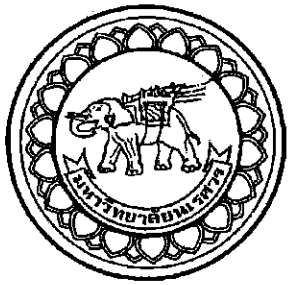


เครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

AUTOMATED GAS CONTROLLER

นายศิริชัย หอมนาน รหัส 46361770

นายทวีศักดิ์ บุญแก่น รหัส 46363214

นางสาวนารีรัตน์ สวาสดิ์วงศ์ รหัส 46363297

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ...../...../.....
เลขทะเบียน.....1500 7752
เลขเรียกหนังสือ.....วิ.ต.ท452ด.
มหาวิทยาลัยนเรศวร
2549

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2549

ใบรับรองโครงงานวิศวกรรม

หัวข้อโครงงาน	**เครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส**		
ผู้ดำเนินโครงงาน	**นายศิริชัย**	**หอมนาน**	**รหัส 46361770**
	นายทวีศักดิ์	บุญแก่น	รหัส 46363214
	นางสาวนารีรัตน์	สวาสดิ์วงศ์	รหัส 46363297
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร. สมยศ	เกียรติวนิชวิไล	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2549		

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะกรรมการสอบโครงงานวิศวกรรม

.....ประธานกรรมการ
(ดร.สมยศ เกียรติวนิชวิไล)

.....กรรมการ
(ดร.ชัยรัตน์ พินทอง)

.....กรรมการ
(อาจารย์ปิยดนัย ภาชนะพรรณ์)

หัวข้อโครงงาน	เครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส		
ผู้ดำเนินโครงงาน	นายศิริชัย	หอมนาน	รหัส 46361770
	นายทวีศักดิ์	บุญแก่น	รหัส 46363214
	นางสาวนารีรัตน์	สวาสดิ์วงศ์	รหัส 46363297
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.สมยศ	เกียรติวนิชวิไล	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า		
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์		
ปีการศึกษา	2549		

บทคัดย่อ

โครงงานนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อลดต้นทุนทางด้านพลังงานของโรงงานผลิตแร่เงิน พลังงานหลักที่ใช้ในโรงงานนี้คือแก๊สหุงต้ม โครงงานนี้จึงมีความพยายามที่จะพัฒนาเครื่องควบคุมแก๊สเพื่อใช้ควบคุมการไหลของแก๊สให้เหมาะสมตามอุณหภูมิของระบบการต้มน้ำ การไหลของแก๊สที่เหมาะสมจะช่วยประหยัดพลังงานให้กับโรงงานผลิตแร่เงิน

ผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงสภาวะที่เหมาะสมระหว่างอุณหภูมิกับเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

Project Title	Automated Gas Controller		
Name	Mr. Sirichai	Homnan	ID 46361770
	Mr. Taweesak	Bunkan	ID 46363214
	Miss Nareerat	Sawatwong	ID 46363297
Project Advisor	Dr. Somyot	Kaitwanidvilai	
Major	Electrical Engineering.		
Department	Electrical and Computer Engineering.		
Academic Year	2006		

Abstract

The major purpose of this project is to save energy for the silver industry. The energy used in this industry are mainly be liquefied petroleum gas. This project attempts to develop a gas controller for controlling the appropriated gas flow according to the temperature of boiler system. The suitable flow makes the energy saving fort this industry. The results show the appropriated condition for gas controller.

กิตติกรรมประกาศ

เนื่องจากในการทำโครงงานนี้ต้องอาศัยความร่วมมือจากหลายๆฝ่าย เพื่อการทำโครงงานจึงจะประสบความสำเร็จในส่วนของผู้นำเสนอโครงงานต้องขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือกับผู้เสนอโครงงาน ไม่ว่าจะเป็นข้อมูล หรือจะเป็นเงินทุนที่ทางคณะได้มีส่วนสนับสนุน เพื่อที่จะได้ช่วยให้ผู้นำเสนอโครงงานได้นำเงินทุนในส่วนนี้ไปซื้ออุปกรณ์ในการทำโครงงาน

นอกจากนี้ ต้องขอขอบพระคุณท่านอาจารย์สมยศ เกียรติวนิชวิไล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่ได้คอยดูแลควบคุมในการดำเนินงาน และเป็นส่วนที่ช่วยผลักดันให้โครงงานนี้สำเร็จได้

คณะผู้จัดทำโครงงาน

นายศิริชัย หอมนาน

นายทวีศักดิ์ บุญแก่น

นางสาวนารีรัตน์ สวาสดิ์วงศ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ฉ

สารบัญรูป ..... ช

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ 1

1.3 ขอบข่ายของโครงการ 1

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ 1

1.5 แผนการดำเนินโครงการ 3

1.6 ผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

1.7 งบประมาณของโครงการ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทำงาน

2.1 Servo motor 5

2.2 หลักการทำงานของ Servo motor 6

2.3 การปรับแต่ง Servo motor 8

2.4 ตัวอย่างการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ด้วยอุปกรณ์ต่างๆ 13

2.5 การตรวจวัดความร้อน (Thermal Sensors) 15

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ 33

2.7 การเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ 40

2.8 PicBasic Pro 41

2.9 OP-AMP 42

หน้า

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 ศึกษาการทำงาน 45

3.2 ออกแบบชิ้นงาน 45

3.3 การสร้างชิ้นงาน 48

3.4 การทดสอบชิ้นงาน 50

บทที่ 4 วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบแรงดันที่ออกจากตัว RTD 51

4.2 การทดสอบแรงดันขยาย 52

4.3 การทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส 53

บทที่ 5 บทสรุป

5.1 สรุป 58

5.2 ข้อเสนอแนะ 58

เอกสารอ้างอิง 59

ภาคผนวก 60

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของเทอร์มิสเตอร์ชนิด เอ็นทีซี ที่ใช้กันบ่อยๆ.....31

2.2 แสดงชื่อขา ตำแหน่งขา ชนิดขา และรายละเอียดการทำงาน
ของไมโครคอนโทรลเลอร์PIC16F877.....36

3.1 เปรียบเทียบค่าแรงดันกับเลข 10 บิต.....46

4.1 แสดงค่าอุณหภูมิตามแรงดันที่ออกมาของ RTD.....51

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบต่างๆของ Servo Motor	6
2.2	ความกว้างของสัญญาณพัลส์และจุดอ้างอิง 3 จุด	7
2.3	ชิ้นส่วนต่างๆของเซอร์โวมอเตอร์	9
2.4	แสดง TAB STOP ก่อนตัดและหลังตัดออก	10
2.5	การเปลี่ยนตัวต้านทานค่าคงที่แทนตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้	10
2.6	แสดง TAB STOP ของตัวต้านทาน	11
2.7	แสดงการควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปทางซ้าย	12
2.8	แสดงการควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปทางขวา	12
2.9	แสดงการควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์ให้หยุดหมุน	12
2.10	แสดงการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ด้วย IC 555	13
2.11	แสดงการควบคุม Servo motor ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC	14
2.12	เส้น L แสดงการประมาณค่าความต้านทานกับอุณหภูมิระหว่าง T_1และT_2	18
2.13	แสดงผลของซีแบ็ค	20
2.14	แสดงผลของเพลเทียร์	22
2.15	แสดงการเปลี่ยนจุดอ้างอิงจาก 0 ถึง 200C ซึ่งจะสมดุลกับการเลื่อนลงของเส้นโค้งแรงเคลื่อนเทอร์โมคัปเปิล	23
2.16	แสดงโครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล	24
2.17	แสดงการออกแบบโพรบเทอร์มิสเตอร์แบบต่างๆ	32
2.18	แสดงชิพที่สามารถทำการโปรแกรมได้ครั้งเดียว	33
2.19	แสดงชิพที่สามารถเขียนโปรแกรมเข้าไปแล้วสามารถลบได้โดยแสงอัลตร้าไวโอเลต	34
2.20	แสดงชิพที่สามารถอ่านหรือเขียนด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า	34
2.21	แสดงชื่อและตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877	36
2.22	สัญลักษณ์ของออปแอมป์	42
2.23	ลักษณะการต่อใช้งานของออปแอมป์	42
2.24	กราฟแสดงลักษณะแรงดันของออปแอมป์ในอุดมคติ	43
3.1	แสดงวงจรวีธสโตนบริดจ์	45
3.2	แสดงวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส	46
3.3	แผนภาพการทำงานของโปรแกรม	47
3.4	แสดงวงจรเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส	48

รูปที่ หน้า

3.5 แสดงตัววงจรที่ต่อสำเร็จ....49
3.6 แสดงสัญญาณอินพุทเข้า PIC16F877 และสัญญาณเอาท์พุทออกจาก PIC16F877 49
3.7 แสดงการทดสอบเรื่องควบคุมอุณหภูมิ....50
4.1 แสดงวิธีการทดสอบโดยปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายปรับค่าได้....52
4.2 แสดงวิธีการทดสอบโดยใช้แรงดันจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ RTD....53
4.3 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ความกว้าง 1.9 ms....54
4.4 แสดงตำแหน่งของเซอร์โวที่มุม 162 องศา....54
4.5 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ความกว้าง 1.7 ms....55
4.6 แสดงตำแหน่งของเซอร์โวที่มุม 126 องศา....55
4.7 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ความกว้าง 1.5 ms....56
4.8 แสดงตำแหน่งของเซอร์โวที่มุม 90 องศา....56
4.9 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ความกว้าง 1.2 ms....57
4.10 แสดงตำแหน่งของเซอร์โวที่มุม 54 องศา....57

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

โรงงานผลิตแร่เงินจากฟิล์มเอ็กซ์เรย์ ซึ่งมีกรรมวิธีการผลิตคร่าวๆ คือ นำฟิล์มเอ็กซ์เรย์ซึ่งมีแร่เงินเคลือบอยู่มาต้ม แล้วนำน้ำที่ได้มาจากการต้มฟิล์มไปทำการตกตะกอน ตะกอนที่ได้จะถูกนำไปตากให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปเผาเพื่อให้แยกแร่เงินออกจากตะกอนอื่นๆ ในส่วนของการต้มฟิล์มนั้น ทางโรงงานได้ใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิงในการต้ม โดยจะทำการต้มตลอดทั้งวัน ซึ่งสูญเสียค่าใช้จ่ายส่วนนี้ต่อเดือนค่อนข้างสูง ทางโรงงานจึงต้องการที่จะลดค่าใช้จ่ายส่วนนี้ลง ผู้จัดทำโครงงานจึงมีความสนใจที่จะทำอุปกรณ์ควบคุมปริมาณแก๊สให้เหมาะสม เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานและลดการใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลือง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1 เพื่อออกแบบ สร้างและทดลองเครื่องควบคุมปริมาณแก๊สที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์โดยควบคุมเซอร์โวให้บิดไปยังตำแหน่งที่กำหนดตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

1.2.2 เพื่อศึกษาสมรรถนะการทำงานของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริงของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

1.3 ขอบข่ายของโครงงาน

1.3.1 สร้างเครื่องควบคุมปริมาณแก๊สที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์โดยควบคุมเซอร์โวให้บิดไปยังตำแหน่งที่กำหนดตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

1.3.2 ทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงงาน

1.4.1 ศึกษาการทำงาน

1.4.1.1 หลักการทำงานของตัวเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

1.4.1.2 หลักการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์

1.4.1.3. หลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

1.4.1.4 หลักการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา PIC BASIC PRO

1.4.2 การออกแบบ

1.4.2.1 ออกแบบวงจรการต่อใช้งานของ RTD

1.4.2.2 ออกแบบวงจรขยายแรงดัน

1.4.2.3 ออกแบบโปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์PIC16F877

1.4.3 การสร้าง

1.4.3.1 สร้างเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

1.4.4 รวบรวมข้อมูลทั้งหมดเข้ารูปเล่มพร้อมรายงาน

1.5 แผนการดำเนินโครงงาน

กิจกรรม	ระยะเวลาดำเนินงาน								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ศึกษาการทำงาน									
หลักการทำงานของตัวเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ	←	→							
หลักการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์	←	→							
หลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์	←	→							
หลักการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา PIC BASIC PRO	←	→							
การออกแบบ									
ออกแบบวงจรการต่อใช้งานของ RTD			←	→					
ออกแบบวงจรขยายแรงดัน					←	→			
ออกแบบโปรแกรมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์PIC 16F877			←	→	→	→			
การสร้าง									
สร้างเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส							←	→	→
รวบรวมข้อมูลทั้งหมดเข้ารูปเล่มพร้อมรายงาน								←	→

1.6 ผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถออกแบบ สร้างเครื่องควบคุมปริมาณแก๊สและทดลองใช้งานจริง

1.6.2 สามารถลดการใช้พลังงานแก๊สลงได้

1.6.3 สามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานลงได้

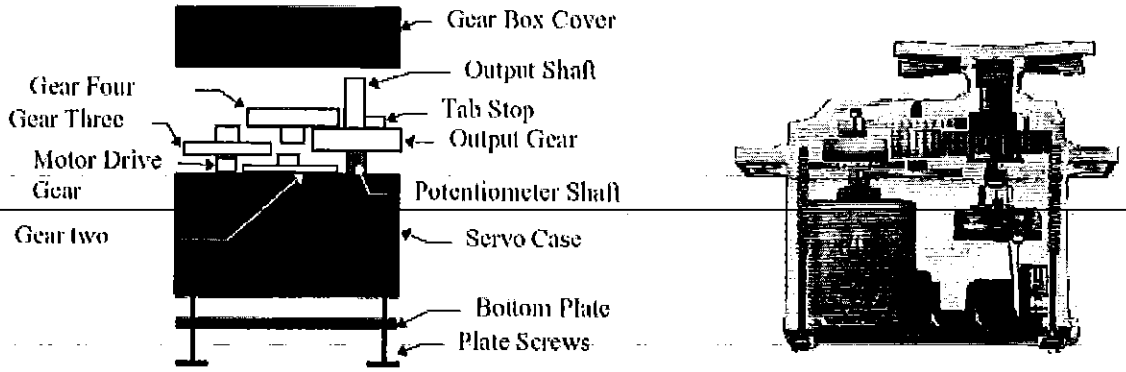
1.7 งบประมาณของโครงงาน

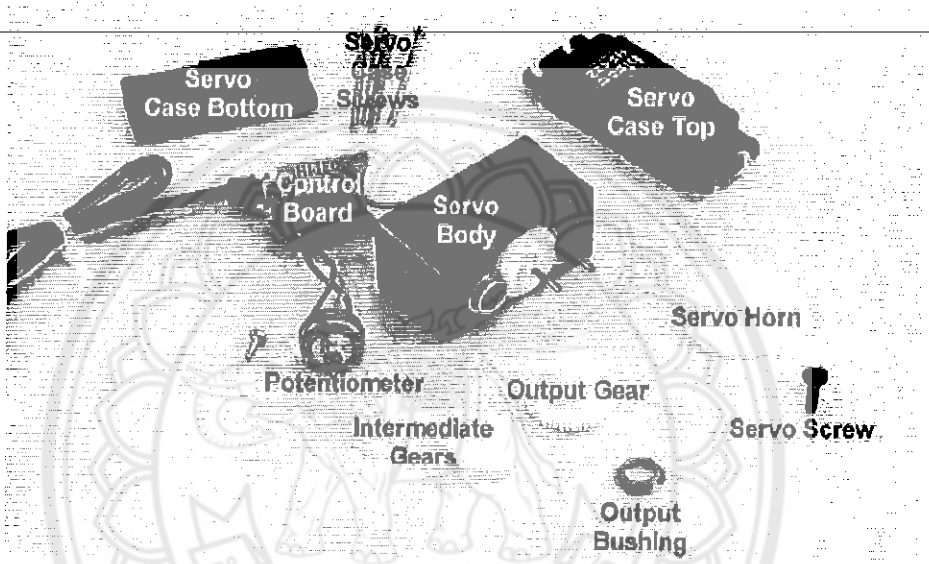
1.7.1 ค่าใช้จ่ายในการสร้างชิ้นงาน	2,000 บาท
1.7.2 ค่าถ่ายเอกสารและเข้าเล่มรายงาน	1,000 บาท
รวมเป็นเงิน	3,000 บาท (สามพันบาทถ้วน)

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการทำงาน

2.1 เซอร์โวมอเตอร์

เซอร์โวมอเตอร์ (Servo motor) คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) ที่ถูกประกอบรวมกับชุดเกียร์และส่วนควบคุมต่างๆไว้ในโมดูลเดียวกันหรือภายในกล่องพลาสติกเดียวกัน โดยมอเตอร์ชนิดนี้จะมีสายต่อใช้งานเพียง 3 เส้นเท่านั้น คือ VCC, GND และ สายสัญญาณควบคุม (Control Line) ซึ่งสามารถควบคุมให้มอเตอร์หมุนซ้ายหรือขวาได้จากสายสัญญาณเพียงเส้นเดียว โดยสัญญาณที่ใช้ควบคุมนี้จะเป็นสัญญาณพัลส์วิดมอด (PWM) แบบ TTL Level ระดับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์นี้จะอยู่ในช่วงประมาณ 4 ถึง 6 โวลต์ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมอเตอร์แต่ละตัว ข้อดีของมอเตอร์ชนิดนี้ก็คือ จะมีขนาดเล็กน้ำหนักเบา, ให้แรงบิดสูง, กินพลังงานน้อยและสามารถควบคุมด้วยแรงดันลอจิกที่เป็น TTL ได้โดยตรงไม่จำเป็นต้องต่อวงจรขับ (Driver) อื่นๆ เพราะมอเตอร์ชนิดนี้จะมีวงจรควบคุมบรรจุไว้ภายในอยู่แล้ว ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้สามารถควบคุมให้หมุนไปในตำแหน่งหรือทิศทางองศาที่ต้องการได้ โดยอาศัยสัญญาณความกว้างพัลส์ที่ป้อนให้มอเตอร์ แต่เซอร์โวมอเตอร์นี้จะหมุนได้แค่เพียงในช่วงประมาณ 180° หรือ ครึ่งรอบเท่านั้น หรือบางรุ่นอาจหมุนได้ถึง 210° แต่จะไม่สามารถหมุนเป็นวงรอบได้เนื่องจากโครงสร้างภายในจะประกอบด้วยตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ (VR) ที่ทำหน้าที่ตรวจสอบตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ และตัวต้านทานนี้จะถูกยึดติดกับแกนหมุนของมอเตอร์ ซึ่งจากการที่ตัวต้านทานปรับค่านี้ไม่สามารถหมุนเป็นวงรอบได้ ดังนั้นเซอร์โวมอเตอร์จึงถูกออกแบบให้หมุนได้เพียงแค่ประมาณ 180 องศา หรือครึ่งรอบเท่านั้น เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับตัวต้านทานปรับค่าได้ แต่ถ้าหากเราต้องการให้มอเตอร์หมุนเป็นวงรอบ (360°) นั้นก็สามารถทำได้ โดยจะต้องทำการปรับแต่ง (Modify) ดัดแปลงชิ้นส่วนบางอย่างของมอเตอร์ ซึ่งวิธีการต่างๆ จะได้กล่าวไว้ในภายหลัง

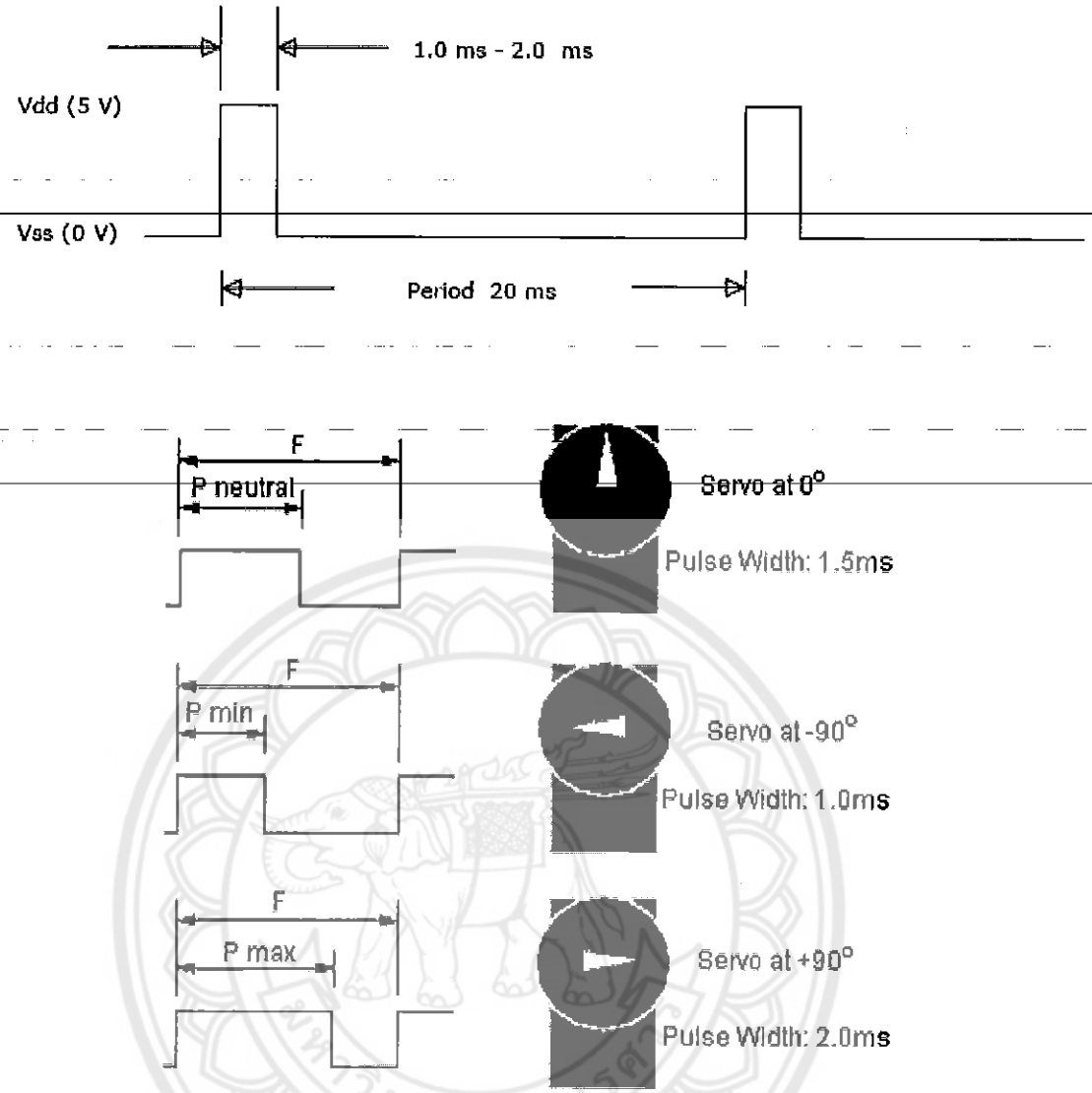




รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบต่างๆของ Servo Motor

2.2 หลักการทำงานของ Servo motor

การควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ทำได้โดยการป้อนสัญญาณความกว้างพัลส์ให้กับมอเตอร์ ซึ่งตำแหน่งและทิศทางการหมุนของมอเตอร์นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของความกว้างของพัลส์นั้น โดยทั่วไปแล้วความกว้างของสัญญาณพัลส์จะมีจุดให้อ้างอิง 3 จุด ดังรูปที่ 2.2 คือ



รูปที่ 2.2 ความกว้างของสัญญาณพัลส์และจุดอ้างอิง 3 จุด

- สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 1.5 ms จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม 0 องศา หรือจุดกึ่งกลางของมอเตอร์

- สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 1.0 ms จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม - 90 องศา หรือในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

- สัญญาณความกว้างพัลส์ขนาด 2.0 ms จะควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปอยู่ที่ตำแหน่งมุม + 90 องศา หรือในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

***หมายเหตุ** ค่าความกว้างพัลส์และระยะองศาการหมุนของมอเตอร์ที่อธิบายด้านบนนั้นเป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น ทั้งนี้ระยะการหมุนและขนาดของพัลส์ที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในแต่ละยี่ห้ออาจจะไม่เท่ากัน ดังนั้นในการใช้งานจึงควรศึกษารายละเอียดของมอเตอร์ใน

แต่ละรุ่นที่นำมาใช้ ซึ่งโดยปกติแล้วรายละเอียดต่างๆของมอเตอร์มักจะมีติดมากับตัวมอเตอร์นั้นๆ อยู่แล้ว สำหรับเซอร์โวมอเตอร์ยี่ห้อ GWS และ HITEC นั้นจะใช้ระบบเฟืองที่ต่างกันทำให้มีทิศทางการหมุนที่ต่างกันโดยจะตรงข้ามกัน เช่น ส่งสัญญาณพัลส์ 1ms มอเตอร์ GWS จะหมุนทวนเข็มนาฬิกา ส่วนมอเตอร์ของ HITEC จะหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เป็นต้น

ส่วนการที่จะควบคุมให้มอเตอร์หมุนเป็นมุมอื่นๆนั้น ก็สามารถทำได้โดยการป้อนสัญญาณพัลส์เป็นระดับความกว้างต่างๆ โดยอ้างอิงจากจุดทั้ง 3 จุดที่กล่าวมานี้ ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนไปที่มุม - 45 องศา เราก็จะต้องป้อนสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง 1.25 ms เป็นต้น และสัญญาณพัลส์นี้จะต้องจ่ายให้มอเตอร์ทุกๆ 20 ms (Period) เพื่อรักษาสภาพตำแหน่งของมอเตอร์ไว้โดยหลักการก็คือ จะอาศัยการเปรียบเทียบช่วงเวลาของความกว้างพัลส์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์ทางขาสัญญาณควบคุมกับค่าเวลาของวงจร RC ภายในบอร์ดควบคุมในตัวของมอเตอร์ ซึ่งค่าเวลาของวงจร RC นี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงตามการหมุนของมอเตอร์ เนื่องจากตัวต้านทานปรับค่าจะถูกยึดติดอยู่กับแกนหมุนของมอเตอร์ ซึ่งการหมุนของมอเตอร์จะทำให้ค่าความต้านทานของตัวต้านทานปรับค่า (VR) เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลทำให้ค่าเวลาของวงจร RC เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยในขณะที่เราป้อนสัญญาณความกว้างพัลส์ให้กับมอเตอร์ทางขาสัญญาณควบคุม สัญญาณนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าเวลาของวงจรRC หากค่าทั้ง 2 ไม่เท่ากันมอเตอร์ก็จะหมุนทำให้ค่าเวลาของวงจร RC เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งค่าเวลาความกว้างพัลส์ของ วงจร RC เปลี่ยนแปลงจนเท่ากับสัญญาณพัลส์ทางขาควบคุม (Control line) มอเตอร์จึงจะหยุดหมุน

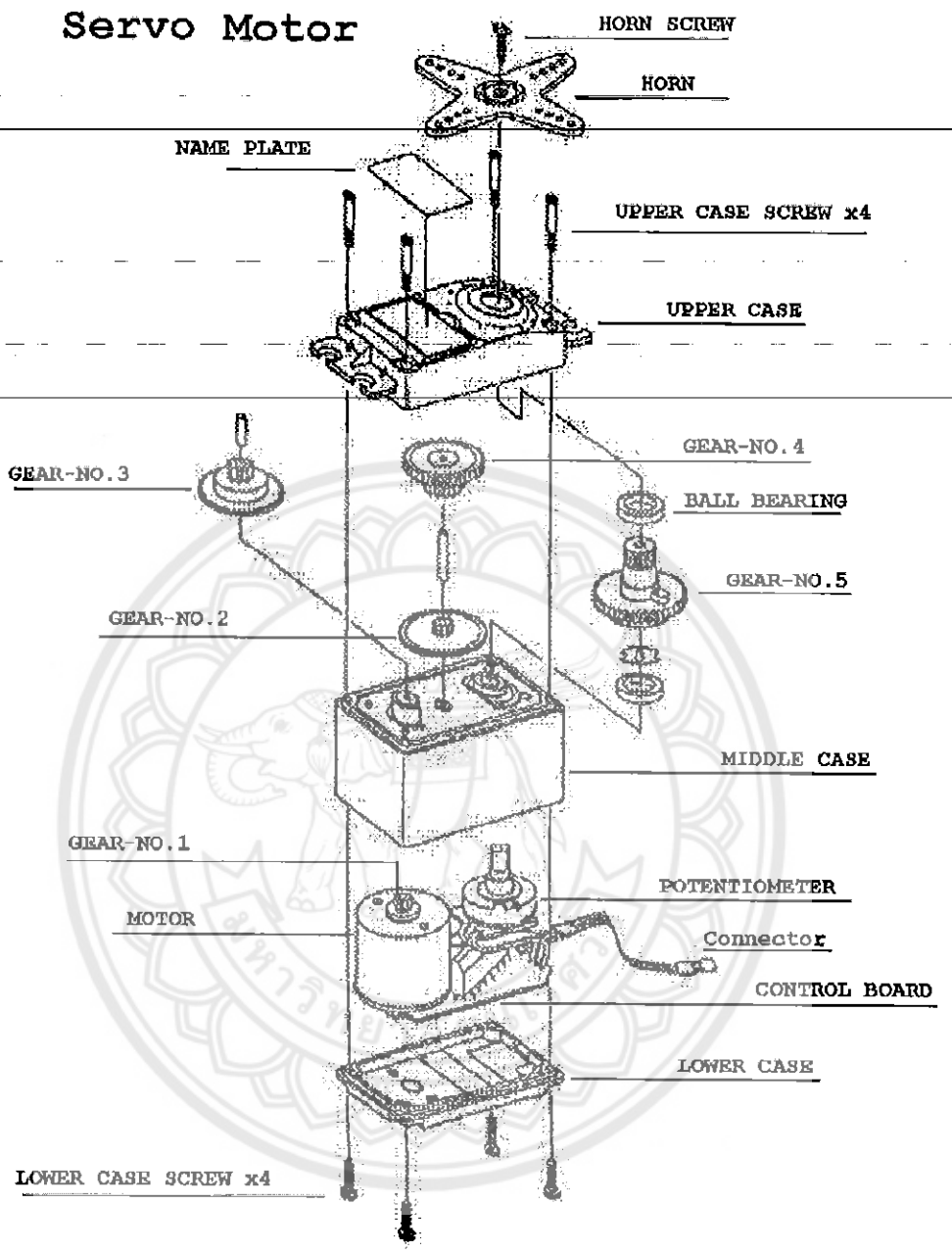
2.3 การปรับแต่งเซอร์โวมอเตอร์

จากคุณสมบัติของเซอร์โวมอเตอร์ที่ผลิตออกมาจากโรงงานจะสามารถหมุนได้แค่พียงประมาณ 180 องศาหรือประมาณครึ่งรอบเท่านั้น หากเราต้องการนำเอาเซอร์โวมอเตอร์ไปใช้งานในลักษณะที่หมุนเป็นวงรอบนั้นก็สามารถทำได้ แต่ก็จะสูญเสียการควบคุมในเรื่องของการสั่งให้มอเตอร์หมุนไปในตำแหน่งหรือมุมที่ต้องการไปด้วย จะทำได้ก็เพียงในเรื่องของการสั่งให้หมุนซ้าย ขวา และหยุด เท่านั้น โดยการทำให้มอเตอร์สามารถหมุนเป็นวงรอบได้นั้นจะต้องทำการปรับแต่งหรือแก้ไขโครงสร้างภายในบางส่วนของมอเตอร์ ซึ่งได้แก่

- การต่อตัวต้านทานคงที่ 2 ตัวอนุกรมกัน แทนตัวต้านทานปรับค่าได้
- ตัดชิ้นส่วนของแกนเฟืองที่ทำหน้าที่หยุดมอเตอร์ (TAB STOP) ออก
- การดัดแปลงตัวต้านทานปรับค่าได้ (VR) ให้สามารถหมุนได้รอบทิศทาง (360°)

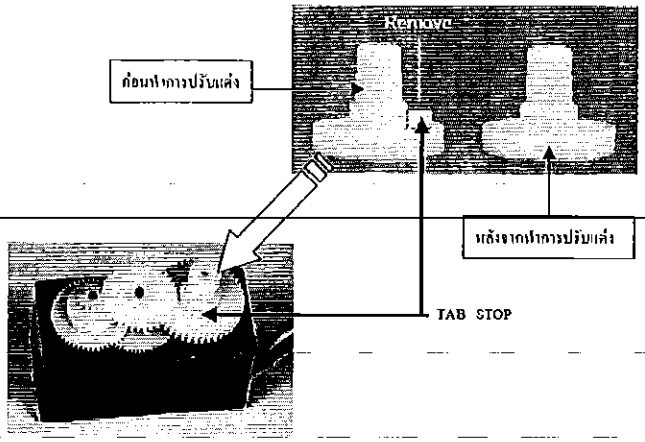
มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ถอดชิ้นส่วนของ Servo motor ออกเป็นส่วนๆ



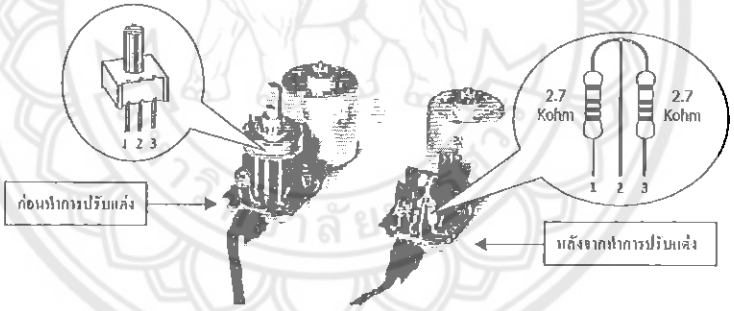
รูปที่ 2.3 ชิ้นส่วนต่างๆของเซอร์โวมอเตอร์

2. ตัดแกนที่ติดกับเฟือง (TAB STOP) ออกโดยแกนนี้มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้มอเตอร์หมุนเกินมุม 180 องศา ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับตัวต้านทานปรับค่าได้ เนื่องจากตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ไม่สามารถหมุนเป็นวงรอบได้ ดังนั้นเพื่อให้มอเตอร์หมุนเป็นวงรอบได้จึงต้องตัด TAB STOP ในส่วนนี้ออกดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดง TAB STOP ก่อนตัดและหลังตัดออก

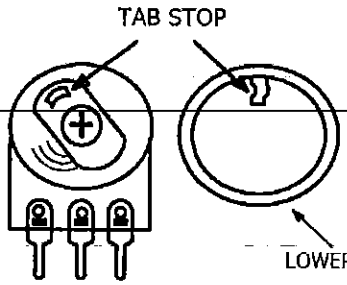
3. ถอดตัวต้านทานปรับค่าได้ (VR) ออก แล้วใส่ตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ 2 ตัวที่ต่ออนุกรมกันเข้าไปแทนในตำแหน่งของตัวต้านทานปรับค่าได้ โดยตัวต้านทานชนิดค่าคงที่ที่นำมาต่อนี้จะต้องมีค่าอยู่ในช่วง 2.2 k ถึง 3.3 k ทั้งนี้เนื่องจากตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ที่อยู่ในบอร์ดควบคุมของเซอร์โวมอเตอร์นั้นจะมีค่าความต้านทาน 5 k ดังนั้นจึงต้องนำตัวต้านทานค่าคงที่มาต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้ค่าความต้านทานใกล้เคียงกับของเดิม ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนตัวต้านทานค่าคงที่แทนตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้

4. ถึงแม้ว่าเราจะถอดตัวต้านทานปรับค่า (VR) ออกจากวงจรแล้วก็ตาม แต่เนื่องจากเรายังคงต้องใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้นี้ไปเป็นแกนหมุนของมอเตอร์อยู่ ซึ่งตัวตานทานปรับค่านี้จะไม่สามารถหมุนเป็นวงรอบได้ ทำให้เราต้องแก้ไขเปลี่ยนแปลงบางส่วนของตัวต้านทานเพื่อให้ตัวต้านทานสามารถหมุนรอบตัวเองได้ เพื่อที่จะได้ไม่ไปขัดขวางการหมุนของมอเตอร์ซึ่งทำได้โดย

- ถอดชิ้นส่วนของตัวต้านทานปรับค่าออก



รูปที่ 2.6 แสดง TAB STOP ของตัวต้านทาน

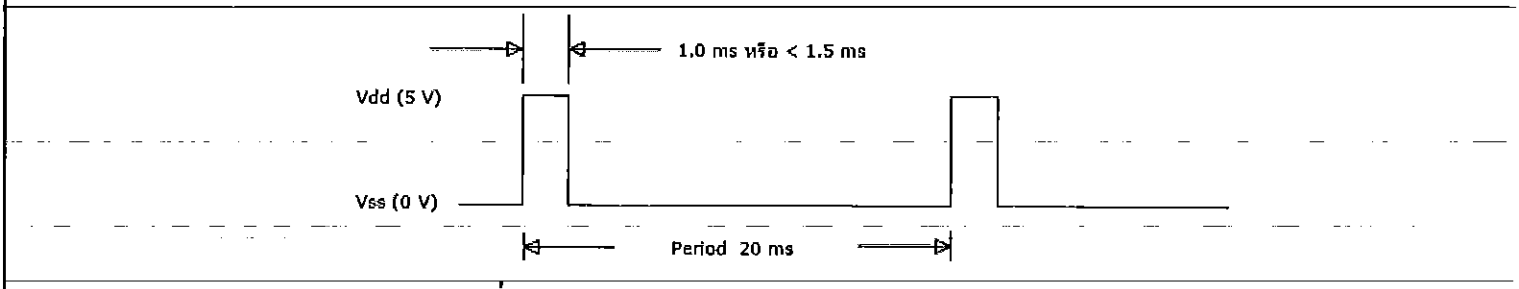
- ตัวต้านทานปรับค่าในมอเตอร์แต่ละรุ่นนั้นอาจจะใช้ไม่เหมือนกัน แต่จะมีหลักการเดียวกันโดยจะมีแท็ปที่ทำหน้าที่หยุดการหมุนของตัวต้านทานอยู่ ให้เราทำการตัดส่วนนี้ออกแล้วทดลองหมุนแกนของตัวต้านทานปรับค่า ถ้าสามารถหมุนรอบตัวเองได้ก็ทำการประกอบตัวต้านทานเข้าไว้เหมือนเดิม แต่ถ้ายังหมุนเป็นวงรอบไม่ได้ก็ให้พิจารณาดูว่ามีชิ้นส่วนใดที่ยังขัดขวางการหมุนของตัวต้านทานอยู่ เมื่อพบก็ให้เอาออกหรือทำลายได้เลยโดยไม่ต้องสนใจว่าจะทำให้ตัวต้านทานนี้พัง เพราะเราไม่ได้ใช้ประโยชน์จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานนี้อีกแล้ว นอกจากใช้เป็นแกนหมุนของเฟืองเท่านั้น

- จากนั้นตัดหรือพับขาของตัวต้านทานปรับค่า (VR) เพื่อป้องกันไม่ให้ขาของตัวต้านทานดังกล่าวไปช็อตกับแผงวงจรควบคุม

5. ประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าที่เดิม และ เพื่อความปลอดภัยในการประกอบตัวต้านทานปรับค่า (VR) ลงในกล่องของเซอร์โวมอเตอร์ควรหาฉนวนรองตรงส่วนของขาที่เป็นโลหะของตัวต้านทานด้วยเพื่อไม่ให้ไปช็อตกับส่วนอื่นๆ ในแผงวงจรควบคุม เพียงเท่านี้มอเตอร์ของเราก็จะสามารถหมุนเป็นวงรอบ 360 องศาได้แล้ว และ ในการนำไปใช้งานจะต้องระวังเรื่องของโหลดที่นำมาต่อกับมอเตอร์ เพราะหากนำมอเตอร์ไปขับ หรือ ยกโหลดที่มีน้ำหนักมากเกินไป อาจจะทำให้เกิดความเสียหายกับ เฟือง หรือ เกียร์ต่างๆ ของมอเตอร์ได้

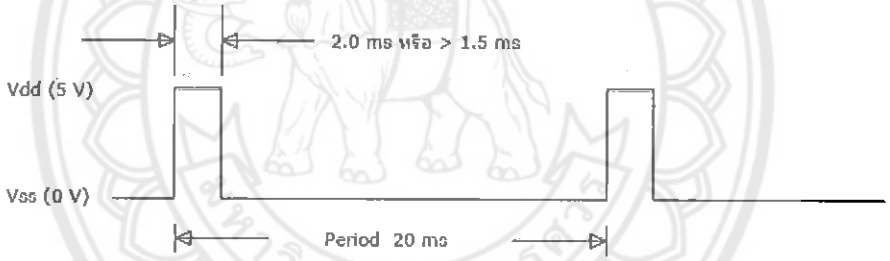
หลังจากเราได้ทำการปรับแต่งการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ให้สามารถหมุนเป็นวงรอบได้แล้ว วิธีในการควบคุมให้มอเตอร์หมุนจะมีลักษณะดังนี้

- การควบคุมให้มอเตอร์หมุนทางด้านซ้ายจะต้องป้อนสัญญาณพัลส์ที่มีขนาดความกว้างพัลส์ 1 ms หรือให้น้อยกว่า 1.5 msโดยจะต้องป้อนสัญญาณพัลส์นี้ทุกๆ 20 ms (หรือในช่วงประมาณ 20ms – 30ms)



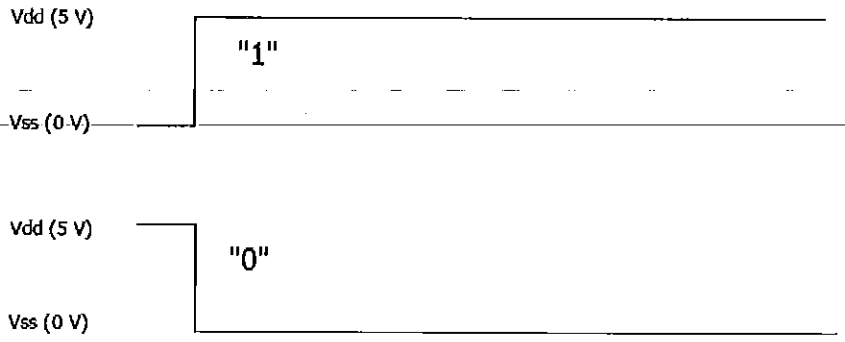
รูปที่ 2.7 แสดงการควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปทางซ้าย

- การควบคุมให้มอเตอร์หมุนทางด้านขวาจะต้องป้อนสัญญาณพัลส์ที่มีขนาดความกว้างพัลส์ 2 ms หรือไม่ต่ำกว่า 1.5 ms และจะต้องป้อนสัญญาณพัลส์นี้ทุกๆ 20 ms (หรือในช่วงประมาณ 20ms – 30ms) เช่นกัน



รูปที่ 2.8 แสดงการควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปทางขวา

- การควบคุมให้มอเตอร์หยุดหมุนทำได้โดยการส่งลอจิก "0" หรือ "1" ให้กับมอเตอร์ หรือก็คือการไม่จ่ายสัญญาณพัลส์ให้กับมอเตอร์นั่นเอง



STOP Motor

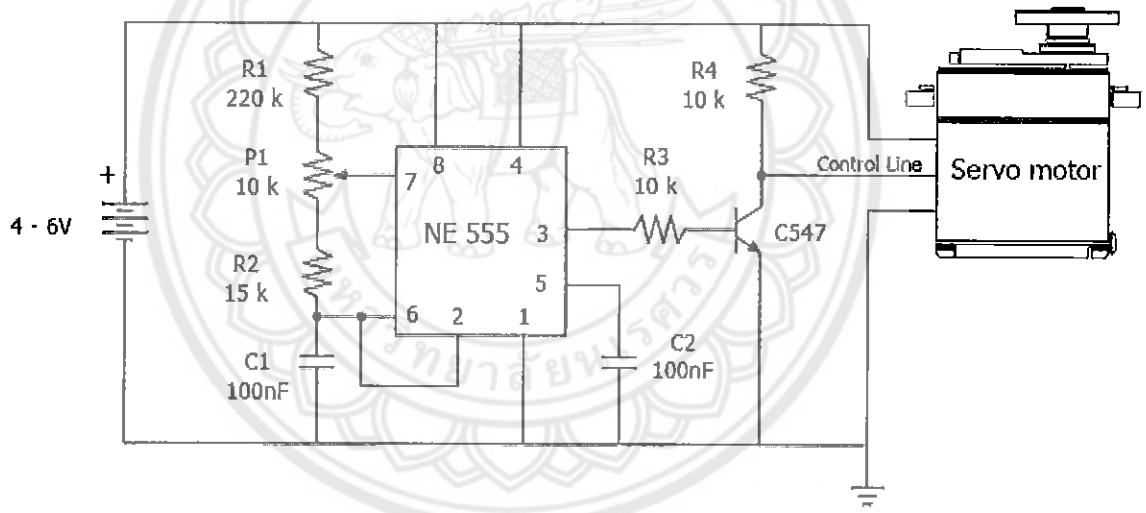
รูปที่ 2.9 แสดงการควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์ให้หยุดหมุน

2.4 ตัวอย่างการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ด้วยอุปกรณ์ต่างๆ

ในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์อาจทำได้หลายวิธีโดยใช้อุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์นั้น จะต้องอาศัยอุปกรณ์ที่สามารถสร้างสัญญาณพัลส์ในระดับต่างๆที่มอเตอร์ต้องการได้ โดยส่วนใหญ่แล้วจะพบว่าได้มีการนำเซอร์โวมอเตอร์มาใช้งานร่วมกับอุปกรณ์จำพวกไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่ก็ไม่ได้หมายความว่าจะต้องใช้อุปกรณ์เหล่านี้เสมอไป ปัจจุบันก็มีการสร้างไอซีที่ทำหน้าที่ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์โดยเฉพาะต่างๆมากมาย แม้กระทั่งไอซีพื้นฐานอย่างเช่น IC 555 ก็ยังสามารถนำมาต่อควบคุมมอเตอร์ได้เช่นกัน โดยจะกล่าวในหัวข้อต่างๆ ต่อไปนี้

2.4.1 การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ด้วย IC 555

เนื่องจากการนำเอาเซอร์โวมอเตอร์ ไปใช้ในงานบางอย่าง ซึ่งอาจจะมีเงื่อนไขการทำงานที่ไม่ซับซ้อนยุ่งยากและมีงบประมาณที่จำกัด เราก็สามารถนำ IC พื้นฐานอย่างเช่น IC 555 มาต่อควบคุมได้เช่นกัน จะช่วยให้ประหยัดต้นทุนลงได้ ดังตัวอย่างวงจรดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.10 แสดงการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ด้วย IC 555

จากวงจรเป็นการนำเอา IC 555 ซึ่งเป็นไอซีที่สามารถกำเนิดสัญญาณคาบเวลาได้ มาต่อเพื่อควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ โดยจะเป็นการต่อวงจรแบบอะสเตเบิล เราสามารถปรับค่าความกว้างพัลส์ได้จากการปรับค่าของตัวต้านทานปรับค่าได้ P1 (10k) ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 1 ms ถึง 2 ms

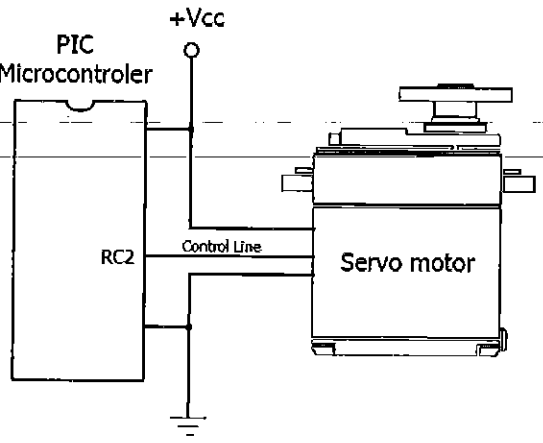
2.4.2 การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในปัจจุบันมีด้วยกันอยู่หลายตระกูล ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเซอร์โวมอเตอร์กับไมโครคอนโทรลเลอร์บางตระกูลเท่านั้น ดังนี้คือ

- PIC
- AVR
- MCS 51
- Motorola
- Z80
- BASIC STAMP

2.4.3 ตัวอย่างการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

ตัวอย่างโปรแกรมการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC เบอร์ 16F877 และ 18F458 โดยใช้บอร์ด CP-PIC V3.0 หรือ CP-PIC V4.0 ของทางบริษัทอีทีทีการควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์จะใช้หลักการสร้างสัญญาณพัลส์ขนาดความกว้างต่างๆ ส่งไปควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งในภาษาเบสิกนั้นจะใช้คำสั่ง PULSOUT Pin,Period เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์ โดยการทำงานของคำสั่งนี้ค่า Period จะเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของสัญญาณนาฬิกาที่จ่ายให้กับ CPU ทำให้คำสั่ง DEFINE OSC ไม่มีผลต่อการทำงานของคำสั่งนี้ เช่น ถ้า CPU ใช้ความถี่ 4 MHz จะทำให้หนึ่งหน่วยของค่า Period = 10 us ดังนั้นหากใช้คำสั่ง PULSOUT Pin,100 ก็จะได้ค่าเวลาเท่ากับ 100 x 10us = 1000us หรือ 1 ms แต่ในตัวอย่างโปรแกรมนี้จะใช้งาน CPU ที่ความถี่ 10 MHz ซึ่งค่าเวลาต่อหน่วยของ Period จะเท่ากับ 4 us ดังนั้นถ้าหากต้องการเวลา 1ms ค่าของ Period จะเท่ากับ 250 คือ 4us x 250 = 1000 us และ คำสั่งที่ใช้ก็จะเป็น PULSOUT Pin, 250 เป็นต้น โดยสามารถทดสอบด้วยการเปลี่ยนค่าเวลาเป็นค่าต่างๆ ดังโปรแกรม



รูปที่ 2.11 แสดงการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

ตัวอย่างโปรแกรมภาษาเบสิก

```
'/**************************************************
'/* Program          : Control  DC servo motor
'/* Filename         :  ServoMotor.bas
'/* CPU Control      : PIC 16F877  or 18F458
'/* OSC              : 10 MHz  [HS mode]
'/* Assembler        : PicBasicPro 2.41
'/**************************************************

INCLUDE "modedefs.bas"          ' Include serial modes
        TRISC = %00000000       ' PORTC is output
        LOW  PORTC.2
Loop:   PULSOUT   PORTC.1,250
        PAUSE 20
        goto  Loop
```

250 = delay 1ms : -90 (CCW)
375 = delay 1.5ms : 0
500 = delay 2ms : +90 (CW)

2.5 การตรวจวัดความร้อน (Thermal Sensors)

นิยามของอุณหภูมิ (Definition of Temperature)

2.5.1 พลังงานความร้อน (Thermal Energy)

ในวัสดุที่เป็นของแข็งแต่ละอะตอมหรือแต่ละโมเลกุลจะยึดเกาะหรือมีพันธะต่อกันอย่างแข็งแรงสภาวะดังกล่าวนี้เรียกว่า " ตำแหน่งสมดุล " (equilibrium position) อย่างไรก็ตามแต่ละอะตอมยังคงสามารถสั่นสะเทือนรอบตำแหน่งที่มันตั้งอยู่ได้ แต่ถ้าของแข็งที่ไม่มีการสั่นสะเทือนของโมเลกุล แสดงว่าพลังงานความร้อนภายในอะตอมเป็นศูนย์หรือ $W_{TH} = 0$ ตอนนี้หากเราเพิ่มพลังงานให้กับวัตถุดังกล่าวจะทำให้โมเลกุลเกิดการสั่นสะเทือนรอบๆตำแหน่งสมดุลของมัน จึงกล่าวได้ว่าขณะนี้มีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นหรือ $W_{TH} > 0$ หากเราเพิ่มพลังงานเข้าไปในวัตถุนี้อีก การสั่นสะเทือนจะเพิ่มมากขึ้น สุดท้ายสภาวะในการยึดเกาะก็จะน้อยลงและแตกออกในที่สุด แสดงว่าวัตถุดังกล่าวนี้เกิดการหลอมละลายและกำลังจะกลายเป็นของเหลว

ในกรณีของแก๊ส หากเพิ่มพลังงานความร้อนในวัตถุที่เป็นของเหลวให้มากขึ้นต่อไปอีก ความเร็วของโมเลกุลก็จะเพิ่มขึ้นจนอยู่ในสภาวะสุดท้ายทำให้เกิดช่องว่างระหว่างแต่ละโมเลกุลเต็มที่ หากถึงขั้นโมเลกุลไม่สัมผัสกันและเคลื่อนที่อย่างสุ่มๆ (Random) ในภาชนะ วัตถุดังกล่าวก็จะกลายเป็นแก๊สไปในที่สุดมีผลทำให้โมเลกุลชนกระแทกกับโมเลกุลอื่นๆรวมถึงผนังของภาชนะ

ในงานจริง วัตถุประสงค์ของการตรวจวัดความร้อน อุปกรณ์วัดความร้อนของวัตถุหรือสิ่งแวดล้อมจะอยู่ในรูปแบบที่แตกต่างกัน

2.5.2 อุณหภูมิ (Temperature)

หน่วยของการวัดพลังงานที่เหมาะสมก็คือ "จูล" (Joule) ซึ่งเป็นหน่วยในระบบ SI ค่านี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ เพราะมันจะเป็นตัวบอกปริมาณในการเก็บความร้อน ส่วนการวัดพลังงานความร้อนเฉลี่ยต่อโมเลกุลก็มีหน่วยเป็นจูลเช่นเดียวกัน

2.5.2.1 สเกลของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute Temperature Scale)

มีการใช้งาน 2 สเกลด้วยกัน คือ สเกลเคลวิน (K) และสเกลแรงคิล $(^\circ R)$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$(1K) = \frac{180}{100}(1^\circ R) = \frac{9}{5}(1^\circ R)$$

ดังนั้น การแปลงสเกล ก็จะกำหนดได้เป็น

$$T(K) = \frac{5}{9}T(^\circ R)$$

เมื่อ $T(K)$ = อุณหภูมิในหน่วย K

$T(^\circ R)$ = อุณหภูมิในหน่วย $^\circ R$

2.5.2.2 สเกลอุณหภูมิสัมพัทธ์ (Relative to Thermal Energy)

สเกลนี้คือสเกลขององศาเซลเซียส (สัมพันธ์กับองศาเคลวิน) และองศาฟาเรนไฮต์ (สัมพันธ์กับองศาเคลวิน)

$$T(^\circ C) = T(K) - 273.15$$

$$T(^\circ F) = T(R) - 459.6$$

$$T(^\circ F) = \frac{9}{5}T(^\circ C) + 32$$

ความสัมพันธ์กับพลังงานความร้อน (Relative to Thermal Energy)

$$W_{TH} = \frac{3}{2}kT$$

เมื่อ $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$ เป็นค่าคงที่ของโบลซ์มาน

2.5.3 การวัดอุณหภูมิ (Measurement of Temperature)

วิธีการวัดที่ไม่ใช่วิธีทางไฟฟ้า (Non-Electrical Methods) อาจจะอยู่บนวิธีใดวิธีหนึ่งดังต่อไปนี้

- การเปลี่ยนแปลงสถานะทางฟิสิกส์
- การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี
- การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์

โดยทั่วไปวิธีการแสดงผลของอุณหภูมิ

1 . เทอร์โมมิเตอร์แบบแท่งโลหะ (Solid Rod thermometer)

หลักการของเทอร์โมมิเตอร์แบบแท่งโลหะนี้ อยู่บนหลักการของการขยายตัวเชิงเส้นของโลหะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2 . เทอร์โมมิเตอร์แบบไบเมทัล (Bimetallic Thermometer)

เทอร์โมมิเตอร์นี้ใช้หลักการขยายตัวของของแข็ง

3 .เทอร์โมมิเตอร์แบบเติมของเหลวในหลอดแก้ว (Liquid-in-Glass Thermometer)

เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้ใช้วัดอุณหภูมิซึ่งใช้ความแตกต่างของการขยายตัวนี้เป็นตัวบอกระดับอุณหภูมิ

4. เทอร์โมมิเตอร์แบบความดัน (Pressure Thermometer)

ทำงานบนพื้นฐานการขยายตัวของของไหล อันเนื่องมาจากการเพิ่มความดันของปริมาตรที่ใช้วัดอุณหภูมิ เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้ใช้งานกันอย่างกว้างขวางในการวัดอุณหภูมิทางอุตสาหกรรม

5. เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทที่อยู่ในโลหะ (Mercury-in-steel Thermometer)

เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้มีสเกลเป็นเชิงเส้น และมีกำลังเพียงพอที่จะใช้งานกับปากกาบันทึกได้

6. เทอร์โมมิเตอร์แบบปริมาตรคงที่ (Constant Volume Thermometer)

เทอร์โมมิเตอร์แบบดังกล่าวนี้ใช้แก๊สเฉื่อย (ปกติจะเป็นไนโตรเจน) เป็นตัวทำงานแทนที่ปรอท หลักการทำงานคือ อาศัยการเพิ่มความดันของแก๊สเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ณ จุดที่ซึ่งปริมาตรคงที่

7. เทอร์โมมิเตอร์แบบความดันไอ (Vapor Pressure Thermometer)

เทอร์โมมิเตอร์แบบนี้สเกลไม่เป็นเชิงเส้น

2.5.4 การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิ

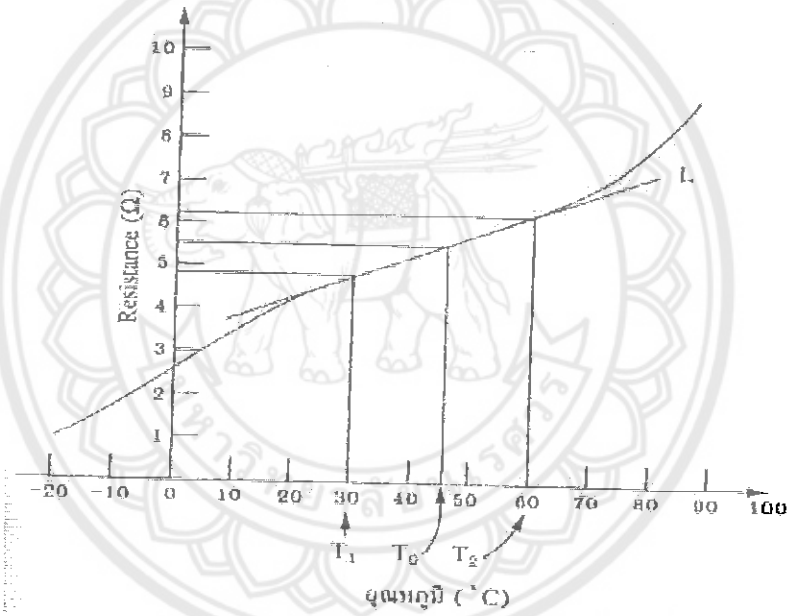
2.5.4.1 ความต้านทานของโลหะกับอุณหภูมิ (Temperature Versus Resistance of Metallic)

โลหะเกิดจาการรวมอะตอมในสถานะของแข็ง ซึ่งในแต่ละอะตอมจะมีตำแหน่งการสั่นที่ซ้อนทับกันและพลังงานความร้อนจะสมดุลกัน คุณสมบัติที่สำคัญของโลหะอยู่ที่ว่าในแต่ละ

อะตอมจะมีอิเล็กตรอน 1 ตัว เรียกว่า "วาเลนซ์อิเล็กตรอน" (valance electron) ที่สามารถเคลื่อนที่ผ่านวัตถุได้อย่างอิสระซึ่งกลายเป็นอิเล็กตรอนตัวนำ (conduction electron)

เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านวัตถุ อะตอมแต่ละตัวจะเกิดการกระแทกกับอะตอมที่อยู่กับที่ (Stationary atom) หรือโมเลกุลของวัตถุ เป็นผลทำให้เกิดพลังงานความร้อนขึ้น อะตอมก็จะสั่นและทำให้อิเล็กตรอนการนำสั่นด้วย ทำให้มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและมีการดูดกลืนพลังงานเกิดขึ้น นั่นคือ ขณะนี้วัตถุดังกล่าวจะกลายเป็นตัวต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า และจะมีการสั่นสะเทือนมากขึ้นหากได้รับความร้อนเพิ่มขึ้น

2.5.4.2 การประมาณค่าความต้านทานกับอุณหภูมิ (Resistance Versus Temperature Approximation)



รูปที่ 2.12 เส้น L แสดงการประมาณค่าความต้านทานกับอุณหภูมิระหว่าง T_1และT_2

การประมาณค่าความเป็นเชิงเส้น (Linear approximation) คือการหาค่าจากสมการเส้นตรงซึ่งพล็อตระหว่างค่าความต้านทานเทียบกับอุณหภูมิ (R-T curve) ในบางช่วงที่ต้องการ

2.5.5 ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (Resistance Temperature Detectors; RTD)

อาร์ทีดี คือ ตัวเซ็นเซอร์อุณหภูมิที่ใช้หลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะซึ่งค่าความต้านทานดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มตามอุณหภูมิ ความต้านทานของโลหะที่เพิ่มเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนี้ เรียกว่า "สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบบวก" (Positive Temperature

Coefficient; PTC) นอกจากนี้อาร์ทีดียังมีชื่อเรียกได้อีกอย่างว่า "เทอร์โมมิเตอร์แบบค่าความต้านทาน" (Resistance Temperatures)

อาร์ทีดีค้นพบในปีเดียวกับที่ซีแบ็คค้นพบปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก โดย Sir Humphry Day ซึ่งพบว่า ความต้านทานในโลหะจะมีผลตามค่าความร้อน อีก 50 ปีต่อมา Sir Willium Siemens ก็นำเอาแพลทินัมมาทำเป็นเทอร์โมมิเตอร์ และจัดให้เป็นเทอร์โมมิเตอร์แบบปฐมภูมิที่มีความแน่นอนสูง ในความเป็นจริงค่าความต้านทานของอาร์ทีดีแบบแพลทินัม (PRTD) ที่ใช้กันในทุกวันนี้จะมีการกำหนดสเกลมาตรฐานจากจุดออกซิเจน (-182.96^0 C) ถึงจุดแอนติโมนี (630.740 C) โดย IPTS

เราพบว่าความนำ (Conductivity); σ ของโลหะใดๆ จะเป็นฟังก์ชันกับค่าของอุณหภูมิ ในทางกลับกันค่าความต้านทานจำเพาะ (resistivity) ซึ่งเป็นส่วนกลับของความนำ ก็จะเปลี่ยนแปลงเกือบเป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิในย่านอุณหภูมิห้อง เช่น อะลูมิเนียม ทองแดง และเงิน จะมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 0.4% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเคลวิน ซึ่งอาจจะแสดงค่าความนำของโลหะใดๆ ได้เป็น

$$\sigma = -\rho_e \mu_e$$

เมื่อ ρ_e = ความหนาแน่นของประจุอิเล็กตรอนอิสระมีค่าเป็นลบ

μ_e = ความสามารถในการเคลื่อนที่ได้ของอิเล็กตรอน; $m/V \cdot s$

2.5.6 ชนิดของอาร์ทีดี (Type of RTD)

1. แพลทินัมเป็นแบบที่นิยมใช้มากที่สุด เขียนบอกไว้เป็น PT ได้แก่ PT-10, PT-100, PT-1000 ความสามารถในการทำซ้ำสูง แต่ความไวต่ำ ราคาแพงมากเมื่อเทียบกับนิกเกิลซึ่งมีความสามารถในการทำซ้ำน้อย แต่มีความไวมากกว่า และราคาถูกกว่า

2. ทองคำและเงิน ธาตุทั้งสองมีค่าความต้านทานจำเพาะต่ำ

3. ทังสเตนมีค่าความต้านทานจำเพาะสัมพัทธ์สูง มักใช้กับการวัดอุณหภูมิที่มีค่าสูง เพราะหากใช้ที่อุณหภูมิปกติจะมีความเปราะและยากต่อการใช้งาน

4. นิกเกิลใช้กับย่านวัดอุณหภูมิสูงๆ มีความเป็นเชิงเส้นต่ำ ทำให้เกิดค่าดริฟต์ (drift) กับเวลา นอกจากนี้ยังมีวัสดุชนิดอื่นๆ ที่ใช้ทำอาร์ทีดี ได้แก่ เหล็ก เป็นต้น

2.5.7 คุณลักษณะของอาร์ทีดี (Characteristic of RTD)

1. ความไว (Sensitivity) ความไวของอาร์ทีดีหาได้จากค่าของ α_0 พบว่าแพลทินัมจะมีค่า α = 0.00385 $\Omega/\Omega/^0$C (ประมาณ 0.004/^{0}C) ดังนั้น สำหรับแพลทินัมอาร์ทีดีแบบ 100Ω จึงเปลี่ยนค่าความต้านทานไปเพียง 0.4 Ω เท่านั้น หากอุณหภูมิเปลี่ยนไป 100^{0}C

2. ผลตอบสนองต่อเวลา (Response Time) เวลาในการตอบสนองของอาร์ทีดีเกิดจากการนำความร้อน โดยทั่วไปเวลาคงที่จะกำหนดโดยสภาวะอากาศอิสระ (หรือสภาวะใดๆ ที่สมมูลกัน)

หากว่าหากมันอยู่ในฝักป้องกัน (sheath) มันจะสัมผัสความร้อนได้ไม่ดีจึงทำให้ได้ผลตอบสนองต่อเวลาช้า

3. โครงสร้าง (Construction) แน่นอนว่าอาร์ทีดีที่มีความยาวของสายมาก จะทำให้ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิมาก

4. การปรับสภาพสัญญาณ (Sine Conditioning)

5. ค่าคงที่ในการสูญเสีย (Dissipation Constant)

6. ย่านการใช้งาน (Range) ย่านประสิทธิผลการใช้งานของอาร์ทีดีจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นอุปกรณ์แอกทีฟ พบว่า อาร์ทีดีแบบแพลทินัมจะมีย่านใช้งานจาก -100^{0}C ถึง 650^{0}C ในขณะที่อาร์ทีดีที่ทำจากนิกเกิลจะมีช่วงใช้งานจาก -180^{0}C ถึง 3000^{0}C

ข้อควรจำในการวัดอุณหภูมิโดยใช้อาร์ทีดี คือ

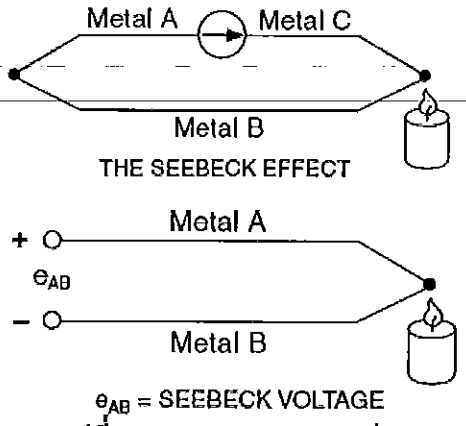
1. ต้องมีการชีลด์สายและเดินสายบิดเกลียวเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน

2. อาร์ทีดีมีความเปราะบาง จึงต้องป้องกันและระวังการใช้งาน

3. เนื่องจากที่อาร์ทีดีไม่สามารถกำเนิดพลังได้เหมือนกับเทอร์โมคัปเปิล จึงทำให้มีกระแสไหลผ่านและเกิดผลของความร้อนจูล (I^2R) กับตัวมันเอง

2.5.8 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิล คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่า "จุดวัดอุณหภูมิ" ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ค้นพบโดยโทมัส ซีแบ็ค (Thomus Seebeck) นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันในปี ค.ศ.1821 ในรูปที่ 2.13 เป็นวงจรที่ใช้อธิบายผลของซีแบ็คดังกล่าว



รูปที่ 2.13 แสดงผลของซีแบ็ค

2.5.9 ผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากความร้อน (Termoelectric Effect)

ทฤษฎีพื้นฐานของผลจากเทอร์โมอิเล็กทริก เกิดจากการส่งผ่านทางไฟฟ้าและทางความร้อนของโลหะที่ต่างกันจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าตกคร่อมที่โลหะนั้น ความต่างศักย์นี้จะสัมพันธ์กับความจริงที่ว่า อิเล็กตรอนในปลายด้านร้อนของโลหะจะมีพลังงานความร้อนมากกว่าปลายทางด้านเย็น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วไปหาปลายด้านเย็น ที่อุณหภูมิเดียวกันนี้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะแปลเปลี่ยนไปตามโลหะที่ต่างชนิดกันด้วย ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าโลหะที่ต่างกันจะมีการนำความร้อนที่ต่างกันนั่นเอง

1. ผลของซีแบ็ค (Seebeck Effect) โดยใช้ทฤษฎีโซลิดสเตต เราสามารถวิเคราะห์ค่าได้จากสมการอินทิเกรตค่าจากย่านของอุณหภูมิดังกล่าวนั่นคือ

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

สมการนี้จะอธิบายผลของซีแบ็ค ซึ่งพบว่า

- ค่า emf ที่เกิดจะเป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของอุณหภูมิ จึงเกิดความแตกต่างของค่าคงที่ในการส่งผ่านความร้อนของโลหะ
- ถ้าใช้โลหะชนิดเดียวกันมาทำเทอร์โมคัปเปิล ค่า emf ที่ได้ก็จะมีค่าเป็นศูนย์
- ถ้าอุณหภูมิทั้งสองจุดคือจุดวัดและจุดอ้างอิงเหมือนกัน ค่า emf ก็จะเป็นศูนย์

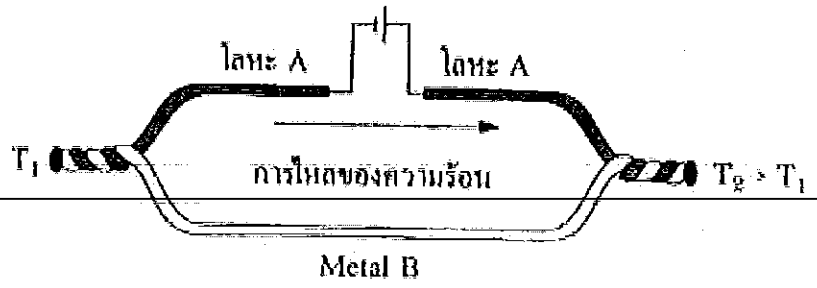
โดยสูตรที่ง่ายและสามารถนำมาคำนวณได้เช่นกันคือ

$$\varepsilon = \alpha(T_2 - T_1)$$

เมื่อ α = ค่าคงที่หรือเรียกว่าสัมประสิทธิ์ของซีแบ็ค; volts/K

T_1, T_2 = อุณหภูมิที่จุดต่อ; K

2. ผลของเพลเทียร์ (Peltier Effects) หากคิดย้อนกลับจากผลของซีแบ็ค นั่นคือใช้โลหะที่แตกต่างกันสองชนิดมาเชื่อมต่อทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วจ่ายพลังงานจากภายนอกเข้าไป ก็จะเป็นเหตุให้เกิดกระแสไหลในวงจร เพราะจากคุณสมบัติในการส่งไฟฟ้าและความร้อนของโลหะ พบว่าขั้วหนึ่งจะเกิดความร้อน (T_2) และอีกขั้วหนึ่งจะเกิดความเย็น (T_1) ขึ้น โดยผลดังกล่าวเรียกว่า "ผลของเพลเทียร์" (Peltier effect) และถูกนำไปใช้งานพิเศษสำหรับการทำความเย็นกับส่วนของระบบอิเล็กทรอนิกส์ หรือแม้กระทั่งเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก



รูปที่ 2.14 แสดงผลของเพลเทียร์

2.5.10 ตารางแสดงแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Table)

ตารางเทอร์โมคัปเปิลจะให้แรงเคลื่อนสำหรับเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด เมื่ออ้างอิงกับจุดอ้างอิงที่กำหนด (0^0C) ณ อุณหภูมิที่จุดวัดต่างๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 210^0C เทอร์โมคัปเปิลชนิด J เมื่ออ้างอิงที่ 0^0C จะมีแรงเคลื่อนเป็น

$$V\ (210^0C) = 11.3\ mV\ (\text{ชนิด J}, 0^0C\ \text{ref.})$$

ในทางกลับกันถ้าเราวัดแรงเคลื่อนได้ 4.768 mV กับชนิด S และอุณหภูมิอ้างอิงที่ 0^0C เราพบว่า

$$T\ (4.768\ mV) = 555^0C\ (\text{ชนิด S}, 0^0C\ \text{ref.})$$

แต่บางกรณี แรงเคลื่อนที่วัดได้จะไม่ตรงกับค่าในตาราง จึงจำเป็นต้องมีการแบ่งสเกล (interpole) ระหว่างค่าในตาราง ซึ่งหาได้จากสมการการแบ่งสเกลดังนี้

$$T_M = T_L + \left[\frac{T_H - T_L}{V_H - V_L}\right](V_M - V_L)$$

เมื่อ V_M = คือแรงเคลื่อนที่วัดได้จากมิเตอร์

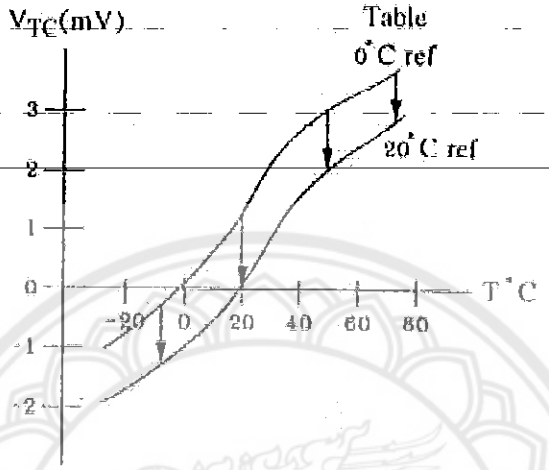
V_H และ V_L = ค่าแรงเคลื่อนของ T_H และ T_L อ่านได้จากตารางโดย V_H อยู่สูงกว่า V_M และ V_L ต่ำกว่า V_M

T_H และ T_L = ค่าอุณหภูมิที่ตรงกับค่าแรงเคลื่อน V_H และ V_L ตามลำดับ

2.5.11 การเปลี่ยนจุดอ้างอิงของตาราง (Change of Table Reference)

หากอุณหภูมิอ้างอิงแตกต่างจากตารางเทอร์โมคัปเปิลที่กำหนดไว้ เราก็ยังสามารถใช้ค่าจากตารางนี้เป็นฐานในการคำนวณได้ ข้อควรจำคือเมื่อวัดอุณหภูมิเดียวกันแต่เปลี่ยนไปใช้จุดอ้างอิงที่สูงกว่าจะทำให้แรงเคลื่อนทางเอาท์พุตถูกกดให้ต่ำลง ดังรูปที่ 2.15

เช่นนำเทอร์โมคัปเปิลชนิด J ซึ่งมีจุดอ้างอิงที่ 30 ^{0}C ไปวัดที่ 400^{0}C วิธีการหาแรงเคลื่อนใหม่ที่ได้คือ ขั้นแรกหาแรงเคลื่อน ณ อุณหภูมิที่ต้องการอ้างอิงใหม่จากตาราง ในที่นี้คือ 30^{0}C ณ จุดอ้างอิง 0^{0}C พบว่ามีแรงเคลื่อน 1.54 mV (เรียกค่าที่หาได้นี้ว่าตัวประกอบ) หลังจากนั้นก็นำค่านี้ไปลบออกจากแรงเคลื่อนที่จุดวัดที่ 400 ^{0}C เมื่อจุดอ้างอิงเป็น 0^{0}C หรือเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังนี้



รูปที่ 2.15 แสดงการเปลี่ยนจุดอ้างอิงจาก 0 ถึง 200C ซึ่งจะสมดุลกับการเลื่อนลงของเส้นโค้งแรงเคลื่อนเทอร์โมคัปเปิล

V(30^{0}C) = 1.54 mV (ชนิด J , 0^{0}C ref.) ขั้นแรก

และ V(400^{0}C) = 21.85 mV (ชนิด J , 0^{0}C ref.) ขั้นที่สอง

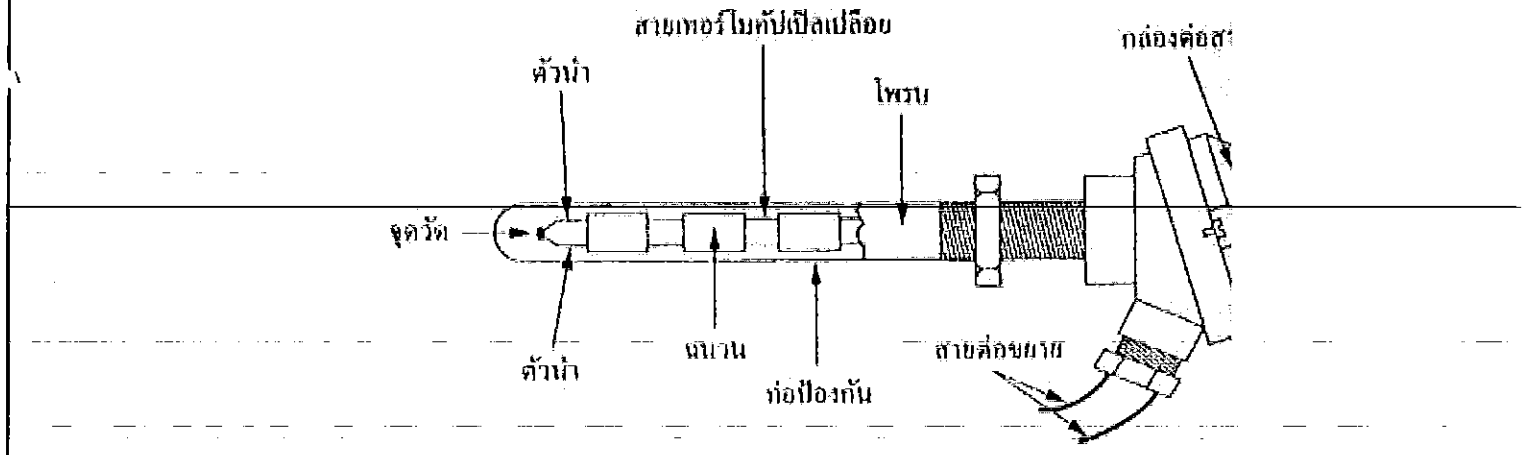
นำค่า (ตัวประกอบ) ที่ได้จากขั้นที่สองมาลบออกจากขั้นแรก ทำให้ได้แรงเคลื่อนซึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างนี้เป็น

V(400^{0}C) = 20.31 mV (ชนิด J ,30^{0}C ref.)

เพื่อหลีกเลี่ยงความสับสนของจุดอ้างอิงจะเขียนในแบบใหม่ เช่น V_{j0} จะหมายถึงแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลชนิด J อ้างอิงที่ 0 ^{0}C และ V_{j30} หมายถึงของชนิด J อ้างอิงที่ 30^{0}C

2.5.12 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน (Characteristic of Standard Thermocouples)

1. ความไว (Sensitivity) จากตารางแรงเคลื่อนของ NBS แสดงว่าย่านของแรงเคลื่อนจากเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าน้อยกว่า 100 mV แต่ความไวที่แท้จริงในการใช้งานจะขึ้นอยู่กับการใช้วงจรปรับสภาพสัญญาณและตัวเทอร์โมคัปเปิลเอง



รูปที่ 2.16 แสดงโครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิล

2. โครงสร้าง (Construction) โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะดังรูปที่ 2.16 โดยต้องมีลักษณะดังนี้คือ: มีความต้านทานต่ำ ให้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่อุณหภูมิสูงๆ ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่นำไปใช้วัดค่า และเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัวฝักหรือท่อป้องกันส่วนมากจะทำจากแสตนเลส ความไวของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับความหนาของท่อป้องกันทั้งเยอรมันเนียมและซิลิคอนจะทำให้คุณสมบัติการเกิดเทอโมอิเล็กทริกจึงใช้กันมากในอุปกรณ์ทำความเย็น (peltier element) มากกว่าที่จะใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ

ขนาดของสายเทอร์โมคัปเปิลกำหนดได้จากการใช้งานแต่ละอย่าง และมีขนาดจาก #10 ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่คงที่ จนถึงขนาด # 30 หรือแม้กระทั่ง 0.02 mm ซึ่งเป็นสายแบบไมโครไวร์ (microwire) ที่ใช้กับการวัดอุณหภูมิการกลั่นในงานทางชีววิทยา

3. ย่านการใช้งาน (Range) ย่านอุณหภูมิการใช้งานและความไวในการวัดของเทอร์โมคัปเปิล แต่ละตัว จะแตกต่างกันตามแต่ละสมาคมจะกำหนด ในส่วนที่สำคัญคือค่าแรงเคลื่อนที่ออกมาจากแต่ละอุณหภูมิ จะต้องอ้างอิงกับตารางค่ามาตรฐานของแต่ละสมาคมที่ใช้ให้ถูกต้องเป็นเอกภาพเดียวกันหมดทั้งระบบ

4. เวลาตอบสนอง (Time Response) เวลาตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับขนาดของสายและวัสดุที่นำมาทำท่อป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล

5. การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) ปกติแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลจะมีขนาดน้อยมากจึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ขยายความแตกต่างที่มีอัตราขยายสูงๆ

150077๗ ปง. ต่45วต 2547

2.5.13 การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน (Characteristic in Application of Thermocouple Standard Type)

ในปัจจุบัน พบว่ามีเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานอยู่ 7 ชนิดตามมาตรฐานของ ANSI และ ASTM โดยการจำแนกตามประเภทของวัสดุที่ใช้ทำ ได้แก่

1. เทอร์โมคัปเปิลแบบ S ประดิษฐ์โดยนาย Le Chatelier ในปี 1886

ข้อดีของแบบ S

- เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่เกิดปฏิกิริยาเคมีแบบออกซิไดซิง (Oxidizing)
- เหมาะกับการใช้งานในสภาวะงานเฉื่อย (Inert) คืองานที่ไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาใดๆได้ง่าย
- นิยมใช้กับงานวัดตัวแปรที่มีอุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมเหล็ก
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง1550^{0}C และอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วงประมาณ- 50 ถึงประมาณ 1700^{0}C
- หากอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะให้ความเที่ยงตรงสูงที่สุด
- ใช้ในการสอบเทียบ ตั้งแต่จุดแข็งตัวของแอนติโมนี (630.74^{0}C) จนถึงจุดแข็งตัวของทองแดง (1064.43^{0}C) ตามมาตรฐาน IPTS 68

ข้อเสียของแบบ S

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

2. เทอร์โมคัปเปิลแบบ R เป็นแบบที่เหมาะกับการวัดอุณหภูมิสูง ๆ

ข้อดีของแบบ R

- ให้แรงเคลื่อนทางด้านเอาท์พุตสูงกว่าแบบ S
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 1600^{0}C
- วัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วง-50 ถึงประมาณ 1700^{0}C
- เหมาะกับการวัดอุณหภูมิสูงๆ เช่น ในเตาหลอมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว
- ทนทานต่อการกัดกร่อน และให้เสถียรภาพของอุณหภูมิที่ดี

ส่วนลักษณะข้อเสียเช่นเดียวกับแบบ S แต่ส่วนที่เพิ่มเติมคือให้ความเป็นเชิงเส้นต่ำเพิ่มอุณหภูมิต่ำกว่า 540^{0}C

3. เทอร์โมคัปเปิลแบบ B ผลิตครั้งแรกเมื่อปี 1954 ในประเทศเยอรมัน

ข้อดีของแบบ B

- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วงประมาณ 100 ถึงประมาณ 1600^{0}c
- วัดอุณหภูมิช่วงสั้นได้จากช่วงประมาณ 50 ถึงประมาณ 1750^{0}c
- แข็งแรงกว่าแบบ S และแบบ R
- เหมาะกับการใช้งานในสภาวะที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิงและสภาวะเฉื่อย ให้ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ (Linearity) ดี

ข้อเสียของแบบ B

- ให้แรงเคลื่อนของไฟฟ้าน้อยกว่าแบบอื่น ๆ เมื่อวัดอุณหภูมิที่เงื่อนไขเดียวกัน
- ไม่เหมาะกับสภาวะที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาแบบรีดิวซิง
- ไม่เหมาะกับสภาวะที่เป็นสุญญากาศ
- ไม่เหมาะกับสภาพงานที่มีไอของโลหะและอโลหะเช่นเดียวกับแบบ Rและ S
- ให้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าสองค่า (double value region)จากอุณหภูมิในช่วง 0-42 ^{0}C ทำให้ไม่สามารถทราบได้ว่าที่แรงเคลื่อนไฟฟ้านั้นมีอุณหภูมิเป็นเท่าใด เช่นที่อุณหภูมิ 0^{0}C จะแรงเลื่อนไฟฟ้าเท่ากับ 42^{0}C
- ให้ความชัน(การเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนต่ออุณหภูมิ) ของสัญญาณต่ำกว่าแบบอื่น ๆ

4. เทอร์โมคัปเปิลแบบ J พบว่าหากใช้แพลทินัมมาทำเป็นเทอร์โมคัปเปิลความคุ้มทุนก็ลดลงไป ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้เทอร์โมคัปเปิลราคาถูกลงจึงใช้วัตถุธาตุอื่นที่มีราคาถูกกว่ามาทดแทนแพลทินัม โดยรหัสสีตามมาตรฐาน BS มีดังนี้ ถ้าขั้วบวก จะเป็นสีดำ ขั้วลบจะเป็นสีขาว ทั้งตัวจะเป็นสีดำ

ความแน่นอนตามมาตรฐาน BS 1797 Part 30 , 1993 ได้แก่

1. Class 1 = -40^{0}C ถึง +750^{0}C $\pm$ 0.004 x t หรือ $\pm$ 1.5^{0}C
2. Class 2 = -40^{0}C ถึง + 750^{0}C $\pm$ 0.0075 x t หรือ $\pm$ 2.5^{0}C

เมื่อ t คือ อุณหภูมิจริง

ข้อดีของแบบ J

- ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิได้ดี
- มีราคาถูกกว่าแบบที่ทำจากธาตุบริสุทธิ์
- ตามมาตรฐาน BS 7937 Part 30 สามารถวัดอุณหภูมิได้ต่อเนื่องจากช่วงประมาณ –210 ถึง 1200^{0}C

- เหมาะกับสภาพงานที่เป็นสุญญากาศงานที่ งานที่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิง และงานที่อยู่ในสภาพเฉื่อย เมื่ออุณหภูมิไม่เกิน 760^{0}C

- นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก

- เป็นแบบที่นิยมใช้ ราคาไม่แพง

ข้อเสียของแบบ J

- วัดอุณหภูมิได้ต่ำกว่าแบบ T

- ไม่เหมาะสมมากนักกับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0^{0}C

- หากวัดที่อุณหภูมิสูงกว่า 538^{0}C จะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซิงที่สายซึ่งทำจากเหล็กด้วยอัตราสูง

- หากใช้งานนานเกินช่วง 20 ปี ส่วนผสมทางเคมี คือ แมงกานีสในเหล็กจะเพิ่มขึ้น 0.5% ทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย

5. เทอร์โมคัปเปิลแบบ K ธาตุหนึ่งที่เป็นฐานสำหรับการสร้างคือ นิกเกิล เทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้เริ่มผลิตให้เป็นมาตรฐานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1916 โดยพื้นฐานการผลิต ขั้วหนึ่งจะเป็นนิกเกิลที่เจือปนด้วยอะลูมิเนียมส่วนอีกด้านที่เจือปนด้วยโครเมียม เพราะว่าในปี ค.ศ. 1916 ยังไม่สามารถสร้างนิเกิลบริสุทธิ์ได้จึงได้เติมสารไม่บริสุทธิ์ต่าง ๆ ในส่วนผสมของวัสดุชนิด K แต่ในปัจจุบันได้มีการระมัดระวังส่วนผสมที่จะทำให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ดังกล่าวเพื่อเหตุผลในการบำรุงรักษาและสอบเทียบ

ด้วยเหตุนี้เทอร์มคัปเปิลชนิด K ที่กำหนดเป็นค่ามาตรฐานจะไม่ใช้โลหะผสมแต่โดยทั่วไปจะผสมธาตุพิเศษเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเคลื่อน/อุณหภูมิของจุดหลอมละลายที่กำหนดไว้ข้อควรระวังในการใช้งานของชนิด K มีดังนี้

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

- ที่อุณหภูมิสูง ๆ (ช่วง 200^{0}C ถึง 600^{0}C) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะมีผลของฮีสเตอร์รีซีสเกิดขึ้นขณะที่มันอ่านค่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและในช่วงที่อุณหภูมิลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่สามารถจะคาดเดาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนได้

- ที่อุณหภูมิ1000^{0}Cขั้วของเทอร์โมคัปเปิลชนิดKจะเกิดออกไซด์ เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อน

- การใช้โคบอลต์เป็นโลหะผสมสำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะทำให้เกิดปัญหาในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ หรือในพื้นที่อื่น ๆ ที่มีฟลักซ์นิวตรอนสูง ๆ ธาตุบางตัวจะรับเอาการปลดปล่อยนิวเคลียร์ จึงทำให้เปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุต

ย่านการทำงานและความแน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลในงานอุตสาหกรรม ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (รหัสสำหรับการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล) ช่วงการวัดอุณหภูมิต่อเนื่องของเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้จะเป็น –270^{0}C ถึง +1,370^{0}C

โดยมีระดับความแน่นอนซึ่งกำหนดโดยมาตรฐานIEC 584ตารางอ้างอิงสำหรับเทอร์โมคัปเปิลนานาชาติ เป็นดังนี้

1. Class 1 = -40^{0}C ถึง +1,000^{0}C ± 0.004 x t หรือ ± 1.5^{0}C
2. Class 2 = -40^{0}C ถึง + 1,200^{0}C ± 0.0075 x t หรือ ± 2.5^{0}C
3. Class 1 = -200^{0}C ถึง +40^{0}C ± 0.015 x t หรือ ± 2.5^{0}C

เมื่อ t คือ อุณหภูมิจริงที่ทำการวัด

รหัสสีสำหรับสายเทอร์โมคัปเปิลกำหนดโดยมาตรฐาน BS 4937 part 30 ,1993(รหัสสีตามมาตรฐานอังกฤษสำหรับสายชดเชยแบบคู่ของเทอร์โมคัปเปิล) สำหรับชนิด K ขั้วบวกจะเป็นสีเขียว ขั้วลบจะเป็นสีขาว ถ้าตลอดทั้งตัวจะเป็นสีเขียว ส่วนสายชดเชยสัญญาณ (ชนิด vx) ก็เหมือนกับสีด้านบนที่กล่าวมา โดยสรุป

ข้อดีของแบบ K

- เป็นแบบที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด
- สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้น ๆ จะวัดได้จาก –180^{0}C ถึงประมาณ 1,350^{0}C
- สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิง หรือสภาวะแบบเฉื่อย (inert) ได้ดีกว่าแบบอื่นๆ
- สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี
- ให้อัตราการเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่น ๆ (ความชันเกือบเป็น 1) และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน

ข้อเสียของแบบ K

- ไม่เหมาะกับการวัดที่ต้องสัมผัสกับปฏิกิริยารีดิวซิงและออกซิไดซิงโดยตรง
- ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของซัลเฟอร์
- ไม่เหมาะกับสภาพงานที่เป็นสุญญากาศ (ยกเว้นจะใช้ในช่วงเวลาสั้นๆ)
- หลังการใช้งานไป 30 ปี ทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไป เป็นผลทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป

6. เทอร์โมคัปเปิลแบบ T

ข้อดีของแบบ T

- ดีกว่าแบบ K ตรงที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ต่ำกว่า นั่นคือเหมาะกับการวัดอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ เช่นในห้องเย็น ตู้แช่แข็ง
- ให้ความแน่นอนในการวัดดีกว่าแบบ K (ช่วงที่ต่ำกว่า 100^0C ความแน่นอนจะเป็น $\pm$ 1%)
- มีเสถียรภาพในการวัดอุณหภูมิดี
- การวัดสภาพงานที่เป็นสุญญากาศงานที่มีปฏิกิริยาแบบออกซิไดซิงรีดิวซิงและงานที่มีปฏิกิริยาแบบเฉื่อยจะทำได้ดี
- วัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องได้จากช่วง –185 ถึง 300^0C และวัดอุณหภูมิแบบช่วงสั้นๆ ได้จากช่วง –250 ถึง $400\ ^0C$
- ทนต่อบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนได้ดี

ข้อเสียของแบบ T

- เป็นแบบที่วัดอุณหภูมิช่วงบวกได้น้อยกว่าแบบอื่นๆ
- หากใช้วัดอุณหภูมิที่สูงกว่า $370\ ^0C$ จะทำให้เกิดออกไซมาก
- ไม่เหมาะกับการวัดอุณหภูมิที่สัมผัสกับการแผ่รังสีความร้อนโดยตรง(ทำให้ส่วนผสมของวัสดุที่ใช้ทำเปลี่ยนไป คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย)
- เมื่อใช้งานไปนานๆในช่วง 20 ปี ส่วนผสมของนิเกิลและสังกะสีจะเพิ่มประมาณ 10% ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน
- คุณสมบัติของแรงเคลื่อนต่ออุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้น (แต่ก็ปรับปรุงได้จากวงจรปรับสภาพสัญญาณ)

7. เทอร์โมคัปเปิลชนิด E

ข้อดีของแบบ E

- ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงสุดเมื่อวัดอุณหภูมิเทียบกับแบบอื่น ๆ ในสภาวะเดียวกัน
- วัดอุณหภูมิต่อเนื่องได้จากช่วง 0 ถึง 800^0C
- คุณสมบัติอื่น ๆ คล้ายกับแบบ K

การแก้ไขให้ระบบวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลให้ทำงานได้ดีขึ้น ต้องปฏิบัติดังนี้

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

3. หลีกเลี่ยงความเค้นทางกลและการสั่นสะเทือนที่มีผลให้เกิดความเครียดในสาย

4. เมื่อใช้สายเทอร์โมคัปเปิลยาวๆให้ต่อชีลด์ที่สายไปยังขั้วต่อสายของดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ และใช้สายขยายสัญญาณแบบบิดเกลียว

5. หลีกเลี่ยงบริเวณที่เต็มไปด้วยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกลางสาย

6. พยายามเลือกสายเทอร์โมคัปเปิลในพิกัดอุณหภูมิของมัน

7. ป้องกันวงจรแปลง integrate A/D จากการรบกวน

8. ใช้สายขยายเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ๆ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลางสายน้อย ๆ

9. ทดสอบและเก็บค่าความต้านทานของเทอร์โมคัปเปิลเก่า ๆ ไว้ พร้อมกับวัดค่าความต้านทานของเทอร์โมคัปเปิลเก็บไว้เป็นช่วง ๆ

2.5.14 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistors)

เทอร์มิสเตอร์ มาจากคำว่า "Thermally sensitive variable resistor" ทำมาจากวัสดุตัวนำที่เหมือนกับเซรามิก อยู่ในรูปของออกไซด์ของแมงกานีส นิกเกิล และโคบอลต์ มีค่าความต้านทานจำเพาะในช่วง 100 ถึง 450,000 โอห์ม-เซนติเมตร ในเบื้องต้นสามารถประยุกต์ใช้งาน 2 อย่างคือ

(1) เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิสำหรับระบบการวัดและควบคุม

(2) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานไฟฟ้า เพราะอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ จะเป็นฟังก์ชันกับกำลังที่ถูกดูดกลืน

โดยอุปกรณ์การวัดกำลังคลื่นความถี่วิยุเป็นตัวอย่างของการใช้งานตามหัวข้อที่ 2

2.5.15 ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำกับอุณหภูมิ (Semiconductor Resistance Versus Temperature)

สารกึ่งตัวนำ คือการที่อิเล็กตรอนสั่นจนถึงช่วงที่ทำให้มีการเพิ่มพลังงานของวาเลนซ์อิเล็กตรอน เมื่อพลังงานนี้มีค่าเท่ากันหรือมากกว่าช่องว่างพลังงาน Δ_{wg} ในขณะนี้อิเล็กตรอนจะเข้ามาอยู่ในแถบการนำและอิสระที่จะนำกระแสได้

ข้อสำคัญคือช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีความไม่เป็นเชิงเส้น

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่ออุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ หลักการของเทอร์มิสเตอร์ คือค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิตามหลักการของสารกึ่งตัวนำ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความต้านทานจะลดลง คุณลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่ามี "สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นลบ" (เอ็นทีซี) การเปลี่ยนแปลงนี้จะแปรตามความไม่บริสุทธิ์ในการเจือปน หากเจือปนมากเกินไปสารกึ่งตัวนำจะมีสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิเป็นบวก

2. ความไวหรือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของอาร์ทีดี จะมีค่าเพิ่มขึ้นหากว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

3. เวลาตอบสนอง (time response) ผลตอบสนองของเทอร์มิสเตอร์ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุและสภาวะแวดล้อม สำหรับเทอร์มิสเตอร์ที่บรรจุอยู่ในอ่างน้ำมัน (ที่มีการสัมผัสความร้อนที่ดี) ผลตอบสนองของเวลาจะมีค่าประมาณ 0.5 วินาที แต่หากเป็นเทอร์มิสเตอร์ตัวเดียวกันที่อยู่ในอากาศ อาจจะใช้เวลาตอบสนองถึง 10 วินาที เทอร์มิสเตอร์แบบจานหรือแบบแท่งขนาดใหญ่อาจจะมีผลตอบสนองต่อเวลาเป็น 10 วินาทีหรือมากกว่า ถึงแม้ว่าจะมีการสัมผัสความร้อนที่ดีก็ตาม

2.5.16 ชนิดของเทอร์มิสเตอร์

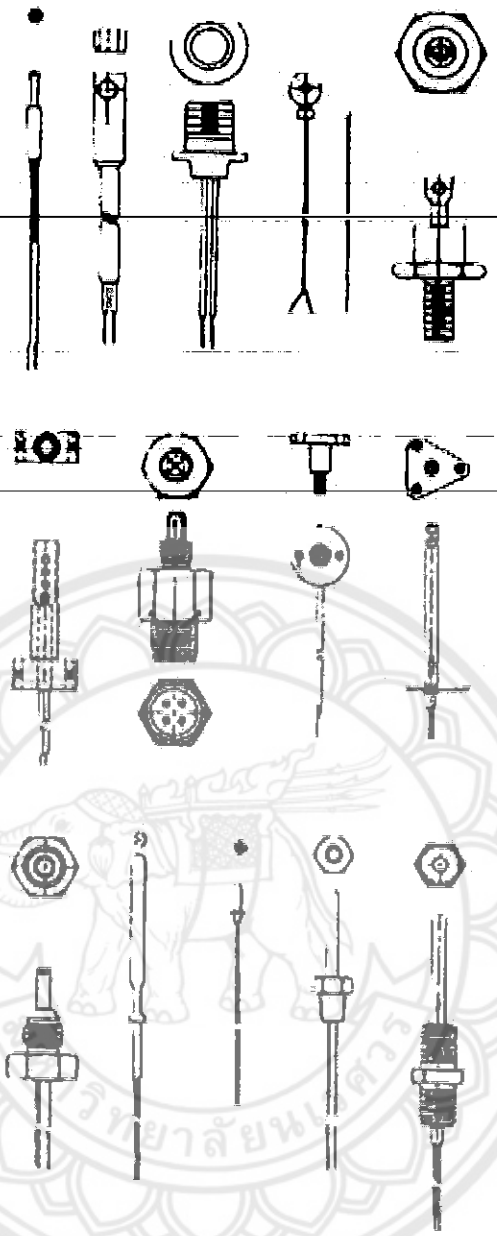
โดยปกติเทอร์มิสเตอร์จะแบ่งเป็น 2 ประเภทตามสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิ อันได้แก่

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของเทอร์มิสเตอร์ชนิด เอ็นทีซี ที่ใช้กันบ่อยๆ

ตัวแปร	ค่าโดยสรุป
ย่านของอุณหภูมิที่ทำการวัด	-100° C ถึง 450° C (ไม่ได้วัดโดยตัวเดียวกัน)
ความต้านทานที่ 25° C	0.5 Ω ถึง 100 MΩ
	1 kΩ ถึง 10 MΩ เป็นค่าโดยทั่วไป
B	2000 K ถึง 5500 K
อุณหภูมิสูงสุด	> 125° C
	300° C เป็นค่าปกติในสภาวะคงที่
	600° C เป็นค่าปกติเมื่อไม่สม่ำเสมอ
ค่าคงที่ในการสูญเสีย , δ	1 mW/K ในอากาศนิ่ง
	8 mW/K ในน้ำมัน
เวลาคงที่ความร้อน	1 มิลลิวินาที ถึง 22 วินาที
การสูญเสียกำลังสูงสุด	1 มิลลิวัตต์ ถึง 1 วัตต์

1. ชนิด เอ็นทีซี เทอร์มิสเตอร์ชนิดนี้ผลิตได้โดยการผสมและเจือปนออกไซด์ของโลหะ เช่น นิกเกิล โคบอลต์ แมงกานีส เหล็ก และทองแดง แล้วอัดให้ติดกันเป็นก้อนแข็ง (sintering dope) กระบวนการนี้ทำให้สำเร็จได้เมื่อมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมในการผลิต เทอร์มิสเตอร์แบบนี้ใช้สำหรับการวัดและควบคุมอุณหภูมิ

2. ชนิด พีทีซี อยู่ในรูปของสวิตชิ่ง พีทีซี ใช้แบเรียมไททาเนตเป็นฐานและเพิ่มตะกั่วหรือเซอร์โคเนียมไททาเนตลงไปปรับความไวในการสับเปลี่ยนอุณหภูมิที่จะวัด ส่วนเทอร์มิสเตอร์แบบพีทีซี ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิจริงๆ จะใช้ซิลิคอนเป็นธาตุตั้งต้นในการเจือปน เทอร์มิสเตอร์แบบนี้มักจะนำไปประยุกต์ใช้ในการป้องกันแรงเคลื่อนหรือกระแสเกินค่าปกติในวงจรไฟฟ้า



รูปที่ 2.17 แสดงการออกแบบโพรบเทอร์มิสเตอร์แบบต่างๆ

2.5.17 การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning)

เพราะว่าเทอร์มิสเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานกับอุณหภูมิสูงจึงมีหลายวงจรที่สามารถนำมาใช้งานได้ เช่นวงจรแบ่งแรงเคลื่อน วงจรบริดจ์ เป็นต้น แต่ก็ต้องพิจารณาข้อได้เปรียบของแต่ละแบบเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์มิสเตอร์ทำให้ยากต่อการวัดค่า จึงต้องแน่ใจว่าการสูญเสียกำลังในเทอร์มิสเตอร์จะไม่เกินขีดจำกัด

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์

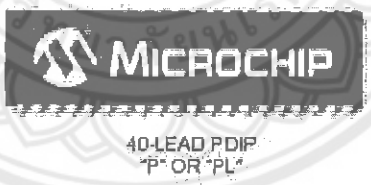
เป็นอุปกรณ์ไอซี (IC:Integrated Circuit) ที่สามารถโปรแกรมการทำงานได้ซับซ้อน สามารถรับข้อมูลในรูปสัญญาณดิจิตอลเข้าไปทำการประมวลผลแล้วส่งผลลัพธ์ข้อมูลดิจิตอลออกมาเพื่อนำไปใช้งานตามที่ต้องการได้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นไมโครโพรเซสเซอร์ชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับหน่วยประมวลผลกลาง (CPU: Central Processing Unit) ที่ใช้ในคอมพิวเตอร์ แต่ได้รับการพัฒนารวมวงจรที่จำเป็น เช่น หน่วยความจำ, ส่วนอินพุต และเอาต์พุต บางส่วนเข้าไปในไอซีตัวเดียวกัน และเพิ่มวงจรบางอย่างเข้าไปเพื่อให้มีความสามารถเหมาะสมกับการใช้ในงานควบคุม เช่น วงจรตั้งเวลา, วงจรการสื่อสารอนุกรม และวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล เป็นต้น

ไมโครคอนโทรลเลอร์มีหลายยี่ห้อ หลายตระกูล และหลายเบอร์ด้วยกัน ซึ่งแต่ละเบอร์ก็จะมีโครงสร้างภายในและความสามารถในการทำงานที่แตกต่างกัน ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นิยมใช้งานคือ MCS51, PIC และ AVR เป็นต้น

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล PIC สามารถแบ่งออกตามชนิดของ PROGRAM MEMORY ได้ 3 แบบ คือ

1. OTP (One Time Programmable)

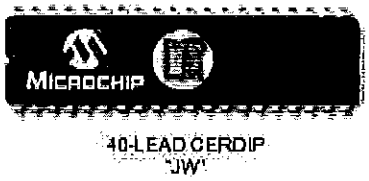
เป็นชิพที่สามารถทำการโปรแกรมได้แค่ครั้งเดียวเท่านั้นดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.18 หลังจากชิพได้ถูกโปรแกรมไปแล้วจะไม่สามารถโปรแกรมเข้าไปใหม่ได้อีก ดังนั้นชิพประเภทนี้จะนิยมใช้หลังจากได้พัฒนาโปรแกรมจนกระทั่งแก้ไขจุดบกพร่องต่างๆ ในโปรแกรมแล้ว จะมีตัวอักษร C แสดงบนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น 16C84 และ 16C74 เป็นต้น



รูปที่ 2.18 แสดงชิพที่สามารถทำการโปรแกรมได้ครั้งเดียว

2. EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory)

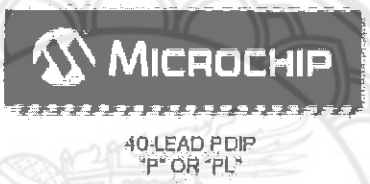
เป็นชิพที่สามารถเขียนโปรแกรมเข้าไปแล้วโปรแกรมใหม่ด้วยการลบโปรแกรมเดิมโดยให้แสงอัลตร้าไวโอเลต ส่องผ่านเข้าไปยังชิพ ประมาณ 5-10 นาทีดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.18 ดังนั้นที่ด้านบนของชิพจะมีกรอบกระจกเพื่อให้แสงอัลตร้าไวโอเลต สามารถส่องผ่านเข้าไปในตัวชิพได้ แต่ก็มีจำนวนครั้งในการลบโปรแกรม เมื่อลบโปรแกรมด้วยแสงอัลตร้าไวโอเลต มากๆ จะเกิดอาการด้านทำให้ไม่สามารถโปรแกรมได้อีก จะมีตัวอักษร JW แสดงบนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือมีกรอบกระจกอยู่บนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 2.19 แสดงชิพที่สามารถเขียนโปรแกรมเข้าไปแล้วสามารถลบได้โดยแสงอัลตร้าไวโอเลต

3. EEPROM / Flash (Electronically Erasable Programmable Read Only Memory)

เป็นชิพที่สามารถอ่านหรือเขียนด้วยสัญญาณทางไฟฟ้าดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.19 ใช้เวลาในการ ลบข้อมูลไม่กี่วินาที และสามารถลบ และเขียนใหม่ได้หลายพันครั้ง มีตัวอักษร F แสดงบนตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ เช่น 16F84 และ 16F877 เป็นต้น



รูปที่ 2.20 แสดงชิพที่สามารถอ่านหรือเขียนด้วยสัญญาณทางไฟฟ้า

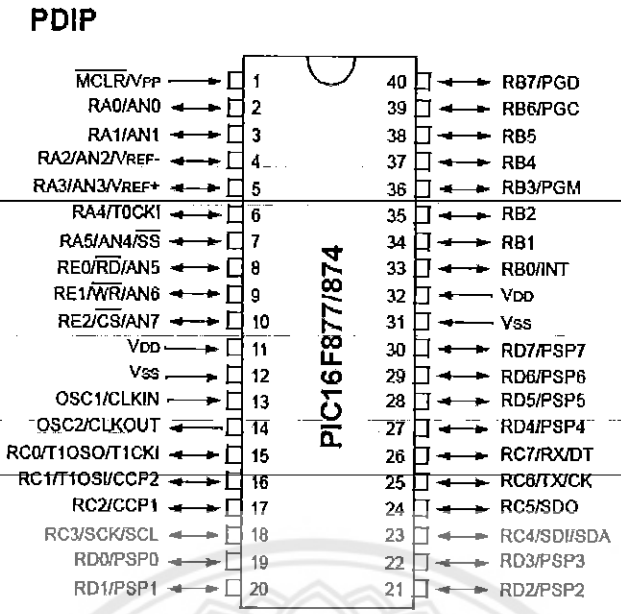
คุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

- ซีพียูเป็นแบบ RISC (Reduced Instruction-Set Computer) มีคำสั่งใช้งาน 35 คำสั่ง
- สามารถกระทำคำสั่งโดยใช้สัญญาณเพียงหนึ่งลูก ยกเว้นคำสั่งการกระโดด
- ความถี่สัญญาณนาฬิกา ตั้งแต่ไฟตรงถึง 20 MHz
- หน่วยความจำโปรแกรม 8 กิโลเวิร์ด
- หน่วยความจำข้อมูลแรมหรือรีจิสเตอร์ 368 ไบต์
- ขนาดหน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม 256 ไบต์
- มีสแต็ก 8 ระดับ
- มีวงจรเพาเวอร์ออนรีเซต (POR)
- มีเพาเวอร์อัปไทเมอร์ (PWRT) และออสซิลเลเตอร์สตาร์อัปไทเมอร์ (OST)
- มีวงจรวอตช์ด็อกไทเมอร์ (WDT) ที่มีวงจรออสซิลเลเตอร์ในตัว
- เลือกป้องกันข้อมูลทั้งในหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลสามารถระดับการป้องกันได้
- มีโหมดประหยัดพลังงาน
- สามารถโปรแกรมโดยใช้แรงดัน +5V ได้

- แก้ไขข้อมูลในหน่วยความจำโปรแกรมด้วยกระบวนการ ICD (In-circuit Debugger) ผ่านทางพอร์ตเพียง 2 ขา
- ซีพียูสามารถอ่านและเขียนหน่วยความจำโปรแกรมได้
- ไฟเลี้ยง +2 ถึง +5.5V
- กระแสซิงก์และซอร์สของพอร์ต 25 mA
- การใช้พลังงานไฟฟ้าในกรณีไม่ขับโหลด
  - น้อยกว่า 2 mA ที่ไฟเลี้ยง +5V และสัญญาณนาฬิกา 4 MHz
  - 20 μA ที่ไฟเลี้ยง +3V และสัญญาณนาฬิกา 32 kHz
  - น้อยกว่า 1 μA ในโหมดประหยัดพลังงานหรือสแตนด์บาย
- มีวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล 10 บิต
- มีวงจรเชื่อมต่ออุปกรณ์อนุกรมทั้ง SPI และบัส I^2C
- มีวงจรสื่อสารข้อมูลอนุกรม (USART) พร้อมการตรวจจับแอดเดรส 9 บิต
- มีวงจรตรวจจับระดับแรงดันไฟเลี้ยง (บราวเอาต์ดีเท็กชั่น : Brown-out detection) เพื่อการรีเซตซีพียู หรือเรียกว่า บราวเอาต์รีเซต (Brown-out reset : BOR)
- มีโมดูล CCP 2 ชุด โดย

  (1)ส่วนตรวจจับสัญญาณหรือแคปเจอร์ (Capture) มีขนาด 16 บิต ความละเอียดสูงสุด 12.5 นาโนวินาที

  (2)ส่วนเปรียบเทียบสัญญาณ (Compare) มีขนาด 16 บิต ความละเอียดสูงสุด 200 นาโน-วินาที
- วงจร PWM มีความละเอียดสูงสุด 10 บิต
- ไทเมอร์ 3 ตัว คือ ไทเมอร์ 0 ขนาด 8 บิต มีปรีสเกลเลอร์ขนาด 8 บิตในตัว, ไทเมอร์ 1 ขนาด 16 บิต พร้อมปรีสเกลเลอร์ และไทเมอร์ 2 ขนาด 8 บิต มีปรีสเกลเลอร์, โพสต์สเกลเลอร์ และรีจิสเตอร์คาบเวลา (period register) ขนาด 8 บิต



รูปที่ 2.21 แสดงชื่อและตำแหน่งขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

ตารางที่ 2.2 แสดงชื่อขา ตำแหน่งขา ชนิดขา และรายละเอียดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	ชนิดของขา	รายละเอียดการทำงาน
OSC1/CLKIN	13	อินพุต	- ขาต่อคริสตอล / รับสัญญาณนาฬิกาจากภายนอก
OSC2/CLKOUT	14	เอาต์พุต	- ขาต่อคริสตอล / ในโหมด RC เป็นขาเอาต์พุตสัญญาณนาฬิกาความถี่ 1/4 ของสัญญาณที่ขา OSC1
$\overline{\text{MCLR}}$/Vpp	1	อินพุต	- ขารับสัญญาณรีเซตหลักทำงานที่ลอจิก “0” - ขารับแรงดันโปรแกรม
RA0/AN0	2	อินพุต/เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RA0 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 0
RA1/AN1	3	อินพุต/เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RA1 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 1

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) แสดงชื่อขา ตำแหน่งขา ชนิดขา และรายละเอียดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	ชนิดของขา	รายละเอียดการทำงาน
RA2/AN2/VREF-	4	อินพุต/ เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RA2 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 2 - อินพุตแรงดันอ้างอิงลบของวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล
RA3/AN3/VREF+	5	อินพุต/ เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RA3 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 3 - อินพุตแรงดันอ้างอิงบวกของวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล
RA4/T0CKI	6	อินพุต/ เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RA4 - อินพุตสัญญาณนาฬิกาของไทเมอร์ 0
RA5/AN4/$\overline{SS}$	7	อินพุต/ เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RA5 - อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอะนาลอกเป็นดิจิตอล ช่อง 4 - ขาสัญญาณ Slave Select ใช้ในการสื่อสารข้อมูลอนุกรมแบบซิงโครนัส
RB0/INT	33	อินพุต/ เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RB0 - อินพุตรับสัญญาณอินเตอร์รัปต์จากภายนอก
RB1	34	อินพุต/ เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RB1
RB2	35	อินพุต/ เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RB2
RB3/PGM	36	อินพุต/ เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RB3 - อินพุตรับแรงดันโปรแกรมต่ำถ้าเอ็นเอเบิลไว้
RB4	37	อินพุต/ เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RB4

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) แสดงชื่อขา ตำแหน่งขา ชนิดขา และรายละเอียดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	ชนิดของขา	รายละเอียดการทำงาน
RB5	38	อินพุต/เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RB5
RB6/PGC	39	อินพุต/เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RB6 - ขาสัญญาณนาฬิกาของการดีบักในวงจร
RB7/PGD	40	อินพุต/เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RB7 - ขาสัญญาณนาฬิกาของการดีบักในวงจร
RC0/T1OSO/T1CKI	15	อินพุต/เอาต์พุต	- ขาพอร์ต RB7 - เอาต์พุตวงจรออสซิลเลเตอร์ของไทเมอร์1 - อินพุตสัญญาณนาฬิกาของไทเมอร์ 1
RC1/T1OSI/CCP2	16	อินพุต/เอาต์พุต	-ขาพอร์ต RC1 -อินพุตวงจรออสซิลเลเตอร์ของไทเมอร์1 -อินพุตวงจรแคปเจอร์/เอาต์พุตวงจรเปรียบเทียบ/เอาต์พุต PWM สำหรับโมดูล CCP2
RC2/CPP1	17	อินพุต/เอาต์พุต	-ขาพอร์ต RC2 -อินพุตวงจรแคปเจอร์/เอาต์พุตวงจรเปรียบเทียบ/เอาต์พุต PWM สำหรับโมดูล CCP1
RC3/SCK/SCL	18	อินพุต/เอาต์พุต	-ขาพอร์ต RC3 -ขาสัญญาณนาฬิกาของวงจร SPI และระบบบัส I^2C
RC4/SDI/SDA	23	อินพุต/เอาต์พุต	-ขาพอร์ต RC4 -ขาข้อมูลอินพุตวงจร SPI -ขาข้อมูลอนุกรมของระบบบัส I^2C
RC5/SDO	24	อินพุต/เอาต์พุต	-ขาพอร์ต RC5 -ขาข้อมูลเอาต์พุตวงจร SPI

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) แสดงชื่อขา ตำแหน่งขา ชนิดขา และรายละเอียดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	ชนิดของขา	รายละเอียดการทำงาน
RC6/TX/CK	25	อินพุต/	-ขาพอร์ต RC6
		เอาต์พุต	-ขาเอาต์พุตวงจร USART สำหรับเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรม
RC7/RX/DT	26	อินพุต/	-ขาพอร์ต RC7
		เอาต์พุต	-ขาอินพุตวงจร USART สำหรับเชื่อมต่อพอร์ตอนุกรม
RD0/PSP0	19	อินพุต/	-ขาพอร์ต RD0
		เอาต์พุต	-ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต0
RD1/PSP1	20	อินพุต/	-ขาพอร์ต RD1
		เอาต์พุต	-ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 1
RD2/PSP2	21	อินพุต/	-ขาพอร์ต RD2
		เอาต์พุต	-ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 2
RD3/PSP3	22	อินพุต/	-ขาพอร์ต RD3
		เอาต์พุต	-ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 3
RD4/PSP4	27	อินพุต/	-ขาพอร์ต RD4
		เอาต์พุต	-ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 4
RD5/PSP5	28	อินพุต/	-ขาพอร์ต RD5
		เอาต์พุต	-ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 5
RD6/PSP6	29	อินพุต/	-ขาพอร์ต RD6
		เอาต์พุต	-ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 6
RD7/PSP7	30	อินพุต/	-ขาพอร์ต RD7
		เอาต์พุต	-ขาขยายพอร์ตแบบขนานบิต 7
RE0/$\overline{RD}$/AN5	8	อินพุต/	-ขาพอร์ต RE0
		เอาต์พุต	-อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลช่อง 5
			-ขาสัญญาณ RD ส่วนขยายพอร์ตแบบขนาน

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) แสดงชื่อขา ตำแหน่งขา ชนิดขา และรายละเอียดการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

ชื่อขา	ตำแหน่งขา	ชนิดของขา	รายละเอียดการทำงาน
RE1/$\overline{WR}$/AN6	9	อินพุต/	-ขาพอร์ต RE1
		เอาต์พุต	-อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลช่อง 6 -ขาสัญญาณ WR ส่วนขยายพอร์ตแบบขนาน
RE2/$\overline{CS}$/AN7	10	อินพุต/	-ขาพอร์ต RE2
		เอาต์พุต	-อินพุตวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลช่อง 7 -ขาสัญญาณ CSn ส่วนขยายพอร์ตแบบขนาน
V_{DD}	11,32	อินพุต	-ขาต่อไฟเลี้ยง ใช้ได้ตั้งแต่ +2 ถึง +5.5V
V_{SS}	12,31	อินพุต	-ขาต่อกราวด์

2.7 การเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์

รูปแบบการเขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถแบ่งได้ 3 แบบคือ

1. เขียนด้วยภาษาแอสเซมบลี (Assembly) แบบไฟล์เดียว หลังจากนั้นจะทำการคอมไพล์ด้วย Assembler ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นโดยไฟล์ที่ได้มา มีได้หลายชนิดแต่ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของ Hex file

2. ใช้ภาษา Assembly แต่แบ่งเป็นหลายๆ ไฟล์ หลังจากนั้นจะทำการคอมไพล์ แต่ละไฟล์ให้ออกมาเป็น Object files และทำการรวมกันด้วย Linker ในขณะทำการ link ก็จะมี script file ของไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นประกอบ หลังจากทำการ Link แล้วไฟล์ที่ได้จะอยู่ในรูป Hex file

3. การเขียนด้วยภาษาสูง โดยทั่วไปภาษาที่ใช้เขียนจะเป็นภาษาซี (C) หรือภาษาเบสิก (Basic) เป็นต้น ซึ่งอาจจะเขียนร่วมกับภาษา Assembly โดยไฟล์ที่เขียนจะถูกทำให้กลายเป็น Object files โดย Assembler สำหรับภาษา Assembly และคอมไพล์ โดยตัวคอมไพล์สำหรับภาษาสูงจากนั้นก็ทำการ Link เข้าด้วยกันด้วย Linker ซึ่งขณะทำการ Link ก็จะมีการรวมเอา Library ที่ถูกเรียกใช้ในโปรแกรมเข้าไปรวมด้วยกัน สุดท้ายจะอยู่ในรูป Hex file หลังจากได้ Hex file แล้วจะทำการอัดโปรแกรมเข้าสู่ชิพด้วยตัวโปรแกรมเมอร์ส่วนใหญ่จะมีรูปแบบคือ มี Software บนคอมพิวเตอร์ สำหรับใช้ในการควบคุมการอ่าน เขียนหรือลบ โดยส่วนใหญ่จะเชื่อมต่อไปยัง Programmer ด้วยพอร์ตอนุกรมหรือพอร์ตขนานเมื่ออัดโปรแกรมเข้าชิพแล้วไมโครคอนโทรลเลอร์ก็สามารถนำไปใช้งานตามที่ได้ออกแบบไว้

2.8 PicBasic Pro

ตัวแปลภาษา PicBasic Pro เป็นตัวคอมไพล์ภาษาเบสิกที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ของทางบริษัท ไมโครชิฟ โดยภาษา PicBasic Pro มีรูปแบบของภาษาที่ง่ายต่อการเรียนรู้ มีชุดคำสั่งต่างๆ สำเร็จรูป ทำให้สะดวกต่อการใช้งาน ซึ่งผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความรู้ในส่วนของโครงสร้างฮาร์ดแวร์ภายในต่างๆ ของไมโครคอนโทรลเลอร์มากนักก็สามารถเขียนได้ อีกทั้งตัวคำสั่งต่างๆ ของภาษาเบสิกยังมีชื่อเรียกที่สื่อให้เข้าใจได้ง่ายกว่าชื่อคำสั่งของภาษาแอสเซมบลี

ตัวอย่างชุดคำสั่ง PicBasic Pro

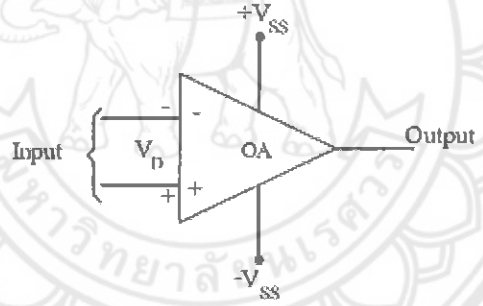
DISABLE INTERRUPT	เป็นคำสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ยกเลิกการตอบสนองการอินเตอร์รัปต์
ENABLE INTERRUPT	เป็นคำสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC ตอบสนองการอินเตอร์-รัปต์
GOTO	เป็นคำสั่งให้โปรแกรมกระโดดไปทำคำสั่งตาม ลาเบลที่กำหนด
HIGH	เป็นคำสั่งกำหนดให้ขาพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC มีลอจิก "1" โดยจะกำหนดให้ขาพอร์ตนั้นๆ ทำหน้าที่เป็นเอาต์พุตโดยอัตโนมัติ
LOW	เป็นคำสั่งกำหนดให้ขาพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC มีลอจิก "0" โดยจะกำหนดให้ขาพอร์ตนั้นๆ ทำหน้าที่เป็นเอาต์พุตโดยอัตโนมัติ
IF…THEN	เป็นคำสั่งตรวจสอบเงื่อนไข
INPUT	เป็นคำสั่งกำหนดให้ขาพอร์ตเป็นอินพุต
LOOKUP	เป็นคำสั่งที่ใช้ในการเปิดตารางข้อมูล
OUTPUT	เป็นคำสั่งกำหนดให้ขาพอร์ตเป็นเอาต์พุต
ON INTERRUPT	เป็นคำสั่งเปิดการอินเตอร์รัปต์
OWIN	เป็นคำสั่งรับข้อมูลจากระบบบัส 1 สายของ Dallas Semiconductor
OWOUT	เป็นคำสั่งส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ระบบบัส 1 สายของ Dallas Semiconductor
PAUSE	เป็นคำสั่งหน่วงเวลาในหน่วยมิลลิวินาที

2.9 OP-AMP

ออปแอมป์ (Operation Amplifier, Op-Amp) หรือวงจรขยายเชิงดำเนินการ เป็นอุปกรณ์วงจรรวมหรือไอซีประเภทเชิงเส้น (Linear Integrated Circuit) ซึ่งมีการนำไปใช้ในงานประยุกต์ต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง ออปแอมป์ถูกออกแบบครั้งแรกในปี 1948 เพื่อช่วยปฏิบัติการด้านคณิตศาสตร์ในเครื่องอนาลอกคอมพิวเตอร์ (Analog Computer) ดั้งนั้นจึงใช้ชื่อว่า Operational Amplifier ซึ่งหมายถึง วงจรขยายดำเนินการ นอกจากนี้ ออปแอมป์ยังได้ถูกนำไปใช้ในงานประยุกต์ต่าง ๆ มากมาย ทั้งนี้ก็เนื่องจากเป็นวงจรขยายผลต่าง (Differential Amplifier) ที่มีอัตราขยายที่สูงมาก และการออกแบบและวิเคราะห์วงจรที่ใช้ ออปแอมป์ก็สามารถทำได้ง่าย

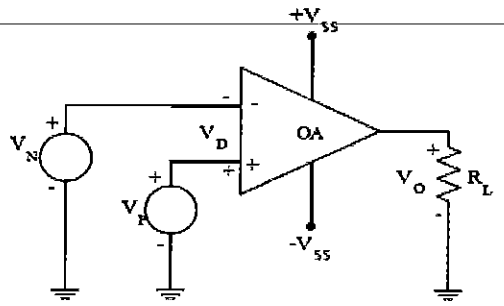
งานประยุกต์ที่ใช้ออปแอมป์จะพบได้ในวงจรเครื่องวัด, วงจรแสดงผล และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุมกระบวนการ, วงจรปรับสัญญาณ, วงจรสื่อสาร, ระบบเตือนภัย, วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทางด้านการแพทย์, ด้านวิทยาศาสตร์และในระบบคอมพิวเตอร์ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าออปแอมป์ได้ถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงอาจเรียกออปแอมป์ได้ว่า เป็นวงจรขยายเชิงเส้นอเนกประสงค์

2.9.1 ออปแอมป์ในอุดมคติ



รูปที่ 2.22 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

สัญลักษณ์ของออปแอมป์เป็นดังรูป 2.21 ซึ่งใช้แหล่งจ่ายกระแสตรง คือ $+V_{SS}$ และ $-V_{SS}$ จ่ายให้กับออปแอมป์ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ไม่เกิน ± 15 V ทางด้านอินพุต จะมี 2 ขั้วคือ อินพุตทางลบและอินพุตทางบวก



รูปที่ 2.23 ลักษณะการต่อใช้งานของออปแอมป์

จากรูป 2.22 จะเห็นว่า เอาท์พุต V_O ที่ออกจากออปแอมป์จะผ่านตัวต้านทาน R_L ลงกราวด์ และอินพุตทางบวก แทนด้วยขั้วของ V_P ส่วนอินพุตทางลบแทนด้วยขั้วของ V_N ซึ่งผลต่างระหว่างทั้งสองขั้วของออปแอมป์จะเป็น V_D

$$V_D = V_P - V_N \qquad (1)$$

ในออปแอมป์อุดมคตินั้น เราจะสามารถหาอัตราขยาย (μ) ได้ จาก

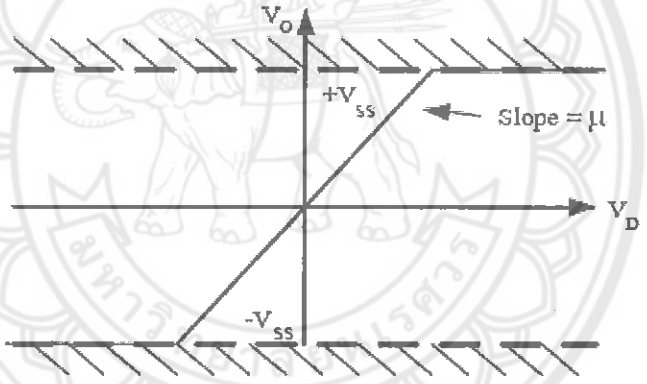
$$\mu = \frac{V_O}{V_D} \qquad (2)$$

จากสองสมการข้างต้น จะได้ว่า

$$V_O = \mu(V_P - V_N) \qquad (3)$$

2.9.2 คุณลักษณะของออปแอมป์

คุณลักษณะของออปแอมป์ในอุดมคติ แสดงดังรูป 2.23 ซึ่งอัตราขยายเป็นไปตามสมการ(2) และแรงดันเอาท์พุตจะไม่เกินค่าของแรงดันที่ป้อนให้กับออปแอมป์ ($+V_{SS}$ และ $-V_{SS}$)



รูปที่ 2.24 กราฟแสดงลักษณะแรงดันของออปแอมป์ในอุดมคติ

ในออปแอมป์แบบอุดมคตินั้น จะมีคุณลักษณะพื้นฐานอยู่ 4 แบบคือ

1. แรงดันเอาท์พุตจะไม่เกินแรงดันที่จ่ายให้กับออปแอมป์

จากกราฟดังรูป 2.23 ทำให้ทราบว่าแรงดันเอาท์พุตที่ได้จากออปแอมป์นั้นจะมีค่าไม่เกินแรงดันที่ป้อนให้กับออปแอมป์ นั่นก็คือ

$$-V_{SS} \le V_O \le +V_{SS}$$

2. อัตราขยายมีค่าเป็นอนันต์ ($\mu = \infty$)

ในทางอุดมคติ ออปแอมป์จะมีอัตราขยายได้เป็นอนันต์ ในทางปฏิบัติอัตราขยายจะไม่เป็นอนันต์ แต่มีค่าสูงมาก ตั้งแต่ 20,000 ถึง 2,000,000 เท่า

3. ขาอินพุตทั้งสองเสมือนเชื่อมติดกัน ($V_D = 0$)

จากสมการที่ 2 เราสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_D = \frac{V_O}{\mu}$$

เมื่ออัตราขยายมีค่าเป็นอนันต์ และ V_O มีค่าไม่เกิน $+V_{SS}$ จะทำให้ $V_D = 0$ นั่นคือไม่มีผลต่างของแรงดันระหว่างขา V_P และขา V_N นั่นเอง

4. กระแสของอินพุตทั้งสองเป็นศูนย์ ($I_N = I_P = 0$)

เนื่องจาก ความต้านทานภายใน (R_I) ของออปแอมป์มีค่าสูงมาก (∞) นั่นคือ จะทำให้กระแสที่ไหลเข้าขาทั้งสองมีค่าเป็น 0

สามารถสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

1. $-V_{SS} \le V_O \le +V_{SS}$
2. $\mu = \infty$
3. $V_D = 0$
4. $I_N = I_P = 0$

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

การสร้างเครื่องควบคุมปริมาณแก๊สสำหรับการต้มน้ำ มีวิธีการดำเนินงาน 4 ส่วนหลักๆ ดังนี้คือ การศึกษาการทำงาน การออกแบบชิ้นงาน การสร้างชิ้นงาน และการทดสอบชิ้นงาน

3.1 การศึกษาการทำงาน

การศึกษาการทำงานแบ่งออกเป็น 4 ส่วนที่สำคัญ คือ

1. การศึกษาหลักการทำงานของตัวเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแต่ละชนิด โดยเลือกเซนเซอร์ที่เหมาะกับสภาพแวดล้อมที่ใช้ ซึ่งก็คือในน้ำที่มีอุณหภูมิถึงจุดเดือด จึงเลือกใช้ RTD ซึ่งมีเสถียรภาพการใช้งานดีกว่าเซนเซอร์แบบอื่นและมีความแม่นยำความถูกต้องสูง
2. การศึกษาหลักการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์
3. การศึกษาหลักการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์
4. การศึกษาหลักการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาปิคเบสิกโปร (PIC BASIC PRO)

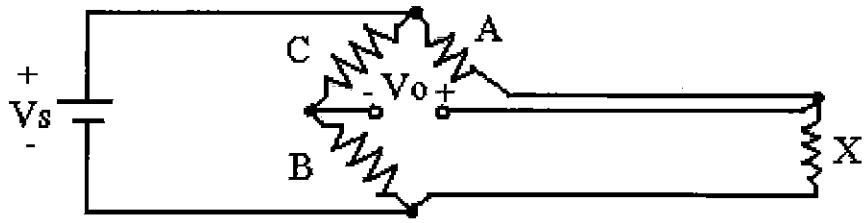
3.2 การออกแบบชิ้นงาน

ในการออกแบบเครื่องควบคุมปริมาณแก๊สนั้น จะแบ่งชิ้นงานที่เกี่ยวข้องที่สำคัญออกเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือ การออกแบบวงจรการต่อใช้งานของ RTD การออกแบบวงจรขยาย และการออกแบบโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

3.2.1 การออกแบบวงจรการต่อใช้งานของ RTD

วงจรต่อใช้งานพื้นฐานของ RTD โดยใช้วงจรวีธสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) ให้ X คือ ตัว RTD ซึ่งติดตั้งอยู่ในจุดที่ต้องการวัดอุณหภูมิ รีซิสเตอร์ประกอบด้วย 3 ตัวคือ A, B และ C ดังรูปที่ 3.1

วงจรบริดจ์นี้จะอยู่ในสภาวะสมดุลเมื่อ RTD อยู่ในอุณหภูมิ $0°C$ ซึ่งจะทำให้อัตราส่วน $\frac{X}{C}=\frac{A}{B}$ กัลวานอมิเตอร์จะชี้ที่ตำแหน่ง 0



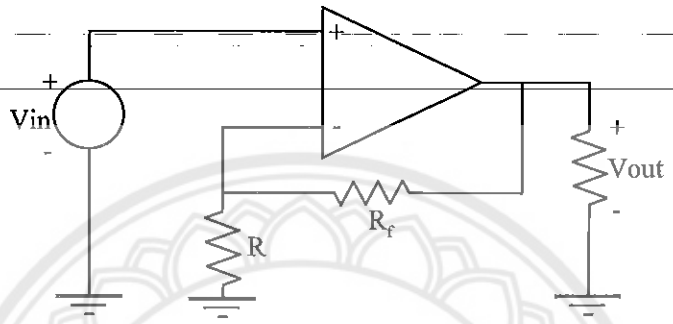
รูปที่ 3.1 แสดงวงจรวีธสโตนบริดจ์

โดยที่ $$V_o = V_s\left(\frac{A}{A+X}\right) - V_s\left(\frac{1}{2}\right)$$

3.2.2 การออกแบบวงจรขยาย

ทางกลุ่มผู้วิจัยต้องการขยายแรงดันให้ได้ 15 เท่า จากสูตร

$$A_V = \frac{V_O}{V_{SIG}} = 1 + \frac{R_F}{R}$$



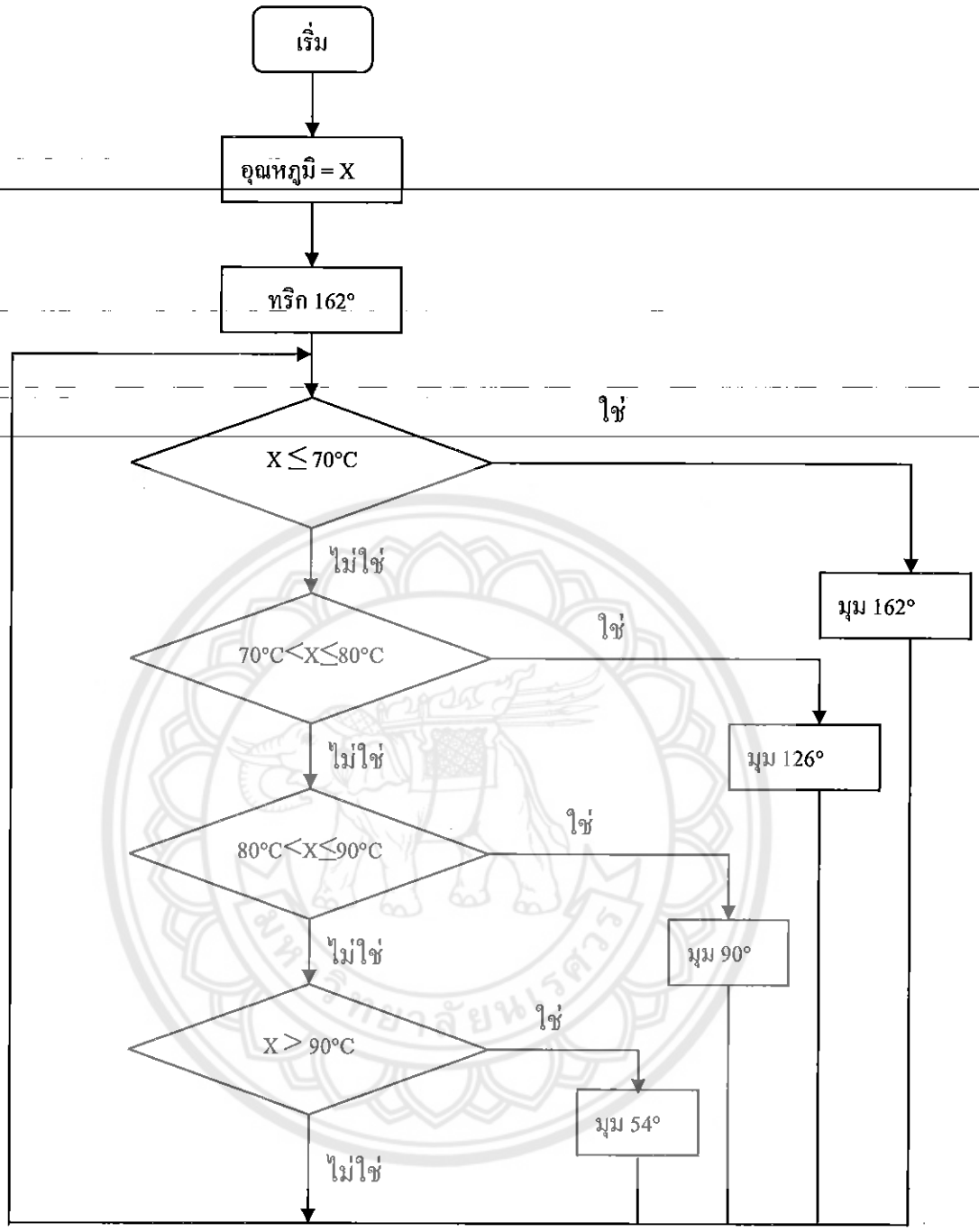
รูปที่ 3.2 แสดงวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

3.2.3 การออกแบบวงจรการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877

ในการออกแบบโปรแกรมการควบคุมการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะใช้โปรแกรม PIC BASIC PRO โดยมีขั้นตอนในการเขียนโปรแกรม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ เริ่มต้นด้วยการเขียนโปรแกรมอ่านค่าอุณหภูมิที่วัดได้ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำค่าแรงดันที่เข้ามาทำการแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอล ดังตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบค่าแรงดันกับเลข 10 บิต เมื่อได้เลขขนาด 10 บิตแล้ว โปรแกรมจะอ่านค่าและแปลงเป็นสัญญาณพัลส์ส่งสัญญาณออกไปขับเซอร์โวตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบค่าแรงดันกับเลข 10 บิต

แรงดัน (V)	เลข 10 บิต
0	0
1	204.6
2	409.2
3	613.8
4	818.4
5	1023



รูปที่ 3.3 แผนภาพการทำงานของโปรแกรม

ที่อุณหภูมิเริ่มต้นให้เซอร์โวบิดไปที่มุม 162 องศา ต่อมาเป็นการอ่านค่าอุณหภูมิ โดยเปรียบเทียบว่าอุณหภูมิน้อยกว่า 70 องศาเซลเซียสหรือไม่ ถ้าใช่ให้เซอร์โวบิดไปที่มุม 162 องศา และให้โปรแกรมกลับมาตรวจสอบเงื่อนไขแรกอีกครั้ง แต่ถ้าไม่ใช่ ให้ตรวจสอบเงื่อนไขต่อไป โดยเปรียบเทียบว่าอุณหภูมิมากกว่า 70 องศาเซลเซียสหรือไม่ ถ้าใช่ให้เซอร์โวบิดไปที่มุม 126 องศาและให้โปรแกรมกลับมาตรวจสอบเงื่อนไขแรกอีกครั้ง แต่ถ้าไม่ใช่ ให้ตรวจสอบเงื่อนไขต่อไป โดยเปรียบเทียบว่าอุณหภูมิมากกว่า 80 องศาเซลเซียสหรือไม่ ถ้าใช่ให้เซอร์โวบิดไปที่มุม

90 องศาและให้โปรแกรมกลับมาตรวจสอบเงื่อนไขแรกอีกครั้ง แต่ถ้าไม่ใช่ ให้ตรวจสอบเงื่อนไขต่อไป โดยเปรียบเทียบว่าอุณหภูมิมากกว่า 90 องศาเซลเซียสหรือไม่ ถ้าใช่ให้เซอร์โวบิดไปที่มุม 54 องศาและให้โปรแกรมกลับมาตรวจสอบเงื่อนไขแรกอีกครั้ง แต่ถ้าไม่ใช่ โปรแกรมจะกลับมาตรวจสอบเงื่อนไขแรกอีกครั้ง

3.3 การสร้างชิ้นงาน

ขั้นตอนการสร้างเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

1. เตรียมอุปกรณ์ที่จะนำมาสร้างวงจรอันได้แก่ ตัวต้านทาน ,ไอซีเบอร์LM324, terminal 2 ขา และ 3ขา และแผ่นปริ้นสำเร็จรูป

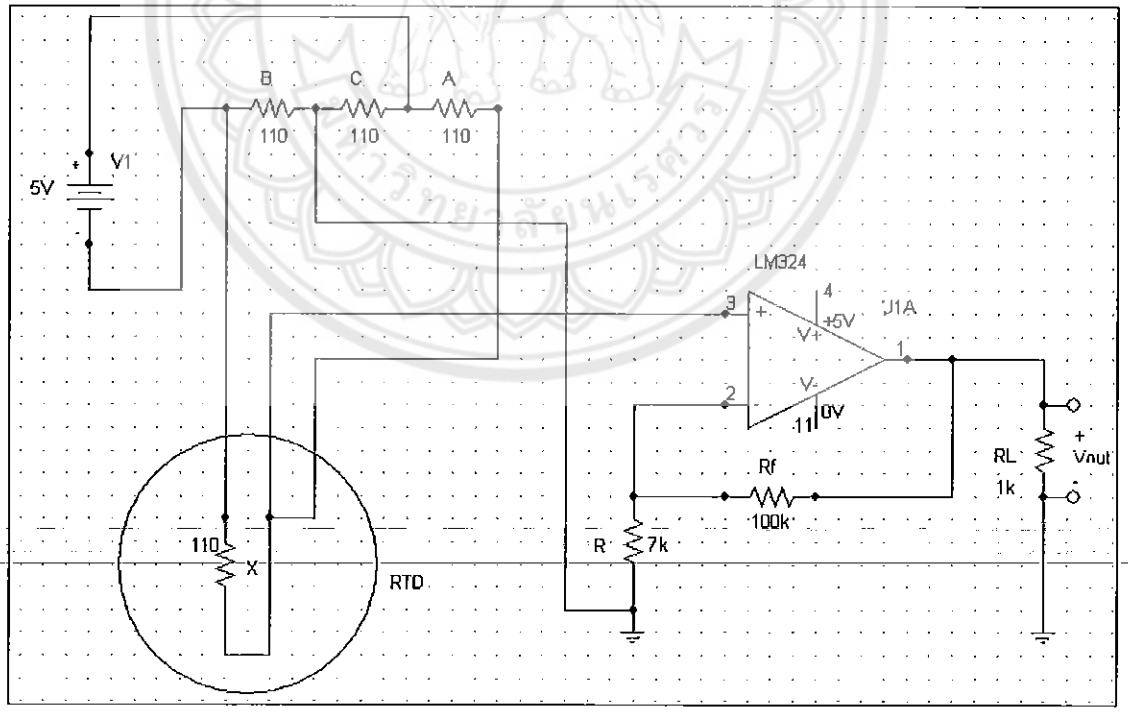
2. ต่ออุปกรณ์ตามวงจรบริดจ์ลงแผ่นปรินท์ตามรูปที่ 3.1 โดย

$A = 110\Omega$

$B = C = 110\Omega$

$X =$ ความต้านทานของ RTD ชนิด PT100

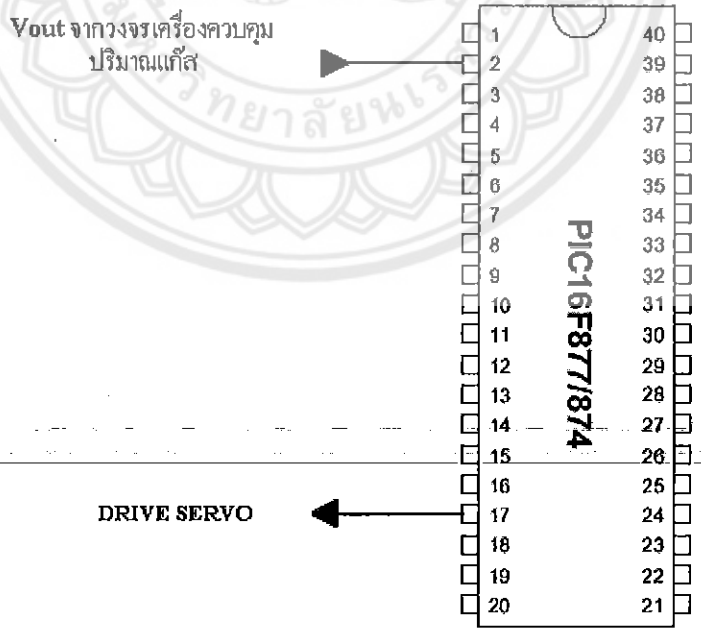
3. ต่ออุปกรณ์ตามวงจรขยายสัญญาณ โดนใช้ไอซีเบอร์ LM324 ตามรูปที่ 3.2 โดยเลือกใช้ตัวต้านทาน R_F ขนาด $100k\Omega$ ตัวต้านทาน R ขนาด $7k\Omega$ และใช้ตัวต้านทาน R_L ขนาด $1k\Omega$ ซึ่งจะได้แรงดันขยายออกมาประมาณ 15 เท่า



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

รูปที่ 3.5 แสดงตัววงจรที่ต่อสำเร็จ

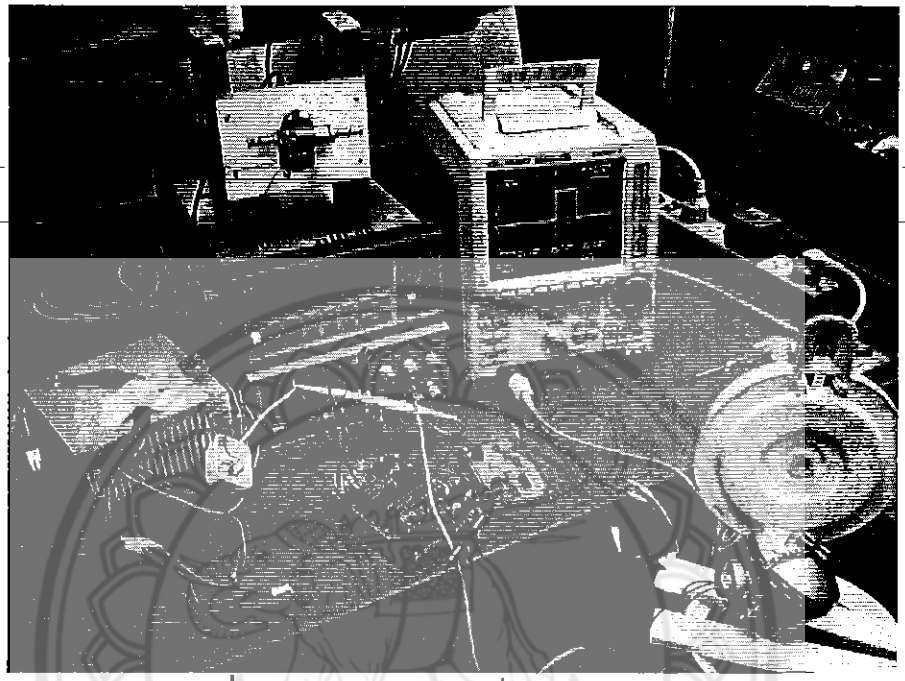
4. นำแรงดัน (V_{OUT}) ที่ได้จากวงจรในรูปที่ 3.4 มาเป็นสัญญาณอินพุทเข้าทางขา RA0 ของ PIC16F877 หลังจากนั้น PIC16F877 จะส่งสัญญาณเอาท์พุทออกมาทางขา RC2 เพื่อนำสัญญาณดังกล่าวไปขับเซอร์โว ซึ่งสัญญาณจะออกมาตามที่โปรแกรมไว้



รูปที่ 3.6 แสดงสัญญาณอินพุทเข้า PIC16F877 และสัญญาณเอาท์พุทออกจาก PIC16F877

3.4 การทดสอบชิ้นงาน

การทดสอบชิ้นงานเป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 กรณี คือ การทดสอบแรงดันที่ออกจากตัว RTD การทดสอบวงจรขยายแรงดัน และการทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส



รูปที่ 3.7 แสดงการทดสอบเรื่องควบคุมอุณหภูมิ

บทที่ 4

วิธีการทดสอบและผลการทดสอบ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบและผลการทดสอบของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊สสำหรับการต้มน้ำ ซึ่งแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ การทดสอบแรงดันที่ออกจากตัว RTD การทดสอบวงจรขยายแรงดัน และการทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

4.1 การทดสอบแรงดันที่ออกจากตัว RTD

วัตถุประสงค์ของการตรวจสอบแรงดันของตัว RTD ก็เพื่อที่เราจะได้นำค่าแรงดันที่ออกมามาเทียบค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์

นำ RTD จุ่มลงในน้ำในกาต้มน้ำไฟฟ้า นำโวลต์มิเตอร์วัดค่าแรงดันที่ออกมาจากวงจรบริดจ์ ณ อุณหภูมิห้องประมาณ 25 องศาเซลเซียส และบันทึกค่าแรงดันที่วัดได้ หลังจากนั้นทำการต้มน้ำ เมื่อน้ำมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 35 องศาเซลเซียส ทำการวัดค่าแรงดันอีกครั้งและบันทึกค่าแรงดันที่ได้ จากนี้ไปทุกๆค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 5 องศาเซลเซียส ก็จะทำการวัดค่าแรงดันและบันทึกค่าจนอุณหภูมิของน้ำถึงค่าสูงสุด ค่าแรงดันที่วัดได้เมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นไปตามตารางที่ 4.1

ตารางที่4.1 แสดงค่าอุณหภูมิตามแรงดันที่ออกมาของ RTD

อุณหภูมิ	ค่าแรงดัน (V)
25	0.0210
30	0.0365
35	0.0520
40	0.0675
45	0.0830
50	0.0985
55	0.1140
60	0.1295
65	0.1450
70	0.1605
75	0.1760
80	0.1915

ตารางที่4.1(ต่อ) แสดงค่าอุณหภูมิตามแรงดันที่ออกมาของ RTD

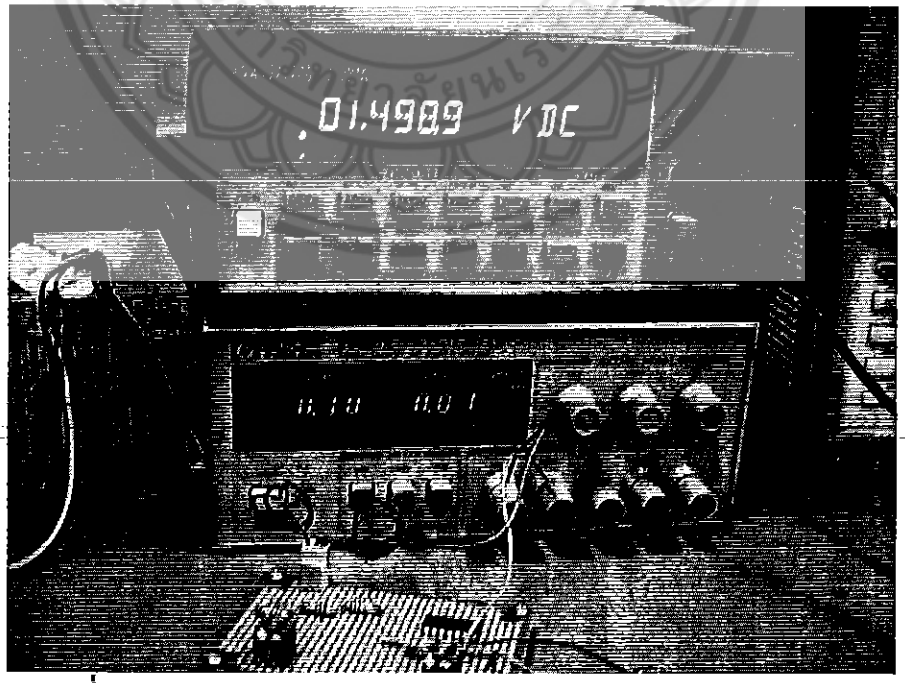
อุณหภูมิ	ค่าแรงดัน (V)
85	0.2070
90	0.2250
95	0.2380
100	0.2535

จากผลการทดลองพบว่าแรงดันจะเพิ่มขึ้นประมาณ 0.0031 V ต่ออุณหภูมิ1°C ซึ่งแรงดันที่ออกมานั้นมีค่าน้อยมาก ค่าที่ได้นี้ยังไม่สามารถเป็นสัญญาณอินพุตสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ จึงนำแรงดันที่ได้ไปขยายสัญญาณต่อไป

4.2 การทดสอบแรงดันขยาย

เพื่อตรวจสอบว่าแรงดันที่ขยายจากแรงดันเอาท์พุทของตัว RTD มีค่าตามที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งค่าแรงดันที่จะออกมาต้องมีค่า 15 เท่าของแรงดันเอาท์พุทของตัว RTD

นำวงจรขยายสัญญาณมาต่อกับแหล่งจ่ายที่ปรับค่าแรงดันได้ ทำการปรับค่าแรงดันเพิ่มขึ้นทีละนิด หลังจากนั้นใช้โวลต์มิเตอร์วัดค่าแรงดันเอาท์พุทที่ออกมาว่าสามารถขยายสัญญาณได้หรือไม่ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงวิธีการทดสอบโดยปรับค่าแรงดันจากแหล่งจ่ายปรับค่าได้

จากผลการทดลองพบว่า แรงดันที่ออกมาจากวงจรขยายมีค่าประมาณ 15 เท่าของแรงดันที่ป้อน

หลังจากนั้นนำวงจรนี้ไปทดสอบจริงกับแรงดันที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ RTD เพื่อทดสอบว่าสามารถใช้งานได้จริงหรือไม่ ดังรูปที่ 4.2

รูปที่ 4.2 แสดงวิธีการทดสอบโดยใช้แรงดันจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของ RTD

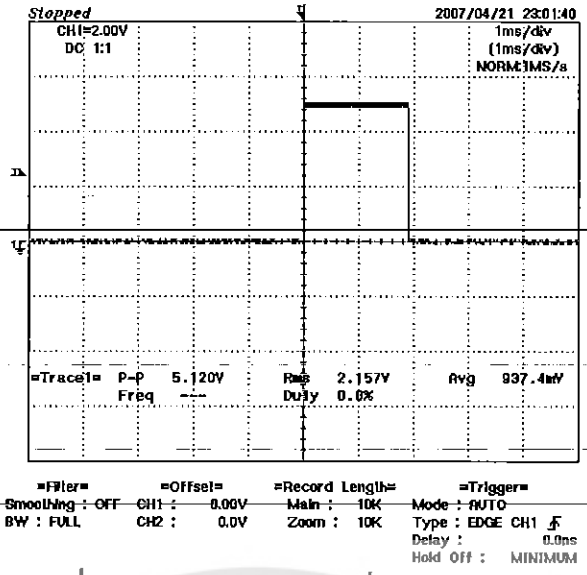
จากการทดลองพบว่า แรงดันที่ขยายออกมาเป็นไปตามที่คาดหมายไว้คือ ประมาณ 15 เท่าของแรงดันเอาท์พุทจาก RTD

4.3 การทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องการทำงานของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส โดยใช้ความร้อนจากกาต้มน้ำไฟฟ้า

วิธีการทดลอง

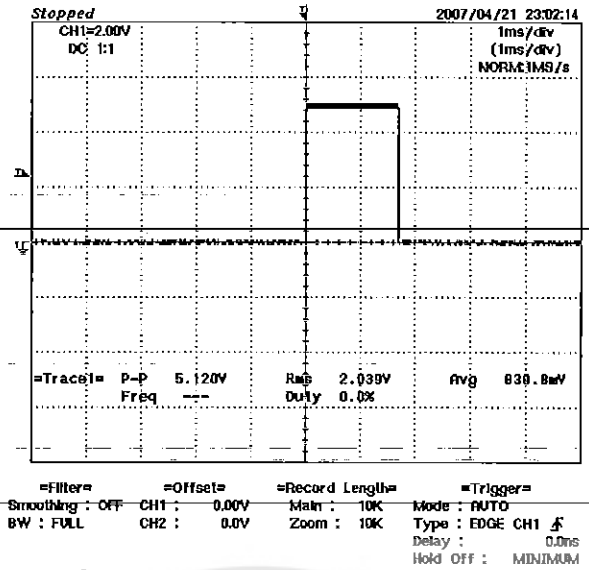
นำ RTD จุ่มลงในน้ำในกาต้มน้ำไฟฟ้า ที่อุณหภูมิน้ำปกติวัดค่าได้ประมาณ 25°C หลังจากนั้นทำการต้มน้ำ เครื่องควบคุมปริมาณแก๊สเริ่มทำงาน โดยเซอร์โวจะบิดไปที่ตำแหน่ง 162° ทำการวัดสัญญาณพัลส์ด้วยออสซิโลสโคป (Oscilloscope) ได้ดังรูปที่ 4.3



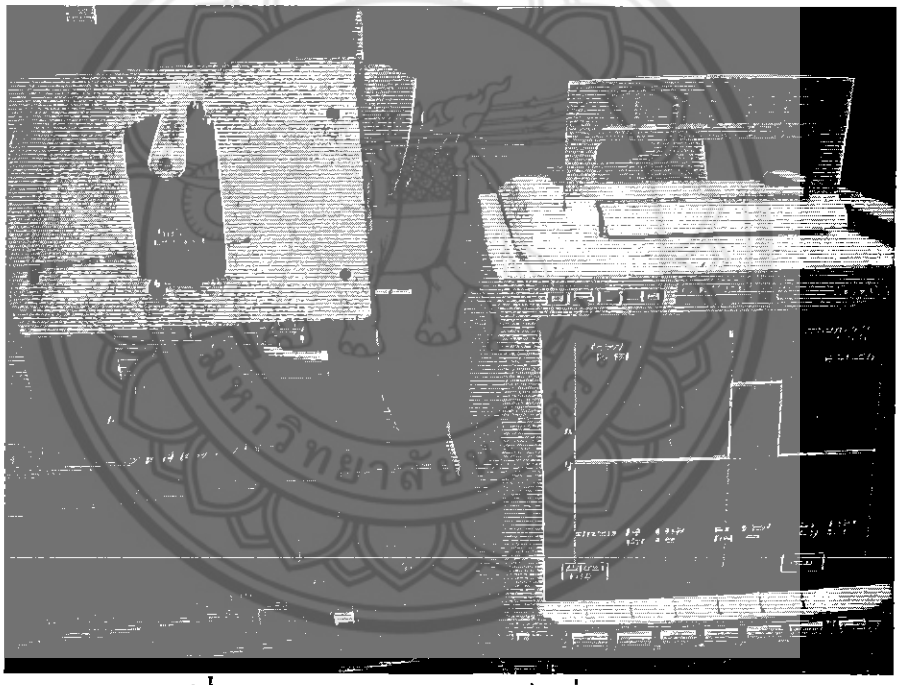
รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ความกว้าง 1.9 ms

รูปที่ 4.4 แสดงตำแหน่งของเซอร์โวที่มุม 162 องศา

จากนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดขั้นแรกคือมากกว่า 70°C เซอร์โวจะบิดไปที่ตำแหน่ง 126° ทำการวัดสัญญาณพัลส์ด้วยออสซิโลสโคป (Oscilloscope) ได้ดังรูปที่ 4.5

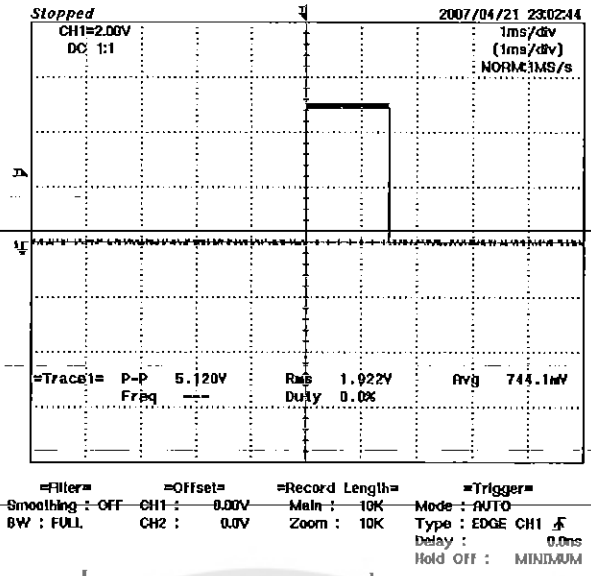


รูปที่ 4.5 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ความกว้าง 1.7 ms



รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งของเซอร์โวที่มุม 126 องศา

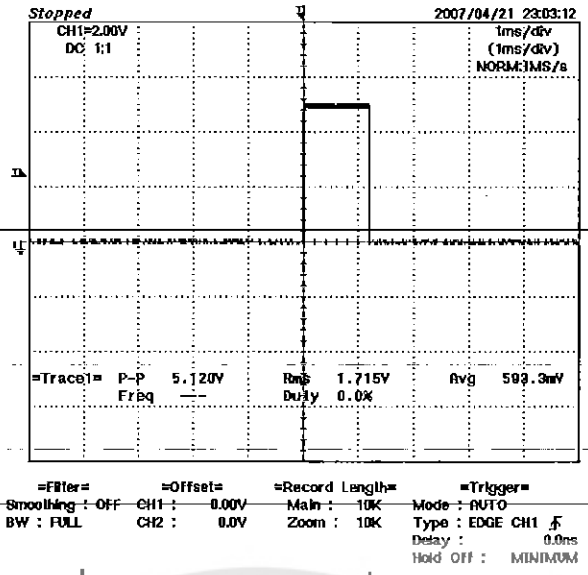
เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดขั้นสองคือมากกว่า 80°C เซอร์โวจะบิดไปที่ตำแหน่ง 90° ทำการวัดสัญญาณพัลส์ด้วยออสซิโลสโคป (Oscilloscope) ได้ดังรูปที่ 4.7



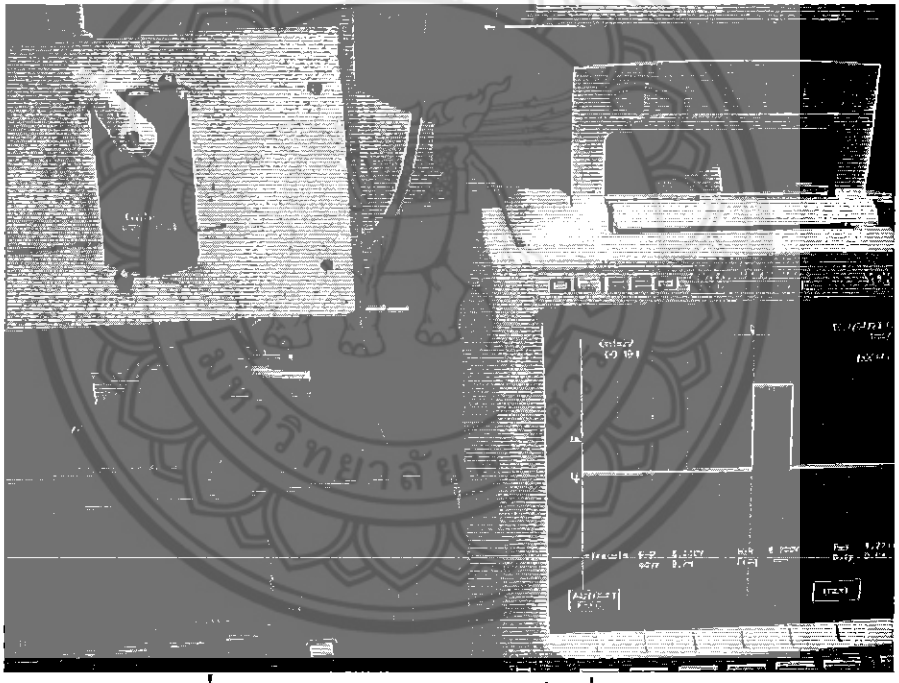
รูปที่ 4.7 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ความกว้าง 1.5 ms

รูปที่ 4.8 แสดงตำแหน่งของเซอร์โวที่มุม 90 องศา

และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงอุณหภูมิที่กำหนดขั้นสามคือมากกว่า 90°C เซอร์โวจะบิดไปที่ตำแหน่ง 54°



รูปที่ 4.9 แสดงสัญญาณพัลส์ที่ความกว้าง 1.2 ms



รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งของเซอร์โวที่มุม 54 องศา

จากการทดสอบ การหมุนของเซอร์โวเป็นไปตามตำแหน่งที่ต้องการตามอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป

บทที่ 5
บทสรุป

จากผลการทดสอบเครื่องควบคุมปริมาณแก๊สในบทที่ 4 นำมาสรุปและมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.1 สรุป

จากผลการทดสอบทั้ง 3 กรณี คือ

- การทดสอบแรงดันที่ออกจากตัว RTD

พบว่าแรงดันที่ออกมามีค่าต่ำไม่สามารถนำไปใช้งานได้

- การทดสอบวงจรขยายแรงดัน

พบว่าแรงดันที่ทำการขยายมีค่าออกมาตามที่ได้ทำออกแบบและคำนวณไว้

- การทดสอบการทำงานของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส

พบว่าลำดับขั้นตอนในการทำงานของเครื่องควบคุมปริมาณแก๊สมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้จริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

เครื่องควบคุมปริมาณแก๊ส สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมระบบนิวเมติกได้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมการทำงานและลดการใช้พลังงาน และอาจนำระบบควบคุม PID มาใช้ เพื่อให้ระบบควบคุมนี้มีความผิดพลาดน้อยลง

เอกสารอ้างอิง

[1] ณัฏฐพล วงศ์สุนทรชัย และ ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. **ปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F87x.** กรุงเทพฯ : บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด. 2547

[2] กฤษดา ใจเย็น, ณัฏฐพล วงศ์สุนทรชัย และ ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล. **เรียนรู้และใช้งาน PIC BASIC PRO คอมไพเลอร์ เขียนโปรแกรมภาษาเบสิกควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC.** กรุงเทพฯ : บริษัท อินโนเวตีฟ เอ็กเพอริเมนต์ จำกัด. 2547

[3] ทีมงานอีทีที. **คู่มือการใช้งาน Servo motor พร้อมตัวอย่างโปรแกรม**. [Online]. Available : http://www.etteam.com/download/SERVO_MOTOR/MANUAL.zip

[4] **การตรวจวัดความร้อน (Thermal Sensors)**. [Online]. Available : http://student.nu.ac.th/electronic/00007.doc

[5] **บทที่ 8 (Op-Amp)**. [Online]. Available : http://fivedots.coe.psu.ac.th/~kpatimakorn/240-206/e-book/chap8.pdf

[6] สมศักดิ์ กีรติวุฒิเศรษฐ์. **หลักการและการใช้งานเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. 2547

ภาคผนวก

โปรแกรมที่ใช้

```
INCLUDE "bs2defs.bas"

DEFINE OSC 4
DEFINE ADC_BITS 10
DEFINE ADC_CLOCK 3
DEFINE ADC_SAMPLESUS 500

RES VAR WORD

ADCON1 = 00000000
ADCON1.7 = 1
TRISA = %11111111
TRISB = %00000000

low portc
servo var portc.2
PAUSE 1000
MAIN:

  ADCIN 0,RES
      IF ( RES <= 500 )  THEN
       'servo=1
        pulsOut PORTC.2,190
       'servo=0
        PAUSEus 20000
     GOTO MAIN
     ENDIF
```

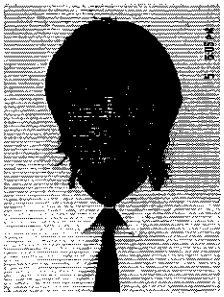
```
IF ( RES <= 600 )  THEN
'servo=1
pulsOut PORTC.2,170
'servo=0
PAUSEus 20000
GOTO MAIN
ENDIF

IF ( RES <= 700 )  THEN
'servo=1
pulsOut PORTC.2,150
'servo=0
PAUSEus 20000
GOTO MAIN
ENDIF

IF ( RES > 700 )  THEN
'servo=1
pulsOut PORTC.2,120
'servo=0
PAUSEus 20000
GOTO MAIN
ENDIF

END
```

ประวัติผู้เขียนโครงงาน



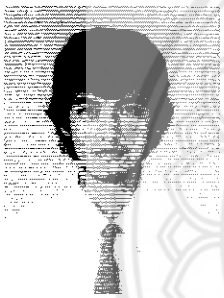
ชื่อ นายศิริชัย หอมนาน

ภูมิลำเนา 201/3 หมู่3 ต.เชียงบาน อ.เชียงคำ จ.พะเยา 56110

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเชียงคำวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : **tor1770@hotmail.com**



ชื่อ นายทวีศักดิ์ บุญแก่น

ภูมิลำเนา 261-263-265 ถ.มหาดไทยบำรุง ต.ระแหง อ.เมือง จ.ตาก 63000

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนตากวิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : **sepia_11@hotmail.com**

ชื่อ นางสาวนารีรัตน์ สวาสดิ์วงศ์

ภูมิลำเนา 545/42 หมู่ 17 ต.ต๋อม อ.เมือง จ.พะเยา 56000

ประวัติการศึกษา

- จบระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพะเยาพิทยาคม
- ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

E-mail : **koza_kirau@hotmail.com**