซ์ซึ่งเมื่อนำมาทำเป็นทรานสดิวเซอร์ยังจะแสดงคุณสมบัติเป็นคาปาซิเตอร์ทางไฟฟ้าค่าคาปาซิแตนซ์เป็นไมโครฟารัดจะได้ค่าสัดส่วนของไดอิล็กทริกของวัสดุคุณด้วยพื้นที่หารด้วยความหนาโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์มีความคล้ายกับคาปาซิเตอร์ที่ว้อล็กโทรดที่อยู่สองข้างถูกแยกโดยช่องที่มีสารเซรามิก ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติบางประการของสารเซรามิกที่ได้รับความร้อนจะทำให้ไดโพลเคลื่อนไหวได้โดยเสรีและที่จุดนี้เมื่อได้รับศักย์ไฟฟ้าเข้าไปก็จะมีการจัดเรียงตัวและมีคุณสมบัติเป็ยโซอิล็กทริกถ้าภายหลังเซรามิกที่มีคุณสมบัตินี้ถูกเผาให้ร้อนถึงอุณหภูมิดังกล่าวคุณสมบัติเป็ยโซอิล็กทริกจะหมดไปดังนั้นความร้อนจะทำลายทรานสดิวเซอร์และโดยเฉพาะถ้าอุณหภูมิสูงเกินอุณหภูมิเคอริกค่าคงที่ไดอิล็กทริกเป็นค่าทรานสดิวเซอร์ที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าจึงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้ซึ่งแบรียมิตานทจะมีค่ามากกว่าผลึกแร่ควอทซ์ 5 - 6 เท่าเนื่องมาจากค่าไดอิล็กทริกต่ำมากและค่าคงที่ต่ำดังนั้นจึงไม่ค่อยได้นำควอทซ์มาใช้ในเครื่องอตราโซนิคส์ในปัจจุบัน

### 2.4.7 คุณสมบัติความถี่ของทรานสดิวเซอร์

ความถี่ของทรานสดิวเซอร์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเชิงกลและลักษณะรูปร่างความถี่ของทรานสดิวเซอร์จะหาได้ดังตัวอย่างเช่นเซรามิกแท่งเหลี่ยมแบนจะมีความถี่เรโซแนนซ์ได้สามอย่างคือมีการยืดหดตัวตามความหนาและตามรัศมีและอย่างไรก็ดีเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปสามารถทำให้ทรานสดิวเซอร์ยืดหดตัวในแนวไหนก็ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับขั้วไฟฟ้าที่ใช้บริษัทที่ทำทรานสดิวเซอร์จะกำหนดค่าความถี่ซึ่งที่สำหรับแต่ละแบบของการยืดหด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติบางอย่างของสารเซรามิก

| ชนิดของสาร           | อุณหภูมิเคอริก<br>(°C) | ประจุไฟฟ้า (Q) | ค่าคงที่<br>ไดอิเล็กทริก (K) | ค่าคงที่ |
|----------------------|------------------------|----------------|------------------------------|----------|
| ควอทซ์               | 550                    | สูงมาก         | 4.5                          | 0.09     |
| แบเรียมดี<br>ทานาท   | 100                    | 400-700        | 1700                         | 0.38     |
| ลิตเซอโคเนท<br>ทานาท | 300                    | 90-500         | 1450                         | 0.51     |

### 2.4.8 เปียโซทรานสดิวเซอร์

โครงสร้างภายในจะประกอบด้วยชั้นสารเปียโซอิเล็กทริกซึ่งสามารถทำได้จากสารหลายชนิดด้วยกันเช่นผลึกควอทซ์, แบเรียมดีทานาทเป็นต้น แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือชั้นสารที่ทำจากแบเรียมดีทานาทซึ่งได้จากการผสมสารดีเตเนียมกับสารแบเรียมคาบอเนทที่ระดับอุณหภูมิประมาณ 1300 – 1400 องศาเซลเซียสและผลึตออกมาในรูปของชั้นสารเซรามิกซึ่งจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมโดยส่วนใหญ่ชั้นเซรามิกนี้จะถูกประกบด้วยแผ่นเพลท 2 แผ่นซึ่งส่วนใหญ่ทำมาจากแผ่นเงินเพื่อต่อเป็นขาของอิเล็กทรอนิกส์นั่นเองด้านข้างหนึ่งของเพลทจะถูกยึดเพื่อไม่ให้เกิดการสั่นส่วนอีกด้านจะถูกยึดกับแผ่นไดอะเฟรมซึ่งสามารถเคลื่อนไหวไปมาได้โดยแผ่นไดอะเฟรมนี้จะถูกสร้างให้มีลักษณะคล้ายกับเลนส์เพื่อที่จะรวมคลื่นให้มีความเร็วสูงขึ้นซึ่งจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างต่อไป

### 2.4.9 ผลของเปียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์แบบเปียโซอิเล็กทริกสามารถอธิบายได้คือเมื่อสภาวะปกติยังไม่มีแรงดันหรือคลื่นมากระทบชั้นสารเซรามิกประจุไฟฟ้าในชั้นสารจะเกิดการสมดุลทำให้แผ่นเพลทเงินที่ประกบอยู่มีศักย์ไฟฟ้าเท่ากัน ซึ่งผลรวมของประจุไฟฟ้าบนแผ่นเพลทมีค่าเท่ากับศูนย์แต่เมื่อมีแรงดันหรือคลื่นเสียงมากระทบชั้นสารเซรามิกจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของชั้นสารคือมีการโค้งงอไปตามลักษณะของคลื่นที่มาตกกระทบซึ่งในกรณีนี้จะทำให้เกิดการจัดเรียงประจุคือเกิดมีประจุตรงข้ามขึ้นที่ประกบชั้นสารเซรามิกอยู่ซึ่งผลของประจุไฟฟ้าตรงข้ามนี้ทำให้เกิดเป็นแรงดันหรือคลื่นที่มาตกกระทบชั้นสารเซรามิกที่โค้งงอไปตามลักษณะคลื่นที่มาตกกระทบ

ทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริกสามารถเปลี่ยนแปลงไปมาได้ระหว่างพลังงานกลกับพลังงาน  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้ากรณีเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลคือตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิคส์จะทำงานก็ต่อเมื่อเราป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งอาจมีความถี่ในช่วง 20 - 100 กิโลเฮิร์ตซ์ แรงดันที่ป้อนนี้ทำให้ชิ้นสารเซรามิกเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยที่ด้านหนึ่งของชิ้นสารเซรามิกถูกกดกับแผ่นไดอะเฟรมและเมื่อชิ้นสารเซรามิกเกิดการบิดตัวไปมาทำให้แผ่นไดอะเฟรมนี้อัดกับอากาศโดยรอบจึงเกิดเป็นคลื่นความถี่สัญญาณที่ป้อนเข้ามาซึ่งคลื่นที่ผลิตได้จะมีกำลังเอาต์พุตสูงสุดก็ต่อเมื่อความถี่ที่ป้อนเข้ามาตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ซึ่งจะเป็นความถี่ทางกลตามธรรมชาติของชิ้นสารเซรามิกชิ้นนั้นจะทำให้ความถี่อื่นๆ นอกเหนือจากนี้จะมีค่าลดลงกว่าความถี่เรโซแนนซ์มาก

ในทางกลับกันการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าคือตัวรับคลื่นอัลตราโซนิคส์จะทำงานก็ต่อเมื่อมีคลื่นความดันมาตกกระทบแผ่นไดอะเฟรมซึ่งค่าความถี่ของคลื่นทำให้ชิ้นสารเซรามิกถูกบีบไปมาซึ่งจะทำให้เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกบนชิ้นสารทำให้สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่เดียวกับคลื่นที่มาตกกระทบได้

## 2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบหนึ่งที่ได้รวบรวมเอาหน่วยประมวลผลหน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิกวงจรรับสัญญาณอินพุตรวมทั้งวงจรขับสัญญาณเอาต์พุตหน่วยความจำและวงจรถ่ายค่าสัญญาณนาฬิกาไว้ด้วยกันทำให้สามารถนำไปใช้งานแทนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีช่วยลดจำนวนอุปกรณ์และขนาดของระบบในขณะที่มีขีดความสามารถสูงขึ้น ภายใต้งบประมาณที่เหมาะสม

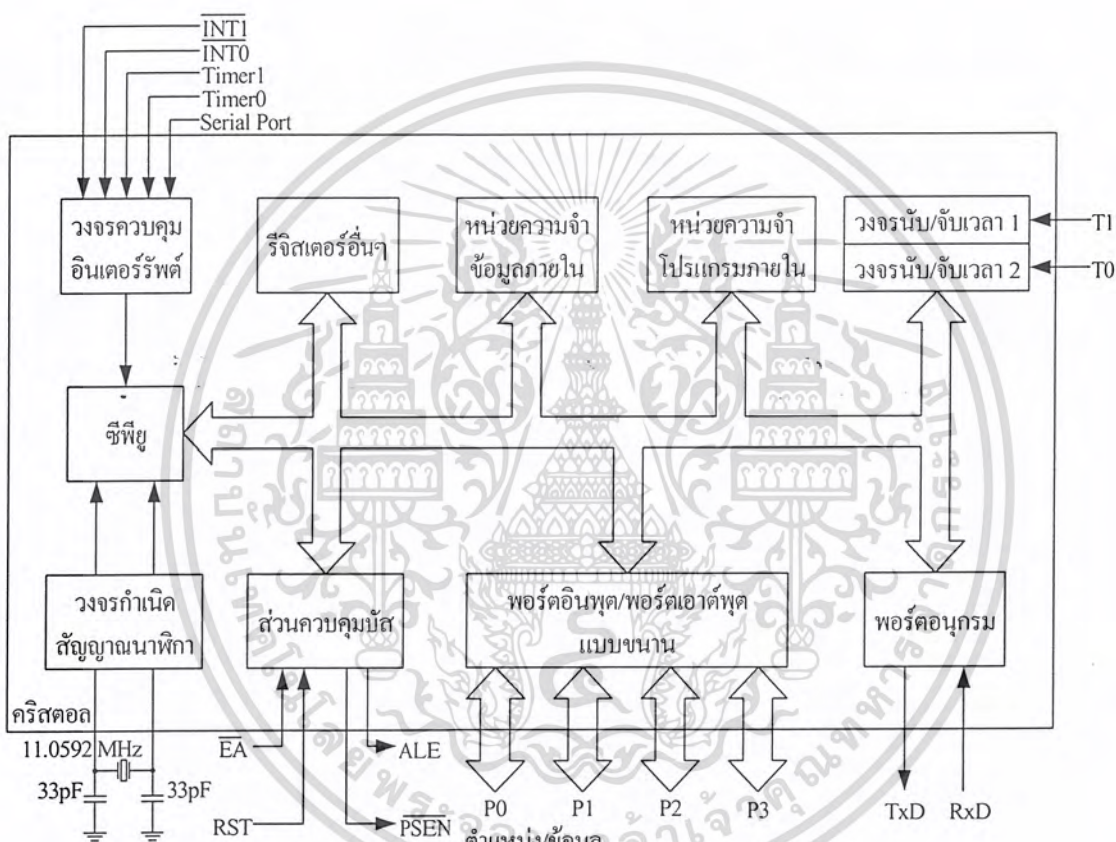
### 2.5.1 คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

1. เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ซีพียูขนาด 8 บิต
2. ภายในมีหน่วยความจำโปรแกรมเป็นแบบแฟลชสามารถลบและเขียนใหม่ได้
3. หน่วยความจำข้อมูลพื้นฐานเป็นหน่วยความจำแบบแรมในบางเบอร์จะมีหน่วยความจำแบบอีอีพรอมเพิ่มเติม
4. ขาพอร์ตเป็นแบบสองทิศทาง สามารถใช้งานเป็นได้ทั้งอินพุตและเอาต์พุต
5. มีวงจรสื่อสารอนุกรมแบบฟูลดูเพล็กซ์
6. ไทมเมอร์/คาน์เตอร์ขนาด 16 บิตอย่างน้อย 2 ตัว
7. สามารถรองรับแหล่งกำเนิดอินเตอร์รัปต์ได้ 6 ประเภท
8. สามารถขยายหน่วยความจำภายนอกเพิ่มเติมได้สูงสุด 64 กิโลไบต์
9. มีวงจรถ่ายค่าสัญญาณนาฬิกาอยู่ในชิป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.2 โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะประกอบไปด้วยเทคนิคต่างๆ เช่นแอนด์เกตออร์เกต หรือนีตเกตเป็นต้นเกตเหล่านี้สามารถนำมาออกแบบให้มีหน้าที่การทำงานต่างๆ เช่นวงจรบวกเลข วงจรเลื่อนข้อมูลวงจรถอดรหัสคำสั่ง และวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา เป็นต้น



รูปที่ 2.18 โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ในรูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ซึ่งสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

#### 1) หน่วยประมวลผลกลาง

ประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนประมวลผลทางคณิตศาสตร์จะทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูล เช่น การบวก การลบ การคูณ หรือการหารข้อมูลแล้วนำผลลัพธ์ไปเก็บไว้ในหน่วยความจำที่ต้องการ และส่วนควบคุม ทำหน้าที่สร้างสัญญาณควบคุมในการติดต่อกับส่วนอื่นๆ สัญญาณที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สร้างจากวงจรควบคุม ได้แก่ สัญญาณสำหรับการติดต่อกับหน่วยความจำ สัญญาณติดต่อกับอุปกรณ์รับข้อมูลเข้าหรือส่งข้อมูลออกรวมทั้งส่วนควบคุมการเข้าจังหวะและส่วนควบคุมบัสด้วย ซีพียูจะทำการสร้างสัญญาณควบคุมโดยการถอดรหัสคำสั่งที่ได้กำหนดไว้และสัญญาณที่สร้างขึ้นจะอ้างอิงกับสัญญาณนาฬิกาที่สร้างจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณนาฬิกาเพื่อให้ทุกส่วนทำงานประสานกันอย่างถูกต้อง

2) หน่วยความจำ มีหน้าที่จำข้อมูลซึ่งการนำข้อมูลเข้าหรือออกจากหน่วยความจำจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของหน่วยความจำในการนำข้อมูลไปเก็บในหน่วยความจำเรียกว่าการเขียนข้อมูลในการอ่านข้อมูลในไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ข้อมูลในแต่ละตำแหน่งจะมีขนาด 8 บิตดังนั้นในแต่ละตำแหน่งของหน่วยความจำจะสามารถเก็บข้อมูลซึ่งมีค่าระหว่าง 00000002 ถึง 11111112 หรือ 00H ถึง 0FFH ในการติดต่อกับหน่วยความจำจะต้องมีสัญญาณ 3 กลุ่มคือ

1. ตำแหน่งที่ติดต่อกับหน่วยความจำซึ่งสามารถติดต่อกับหน่วยความจำ โปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลได้สูงสุดชนิดละ 65,536 ตำแหน่ง 64 กิโลไบต์ดังนั้นการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำจะต้องใช้สายสัญญาณกำหนดตำแหน่งทั้งหมด 16 เส้น
2. ข้อมูลที่อ่านหรือเขียนกับหน่วยความจำในบริเวณตำแหน่งที่ต้องการ
3. สัญญาณควบคุมที่ส่งไปยังหน่วยความจำเพื่อบอกกับหน่วยความจำเมื่อต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลซึ่งวงจรถอดรหัสคำสั่งทำการสร้างสัญญาณควบคุมจากคำสั่งที่อ่านเข้ามาจากหน่วยความจำโปรแกรม

3) อุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุต เป็นส่วนที่ใช้ส่งข้อมูลเข้าหรือนำข้อมูลออกจาก MCS-51 ทำให้สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ อุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุต ได้แก่

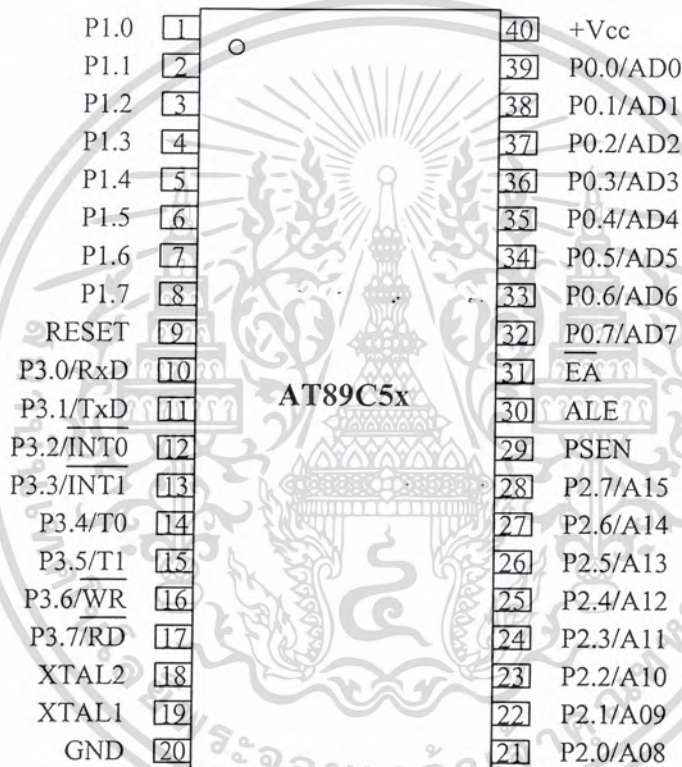
1. พอร์ตอินพุต/เอาต์พุตแบบขนาน 4 พอร์ต ใช้รับส่งข้อมูลเป็นสัญญาณดิจิทัลเข้าหรือออกจาก MCS-51 โดยแต่ละพอร์ตจะรับส่งข้อมูลได้ 8 บิต พอร์ต P0, P1, P2 และ P3 บางพอร์ตจะใช้งานมากกว่าหนึ่งหน้าที่

2. วงจรนับ/จับเวลาทำงานได้ 2 หน้าที่คือใช้เป็นวงจรรนับหรือจับเวลาเมื่อเป็นวงจรรนับจะทำการนับจำนวนรอบของสัญญาณนาฬิกาภายใน MCS-51 ก็ได้ สามารถตั้งค่าเริ่มต้นของการนับและอ่านค่าการนับได้โดยซีพียูเมื่อเป็นวงจรรจับเวลาจะใช้หลักการเดียวกันกับวงจรรนับเพียงแต่จะกำหนดค่าสูงสุดของการนับไว้ซึ่งค่าสูงสุดของการนับจะคำนวณมาจากเวลาที่ต้องการจับเวลานั้นเอง

3. พอร์ตอนุกรมซีพียูจะอ่านและเขียนข้อมูลกับพอร์ตอนุกรมเป็นแบบ 8บิตซึ่งแต่ละข้อมูลจะถูกส่งออกจาก MCS-51 เรียงไปครั้งละบิตออกจากขา TxD และในการรับข้อมูลจะรับเข้ามาครั้งละบิตทางขา RxD แล้วจัดเรียงใหม่เป็น 8 บิตเพื่อให้ซีพียูอ่านไปใช้งานต่อไป

### 2.5.3 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ทุกเบอร์จะมีสถาปัตยกรรมและขาใช้งานพื้นฐานเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 2.19 ดังนี้



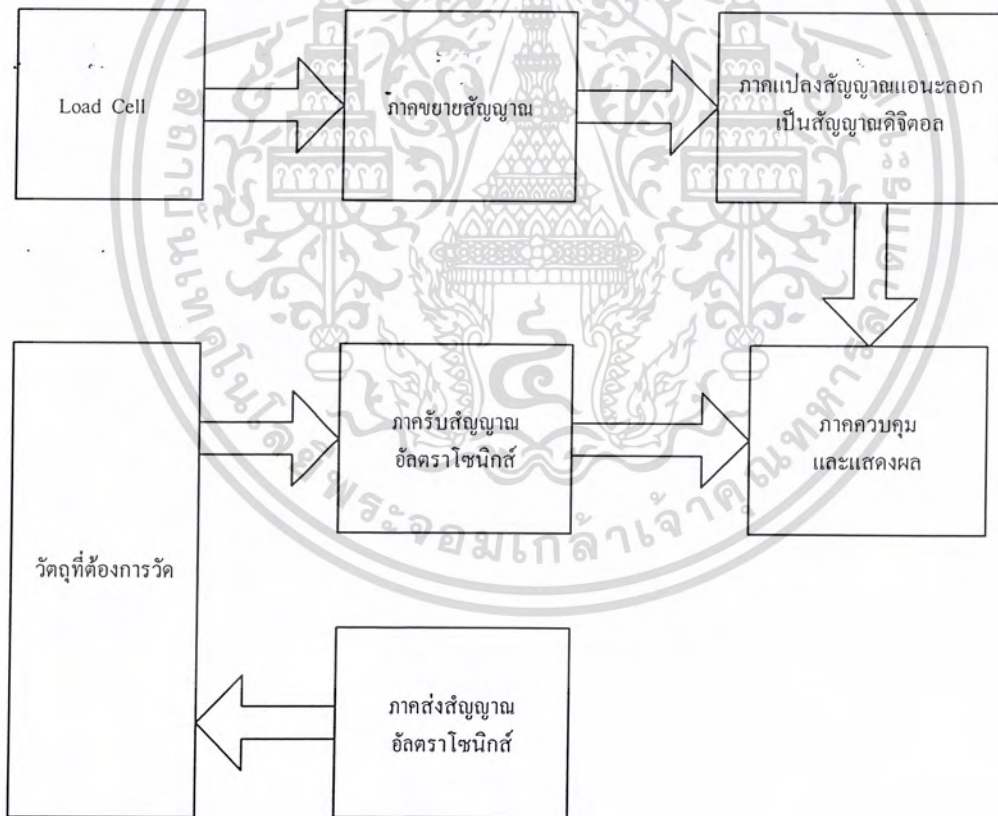
รูปที่ 2.19 การจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

# บทที่ 3

## การออกแบบ การสร้าง และการทำงาน

### 3.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบได้ออกแบบเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติแยกส่วนออกจากกัน ในส่วนของเครื่องชั่งน้ำหนักจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ ตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้า ภาครับ-ส่งคลื่นอัลตราโซนิกส ภาจขยายสัญญาณ ภาจแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ดิจิตอล ภาจควบคุมและแสดงผล โครงสร้างของเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ

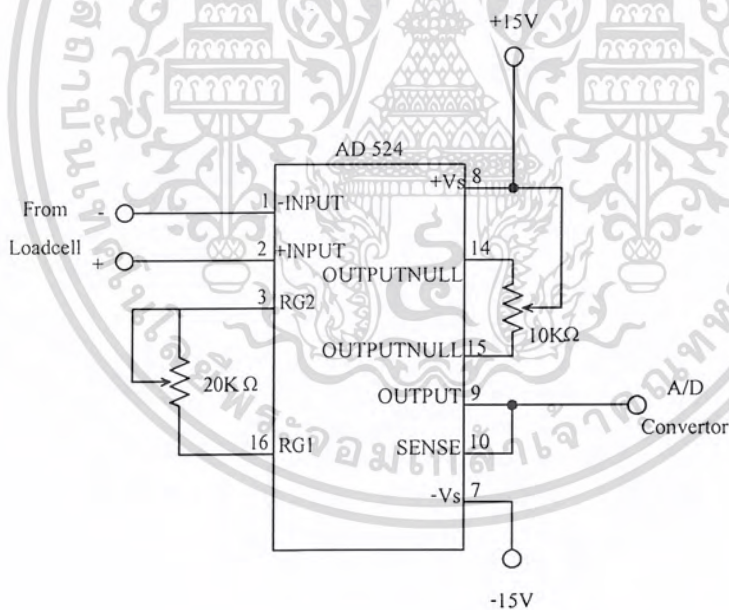
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้า

ตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้าในปริณูณานิพนธ์นี้ใช้โพลดเซลล์เบอร์ MODEL 1242 ของบริษัท TEDEA ซึ่งรับน้ำหนักได้สูงสุด 150 กิโลกรัม แรงดันไฟฟ้าที่ได้ี้จะมีค่าที่ต่ำมากจึงต้องเข้าวงจรขยายสัญญาณเพื่อให้ได้ขนาดแรงดันที่สูงขึ้นตามต้องการ

### 3.3 ภาคขยายสัญญาณ

สัญญาณที่ได้จากตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้าจะมีขนาดเล็กมากไม่สามารถนำไปใช้งานได้จึงต้องนำมาขยายสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและเหมาะแก่การใช้งานวงจรที่ใช้ในการขยายสัญญาณจะใช้วงจรขยายแรงดันอินส์ทรูเมนเทชั่นแอมพลิไฟเออร์ที่มีความเที่ยงตรงสูงในที่นี้ใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ AD 524 ของบริษัท Analog Device ซึ่งแสดงวงจรดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรภาคขยายสัญญาณ

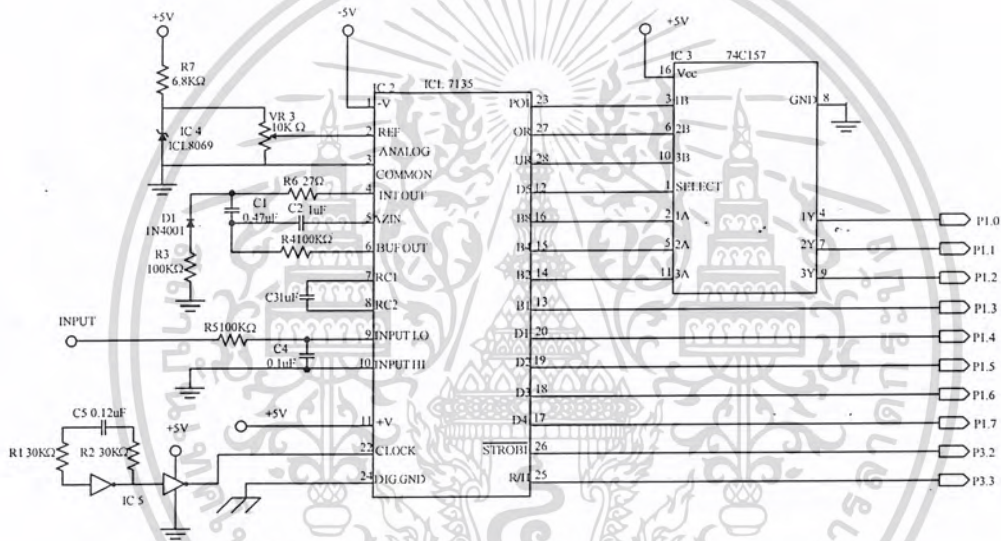
การทำงานของ AD 524 จะรับแรงดันที่มาจากตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้าเข้ามาทางขา 1 และขา 2 และขยายแรงดันออกทางขา 9 การปรับอัตราขยายใช้ค่าความต้านทานแบบปรับค่าได้ค่า 10 KΩ ต่อระหว่างขา 16 กับขา 13 และทำการปรับค่าความต้านทานเพื่อเพื่อให้ได้อัตราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายตามต้องการซึ่งในที่นี้ก็คือการปรับอัตราการขยายเพื่อให้ได้แรงดัน +2 โวลต์เมื่อชั่งน้ำหนัก 150 กิโลกรัม และใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ค่า 20 KΩ ต่อระหว่างขา 4 ขา 5 และขา 8 เพื่อทำการปรับแรงดันเอาต์พุตเท่ากับ 0 โวลต์ขณะที่ไม่ได้ชั่งน้ำหนักหรือน้ำหนักเท่ากับ 0 กิโลกรัม

### 3.4 ภาคแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

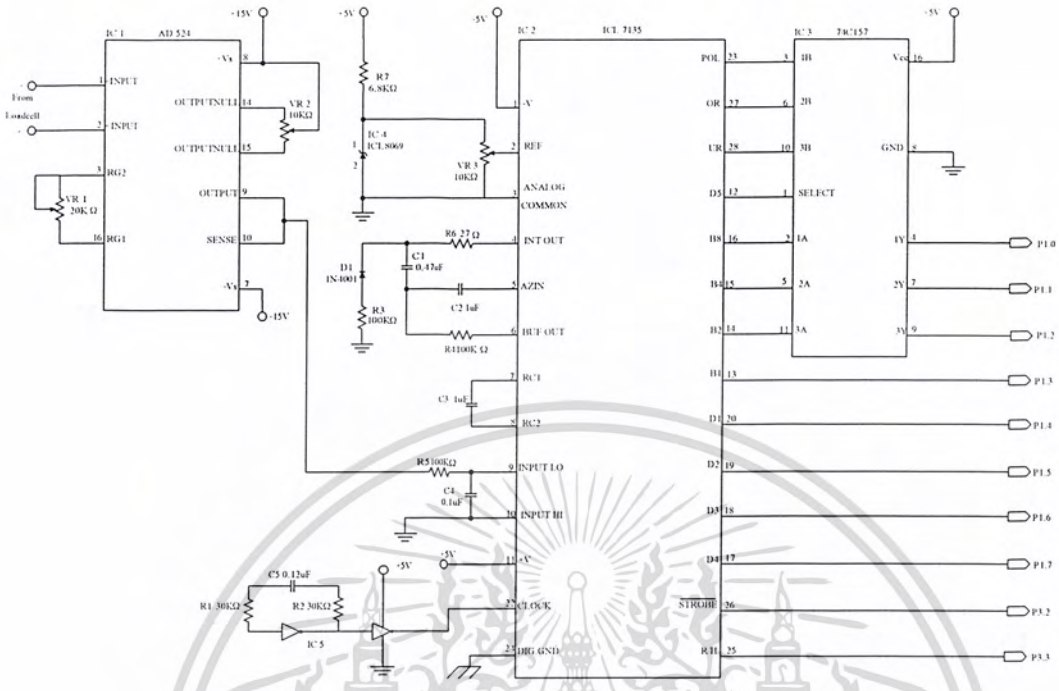
ภาคแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลใช้ไอซีแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลเบอร์ ICL 7135 ซึ่งแสดงการต่อวงจรดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรภาคแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล

การทำงานของวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลใช้ไอซีเบอร์ ICL 7135 ซึ่งเป็นไอซีโวลต์มิเตอร์ที่มีอัตราการสุ่มของข้อมูลที่เป็นข้อมูล (DATA) 4 บิต และเป็นตัวเลือก (SELECT) อีก 4 บิต นั่นก็หมายความว่า ICL 7135 สามารถแสดงผลออกมาได้ 4 หลัก โดยการสแกนการต่อใช้งานจะต้องมีแรงดัน -5V จ่ายให้ขา 1 แรงดันไฟ +5V จ่ายให้ขา 11 ที่ขา 2 จะเป็นขาที่ใช้ในการอ้างอิงแรงดันซึ่งต้องป้อนแรงดัน 1 V ขา 3 จะเป็นขาแอนะล็อกกราวด์ ขา 9 และขา 10 จะเป็นขาอินพุตที่รับค่ามาจากวงจรขยายสัญญาณ ที่ขา 22 จะต้องป้อนสัญญาณนาฬิกาซึ่งป้อนได้สูงสุดไม่เกิน 1.2 เมกะเฮิรตซ์การป้อนสัญญาณนาฬิกามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความต้องการในการสุ่มมากน้อยเพียงใดเมื่อนำภาคขยายสัญญาณและภาคแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลมาใช้งานร่วมกันจะทำให้ได้วงจรรวมเครื่องชั่งน้ำหนักดังรูปที่ 3.4

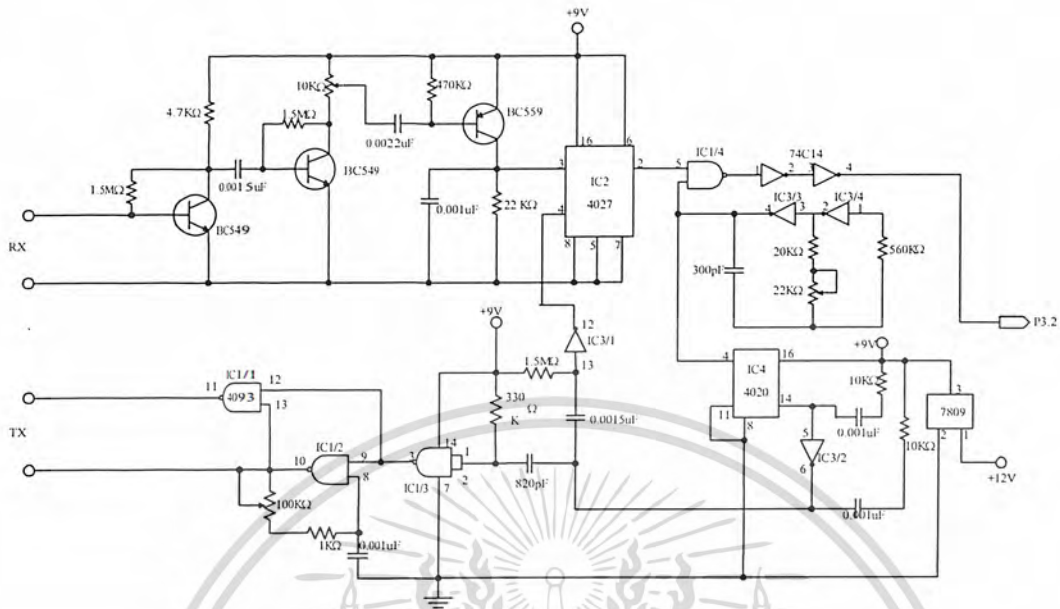
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 วงจรรวมเครื่องขงนำหนัก

### 3.5 ภาครับ-ส่งคลื่นอัลตราโซนิกส์

การทำงานของวงจรับและส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์จะประกอบด้วย สวิตซ์เกต วงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ วงจรกำเนิดความถี่ 40 กิโลเฮิรซ์ และวงจรมกำเนิดความถี่ 17.3 กิโลเฮิรซ์ ซึ่งเป็นค่าความถี่ที่จะหาได้จากความเร็วของเสียงในอากาศเท่ากับ 346 เมตรต่อวินาทีหารด้วยระยะทางระหว่างหัวรับและหัวส่งคลื่นอัลตราโซนิกส์ ซึ่งจะมีระยะทางเป็น 2 เท่าซึ่งสามารถแสดงวงจรดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรรับและส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์

วงจรกำเนิดความถี่ 17.3 กิโลเฮิร์ตซ์ จะประกอบไปด้วยไอซี IC3/2 ไอซี IC3/3 ทำหน้าที่ผลิตความถี่ 17.3 กิโลเฮิร์ตซ์ ไอซี IC 1/2 ทำหน้าที่กำเนิดความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อใช้ขับหัวส่งคลื่นอัลตราโซนิกส์ ไอซี IC 4 ทำหน้าที่หารค่าความถี่ 17.3 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งมีผลทำให้ได้ค่าเอาต์พุต 1 เฮิร์ตซ์ ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของวงจร โมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์ชุดที่ 1 ที่ไอซี IC 1/3 จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของสวิตช์เกต 1 และสวิตช์เกต 2 จะประกอบด้วยไอซี IC 1/1 ทำหน้าที่ควบคุมการส่งสัญญาณความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ให้กับหัวส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์ส่วนวงจรโมโนสเตเบิลมัลติไวเบเรเตอร์ชุดที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยไอซี IC 3/1 จะทำหน้าที่ในการควบคุมการรีเซ็ตค่าของวงจรฟลิปฟล็อปในส่วนของวงจรถ่ายจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่รับจากหัวรับคลื่นอัลตราโซนิกส์และส่งสัญญาณจากการขยายให้กับวงจรฟลิปฟล็อปถ้าไอซี IC 2 ขาที่ 2 มีสถานะเป็นลอจิก 1 ที่ไอซี IC 2 ขาที่ 2 มีสถานะเป็นลอจิก 0 จะทำให้สวิตช์เกต 2 เปิดถ้าไอซี IC 2 ขาที่ 3 มีสถานะเป็นลอจิก 0 ที่ไอซี IC 2 ขาที่ 2 มีสถานะเป็นลอจิก 1 ซึ่งทำให้สวิตช์เกต 2 ปิด ทำให้ความถี่ 17.3 กิโลเฮิร์ตซ์ สามารถส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์นับจำนวนช่วงเวลาของคลื่นพัลส์ความถี่ 17.3 กิโลเฮิร์ตซ์ ได้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

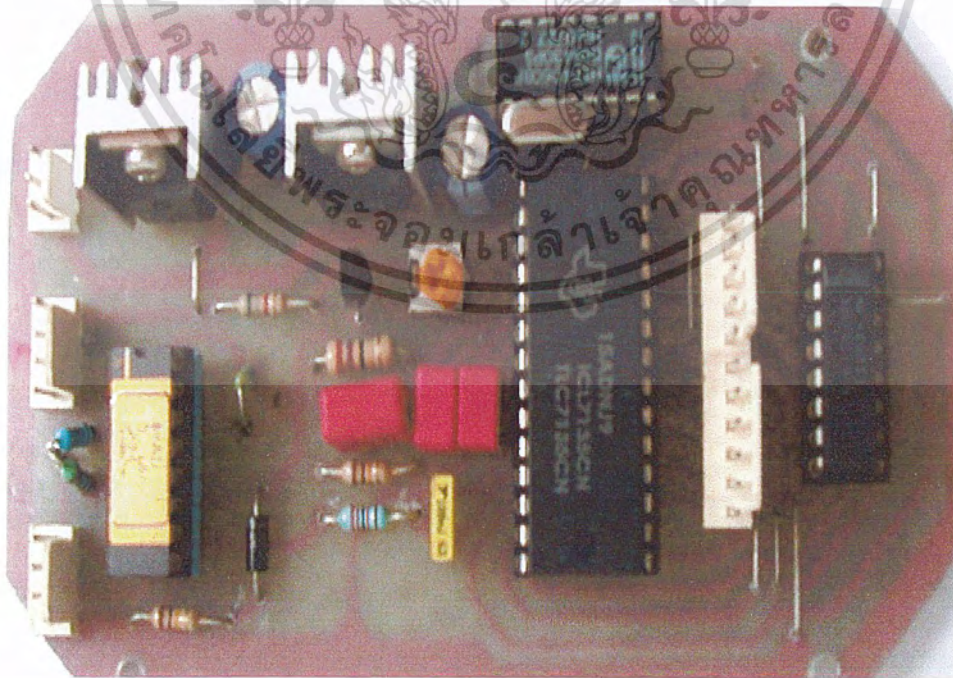
จากการทดลองและการตรวจสอบการทำงานของเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนของการทดลองในส่วนเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลจะประกอบไปด้วยภาคขยายสัญญาณ ภาคควบคุมและแสดงผลส่วนที่สองเป็นส่วนเครื่องวัดส่วนสูงจะประกอบไปด้วย ภาครับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์ ภาคควบคุมและแสดงผล

#### 4.1 การทดลองเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

##### 4.1.1 การทดลองภาคขยายสัญญาณ

###### 1) ลำดับขั้นการทดลอง

###### 1.1) ประกอบวงจรภาคขยายสัญญาณตามรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วงจรภาคขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.2) ประกอบวงจรภาคขยายสัญญาณเข้ากับตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้า
- 1.3) ตรวจสอบความถูกต้องของการประกอบวงจร
- 1.4) ทำการจ่ายไฟให้กับวงจรเพื่อทำการทดสอบ
- 1.5) ปรับแต่งหาอัตราขยายแรงดันตามต้องการ โดยการปรับค่าความต้านทาน  $10\text{K}\Omega$  เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการคือ  $+2\text{ V}$
- 1.6) ทำการปรับแต่งค่าความต้านทาน  $20\text{ K}\Omega$  เพื่อให้ได้แรงดันเอาต์พุตเป็น  $0\text{V}$  ขณะที่ไม่มีภาระชั่งน้ำหนัก
- 1.7) ทำการวางน้ำหนักลงไปยังตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้าในช่วงน้ำหนักต่างๆ ที่แตกต่างกันออกไป
- 1.8) ทำการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักที่วางลงไปกับแรงดันไฟฟ้าที่ขยายได้พร้อมทั้งบันทึกผลการทดลอง

## 2) ผลการทดลอง

เมื่อทำการปรับค่าความต้านทาน  $10\text{ K}\Omega$  ให้ได้ค่าความต้านทานที่เหมาะสมจะได้แรงดันเอาต์พุตตามต้องการคือ  $+2\text{ V}$  และการปรับค่าความต้านทาน  $20\text{ K}\Omega$  ให้ได้ค่าความต้านทานที่เหมาะสมก็จะได้แรงดันเอาต์พุตเป็น  $0\text{V}$  ขณะที่ไม่มีภาระชั่งน้ำหนักตามต้องการเมื่อมีการทดสอบวางน้ำหนักลงไปที่ตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้าในช่วงน้ำหนักต่างๆ ที่แตกต่างกันออกไป ภาคขยายสัญญาณสามารถขยายแรงดันไฟฟ้าออกมาตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลแรงของคณไฟฟ้าเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณ

| น้ำหนักที่ทดสอบ<br>(กิโลกรัม) | แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต<br>จากดิจิตอลมิเตอร์ (โวลต์) |
|-------------------------------|--|
| 0                             | 0.07   |
| 6                             | 0.11   |
| 12                            | 0.14   |
| 18                            | 0.17   |
| 24                            | 0.21   |
| 30                            | 0.24   |
| 36                            | 0.28   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลแรงของดันไฟฟ้าเอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณ

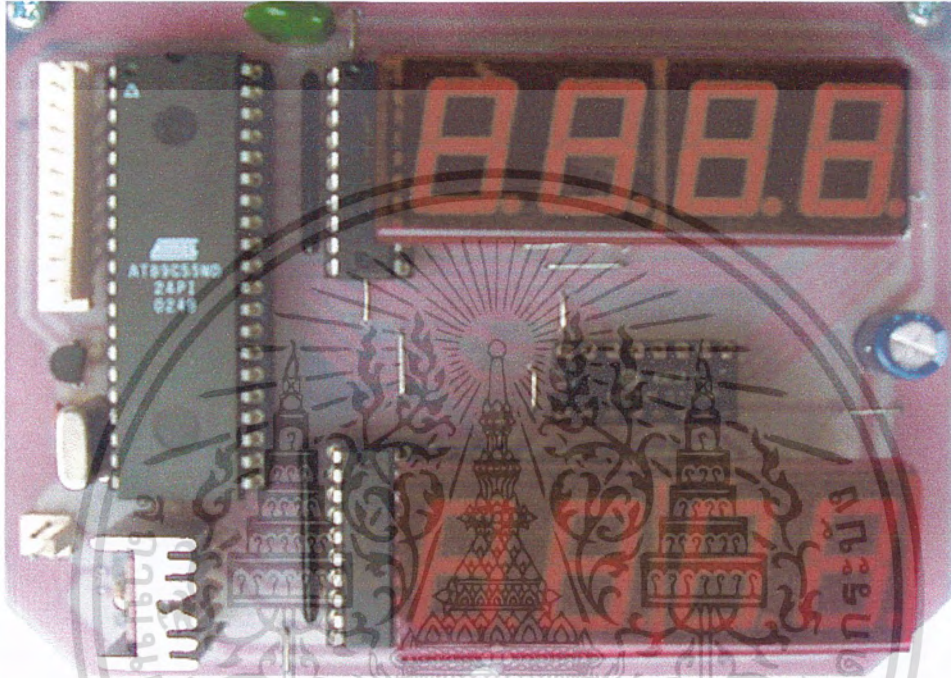
| น้ำหนักที่ทดสอบ<br>(กิโลกรัม) | แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต<br>จากดิจิตอลมิเตอร์ (โวลต์) |
|-------------------------------|--|
| 42                            | 0.31   |
| 48                            | 0.34   |
| 54                            | 0.38   |
| 60                            | 0.41   |
| 66                            | 0.44   |
| 72                            | 0.48   |
| 78                            | 0.52   |
| 84                            | 0.55   |
| 90                            | 0.58   |
| 96                            | 0.64   |
| 102                           | 0.70   |
| 108                           | 0.79   |
| 114                           | 0.82   |
| 120                           | 0.85   |
| 126                           | 0.89   |
| 132                           | 0.90   |
| 138                           | 0.92   |
| 144                           | 0.94   |
| 150                           | 0.95   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การทดลองภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

##### 1) ลำดับขั้นการทดลอง

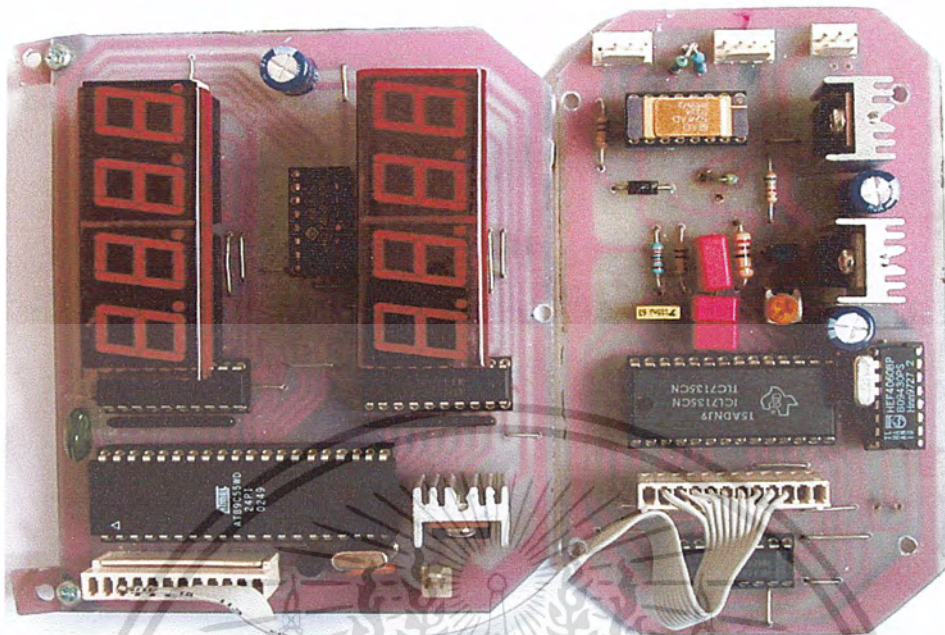
1.1) ประกอบวงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลตามรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 วงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล

1.2) ประกอบวงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลเข้ากับวงจรภาคขยายสัญญาณตามรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การประกอบวงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลเข้ากับวงจรภาคขยายสัญญาณ

- 1.3) ตรวจสอบความถูกต้องของการประกอบวงจร
- 1.4) ทำการเขียน โปรแกรมประมวลผลและแสดงผล
- 1.5) ทำการจ่ายไฟให้กับวงจรเพื่อทดสอบผลของการชั่งน้ำหนัก
- 1.6) ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกผลการทดลอง

## 2) ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดสอบวางน้ำหนักลงไปในตัวเปลี่ยนน้ำหนักเป็นแรงดันไฟฟ้าในช่วงน้ำหนักต่างๆ ที่แตกต่างกันออกไปภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัลสามารถแสดงผลที่ออกมาดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลของค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากเครื่องชั่งอัตโนมัติ

| น้ำหนักที่ทดสอบ<br>(กิโลกรัม) | น้ำหนักที่อ่านได้จากจาก<br>เครื่องชั่งอัตโนมัติ |       | ค่าความผิดพลาด<br>เปอร์เซ็นต์<br>(%) |
|-------------------------------|---|-------|--------------------------------------|
|                               | กิโลกรัม  | ปอนด์ |                                      |
| 0                             | 0   | 0     | 0                                    |
| 10                            | 10.0  | 22.0  | 0                                    |
| 20                            | 19.8  | 43.6  | 1                                    |
| 30                            | 29.8  | 65.7  | 0.66                                 |
| 40                            | 39.8  | 87.7  | 0.5                                  |
| 50                            | 49.8  | 109.8 | 0.4                                  |
| 60                            | 60.0  | 132.3 | 0                                    |
| 70                            | 70.0  | 154.3 | 0                                    |
| 80                            | 80.2  | 176.8 | 0.25                                 |
| 90                            | 90.1  | 200.8 | 0.11                                 |
| 100                           | 99.9  | 220.2 | 0.1                                  |
| 110                           | 110.0   | 242.5 | 0                                    |
| 120                           | 120.0   | 264.6 | 0                                    |
| 130                           | 129.9   | 286.4 | 0.07                                 |
| 140                           | 139.1   | 306.7 | 0.64                                 |
| 150                           | 149.2   | 328.9 | 0.53                                 |

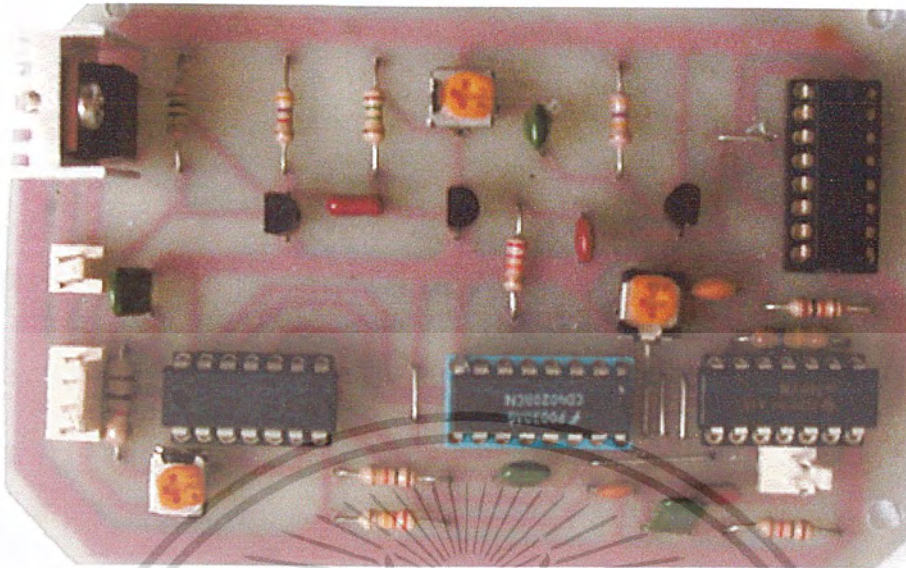
## 4.2 การทดลองเครื่องวัดส่วนสูง

### 4.2.1 การทดลองภาครับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์

#### 1) ลำดับขั้นการทดลอง

##### 1.1) ประกอบวงจรภาครับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์ตามรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 วงจรภาครับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิคส์

- 1.2) ตรวจสอบความถูกต้องของการประกอบวงจร
- 1.3) ทำการจ่ายไฟให้กับวงจรเพื่อทดสอบการทำงาน
- 1.4) ทำการปรับค่าความต้านทาน  $100\text{ K}\Omega$  ให้ได้ค่าความถี่ที่ต้องการส่งออกทางหัวส่งสัญญาณอัลตราโซนิคส์ที่มีความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์
- 1.5) ทำการปรับค่าความต้านทาน  $10\text{ K}\Omega$  เพื่อให้ได้ค่าความถี่ที่รับเข้ามาทางหัวรับสัญญาณอัลตราโซนิคส์มีความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์

## 2) ผลการทดลอง

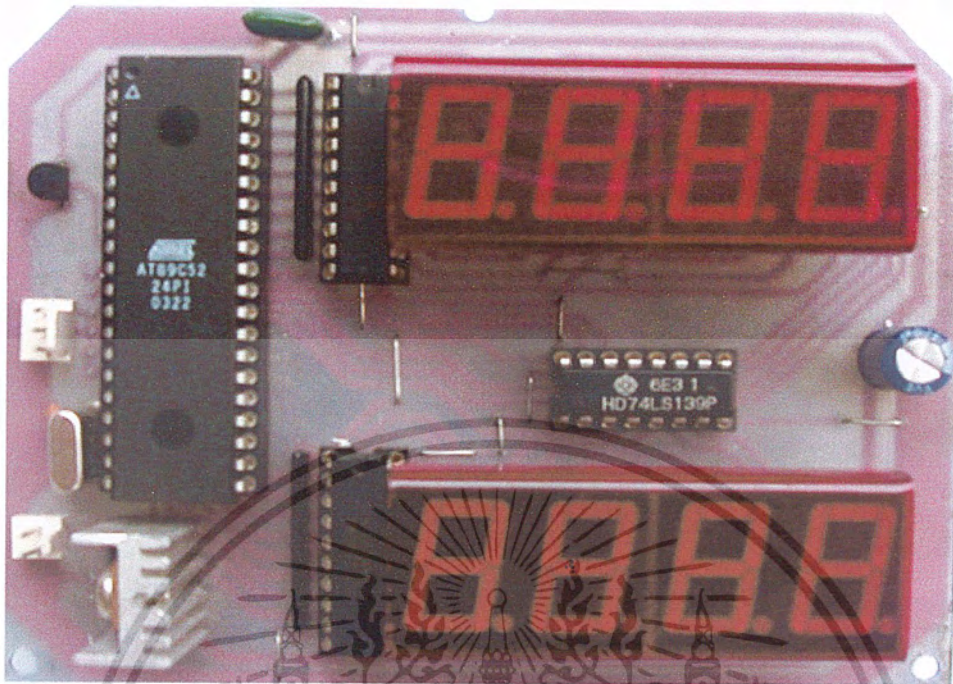
เมื่อทำการปรับแต่งค่าความต้านทาน  $100\text{ K}\Omega$  และ  $10\text{ K}\Omega$  เพื่อให้ได้ค่าความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่าความถี่ที่ได้จะได้ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ตามต้องการ

## 4.2.2 การทดลองภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องวัดส่วนสูง

### 1) ลำดับขั้นการทดลอง

- 1.1) ประกอบวงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องวัดส่วนสูงตามรูปที่ 4.5

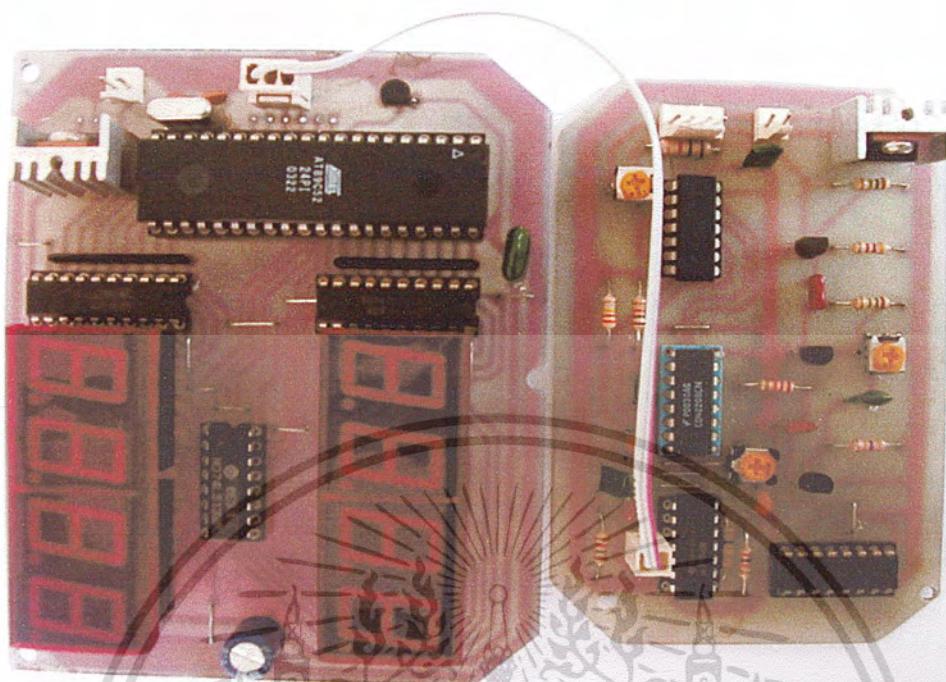
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 วงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องวัดส่วนสูง

- 1.2) ประกอบวงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องวัดส่วนสูงเข้ากับวงจรภาครับ-ส่ง สัญญาณอัลตราโซนิกส์ตามรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ประกอบวงจรภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องวัดส่วนสูงเข้ากับวงจรภาครับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์

- 1.3) ตรวจสอบความถูกต้องของการประกอบวงจร
- 1.4) ทำการเขียน โปรแกรมประมวลผลและแสดงผล
- 1.5) ทำการจ่ายไฟให้กับวงจรเพื่อทดสอบผลของการวัดส่วนสูง
- 1.6) ทำการวัดส่วนสูงและบันทึกผลการทดลอง

## 2) ผลการทดลอง

เมื่อทำการทดสอบวัดส่วนสูงในตำแหน่งต่างๆ ที่แตกต่างกันออกไปภาคควบคุมและแสดงผลเครื่องวัดส่วนสูงสามารถแสดงผลที่ได้ตามตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลของค่าส่วนสูงที่อ่านได้จากจากเครื่องวัดส่วนสูง

| ส่วนสูงที่ทดสอบ<br>(เซนติเมตร) | ส่วนสูงที่อ่านได้จากจาก<br>เครื่อง<br>วัดส่วนสูงอัตโนมัติ |      | ค่าความ<br>ผิดพลาด<br>เปอร์เซ็นต์<br>(%) |
|--------------------------------|---|------|--|
|                                | เซนติเมตร   | ฟุต  |  |
| 80                             | 80  | 2.62 | 0  |
| 90                             | 89  | 2.91 | 1.11                                     |
| 100                            | 99  | 3.24 | 1  |
| 110                            | 110   | 3.60 | 0  |
| 120                            | 119   | 3.90 | 0.83                                     |
| 130                            | 131   | 4.29 | 0.76                                     |
| 140                            | 142   | 4.65 | 1.42                                     |
| 150                            | 152   | 4.98 | 1.33                                     |
| 160                            | 162   | 5.31 | 1.25                                     |
| 165                            | 165   | 5.41 | 0  |
| 170                            | 171   | 5.60 | 0.58                                     |
| 175                            | 176   | 5.77 | 0.57                                     |
| 180                            | 180   | 5.9  | 0  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุป

เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติสร้างขึ้นมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงให้สามารถอ่านค่าได้รวดเร็วและง่ายขึ้นเพราะมีการแสดงผลเป็นตัวเลขทำให้ง่ายต่อการใช้งาน เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติจะประกอบด้วยวงจรรภาคต่างๆ คือ ภาควิทยาสัญญาณ ภาคแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ภาครับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิคส์ ภาคควบคุม และภาคแสดงผลในการดำเนินการออกแบบและสร้างเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติทำให้สามารถสรุปหลักการการทำงานข้อผิดพลาดและข้อจำกัดในด้านต่างๆ ซึ่งสรุปได้ว่าโพลีเมอร์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแรงกดของน้ำหนักให้เป็นแรงดันไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตามน้ำหนักที่มากขึ้นแรงดันไฟฟ้าก็จะเพิ่มมากขึ้นแต่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะไม่เป็นเชิงเส้นทำให้ยากต่อการประมวลผล แรงดันที่ได้จากโพลีเมอร์จะมีระดับแรงดันที่ต่ำมากจึงต้องทำการขยายแรงดันให้สูงขึ้นโดยใช้ไอซีเบอร์ AD 524 เพื่อปรับอัตราขยายให้พอเหมาะกับอินพุตให้อยู่ในช่วงที่ไอซีแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลต้องการ ภาครับส่งสัญญาณอัลตราโซนิคส์จากการทดลองสามารถส่งและรับสัญญาณอัลตราโซนิคส์ได้แต่มีข้อผิดพลาดเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ความร้อน ความชื้นในอากาศ และการถ่ายเทของอากาศ ทำให้การสะท้อนกลับของคลื่นอัลตราโซนิคส์เกิดการผิดเพี้ยน เมื่อประกอบเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงแล้วทำการทดลองปรากฏว่าเครื่องชั่งน้ำหนักสามารถชั่งน้ำหนักได้ดีแต่มีความผิดพลาดเล็กน้อยเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของโพลีเมอร์ การวัดส่วนสูงมีความผิดพลาดพอสมควรเนื่องจากปัญหาการเดินทางของคลื่นอัลตราโซนิคส์ในอากาศ ความไม่เรียบของเส้นผมสิ่งต่างๆ เหล่านี้เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความแม่นยำของการวัดส่วนสูงทางคณะผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาานิพนธ์นี้จะเป็นประโยชน์ต่อสาธารณชนต่อไป

#### 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

จากการดำเนินการสร้างและทดสอบโครงการปรากฏว่าได้เกิดปัญหาหลายประการซึ่งสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ปัญหา การแสดงผลค่าน้ำหนักคาดเคลื่อนจากความเป็นจริงเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากโหลดเซลล์ไม่สัมพันธ์กับน้ำหนักที่ทำการชั่ง

แนวทางแก้ไข ทำการเขียน โปรแกรมให้มีการเปรียบเทียบเป็นช่วงๆ

2. ปัญหา การส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ จากวงจรกำเนิดความถี่ให้กับหัวส่งอัลตราโซนิกส์เกิดปัญหาสัญญาณรบกวน

แนวทางแก้ไข ต่อสายนำสัญญาณให้สั้นที่สุดเท่าที่จะสั้นได้

3. ปัญหา ความผิดเพี้ยนของการวัดส่วนสูงความไม่เรียบของเส้นผม

แนวทางแก้ไข ทำแผ่นเพลตเป็นฉากกันสีรยะเพื่อให้การสะท้อนกลับของคลื่นอัลตราโซนิกส์ทำได้ดีขึ้น

4. ปัญหา ความผิดเพี้ยนในการสร้างความถี่เนื่องจากตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกและไมลาร์ที่มีค่าความผิดพลาดสูง

แนวทางแก้ไข เปลี่ยนไปใช้ตัวเก็บประจุชนิด มัลติเลเยอร์และ โพลีเอเตอร์ซึ่งมีค่าความผิดพลาดต่ำ

5. ปัญหา ความคาดเคลื่อนของตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ที่ใช้ปรับอัตราขยายแรงดันที่รับจากโหลดเซลล์

แนวทางแก้ไข เมื่อปรับอัตราขยายได้ตามต้องการแล้วให้เปลี่ยนเป็นตัวต้านทานแบบค่าคงที่แทนตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ในอัตราค่าความต้านทานที่เท่ากัน

## 5.2 แนวทางการพัฒนา

1. พัฒนาให้สามารถเก็บข้อมูลของค่าน้ำหนักและส่วนสูงเพื่อบันทึกเป็นฐานข้อมูลในการเตรียมเทียบการเจริญเติบโตโดยการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์

2. พัฒนาการแสดงผลที่ได้ให้มีค่าเที่ยงตรงมากกว่านี้

3. พัฒนาการออกแบบแทนของเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติให้มีน้ำหนักเบา กว่านี้เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย

4. เพิ่มแผ่นเพลตยึดติดกับรางเลื่อนเป็นฉากกันสีรยะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสะท้อนกลับของคลื่นอัลตราโซนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

ไชโย คำแก่นแก้ว และวาทีน เจนกิจ. “เครื่องวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิก.” ปรินญาณินพนธ์ ปรินญาอุตสาหกรรมการศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ธีรวัฒน์ ประกอบผล. การพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยภาษาซี. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. 2546

ธีรวัฒน์ ประกอบผล. ภาษาแอสเซมบลี. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. 2546

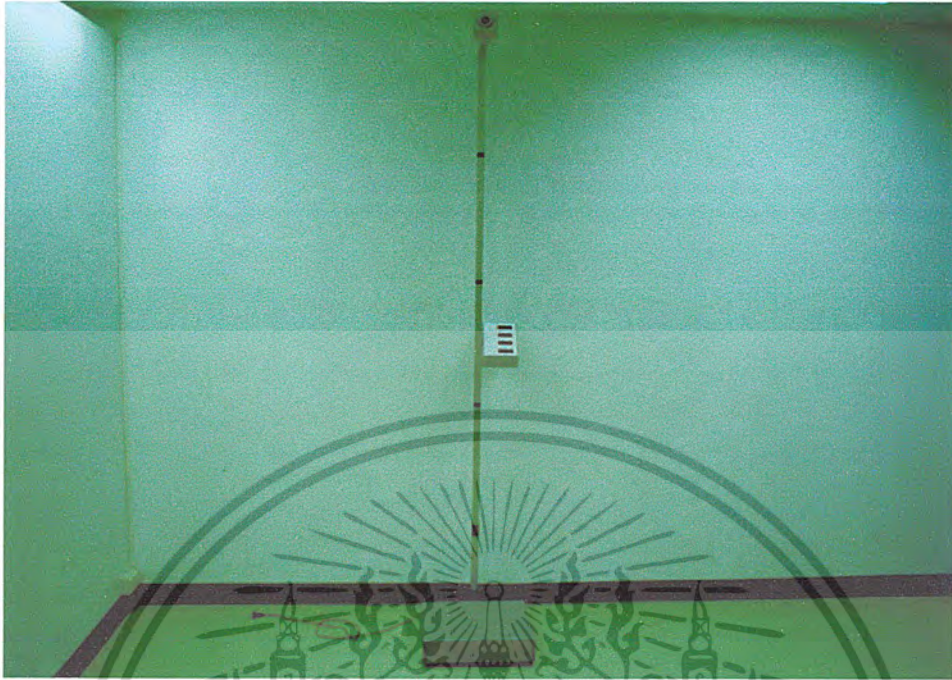
พรเพชร มาสมหันต์ และอัญญาวดี สุริยคุปต์. “เครื่องชั่งน้ำหนักด้วยไมโครคอมพิวเตอร์.” ปรินญาณินพนธ์ปรินญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542

อุดม จินประดับ. ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2541

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

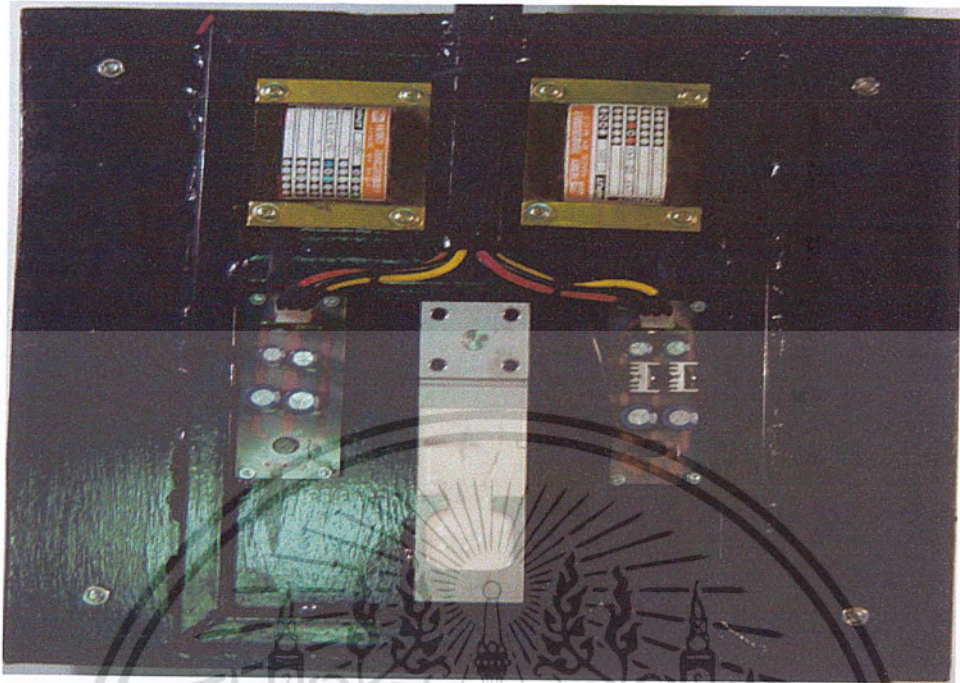


รูปที่ ก.1 ด้านหน้าเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ



รูปที่ ก.2 หน้าจอแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.3 แสดงการติดตั้งโหลดเซลล์

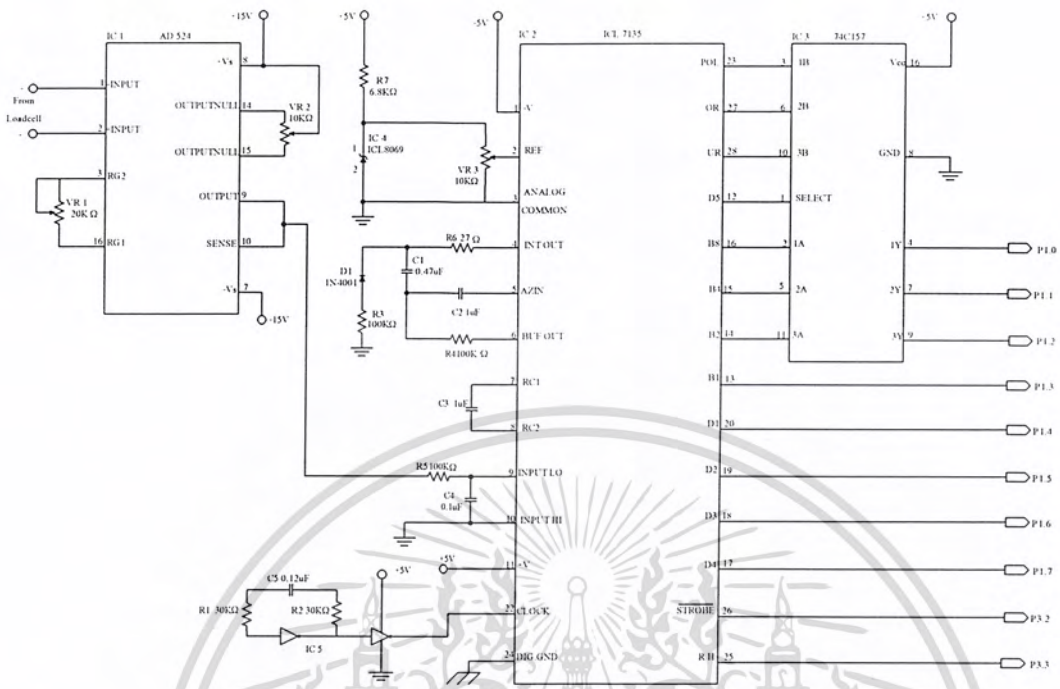


รูปที่ ก.4 แสดงการติดตั้งชุดรับ-ส่งอัลตราโซนิกส์

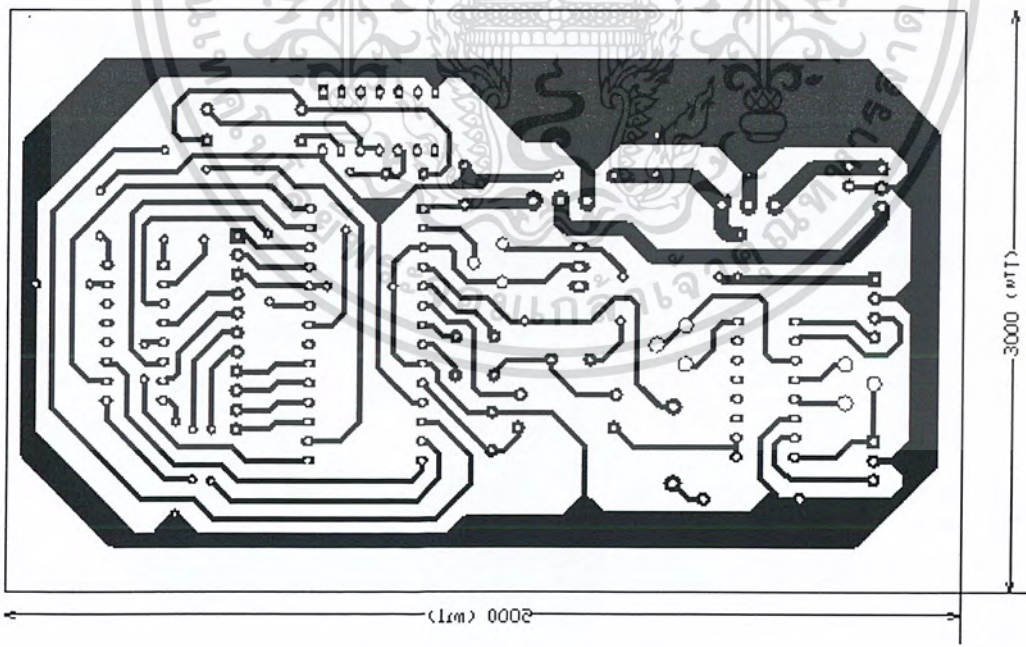
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



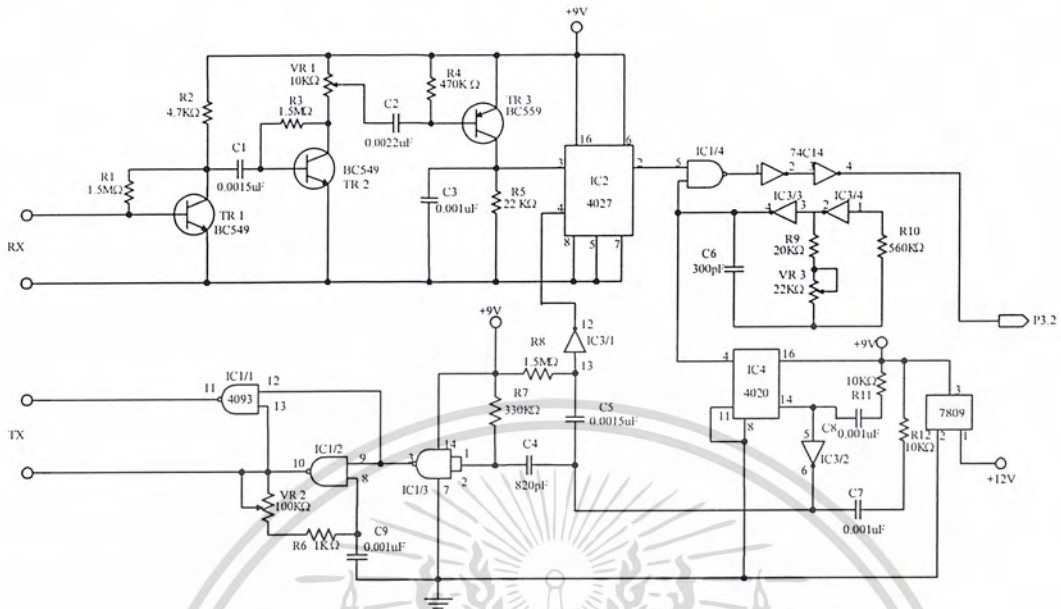
รูปที่ ข.1 วงจรรวมเครื่องชั่งน้ำหนัก



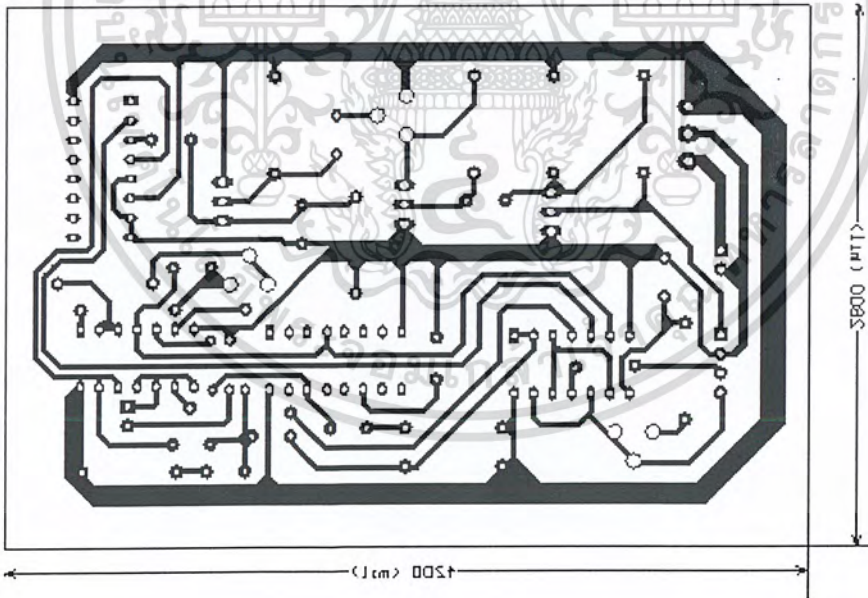
รูปที่ ข.2 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรรวมเครื่องชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





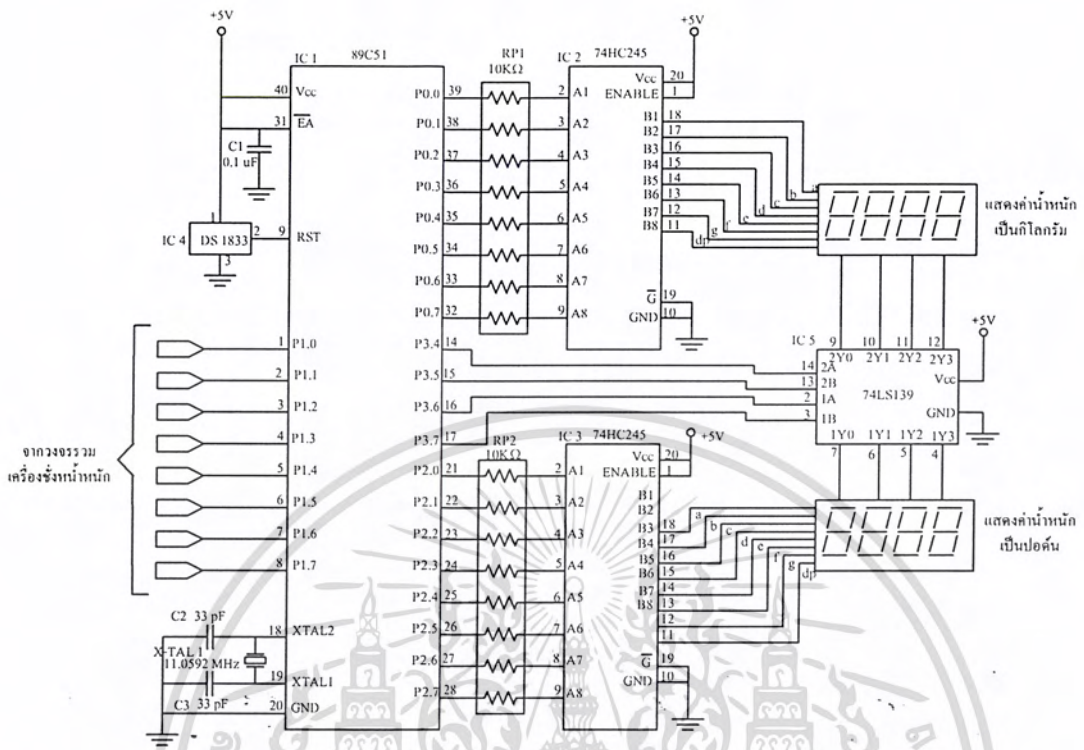
รูปที่ ข.5 วงจรรับ-ส่งอัลตราโซนิกส์



รูปที่ ข.6 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรรับ-ส่งอัลตราโซนิกส์

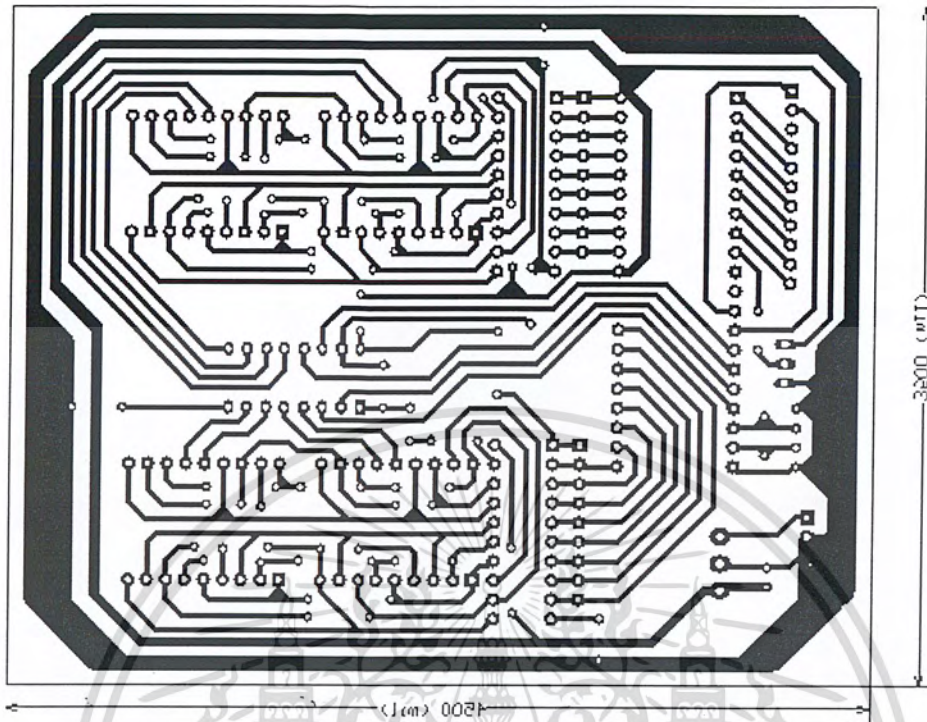
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





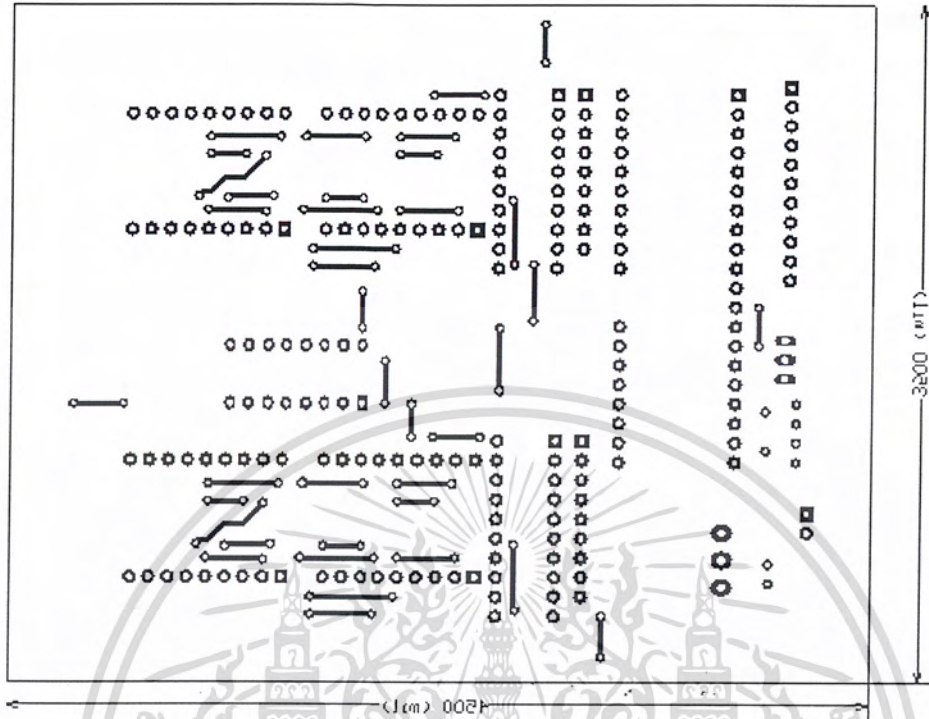
รูปที่ ข.9 วงจรควบคุมเครื่องชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



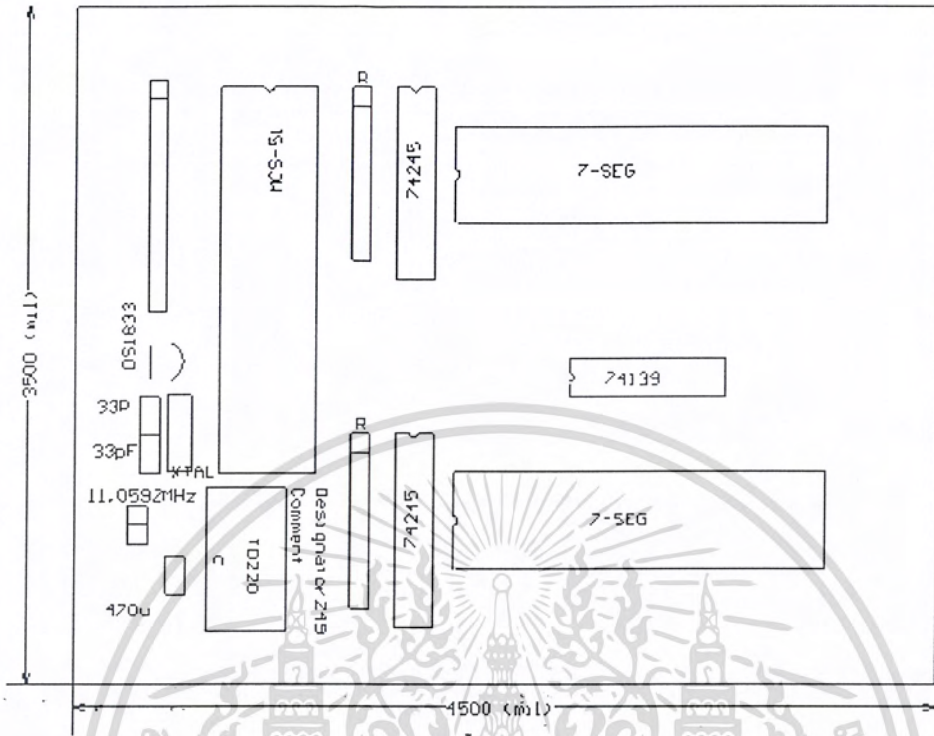
รูปที่ ข.10 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรควบคุมเครื่องชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



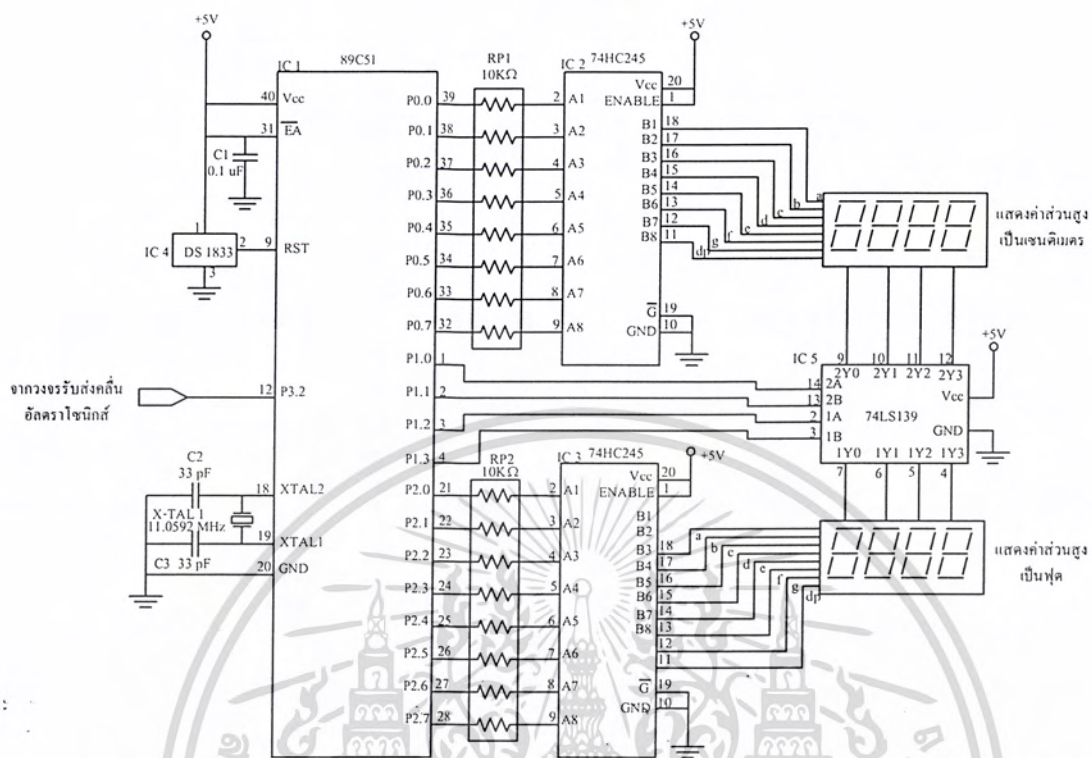
รูปที่ ข.11 แผนวงจรพิมพ์วงจรควบคุมเครื่องชั่งน้ำหนัก (ด้านล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



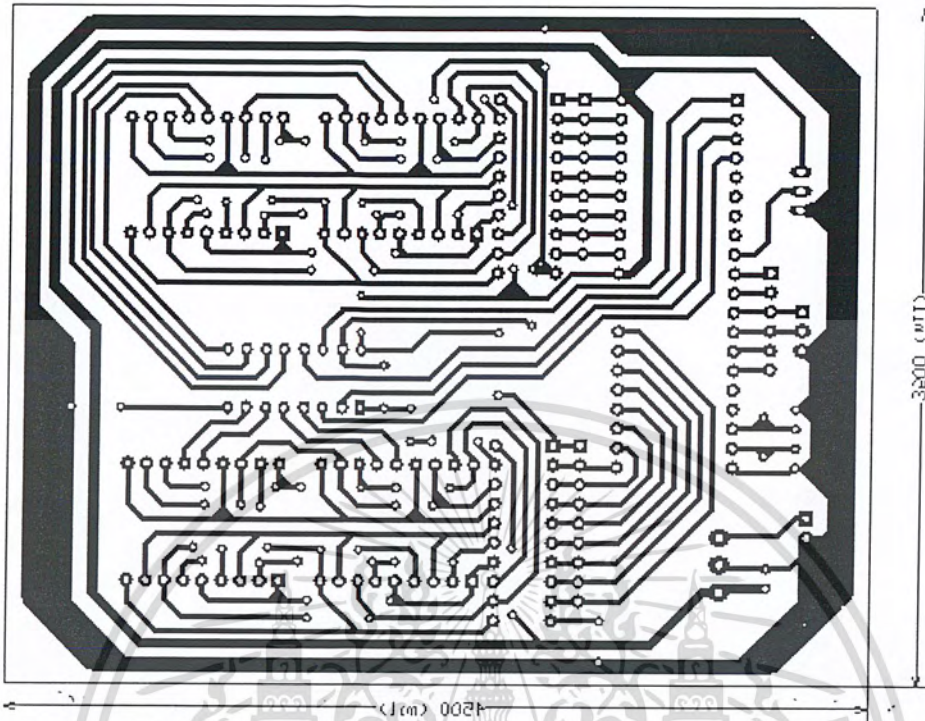
รูปที่ ข.12 ตำแหน่งอุปกรณ์วงจรควบคุมเครื่องชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



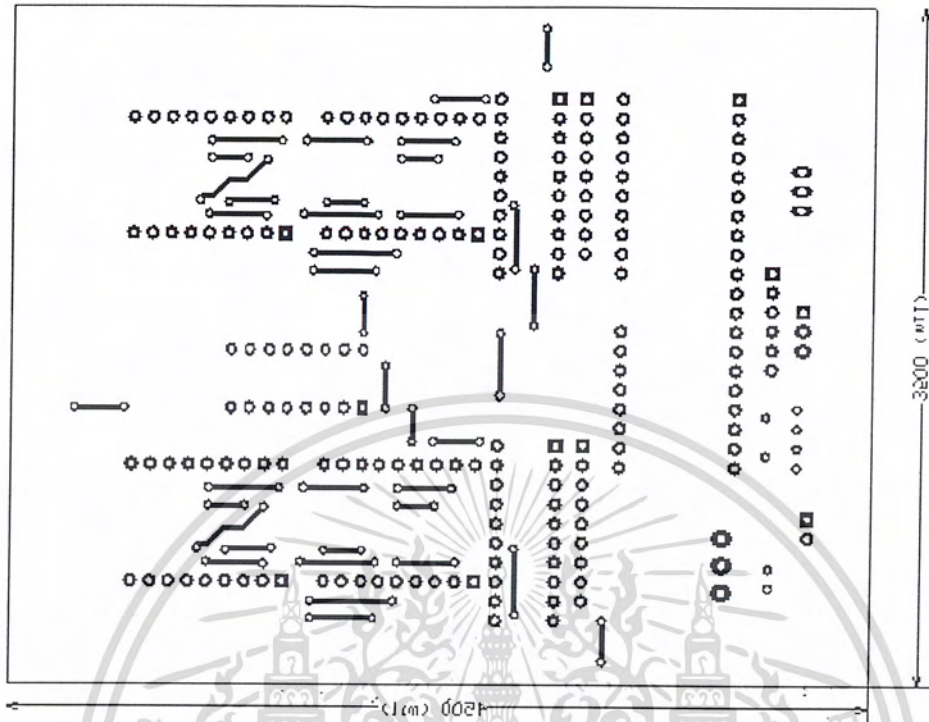
รูปที่ ข.13 วงจรควบคุมเครื่องวัดส่วนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.14 แผ่นวงจรพิมพ์วงจรควบคุมเครื่องวัดส่วนสูง

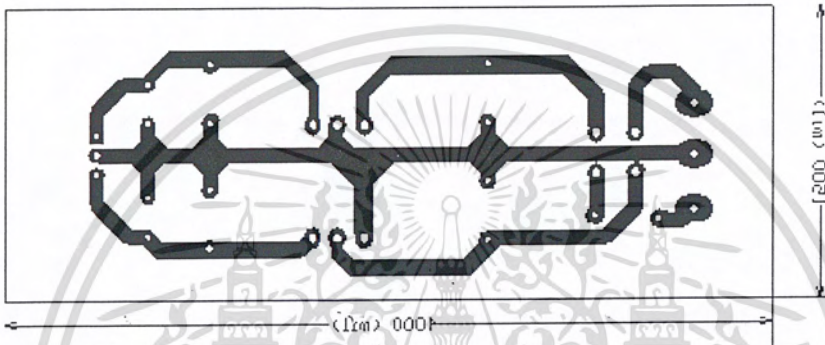
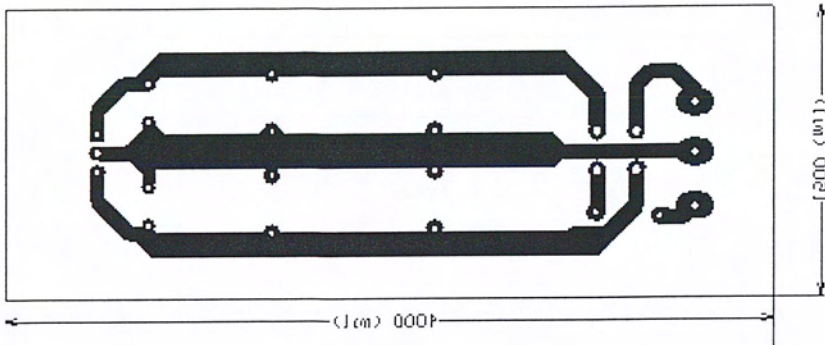
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.15 แผนวงจรพิมพ์วงจรควบคุมเครื่องวัดส่วนสูง (ด้านล่าง)

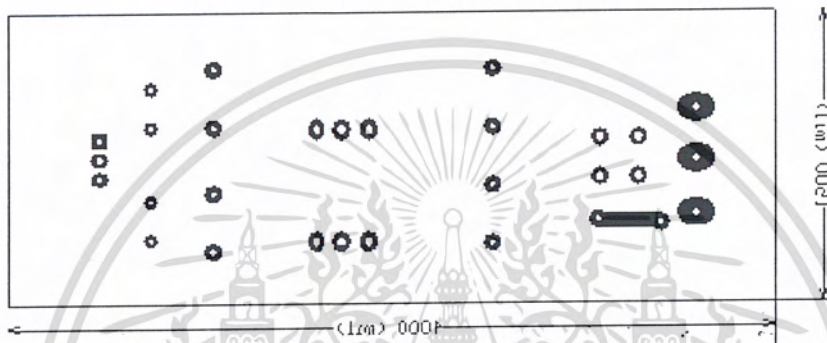
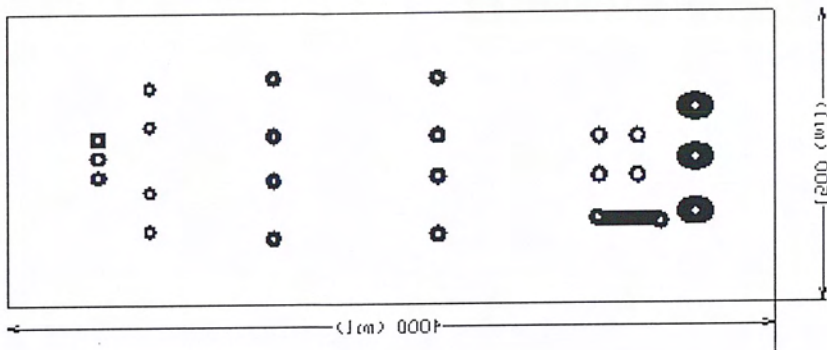
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





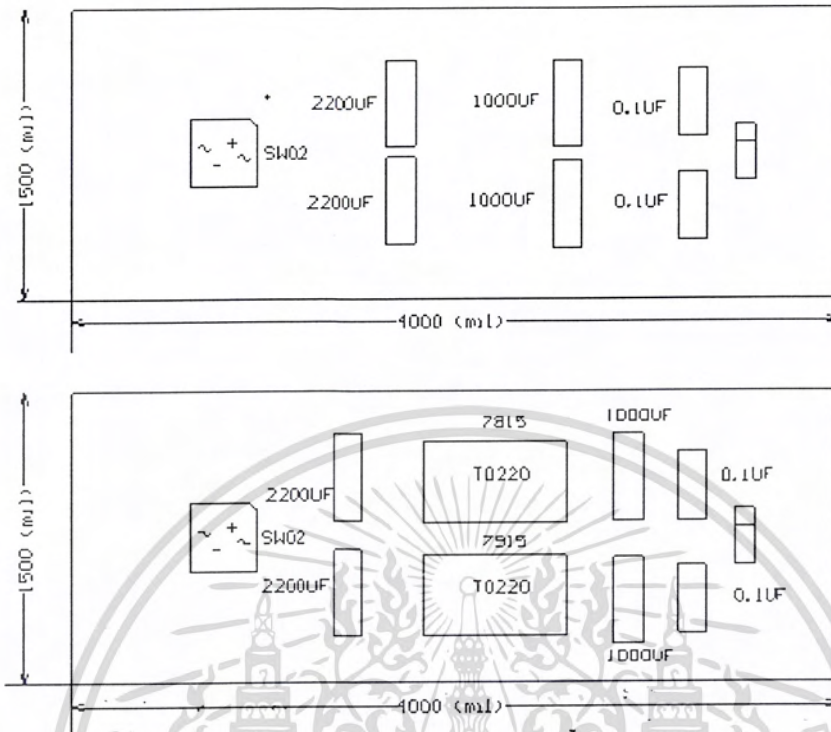
รูปที่ ข.18 แผ่นวงจรพิมพ์ภาคจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.19 แผงวงจรพิมพ์ภาคจ่ายไฟ (ด้านล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.20 ตำแหน่งอุปกรณ์วงจรภาคจ่ายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
รายการอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 รายการอุปกรณ์ของวงจรรวมเครื่องชั่งน้ำหนัก

| ชื่ออุปกรณ์                | รายละเอียด     | จำนวน |
|----------------------------|----------------|-------|
| <b>วงจรรวม</b>             |                |       |
| IC 1                       | AD 524         | 1 ตัว |
| IC 2                       | ICL 7135       | 1 ตัว |
| IC 3                       | 74C157         | 1 ตัว |
| IC 4                       | ICL 8069       | 1 ตัว |
| IC 5                       | 74C14          | 1 ตัว |
| <b>อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ</b> |                |       |
| D 1                        | 1N4001         | 1 ตัว |
| <b>ตัวเก็บประจุ</b>        |                |       |
| C1                         | 0.47 uF        | 1 ตัว |
| C2,C3                      | 1 uF           | 2 ตัว |
| C4                         | 0.1 uF         | 1 ตัว |
| C5                         | 0.12 uF        | 1 ตัว |
| <b>ตัวต้านทาน</b>          |                |       |
| VR 1                       | 20 k $\Omega$  | 1 ตัว |
| VR 2,VR 2                  | 10 k $\Omega$  | 2 ตัว |
| R1,R2                      | 30 k $\Omega$  | 1 ตัว |
| R3,R4,R5                   | 100 k $\Omega$ | 3 ตัว |
| R6                         | 27 k $\Omega$  | 1 ตัว |
| R7                         | 6.8 k $\Omega$ | 1 ตัว |
| <b>อุปกรณ์อื่นๆ</b>        |                |       |
| โพลีคเชลล                  | MODEL 1242     | 1 ตัว |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 รายการอุปกรณ์ของวงจรรับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์

| ชื่ออุปกรณ์                | รายละเอียด     | จำนวน |
|----------------------------|----------------|-------|
| <b>วงจรรวม</b>             |                |       |
| IC 1                       | 4093           | 1 ตัว |
| IC 2                       | 4027           | 1 ตัว |
| IC 3                       | 74C14          | 1 ตัว |
| IC 4                       | 4020           | 1 ตัว |
| <b>อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ</b> |                |       |
| TR1,TR2                    | BC549          | 2 ตัว |
| TR3                        | BC559          | 1 ตัว |
| <b>ตัวเก็บประจุ</b>        |                |       |
| C1, C5                     | 0.0015 $\mu$ F | 2 ตัว |
| C2                         | 0.0022 $\mu$ F | 1 ตัว |
| C3,C7,C8,C9                | 0.001 $\mu$ F  | 4 ตัว |
| C4                         | 820 pF         | 1 ตัว |
| C6                         | 300 pF         | 1 ตัว |
| <b>ตัวต้านทาน</b>          |                |       |
| VR 1                       | 10 k $\Omega$  | 1 ตัว |
| VR 2                       | 100 k $\Omega$ | 2 ตัว |
| VR 3                       | 22 k $\Omega$  | 1 ตัว |
| R1,R3,R8                   | 1.5 M $\Omega$ | 3 ตัว |
| R2                         | 4.7 k $\Omega$ | 1 ตัว |
| R4                         | 470 k $\Omega$ | 1 ตัว |
| R5                         | 22 k $\Omega$  | 1 ตัว |
| R6                         | 1 k $\Omega$   | 1 ตัว |
| R7                         | 330 k $\Omega$ | 1 ตัว |
| R9                         | 20 k $\Omega$  | 1 ตัว |
| R10                        | 560 k $\Omega$ | 1 ตัว |
| R11,R12                    | 10 k $\Omega$  | 2 ตัว |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.2 (ต่อ) รายการอุปกรณ์ของวงจรรับ-ส่งสัญญาณอัลตราโซนิกส์

| ชื่ออุปกรณ์  | รายละเอียด                 | จำนวน |
|--------------|----------------------------|-------|
| อุปกรณ์อื่นๆ |                            |       |
| Tx           | หัวส่งอัลตราโซนิกส์ 40 kHz | 1 ตัว |
| Rx           | หัวรับอัลตราโซนิกส์ 40 kHz | 1 ตัว |

ตารางที่ ค.3 รายการอุปกรณ์ของวงจรควบคุมและแสดงผลเครื่องชั่งน้ำหนัก

| ชื่ออุปกรณ์         | รายละเอียด      | จำนวน |
|---------------------|-----------------|-------|
| วงจรรวม             |                 |       |
| IC 1                | 89C51           | 1 ตัว |
| IC 2, IC 3          | 74HC245         | 2 ตัว |
| IC 4                | DS1833          | 1 ตัว |
| IC5                 | 74LS139         | 1 ตัว |
| อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ |                 |       |
| 7 Segment           | แคโทดร่วมแบบคู่ | 4 ตัว |
| ตัวเก็บประจุ        |                 |       |
| C1                  | 0.1 $\mu$ F     | 1 ตัว |
| C2,C3               | 33 pF           | 2 ตัว |
| ตัวต้านทาน          |                 |       |
| RP 1,RP2            | 10 k $\Omega$   | 2 ตัว |
| อุปกรณ์อื่นๆ        |                 |       |
| XTAL 1              | 11.0562 MHz     | 1 ตัว |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.4 รายการอุปกรณ์ของวงจรควบคุมและแสดงผลเครื่องวัดส่วนสูง

| ชื่ออุปกรณ์         | รายละเอียด      | จำนวน |
|---------------------|-----------------|-------|
| วงจรรวม             |                 |       |
| IC 1                | 89C51           | 1 ตัว |
| IC 2, IC 3          | 74HC245         | 2 ตัว |
| IC 4                | DS1833          | 1 ตัว |
| IC5                 | 74LS139         | 1 ตัว |
| อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ |                 |       |
| 7 Segment           | แคโทดร่วมแบบคู่ | 4 ตัว |
| ตัวเก็บประจุ        |                 |       |
| C1                  | 0.1 uF          | 1 ตัว |
| C2,C3               | 33 pF           | 2 ตัว |
| ตัวต้านทาน          |                 |       |
| RP 1,RP2            | 10 k $\Omega$   | 2 ตัว |
| อุปกรณ์อื่นๆ        |                 |       |
| XTAL 1              | 11.0562 MHz     | 1 ตัว |

ตารางที่ ค.5 รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคจ่ายไฟ

| ชื่ออุปกรณ์         | รายละเอียด  | จำนวน |
|---------------------|-------------|-------|
| วงจรรวม             |             |       |
| IC 1                | 7815        | 1 ตัว |
| IC 2                | 7915        | 1 ตัว |
| อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ |             |       |
| D1,D2               | SW02        | 2 ตัว |
| ตัวเก็บประจุ        |             |       |
| C1,C2,C7,C8         | 2200 uF 25V | 4 ตัว |
| C3,C4,C9,C10        | 100 uF 16V  | 4 ตัว |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางที่ ค.5 (ต่อ) รายการอุปกรณ์ของวงจรภาคจ่ายไฟ

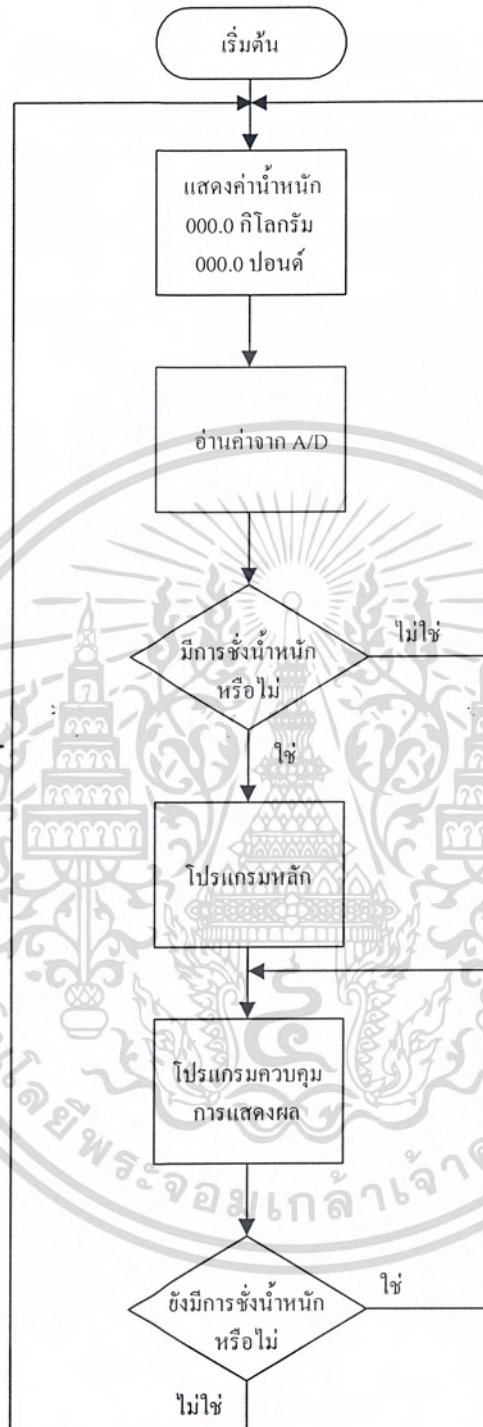
| ชื่ออุปกรณ์                   | รายละเอียด              | จำนวน |
|-------------------------------|-------------------------|-------|
| ตัวเก็บประจุ<br>C5,C6,C11,C12 | 0.1 uF                  | 4 ตัว |
| อุปกรณ์อื่นๆ                  |                         |       |
| T1                            | หม้อแปลง 220/15-0-15 1A | 1 ตัว |
| T2                            | หม้อแปลง 220/12-0-12 1A | 1 ตัว |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

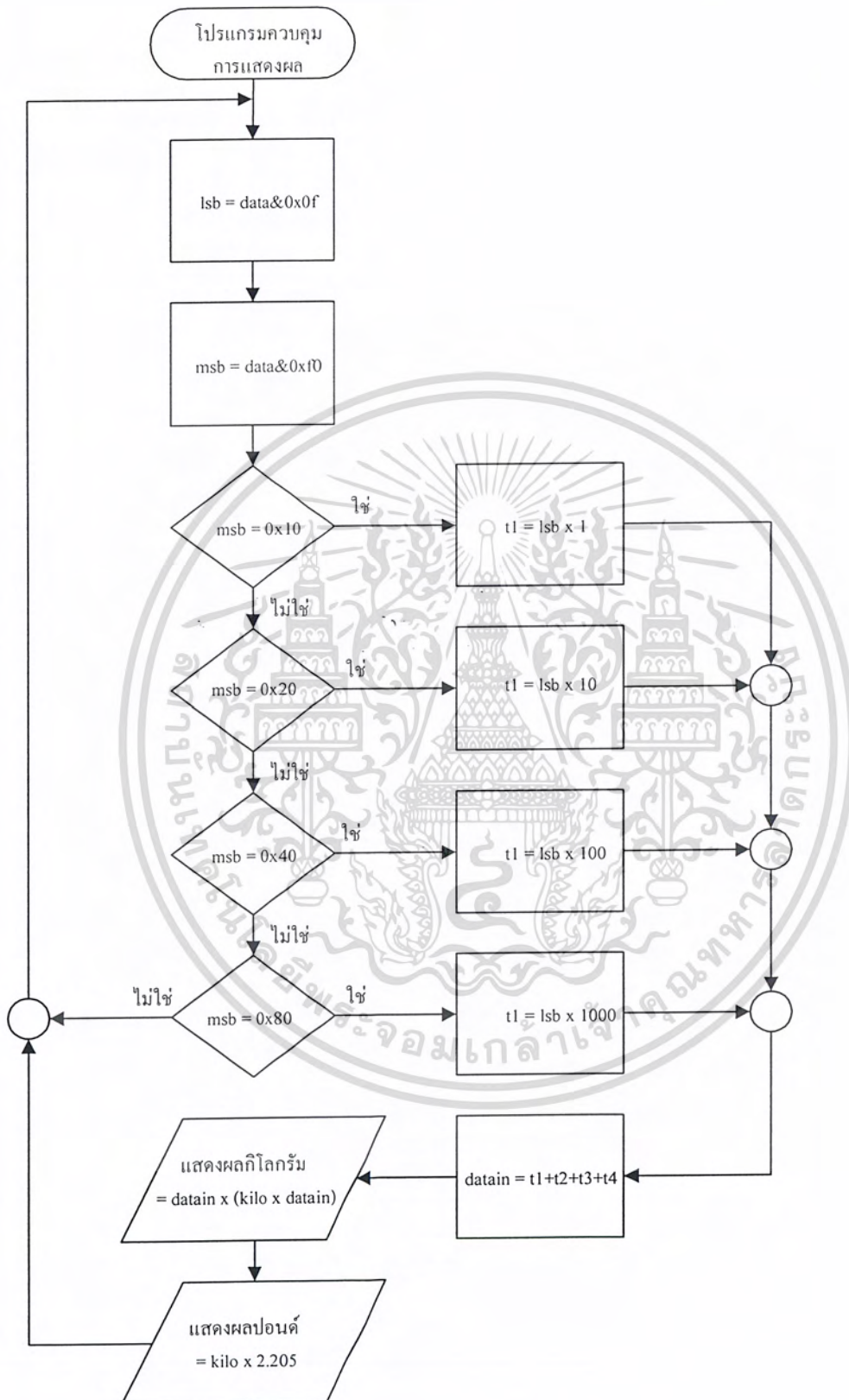


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



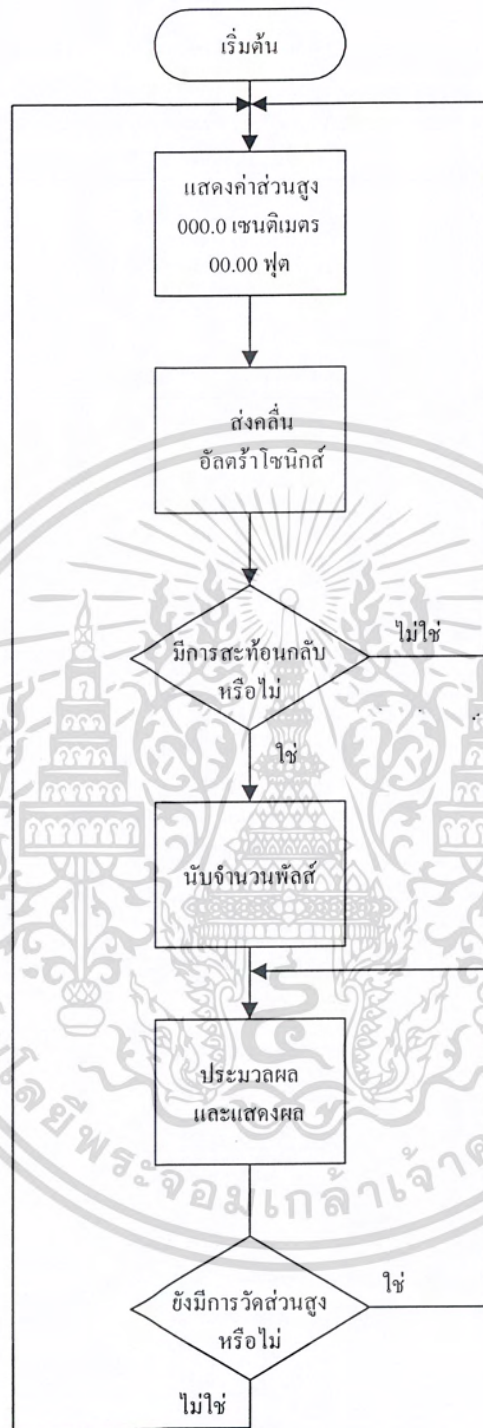
รูปที่ ง.1 ผังงานหลักเครื่องชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



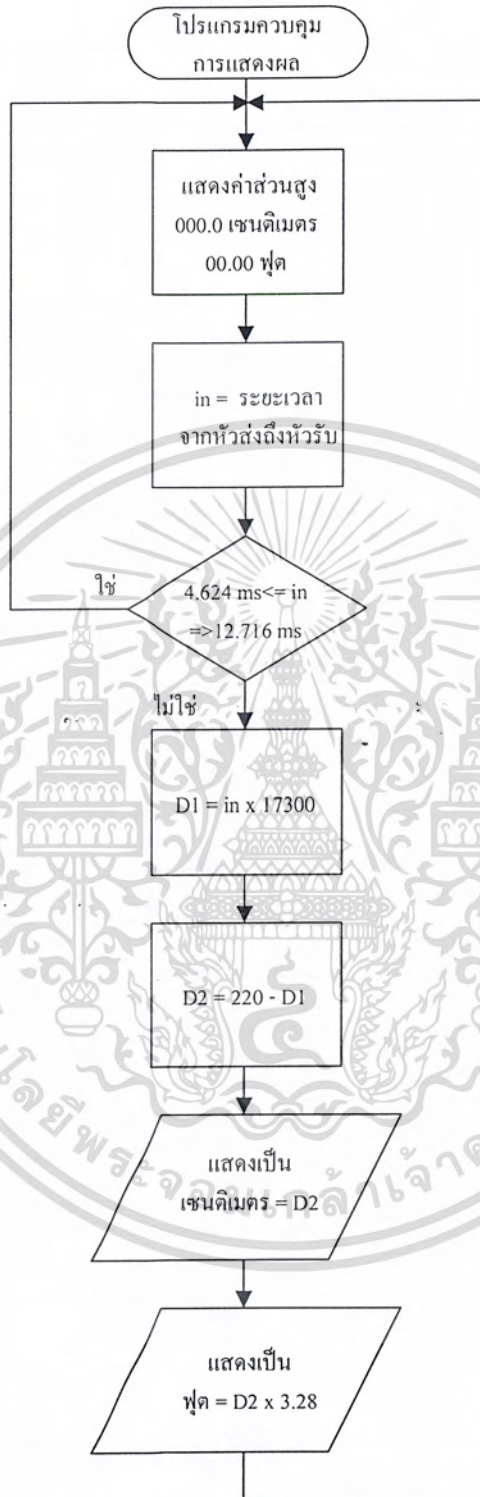
รูปที่ ๒.๒ ผังงาน โปรแกรมเครื่องชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๓.๓ ฟังงานหลักเครื่องวัดส่วนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ง.4 ผังงาน โปรแกรมเครื่องวัดส่วนสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรมการทำงานเครื่องชั่งน้ำหนัก

```

#include <8051.h>
void delay (int dly);
void delay_In (int dly1);
void delay_scan(void);
void NumberToBuffer(unsigned int count);
void NumberToBuffer1(unsigned int count1);
void Readdata(void);

unsigned char a[10] =
{0x3f,0x06,0x5b,0x4f,0x66,0x6d,0x7d,0x07,0x7f,0x6f};
unsigned char DISBUF[4],DISBUF1[4];

int lsb,Msb;
int DataIn,Kilo,Pond,in,t,t1,t2,t3,t4,t5;
int vtokm;
void main (void)
{
DataIn=0;
while (1) {
Readdata();
if (DataIn<=666) DataIn=0;
if (DataIn>666)
{
if (DataIn<=724)
{
DataIn=DataIn*0.013812154696132596685082872928177;
}
}
if (DataIn>724)
{
if (DataIn<=842)
{
DataIn=DataIn*0.025542784163473818646232439335888;
}
}
if (DataIn>842)
{
if (DataIn<=946)
{
DataIn=DataIn*0.044345898004434589800443458980044;
}
}
if (DataIn>946)
{
if (DataIn<=1056)
{
DataIn=DataIn*0.060240963855421686746987951807229;
}
}
if (DataIn>1056)
{
if (DataIn<=1178)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        {
            DataIn=DataIn*0.071684587813620071684587813620072;
        }
    }

if (DataIn>1178)
    {
        if (DataIn<=1300)
            {
                DataIn=DataIn*0.080580177276390008058017727639001;
            }
    }

if (DataIn>1300)
    {
        if (DataIn<=1419)
            {
                DataIn=DataIn*0.088235294117647058823529411764706;
            }
    }

if (DataIn>1419)
    {
        if (DataIn<=1526)
            {
                DataIn=DataIn*0.094658553076402974983096686950642;
            }
    }

if (DataIn>1526)
    {
        if (DataIn<=1631)
            {
                DataIn=DataIn*0.10171646535282898919262555626192;
            }
    }

if (DataIn>1631)
    {
        if (DataIn<=1727)
            {
                DataIn=DataIn*0.10650887573964497041420118343195;
            }
    }

if (DataIn>1727)
    {
        if (DataIn<=1824)
            {
                DataIn=DataIn*0.1133144475920679886685552407932;
            }
    }

if (DataIn>1824)
    {
        if (DataIn<=1942)
            {
                DataIn=DataIn*0.11683483802442910249601699415826;
            }
    }

if (DataIn>1942)
    {
        if (DataIn<=2049)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        {
            DataIn=DataIn*0.11988011988011988011988011988011988012;
        }
    }
if (DataIn>2049)
    {
        if (DataIn<=2155)
            {
                DataIn=DataIn*0.12404580152671755725190839694656;
            }
    }
if (DataIn>2155)
    {
        if (DataIn<=2278)
            {
                DataIn=DataIn*0.12641083521444695259593679458239;
            }
    }
if (DataIn>2278)
    {
        if (DataIn<2400)
            {
                DataIn=DataIn*0.12815036309269542930371636052969;
            }
    }
if (DataIn>2400)
    {
        if (DataIn<=2519)
            {
                DataIn=DataIn*0.13013420089467263115087433916226;
            }
    }
if (DataIn>2519)
    {
        if (DataIn<=2624)
            {
                DataIn=DataIn*0.13188518231186966640806826997673;
            }
    }
if (DataIn>2624)
    {
        if (DataIn<=2713)
            {
                DataIn=DataIn*0.13478098090602770497940846125047;
            }
    }
if (DataIn>2713)
    {
        if (DataIn<=2822)
            {
                DataIn=DataIn*0.13615191687567180222142601218201;
            }
    }
if (DataIn>2822)
    {
        if (DataIn<=2912)
            {

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นการคำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

DataIn=DataIn*0.14020329477742726954083420960393;
}
}
if (DataIn>2912)
{
if (DataIn<=3011)
{
DataIn=DataIn*0.14131897711978465679676985195155;
}
}
if (DataIn>3011)
{
if (DataIn<=3137)
{
DataIn=DataIn*0.14239482200647249190938511326861;
}
}
if (DataIn>3137)
{
if (DataIn<=3243)
{
DataIn=DataIn*0.14447236180904522613065326633166;
}
}
if (DataIn>3243)
{
if (DataIn<=3365)
{
DataIn=DataIn*0.14536644457904300423985463355542;
}
}
if (DataIn>3365)
{
if (DataIn<=3487)
{
DataIn=DataIn*0.14585764294049008168028004667445;
}
}
if (DataIn>3487)
{
if (DataIn<=3606)
{
DataIn=DataIn*0.14660276289822385114180998026501;
}
}
if (DataIn>3606)
{
if (DataIn<=3713)
{
DataIn=DataIn*0.14729950900163666121112929623568;
}
}
if (DataIn>3713)
{
if (DataIn<=3818)
{
DataIn=DataIn*0.1489361702127659574468085106383;
}
}

```

```

    }
}
if (DataIn>3818)
{
    if (DataIn<=3905)
    {
        DataIn=DataIn*0.14960020634511220015475883415012;
    }
}
if (DataIn>3905)
{
    if (DataIn<=3994)
    {
        DataIn=DataIn*0.15251652262328418912048805287239;
    }
}
if (DataIn>3994)
{
    if (DataIn<=4113)
    {
        DataIn=DataIn*0.15289765721331689272503082614057;
    }
}
if (DataIn>4113)
{
    if (DataIn<=4219)
    {
        DataIn=DataIn*0.15340364333652924256951102588686;
    }
}
if (DataIn>4219)
{
    if (DataIn<=4325)
    {
        DataIn=DataIn*0.15471167369901547116736990154712;
    }
}
if (DataIn>4325)
{
    if (DataIn<=4448)
    {
        DataIn=DataIn*0.15507411630558722919042189281642;
    }
}
if (DataIn>4448)
{
    if (DataIn<=4570)
    {
        DataIn=DataIn*0.1551762358678785191753491465307;
    }
}
if (DataIn>4570)
{
    if (DataIn<=4688)
    {
        DataIn=DataIn*0.15554115359688917692806221646144;
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
if (DataIn>4688)
    {
        if (DataIn<=4794)
            {
                DataIn=DataIn*0.15585509688289806234203875315922;
            }
    }
if (DataIn>4794)
    {
        if (DataIn<=4901)
            {
                DataIn=DataIn*0.15699235695104317289816153687255;
            }
    }
if (DataIn>4901)
    {
        if (DataIn<=4996)
            {
                DataIn=DataIn*0.15722636565208627292884499092925;
            }
    }
if (DataIn>4996)
    {
        if (DataIn<=5090)
            {
                DataIn=DataIn*0.15901411250248459550785132180481;
            }
    }
if (DataIn>5090)
    {
        if (DataIn<=5199)
            {
                DataIn=DataIn*0.15922330097087378640776699029126;
            }
    }
if (DataIn>5199)
    {
        if (DataIn<=5315)
            {
                DataIn=DataIn*0.15942304042512810780034162080091;
            }
    }
if (DataIn>5315)
    {
        if (DataIn<=5421)
            {
                DataIn=DataIn*0.16038791495710555762775083923909;
            }
    }
if (DataIn>5421)
    {
        if (DataIn<=5542)
            {
                DataIn=DataIn*0.16055464331326400291917533296844;
            }
    }

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (DataIn>5542)
{
    if (DataIn<=5666)
    {
        DataIn=DataIn*0.16051364365971107544141252006421;
    }
}
if (DataIn>5666)
{
    if (DataIn<=5785)
    {
        DataIn=DataIn*0.16067062521830247991617184771219;
    }
}
if (DataIn>5785)
{
    if (DataIn<=5887)
    {
        DataIn=DataIn*0.1608487337440109514031485284052;
    }
}
if (DataIn>5887)
{
    if (DataIn<=5993)
    {
        DataIn=DataIn*0.16167059616032334119232064668238;
    }
}
if (DataIn>5993)
{
    if (DataIn<=6120)
    {
        DataIn=DataIn*0.19382911392405063291139240506329;
    }
}
if (DataIn>6120)
{
    if (DataIn<=6243)
    {
        DataIn=DataIn*0.16170763260025873221216041397154;
    }
}
if (DataIn>6243)
{
    if (DataIn<=6362)
    {
        DataIn=DataIn*0.16185337987940336401142494446208;
    }
}

if (DataIn>6362)
{
    if (DataIn<=6468)
    {
        DataIn=DataIn*0.16194331983805668016194331983806;
    }
}

```

```

    }
if (DataIn>6468)
    {
        if (DataIn<=6574)
            {
                DataIn=DataIn*0.16270145817344589409056024558711;
            }
    }
if (DataIn>6574)
    {
        if (DataIn<=6696)
            {
                DataIn=DataIn*0.16279770877298763943322279167923;
            }
    }
if (DataIn>6696)
    {
        if (DataIn<=6818)
            {
                DataIn=DataIn*0.16274596833851161414410415741974;
            }
    }
if (DataIn>6818)
    {
        if (DataIn<=6937)
            {
                DataIn=DataIn*0.16283803431230008723466123873219;
            }
    }
if (DataIn>6937)
    {
        if (DataIn<=7044)
            {
                DataIn=DataIn*0.16334718441037397908009743516263;
            }
    }
if (DataIn>7044)
    {
        if (DataIn<=7150)
            {
                DataIn=DataIn*0.16358764631222676632350867296573;
            }
    }
if (DataIn>7150)
    {
        if (DataIn<=7276)
            {
                DataIn=DataIn*0.16366158113730929264909847434119;
            }
    }
if (DataIn>7276)
    {
        if (DataIn<=7402)
            {
                DataIn=DataIn*0.16344320348678834105148460909834;
            }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if (DataIn>7402)
{
    if (DataIn<=7529)
    {
        DataIn=DataIn*0.16349504154382203162690967569016;
    }
}
if (DataIn>7529)
{
    if (DataIn<=7626)
    {
        DataIn=DataIn*0.16360997493072964771077978625148;
    }
}
if (DataIn>7626)
{
    if (DataIn<=7732)
    {
        DataIn=DataIn*0.16421217255310830183761240714193;
    }
}
if (DataIn>7732)
{
    if (DataIn<=7855)
    {
        DataIn=DataIn*0.16427104722792607802874743326489;
    }
}
if (DataIn>7855)
{
    if (DataIn<=7979)
    {
        DataIn=DataIn*0.16416214168455613082459906553858;
    }
}
if (DataIn>7979)
{
    if (DataIn<=8098)
    {
        DataIn=DataIn*0.16419952730439109341957954969524;
    }
}
if (DataIn>8098)
{
    if (DataIn<=8203)
    {
        DataIn=DataIn*0.16427608189285276449675125658943;
    }
}
if (DataIn>8203)
{
    if (DataIn<=8308)
    {
        DataIn=DataIn*0.16484848484848484848484848484848;
    }
}
if (DataIn>8308)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    {
    if (DataIn<=8430)
        {
        DataIn=DataIn*0.16493366798135532448906418070993;
        }
    }
if (DataIn>8430)
    {
    if (DataIn<=8553)
        {
        DataIn=DataIn*0.16482222745467388744996468095126;
        }
    }
if (DataIn>8553)
    {
    if (DataIn<=8672)
        {
        DataIn=DataIn*0.16488620529493729679516953088713;
        }
    }
if (DataIn>8672)
    {
    if (DataIn<=8779)
        {
        DataIn=DataIn*0.16491067338524965643609711406322;
        }
    }
if (DataIn>8779)
    {
    if (DataIn<=8885)
        {
        DataIn=DataIn*0.16542034896895535916610015862225;
        }
    }
if (DataIn>8885)
    {
    if (DataIn<=9004)
        {
        DataIn=DataIn*0.16545556176634991615427613191727;
        }
    }
if (DataIn>9004)
    {
    if (DataIn<=9063)
        {
        DataIn=DataIn*0.16550810989738497186362131744455;
        }
    }
}
if (DataIn>9065)
{
    NumberToBuffer(9999);
    NumberToBuffer1(0000);
    delay_scan();
}
    Kilo=DataIn;
    Pond=DataIn*2.205;
    NumberToBuffer(Kilo);

```

```

        NumberToBuffer1(Pond);
        delay_scan();
    }
}
void delay (int dly)
{
    int i,j;
    for (i=0;i<dly;i++)
        for (j=0;j<125;j++);
}
void Readdata(void)
{
    in=0;
    lsb=0;
    Msb=0;
    t1=0;
    in = P1;
    lsb=in&0x0f;
    Msb=in&0xf0;
    switch(lsb)
    {
        case 0x00:
            t1=0;
            break;
        case 0x08:
            t1=1;
            break;
        case 0x04:
            t1=2;
            break;
        case 0x0c:
            t1=3;
            break;
        case 0x02:
            t1=4;
            break;
        case 0x0a:
            t1=5;
            break;
        case 0x06:
            t1=6;
            break;
        case 0x0e:
            t1=7;
            break;
        case 0x01:
            t1=8;
            break;
        case 0x09:
            t1=9;
            break;
    }
    switch(Msb)
    {
        case 0x10:
            t2=t1*1;
            break;
    }
}

```

```

    case 0x20:
        t3=t1*10;
        break;
    case 0x40:
        t4=t1*100;
        break;
    case 0x80:
        t5=t1*1000;
        break;
}
DataIn=t2+t3+t4+t5;
}

void NumberToBuffer(unsigned int count)
{
    int temp;
    DISBUF[0]=a[count/1000];
    temp=count%1000;
    DISBUF[1]=a[temp/100];
    temp=temp%100;
    DISBUF[2]=a[temp/10];
    DISBUF[3]=a[temp%10];
}

void NumberToBuffer1(unsigned int count1)
{
    int temp;
    DISBUF1[0]=a[count1/1000];
    temp=count1%1000;
    DISBUF1[1]=a[temp/100];
    temp=temp%100;
    DISBUF1[2]=a[temp/10];
    DISBUF1[3]=a[temp%10];
}

void delay_scan(void)
{
    int i,j,k;
    for (j=0;j<10;j++)
    {
        k=0;
        for (i = 0; i<4; i++) {
            P0 = DISBUF[i];
            P2=DISBUF1[i];
            P3=k;
            k=k+80;
            delay (1);
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โปรแกรมเครื่องวัดส่วนสูง

```

#include <8051.h>

void delay (int dly);
void delay_scan(void);
void NumberToBuffer(unsigned int count);
void NumberToBuffer1(unsigned int count1);

unsigned char a[10] = {0x3f,0x06,0x5b,0x4f,0x66,
                      0x6d,0x7d,0x07,0x7f,0x6f};

unsigned char DISBUF[4],DISBUF1[4];

int lsb,Msb;
int c,da,dainc,in,t,t1,t2,t3,t4,t5;

void main (void)
{
    da=0;
    while (1) {
        in=0;
        lsb=0;
        Msb=0;
        t1=0;

        in = P3;
        lsb=in&0x0f;
        Msb=in&0xf0;

        switch(Msb)
        {
            case 0x10:
                t2=lsb*1;
                break;

            case 0x20:
                t3=lsb*10;

                break;

            case 0x40:
                t4=lsb*100;

                break;

            case 0x80:
                t5=lsb*1000;

                break;

        }

        da=t2+t3+t4+t5;
    }
}

```

```

        if (da>230)
        {
            NumberToBuffer(0000);
            NumberToBuffer1(0000);
            delay_scan();
        }

        else
        {
            da=227-da;
            dainc=da*3.28;
            NumberToBuffer(da);
            NumberToBuffer1(dainc);

            delay_scan();
        }
    }
}

void delay (int dly)
{
    int i,j;
    for (i=0;i<dly;i++)
        for (j=0;j<125;j++);
}

void NumberToBuffer(unsigned int count)
{
    int temp;

    DISBUF[0]=a[count/1000];
    temp=count%1000;

    DISBUF[1]=a[temp/100];
    temp=temp%100;

    DISBUF[2]=a[temp/10];

    DISBUF[3]=a[temp%10];
}

void delay_scan(void)
{
    int i,j,k;
    for (j=0;j<10;j++)
    {
        k=5;
        for (i = 1; i<4; i++) {
            P0 = DISBUF[i];
            P2= DISBUF1[i];
            P1=k;
            k=k+5;
        }
    }
}

```

```
        delay (1);
    }
}

void NumberToBuffer1(unsigned int count1)
{
    int temp;
    DISBUF1[0]=a[count1/1000];
    temp=count1%1000;

    DISBUF1[1]=a[temp/100];
    temp=temp%100;

    DISBUF1[2]=a[temp/10];
    DISBUF1[3]=a[temp%10];
}
```

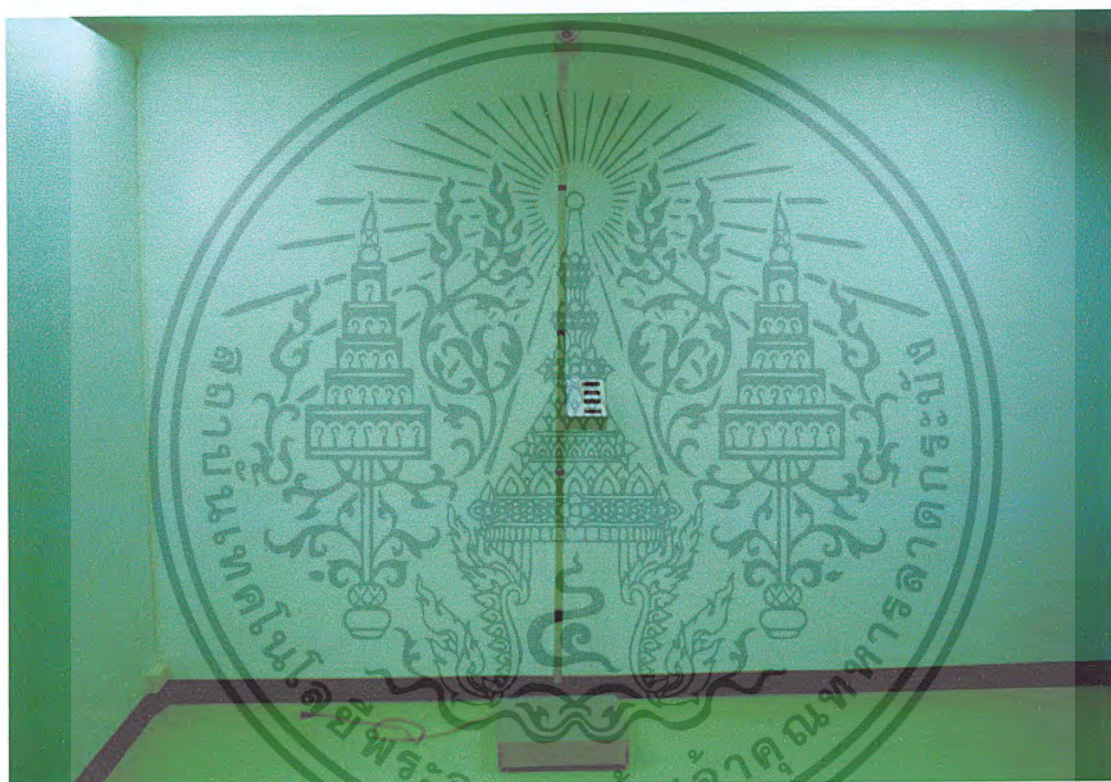


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้งาน  
เครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ



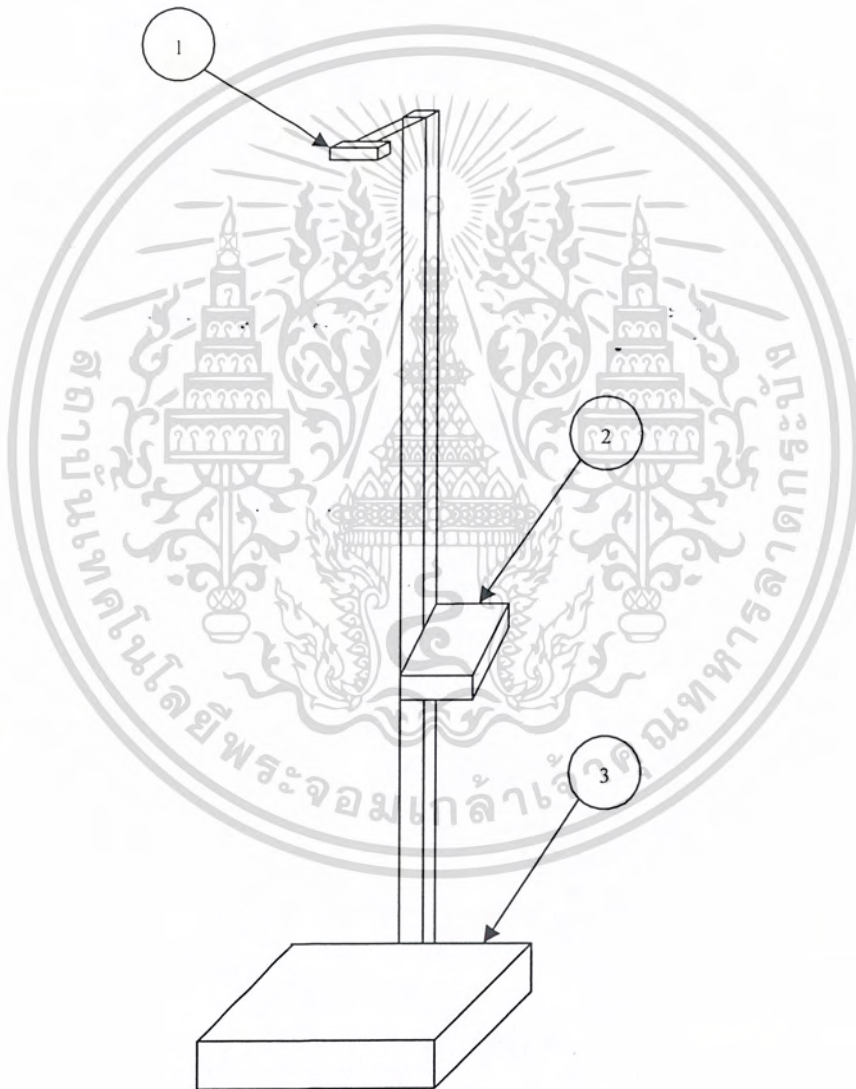
ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม  
คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.แนะนำเบื้องต้น

ก่อนการใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติควรรศึกษาคู่มือการใช้งานวิธีการอ่านค่าน้ำหนักและส่วนสูง การป้องกันและบำรุงดูแลรักษาเพื่อป้องกันความเสียหายและการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 2. ส่วนประกอบ



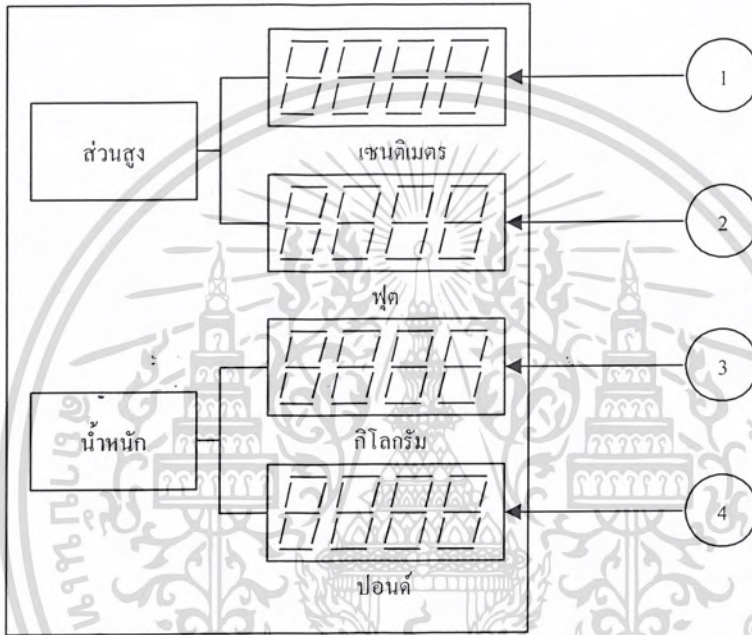
รูปที่ จ.1 ส่วนประกอบเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ จ.1 มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

1. เครื่องวัดส่วนสูง
2. หน้าจอแสดงผล
3. แท่นชั่งน้ำหนัก

จากรูปที่ จ. 1 ในส่วนของหน้าจอแสดงผลมีรายละเอียดดังรูปที่ จ. 2



รูปที่ จ. 2 รายละเอียดหน้าจอแสดงผล

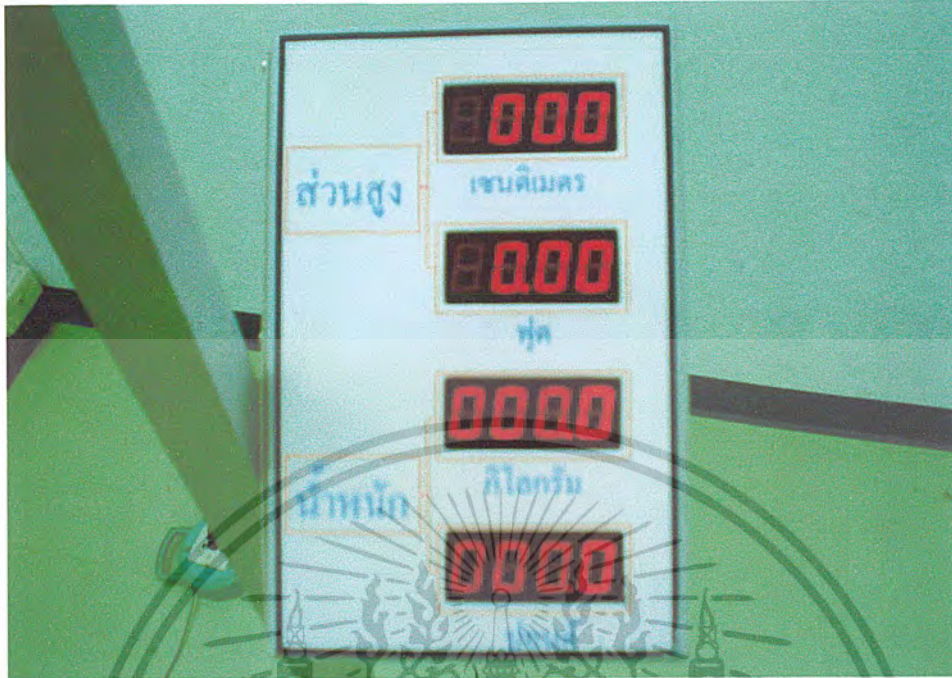
จากรูปที่ จ. 2 มีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

1. แสดงค่าส่วนสูงมีหน่วยเป็นเซนติเมตร
2. แสดงค่าส่วนสูงมีหน่วยเป็นฟุต
3. แสดงค่าน้ำหนักมีหน่วยเป็นกิโลกรัม
4. แสดงค่าน้ำหนักมีหน่วยเป็นปอนด์

### 3. การติดตั้งและใช้งาน

- 3.1 ทำการศึกษาวิธีการใช้งานจากคู่มือการใช้งานอย่างละเอียด
- 3.2 ทำการจ่ายไฟกระแสสลับ 220 โวลต์ ให้กับตัวเครื่อง
- 3.3 จอแสดงผลจะแสดงค่าเริ่มต้นดังรูปที่ จ. 3 แสดงว่าพร้อมใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ จ.3 ค่าเริ่มต้นก่อนการใช้งาน

#### 4. การแก้ปัญหาเบื้องต้น

เมื่อประสบปัญหาในการใช้งานเครื่องชั่งน้ำหนักและวัดส่วนสูงอัตโนมัติสามารถตรวจสอบแก้ไขปัญหเบื้องต้นได้จากตารางข้างล่างนี้

| อาการ                          | สาเหตุ/แนวทางแก้ไข          |
|--------------------------------|-----------------------------|
| เครื่องไม่ทำงานหน้าจอไม่แสดงผล | ตรวจสอบไฟเลี้ยง             |
| ค่าน้ำหนักผิดพลาดมากเกินไป     | โหลดเซลล์ชำรุด              |
| ค่าส่วนสูงผิดพลาดมากเกินไป     | ตัวรับส่งอัลตราโซนิกส์ชำรุด |

#### 5. การดูแลรักษาและข้อควรระวัง

5.1 การดูแลรักษา หมั่นทำความสะอาดตัวเครื่องอยู่ตลอดเวลา

5.2 ข้อควรระวัง

- อย่าติดตั้งบริเวณที่อับชื้น
- น้ำหนักที่ชั่งไม่เกิน 150 กิโลกรัม
- ไม่กระแทกน้ำหนักลงไปอย่างรุนแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ไม่ควรซ่อมและตัดแปลงเครื่องเอง
- ไม่ยืนบนแท่นชั่งนานเกินไป

## 6. ข้อมูลจำเพาะ

| คุณสมบัติ          | รายละเอียด   |
|--------------------|--|
| ระบบไฟฟ้า          | ไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์   |
| ขนาด               | แท่นชั่งขนาด กว้าง 36 เซนติเมตร<br>ยาว 36 เซนติเมตร<br>ส่วนสูง 220 เซนติเมตร |
| พิกัด              | ชั่งน้ำหนักได้ 1-150 กิโลกรัม<br>วัดส่วนสูงได้ 80-180 เซนติเมตร              |
| จอแสดงผล           | แอลอีดีเจ็ดส่วน  |
| หน่วยแสดงผลส่วนสูง | 1. เซนติเมตร<br>2. ฟุต   |
| หน่วยแสดงผลน้ำหนัก | 1. กิโลกรัม<br>2. ปอนด์  |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



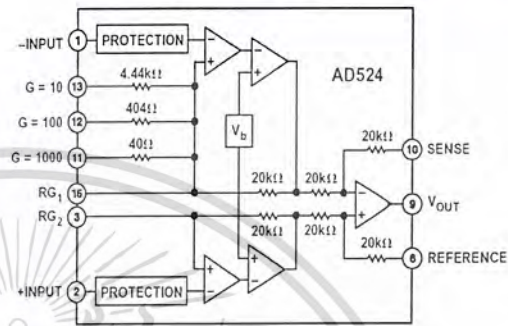
# Precision Instrumentation Amplifier

## AD524

### FEATURES

Low Noise: 0.3  $\mu\text{V}$  p-p 0.1 Hz to 10 Hz  
 Low Nonlinearity: 0.003% ( $G = 1$ )  
 High CMRR: 120 dB ( $G = 1000$ )  
 Low Offset Voltage: 50  $\mu\text{V}$   
 Low Offset Voltage Drift: 0.5  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$   
 Gain Bandwidth Product: 25 MHz  
 Pin Programmable Gains of 1, 10, 100, 1000  
 Input Protection, Power On–Power Off  
 No External Components Required  
 Internally Compensated  
 MIL-STD-883B and Chips Available  
 16-Lead Ceramic DIP and SOIC Packages and  
 20-Terminal Leadless Chip Carriers Available  
 Available in Tape and Reel in Accordance  
 with EIA-481A Standard  
 Standard Military Drawing Also Available

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



### PRODUCT DESCRIPTION

The AD524 is a precision monolithic instrumentation amplifier designed for data acquisition applications requiring high accuracy under worst-case operating conditions. An outstanding combination of high linearity, high common mode rejection, low offset voltage drift and low noise makes the AD524 suitable for use in many data acquisition systems.

The AD524 has an output offset voltage drift of less than 25  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , input offset voltage drift of less than 0.5  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ , CMR above 90 dB at unity gain (120 dB at  $G = 1000$ ) and maximum nonlinearity of 0.003% at  $G = 1$ . In addition to the outstanding dc specifications, the AD524 also has a 25 kHz gain bandwidth product ( $G = 1000$ ). To make it suitable for high speed data acquisition systems the AD524 has an output slew rate of 5  $\text{V}/\mu\text{s}$  and settles in 15  $\mu\text{s}$  to 0.01% for gains of 1 to 100.

As a complete amplifier the AD524 does not require any external components for fixed gains of 1, 10, 100 and 1000. For other gain settings between 1 and 1000 only a single resistor is required. The AD524 input is fully protected for both power-on and power-off fault conditions.

The AD524 IC instrumentation amplifier is available in four different versions of accuracy and operating temperature range. The economical "A" grade, the low drift "B" grade and lower drift, higher linearity "C" grade are specified from  $-25^\circ\text{C}$  to  $+85^\circ\text{C}$ . The "S" grade guarantees performance to specification over the extended temperature range  $-55^\circ\text{C}$  to  $+125^\circ\text{C}$ . Devices are available in 16-lead ceramic DIP and SOIC packages and a 20-terminal leadless chip carrier.

### PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD524 has guaranteed low offset voltage, offset voltage drift and low noise for precision high gain applications.
2. The AD524 is functionally complete with pin programmable gains of 1, 10, 100 and 1000, and single resistor programmable for any gain.
3. Input and output offset nulling terminals are provided for very high precision applications and to minimize offset voltage changes in gain ranging applications.
4. The AD524 is input protected for both power-on and power-off fault conditions.
5. The AD524 offers superior dynamic performance with a gain bandwidth product of 25 MHz, full power response of 75 kHz and a settling time of 15  $\mu\text{s}$  to 0.01% of a 20 V step ( $G = 100$ ).

### REV. E

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements 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 Analog Devices.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
 Tel: 781/329-4700 World Wide Web Site: <http://www.analog.com>  
 Fax: 781/326-8703 © Analog Devices, Inc., 1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# AD524—SPECIFICATIONS (@ $V_S = \pm 15\text{ V}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$ and $T_A = +25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

| Model  | AD524A   |     |   | AD524B   |     |   | AD524C   |     |   | AD524S   |     |   | Units                        |
|--|--|-----|---|--|-----|---|--|-----|---|--|-----|---|------------------------------|
|  | Min  | Typ | Max   | Min  | Typ | Max   | Min  | Typ | Max   | Min  | Typ | Max   |                              |
| <b>GAIN</b>  |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| Gain Equation<br>(External Resistor Gain Programming)                | $\left[ \frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$ |     |   | $\left[ \frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$ |     |   | $\left[ \frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$ |     |   | $\left[ \frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$ |     |   |                              |
| Gain Range (Pin Programmable)  | 1 to 1000  |     |   | 1 to 1000  |     |   | 1 to 1000  |     |   | 1 to 1000  |     |   |                              |
| Gain Error <sup>1</sup>  |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| G = 1  |  |     | $\pm 0.05$  |  |     | $\pm 0.03$  |  |     | $\pm 0.02$  |  |     | $\pm 0.05$  | %                            |
| G = 10   |  |     | $\pm 0.25$  |  |     | $\pm 0.15$  |  |     | $\pm 0.1$   |  |     | $\pm 0.25$  | %                            |
| G = 100  |  |     | $\pm 0.5$   |  |     | $\pm 0.35$  |  |     | $\pm 0.25$  |  |     | $\pm 0.5$   | %                            |
| G = 1000   |  |     | $\pm 2.0$   |  |     | $\pm 1.0$   |  |     | $\pm 0.5$   |  |     | $\pm 2.0$   | %                            |
| Nonlinearity   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| G = 1  |  |     | $\pm 0.01$  |  |     | $\pm 0.005$   |  |     | $\pm 0.003$   |  |     | $\pm 0.01$  | %                            |
| G = 10, 100  |  |     | $\pm 0.01$  |  |     | $\pm 0.005$   |  |     | $\pm 0.003$   |  |     | $\pm 0.01$  | %                            |
| G = 1000   |  |     | $\pm 0.01$  |  |     | $\pm 0.01$  |  |     | $\pm 0.01$  |  |     | $\pm 0.01$  | %                            |
| Gain vs. Temperature   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| G = 1  |  |     | 5   |  |     | 5   |  |     | 5   |  |     | 5   | ppm/°C                       |
| G = 10   |  |     | 15  |  |     | 10  |  |     | 10  |  |     | 10  | ppm/°C                       |
| G = 100  |  |     | 35  |  |     | 25  |  |     | 25  |  |     | 25  | ppm/°C                       |
| G = 1000   |  |     | 100   |  |     | 50  |  |     | 50  |  |     | 50  | ppm/°C                       |
| <b>VOLTAGE OFFSET (May be Nulled)</b>                                |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| Input Offset Voltage vs. Temperature                                 |  |     | 250   |  |     | 100   |  |     | 50  |  |     | 100   | $\mu\text{V}$                |
| Output Offset Voltage vs. Temperature                                |  |     | 2   |  |     | 0.75  |  |     | 0.5   |  |     | 2.0   | $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| Offset Referred to the Input vs. Supply                              |  |     | 5   |  |     | 3   |  |     | 2.0   |  |     | 3.0   | mV                           |
| G = 1  |  |     | 100   |  |     | 50  |  |     | 25  |  |     | 50  | $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ |
| G = 10   | 70   |     |   | 75   |     |   | 80   |     |   | 75   |     |   | dB                           |
| G = 100  | 85   |     |   | 95   |     |   | 100  |     |   | 95   |     |   | dB                           |
| G = 1000   | 95   |     |   | 105  |     |   | 110  |     |   | 105  |     |   | dB                           |
| G = 1000   | 100  |     |   | 110  |     |   | 115  |     |   | 110  |     |   | dB                           |
| <b>INPUT CURRENT</b>   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| Input Bias Current vs. Temperature                                   |  |     | $\pm 50$  |  |     | $\pm 25$  |  |     | $\pm 15$  |  |     | $\pm 50$  | nA                           |
| Input Offset Current vs. Temperature                                 |  |     | $\pm 100$   |  |     | $\pm 100$   |  |     | $\pm 100$   |  |     | $\pm 100$   | pA/°C                        |
| <b>INPUT</b>   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| Input Impedance  |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| Differential Resistance  |  |     | $10^7$  |  |     | $10^7$  |  |     | $10^9$  |  |     | $10^9$  | $\Omega$                     |
| Differential Capacitance   |  |     | 10  |  |     | 10  |  |     | 10  |  |     | 10  | pF                           |
| Common-Mode Resistance   |  |     | $10^8$  |  |     | $10^8$  |  |     | $10^8$  |  |     | $10^8$  | $\Omega$                     |
| Common-Mode Capacitance  |  |     | 10  |  |     | 10  |  |     | 10  |  |     | 10  | pF                           |
| Input Voltage Range  |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| Max Differ. Input Linear ( $V_{IM}$ ) <sup>2</sup>                   |  |     | $\pm 10$  |  |     | $\pm 10$  |  |     | $\pm 10$  |  |     | $\pm 10$  | V                            |
| Max Common-Mode Linear ( $V_{CM}$ )                                  |  |     | $12\text{ V} - \left( \frac{G}{2} \times V_D \right)$ |  |     | $12\text{ V} - \left( \frac{G}{2} \times V_D \right)$ |  |     | $12\text{ V} - \left( \frac{G}{2} \times V_D \right)$ |  |     | $12\text{ V} - \left( \frac{G}{2} \times V_D \right)$ | V                            |
| Common-Mode Rejection dc to 60 Hz with 1 k $\Omega$ Source Imbalance |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| G = 1  | 70   |     |   | 75   |     |   | 80   |     |   | 70   |     |   | dB                           |
| G = 10   | 90   |     |   | 95   |     |   | 100  |     |   | 90   |     |   | dB                           |
| G = 100  | 100  |     |   | 105  |     |   | 110  |     |   | 100  |     |   | dB                           |
| G = 1000   | 110  |     |   | 115  |     |   | 120  |     |   | 110  |     |   | dB                           |
| <b>OUTPUT RATING</b>   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| $V_{OUT}$ , $R_L = 2\text{ k}\Omega$                                 |  |     | $\pm 10$  |  |     | $\pm 10$  |  |     | $\pm 10$  |  |     | $\pm 10$  | V                            |
| <b>DYNAMIC RESPONSE</b>  |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| Small Signal - 3 dB  |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| G = 1  |  |     | 1   |  |     | 1   |  |     | 1   |  |     | 1   | MHz                          |
| G = 10   |  |     | 400   |  |     | 400   |  |     | 400   |  |     | 400   | kHz                          |
| G = 100  |  |     | 150   |  |     | 150   |  |     | 150   |  |     | 150   | kHz                          |
| G = 1000   |  |     | 25  |  |     | 25  |  |     | 25  |  |     | 25  | kHz                          |
| Slew Rate  |  |     | 5.0   |  |     | 5.0   |  |     | 5.0   |  |     | 5.0   | V/ $\mu\text{s}$             |
| Settling Time to 0.01%, 20 V Step                                    |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| G = 1 to 100   |  |     | 15  |  |     | 15  |  |     | 15  |  |     | 15  | $\mu\text{s}$                |
| G = 1000   |  |     | 75  |  |     | 75  |  |     | 75  |  |     | 75  | $\mu\text{s}$                |
| <b>NOISE</b>   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| Voltage Noise, 1 kHz   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| R.T.I.   |  |     | 7   |  |     | 7   |  |     | 7   |  |     | 7   | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| R.T.O.   |  |     | 90  |  |     | 90  |  |     | 90  |  |     | 90  | $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ |
| R.T.I., 0.1 Hz to 10 Hz  |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| G = 1  |  |     | 15  |  |     | 15  |  |     | 15  |  |     | 15  | $\mu\text{V}$ p-p            |
| G = 10   |  |     | 2   |  |     | 2   |  |     | 2   |  |     | 2   | $\mu\text{V}$ p-p            |
| G = 100, 1000  |  |     | 0.3   |  |     | 0.3   |  |     | 0.3   |  |     | 0.3   | $\mu\text{V}$ p-p            |
| Current Noise  |  |     |   |  |     |   |  |     |   |  |     |   |                              |
| 0.1 Hz to 10 Hz  |  |     | 60  |  |     | 60  |  |     | 60  |  |     | 60  | pA p-p                       |

## AD524

| Model                 | AD524A   |          |          | AD524B   |          |          | AD524C   |          |          | AD524S   |          |          | Units              |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------|
|                       | Min      | Typ      | Max      | Min      | Typ      | Max      | Min      | Typ      | Max      | Min      | Typ      | Max      |                    |
| SENSE INPUT           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |                    |
| $R_{IN}$              |          | 20       |          |          | 20       |          |          | 20       |          |          | 20       |          | $k\Omega \pm 20\%$ |
| $I_{IN}$              |          | 15       |          |          | 15       |          |          | 15       |          |          | 15       |          | $\mu A$            |
| Voltage Range         | $\pm 10$ |          |          | $\pm 10$ |          |          | $\pm 10$ |          |          | $\pm 10$ |          |          | V                  |
| Gain to Output        |          | 1        |          |          | 1        |          |          | 1        |          |          | 1        |          | %                  |
| REFERENCE INPUT       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |                    |
| $R_{IN}$              |          | 40       |          |          | 40       |          |          | 40       |          |          | 40       |          | $k\Omega \pm 20\%$ |
| $I_{IN}$              |          | 15       |          |          | 15       |          |          | 15       |          |          | 15       |          | $\mu A$            |
| Voltage Range         | $\pm 10$ |          |          | $\pm 10$ |          |          | 10       |          |          | 10       |          |          | V                  |
| Gain to Output        |          | 1        |          |          | 1        |          |          | 1        |          |          | 1        |          | %                  |
| TEMPERATURE RANGE     |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |                    |
| Specified Performance | -25      |          | +85      | -25      |          | +85      | -25      |          | +85      | -55      |          | +125     | $^{\circ}C$        |
| Storage               | -65      |          | +150     | -65      |          | +150     | -65      |          | +150     | -65      |          | +150     | $^{\circ}C$        |
| POWER SUPPLY          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |                    |
| Power Supply Range    | $\pm 6$  | $\pm 15$ | $\pm 18$ | $\pm 6$  | $\pm 15$ | $\pm 18$ | $\pm 6$  | $\pm 15$ | $\pm 18$ | $\pm 6$  | $\pm 15$ | $\pm 18$ | V                  |
| Quiescent Current     |          | 3.5      | 5.0      |          | 3.5      | 5.0      |          | 3.5      | 5.0      |          | 3.5      | 5.0      | mA                 |

## NOTES

<sup>1</sup> Does not include effects of external resistor  $R_{EX}$ .

<sup>2</sup>  $V_{OL}$  is the maximum differential input voltage at  $G = 1$  for specified nonlinearity.

$V_{DL}$  at the maximum = 10 V/G.

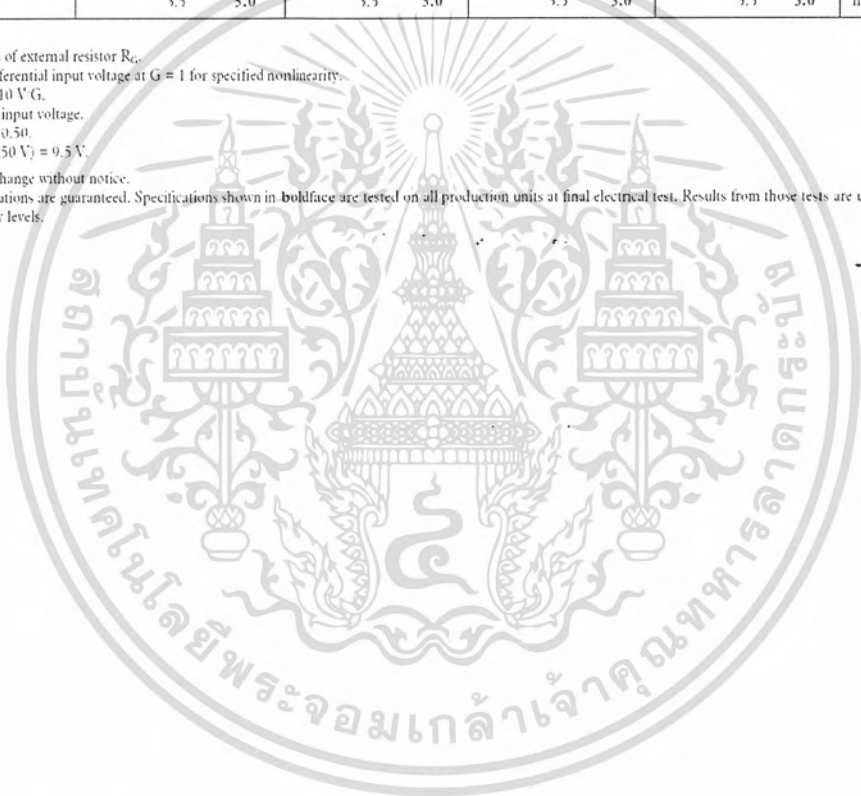
$V_{D1}$  = Actual differential input voltage.

Example:  $G = 10$ ,  $V_{D1} = 0.50$ .

$V_{CM} = 12 V$  ( $10 \cdot 2 \times 0.50 V$ ) = 9.5 V.

Specification subject to change without notice.

All min and max specifications are guaranteed. Specifications shown in boldface are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels.



# AD524

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS<sup>1</sup>

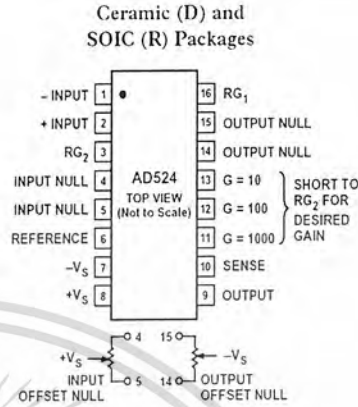
|  |                 |
|--|-----------------|
| Supply Voltage                                   | ±18 V           |
| Internal Power Dissipation                       | 450 mW          |
| Input Voltage <sup>2</sup>                       |                 |
| (Either Input Simultaneously) $ V_{IN}  +  V_S $ | <36 V           |
| Output Short Circuit Duration                    | Indefinite      |
| Storage Temperature Range                        |                 |
| (R)  | -65°C to +125°C |
| (D, E)   | -65°C to +150°C |
| Operating Temperature Range                      |                 |
| AD524A/B/C                                       | -25°C to +85°C  |
| AD524S   | -55°C to +125°C |
| Lead Temperature (Soldering 60 secs)             | +300°C          |

## NOTES

<sup>1</sup>Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

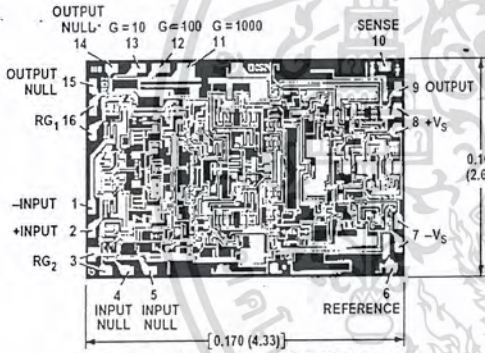
<sup>2</sup>Max input voltage specification refers to maximum voltage to which either input terminal may be raised with or without device power applied. For example, with ±18 volt supplies max  $V_{IN}$  is ±18 volts, with zero supply voltage max  $V_{IN}$  is ±36 volts.

## CONNECTION DIAGRAMS

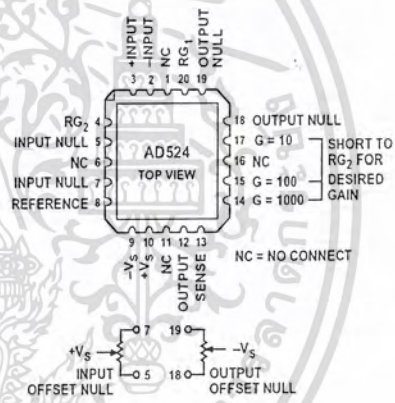


## METALIZATION PHOTOGRAPH

Contact factory for latest dimensions.  
Dimensions shown in inches and (mm).



## Leadless Chip Carrier



## ORDERING GUIDE

| Model            | Temperature Ranges | Package Descriptions              | Package Options |
|------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------|
| AD524AD          | -40°C to +85°C     | 16-Lead Ceramic DIP               | D-16            |
| AD524AE          | -40°C to +85°C     | 20-Terminal Leadless Chip Carrier | E-20A           |
| AD524AR-16       | -40°C to +85°C     | 16-Lead Gull-Wing SOIC            | R-16            |
| AD524AR-16-REEL  | -40°C to +85°C     | Tape & Reel Packaging 13"         |                 |
| AD524AR-16-REEL7 | -40°C to +85°C     | Tape & Reel Packaging 7"          |                 |
| AD524BD          | -40°C to +85°C     | 16-Lead Ceramic DIP               | D-16            |
| AD524BE          | -40°C to +85°C     | 20-Terminal Leadless Chip Carrier | E-20A           |
| AD524CD          | -40°C to +85°C     | 16-Lead Ceramic DIP               | D-16            |
| AD524SD          | -55°C to +125°C    | 16-Lead Ceramic DIP               | D-16            |
| AD524SD/883B     | -55°C to +125°C    | 16-Lead Ceramic DIP               | D-16            |
| 5962-8853901EA*  | -55°C to +125°C    | 16-Lead Ceramic DIP               | D-16            |
| AD524SE/883B     | -55°C to +125°C    | 20-Terminal Leadless Chip Carrier | E-20A           |
| AD524SCHIPS      | -55°C to +125°C    | Die                               |                 |

\*Refer to official DESC drawing for tested specifications.

## CAUTION

ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Electrostatic charges as high as 4000 V readily accumulate on the human body and test equipment and can discharge without detection. Although the AD524 features proprietary ESD protection circuitry, permanent damage may occur on devices subjected to high energy electrostatic discharges. Therefore, proper ESD precautions are recommended to avoid performance degradation or loss of functionality.



AD524—Typical Characteristics

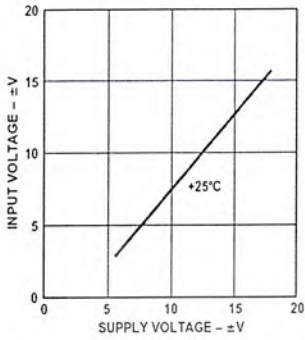


Figure 1. Input Voltage Range vs. Supply Voltage,  $G = 1$

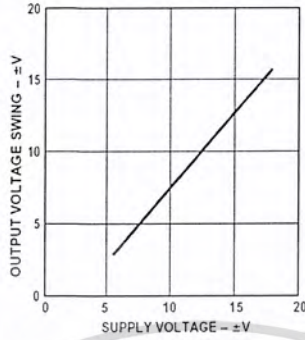


Figure 2. Output Voltage Swing vs. Supply Voltage

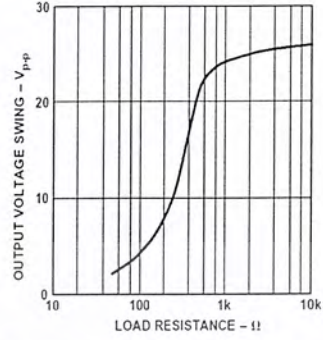


Figure 3. Output Voltage Swing vs. Load Resistance

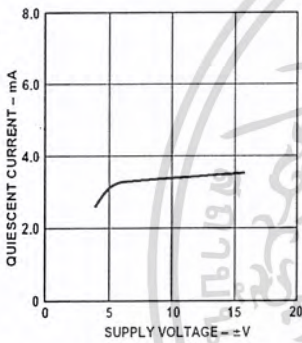


Figure 4. Quiescent Current vs. Supply Voltage

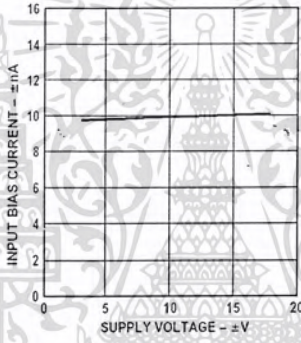


Figure 5. Input Bias Current vs. Supply Voltage

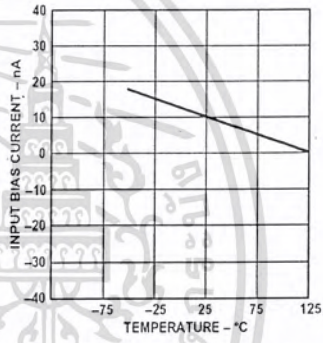


Figure 6. Input Bias Current vs. Temperature

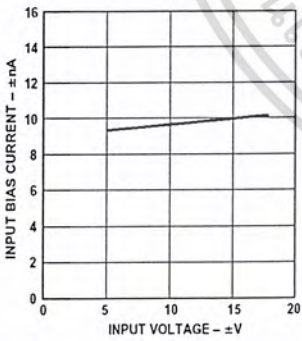


Figure 7. Input Bias Current vs. Input Voltage

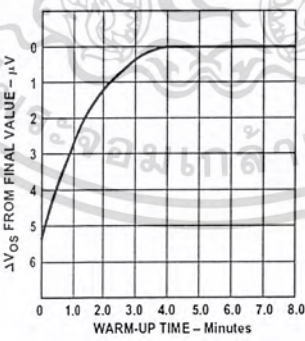


Figure 8. Offset Voltage, RTI, Turn On Drift

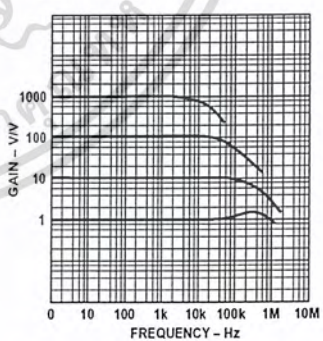


Figure 9. Gain vs. Frequency

AD524

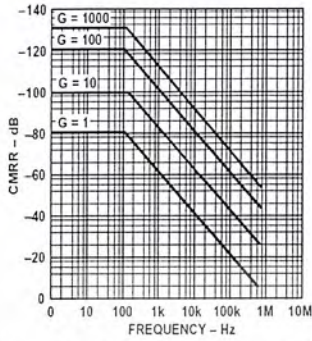


Figure 10. CMRR vs. Frequency RTI, Zero to 1k Source Imbalance

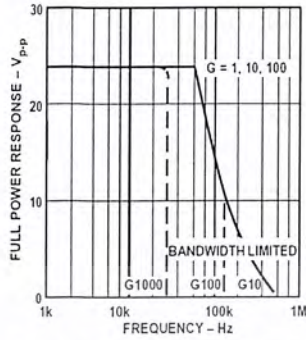


Figure 11. Large Signal Frequency Response

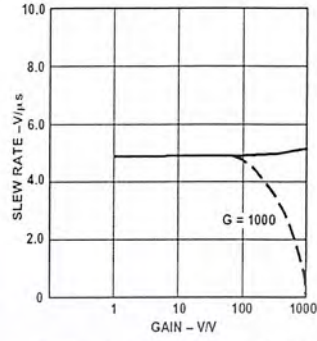


Figure 12. Slew Rate vs. Gain

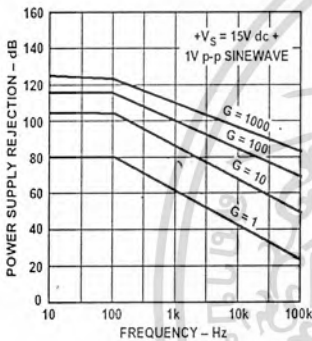


Figure 13. Positive PSRR vs. Frequency



Figure 14. Negative PSRR vs. Frequency

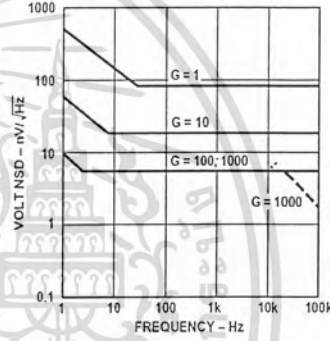


Figure 15. RTI Noise Spectral Density vs. Gain

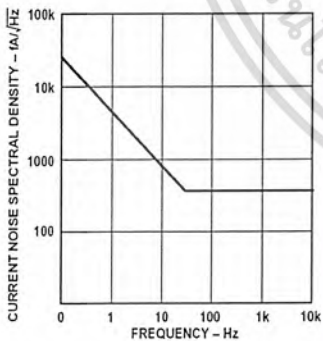


Figure 16. Input Current Noise vs. Frequency

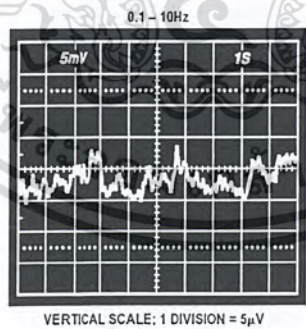


Figure 17. Low Frequency Noise - G = 1 (System Gain = 1000)

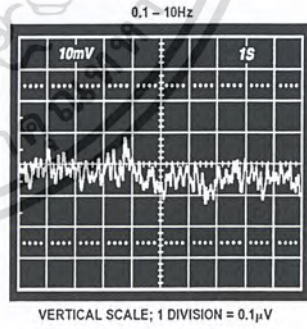


Figure 18. Low Frequency Noise - G = 1000 (System Gain = 100,000)

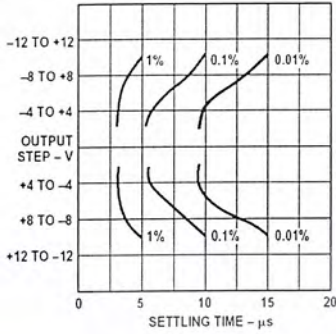


Figure 19. Settling Time Gain = 1

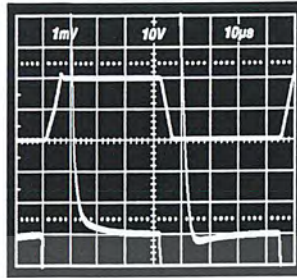


Figure 20. Large Signal Pulse Response and Settling Time - G = 1

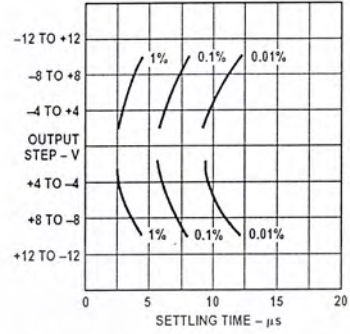


Figure 21. Settling Time Gain = 10

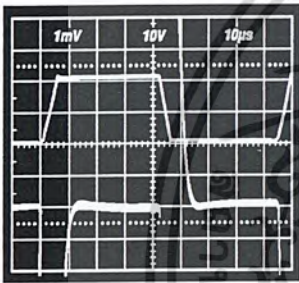


Figure 22. Large Signal Pulse Response and Settling Time G = 10

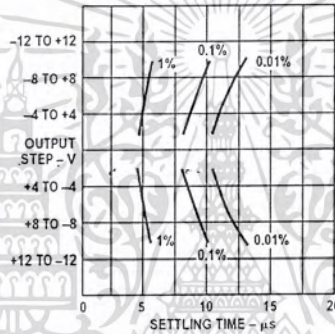


Figure 23. Settling Time Gain = 100

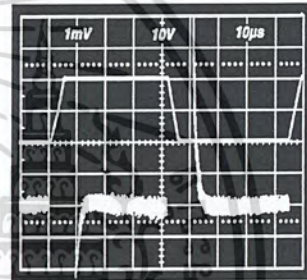


Figure 24. Large Signal Pulse Response and Settling Time G = 100

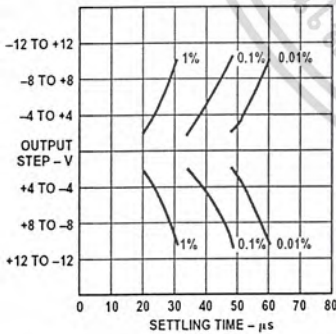


Figure 25. Settling Time Gain = 1000

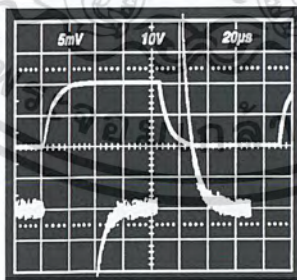


Figure 26. Large Signal Pulse Response and Settling Time G = 1000

AD524

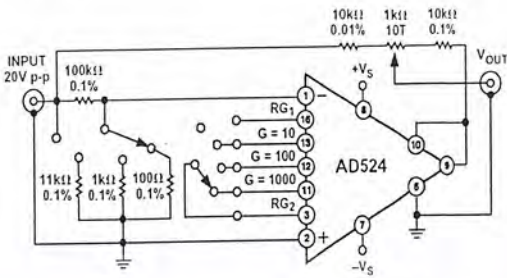


Figure 27. Settling Time Test Circuit

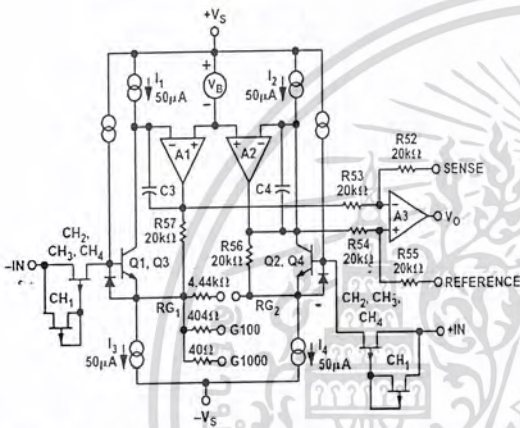


Figure 28 Simplified Circuit of Amplifier; Gain Is Defined as  $((R56 + R57)/(R_G)) + 1$ . For a Gain of 1,  $R_G$  Is an Open Circuit

Theory of Operation

The AD524 is a monolithic instrumentation amplifier based on the classic 3 op amp circuit. The advantage of monolithic construction is the closely matched components that enhance the performance of the input preamp. The preamp section develops the programmed gain by the use of feedback concepts. The programmed gain is developed by varying the value of  $R_G$  (smaller values increase the gain) while the feedback forces the collector currents Q1, Q2, Q3 and Q4 to be constant, which impresses the input voltage across  $R_G$ .

As  $R_G$  is reduced to increase the programmed gain, the transconductance of the input preamp increases to the transconductance of the input transistors. This has three important advantages. First, this approach allows the circuit to achieve a very high open loop gain of  $3 \times 10^8$  at a programmed gain of 1000, thus reducing gain-related errors to a negligible 30 ppm. Second, the gain bandwidth product, which is determined by C3 or C4 and the input transconductance, reaches 25 MHz. Third, the input voltage noise reduces to a value determined by the collector current of the input transistors for an RTI noise of  $7 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  at  $G = 1000$ .

INPUT PROTECTION

As interface amplifiers for data acquisition systems, instrumentation amplifiers are often subjected to input overloads, i.e., voltage levels in excess of the full scale for the selected gain range. At low gains, 10 or less, the gain resistor acts as a current limiting element in series with the inputs. At high gains the lower value of  $R_G$  will not adequately protect the inputs from excessive currents. Standard practice would be to place series limiting resistors in each input, but to limit input current to below 5 mA with a full differential overload (36 V) would require over 7k of resistance which would add  $10 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  of noise. To provide both input protection and low noise a special series protect FET was used.

A unique FET design was used to provide a bidirectional current limit, thereby, protecting against both positive and negative overloads. Under nonoverload conditions, three channels CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, act as a resistance ( $\approx 1 \text{ k}\Omega$ ) in series with the input as before. During an overload in the positive direction, a fourth channel, CH<sub>1</sub>, acts as a small resistance ( $\approx 3 \text{ k}\Omega$ ) in series with the gate, which draws only the leakage current, and the FET limits  $I_{DSS}$ . When the FET enhances under a negative overload, the gate current must go through the small FET formed by CH<sub>1</sub> and when this FET goes into saturation, the gate current is limited and the main FET will go into controlled enhancement. The bidirectional limiting holds the maximum input current to 3 mA over the 36 V range.

INPUT OFFSET AND OUTPUT OFFSET

Voltage offset specifications are often considered a figure of merit for instrumentation amplifiers. While initial offset may be adjusted to zero, shifts in offset voltage due to temperature variations will cause errors. Intelligent systems can often correct for this factor with an autozero cycle, but there are many small-signal high-gain applications that don't have this capability.

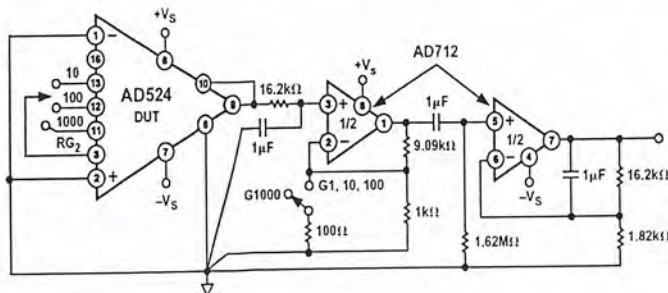


Figure 29. Noise Test Circuit

AD524

Voltage offset and drift comprise two components each; input and output offset and offset drift. Input offset is that component of offset that is directly proportional to gain i.e., input offset as measured at the output at  $G = 100$  is 100 times greater than at  $G = 1$ . Output offset is independent of gain. At low gains, output offset drift is dominant, while at high gains input offset drift dominates. Therefore, the output offset voltage drift is normally specified as drift at  $G = 1$  (where input effects are insignificant), while input offset voltage drift is given by drift specification at a high gain (where output offset effects are negligible). All input-related numbers are referred to the input (RTI) which is to say that the effect on the output is "G" times larger. Voltage offset vs. power supply is also specified at one or more gain settings and is also RTI.

By separating these errors, one can evaluate the total error independent of the gain setting used. In a given gain configuration both errors can be combined to give a total error referred to the input (R.T.I.) or output (R.T.O.) by the following formula:

$$\text{Total Error R.T.I.} = \text{input error} + (\text{output error}/\text{gain})$$

$$\text{Total Error R.T.O.} = (\text{Gain} \times \text{input error}) + \text{output error}$$

As an illustration, a typical AD524 might have a  $+250 \mu\text{V}$  output offset and a  $-50 \mu\text{V}$  input offset. In a unity gain configuration, the total output offset would be  $200 \mu\text{V}$  or the sum of the two. At a gain of 100, the output offset would be  $-4.75 \text{ mV}$  or:  $+250 \mu\text{V} + 100(-50 \mu\text{V}) = -4.75 \text{ mV}$ .

The AD524 provides for both input and output offset adjustment. This simplifies very high precision applications and minimize offset voltage changes in switched gain applications. In such applications the input offset is adjusted first at the highest programmed gain, then the output offset is adjusted at  $G = 1$ .

**GAIN**

The AD524 has internal high accuracy pretrimmed resistors for pin programmable gain of 1, 10, 100 and 1000. One of the preset gains can be selected by pin strapping the appropriate gain terminal and  $\text{RG}_2$  together (for  $G = 1$   $\text{RG}_2$  is not connected).

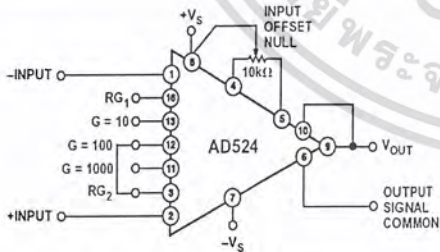


Figure 30. Operating Connections for  $G = 100$

The AD524 can be configured for gains other than those that are internally preset; there are two methods to do this. The first method uses just an external resistor connected between pins 3 and 16, which programs the gain according to the formula

$$R_G = \frac{40k}{G - 1}$$

(see Figure 31).

For best results  $R_G$  should be a precision resistor with a low temperature coefficient. An external  $R_G$  affects both gain accuracy and gain drift due to the mismatch between it and the internal thin-film resistors. Gain accuracy is determined by the tolerance of the external  $R_G$ ; and the absolute accuracy of the internal resistors ( $\pm 20\%$ ). Gain drift is determined by the mismatch of the temperature coefficient of  $R_G$  and the temperature coefficient of the internal resistors ( $-50 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  typ).

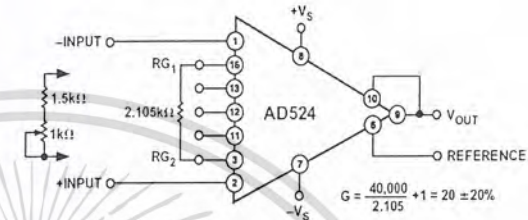


Figure 31. Operating Connections for  $G = 20$

The second technique uses the internal resistors in parallel with an external resistor (Figure 32). This technique minimizes the gain adjustment range and reduces the effects of temperature coefficient sensitivity.

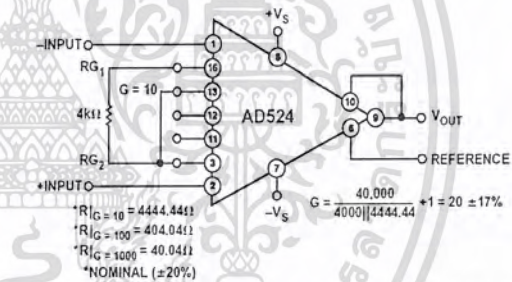


Figure 32. Operating Connections for  $G = 20$ , Low Gain T.C. Technique

The AD524 may also be configured to provide gain in the output stage. Figure 33 shows an H pad attenuator connected to the reference and sense lines of the AD524.  $R_1$ ,  $R_2$  and  $R_3$  should be made as low as possible to minimize the gain variation and reduction of CMRR. Varying  $R_2$  will precisely set the gain without affecting CMRR. CMRR is determined by the match of  $R_1$  and  $R_3$ .

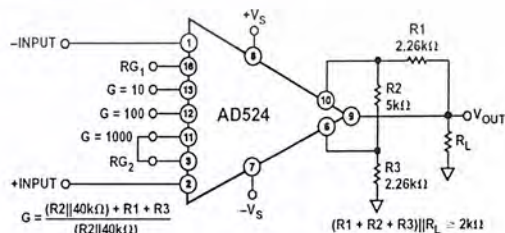


Figure 33. Gain of 2000

# AD524

Table I. Output Gain Resistor Values

| Output Gain | R2      | R1, R3  | Nominal Gain |
|-------------|---------|---------|--------------|
| 2           | 5 kΩ    | 2.26 kΩ | 2.02         |
| 5           | 1.05 kΩ | 2.05 kΩ | 5.01         |
| 10          | 1 kΩ    | 4.42 kΩ | 10.1         |

## INPUT BIAS CURRENTS

Input bias currents are those currents necessary to bias the input transistors of a dc amplifier. Bias currents are an additional source of input error and must be considered in a total error budget. The bias currents, when multiplied by the source resistance, appear as an offset voltage. What is of concern in calculating bias current errors is the change in bias current with respect to signal voltage and temperature. Input offset current is the difference between the two input bias currents. The effect of offset current is an input offset voltage whose magnitude is the offset current times the source impedance imbalance.

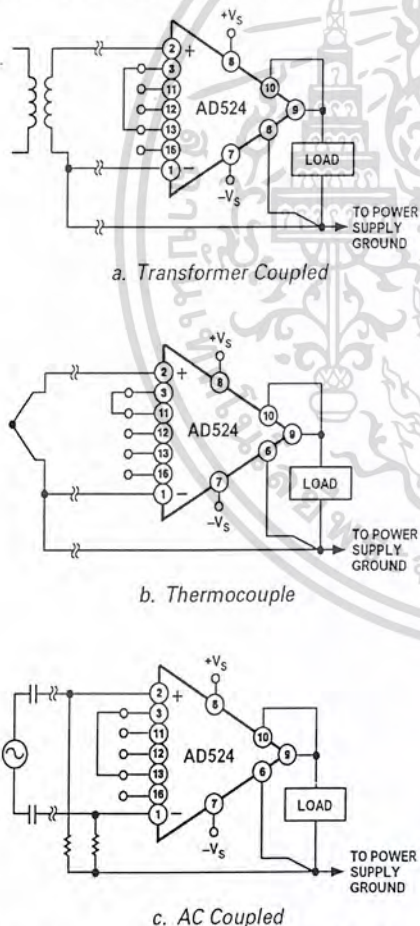


Figure 34. Indirect Ground Returns for Bias Currents

Although instrumentation amplifiers have differential inputs, there must be a return path for the bias currents. If this is not provided, those currents will charge stray capacitances, causing the output to drift uncontrollably or to saturate. Therefore, when amplifying "floating" input sources such as transformers and thermocouples, as well as ac-coupled sources, there must still be a dc path from each input to ground.

## COMMON-MODE REJECTION

Common-mode rejection is a measure of the change in output voltage when both inputs are changed equal amounts. These specifications are usually given for a full-range input voltage change and a specified source imbalance. "Common-Mode Rejection Ratio" (CMRR) is a ratio expression while "Common-Mode Rejection" (CMR) is the logarithm of that ratio. For example, a CMRR of 10,000 corresponds to a CMR of 80 dB.

In an instrumentation amplifier, ac common-mode rejection is only as good as the differential phase shift. Degradation of ac common-mode rejection is caused by unequal drops across differing track resistances and a differential phase shift due to varied stray capacitances or cable capacitances. In many applications shielded cables are used to minimize noise. This technique can create common mode rejection errors unless the shield is properly driven. Figures 35 and 36 shows active data guards that are configured to improve ac common mode rejection by "bootstrapping" the capacitances of the input cabling, thus minimizing differential phase shift.

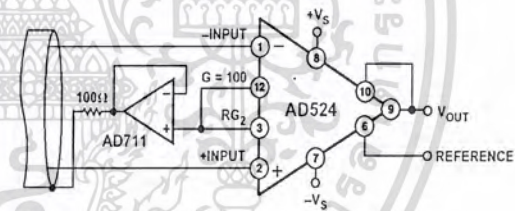


Figure 35. Shield Driver,  $G \geq 100$

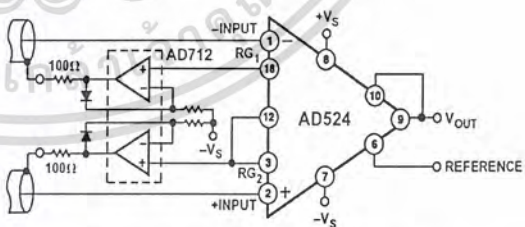


Figure 36. Differential Shield Driver

## GROUNDING

Many data acquisition components have two or more ground pins that are not connected together within the device. These grounds must be tied together at one point, usually at the system power-supply ground. Ideally, a single solid ground would be desirable. However, since current flows through the ground wires and etch stripes of the circuit cards, and since these paths have resistance and inductance, hundreds of millivolts can be generated between the system ground point and the data

acquisition components. Separate ground returns should be provided to minimize the current flow in the path from the sensitive points to the system ground point. In this way supply currents and logic-gate return currents are not summed into the same return path as analog signals where they would cause measurement errors.

Since the output voltage is developed with respect to the potential on the reference terminal, an instrumentation amplifier can solve many grounding problems.

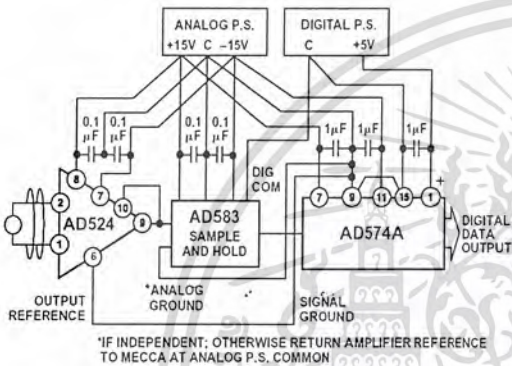


Figure 37. Basic Grounding Practice

**SENSE TERMINAL.**

The sense terminal is the feedback point for the instrument amplifier's output amplifier. Normally it is connected to the instrument amplifier output. If heavy load currents are to be drawn through long leads, voltage drops due to current flowing through lead resistance can cause errors. The sense terminal can be wired to the instrument amplifier at the load, thus putting the IxR drops "inside the loop" and virtually eliminating this error source.

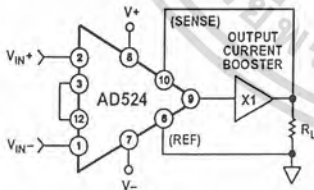


Figure 38. AD524 Instrumentation Amplifier with Output Current Booster

Typically, IC instrumentation amplifiers are rated for a full ±10 volt output swing into 2 kΩ. In some applications, however, the need exists to drive more current into heavier loads. Figure 38 shows how a high-current booster may be connected "inside the loop" of an instrumentation amplifier to provide the required current boost without significantly degrading overall performance. Nonlinearities, offset and gain inaccuracies of the buffer are minimized by the loop gain of the IA output amplifier. Offset drift of the buffer is similarly reduced.

**REFERENCE TERMINAL**

The reference terminal may be used to offset the output by up to ±10 V. This is useful when the load is "floating" or does not share a ground with the rest of the system. It also provides a direct means of injecting a precise offset. It must be remembered that the total output swing is ±10 volts to be shared between signal and reference offset.

When the IA is of the three-amplifier configuration it is necessary that nearly zero impedance be presented to the reference terminal.

Any significant resistance from the reference terminal to ground increases the gain of the noninverting signal path, thereby upsetting the common-mode rejection of the IA.

In the AD524 a reference source resistance will unbalance the CMR trim by the ratio of 20 kΩ/RREF. For example, if the reference source impedance is 1 Ω, CMR will be reduced to 86 dB (20 kΩ/1 Ω = 86 dB). An operational amplifier may be used to provide that low impedance reference point as shown in Figure 39. The input offset voltage characteristics of that amplifier will add directly to the output offset voltage performance of the instrumentation amplifier.

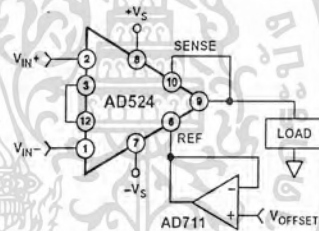
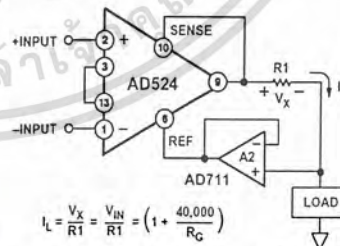


Figure 39. Use of Reference Terminal to Provide Output Offset

An instrumentation amplifier can be turned into a voltage-to-current converter by taking advantage of the sense and reference terminals as shown in Figure 40.



$$I_L = \frac{V_X}{R_1} = \frac{V_{IN}}{R_1} \left( 1 + \frac{40,000}{R_C} \right)$$

Figure 40. Voltage-to-Current Converter

By establishing a reference at the "low" side of a current setting resistor, an output current may be defined as a function of input voltage, gain and the value of that resistor. Since only a small current is demanded at the input of the buffer amplifier A2, the forced current IL will largely flow through the load. Offset and drift specifications of A2 must be added to the output offset and drift specifications of the IA.

AD524

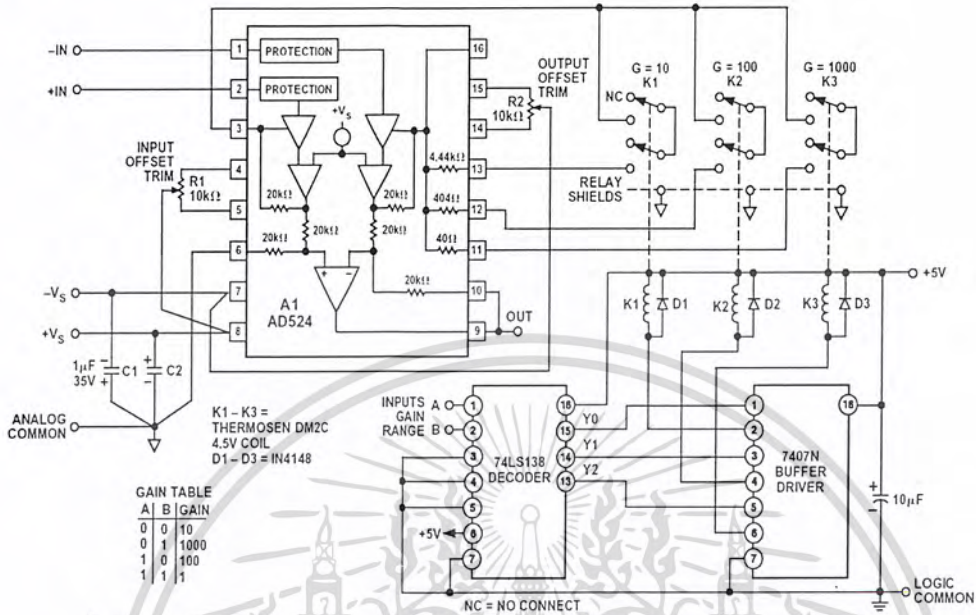


Figure 41. Three Decade Gain Programmable Amplifier

PROGRAMMABLE GAIN

Figure 41 shows the AD524 being used as a software programmable gain amplifier. Gain switching can be accomplished with mechanical switches such as DIP switches or reed relays. It should be noted that the “on” resistance of the switch in series with the internal gain resistor becomes part of the gain equation and will have an effect on gain accuracy.

The AD524 can also be connected for gain in the output stage. Figure 42 shows an AD711 used as an active attenuator in the output amplifier’s feedback loop. The active attenuation presents a very low impedance to the feedback resistors, therefore minimizing the common-mode rejection ratio degradation.

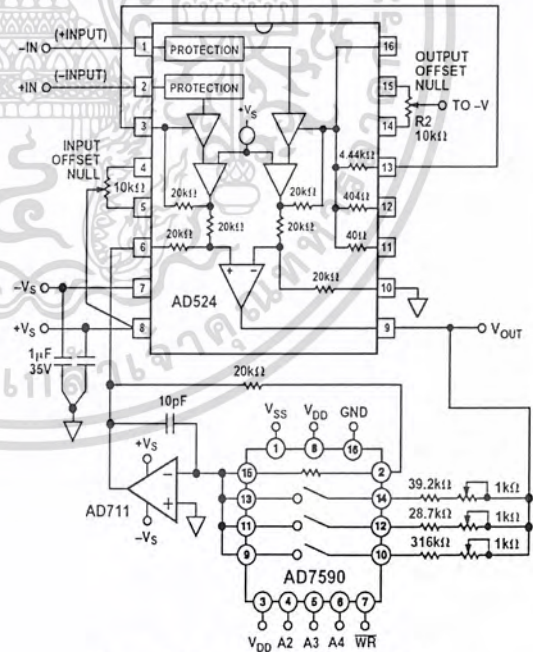


Figure 42. Programmable Output Gain

AD524

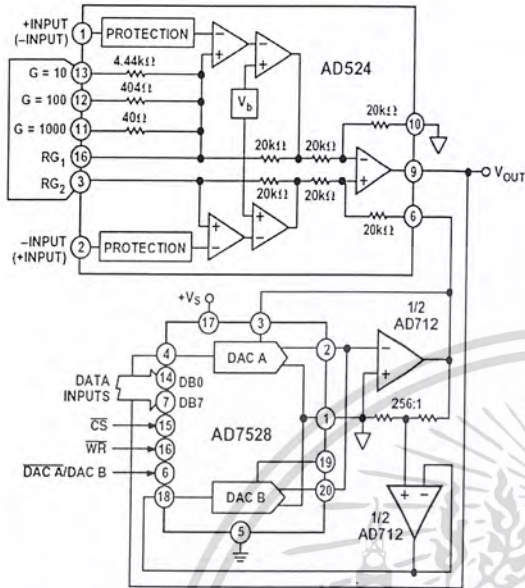


Figure 43. Programmable Output Gain Using a DAC

Another method for developing the switching scheme is to use a DAC. The AD7528 dual DAC, which acts essentially as a pair of switched resistive attenuators having high analog linearity and symmetrical bipolar transmission, is ideal in this application. The multiplying DAC's advantage is that it can handle inputs of either polarity or zero without affecting the programmed gain. The circuit shown uses an AD7528 to set the gain (DAC A) and to perform a fine adjustment (DAC B).

**AUTOZERO CIRCUITS**

In many applications it is necessary to provide very accurate data in high gain configurations. At room temperature the offset effects can be nulled by the use of offset trimpots. Over the operating temperature range, however, offset nulling becomes a problem. The circuit of Figure 44 show a CMOS DAC operating in the bipolar mode and connected to the reference terminal to provide software controllable offset adjustments.

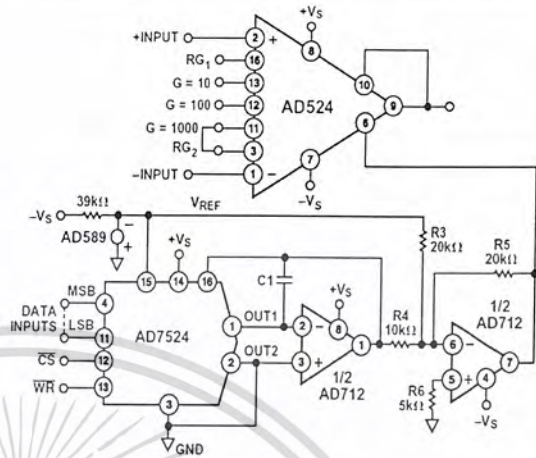


Figure 44. Software Controllable Offset

In many applications complex software algorithms for autozero applications are not available. For those applications Figure 45 provides a hardware solution.

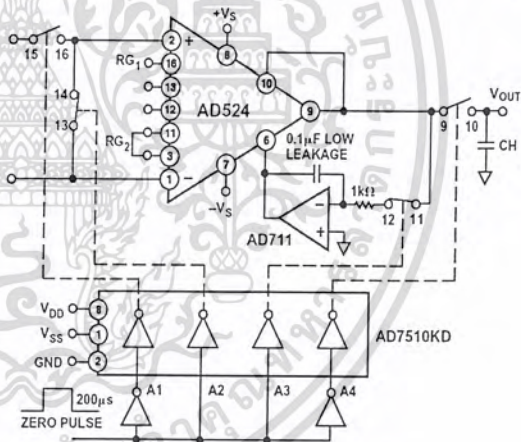


Figure 45. Autozero Circuit

# AD524

## ERROR BUDGET ANALYSIS

To illustrate how instrumentation amplifier specifications are applied, we will now examine a typical case where an AD524 is required to amplify the output of an unbalanced transducer. Figure 46 shows a differential transducer, unbalanced by 100 Ω, supplying a 0 to 20 mV signal to an AD524C. The output of the IA feeds a 14-bit A-to-D converter with a 0 to 2 volt input voltage range. The operating temperature range is -25°C to +85°C. Therefore, the largest change in temperature ΔT within the operating range is from ambient to +85°C (85°C - 25°C = 60°C).

In many applications, differential linearity and resolution are of prime importance. This would be so in cases where the absolute value of a variable is less important than changes in value. In these applications, only the irreducible errors (45 ppm = 0.004%) are significant. Furthermore, if a system has an intelligent processor monitoring the A-to-D output, the addition of a auto-gain/autozero cycle will remove all reducible errors and may eliminate the requirement for initial calibration. This will also reduce errors to 0.004%.

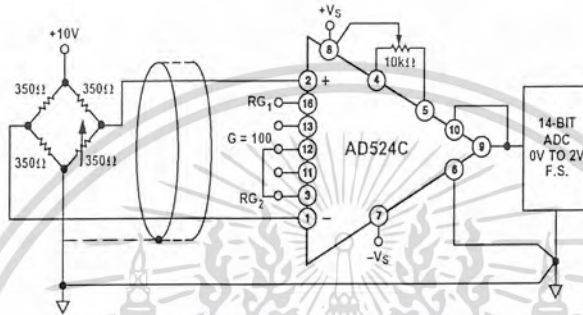


Figure 46. Typical Bridge Application

Table II. Error Budget Analysis of AD524CD in Bridge Application

| Error Source                           | AD524C Specifications | Calculation   | Effect on Absolute Accuracy at T <sub>A</sub> = +25°C | Effect on Absolute Accuracy at T <sub>A</sub> = +85°C | Effect on Resolution |
|--|-----------------------|---|---|---|----------------------|
| Gain Error                             | ±0.25%                | ±0.25% = 2500 ppm   | 2500 ppm  | 2500 ppm  | -                    |
| Gain Instability                       | 25 ppm                | (25 ppm/°C)(60°C) = 1500 ppm                                | -   | 1500 ppm  | -                    |
| Gain Nonlinearity                      | ±0.003%               | ±0.003% = 30 ppm  | -   | -   | 30 ppm               |
| Input Offset Voltage                   | ±50 μV, RTI           | ±50 μV/20 mV = ±2500 ppm                                    | 2500 ppm  | 2500 ppm  | -                    |
| Input Offset Voltage Drift             | ±0.5 μV/°C            | (±0.5 μV/°C)(60°C) = 30 μV<br>30 μV/20 mV = 1500 ppm        | -   | 1500 ppm  | -                    |
| Output Offset Voltage*                 | ±2.0 mV               | ±2.0 mV/20 mV = 1000 ppm                                    | 1000 ppm  | 1000 ppm  | -                    |
| Output Offset Voltage Drift*           | ±25 μV/°C             | (±25 μV/°C)(60°C) = 1500 μV<br>1500 μV/20 mV = 750 ppm      | -   | 750 ppm   | -                    |
| Bias Current-Source Imbalance Error    | ±15 nA                | (±15 nA)(100 Ω) = 1.5 μV<br>1.5 μV/20 mV = 75 ppm           | 75 ppm  | 75 ppm  | -                    |
| Bias Current-Source Imbalance Drift    | ±100 pA/°C            | (±100 pA/°C)(100 Ω)(60°C) = 0.6 μV<br>0.6 μV/20 mV = 30 ppm | -   | 30 ppm  | -                    |
| Offset Current-Source Imbalance Error  | ±10 nA                | (±10 nA)(100 Ω) = 1 μV<br>1 μV/20 mV = 50 ppm               | 50 ppm  | 50 ppm  | -                    |
| Offset Current-Source Imbalance Drift  | ±100 pA/°C            | (100 pA/°C)(100 Ω)(60°C) = 0.6 μV<br>0.6 μV/20 mV = 30 ppm  | -   | 30 ppm  | -                    |
| Offset Current-Source Resistance-Error | ±10 nA                | (10 nA)(175 Ω) = 3.5 μV<br>3.5 μV/20 mV = 87.5 ppm          | 87.5 ppm  | 87.5 ppm  | -                    |
| Offset Current-Source Resistance-Drift | ±100 pA/°C            | (100 pA/°C)(175 Ω)(60°C) = 1 μV<br>1 μV/20 mV = 50 ppm      | -   | 50 ppm  | -                    |
| Common Mode Rejection 5 V dc           | 115 dB                | 115 dB = 1.8 ppm × 5 V = 8.8 μV<br>8.8 μV/20 mV = 444 ppm   | 444 ppm   | 444 ppm   | -                    |
| Noise, RTI (0.1 Hz-10 Hz)              | 0.3 μV p-p            | 0.3 μV p-p/20 mV = 15 ppm                                   | -   | -   | 15 ppm               |
| Total Error                            |                       |   | 6656.5 ppm  | 10516.5 ppm   | 45 ppm               |

\*Output offset voltage and output offset voltage drift are given as RTI figures.

Figure 47 shows a simple application, in which the variation of the cold-junction voltage of a Type J thermocouple-iron(+)-constantan-is compensated for by a voltage developed in series by the temperature-sensitive output current of an AD590 semiconductor temperature sensor.

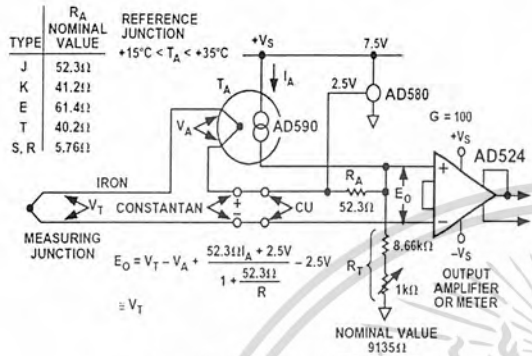


Figure 47. Cold-Junction Compensation

The circuit is calibrated by adjusting R<sub>T</sub> for proper output voltage with the measuring junction at a known reference temperature

and the circuit near 25°C. If resistors with low tempcos are used, compensation accuracy will be to within ±0.5°C, for temperatures between +15°C and +35°C. Other thermocouple types may be accommodated with the standard resistance values shown in the table. For other ranges of ambient temperature, the equation in the figure may be solved for the optimum values of R<sub>T</sub> and R<sub>A</sub>.

The microprocessor controlled data acquisition system shown in Figure 48 includes both autozero and autogain capability. By dedicating two of the differential inputs, one to ground and one to the A/D reference, the proper program calibration cycles can eliminate both initial accuracy errors and accuracy errors over temperature. The autozero cycle, in this application, converts a number that appears to be ground and then writes that same number (8-bit) to the AD7524, which eliminates the zero error since its output has an inverted scale. The autogain cycle converts the A/D reference and compares it with full scale. A multiplicative correction factor is then computed and applied to subsequent readings.

For a comprehensive study of instrumentation amplifier design and applications, refer to the *Instrumentation Amplifier Application Guide*, available free from Analog Devices.

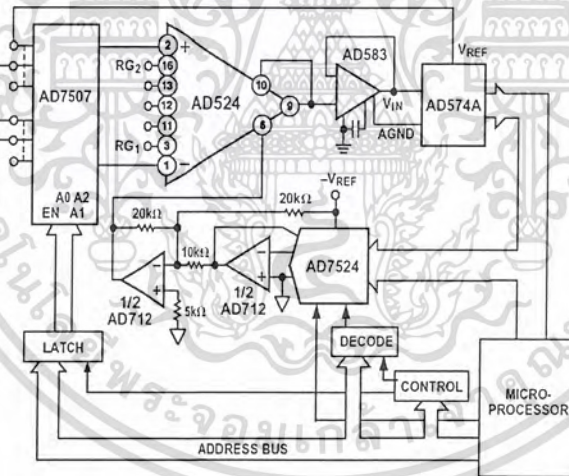


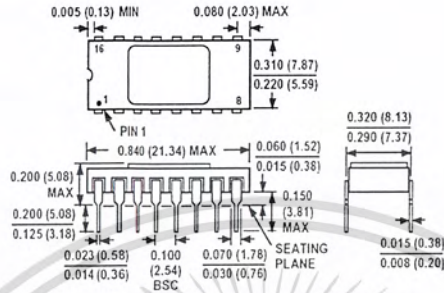
Figure 48. Microprocessor Controlled Data Acquisition System

AD524

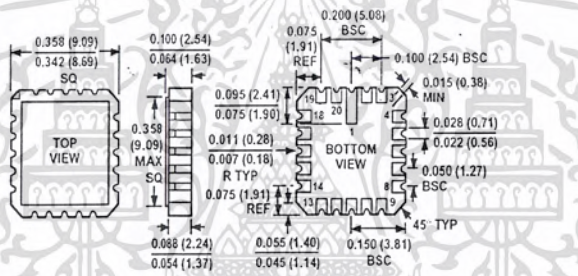
OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

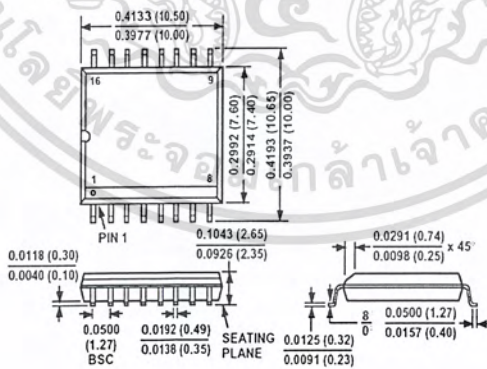
16-Lead Ceramic DIP  
(D-16)



20-Terminal Leadless Chip Carrier  
(E-20A)



16-Lead SOIC  
(R-16)





# ICL7135

4<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Digit,  
BCD Output, A/D Converter

August 1997

### Features

- Accuracy Guaranteed to  $\pm 1$  Count Over Entire  $\pm 20000$  Counts (2.0000V Full Scale)
- Guaranteed Zero Reading for 0V Input
- 1pA Typical Input Leakage Current
- True Differential Input
- True Polarity at Zero Count for Precise Null Detection
- Single Reference Voltage Required
- Overrange and Underrange Signals Available for Auto-Range Capability
- All Outputs TTL Compatible
- Blinking Outputs Gives Visual Indication of Overrange
- Six Auxiliary Inputs/Outputs are Available for Interfacing to UARTs, Microprocessors, or Other Circuitry
- Multiplexed BCD Outputs

### Description

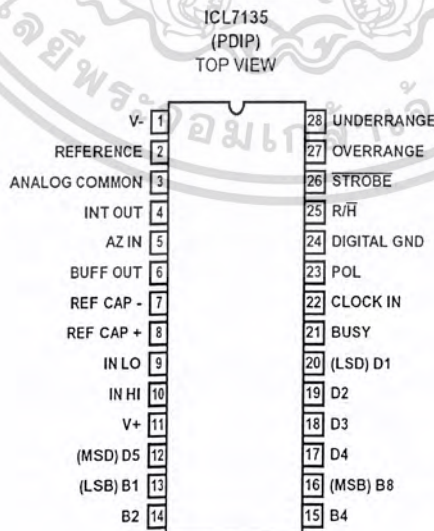
The Intersil ICL7135 precision A/D converter, with its multiplexed BCD output and digit drivers, combines dual-slope conversion reliability with  $\pm 1$  in 20,000 count accuracy and is ideally suited for the visual display DVM/DPM market. The 2.0000V full scale capability, auto-zero, and auto-polarity are combined with true ratiometric operation, almost ideal differential linearity and true differential input. All necessary active devices are contained on a single CMOS IC, with the exception of display drivers, reference, and a clock.

The ICL7135 brings together an unprecedented combination of high accuracy, versatility, and true economy. It features auto-zero to less than 10 $\mu$ V, zero drift of less than 1 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C, input bias current of 10pA (Max), and rollover error of less than one count. The versatility of multiplexed BCD outputs is increased by the addition of several pins which allow it to operate in more sophisticated systems. These include STROBE, OVERRANGE, UNDERRANGE, RUN/HOLD and BUSY lines, making it possible to interface the circuit to a microprocessor or UART.

### Ordering Information

| PART NUMBER | TEMP. RANGE ( $^{\circ}$ C) | PACKAGE    | PKG. NO. |
|-------------|-----------------------------|------------|----------|
| ICL7135CPI  | 0 to 70                     | 28 Ld PDIP | E28.6    |

### Pinout



CAUTION: These devices are sensitive to electrostatic discharge; follow proper IC Handling Procedures.

File Number 3093.1

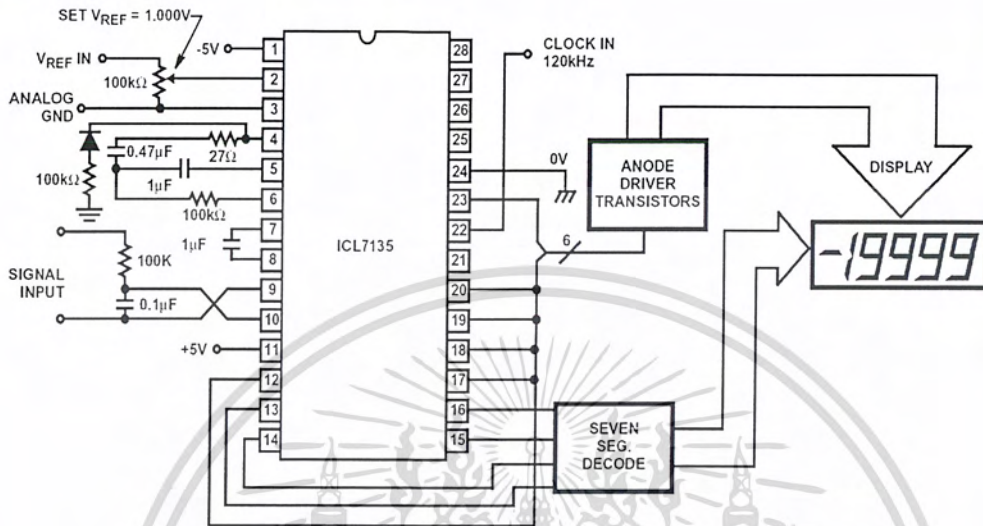
1-888-INTERSIL or 321-724-7143 | Copyright © Intersil Corporation 1999

5-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ICL7135

## Typical Application Schematic



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ICL7135

## Absolute Maximum Ratings

|  |                |
|--|----------------|
| Supply Voltage $V_+$                         | +6V            |
| $V_-$  | -9V            |
| Analog Input Voltage (Either Input) (Note 1) | $V_+$ to $V_-$ |
| Reference Input Voltage (Either Input)       | $V_+$ to $V_-$ |
| Clock Input Voltage                          | GND to $V_+$   |

## Thermal Information

|  |  |
|--|--|
| Thermal Resistance (Typical, Note 2)     | $\theta_{JA}$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )    |
| PDIP Package                             | 55   |
| Maximum Junction Temperature             | 150 $^{\circ}\text{C}$                           |
| Maximum Storage Temperature Range        | -65 $^{\circ}\text{C}$ to 150 $^{\circ}\text{C}$ |
| Maximum Lead Temperature (Soldering 10s) | 300 $^{\circ}\text{C}$                           |

## Operating Conditions

Temperature Range ..... 0 $^{\circ}\text{C}$  to 70 $^{\circ}\text{C}$

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

## NOTES:

- Input voltages may exceed the supply voltages provided the input current is limited to +100 $\mu\text{A}$ .
- $\theta_{JA}$  is measured with the component mounted on an evaluation PC board in free air.

Electrical Specifications  $V_+ = +5\text{V}$ ,  $V_- = -5\text{V}$ ,  $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $f_{\text{CLK}}$  Set for 3 Readings/s, Unless Otherwise Specified

| PARAMETER  | TEST CONDITIONS  | MIN    | TYP    | MAX    | UNITS                          |
|--|--|--------|--------|--------|--------------------------------|
| <b>ANALOG</b> (Notes 3, 4)   |  |        |        |        |                                |
| Zero Input Reading   | $V_{\text{IN}} = 0\text{V}$ , $V_{\text{REF}} = 1.000\text{V}$   | -00000 | +00000 | +00000 | Counts                         |
| Ratiometric Error (Note 4)   | $V_{\text{IN}} = V_{\text{REF}} = 1.000\text{V}$   | -3     | -1     | 0      | Counts                         |
| Linearity Over $\pm$ Full Scale (Error of Reading from Best Straight Line)                     | $-2\text{V} \leq V_{\text{IN}} \leq +2\text{V}$  | -      | 0.5    | 1      | LSB                            |
| Differential Linearity (Difference Between Worst Case Step of Adjacent Counts and Ideal Step)  | $-2\text{V} \leq V_{\text{IN}} \leq +2\text{V}$  | -      | 0.01   | -      | LSB                            |
| Rollover Error (Difference in Reading for Equal Positive and Negative Voltage Near Full Scale) | $-V_{\text{IN}} \cong +V_{\text{IN}} = 2\text{V}$  | -      | 0.5    | 1      | LSB                            |
| Noise (Peak-to-Peak Value Not Exceeded 95% of Time), $e_{\text{N}}$                            | $V_{\text{IN}} = 0\text{V}$ , Full scale = 2.000V  | -      | 15     | -      | $\mu\text{V}$                  |
| Input Leakage Current, $I_{\text{ILK}}$  | $V_{\text{IN}} = 0\text{V}$  | -      | 1      | 10     | $\mu\text{A}$                  |
| Zero Reading Drift (Note 7)  | $V_{\text{IN}} = 0\text{V}$ , 0 $^{\circ}\text{C}$ to 70 $^{\circ}\text{C}$  | -      | 0.5    | 2      | $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ |
| Scale Factor Temperature Coefficient, $T_C$ (Notes 5 and 7)                                    | $V_{\text{IN}} = +2\text{V}$ , 0 $^{\circ}\text{C}$ to 70 $^{\circ}\text{C}$<br>Ext. Ref. 0ppm/ $^{\circ}\text{C}$ | -      | 2      | 5      | ppm/ $^{\circ}\text{C}$        |
| <b>DIGITAL INPUTS</b>  |  |        |        |        |                                |
| Clock In, Run/Hold (See Figure 2)  |  |        |        |        |                                |
| $V_{\text{INH}}$   |  | 2.8    | 2.2    | -      | V                              |
| $V_{\text{INL}}$   |  | -      | 1.6    | 0.8    | V                              |
| $I_{\text{INL}}$   | $V_{\text{IN}} = 0\text{V}$  | -      | 0.02   | 0.1    | mA                             |
| $I_{\text{INH}}$   | $V_{\text{IN}} = +5\text{V}$   | -      | 0.1    | 10     | $\mu\text{A}$                  |
| <b>DIGITAL OUTPUTS</b>   |  |        |        |        |                                |
| All Outputs, $V_{\text{OL}}$   | $I_{\text{OL}} = 1.6\text{mA}$   | -      | 0.25   | 0.40   | V                              |
| B1, B2, B4, B8, D1, D2, D3, D4, D5, $V_{\text{OH}}$  | $I_{\text{OH}} = -1\text{mA}$  | 2.4    | 4.2    | -      | V                              |
| BUSY, STROBE, OVERRANGE, UNDERRANGE, POLARITY, $V_{\text{OH}}$                                 | $I_{\text{OH}} = -10\mu\text{A}$   | 4.9    | 4.99   | -      | V                              |
| <b>SUPPLY</b>  |  |        |        |        |                                |
| +5V Supply Range, $V_+$  |  | +4     | +5     | +6     | V                              |
| -5V Supply Range, $V_-$  |  | -3     | -5     | -8     | V                              |
| +5V Supply Current, $I_+$  | $f_{\text{C}} = 0$   | -      | 1.1    | 3.0    | mA                             |
| -5V Supply Current, $I_-$  | $f_{\text{C}} = 0$   | -      | 0.8    | 3.0    | mA                             |
| Power Dissipation Capacitance, $C_{\text{PD}}$   | vs Clock Frequency   | -      | 40     | -      | pF                             |
| <b>CLOCK</b>   |  |        |        |        |                                |
| Clock Frequency (Note 6)   |  | DC     | 2000   | 1200   | kHz                            |

## NOTES:

- Tested in  $4\frac{1}{2}$  digit (20,000 count) circuit shown in Figure 3. (Clock frequency 120kHz.)
- Tested with a low dielectric absorption integrating capacitor, the 27 $\Omega$  INT OUT resistor shorted, and  $R_{\text{INT}} = 0$ . See Component Value Selection Discussion.
- The temperature range can be extended to 70 $^{\circ}\text{C}$  and beyond as long as the auto-zero and reference capacitors are increased to absorb the higher leakage of the ICL7135.
- This specification relates to the clock frequency range over which the ICL7135 will correctly perform its various functions See "Max Clock Frequency" section for limitations on the clock frequency range in a system.
- Parameter guaranteed by design or characterization. Not production tested.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ICL7135

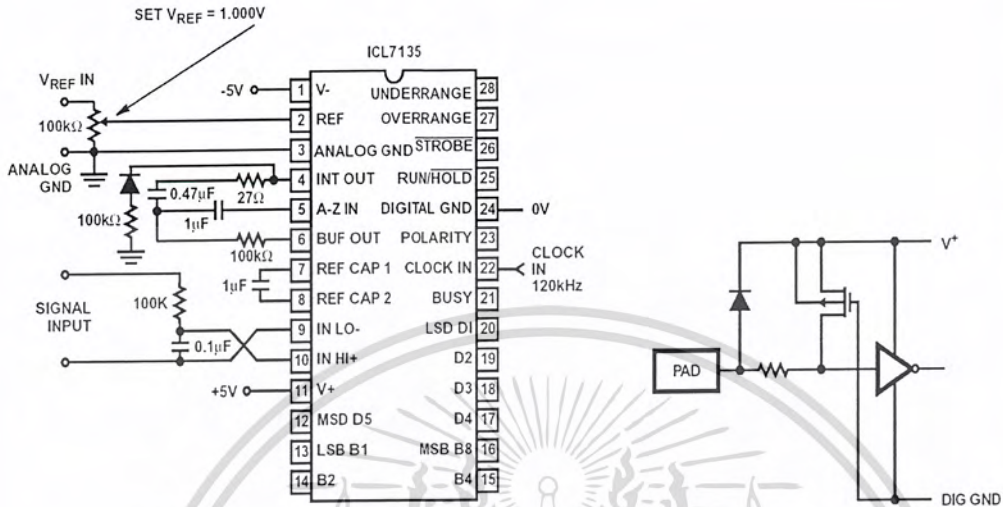


FIGURE 1. ICL7135 TEST CIRCUIT

FIGURE 2. ICL7135 DIGITAL LOGIC INPUT

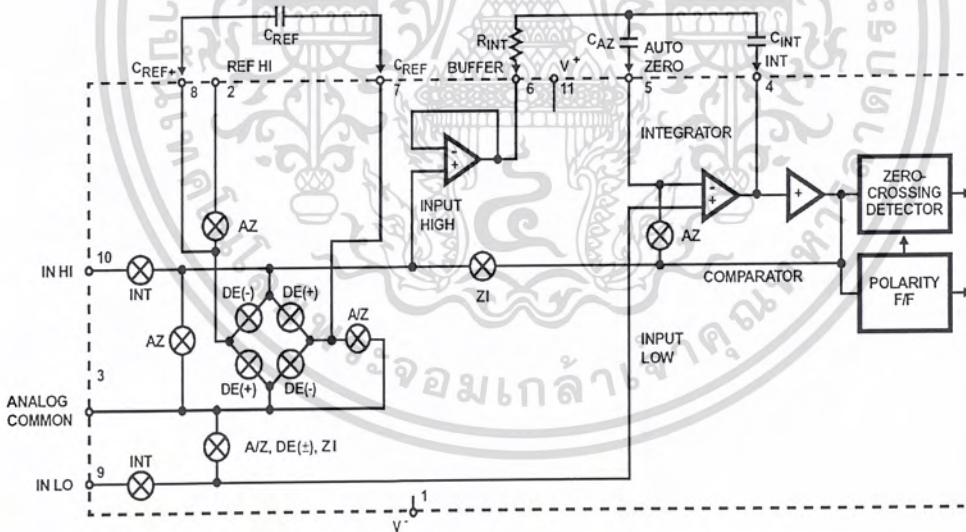


FIGURE 3. ANALOG SECTION OF ICL7135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ICL7135

**Detailed Description****Analog Section**

Figure 3 shows the Block Diagram of the Analog Section for the ICL7135. Each measurement cycle is divided into four phases. They are (1) auto-zero (AZ), (2) signal-integrate (INT), (3) de-integrate (DE) and (4) zero-integrator (ZI).

**Auto-Zero Phase**

During auto-zero, three things happen. First, input high and low are disconnected from the pins and internally shorted to analog COMMON. Second, the reference capacitor is charged to the reference voltage. Third, a feedback loop is closed around the system to charge the auto-zero capacitor  $C_{AZ}$  to compensate for offset voltages in the buffer amplifier, integrator, and comparator. Since the comparator is included in the loop, the AZ accuracy is limited only by the noise of the system. In any case, the offset referred to the input is less than  $10\mu\text{V}$ .

**Signal Integrate Phase**

During signal integrate, the auto-zero loop is opened, the internal short is removed, and the internal input high and low are connected to the external pins. The converter then integrates the differential voltage between IN HI and IN LO for a fixed time. This differential voltage can be within a wide common mode range; within one volt of either supply. If, on the other hand, the input signal has no return with respect to the converter power supply, IN LO can be tied to analog COMMON to establish the correct common-mode voltage. At the end of this phase, the polarity of the integrated signal is latched into the polarity F/F.

**De-Integrate Phase**

The third phase is de-integrate or reference integrate. Input low is internally connected to analog COMMON and input high is connected across the previously charged reference capacitor. Circuitry within the chip ensures that the capacitor will be connected with the correct polarity to cause the integrator output to return to zero. The time required for the output to return to zero is proportional to the input signal. Specifically the digital reading displayed is:

$$\text{OUTPUT COUNT} = 10,000 \left( \frac{V_{\text{IN}}}{V_{\text{REF}}} \right)$$

**Zero Integrator Phase**

The final phase is zero integrator. First, input low is shorted to analog COMMON. Second, a feedback loop is closed around the system to input high to cause the integrator output to return to zero. Under normal condition, this phase lasts from 100 to 200 clock pulses, but after an overrange conversion, it is extended to 6200 clock pulses.

**Differential Input**

The input can accept differential voltages anywhere within the common mode range of the input amplifier; or specifically from 0.5V below the positive supply to 1V above the negative supply. In this range the system has a CMRR of 86dB typical. However, since the integrator also swings with the common mode voltage, care must be exercised to assure the integrator output does not saturate. A worst case condition would be a large positive common-mode voltage with a near full scale

negative differential input voltage. The negative input signal drives the integrator positive when most of its swing has been used up by the positive common mode voltage. For these critical applications the integrator swing can be reduced to less than the recommended 4V full scale swing with some loss of accuracy. The integrator output can swing within 0.3V of either supply without loss of linearity.

**Analog COMMON**

Analog COMMON is used as the input low return during auto-zero and de-integrate. If IN LO is different from analog COMMON, a common mode voltage exists in the system and is taken care of by the excellent CMRR of the converter. However, in most applications IN LO will be set at a fixed known voltage (power supply common for instance). In this application, analog COMMON should be tied to the same point, thus removing the common mode voltage from the converter. The reference voltage is referenced to analog COMMON.

**Reference**

The reference input must be generated as a positive voltage with respect to COMMON, as shown in Figure 4.

**Digital Section**

Figure 5 shows the Digital Section of the ICL7135. The ICL7135 includes several pins which allow it to operate conveniently in more sophisticated systems. These include:

**Run/HOLD (Pin 25)**

When high (or open) the A/D will free-run with equally spaced measurement cycles every 40,002 clock pulses. If taken low, the converter will continue the full measurement cycle that it is doing and then hold this reading as long as  $R/\bar{H}$  is held low. A short positive pulse (greater than 300ns) will now initiate a new measurement cycle, beginning with between 1 and 10,001 counts of auto zero. If the pulse occurs before the full measurement cycle (40,002 counts) is completed, it will not be recognized and the converter will simply complete the measurement it is doing. An external indication that a full measurement cycle has been completed is that the first strobe pulse (see below) will occur 101 counts after the end of this cycle. Thus, if Run/HOLD is low and has been low for at least 101 counts, the converter is holding and ready to start a new measurement when pulsed high.

**STROBE (Pin 26)**

This is a negative going output pulse that aids in transferring the BCD data to external latches, UARTs, or microprocessors. There are 5 negative going STROBE pulses that occur in the center of each of the digit drive pulses and occur once and only once for each measurement cycle starting 101 clock pulses after the end of the full measurement cycle. Digit 5 (MSD) goes high at the end of the measurement cycle and stays on for 201 counts. In the center of this digit pulse (to avoid race conditions between changing BCD and digit drives) the first STROBE pulse goes negative for  $1/2$  clock pulse width. Similarly, after digit 5, digit 4 goes high (for 200 clock pulses) and 100 pulses later the STROBE goes negative for the second time. This continues through digit 1 (LSD) when the fifth and last STROBE pulse is sent. The

ICL7135

digit drive will continue to scan (unless the previous signal was overrange) but no additional STROBE pulses will be sent until a new measurement is available.

**BUSY (Pin 21)**

BUSY goes high at the beginning of signal integrate and stays high until the first clock pulse after zero crossing (or after end of measurement in the case of an overrange). The internal latches are enabled (i.e., loaded) during the first clock pulse after busy and are latched at the end of this clock pulse. The circuit automatically reverts to auto-zero when not BUSY, so it may also be considered a (ZI + AZ) signal. A very simple means for transmitting the data down a single wire pair from a remote location would be to AND BUSY with clock and subtract 10,001 counts from the number of pulses received - as mentioned previously there is one "NO-count" pulse in each reference integrate cycle.

**OVERRANGE (Pin 27)**

This pin goes positive when the input signal exceeds the range (20,000) of the converter. The output F/F is set at the end of BUSY and is reset to zero at the beginning of reference integrate in the next measurement cycle.

**UNDERRANGE (Pin 28)**

This pin goes positive when the reading is 9% of range or less. The output F/F is set at the end of BUSY (if the new reading is 1800 or less) and is reset at the beginning of signal integrate of the next reading.

**POLARITY (Pin 23)**

This pin is positive for a positive input signal. It is valid even for a zero reading. In other words, +0000 means the signal is positive but less than the least significant bit. The converter can be used as a null detector by forcing equal frequency of (+) and (-) readings. The null at this point should be less than 0.1 LSB. This output becomes valid at the beginning of reference integrate and remains correct until it is revalidated for the next measurement.

**Digit Drives (Pins 12, 17, 18, 19 and 20)**

Each digit drive is a positive going signal that lasts for 200 clock pulses. The scan sequence is D5 (MSD), D4, D3, D2, and D1 (LSD).

All five digits are scanned and this scan is continuous unless an overrange occurs. Then all digit drives are blanked from the end of the strobe sequence until the beginning of Reference Integrate when D5 will start the scan again. This can give a blinking display as a visual indication of overrange.

**BCD (Pins 13, 14, 15 and 16)**

The Binary coded Decimal bits B8, B4, B2, and B1 are positive logic signals that go on simultaneously with the digit driver signal.

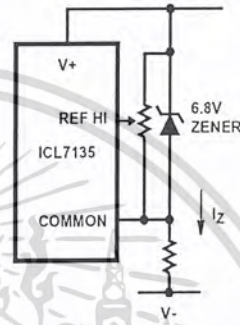


FIGURE 4A.

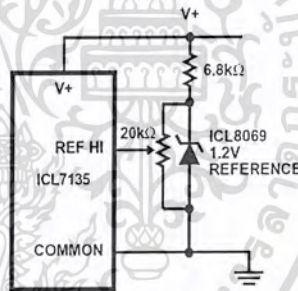


FIGURE 4B.

FIGURE 4. USING AN EXTERNAL REFERENCE

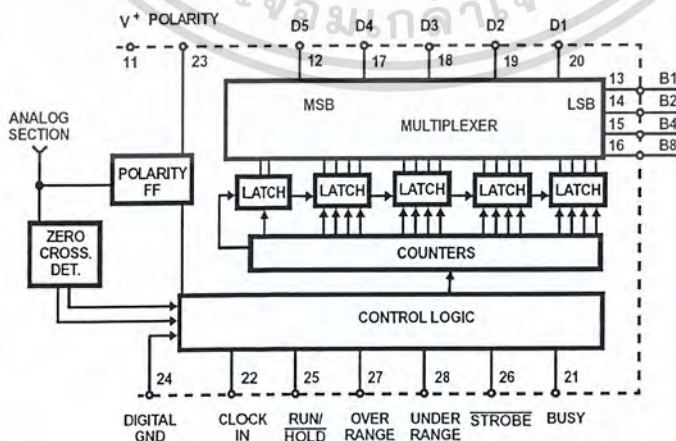


FIGURE 5. DIGITAL SECTION OF THE ICL7135

## ICL7135

**Component Value Selection**

For optimum performance of the analog section, care must be taken in the selection of values for the integrator capacitor and resistor, auto-zero capacitor, reference voltage, and conversion rate. These values must be chosen to suit the particular application.

**Integrating Resistor**

The integrating resistor is determined by the full scale input voltage and the output current of the buffer used to charge the integrator capacitor. Both the buffer amplifier and the integrator have a class A output stage with 100 $\mu$ A of quiescent current. They can supply 20 $\mu$ A of drive current with negligible non-linearity. Values of 5 $\mu$ A to 40 $\mu$ A give good results, with a nominal of 20 $\mu$ A, and the exact value of integrating resistor may be chosen by:

$$R_{INT} = \frac{\text{full scale voltage}}{20\mu\text{A}}$$

**Integrating Capacitor**

The product of integrating resistor and capacitor should be selected to give the maximum voltage swing which ensures that the tolerance built-up, will not saturate the integrator swing (approx. 0.3V from either supply). For  $\pm 5$ V supplies and analog COMMON tied to supply ground, a  $\pm 3.5$ V to  $\pm 4$ V full scale integrator swing is fine, and 0.47 $\mu$ F is nominal. In general, the value of  $C_{INT}$  is given by:

$$C_{INT} = \left( \frac{[10,000 \times \text{clock period}] \times I_{INT}}{\text{integrator output voltage swing}} \right)$$

$$= \frac{(10,000) (\text{clock period}) (20\mu\text{A})}{\text{integrator output voltage swing}}$$

A very important characteristic of the integrating capacitor is that it has low dielectric absorption to prevent roll-over or ratiometric errors. A good test for dielectric absorption is to use the capacitor with the input tied to the reference.

This ratiometric condition should read half scale 0.9999, and any deviation is probably due to dielectric absorption. Polypropylene capacitors give undetectable errors at reasonable cost. Polystyrene and polycarbonate capacitors may also be used in less critical applications.

**Auto-Zero and Reference Capacitor**

The physical size of the auto-zero capacitor has an influence on the noise of the system. A larger capacitor value reduces system noise. A larger physical size increases system noise. The reference capacitor should be large enough such that stray capacitance to ground from its nodes is negligible.

The dielectric absorption of the reference cap and auto-zero cap are only important at power-on or when the circuit is recovering from an overload. Thus, smaller or cheaper caps can be used here if accurate readings are not required for the first few seconds of recovery.

**Reference Voltage**

The analog input required to generate a full scale output is  $V_{IN} = 2V_{REF}$ .

The stability of the reference voltage is a major factor in the overall absolute accuracy of the converter. For this reason, it is recommended that a high quality reference be used where high-accuracy absolute measurements are being made.

**Rollover Resistor and Diode**

A small rollover error occurs in the ICL7135, but this can be easily corrected by adding a diode and resistor in series between the INTEGRATOR OUTPUT and analog COMMON or ground. The value shown in the schematics is optimum for the recommended conditions, but if integrator swing or clock frequency is modified, adjustment may be needed. The diode can be any silicon diode such as 1N914. These components can be eliminated if rollover error is not important and may be altered in value to correct other (small) sources of rollover as needed.

**Max Clock Frequency**

The maximum conversion rate of most dual-slope A/D converters is limited by the frequency response of the comparator. The comparator in this circuit follows the integrator ramp with a 3 $\mu$ s delay, and at a clock frequency of 160kHz (6 $\mu$ s period) half of the first reference integrate clock period is lost in delay. This means that the meter reading will change from 0 to 1 with a 50 $\mu$ V input, 1 to 2 with a 150 $\mu$ V input, 2 to 3 with a 250 $\mu$ V input, etc. This transition at mid-point is considered desirable by most users; however, if the clock frequency is increased appreciably above 160kHz, the instrument will flash "1" on noise peaks even when the input is shorted.

For many dedicated applications where the input signal is always of one polarity, the delay of the comparator need not be a limitation. Since the non-linearity and noise do not increase substantially with frequency, clock rates of up to  $\sim 1$ MHz may be used. For a fixed clock frequency, the extra count or counts caused by comparator delay will be constant and can be subtracted out digitally.

The clock frequency may be extended above 160kHz without this error, however, by using a low value resistor in series with the integrating capacitor. The effect of the resistor is to introduce a small pedestal voltage on to the integrator output at the beginning of the reference integrate phase. By careful selection of the ratio between this resistor and the integrating resistor (a few tens of ohms in the recommended circuit), the comparator delay can be compensated and the maximum clock frequency extended by approximately a factor of 3. At higher frequencies, ringing and second order breaks will cause significant non-linearities in the first few counts of the instrument. See Application Note AN017.

The minimum clock frequency is established by leakage on the auto-zero and reference caps. With most devices, measurement cycles as long as 10s give no measurable leakage error.

ICL7135

To achieve maximum rejection of 60Hz pickup, the signal integrate cycle should be a multiple of 60Hz. Oscillator frequencies of 300kHz, 200kHz, 150kHz, 120kHz, 100kHz, 40kHz,  $33\frac{1}{3}$ kHz, etc. should be selected. For 50Hz rejection, oscillator frequencies of 250kHz,  $166\frac{2}{3}$ kHz, 125kHz, 100kHz, etc. would be suitable. Note that 100kHz (2.5 readings/sec) will reject both 50Hz and 60Hz.

The clock used should be free from significant phase or frequency jitter. Several suitable low-cost oscillators are shown in the Typical Applications section. The multiplexed output means that if the display takes significant current from the logic supply, the clock should have good PSRR.

Zero-Crossing Flip-Flop

The flip-flop interrogates the data once every clock pulse after the transients of the previous clock pulse and half-clock pulse have died down. False zero-crossings caused by clock pulses are not recognized. Of course, the flip-flop delays the true zero-crossing by up to one count in every instance, and if a correction were not made, the display would always be one count too high. Therefore, the counter is disabled for one clock pulse at the beginning of phase 3. This one-count delay compensates for the delay of the zero-crossing flip-flop, and allows the correct number to be latched into the display. Similarly, a one-count delay at the beginning of phase 1 gives an overload display of 0000 instead of 0001. No delay occurs during phase 2, so that true ratio-metric readings result.

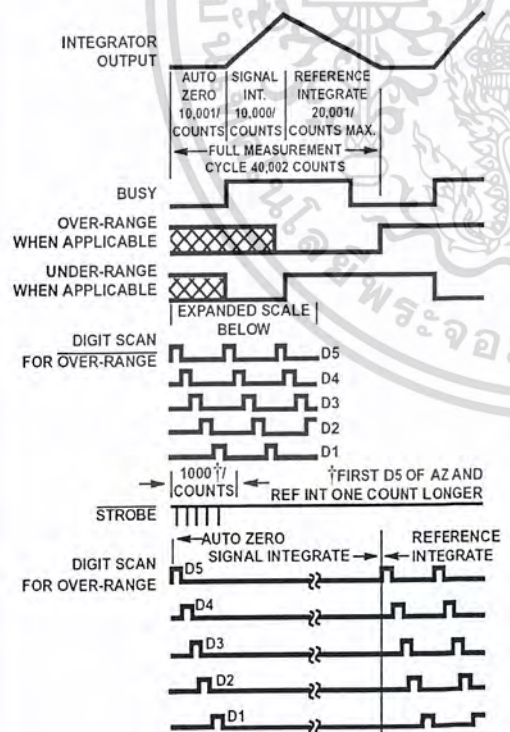


FIGURE 6. TIMING DIAGRAM FOR OUTPUTS

Evaluating The Error Sources

Errors from the "ideal" cycle are caused by:

1. Capacitor droop due to leakage.
2. Capacitor voltage change due to charge "suck-out" (the reverse of charge injection) when the switches turn off.
3. Non-linearity of buffer and integrator.
4. High-frequency limitations of buffer, integrator, and comparator.
5. Integrating capacitor non-linearity (dielectric absorption).
6. Charge lost by  $C_{REF}$  in charging  $C_{STRAY}$ .
7. Charge lost by  $C_{AZ}$  and  $C_{INT}$  to charge  $C_{STRAY}$ .

Each error is analyzed for its error contribution to the converter in application notes listed on the back page, specifically Application Note AN017 and Application Note AN032.

Noise

The peak-to-peak noise around zero is approximately 15µV (peak-to-peak value not exceeded 95% of the time). Near full scale, this value increases to approximately 30µV. Much of the noise originates in the auto-zero loop, and is proportional to the ratio of the input signal to the reference.

Analog And Digital Grounds

Extreme care must be taken to avoid ground loops in the layout of ICL7135 circuits, especially in high-sensitivity circuits. It is most important that return currents from digital loads are not fed into the analog ground line.

Power Supplies

The ICL7135 is designed to work from ±5V supplies. However, in selected applications no negative supply is required. The conditions to use a single +5V supply are:

1. The input signal can be referenced to the center of the common mode range of the converter.
2. The signal is less than ±1.5V.

See "differential input" for a discussion of the effects this will have on the integrator swing without loss of linearity.

Typical Applications

The circuits which follow show some of the wide variety of possibilities and serve to illustrate the exceptional versatility of this A/D converter.

Figure 7 shows the complete circuit for a  $4\frac{1}{2}$  digit (±2,000V) full scale) A/D with LED readout using the ICL8069 as a 1.2V temperature compensated voltage reference. It uses the band-gap principal to achieve excellent stability and low noise at reverse currents down to 50µA. The circuit also shows a typical R-C input filter. Depending on the application, the time-constant of this filter can be made faster, slower, or the filter deleted completely. The  $\frac{1}{2}$  digit LED is

## ICL7135

driven from the 7 segment decoder, with a zero reading blanked by connecting a D5 signal to RBI input of the decoder. The 2-gate clock circuit should use CMOS gates to maintain good power supply rejection.

A suitable circuit for driving a plasma-type display is shown in Figure 8. The high voltage anode driver buffer is made by Dionics. The 3 AND gates and caps driving "BI" are needed for interdigit blanking of multiple-digit display elements, and can be omitted if not needed. The 2.5k $\Omega$  and 3k $\Omega$  resistors set the current levels in the display. A similar arrangement can be used with Nixie<sup>®</sup> tubes.

The popular LCD displays can be interfaced to the outputs of the ICL7135 with suitable display drivers, such as the ICM7211A as shown in Figure 9. A standard CMOS 4030 QUAD XOR gate is used for displaying the  $1/2$  digit, the polarity, and an "overrange" flag. A similar circuit can be used with the ICL7212A LED driver and the ICM7235A vacuum fluorescent driver with appropriate arrangements made for the "extra" outputs. Of course, another full driver circuit could be ganged to the one shown if required. This would be useful if additional annunciators were needed. The Figure shows the complete circuit for a  $4\frac{1}{2}$  digit ( $\pm 2.000V$ ) A/D.

Figure 10 shows a more complicated circuit for driving LCD displays. Here the data is latched into the ICM7211 by the STROBE signal and "Overrange" is indicated by blanking the 4 full digits.

A problem sometimes encountered with both LED and plasma-type display driving is that of clock source supply line variations. Since the supply is shared with the display, any variation in voltage due to the display reading may cause clock supply voltage modulation. When in overrange the display alternates between a blank display and the 0000 overrange indication. This shift occurs during the reference integrate phase of conversion causing a low display reading just after overrange recovery. Both of the above circuits have considerable current flowing in the digital supply from drivers, etc. A clock source using an LM311 voltage comparator with positive feedback (Figure 11) could minimize any clock frequency shift problem.

The ICL7135 is designed to work from  $\pm 5V$  supplies. However, if a negative supply is not available, it can be generated with an ICL7660 and two capacitors (Figure 12).

### Interfacing with UARTs and Microprocessors

Figure 13 shows a very simple interface between a free-running ICL7135 and a UART. The five STROBE pulses start the transmission of the five data words. The digit 5 word is 0000XXXX, digit 4 is 1000XXXX, digit 3 is 0100XXXX, etc. Also the polarity is transmitted indirectly by using it to drive the Even Parity Enable Pin (EPE). If EPE of the receiver is held low, a parity flag at the receiver can be decoded as a positive signal, no flag as negative. A complex arrangement is shown in Figure 14. Here the UART can instruct the A/D to begin a measurement sequence by a word on RRI. The BUSY signal resets the Data Ready Reset (DRR). Again STROBE starts the transmit sequence. A quad 2 input

multiplexer is used to superimpose polarity, over-range, and under-range onto the D5 word since in this instance it is known that B2 = B4 = B8 = 0.

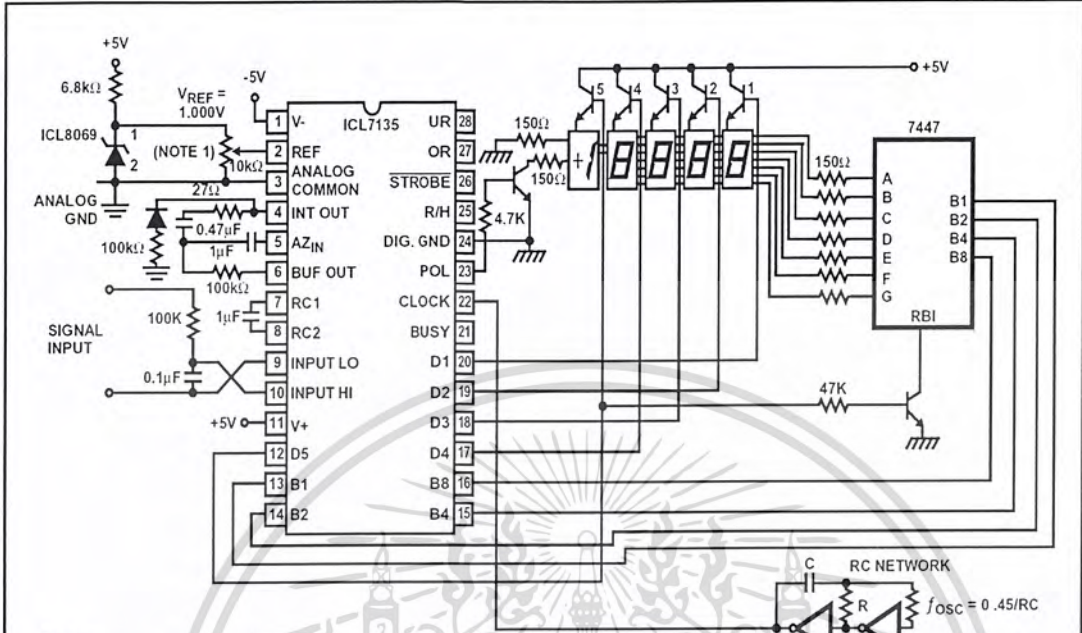
For correct operation it is important that the UART clock be fast enough that each word is transmitted before the next STROBE pulse arrives. Parity is locked into the UART at load time but does not change in this connection during an output stream.

Circuits to interface the ICL7135 directly with three popular microprocessors are shown in Figure 15 and Figure 16. The 8080/8048 and the MC6800 groups with 8-bit buses need to have polarity, over-range and under-range multiplexed onto the Digit 5 Sword - as in the UART circuit. In each case the microprocessor can instruct the A/D when to begin a measurement and when to hold this measurement.

### Application Notes

| NOTE # | DESCRIPTION   | AnswerFAX DOC. # |
|--------|---|------------------|
| AN016  | "Selecting A/D Converters"  | 9016             |
| AN017  | "The Integrating A/D Converter"   | 9017             |
| AN018  | "Do's and Don'ts of Applying A/D Converters"  | 9018-            |
| AN023  | "Low Cost Digital Panel Meter Designs"  | 9023             |
| AN028  | "Building an Auto-Ranging DMM Using the 8052A/7103A A/D Converter Pair"             | 9028             |
| AN030  | "The ICL7104 - A Binary Output A/D Converter for Microprocessors"                   | 9030             |
| AN032  | "Understanding the Auto-Zero and Common Mode Performance of the ICL7136/7/9 Family" | 9032             |

ICL7135



NOTE:

- For finer resolution on scale factor adjust, use a 10 turn pot or a small pot in series with a fixed resistor.

FIGURE 7. 4 1/2 DIGIT A/D CONVERTER WITH A MULTIPLEXED COMMON ANODE LED DISPLAY

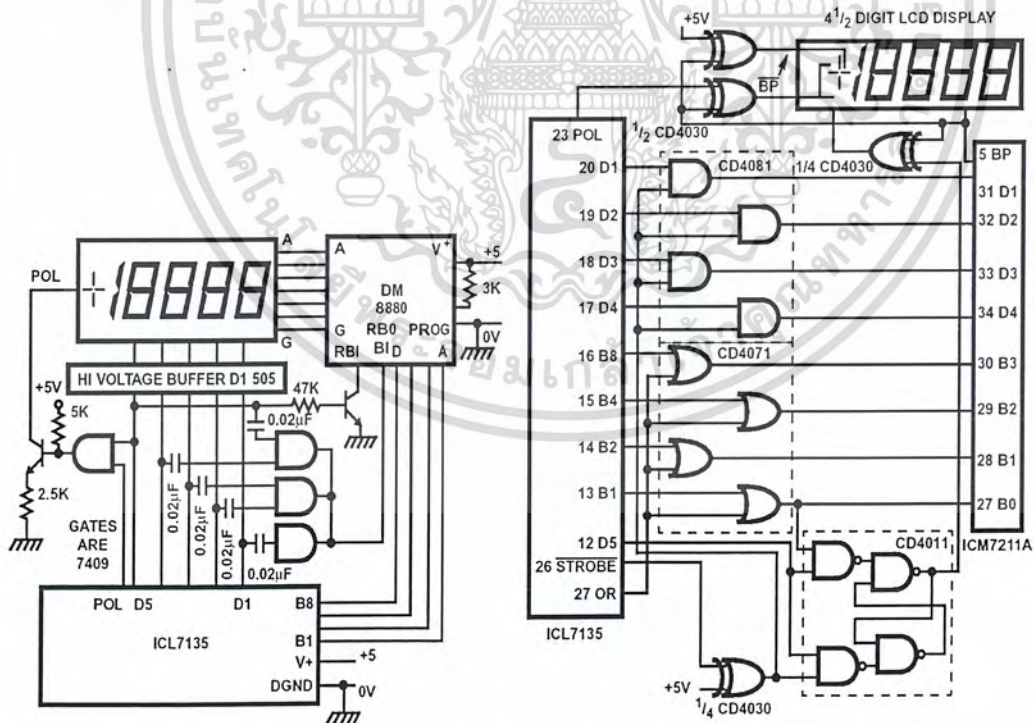


FIGURE 8. ICL7135 PLASMA DISPLAY CIRCUIT

FIGURE 9. LCD DISPLAY WITH DIGIT BLANKING ON OVERRANGE

ICL7135

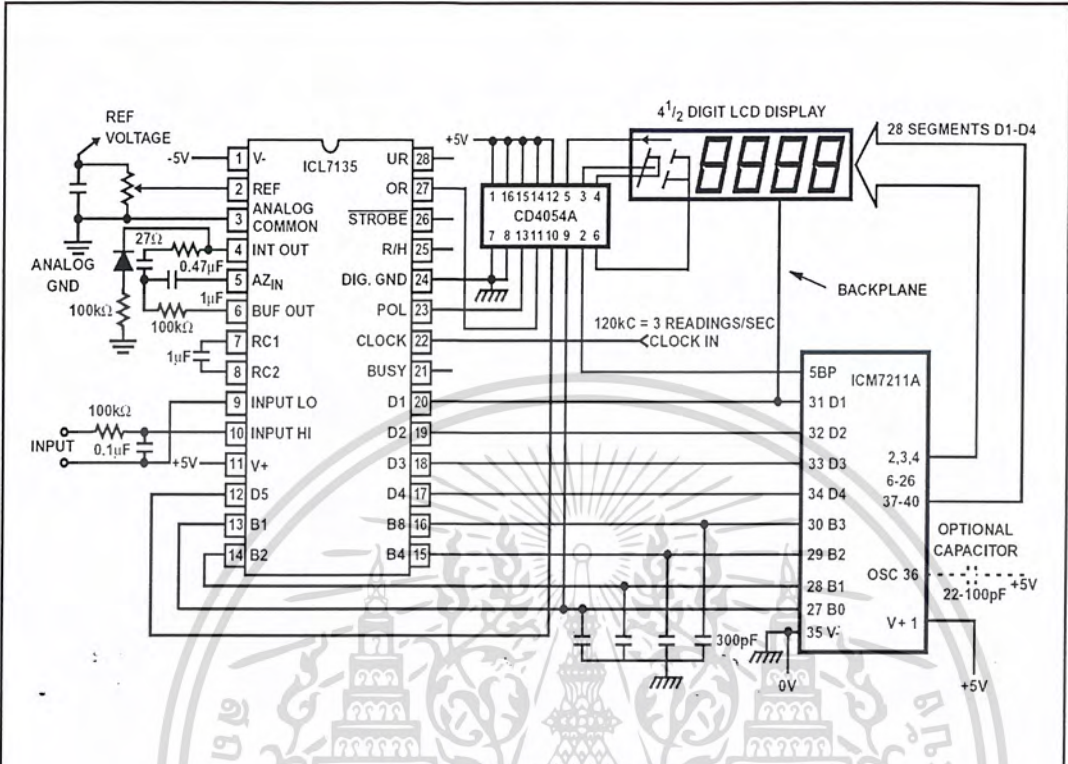


FIGURE 10. DRIVING LCD DISPLAYS

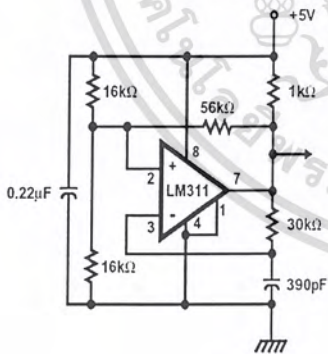


FIGURE 11. LM311 CLOCK SOURCE

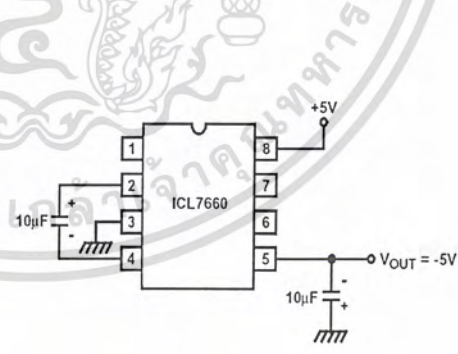


FIGURE 12. GENERATING A NEGATIVE SUPPLY FROM +5V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ICL7135

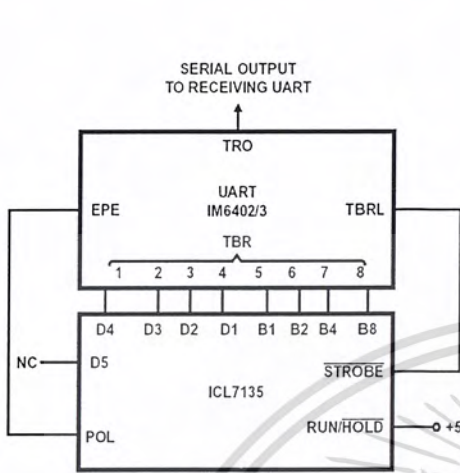


FIGURE 13. ICL7135 TO UART INTERFACE

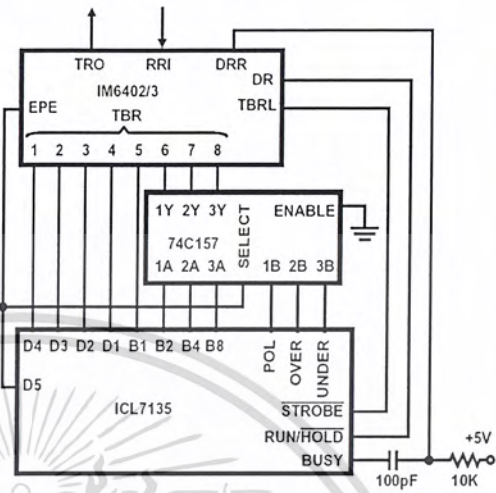


FIGURE 14. COMPLEX ICL7135 TO UART INTERFACE

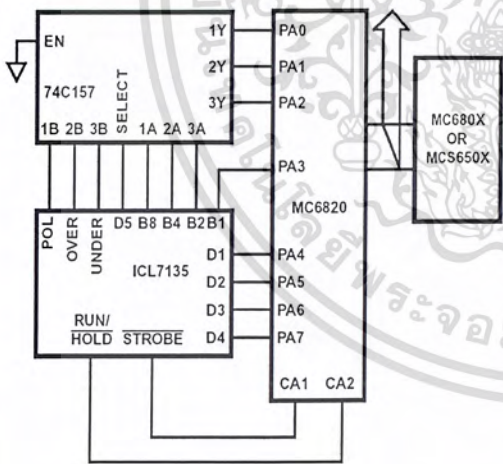


FIGURE 15. ICL7135 TO MC6800, MCS650X INTERFACED

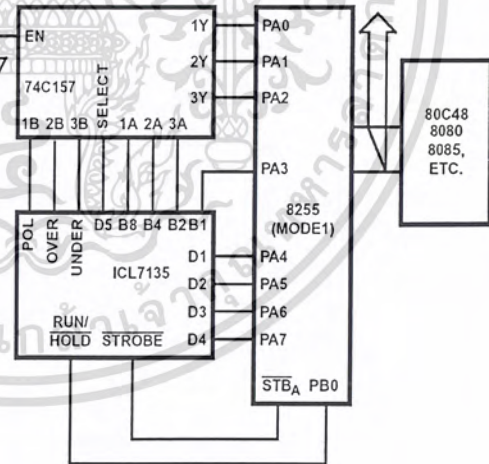


FIGURE 16. ICL7135 TO MCS-48, -80, -85 INTERFACE

## ICL7135

**Design Information Summary Sheet**• **CLOCK INPUT**

The ICL7135 does not have an internal oscillator. It requires an external clock.

$$f_{\text{CLOCK}} (\text{Typ}) = 120\text{kHz}$$

• **CLOCK PERIOD**

$$t_{\text{CLOCK}} = 1/f_{\text{CLOCK}}$$

• **INTEGRATION PERIOD**

$$t_{\text{INT}} = 10,000 \times t_{\text{CLOCK}}$$

• **60/50Hz REJECTION CRITERION**

$$t_{\text{INT}}/t_{60\text{Hz}} \text{ or } t_{\text{INT}}/t_{50\text{Hz}} = \text{Integer}$$

• **OPTIMUM INTEGRATION CURRENT**

$$I_{\text{INT}} = 20\mu\text{A}$$

• **FULL-SCALE ANALOG INPUT VOLTAGE**

$$V_{\text{INFS}} (\text{Typ}) = 200\text{mV or } 2\text{V}$$

• **INTEGRATE RESISTOR**

$$R_{\text{INT}} = \frac{V_{\text{INFS}}}{I_{\text{INT}}}$$

• **INTEGRATE CAPACITOR**

$$C_{\text{INT}} = \frac{(t_{\text{INT}})(I_{\text{INT}})}{V_{\text{INT}}}$$

• **INTEGRATOR OUTPUT VOLTAGE SWING**

$$V_{\text{INT}} = \frac{(t_{\text{INT}})(I_{\text{INT}})}{C_{\text{INT}}}$$

• **V<sub>INT</sub> MAXIMUM SWING:**

$$(V^- + 0.5) < V_{\text{INT}} < (V^+ - 0.5\text{V})$$

$V_{\text{INT}}$  Typically = 2.7V

• **DISPLAY COUNT**

$$\text{COUNT} = 10,000 \times \frac{V_{\text{IN}}}{V_{\text{REF}}}$$

• **CONVERSION CYCLE**

$$t_{\text{CYC}} = t_{\text{CLOCK}} \times 40002$$

when  $f_{\text{CLOCK}} = 120\text{kHz}$ ,  $t_{\text{CYC}} = 333\text{ms}$

• **COMMON MODE INPUT VOLTAGE**

$$(V^- + 1\text{V}) < V_{\text{IN}} < (V^+ - 0.5\text{V})$$

• **AUTO-ZERO CAPACITOR**

$$0.01\mu\text{F} < C_{\text{AZ}} < 1\mu\text{F}$$

• **REFERENCE CAPACITOR**

$$0.1\mu\text{F} < C_{\text{REF}} < 1\mu\text{F}$$

• **POWER SUPPLY: DUAL  $\pm 5\text{V}$** 

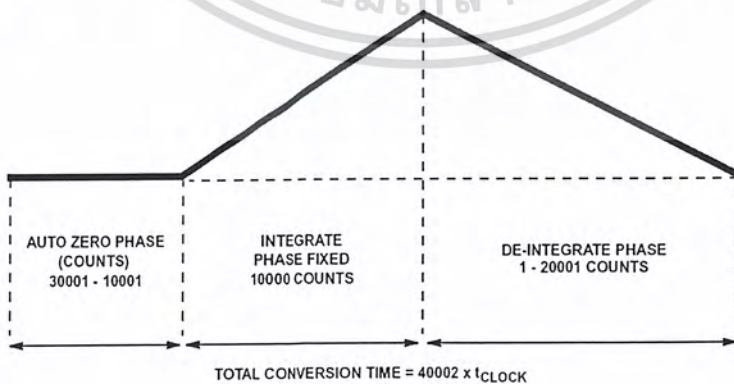
$$V^+ = +5\text{V to GND}$$

$$V^- = -5\text{V to GND}$$

• **OUTPUT TYPE**

4 BCD Nibbles with Polarity and Overrange Bits

There is no internal reference available on the ICL7135. An external reference is required due to the ICL7135's  $4^{1/2}$  digit resolution.

**Typical Integrator Amplifier Output Waveform (INT Pin)**

ICL7135

**Die Characteristics**

**DIE DIMENSIONS:**

(120 mils x 130 mils) x 525µm ±25µm

**PASSIVATION:**

Type: Nitride/Silox Sandwich

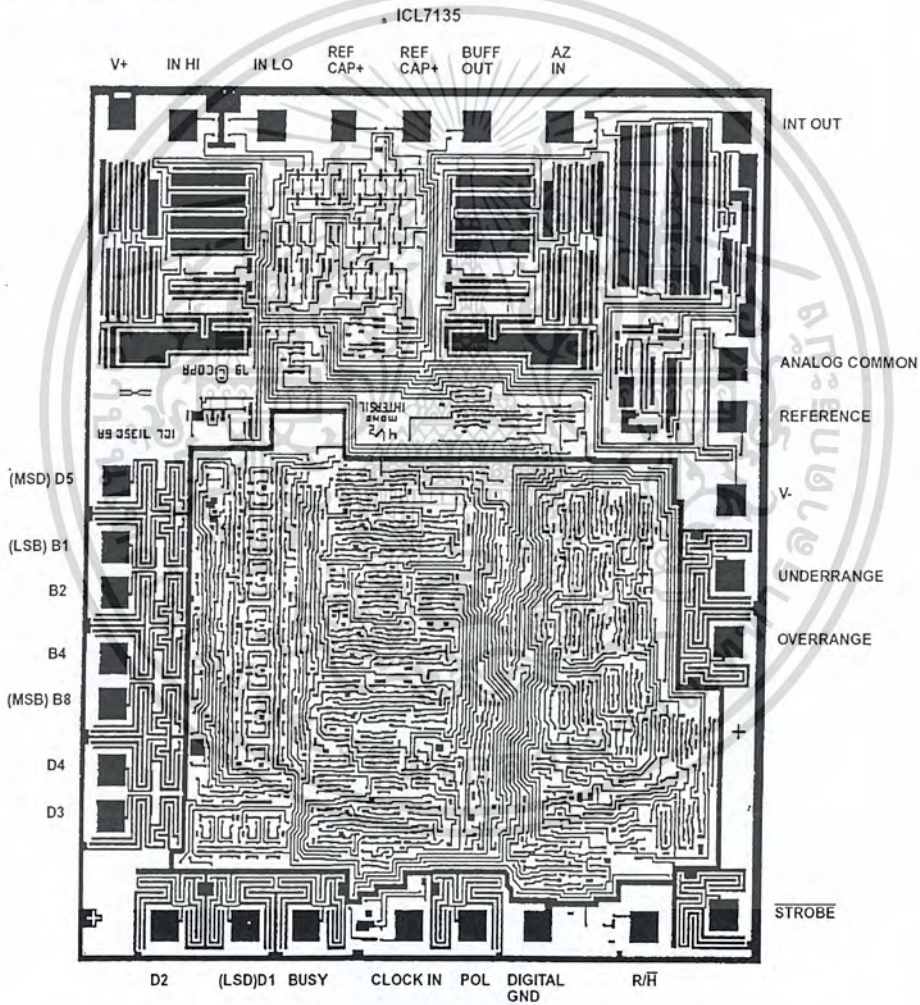
Thickness: 8k Nitride over 7k Silox

**METALLIZATION:**

Type: Al

Thickness: 10kÅ ±1kÅ

**Metallization Mask Layout**



All Intersil semiconductor products are manufactured, assembled and tested under ISO9000 quality systems certification.

*Intersil products are sold by description only. Intersil Corporation reserves the right to make changes in circuit design and/or specifications at any time without notice. Accordingly, the reader is cautioned to verify that data sheets are current before placing orders. Information furnished by Intersil is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Intersil or its subsidiaries for its use; nor for any infringements 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 Intersil or its subsidiaries.*

For information regarding Intersil Corporation and its products, see web site <http://www.intersil.com>

## ประวัติผู้แต่ง



ชื่อ-สกุล นายภาณุวัตร อนันต์แดง  
 วัน เดือน ปีเกิด 23 พฤศจิกายน 2524  
 ภูมิลำเนา 36 หมู่ 10 ต. เขาค่าย อ. สวี จ. ชุมพร 86130  
 โทรศัพท์ 0-7078-8073

ประวัติการศึกษา  
 ประถมศึกษา โรงเรียนบ้านเขาค่าย  
 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเขาทะลุพิทยาคม  
 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ วิทยาลัยเทคนิคชุมพร  
 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี  
 ปริญญาตรี สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์  
 ภาควิชาครุศาสตร์วิศวกรรม  
 คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล.  
 จะสุขจะทุกข์อยู่ที่ใจใช้การกระทำ

คติพจน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



|                             |  |
|-----------------------------|--|
| ชื่อ-สกุล                   | นายอภิรักษ์ รอดจินดา   |
| วัน เดือน ปีเกิด            | 3 เมษายน 2523  |
| ภูมิลำเนา                   | 5 หมู่ 12 ต. บ้านนา อ. เมือง จ. ชุมพร 86190<br>โทรศัพท์ 0-7755-5090                                  |
| ประวัติการศึกษา             |  |
| ประถมศึกษา                  | โรงเรียนอนุบาลนิรมล  |
| มัธยมศึกษาตอนต้น            | โรงเรียนศรีราษฎร์  |
| ประกาศนียบัตรวิชาชีพ        | วิทยาลัยเทคนิคชุมพร  |
| ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง | สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตนนทบุรี   |
| ปริญญาตรี                   | สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์<br>ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์วิศวกรรม<br>คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สจล. |
| คติพจน์                     | มันอยู่ที่ใจ   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้