

เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง  
THE ACTIVATION STARTS STIRLING ENGINE

นายพงษ์ฉวี แก้วน้ำใบ

นายรุ่งโรจน์ แสงน้อม

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี วิทยาเขตบุรีรัมย์  
สาขาวิชาเทคนิคชั้นประถมศึกษา  
คณะวิทยาศาสตร์

พัฒนาเทคโนโลยีที่ทรงคุณค่าเข้าสู่อุตสาหกรรมระดับ

ปีการศึกษา 2556

เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

THE ACTIVATION STARTS STIRLING ENGINE

นายพงษ์สิทธิ์

แก้วนันทไชย

นายรุ่งโรจน์

แสงเข้ม

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

**THE ACTIVATION STARTS STIRLING ENGINE**

**MR PONGSIRI KAEWNANCHAI**

**MR RUNGROT SAENGCHAEM**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE  
IN APPLIED PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง  
 THE ACTIVATION STARTS STIRLING ENGINE  
 ชื่อนักศึกษา นายพงษ์สิทธิ์ แก้วนั่นไชย  
 นายรุ่งโรจน์ แสงเข้ม  
 ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต  
 สาขาวิชา ฟิสิกส์  
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. สาหรัย เล็กชะอุ่ม

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์  
 ประยุक्त ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กฤษฎ์ ศรีนวลจันทร์	
ดร.ณัฐพร พรหมรส	
ดร.อาภาภรณ์ สกฤตการะเวก	
รศ.สาหรัย เล็กชะอุ่ม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
ชื่อนักศึกษา	นายพงษ์สิทธิ์ แก้วนันไชย นายรุ่งโรจน์ แสงเข้ม
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC 16F627A เป็นอุปกรณ์ในการออกแบบและสร้างวงจรควบคุมการทำงาน มอเตอร์สองตัวจะมีส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นพอร์ตอินพุตมี 3 พอร์ต คือ RB1 RB2 และ RB3 โดยที่ RB1 และ RB2 ทำหน้าที่รับสถานะลอจิก Low กับ High ของมอเตอร์ตัวที่หนึ่งไปและกลับ ซึ่ง RB3 จะรับลอจิก High จากวงจรอินพุตที่ประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด k เป็นตัวตรวจจับอุณหภูมิเริ่มทำงานที่กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์แล้วเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าในหน่วยมิลลิโวลต์ ส่งต่อไปขยายสัญญาณมีอัตราขยายเท่ากับ 221 ด้วย LM358 จากนั้นปรับแต่งแรงดันไฟฟ้าให้คงที่เป็นสถานะลอจิก Low และ High ด้วย IC7408 ส่วนที่สองเป็นการออกแบบโปรแกรมควบคุมการทำงานพอร์ตอินพุตและพอร์ตเอาต์พุต คือ RB4 RB6 และ RB7 โดยที่ RB6 และ RB7 เป็นพอร์ตส่งสัญญาณควบคุมมอเตอร์ตัวที่หนึ่ง ซึ่งมอเตอร์ตัวที่สองจะควบคุมด้วยพอร์ต RB4 เพื่อไปกระตุ้นล้อเกียร์ การทดสอบเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานจะเป็นการทดสอบวงจรอินพุตที่กระบอกสูบดิสเพลสเซอร์เพื่อหาสถานะลอจิก Low กับ High และการทดสอบโปรแกรมควบคุมการกระตุ้นล้อเกียร์ ผลการทดสอบวงจรอินพุตพบว่าที่อุณหภูมิ 282 องศาเซลเซียส มีค่าแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิลและวงจรขยายเท่ากับ 11.5 มิลลิโวลต์ และ 2.4 โวลต์ ตามลำดับ ทำให้เปลี่ยนสถานะลอจิกจาก Low เป็น High และพบว่าโปรแกรมสามารถควบคุมให้มอเตอร์ตัวที่หนึ่งไปขับเคลื่อนมอเตอร์ตัวที่สองเพื่อกระตุ้นล้อเกียร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยห้วงเวลาการทำงานไว้ 30 วินาที เพื่อป้องกันการงานที่ผิดพลาดของเครื่องกระตุ้น

คำสำคัญ : เครื่องกระตุ้น,PIC,PCB

<b>Title</b>	THE ACTIVATION STARTS STIRLING ENGINE
<b>Students</b>	Mr.Pongsiri Kaewaunchai Mr.Rungrot Saengchaem
<b>Degree</b>	Bachelor of Science
<b>Major Program</b>	Physics
<b>Academic Year</b>	2013
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Sarai Lekchaum

### ABSTRACT

This Special Project is study the activation starts stirling engine. By used to Microcolltroller PIC 16F627A is device for design and make working control circuit of 2 motor. Have importance 2 parts. The first part,with is input port have 3 ports is RB1 RB2 RB3.With is RB1 and RB2 duty to accept logic state Low and High of first motor back and forward,which is RB3 accept logic state High from input circuit consisting termocupple type k is sensor temperature start working at displacer with change voltage(mV). Carry on to Amplified,with is gain 221 by LM358.Then adjust the voltage constant is logic state Low and High by IC7408. The Second part,with is design program controls work input port and output port R4 R6 and R7,with is RB6 and RB7 is port send signal control the first motor,which the second motor will control port RB4 and RB5 for activation gear wheel. Testing the activation stars stirling engine is testing input circuit at displacer for finding logic state Low and High and testing program control the activation gear wheel. At the result input circuit, at 282 °C have a voltage value from thermocupple and amplified is 11.5 mV and 2.4 V respectiveiy,with is change logic state from Low is High and found that the program can be colltrolled with first motor driving second motor for the activation gear wheel of stirling engine to work continuously,with is delay 30 seconds for prevents error of the avtivation engine.

**keywords :** The Activation,PIC,PCB

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับการช่วยเหลือและสนับสนุนจากผู้ช่วยศาสตราจารย์สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ผู้ซึ่งให้คำแนะนำปรึกษาทั้งด้านขั้นตอนการทำงานและวิชาการที่ดีตลอดมา และยังเสนอแนะสิ่งที่คณะผู้จัดทำทำงานผิดพลาดและตอบข้อสงสัยต่างๆทำให้คณะผู้จัดทำมีความรู้ความเข้าใจ มีแนวทางที่ถูกต้องในการนำประยุกต์ใช้กับโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์สถาวร คุณิพงษ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการวัด เพื่อนำมาใช้ในการทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ คุณณที เกษม โชติพันธ์ ที่ให้ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบเครื่องกระตุ้น

ขอขอบคุณ บริษัทเมโสโทนิคส์ ที่เสียสละเวลาในการอบรมให้ความรู้เกี่ยวกับการใช้เครื่องมือวัดชนิดต่างๆด้วยวิธีการที่ถูกต้อง เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการทำโครงการพิเศษครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆสาขาฟิสิกส์ทุกคนที่คอยให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการพิเศษตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกๆท่านที่คอยอบรมสั่งสอนประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนบิดา มารดา ที่เป็นผู้ให้คำปรึกษา เป็นแรงผลักดันและที่สำคัญเป็นผู้สนับสนุนทุนทรัพย์ ในการทำโครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วง

นายพงษ์สิทธิ์ แก้วนนไชย

นายรุ่งโรจน์ แสงเข้ม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
<b>ที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 เทอร์โมคัปเปิล(Thermocouple)	3
2.1.1 ผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน (Termoelectric Effect)	4
2.1.2 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน (Characteristic of Standard Thermocouples)	5
2.1.3 การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน (Characteristic in Application of Thermocouple Standard Type)	6
2.2 PIC	13
2.2.1 คุณลักษณะของ PIC ตามเบอร์	15
2.2.2 การเลือกใช้งาน PIC	17
2.2.2.1 PIC16C5X	17
2.2.2.2 PIC16CXXX	18
2.2.2.3 PIC12CXXX	18
2.2.2.4 PIC17CXXX	18

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.2.5 PIC16FXXX, PIC12FXXX	18
2.2.2.6 PIC18FXXX	19
2.2.2.7 PIC24FXXX	19
2.2.2.8 PIC 32MX3XX, PIC32MX4XX	19
2.2.3 PIC18FXX2	20
2.2.4 สถาปัตยกรรมของ PIC18FXX2	20
2.2.4.1 โครงสร้างหน่วยความจำ	21
2.2.5 โครงสร้างและหน้าที่ของ PIC	22
2.3 มอเตอร์	25
2.3.1 หลักการทำงานของมอเตอร์	26
2.3.2 ส่วนประกอบของมอเตอร์	28
2.3.3 การควบคุมมอเตอร์	29
2.4 ลอจิกเกต	30
2.4.1 ความหมายของลอจิกเกต	30
2.4.2 ค่าคงที่ลอจิกและตัวแปรลอจิก	31
2.4.3 เกตที่เป็นปฏิบัติการพื้นฐานของพีชคณิตบูลีน	31
2.4.3.1 เกตแอนด์ (AND Gates)	32
2.4.3.2 เกตออร์ (OR Gates)	33
2.4.3.3 NOT GATES	33
2.5 สายพาน	34
2.5.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสายพานส่งกำลัง	34
2.5.2 ชนิดและวัสดุของสายพาน	35
2.5.3 การครีฟและการสลิปของสายพาน	35
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>37</b>

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1 การศึกษาเครื่องกระตุ้นการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	37
3.2 วงจรเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและออกแบบอุปกรณ์	38
3.2.1 การออกแบบและการประกอบในส่วนของอินพุต	39
3.2.2 การออกแบบและการประกอบในส่วนของเอาต์พุต	39
3.3 การออกแบบลายปริ้นต์	40
3.4 การออกแบบโปรแกรม(เขียนโค้ดโปรแกรม)ควบคุมการทำงานของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	41
3.5 ภาพแสดงส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกระตุ้นและสถานะก่อนการทำงาน	46
3.6 การทดสอบและวิเคราะห์เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	48
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>49</b>
4.1 การทดสอบและวิเคราะห์วงจรของเครื่องกระตุ้น	49
4.2 ทดสอบระบบควบคุม	56
<b>บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>57</b>
5.1 สรุปผลการทดลองจากการทดสอบระบบและประสิทธิภาพของเครื่องกระตุ้น	57
5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	57
5.3 ข้อเสนอแนะ	58
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>59</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>60</b>

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 seeback voltage	4
2.2 ผลของเพลเทียร์	5
2.3 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล	5
2.4 โครงสร้างหลักๆ ของ PIC	13
2.5 ตัวอย่าง PIC แบบ OTP	14
2.6 ตัวอย่าง PIC แบบ EPROM	14
2.7 ตัวอย่าง PIC แบบ EEPROM	15
2.8 ตัวอย่างเบอร์ของ PIC	15
2.9 โครงสร้างหน่วยความจำโปรแกรม	21
2.10 โครงสร้างหน่วยความจำข้อมูล	22
2.11 การจัดขาของ คือ PIC18F242, PIC18F252, PIC18F442 และ PIC18F452	22
2.12 การทำงานของมอเตอร์ (1)	26
2.13 การทำงานของมอเตอร์ (2)	27
2.14 วงแหวนคอมมิวเตเตอร์ และ แปรงผ่าน	27
2.15 โครงสร้างและภาพจริงของอามเจอร์	28
2.16 ภาพด้านหน้าและด้านหลังของมอเตอร์	28
2.17 สเตเตอร์และส่วนประกอบซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวร	28
2.18 อามเจอร์และส่วนประกอบ	28
2.19 ส่วนฝาพลาสติกที่มีขั้วต่อไฟฟ้าเชื่อมต่อกับแผ่นทองแดงที่ทำหน้าที่แทนแปรงถ่าน	28
2.20 การกลับทิศทางของมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้รีเลย์	29
2.21 การใช้ทรานซิสเตอร์เพื่อขับรีเลย์ให้ทำงาน	29
2.22 การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรถับและกำหนดทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง	30
2.23 ตารางความจริงและสัญลักษณ์ของ AND Gate	32
2.24 ตารางความจริงและสัญลักษณ์ของ OR Gate	33
2.25 ตารางความจริงและสัญลักษณ์ของ NOT Gate	34

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 วงจรของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของสเตอร์ลิง	38
3.2 วงจรในส่วนของอินพุต	39
3.3 วงจรในส่วนของเอาต์พุต	40
3.4 ลายปรี้นของวงจรที่ใช้กับเครื่องกระตุ้นการเริ่มการทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	40
3.5 แผ่นลายปรี้นที่วางอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วพร้อมใช้งาน	41
3.6 หน้าจอต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F627A	41
3.7 วงจรในส่วนของระบบควบคุม	46
3.8 ส่วนประกอบของเครื่อง	46
3.9 ส่วนที่รับความร้อน(เทอร์โมคัปเปิล)	46
3.10 สถานะเริ่มต้นของกระตุ้นการเริ่มทำงานให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	47
3.11 ตำแหน่งที่พร้อมจะกระตุ้นการเริ่มทำงานให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง	47
3.12 ไคอะแกรมของการทำงานตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสิ้นการทำงาน	47
4.1 วงจรของการทดลอง	50
4.2 ไคอะแกรมของการทำงานจากระบบ	50
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันเทอร์โมคัปเปิล	54
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันเทอร์โมคัปเปิล	55
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับแรงดันเทอร์โมคัปเปิล	55
4.6 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกระตุ้น	56
4.7 ประสิทธิภาพของเครื่องกระตุ้นที่ทำงานจริง	56

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนวิจัยและการดำเนินงาน	2
2.1 คุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน Type ต่างๆ	12
2.2 ความหมายของตัวอักษรบอกลักษณะของหน่วยความจำโปรแกรม	16
2.3 ความหมายของตัวอักษรบอกช่วงอุณหภูมิที่ PIC สามารถทำงานได้	16
2.4 ความหมายของตัวอักษรบอกลักษณะตัวถัง	17
2.5 PIC เบอร์ต่างๆ ในตระกูล PIC18FXX2	20
4.1 ค่าแรงดัน อุณหภูมิและสถานะลอจิก	51
4.2 เวลาขาขึ้นที่ลอจิกเริ่มทำงานจากความร้อนจากเทียนไข 1 เล่ม และ 2 เล่ม	53
4.3 เวลาขาขึ้นที่ลอจิกเริ่มทำงานจากความร้อนจากเทียนไข 1 เล่ม และ 2 เล่ม	54

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานทดแทนกันอย่างแพร่หลายมากขึ้น และพลังงานทดแทนเหล่านี้จะสามารถใช้ทดแทนพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงได้ ซึ่งจัดเป็นพลังงานหลักที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน พลังงานทดแทนที่สำคัญ ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานจากชีวมวล เป็นต้น นอกจากนี้จำเป็นที่จะต้องมีการมีเครื่องมือเพื่อเปลี่ยนพลังงานเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของพลังงานที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ เช่น การแปลงพลังงานน้ำให้เป็นพลังงานกล จากนั้นเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปแบบพลังงานกล จากนั้นก็เปลี่ยนพลังงานกลให้อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้าและนำพลังงานไฟฟ้าไปใช้งานต่อไป ซึ่งในขั้นตอนการเปลี่ยนพลังงานทดแทน หรือพลังงานแสงอาทิตย์นั้นจำเป็นต้องใช้เครื่องยนต์เข้ามาช่วย เช่น เครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปของพลังงานกลได้ และจะสามารถนำพลังงานกลที่ผลิตได้นั้นไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

โครงการพิเศษนี้จะให้ความสนใจในเรื่องการเริ่มต้นการทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงหลังจากที่ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว ซึ่งเครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะรับพลังงานจากแสงอาทิตย์เพื่อใช้เป็นพลังงานขับเคลื่อนให้เครื่องยนต์ทำงาน แต่ก่อนที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงจะสามารถเริ่มต้นการทำงานได้หลังจากที่ได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์แล้วนั้น จำเป็นต้องมีแรงหมุนจำนวนหนึ่งมากระตุ้นให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อให้เครื่องยนต์นั้นเริ่มทำงานได้ และส่วนใหญ่จะใช้มือในการหมุนเพื่อให้เกิดแรงหมุนนี้ เพราะมีความสะดวกและง่ายต่อการกระตุ้นเมื่อเครื่องยนต์สเตอร์ลิงวางอยู่กับพื้นหรืออยู่ในระดับที่ไม่สูงมากที่มือสามารถเอื้อมถึง แต่เมื่อเครื่องยนต์จำเป็นที่จะต้องทำการติดตั้งในที่สูงมากและยากต่อการกระตุ้นด้วยมือเพื่อให้เครื่องยนต์ทำงานได้ ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงได้ศึกษาเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงเพื่อใช้ในการกระตุ้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงขึ้นมา เพื่อให้เกิดความสะดวกและง่ายต่อการกระตุ้นเมื่อเครื่องยนต์สเตอร์ลิงติดตั้งอยู่ในที่สูง

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาระบบและการออกแบบเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและการทำงานของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาและวิเคราะห์ความสามารถในการทำงานเพื่อใช้กระตุ้นการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
2. ออกแบบ ประกอบ และทดสอบการทำงานของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
3. เก็บรวบรวมข้อมูลและวิเคราะห์หาความสามารถที่เหมาะสมที่จะใช้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนวิจัยและการดำเนินงาน

ช่วงเวลา	ขั้นตอนการดำเนินงาน
มิถุนายน - กรกฎาคม พ.ศ. 2556	- ค้นคว้า รวบรวมข้อมูล และหาหลักการทำงานของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
สิงหาคม - กันยายน พ.ศ. 2556	- ค้นคว้าและศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
ตุลาคม - ธันวาคม พ.ศ. 2556	- ทำการสร้างและประกอบเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง - เก็บรวบรวมข้อมูลและทดสอบหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง
มกราคม - กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2557	- นำข้อมูลที่ได้มาสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองของโครงการ

### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงสามารถกระตุ้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้ทำงานได้
2. สามารถวิเคราะห์หาความสามารถในการกระตุ้นให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อ หรือนำไปประยุกต์กับเครื่องยนต์อื่นๆได้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

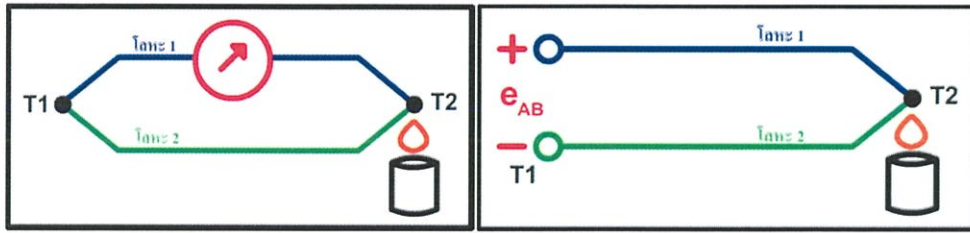
เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิงนั้นเป็นการควบคุมโดยระบบของไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล PIC ซึ่งในวงการไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ถือได้ว่าเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ยอดนิยมตัวหนึ่งที่มีผู้สนใจศึกษาและใช้งานอยู่มากมาย ทั้งนี้เพราะ PIC มีความโดดเด่นทางด้านคุณสมบัติที่สามารถใช้งานได้หลากหลาย รวมถึงมีคอมไพเลอร์ให้เลือกใช้งานอยู่มากมาย และในการทำงาน PIC จะต้องมีารรับสัญญาณจากอินพุตเพื่อให้ระบบประมวลผลและส่งคำสั่งออกมาทางเอาต์พุตของระบบ โดยอินพุตของระบบจะใช้เทอร์โมคัปเปิลในการรับความร้อนที่ได้จากงานพาราโบลา ซึ่งจะได้แรงดันเอาต์พุตจากเทอร์โมคัปเปิลที่ต่ำจึงจำเป็นต้องมีวงจรขยายสัญญาณเพื่อแปลงสัญญาณให้เป็นลอจิก 1 และจะส่งสัญญาณให้กับระบบควบคุมหรือไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ต่อไป

ระบบได้รับสัญญาณอินพุตมาแล้ว ระบบจะส่งคำสั่งผ่านทางพอร์ตเอาต์พุตของ PIC แล้วสัญญาณก็จะถูกส่งผ่านด้วย IC7404 ซึ่งทำหน้าที่เป็น Buffer ระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์และ Relay สัญญาณที่ได้จะทำหน้าที่เป็นสวิทช์ของ Relay ในการหยุดและเริ่มทำงานของมอเตอร์เมื่อ

### 2.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) หรือ ที่ทั่ว ๆ ไปมักเรียกกันว่า “หัววัดอุณหภูมิ” ซึ่งเทอร์โมคัปเปิลนี้ก็จะมียู่อหลายชนิด หลายแบบ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับความต้องการนำไปใช้ในลักษณะของการวัดที่แตกต่างกันออกไป เทอร์โมคัปเปิล คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า(emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่า “จุดวัดอุณหภูมิ” ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้เปิดไว้ เรียกว่า จุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจร เทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง เมื่อทำการเชื่อมโลหะ 2 เส้นที่เป็นโลหะต่างชนิดกันเข้าด้วยกัน ถ้าอุณหภูมิที่ปลายทั้ง 2 ด้านไม่เท่ากันจะเกิดกระแสไหลในโลหะทั้ง 2 เส้น นั่นแสดงว่าถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออกแล้วนำ Voltmeter ไปวัดจะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างโลหะ 2 เส้นค่าหนึ่ง(ค่านี้มีปริมาณน้อย หน่วยเป็น mV) เรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ว่า “Seebeck Voltage”

ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ค้นพบโดย Thomus Seebeck นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันในปี ค.ศ.1821 ในรูปที่ 2.1 เป็นวงจรที่ใช้อธิบายผลของซีเบ็คดังกล่าว



(ก)กระแสในวงจรปิด

(ข)กระแสในวงจรเปิด

รูปที่ 2.1 seeback voltage

### 2.1.1 ผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน (Termoelectric Effect)

ทฤษฎีพื้นฐานของผลจากเทอร์โมอิเล็กทริก เกิดจากการส่งผ่านทางไฟฟ้าและทางความร้อนของโลหะที่ต่างกันจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าตกคร่อมที่โลหะนั้น ความต่างศักย์นี้จะสัมพันธ์กับความจริงที่ว่า อิเล็กตรอนในปลายด้านร้อนของโลหะจะมีพลังงานความร้อนมากกว่าปลายทางด้านเย็น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วไปหาปลายด้านเย็น ที่อุณหภูมิเดียวกันนี้ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะแปรเปลี่ยนไปตามโลหะที่ต่างชนิดกันด้วย ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่า โลหะที่ต่างกันจะมีการนำความร้อนที่ต่างกันนั่นเอง

1) ผลของซีเบ็ค (Seebeck Effect) โดยใช้ทฤษฎีโซลิตสแตด เราสามารถวิเคราะห์ค่าได้จากสมการอินทิเกรตค่าจากย่านของอุณหภูมิดังกล่าวนี้คือ

$$\varepsilon = \int_{T_1}^{T_2} (Q_A - Q_B) dT \quad \dots\dots\dots(1)$$

สมการนี้จะอธิบายผลของซีเบ็ค ซึ่งพบว่า

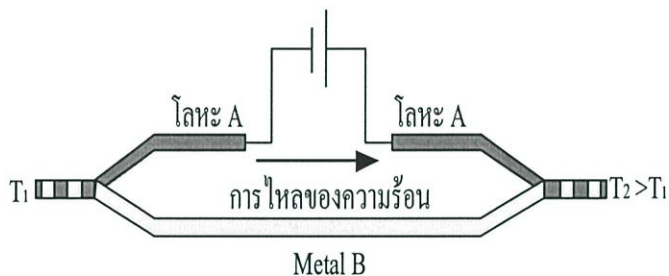
- 1.ค่า emf. ที่เกิดจะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิ จึงเกิดความแตกต่างของค่าคงที่ในการส่งผ่านความร้อนของโลหะ
  - 2.ถ้าใช้โลหะชนิดเดียวกันมาทำเทอร์โมคัปเปิลค่า emf. ที่ได้ก็จะมีค่าเป็นศูนย์
  - 3.ถ้าอุณหภูมิทั้งสองจุดคือจุดวัดและจุดอ้างอิงเหมือนกันค่า emf. ก็จะเป็นศูนย์
- โดยสูตรที่ง่ายและสามารถนำมาคำนวณได้เช่นกันคือ

$$\varepsilon = \alpha(T_2 - T_1) \quad \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ  $\alpha$  = ค่าคงที่หรือเรียกว่าสัมประสิทธิ์ของซีแบ็ค ; volts/K

$T_1, T_2$  = อุณหภูมิที่จุดต่อ ; K

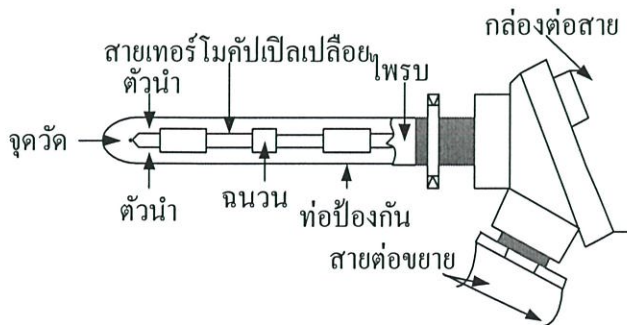
2) ผลของเพลเทียร์ (Peltier Effects) หากคิดย้อนกลับจากผลของซีแบ็ค นั่นคือใช้โลหะที่แตกต่างกันสองชนิดมาเชื่อมต่อทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วจ่ายพลังงานจากภายนอกเข้าไป ก็จะเป็นเหตุให้เกิดกระแสไหลในวงจร เพราะจากคุณสมบัติในการส่งไฟฟ้าและความร้อนของโลหะพบว่าขั้วหนึ่งจะเกิดความร้อน ( $T_2$ ) และอีกขั้วหนึ่งจะเกิดความเย็น ( $T_1$ ) ขึ้น โดยผลดังกล่าวเรียกว่า “ผลของเพลเทียร์” (Peltier effect) และถูกนำไปใช้งานพิเศษสำหรับการทำความเย็นกับส่วนของระบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือแม้กระทั่งเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก



รูปที่ 2.2 ผลของเพลเทียร์

2.1.2 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน (Characteristic of Standard Thermocouples)

1) ความไว (Sensitivity) จากตารางแรงเคลื่อนของ NBS แสดงว่า ย่านของแรงเคลื่อนจากเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าน้อยกว่า 100 mV แต่ความไวที่แท้จริงในการใช้งานจะขึ้นอยู่กับการใช้งานจริงปรับสภาพสัญญาณและตัวเทอร์โมคัปเปิลเอง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล

2) โครงสร้าง (Construction) โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะดังนี้ คือ มีความต้านทานต่ำให้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงๆ ทนต่อสถานะแวดล้อมที่นำไปใช้วัดค่าและเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัวฝักหรือท่อป้องกันส่วนมากจะทำจากสแตนเลส ความไวของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับความหนาของท่อป้องกันทั้งเยอร์มันเนียมและซิลิกอนจะทำให้คุณสมบัติการเกิดเทอร์โมอีเล็กทริกจึงใช้กันมากในอุปกรณ์ทำความเย็น (peltier element) มากกว่าที่จะใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ

ขนาดของสายเทอร์โมคัปเปิลกำหนดได้จากการใช้งานแต่ละอย่างและมีขนาดจาก #10 ในสถานะแวดล้อมที่ไม่คงที่ จนถึงขนาด # 30 หรือแม้กระทั่ง 0.02 mm ซึ่งเป็นสายแบบไมโครไวร์ (microwire) ที่ใช้กับการวัดอุณหภูมิการกลั่นในงานทางชีววิทยา

3) ย่านการใช้งาน (Range) ย่านอุณหภูมิการใช้งานและความไวในการวัดของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละตัวจะแตกต่างกันตามแต่ละสมาคมจะกำหนด ในส่วนที่สำคัญคือค่าแรงเคลื่อนที่ออกมาจากแต่ละอุณหภูมิจะต้องอ้างอิงกับตารางค่ามาตรฐานของแต่ละสมาคมที่ใช้ให้ถูกต้องเป็นเอกภาพเดียวกันหมดทั้งระบบ

4) เวลาตอบสนอง (Time Response) เวลาตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับขนาดของสายและวัสดุที่นำมาทำท่อป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล

5) การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) ปกติแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลจะมีขนาดเล็กน้อยมากจึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณ โดยใช้ออปแอมป์ขยายความแตกต่างที่มีอัตราขยายสูงๆ

### 2.1.3 การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน (Characteristic in Application of Thermocouple Standard Type)

ในปัจจุบัน พบว่ามีเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานอยู่ 7 ชนิด ตามมาตรฐานของ ANSI และ ASTM โดยการจำแนกตามประเภทของวัสดุที่ใช้ทำได้แก่

1) เทอร์โมคัปเปิลแบบ S ประดิษฐ์โดยนาย Le Chatelier ในปี 1886

ข้อดีของแบบ S

- ใช้ในการสอบเทียบตั้งแต่จุดแข็งตัวของแอนติโมนี ( $630.74^{\circ}\text{C}$ ) จนถึงจุดแข็งตัวของทองแดง ( $1064.43^{\circ}\text{C}$ ) ตามมาตรฐาน IPTS 68

- หากอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะให้ความเที่ยงตรงสูงที่สุด

- นิยมใช้กับงานวัดตัวแปรที่มีอุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมเหล็ก
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1550°C และอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วงประมาณ 50 ถึงประมาณ 1700°C
- เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิไดซิง(oxidizing)
- เหมาะกับการใช้งานในสภาวะงานที่เป็นงานเฉื่อย คืองานที่ไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาใดๆ ได้ง่าย ๆ

### ข้อเสียของแบบ S

- ต้องใช้ท่อป้องกันในทุกสภาวะบรรยากาศ
- ไม่เหมาะกับงานที่มีปฏิกิริยาแบบรีดิวซิง (reducing)
- ไม่เหมาะกับงานที่เป็นสุญญากาศ(vacuum)
- ไม่เหมาะกับงานที่มีไอโลหะ เช่น สังกะสี ตะกั่ว
- ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของโลหะ เช่น จำพวก อาเซนิก ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส เพราะจะมีอายุการใช้งานสั้นลง

2) เทอร์โมคัปเปิลแบบ R เป็นแบบที่เหมาะสมกับการวัดอุณหภูมิสูง ๆ

### ข้อดีของแบบ R

- ให้แรงเคลื่อนทางค่านเอาต์พุตสูงกว่าแบบ S
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1600°C
- วัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วง -50 ถึงประมาณ 1700°C
- เหมาะกับการวัดอุณหภูมิสูงๆ เช่น ในเตาหลอมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว
- ทนทานต่อการกัดกร่อน และให้เสถียรภาพของอุณหภูมิที่ดี

ส่วนลักษณะข้อเสียเช่นเดียวกับแบบ S แต่ส่วนที่เพิ่มเติมคือ ให้ความเป็นเชิงเส้นต่ำเพิ่ม อุณหภูมิต่ำกว่า 540°C

3) เทอร์โมคัปเปิลแบบ B ผลิตครั้งแรกเมื่อปี 1954 ในประเทศเยอรมัน

### ข้อดีของแบบ B

- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วงประมาณ 100 ถึงประมาณ 1600°C
- วัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วงประมาณ 50 ถึงประมาณ 1750°C
- เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิงและสภาวะเฉื่อย ให้ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ (linearity) ดี

- แข็งแรงกว่าแบบ S และแบบ R

### ข้อเสียของแบบ B

- ให้แรงเคลื่อนของไฟฟ้าน้อยกว่าแบบอื่นๆเมื่อวัดอุณหภูมิที่เงื่อนไขเดียวกัน
- ไม่เหมาะกับสภาวะที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาแบบรีดอกซ์
- ไม่เหมาะกับสภาวะที่เป็นสุญญากาศ
- ไม่เหมาะกับสภาพงานที่มีไอของโลหะและอโลหะเช่นเดียวกับแบบ R และ S
- ให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสองค่า (double value region) จากอุณหภูมิในช่วง 0-42 °C ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าที่แรงเคลื่อนไฟฟ้านั้นมีอุณหภูมิเท่าใด เช่น ที่อุณหภูมิ 0°C จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 42°C
- ให้ความชัน(การเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนต่ออุณหภูมิ) ของสัญญาณต่ำกว่าแบบอื่น ๆ

4) เทอร์โมคัปเปิลแบบ J พบว่าหากใช้แพลทินัมมาทำเป็นเทอร์โมคัปเปิลความคุ้มทุนก็ลดลงไป ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลราคาถูกลง จึงใช้วัสดุธาตุอื่นที่มีราคาถูกกว่ามาทดแทนแพลทินัม โดยรหัสสีตามมาตรฐาน BS มีดังนี้ ถ้าขั้วบวก จะเป็นสีดำ ขั้วลบจะเป็นสีขาว ทั้งตัวจะเป็นสีดำ

ความแน่นอนตามมาตรฐาน BS 1797 Part 30 , 1993 ได้แก่

$$1. \text{ Class 1} = -40^{\circ}\text{C ถึง } +750^{\circ}\text{C} \pm 0.004 \times t \quad \text{หรือ} \quad \pm 1.5^{\circ}\text{C}$$

$$2. \text{ Class 2} = -40^{\circ}\text{C ถึง } +750^{\circ}\text{C} \pm 0.0075 \times t \quad \text{หรือ} \quad \pm 2.5^{\circ}\text{C}$$

เมื่อ t คือ อุณหภูมิจริง

### ข้อดีของแบบ J

- ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิได้ดี
- มีราคาถูกกว่าแบบที่ทำจากธาตุบริสุทธิ์
- ตามมาตรฐาน BS 7937 Part 30 สามารถวัดอุณหภูมิได้ต่อเนื่องจากช่วงประมาณ -210 ถึง 1200°C
- เหมาะกับสภาพงานที่เป็นสุญญากาศงานที่ งานที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ และงานที่อยู่ในสภาพเฉื่อย เมื่ออุณหภูมิไม่เกิน 760°C
- นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก
- เป็นแบบที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่
- ราคาถูกไม่แพง

## ข้อเสียของแบบ J

- วัตต์อุณหภูมิได้ต่ำกว่าแบบ T
- ไม่เหมาะสมมากนักกับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า  $0^{\circ}\text{C}$
- วัตต์อุณหภูมิสูงกว่า  $538^{\circ}\text{C}$  จะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิงที่สายซึ่งทำจากเหล็กด้วยอัตราสูง
- หากใช้งานนานเกินช่วง 20 ปี ส่วนผสมทางเคมี คือ แมงกานีสในเหล็กจะเพิ่มขึ้น 0.5% ทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

5) เทอร์โมคัปเปิลแบบ K ธาตุหนึ่งที่เป็นฐานสำหรับการสร้างคือ นิกเกิล เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เริ่มผลิตให้เป็นมาตรฐานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1916 โดยพื้นฐานการผลิต ขั้วหนึ่งจะเป็น นิกเกิลที่เจือปนด้วยอะลูมิเนียมส่วนอีกด้านที่เจือปนด้วยโครเมียม ในปี ค.ศ. 1916 ยังไม่สามารถสร้างนิกเกิลลบบริสุทธิ์ได้จึงได้เติมสารไม่บริสุทธิ์ต่างๆในส่วนผสมของวัสดุชนิด K แต่ในปัจจุบันได้มีการระมัดระวังส่วนผสมที่จะทำให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ดังกล่าวเพื่อเหตุผลในการบำรุงรักษาและสอบเทียบ

ด้วยเหตุนี้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่กำหนดเป็นค่ามาตรฐานจะไม่ใช้โลหะผสมแต่โดยทั่วไปจะผสมธาตุพิเศษเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเคลื่อน/อุณหภูมิของจุดหลอมละลายที่กำหนดไว้ข้อควรระวังในการใช้งานของชนิด K มีดังนี้

1. ขั้วลบของเทอร์โมคัปเปิลจะเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก(เหล็กที่เป็นสารแม่เหล็ก) ที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่จุดคิวรีของมัน(curie point) คืออุณหภูมิที่มันเปลี่ยนจากคุณสมบัติเหล็กไปเป็นแม่เหล็ก) อยู่ในช่วงที่ใช้งานพอดี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางเอาท์พุตอย่างทันทีทันใด ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าจุดคิวรีดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะผสม จุดคิวรีนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติจากเทอร์โมคัปเปิลตัวหนึ่งให้เป็นเทอร์โมคัปเปิลอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องทดลองหาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนที่ไม่ทราบค่า ณ อุณหภูมิที่เราไม่ทราบค่านี้

2. ที่อุณหภูมิสูง ๆ (ช่วง  $200^{\circ}\text{C}$  ถึง  $600^{\circ}\text{C}$ ) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะมีผลของฮิสเตอร์รีซิสเกิดขึ้นขณะที่มันอ่านค่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและในช่วงที่อุณหภูมิลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่สามารถจะคาดเดาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนได้

3. ที่อุณหภูมิ  $1000^{\circ}\text{C}$  ขั้วของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะเกิดออกไซด์ เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อน การใช้โคบอลต์เป็นโลหะผสมสำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะทำให้เกิดปัญหาในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์หรือในพื้นที่อื่นๆ ที่มีฟลักซ์นิวตรอนสูงๆธาตุบางตัวจะรับเอาการปลดปล่อยนิวเคลียร์ จึงทำให้เปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางด้านเอาท์พุต

ย่านการทำงานและความแน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลในงานอุตสาหกรรม ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (รหัสสำหรับการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล) ช่วงนี้การวัดอุณหภูมิต่อเนื่องของเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้จะเป็น  $-270^{\circ}\text{C}$  ถึง  $+1,370^{\circ}\text{C}$  โดยมีระดับความแน่นอนซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (ตารางอ้างอิงสำหรับเทอร์โมคัปเปิลนานาชาติ จะแบ่งออกเป็น 3 class ดังนี้

$$1. \text{ Class 1} = -40^{\circ}\text{C ถึง } +1,000^{\circ}\text{C} \pm 0.004 \times t \quad \text{หรือ} \quad \pm 1.5^{\circ}\text{C}$$

$$2. \text{ Class 2} = -40^{\circ}\text{C ถึง } +1,200^{\circ}\text{C} \pm 0.0075 \times t \quad \text{หรือ} \quad \pm 2.5^{\circ}\text{C}$$

$$3. \text{ Class 1} = -200^{\circ}\text{C ถึง } +40^{\circ}\text{C} \pm 0.015 \times t \quad \text{หรือ} \quad \pm 2.5^{\circ}\text{C}$$

เมื่อ  $t$  อุณหภูมิจริงที่ทำการวัด

รหัสสี่สำหรับสายเทอร์โมคัปเปิลกำหนดโดยมาตรฐาน BS 4937 part 30, 1993 (รหัสสี่ตามมาตรฐานอังกฤษสำหรับสายขดเชยแบบคู่ของเทอร์โมคัปเปิล) สำหรับชนิด K ขั้วบวกจะเป็นสีเขียว ขั้วลบจะเป็นสีขาว ถ้าตลอดทั้งตัวจะเป็นสีเขียว ส่วนสายขดเชยสัญญาณ (ชนิด vx) ก็เหมือนกับสีด้านบนที่กล่าวมา โดยสรุป

#### ข้อดีของแบบ K

- เป็นแบบที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด
- สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้น ๆ จะวัดได้จาก  $-180^{\circ}\text{C}$  ถึงประมาณ  $1,350^{\circ}\text{C}$
- สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิงได้ หรือใช้ในงานที่มีสภาวะแบบเฉื่อยได้ดีกว่าแบบอื่นๆ
- สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี
- ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่น ๆ (ความชันเกือบเป็น 1) และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน

#### ข้อเสียของแบบ K

- ไม่เหมาะกับการวัดที่ต้องสัมผัสกับปฏิกิริยารีดิวซิงและออกซิไดซิงโดยตรง
- ไม่เหมาะกับการงานที่มีไอของซัลเฟอร์
- ไม่เหมาะกับการสภาพงานที่เป็นสุญญากาศ(ยกเว้นจะใช้ในช่วงเวลาสั้นๆ)
- หลังใช้งานไป 30 ปี ทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป ทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป

#### 6)เทอร์โมคัปเปิลแบบ T

### ข้อดีของแบบ T

- ดีกว่าแบบ K ตรงที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ต่ำกว่า นั่นคือเหมาะกับการวัดอุณหภูมิต่ำกว่า จุดเยือกแข็งของน้ำ เช่นในห้องเย็น ตู้แช่แข็ง
- ให้ความแม่นยำในการวัดดีกว่าแบบ K (ช่วงที่ต่ำกว่า  $100^{\circ}\text{C}$  ความแม่นยำจะเป็น  $\pm 1\%$ )
- มีเสถียรภาพในการวัดอุณหภูมิดี
- การวัดสภาพงานที่เป็นสุญญากาศงานที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิงรีดิวซิงและงานที่มีปฏิกิริยาแบบเฉื่อยจะทำได้ดี
- วัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้จากช่วง  $-185$  ถึง  $300^{\circ}\text{C}$  และวัดอุณหภูมิแบบช่วงสั้นๆ ได้จากช่วง  $-250$  ถึง  $400^{\circ}\text{C}$

### ข้อเสียของแบบ T

- เป็นแบบที่วัดอุณหภูมิช่วงบวกได้น้อยกว่าแบบอื่นๆ
- หากใช้วัดอุณหภูมิที่สูงกว่า  $370^{\circ}\text{C}$  จะทำให้เกิดออกไซด์มาก
- ไม่เหมาะกับการวัดอุณหภูมิที่สัมผัสกับการแผ่รังสีความร้อนโดยตรง(ทำให้ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ทำเปลี่ยนไป คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย)
- เมื่อใช้งานไปนาน ๆ ในช่วง 20 ปี ส่วนผสมของนิเกิลและสังกะสี จะเพิ่มประมาณ 10% ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน
- คุณสมบัติของแรงเคลื่อนต่ออุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้น (แต่ก็ปรับปรุงได้จากวงจรปรับสภาพสัญญาณ)

### 7) เทอร์โมคัปเปิลชนิด E

#### ข้อดีของแบบ E

- ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดเมื่อวัดอุณหภูมิเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์แบบอื่น ๆ ในสภาวะเดียวกัน
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง  $800^{\circ}\text{C}$
- คุณสมบัติอื่น ๆ คล้ายกับแบบ K

การแก้ไขให้ระบบวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลให้ทำงานได้ดีขึ้น ต้องปฏิบัติดังนี้

1. หลีกเลี่ยงความเค้นทางกลและการสั่นสะเทือนที่มีผลให้เกิดความเครียดในสาย
2. ถ้าต้องการใช้สายขนาดเล็ก ๆ ให้ใช้เฉพาะในขอบเขตที่ทำการวัด และใช้สายขยาย (extension wire) ในขอบเขตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลางสาย

3. ใช้สายเทอร์โมคัปเปิลขนาดใหญ่ที่สุดที่จะเป็นไปได้ เพราะมันจะไม่พวงเอาความร้อนออกจากพื้นที่การวัดเข้ามา

4. เมื่อใช้สายเทอร์โมคัปเปิลยาว ๆ ให้ต่อซิลด์ที่สายไปยังขั้วต่อสายของดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ และใช้สายขยายสัญญาณแบบบิเดเกลียว

5. หลีกเลี่ยงบริเวณที่เต็มไปด้วยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกลางสาย

6. พยายามเลือกสายเทอร์โมคัปเปิลในพิคคอุณหภูมิของมัน

7. ป้องกันวงจรแปลง integrate A/D จากการรบกวน

8. ใช้สายขยายเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลางสายน้อย ๆ

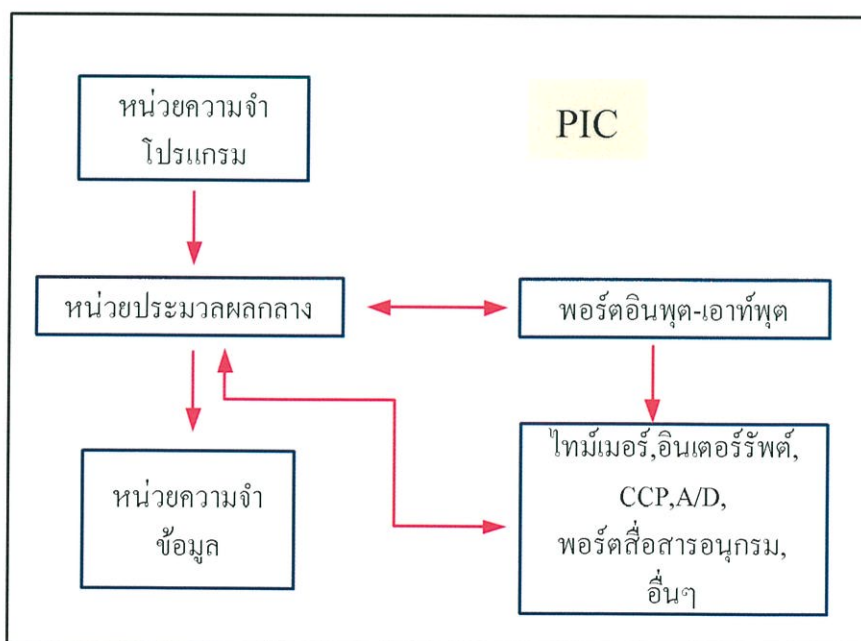
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน Type ต่างๆ

Type	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้า (mV)
		$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	
B	แพลทินัม-30% โรเดียม แพลทินัม-6% โรเดียม	0 ถึง 1820	32 ถึง 3310	0 ถึง 13.814
R	แพลทินัม-13% โรเดียม แพลทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.26 ถึง 21.108
S	แพลทินัม-10% โรเดียม แพลทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.236 ถึง 18.698
J	เหล็ก/คอนสแตนแตน	-210 ถึง 760	-350 ถึง 1400	-8.096 ถึง 42.922
K	โครเมล/อะลูเมล	-270 ถึง 1372	-450 ถึง 2500	-6.458 ถึง 54.875
T	ทองแดง/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 400	-450 ถึง 750	-6.258 ถึง 20.869
E	โครเมล/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 1000	-450 ถึง 1830	-9.835 ถึง 76.358

## 2.2 PIC

PIC ย่อมาจากคำว่า Peripheral Interface Controller เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ผลิตโดยบริษัท ไมโครชิพ(Microchip Technology, Inc.) ซึ่งนี้ถูกใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1977 ซึ่งในขณะนั้นบริษัท ไมโครชิพยังใช้ชื่อว่า เจนเนอรอล อินสตรูเมนต์ (General Instrument) PIC เบอร์แรกที่ผลิตออกมาคือ PIC1650 ซึ่งมีโครงสร้างสถาปัตยกรรมไม่ต่างจาก PIC ในปัจจุบันมากนัก แนวคิดของการสร้าง PIC คือ การพยายามรวมเอาทุกอย่างไว้ในชิพตัวเดียวไม่ว่าจะเป็นหน่วยประมวลผลกลาง, หน่วยความจำโปรแกรม, หน่วยความจำข้อมูล, EEPROM, I<sup>2</sup>C, CCP, A/D ฯลฯ โดยไม่จำเป็นต้องต่ออุปกรณ์เสริมจากภายนอก ผลที่ตามมาคือแผ่น PCB มีขนาดเล็กลง อุปกรณ์ที่ใช้จะมีไม่มากบางงานอาจใช้แค่ PIC เพียงตัวเดียวโดยไม่ต้องใช้ชิพอื่นๆมาต่อเพิ่มเลย

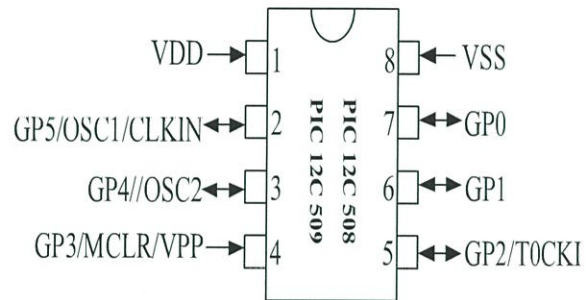
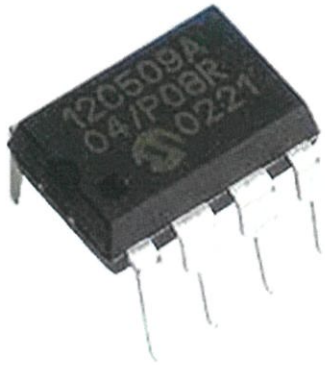
PIC ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีสถาปัตยกรรมแบบฮาวาร์ด (Harvard Architecture) หรือ ที่เรียกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ RISC (Reduced Instruction Set Computer) คือ มีการทำงานที่มีจำนวนชุดคำสั่งน้อย แต่ละคำสั่งจะทำงานแบบง่ายๆ ทำให้ความเร็วในการทำงานแต่ละคำสั่งสูงหนึ่งคำสั่งของ PIC จะมีขนาด 14 บิต เป็นผลให้จำนวนชุดคำสั่งของ PIC มีน้อยนั่นเอง ในปัจจุบัน PIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลที่เป็นยอดนิยมตระกูลหนึ่ง เพราะเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ราคาถูก และก็ยังมิให้เลือกใช่มากมายหลายเบอร์อีกด้วย ลักษณะโครงสร้างหลักๆของ PIC แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างหลักๆ ของ PIC

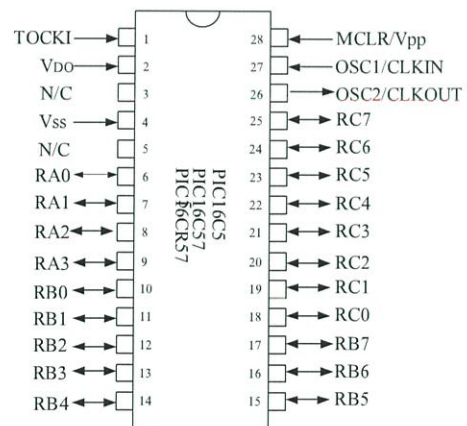
ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC แบ่งออกตามชนิดของหน่วยความจำโปรแกรมได้ 3 ประเภท คือ

1.OTP (One-Time Programmable) เป็นชิพที่ราคาถูกสุด แต่สามารถเขียนโปรแกรมได้แค่ครั้งเดียวเท่านั้น ซึ่งชิพประเภทนี้จะใช้ในกรณีที่พัฒนาโปรแกรมจนไม่พบจุดบกพร่องของโปรแกรมอีกแล้ว และต้องการใช้งานจำนวนมากๆ เพราะมีราคาที่ถูก ชิพประเภทนี้ยกตัวอย่าง เช่น PIC12C509, PIC12C672, PIC16C84, PIC16C74



รูปที่ 2.5 ตัวอย่าง PIC แบบ OTP

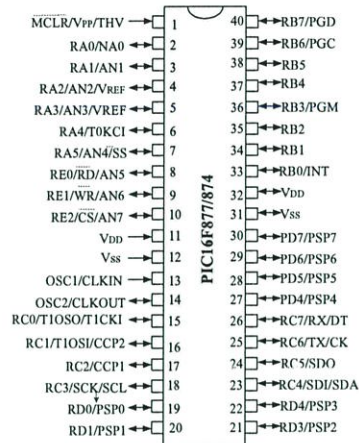
2.EPROM (Erasable Programmable ROM) เป็นชิพที่เมื่อเขียนโปรแกรมไปแล้วจะสามารถลบได้ด้วยแสง UV(Ultra Violet) ชิพประเภทนี้จะมีกรอบกระจกอยู่ด้านบน ชิพแบบนี้จะมีตัวอักษร JW กำกับอยู่ เช่น PIC16C57/JW, PIC16C72A/JW, PIC16C74/JW



รูปที่ 2.6 ตัวอย่าง PIC แบบ EPROM

3.EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า แฟลช (Flash) เป็นชิพที่เมื่อเขียนโปรแกรมไปแล้วสามารถลบได้ด้วยไฟฟ้า และสามารถลบแล้วเขียนใหม่ได้หลายพันครั้ง ทำให้ชิพประเภทนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด ใน 3 ประเภท ชิพประเภทนี้

ยกตัวอย่าง เช่น PIC16F877, PIC12F510, PIC16F84, PIC18F1220, PIC18F4331, PIC24HJ12GP201, PIC32MX340F128H



รูปที่ 2.7 ตัวอย่าง PIC แบบ EEPROM

### 2.2.1 คุณลักษณะของ PIC ตามเบอร์

เบอร์ของ PIC มีมากมายหลายเบอร์ แต่ที่จริงแล้วเบอร์ของ PIC สามารถบอกได้หลายอย่างเลขที่เดียว ยกตัวอย่างเช่น PIC เบอร์ 18F452-I/P ดังนี้



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างเบอร์ของ PIC

-18 ตัวเลขสองตัวแรกนี่คือ Family number ของ PIC ซึ่งจะมีตั้งแต่เลข 10,12,14,16,17, 18,24 และ 32 นอกจากนั้นยังมีตัวเลข 30 และ 33 สำหรับ dsPIC(digital signal PIC) อีกด้วย ซึ่งตัวเลขเหล่านี้จะกลายเป็นตัวเลขบ่งบอกวิวัฒนาการของ PIC โดย PIC ที่มี Family number 10 , 12 , 14 , 16 , 18 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต Family number 24 , 30,33 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ขนาด 16 บิต และ Family number 32 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 32 บิต

-F ตัวอักษรตัวนี้หมายถึง ลักษณะของหน่วยความจำโปรแกรมว่ามีลักษณะแบบใด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความหมายของตัวอักษรบอกลักษณะของหน่วยความจำโปรแกรม

ตัวอักษร	ลักษณะหน่วยความจำโปรแกรม
C	EPROM
CR	ROM
CE	One-time programmable EPROM และ EEPROM
F	Flash
HV	High Voltage (15)
LF	Low Voltage Flash
LC	Low Voltage One-time programmable
LCR	Low Voltage ROM

-452 ตัวเลขที่อยู่ถัดจากตัวอักษรนี้คือ ตัวเลขบอกประเภทของ PIC เบอร์นั้นๆ

-XX กรณีที่มีตัวเลขต่อจากเครื่องหมายขีด (-) ตัวเลขนี้จะบอกถึงความถี่สัญญาณนาฬิกาสูงสุดที่ PIC เบอร์นั้นๆทำงานได้

-I ตัวอักษรนี้จะบอกถึงช่วงอุณหภูมิที่ PIC เบอร์นั้นๆ สามารถทำงานได้ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ความหมายของตัวอักษรบอกช่วงอุณหภูมิที่ PIC สามารถทำงานได้

ตัวอักษร	ช่วงอุณหภูมิที่ PIC สามารถทำงานได้
C	Commercial 0 °C ถึง +85 °C
I	Industrial - 40 °C ถึง +85 °C
E	Extended - 40 °C ถึง +125 °C

-/P เป็นตัวอักษรบอกลักษณะตัวถัง (Package) ของ PIC ว่าเป็นตัวถังแบบใด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ความหมายของตัวอักษรบอกลักษณะตัวถัง

ตัวอักษร	ลักษณะตัวถัง
JW	Ceramic window (EEPROM only)
P	Plastic DIP
SN, OA, SM, SL, OD, SO, SI	SOIC-plastic small outline (surface mount)
PQ	QFP-Plastic quad flatpack surface mount
SS	SSOP- Plastic shrink small outline surface mount
ML	Chip scale package
ST	TSSOP-Plastic thin shrink small outline surface mount
PT	TQFP-Plastic thin quad flatpack

### 2.2.2 การเลือกใช้งาน PIC

รายละเอียดของ PIC ที่ได้จากการดูเบอร์จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นแค่ส่วนหนึ่งในการตัดสินใจเลือก PIC เพื่อใช้งานเท่านั้น ทั้งนี้เองจำเป็นต้องศึกษาโครงสร้างส่วนประกอบภายใน PIC แต่ละเบอร์จากคู่มือการใช้งาน(Data Sheet) ของ PIC เบอร์นั้นๆด้วย เพื่อประกอบการตัดสินใจหลักการเลือกใช้งาน PIC มีหลักการดังต่อไปนี้

- ต้องการใช้พอร์ตอินพุต-เอาต์พุตทั้งหมดก็พอร์ต
- ต้องการหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลแบบไหน มีขนาดเท่าไร
- ต้องการความเร็วในการทำงานสูงแค่ไหน
- ต้องการใช้ฟังก์ชันพิเศษอะไรของ PIC บ้าง มีตัวถังแบบไหน
- ต้องการให้ PIC ทำงานแบบ Low-voltage Operationหรือไม่

ซึ่งเราสามารถแบ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ที่นิยมใช้กันทั่วไป เรียงลำดับจากความสามารถต่ำไปถึงความสามารถสูงได้ดังนี้

#### 2.2.2.1 PIC16C5X

PIC ตระกูลนี้เป็นเป็นชิพที่ออกมาในยุคแรกของไมโครชิพจึงทำให้มีแต่หน่วยความจำโปรแกรมแบบ OTP และ EPROM เท่านั้นส่วนฟังก์ชันพิเศษก็มีเพียงแค่ ไทม์เมอร์

และวอตซ์ด็อกไทม์เมอร์ ไม่มีพอร์ตสื่อสารอนุกรมและ A/D ในปัจจุบันก็ยังคงมี PIC ตระกูลนี้อยู่บ้าง เช่น PIC16C505, PIC16C58 เป็นต้น

#### 2.2.2.2 PIC16CXXX

PIC ตระกูลนี้เป็นยุคต่อจาก PIC16C5X ที่ยังมีหน่วยความจำแบบ OTP และ EPROM แต่มีฟังก์ชันพิเศษให้เลือกใช้งานได้มากขึ้นซึ่งก็คือ มีไทม์เมอร์, วอตซ์ด็อกไทม์เมอร์, พอร์ตสื่อสารอนุกรม, USART, I<sup>2</sup>C, SPI, CCP นอกจากนั้นบางเบอร์ยังมี A/D อีกด้วย ซึ่งสามารถทำให้ติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ง่ายขึ้น ไม่จำเป็นต้องเขียนโปรแกรมติดต่อกันเอง โดยตัวอย่างของ PIC ในตระกูลนี้ ก็เช่น PIC16C621, PIC16C72, PIC16C711 เป็นต้น

#### 2.2.2.3 PIC12CXXX

PIC ตระกูลนี้เป็น PIC ที่มีเพียง 8 ขา ซึ่งจะออกแบบมาเพื่อใช้กับงานเล็กๆ มีไทม์เมอร์และวอตซ์ด็อกไทม์เมอร์, A/D นอกจากนั้นแล้วยังมี 4 MHz ออสซิลเลเตอร์ (OSC) กำเนิดสัญญาณภายในชิพ และบางเบอร์ก็มี EEPROM อยู่ในชิพด้วย แต่หน่วยความจำก็ยังคงเป็นแบบ OTP และ EPROM อยู่เหมือนเดิม PIC ในตระกูลนี้ก็ยกตัวอย่างเช่น PIC12C509, PIC12C672 เป็นต้น

#### 2.2.2.4 PIC17CXXX

PIC ตระกูลนี้ออกมาพร้อมๆ กับ PIC16CXXX แต่ PIC17CXXX จะมีขนาดหน่วยความจำที่ใหญ่กว่า และสามารถต่อหน่วยความจำภายนอกเพิ่มได้ มีไทม์เมอร์, วอตซ์ด็อกไทม์เมอร์, พอร์ตสื่อสารอนุกรม, USART, I<sup>2</sup>C, SPI, CCP นอกจากนั้นยังสามารถใช้คำสั่งการคูณและการหารได้อีกด้วย ตัวอย่างของ PIC ในตระกูลนี้เช่น PIC17C43, PIC17C44, PIC17C756 เป็นต้น

#### 2.2.2.5 PIC16FXXX, PIC12FXXX

PIC ตระกูลนี้เป็น PIC ยุคแรกๆ ที่มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash (EEPROM) ทำให้การสร้างเครื่องโปรแกรมชิพสามารถทำได้ง่าย จึงเป็นที่นิยมเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในตระกูล PIC16F8XXX ซึ่งมี A/D ขนาด 10 บิต, ไทม์เมอร์, วอตซ์ด็อกไทม์เมอร์, พอร์ตสื่อสารอนุกรม, USART, I<sup>2</sup>C, SPI, CCP และ EEPROM ภายในชิพ ตัวอย่างของ PIC ในตระกูลนี้ก็เช่น PIC16F628, PIC16F685 เป็นต้น หลังจากที่ PIC16FXXX ออกมาได้ไม่นาน PIC12FXXX ซึ่งเป็น PIC แบบ 8 ขาแต่มีหน่วยความจำโปรแกรมแบบ Flash ก็ออกตามมา

### 2.2.2.6 PIC18FXXX

PIC ตระกูลนี้มีหน่วยความจำแบบ Flash เช่นเดียวกับตระกูล PIC16FXXX แต่จะแก้จุดด้วยของ PIC16FXXX ตรงที่ไม่ต้องอ้างหน่วยความจำข้อมูลแบบที่มีลักษณะแบ่งออกเป็นหน้าๆ (Page) ซึ่งทำให้สะดวกในการเขียน โปรแกรม ซึ่ง PIC18FXXX นั้นจะมี A/D ขนาด 10 บิต, ไทม์เมอร์, วอท์ชดอกไทม์เมอร์, พอร์ตอนุกรม USART, I<sup>2</sup>C, SPI, CCP, CAN และ EEPROM ภายในชิพ สามารถต่อหน่วยความจำภายนอกเพิ่มได้ ตัวอย่างของ PIC ในตระกูลนี้ เช่น PIC18F1220, PIC18F252, PIC18F2550, PIC18F4220, PIC18F4431, PIC18F452 เป็นต้น

### 2.2.2.7 PIC24FXXX

PIC ตระกูลนี้เป็น PIC ที่มีหน่วยประมวลผลกลางขนาด 16 บิต ซึ่งเบอร์ก่อนๆ จะเป็น 8 บิต นอกจากนั้น dsPIC ยังได้รวมการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DSP) เข้าไว้ในชิพด้วย ทำให้ PIC รูปแบบนี้ถูกเรียกว่า Digital Signal Controller PIC ตระกูลนี้มีฟังก์ชันพิเศษมากมายให้เลือกใช้ เช่น A/D, ไทม์เมอร์, USART, CCP, I<sup>2</sup>C, SPI, CAN, RTCC, EEPROM, นอกจากนั้นบางเบอร์ยังมีโมดูล สำหรับติดต่อผ่านพอร์ต USB (OTG) ภายในอีกด้วย มีการทำงานแบบ Low-Voltage Operation เช่น 2.0-3.6 V ตัวอย่างของ PIC ในตระกูลนี้เช่น PIC24FJ48GA002, dsPIC30F4011, dsPIC33FJ64MC710 เป็นต้น

### 2.2.2.8 PIC 32MX3XX, PIC32MX4XX

PIC ตระกูลนี้เป็นตระกูลที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในปัจจุบัน มีหน่วยประมวลผลกลางขนาด 32 บิต มีความเร็วในการทำงานสูงมากถึงระดับ 80 MHz มีขนาดหน่วยความจำสูงสุดที่ 256K หน่วยความจำข้อมูลสูงสุด 32K มีระบบหน่วยความจำแคช (cached processor) มีโมดูลสำหรับติดต่อผ่านพอร์ต USB มีการทำงานแบบ Low-Voltage Operation เช่น 2.3 - 3.6 V และฟังก์ชันพิเศษอื่นๆ ครบถ้วน เหมาะสำหรับงานขนาดใหญ่ ที่ต้องการความสามารถของไมโครคอนโทรลเลอร์สูง ตัวอย่างของ PIC ในตระกูลนี้เช่น PIC32MX340F128H, PIC32MX460F256L เป็นต้น

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ เป็นแนวทางในการเลือกเบอร์ PIC เพื่อใช้งานได้ตรงตามความต้องการ หลักสำคัญอีกอย่างคือ งานที่ต้องการทำนั้นจะเป็นตัวกำหนดว่า ควรเลือกใช้ PIC เบอร์ใด เพื่อให้เหมาะสมกับงานนั้นมากที่สุด ยกตัวอย่าง PIC ตระกูลหนึ่งที่น่าสนใจในโครงการพิเศษนี้ คือ PIC18FXX2 ซึ่ง PIC ตระกูลนี้จะเป็น PIC ตัวหลักที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ในโครงการพิเศษนี้

### 2.2.3 PIC18FXX2

PIC ในตระกูล PIC18FXX2 ประกอบไปด้วย PIC ทั้งหมด 4 เบอร์คือ PIC18F242, PIC18F252, PIC18F442 และ PIC18F452 ซึ่งทุกเบอร์เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต และมีโครงสร้างภายในแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย แสดงรายละเอียดของแต่ละเบอร์ได้ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 PIC เบอร์ต่างๆ ในตระกูล PIC18FXX2

ส่วนประกอบ	PIC18F242	PIC18F252	PIC18F442	PIC18F452
หน่วยความจำโปรแกรม (Bytes)	16K	32K	16K	32K
หน่วยความจำข้อมูล (Bytes)	768	1536	768	1536
EEPROM (Bytes)	256	256	256	256
อินพุต - เอาต์พุตพอร์ต	A, B, C	A, B, C	A, B, C, D	A, B, C, D
ไทม์เมอร์	4	4	4	4
อินเตอร์รัพต์	17	17	18	18
Capture / compare / PWM	2	2	2	2
พอร์ตสื่อสารข้อมูลอนุกรม	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART	MSSP, USART
A/D converter (10 บิต)	5 ช่อง	5 ช่อง	8 ช่อง	8 ช่อง

### 2.2.4 สถาปัตยกรรมของ PIC18FXX2

PIC18F242 และ PIC18F252 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 28 ขา ส่วน PIC18F442 และ PIC18F452 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 40 ขา ซึ่งทั้ง 4 เบอร์มีลักษณะ

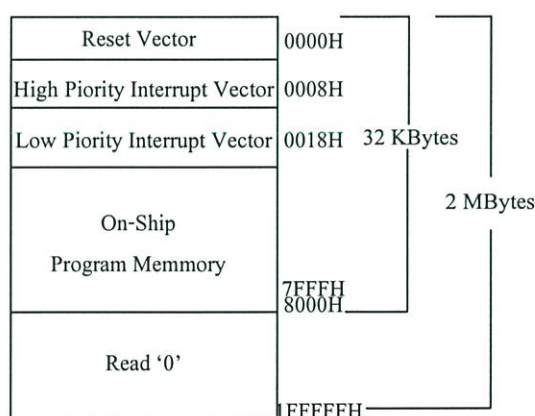
โครงสร้างภายในเหมือนกัน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ PIC18F442 และ PIC18F452 มีจำนวนพอร์ต อินพุต - เอาท์พุต และจำนวนช่องสัญญาณ A/D มากกว่าเท่านั้นเอง นอกจากนั้นแล้วเบอร์ที่ลงท้าย ด้วย 52 ก็จะมีขนาดของหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลมากกว่าเบอร์ที่ลงท้าย ด้วย 42 เป็นสองเท่าอีกด้วย

#### 2.2.4.1 โครงสร้างหน่วยความจำ

หน่วยความจำของ PIC18F252 แบ่งออกเป็นหน่วยความจำโปรแกรม (Program memory) และหน่วยความจำข้อมูล (Data memory) ซึ่งมีรายละเอียดของแต่ละ หน่วยความจำดังต่อไปนี้

##### 1) หน่วยความจำโปรแกรม

PIC ตระกูล 18F จะมีโปรแกรมเคอร์เตอร์ขนาด 21 บิต ดังนั้นจึงสามารถอ้างแอดเดรสของ หน่วยความจำโปรแกรมได้มากที่สุดถึง 2 Mbytes แต่เนื่องจากหน่วยความจำโปรแกรมที่มีอยู่ในชิพ PIC18F252 มีขนาดเพียงแค่ 32 Kbytes ดังนั้นจึงสามารถอ้างแอดเดรสได้ตั้งแต่ 0000H จนถึง 7FFFH เท่านั้น ส่วนแอดเดรสตั้งแต่ 8000H จนถึง 1FFFFFFH จะอ่านค่าได้ตั้งแต่ 0 ส่วนแอดเดรสที่ สกวนได้สำหรับเวกเตอร์การอินเตอร์รัพท์ ก็คือ แอดเดรส 0008H และ 0018H ทุกครั้งที่ทำการรีเซต ไมโครคอนโทรลเลอร์ โปรแกรมเคอร์เตอร์จะกลับมาซึ่งอยู่ที่แอดเดรส 0000H ซึ่งเป็นเวกเตอร์การรี เซต โครงสร้างหน่วยความจำโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 2.9

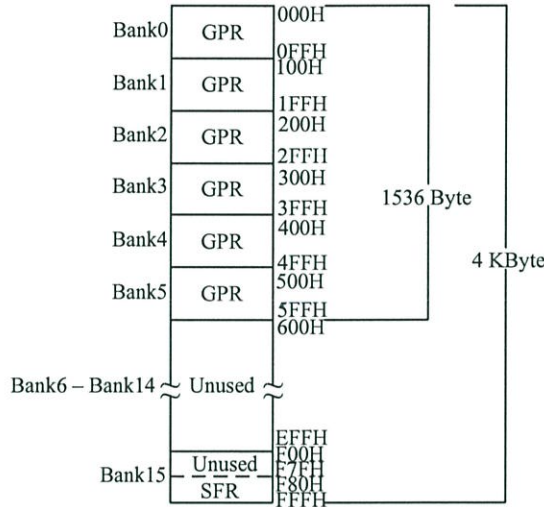


รูปที่ 2.9 โครงสร้างหน่วยความจำโปรแกรม

##### 2) หน่วยความจำข้อมูล

PIC18F252 มีสายสัญญาณข้อมูล (Data Bus) ขนาด 12 บิต ทำให้สามารถอ้าง แอดเดรสของหน่วยความจำข้อมูลได้ถึง 4Kbytes ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะแบ่งออกเป็น 16 แบนด์ แบนด์

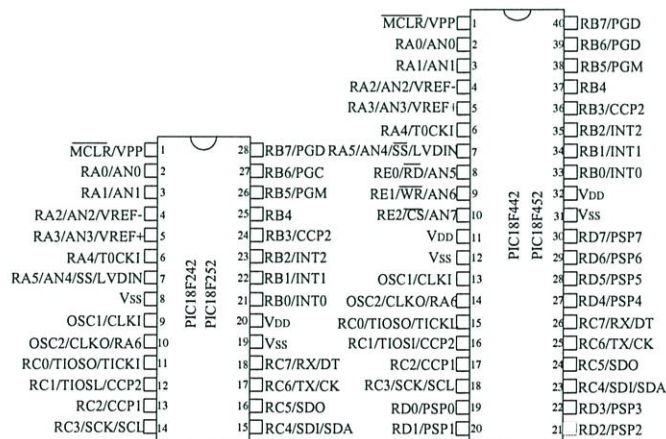
ละ 256 Bytes แต่มีเพียงแค่ 6 แบนก์บนสุดเท่านั้นที่ถูกใช้งาน จึงทำให้ PIC18F252 มีหน่วยความจำข้อมูลทั้งหมด 1536 Bytes (6 x 265) ใช้เป็นรีจิสเตอร์ใช้งานทั่วไป (General Purpose Register) ส่วนรีจิสเตอร์ฟังก์ชันพิเศษ (Special Function Register) จะอยู่ภายใน 128 Bytes ของแบนก์บนสุด สำหรับการเลือกใช้งานแต่ละแบนก์นั้น คอมไพเลอร์ภาษา C จะทำการเลือกแบนก์ให้โดยอัตโนมัติ โครงสร้างหน่วยความจำข้อมูลแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างหน่วยความจำข้อมูล

### 2.2.5 โครงสร้างและหน้าที่ของ PIC

PIC18FXX2 ทั้ง 4 เบอร์คือ PIC18F242, PIC18F252, PIC18F442 และ PIC18F452 มีการจัดขาในแบบตัวถังแบบ DIP 28 ขา และแบบ DIP 42 ขา แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การจัดขาของ PIC18F242, PIC18F252, PIC18F442 และ PIC18F452

- MCLR/VPP เป็นขาอินพุตสัญญาณรีเซ็ตด้วยลอจิก 0 ซึ่งโดยปกติจะต่อกับ R ค่า 10 K เพื่อเชื่อมต่อกับไฟเลี้ยง(VDD) และต่อสวิตช์รีเซ็ตลงกราวนด์ (GND) นอกจากนั้นยังทำหน้าที่เป็นขาอินพุตแรงดันไฟสูง 13V ในขณะที่ทำการโปรแกรมใช้กับชิพด้วย
- VDD เป็นขาอินพุตสำหรับต่อไฟเลี้ยงให้กับ PIC โดยจ่ายแรงดันในช่วง 4.2-5.5 V
- VSS เป็นขาอินพุตสำหรับต่อไฟเลี้ยงให้กับ PIC โดยการต่อลงกราวนด์
- OSC1/CLKI เป็นขาอินพุตของสัญญาณนาฬิกา
- RA0/AN0 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่อง 0
- RA1/AN1 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่อง 1
- RA2/AN2/VREF- เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่อง 2 และอินพุตแรงดันอ้างอิงต่ำของโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D)
- RA3/AN3/VREF+ เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่อง 3 และอินพุตแรงดันอ้างอิงสูงของโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D)
- RA4/T0CKI เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุตสัญญาณ Clock จากภายนอกเข้าสู่ ไทม์เมอร์ 0
- RA5/AN4/SS/LVDIN เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป,อินพุตสัญญาณอนาล็อกช่อง 4 และอินพุต Slave Select ของ SPI
- OSC2/CLKO/RA6 เป็นขาเอาท์พุตของสัญญาณนาฬิกาซึ่งมีค่าความถี่เท่ากับ FOSC/4 และอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป
- RB0/INT0 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุตสัญญาณอินเทอร์รัพต์ 0 จากภายนอก
- RB1/INT1 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุตสัญญาณอินเทอร์รัพต์ จากภายนอก
- RB2/INT2 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุตสัญญาณอินเทอร์รัพต์ 2 จากภายนอก
- RB3/CCP2 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุตเอาท์พุตของโมดูล CCP2
- RB4 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป
- RB5/PGM เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุตของโปรแกรมแบบ ICSP แรงดันต่ำ
- RB6/PGC เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป อินพุต – เอาท์พุตสำหรับ In-circuit debugger และการโปรแกรมแบบ ICSP

- RB7/PGD เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป, อินพุต – เอาท์พุตสำหรับ In-circuit debugger และการโปรแกรมแบบ ICSP
- RC5/SDO เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และเอาท์พุตข้อมูลของ SPI
- RC0/TIOSO/TICKI เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป,เอาท์พุตออสซิลเลเตอร์ของไทม์เมอร์ที่ 1 และอินพุตสัญญาณนาฬิกา จากภายนอกเข้าสู่ไทม์เมอร์ที่ 1และเข้าสู่ไทม์เมอร์ 3
- RC1/TIOSI/CCP2 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป,อินพุตออสซิลเลเตอร์ของไทม์เมอร์ 1 และอินพุต – เอาท์พุตของโมดูล CCP2
- RC2/CCP1 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และเป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไปของ CCP1
- RC3/SCK/SCL เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป, อินพุต – เอาท์พุตสัญญาณ Clock แบบซิงโครนัสของ SPI และอินพุต – เอาท์พุต ของสัญญาณ Clock แบบซิงโครนัส ของ I<sup>2</sup>C
- C4/SDI/SDA เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป,อินพุตข้อมูลของ SPI,อินพุต – เอาท์พุตข้อมูลของ I<sup>2</sup>C
- RC6/TX/CX เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป, เอาท์พุตข้อมูลของ USART และอินพุต – เอาท์พุตสัญญาณ Clock แบบซิงโครนัสของ USART
- RC7/RX/DT เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป,อินพุตข้อมูลของ USART และอินพุต – เอาท์พุตสัญญาณ Clock แบบซิงโครนัสของ USART
- RD0/PSP0 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุต – เอาท์พุตของ PSP บิต 0
- RD1/PSP1 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุต – เอาท์พุตของ PSP บิต 1
- RD2/PSP2 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุต – เอาท์พุตของ PSP บิต 2
- RD3/PSP3 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุต – เอาท์พุตของ PSP บิต 3
- RD4/PSP4 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุต – เอาท์พุตของ PSP บิต 4
- RD5/PSP5 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุต – เอาท์พุตของ PSP บิต 5
- RD6/PSP6 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุต – เอาท์พุตของ PSP บิต 6
- RD7/PSP7 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป และอินพุต – เอาท์พุตของ PSP บิต 7
- RE0/RD/AN5 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป,ควบคุมการอ่านค่า PSP และอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่อง 5
- RE1/WR/AN6 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป, ควบคุมการเขียนค่า PSP และอินพุตสัญญาณอนาล็อกช่อง 6

-RE2/CS/AN7 เป็นขาอินพุต – เอาท์พุตทั่วไป, ควบคุมการทำงานค่า PSP และอินพุต สัญญาณอนาล็อกช่อง 7

## 2.3 มอเตอร์

วงจรไฟฟ้าคือการนำแหล่งจ่ายไฟฟ้าจ่ายแรงดันและกระแสให้กับโหลด โดยใช้ลวดตัวนำ ถ้าเรามองดูอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้ารอบๆตัวเรา ไม่ว่าจะเป็นพัดลม เครื่องซักผ้า เครื่องเล่นเทป หรือของเล่นต่างๆ จะเห็นว่าเครื่องใช้ส่วนใหญ่จะมีมอเตอร์เป็นส่วนประกอบในการทำงานแทบทั้งสิ้น นอกจากนี้เครื่องจักรต่างๆที่ใช้ในงานผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมก็อาศัยมอเตอร์แทบทั้งสิ้น จึงอาจกล่าวได้ว่ามอเตอร์ คือ อุปกรณ์ที่มีความสำคัญ ต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์เราเลยทีเดียว

มอเตอร์จะทำหน้าที่ แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลให้เราไปใช้ในการทำงาน แทนการใช้แรงงานจากมนุษย์ เราอาจแบ่งมอเตอร์ ตามระบบไฟที่ใช้ได้ 2 ประเภท คือ

- 1.มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)
- 2.มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor)

โดยมอเตอร์ทั้งสองประเภทจะมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันออกไปบ้าง แต่ส่วนประกอบหลักคือจะมีส่วนที่อยู่กับที่เราเรียกว่า สเตเตอร์(Stator) และส่วนที่เคลื่อนที่ซึ่งเราเรียกว่าโรเตอร์ (Rotor) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีด้วยกันหลายแบบ ถ้าจะแบ่งตามการตัวสร้างสนามแม่เหล็ก (Permanent DC Motor) แบบนี้จะมีแท่งแม่เหล็กอย่างน้อยสองแท่ง เป็นส่วนประกอบของสเตเตอร์ ส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์ขนาดเล็กๆใช้ในของเด็กเล่น หรือเครื่องมือขนาดเล็ก เช่น สว่านเจาะพริ้นซ์สร้างสนามแม่เหล็กของ สเตเตอร์ ก็จะแบ่งได้เป็น 3 แบบคือ

1. แบบที่ใช้แม่เหล็กถาวรเป็นตัวสร้างสนามแม่เหล็ก (Permanent DC Motor)แบบนี้จะมีแท่งแม่เหล็กอย่างน้อยสองแท่งเป็นส่วนประกอบของสเตเตอร์ ส่วนใหญ่จะเป็นมอเตอร์ขนาดเล็กๆ ใช้ในของเด็กเล่นหรือเครื่องมือขนาดเล็ก เช่น สว่านเจาะพริ้นซ์

2. แบบที่ใช้ขดลวดในการสร้างสนามแม่เหล็ก(Wound DC Motor) แบบนี้จะมีขดลวดสเตเตอร์ ในการสร้างสนามแม่เหล็ก และมีขั้วต่อออกเพื่อรับการจ่ายไฟเลี้ยง ซึ่งสามารถต่อได้ 2 ลักษณะ คือ ต่ออนุกรมกับขดลวดโรเตอร์ เราเรียกว่า ซีรีส์มอเตอร์ และต่อแบบขนานกับโรเตอร์ เรียกว่า ชันท์มอเตอร์ โดยมอเตอร์แบบนี้จะใช้ในงานพิเศษที่ต้องการแรงบิดสูง หรือ งานที่ต้องการความเร็วรอบที่คงที่และปรับเปลี่ยนได้ง่าย โดยวิธีควบคุมกระแสที่จ่ายให้ขดลวดนี้

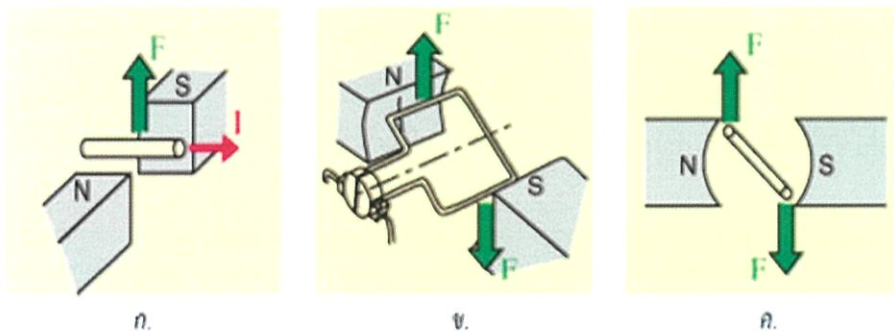
3. แบบใช้ขดลวดพันพิเศษเพื่อหมุนทีละขั้นทีละจุด มักเรียกกันว่า สเตปปีงมอเตอร์ (stepping motor) ซึ่งจะใช้ในการควบคุมแบบพิเศษ เช่น แขนกล หรืออุปกรณ์ที่ต้องการควบคุมการหมุนแบบละเอียด

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ก็มีด้วยกันหลายประเภท เช่น มอเตอร์แบบซิงโครนัส (Synchronous Motor), มอเตอร์แบบอินดักชัน (Induction Motor) เป็นต้นซึ่งในที่นี่จะไม่ขอกล่าวถึง เพราะมีรายละเอียดมากมาย ไม่เหมาะกับการเรียนรู้ในระดับพื้นฐาน จึงขอกล่าวรายละเอียด เฉพาะมอเตอร์อย่างง่าย ที่ใช้แม่เหล็กถาวรเท่านั้น เพราะศึกษาได้ง่ายและเห็นกันอยู่เสมอ

### 2.3.1 หลักการทำงานของมอเตอร์

หลักการทำงานของมอเตอร์จะอาศัยแรงผลักที่เกิดจากสนามแม่เหล็ก โดยความรู้เบื้องต้นที่เราได้เรียนมา คือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรอบตัวนำนั้น ถ้าเรานำตัวนำดังกล่าวไปวางไว้ในสนามแม่เหล็กถาวรก็จะเกิดการดันและเสริมกับเส้นแรงแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวร ทำให้เกิดแรงผลักขึ้นที่ขดลวด

หลักการทำงานของมอเตอร์แต่ละขั้นตอน



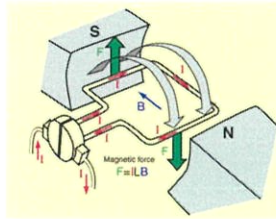
รูปที่ 2.12 การทำงานของมอเตอร์ (1)

รูปที่ 2.12 ก. เมื่อเราจ่ายกระแสให้กับตัวนำ จะทำให้ตัวนำมีสนามแม่เหล็กมีผลให้ทำปฏิกิริยากับสนามแม่เหล็กถาวร ทำให้เกิดแรงผลักตัวนำไปในทิศทางด้านบน แต่ถ้าจ่ายกระแสในทิศทางตรงข้ามตัวนำก็จะถูกผลักในทิศทางตรงกันข้าม

รูปที่ 2.12 ข. เมื่อใช้ตัวนำเป็นวงรอบแล้วจ่ายกระแสจะทำให้ด้านหนึ่งของตัวนำถูกผลักขึ้นและอีกด้านถูกผลักลง ทำให้ตัวนำหมุน

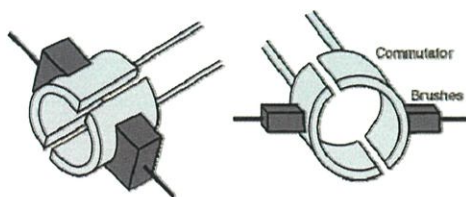
รูปที่ 2.12 ค. แสดงภาพในแนวตัวขวาง แสดงถึงทิศทางของแรงที่เกิดขึ้นกับตัวนำ

## หลักการการทำงานของมอเตอร์เติมรูปแบบ



รูปที่ 2.13 การทำงานของมอเตอร์ (2)

จากรูปจะเห็นได้ชัดเจนว่าเมื่อจ่ายกระแสผ่านขั้วต่อที่เรียกว่าแปรงถ่าน (Brushes) ไปยังวงแหวนพิเศษที่เรียกว่าคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ซึ่งต่อเข้ากับวงรอบตัวนำ กระแสที่ไหลผ่านตัวนำจะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบตัวนำ โดยด้านหนึ่งจะเกิดเป็นแรงผลักขึ้น ส่วนอีกด้านจะเกิดแรงผลักลงมา ทำให้วงรอบตัวนำมีการหมุน โดยแรงที่เกิดขึ้นจะแปรตามกระแสที่ไหลผ่าน (I) ความยาวของตัวนำ (L) และความเข้มของสนามแม่เหล็กสเตเตอร์ (B) ที่ต้องใช้วงแหวนคอมมิวเตเตอร์ เพราะถ้าเราต่อตัวนำเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรงจะทำให้กระแสที่ไหลผ่านตัวนำมีทิศทางตัวเมื่อตัวนำหมุนมาอีกทิศทางหนึ่ง ทิศทางแรงผลักรจะทำให้ตัวนำถูกผลักรับกลับไปตำแหน่งเดิม ทำให้ไม่สามารถหมุนต่อเนื่องได้ การใช้วงแหวนคอมมิวเตเตอร์ก็เพื่อให้ตัวนำได้รับการจ่ายกระแสที่ถูกต้อง ทำให้ตัวนำหมุนต่อเนื่องต่อไปได้ สำหรับการต่อแรงดันไฟฟ้าไปยังคอมมิวเตเตอร์ จะกระทำผ่านแปรงถ่าน โดยแปรงถ่านจะเป็นสารผสมระหว่างทองแดงกับกราไฟต์ที่สามารถนำกระแสที่ใช้แปรงถ่านก็เพื่อลดการเสียดสีระหว่างขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟกับวงแหวนคอมมิวเตเตอร์



รูปที่ 2.14 วงแหวนคอมมิวเตเตอร์ และ แปรงถ่าน

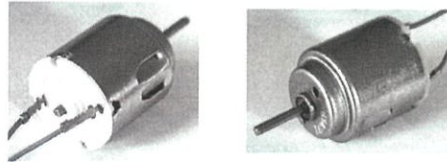
มอเตอร์ในทางปฏิบัติจะเพิ่มความยาวของลวดตัวนำซึ่งเป็นโรเตอร์ โดยพันลวดรอบแกนโลหะ ซึ่งเรามักเรียกกันอีกชื่อหนึ่งว่า อาร์เมเจอร์ (Armature) เพื่อเพิ่มแรงบิด (Torque) ให้กับมอเตอร์



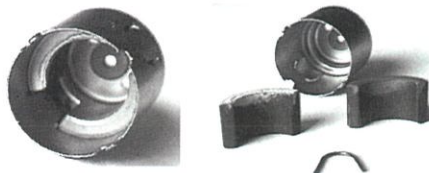
รูปที่ 2.15 โครงสร้างและภาพจริงของแอมมิเตอร์

### 2.3.2 ส่วนประกอบของมอเตอร์

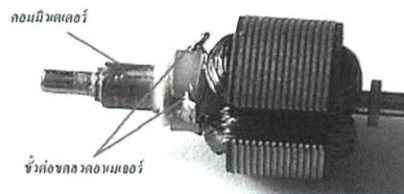
ในที่นี่จะแสดงรูปจริงที่เป็นส่วนประกอบของมอเตอร์ไฟตรงแบบแม่เหล็กถาวร



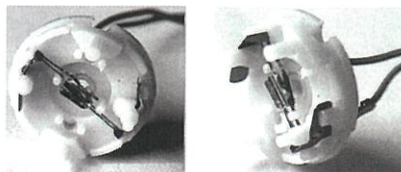
รูปที่ 2.16 ภาพด้านหน้าและด้านหลังของมอเตอร์



รูปที่ 2.17 สเตเตอร์และส่วนประกอบซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 2.18 แอมมิเตอร์และส่วนประกอบ



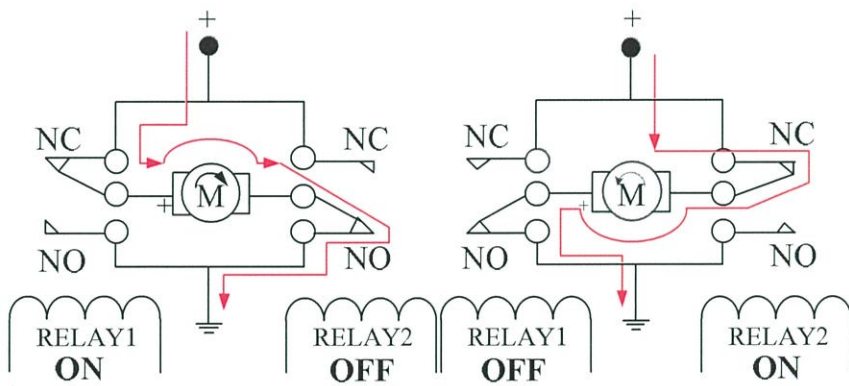
รูปที่ 2.19 ส่วนพลาสติกที่มีขั้วต่อไฟฟ้า

เชื่อมต่อกับแผ่นทองแดงที่ทำหน้าที่แทนแปรงถ่าน

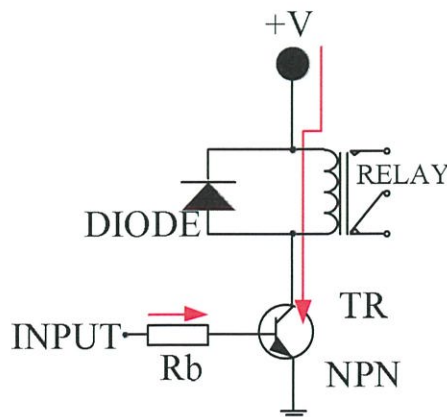
### 2.3.3 การควบคุมมอเตอร์

ในการใช้ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการหมุนและทิศทางของมอเตอร์ กระแสตรงนั้น เราจะต้องมีส่วนของวงจร ที่เรียกว่าวงจรขับมอเตอร์(Driver) ในส่วนของวงจรกลับทิศทางของมอเตอร์นั้นสามารถที่จะใช้รีเลย์ต่อวงจรสวิตช์เพื่อกลับทิศทางของขั้วไฟกระแสตรง หรืออาจใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เป็นวงจรขับกำลัง เช่น ทรานซิสเตอร์ มอสเฟต แล้วแต่วิธีที่เราจะเลือกใช้งาน

จากรูปเป็นการใช้รีเลย์ควบคุมการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์ โดยการควบคุมการปิด - เปิดที่รีเลย์ 2 ตัว ซึ่งจะทำหน้าที่กลับทิศทางของขั้วไฟที่ป้อนให้กับมอเตอร์โดยการสลับการทำงานของรีเลย์ เช่น ให้รีเลย์ตัวที่ 1 ทำงาน(ON) และรีเลย์ตัวที่ 2 หยุดทำงาน(OFF) จะทำให้มอเตอร์หมุนไปทางซ้ายและในทำนองเดียวกันถ้าหากรีเลย์ตัวที่ 1 หยุดทำงาน(OFF) และรีเลย์ตัวที่ 2 ทำงาน (ON) ก็จะทำให้มอเตอร์หมุนไปทางขวา

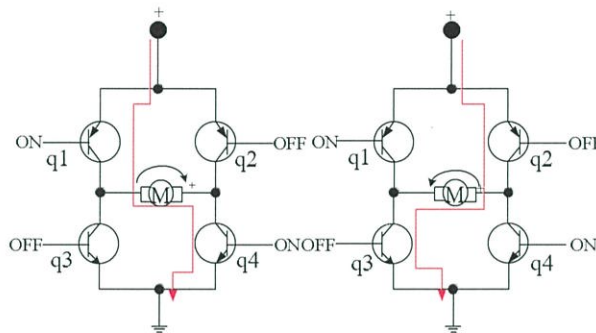


รูปที่ 2.20 การกลับทิศทางของมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้รีเลย์



รูปที่ 2.21 การใช้ทรานซิสเตอร์เพื่อขับรีเลย์ให้ทำงาน

จากรูปเป็นวงจรขั้วรีเลย์โดยใช้ทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ขยายกระแส ด้วยเหตุผลเพราะไม่สามารถจะใช้ขาเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์ป้อนกระแสไฟที่ขดลวดของรีเลย์โดยตรงได้ เนื่องจากว่ากระแสที่จ่ายออกมาจากขาเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าน้อยเกินไป ดังนั้นเราจึงต้องมีส่วนของวงจรทรานซิสเตอร์เพื่อที่จะทำการขยายกระแสให้เพียงพอในการป้อนให้กับขดลวดของรีเลย์ ส่วนไดโอดนำมาต่อไว้สำหรับป้องกันแรงดันย้อนกลับที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในขณะเกิดการยุบตัว ซึ่งอาจจะทำให้ทรานซิสเตอร์เสียหายได้



รูปที่ 2.22 การใช้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรขับและกำหนดทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง

จากรูปเป็นวงจรลิเนียร์บริดจ์แอมป์ซึ่งจะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์กำลัง 4 ตัวที่ทำหน้าที่ขับ และควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ถ้าหากกำหนดให้ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q4 อยู่ในสถานะทำงาน (Active) กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านทรานซิสเตอร์จากซ้ายไปขวาโดยผ่านมอเตอร์กระแสตรงทำให้มอเตอร์หมุนไปทางขวา ในทำนองเดียวกันถ้าหากเราทำให้ทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q3 อยู่ในสถานะทำงาน (Active) กระแสไฟฟ้าก็จะไหลจากทางขวาไปทางซ้ายซึ่งจะส่งผลให้มอเตอร์กลับทิศทางการหมุนจากทางขวาไปทางซ้าย

## 2.4 ลอจิกเกต

### 2.4.1 ความหมายของลอจิกเกต

วงจรลอจิกเกต ถ้าจะแปลความหมายน่าจะเป็นการแยกคำออกโดยแบ่งเป็นคำว่า "ลอจิก" ซึ่งแปลว่าความคิดแบบมีเหตุ มีผล กับคำว่า "เกต" ซึ่งหมายถึงประตู ฉะนั้น ลอจิกเกต น่าจะหมายความว่า เป็นประตูที่สามารถเปิดปิดอย่างมีเหตุผล

การคิดแบบมีเหตุมีผลก็คือการคิดที่ตรงไปตรงมามีหลักเกณฑ์ที่แน่นอนไม่เปลี่ยนแปลงหรือลังเล เช่น เดียวกันวงจรเกตที่จะศึกษา กัน วงจรเกตที่ดีจะต้องไม่เปิดประตูแบบ

ครึ่งๆกลางๆ แต่จะต้องเปิดประตูอย่างสมบูรณ์จึงจะเรียกว่าวงจรเกต ที่สมบูรณ์ เช่น ในกรณีมีข้อมูลที่จะต้องตัดสินใจ ก็จะต้องเป็นแบบ 'ไม่หรือใช่' จริงหรือเท็จ แต่จะห้ามในกรณี เช่น อาจจะน่าจะ คงจะ เป็นต้นเนื่องจากคำพวกนี้ ไม่สามารถกำหนดได้แน่นอนว่าจะทำอะไร ค่าของเหตุผลนี้จะมีเพียงสองค่าซึ่งอาจจะใช้ได้หลายอย่างเช่น เท็จ ,จริง / ปิด , เปิด / ต่ำ , สูง

เครื่องคอมพิวเตอร์ เครื่องคำนวณเลข และอุปกรณ์ทางดิจิทัลมากมายที่สามารถทำงานให้กับมนุษย์ได้อย่างน่าอัศจรรย์นั้น ล้วนประกอบขึ้นจากอุปกรณ์และวงจรทางดิจิทัล ที่มีการทำงานในลักษณะของลอจิกและวงจรดิจิทัลนั้น จะมีส่วนประกอบพื้นฐาน คือ ลอจิกเกต (Logic gate) ซึ่งจะมีการทำงานเหมือนระบบ เลขไบนารี(มีเลข 0 กับเลข 1) ดังนั้น บุคคลที่ต้องทำงานหรือเกี่ยวข้องกับระบบดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจและใช้งานได้อย่างถูกต้อง ของการทำงานแบบไบนารีของลอจิกเกต (logic gate) ในส่วนนี้จะศึกษาการทำงานของลอจิกเกตพื้นฐาน เช่น AND, OR, NOT, NOR และ NAND เพื่อเป็นพื้นฐานในการสร้างวงจรลอจิกที่ซับซ้อนต่อไป

## 2.4.2 ค่าคงที่ลอจิกและตัวแปรลอจิก

ค่าคงที่ลอจิกและตัวแปรลอจิก(logic constants and logic variables)

พีชคณิตทางลอจิก ใช้สำหรับหาข้อเท็จจริงต่างๆเกี่ยวกับการกระทำทางลอจิก ซึ่งจะแตกต่างกับพีชคณิตทั่วไป ตรงที่พีชคณิตทางลอจิกประกอบด้วยชุดของตัวคงที่และตัวแปรที่มีค่าได้เพียง 2 ค่าเท่านั้น คือ 0 และ 1 ตัวแปรนี้ จะเรียกว่า ตัวแปรลอจิก(Logic variables) อาจแทนด้วยตัวอักษร เช่น A, B, C, a, b, c,... ฯลฯ

สำหรับค่าของตัวแปรลอจิกที่มีค่าเป็น 0 หรือ 1 ที่เวลาต่างๆกัน เราเรียกว่า ระดับลอจิก (logic level) ดังนั้น ค่าระดับแรงดันไฟฟ้าของวงจรดิจิทัลที่ขั้วอินพุตและเอาต์พุตของวงจร เราสามารถแทนได้ด้วยระดับลอจิก เช่น ระดับแรงดัน จาก 2-5 โวลต์ ให้มีค่าเป็นลอจิก 1 ดังนั้น ค่าแรงดันในวงจรดิจิทัลจะมีระดับลอจิกเป็น 0 หรือ 1 ก็ขึ้นอยู่กับค่าจริงของการทำงานของวงจร

## 2.4.3 เกตที่เป็นปฏิบัติการพื้นฐานของพีชคณิตบูลีน

เกตที่เป็นปฏิบัติการพื้นฐานของพีชคณิตบูลีนเราสามารถนำมากระทำกันด้วยตัวกระทำทางลอจิกพื้นฐาน มี 3 แบบ คือ

1. การคูณทางลอจิก เรียกว่า การคูณแบบ AND หรือ การกระทำ AND มีสัญลักษณ์ คือ เครื่องหมายคูณแบบจุด (.)

2. การบวกทางลอจิก เรียกว่า การบวกแบบ OR หรือ การกระทำ OR มีสัญลักษณ์ คือ เครื่องหมายบวก (+)

3. การคอมพลิเมนต์ทางลอจิก หรือการกลับค่า เรียกว่า การกระทำ NOT มีสัญลักษณ์คือขีดบน (-)


#### 2.4.3.1 เกตแอนด์ (AND Gates)

ถ้ากำหนดให้ A และ B แทนตัวแปรอินพุตทั้งสอง ถ้าตัวแปร A มากระทำแบบ AND กับตัวแปร B ได้ผลลัพธ์ เป็น X ทำให้เขียนสมการลอจิก (ทางด้านเอาต์พุต x) ได้ดังนี้

$$X = AB \quad \dots\dots\dots(3)$$

จากสมการลอจิก เครื่องหมาย (.) ก็คือการคูณแบบ AND ซึ่งสามารถเขียนตารางความจริง และสัญลักษณ์ได้ดังรูปที่ 2.23

A	B	X = A . B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



รูปที่ 2.23 ตารางความจริงและสัญลักษณ์ของ AND Gate

เมื่อพิจารณาจากตารางความจริงจะเห็นว่าการคูณแบบ AND เหมือนกับการคูณทางพีชคณิตธรรมดา เมื่อใดก็ตามที่ A และ B เป็น 0 จะได้ผลคูณเป็น 0 แต่ถ้า A และ B เป็น 1 จะได้ผลคูณเป็น 1 ดังนั้น จากเหตุผลดังกล่าว เราสามารถสรุปได้ว่า การกระทำแบบ AND นั้น จะได้ผลคูณเป็น 1 ก็ต่อเมื่ออินพุตทั้งหมดจะต้องเป็น 1 สำหรับกรณีอื่นๆนอกจากนี้ จะได้ผลลัพธ์เป็น 0 การทำงานของลอจิกเกตในแบบเกตแอนด์แบบ 2 อินพุต เมื่อเปรียบเทียบการทำงานในลักษณะสวิตช์โดยให้สวิตช์ที่หนึ่งเป็น A สวิตช์ที่สองเป็น B ต่อวงจรแบบอนุกรมมีแหล่งจ่ายไฟไปยังหลอดไฟที่เป็น X ก็จะพบว่า เมื่อสวิตช์ทั้ง A และ B อยู่ที่ 0 สถานะของหลอดไฟก็จะดับ เพราะไฟฟ้าไม่ครบวงจร แต่เมื่อสับสวิต A หรือ ตัวใดตัวหนึ่งจาก 0 ไปยัง 1 ไฟฟ้าก็จะยังไม่ครบวงจร หลอดไฟก็จะยังดับคือเป็น 0 การต่อวงจรแบบเกตแอนด์จะต้องให้สถานะของ A และ B เป็น 1 ทั้งคู่

หลอดไฟ X จึงจะ ติดได้ คือ มีสถานะเป็น 1 เปรียบเทียบ ได้จากสมการบูลีนของเกตแอนด์และ ตารางความจริง


#### 2.4.3.2 เกตออร์ (OR Gates)

กำหนดให้ A และ B แทนตัวแปรอินพุตทั้งสอง ถ้าตัวแปร A มากระทำ แบบ OR กัน กับตัวแปร B ได้ผลลัพธ์เป็น X ทำให้สามารถเขียนสมการลอจิก(ทางเอาต์พุต) ได้ ดังนี้

$$X = A + B \quad \text{.....(4)}$$

จากสมการลอจิก เครื่องหมาย + ไม่ใช้เป็นการบวกเลขแบบธรรมดา แต่จะเป็นการบวก แบบ OR ซึ่งสามารถเขียนเป็นกฎเกณฑ์ ได้ตามตารางความจริง

A	B	X = A + B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



รูปที่ 2.24 ตารางความจริงและสัญลักษณ์ของ OR Gate

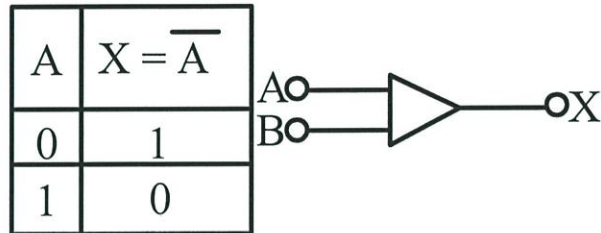
เมื่อพิจารณาจากตารางความจริง จะเห็นว่าการบวกแบบ OR เมื่อใดก็ตามที่ A และ B เป็น 0 จะได้ผลบวกเป็น 0 แต่ถ้า A หรือ B เป็น 1 จะได้ผลบวกเป็น 1 ดังนั้นจากเหตุผลดังกล่าว เราสามารถสรุปได้ว่า การกระทำแบบ OR นั้น จะได้ผลบวกเป็น 0 ก็ต่อเมื่อ อินพุตทั้งหมดจะต้องเป็น 0 สำหรับการณอื่นๆ นอกจากนี้ จะได้ผลลัพธ์เป็น 1 การทำงานของลอจิกเกตในแบบเกตออร์ 2 อินพุต เมื่อเปรียบเทียบการทำงานในลักษณะสวิตช์ โดยให้สวิตช์ที่หนึ่งเป็น A สวิตช์ที่สองเป็น B ต่อวงจรแบบขนานมีแหล่งจ่ายไฟไปยังหลอดไฟที่เป็น X ก็จะพบว่า เมื่อสวิตช์ทั้ง A และ B อยู่ที่ 0 สถานะของหลอดไฟก็จะดับเพราะไฟไม่ครบวงจร แต่เมื่อสับสวิตช์ A จาก 0 ไปยัง 1 ไฟฟ้าก็จะครบวงจร ทำให้หลอดไฟ X ติดได้ คือ มีสถานะเป็น 1

#### 2.4.3.3 NOT GATES

ตัวกระทำ NOT ไม่เหมือนตัวกระทำ OR และ AND ตรงที่ตัวกระทำ NOT ใช้กับตัวแปรอินพุตเดียว เช่น ถ้าให้ A แทนตัวแปรที่ป้อนอินพุต ของตัวกระทำ NOT และได้ผลลัพธ์เป็น X ทำให้เขียนสมการลอจิก (ทางเอาต์พุต X) ได้ดังนี้

$$X = \bar{A} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ซึ่งสัญลักษณ์ขีด (bar) บนตัว A จะแทนการกระทำ NOT สมการ  $X = \bar{A}$  อ่านว่า "X" เท่ากับ NOT A หรือ "X" เท่ากับส่วนกลับของ A หรือ "X" เท่ากับคอมพละเมนต์ของ A หรือ "X" เท่ากับ A bar



รูปที่ 2.25 ตารางความจริงและสัญลักษณ์ของ NOT Gate

จากตารางความจริง จะเห็นได้ว่าลอจิกทางอินพุต ของ  $X = \bar{A}$  จะมีค่าตรงข้ามกับลอจิกทางอินพุตของ A เช่น

ถ้า  $A = 0$ ,  $X =$  เพราะ NOT 0 คือ 1

ถ้า  $A = 1$ ,  $X =$  เพราะ NOT 1 คือ 0

สัญลักษณ์ของตัวกระทำ NOT (NOT Gate) หรืออินเวอร์เตอร์ (Inverter) ซึ่งจะมีอินพุตเพียงอันเดียว และค่าระดับลอจิกทางเอาต์ พูตจะตรงกันข้ามกับค่าระดับลอจิกทางด้านอินพุตเสมอ

## 2.5 สายพาน

### 2.5.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสายพานส่งกำลัง

การส่งกำลังทางกลจากเพลานึงไปยังเพลานี้อีกอันหนึ่งอาจทำได้สามวิธี คือ โดยใช้เฟือง ใช้สายพาน และใช้โซ่ การส่งกำลังโดยสายพานเป็นการส่งกำลังแบบอ่อนตัวได้ (Flexible) ซึ่งมีข้อดีและข้อเสียหลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับ การส่งกำลังโดยใช้เฟืองและโซ่ ข้อดี คือ มีราคาถูกและใช้งานง่าย รับแรงกระตุกและการสั่นสะเทือนได้ดี ขณะใช้งานไม่มีเสียงดัง เหมาะสำหรับการส่งกำลังระหว่างเพลที่อยู่ห่างกันมากๆ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ อย่างไรก็ตาม การครีฟของสายพานและต้องมีการปรับระยะห่างระหว่างเพลหรือปรับแรงตึงในสายพานระหว่างการใช้งาน นอกจากนี้ยังไม่อาจใช้งานที่มีอัตราทดสูงมากได้ ซึ่งมักใช้กับอัตราทดไม่เกิน

## 2.5.2 ชนิดและวัสดุของสายพาน

สายพานแบ่งออกเป็นสี่ชนิดตามลักษณะหน้าตัดของสายพาน คือ สายพานแบน (Flat Belts) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า สายพานลิ้ม (V-belts) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู สายพานกลม (Ropes) มีหน้าตัดเป็นรูปวงกลมและสายพานไทม์มิ่ง (Timing Belt) มีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู แต่จะทำเป็นร่องคล้ายฟันเพื่อลดความยาวของสายพาน สายพานแต่ละชนิดจะมีลักษณะในการใช้งานต่างกัน

วัสดุที่ใช้ทำสายพานซึ่งใช้งานกันมากก็คือหนัง (Oak-tanned Leather) แต่ถ้าเป็นการใช้งานพิเศษ เช่น อยู่ในบรรยากาศที่มีความชื้นสูง มีไอของสารเคมี หรือมีน้ำมันอยู่ด้วยก็มักใช้สายพานแบบ Chrome Leather เพื่อให้สายพานมีอายุการใช้งานได้นานพอสมควร จึงมักให้ค่าความเค้นในการออกแบบสายพานต่ำกว่าความต้านแรงดึงสูงสุดของสายพานมากๆ โดยทั่วไปจะใช้ค่าความปลอดภัยประมาณ 10 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของสายพานหนังจะมีค่าประมาณ 0.40 – 0.50 และความเร็วใช้งานของสายพานควรจะอยู่ในช่วง 1,000 – 2,000 m/min

สายพานอีกชนิดหนึ่งคือสายพานยาง (Rubber Belts) สายพานประเภทนี้จะมีฝ้ายหรือผ้าใบเป็นไส้ภายในและมียางหุ้มอยู่ภายนอก ยางที่ใช้หุ้มจะเป็นยางที่อบด้วยกำมะถันในอุณหภูมิสูง (Vulcanized) เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและความต้านแรง สายพานยางเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีน้ำมันหรือแสงแดด เมื่อเปรียบเทียบกับสายพานหนังแล้วสายพานยางจะมีราคาถูกกว่าแต่อายุใช้งานสั้นกว่าสายพานยางทนต่อสภาพบรรยากาศในการใช้งานได้ดีกว่าสายพานหนัง ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของสายพานยางจะมีค่าประมาณ 0.30 – 0.40 และสามารถรับแรงดึงได้ประมาณ 20 N ต่อชั้น ต่อความกว้างสายพาน 1 mm.

สายพานทุกชนิดที่กล่าวมานี้จะยึดตัวได้ดี ดังนั้นเมื่ออยู่ภายใต้แรงดึงจะยึดตัวทำให้เกิดการสลีปบนล้อสายพาน (Pulley) ในทางปฏิบัติจึงมักจะยึดสายพานให้ตึงไว้ก่อนใช้งานทั้งนี้เพื่อเป็นการลดการสลีปของสายพาน

## 2.5.3 การครีฟและการสลีปของสายพาน

ความแตกต่างระหว่างการครีฟและการสลีปของสายพานจะเห็นได้อย่างชัดเจนโดยการพิจารณาการขับเคลื่อนด้วยสายพาน เมื่อสายพานส่วนหนึ่งเคลื่อนที่เข้าหาล้อขับ สายพานจะเคลื่อนที่ไปตามส่วนโค้งสัมผัสบนล้อสายพานด้วยความเร็วที่เท่ากับความเร็วขอบของล้อสายพาน (ถ้าแรงดึง

ในสายพานมากเพียงพอที่จะเอาชนะแรงภายนอกได้) เมื่อสายพานส่วนนี้ไถลจะออกจาก ล้อสายพาน แรงดึงในสายพานจะลดลงเท่ากับแรงดึงในด้านหย่อนเป็นผลให้สายพานหดสั้นลง ในทำนองเดียวกันสายพานที่เคลื่อนที่ตามออกไปก็จะหดสั้นลงด้วย ดังนั้นความเร็วจริงของ สายพานที่เคลื่อนที่ออกจากล้อขับจะมีค่าน้อยกว่าความเร็วขณะเข้าสู่ล้อสายพาน ในทำนอง เดียวกันความเร็วความเร็วของสายพานจะเพิ่มขึ้นในช่วงส่วนโค้งสัมผัสของล้อตามเมื่อแรงดึงใน สายพานเพิ่มขึ้นเท่ากับแรงดึงในด้านตึงและสายพานที่เคลื่อนที่ตามออกมาก็จะยึดตัวจนมีความยาว เท่าเดิม ปรากฏการณ์ที่สายพานเปลี่ยนความเร็วเป็นความเร็วที่ช้าลงบนล้อขับและเพิ่มความเร็วบน ล้อตาม เรียกว่า การครีพ (Creep)

เมื่อแรงภายนอกเพิ่มขึ้นโดยไม่เพิ่มแรงดึงขั้นต้นในสายพาน สายพานทุกส่วนจะเกิดการ เปลี่ยนแปลงแรงดึงในตัวสายพานเมื่อเริ่มเข้าสู่โค้งสัมผัส ถ้าแรงภายนอกมากเพียงพอส่วนโค้งที่ เกิดการครีพอาจจะเท่ากับส่วนโค้งสัมผัส ดังนั้นจึงเกิดการสลลิป (Slip) ขึ้น การสลลิปอาจเกิดขึ้นบน ล้อสายพานเพียงล้อเดียว ส่วนการครีพจำเป็นจะต้องเกิดขึ้นเท่ากับบนล้อสายพานทั้งสองล้อ

การออกแบบการขับด้วยสายพานที่ดี เมื่อทำงานในสภาวะปกติไม่ควรมีการสลลิปแต่ การครีพจะเกิดขึ้นเสมอไม่ว่าจะเป็นสายพานชนิดใด การเกิดครีพและสลลิปทำให้ต้องสูญเสียกำลัง งานและความเร็ว แต่การสูญเสียที่เกิดจากการครีพมีค่าน้อยมาก การสลลิปอาจทำให้เกิดความร้อน มากเพียงพอที่จะทำให้ผิวหน้าของสายพานเสียหายได้ ดังนั้นจึงควรระมัดระวังไม่ให้เกิดการสลลิป ด้วยวิธีการดึงสายพานให้ตึงเพียงพอก่อนการใช้งานเพื่อกำจัดการสลลิป

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานศึกษาวิจัยเรื่องเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง มีขั้นตอนดังนี้ คือ การศึกษาเครื่องกระตุ้นการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง การออกแบบอุปกรณ์และวงจรของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง การออกแบบลายปริ้นต์ การออกแบบโปรแกรม(เขียน โค้ด โปรแกรม)ควบคุมการทำงานของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง และการทดสอบและวิเคราะห์เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 การศึกษาเครื่องกระตุ้นการทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

หลักการทำงานมีขั้นตอนดังนี้

-ขั้นตอนที่ 1 ความร้อนจากรางพาราโบลิกจะแผ่ความร้อนให้กับเทอร์โมคัปเปิล

-ขั้นตอนที่ 2 เทอร์โมคัปเปิลจะสร้างลอจิก 1 ให้กับอินพุตของ PIC16F627A ที่ Port RB3

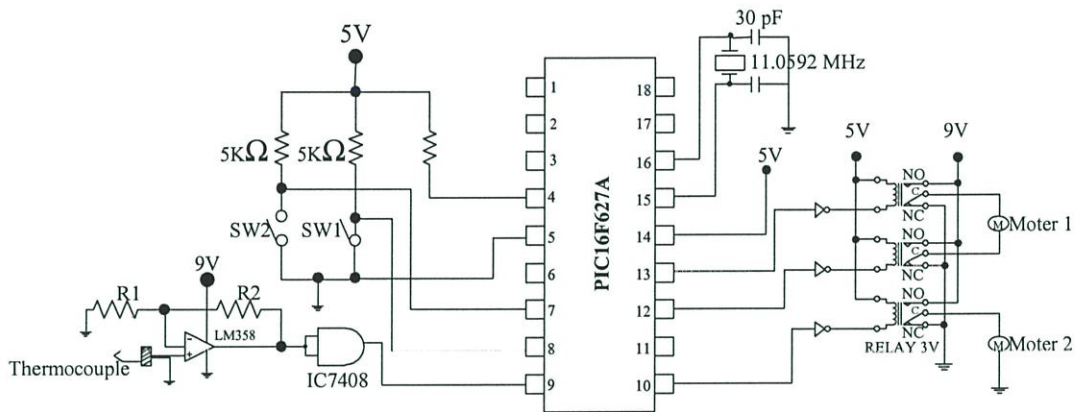
-ขั้นตอนที่ 3 PIC16F627A จะส่งคำสั่งให้มอเตอร์ตัวแรกหมุนผ่าน Port RB6 และ Port RB7 ซึ่งในขั้นตอนนี้มอเตอร์ตัวแรกจะหมุนเพื่อขยับให้มอเตอร์ตัวที่สองเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

-ขั้นตอนที่ 4 เมื่อมอเตอร์ตัวที่สองเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับไมโครสวิตช์ตัวที่หนึ่ง จะทำให้มอเตอร์ตัวที่หนึ่งหยุดหมุน และในขณะเดียวกันมอเตอร์ตัวที่สองก็จะหมุนแล้วไปกระตุ้นให้ล้อเกียร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงาน ซึ่งมอเตอร์ตัวที่สองนี้จะมีการหน่วงเวลาประมาณ 3 วินาที จากนั้นมอเตอร์ตัวที่หนึ่งจะทำงานอีกครั้งแต่จะทำงานในทางตรงกันข้ามคือ จะหมุนกลับเพื่อพามอเตอร์ตัวที่สองกลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้นอีกครั้ง

-ขั้นตอนที่ 5 ในขณะที่ยังมีมอเตอร์ตัวแรกหมุนกลับนั้น ก็จะมีไมโครสวิตช์ตัวที่สองคอยเช็คว่ากลับมาถึงจุดเริ่มต้นหรือยัง เมื่อมอเตอร์ตัวแรกกลับจุดเริ่มต้นก็จะสัมผัสกับไมโครสวิตช์ตัวที่สองและจะส่งผลให้มอเตอร์ตัวที่หนึ่งและสองหยุดหมุนทันที จากนั้นมอเตอร์ตัวแรกและตัวที่สองจะอยู่ในสถานะเตรียมพร้อมอีกครั้ง

### 3.2 วงจรเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและการออกแบบอุปกรณ์

การออกแบบวงจรรวมของเครื่องกระตุ้นสามารถออกแบบได้ดังรูปที่ 3.1



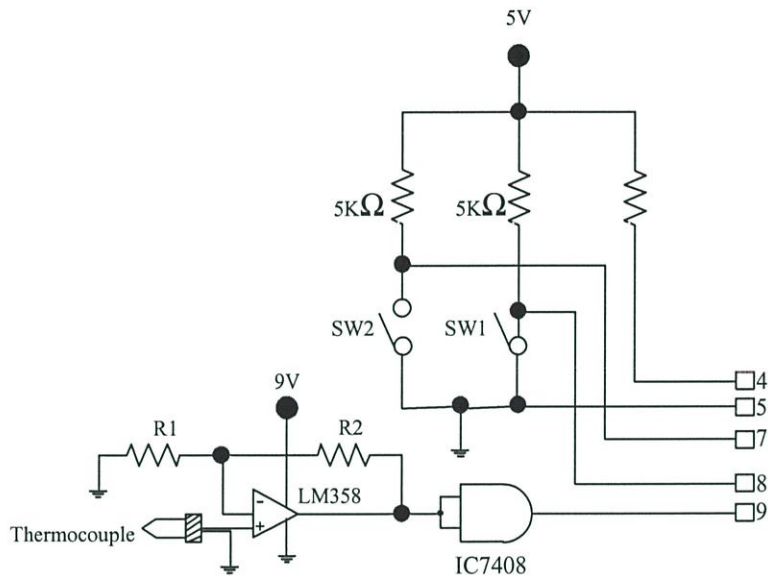
รูปที่ 3.1 วงจรของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของสเตอร์ลิง

#### อธิบายการทำงานของระบบ

การออกแบบเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F627A เป็นตัวอุปกรณ์ในการออกแบบและสร้างวงจรควบคุมในการทำงาน ซึ่งจะมีส่วนสำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นส่วนของอินพุต พอร์ต RB1 , RB2 และ RB3 โดยพอร์ต RB3 รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล Type K ที่มีช่วงในการวัดอุณหภูมิ -270 ถึง 1300 องศาเซลเซียส เป็นตัวตรวจวัดความร้อนในการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงที่มีช่วงในการเริ่มทำงานประมาณ 300 องศาเซลเซียส และเทอร์โมคัปเปิลจะมีแรงดัน 11.5 mV ซึ่งจะต้องมีวงจรขยายแรงดันโดยใช้ Op-Amp ที่มีใน IC 358 คอเป็นวงจร Non-Inverting Amp ที่มีเกณฑ์การขยาย 221 เท่า และมีการปรับรูปสัญญาณให้มีการแสดงสถานะ LOW กับ HIGH ให้ดีขึ้น จึงมีการนำ AND Gate ซึ่งเป็น IC ดิจิตอลที่มีการแสดงสถานะเอาต์พุต LOW กับ HIGH ส่วนพอร์ต RB1 และ RB2 จะรับสัญญาณจากไมโครสวิตช์ตัวที่ 1 และ 2 ที่มีหน้าที่ตรวจสอบการเคลื่อนที่ไปและกลับของมอเตอร์ตัวที่สองจากสถานะเริ่มต้นของเครื่องกระตุ้นและจุดที่ล้อกระตุ้นเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับล้อเกียร์ของคลีแนยน์สเตอร์ลิงพอดี ส่วนที่สองเป็นการออกแบบเอาต์พุต พอร์ต RB4, RB6 และ RB7 โดยพอร์ต RB6 และ RB7 จะทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ไปและกลับของมอเตอร์ตัวที่หนึ่งที่มีการเชื่อมต่อไว้กับสายพานและมอเตอร์ตัวที่สอง ส่วนพอร์ต RB4 จะทำหน้าที่ควบคุมเมอร์ตัวที่สองในการหมุนกระตุ้นล้อเกียร์เครื่องยนต์สเตอร์ลิง

### 3.2.1 การออกแบบและการประกอบในส่วนของอินพุต

อินพุตของวงจรในขณะนี้ยังใช้เป็นสวิตช์เพื่อ Start เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของสเตอร์ลิง ซึ่งจะมีการพัฒนาโดยเปลี่ยนจากสวิตช์กดคิดปัลลอยด์ให้เป็นเทอร์โมคัปเปิลและผ่านวงจรขยายและส่งสัญญาณที่ได้ให้กับระบบควบคุมเพื่อให้เครื่องกระตุ้นเริ่มทำงาน

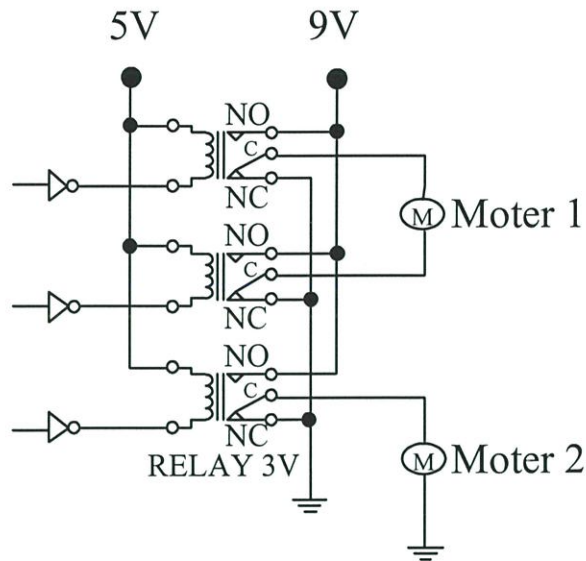


รูปที่ 3.2 วงจรในส่วนของอินพุต

### 3.2.2 การออกแบบและการประกอบในส่วนของเอาต์พุต

การออกแบบของส่วนเอาต์พุตนั้นทำได้โดยนำสัญญาณของพอร์ตเอาต์พุตแต่ละพอร์ต มาขยายกระแสด้วยไอซีทรานซิสเตอร์เบอร์ C9013 โดยมีการต่อเอาต์พุตที่ออกมาจาก PIC เข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ ส่วนขาคอลเล็กเตอร์จะต่อกราวด์ 5V โดยผ่านตัวต้านทาน 500Ω และขาอิมิตเตอร์จะต่อลงกราวด์โดยผ่านตัวต้านทาน 50Ω เช่นกัน

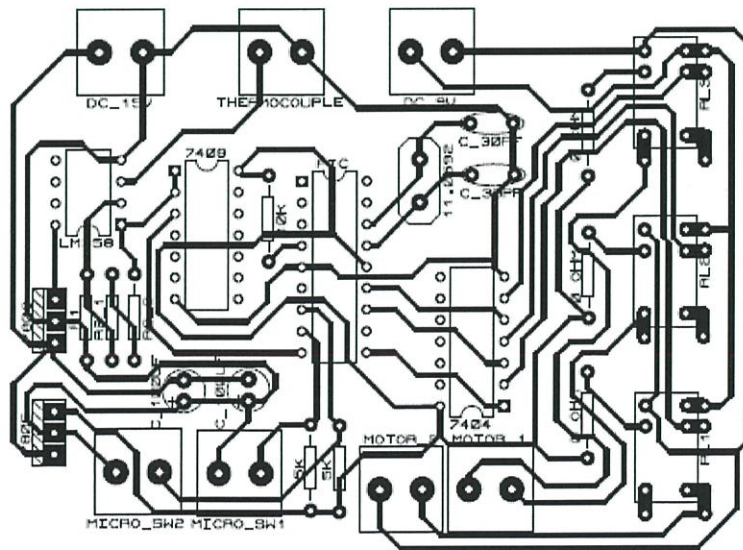
เมื่อขยายกระแสผ่านทรานซิสเตอร์เรียบร้อยแล้วนั้น ก็จะใช้กระแสและแรงดันที่ได้จากขาคอลเล็กเตอร์มาใช้ในการควบคุมการสวิตช์ของ Relay โดยต่อเข้ากับขาของ Coil ของ Relay และผ่านลงกราวด์ ส่วนขาของ NO จะต่อเข้ากับแรงดัน 5V ส่วนขาของ NC จะต่อเข้ากับกราวด์ โดยมีขา COM ของ Relay เป็นส่วนที่ใช้ในการควบคุม การเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ซึ่ง Relay ตัวที่ 1 และ Relay ตัวที่ 2 จะทำการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ตัวที่ 1 ในทิศทางไปและกลับ ส่วน Relay ตัวที่ 2 จะควบคุมการทำงานของมอเตอร์ตัวที่สองในทิศทางเดียวคือจะหมุนเพื่อให้การกระตุ้นกับล้อเกียร์ของสเตอร์ลิงเท่านั้น โดยมีการต่อวงจรดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 วงจรในส่วนของเอาต์พุต

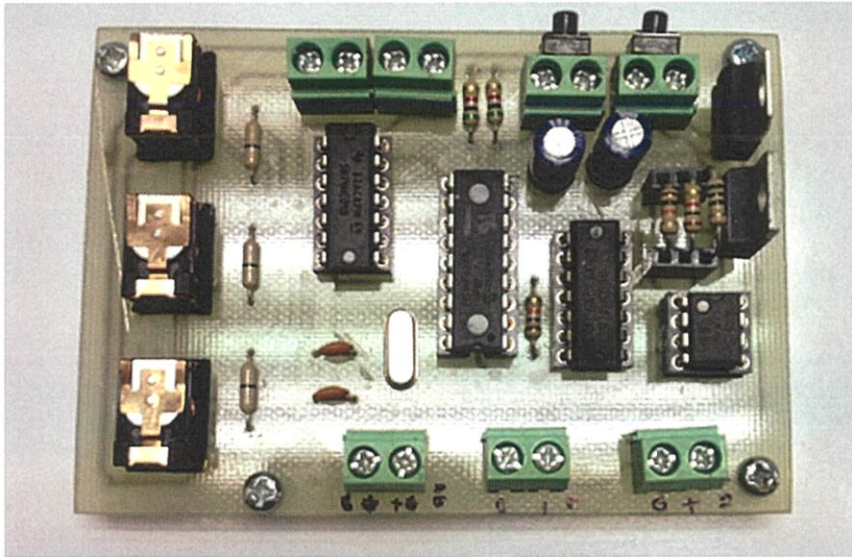
### 3.3 การออกแบบลายปริ้นต์

ทำการออกแบบลายปริ้นต์ที่จะใช้กับเครื่องกระตุ้น โดยใช้โปรแกรม Proteus8 โดยทำการเลือกอุปกรณ์ที่จะใช้งานทั้งหมดจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ต่างให้มีความเหมาะสมและมีพื้นที่ของแผ่นปริ้นต์ขนาดเล็กที่สุดเพื่อไม่ให้เครื่องนั้นมีขนาดใหญ่จนเกินไป แล้วทำการลากเส้นลายวงจรให้ทุกอุปกรณ์เชื่อมต่อกันตามวงจรที่ได้ออกแบบไว้รวมทั้งเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายเพื่อให้วงจรนั้นสามารถทำงานได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลายปริ้นของวงจรที่ใช้กับเครื่องกระตุ้นการเริ่มการทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

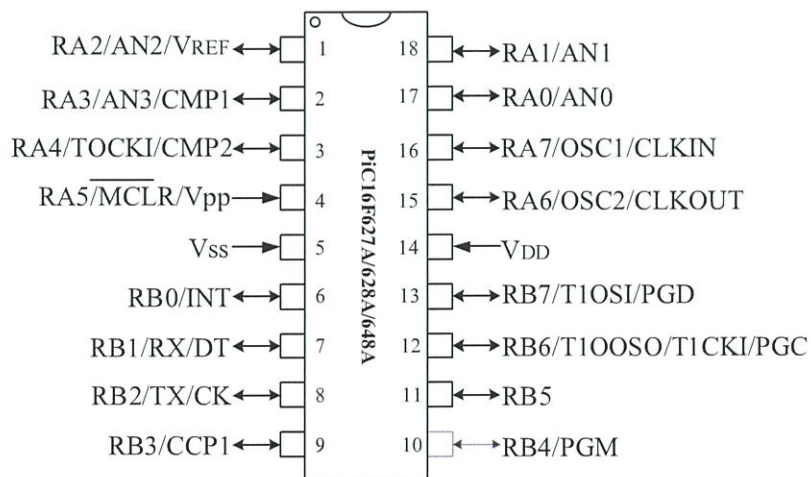
เมื่อทำการกัดลายปริ๊นต์ตามที่ได้ออกแบบไว้แล้วก็ทำการวางอุปกรณ์ต่างลงบนแผ่นปริ๊นต์  
 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผ่นลายปริ๊นต์ที่วางอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วพร้อมใช้งาน

### 3.4 การออกแบบโปรแกรม(เขียนโค้ดโปรแกรม)ควบคุมการทำงานของเครื่องกระตุ้นการ เริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ในส่วนของการควบคุมนี้จะใช้ PIC16F627A เพราะว่า PIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มี  
 ฟังก์ชันมากมายอยู่ในชิปตัวเดียว ซึ่งสามารถเรียกใช้ฟังก์ชันต่างๆ โดยการเขียนคำสั่งด้วยภาษา C  
 เพื่อให้ทำตามที่ต้องการได้



รูปที่ 3.6 หน้าที่ขาต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F627A

โดยโปรแกรมที่ใช้โปรแกรมลงในไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น จะมีคำสั่งต่างๆ ดังนี้

```

////////////////////////////////////////////////////////////////
////////////////////////////////////////////////////////////////

```

```
#define moter1_l PORTB.F7
```

```
#define moter1_r PORTB.F6
```

```
#define moter2_l PORTB.F5
```

```
#define moter2_r PORTB.F4
```

```
#define sw_01 PORTB.F3
```

```
#define m_sw1 PORTB.F1
```

```
#define m_sw2 PORTB.F2
```

```
int x,y;
```

```
void moter(void);
```

```
void main ()
```

```
{
```

```
    TRISB = 0X0F ;
```

```
while(1)
```

```
{  
  
    if(sw_01==0)  
  
        {  
  
            Moter1_l = 0;  
  
            Moter1_r = 0;  
  
            Moter2_l = 0;  
  
            Moter2_r = 0;  
  
        }  
  
    else  
  
        {  
  
            x = 1;  
  
            y = 1;  
  
            while(x)  
  
                {  
  
                    Moter1_l = 0;  
  
                    Moter1_r = 1;  
  
  
  
                    if(m_sw1==0)  
  
                        {
```

```
Moter1_l = 0;
```

```
Moter1_r = 0;
```

```
Moter2_l = 0;
```

```
Moter2_r = 1;
```

```
delay_ms(3000);
```

```
moter1_l = 1;
```

```
moter1_r = 0;
```

```
while(y)
```

```
{
```

```
    if(m_sw2==0)
```

```
    {
```

```
        Moter1_l = 0;
```

```
        Moter1_r = 0;
```

```
        Moter2_l = 0;
```

```
        Moter2_r = 0;
```

```
    }
```

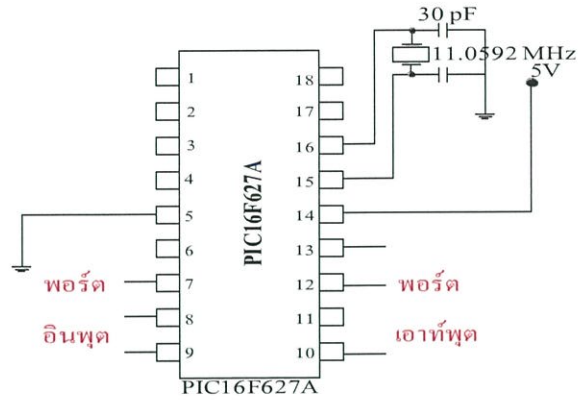
```
    if(sw_01==0)
```

```
    {
```

```
        x = 0;
```

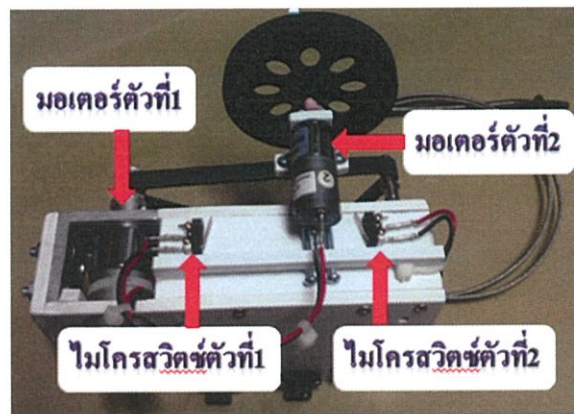


โดยสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพที่ 3.7

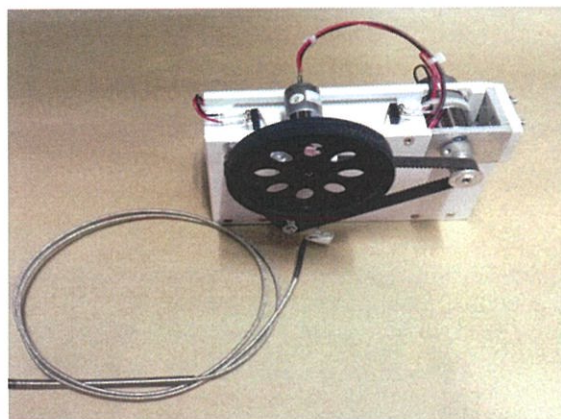


รูปที่ 3.7 วงจรในส่วนของระบบควบคุม

### 3.5 ภาพแสดงส่วนประกอบต่างๆของเครื่องกระตุ้นและสถานะก่อนการทำงาน



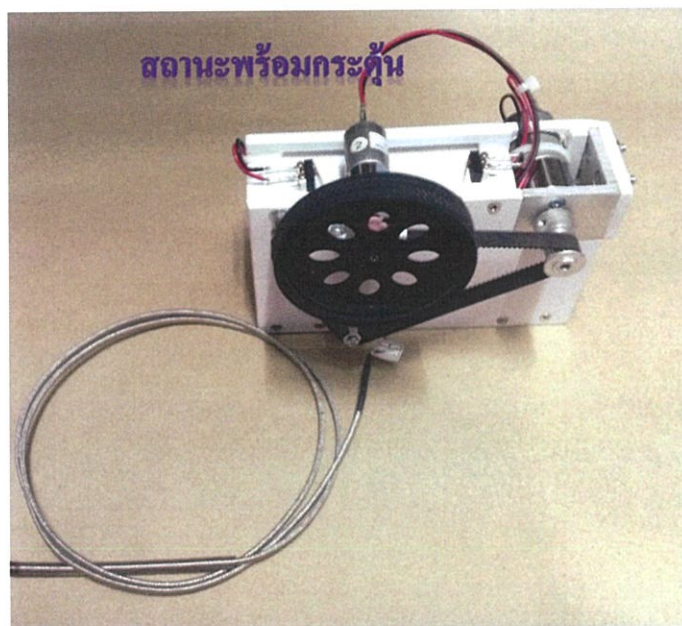
รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบของเครื่อง



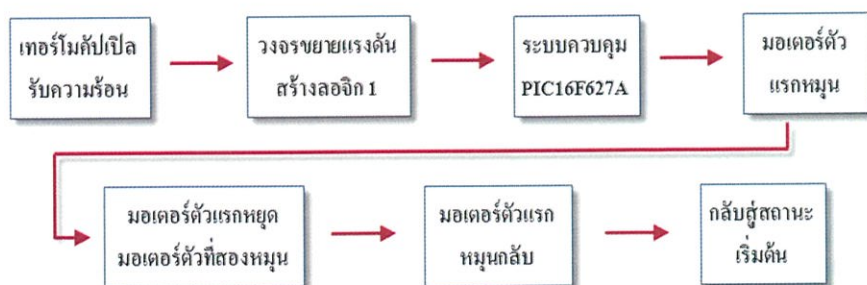
รูปที่ 3.9 ส่วนที่รับความร้อน(เทอร์โมคัปเปิล)



รูปที่ 3.10 สถานะเริ่มต้นของกระบวนการเริ่มทำงานให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง



รูปที่ 3.11 ตำแหน่งที่พร้อมจะกระตุ้นการเริ่มทำงานให้กับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง



รูปที่ 3.12 ไคอะแกรมของการทำงานตั้งแต่เริ่มต้นจนเสร็จสิ้นการทำงาน

### 3.6 การทดสอบและวิเคราะห์เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

ในการวิเคราะห์นี้จะทำการทดสอบโดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่หนึ่งทดสอบวงจรของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานเครื่องยนต์สเตอร์ลิง และตอนที่สองเป็นการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

## บทที่ 4

# ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดสอบและวิเคราะห์ผลของ โครงการการออกแบบเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของ เครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ตอน คือ ตอนที่เป็นการทดสอบและวิเคราะห์ วงจรที่ออกแบบสำหรับเครื่องกระตุ้นและตอนที่สองเป็นการทดสอบระบบควบคุม ดังจะกล่าวใน รายละเอียดต่อไปนี้

### 4.1 การทดสอบและวิเคราะห์วงจรของเครื่องกระตุ้น

อุปกรณ์การทดลอง

- 1.เทียนไข
- 2.ไฟแชค
- 3.นาฬิกาจับเวลา
- 4.Power Supply 9 V และ 16 V
- 5.กล่องกันลม(ควบคุมค่าพารามิเตอร์)
- 6.Digital Multi Meter 2 ตัว
- 7.LED 1 ตัว
- 8.เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง

วิธีการทดลอง

- 1.นำมัลติมิเตอร์ตัวที่ 1 ต่อเข้ากับเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิล เพื่อวัดค่าแรงดันเอาต์พุต เทียบกับกราฟด์โดยที่ค่าแรงดันจะมีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์
- 2.นำมัลติมิเตอร์ตัวที่ 2 ต่อเข้ากับขาที่ 6 ของ Op-Amp 358 เพื่อใช้ในการวัดค่าแรงที่ได้จาก วงจรขยายสัญญาณเทียบกราฟด์โดยแรงดันที่ได้จะมีหน่วยเป็น โวลต์
- 3.นำ LED ไปต่อเข้ากับขาที่ 3 ของ IC 7408 เพื่อใช้แสดงสถานะลอจิกของวงจรอินพุตใน การส่งสัญญาณให้กับวงจรควบคุม โดยเมื่อ LED สว่างจะแสดงสถานะลอจิก HIGH และเมื่อ LED ดับก็จะแสดงสถานะลอจิก LOW
- 4.นำแหล่งจ่ายไฟ 9 V และ 16 V ต่อเข้ากับเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์ สเตอร์ลิง
- 5.นำหัววัดอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลไปใส่ไว้ในกล่องกันลม

6. นำเทียนจำนวน 1 เล่ม ไปวางไว้ตรงหัววัดอุณหภูมิและจุดเทียนด้วยไฟแชคเพื่อเป็นแหล่งกำเนิดความร้อนให้กับระบบ

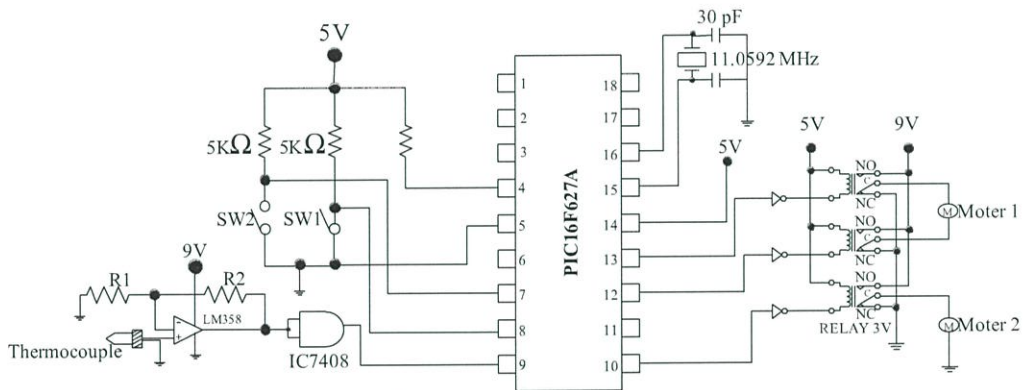
7. อ่านค่าแรงดันที่ได้จากเอาต์พุตเทอร์โมคัปเปิลในช่วง 2 mV , 4mV , 6mV ไปเรื่อยๆตามตารางที่ได้กำหนดไว้จนถึง 18mV

8. เมื่อแรงดันเอาต์พุตจากเทอร์โมคัปเปิลมีค่าแรงดันตามค่าที่กำหนด ให้อ่านค่าแล้วบันทึกผลลงตามตาราง

9. ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง แล้วนำค่าที่ได้จากผลการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย

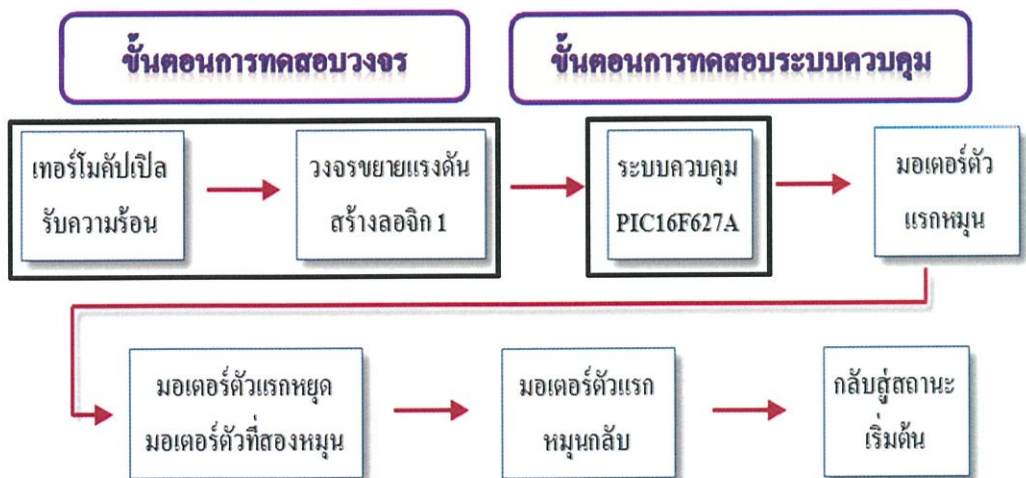
10. เปลี่ยนแหล่งพลังงานความร้อนจากเทียนไข 1 เล่มเป็น 2 เล่มเพื่อเพิ่มความร้อนให้มากขึ้นจากนั้นให้ทำผลการทดลองซ้ำจากข้อ 6 – 9

วงจรที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.1 วงจรของการทดลอง

ไคอะแกรมแสดงการทดสอบ



รูปที่ 4.2 ไคอะแกรมของการทำงานของระบบ

ตารางผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันอุณหภูมิและสถานะลอจิก

แรงดัน (thermocouple)	แรงดันจากวงจรขยาย(V)		อุณหภูมิจาก thermocouple	สถานะลอจิก
	คำนวณ (V)	ผลทดลอง		
2	0.442	0.4	49.473	LOW
4	0.884	0.8	97.643	LOW
6	1.326	1.2	146.565	LOW
8	1.768	1.6	196.521	LOW
10	2.21	2	246.221	LOW
10.5	2.321	2.2	258.504	LOW
11	2.431	2.3	270.772	LOW
11.5	2.541	2.4	282.878	HI
12	2.52	2.5	294.98	HI
13	2.873	2.7	319.048	HI
14	3.094	2.9	342.985	HI
15	3.315	3.1	366.83	HI
16	3.536	3.3	390.592	HI
17	3.757	3.4	412.264	HI
18	3.978	3.6	437.847	HI

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่า  $R_2$  ที่ใช้ในวงจร,  $t_{90} = 300^{\circ}C$

$$E = \sum_{i=0}^n C_i (t_{90})^i + \alpha_0 e^{\alpha_1 (t_{90} - 126.9686)^2} \dots\dots\dots(6)$$

$$\begin{aligned} E = & (-1.760\ 041\ 368\ 6 \times 10^1 \times 300^0) + (3.892\ 120\ 497\ 5 \times 10^1 \times 300^1) \sqrt{b^2 - 4ac} \\ & + (1.855\ 877\ 003\ 2 \times 10^{-2} \times 300^2) + (-9.945\ 759\ 287\ 4 \times 10^{-5} \times 300^3) \\ & + (3.184\ 094\ 571\ 9 \times 10^{-7} \times 300^4) + (-5.607\ 284\ 488\ 9 \times 10^{-10} \times 300^5) \\ & + (5.607\ 505\ 905\ 9 \times 10^{-13} \times 300^6) + (-3.202\ 072\ 000\ 3 \times 10^{-16} \times 300^7) \\ & + (9.715\ 114\ 715\ 2 \times 10^{-20} \times 300^8) + (-1.210\ 472\ 127\ 5 \times 10^{-23} \times 300^9) \\ & + (1.185\ 976 \times 10^2 \times e^{-1.183\ 432 \times 10^{-4} (320 - 126.9686)^2}) \end{aligned}$$

$$E = 12206.5776 \mu V$$

แทนค่าลงในสมการเพื่อหาค่า  $R_2$ ,  $E = V_m$

$$V_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_m$$

$$2.5 = \frac{50\Omega + R_2}{50\Omega} \times 12206.5776 \mu V$$

$$R_2 = 10.190 k\Omega$$

$$R_2 \approx 11 k\Omega$$

สูตรที่ใช้ในการคำนวณหาแรงดันจากวงจรขยาย

$$V_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_m \quad \dots\dots\dots(7)$$

แทนค่าลงในสมการ(ยกตัวอย่างการคำนวณ),  $R_2 = 50\Omega$

$$V_0 = \frac{50\Omega \times 11k\Omega}{50\Omega} \times 2mV$$

$$= 0.442 V$$

สูตรการคำนวณหาอุณหภูมิ,  $E = 12 mV$

$$t_{90} = C_0 + C_1 E + C_2 E^2 + \dots C_i E^i \quad \dots\dots\dots(8)$$

แทนค่าลงในสมการ(ยกตัวอย่างการคำนวณ)

$$\begin{aligned} t_{90} = & 0.000 + (2.508\ 355 \times 10^{-2} \times 12000^1) + (7.860\ 106 \times 10^{-8} \times 12000^2) \\ & + (-2.503\ 131 \times 10^{-10} \times 12000^3) + (8.315\ 270 \times 10^{-14} \times 12000^4) \\ & + (-1.228\ 034 \times 10^{-17} \times 12000^5) + (9.804\ 036 \times 10^{-22} \times 12000^6) \\ & + (-4.413\ 030 \times 10^{-26} \times 12000^7) + (1.057\ 734 \times 10^{-30} \times 12000^8) \\ & + (-1.052\ 755 \times 10^{-35} \times 12000^9) \end{aligned}$$

$$t_{90} = 294.98\ ^\circ C$$

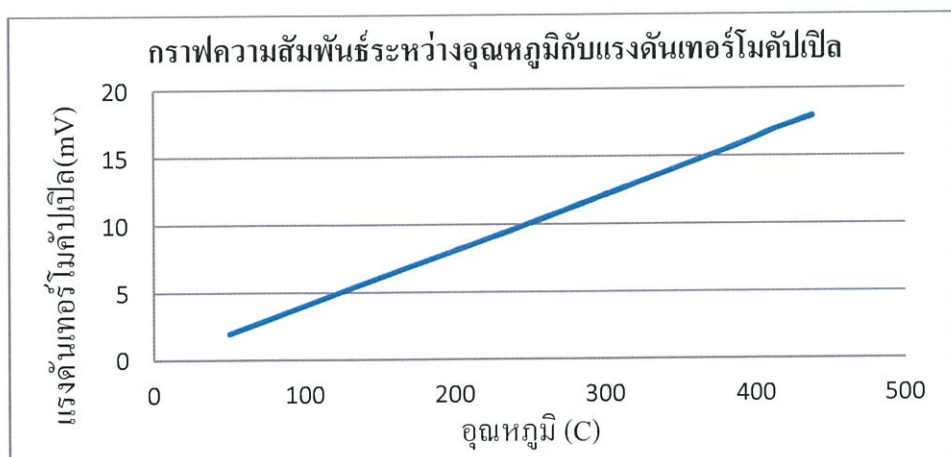
ตารางที่ 4.2 เวลาขาขึ้นที่ล่อจิกเริ่มทำงานจากความร้อนจากเทียนไข 1 เล่ม และ 2 เล่ม

แรงดัน (thermocouple) (mV)	ความร้อนจากเทียน 1 เล่ม			ความร้อนจากเทียน 2 เล่ม		
	ครั้งที่ 1 (S)	ครั้งที่ 2 (S)	เวลาเฉลี่ย (S)	ครั้งที่ 1 (S)	ครั้งที่ 2 (S)	เวลาเฉลี่ย (S)
2	4.24	4.28	4.260	3.21	4.97	4.09
4	8.98	9.24	9.110	6.66	10.59	8.625
6	13.85	14.37	14.110	10.22	15.36	12.79
8	19.18	20.15	19.665	13.59	20.29	16.94
10	25.30	26.84	26.070	17.2	24.92	21.06
10.5	26.97	29.43	28.200	18.12	26.2	22.16
11	29.07	31.40	30.235	19.06	27.51	23.285
11.5	30.96	33.56	32.260	20.33	28.53	24.43
12	33.34	35.76	34.550	21.35	29.96	25.655
13	38.75	41.00	39.875	23.74	32.89	28.315
14	46.09	47.96	47.025	26.35	36.75	31.55
15	55.83	58.26	57.045	28.73	40.65	34.69
16	69.77	78.35	74.060	32.09	45.59	38.84
17	88.96	102.49	95.725	35.97	51.05	43.51
18	123.10	156.64	139.870	40.09	57.42	48.755

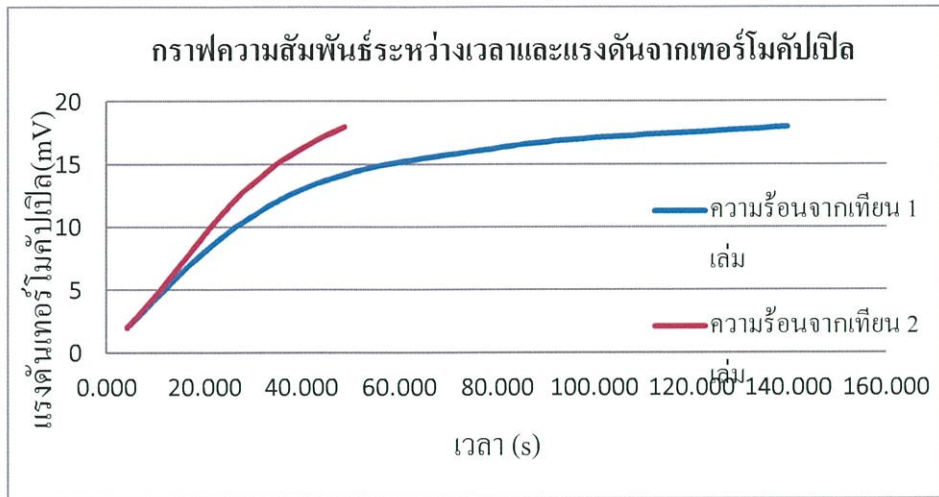
นำข้อมูลที่ได้อ่านเขียนกราฟแสดงผลเพื่อแสดงผลให้เห็นในรูปที่ชัดเจนและสามารถเปรียบเทียบค่าของผลการทดลองได้อย่างชัดเจน โดยกราฟที่จะนำมาแสดงเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับแรงดันของเทอร์โมคัปเปิล และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและแรงดันจากเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งจะแยกเป็นกราฟเวลาขาขึ้นและเวลาขาลง

ตารางที่ 4.3 เวลาขาขึ้นที่ลจิกเริ่มทำงานจากความร้อนจากเทียนไข 1 เล่ม และ 2 เล่ม

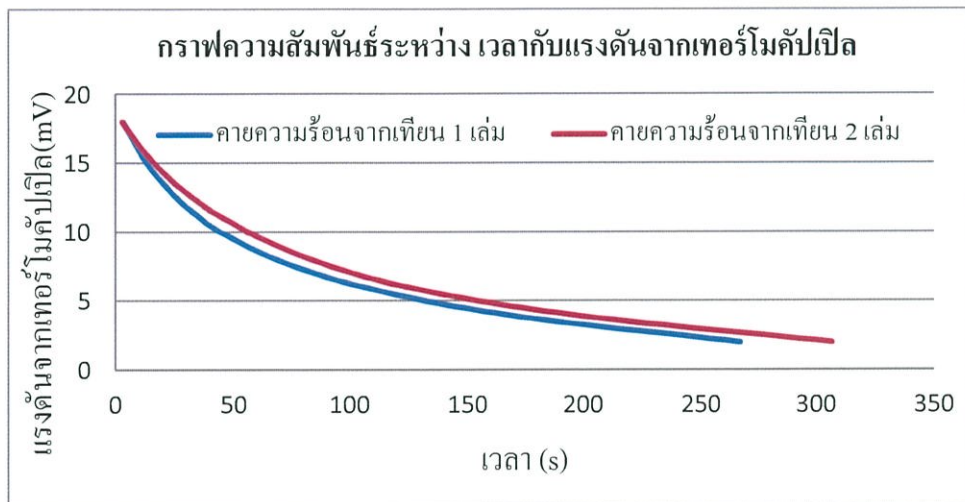
แรงดัน (thermocouple)  (mV)	ความร้อนจากเทียน 1 เล่ม			ความร้อนจากเทียน 2 เล่ม		
	ครั้งที่ 1 (S)	ครั้งที่ 2 (S)	เวลาเฉลี่ย (S)	ครั้งที่ 1 (S)	ครั้งที่ 2 (S)	เวลาเฉลี่ย (S)
18	3.88	2.58	3.23	2.94	2.92	2.93
17	7.27	5.67	6.47	6.19	7.63	6.91
16	10.39	9.08	9.735	10.01	12.48	11.245
15	14.12	12.60	13.36	14.38	18.47	16.425
14	18.49	17.19	17.84	19.27	24.90	22.085
13	23.4	22.47	22.935	25.13	32.19	28.66
12	28.86	28.56	28.71	32.01	41.02	36.515
11.5	32.52	31.97	32.245	36.03	45.31	40.67
11	36.4	35.69	36.045	40.57	50.68	45.625
10.5	39.81	39.55	39.68	45.47	56.21	50.84
10	44.93	43.92	44.425	50.21	61.78	55.995
8	69.51	68.08	68.795	76.22	91.19	83.705
6	107.69	104.88	106.285	115.24	133.16	124.2
4	169.14	163.97	166.555	186.92	200.97	193.945
2	263.33	270.24	266.785	304.81	308.10	306.455



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาด้วยแรงดันเทอร์โมคัปเปิล

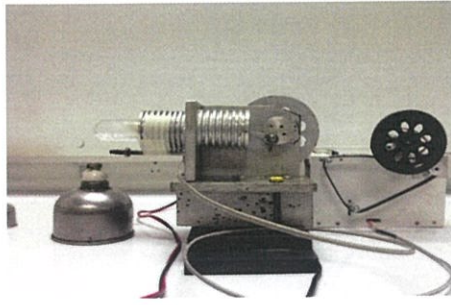


รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาด้วยแรงดันเทอร์โมคัปเปิล

## 4.2 ทดสอบระบบควบคุม

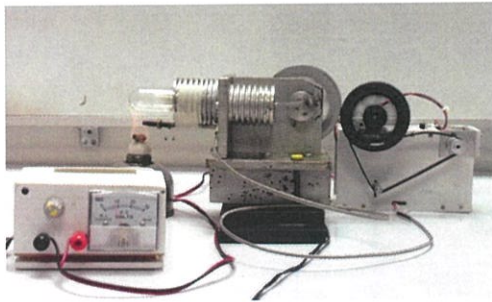
จากการวิเคราะห์ระบบควบคุมของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำให้พบว่าระบบมีการทำงานได้ตามต้องการตามที่ได้ทำการทดลองตามหัวข้อ 4.1 และในขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง โดยนำไปประกอบเข้ากับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ทดสอบเครื่องกระตุ้นว่ามีประสิทธิภาพและแรงบิดเพียงพอที่จะหมุนล้อเกียร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงได้หรือไม่ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

นำเครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงไปวางไว้ข้างด้านหลังของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง และนำเทอร์โมคัปเปิลของเครื่องกระตุ้นติดไว้ตรงกระบอกสูบ displacer เพื่อให้หัววัดเทอร์โมคัปเปิลได้รับความร้อนที่เท่ากันกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การจัดวางอุปกรณ์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพเครื่องกระตุ้น

ซึ่งจากผลการทดลองทดสอบการทำงานของเครื่องกระตุ้นให้ทำงานพร้อมกับเครื่องยนต์สเตอร์ลิง เพื่อทำหน้าที่กระตุ้นเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้ทำงานเมื่อได้รับความร้อนถึงองศาที่เครื่องยนต์สเตอร์ลิงพร้อมทำงาน พบว่า เครื่องกระตุ้นการเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะทำหน้าที่กระตุ้นล้อยักษ์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้ทำงานได้ตามสมมติฐานข้างต้น ดังภาพที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ประสิทธิภาพของเครื่องกระตุ้นที่ทำงานจริง

## บทที่ 5

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลองจากการทดสอบระบบและประสิทธิภาพของเครื่องกระตุ้น

จากผลการทดลองข้างต้นมีการทดสอบระบบแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบในส่วนของการเปลี่ยนสถานะที่ได้รับแรงดันมาจากส่วนของวงจรถยายและปรับรูปสัญญาณให้ดีขึ้นโดยใช้ AND Gate ในส่วนที่สองเป็นการเปรียบเทียบเวลาในการรับความร้อนที่อุณหภูมิต่างกัน และในส่วนที่สามเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกระตุ้นว่ามีแรงบิดเพียงพอที่สามารถขับให้ล้อเกียร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงให้เคลื่อนที่ได้

จากผลการทดลองในส่วนแรกพบว่าผลที่ได้เป็นไปตามที่ได้คำนวณไว้ โดยที่อุณหภูมิเริ่มทำงานของเครื่องยนต์สเตอร์ลิง คือ 300 องศาเซลเซียส และจากผลการทดลองที่ได้ พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นได้ประมาณ 300 องศาเซลเซียส สถานะลอจิกที่ได้รับจากวงจรถยายจะมีการเปลี่ยนสถานะจาก LOW เป็น HIGH ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้และจากผลการทดลองในส่วนที่สองพบว่าเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบแปรผันตรงกับความร้อนของแหล่งกำเนิดความร้อนที่ต่างกัน ซึ่งเวลาที่ได้จากผลการทดลอง สามารถนำไปใช้กับการเขียนโค้ดโปรแกรมเพื่อใช้ในการหน่วงเวลาในการเปลี่ยนสถานะลอจิกจาก LOW เป็น HIGH และ HIGH เป็น LOW เพื่อรอให้การเปลี่ยนสถานะดังกล่าวมีการเปลี่ยนรูปสัญญาณที่เป็น LOW หรือ HIGH แบบสมบูรณ์ และในส่วนที่สามจะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องกระตุ้นซึ่งผลที่ได้พบว่าเมื่อเครื่องยนต์สเตอร์ลิงและหัววัดเทอร์โมคัปเปิลได้รับความร้อนที่ตำแหน่งเดียวกันเมื่อเวลาผ่านไปจนถึงช่วงที่เครื่องยนต์พร้อมทำงานเครื่องกระตุ้นจะเคลื่อนล้อกระตุ้นให้ไปสัมผัสกับล้อเกียร์ซึ่งแรงบิดที่ได้จากล้อกระตุ้นนั้นสามารถขับให้ล้อเกียร์ของเครื่องยนต์สเตอร์ลิงทำงานได้ตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

### 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดสอบระบบข้างต้นพบว่าระบบมีการทำงานได้ตามสมมติฐาน ผลที่ได้เกิดจากการที่มีการหน่วงเวลาในการทำงานของระบบในส่วนของการเขียนโปรแกรมเพื่อรอให้ลอจิกถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นลอจิก LOW หรือ HIGH อย่างสมบูรณ์ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาเนื่องจากไมโครคอนโทรลเลอร์สับสน ลอจิกที่เข้ามาจนเป็นเหตุให้การทำงานของโปรแกรมและของระบบที่

ผิดพลาดจากสมมติฐานที่ตั้งไว้ ซึ่งการห้วงเวลานั้นก็จะดูจากตารางบันทึกผลที่บันทึกค่าความร้อนต่างๆที่มีการเปลี่ยนเทียบกับเวลาที่เพิ่มขึ้นและจากผลที่ได้นั้น พบว่า เมื่อความร้อนต่างกันเวลาที่ให้ในการเปลี่ยนสถานะก็จะต่างกันออกไป ดังนั้นการกำหนดเวลาในการทำงานนั้นจึงต้องทำการห้วงเวลาให้มากไว้ก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาการทำงานที่ผิดพลาดของระบบ

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. วัสดุที่นำมาทำเครื่องกระตุ้นนั้นอาจยังเป็นวัสดุที่ไม่คงทนต่อการใช้งานเป็นเวลานานๆ ซึ่งเมื่อมีการนำไปใช้งานจริงก็จะต้องมีการเปลี่ยนวัสดุให้มีความคงทนขึ้นและมีการทดสอบความร้อนได้ดีอีกด้วย

2. การออกแบบวงจรของเครื่องกระตุ้นนั้นอาจจะมีการปรับเปลี่ยนหรือเพิ่มอุปกรณ์บางตัวเพื่อให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ดีขึ้น เช่น อาจจะมีการเพิ่ม Relay อีก 1 ตัวเข้าไปในส่วนของเอาต์พุตของวงจรขยายที่ออกจาก AND Gate ซึ่งจะทำให้การตรวจสอบสถานะลอจิกนั้นมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น

3. การออกแบบการวางไมโครสวิตช์เพื่อจัดการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ตัวที่สองนั้น เมื่อมีการนำไปใช้จริงอาจจะต้องมีการนำไปวางหรือติดไว้ในที่มิดชิดกว่านี้ เพื่อป้องกันเหตุการณ์ในกรณีที่มีฝนตกขึ้นมา ซึ่งน้ำจะเป็นตัวนำไฟฟ้าและจะทำให้ไมโครสวิตช์นั้นรับค่าที่ผิดพลาดแล้วส่งค่าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำให้การทำงานของระบบนั้นผิดพลาดตามไปด้วยเช่นกัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1]ทีมงานสมาร์ตเลิร์นนิ่ง. ADVANCE PIC MICROCONTROLLER IN C. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ. ห้างหุ้นส่วนสามัญสมาร์ตเลิร์นนิ่ง,2555
- [2]ทีมงานสมาร์ตเลิร์นนิ่ง. ผู้โลกการออกแบบไอซี. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ. ห้างหุ้นส่วนสามัญสมาร์ตเลิร์นนิ่ง,2555.
- [3]บันทึก 380 วงจรไอซี. กรุงเทพฯ. บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), 2551
- [4][Online].Available:[http://www.weloveshopping.com/shop/show\\_article.php?shopid=142060&qid=66204](http://www.weloveshopping.com/shop/show_article.php?shopid=142060&qid=66204)
- [5][Online].Available:<http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-02.html>
- [6][Online].Available:<http://www.rajsima.ac.th/media/patchara/work411012/Webpage4/GATES2.htm>
- [7][Online].Available:[student.nu.ac.th/electronic/00008.doc](http://student.nu.ac.th/electronic/00008.doc)
- [8][Online].Available:[http://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/device/diode\\_transistor/transistor.htm](http://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/device/diode_transistor/transistor.htm)

## ภาคผนวก

# DM7404

## Hex Inverting Gates

### General Description

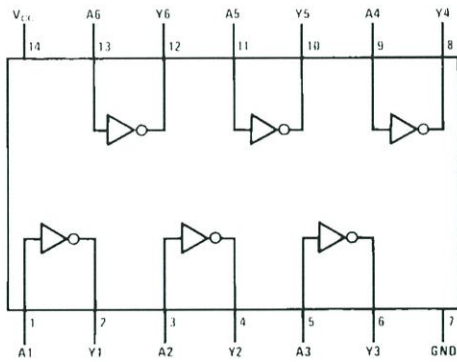
This device contains six independent gates each of which performs the logic INVERT function.

### Ordering Code:

Order Number	Package Number	Package Description
DM7404M	M14A	14-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-012, 0.150 Narrow
DM7404N	N14A	14-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300 Wide

Devices also available in Tape and Reel. Specify by appending the suffix letter "X" to the ordering code.

### Connection Diagram



### Function Table

$$Y = \bar{A}$$

Inputs	Output
A	Y
L	H
H	L

H = HIGH Logic Level  
L = LOW Logic Level

**Absolute Maximum Ratings**(Note 1)

Supply Voltage	7V
Input Voltage	5.5V
Operating Free Air Temperature Range	0°C to +70°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C

**Note 1:** The "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. The device should not be operated at these limits. The parametric values defined in the Electrical Characteristics tables are not guaranteed at the absolute maximum ratings. The "Recommended Operating Conditions" table will define the conditions for actual device operation.

**Recommended Operating Conditions**

Symbol	Parameter	Min	Nom	Max	Units
V <sub>CC</sub>	Supply Voltage	4.75	5	5.25	V
V <sub>IH</sub>	HIGH Level Input Voltage	2			V
V <sub>IL</sub>	LOW Level Input Voltage			0.8	V
I <sub>OH</sub>	HIGH Level Output Current			-0.4	mA
I <sub>OL</sub>	LOW Level Output Current			16	mA
T <sub>A</sub>	Free Air Operating Temperature	0		70	°C

**Electrical Characteristics**

over recommended operating free air temperature range (unless otherwise noted)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ (Note 2)	Max	Units
V <sub>I</sub>	Input Clamp Voltage	V <sub>CC</sub> = Min, I <sub>I</sub> = -12 mA			-1.5	V
V <sub>OH</sub>	HIGH Level Output Voltage	V <sub>CC</sub> = Min, I <sub>OH</sub> = Max V <sub>IL</sub> = Max	2.4	3.4		V
V <sub>OL</sub>	LOW Level Output Voltage	V <sub>CC</sub> = Min, I <sub>OL</sub> = Max V <sub>IH</sub> = Min		0.2	0.4	V
I <sub>I</sub>	Input Current @ Max Input Voltage	V <sub>CC</sub> = Max, V <sub>I</sub> = 5.5V			1	mA
I <sub>IH</sub>	HIGH Level Input Current	V <sub>CC</sub> = Max, V <sub>I</sub> = 2.4V			40	μA
I <sub>IL</sub>	LOW Level Input Current	V <sub>CC</sub> = Max, V <sub>I</sub> = 0.4V			-1.6	mA
I <sub>OS</sub>	Short Circuit Output Current	V <sub>CC</sub> = Max (Note 3)	-18		-55	mA
I <sub>CCH</sub>	Supply Current with Outputs HIGH	V <sub>CC</sub> = Max		6	12	mA
I <sub>CCL</sub>	Supply Current with Outputs LOW	V <sub>CC</sub> = Max		18	33	mA

**Note 2:** All typicals are at V<sub>CC</sub> = 5V, T<sub>A</sub> = 25°C.

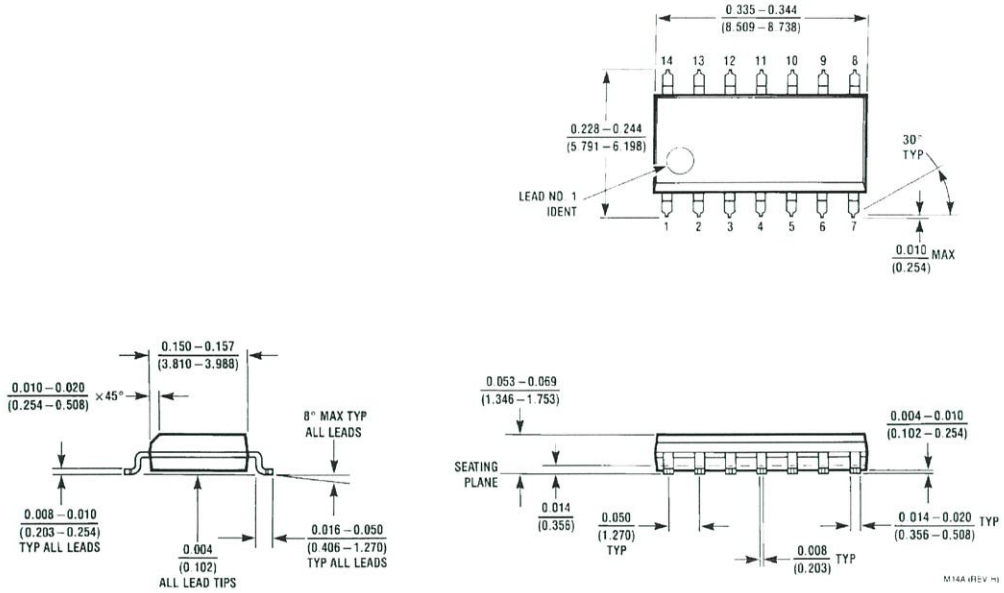
**Note 3:** Not more than one output should be shorted at a time.

**Switching Characteristics**

at V<sub>CC</sub> = 5V and T<sub>A</sub> = 25°C

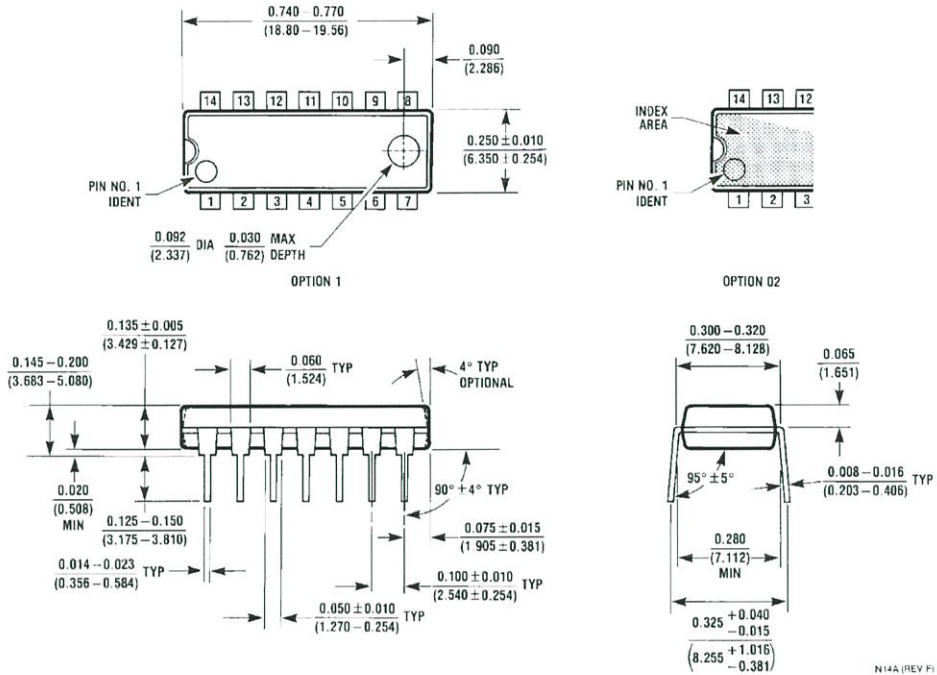
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Max	Units
t <sub>PLH</sub>	Propagation Delay Time LOW-to-HIGH Level Output	C <sub>L</sub> = 15 pF R <sub>L</sub> = 400Ω		22	ns
t <sub>PHL</sub>	Propagation Delay Time HIGH-to-LOW Level Output			15	ns

**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted



14-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-012, 0.150 Narrow Package Number M14A

**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



**14-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300 Wide Package Number N14A**

Fairchild does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and Fairchild reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

**LIFE SUPPORT POLICY**

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

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

## DM7408 Quad 2-Input AND Gates

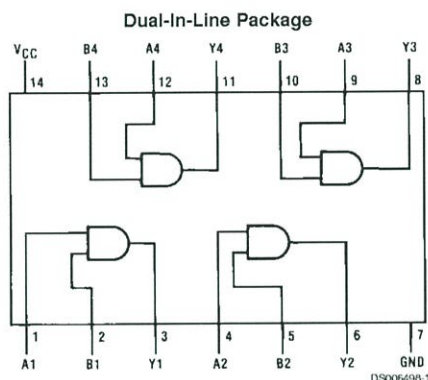
### General Description

This device contains four independent gates each of which performs the logic AND function.

### Features

- Alternate Military/Aerospace device (5408) is available. Contact a Fairchild Semiconductor Sales Office/Distributor for specifications.

### Connection Diagram



Order Number 5408DMQB, 5408FMQB, DM5408J, DM5408W or DM7408N  
See Package Number J14A, N14A or W14B

### Function Table

$$Y = AB$$

Inputs		Output
A	B	Y
L	L	L
L	H	L
H	L	L
H	H	H

H = High Logic Level  
L = Low Logic Level

<b>Absolute Maximum Ratings</b> (Note 1)	DM54 and 54	-55°C to +125°C
Supply Voltage	7V	0°C to +70°C
Input Voltage	5.5V	-65°C to +150°C
Operating Free Air Temperature Range	DM74	
	Storage Temperature Range	

## Recommended Operating Conditions

Symbol	Parameter	DM5408			DM7408			Units
		Min	Nom	Max	Min	Nom	Max	
V <sub>CC</sub>	Supply Voltage	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
V <sub>IH</sub>	High Level Input Voltage	2			2			V
V <sub>IL</sub>	Low Level Input Voltage			0.8			0.8	V
I <sub>OH</sub>	High Level Output Current			-0.8			-0.8	mA
I <sub>OL</sub>	Low Level Output Current			16			16	mA
T <sub>A</sub>	Free Air Operating Temperature	-55		125	0		70	°C

**Note 1:** The "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. The device should not be operated at these limits. The parametric values defined in the "Electrical Characteristics" table are not guaranteed at the absolute maximum ratings. The "Recommended Operating Conditions" table will define the conditions for actual device operation.

## Electrical Characteristics

over recommended operating free air temperature range (unless otherwise noted)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ (Note 2)	Max	Units
V <sub>I</sub>	Input Clamp Voltage	V <sub>CC</sub> = Min, I <sub>I</sub> = -12 mA			-1.5	V
V <sub>OH</sub>	High Level Output Voltage	V <sub>CC</sub> = Min, I <sub>OH</sub> = Max V <sub>IL</sub> = Max	2.4	3.4		V
V <sub>OL</sub>	Low Level Output Voltage	V <sub>CC</sub> = Min, I <sub>OL</sub> = Max V <sub>IH</sub> = Min		0.2	0.4	V
I <sub>I</sub>	Input Current @ Max Input Voltage	V <sub>CC</sub> = Max, V <sub>I</sub> = 5.5V			1	mA
I <sub>IH</sub>	High Level Input Current	V <sub>CC</sub> = Max, V <sub>I</sub> = 2.4V			40	μA
I <sub>IL</sub>	Low Level Input Current	V <sub>CC</sub> = Max, V <sub>I</sub> = 0.4V			-1.6	mA
I <sub>OS</sub>	Short Circuit Output Current	V <sub>CC</sub> = Max	DM54	-20	-55	mA
		(Note 3)	DM74	-18	-55	
I <sub>CCH</sub>	Supply Current with Outputs High	V <sub>CC</sub> = Max		11	21	mA
I <sub>CCL</sub>	Supply Current with Outputs Low	V <sub>CC</sub> = Max		20	33	mA

## Switching Characteristics

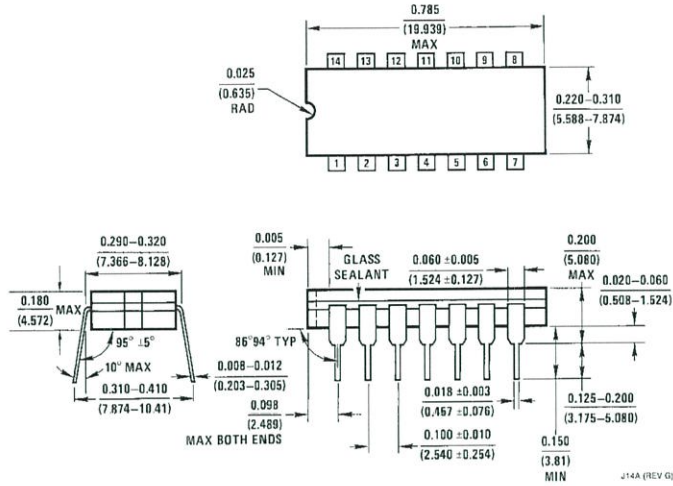
at V<sub>CC</sub> = 5V and T<sub>A</sub> = 25°C (See Section 1 for Test Waveforms and Output Load)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Max	Units
t <sub>PLH</sub>	Propagation Delay Time Low to High Level Output	C <sub>L</sub> = 15 pF R <sub>L</sub> = 400Ω		27	ns
t <sub>PHL</sub>	Propagation Delay Time High to Low Level Output			19	ns

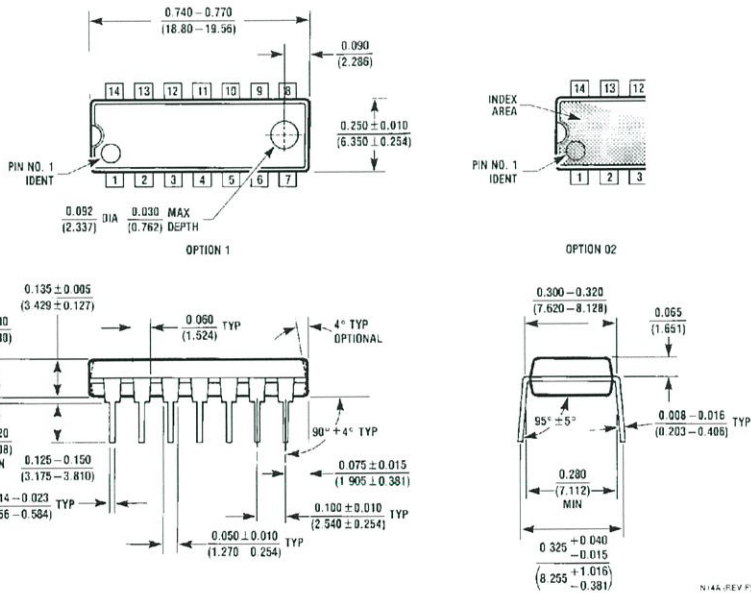
**Note 2:** All typicals are at V<sub>CC</sub> = 5V, T<sub>A</sub> = 25°C.

**Note 3:** Not more than one output should be shorted at a time.

**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted

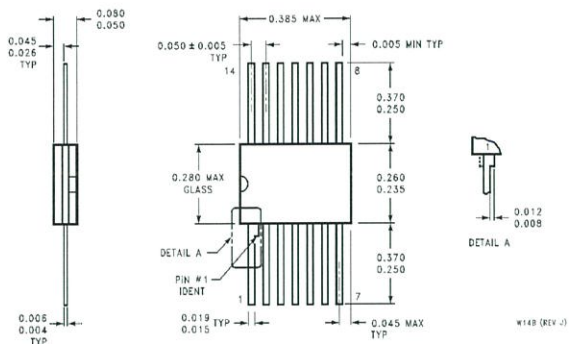


**14-Lead Ceramic Dual-In-Line Package (J)**  
**Order Number 5408DMQB or DM5408J**  
**Package Number J14A**



**14-Lead Molded Dual-In-Line Package (N)**  
**Order Number DM7408N**  
**Package Number N14A**

**Physical Dimensions** inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



**14-Lead Ceramic Flat Package (W)**  
**Order Number 5408FMQB or DM5408W**  
**Package Number W14B**

**LIFE SUPPORT POLICY**

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

Fairchild Semiconductor Corporation  
**Americas**  
 Customer Response Center  
 Tel: 1-888-522-5372

Fairchild Semiconductor Europe  
 Fax: +49 (0) 1 80-530 85 86  
 Email: europe.support@nsc.com  
 Deutsch Tel: +49 (0) 8 141-35-0  
 English Tel: +44 (0) 1 793-85-68-56  
 Italy Tel: +39 (0) 2 57 5631

Fairchild Semiconductor Hong Kong Ltd.  
 13th Floor, Straight Block,  
 Ocean Centre, 5 Canton Rd.  
 Tsimshatsui, Kowloon  
 Hong Kong  
 Tel: +852 2737-7200  
 Fax: +852 2314-0061

National Semiconductor Japan Ltd.  
 Tel: 81-3-5620-6175  
 Fax: 81-3-5620-6179

www.fairchildsemi.com

This datasheet has been downloaded from:

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

Datasheets for electronic components.

# LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V



ON Semiconductor®

<http://onsemi.com>

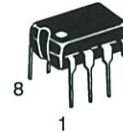
## Single Supply Dual Operational Amplifiers

Utilizing the circuit designs perfected for Quad Operational Amplifiers, these dual operational amplifiers feature low power drain, a common mode input voltage range extending to ground/ $V_{EE}$ , and single supply or split supply operation. The LM358 series is equivalent to one-half of an LM324.

These amplifiers have several distinct advantages over standard operational amplifier types in single supply applications. They can operate at supply voltages as low as 3.0 V or as high as 32 V, with quiescent currents about one-fifth of those associated with the MC1741 (on a per amplifier basis). The common mode input range includes the negative supply, thereby eliminating the necessity for external biasing components in many applications. The output voltage range also includes the negative power supply voltage.

### Features

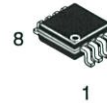
- Short Circuit Protected Outputs
- True Differential Input Stage
- Single Supply Operation: 3.0 V to 32 V
- Low Input Bias Currents
- Internally Compensated
- Common Mode Range Extends to Negative Supply
- Single and Split Supply Operation
- ESD Clamps on the Inputs Increase Ruggedness of the Device without Affecting Operation
- NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Site and Control Changes
- These Devices are Pb-Free, Halogen Free/BFR Free and are RoHS Compliant



PDIP-8  
N, AN, VN SUFFIX  
CASE 626

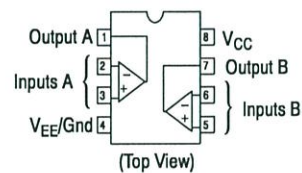


SOIC-8  
D, VD SUFFIX  
CASE 751



Micro8™  
DMR2 SUFFIX  
CASE 846A

### PIN CONNECTIONS



### ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 10 of this data sheet.

### DEVICE MARKING INFORMATION

See general marking information in the device marking section on page 11 of this data sheet.

LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V



Figure 1.

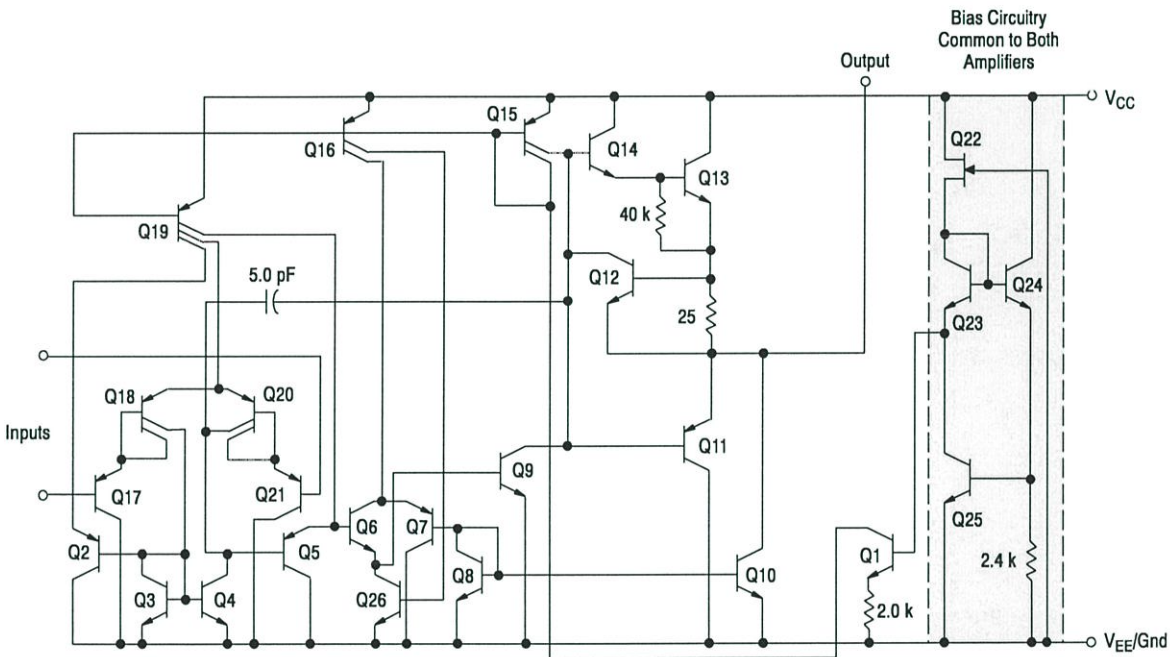


Figure 2. Representative Schematic Diagram  
(One-Half of Circuit Shown)

# LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V

**MAXIMUM RATINGS** ( $T_A = +25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltages Single Supply Split Supplies	$V_{CC}$ $V_{CC}, V_{EE}$	32 $\pm 16$	Vdc
Input Differential Voltage Range (Note 1)	$V_{IDR}$	$\pm 32$	Vdc
Input Common Mode Voltage Range (Note 2)	$V_{ICR}$	-0.3 to 32	Vdc
Output Short Circuit Duration	$t_{SC}$	Continuous	
Junction Temperature	$T_J$	150	$^\circ\text{C}$
Thermal Resistance, Junction-to-Air (Note 3)	$R_{\theta JA}$	Case 846A 238 Case 751 212 Case 626 161	$^\circ\text{C/W}$
Storage Temperature Range	$T_{stg}$	-65 to +150	$^\circ\text{C}$
ESD Protection at any Pin Human Body Model Machine Model	$V_{esd}$	2000 200	V
Operating Ambient Temperature Range	$T_A$	LM258 -25 to +85 LM358, LM358A 0 to +70 LM2904/LM2904A -40 to +105 LM2904V, NCV2904 (Note 4) -40 to +125 NCV2904V (Note 4) -40 to +150	$^\circ\text{C}$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

1. Split Power Supplies.
2. For supply voltages less than 32 V the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.
3. All  $R_{\theta JA}$  measurements made on evaluation board with 1 oz. copper traces of minimum pad size. All device outputs were active.
4. *NCV2904 and NCV2904V are qualified for automotive use.*

# LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_{CC} = 5.0\text{ V}$ ,  $V_{EE} = \text{GND}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	LM258			LM358			LM358A			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage $V_{CC} = 5.0\text{ V}$ to $30\text{ V}$ , $V_{IC} = 0\text{ V}$ to $V_{CC} - 1.7\text{ V}$ , $V_O \approx 1.4\text{ V}$ , $R_S = 0\ \Omega$ $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{high}}$ (Note 5) $T_A = T_{\text{low}}$ (Note 5)	$V_{IO}$	-	2.0	5.0	-	2.0	7.0	-	2.0	3.0	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 5)	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	-	7.0	-	-	7.0	-	-	7.0	-	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 5)	$I_{IO}$	-	3.0	30	-	5.0	50	-	5.0	30	nA
Input Bias Current $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 5)	$I_{IB}$	-	-45	-150	-	-45	-250	-	-45	-100	nA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 5)	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	-	10	-	-	10	-	-	10	-	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Common Mode Voltage Range (Note 6), $V_{CC} = 30\text{ V}$ $V_{CC} = 30\text{ V}$ , $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$	$V_{ICR}$	0	-	28.3	0	-	28.3	0	-	28.5	V
Differential Input Voltage Range	$V_{IDR}$	-	-	$V_{CC}$	-	-	$V_{CC}$	-	-	$V_{CC}$	V
Large Signal Open Loop Voltage Gain $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$ , For Large $V_O$ Swing, $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 5)	$A_{VOL}$	50	100	-	25	100	-	25	100	-	V/mV
Channel Separation $1.0\text{ kHz} \leq f \leq 20\text{ kHz}$ , Input Referenced	CS	-	-120	-	-	-120	-	-	-120	-	dB
Common Mode Rejection $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	CMR	70	85	-	65	70	-	65	70	-	dB
Power Supply Rejection	PSR	65	100	-	65	100	-	65	100	-	dB
Output Voltage-High Limit $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 5) $V_{CC} = 5.0\text{ V}$ , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_{CC} = 30\text{ V}$ , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ $V_{CC} = 30\text{ V}$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$	$V_{OH}$	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	V
Output Voltage-Low Limit $V_{CC} = 5.0\text{ V}$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 5)	$V_{OL}$	-	5.0	20	-	5.0	20	-	5.0	20	mV
Output Source Current $V_{ID} = +1.0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$ $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (LM358A Only)	$I_{O+}$	20	40	-	20	40	-	20	40	-	mA
Output Sink Current $V_{ID} = -1.0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$ $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (LM358A Only) $V_{ID} = -1.0\text{ V}$ , $V_O = 200\text{ mV}$	$I_{O-}$	10	20	-	10	20	-	10	20	-	mA
Output Short Circuit to Ground (Note 7)	$I_{SC}$	-	40	60	-	40	60	-	40	60	mA
Power Supply Current (Total Device) $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 5) $V_{CC} = 30\text{ V}$ , $V_O = 0\text{ V}$ , $R_L = \infty$ $V_{CC} = 5\text{ V}$ , $V_O = 0\text{ V}$ , $R_L = \infty$	$I_{CC}$	-	1.5	3.0	-	1.5	3.0	-	1.5	2.0	mA

5. LM258:  $T_{\text{low}} = -25^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{high}} = +85^\circ\text{C}$       LM358, LM358A:  $T_{\text{low}} = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{high}} = +70^\circ\text{C}$   
 LM2904/LM2904A:  $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{high}} = +105^\circ\text{C}$       LM2904V & NCV2904:  $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{high}} = +125^\circ\text{C}$   
 NCV2904 and NCV2904V are qualified for automotive use.      NCV2904V:  $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{high}} = +150^\circ\text{C}$
6. The input common mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V. The upper end of the common mode voltage range is  $V_{CC} - 1.7\text{ V}$ .
7. Short circuits from the output to  $V_{CC}$  can cause excessive heating and eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

# LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $V_{CC} = 5.0\text{ V}$ ,  $V_{EE} = \text{Gnd}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	LM2904			LM2904A			LM2904V, NCV2904 NCV2904V			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage $V_{CC} = 5.0\text{ V to } 30\text{ V}$ , $V_{IC} = 0\text{ V to } V_{CC} - 1.7\text{ V}$ , $V_O = 1.4\text{ V}$ , $R_S = 0\ \Omega$ $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{high}}$ (Note 8) $T_A = T_{\text{low}}$ (Note 8)	$V_{IO}$	-	2.0	7.0	-	2.0	7.0	-	-	7.0	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 8)	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	-	7.0	-	-	7.0	-	-	7.0	-	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 8)	$I_{IO}$	-	5.0	50	-	5.0	50	-	5.0	50	nA
Input Bias Current $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 8)	$I_{IB}$	-	-45	-250	-	-45	-100	-	-45	-250	nA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 8)	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	-	10	-	-	10	-	-	10	-	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Common Mode Voltage Range (Note 9), $V_{CC} = 30\text{ V}$ $V_{CC} = 30\text{ V}$ , $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$	$V_{ICR}$	0	-	28.3	0	-	28.3	0	-	28.3	V
Differential Input Voltage Range	$V_{IDR}$	-	-	$V_{CC}$	-	-	$V_{CC}$	-	-	$V_{CC}$	V
Large Signal Open Loop Voltage Gain $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$ , For Large $V_O$ Swing, $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 8)	$A_{VOL}$	25	100	-	25	100	-	25	100	-	V/mV
Channel Separation $1.0\text{ kHz} \leq f \leq 20\text{ kHz}$ , Input Referenced	CS	-	-120	-	-	-120	-	-	-120	-	dB
Common Mode Rejection $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$	CMR	50	70	-	50	70	-	50	70	-	dB
Power Supply Rejection	PSR	50	100	-	50	100	-	50	100	-	dB
Output Voltage-High Limit $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 8) $V_{CC} = 5.0\text{ V}$ , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_{CC} = 30\text{ V}$ , $R_L = 2.0\text{ k}\Omega$ $V_{CC} = 30\text{ V}$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$	$V_{OH}$	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	3.3	3.5	-	V
Output Voltage-Low Limit $V_{CC} = 5.0\text{ V}$ , $R_L = 10\text{ k}\Omega$ , $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 8)	$V_{OL}$	-	5.0	20	-	5.0	20	-	5.0	20	mV
Output Source Current $V_{ID} = +1.0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$	$I_{O+}$	20	40	-	20	40	-	20	40	-	mA
Output Sink Current $V_{ID} = -1.0\text{ V}$ , $V_{CC} = 15\text{ V}$ $V_{ID} = -1.0\text{ V}$ , $V_O = 200\text{ mV}$	$I_{O-}$	10	20	-	10	20	-	10	20	-	mA
Output Short Circuit to Ground (Note 10)	$I_{SC}$	-	40	60	-	40	60	-	40	60	mA
Power Supply Current (Total Device) $T_A = T_{\text{high}}$ to $T_{\text{low}}$ (Note 8) $V_{CC} = 30\text{ V}$ , $V_O = 0\text{ V}$ , $R_L = \infty$ $V_{CC} = 5\text{ V}$ , $V_O = 0\text{ V}$ , $R_L = \infty$	$I_{CC}$	-	1.5	3.0	-	1.5	3.0	-	1.5	3.0	mA

8. LM258:  $T_{\text{low}} = -25^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{high}} = +85^\circ\text{C}$

LM358, LM358A:  $T_{\text{low}} = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{high}} = +70^\circ\text{C}$

LM2904/LM2904A:  $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{high}} = +105^\circ\text{C}$

LM2904V & NCV2904:  $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{high}} = +125^\circ\text{C}$

NCV2904 and NCV2904V are qualified for automotive use.

NCV2904V:  $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{high}} = +150^\circ\text{C}$

9. The input common mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V. The upper end of the common mode voltage range is  $V_{CC} - 1.7\text{ V}$ .

10. Short circuits from the output to  $V_{CC}$  can cause excessive heating and eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

CIRCUIT DESCRIPTION

The LM358 series is made using two internally compensated, two-stage operational amplifiers. The first stage of each consists of differential input devices Q20 and Q18 with input buffer transistors Q21 and Q17 and the differential to single ended converter Q3 and Q4. The first stage performs not only the first stage gain function but also performs the level shifting and transconductance reduction functions. By reducing the transconductance, a smaller compensation capacitor (only 5.0 pF) can be employed, thus saving chip area. The transconductance reduction is accomplished by splitting the collectors of Q20 and Q18. Another feature of this input stage is that the input common mode range can include the negative supply or ground, in single supply operation, without saturating either the input devices or the differential to single-ended converter. The second stage consists of a standard current source load amplifier stage.

Each amplifier is biased from an internal-voltage regulator which has a low temperature coefficient thus giving each amplifier good temperature characteristics as well as excellent power supply rejection.

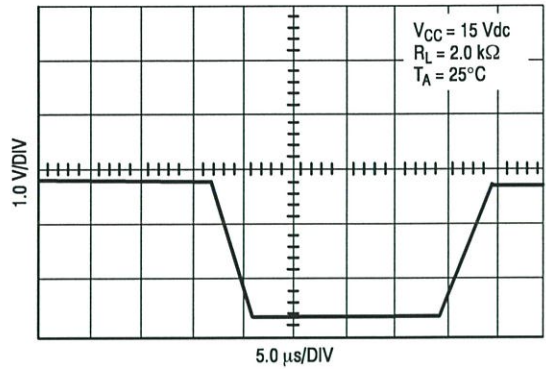


Figure 3. Large Signal Voltage Follower Response

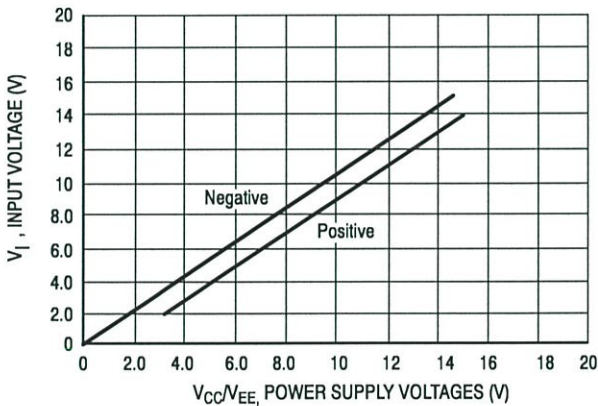


Figure 4. Input Voltage Range

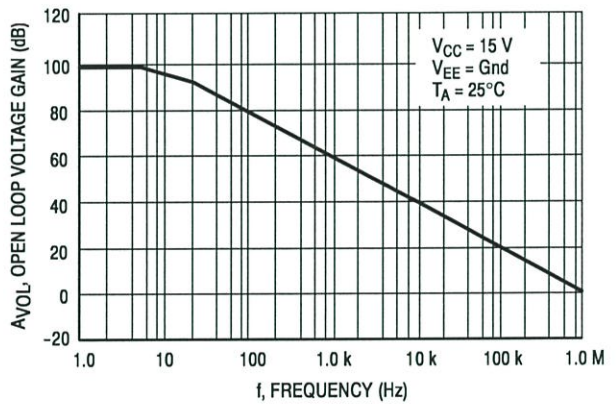


Figure 5. Large-Signal Open Loop Voltage Gain

LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V

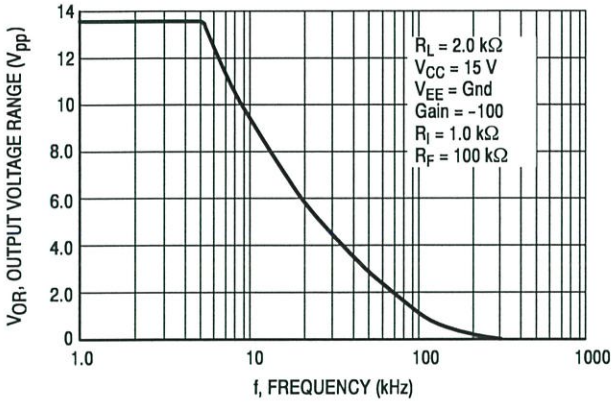


Figure 6. Large-Signal Frequency Response

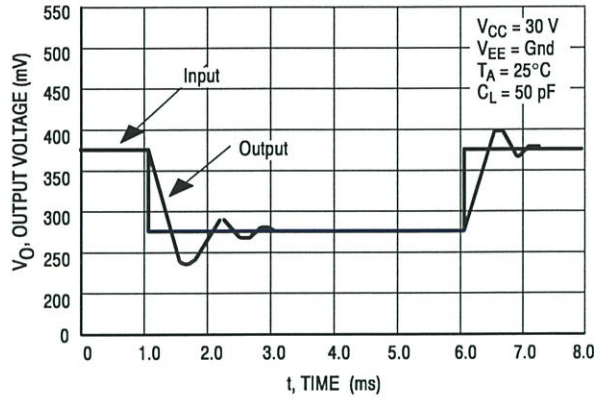


Figure 7. Small Signal Voltage Follower Pulse Response (Noninverting)

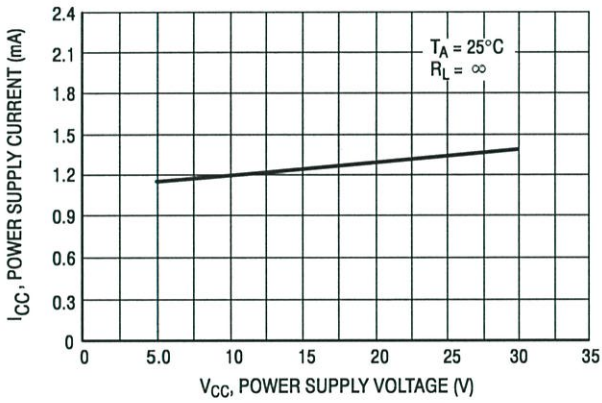


Figure 8. Power Supply Current versus Power Supply Voltage

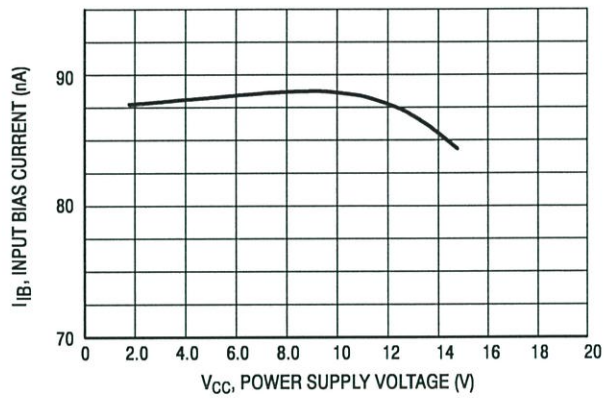


Figure 9. Input Bias Current versus Supply Voltage

LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V

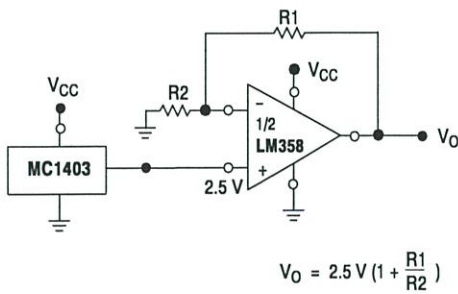


Figure 10. Voltage Reference

$$V_O = 2.5 V \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$

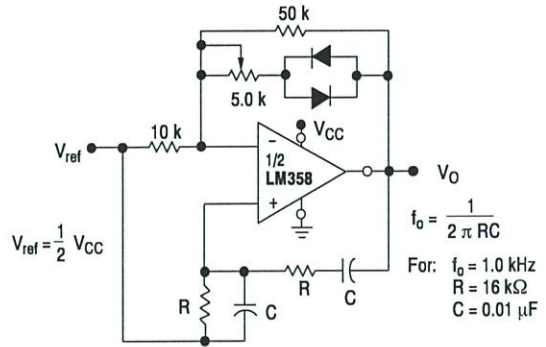
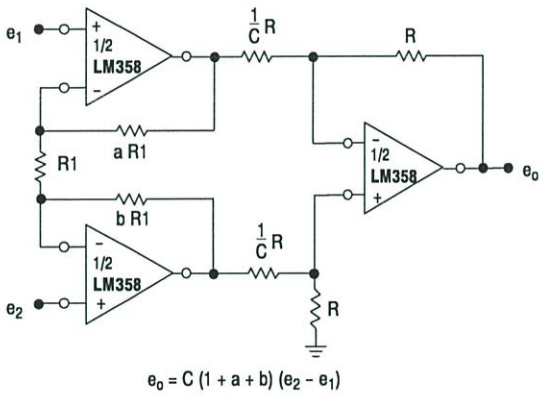


Figure 11. Wien Bridge Oscillator

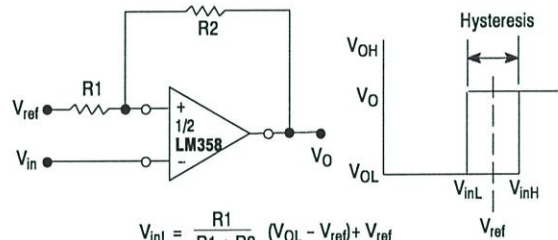
$$f_o = \frac{1}{2 \pi RC}$$

For:  $f_o = 1.0 \text{ kHz}$   
 $R = 16 \text{ k}\Omega$   
 $C = 0.01 \mu\text{F}$



$$e_o = C (1 + a + b) (e_2 - e_1)$$

Figure 12. High Impedance Differential Amplifier

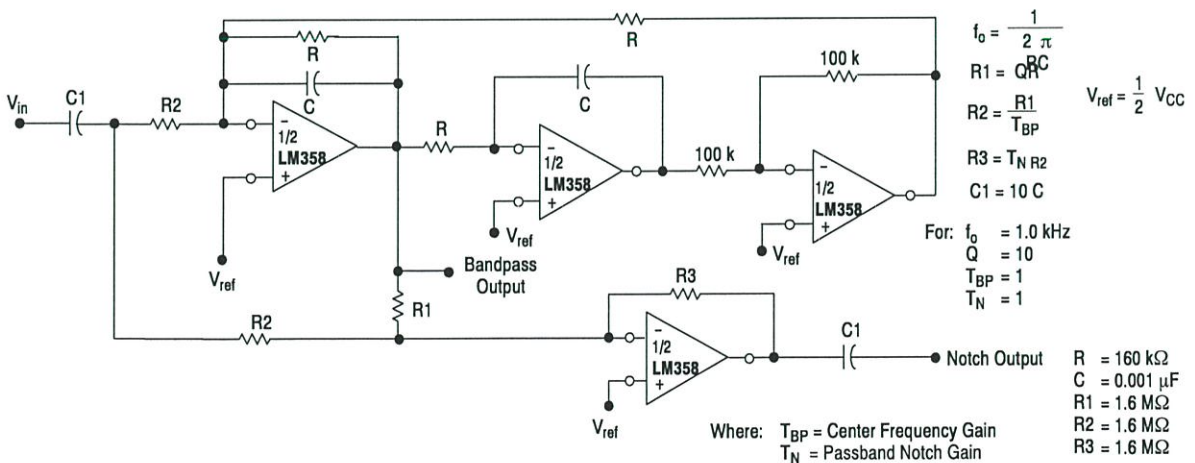


$$V_{inL} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_{OL} - V_{ref}) + V_{ref}$$

$$V_{inH} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_{OH} - V_{ref}) + V_{ref}$$

$$H = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (V_{OH} - V_{OL})$$

Figure 13. Comparator with Hysteresis



$$f_o = \frac{1}{2 \pi RC}$$

$$R_1 = \frac{Q}{RC}$$

$$R_2 = \frac{R_1}{T_{BP}}$$

$$R_3 = T_N R_2$$

$$C_1 = 10 C$$

For:  $f_o = 1.0 \text{ kHz}$   
 $Q = 10$   
 $T_{BP} = 1$   
 $T_N = 1$

Where:  $T_{BP}$  = Center Frequency Gain  
 $T_N$  = Passband Notch Gain

$R = 160 \text{ k}\Omega$   
 $C = 0.001 \mu\text{F}$   
 $R_1 = 1.6 \text{ M}\Omega$   
 $R_2 = 1.6 \text{ M}\Omega$   
 $R_3 = 1.6 \text{ M}\Omega$

Figure 14. Bi-Quad Filter

LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V

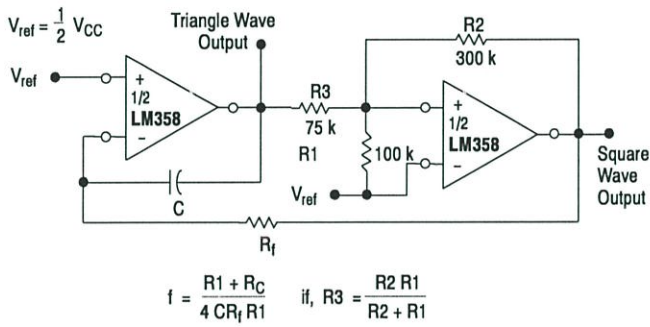
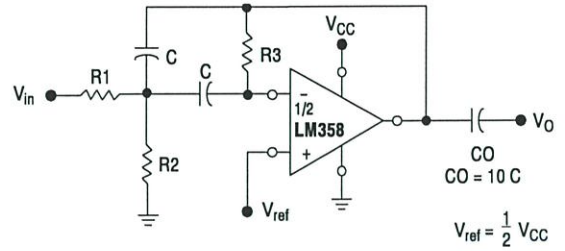


Figure 15. Function Generator



Given:  $f_0$  = center frequency  
 $A(f_0)$  = gain at center frequency

Choose value  $f_0, C$

Then:  $R3 = \frac{Q}{\pi f_0 C}$

$R1 = \frac{R3}{2 A(f_0)}$

$R2 = \frac{R1 R3}{4 Q^2 R1 - R3}$

For less than 10% error from operational amplifier.  $\frac{Q_0 f_0}{BW} < 0.1$

Where  $f_0$  and BW are expressed in Hz.

If source impedance varies, filter may be preceded with voltage follower buffer to stabilize filter parameters.

Figure 16. Multiple Feedback Bandpass Filter

# LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V

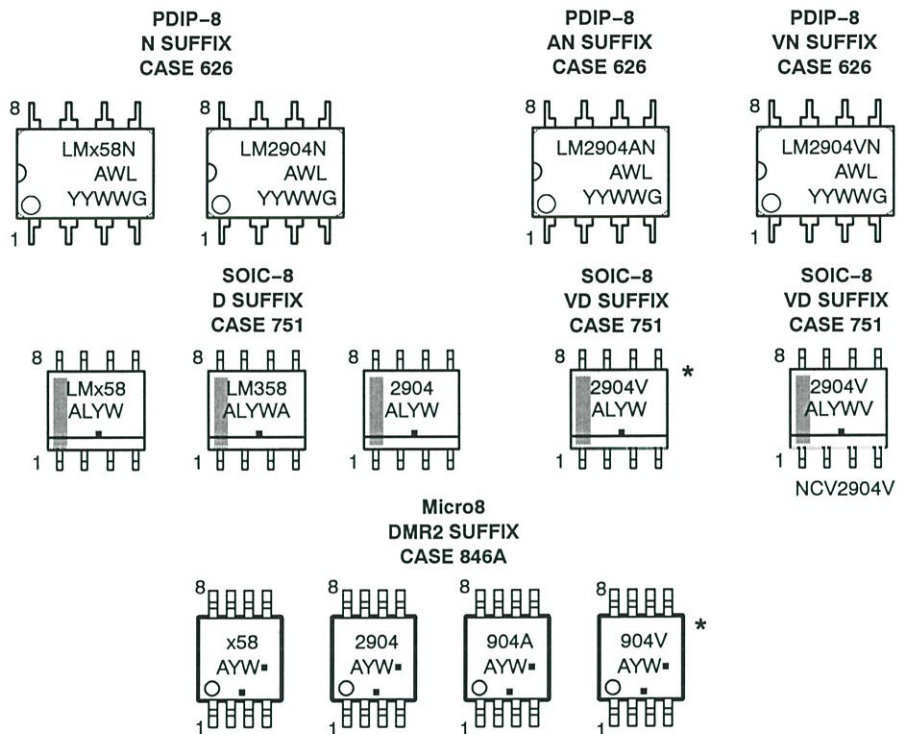
## ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package	Shipping†
LM358ADR2G	0°C to +70°C	SOIC-8 (Pb-Free)	2500 / Tape & Reel
LM358DG			98 Units / Rail
LM358DR2G			2500 / Tape & Reel
LM358DMR2G		Micro8 (Pb-Free)	4000 / Tape & Reel
LM358NG		PDIP-8 (Pb-Free)	50 Units / Rail
LM258DG	-25°C to +85°C	SOIC-8 (Pb-Free)	98 Units / Rail
LM258DR2G			2500 / Tape & Reel
LM258DMR2G		Micro8 (Pb-Free)	4000 / Tape & Reel
LM258NG		PDIP-8 (Pb-Free)	50 Units / Rail
LM2904DG	-40°C to +105°C	SOIC-8 (Pb-Free)	98 Units / Rail
LM2904DR2G			2500 / Tape & Reel
LM2904DMR2G		Micro8 (Pb-Free)	2500 / Tape & Reel
LM2904NG		PDIP-8 (Pb-Free)	50 Units / Rail
LM2904ADMG		Micro8 (Pb-Free)	4000 / Tape & Reel
LM2904ADMR2G			4000 / Tape & Reel
LM2904ANG		PDIP-8 (Pb-Free)	50 Units / Rail
LM2904VDG		-40°C to +125°C	SOIC-8 (Pb-Free)
LM2904VDR2G	2500 / Tape & Reel		
LM2904VDMR2G	Micro8 (Pb-Free)		4000 / Tape & Reel
LM2904VNG	PDIP-8 (Pb-Free)		50 Units / Rail
NCV2904DR2G	SOIC-8 (Pb-Free)		2500 / Tape & Reel
NCV2904DMR2G	Micro8 (Pb-Free)		4000 / Tape & Reel
NCV2904VDR2G	SOIC-8 (Pb-Free)		2500 / Tape & Reel

†For information on tape and reel specifications, including part orientation and tape sizes, please refer to our Tape and Reel Packaging Specifications Brochure, BRD8011/D.

# LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V

## MARKING DIAGRAMS



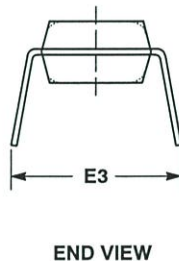
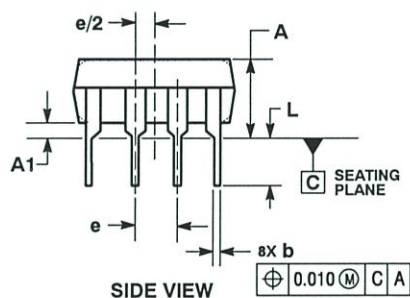
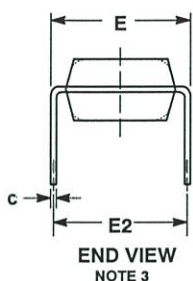
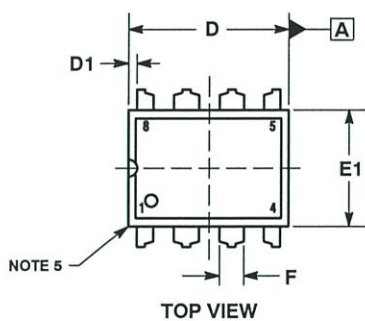
- x = 2 or 3
- A = Assembly Location
- WL, L = Wafer Lot
- YY, Y = Year
- WW, W = Work Week
- G = Pb-Free Package
- = Pb-Free Package – (Note: Microdot may be in either location)

\*This diagram also applies to NCV2904

LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V

PACKAGE DIMENSIONS

PDIP-8  
N, AN, VN SUFFIX  
CASE 626-05  
ISSUE M



NOTES:

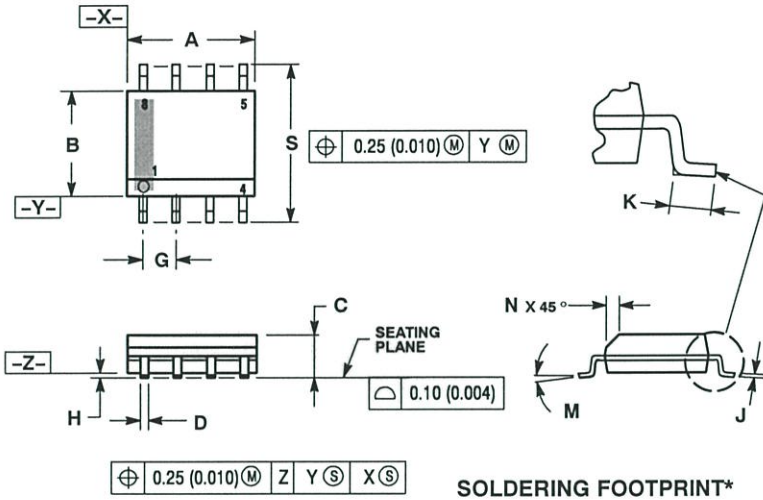
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCHES.
3. DIMENSION E IS MEASURED WITH THE LEADS RESTRAINED PARALLEL AT WIDTH E2.
4. DIMENSION E1 DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH.
5. ROUNDED CORNERS OPTIONAL.

DIM	INCHES			MILLIMETERS		
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
A	----	----	0.210	----	----	5.33
A1	0.015	----	----	0.38	----	----
b	0.014	0.018	0.022	0.35	0.46	0.56
C	0.008	0.010	0.014	0.20	0.25	0.36
D	0.355	0.365	0.400	9.02	9.27	10.02
D1	0.005	----	----	0.13	----	----
E	0.300	0.310	0.325	7.62	7.87	8.26
E1	0.240	0.250	0.280	6.10	6.35	7.11
E2	0.300 BSC			7.62 BSC		
E3	----	----	0.430	----	----	10.92
e	0.100 BSC			2.54 BSC		
L	0.115	0.130	0.150	2.92	3.30	3.81

LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V

PACKAGE DIMENSIONS

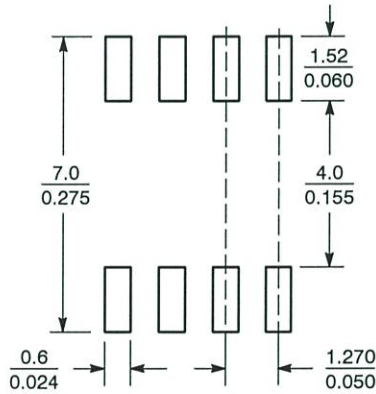
SOIC-8 NB  
CASE 751-07  
ISSUE AK



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
  2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
  3. DIMENSION A AND B DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
  4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 (0.006) PER SIDE.
  5. DIMENSION D DOES NOT INCLUDE DAMBAR PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 (0.005) TOTAL IN EXCESS OF THE D DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.
  6. 751-01 THRU 751-06 ARE OBSOLETE. NEW STANDARD IS 751-07.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	4.80	5.00	0.189	0.197
B	3.80	4.00	0.150	0.157
C	1.35	1.75	0.053	0.069
D	0.33	0.51	0.013	0.020
G	1.27 BSC		0.050 BSC	
H	0.10	0.25	0.004	0.010
J	0.19	0.25	0.007	0.010
K	0.40	1.27	0.016	0.050
M	0°	8°	0°	8°
N	0.25	0.50	0.010	0.020
S	5.80	6.20	0.228	0.244

SOLDERING FOOTPRINT\*



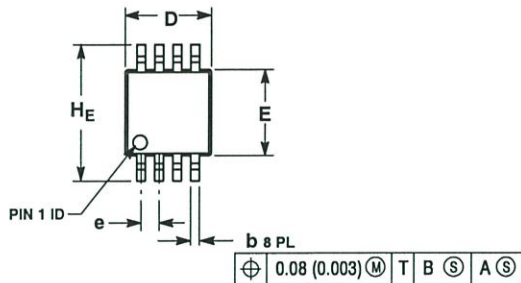
SCALE 6:1 (mm/inches)

\*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERM/D.

# LM258, LM358, LM358A, LM2904, LM2904A, LM2904V, NCV2904, NCV2904V

## PACKAGE DIMENSIONS

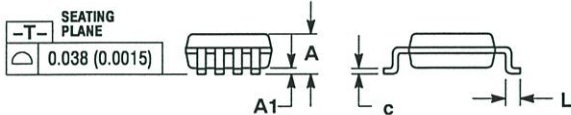
Micro8™  
CASE 846A-02  
ISSUE H



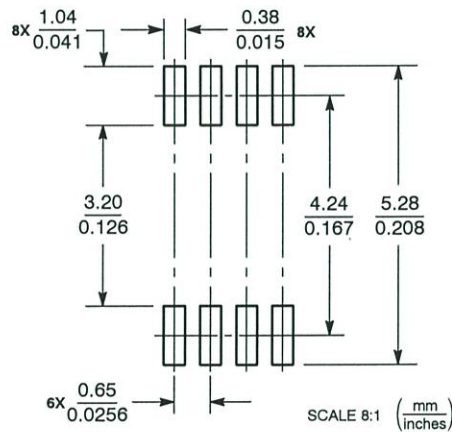
NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: MILLIMETER.
3. DIMENSION A DOES NOT INCLUDE MOLD FLASH, PROTRUSIONS OR GATE BURRS. MOLD FLASH, PROTRUSIONS OR GATE BURRS SHALL NOT EXCEED 0.15 (0.006) PER SIDE.
4. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE INTERLEAD FLASH OR PROTRUSION. INTERLEAD FLASH OR PROTRUSION SHALL NOT EXCEED 0.25 (0.010) PER SIDE.
5. 846A-01 OBSOLETE, NEW STANDARD 846A-02.

DIM	MILLIMETERS			INCHES		
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX
A	--	--	1.10	--	--	0.043
A1	0.05	0.08	0.15	0.002	0.003	0.006
b	0.25	0.33	0.40	0.010	0.013	0.016
c	0.13	0.18	0.23	0.005	0.007	0.009
D	2.90	3.00	3.10	0.114	0.118	0.122
E	2.90	3.00	3.10	0.114	0.118	0.122
e	0.65 BSC			0.026 BSC		
L	0.40	0.55	0.70	0.016	0.021	0.028
HE	4.75	4.90	5.05	0.187	0.193	0.199



### SOLDERING FOOTPRINT\*



\*For additional information on our Pb-Free strategy and soldering details, please download the ON Semiconductor Soldering and Mounting Techniques Reference Manual, SOLDERRM/D.

Micro8 is a trademark of International Rectifier.

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

### PUBLICATION ORDERING INFORMATION

LITERATURE FULFILLMENT:  
Literature Distribution Center for ON Semiconductor  
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA  
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada  
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada  
Email: orderlit@onsemi.com

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free  
USA/Canada  
Europe, Middle East and Africa Technical Support:  
Phone: 421 33 790 2910  
Japan Customer Focus Center  
Phone: 81-3-5817-1050

ON Semiconductor Website: [www.onsemi.com](http://www.onsemi.com)

Order Literature: <http://www.onsemi.com/orderlit>

For additional information, please contact your local Sales Representative

LM358/D



**MICROCHIP**

# PIC16F627A/628A/648A

## 18-pin Flash-Based, 8-Bit CMOS Microcontrollers with nanoWatt Technology

### High-Performance RISC CPU:

- Operating speeds from DC – 20 MHz
- Interrupt capability
- 8-level deep hardware stack
- Direct, Indirect and Relative Addressing modes
- 35 single-word instructions:
  - All instructions single cycle except branches

### Special Microcontroller Features:

- Internal and external oscillator options:
  - Precision internal 4 MHz oscillator factory calibrated to  $\pm 1\%$
  - Low-power internal 48 kHz oscillator
  - External Oscillator support for crystals and resonators
- Power-saving Sleep mode
- Programmable weak pull-ups on PORTB
- Multiplexed Master Clear/Input-pin
- Watchdog Timer with independent oscillator for reliable operation
- Low-voltage programming
- In-Circuit Serial Programming™ (via two pins)
- Programmable code protection
- Brown-out Reset
- Power-on Reset
- Power-up Timer and Oscillator Start-up Timer
- Wide operating voltage range (2.0-5.5V)
- Industrial and extended temperature range
- High-Endurance Flash/EEPROM cell:
  - 100,000 write Flash endurance
  - 1,000,000 write EEPROM endurance
  - 40 year data retention

### Low-Power Features:

- Standby Current:
  - 100 nA @ 2.0V, typical
- Operating Current:
  - 12  $\mu$ A @ 32 kHz, 2.0V, typical
  - 120  $\mu$ A @ 1 MHz, 2.0V, typical
- Watchdog Timer Current:
  - 1  $\mu$ A @ 2.0V, typical
- Timer1 Oscillator Current:
  - 1.2  $\mu$ A @ 32 kHz, 2.0V, typical
- Dual-speed Internal Oscillator:
  - Run-time selectable between 4 MHz and 48 kHz
  - 4  $\mu$ s wake-up from Sleep, 3.0V, typical

### Peripheral Features:

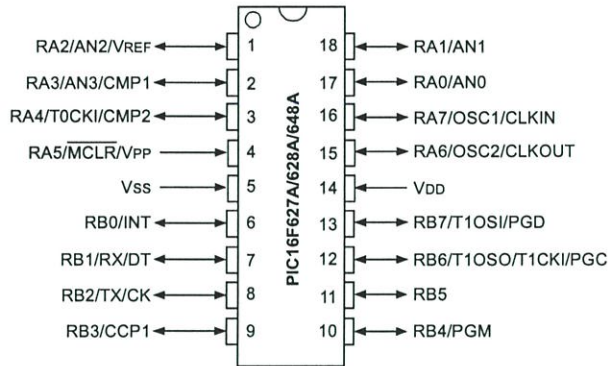
- 16 I/O pins with individual direction control
- High current sink/source for direct LED drive
- Analog comparator module with:
  - Two analog comparators
  - Programmable on-chip voltage reference (VREF) module
  - Selectable internal or external reference
  - Comparator outputs are externally accessible
- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit programmable prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with external crystal/clock capability
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period register, prescaler and postscaler
- Capture, Compare, PWM module:
  - 16-bit Capture/Compare
  - 10-bit PWM
- Addressable Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter USART/SCI

Device	Program Memory	Data Memory		I/O	CCP (PWM)	USART	Comparators	Timers 8/16-bit
	Flash (words)	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)					
PIC16F627A	1024	224	128	16	1	Y	2	2/1
PIC16F628A	2048	224	128	16	1	Y	2	2/1
PIC16F648A	4096	256	256	16	1	Y	2	2/1

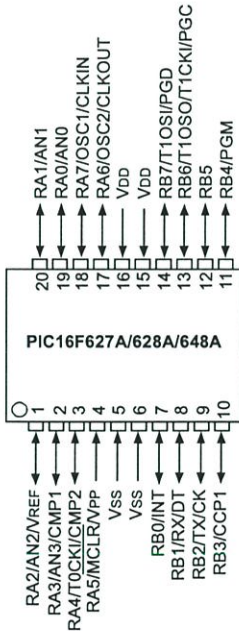
# PIC16F627A/628A/648A

## Pin Diagrams

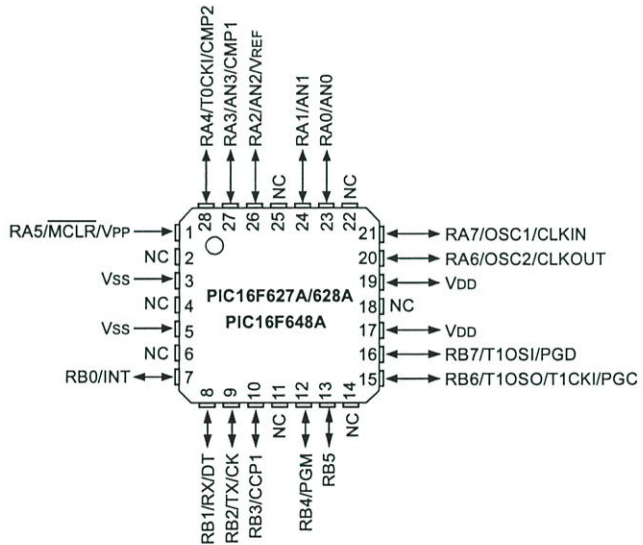
### PDIP, SOIC



### SSOP



### 28-Pin QFN



# PIC16F627A/628A/648A

## Table of Contents

1.0	General Description.....	5
2.0	PIC16F627A/628A/648A Device Varieties .....	7
3.0	Architectural Overview .....	9
4.0	Memory Organization .....	15
5.0	I/O Ports .....	31
6.0	Timer0 Module .....	45
7.0	Timer1 Module .....	48
8.0	Timer2 Module .....	52
9.0	Capture/Compare/PWM (CCP) Module .....	55
10.0	Comparator Module.....	61
11.0	Voltage Reference Module.....	67
12.0	Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (USART) Module .....	71
13.0	Data EEPROM Memory .....	89
14.0	Special Features of the CPU.....	95
15.0	Instruction Set Summary .....	115
16.0	Development Support.....	129
17.0	Electrical Specifications.....	135
18.0	DC and AC Characteristics Graphs and Tables .....	151
19.0	Packaging Information.....	163
Appendix A:	Revision History .....	169
Appendix B:	Device Differences.....	169
Appendix C:	Device Migrations - PIC16C63/65A/73A/74A → PIC16C63A/65B/73B/74B .....	170
Appendix D:	Migration from Baseline to Midrange Devices .....	170
	On-Line Support.....	171
	Reader Response .....	172
	Product Identification System .....	177

## TO OUR VALUED CUSTOMERS

It is our intention to provide our valued customers with the best documentation possible to ensure successful use of your Microchip products. To this end, we will continue to improve our publications to better suit your needs. Our publications will be refined and enhanced as new volumes and updates are introduced.

If you have any questions or comments regarding this publication, please contact the Marketing Communications Department via E-mail at [docerrors@microchip.com](mailto:docerrors@microchip.com) or fax the Reader Response Form in the back of this data sheet to (480) 792-4150. We welcome your feedback.

### Most Current Data Sheet

To obtain the most up-to-date version of this data sheet, please register at our Worldwide Web site at:

<http://www.microchip.com>

You can determine the version of a data sheet by examining its literature number found on the bottom outside corner of any page. The last character of the literature number is the version number, (e.g., DS30000A is version A of document DS30000).

### Errata

An errata sheet, describing minor operational differences from the data sheet and recommended workarounds, may exist for current devices. As device/documentation issues become known to us, we will publish an errata sheet. The errata will specify the revision of silicon and revision of document to which it applies.

To determine if an errata sheet exists for a particular device, please check with one of the following:

- Microchip's Worldwide Web site; <http://www.microchip.com>
- Your local Microchip sales office (see last page)

When contacting a sales office, please specify which device, revision of silicon and data sheet (include literature number) you are using.

### Customer Notification System

Register on our web site at [www.microchip.com](http://www.microchip.com) to receive the most current information on all of our products.

# PIC16F627A/628A/648A

---

NOTES:

# PIC16F627A/628A/648A

## 1.0 GENERAL DESCRIPTION

The PIC16F627A/628A/648A are 18-pin Flash-based members of the versatile PIC16F627A/628A/648A family of low-cost, high-performance, CMOS, fully-static, 8-bit microcontrollers.

All PICmicro<sup>®</sup> microcontrollers employ an advanced RISC architecture. The PIC16F627A/628A/648A have enhanced core features, an eight-level deep stack, and multiple internal and external interrupt sources. The separate instruction and data buses of the Harvard architecture allow a 14-bit wide instruction word with the separate 8-bit wide data. The two-stage instruction pipeline allows all instructions to execute in a single-cycle, except for program branches (which require two cycles). A total of 35 instructions (reduced instruction set) are available, complemented by a large register set.

PIC16F627A/628A/648A microcontrollers typically achieve a 2:1 code compression and a 4:1 speed improvement over other 8-bit microcontrollers in their class.

PIC16F627A/628A/648A devices have integrated features to reduce external components, thus reducing system cost, enhancing system reliability and reducing power consumption.

The PIC16F627A/628A/648A has 8 oscillator configurations. The single-pin RC oscillator provides a low-cost solution. The LP oscillator minimizes power consumption, XT is a standard crystal, and INTOSC is a self-contained precision two-speed internal oscillator.

The HS mode is for High-Speed crystals. The EC mode is for an external clock source.

The Sleep (Power-down) mode offers power savings. Users can wake-up the chip from Sleep through several external interrupts, internal interrupts and Resets.

A highly reliable Watchdog Timer with its own on-chip RC oscillator provides protection against software lock-up.

Table 1-1 shows the features of the PIC16F627A/628A/648A mid-range microcontroller family.

A simplified block diagram of the PIC16F627A/628A/648A is shown in Figure 3-1.

The PIC16F627A/628A/648A series fits in applications ranging from battery chargers to low power remote sensors. The Flash technology makes customizing application programs (detection levels, pulse generation, timers, etc.) extremely fast and convenient. The small footprint packages makes this microcontroller series ideal for all applications with space limitations. Low cost, low power, high performance, ease of use and I/O flexibility make the PIC16F627A/628A/648A very versatile.

### 1.1 Development Support

The PIC16F627A/628A/648A family is supported by a full-featured macro assembler, a software simulator, an in-circuit emulator, a low cost in-circuit debugger, a low cost development programmer and a full-featured programmer. A Third Party "C" compiler support tool is also available.

TABLE 1-1: PIC16F627A/628A/648A FAMILY OF DEVICES

		PIC16F627A	PIC16F628A	PIC16F648A	PIC16LF627A	PIC16LF628A	PIC16LF648A
Clock	Maximum Frequency of Operation (MHz)	20	20	20	20	20	20
	Flash Program Memory (words)	1024	2048	4096	1024	2048	4096
Memory	RAM Data Memory (bytes)	224	224	256	224	224	256
	EEPROM Data Memory (bytes)	128	128	256	128	128	256
	Timer module(s)	TMR0, TMR1, TMR2	TMR0, TMR1, TMR2	TMR0, TMR1, TMR2	TMR0, TMR1, TMR2	TMR0, TMR1, TMR2	TMR0, TMR1, TMR2
Peripherals	Comparator(s)	2	2	2	2	2	2
	Capture/Compare/PWM modules	1	1	1	1	1	1
	Serial Communications	USART	USART	USART	USART	USART	USART
	Internal Voltage Reference	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	Interrupt Sources	10	10	10	10	10	10
Features	I/O Pins	16	16	16	16	16	16
	Voltage Range (Volts)	3.0-5.5	3.0-5.5	3.0-5.5	2.0-5.5	2.0-5.5	2.0-5.5
	Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
	Packages	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP, 28-pin QFN	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP, 28-pin QFN	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP, 28-pin QFN	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP, 28-pin QFN	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP, 28-pin QFN	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP, 28-pin QFN

All PICmicro<sup>®</sup> family devices have Power-on Reset, selectable Watchdog Timer, selectable code-protect and high I/O current capability. All PIC16F627A/628A/648A family devices use serial programming with clock pin RB6 and data pin RB7.

# PIC16F627A/628A/648A

---

NOTES:

## 2.0 PIC16F627A/628A/648A DEVICE VARIETIES

A variety of frequency ranges and packaging options are available. Depending on application and production requirements, the proper device option can be selected using the information in the PIC16F627A/628A/648A Product Identification System, at the end of this data sheet. When placing orders, please use this page of the data sheet to specify the correct part number.

### 2.1 Flash Devices

Flash devices can be erased and re-programmed electrically. This allows the same device to be used for prototype development, pilot programs and production.

A further advantage of the electrically erasable Flash is that it can be erased and reprogrammed in-circuit, or by device programmers, such as Microchip's PICSTART<sup>®</sup> Plus or PRO MATE<sup>®</sup> II programmers.

### 2.2 Quick-Turnaround-Production (QTP) Devices

Microchip offers a QTP Programming Service for factory production orders. This service is made available for users who chose not to program a medium to high quantity of units and whose code patterns have stabilized. The devices are standard Flash devices, but with all program locations and configuration options already programmed by the factory. Certain code and prototype verification procedures apply before production shipments are available. Please contact your Microchip Technology sales office for more details.

### 2.3 Serialized Quick-Turnaround- Production (SQTP<sup>SM</sup>) Devices

Microchip offers a unique programming service where a few user-defined locations in each device are programmed with different serial numbers. The serial numbers may be random, pseudo-random or sequential.

Serial programming allows each device to have a unique number, which can serve as an entry-code, password or ID number.

# PIC16F627A/628A/648A

---

NOTES:

# PIC16F627A/628A/648A

## 3.0 ARCHITECTURAL OVERVIEW

The high performance of the PIC16F627A/628A/648A family can be attributed to a number of architectural features commonly found in RISC microprocessors. To begin with, the PIC16F627A/628A/648A uses a Harvard architecture in which program and data are accessed from separate memories using separate busses. This improves bandwidth over traditional Von Neumann architecture where program and data are fetched from the same memory. Separating program and data memory further allows instructions to be sized differently than 8-bit wide data word. Instruction opcodes are 14-bits wide making it possible to have all single-word instructions. A 14-bit wide program memory access bus fetches a 14-bit instruction in a single cycle. A two-stage pipeline overlaps fetch and execution of instructions. Consequently, all instructions (35) execute in a single-cycle (200 ns @ 20 MHz) except for program branches.

Table 3-1 lists device memory sizes (Flash, Data and EEPROM).

**TABLE 3-1: DEVICE MEMORY LIST**

Device	Memory		
	Flash Program	RAM Data	EEPROM Data
PIC16F627A	1024 x 14	224 x 8	128 x 8
PIC16F628A	2048 x 14	224 x 8	128 x 8
PIC16F648A	4096 x 14	256 x 8	256 x 8
PIC16LF627A	1024 x 14	224 x 8	128 x 8
PIC16LF628A	2048 x 14	224 x 8	128 x 8
PIC16LF648A	4096 x 14	256 x 8	256 x 8

The PIC16F627A/628A/648A can directly or indirectly address its register files or data memory. All Special Function Registers (SFR), including the program counter, are mapped in the data memory. The PIC16F627A/628A/648A have an orthogonal (symmetrical) instruction set that makes it possible to carry out any operation, on any register, using any addressing mode. This symmetrical nature and lack of 'special optimal situations' makes programming with the PIC16F627A/628A/648A simple yet efficient. In addition, the learning curve is reduced significantly.

The PIC16F627A/628A/648A devices contain an 8-bit ALU and working register. The ALU is a general purpose arithmetic unit. It performs arithmetic and Boolean functions between data in the working register and any register file.

The ALU is 8-bits wide and capable of addition, subtraction, shift and logical operations. Unless otherwise mentioned, arithmetic operations are two's complement in nature. In two-operand instructions, typically one operand is the working register (W register). The other operand is a file register or an immediate constant. In single operand instructions, the operand is either the W register or a file register.

The W register is an 8-bit working register used for ALU operations. It is not an addressable register.

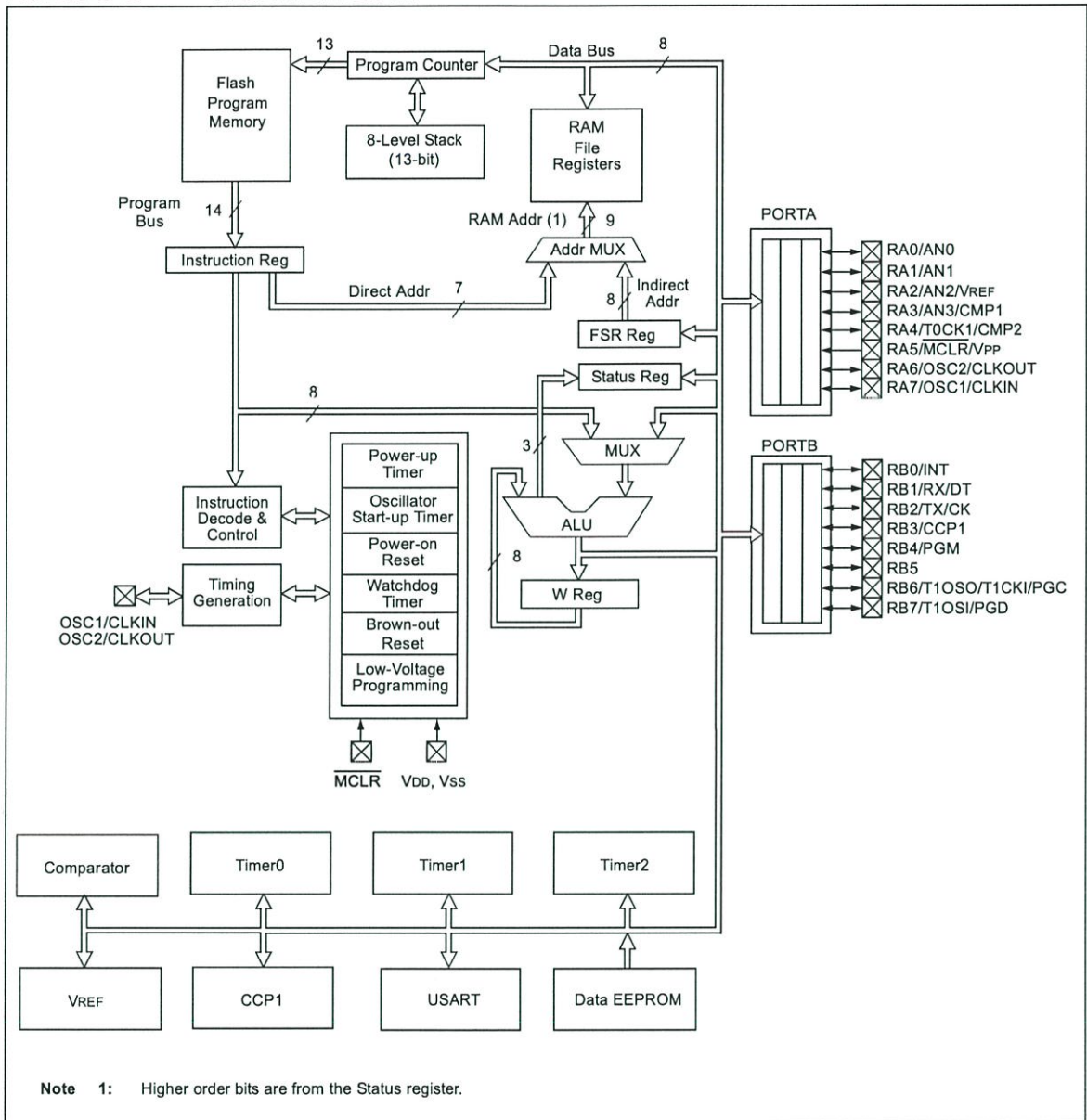
Depending on the instruction executed, the ALU may affect the values of the Carry (C), Digit Carry (DC), and Zero (Z) bits in the Status Register. The C and DC bits operate as Borrow and Digit Borrow out bits, respectively, in subtraction. See the `SUBLW` and `SUBWF` instructions for examples.

A simplified block diagram is shown in Figure 3-1, and a description of the device pins in Table 3-2.

Two types of data memory are provided on the PIC16F627A/628A/648A devices. Nonvolatile EEPROM data memory is provided for long term storage of data, such as calibration values, look-up table data, and any other data which may require periodic updating in the field. These data types are not lost when power is removed. The other data memory provided is regular RAM data memory. Regular RAM data memory is provided for temporary storage of data during normal operation. Data is lost when power is removed.

# PIC16F627A/628A/648A

FIGURE 3-1: BLOCK DIAGRAM



# PIC16F627A/628A/648A

**TABLE 3-2: PIC16F627A/628A/648A PINOUT DESCRIPTION**

Name	Function	Input Type	Output Type	Description
RA0/AN0	RA0	ST	CMOS	Bidirectional I/O port
	AN0	AN	—	Analog comparator input
RA1/AN1	RA1	ST	CMOS	Bidirectional I/O port
	AN1	AN	—	Analog comparator input
RA2/AN2/VREF	RA2	ST	CMOS	Bidirectional I/O port
	AN2	AN	—	Analog comparator input
	VREF	—	AN	VREF output
RA3/AN3/CMP1	RA3	ST	CMOS	Bidirectional I/O port
	AN3	AN	—	Analog comparator input
	CMP1	—	CMOS	Comparator 1 output
RA4/T0CKI/CMP2	RA4	ST	OD	Bidirectional I/O port
	T0CKI	ST	—	Timer0 clock input
	CMP2	—	OD	Comparator 2 output
RA5/MCLR/VPP	RA5	ST	—	Input port
	MCLR	ST	—	Master clear. When configured as MCLR, this pin is an active low Reset to the device. Voltage on MCLR/VPP must not exceed VDD during normal device operation.
	VPP	—	—	Programming voltage input
RA6/OSC2/CLKOUT	RA6	ST	CMOS	Bidirectional I/O port
	OSC2	—	XTAL	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode.
	CLKOUT	—	CMOS	In RC/INTOSC mode, OSC2 pin can output CLKOUT, which has 1/4 the frequency of OSC1.
RA7/OSC1/CLKIN	RA7	ST	CMOS	Bidirectional I/O port
	OSC1	XTAL	—	Oscillator crystal input
	CLKIN	ST	—	External clock source input. RC biasing pin.
RB0/INT	RB0	TTL	CMOS	Bidirectional I/O port. Can be software programmed for internal weak pull-up.
	INT	ST	—	External interrupt
RB1/RX/DT	RB1	TTL	CMOS	Bidirectional I/O port. Can be software programmed for internal weak pull-up.
	RX	ST	—	USART receive pin
	DT	ST	CMOS	Synchronous data I/O
RB2/TX/CK	RB2	TTL	CMOS	Bidirectional I/O port. Can be software programmed for internal weak pull-up.
	TX	—	CMOS	USART transmit pin
	CK	ST	CMOS	Synchronous clock I/O
RB3/CCP1	RB3	TTL	CMOS	Bidirectional I/O port. Can be software programmed for internal weak pull-up.
	CCP1	ST	CMOS	Capture/Compare/PWM I/O

**Legend:** O = Output                      CMOS = CMOS Output                      P = Power  
 — = Not used                      I = Input                      ST = Schmitt Trigger Input  
 TTL = TTL Input                      OD = Open Drain Output                      AN = Analog

# PIC16F627A/628A/648A

TABLE 3-2: PIC16F627A/628A/648A PINOUT DESCRIPTION (CONTINUED)

Name	Function	Input Type	Output Type	Description
RB4/PGM	RB4	TTL	CMOS	Bidirectional I/O port. Interrupt-on-pin change. Can be software programmed for internal weak pull-up.
	PGM	ST	—	Low-voltage programming input pin. When low-voltage programming is enabled, the interrupt-on-pin change and weak pull-up resistor are disabled.
RB5	RB5	TTL	CMOS	Bidirectional I/O port. Interrupt-on-pin change. Can be software programmed for internal weak pull-up.
RB6/T1OSO/T1CKI/PGC	RB6	TTL	CMOS	Bidirectional I/O port. Interrupt-on-pin change. Can be software programmed for internal weak pull-up.
	T1OSO	—	XTAL	Timer1 oscillator output
	T1CKI	ST	—	Timer1 clock input
	PGC	ST	—	ICSP™ programming clock
RB7/T1OSI/PGD	RB7	TTL	CMOS	Bidirectional I/O port. Interrupt-on-pin change. Can be software programmed for internal weak pull-up.
	T1OSI	XTAL	—	Timer1 oscillator input
	PGD	ST	CMOS	ICSP data I/O
Vss	Vss	Power	—	Ground reference for logic and I/O pins
VDD	VDD	Power	—	Positive supply for logic and I/O pins

**Legend:** O = Output  
 — = Not used  
 TTL = TTL Input

CMOS = CMOS Output  
 I = Input  
 OD = Open Drain Output

P = Power  
 ST = Schmitt Trigger Input  
 AN = Analog

# PIC16F627A/628A/648A

## 3.1 Clocking Scheme/Instruction Cycle

The clock input (RA7/OSC1/CLKIN pin) is internally divided by four to generate four non-overlapping quadrature clocks namely Q1, Q2, Q3 and Q4. Internally, the Program Counter (PC) is incremented every Q1, the instruction is fetched from the program memory and latched into the instruction register in Q4. The instruction is decoded and executed during the following Q1 through Q4. The clocks and instruction execution flow is shown in Figure 3-2.

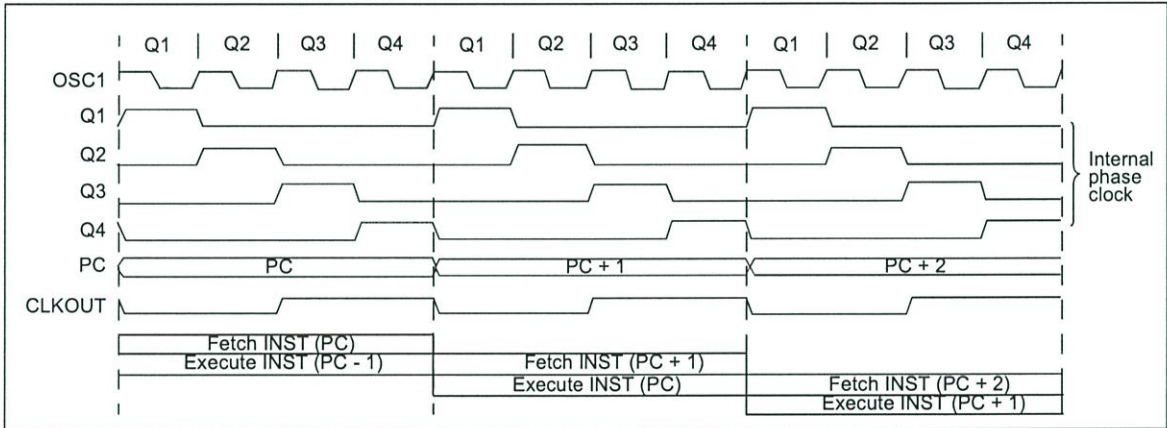
## 3.2 Instruction Flow/Pipelining

An instruction cycle consists of four Q cycles (Q1, Q2, Q3 and Q4). The instruction fetch and execute are pipelined such that fetch takes one instruction cycle while decode and execute takes another instruction cycle. However, due to the pipelining, each instruction effectively executes in one cycle. If an instruction causes the program counter to change (e.g., GOTO) then two cycles are required to complete the instruction (Example 3-1).

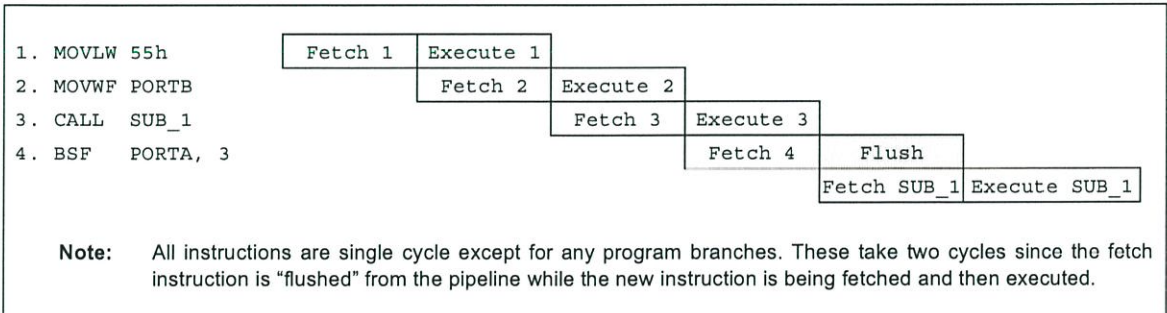
A fetch cycle begins with the program counter incrementing in Q1.

In the execution cycle, the fetched instruction is latched into the Instruction Register (IR) in cycle Q1. This instruction is then decoded and executed during the Q2, Q3 and Q4 cycles. Data memory is read during Q2 (operand read) and written during Q4 (destination write).

FIGURE 3-2: CLOCK/INSTRUCTION CYCLE



EXAMPLE 3-1: INSTRUCTION PIPELINE FLOW



# PIC16F627A/628A/648A

---

---

NOTES:

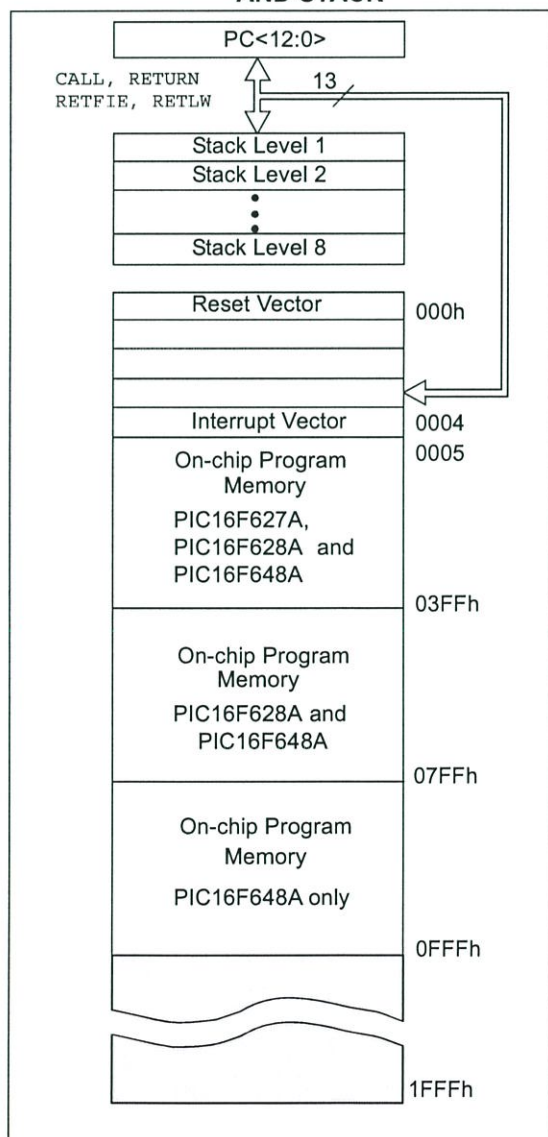
# PIC16F627A/628A/648A

## 4.0 MEMORY ORGANIZATION

### 4.1 Program Memory Organization

The PIC16F627A/628A/648A has a 13-bit program counter capable of addressing an 8K x 14 program memory space. Only the first 1K x 14 (0000h-03FFh) for the PIC16F627A, 2K x 14 (0000h-07FFh) for the PIC16F628A and 4K x 14 (0000h-0FFFh) for the PIC16F648A are physically implemented. Accessing a location above these boundaries will cause a wrap-around within the first 1K x 14 space (PIC16F627A), 2K x 14 space (PIC16F628A) or 4K x 14 space (PIC16F648A). The Reset vector is at 0000h and the interrupt vector is at 0004h (Figure 4-1).

**FIGURE 4-1: PROGRAM MEMORY MAP AND STACK**



### 4.2 Data Memory Organization

The data memory (Figure 4-2 and Figure 4-3) is partitioned into four banks, which contain the General Purpose Registers (GPRs) and the Special Function Registers (SFRs). The SFRs are located in the first 32 locations of each bank. There are General Purpose Registers implemented as static RAM in each bank. Table 4-1 lists the General Purpose Register available in each of the four banks.

**TABLE 4-1: GENERAL PURPOSE STATIC RAM REGISTERS**

	PIC16F627A/628A	PIC16F648A
Bank0	20-7Fh	20-7Fh
Bank1	A0h-FF	A0h-FF
Bank2	120h-14Fh, 170h-17Fh	120h-17Fh
Bank3	1F0h-1FFh	1F0h-1FFh

Addresses F0h-FFh, 170h-17Fh and 1F0h-1FFh are implemented as common RAM and mapped back to addresses 70h-7Fh.

Table 4-2 lists how to access the four banks of registers via the Status register bits RP1 and RP0.

**TABLE 4-2: ACCESS TO BANKS OF REGISTERS**

Bank	RP1	RP0
0	0	0
1	0	1
2	1	0
3	1	1

#### 4.2.1 GENERAL PURPOSE REGISTER FILE

The register file is organized as 224 x 8 in the PIC16F627A/628A and 256 x 8 in the PIC16F648A. Each is accessed either directly or indirectly through the File Select Register (FSR), See Section 4.4 "Indirect Addressing, INDF and FSR Registers".

# PIC16F627A/628A/648A

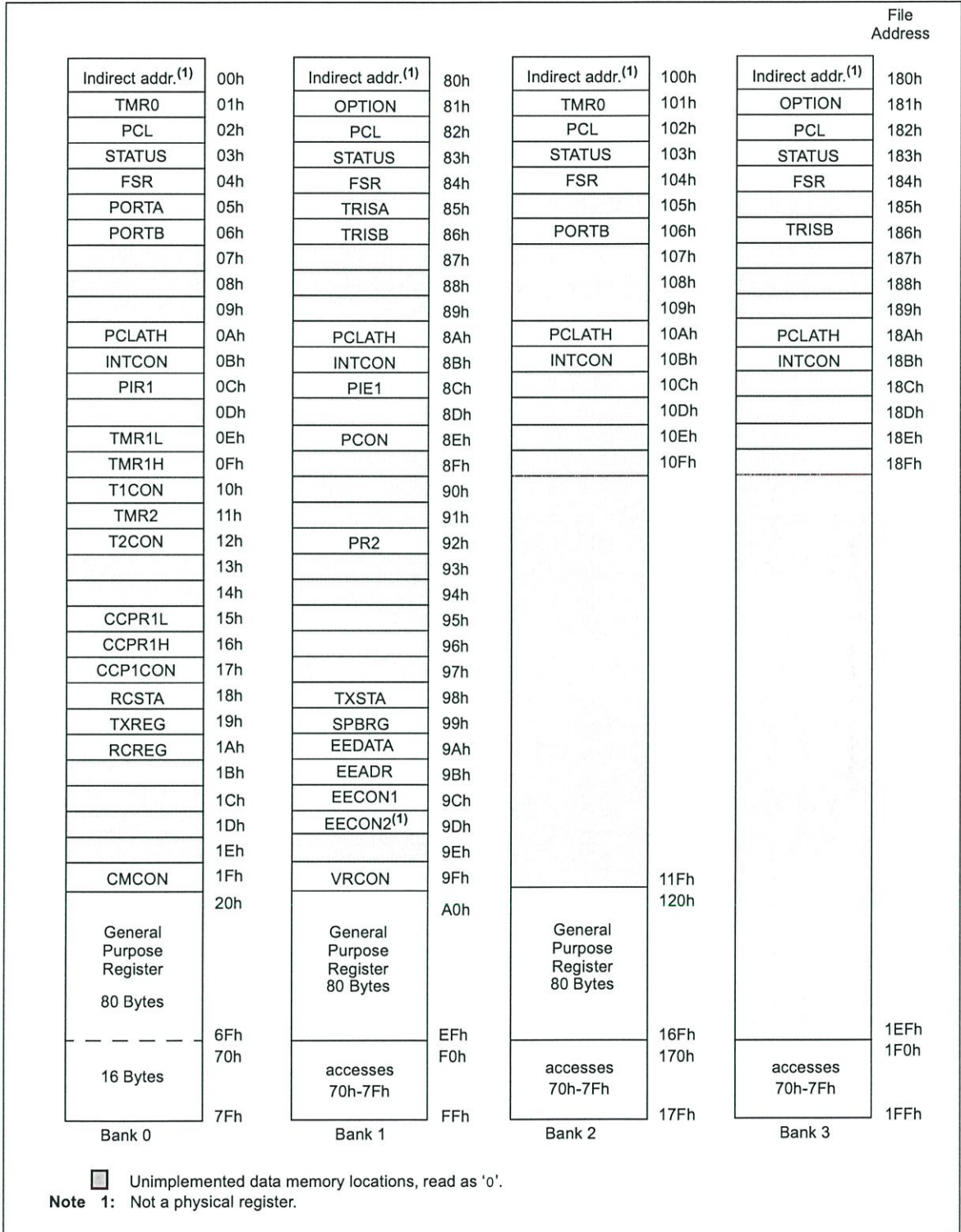
FIGURE 4-2: DATA MEMORY MAP OF THE PIC16F627A AND PIC16F628A

						File Address	
Indirect addr. <sup>(1)</sup>	00h	Indirect addr. <sup>(1)</sup>	80h	Indirect addr. <sup>(1)</sup>	100h	Indirect addr. <sup>(1)</sup>	180h
TMR0	01h	OPTION	81h	TMR0	101h	OPTION	181h
PCL	02h	PCL	82h	PCL	102h	PCL	182h
STATUS	03h	STATUS	83h	STATUS	103h	STATUS	183h
FSR	04h	FSR	84h	FSR	104h	FSR	184h
PORTA	05h	TRISA	85h		105h		185h
PORTB	06h	TRISB	86h	PORTB	106h	TRISB	186h
	07h		87h		107h		187h
	08h		88h		108h		188h
	09h		89h		109h		189h
PCLATH	0Ah	PCLATH	8Ah	PCLATH	10Ah	PCLATH	18Ah
INTCON	0Bh	INTCON	8Bh	INTCON	10Bh	INTCON	18Bh
PIR1	0Ch	PIE1	8Ch		10Ch		18Ch
	0Dh		8Dh		10Dh		18Dh
TMR1L	0Eh	PCON	8Eh		10Eh		18Eh
TMR1H	0Fh		8Fh		10Fh		18Fh
T1CON	10h		90h				
TMR2	11h		91h				
T2CON	12h	PR2	92h				
	13h		93h				
	14h		94h				
CCPR1L	15h		95h				
CCPR1H	16h		96h				
CCP1CON	17h		97h				
RCSTA	18h	TXSTA	98h				
TXREG	19h	SPBRG	99h				
RCREG	1Ah	EEDATA	9Ah				
	1Bh	EEADR	9Bh				
	1Ch	EECON1	9Ch				
	1Dh	EECON2 <sup>(1)</sup>	9Dh				
	1Eh		9Eh				
CMCON	1Fh	VRCON	9Fh		11Fh		
	20h		A0h	General Purpose Register 48 Bytes	120h		
General Purpose Register 80 Bytes		General Purpose Register 80 Bytes			14Fh		
					150h		
	6Fh		EFh		16Fh		1EFh
16 Bytes	70h	accesses 70h-7Fh	F0h	accesses 70h-7Fh	170h		1F0h
	7Fh		FFh		17Fh		1FFh
Bank 0		Bank 1		Bank 2		Bank 3	

Unimplemented data memory locations, read as '0'.  
**Note 1:** Not a physical register.

# PIC16F627A/628A/648A

**FIGURE 4-3: DATA MEMORY MAP OF THE PIC16F648A**



# PIC16F627A/628A/648A

## 4.2.2 SPECIAL FUNCTION REGISTERS

The SFRs are registers used by the CPU and Peripheral functions for controlling the desired operation of the device (Table 4-3). These registers are static RAM.

The special registers can be classified into two sets (core and peripheral). The SFRs associated with the "core" functions are described in this section. Those related to the operation of the peripheral features are described in the section of that peripheral feature.

**TABLE 4-3: SPECIAL REGISTERS SUMMARY BANK0**

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on POR Reset <sup>(1)</sup>	Details on Page
<b>Bank 0</b>											
00h	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								xxxx xxxx	28
01h	TMR0	Timer0 Module's Register								xxxx xxxx	45
02h	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	28
03h	STATUS	IRP	RP1	RP0	$\overline{TO}$	$\overline{PD}$	Z	DC	C	0001 1xxx	22
04h	FSR	Indirect Data Memory Address Pointer								xxxx xxxx	28
05h	PORTA	RA7	RA6	RA5	RA4	RA3	RA2	RA1	RA0	xxxx 0000	31
06h	PORTB	RB7	RB6	RB5	RB4	RB3	RB2	RB1	RB0	xxxx xxxx	36
07h	—	Unimplemented								—	—
08h	—	Unimplemented								—	—
09h	—	Unimplemented								—	—
0Ah	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for upper 5 bits of Program Counter					---0 0000	28
0Bh	INTCON	GIE	PEIE	TOIE	INTE	RBIE	T0IF	INTF	RBIF	0000 000x	24
0Ch	PIR1	EEIF	CMIF	RCIF	TXIF	—	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF	0000 -000	26
0Dh	—	Unimplemented								—	—
0Eh	TMR1L	Holding Register for the Least Significant Byte of the 16-bit TMR1 Register								xxxx xxxx	48
0Fh	TMR1H	Holding Register for the Most Significant Byte of the 16-bit TMR1 Register								xxxx xxxx	48
10h	T1CON	—	—	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	$\overline{T1SYNC}$	TMR1CS	TMR1ON	--00 0000	48
11h	TMR2	TMR2 Module's Register								0000 0000	52
12h	T2CON	—	TOUTPS3	TOUTPS2	TOUTPS1	TOUTPS0	TMR2ON	T2CKPS1	T2CKPS0	-000 0000	52
13h	—	Unimplemented								—	—
14h	—	Unimplemented								—	—
15h	CCPR1L	Capture/Compare/PWM Register (LSB)								xxxx xxxx	55
16h	CCPR1H	Capture/Compare/PWM Register (MSB)								xxxx xxxx	55
17h	CCP1CON	—	—	CCP1X	CCP1Y	CCP1M3	CCP1M2	CCP1M1	CCP1M0	--00 0000	55
18h	RCSTA	SPEN	RX9	SREN	CREN	ADEN	FERR	OERR	RX9D	0000 000x	72
19h	TXREG	USART Transmit Data Register								0000 0000	77
1Ah	RCREG	USART Receive Data Register								0000 0000	80
1Bh	—	Unimplemented								—	—
1Ch	—	Unimplemented								—	—
1Dh	—	Unimplemented								—	—
1Eh	—	Unimplemented								—	—
1Fh	CMCON	C2OUT	C1OUT	C2INV	C1INV	CIS	CM2	CM1	CM0	0000 0000	61

**Legend:** - = Unimplemented locations read as '0', u = unchanged, x = unknown, q = value depends on condition, shaded = unimplemented

**Note 1:** For the initialization condition for registers tables, refer to Table 14-6 and Table 14-7.

# PIC16F627A/628A/648A

**TABLE 4-4: SPECIAL FUNCTION REGISTERS SUMMARY BANK1**

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on POR Reset <sup>(1)</sup>	Details on Page
<b>Bank 1</b>											
80h	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								xxxx xxxx	28
81h	OPTION	RBP $\bar{U}$	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	23
82h	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	28
83h	STATUS	IRP	RP1	RP0	$\bar{T}O$	$\bar{P}D$	Z	DC	C	0001 1xxx	22
84h	FSR	Indirect Data Memory Address Pointer								xxxx xxxx	28
85h	TRISA	TRISA7	TRISA6	TRISA5	TRISA4	TRISA3	TRISA2	TRISA1	TRISA0	1111 1111	31
86h	TRISB	TRISB7	TRISB6	TRISB5	TRISB4	TRISB3	TRISB2	TRISB1	TRISB0	1111 1111	36
87h	—	Unimplemented								—	—
88h	—	Unimplemented								—	—
89h	—	Unimplemented								—	—
8Ah	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for upper 5 bits of Program Counter					---0 0000	28
8Bh	INTCON	GIE	PEIE	T0IE	INTE	RBIE	T0IF	INTF	RBIF	0000 000x	24
8Ch	PIE1	EEIE	CMIE	RCIE	TXIE	—	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE	0000 -000	25
8Dh	—	Unimplemented								—	—
8Eh	PCON	—	—	—	—	OSCF	—	$\bar{P}OR$	$\bar{B}OR$	---- 1-0x	27
8Fh	—	Unimplemented								—	—
90h	—	Unimplemented								—	—
91h	—	Unimplemented								—	—
92h	PR2	Timer2 Period Register								1111 1111	52
93h	—	Unimplemented								—	—
94h	—	Unimplemented								—	—
95h	—	Unimplemented								—	—
96h	—	Unimplemented								—	—
97h	—	Unimplemented								—	—
98h	TXSTA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D	0000 -010	71
99h	SPBRG	Baud Rate Generator Register								0000 0000	73
9Ah	EEDATA	EEPROM Data Register								xxxx xxxx	89
9Bh	EEADR	EEPROM Address Register								xxxx xxxx	90
9Ch	EECON1	—	—	—	—	WRERR	WREN	WR	RD	---- x000	90
9Dh	EECON2	EEPROM Control Register 2 (not a physical register)								---- ----	90
9Eh	—	Unimplemented								—	—
9Fh	VRCON	VREN	VROE	VRR	—	VR3	VR2	VR1	VR0	000- 0000	67

**Legend:** - = Unimplemented locations read as '0', u = unchanged, x = unknown, q = value depends on condition, shaded = unimplemented

**Note 1:** For the initialization condition for registers tables, refer to Table 14-6 and Table 14-7.

# PIC16F627A/628A/648A

**TABLE 4-5: SPECIAL FUNCTION REGISTERS SUMMARY BANK2**

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on POR Reset <sup>(1)</sup>	Details on Page
<b>Bank 2</b>											
100h	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								xxxx xxxx	28
101h	TMR0	Timer0 Module's Register								xxxx xxxx	45
102h	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	28
103h	STATUS	IRP	RP1	RP0	$\overline{TO}$	$\overline{PD}$	Z	DC	C	0001 1xxx	22
104h	FSR	Indirect Data Memory Address Pointer								xxxx xxxx	28
105h	—	Unimplemented								—	—
106h	PORTB	RB7	RB6	RB5	RB4	RB3	RB2	RB1	RB0	xxxx xxxx	36
107h	—	Unimplemented								—	—
108h	—	Unimplemented								—	—
109h	—	Unimplemented								—	—
10Ah	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for upper 5 bits of Program Counter				---	0000	28
10Bh	INTCON	GIE	PEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000 000x	24
10Ch	—	Unimplemented								—	—
10Dh	—	Unimplemented								—	—
10Eh	—	Unimplemented								—	—
10Fh	—	Unimplemented								—	—
110h	—	Unimplemented								—	—
111h	—	Unimplemented								—	—
112h	—	Unimplemented								—	—
113h	—	Unimplemented								—	—
114h	—	Unimplemented								—	—
115h	—	Unimplemented								—	—
116h	—	Unimplemented								—	—
117h	—	Unimplemented								—	—
118h	—	Unimplemented								—	—
119h	—	Unimplemented								—	—
11Ah	—	Unimplemented								—	—
11Bh	—	Unimplemented								—	—
11Ch	—	Unimplemented								—	—
11Dh	—	Unimplemented								—	—
11Eh	—	Unimplemented								—	—
11Fh	—	Unimplemented								—	—

**Legend:** - = Unimplemented locations read as '0', u = unchanged, x = unknown, q = value depends on condition, shaded = unimplemented.

**Note 1:** For the initialization condition for registers tables, refer to Table 14-6 and Table 14-7.

# PIC16F627A/628A/648A

**TABLE 4-6: SPECIAL FUNCTION REGISTERS SUMMARY BANK3**

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on POR Reset <sup>(1)</sup>	Details on Page
<b>Bank 3</b>											
180h	INDF	Addressing this location uses contents of FSR to address data memory (not a physical register)								xxxx xxxx	28
181h	OPTION	$\overline{\text{RBP}}\overline{\text{U}}$	INTEDG	T0CS	T0SE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	23
182h	PCL	Program Counter's (PC) Least Significant Byte								0000 0000	28
183h	STATUS	IRP	RP1	RP0	$\overline{\text{TO}}$	$\overline{\text{PD}}$	Z	DC	C	0001 1xxx	22
184h	FSR	Indirect Data Memory Address Pointer								xxxx xxxx	28
185h	—	Unimplemented								—	—
186h	TRISB	TRISB7	TRISB6	TRISB5	TRISB4	TRISB3	TRISB2	TRISB1	TRISB0	1111 1111	36
187h	—	Unimplemented								—	—
188h	—	Unimplemented								—	—
189h	—	Unimplemented								—	—
18Ah	PCLATH	—	—	—	Write Buffer for upper 5 bits of Program Counter				---	0 0000	28
18Bh	INTCON	GIE	PEIE	T0IE	INTE	RBIE	T0IF	INTF	RBIF	0000 000x	24
18Ch	—	Unimplemented								—	—
18Dh	—	Unimplemented								—	—
18Eh	—	Unimplemented								—	—
18Fh	—	Unimplemented								—	—
190h	—	Unimplemented								—	—
191h	—	Unimplemented								—	—
192h	—	Unimplemented								—	—
193h	—	Unimplemented								—	—
194h	—	Unimplemented								—	—
195h	—	Unimplemented								—	—
196h	—	Unimplemented								—	—
197h	—	Unimplemented								—	—
198h	—	Unimplemented								—	—
199h	—	Unimplemented								—	—
19Ah	—	Unimplemented								—	—
19Bh	—	Unimplemented								—	—
19Ch	—	Unimplemented								—	—
19Dh	—	Unimplemented								—	—
19Eh	—	Unimplemented								—	—
19Fh	—	Unimplemented								—	—

**Legend:** - = Unimplemented locations read as '0', u = unchanged, x = unknown, q = value depends on condition, shaded = unimplemented

**Note 1:** For the initialization condition for registers tables, refer to Table 14-6 and Table 14-7.

# ITS-90 Thermocouple Direct & Inverse Polynomials cont'd

**Type T Thermocouples** - coefficients,  $c_i$ , of reference equations giving the thermoelectric voltage,  $E$ , as a function of temperature,  $t_{90}$ , for the indicated temperature ranges. The equations are of the form:

$$E = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i$$

where  $E$  is in microvolts and  $t_{90}$  is in degrees Celsius.

Temperature Range:	-270 to 0°C	0 to 400°
$C_0 =$	0.000 000 000 0....	0.000 000 000 0....
$C_1 =$	3.874 810 636 4 x 10 <sup>1</sup>	3.874 810 636 4 x 10 <sup>1</sup>
$C_2 =$	4.419 443 434 7 x 10 <sup>-2</sup>	3.329 222 788 0 x 10 <sup>-2</sup>
$C_3 =$	1.184 432 310 5 x 10 <sup>-4</sup>	2.061 824 340 4 x 10 <sup>-4</sup>
$C_4 =$	2.003 297 355 4 x 10 <sup>-5</sup>	-2.188 225 684 6 x 10 <sup>-6</sup>
$C_5 =$	9.013 801 955 9 x 10 <sup>-7</sup>	1.099 688 092 8 x 10 <sup>-8</sup>
$C_6 =$	2.265 115 659 3 x 10 <sup>-8</sup>	-3.081 575 877 2 x 10 <sup>-11</sup>
$C_7 =$	3.607 115 420 5 x 10 <sup>-10</sup>	4.547 913 529 0 x 10 <sup>-14</sup>
$C_8 =$	3.849 393 988 3 x 10 <sup>-12</sup>	-2.751 290 167 3 x 10 <sup>-17</sup>
$C_9 =$	2.821 352 192 5 x 10 <sup>-14</sup>	
$C_{10} =$	1.425 159 477 9 x 10 <sup>-16</sup>	
$C_{11} =$	4.876 866 228 6 x 10 <sup>-19</sup>	
$C_{12} =$	1.079 553 927 0 x 10 <sup>-21</sup>	
$C_{13} =$	1.394 502 706 2 x 10 <sup>-24</sup>	
$C_{14} =$	7.979 515 392 7 x 10 <sup>-28</sup>	

**Type T Thermocouples** - coefficients of approximate inverse functions giving temperature,  $t_{90}$ , as a function of the thermoelectric voltage,  $E$ , in selected temperature and voltage ranges. The functions are of the form:

$$t_{90} = c_0 + c_1 E + c_2 E^2 + \dots c_i E^i$$

where  $E$  is in microvolts and  $t_{90}$  is in degrees Celsius.

Temperature Range:	-200 to 0°C	0 to 400°C
<b>Voltage Range:</b>	-5,603 to 0 $\mu$ V	0 to 20,872 $\mu$ V
$C_0 =$	0.000 000 0....	0.000 000 ....
$C_1 =$	2.594 919 2 x 10 <sup>-2</sup>	2.592 800 x 10 <sup>-2</sup>
$C_2 =$	-2.131 696 7 x 10 <sup>-7</sup>	-7.602 961 x 10 <sup>-7</sup>
$C_3 =$	7.901 869 2 x 10 <sup>-10</sup>	4.637 791 x 10 <sup>-11</sup>
$C_4 =$	4.252 777 7 x 10 <sup>-13</sup>	-2.165 394 x 10 <sup>-15</sup>
$C_5 =$	1.330 447 3 x 10 <sup>-16</sup>	6.048 144 x 10 <sup>-20</sup>
$C_6 =$	2.024 144 6 x 10 <sup>-20</sup>	-7.293 422 x 10 <sup>-25</sup>
$C_7 =$	1.266 817 1 x 10 <sup>-24</sup>	
<b>Error Range:</b>	0.04 to -0.02°C	0.03 to -0.03°C

**Type E Thermocouples** - coefficients,  $c_i$ , of reference equations giving the thermoelectric voltage,  $E$ , as a function of temperature,  $t_{90}$ , for the indicated temperature ranges. The equations are of the form:

$$E = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i$$

where  $E$  is in microvolts and  $t_{90}$  is in degrees Celsius.

Temperature Range:	-270 to 0°C	0 to 1000°C
$C_0 =$	0.000 000 000 0 ....	0.000 000 000 0 ....
$C_1 =$	5.866 550 870 8 x 10 <sup>1</sup>	5.866 550 871 0 x 10 <sup>1</sup>
$C_2 =$	4.541 097 712 4 x 10 <sup>-2</sup>	4.503 227 558 2 x 10 <sup>-2</sup>
$C_3 =$	-7.799 804 868 6 x 10 <sup>-4</sup>	2.890 840 721 2 x 10 <sup>-5</sup>
$C_4 =$	-2.580 016 084 3 x 10 <sup>-5</sup>	-3.305 689 665 2 x 10 <sup>-7</sup>
$C_5 =$	-5.945 258 305 7 x 10 <sup>-7</sup>	6.502 440 327 0 x 10 <sup>-10</sup>
$C_6 =$	-9.321 405 866 7 x 10 <sup>-9</sup>	-1.919 749 550 4 x 10 <sup>-13</sup>
$C_7 =$	-1.028 760 553 4 x 10 <sup>-10</sup>	-1.253 660 049 7 x 10 <sup>-15</sup>
$C_8 =$	-8.037 012 362 1 x 10 <sup>-13</sup>	2.148 921 756 9 x 10 <sup>-18</sup>
$C_9 =$	-4.397 949 739 1 x 10 <sup>-15</sup>	-1.438 804 178 2 x 10 <sup>-21</sup>
$C_{10} =$	-1.641 477 635 5 x 10 <sup>-17</sup>	3.596 089 948 1 x 10 <sup>-25</sup>
$C_{11} =$	-3.967 361 951 6 x 10 <sup>-20</sup>	
$C_{12} =$	-5.582 732 872 1 x 10 <sup>-23</sup>	
$C_{13} =$	-3.465 784 201 3 x 10 <sup>-28</sup>	

**Type E Thermocouples** - coefficients of approximate inverse functions giving temperature,  $t_{90}$ , as a function of the thermoelectric voltage,  $E$ , in selected temperature and voltage ranges. The functions are of the form:

$$t_{90} = c_0 + c_1 E + c_2 E^2 + \dots c_i E^i$$

where  $E$  is in microvolts and  $t_{90}$  is in degrees Celsius.

Temperature Range:	-200 to 0°C	0 to 1,000°C
<b>Voltage Range:</b>	-8,825 to 0 $\mu$ V	0 to 76,373 $\mu$ V
$C_0 =$	0.000 000 0 ....	0.000 000 0 ....
$C_1 =$	1.697 728 8 x 10 <sup>-2</sup>	1.705 703 5 x 10 <sup>-2</sup>
$C_2 =$	-4.351 497 0 x 10 <sup>-7</sup>	-2.330 175 9 x 10 <sup>-7</sup>
$C_3 =$	-1.585 969 7 x 10 <sup>-10</sup>	6.543 558 5 x 10 <sup>-12</sup>
$C_4 =$	-9.250 287 1 x 10 <sup>-14</sup>	-7.356 274 9 x 10 <sup>-17</sup>
$C_5 =$	-2.608 431 4 x 10 <sup>-17</sup>	-1.789 600 1 x 10 <sup>-21</sup>
$C_6 =$	-4.136 019 9 x 10 <sup>-21</sup>	8.403 616 5 x 10 <sup>-26</sup>
$C_7 =$	-3.403 403 0 x 10 <sup>-25</sup>	-1.373 587 9 x 10 <sup>-30</sup>
$C_8 =$	-1.156 489 0 x 10 <sup>-29</sup>	1.062 982 3 x 10 <sup>-35</sup>
$C_9 =$		-3.244 708 7 x 10 <sup>-41</sup>
<b>Error Range:</b>	0.03 to -0.01°C	0.02 to -0.02°C

# ITS-90 Thermocouple Direct & Inverse Polynomials cont'd

## Type R Thermocouples -

coefficients,  $c_i$ , of reference equations giving the thermoelectric voltage,  $E$ , as a function of temperature,  $t_{90}$ , for the indicated temperature ranges. The equations are of the form:

$$E = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i$$

where  $E$  is in microvolts and  $t_{90}$  is in degrees Celsius.

Temperature Range:	-50 to 1,064.18°C	1,064.18 to 1,664.5°C	1,664.5 to 1,768.1°C
$C_0 =$	0.000 000 000 0 ....	2.951 579 253 16 x 10 <sup>3</sup>	1.522 321 182 09 x 10 <sup>5</sup>
$C_1 =$	5.289 617 297 65 ....	-2.520 612 513 32 ....	-2.688 198 885 45 x 10 <sup>2</sup>
$C_2 =$	1.391 665 897 82 x 10 <sup>-2</sup>	1.595 645 018 65 x 10 <sup>-2</sup>	1.712 802 804 71 x 10 <sup>-1</sup>
$C_3 =$	-2.388 556 930 17 x 10 <sup>-5</sup>	-7.640 859 475 76 x 10 <sup>-6</sup>	-3.458 957 064 53 x 10 <sup>-5</sup>
$C_4 =$	3.569 160 010 63 x 10 <sup>-8</sup>	2.053 052 910 24 x 10 <sup>-9</sup>	-9.346 339 710 46 x 10 <sup>-12</sup>
$C_5 =$	-4.623 476 662 98 x 10 <sup>-11</sup>	-2.933 596 681 73 x 10 <sup>-13</sup>	
$C_6 =$	5.007 774 410 34 x 10 <sup>-14</sup>		
$C_7 =$	-3.731 058 861 91 x 10 <sup>-17</sup>		
$C_8 =$	1.577 164 823 67 x 10 <sup>-20</sup>		
$C_9 =$	-2.810 386 252 51 x 10 <sup>-24</sup>		

## Type R Thermocouples -

coefficients of approximate inverse functions giving temperature,  $t_{90}$ , as a function of the thermoelectric voltage,  $E$ , in selected temperature and voltage ranges. The functions are of the form:

$$t_{90} = c_0 + c_1 E + c_2 E^2 + \dots + c_i E^i$$

where  $E$  is in microvolts and  $t_{90}$  is in degrees Celsius.

Temperature Range:	-50°C to 250°C	250 to 1,200°C	1,064 to 1,664.5°C	1,664.5 to 1,768.1°C
Voltage Range:	-226 to 1,923 μV	1,923 to 13,228 μV	11,361 to 19,739 μV	19,739 to 21,103 μV
$C_0 =$	0.000 000 0 ....	1.334 584 505 x 10 <sup>1</sup>	-8.199 599 416 x 10 <sup>1</sup>	3.406 177 836 x 10 <sup>4</sup>
$C_1 =$	1.889 138 0 x 10 <sup>-1</sup>	1.472 644 573 x 10 <sup>-1</sup>	1.553 962 042 x 10 <sup>-1</sup>	-7.023 729 171 ....
$C_2 =$	-9.383 529 0 x 10 <sup>-5</sup>	-1.844 024 844 x 10 <sup>-5</sup>	-8.342 197 663 x 10 <sup>-6</sup>	5.582 903 813 x 10 <sup>-4</sup>
$C_3 =$	1.306 861 9 x 10 <sup>-7</sup>	4.031 129 x 726 10 <sup>-9</sup>	4.279 433 549 x 10 <sup>-10</sup>	-1.952 394 635 x 10 <sup>-8</sup>
$C_4 =$	-2.270 358 0 x 10 <sup>-10</sup>	-6.249 428 360 x 10 <sup>-13</sup>	-1.191 577 910 x 10 <sup>-14</sup>	2.560 740 231 x 10 <sup>-13</sup>
$C_5 =$	3.514 565 9 x 10 <sup>-13</sup>	6.468 412 046 x 10 <sup>-17</sup>	1.492 290 091 x 10 <sup>-19</sup>	
$C_6 =$	-3.895 390 0 x 10 <sup>-16</sup>	-4.458 750 426 x 10 <sup>-21</sup>		
$C_7 =$	2.823.947 1 x 10 <sup>-19</sup>	1.994 710 146 x 10 <sup>-25</sup>		
$C_8 =$	-1.260 728 1 x 10 <sup>-22</sup>	-5.313 401 790 x 10 <sup>-30</sup>		
$C_9 =$	3.135 361 1 x 10 <sup>-26</sup>	6.481 976 217 x 10 <sup>-35</sup>		
$C_{10} =$	-3.318 776 9 x 10 <sup>-30</sup>			
<b>Error Range:</b>	0.02 to -0.02°C	0.005 to -0.005°C	0.001 to -0.0005°C	0.002 to -0.001°C

## Type S Thermocouples -

coefficients,  $c_i$ , of reference equations giving the thermoelectric voltage,  $E$ , as a function of temperature,  $t_{90}$ , for the indicated temperature ranges. The equations are of the form:

$$E = \sum_{i=0}^n c_i (t_{90})^i$$

where  $E$  is in microvolts and  $t_{90}$  is in degrees Celsius.

Temperature Range:	-50 to 1,064.18°C	1,064.18 to 1,664.5°C	1,664.5 to 1,768.1°C
$C_0 =$	0.000 000 000 0 ....	1.329 004 450 85 x 10 <sup>3</sup>	1.466 282 326 36 x 10 <sup>5</sup>
$C_1 =$	5.403 133 086 31....	3.345 093 113 44 ....	-2.584 305 167 52 x 10 <sup>2</sup>
$C_2 =$	1.259 342 897 40 x 10 <sup>-2</sup>	6.548 051 928 18 x 10 <sup>-3</sup>	1.636 935 746 41 x 10 <sup>-1</sup>
$C_3 =$	-2.324 779 686 89 x 10 <sup>-5</sup>	-1.648 562 592 09 x 10 <sup>-6</sup>	-3.304 390 469 87 x 10 <sup>-5</sup>
$C_4 =$	3.220 288 230 36 x 10 <sup>-8</sup>	1.299 896 051 74 x 10 <sup>-11</sup>	-9.432 236 906 12 x 10 <sup>-12</sup>
$C_5 =$	-3.314 651 963 89 x 10 <sup>-11</sup>		
$C_6 =$	2.557 442 517 86 x 10 <sup>-14</sup>		
$C_7 =$	-1.250 688 713 93 x 10 <sup>-17</sup>		
$C_8 =$	2.714 431 761 45 x 10 <sup>-21</sup>		

## Type S Thermocouples -

coefficients of approximate inverse functions giving temperature,  $t_{90}$ , as a function of the thermoelectric voltage,  $E$ , in selected temperature and voltage ranges. The functions are of the form:

$$t_{90} = c_0 + c_1 E + c_2 E^2 + \dots + c_i E^i$$

where  $E$  is in microvolts and  $t_{90}$  is in degrees Celsius.

Temperature Range:	-50 to 250°C	250 to 1,200°C	1,064 to 1,664.5°C	1,664.5 to 1,768.1°C
Voltage Range:	-235 to 1,874 μV	1,874 to 11,950 μV	10,332 to 17,536 μV	17,536 to 18,693 μV
$C_0 =$	0.000 000 0 ....	1.291 507 177 x 10 <sup>1</sup>	-8.087 801 117 x 10 <sup>1</sup>	5.333 875 126 x 10 <sup>4</sup>
$C_1 =$	1.849 494 60 x 10 <sup>-1</sup>	1.466 298 863 x 10 <sup>-1</sup>	1.621 573 104 x 10 <sup>-1</sup>	-1.235 892 298 x 10 <sup>1</sup>
$C_2 =$	-8.005 040 62 x 10 <sup>-5</sup>	-1.534 713 402 x 10 <sup>-5</sup>	-8.536 869 453 x 10 <sup>-6</sup>	1.092 657 613 x 10 <sup>-3</sup>
$C_3 =$	1.022 374 30 x 10 <sup>-7</sup>	3.145 945 973 x 10 <sup>-9</sup>	4.719 686 976 x 10 <sup>-10</sup>	-4.265 693 686 x 10 <sup>-8</sup>
$C_4 =$	-1.522 485 92 x 10 <sup>-10</sup>	-4.163 257 839 x 10 <sup>-13</sup>	-1.441 693 666 x 10 <sup>-14</sup>	6.247 205 420 x 10 <sup>-13</sup>
$C_5 =$	1.888 213 43 x 10 <sup>-13</sup>	3.187 963 771 x 10 <sup>-17</sup>	2.081 618 890 x 10 <sup>-19</sup>	
$C_6 =$	-1.590 859 41 x 10 <sup>-16</sup>	-1.291 637 500 x 10 <sup>-21</sup>		
$C_7 =$	8.230 278 80 x 10 <sup>-20</sup>	2.183 475 087 x 10 <sup>-26</sup>		
$C_8 =$	-2.341 819 44 x 10 <sup>-23</sup>	-1.447 379 511 x 10 <sup>-31</sup>		
$C_9 =$	2.797 862 60 x 10 <sup>-27</sup>	8.211 272 125 x 10 <sup>-36</sup>		
<b>Error Range:</b>	0.02 to -0.02°C	0.01 to -0.01°C	0.0002 to -0.0002°C	0.002 to -0.002°C