

ชุดปฏิบัติการตัวแปลงสัญญาณตัวรับรู้ทางไฟฟ้า
ELECTRIC TRANSDUCER LABORATORY

นายสรายุทธ์	ชumni
นายพงศ์พิสุทธิ์	ศิตติสาร
นายวัชระ	ต่อนต์

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ปีการศึกษา 2552
51EE203

หัวข้อโครงการ	ชุดปฏิบัติการตัวแปลงสัญญาณตัวรับรู้ทางไฟฟ้า
โดย	นายสรารุติ ชุมณี นายพงศ์พิสุทธิ์ ศีตีสาร นายวัชระ ค่อนดี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์สัญญา คุณขาว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
อนุมัติให้นับ โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรม
ศาสตรบัณฑิต

..... หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
(ดร.นิमित บุญภิรมย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร.สัญญา คุณขาว)

วันที่..... เดือน..... พ.ศ.....

ชุดปฏิบัติการตัวแปลงสัญญาณตัวรับรู้ทางไฟฟ้า ELECTRIC TRANSDUCER LABORATORY

บทคัดย่อ (Abstract)

เทอร์มิสเตอร์ เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานไฟฟ้า เทอร์มิสเตอร์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อค่าความต้านทานสูง โดยทั่วไปค่าความต้านทานสูงของเทอร์มิสเตอร์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเทอร์โมคัปเปิลเป็นทรานสดิวเซอร์ที่ใช้หลักการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิเป็นค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าประกอบด้วยลวดโลหะสองชนิดที่แตกต่างกัน โดยนำปลายของโลหะทั้งสองมาเชื่อมต่อกันที่ด้าน ส่วนอีกปลายด้านหนึ่งของขดลวดนี้เราต้องรักษาอุณหภูมิให้คงที่ เมื่ออุณหภูมิทางด้าน Hot Junction และ Cold Junction มีค่าแตกต่างกันก็จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้น เซ็นต์เซอร์วัดความดัน เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดความดันที่วัดเปรียบเทียบกับบรรยากาศจะมีค่าเป็น ศูนย์ เมื่อวัดที่ความดันปกติ เมื่ออัตราเร่งต่อพื้นที่ที่ถูกกระทำแรงกระทำจะเกิดความดันขึ้น ตัวเก็บประจุ ประกอบด้วยแผ่นโลหะ 2 แผ่นวางขนานกัน ซึ่งเรียกว่าแผ่น Plate ระหว่างแผ่น Plate จะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นในการพิจารณาค่าเก็บประจุจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของแผ่น Plate เพียงอย่างเดียว ลักษณะเฉพาะของตัวเก็บประจุจำนวนค่าเก็บประจุจะขึ้นกับจำนวนของพื้นที่ของแผ่น Plate ทั้ง 2 แผ่นที่วางซ้อนกันอยู่ แผ่น Plate ลงที่และแผ่น Plate เคลื่อนที่ประกอบรวมกันเป็น ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor) ซึ่งจะใช้เป็น Capacitance sensor เมื่อปรับพื้นที่ที่ซ้อนกันอยู่ โดยปรับให้แผ่น Plate เคลื่อนที่จะทำให้ค่าเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไป

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีก็เนื่องมาจาก ร่วมมือหลายฝ่ายด้วยกันทั้ง ได้รับคำแนะนำการออกแบบจาก อาจารย์ ดร.สัญญา คุณขาว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญา นิพนธ์ จึงใคร่ขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วยสิ่งใดที่โครงการนี้มีความ ผิดพลาดผู้จัดทำจะขอรับผิดชอบแต่เพียงผู้เดียว ส่วนความดีความชอบทั้งหลายขอมอบให้ ผู้สนับสนุน โครงการนี้ทุกๆ ท่าน

คณะผู้จัดทำ

พ.ศ. 2552

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ของโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินงานโครงการ	3
1.6 งบประมาณของโครงการ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistors)	4
2.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)	6
2.3 แหล่งพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลอง (Bias Transistor)	10
2.4 Capacitive Sensor	21
2.5 PressureSensor	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การคำนวณและการออกแบบโครงสร้าง	24
3.1 การออกแบบวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์ (ใช้ในชุดการทดลอง เทอร์โมคัปเปิ้ล และ เทอร์มิสเตอร์)	24
3.2 การออกแบบวงจรจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source) ของชุดเทอร์มิสเตอร์	27
3.3 การออกแบบวงจรปรับ Off-set และ ขยายแบบ (Non-Inverting) ของเทอร์โมคัปเปิ้ล	29
3.4 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณของ Pressure Sensor Amplifier	32
3.5 การออกแบบวงจรคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (Capacitive Sensor)	34
บทที่ 4 การทดลองและบันทึกผลการทดลอง	36
4.1 อุปกรณ์การทดลอง	36
4.2 วัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน	36
4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน	36
4.4 การออกแบบชิ้นงาน	36
4.5 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบ	37
4.6 ผลการทดสอบชิ้นงาน	37
4.7 ผลการทดสอบชุดทดลอง	37
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	42
5.1 สรุป	42
5.2 ข้อเสนอแนะ	42
เอกสารอ้างอิง	43
ภาคผนวก	44

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 1.2 งบประมาณของโครงการ	3
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของเทอร์มิสเตอร์ชนิด เอ็นทีซี	6
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าคงตัวไดอิเล็กตริก, K	21
ตารางที่ 4.1 ค่าจากการทดลองเทอร์มิสเตอร์	38
ตารางที่ 4.2 ค่าจากการทดลองเทอร์โมคัปเปิล	39
ตารางที่ 4.3 ค่าจากการทดลองคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (Capacitive Sensor)	40
ตารางที่ 4.4 ตารางการทดลองเซ็นเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor)	41

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC และแบบ PTC	5
ภาพที่ 2.2 แสดงการหากราฟลักษณะสมบัติทางคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN	11
ภาพที่ 2.3 แสดงการปรับจุดทำงาน (Q-Point) ของวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์	12
ภาพที่ 2.4 แสดงเส้น โหลดไฟตรง (DC Load Line)	13
ภาพที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนค่าสัญญาณอินพุต I_B เป็นผลต่อกระแส I_C และแรงดัน V_{CE}	14
ภาพที่ 2.6 แสดงภาพความถี่ของสัญญาณขาออกที่ได้จากวงจรขยายทรานซิสเตอร์	15
ภาพที่ 2.7 แสดงวงจรไบอัสเบส (Base Bias)	16
ภาพที่ 2.8 แสดงวงจรไบอัสอิมิตเตอร์	17
ภาพที่ 2.9 การใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์วิเคราะห์ห้วงจรในส่วนของเบสและอิมิตเตอร์	18
ภาพที่ 2.10 แสดงวงจร Emitter Bias กับทรานซิสเตอร์ชนิด PNP	19
ภาพที่ 2.11 แสดงเสถียรภาพของวงจรไบอัสป้อนกลับที่คอลเล็กเตอร์เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลง	20
ภาพที่ 2.12 แมนอมิเตอร์ชนิดหลอดแก้วรูปตัว U ปลายเปิด	23
ภาพที่ 2.13 แบริอมิเตอร์แบบปรอทความดันของปรอทที่มีระดับสูง h	23
ภาพที่ 3.1 วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์	24
ภาพที่ 3.2 การต่อวงจร ไบอัสทรานซิสเตอร์ และวงจรขยายที่นำมาใช้งานจริง	25
ภาพที่ 3.3 การนำทรานซิสเตอร์ติดกับฮีทซิงค์ (Heat sink)	25
ภาพที่ 3.4 วงจรจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source)	28
ภาพที่ 3.5 วงจรจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source) ที่ใช้ในงานจริง	28
ภาพที่ 3.6 วงจรปรับ Off-set Thermocoupl	30
ภาพที่ 3.8 วงจรขยายแบบ (Non-Inverting) ของเทอร์โมคัปเปิล	31
ภาพที่ 3.9 การต่อวงจร ไบอัสทรานซิสเตอร์ และวงจรขยายที่นำมาใช้งานจริง	31
ภาพที่ 3.10 การออกแบบวงจรของ PRESSURE SENSORS	32
ภาพที่ 3.11 การออกแบบวงจรของ PRESSURE SENSORS ที่ใช้ในงานจริง	33

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 3.12 วงจร Astable multivibrator	34
ภาพที่ 3.13 วงจร Astable multivibrator ที่ใช้ในงานจริง	35
ภาพที่ 4.1 กราฟผลการทดลองเทอร์มิสเตอร์	38
ภาพที่ 4.2 กราฟผลการทดลองเทอร์โมคัปเปิลจากการวัด	39
ภาพที่ 4.3 ภาพสัญญาณจากการทดลองคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (Capacitive Sensor)	40
ภาพที่ 4.4 กราฟผลการทดลองเซ็นเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor)	41

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

1.1.1 เพื่อสร้างและพัฒนาชุดอุปกรณ์ การทดลองในส่วนตัวรับรู้ ตัวแปลงสัญญาณ อาทิ เช่น ตัววัดอุณหภูมิ การวัดความดัน

1.1.2 ชุดการทดลองมีขนาดเล็ก จึงพัฒนาให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถมองเห็น หลักการทำงานอย่างชัดเจน

1.1.3 ชุดอุปกรณ์ Lap view มีความจำเป็นต่อการเรียนการทดลอง และมีราคาค่อนข้างสูงไม่ เพียงพอต่อการทดลอง

1.1.4 พัฒนาประยุกต์กับโปรแกรม Lap view เพื่อให้เป็นชุดควบคุมและแสดงผลของชุด ปฏิบัติการที่พัฒนาขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์โครงการ

1.2.1 เพื่อประโยชน์ในการพัฒนาการเรียนรู้ทางด้านวิศวกรรมเครื่องมือวัด

1.2.2 เพื่อให้เกิดทักษะในด้านการวัดและประยุกต์ใส่อุปกรณ์เครื่องมือวัด

1.2.3 เพื่อฝึกวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นจากการสร้างชุดปฏิบัติการให้
เหมาะสมกับโครงการทางด้านวิศวกรรม

1.2.4 เพื่อให้เกิดความรู้และทักษะในทางด้าน โครงการวิศวกรรม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 สามารถวัดระดับอุณหภูมิโดยใช้ เทอร์โมคัปเปิ้ล เทียบกับเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท ในการวัดและแสดงผลจากการวัดต่างๆ

1.3.2 สามารถวัดระดับอุณหภูมิโดยใช้ เทอร์มิสเตอร์ เทียบกับเทอร์โมมิเตอร์แบบปรอท และแสดงผลจากการวัดต่างๆ

1.3.3 สามารถวัดระดับความดัน โดยใช้เพียโซมิเตอร์และสามารถเอาค่าต่างๆมา เปรียบเทียบกับการคำนวณ

1.3.4 สามารถทดสอบการตรวจจับของเซนเซอร์โดยใช้ Capacitance sensor ทำหน้าที่เป็น ตัวรับส่งสัญญาณเพื่อแปลงสัญญาณเป็น ไฟฟ้า

1.3.5 ความถูกต้องของการวัดเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณไม่เกิน $\pm 5\%$

1.3.6 มีใบงานประกอบการทดลอง

1.4 ประโยชน์ของโครงการ

1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการพัฒนาตัวรับรู้และตัวแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า

1.4.2 ทำให้เกิดความชำนาญและมีทักษะในด้านการวัดและประยุกต์ใช้อุปกรณ์ตัวรับรู้ ตัวแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า

1.4.3 สามารถวิเคราะห์และแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสร้างชุดปฏิบัติการให้เหมาะสมกับ โครงการทางด้านวิศวกรรม

1.4.4 สามารถพัฒนาประยุกต์ใช้กับชุดทดลองที่มี โปรแกรม Lap View เพื่อให้ชุด ควบคุมสามารถแสดงผลของชุดปฏิบัติการที่พัฒนาขึ้น

1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

ลำดับ	รายละเอียด	EEG 491				EEG 492			
		ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	ก.ค.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1.	ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการ	←→							
2.	ศึกษาและทดลองวงจรที่เกี่ยวข้องกับ Thermistor และ Thermocouple			←→					
3.	ศึกษาและทดลองวงจรของ Capacitive sensor และ Pressure sensor			←→					
4.	ประกอบโครงสร้างเข้ากับวงจรและอุปกรณ์ทดลอง						←→		
5.	บันทึกและสรุปผลการทดลอง							←→	

1.6 งบประมาณของโครงการ

ตารางที่ 1.2 งบประมาณโครงการ

ลำดับ	รายการ	ราคา (บาท)
1.	อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	8,000
2.	อุปกรณ์ โครงสร้าง	3,000
3.	อื่นๆ	2,000
รวม		13,000

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistors) [2]

เทอร์มิสเตอร์มาจาก คำว่า Thermally sensitive variable resistor ทำมาจากวัสดุตัวนำที่เหมือนกับเซรามิก อยู่ในรูปของออกไซด์ของแมงกานีส นิกเกิล และโคบอลต์ มีค่าความต้านทานจำเพาะในช่วง 100 ถึง 450,000 โอห์ม-เซนติเมตร ในเบื้องต้นสามารถประยุกต์ใช้งานสองอย่างคือ (1) เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิสำหรับระบบการวัดและควบคุม (2) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานไฟฟ้า เพราะอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์จะเป็นฟังก์ชันกับกำลังที่ถูกดูดกลืน โดยอุปกรณ์การวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุเป็นตัวอย่างของการใช้งานตามหัวข้อที่ 2

2.1.1 ชนิดของเทอร์มิสเตอร์

โดยปกติเทอร์มิสเตอร์จะแบ่งเป็น 2 ประเภทตามสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิ อันได้แก่

1. ชนิด เอ็นทีซี

เทอร์มิสเตอร์ชนิดนี้ผลิตได้โดยการผสมและเจือปนออกไซด์ของโลหะ เช่น นิกเกิล โคบอลต์ แมงกานีส เหล็ก และทองแดง แล้วอัดให้ติดกันเป็นก้อน แน็ง (sintering dope) กระบวนการนี้ทำให้สำเร็จได้เมื่อมีการควบคุมสถานะแวดล้อมในการผลิต เทอร์มิสเตอร์แบบนี้ใช้สำหรับการวัดและควบคุมอุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 2.1(ก)

2. ชนิด พีทีซี

อยู่ในรูปของสวิตซิ่ง พีทีซี ใช้แบเรียมไททานเตเป็นฐานและเพิ่มตะกั่วหรือเซอร์โคเนียมไททานเตลงไปปรับความไวในการสับเปลี่ยนอุณหภูมิที่จะวัด ส่วนเทอร์มิสเตอร์แบบ พีทีซี ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิจริงๆ จะใช้ซิลิคอนเป็นธาตุตั้งต้นในการเจือปน เทอร์มิสเตอร์แบบนี้มักจะนำไปประยุกต์ใช้ในการป้องกันแรงเคลื่อนหรือกระแสเกินค่าปกติในวงจรไฟฟ้า ดังแสดงในภาพ ที่ 2.1(ข)

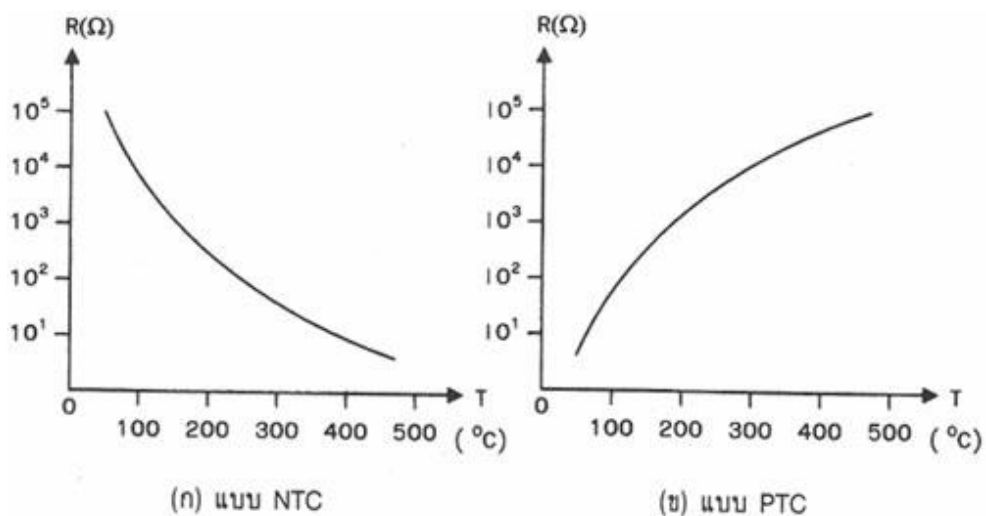
2.1.2 ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำกับอุณหภูมิ (Semiconductor Resistance versus Temperature)

สารกึ่งตัวนำ คือการที่อิเล็กตรอนสั้นจนถึงช่วงที่ทำให้มีการเพิ่มพลังงานของวาเลนซ์อิเล็กตรอน เมื่อพลังงานนี้มีค่าเท่ากันหรือมากกว่าช่องว่างพลังงาน E_g ในขณะนี้อิเล็กตรอนจะเข้ามาอยู่ในแถบการนำและอิสระที่จะนำกระแสได้ ข้อสำคัญคือช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำนี้จะไม่เป็นเชิงเส้น

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 เทอร์มิสเตอร์แบบจานหรือแบบแท่งขนาดใหญ่ อาจจะมีผลตอบสนองต่อเวลาเป็น 10 วินาที หรือมากกว่า ถึงแม้ว่าจะมีการสัมผัสความร้อนที่ดีก็ตาม



ภาพที่ 2.1 คุณสมบัติของเทอร์มิสเตอร์ แบบ NTC และ แบบ PTC

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของเทอร์มิสเตอร์ชนิด เอ็นทีซี ที่ใช้กันบ่อยๆ

ตัวแปร	ค่าโดยสรุป
ย่านของอุณหภูมิที่ทำการวัด	-100°C ถึง 450°C (ไม่ได้วัดโดยตัวเดียวกัน)
ความต้านทานที่ 25° C	0.5 Ω ถึง 100 MΩ
B	1 kΩ ถึง 10 MΩ เป็นค่าโดยทั่วไป
อุณหภูมิสูงสุด	2,000 K ถึง 5,500 K
	> 125°C
	300°C เป็นค่าปกติในสถานะคงที่
	600°C เป็นค่าปกติเมื่อไม่สม่ำเสมอ
ค่าคงที่ในการสูญเสีย , δ	1 mW/K ในอากาศนี้
	8 mW/K ในน้ำมัน
เวลาคงที่ความร้อน	1 มิลลิวินาที ถึง 22 วินาที
การสูญเสียกำลังสูงสุด	1 มิลลิวัตต์ ถึง 1 วัตต์

2.1.3 การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning)

เพราะว่าเทอร์มิสเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานกับอุณหภูมิสูงจึงมีหลายวงจรที่สามารถนำมาใช้งานได้ เช่น วงจรแบ่งแรงเคลื่อน วงจรบริดจ์ เป็นต้น แต่ก็ต้องพิจารณาข้อได้เปรียบของแต่ละแบบเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น ของเทอร์มิสเตอร์ทำให้ยากต่อการวัดค่า จึงต้องแน่ใจว่าการสูญเสียกำลังของเทอร์มิสเตอร์จะไม่เกินขีดจำกัด

2.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) [2]

เทอร์โมคัปเปิล คืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หาก จุดวัดอุณหภูมิ และจุดอ้างอิง อุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ค้นพบโดย Thomas Seebeck นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันในปี ค.ศ.1821 ในรูปที่ 2 เป็นวงจรที่ใช้อธิบายผลของซีเบ็คดังกล่าวผลของแรงเคลื่อนไฟฟ้า จากความร้อน

(Thermoelectric Effect) ปรากฏการณ์พื้นฐานของผลจากเทอร์โมอิเล็กทริก เกิดจากการส่งผ่านทางไฟฟ้า และทางความร้อนของ โลหะที่ต่างกันจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าตกคร่อมที่โลหะนั้น ความต่างศักย์นี้จะสัมพันธ์กับความจริงที่ว่า อิเล็กตรอนในปลายด้านร้อนของ โลหะจะมีพลังงาน ความร้อนมากกว่าปลายทางด้านเย็น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วไปหาปลายด้านเย็นที่อุณหภูมิ เดียวกันนี้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะแปรเปลี่ยนไปตามโลหะที่ต่างชนิดกันด้วยที่เป็นเช่นนี้ก็ เพราะ โลหะที่ต่างกันจะมีการนำความร้อนที่ต่างกันนั่นเอง

2.2.1 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน (Characteristic of Standard Thermocouples)

1. ความไว (Sensitivity) จากตารางแรงเคลื่อนของ NBS แสดงว่าย่านของแรงเคลื่อนจาก เทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าน้อยกว่า 100 mV แต่ความไวที่แท้จริงในการใช้งานจะขึ้นอยู่กับการใช้วงจร ปรับสภาพสัญญาณและตัวเทอร์โมคัปเปิลเอง
2. โครงสร้าง (Construction) โครงสร้างของเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะ ดังรูปที่ 5 โดยต้องมี ลักษณะดังนี้คือ มีความต้านทานต่ำ ให้สัมประสิทธิ์อุณหภูมิสูง ต้านทานต่อการเกิดออกไซด์ที่ อุณหภูมิสูงๆ ทนต่อสภาวะแวดล้อมที่นำไปใช้วัดค่า และเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ตัว ฝักหรือท่อป้องกันส่วนมากจะทำจากสแตนเลส ความไวของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับความหนา ของท่อป้องกันทั้งเยอรมันเนียมและซิลิคอนจะทำให้คุณสมบัติการเกิดเทอร์โมอิเล็กทริกจึงใช้กัน มากในอุปกรณ์ทำความเย็น (Peltierelement) มากกว่าที่จะใช้เป็นเทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิสาย แบบไมโครไวร์ (Microwire) ที่ใช้กับการวัดอุณหภูมิการกลั่นในงานทางชีววิทยา
3. ย่านการใช้งาน (Range) ย่านอุณหภูมิการใช้งานและความไวในการวัดของเทอร์ โมคัปเปิลแต่ละตัว จะแตกต่างกันตามแต่ละสมาคมจะกำหนด ในส่วน ที่สำคัญคือค่าแรงเคลื่อนที่ ออกมาจากแต่ละอุณหภูมิจะต้องอ้างอิงกับตารางค่ามาตรฐานของแต่ละสมาคมที่ใช้ให้ถูกต้องเป็น เอกภาพเดียวกันหมดทั้งระบบ
4. เวลาตอบสนอง (Time Response) เวลาตอบสนองของเทอร์โมคัปเปิลขึ้นอยู่กับขนาด ของสายและวัสดุที่นำมาทำท่อป้องกันตัวเทอร์โมคัปเปิล
5. การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning) ปกติแรงเคลื่อนของเทอร์โมคัปเปิลจะ มีขนาดน้อยมากจึงจำเป็นต้องมีการขยายสัญญาณโดยใช้ออปแอมป์ขยายความแตกต่างที่มี อัตราขยายสูงๆ

2.2.2 การใช้งานเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน (Characteristic in Application of Thermocouple Standard Type)

ในปัจจุบัน พบว่ามีเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานอยู่ 7 ชนิดตามมาตรฐานของ ANSI และ ASTM โดยการจำแนกตามประเภทของวัสดุที่ใช้ แต่ที่เรานำมาใช้คือ

เทอร์โมคัปเปิลแบบ K

ธาตุหนึ่งที่เป็นฐานสำหรับการสร้างคือ นิกเกิล เทอร์โมคัปเปิล ชนิดนี้เริ่มผลิตให้เป็นมาตรฐานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1916 โดยพื้นฐานการผลิต ขั้วหนึ่งจะเป็นนิกเกิลที่เจือปนด้วยอะลูมิเนียม ส่วนอีกด้านที่เจือปนด้วยโครเมียม เพราะว่าในปี ค.ศ. 1916 ยังไม่สามารถสร้างนิกเกิลอบบริสุทธิ์ ได้จึงได้เติมสารไม่บริสุทธิ์ต่างๆ ในส่วนผสมของวัสดุชนิด K แต่ในปัจจุบันได้มีการระมัดระวัง ส่วนผสมที่จะทำให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ดังกล่าวเพื่อเหตุผลในการบำรุงรักษาและสอบเทียบด้วย เหตุนี้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K ที่กำหนดเป็นค่ามาตรฐานจะไม่ใช้โลหะผสมแต่โดยทั่วไปจะผสมธาตุพิเศษเข้าไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของแรงเคลื่อน อุณหภูมิของจุดหลอมละลายที่กำหนดไว้ข้อควรระวังในการใช้งานของชนิด K มีดังนี้

1. ขั้วลบของเทอร์โมคัปเปิลจะเป็นวัสดุเฟอร์โรแมกเนติก (เหล็กที่เป็นสารแม่เหล็ก) ที่อุณหภูมิห้อง แต่ที่จุดคิวรีของมัน (Curie point คืออุณหภูมิที่มันเปลี่ยนจากคุณสมบัติ เหล็กไปเป็นแม่เหล็ก) อยู่ในช่วงที่ใช้งานพอดี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางเอาต์พุตอย่างทันทีทันใด ยิ่งไปกว่านั้นพบว่าจุดคิวรีดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโลหะผสม จุดคิวรีนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติจากเทอร์โมคัปเปิลตัวหนึ่งให้เป็นเทอร์โมคัปเปิลอีกตัวหนึ่ง ดังนั้นจึงต้องทดลองหาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนที่ไม่ทราบค่า ณ อุณหภูมิที่เราไม่ทราบค่านี้

2. ที่อุณหภูมิสูงๆ (ช่วง $2,000^{\circ}\text{C}$ ถึง $6,000^{\circ}\text{C}$) เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะมีผลของฮิสเตอรีซิสเกิดขึ้นขณะที่มันอ่านค่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและในช่วงที่อุณหภูมิลดลง ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่สามารถจะคาดเดาการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนได้

3. ที่อุณหภูมิ $10,000^{\circ}\text{C}$ ขั้วของเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะเกิดออกไซด์ เป็นเหตุให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อน

4. การใช้โคบอลต์เป็นโลหะผสมสำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะทำให้เกิดปัญหาในอุตสาหกรรมนิวเคลียร์ หรือในพื้นที่อื่นๆ ที่มีฟลักซ์นิวตรอนสูงๆ ธาตุบางตัวจะรับเอาการปลดปล่อยนิวเคลียร์ จึงทำให้เปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนทางด้านเอาต์พุตย่านการทำงานและความแน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลในงานอุตสาหกรรม ที่กำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (รหัสสำหรับการวัดอุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล) ช่วงการวัดอุณหภูมิต่อเนื่องของเทอร์โมคัปเปิลแบบนี้จะเป็น $-2,700^{\circ}\text{C}$ ถึง $+1,3700^{\circ}\text{C}$ โดยมีระดับความแน่นอนซึ่งกำหนดโดยมาตรฐาน IEC 584 (ตารางอ้างอิง) สำหรับเทอร์โมคัปเปิลนานาชาติ เป็นดังนี้

1. Class 1 = -400°C ถึง $+1,0000^{\circ}\text{C}$ $0.004 \times t$ หรือ 1.50°C

2. Class 2 = $-400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $+1,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ $0.0075 \times t$ หรือ $2.50\text{ }^{\circ}\text{C}$

3. Class 1 = $-2,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$ $0.015 \times t$ หรือ $2.50\text{ }^{\circ}\text{C}$

เมื่อ t อุณหภูมิจริงที่ทำการวัดรหัสสี่สำหรับสายเทอร์โมคัปเปิลกำหนดโดยมาตรฐาน BS 4937 part 30 1993 (รหัสสี่ตามมาตรฐานอังกฤษสำหรับสายชดเชยแบบคู่ของเทอร์โมคัปเปิล) สำหรับชนิด K ขั้วบวกจะเป็นสีเขียว ขั้วลบจะเป็นสีขาว ถ้าตลอดทั้งตัวจะเป็นสีเขียว ส่วนสายชดเชยสัญญาณ (ชนิด VX) ก็เหมือนกับสีด้านบนที่กล่าวมา โดยสรุป

ข้อดีของแบบ K

1. เป็นแบบที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด
2. สำหรับการวัดอุณหภูมิช่วงสั้น ๆ จะวัดได้จาก $-1,800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึงประมาณ $1,3500\text{ }^{\circ}\text{C}$
3. สามารถใช้วัดในงานที่มีปฏิกิริยาออกซิไดซิง หรือสภาวะแบบเฉื่อย (Inert) ได้ดีกว่าแบบอื่นๆ
4. สามารถใช้กับสภาพงานที่มีการแผ่รังสีความร้อนได้ดี
5. ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าต่ออุณหภูมิต่ำกว่าแบบอื่นๆ (ความชันเกือบเป็น 1) และมีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดในบรรดาเทอร์โมคัปเปิลด้วยกัน

ข้อเสียของแบบ K

1. ไม่เหมาะกับการวัดที่ต้องสัมผัสกับปฏิกิริยารีดิวซิงและออกซิไดซิง โดยตรง
2. ไม่เหมาะกับงานที่มีไอของซัลเฟอร์
3. ไม่เหมาะกับสภาพงานที่เป็นสุญญากาศ (ยกเว้นจะใช้ในช่วงเวลาสั้นๆ)
4. หลังการใช้งานไป 30 ปี ทำให้ส่วนผสมทางเคมีเปลี่ยนไปเป็นผลทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป

2.2.3 การแก้ไขให้ระบบวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิลให้ทำงานได้ดีขึ้น ต้องปฏิบัติดังนี้

1. ใช้สายเทอร์โมคัปเปิลขนาดใหญ่ที่สุดที่จะเป็นไปได้เพราะมันจะไม่พองเอา ความร้อนออกจากพื้นที่การวัดเข้ามา
2. ถ้าต้องการใช้สายขนาดเล็กๆ ให้ใช้เฉพาะในขอบเขตที่ทำการวัด และใช้สายขยาย (Extention wire) ในขอบเขตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลางสาย
3. หลีกเลี่ยงความกดดันทางกลและการสั่นสะเทือนที่มีผลให้เกิดความเครียดในสาย
4. เมื่อใช้สายเทอร์โมคัปเปิลยาวๆ ให้ต่อซิลด์ที่สายไปยังขั้วต่อสายของดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ และใช้สายขยายสัญญาณแบบบิเดเกลียว
5. หลีกเลี่ยงบริเวณที่เต็มไปด้วยการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิกกลางสาย

6. พยายามเลือกสายเทอร์โมคัปเปิลในพิกัดอุณหภูมิของมัน
7. ป้องกันวงจรแปลง Integrate A/D จากการรบกวน
8. ใช้สายขยายเฉพาะที่อุณหภูมิต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกลางสายน้อยๆ
9. ทดสอบและเก็บค่าความต้านทานของเทอร์โมคัปเปิลหลายๆ ไร่พร้อมกับวัดค่าความต้านทานของเทอร์โมคัปเปิลเก็บไว้เป็นช่วงๆ

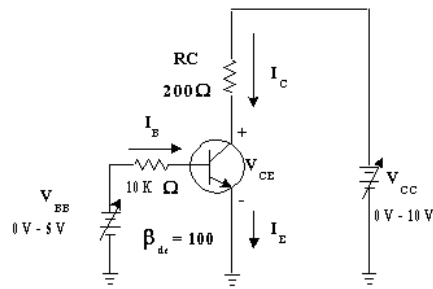
2.3 แหล่งความร้อนที่ใช้ในการทดลอง [3][4][5]

2.3.1 การไบอัสทรานซิสเตอร์

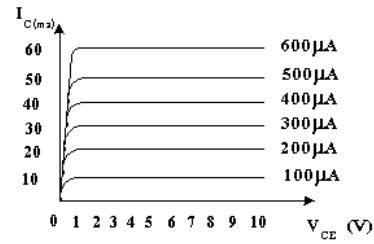
การไบอัส (Biasing) ทรานซิสเตอร์นั้นมีหลายวิธีแต่ละวิธีจะให้เสถียรภาพ (Stabilized) ในการทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์แตกต่างกัน เมื่อนำทรานซิสเตอร์นั้นไปใช้งานในที่ที่มี อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปจุดทำงาน (Q-Point) ของทรานซิสเตอร์นั้นจะเปลี่ยนไปด้วย เป็นผลให้ แรงดันที่จุดต่าง ๆ ซึ่งตกคร่อมทรานซิสเตอร์เปลี่ยนไป วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์ที่ดีเมื่อมีการ เปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายนอก จะเป็นผลให้จุดทำงาน ของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนแปลงไปน้อย มากหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย ผลคือเสถียรภาพในการทำงานของทรานซิสเตอร์ในวงจรไบอัสนั้นดี ขึ้น

2.3.2 จุดทำงานในวงจรไฟตรง

การวิเคราะห์ด้วยกราฟ (Graphical Analysis) วงจรทรานซิสเตอร์ใน ภาพที่ 2.2 (a) ได้รับ แรงดันไบอัส ที่เบสคือ V_{EE} และแรงดันที่คอลเลกเตอร์ด้วย V_{CC} ทำให้เกิดกระแส I_B, I_C และ I_E ไหลในวงจรเมื่อทำการปรับค่าแรงดัน V_{BB} ให้ได้กระแส $I_B = 100\mu A, 200\mu A$ จนถึง $600\mu A$ โดยให้แรงดัน V_{CC} คงที่ที่ 10V จะได้ลักษณะสมบัติทางคอลเลกเตอร์ ดังกราฟ ภาพที่ 2.2 (b)



(a) Bias circuit



(b) Characteristic curve

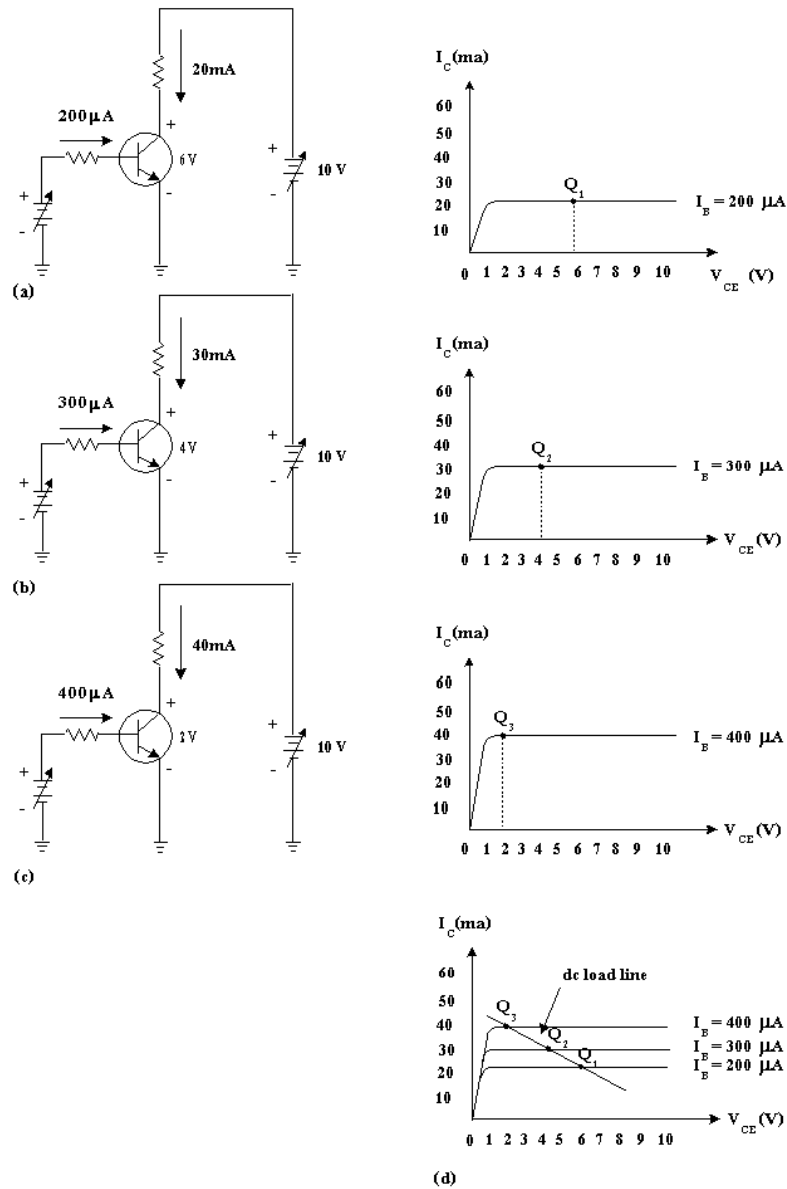
ภาพที่ 2.2 การหากราฟลักษณะสมบัติทางคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ชนิด NPN

การหาจุดทำงาน (Q-Point) ของทรานซิสเตอร์ เริ่มจากการปรับ

V_{BB} ให้ได้ $I_B = 220\mu A$ ดังภาพที่ 2.2 (a) จะได้ค่ากระแส I_C ตามสมการ $I_C = \beta I_B = 20mA$ และค่าแรงดัน V_{CE} คือ $V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$

$$\begin{aligned} V_{CE} &= 10 \text{ V} - (20mA)(200 \Omega) \\ &= 10 \text{ V} - 4 \text{ V} \\ &= 6 \text{ V} \end{aligned}$$

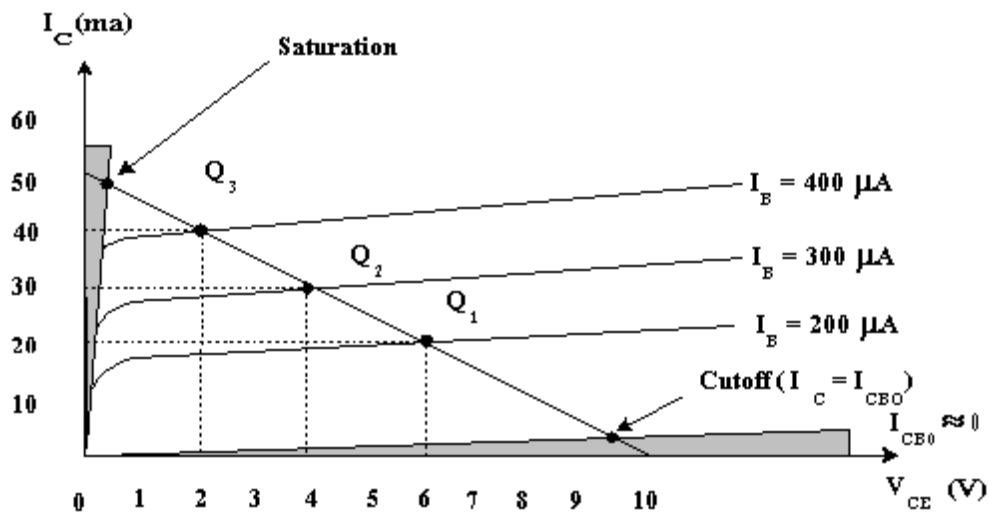
เมื่อลากเส้นประจากจุดแรงดัน $V_{CE} = 6 \text{ V}$ ไปตัดเส้นกราฟ I_C ที่ $I_B = 200\mu A$ จะได้จุดทำงาน (Q1) ของวงจร ดังภาพ ที่ 2.3 (a) ในทำนองเดียวกัน เมื่อปรับแรงดัน V_{BB} ให้กระแส I_B เพิ่มขึ้นเป็น $300\mu A$ จะได้ I_C เพิ่มขึ้นเป็น $30mA$ เป็นผลให้แรงดัน $V_{CE} = 4 \text{ V}$ ขณะที่จุดทำงาน (Q) ของวงจรเปลี่ยนไปจาก Q1 เป็น Q2 ดัง ภาพ ที่ 2.3 (b) และเมื่อปรับแรงดัน V_{BB} อีกครั้งให้ได้ $I_B = 400\mu A$ จะได้ $I_C = 40mA$ ทำให้เกิดแรงดัน V_{CE} เท่ากับ 2 V จะได้จุดทำงานเปลี่ยนจาก Q2 เป็น Q3 ดังรูปที่ 2.3(c)



ภาพที่ 2.3 การปรับจุดทำงาน (Q-Point) ของวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์

เส้น โหลดไฟตรง (DC-load Line) จากการสังเกตจะพบว่าค่ากระแส I_C เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามค่ากระแส I_B และค่าแรงดัน V_{CE} จะลดลงเมื่อกระแส I_C เพิ่มขึ้น ดังนั้นจุดทำงานของทรานซิสเตอร์จะ เปลี่ยนแปลง ไปตามค่ากระแส I_B (คือ กระแสที่วงจรไบอัสจ่ายให้กับทรานซิสเตอร์) และทางเดินของจุด Q นี้เองเรียกว่า เส้น โหลดไฟตรง (DC-load Line) ดัง ภาพ ที่ 2.3 (d) จากวงจรในภาพที่ 2.4 นั้นถ้าทำการปรับค่ากระแส I_B เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ค่ากระแส I_C จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุด สูงสุดเรียกว่าจุดอิ่มตัว (Saturation Point) ที่ค่ากระแส $I_C \approx 50 \text{ mA}$ ดัง ภาพ ที่ 2.4 และถ้า

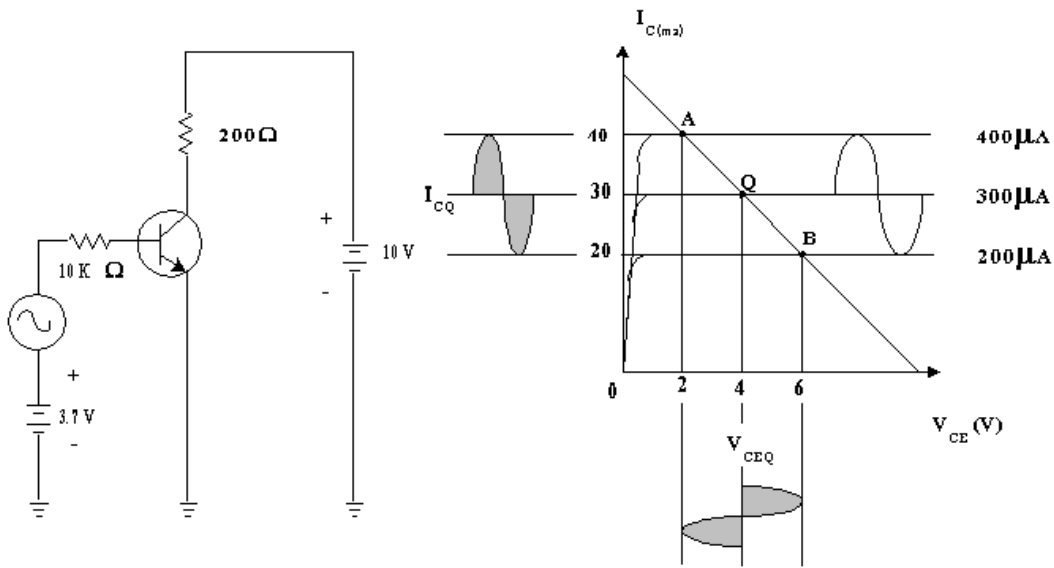
ลดค่ากระแส I_B ลงมาจนทรานซิสเตอร์หยุดทำงานคือ $I_C = 0mA$ ($I_B = 0mA$) จะเรียกว่าจุดตัดออฟ ในขณะที่กระแสคอลเลกเตอร์จะเกิดเฉพาะกระแสรั่วไหลระหว่างรอยต่อคอลเลกเตอร์กับเบสเท่านั้น ($I_C = I_{CBO}$) จากภาพที่ 2.4 จะเห็นว่า เส้นโหลดไฟตรงจะลาดเอียงจากจุดอิมิต์วไปสู่ออฟ และนี่คือทางเดินของจุดทำงานของวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์



ภาพที่ 2.4 เส้น โหลดไฟตรง (DC Load Line)

2.3.3 การทำงานแบบเชิงเส้น

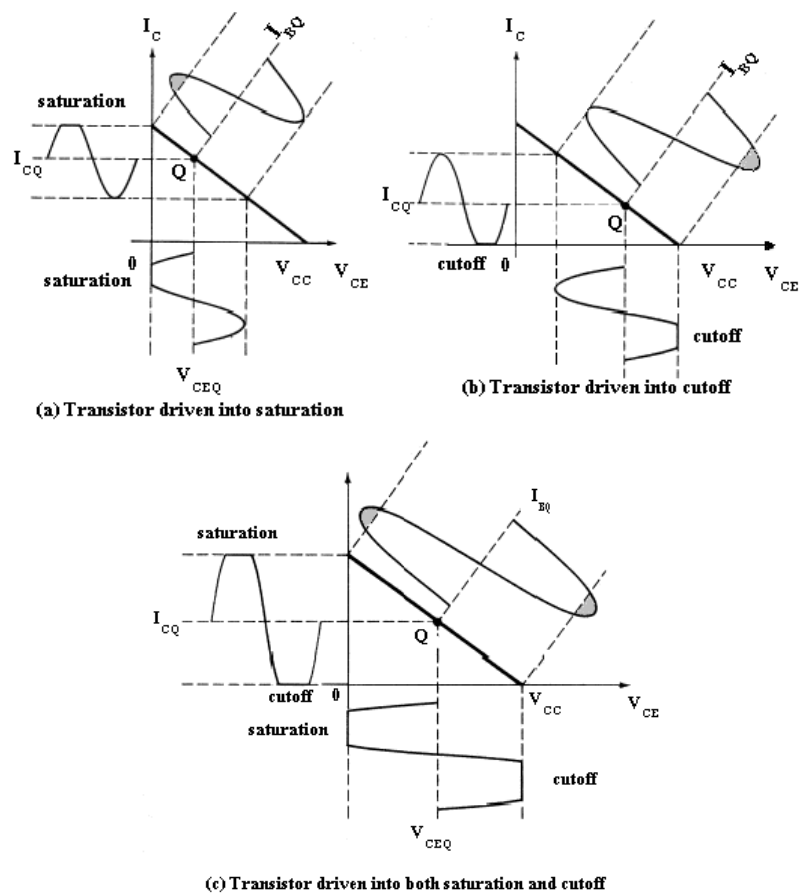
การทำงานแบบเชิงเส้น (Linear Operation) เมื่อพิจารณาในกราฟรูปที่ 3 ย่านการทำงานระหว่างจุด อิมิต์วจนถึงตัดออฟเรียกว่า ย่านขยายสัญญาณเชิงเส้น (Linear Region) หมายความว่าถ้า นำทรานซิสเตอร์ ไปขยายสัญญาณไฟสลับ เช่น รูปไซน์ ฯลฯ ลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้รับ จะปรากฏอย่างสมบูรณ์ไม่มีการผิดเพี้ยน (Distortion) ในย่านนี้เท่านั้น ถ้านำทรานซิสเตอร์ที่ไ้ รับไบอัสไปขยายสัญญาณไซน์ดังภาพที่ 2.5 ถ้าเส้น โหลดไฟตรงแสดงจุดทำงานของวงจรที่แรงดันอินพุตเท่ากับมุมศูนย์ จุดทำงาน (Q) คือจุดที่แรงดัน $V_{CE} = 4V$ และ $I_C = 30mA$ จุดนี้จะเรียกกระแสคอลเลกเตอร์ว่ากระแสคอลเลกเตอร์ที่จุด Q ($I_{CQ} = 30mA$) และเรียกแรงดัน V_{CE} ที่จุด Q ว่า ($V_{CEQ} = 4V$) ที่จุดทำงานจะมีกระแส $I_B = 300mA$



ภาพ ที่ 2.5 การเปลี่ยนค่าสัญญาณอินพุต I_B เป็นผลต่อกระแส I_C และแรงดัน V_{CE}

สมมติว่าแรงดันคลื่น ไซน์สูงสุดทำให้เกิด $I_B = 400\mu A$ และเมื่อแรงดันคลื่น ไซน์ต่ำสุดทำให้เกิด $I_B = 200\mu A$ จะทำให้กระแส I_C เปลี่ยนแปลงไปด้วย กล่าวคือ เมื่อ $I_B = 400\mu A$ (เมื่อ $\beta = 100$) และเมื่อ กระแส $I_B = 200\mu A$ จะได้กระแส $I_C = 20\mu A$ ในทำนองเดียวกันเมื่อกระแส I_C เปลี่ยนแปลงเป็นคลื่น ไซน์ระหว่าง $20\mu A$ ถึง $40\mu A$ จะทำให้แรงดัน V_{CE} เปลี่ยนแปลงไปด้วยคือเปลี่ยนแปลงไปในช่วง $2V$ ถึง $4V$ เมื่อกำหนดจุดที่เกี่ยวข้องทั้ง 3 จุดคือ จุด A จุด Q และจุด B ลงบนเส้นโหลดไฟตรงเราจะ ได้ข้อมูลเพิ่มเติมพออธิบายได้ดังนี้คือ ที่จุด A ของเส้นโหลดไฟตรง เรียกว่า จุดสูงสุดด้านบวก (Positive Peak) ที่จุด B ของเส้นโหลดไฟตรง เรียกว่า จุดสูงสุดด้านลบ (Negative Peak) ที่จุด Q คือจุดทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์ที่จุดนี้คือจุดที่คลื่น ไซน์อินพุตมีค่าแรงดันเท่ากับศูนย์จะ ทำให้เกิดค่าของ V_{CEQ}, I_{CQ} และ I_{BQ} ความเพี้ยนของสัญญาณขาออก (Distortion of The Output) ความเพี้ยนของสัญญาณขาออกเกิดขึ้นเมื่อสัญญาณขาออกโดนขริบ (Clip) เนื่องจากสาเหตุ 3 ประการคือ

1. จุดทำงานอยู่ใกล้จุดอิ่มตัว ดังรูปที่ 5 (a) ทำให้สัญญาณอินพุตที่ ป้อนเข้าสู่วงจรเกินขอบเขต (Over Driven) จะเห็นว่าด้านบนของ I_B ส่วนที่เร่งเกินจากจุดอิ่มตัวทำให้ทรานซิสเตอร์ที่ขยายกระแส I_C ออกมาถูกขริบทางด้านบนด้วย ส่วนด้านล่างกระแส I_C ขยายแล้วไม่เกินไป ดักออฟจึงไม่ถูกขริบเหมือนด้านบน สำหรับ V_{CE} จะถูกขริบด้านบนเช่นเดียวกัน

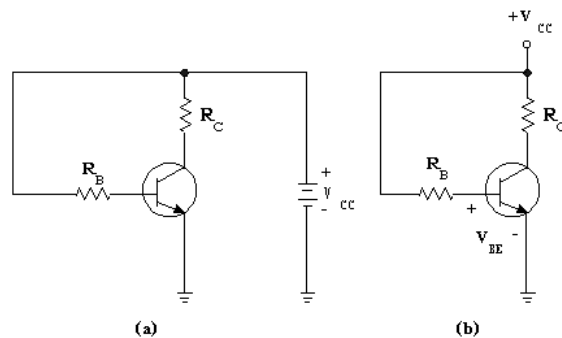


ภาพที่ 2.6 ภาพความเพี้ยนของสัญญาณขาออกที่ได้จากวงจรขยายทรานซิสเตอร์

2. จุดทำงานอยู่ใกล้จุดคัตออฟ ตามภาพที่ 2.6 (b) เมื่อจุดทำงานของวงจรอยู่ใกล้จุดคัตออฟ ทำให้การขยายสัญญาณ I_E ไปสู่สัญญาณขาออก I_C ถูกขริบด้านล่างออกไป คือส่วนที่แรงในภาพที่ 2.6 (b) ทำให้ สัญญาณขาออก I_C และ V_{CE} ถูกขริบออกด้านล่างดัง ภาพที่ 2.6 (b)
3. จุดทำงานอยู่กลางเส้น โหลดไฟตรง ตามภาพที่ 2.6 (c) สภาวะที่ปกติคือการกำหนดจุดทำงานของวงจรทรานซิสเตอร์ให้อยู่กลางเส้นโหลดไฟตรง เพราะจะทำให้การขยายสัญญาณขาออกสามารถขยายได้สูงสุดทั้งทางด้านบนและด้านล่าง แต่จะเกิดความเพี้ยนของสัญญาณขาออกได้เมื่อป้อนสัญญาณอินพุตมากเกินไป สัญญาณอินพุตจะถูกขริบทั้งด้านบนและด้านล่าง เป็นผลให้สัญญาณขาออกถูกขริบทั้งสองด้านเช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 2.6 (c)

2.3.4 การไบอัสเบส

การไบอัสเบส (Base Bias) เป็นวิธีการไบอัสทรานซิสเตอร์เบื้องต้น ที่ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายไบอัสที่คอลเลกเตอร์ (V_{CC}) และแหล่งจ่ายไบอัสที่เบส (V_{BE}) หรืออาจใช้แหล่งจ่ายไบอัสชุดเดียวกันก็ได้ ดังแสดงใน ภาพที่ 2.7 (a) แสดงการไบอัสด้วยสัญลักษณ์ของแบตเตอรี่ (V_{CC}) สำหรับภาพที่ 2.7 (b) ใช้สัญลักษณ์ของแหล่งจ่ายแรงดันแทน



ภาพที่ 2.7 วงจรไบอัสเบส (Base Bias)

จากภาพที่ 2.7 $V_{RB} = V_{CC} - V_{BE}$

$$I_B = \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \right)$$

เมื่อพิจารณาค่า I_{CB} เพราะว่า $I_{CB} \ll I_C$

$$\text{ดังนั้น } I_C = \beta I_B$$

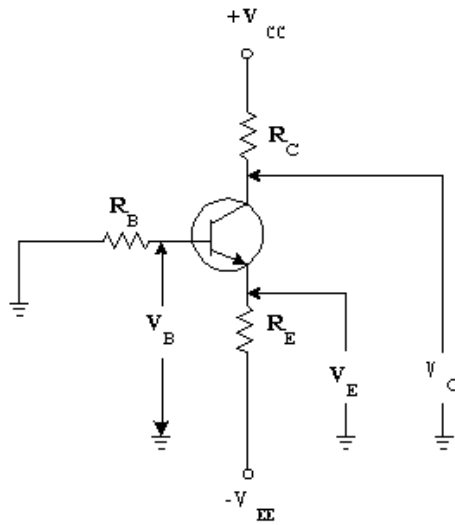
$$\text{และ } V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

แทนค่า 2 ใน 3

$$V_{CE} = V_{CC} - \beta I_B R_C$$

2.3.5 การไบอัสอิมิตเตอร์

วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์แบบ Emitter Bias นี้มีเสถียรภาพของการทำงานดีกว่าแบบไบอัสเบส ต้องใช้แหล่งจ่ายไบอัส 2 ชุดคือ V_{CC} เป็นแหล่งจ่ายแรงดันบวกไบอัสที่คอลเลกเตอร์และ $-V_{EE}$ เป็นแหล่งจ่ายแรงดันลบไบอัสระหว่างอิมิตเตอร์กับเบส ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 วงจรไบอัสอิมิตเตอร์

จากภาพที่ 2.8 จะเห็นว่า

$$V_B = 0$$

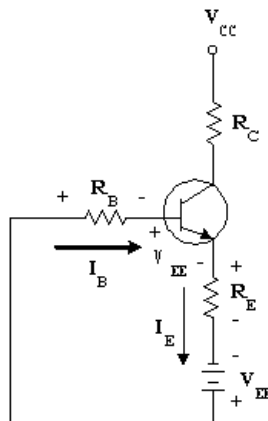
$$V_E = -V_{BE}$$

$$I_E \left(\frac{V_E - V_{EE}}{R_E} \right)$$

$$I_C = I_E$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C$$

เสถียรภาพของวงจรไบอัสอิมิตเตอร์ (Stability of Emitter Bias) ถ้าใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์วิเคราะห์วงจรในภาพที่ 2.8 สามารถเขียนใหม่ได้ดัง ภาพที่ 2.9 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ที่วงจรไบอัสอิมิตเตอร์



ภาพที่ 2.9 การใช้กฎของเคอร์ชอฟฟ์วิเคราะห์วงจรในส่วนของเบสและอิมิตเตอร์

$$V_{EE} - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

$$V_{EE} = I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E$$

$$I_B = \frac{I_E}{\beta_{dc}}$$

$$\left(\frac{I_E}{\beta_{dc}} \right) R_B + I_E R_E + V_{BE} = V_{EE}$$

$$I_E \left(\frac{R_B}{\beta_{dc}} + R_E \right) + V_{BE} = V_{EE}$$

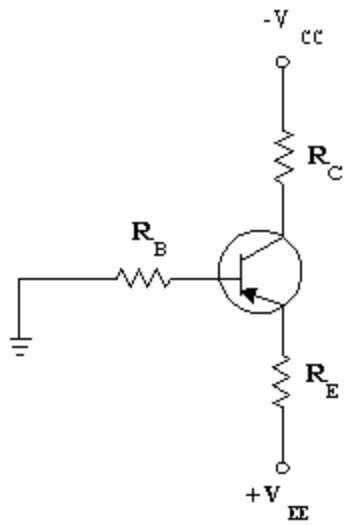
$$I_E \left(\frac{-V_{BE}}{R_E + R_B + \beta_{dc}} \right)$$

$$I_E \gg \frac{R_E}{\beta_{dc}}$$

$$I_E \left(\frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_E} \right)$$

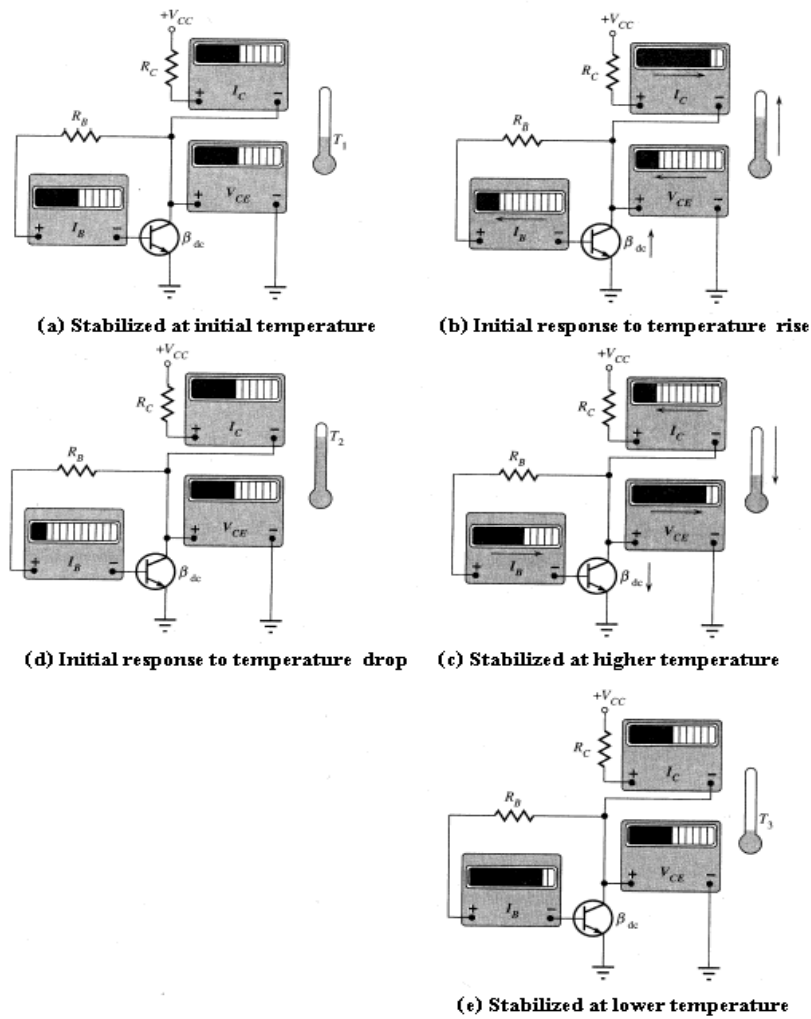
ปกติค่าของ $V_{EE} \gg V_{BE}$ ดังนั้น $I_E = \left(\frac{V_{EE}}{R_E} \right)$ การไบอัสอิมิตเตอร์กับทรานซิสเตอร์ PNP

(Emitter Biased PNP) วงจรการไบอัสเบื้องต้นแสดง ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 วงจร Emitter Bias กับทรานซิสเตอร์ชนิด PNP

ลักษณะของการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และการทำงานของวงจรไบอัสป้อนกลับที่คอลเลกเตอร์แสดง ในภาพที่ 2.11 (a),(b), (c), (d), (e)



ภาพที่ 2.11 เสถียรภาพของวงจรไบอัสย้อนกลับที่คอลเลกเตอร์เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นหรือลดลง

จากภาพที่ 2.11 (a) ที่อุณหภูมิห้อง (T_1) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทันทีทันใด ดังภาพที่ 2.11 (b) กระแสเบส I_B จะ ลดลง กระแส I_C จะเพิ่มขึ้น และ V_{CE} จะลดลง เพราะค่า β_{dc} เพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นคงที่ที่ T_2 ดังภาพที่ 2.11 (c) กระแส I_B จะลดลงและคงที่ ส่วนแรงดัน V_{CE} จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและคงที่ สำหรับกระแส I_C จะลดลงและคงที่เช่นกัน จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น I_C และ I_B จะลดลงเพื่อชดเชยการเพิ่มขึ้นของ β_{dc} และ V_{CE}

2.4 คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (Capacitive Sensor) [1][6]

โครงสร้างตามธรรมชาติของ ตัวเก็บประจุสามารถใช้เครื่องวัดพื้นฐานในการวัดตำแหน่ง (Position) หรือการเคลื่อนที่ (displacement) ตัวเก็บประจุประกอบด้วยแผ่น โลหะ 2 แผ่นวางขนานกัน ซึ่งเรียกว่าแผ่น Plate ระหว่างแผ่น Plate จะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นในการพิจารณาค่าเก็บประจุ จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ของแผ่น Plate เพียงอย่างเดียว ลักษณะเฉพาะของตัวเก็บประจุจำนวนค่าเก็บประจุ จะขึ้นกับจำนวนของพื้นที่ของแผ่น Plate ทั้ง 2 แผ่นที่วางซ้อนกันอยู่ แผ่น Plate คงที่และแผ่น Plate เคลื่อนที่ประกอบรวมกันเป็น ตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ (Variable Capacitor) ซึ่งจะใช้เป็น Capacitance sensor เมื่อปรับพื้นที่ที่ซ้อนกันอยู่ โดยปรับให้แผ่น Plate เคลื่อนที่จะทำให้ค่าเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไป

$$C = K\epsilon_0(A/d) \quad (2.1)$$

- ค่า K เป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของวัสดุบางชนิด
- ค่า C ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ
- ค่า $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} C^2 / N.m^2$
- ค่า A พื้นที่หน้าตัดแผ่นเพลท
- ค่า d ระยะห่าง

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ,K

วัสดุ	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก ,K
สุญญากาศ(แผ่น Plate ใกล้เคียงกันมากๆ)	1
อากาศ (แห้ง)	1.00059
กระดาษ	3.6

การประยุกต์ใช้ Capacitance sensor เช่น ใช้เป็นตัวตรวจสอบตำแหน่ง Position sensor ซึ่งสามารถกำหนดตำแหน่ง การเคลื่อนที่ของแผ่น Plate ไปตำแหน่งใดก็ได้ โดยที่การเคลื่อนที่จะวัด

ออกมาเป็นค่าเก็บประจุของแต่ละตำแหน่ง คุณสามารถเปลี่ยนปริมาณของค่าเก็บประจุ โดยการใช้นิ้วสัมผัสแผ่น Plate ของตัว Capacitor ค่าประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่อยู่ในร่างกายมนุษย์ จะไปขนานกับค่าประจุของ Capacitor ผลรวมของค่าตัวเก็บประจุจะเป็นผลรวมของค่าประจุไฟฟ้า ในร่างกายรวมกับค่าประจุของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวตรวจสอบ

$$C_{total} = C_{body} + C_{sense} \quad (2.2)$$

ค่าเก็บประจุที่เปลี่ยนสามารถ ตรวจสอบโดยวงจรภายนอก หรือเครื่องมือวัด อุปกรณ์ ตรวจสอบการสัมผัสนี้เรียกว่า Touch Sensor ตัวตรวจสอบค่า ประจุ (Cs) และ Timing Resistor (RT) ตัวร่วมอยู่กับ I_C กลายเป็นวงจร RC Oscillator ความถี่ Output (f_0) จะขึ้นอยู่กับ RC Time constant ของอุปกรณ์ข้างต้น Input ดังนั้นถ้าทำการเปลี่ยนตำแหน่ง ของ sensor โดยเคลื่อนที่แผ่น Plate เพื่อ เปลี่ยนค่าประจุค่า f_0 จะเปลี่ยน ไปคุณสามารถใช้วงจรนี้เป็นตัวตรวจสอบการสัมผัส Touch Sensor โดยที่ค่า Output Frequency จะเปลี่ยน ไปเมื่อแผ่น Plate ถูกสัมผัส

Capacitance sensor - เป็นตัวตรวจสอบการสัมผัส ตำแหน่ง หรือการเคลื่อนที่ โดยการเปลี่ยนค่าตาม ประจุไฟฟ้า

Displacement - ระยะทางที่วัสดุเคลื่อนที่

Position sensor - เป็นตัวตรวจสอบการสัมผัสแบบตำแหน่งของวัตถุ

Proximity detector - เป็นตัวตรวจสอบระยะระหว่างวัตถุ

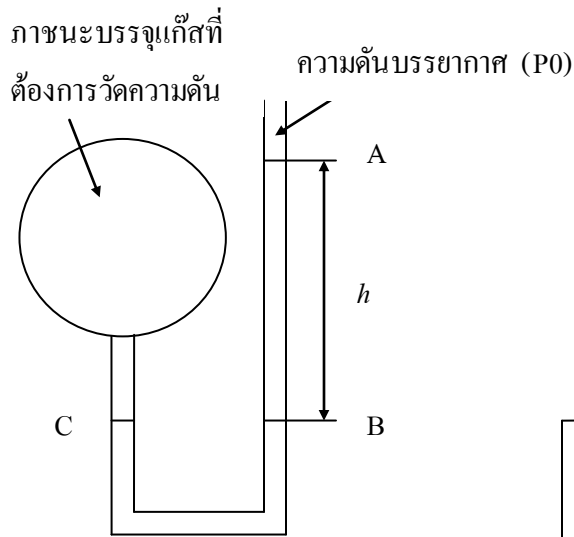
Touch sensor - เป็นตัวตรวจสอบการสัมผัสของร่างกายโดยตรวจสอบค่าประจุไฟฟ้าใน ร่างกาย

2.5 เซ็นเซอร์ความดัน (Pressure Sensor)

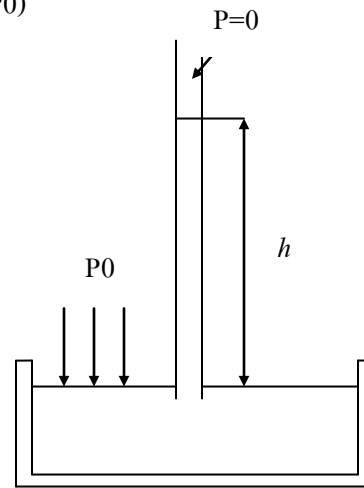
เกจวัดความดัน (Pressure gauge) ของแก๊สที่บรรจุในภาชนะปิดแบบใช้หลักการง่ายที่สุด เรียกว่าแมนอมิเตอร์ (Manometer) ซึ่งเป็นหลอดแก้วรูปตัว U ดังรูป 13.7 ในหลอดแก้วบรรจุด้วย น้ำหรือปรอทปลายข้างหนึ่งของหลอดแก้วเปิดสู่อากาศและอีกข้างหนึ่งต่อกับภาชนะบรรจุแก๊สที่ต้องการวัดความดัน ดังนั้น ระดับของเหลวในหลอดจึงไม่เท่ากัน ความดันที่จุด A เป็นความดัน บรรยากาศ P_0 ที่จุด B มีความดันเท่ากับ $P_0 + \rho gh$ เมื่อ ρ เป็นความหนาแน่นของของเหลว ส่วน ความดันที่จุด C เป็นความดันของแก๊สในภาชนะซึ่งเท่ากับความดันที่จุด B ดังนั้น ความดัน P ของ แก๊สในภาชนะปิด คือ

$$P = P_0 + \rho gh \quad (2.3)$$

ความดัน P ในสมการ (13.8) เรียกว่า ความดันสมบูรณ์ (Absolute Pressure) ส่วนความดัน $P - P_0 = \rho gh$ เรียกว่าความดันเกจ (Gauge Pressure) ถ้า P มากกว่า P_0 เครื่องหมายของ h เป็นบวก แต่ถ้า P น้อยกว่า P_0 เครื่องหมายของ h เป็นลบ



ภาพที่ 2.12 แมนอมิเตอร์ชนิดหลอดแก้วรูปตัว U ปลายเปิด



ภาพที่ 2.13 แบริอมิเตอร์แบบปรอท ความดันของปรอทที่มีระดับสูง h

เกจวัดความดันอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า *แบริอมิเตอร์* (Barometer) ซึ่งประกอบด้วยหลอดแก้วบรรจุปรอทโดยด้านปลายเปิดคว่ำจุ่มในอ่างปรอท และด้านปลายปิดที่มีช่องว่างเหนือระดับปรอทในท่อที่ถือว่าเป็นสุญญากาศ (ความดัน ≈ 0) ดังนั้น ความดัน (อากาศ) P_0 ที่กดผิวปรอทจะเท่ากับ ความดันของปรอทในหลอดซึ่งมีระดับสูง h เหนือผิวปรอทในอ่าง (รูป 13.8) นั่นคือ $P_0 = \rho gh$ ความดัน 1 บรรยากาศ (1 atm) จึงเป็นความดันเมื่อระดับความสูงของปรอท $h = 0.76 \text{ m}$ ที่ 0°C ซึ่งที่อุณหภูมินี้ความหนาแน่นปรอท $\rho = 13.595 \text{ kg/m}^3$ ดังนั้น

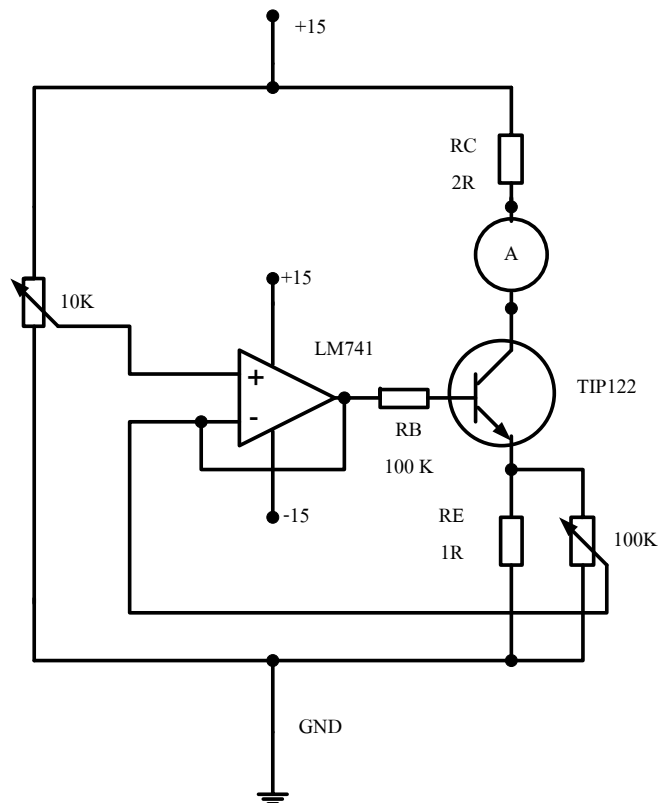
$$\begin{aligned} 1 \text{ atm} &= (13.595 \times 10^3 \text{ kg/m}^3) (9.80 \text{ m/s}^2) (0.76 \text{ m}) \\ &= 1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \\ &= 1.01 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

บทที่ 3

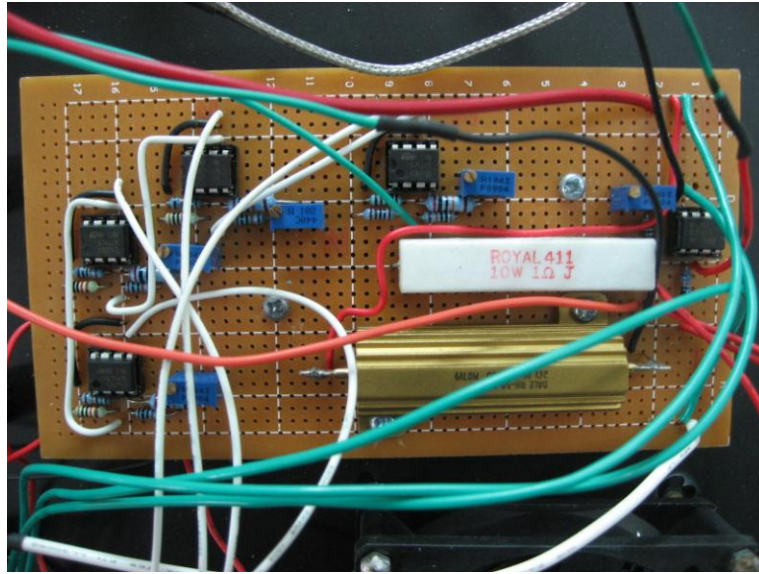
การออกแบบและการคำนวณ

3.1 การออกแบบวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์ (ใช้ในชุดการทดลอง เทอร์โมคัปเปิ้ล และ เทอร์มิสเตอร์) เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อน

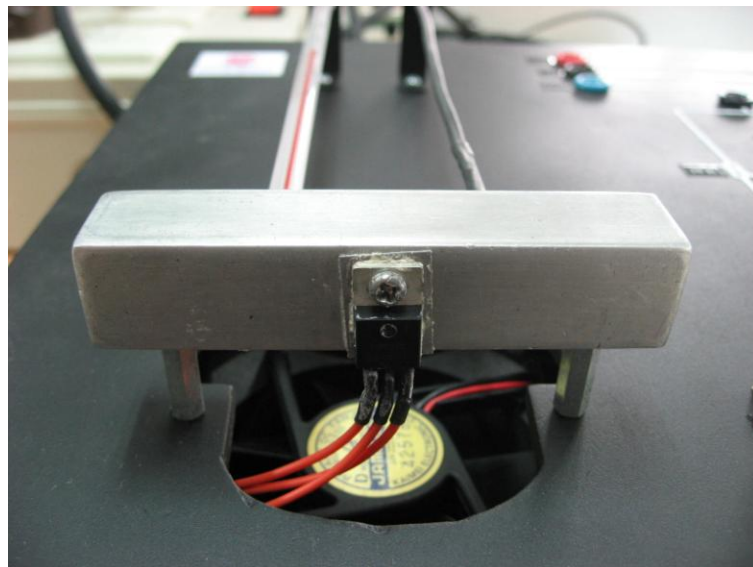
เป็นวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์ (Fix Bias) ความต้องการของการออกแบบวงจรนี้คือความร้อนที่เกิดขึ้นจากตัวทรานซิสเตอร์ส่งผ่านไปยัง Heat Sink ใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ TIP122 ความร้อนจากทรานซิสเตอร์นั้นเกิดจากกระแสไฟฟ้าในวงจรตกคร่อมตัวทรานซิสเตอร์ จาก $I_C = \beta I_B$ เมื่อกระแสที่ I_C ขึ้นอยู่กับ I_B เราจึงควบคุมกระแสทางดำน I_B โดยมี LM741 ต่อเข้าไปในวงจรเพื่อรักษาเสถียรภาพในวงจรให้ดีขึ้นในภาพที่ 3.1 , 3.2 และ 3.3



ภาพที่ 3.1 วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์



ภาพที่ 3.2 การต่อวงจร ไบอัสทรานซิสเตอร์ และวงจรขยาย ที่นำมาใช้งานจริง



ภาพที่ 3.3 การนำทรานซิสเตอร์ติดกับฮีทซิงค์ (Heat sink)

จากภาพที่ 3.1 หา KVL จะได้

$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - I_E R_E = 0$$

$$I_E = I_C + I_B$$

$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - (I_C + I_B) R_E = 0$$

$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - I_C R_E + I_B R_E = 0$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} - \beta I_B R_E - I_B R_E = 0$$

$$I_B (R_B + \beta R_E + R_E) = V_{CC} - V_{BE}$$

$$I_B (R_B + R_E (\beta + 1)) = V_{CC} - V_{BE}$$

$$I_B = \left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B + R_E (\beta + 1)} \right)$$

$$I_B = \left(\frac{V_{CC}}{R_B + \beta R_E} \right)$$

$$I_B = \left(\frac{15V}{100k\Omega + (1000 \times 1\Omega)} \right) = 0.148mA$$

จากสมการ KVL จะได้

$$V_{CC} - I_E R_E - V_{CE} - I_C R_C = 0$$

$$I_C \approx I_E$$

$$I_C = \beta I_B = 1000(0.148mA) = 0.148A \approx I_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

$$V_{CE} = 15V - 0.148(2\Omega + 1\Omega)$$

$$= 14.556V$$

3.2 การออกแบบวงจรจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source) ของชุดเทอร์มิสเตอร์

การใช้ออฟแอมป์หนึ่งตัวสำหรับจ่ายกระแสคงที่ ความต้านทานของโหลดขึ้นอยู่กับแรงดันที่ป้อนให้ V_{IN} และ V_A สามารถเขียนเป็นสมการ

$$V_A = \frac{-R_2}{R_1} V_{IN} + V_B \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.1)$$

โดยใช้สมการในเชิงลบและบวกของออฟแอมป์ จัดรูปสมการใหม่

$$V_A = \frac{-R_2}{R_1} V_{IN} + V_B$$

จะได้

$$V_A - V_B = \frac{-R_2}{R_1} V_{IN}$$

ตามกฎของโอห์มเท่ากับ

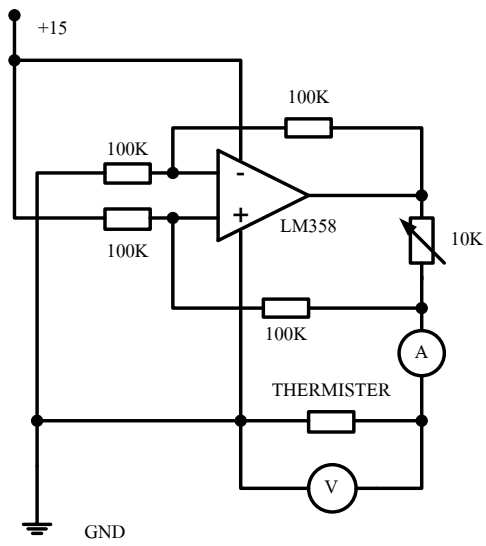
$$I_B = \frac{V_A - V_B}{R_X}$$

$$I_B R_X = V_A - V_B$$

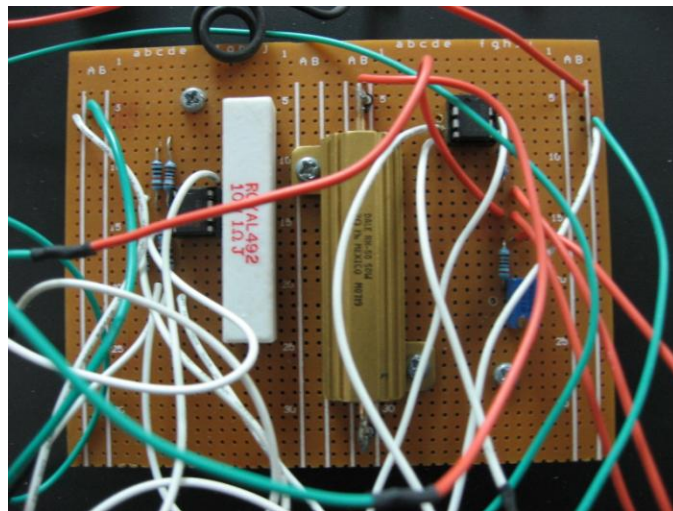
$$I_B = \left[\left(\frac{-R_2}{R_1} \right) \left(\frac{1}{R_X} \right) \right] V_{IN}$$

จากการคำนวณ

$$\begin{aligned} I_B &= \left[\left(\frac{-100k}{100k} \right) \left(\frac{1}{10k} \right) \right] 15V \\ &= -1.5 \text{ mA} \end{aligned}$$



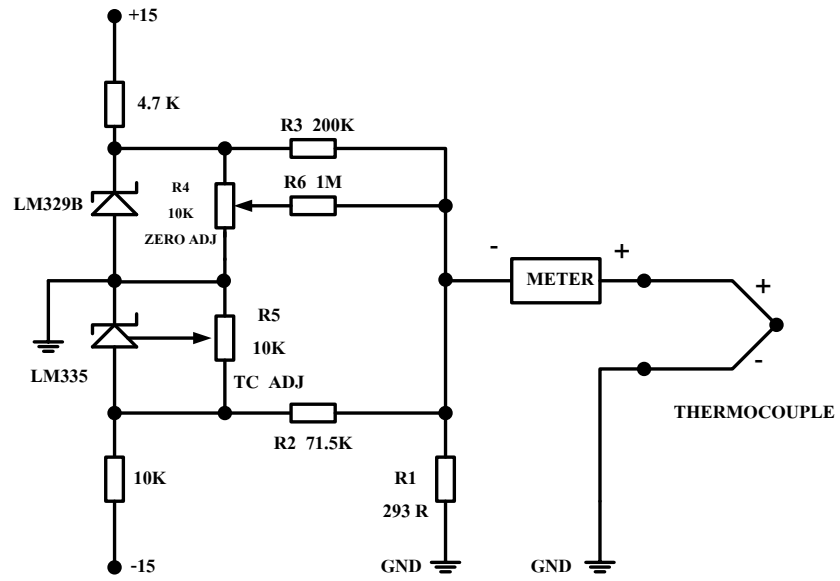
ภาพที่ 3.4 วงจรจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source)



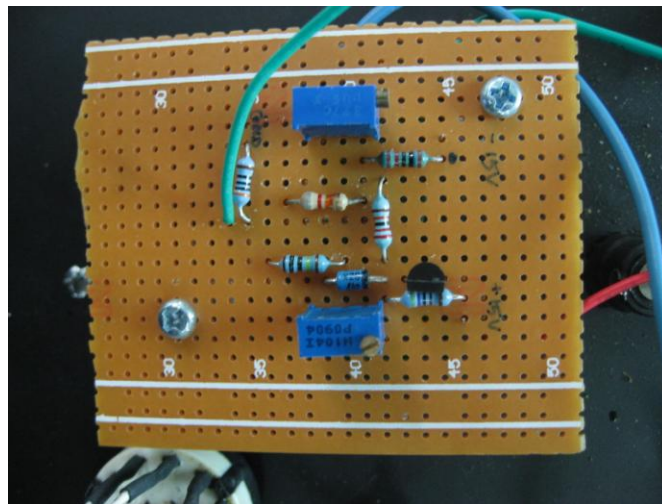
ภาพที่ 3.5 วงจรจ่ายกระแสคงที่ (Constant Current Source) ที่ใช้ในงานจริง

3.3 การออกแบบวงจรปรับ Off-set และขยายแบบ (Non-Inverting) ของเทอร์โมคัปเปิล

IC ตรวจจับอุณหภูมิประกอบไปด้วย LM135, LM235, LM335 จะถูกใช้ในการวัดความเป็นเชิงเส้นของแรงดันกับอุณหภูมิซึ่งจะถูกใช้เป็น วงจรชดเชยอุณหภูมิการทำงานของวงจร IC LM135, LM235, LM335 จะใช้วัดความแตกต่างของแรงดันเบสและอิมิตเตอร์โดยเป็นคู่ทรานซิสเตอร์ที่ซึ่งจะมีระดับกระแสที่แตกต่างกันและแสดงพฤติกรรมเหมือนกับซีเนอร์ไดโอดในสถานะแรงดันพังทลายซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิสมบูรณ์ที่ $10\text{mV}/^\circ\text{K}$ LM135, LM235, LM335 จะสามารถแสดงให้เห็นค่าของระดับเอาต์พุตที่เป็น 0 ที่ระดับอุณหภูมิ 0°K ของอุณหภูมิ temperature coefficient เพื่อทำการเป็นวงจรชดเชยเพื่อจะปรับระดับอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิห้องที่ปราศจากอุณหภูมิข้างเคียงได้อย่างสิ้นเชิง สำหรับการใช้ตัวความคลาดเคลื่อนของตัวแบ่งความร้อนโดยพื้นฐานของความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากการใช้เทอร์โมคัปเปิลในการวัดเนื่องจากการที่ตำแหน่งเนื่องจากส่วนผสมวัสดุที่ประกอบมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดในเส้นลวดที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิล ดังนั้นในสถานะความคลาดเคลื่อนของแรงดันที่ออกมาจากตัวเทอร์โมคัปเปิลจะเกิดความแตกต่างกันขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติเทอร์โมคัปเปิลและความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวเทอร์โมคัปเปิลนี้เองสำหรับการชดเชยนี้จะใช้วงจรชดเชยซึ่งจะต้องเลือกระดับสัญญาณเอาต์พุตให้เหมาะสมโดยจะมีการสร้างระดับแรงดันอ้างอิงที่จุดเยือกแข็งของเทอร์โมคัปเปิลในสถานะอุณหภูมิ Ambient การที่จะสร้างอุณหภูมิในระดับนี้เป็นสิ่งที่ยากมากเพื่อให้เกิดการเหมาะสมกับระดับแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์โมคัปเปิลและอุณหภูมิ ดังนั้นด้วยตัวตรวจจับอุณหภูมินี้ที่จะทำการสร้างให้เกิดการเป็นเชิงเส้นได้อย่างสมบูรณ์จะต้องทำการปรับระดับแรงดันเพื่อให้เกิดเป็นเชิงเส้นได้อย่างเหมาะสม เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะให้ความเป็นเชิงเส้นได้ดีที่สุดขณะที่เป็นเชิงเส้นต่ำกว่าด้วยการใช้ตัวตรวจจับอุณหภูมิโดยที่จะชดเชยระดับอุณหภูมิตามภาพที่ 3.3



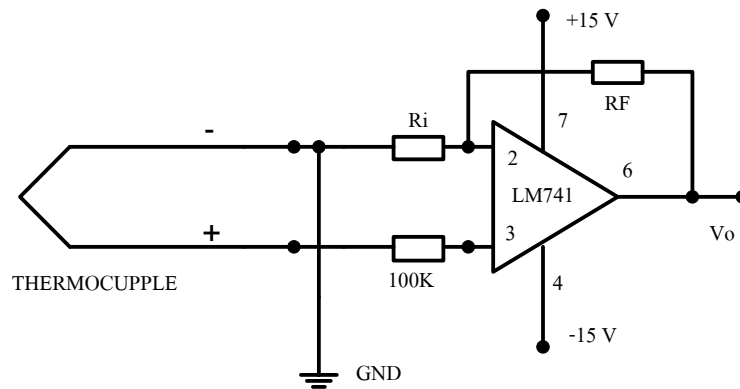
ภาพที่ 3.6 วงจรปรับ Off-set Thermocouple



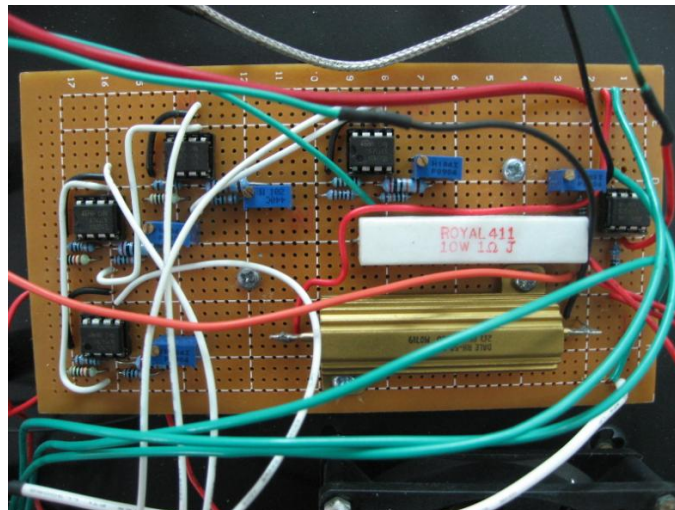
ภาพที่ 3.7 วงจรปรับ Off-set Thermocouple ที่ใช้ในงานจริง

วงจรรขยายของเทอร์โมคัปเปิลแบบ ไม่กลับเฟส $V_0 = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) V_1$ เนื่องจาก $V_i = 0$ จึง
 หาค่า V_1 ได้โดยใช้กฎการแบ่งแรงดันไฟฟ้าดังนี้คือ

$$V_1 = \frac{R_i}{R_i + R_f} V_0 \quad (3.2)$$



ภาพที่ 3.8 วงจรรขยายแบบ (Non-Inverting) ของเทอร์โมคัปเปิล



ภาพที่ 3.9 การต่อวงจร ไลอัสทรานซิสเตอร์ และวงจรรขยายที่นำมาใช้งานจริง

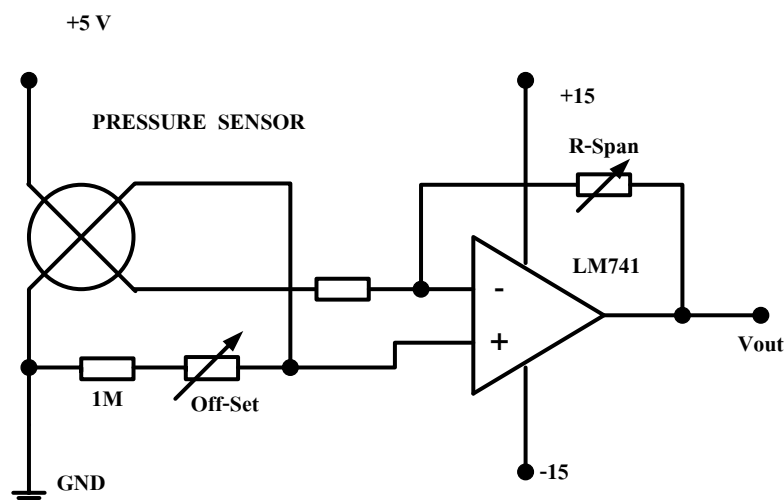
3.4 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณของ Pressure Sensor Amplifier

วงจรออปแอมป์แบบตัวเดียวนี้จะให้แรงเคลื่อนเอาต์พุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 4 โวลต์ เมื่อความดันด้านเอาต์พุตมีค่าเต็มสเกลค่ายอมรับได้จะเป็น $\pm 3\%$ นอกจากนั้นยังสามารถสอบเทียบความแน่นอนได้ถึง $\pm 1.5\%$ ในช่วงอุณหภูมิ 0 – 85 องศาเซลเซียส ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ปรับค่าของ R_{off} และ R_{span} แนะนำให้ใช้โพเทนซิโอมิเตอร์แบบหลายรอบเพื่อปรับค่าดังกล่าว

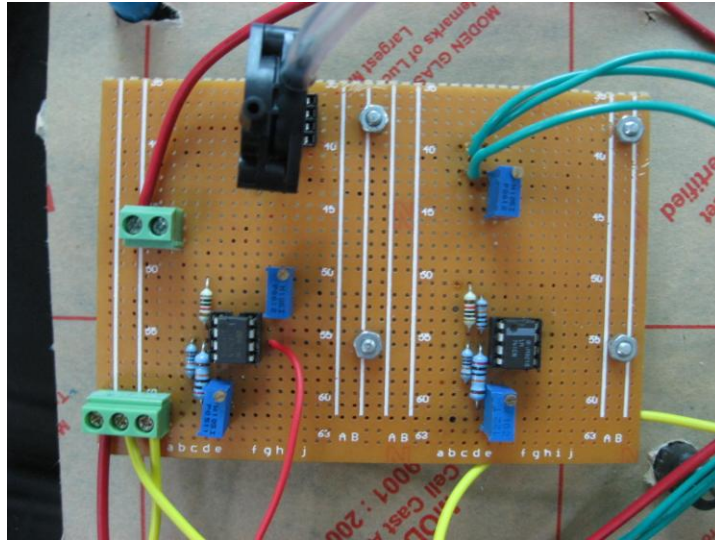
การปรับสภาพสัญญาณ (The Signal Conditioning) วงจรขยายที่ปรากฏเป็นแบบออปแอมป์ตัวเดียวซึ่งมีอิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตสูงแต่มีอิมพีแดนซ์ทางด้านเอาต์พุตต่ำและต้องใช้อัตราขยายค่าสูงๆ เพื่อการอินเทอร์เฟซ ซึ่งมีอัตราดังกล่าวปรับได้ดังสมการต่อไปนี้

$$G = 1 + \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_1 = R\text{-Span}$



ภาพที่ 3.10 การออกแบบวงจรของ PRESSURE SENSORS



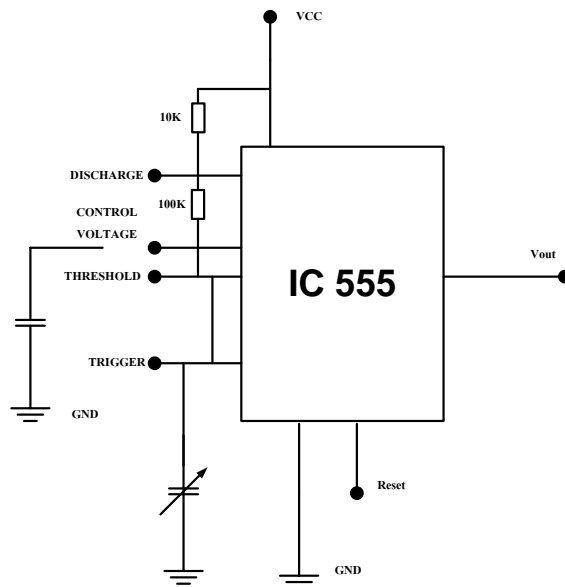
ภาพที่ 3.11 การออกแบบวงจรของ PRESSURE SENSORS ที่ใช้ในงานจริง

3.5 การออกแบบวงจรคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (Capacitive Sensor)

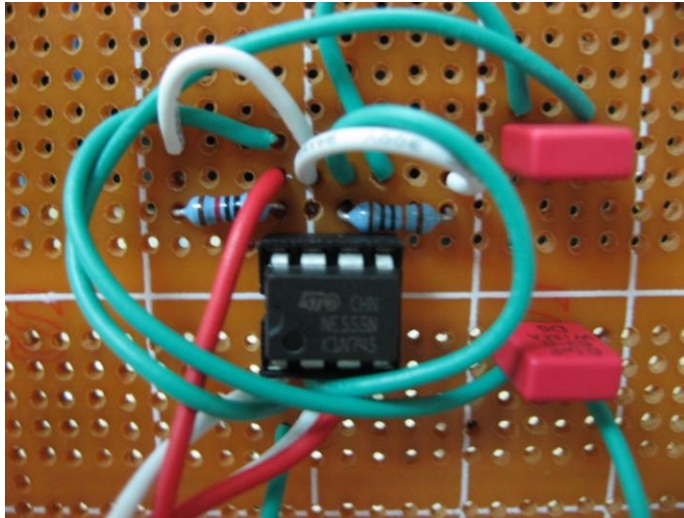
ตามแบบวงจรซึ่งเป็นวงจร Capacitance sensor วงจรรวมใช้ IC 555 ซึ่งเป็น timer นำมาต่อเป็นวงจร Astable multiabator หรือเรียกว่ากำเนิดความถี่อิสระ (Free-running aseillator) ตัวเก็บประจุ (C_s) ทำการชาร์จประจุผ่าน R_2 และ R_3 และทำการคายประจุผ่าน R_3 output ที่ได้จะเป็น square wave ซึ่งความถี่จะขึ้นอยู่กับ C_s, R_2, R_3 โดยที่

$$f_0 = \left[\frac{1.46}{(R_2 + 2R_3)(C_s)} \right] \quad (3.5)$$

C_s เป็นตัวเก็บประจุแบบเก็บค่าได้ความถี่ output ของวงจร จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแผ่น plate ของตัว Capacitor



ภาพที่ 3.12 วงจร Astable multiabator



ภาพที่ 3.13 วงจร Astable multivibrator ที่ใช้ในงานจริง

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

อุปกรณ์ ประกอบด้วยวัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน เครื่องมือต่างๆ ในการสร้างชิ้นงาน และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองชิ้นงานมีดังนี้

- Thermister , Thermocouple , Pressure Sensor , Capacitance Sensor
- เครื่องมือวัดกระแส
- เครื่องมือวัดแรงดัน
- อื่นๆ

4.2 วัสดุที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน

ได้แก่ เหล็กรูปพรรณชนิดต่างๆ ที่ใช้สำหรับในการทำโครงสร้าง แผ่นอะคริลิก ,แผ่นแมกกาไลต์ อลูมิเนียม ตะกั่ว สายไฟ สติกเกอร์ กาว น็อตยึด และอื่นๆ

4.3 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน

ได้แก่ เครื่องกลึง เครื่องเจียร ส่วนแท่น ส่วนมือ หัวแรง ตะไบขยาย คีม ไขควง และเครื่องตัดและอื่นๆ

4.4 การออกแบบชิ้นงาน

วิธีการออกแบบชิ้นงานจะต้องทราบถึงปัญหา และความสะดวกในการทดลองรวมถึงการทำความเข้าใจเกี่ยวกับวงจรที่เกี่ยวข้องในการทดลอง ลักษณะภายนอกที่เหมาะสมและสวยงาม

4.5 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบ

ข้อมูลเกี่ยวกับการ ออกแบบชุดทดลอง

4.5.1 ความหนาของกล่องชุดทดลอง	10 cm
4.5.2 ความกว้างของกล่องชุดทดลอง	30 cm
4.5.3 ความยาวของ กล่องชุดทดลอง	40 cm

4.6 ผลการทดสอบชิ้นงาน

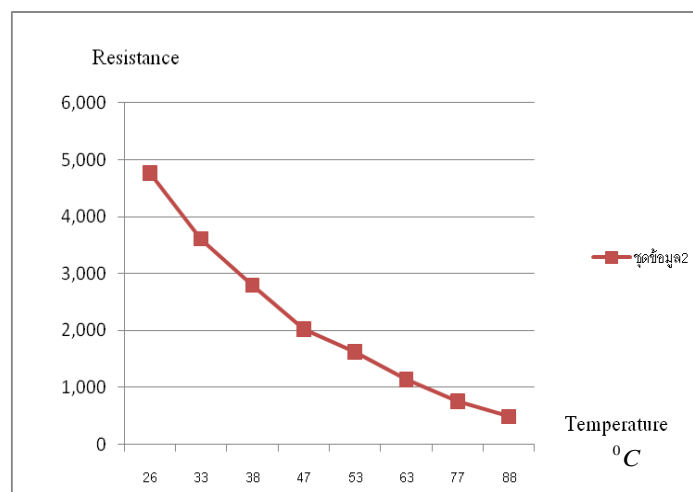
ผลการทดสอบการทำงานของชุดการทดลองทั้ง 4 ชุดเพื่อปรับและแก้ไขค่าความแตกต่างระหว่างการคำนวณทางทฤษฎี และทางปฏิบัติ เพื่อให้ค่าที่ออกมานั้น ใกล้เคียงกัน

4.7 ผลการทดสอบชุดทดลอง

4.7.1 Thermistor การทำงานของวงจรสามารถทำงานได้ตามทฤษฎีโดยค่าความต้านทานของเทอร์มิสเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยใช้เส้นกราฟจากการทดลอง เท่ากับ 24

ตารางที่ 4.1 ค่าจากการทดลองเทอร์มิสเตอร์

Bias Current Heater Control Scale div. (mA)	Temp of Glass Thermometer (T_a) °C	Output Voltage (U_A)	Resistance Ω จำนวน	Temp of Thermister (T_T) °C R-T Curve 240	%Error (Temp)
0	26	9.53 V	4,765	24	7.69
400	33	7.22 V	3,610	28	15.15
500	38	5.59 V	2,795	36	5.26
600	47	4.05 V	2,025	44	6.38
700	53	3.25 V	1,625	52	1.88
800	63	2.27 V	1,135	58	7.93
900	77	1.52 V	760	70	9.09
1000	88	0.98 V	490	85	3.40

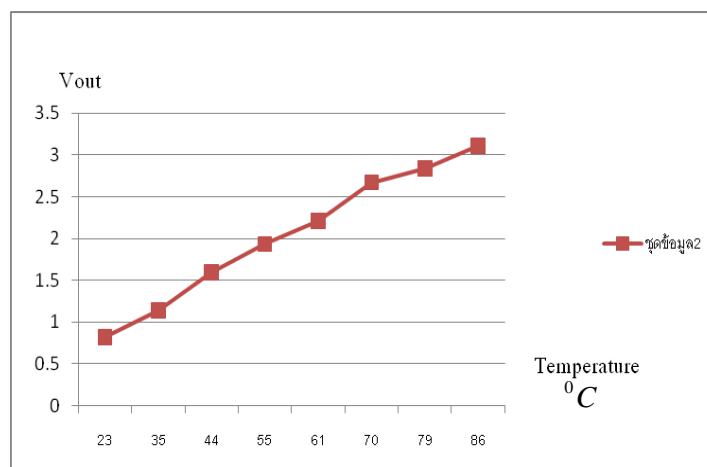


ภาพที่ 4.1 กราฟผลการทดลองเทอร์มิสเตอร์

4.7.2 Thermocouple การทำงานของวงจรนี้สามารถวัดค่าของแรงดันจากวงจรขยาย เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าของแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

ตารางที่ 4.2 ค่าจากการทดลองเทอร์โมคัปเปิล

Bias Current Heating Controller	Glass Thermocouple $^{\circ}C$	Reference Tables Thermocouple Voltage (mV)	Measured Thermocouple Voltage (mV) V_{out}	Hot-Junction Temp.	%Error Voltage
Scale div.	T_a	$U_c/1000$ mV	$U_c/1000$ mV	T_M	U_c
0	23	0.919	0.821	23	10.66
400	35	1.407	1.141	36.580	18.90
500	44	1.776	1.592	47.130	10.36
600	55	2.230	1.935	60.440	13.22
700	61	2.478	2.210	67.890	10.81
800	70	2.851	2.671	79.320	6.31
900	79	3.225	2.835	91.060	12.09
1000	86	3.516	3.110	100.407	11.55



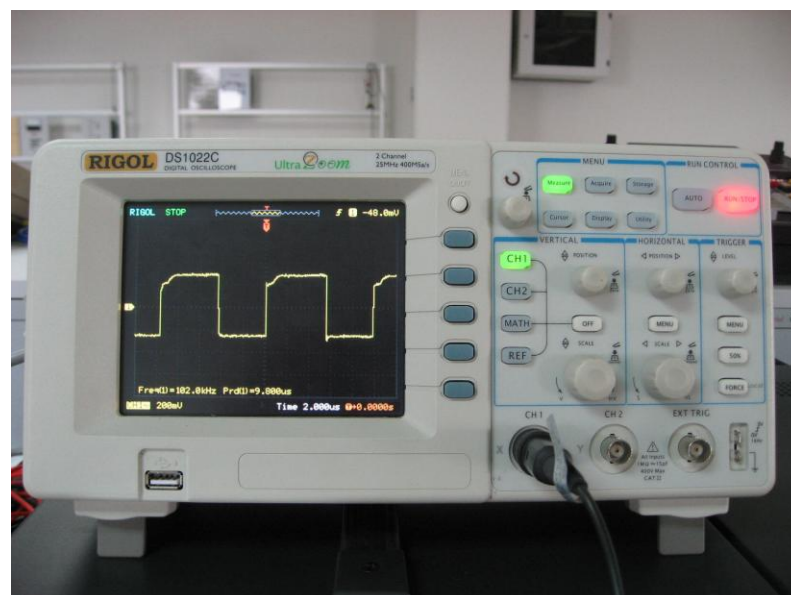
ภาพที่ 4.2 กราฟผลการทดลองเทอร์โมคัปเปิลจากการวัด

4.7.3 Capacitance Sensor สามารถแสดงสัญญาณ Square Wave เมื่อมีการเลื่อนปรับค่าของ C_s ทำให้สามารถวัดความแตกต่างของการเลื่อนแผ่นตัวนำที่มีระยะห่างที่สามารถตรวจจับได้

$$C_s = \left(\frac{(8.85 \times 10^{-12}) \times K \times A}{d} \right) \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.3 ค่าจากการทดลองคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (Capacitive Sensor)

ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ d (m)	ความถี่จากการวัด f (Hz)	ค่าการเก็บประจุจากการคำนวณ (C_s)
0.001 m	111.1 kHz	1.793×10^{-11} F
0.002 m	116.3 kHz	8.966×10^{-12} F
0.003 m	123.5 kHz	5.977×10^{-12} F

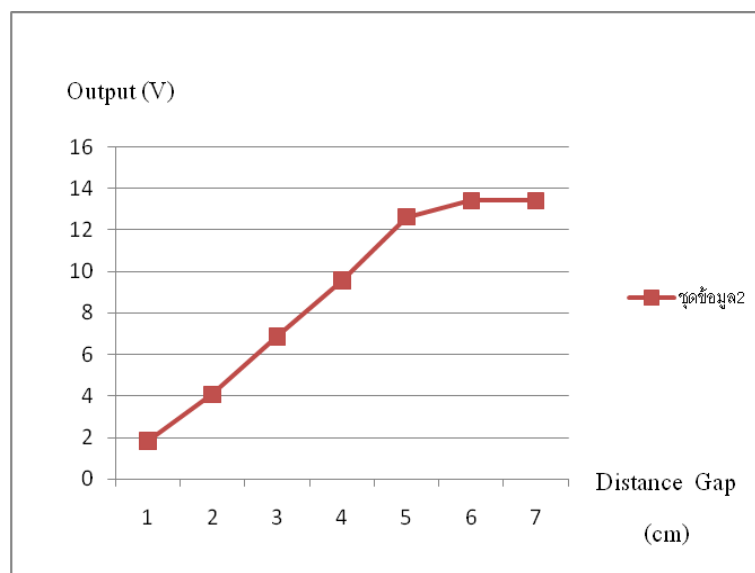


ภาพที่ 4.3 ภาพสัญญาณจากการทดลองคาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (Capacitive Sensor)

4.7.4 Pressure Sensor สามารถแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อเทียบกับความดันที่กระทำต่อ Pressure Sensor ในระดับที่ Pressure Sensor สามารถวัดค่าได้ไม่เกินจุดอิ่มตัว

ตารางที่ 4.4 ตารางการทดลองเซ็นเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor)

ระยะหลอดอึดอากาศ (cm)	Output (V)
1	1.83
2	4.08
3	6.86
4	9.57
5	12.62
6	13.4
7	13.4



ภาพที่ 4.4 กราฟผลการทดลองเซ็นเซอร์วัดความดัน (Pressure Sensor)

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาและสร้างชุดทดลองเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า ในส่วนของชุดตัวตรวจจับทรานสดิวเซอร์ในการวัดอุณหภูมิ ความดัน และคาปาซิทีฟนี้ได้แสดงผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับทฤษฎีที่ได้มีการศึกษามา โดยในการจัดทำโครงการนี้สามารถนำวิชาต่างที่เกี่ยวข้องวิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิชาเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า และหลักการทางวิศวกรรมมาช่วย ทำให้การทดสอบผลของโครงการในแต่ละชุดการทดลองเป็นที่น่าพอใจอย่างยิ่ง

จากการทดลองทำโครงการทั้ง 4 ชุดการทดลอง ชุดที่ 1 เทอร์มิสเตอร์ผลการทดลองที่ได้ออกมาแล้วยังมีค่าเปอร์เซ็นต์ที่ผิดพลาดค่อนข้างมากเนื่องจาก วงจรจ่ายกระแสคงที่ไม่มีเสถียรภาพที่ดีพอเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่ากระแสของวงจรจ่ายกระแสคงที่นั้นได้เปลี่ยนไปด้วยและไม่สามารถใช้แหล่งจ่ายตัวเดียวกันได้ ระหว่าง วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์และวงจรจ่ายกระแสคงที่ ยังมีการดึงกระแสกันระหว่างสองวงจรนี้อยู่ทำให้ต้องใช้แหล่งจ่ายถึง 2 ชุดด้วยกันซึ่งทำให้ไม่สะดวกในการทดลอง การทดลองชุดที่ 2 เทอร์ โมคัปเปิล วงจรด้วยกัน วงจรที่ยังมีปัญหาอยู่คือวงจรขยายสัญญาณในการปรับออฟเซตวงจรขยายยังไม่นิ่งพอเนื่องจากใช้ออปแอมป์ที่ประสิทธิภาพค่อนข้างน้อยมาใช้งาน ส่วนของวงจรปรับออฟเซตเทอร์โมคัปเปิลนั้น ยังไม่สามารถปรับให้ได้ตามค่ามาตรฐานที่บริษัทผู้ผลิตกำหนดมาได้เนื่องจาก ไอซี LM329 ไม่มีจึงแก้ปัญหาโดยการเอาซีเนอริ์ไดโอดใกล้เคียงมาใช้งานแทน การทดลองชุดที่ 3 คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ วงจรเสียหายง่ายเนื่องจากเกิดการดิซชาร์จระหว่างนิ้วสัมผัสกับแผ่นตัวนำทำให้ตัวเก็บประจุในวงจรเสียหายแก้ไขโดยการนำแผ่นสติกเกอร์มาติดไว้บนแผ่นตัวนำเพื่อไม่ให้นิ้วสัมผัสกับแผ่นตัวนำโดยตรง การทดลองที่ 4 ความดัน ปัญหาคือตัวเซ็นเซอร์ไม่ไวต่อแรงที่กระทำกับตัวเซ็นเซอร์เอง ทำให้ไม่สามารถวัดค่าที่ใช้ระบบของเหลวในการทดลองได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ผศ.ปรเมษฐ์ ปัญญาเหล็ก “ฟิสิกส์ 1” เอส.อาร์. พรินดี้ง แมสโปรดักส์ จำกัด 2550
- [2] พจนานฎ สุวรรณมณี “เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์เบื้องต้น ” กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2545.
- [3] สุคนธ์ พุ่มศรี “วิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์” กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2544
- [4] มงคล ทองสงคราม “อิเล็กทรอนิกส์ 2” พิมพ์ครั้งที่ 3 วิ.เจ.พรินดี้ง , 2541
- [5] เฉลิมพล เรื่องพัฒนาวิวัฒน์ “วิเคราะห์วงจรไฟฟ้า 1” กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร, 2550
- [6] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปรเมษฐ์ ปัญญาเหล็ก “ฟิสิกส์ 2” มหาวิทยาลัยศรีปทุม วิ .เจ.พรินดี้ง ถนนกำแพงเพชร เขตจตุจักร กทม. ,2551

ภาคผนวก

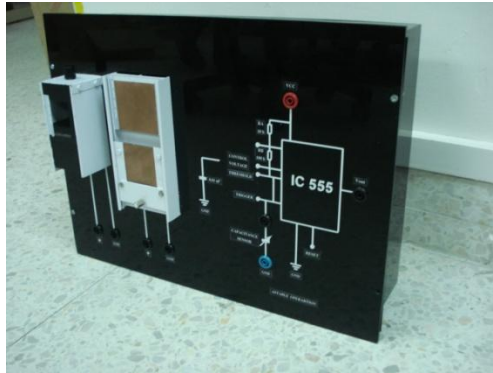
ภาคผนวก ก
ชุดอุปกรณ์การทดลอง



เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)



เทอร์มิสเตอร์ (Thermister)



คาปาซิทีฟเซ็นเซอร์ (Capacitive sensor)



เพรสเชอร์เซ็นเซอร์ (Pressure sensor)



แหล่งจ่ายที่ใช้ในการทดลอง



เครื่องมือวัดทางไฟฟ้ามัลติมิเตอร์

ภาคผนวก ข
ใบงานการทดลอง

ภาคผนวก ก
ดาต้าชีต (Data sheet)