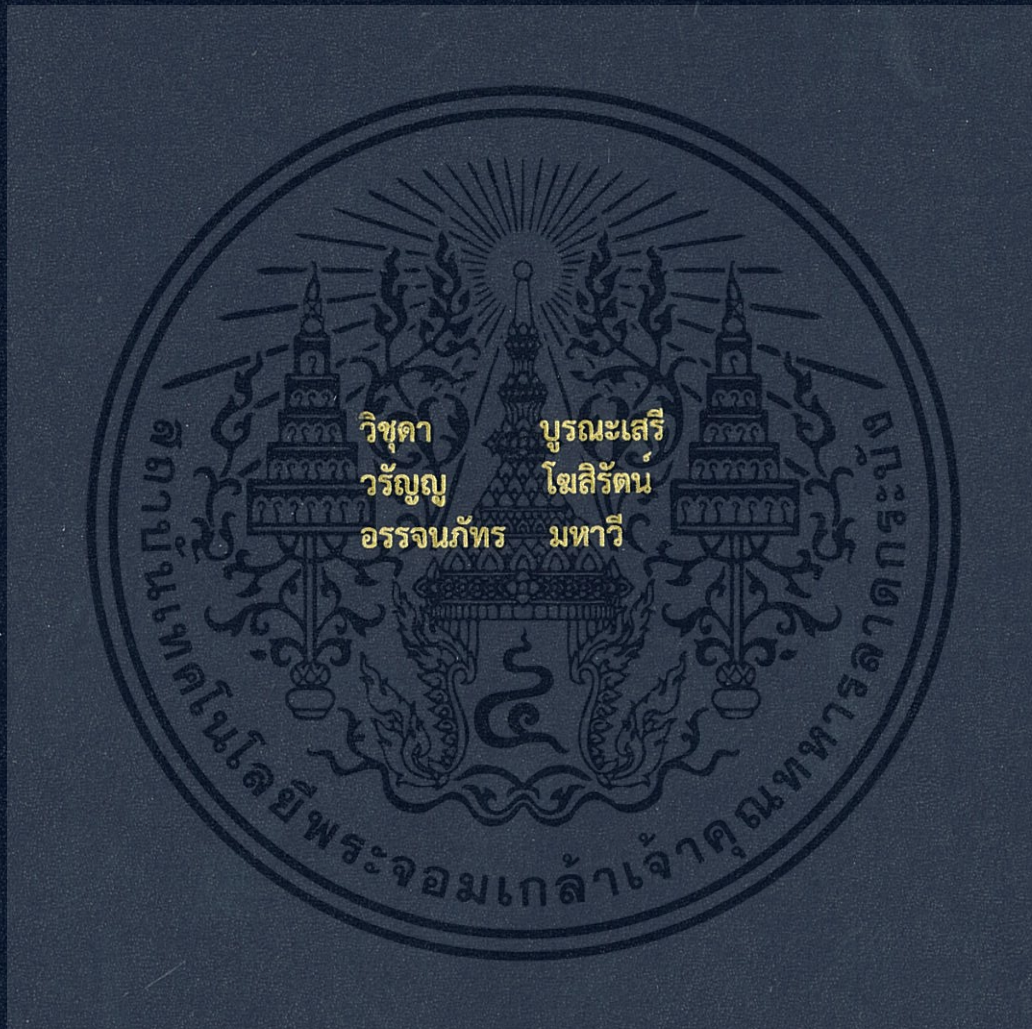


การวิเคราะห์อุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมไพล์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เทอร์โมอิเล็กทริก
ANALYSIS OF TEMPERATURE BY USING THE THERMOPILE
FOR THERMOELECTRIC GENERATOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

ANALYSIS OF TEMPERATURE BY USING THE THERMOPILE
FOR THERMOELECTRIC GENERATOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การวิเคราะห์อุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมโพล์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
เทอร์โมอิเล็กทริก
ANALYSIS OF TEMPERATURE BY USING THE THERMOPILE
FOR THERMOELECTRIC GENERATOR

นักศึกษาผู้จัดทำ นางสาววิชุดา บุรณะเสวี รหัสนักศึกษา 57011171
นายวรัญญู โฉมสิรัตน์ รหัสนักศึกษา 57011118
นายอรรถนภัทร มหาวี รหัสนักศึกษา 57011496

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2560

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รองศาสตราจารย์ ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุธรรม สัตถธรรมสกุล	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การวิเคราะห์อุณหภูมิโดยใช้เทอร์โมโพล์สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โมอิเล็กทริก		
	ANALYSIS OF TEMPERATURE BY USING THE THERMOPILE FOR THERMOELECTRIC GENERATOR		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นางสาววิชุดา	บุรณะเสรี	รหัสนักศึกษา 57011171
	นายวรัญญ	โฆสิรัตน์	รหัสนักศึกษา 57011118
	นายอรรถนภัทร	มหาวิ	รหัสนักศึกษา 57011496
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุธรรม สัทธรรมสกุล		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม		
ปีการศึกษา	2560		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ศึกษาการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานสิ้นเปลืองอันเนื่องมาจาก ความร้อนที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของอุปกรณ์ เช่น ความร้อนจากมอเตอร์ไฟฟ้าที่ติดตั้งภายในเครื่องจักรอุตสาหกรรม หรือความร้อนจากแสงสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น ในที่นี้ใช้ความร้อนที่เกิดจากแสงสว่างของหลอดไฟขนาด 100 Watt ค่าความสว่าง 20000 lux จำนวน 1 หลอด เป็นกรณีศึกษา โดยใช้อุปกรณ์เซนเซอร์ 2 ชนิดที่ต่างกัันมาทำการเปรียบเทียบประกอบด้วย เทอร์โมโพล์ และเพลเทียร์ โดยทำการวัดอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลง ตั้งแต่ 22 °C ถึง 110 °C ในช่วงเวลาประมาณ 20 นาที จากการทดสอบพบว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมโพล์มีค่าสูงสุด 25 mV และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากแผ่นเพลเทียร์มีค่าสูงสุด 65 mV ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของความร้อนที่กำเนิดจากหลอดไฟ โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากเทอร์โมโพล์ และเพลเทียร์เท่ากับ 1.2054 % และ 0.7359 % ตามลำดับ

Thesis	ANALYSIS OF TEMPERATURE BY USING THE THERMOPILE FOR THERMOELECTRIC GENERATOR
Authors	Miss.Wichuda Buranaseree Mr.Warunyoo Kosirut Mr.Adjanapat Mahawee
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Witsarut Srirattana Asst.Prof. Sutham Satthamsakul
Year	2017

ABSTRACT

This thesis aimed to study the generation of voltage from power consumption due to the heat generated by the activity of the device, such as the heat from an electric motor installed inside industrial machines or the heat from the brightness of lamp. In this case, a 100-Watt lamp with the light intensity of 20000 lux was used as the heat source. Two transducer, namely a Thermopile and a Peltier plate, were used to measure the heat emanating from the lamp at the temperature range 22 °C to 110 °C in 20 minutes. Experiment result show the voltage from the thermopile is 25 mV and the voltage from the Peltier is 65 mV, which is directly proportional to the temperature of the heat generated by the lamp. The percentage of voltage deviation caused by the thermopile and Peltier platelets were 1.2054% and 0.7359%, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุธรรม สัทธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำมาโดยตลอด อีกทั้งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำปริญญาานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอพระคุณเป็นอย่างสูง ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ให้คำแนะนำและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอพระคุณคุณพ่อคุณแม่ ครอบครัว มิตรสหาย ที่ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจ และเป็นแรงบันดาลใจในการทำปริญญาานิพนธ์เสมอมา คุณงามความดีที่พึงมีจากการทำปริญญาานิพนธ์ ผู้วิจัยขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่ รวมทั้งคุณอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน



คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องแจ้งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา.....	2
1.3 ประโยชน์หรือปัญหาที่พบในการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและโครงการที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric).....	3
2.1.1 ปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric effect).....	3
2.1.1.1 ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect).....	3
2.1.1.2 ปรากฏการณ์เพลทีเยอร์ (Peltier effect).....	4
2.1.1.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect).....	5
2.1.2 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก.....	6
2.1.3 การประยุกต์ใช้งาน.....	8
2.2 เทอร์โมคัปเปิ้ล (Thermocouple).....	8
2.2.1 มาตรฐานของ ISA.....	10
2.2.2 มาตรฐานของ ANSI.....	11
2.2.3 การกำเนิดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิ้ล.....	12
2.3 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistors).....	15
2.3.1 ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำกึ่งบอห์นฮูมิ.....	15
2.3.2 ชนิดของเทอร์มิสเตอร์.....	17
2.4 เทอร์โมไพล์ (Thermopile).....	17
2.5 เพลทีเยอร์ (Peltier).....	18
2.6 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino.....	20
2.6.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3.....	20
2.6.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno SMD.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 R3.....	21
2.6.4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega ADK.....	22
2.6.5 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Leonardo.....	22
2.6.6 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mini 05.....	23
2.6.7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro Mini 328 3.3V.....	23
2.6.8 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Ethernet With PoE Module.....	23
2.6.9 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Ethernet Without PoE Module.....	24
2.6.10 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino DUE.....	24
2.7 โปรแกรม Arduino IDE.....	25
2.7.1 ลักษณะโดยทั่วไปของโปรแกรม Arduino IDE.....	25
2.7.2 บาร์แสดงรายการของคำสั่ง.....	27
2.7.2.1 เมนู File.....	27
2.7.2.2 เมนู Edit.....	27
2.7.2.3 เมนู Sketch.....	28
2.7.2.4 เมนู Tools.....	28
2.7.2.5 เมนู Help.....	28
2.8 โปรแกรมแลปวิว.....	29
2.8.1 ส่วนของ DATA FLOW และ G Programming.....	29
2.8.2 ฟังก์ชันของโปรแกรมแลปวิว.....	30
บทที่ 3 หลักการออกแบบ.....	33
3.1 กล่าวนำ.....	33
3.2 การออกแบบการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าด้วยเทอร์โมไพร์และเพลเทียร์.....	33
3.3 จำลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้า และการเปรียบเทียบอุณหภูมิอ้างอิง.....	34
3.3.1 การจำลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง.....	34
3.3.2 การเปรียบเทียบอุณหภูมิอ้างอิง.....	34
บทที่ 4 การทดลองผลการทดลอง.....	36
4.1 กล่าวนำ.....	36
4.2 การทดลองวัดอุณหภูมิการเปรียบเทียบเทอร์มิสเตอร์.....	36
4.2.1 ขั้นตอนการทดลองการเปรียบเทียบเทอร์มิสเตอร์.....	36
4.2.2 ผลการทดลองการเปรียบเทียบเทอร์มิสเตอร์.....	38

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การทดลองการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมไพล์และเพลเทียร์.....	39
4.3.1 การทดลองการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเพลเทียร์.....	39
4.3.1.1 ขั้นตอนการทดลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมไพล์.....	39
4.3.1.2 ผลการทดลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมไพล์.....	41
4.3.2 การทดลองการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเพลเทียร์.....	44
4.3.2.1 ขั้นตอนการทดลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเพลเทียร์.....	44
4.3.2.2 ผลการทดลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเพลเทียร์.....	44
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุป.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
บรรณานุกรม.....	47
ภาคผนวก.....	



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบมาตรฐาน.....	10
2.2 คุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิ้ลแต่ละชนิด.....	10
2.3 มาตรฐาน ISA สำหรับรหัสสีของหัววัด Thermocouples และ RTD.....	11
2.4 การแบ่งชนิดของ Thermocouple ด้วยรหัสสีของสายไฟ.....	11
2.5 ตารางคุณสมบัติโดยทั่วไปของเทอร์มิสเตอร์ชนิด เอ็นทีซี ที่ใช้กันบ่อย ๆ.....	16
2.6 ตารางเปรียบเทียบศัพท์ใช้ใน LabVIEW กับโปรแกรมพื้นฐานทั่ว ๆ.....	32
4.1 ตารางข้อมูลที่ถูกจัดเก็บจากโปรแกรมแลปวิว.....	38
4.2 ตารางบันทึกผลของอุณหภูมิจากโปรแกรม Microsoft Excel.....	42
4.3 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวเทอร์โมโพล์.....	42
4.4 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวเพลเทียร์.....	44



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Thomas Johann Seebeck.....	3
2.2 ความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า.....	4
2.3 Jean Charles Athanase Peltier.....	5
2.4 William Thomson (Lord Kelvin).....	6
2.5 วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของปรากฏการณ์ทอมสัน.....	6
2.6 ส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล.....	7
2.7 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์.....	7
2.8 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลิ่ง.....	8
2.9 การประยุกต์ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลอย่างง่าย.....	9
2.10 สายไฟที่ต่อกับหัววัด.....	12
2.11 วงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจาก Thermocouple กับแรงดันไฟฟ้าที่รู้ค่า.....	12
2.12 แสดงวงจร Potentiometer สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Thermocouple.....	13
2.13 ลักษณะการเกิด Seebeck Effect.....	13
2.14 แสดงลักษณะการเกิดกระแสไฟฟ้าเมื่อเส้นลวดได้รับความร้อน.....	14
2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิ.....	14
2.16 แสดงผลของเพลเทียร์.....	14
2.17 สัญลักษณ์เทอร์มิสเตอร์.....	15
2.18 การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning).....	17
2.19 เทอร์โมไพล์ (Thermopile).....	18
2.20 ปรากฏการณ์ซีเบค.....	18
2.21 ปรากฏการณ์เพลเทียร์.....	18
2.22 โครงสร้างของโมดูลเพลเทียร์.....	19
2.23 แผนภาพแสดงการทำงานของเพลเทียร์.....	19
2.24 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3.....	20
2.25 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno SMD.....	21
2.26 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 R3.....	21
2.27 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega ADK.....	22
2.28 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Leonardo.....	22
2.29 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mini 05.....	23
2.30 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro Mini 328 3.3V.....	23
2.31 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Ethernet With PoE Module.....	24
2.32 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Ethernet Without PoE Module.....	24
2.33 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ VIII อังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.34 ลักษณะโดยทั่วไปของโปรแกรม Arduino IDE.....	26
2.35 ลักษณะของหน้าต่าง Serial Monitor.....	27
2.36 ลักษณะของ Front Panel.....	30
2.37 ลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง block.....	31
2.38 ลักษณะTerminal.....	31
3.1 โครงสร้างการวิเคราะห์การกำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง รอยต่อร้อนและรอยต่อเย็นด้วยเทอร์โมไฟล์	33
3.2 ชุดทดลองเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K ในห้องแลปทดลองอุปกรณ์เซนเซอร์.....	34
3.3 (ก) วงจรที่ใช้ในการปรับเทียบอุณหภูมิ (ข) ไอซีลอจิก ชนิด AD524.....	35
4.1 ลักษณะการติดตั้งชุดกำเนิดอุณหภูมิ.....	37
4.2 การต่อวงจรเทอร์มิสเตอร์กับบอร์ด Arduino.....	37
4.3 เขียนโปรแกรม Arduino เพื่อรับค่าจากเทอร์มิสเตอร์.....	38
4.4 กราฟแสดงผลอุณหภูมิแบบเวลาจริงในโปรแกรมแลบวิว.....	39
4.5 แสดงการต่ออนุกรม Thermocouple เป็น Thermopile (จุดรอยต่อเย็น).....	39
4.6 แสดงรอยต่อจุดร้อนที่แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ.....	40
4.7 วงจรรับค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Thermopile.....	40
4.8 ตัวอย่างโปรแกรม รับค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Thermopile และแสดงผล.....	41
4.9 ชุดทดลอง Thermopile และเพลเทียร์.....	41
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมไฟล์ ที่อุณหภูมิอ้างอิง 0 °C	42
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมไฟล์ ที่อุณหภูมิอ้างอิง 22 °C	43
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมไฟล์ ที่อุณหภูมิ 0 °C และ 22 °C	43
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าของแผ่นเพลเทียร์.....	44
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมไฟล์ และแผ่นเพลเทียร์ที่อุณหภูมิอ้างอิง 22 °C	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการกำเนิดพลังงานไฟฟ้ามีหลากหลายรูปแบบ เช่น การกำเนิดไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีของวัตถุสองชนิดเรียกว่าไฟฟ้าสถิต, การกำเนิดไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากพลังงานทางเคมีได้ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ได้แก่ เซลล์ปฐมภูมิ คือสร้างเสร็จสามารถนำมาใช้งานได้ทันที และเซลล์ทุติยภูมิ คือสร้างเสร็จต้องประจุไฟฟ้าก่อนนำไปใช้งาน เมื่อใช้ไฟฟ้าหมดสามารถนำไปประจุไฟฟ้าใช้ได้อีก, การกำเนิดไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า โดยวิธีการใช้ลวดตัวนำไฟฟ้าตัดผ่านสนามแม่เหล็กหรือการนำสนามแม่เหล็กวิ่งตัดผ่านลวดตัวนำอย่างใดอย่างหนึ่ง ทั้งสองวิธีนี้จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำนั้น กระแสที่ผลิตได้มีทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ, การกำเนิดไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากพลังงานแสง เกิดจากการที่แสงผ่านกระแสไฟฟ้าจากพลังงานสารกึ่งตัวนำ ปัจจุบันเรียกว่า โฟโตเซลล์ (Photo Cell), การกำเนิดไฟฟ้าจากฟ้าที่เกิดขึ้นจากแรงกดดันที่ถูกแรงกดหรือดึงจะเกิดกระแสไฟฟ้าผลึกของควอตซ์ทัวร์มาไลต์ และเกลือโรเซลล์ เมื่อนำเอาผลึกดังกล่าวมาวางไว้ระหว่างโลหะทั้งสองแผ่นแล้วออกแรงกด สารนี้จะมีไฟฟ้าออกมาที่ปลายโลหะทั้งสองแต่พลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้ต่ำมาก, การกำเนิดไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เกิดเป็นพลังงานความร้อน โดยการนำโลหะ 2 ชนิดมายึดติดกันแล้วให้ความร้อน จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในลวดโลหะทั้งสอง ซึ่งการกำเนิดไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่เป็นพลังงานความร้อน นั้นคือหลักการของเทอร์โมอิเล็กทริก (thermoelectric) โดยเทอร์โมอิเล็กทริก คือการแปลงพลังงานความร้อนให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมอิเล็กทริกมี 2 ปรากฏการณ์ที่สำคัญ คือ ปรากฏการณ์ซีเบค และปรากฏการณ์เพลเทียร์ โดยปรากฏการณ์ซีเบคเป็นปรากฏการณ์ที่มีรากฐานการนำความร้อนไปเป็นไฟฟ้า ทำงานโดยอาศัยคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ 2 ชนิดที่ว่า เมื่อปลายลวดโลหะหรือโลหะผสม 2 ชนิดที่ไม่เหมือนกันเชื่อมติดกัน ถ้าอุณหภูมิที่ปลายลวดด้านที่เชื่อมกัน แตกต่างกับปลายลวดด้านที่เหลือ จะเกิดความต่างศักย์ มีหน่วยเป็น ไมโครโวลต์ (μV) หรือ มิลลิโวลต์ (mV) ส่วนปรากฏการณ์เพลเทียร์เป็นระบวย้อนกลับของปรากฏการณ์ซีเบค เมื่อจ่ายไฟฟ้าเข้าไปในวงจรเทอร์โมคัปเปิลจะได้อุณหภูมิที่เย็นที่จุดต่อเย็นและร้อนที่จุดต่อร้อน

ด้วยเหตุนี้เราจึงมีแนวคิดเพื่อศึกษาการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานสิ้นเปลืองอันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของอุปกรณ์ เช่น ความร้อนจากมอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องจักรอุตสาหกรรมหรือความร้อนจากความสว่างของหลอดไฟ เป็นต้น ในที่นี้ใช้ความร้อนที่เกิดจากความสว่างของหลอดไฟฟ้าขนาด 100 Watt ค่าความสว่าง 20000 lux จำนวน 1 หลอด เป็นกรณีศึกษา โดยใช้อุปกรณ์เซนเซอร์ 2 ชนิดที่แตกต่างกันเปรียบเทียบกันประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิลต่ออนุกรมกันหลายตัวเรียกว่าเทอร์โมโพลี และเพลเทียร์ ทำการวัดอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 22 °C ถึง 110 °C ในช่วงเวลาประมาณ 20 นาที เพื่อวิเคราะห์หาค่าของอุณหภูมิที่เหมาะสม สามารถทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

1. เพื่อศึกษาการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานสลับเปลี่ยนอันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากความสว่างของหลอดไฟฟ้า โดยใช้อุปกรณ์เซนเซอร์ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน คือ เทอร์โมคัปเปิ้ลต่ออนุกรมกันหลายตัวเรียกว่าเทอร์โมโพล์ และเพลเทียร์ มาเปรียบเทียบกับกัน

2. เพื่อนำผลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าของอุณหภูมิที่เหมาะสม สามารถทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานได้

1.3 ประโยชน์หรือปัญหาที่พบในการศึกษา

1. ได้ศึกษาการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานสลับเปลี่ยนอันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากความสว่างของหลอดไฟฟ้า โดยใช้อุปกรณ์เซนเซอร์ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน คือ เทอร์โมคัปเปิ้ลต่ออนุกรมกันหลายตัวเรียกว่าเทอร์โมโพล์ และเพลเทียร์ โดยใช้หลักการเทอร์โมอิเล็กทริก ประกอบกับการศึกษาหลักการการทำงานของเทอร์โมคัปเปิ้ล เทอร์โมโพล์ และเพลเทียร์

2. ได้ระบบกำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่ปลอดภัย การออกแบบไม่ซับซ้อน รวมถึงสามารถนำไปพัฒนาต่อได้ในอนาคต

3. ปัญหาที่พบคือ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์เซนเซอร์ทั้ง 2 ชนิด มีค่าน้อยมาก

1.4 ขอบเขตของโครงการ

1. ใช้หลอดไฟฟ้าขนาด 100 Watt ค่าความสว่าง 20000 lux จำนวน 1 หลอด ในการทดสอบการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากความสว่างของหลอดไฟฟ้า

2. ใช้อุปกรณ์เซนเซอร์ 2 ชนิดที่แตกต่างกันมาเปรียบเทียบกับกันประกอบด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลต่ออนุกรมกันหลายตัวเรียกว่าเทอร์โมโพล์ และเพลเทียร์

3. ใช้ Arduino Mega 2560 R3 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับ รับค่า และแสดงผลข้อมูล

4. ทำการวัดอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 22 °C ถึง 110 °C ในช่วงเวลาประมาณ 20 นาที

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาการใช้งานเทอร์โมคัปเปิ้ล เทอร์โมโพล์ เพลเทียร์ และโปรแกรม Arduino รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ทำงานร่วมกับบอร์ด Arduino

2. ศึกษาเงื่อนไขการทำงาน และออกแบบการทำงาน

3. ทำการจัดซื้ออุปกรณ์ต่าง ๆ และทำการติดตั้งหลอดไฟฟ้าสำหรับให้ความร้อน

4. ทำการเขียนโปรแกรมลง Arduino IDE และทดสอบการทำงานของอุปกรณ์เบื้องต้น

5. ทำการเขียนโปรแกรมทดสอบการติดต่อระหว่าง Arduino กับอุปกรณ์ที่ออกแบบไว้

6. ทำการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันตามที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและโครงการที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) [1]-[3]

เทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric) เป็นสมบัติพิเศษของวัสดุที่สามารถผันความร้อนเป็นไฟฟ้า และสามารถผันไฟฟ้าเป็นความเย็น โดยอาศัยหลักการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายในของแข็งที่เป็นวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ในเชิงควอนตัมฟิสิกส์ เรียกว่า โฟนอน (Phonon) เมื่อวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกได้รับอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิสูงก็จะถ่ายเทไปยังที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า นั่นคือมีอิเล็กตรอน (Electron) และ โฮล (Hole) เคลื่อนที่ ซึ่งจะได้ออกไฟฟ้าออกมา ซึ่งสามารถนำมาสร้างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าและสร้างเครื่องทำความเย็นได้

2.1.1 ปรัชญาการผันเทอร์โมอิเล็กทริก

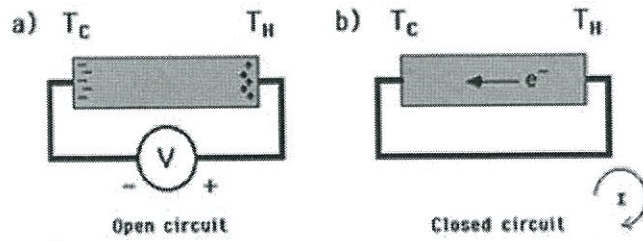
ปรัชญาการผันพื้นฐานทางการผันไฟฟ้าจากความร้อน มีอยู่ด้วยกันดังปรัชญาการผันที่กล่าวมาแล้วคือ ปรัชญาการผันซีเบค (Seebeck effect) ปรัชญาการผันเพลทีเออร์ (Peltier effect) และ ปรัชญาการผันทอมสัน (Thomson effect) ทั้งสามปรัชญาการผันนี้ มีรากฐานอยู่ที่การผันความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า หรืออาจผันไฟฟ้าไปเป็นความร้อน

2.1.1.1 ปรัชญาการผันซีเบค (Seebeck effect)

ในปี 1821 โทมัส โจฮันน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck) รูปที่ 2.1 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันกล่าวว่า “ เมื่อให้ความร้อนที่รอยต่อของตัวนำสองชนิด จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรปิด ”



รูปที่ 2.1 โทมัส โจฮันน์ ซีเบค (Thomas Johann Seebeck)



รูปที่ 2.2 ความต่างศักย์ซีเบคและการไหลของกระแสไฟฟ้า

ปรากฏการณ์ซีเบคเป็นปรากฏการณ์ที่มีรากฐานอยู่ที่การผันความร้อนเป็นไฟฟ้าความสำคัญทางกายภาพของมันสามารถเห็นได้โดยการพิจารณาปรากฏการณ์ของการบังคับเกรเดียนต์ของอุณหภูมิสม่ำเสมอ ให้ไหลไปตามตัวนำจำกัด ซึ่งในตอนเริ่มแรกตัวนำจะควบคุมการกระจายอย่างสม่ำเสมอของ ตัวพาหะประจุ แต่ภายใต้เกรเดียนต์อุณหภูมิหนึ่งพาหะอิสระต่าง ๆ ที่ปลายด้านร้อน (Hot end) จะมีพลังงานจลน์มากกว่าที่ปลายด้านเย็น (Cold end) และมีแนวโน้มที่จะแพร่ไปปลายด้านเย็น การเกิดขึ้นของประจุทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back electromotive force หรือ back e.m.f) ซึ่งตรงกันข้ามกับการไหลของประจุ ความต่างศักย์วงจรเปิดเมื่อไม่มีกระแสไหลที่เกิดขึ้น เรียกว่า ความต่างศักย์ซีเบค (Seebeck voltage) แสดงดังรูปที่ 2.2 สำหรับสมการของ Seebeck effect ถ้าเขียนในรูปของความต่างศักย์ และค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจะได้ว่า

$$\vec{E} = \alpha \nabla T \quad (1)$$

โดย \vec{E} = เวกเตอร์สนามไฟฟ้า 0 (V/m)
 α = สัมประสิทธิ์ซีเบค (V/K)
 T = อุณหภูมิ (K)

วัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค (Seebeck coefficient) ไม่เท่ากับศูนย์ จะเป็นวัสดุThermoelectric และ จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคเป็นได้ทั้งบวกและลบ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุนั้นๆ เช่น ในกรณีของ สารกึ่งตัวนำ N-type จะมีค่าสัมประสิทธิ์ซีเบค เป็นลบ แต่ P-type จะมี Seebeck coefficient เป็นบวก เป็นต้น

2.1.1.2 ปรากฏการณ์เพลทีเออร์ (Peltier effect)

ในปี 1834 ยีน เพลทีเออร์ ชาร์เลส อะธานาส (Jean Charles Athanase Peltier) รูปที่ 2.3 นักฟิสิกส์ชาวฝรั่งเศส กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีความร้อนเกิดขึ้นที่รอยต่อของตัวนำ ความร้อนจะเพิ่มขึ้น หรือลดลงขึ้นอยู่กับทิศการไหลของกระแสไฟฟ้า”



รูปที่ 2.3 Jean Charles Athanase Peltier

ปรากฏการณ์เพลทีเออร์เป็นปรากฏการณ์หนึ่งซึ่งคู่กันกับปรากฏการณ์ซีเบค และถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการทำระบบหล่อเย็นจากการผันความร้อนจากไฟฟ้า (Thermoelectric refrigeration) ในที่นี้ อัตราของการดูดซับความร้อนแบบกลับได้ (Rate of reversible heat absorption, Q) ซึ่งส่งมาพร้อมกับการผ่านกระแสไฟฟ้า (I) ผ่านรอยต่อ คือ

$$Q = \pi_{ab} I \quad (2)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ของเพลทีเออร์ของรอยต่อ หาได้จาก

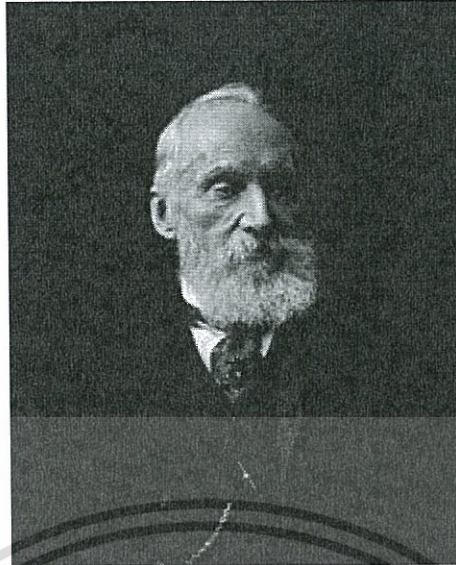
$$\pi = \alpha T \quad (3)$$

$\pi < 0$; ค่าสัมประสิทธิ์ เพลทีเออร์เป็นลบ

$\pi > 0$; ค่าสัมประสิทธิ์ เพลทีเออร์เป็นบวก

2.1.1.3 ปรากฏการณ์ทอมสัน (Thomson effect)

ในปี 1954 วิลเลียม ทอมสัน (William Thomson) หรือ ลอร์ด เคลวิน (Lord Kelvin) รูปที่ 2.4 นักฟิสิกส์ชาวสก็อต กล่าวว่า “เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้าสองจุดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ทิศทางความร้อนขึ้นอยู่กับ การไหลของกระแสไฟฟ้าจากจุดเย็นไปจุดร้อนหรือจากจุดร้อนไปจุดเย็น”



รูปที่ 2.4 William Thomson (Lord Kelvin)

ปรากฏการณ์ทอมสัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการแพร่ของความร้อนแบบกลับได้ ΔQ ซึ่งเกิดขึ้นมาเนื่องจากการผ่านของกระแสไฟฟ้าตามตัวนำเดี่ยวอันหนึ่งเมื่อมีเกรเดียนต์ ΔT อุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรเทอร์โมไดนามิกส์ของปรากฏการณ์ทอมสัน (H.J. Goldsmid, 1960)

ความสัมพันธ์ระหว่าง α และ τ เป็น

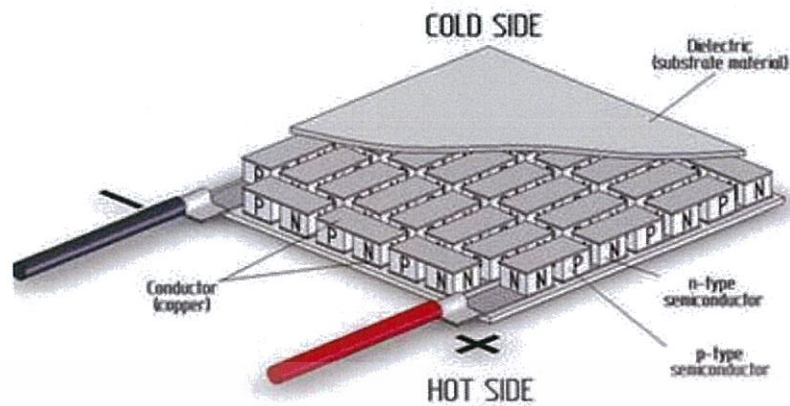
$$\tau = T \frac{d\alpha}{dt} \quad (4)$$

τ คือ Thomson coefficient (VK^{-1})

2.1.2 วัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก

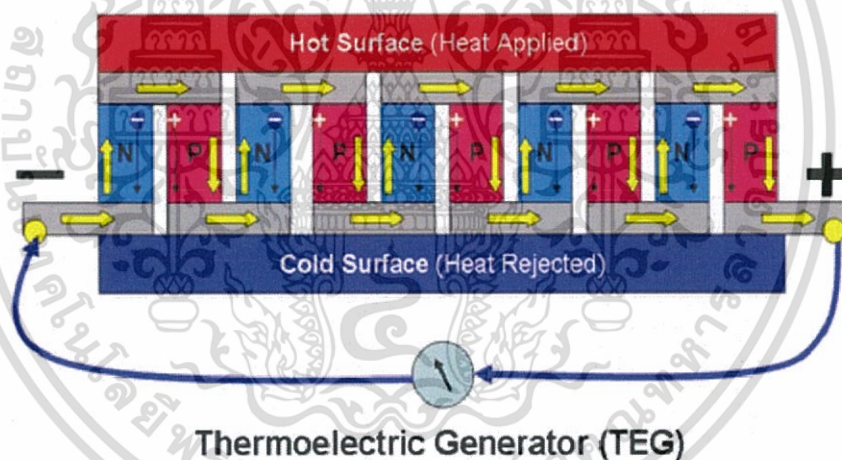
อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก เป็นการนำเอาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก มาประกอบให้เป็นอุปกรณ์ที่สามารถใช้งานได้ เรียกว่า “เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (Thermoelectric module)” โดยการนำเอาวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก ที่เป็นวัสดุประเภทสารกึ่งตัวนำ (semi-conductor) ชนิดเอ็น (N type) และชนิดพี (P type) มาต่อกันเป็นคู่ ๆ โดยวางสลับกัน และมีโลหะขนาดเล็กเชื่อมต่อทั้งคู่เข้าด้วยกัน ซึ่งแต่ละคู่ที่ต่อกันจะมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรมทางไฟฟ้า ตั้งแต่ตัวแรกจนถึงตัวสุดท้าย และด้านบนกับด้านล่างถูกประกอบด้วยแผ่นเซรามิก แสดงดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อชิงทุนการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



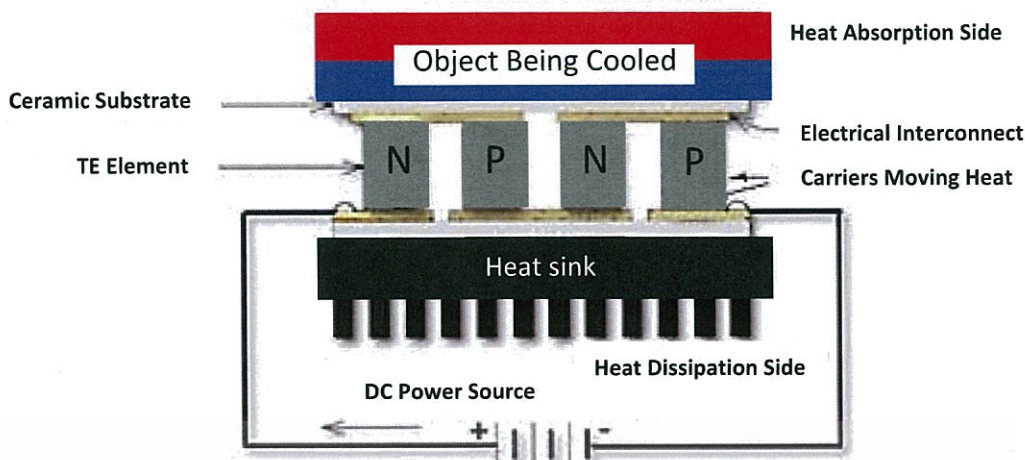
รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

เมื่อนำเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล แล้วทำให้อุณหภูมิแผ่นเซรามิคด้านบนและด้านล่าง แตกต่างกัน ทำให้เกิด ปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้าที่โมดูลผลิตได้ และเมื่อนำมาต่อเข้ากับโหลดศูนย์ (load) หรือภาระไฟฟ้า จะทำให้มี กระแสไฟฟ้าไหล ตามปรากฏการณ์ของซีเบค โดยทั่วไปเรียกรวมเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบนี้ว่าเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์

ในทางกลับกัน เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะทำให้เกิดความร้อนและความเย็นเกิดขึ้นที่ผิวด้านบน และด้านล่างตามปรากฏการณ์ของเพลเทียร์ โดยทั่วไป เรียก เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลแบบนี้ว่า เทอร์โมอิเล็กทริกคูลิ่ง แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กลไกการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริกคูลิ่ง

2.1.3 การประยุกต์ใช้งาน

การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริก หรือเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล 0 สามารถนำมาใช้งานได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ การเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือ เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ และการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อน หรือเทอร์โมอิเล็กทริกคูลิ่ง

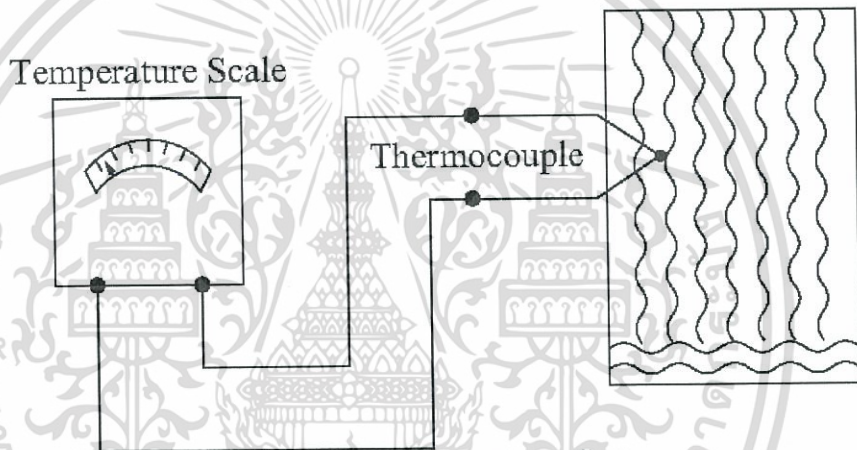
1. เทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ เป็นการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ซีเบค โดยสามารถใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนได้ เป็นการใช้พลังงานความร้อนที่เหลือจากกระบวนการต่าง ๆ มาผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น ความร้อนจากท่อไอเสียรถยนต์ ความร้อนจากหม้อต้มน้ำความร้อนสูง ความร้อนจากแสงแดด ความร้อนที่เกิดจาก สภาวะโลกร้อน หรือความร้อนจากร่างกายมนุษย์ เป็นต้น

2. เทอร์โมอิเล็กทริกคูลิ่ง เป็นการประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์เพลเทียร์ โดยสามารถใช้อุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกผลิตพลังงานความร้อน หรือทำความเย็นจากพลังงานไฟฟ้าได้เป็นการใช้พลังงานไฟฟ้าเพื่อทำความร้อนหรือความเย็นตามที่ ต้องการ เช่น ตู้แช่เย็นในรถยนต์ ชุดระบายความร้อนของ CPU แก้วทำความร้อน USB หรือลูกประคบร้อน USB เป็นต้น จากที่ได้กล่าวมานั้นอุปกรณ์เทอร์โมอิเล็กทริกสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย แต่เนื่องจากวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริกเองมีประสิทธิภาพประมาณ 4% ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดในการนำมาประยุกต์ใช้งาน โดยส่วนใหญ่จะนิยมนำไปใช้งานกับพลังงานความร้อนที่เหลือจากกระบวนการต่าง ๆ หรือทำเป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กที่สามารถพกพาได้ง่ายและสะดวก เป็นต้น

2.2 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) [4]

อุปกรณ์ที่มีชื่อว่าเทอร์โมคัปเปิล จัดเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิชนิดที่ใช้หลักการ เปลี่ยนแปลงลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่มีความสำคัญมากสำหรับวงการทางอุตสาหกรรม โดยเป็นอุปกรณ์ที่อยู่ในกลุ่มประเภท แอคทีฟทรานสดิวเซอร์ คือ สามารถผลิตแรงดันไฟฟ้าได้เองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ต้องการตรวจวัดโดยไม่จำเป็นต้องกระตุ้นด้วยแหล่งจ่ายพลังงานจากภายนอก ดังนั้น จึงสามารถใช้ได้โดยตรงในเครื่องมือวัดและบันทึกอุณหภูมิ หรือเครื่องควบคุมต่าง ๆ นอกจากนี้ เทอร์โมคัปเปิล ยังเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่ออุณหภูมิมาก ซึ่งโครงสร้างภายในประกอบด้วยเส้นลวดโลหะต่างชนิดกันสองเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นต่อเข้าด้วยกันที่ปลายข้างหนึ่งซึ่งใช้เป็นจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งซึ่งใช้เป็นเอาต์พุตจะถูกนำไปต่อกับมิเตอร์หรือวงจรอื่น ๆ ในขณะที่ปลายของเส้นลวดที่ต่อเข้าด้วยกันนี้เรียกว่ารอยต่อร้อน (Hot Junction) ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งจะเรียกว่ารอยต่อเย็น (Cold Junction) เมื่อนำเอาปลายด้านที่เป็นรอยต่อร้อนไปวัดอุณหภูมิจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่จุดรอยต่อเย็น และแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตรงกับค่าของอุณหภูมิที่ทำการวัด เนื่องจากคุณสมบัติในการแปลงพลังงานความร้อนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า จึงสามารถจัดได้ว่าเทอร์โมคัปเปิ้ล เป็นเทอร์โมอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ชนิดหนึ่ง โดยรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นถึงวงจรอย่างง่าย ๆ สำหรับใช้งานเทอร์โมคัปเปิ้ล ในการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเตาอบ เมื่อรอยต่อร้อนของเทอร์โมคัปเปิ้ลได้รับความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่รอยต่อเย็นยังมีอุณหภูมิที่คงที่ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดรอยต่อทั้งสองจุดนี้จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ค่าของกระแสไฟฟ้าที่มีเตอร์แสดงนี้สามารถจะปรับเทียบให้เป็นค่าที่อยู่ในหน่วยของอุณหภูมิได้



รูปที่ 2.9 การประยุกต์ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลอย่างง่าย

ส่วนใหญ่วัสดุตัวนำที่ใช้ประกอบร่วมกันเป็นเทอร์โมคัปเปิ้ลนั้นจะได้แก่โลหะจำพวก Iron - Constantan, Copper - Constantan, Chromel - Alumel และ Platinum/Rhodium - Platinum ซึ่งการแบ่งชนิดของเทอร์โมคัปเปิ้ลมาตรฐานนั้นจะพิจารณาจากชนิดของวัสดุตัวนำที่ใช้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และอุณหภูมิในช่วงใช้งานของเทอร์โมคัปเปิ้ลแต่ละชนิด ตลอดจนเอาต์พุตเฉลี่ย 1 ในหน่วย mV / °F สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 โดยชื่อแรกของวัสดุ ตัวนำหมายถึงขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์เป็นบวก (+) ส่วนชื่อหลังจะเป็นขั้วลบ (-)

ตารางที่ 2.1 ชนิดของเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบมาตรฐาน

สัญลักษณ์มาตรฐาน	ชนิดของวัสดุตัวนำ
Type K	Nickel Chromium / Nickel Aluminium
Type J	Iron / Constantan
Type T	Copper / Constantan
Type E	Nickel Chromium / Constantan
Type N	Nicrosil / Nisil
Type R	Platinum 13 % / Rhodium
Type S	Platinum 10 % / Rhodium
Type B	Platinum 30 % / Rhodium

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิ้ลแต่ละชนิด

ชนิดของ Thermocouple	ช่วงอุณหภูมิ (°F)	เอาต์พุต (mV/°F)
Iron – Constantan	0 ถึง 1400	0.03
Chromel – Constantan	500 ถึง 2300	0.023
Platinum / Rhodium - Platinum	1000 ถึง 2700	0.005
Copper - Constantan	-300 ถึง 700	0.025

การใช้งานเทอร์โมคัปเปิ้ลในอุตสาหกรรมทั่วไปนั้น บางครั้งเราไม่สามารถทราบได้ว่าเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้อยู่ทำมาจากโลหะตัวนำชนิดใด และเป็นชนิดมาตรฐานแบบใด ดังนั้น สำหรับการใช้งานจริงนอกจากจะสามารถหาชนิดของเทอร์โมคัปเปิ้ล ได้จากป้ายชื่อ (Name Plate) ที่ติดอยู่บนตัวของอุปกรณ์แล้วยังสามารถพิจารณาได้จากมาตรฐานดังต่อไปนี้

2.2.1 มาตรฐานของ ISA

มาตรฐานของ ISA (Instrument Society of America) นั้นจะพิจารณาจากรหัสสี่ (Heads Coded) ของหัววัด (Probe) และปลั๊กเสียบของอุปกรณ์ ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 มาตรฐาน ISA สำหรับรหัสสีของหัววัด Thermocouples และ RTD

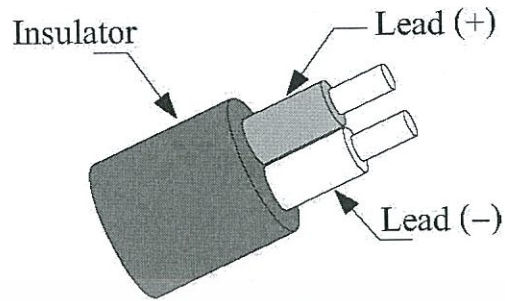
Type	Color Coded Heads
J	Black
K	Yellow
T	Blue
E	Purple
R&s	Green
RTD	White

2.2.2 มาตรฐานของ ANSI

ในทำนองเดียวกันมาตรฐานของ ANSI (American National Standards Institute) จะสามารถพิจารณาได้จากรหัสสีของสายไฟที่ต่อออกมาจากหัววัดของอุปกรณ์ ซึ่งจะแบ่ง ออกเป็น 2 ระบบ คือ ระบบอเมริกัน และระบบอังกฤษ ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.4 และ ลักษณะของสายไฟในรูปที่ 2.10

ตารางที่ 2.4 การแบ่งชนิดของ Thermocouple ด้วยรหัสสีของสายไฟ

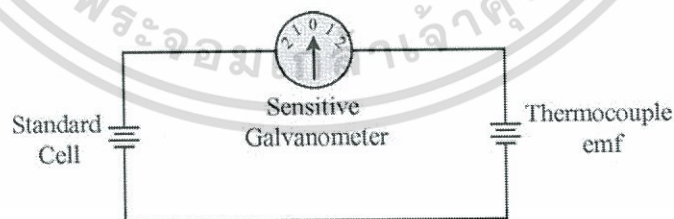
Code	Conductors (+)/(-)	Thermocouple Color Codes	
		British (BS 1843:1952)	American (ANSI/MC 96.1)
J	Iron / Nickel	Insulator (ดำ) (+) (เหลือง) (-) (น้ำเงิน)	Insulator (ดำ) (+) (ขาว) (-) (แดง)
K	Nickel Chromium / Nickel Aluminium	Insulator (แดง) (+) (น้ำตาล) (-) (น้ำเงิน-)	Insulator (เหลือง) (+) (เหลือง) (-) (แดง)
T	Copper / Constantan	Insulator (น้ำเงิน) (+) (ขาว) (-) (น้ำเงิน)	Insulator (น้ำเงิน) (+) (น้ำเงิน) (-) (แดง)
E	Nickel Chromium / Constantan	Insulator (น้ำตาล) (+) (น้ำตาล) (-) (น้ำเงิน)	Insulator (ชมพู) (+) (ชมพู) (-) (แดง)
N	Nicrosil / Nisil	Insulator (ส้ม) (+) (ส้ม) (-) (น้ำเงิน)	Insulator (ส้ม) (+) (ส้ม) (-) (แดง)
R&S	Platinum Rhodium/ Platinum	Insulator (เขียว) (+) (ขาว) (-) (น้ำเงิน)	Insulator (เขียว) (+) (ดำ) (-) (แดง)



รูปที่ 2.10 สายไฟที่ต่อกับหัววัด

2.2.3 การกำเนิดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิล

การกำเนิดกระแสและแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิล โดยทั่วไปมิเตอร์ที่ใช้กับเทอร์โมคัปเปิลนั้นจะเป็นมิลลิโวลต์มิเตอร์แบบ Permanent - Magnet Moving Coil ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าเพียงเล็กน้อย แต่ในปัจจุบันจะใช้ดิจิตอลมิเตอร์เป็นเครื่องมือสำหรับวัดระดับของแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิล ค่าที่มิเตอร์แสดงจะเป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เทอร์โมคัปเปิลสร้างขึ้น และเนื่องจากค่าของแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลนี้สัมพันธ์โดยตรงกับอุณหภูมิ ดังนั้น สเกลของแรงดันไฟฟ้าจึงสามารถปรับเทียบให้อยู่ในหน่วยของอุณหภูมิได้ โดยจะต้องมีความระมัดระวังในการปรับเทียบเป็นพิเศษเนื่องจากค่าของศักย์ไฟฟ้าที่ได้นี้มีขนาดเป็นมิลลิโวลต์ ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนเพียงหนึ่งมิลลิโวลต์อาจจะมีผลทำให้ค่าของอุณหภูมิผิดพลาดไปได้ถึง 50 องศา หรืออาจถึง 100 องศา ก็ได้ ในการวัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิลให้แม่นยำในทางปฏิบัตินั้น มักจะใช้ Potentiometer แทนมิลลิโวลต์มิเตอร์ เหตุเพราะ Potentiometer จะไม่ใช้แรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมคัปเปิลไปทำให้มิเตอร์แสดงค่า แต่จะใช้วิธีการเปรียบเทียบค่า แรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลกับค่าแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ดังแสดงวงจรเปรียบเทียบ ค่าอย่างง่าย ๆ ในรูปที่ 2.11

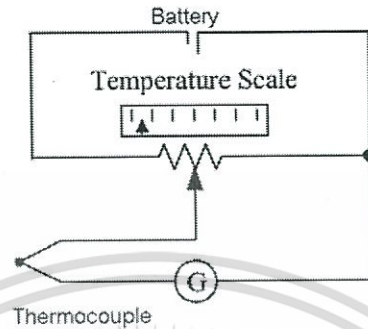


รูปที่ 2.11 วงจรเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าจาก Thermocouple กับแรงดันไฟฟ้าที่รู้ค่า

สำหรับรูปที่ 2.12 นั้นเป็นวงจรอีกแบบหนึ่งที่ใช้ Potentiometer เป็นส่วนประกอบในการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของ Thermocouple จากรูปจะเห็นว่ามีความคล้ายคลึงกับรูปที่ 2.11 แต่การปรับค่าแรงดันไฟฟ้านั้นจะใช้หน้าสัมผัส (Wiper) เป็นตัวปรับสมดุลให้แรงดันไฟฟ้าทั้งสองด้านของมิเตอร์มีขนาดที่เท่ากัน

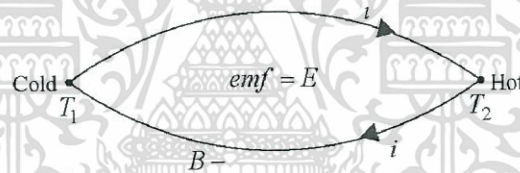
โดยปรากฏการณ์ที่สำคัญเกี่ยวกับคุณสมบัติของ Thermocouple นั้นมีอยู่ 3 ลักษณะคือ

- (ก) Seebeck Effect
- (ข) Peltier Effect
- (ค) Thomson Effect



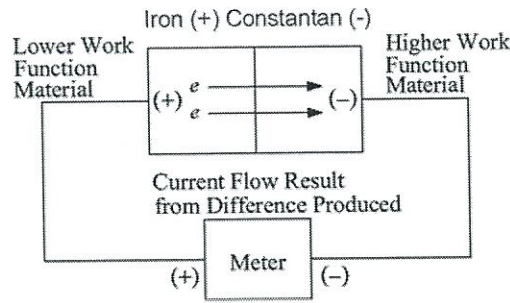
รูปที่ 2.12 แสดงวงจร Potentiometer สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Thermocouple

นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันที่ชื่อ Thomas Seebeck เป็นผู้ค้นพบอุปกรณ์ไฟฟ้าความร้อนขึ้นเป็นครั้งแรกอย่างไม่คาดคิดมาก่อน ในเวลานั้นเขาได้นำเอาลวดโลหะต่างชนิดกันสอง เส้นมาต่อปลายเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 2.13



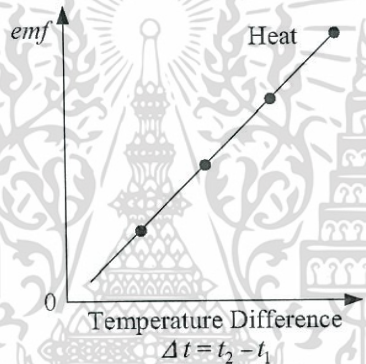
รูปที่ 2.13 ลักษณะการเกิด Seebeck Effect

Seebeck Effect อธิบายไว้ว่าถ้าให้ความร้อนที่ปลายด้านหนึ่งของเส้นลวดโลหะต่าง ชนิดกันที่ต่อร่วมกันอยู่ จะเกิดกระแสไหลและมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าของอุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างรอยต่อร้อนและรอยต่อเย็น การไหลของกระแสไฟฟ้านั้นเกิดจากความปั่นป่วนของอิเล็กตรอนเมื่อน้ำสัมผัสได้รับความร้อน โดยที่วัสดุที่ใช้จะต้องเป็นวัสดุที่มีฟังก์ชันการทำงานไม่เท่ากัน วัสดุที่มีฟังก์ชันการทำงานต่ำ (Lower - Work Function Material) จะให้อิเล็กตรอนวิ่งได้เร็วกว่าวัสดุที่มี ฟังก์ชันการทำงานสูง (Higher Work Function) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาก็จะมีจำนวนคงที่และกระแสจะไหลสม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาก็จะเพิ่มมากขึ้น และกระแสก็จะไหลมากขึ้นตามไปด้วย โดยรูปที่ 2.14 แสดงถึงการเกิดขึ้นมาของกระแสไฟฟ้า



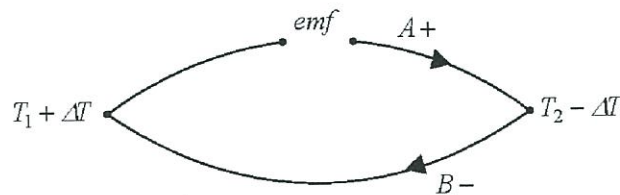
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะการเกิดกระแสไฟฟ้าเมื่อเส้นลวดได้รับความร้อน

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะยังคงไหลอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ตราบใดที่จุดรอยต่อทั้งสองยังมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน และแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกระแสนี้ คือ แรงดันไฟฟ้าความร้อน Seebeck (Seebeck Thermal emf) สำหรับรูปที่ 2.15 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าของอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างรอยต่อร้อนกับรอยต่อเย็น



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิ

ต่อมาในปี ค.ศ. 1834 ฌอง ซี. เอ. เพลเทียร์ (Jean C.A. Peltier) ได้ค้นพบว่าเมื่อ กระแสไฟฟ้าไหลผ่านจุดเชื่อมต่อของเส้นลวดต่างชนิดกัน ที่ปลายด้านหนึ่งจะมีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะมีอุณหภูมิลดลงซึ่งสามารถแสดงผลของเพลเทียร์ได้ ดังรูปที่ 2.16 ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีของเส้นลวดแบบ Iron - Constantan ความร้อนจะถูกดูดกลืน เมื่อกระแสไหลผ่านรอยต่อร้อนในทิศทางจาก Constantan ไปหา Iron โดย Iron จะเป็นไฟฟ้า ความร้อนชั่ววอกเมื่อเทียบกับ Constantan ปริมาณของความร้อนที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อประจุ ไฟฟ้าหนึ่งคูลอมบ์ (Coulomb) ตกคร่อม ณ จุดเชื่อมต่อ นั้นเรียกว่า “ผลเพลเทียร์” (Peltier) ของอุณหภูมิที่จุดเชื่อมต่อนั้น



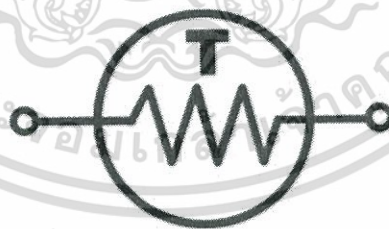
รูปที่ 2.16 แสดงผลของเพลเทียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจร (ขณะที่รอยต่อเย็นถูก ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่) นั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดที่เป็นรอยต่อร้อนและรอยต่อเย็น แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วอาจจะไม่เป็นความจริงเสมอไป ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่วงจรประกอบด้วยเส้นลวดที่เป็น Iron และ Copper ซึ่งรอยต่อเย็นอยู่ที่จุด Melting Ice แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิที่จุดของรอยต่อร้อนเพิ่มขึ้น และจะเพิ่ม 1 ขึ้นไปเรื่อย ๆ จนถึงค่าสูงสุด จากนั้นแรงดันไฟฟ้าจะเริ่มมีค่าลดลง ในขณะที่อุณหภูมิ ยังคงเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยแรงดันไฟฟ้าจะลดต่ำลงจนเป็นศูนย์ หรืออาจมีค่าเป็นค่าลบก็ได้ ผลที่เกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้ามของอุณหภูมิลักษณะนี้ คือ ผลของ Thomson นักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษที่ชื่อ W.T. Thomson เป็นผู้ค้นพบว่าเมื่อเกิดผลต่างของ อุณหภูมิจะสามารถเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นได้ไม่เฉพาะแต่ในกรณีของเส้นลวดโลหะต่างชนิดกันเท่านั้น แต่ยังสามารถเกิดขึ้นภายในเส้นลวดเส้นเดียวที่มีอุณหภูมิต่างกันด้วย เขาพบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดทองแดง (Copper) ซึ่งมีอุณหภูมิแต่ละจุดไม่เท่ากัน ที่จุด P ใด ๆ ความร้อนจะลดลงถ้ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านนั้นไหลไปในทิศทางเดียวกันกับการไหลของความร้อน (กระแสไหลจากรอยต่อร้อนไปยังรอยต่อเย็น) แต่ถ้ากระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางที่ตรงกันข้ามแล้ว ที่จุด P จะมีความร้อนเพิ่มสูงขึ้น แต่ในกรณีของเส้นลวดที่เป็นเหล็กนั้น ที่จุด P ใด ๆ จะมีความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลไปในทิศทางเดียวกันกับการไหลของความร้อน และความร้อนจะลดลงเมื่อกระแสไหลในทิศทางที่ตรงข้ามกัน

2.3 เทอร์มิสเตอร์ (Thermistors) [4] และ [5]

เทอร์มิสเตอร์ มาจากคำว่า “Thermally sensitive variable resistor” ทำมาจากวัสดุตัวนำที่เหมือนกับเซรามิก อยู่ในรูปของออกไซด์ของแมงกานีส นิกเกิล และโคบอลต์ มีความต้านทานจำเพาะในช่วง 100 ถึง 450,000 โอห์ม-เซนติเมตร ในเบื้องต้นสามารถประยุกต์ใช้งานสองอย่างคือ (1) เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิสำหรับระบบการวัดและควบคุม (2) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับกำลังงานไฟฟ้า เพราะอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ จะเป็นฟังก์ชันกับกำลังที่ถูกดูดกลืนโดยอุปกรณ์การวัดกำลังคลื่นความถี่วิทยุ เป็นตัวอย่างของการใช้งาน โดยสัญลักษณ์ของเทอร์มิสเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 สัญลักษณ์เทอร์มิสเตอร์

2.3.1 ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำกับอุณหภูมิ (Semiconductor Resistance Versus Temperature)

สารกึ่งตัวนำ คือการที่อิเล็กตรอนสั้นจนถึงช่วงที่ทำให้มีการเพิ่มพลังงานของวาเลนซ์อิเล็กตรอน เมื่อพลังงานนี้มีค่าเท่ากันหรือมากกว่าช่องว่างพลังงาน ในขณะที่อิเล็กตรอนจะเข้ามาอยู่ในแถบการนำ และอิสระที่จะนำกระแสได้ ข้อสำคัญคือช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของสารกึ่งตัวนำนี้จะไม่เป็นเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานต่ออุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ หลักการคือ ค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิตามหลักการของสารกึ่งตัวนำ นั่นคือเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความต้านทานจะลดลง คุณลักษณะดังกล่าวนี้เรียกว่ามี “สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็นลบ” (เอ็นทีซี) การเปลี่ยนแปลงนี้จะแปรตามความไม่บริสุทธิ์ในการเจือปน หากเจือปนมากเกินไปสารกึ่งตัวนำจะมีสัมประสิทธิ์ ของอุณหภูมิเป็นบวก

2. ความไวหรือสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของอาร์ทีดี จะมีค่าเพิ่มขึ้นหากว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น

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

ตารางที่ 2.5 ตารางคุณสมบัติโดยทั่วไปของเทอร์มิสเตอร์ชนิด เอ็นทีซี ที่ใช้กันบ่อย ๆ

ตัวแปร	ค่าโดยสรุป
ย่านของอุณหภูมิที่ทำการวัด	-100° C ถึง 450° C (ไม่ได้วัดโดยตัวเดียวกัน)
ความต้านทานที่ 25° C	0.5 Ω ถึง 100 M Ω 1 k Ω ถึง 10 M Ω เป็นค่าโดยทั่วไป
B	2000 K ถึง 5500 K
อุณหภูมิสูงสุด	> 125° C 300° C เป็นค่าปกติในสภาวะคงที่ 600° C เป็นค่าปกติเมื่อไม่สัมผัส
ค่าคงที่ในการสูญเสีย	1 mW/K ในอากาศนิ่ง 8 mW/K ในน้ำมัน
เวลาคงที่ความร้อน	1 ms ถึง 22 s
การสูญเสียกำลังสูงสุด	1 mW ถึง 1 W

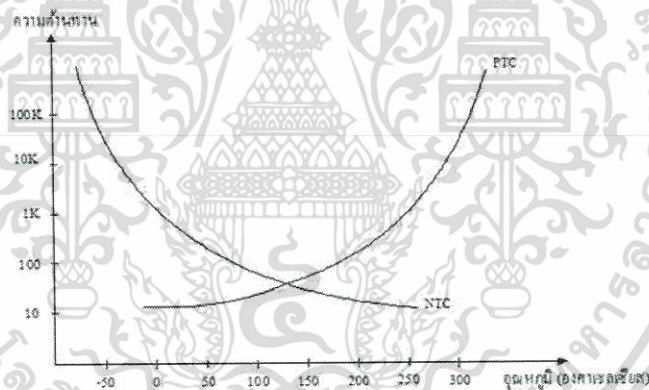
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ชนิดของเทอร์มิสเตอร์

โดยปกติเทอร์มิสเตอร์จะแบ่งเป็น 2 ประเภทตามสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิ อันได้แก่

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

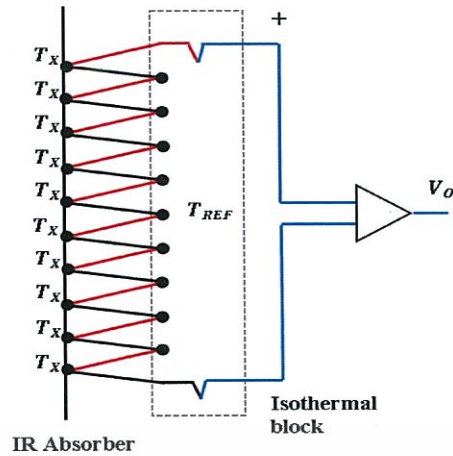
2. ชนิด พีทีซี อยู่ในรูปของสวิตช์ พีทีซี ใช้แบเรียมไททาเนตเป็นฐานและเพิ่มตะกั่วหรือเซอร์โคเนียม ไททาเนตลงไปปรับความไวในการสับเปลี่ยนอุณหภูมิที่จะวัด ส่วนเทอร์มิสเตอร์แบบ พีทีซี ที่ใช้ในการวัด อุณหภูมิจริง ๆ จะใช้ซิลิคอนเป็นธาตุตั้งต้นในการเจือปน เทอร์มิสเตอร์แบบนี้มักจะนำไปประยุกต์ใช้ในการ ป้องกันแรงเคลื่อนหรือกระแสเกินค่าปกติในวงจรไฟฟ้า เพราะว่าเทอร์มิสเตอร์มีการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานกับอุณหภูมิสูงจึงมีหลายวงจรที่สามารถ นำมาใช้งานได้ เช่นวงจรแบ่งแรงเคลื่อน วงจรบริดจ์ เป็นต้น แต่ก็ต้องพิจารณาข้อได้เปรียบของแต่ละแบบ เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์มิสเตอร์ทำให้ ยากต่อการวัดค่า จึงต้องแน่ใจว่าการสูญเสียกำลังในเทอร์มิสเตอร์จะไม่เกินขีดจำกัด



รูปที่ 2.18 การปรับสภาพสัญญาณ (Signal Conditioning)

2.4 เทอร์โมไพล์ (Thermopile) [3]

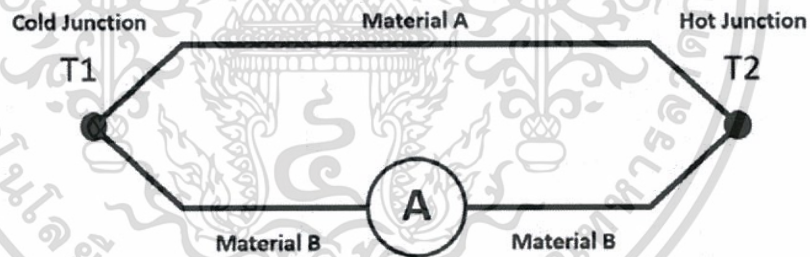
Thermopile เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่แปลงพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยเทอร์โมคัปเปิ้ลหลายตัวต่อรวมกันในแบบอนุกรมไฟฟ้า โดยเทอร์โมคัปเปิ้ลทำงานโดยการวัดค่าความแตกต่างของอุณหภูมิจากจุดเชื่อมต่อไปยังจุดที่วัดแรงดันเอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิ้ล ยิ่งจำนวนของเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ต่ออนุกรมกันมากขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้ยิ่งมากขึ้น ในการทดสอบนี้จำนวนเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้คือจำนวน 10 เส้นดังรูปที่ 2.19 โดยเทอร์โมคัปเปิ้ลที่ใช้ทดสอบ คือ เทอร์โมคัปเปิ้ล Type K



รูปที่ 2.19 เทอร์โมไพล์ (Thermopile)

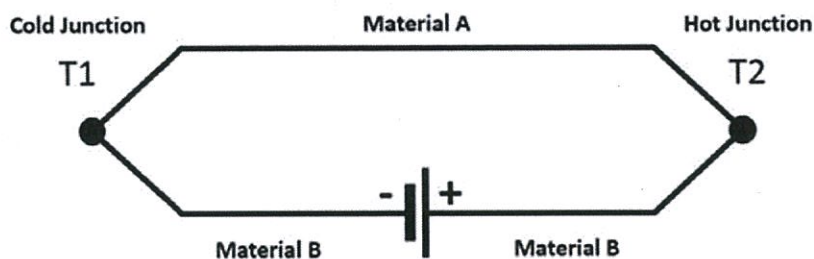
2.5 เพลเทียร์ (Peltier) [2] และ [3]

เพลเทียร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่งที่สำคัญต่องานวิจัยนี้มาก เนื่องจากเพลเทียร์จะถูกนำมาเป็นแหล่งกำเนิดความเย็นของเครื่องควบแน่นน้ำ จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจถึงหลักการและวิธีการทำงานขอเพลเทียร์ ในช่วงต้นศตวรรษที่ 19 นักวิทยาศาสตร์ 2 คน คือ โทมัส ซีแบค (Thomas Seebeck) และจีน เพลเทียร์ (Jean Peltier) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ที่เป็นพื้นฐานสำหรับอุตสาหกรรมเทอร์โมอิเล็กทริก ในปัจจุบัน โดย โทมัส ซีแบค พบว่า ถ้าให้อุณหภูมิที่ต่างกันระหว่างรอยต่อของตัวนำ 2 ชนิดที่แตกต่างกัน กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวนำนั้น ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ปรากฏการณ์ซีแบค

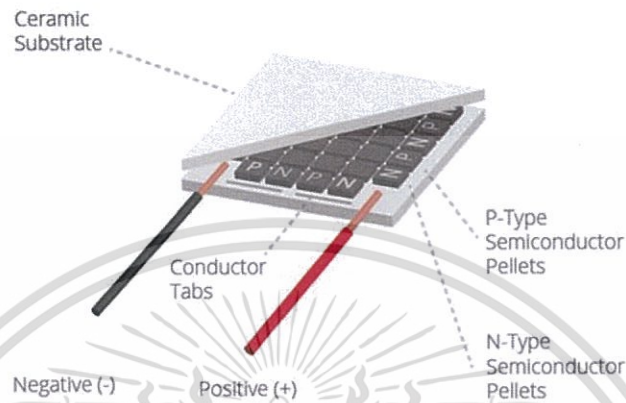
นอกจากนี้ จีน เพลเทียร์ พบว่า เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านตัวนำ 2 ชนิดที่แตกต่างกันจะเกิดความร้อนและความเย็นขึ้น ที่รอยต่อของตัวนำทั้งสองชนิดนั้น โดยรอยต่อหนึ่งจะร้อนและอีกรอยต่อหนึ่งจะเย็น ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ปรากฏการณ์เพลเทียร์

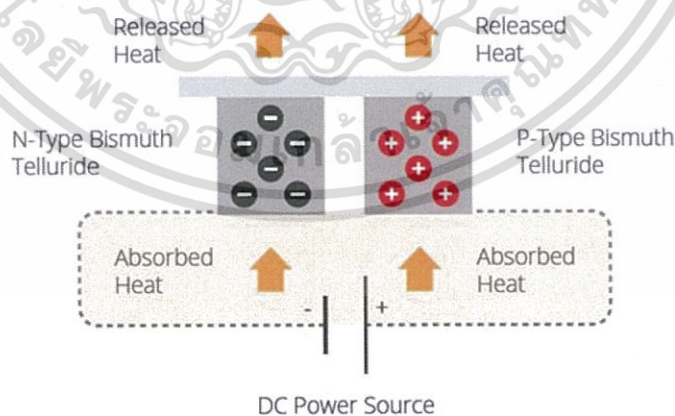
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงกลางของศตวรรษที่ 20 ความก้าวหน้าในด้านเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ ถูกพัฒนาขึ้นการใช้งานจริงของอุปกรณ์ด้านเทอร์โมอิเล็กทริกจึงมีความเป็นไปได้ และด้วยเทคนิคที่ทันสมัย จึงมีการผลิต โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก หรือเพลเทียร์ขึ้นมา องค์ประกอบของโมดูลเพลเทียร์ประกอบด้วย สารกึ่งตัวนำพีและเอ็นมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมมีตัวนำเชื่อมต่อระหว่างสารพีและสารเอ็น และมี แผ่นเซรามิก ประกอบอยู่ทั้งสองด้าน ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของโมดูลเพลเทียร์

เมื่อป้อนไฟฟ้ากระแสตรงให้กับโมดูลเพลเทียร์ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านวัสดุที่ทำจากสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน ทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงานของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากพลังงานระดับต่ำในสารกึ่งตัวนำแบบพีสู่พลังงานระดับสูงในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น ส่งผลให้เกิดการดูดกลืนความร้อนที่ด้านหนึ่งของโมดูลเพลเทียร์ และในขณะเดียวกันก็เกิดการคายพลังงานของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากพลังงานระดับสูงในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็น สู่พลังงานระดับต่ำในสารกึ่งตัวนำแบบพี ส่งผลให้เกิดการคายความร้อนที่ด้านตรงกันข้าม ซึ่งด้านที่คายพลังงานนั้น คือด้านที่ปล่อยความร้อนออกมา และด้านที่ถูกดูดกลืนพลังงานนั้น คือด้านที่ปล่อยความเย็นออกมา โดยแผนภาพแสดงการทำงานของเพลเทียร์แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แผนภาพแสดงการทำงานของเพลเทียร์

เพลเทียร์ที่มีจำหน่ายทั่วไป จะมีหลักการการทำงานเหมือนกันทั้งหมด แต่จะมีลักษณะที่แตกต่างกันระหว่างเพลเทียร์แต่ละรุ่นแต่ละยี่ห้อดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) ข้อแตกต่างของขนาดและรูปทรงของพื้นที่ใช้งาน (Active Area) เช่น เฟลเทียร์รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือรูปทรงวงกลม เป็นต้น นอกจากนี้แต่ละรูปทรงยังมีหลายขนาดอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.23
- 2) ข้อแตกต่างของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ ค่าความต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้าน(Maximum Temperature Difference) ค่ากระแสสูงสุด (Maximum Current) ค่าศักย์สูงสุด (Maximum Voltage)

2.6 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino [6]

Arduino เป็นภาษาอิตาลี โดยเป็นชื่อโครงการพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ในรูปแบบ Open Source คือวิธีการในการออกแบบ พัฒนา และแจกจ่ายสำหรับต้นฉบับของสินค้าหรือความรู้ โดยเฉพาะซอฟต์แวร์โดยโอเพนซอร์ซถูกพิจารณาว่าเป็นทั้งรูปแบบหนึ่งในการออกแบบ และแผนการในการ ดำเนินการ โอเพนซอร์ซเปิดโอกาสให้บุคคลอื่นนำเอาระบบนั้นไปพัฒนาได้ต่อไป การพัฒนามาจากโครงการ Open Source เดิมของ AVR ที่ชื่อ Wiring โดยโครงการ Wiring ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR เบอร์ ATmega28 ซึ่งมีข้อจำกัดหลายด้าน เช่นเป็นชิปที่มีตัวถังแบบ SMD ทำให้นำมาใช้งานยากเพราะตัว ไมโครคอนโทรลเลอร์มีขนาดเล็กเกินไป ทำให้ไม่สะดวกในการต่อใช้งานจริง มีขาอินพุตและเอาต์พุตจำนวน มากเกินไป ตัวบอร์ดมีขนาดใหญ่เกินไป ไม่เหมาะสมสำหรับผู้เริ่มต้นเรียนรู้ค่านไมโครคอนโทรลเลอร์ ด้วย เหตุผลข้างต้นจึงทำให้ไม่ได้รับความนิยม ระยะต่อมาทีมงาน Arduino จึงได้นำโครงการ Wiring มาพัฒนา ใหม่โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ขนาดเล็ก คือ ATmega8 และ ATmega68 ทำให้ได้รับความนิยม จนถึงปัจจุบันนี้ ตัวอย่างรายละเอียดรุ่นต่าง ๆ มีดังนี้

2.6.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3

คำว่า Uno เป็นภาษาอิตาลี ซึ่งแปลว่าหนึ่ง เป็นบอร์ด Arduino รุ่นแรกที่ผลิตออกมา มีขนาด ประมาณ 68.6x53.4 mm. เป็นบอร์ดมาตรฐานที่นิยมใช้งานมากที่สุด เนื่องจากเป็นขนาดที่เหมาะสม สำหรับการเริ่มต้นเรียนรู้ Arduino และมี Shields ให้เลือกใช้งานได้มากกว่าบอร์ด Arduino รุ่นอื่น ๆ ที่ ออกแบบมา เฉพาะมากกว่า โดยบอร์ด Arduino Uno ได้มีการพัฒนาเรื่อยมา ตั้งแต่ R2 R3 และรุ่นย่อยที่เปลี่ยนชิปไอซี เป็นแบบ SMD เป็นบอร์ด Arduino ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากราคาไม่แพง และส่วนใหญ่โปรเจค และ Library ต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้นมา Support จะอ้างอิงกับบอร์ดนี้เป็นหลัก และ ข้อดีอีกอย่างคือกรณีที่ MCU เสียผู้ใช้งานสามารถซื้อมาเปลี่ยนเองได้ง่าย Arduino Uno R3 มี MCU ที่เป็น Package DIP โดยลักษณะบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 แสดงดังรูปที่ 2.24

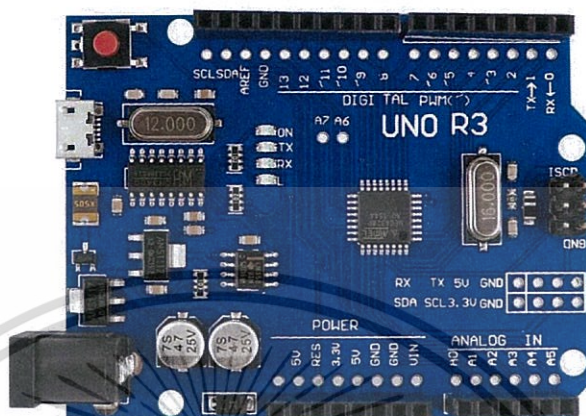


รูปที่ 2.24 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno SMD

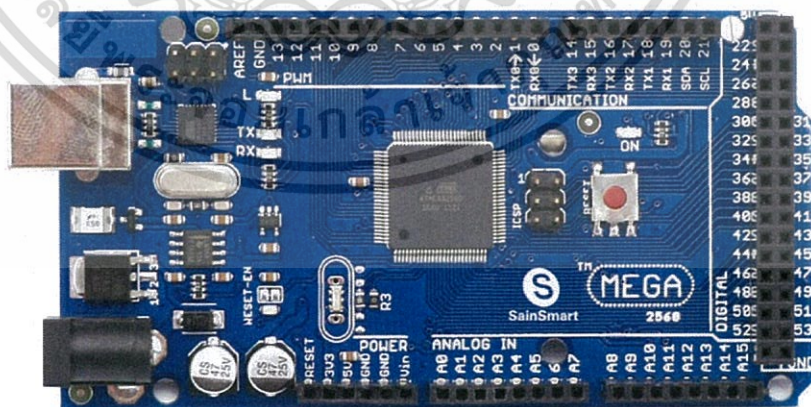
เป็นบอร์ดที่มีคุณสมบัติและการทำงานเหมือนกับบอร์ด Arduino Uno R3 ทุกประการ แสดงดังรูปที่ 2.25 แต่จะแตกต่างกันที่ Package ของ MCU ซึ่งบอร์ดนี้จะมี MCU ที่เป็น Package SMD



รูปที่ 2.25 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno SMD

2.6.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 R3

บอร์ด Arduino Mega 2560 แสดงดังรูปที่ 2.26 จะเหมือนกับ Arduino Mega ADK ต่างกันตรงที่บนบอร์ดไม่มี USB Host มาให้ การโปรแกรมยังต้องทำผ่านโปรโตคอล UART อยู่บนบอร์ดใช้ชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560 เป็นบอร์ด Arduino ที่ออกแบบมาสำหรับงานที่ต้องใช้ I/O มากกว่า Arduino Uno R3 เช่น งานที่ต้องการรับสัญญาณจาก Sensor หรือควบคุมมอเตอร์ Servo หลายๆตัว ทำให้ Pin I/O ของบอร์ด Arduino Uno R3 ไม่สามารถรองรับได้ ทั้งนี้บอร์ด Mega 2560 R3 ยังมีความหน่วยความจำแบบ Flash มากกว่า Arduino Uno R3 ทำให้สามารถเขียนโค้ดโปรแกรมเข้าไปมากกว่า ในความเร็วของ MCU ที่เท่ากัน

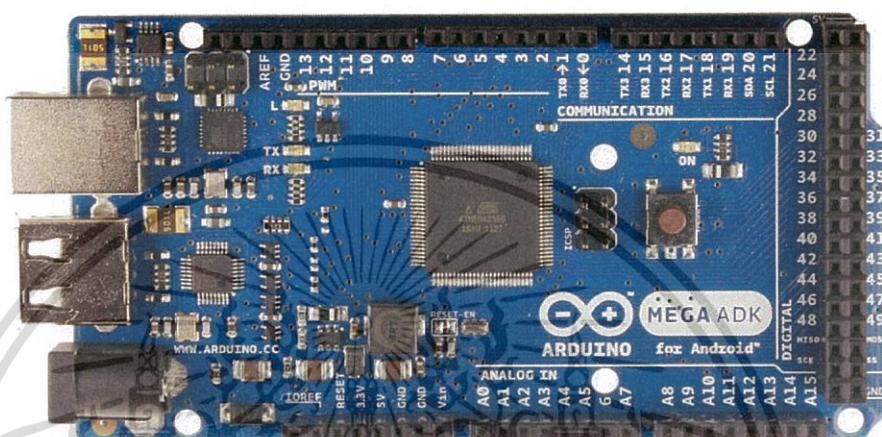


รูปที่ 2.26 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega ADK

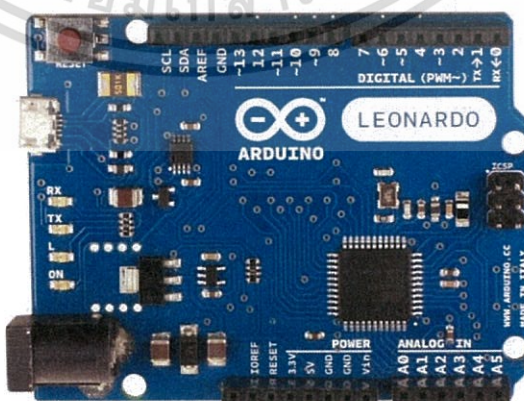
บอร์ด Arduino Mega ADK แสดงดังรูปที่ 2.27 ใช้ชิปไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด ATmega2560 มีชิปไอซี USB Host เบอร์ MAX3421e มาให้บนบอร์ด ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับ โทรศัพท์มือถือแอนดรอยด์ผ่าน OTG มีพอร์ตดิจิตอลอินพุตเอาต์พุตจำนวน 54 พอร์ต มีนาฬิกาอินพุตมาให้ 16 พอร์ต ทำงานที่ความถี่ 16 MHz บอร์ด Arduino Mega ADK จะแตกต่างกับบอร์ด Arduino Duo ตรงที่ชิปบนบอร์ดนั้นฉลาดไม่เท่า และใช้ความถี่ต่ำกว่า ดังนั้นจึงไม่เหมาะจะนำไปใช้กับงานคำนวณ แต่เหมาะสำหรับงานที่ใช้การเชื่อมต่อกับโทรศัพท์มือถือ แอนดรอยด์มากกว่า



รูปที่ 2.27 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega ADK

2.6.5 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Leonardo

บอร์ด Arduino Leonardo แสดงดังรูปที่ 2.28 เป็นบอร์ดที่เลือกใช้ชิปไอซีเบอร์ ATmega32u4 ที่รองรับการเชื่อมต่อกับ พอร์ต USB ได้โดยตรง ทำให้บอร์ดสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองตัวเองให้เป็นเมาส์ หรือคีย์บอร์ดได้ ทำงานที่แรงดัน 5V ทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเซ็นเซอร์ หรือ Shields ที่ใช้งานกับ Arduino Uno การทำงานจะ คล้ายกับบอร์ด Arduino Uno R3 แต่มีการเปลี่ยน MCU ตัวใหม่เป็น ATmega32U4 ซึ่งมีโมดูลพอร์ต USB มาด้วยบนชิป (แตกต่างจากบอร์ด Arduino UNO R3 หรือ Arduino Mega 2560 ที่ต้องใช้ชิป ATmega1602 ร่วมกับ ATmega328 ในการเชื่อมต่อกับพอร์ต USB)

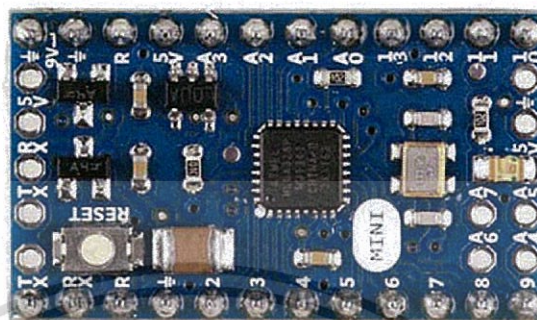


รูปที่ 2.28 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Leonardo

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.6 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mini 05

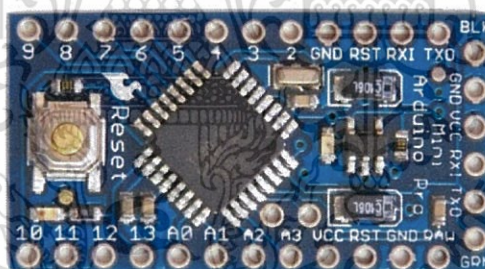
เป็นบอร์ด Arduino ขนาดเล็กที่ใช้ MCU เบอร์ Atmega328 ข้อแตกต่างของบอร์ด Arduino Mini 05 จะไม่มีพอร์ต USB มาให้ ผู้ใช้งานต้องต่อกับบอร์ด USB to Serial Converter เพิ่มเมื่อต้องการโปรแกรมบอร์ด โดยลักษณะบอร์ดแสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mini 05

2.6.7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro Mini 328 3.3V

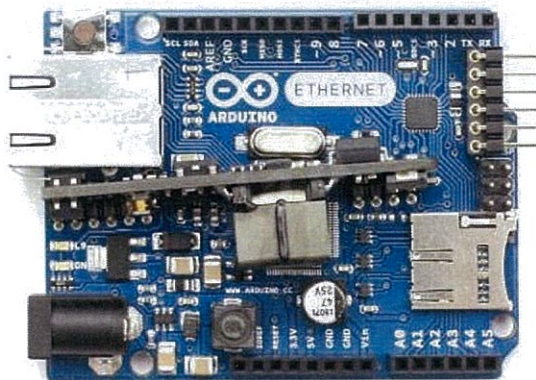
เป็นบอร์ด Arduino ขนาดเล็กที่ใช้ MCU เบอร์ ATmega328 ซึ่งจะคล้ายกับบอร์ด Arduino Mini 05 แต่บนบอร์ดจะมี Regulator 3.3 V ชุดเดียวเท่านั้น ระดับแรงดันไฟฟ้า I/O คือ 3.3V โดยลักษณะของบอร์ดแสดงดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Pro Mini 328 3.3V

2.6.8 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Ethernet With PoE Module

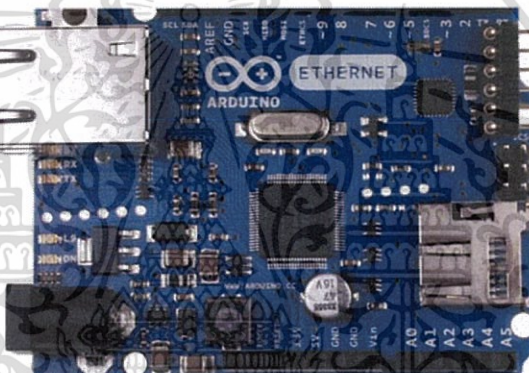
เป็นบอร์ด Arduino ที่ใช้ MCU เบอร์เดียวกับ Arduino Uno SMD แสดงดังรูปที่ 2.31 ในบอร์ดมีชิป Ethernet และ ช่องสำหรับเสียบ รอ Card รวมทั้งโมดูล POE ทำให้บอร์ดนี้สามารถใช้แหล่งจ่ายไฟจากสาย LAN ได้ โดยตรง โดยไม่ต้องต่อ Adapter เพิ่ม แต่บอร์ด Arduino Ethernet With PoE Module นี้จะไม่มี พอร์ต USB ทำให้เวลาโปรแกรมต้องต่อบอร์ด USB to Serial Converter เพิ่มเติม



รูปที่ 2.31 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Ethernet With PoE Module

2.6.9 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Ethernet Without PoE Module

บอร์ดนี้จะตัดโมดูล POE ออกไป ต้องใช้ไฟจากพอร์ต Power Jack เท่านั้น คุณสมบัติอื่น ๆ จะเหมือนกับบอร์ด Arduino Ethernet With PoE Module แสดงดังรูปที่ 2.32

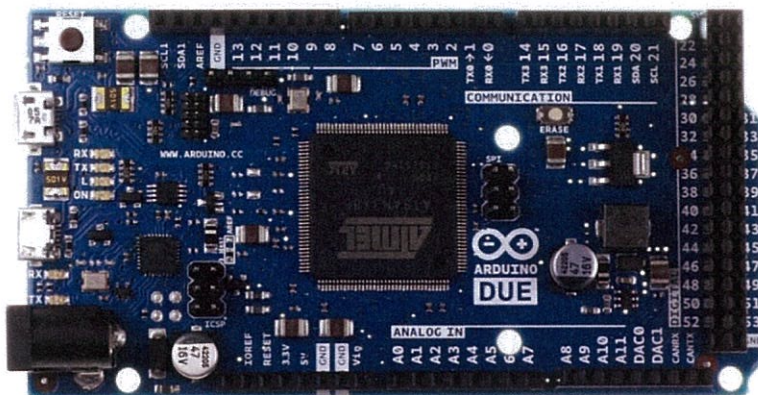


รูปที่ 2.32 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Ethernet Without PoE Module

2.6.10 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due

Due เป็นภาษาอิตาลีแปลว่าสอง เป็นรุ่นที่เพิ่มพอร์ตให้มากขึ้นเป็น 54 พอร์ตดิจิทัล อินพุต เอาต์พุต และ 12 พอร์ตแอนะล็อกอินพุต 2 พอร์ตอนาล็อกเอาต์พุต เพิ่มพื้นที่โปรแกรมเป็น 512 KB สามารถใช้งานพื้นที่ได้เต็มไม่มี Bootloader เนื่องจากสามารถใช้กับพอร์ต USB ได้โดยตรง มีขนาดบอร์ด 101.52x53.3 mm สามารถใช้ Shields ของ Arduino Uno ได้ แต่บางตัวจำเป็นต้องแก้ไขให้ถูกต้องจากรูปที่ 2.32 จะเห็นได้ว่าบอร์ดได้เปลี่ยนมาใช้ชิปไอซีแบบ SMD จึงไม่นิยมนำมาใช้ในแบบ Standalone แต่นิยมนำมาใช้ในงานที่จำเป็นต้องพื้นที่โปรแกรมมากขึ้น ทำงานที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น บอร์ด Arduino Due ใช้ชิปไอซีเบอร์ AT91SAM3X8E ซึ่งเป็นชิปไอซีที่ใช้เทคโนโลยี ARM Core สถาปัตยกรรม 32 บิต แรงความถี่คริสตอลขึ้นไปสูงถึง 84 MHz จึงทำให้สามารถทำงานด้านการคำนวณ หรือการประมวลผลอัลกอริทึมได้เร็วกว่า Arduino Uno มาก เนื่องจากชิปไอซีทำงานที่แรงดัน 3.3 V ดังนั้นการนำไปใช้งานกับเซ็นเซอร์ควรระวังไม่ให้แรงดัน 5 V หลอเข้าบอร์ด ควรใช้วงจรแบ่งแรงดันเพื่อช่วยลดแรงดันลงมาให้เหมาะสม โดยลักษณะของบอร์ดแสดงดังรูปที่ 2.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Due

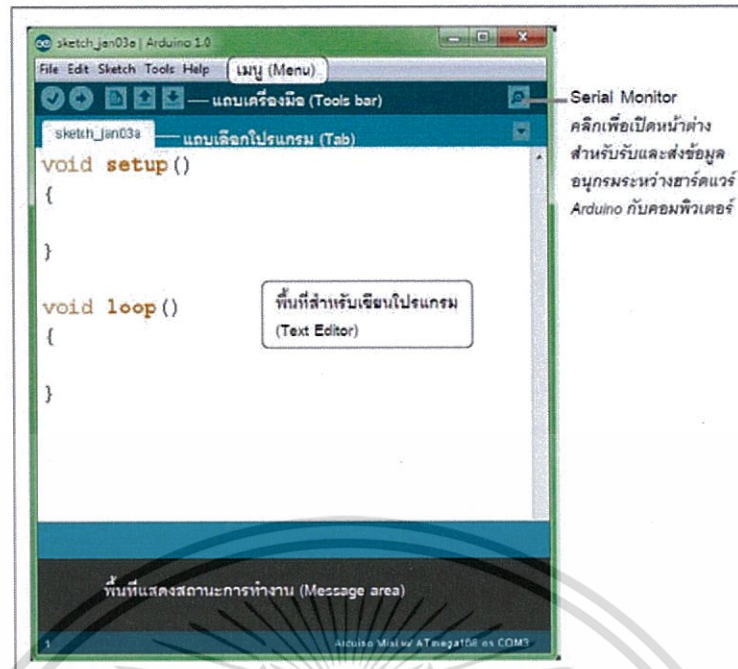
2.7 โปรแกรม Arduino IDE [7]

IDE ย่อมาจาก (Integrated Development Environment) คือ ส่วนเสริมของระบบการพัฒนาหรือตัวช่วยต่าง ๆ ที่จะคอยช่วยเหลือ Developer หรือช่วยเหลือคนที่พัฒนา Application เพื่อเสริมให้เกิดความรวดเร็ว ถูกต้อง แม่นยำ ตรวจสอบระบบที่จัดทำได้ ทำให้การพัฒนางานต่าง ๆ เร็วมากขึ้นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนางานสำหรับบอร์ด Arduino นั้นคือโปรแกรมที่เรียกว่า Arduino IDE ในการเขียนโปรแกรมและคอมไพล์ลงบอร์ด โดยขนาดของโปรแกรม Arduino โดยปกติแล้วจะใหญ่กว่าโค้ด AVR ปกติเนื่องจากโค้ด AVR เป็นการเข้าถึงจากรีจิสเตอร์โดยตรง แต่โค้ด Arduino เข้าถึงผ่านฟังก์ชัน เพื่อให้สามารถเขียนโค้ดได้ง่ายมากกว่าการเขียนโค้ดแบบ AVR หรือเวอร์ชันอื่น ๆ ของ Arduino

2.7.1 ลักษณะโดยทั่วไปของโปรแกรม Arduino IDE

เมื่อเรียกให้โปรแกรมทำงานจะมีหน้าต่างดังรูปที่ 2.34 ตัวโปรแกรมประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. เมนู (Menu) ใช้เลือกคำสั่งต่าง ๆ ในการใช้งานโปรแกรม
2. แถบเครื่องมือ (Toolbar) เป็นการนำคำสั่งที่ใช้งานบ่อย ๆ มาสร้างเป็นปุ่มเพื่อให้เรียกใช้คำสั่งได้รวดเร็วขึ้น
3. แถบเลือกโปรแกรม (Tabs) เป็นแถบที่ใช้เลือกไฟล์โปรแกรมแต่ละตัว (กรณีเขียนโปรแกรมขนาดใหญ่ ประกอบด้วยไฟล์หลายตัว



รูปที่ 2.34 ลักษณะโดยทั่วไปของโปรแกรม Arduino IDE

4. พื้นที่เขียนโปรแกรม (Text Editor) เป็นพื้นที่สำหรับเขียนโปรแกรมภาษา C/C++
5. พื้นที่แสดงสถานะการทำงาน (Message Area) เป็นพื้นที่ที่โปรแกรมใช้แจ้งสถานะการทำงานของ โปรแกรม เช่นผลการคอมไพล์โปรแกรม
6. พื้นที่แสดงข้อมูล (Text Area) ใช้แจ้งว่าโปรแกรมที่ผ่านการคอมไพล์แล้วมีขนาดกี่ไบต์
7. ปุ่มสำหรับเปิดหน้าต่าง Serial Monitor ปุ่มนี้จะอยู่ทางมุมบนด้านขวามือ คลิกปุ่มนี้เมื่อต้องการเปิดหน้าต่างสื่อสารและแสดงข้อมูลอนุกรม โดยต้องมีการต่อฮาร์ดแวร์ Arduino และเลือกพอร์ตการเชื่อมต่อให้ถูกต้องก่อน
8. หน้าต่าง Serial Monitor มีบทบาทค่อนข้างมากในการใช้แสดงผลการทำงานของโปรแกรมแทนการใช้ อุปกรณ์แสดงผลอื่น ๆ เนื่องจาก Arduino ได้เตรียมคำสั่งสำหรับใช้แสดงค่าของตัวแปรที่ต้องการดูผลการทำงานไว้ แล้วนั่นคือ Serial.print ส่วนการส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ ไปยังฮาร์ดแวร์ Arduino หรือแผงวงจรควบคุมให้ พิมพ์ข้อความและคลิกปุ่ม Send ในการรับส่งข้อมูลต้องกำหนดอัตราเร็วในการถ่ายทอดข้อมูลหรือบอดเรต (baud rate) ให้กับโปรแกรมในคำสั่ง Serial.begin กรณีที่ใช้งานกับคอมพิวเตอร์ Mcintosh หรือคอมพิวเตอร์ที่ติด ตั้งระบบปฏิบัติการ Linux ตัวฮาร์ดแวร์ของ Arduino จะรีเซ็ตเมื่อเริ่มเปิดใช้งาน Serial monitor ดังรูปที่ 2.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 ลักษณะของหน้าต่าง Serial Monitor

2.7.2 บาร์แสดงรายการของคำสั่ง

เมนู File ใน Arduino จะเรียกโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นว่าสเก็ตช์ (Sketch) ในโปรแกรมของผู้ใช้งานอาจมีไฟล์โปรแกรมหลายตัว จึงเรียกรวมว่าเป็นสเก็ตช์บุ๊ก (Sketchbook) เมนูนี้จะเกี่ยวข้องกับการเปิด-บันทึก-ปิดไฟล์มี คำสั่งที่ควรทราบและเกี่ยวข้องกับบอร์ด Arduino ดังนี้

2.7.2.1 เมนู File

- New : ใช้สร้างไฟล์สเก็ตช์ตัวใหม่เพื่อเริ่มเขียนโปรแกรมใหม่
- Open : ใช้เปิดสเก็ตช์ที่บันทึกไว้ก่อนหน้านี้
- Sketchbook : ใช้เปิดไฟล์สเก็ตช์ล่าสุดที่เปิดใช้งานเสมอ
- Example : ใช้ในการเลือกเปิดไฟล์สเก็ตช์ตัวอย่างที่บรรจุและรวบรวมไว้ใน

โพลเดอร์ของ Arduino

- Save : ใช้ในการบันทึกไฟล์สเก็ตช์ปัจจุบัน
- Save As : ใช้บันทึกไฟล์สเก็ตช์โดยเปลี่ยนชื่อไฟล์
- Upload to I/O บอร์ด : ใช้อัปโหลดโปรแกรมไปยังแผงวงจร Arduino หรือ

ฮาร์ดแวร์ ของ Arduino

- Page Setup : ตั้งค่าหน้ากระดาษของไฟล์สเก็ตช์ปัจจุบัน
- Print : สั่งพิมพ์โค้ดของไฟล์สเก็ตช์ปัจจุบันออกจากเครื่องพิมพ์
- Preference : ใช้กำหนดค่าการทำงานของโปรแกรม
- Quit : ใช้จบการทำงานและออกจากโปรแกรม

2.7.2.2 เมนู Edit

ในขณะที่พิมพ์โปรแกรมใช้คำสั่งในเมนูนี้ในการสั่งยกเลิกคำสั่งที่แล้วทำซ้ำ และมีรายการคำสั่งต่าง ๆ ที่ควรทราบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Undo : ยกเลิกคำสั่งหรือการพิมพ์ครั้งสุดท้าย
- Redo : ทำซ้ำคำสั่งหรือการพิมพ์ครั้งสุดท้าย
- Cut : ตัดข้อความที่เลือกไว้ไปเก็บในคลิปบอร์ดของโปรแกรม
- Copy : ตัดลอกข้อความที่เลือกไว้มาเก็บในคลิปบอร์ด
- Paste : นำข้อความที่อยู่ในคลิปบอร์ดมาแปะลงในตำแหน่งที่เคอร์เซอร์ชี้อยู่
- Select All: เลือกข้อความทั้งหมด
- Comment/Uncomment : ใช้เติมเครื่องหมาย // เพื่อสร้างหมายเหตุหรือ

คำอธิบายลงในโปรแกรมและยกเลิกด้วยเครื่องหมาย // ออก

2.7.2.3 เมนู Sketch

เป็นเมนูที่บรรจุคำสั่งที่ใช้ในการคอมไพล์โปรแกรมเพิ่มไฟล์ไลบรารี ฯลฯ โดยมีเมนูย่อยดังนี้

- Verify/Compile: ใช้คอมไพล์แปลโปรแกรมภาษาซีให้เป็นภาษาเครื่อง
- Show Sketch folder: สั่งเปิดโฟลเดอร์ที่เก็บโปรแกรมของผู้ใช้
- Add File: เพิ่มไฟล์ให้กับสเก็ทซ์ปัจจุบัน เมื่อใช้คำสั่งนี้โปรแกรม Arduino

จะทำการคัดลอกไฟล์ที่เลือกไว้มาเก็บไว้ในโฟลเดอร์เดียวกันกับโปรแกรมที่กำลังพัฒนา

- Import Library: เป็นคำสั่งเรียกใช้ไลบรารีเพิ่มเติมเมื่อคลิกเลือกคำสั่งนี้แล้วโปรแกรม Arduino IDE แสดงไลบรารีให้เลือก เมื่อเลือกแล้วโปรแกรมจะแทรก บรรทัดคำสั่ง #include ลงในส่วนต้นของไฟล์

2.7.2.4 เมนู Tools

ใช้จัดรูปแบบของโค้ดโปรแกรม เลือกุ่นของฮาร์ดแวร์ Arduino และเลือกพอร์ตที่ติดต่อเมนูที่ใช้งานกับ บอร์ด Arduino มีดังนี้

- Auto Format : จัดรูปแบบของโค้ดโปรแกรมให้สวยงาม
- Archive Sketch : สั่งบีบอัดไฟล์โปรแกรมทั้งโฟลเดอร์หลักและโฟลเดอร์ย่อยของไฟล์สเก็ทซ์ปัจจุบันไฟล์ที่สร้างใหม่จะมีชื่อเดียวกับไฟล์สเก็ทซ์ปัจจุบัน
- Board : เลือกฮาร์ดแวร์ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino
- Serial Port : เลือกหมายเลขพอร์ตของคอมพิวเตอร์ที่ต่อกับฮาร์ดแวร์ Arduino

และบอร์ด Arduino

2.7.2.5 เมนู Help

เมื่อต้องการความช่วยเหลือหรือข้อมูลเกี่ยวกับโปรแกรมให้เลือกเมนูนี้เมื่อเลือกเมนูย่อยตัวโปรแกรมจะ เปิดไฟล์เว็บเพจ (ไฟล์นามสกุล .html) ที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อนั้น ๆ โดยไฟล์จะเก็บในเครื่องของผู้ใช้ภายในโฟลเดอร์ที่ เก็บ Arduino IDE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 โปรแกรมแลปวิว (LabVIEW Program) [8]

LabVIEW เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในด้านการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับงานทางวิศวกรรม LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench ซึ่งหมายความว่า เป็นโปรแกรมที่สร้าง เครื่องมือวัดเสมือนจริงในห้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม ดังนั้นจุดประสงค์หลักของการทำงานของโปรแกรมนี้ก็คือการจัดการในด้านการวัดและเครื่องมือวัด อย่างมีประสิทธิภาพ และในตัวของโปรแกรมจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันที่ใช้ช่วยในการวัดมากมายและแน่นอนที่สุด โปรแกรมนี้จะมีประโยชน์อย่างสูงเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมต่าง ๆ สิ่งที LabVIEW แตกต่างจากโปรแกรมอื่นอย่างเห็นได้ชัดที่สุดก็คือ LabVIEW นี้เป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) โดยสมบูรณ์ นั่นคือเราไม่จำเป็นต้องเขียน code หรือคำสั่งใด ๆ ทั้งสิ้น และที่สำคัญลักษณะภาษาที่ใช้ในโปรแกรมนี้เราจะเรียกว่าเป็น ภาษารูปภาพ หรือเรียกอีกอย่างว่าภาษา G (Graphical Language) ซึ่งจะแทนการเขียนโปรแกรมเป็นบรรทัดอย่างที่เราค้นเคยกับภาษาพื้นฐาน เช่น C, BASIC หรือ FORTRAN ด้วยรูปภาพหรือสัญลักษณ์ทั้งหมด ซึ่งแม้ว่าในเบื้องต้นเราอาจจะสับสนกับการจัดเรียงหรือเขียนโปรแกรมบ้าง แต่เมื่อเราค้นเคยกับการใช้โปรแกรมนี้แล้วเราจะพบว่า LabVIEW นี้มีความสะดวกและสามารถลดเวลาในการเขียนโปรแกรมลงไปได้มาก โดยเฉพาะในงานเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น ๆ เพื่อใช้ในการวัดและการควบคุม สำหรับผู้ที่เคยใช้โปรแกรมประเภทที่ใช้ตัวหนังสือ หรือที่เรียกว่า Text Base ทั้งหมด คงจะทราบถึงความยุ่งยากในการจัดการกับตำแหน่งการส่งผ่านข้อมูลตามอุปกรณ์เชื่อมต่อเช่น Port หรือ Card ต่าง ๆ รวมถึงการจัดวางตำแหน่งในหน่วยความจำเพื่อที่จะสามารถรวบรวมข้อมูลมาใช้ในการคำนวณและเก็บข้อมูลให้ได้ประโยชน์สูงสุด ปัญหาเหล่านี้ได้รับการแก้ไขใน LabVIEW โดยได้มีการบรรจุโปรแกรมจำนวนมาก หรือ Libraries ไว้สำหรับจัดการกับปัญหาเหล่านั้น ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์การเชื่อมต่อจะเป็น DAQ (Data Acquisition), GPIB (General Purpose Interface Bus หรือก่อนหน้านี้รู้จักกันในชื่อ Hewlett Packard Interface Bus, HP-IB), พอร์ตอนุกรม หรือ Serial Port เพื่อใช้ติดต่อกับอุปกรณ์ที่ส่งผ่านข้อมูลแบบอนุกรม (Serial Instrument) รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ด้วยวิธีการต่าง ๆ นอกจากนี้ใน Libraries เหล่านี้ยังได้บรรจุฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญอีกหลายประการเช่น signal generation, signal processing, filters, สถิติ, พีชคณิต และคณิตศาสตร์อื่น ๆ ดังนั้น LabVIEW จึงทำให้การวัดและการใช้เครื่องมือวัดกลายเป็นเรื่องง่ายลงไปมาก และทำให้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลของเรากลายเป็นเครื่องมือทางด้านการวัดหลายชนิดอยู่ในเครื่องเดียว

2.8.1 ส่วนของ DATA FLOW และ G Programming

LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้รูปภาพ หรือสัญลักษณ์แทนการเขียนด้วยตัวอักษรเหมือนโปรแกรมปกติทั่วไป ซึ่งข้อดีข้อแรกก็คือการลดความผิดพลาดด้านการสะกดผิดหรือพิมพ์ผิด ออกไป ข้อแตกต่างอีกประการหนึ่งที่สำคัญของการเขียนโปรแกรมแบบ G กับการเขียนด้วย ตัวหนังสือก็คือ การเขียนด้วยภาษา G นี้เป็นการเขียนโดยใช้หลักการของ Data Flow ซึ่งเมื่อเริ่ม ส่งข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม เราจะต้องกำหนดทิศทางไหลของข้อมูลว่าจะไปที่ส่วนใด ผ่านการ ประเมินผลและคำนวณในส่วนใดบ้าง และจะให้แสดงผลอย่างไร ซึ่งลักษณะการเขียนภาษา G หรือ Data Flow นี้จะมีลักษณะ เหมือนกับการเขียน Block Diagram ซึ่งทำให้ผู้เขียนโปรแกรม สามารถให้ความสนใจกับการ เคลื่อนที่และเปลี่ยนแปลงข้อมูลได้โดยไม่ต้องจดจำรูปแบบคำสั่งที่ ยุ่งยาก เนื่องจาก LabVIEW ใช้

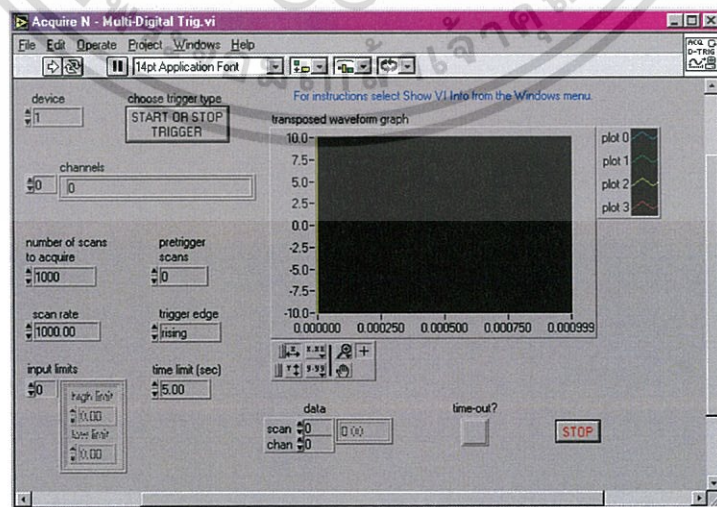
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการเขียนแบบ Block Diagram ซึ่งวิศวกรส่วนใหญ่มีความคุ้นเคยอยู่แล้ว จึงเป็นการง่ายที่จะทำความเข้าใจและนำไปพัฒนาใช้ต่อไปได้ และถ้าหากเรา จำได้ถึงขั้นตอนการเขียนโปรแกรมว่าก่อนที่จะเขียนโปรแกรม เราควรจะต้องเขียน Flow Chart ให้เสร็จสิ้นก่อน หลังจากตรวจสอบ Flow Chart เรียบร้อยแล้วเราจึงนำไปเขียนโปรแกรม ดังนั้น เราจะมีความสะดวกมากขึ้น ถ้าหากการเขียน Flow Chart ของ LabVIEW ก็คือการเขียน โปรแกรมนั่นเอง ซึ่งเป็นการลดขั้นตอนการทำงานลงไปได้เป็นอย่างมาก แม้ว่าการเขียนโปรแกรมใน LabVIEW ไม่จำเป็นต้องมีความรู้ด้านการเขียนโปรแกรมใด ๆ มาก่อนเลย แต่การมีความรู้ด้านการเขียนโปรแกรมหรือใช้โปรแกรมสำเร็จรูปอื่น ๆ จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เป็นอย่างดี เราคาดหวังว่าผู้อ่านคงจะมีความเข้าใจหรือคุ้นเคยกับการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาบ้างแม้จะไม่ใช้ประโยชน์โดยตรงแต่อย่างน้อยจะได้เข้าใจหลักการ พื้นฐานบางอย่าง แต่ส่วนที่จำเป็นนั้นคือเราหวังว่าผู้อ่านคงจะคุ้นเคยกับทำงานกับคอมพิวเตอร์ พอสมควร โดยเฉพาะอย่างยิ่งเราควรจะมี ความคุ้นเคยกับการทำงานต่าง ๆ บนระบบปฏิบัติการ Windows ไม่ว่าจะ เป็น Version ใด

2.8.2 ฟังก์ชันของโปรแกรมแลปวิว

โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาโดย LabVIEW เราจะเรียกว่า Virtual Instrument (VI) เพราะลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพเมื่อผู้ใช้ใช้งานจะเหมือนกับเครื่องมือหรืออุปกรณ์ทางวิศวกรรม ในขณะเดียวกันหลังจากของอุปกรณ์เสมือนจริงเหล่านั้นจะเป็นการทำงานของ ฟังก์ชัน, Subroutines และโปรแกรมหลักเหมือนกับภาษาทั่วไป สำหรับ VI หนึ่งๆ จะประกอบด้วย ส่วนประกอบที่สำคัญสามส่วนคือ

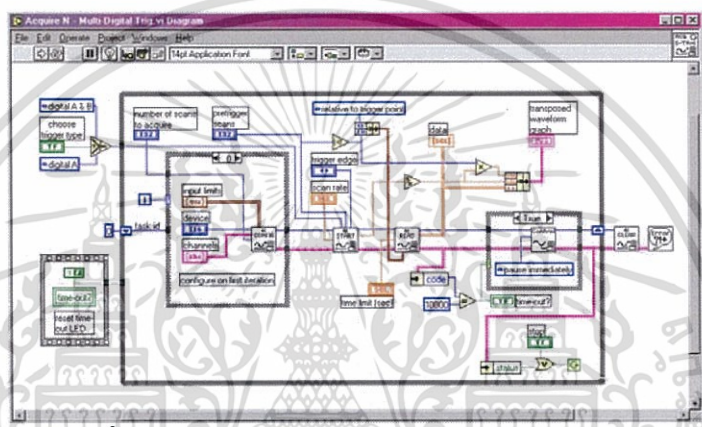
1) Front Panel หรือหน้าปัทม์ จะเป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม (หรือที่นิยมเรียก user interface) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัทม์ของของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัดทั่ว ๆ ไป โดยทั่วไปจะประกอบด้วย สวิตช์ปิดเปิด, ปุ่มปิด, ปุ่มกด จอแสดงผล หรือแม้แต่ค่าที่ผู้ใช้สามารถกำหนด ดังนั้นสำหรับผู้ที่คุ้นเคยกับการเขียนโปรแกรม ประเภท Visual ทั้งหลายคงจะเข้าใจถ้าหากบอกว่า Front Panel นี้จะเปรียบเสมือนเป็น GUI ของโปรแกรมหรือ VI นั้นเอง ลักษณะของ Front Panel แสดงในรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 ลักษณะของ Front Panel

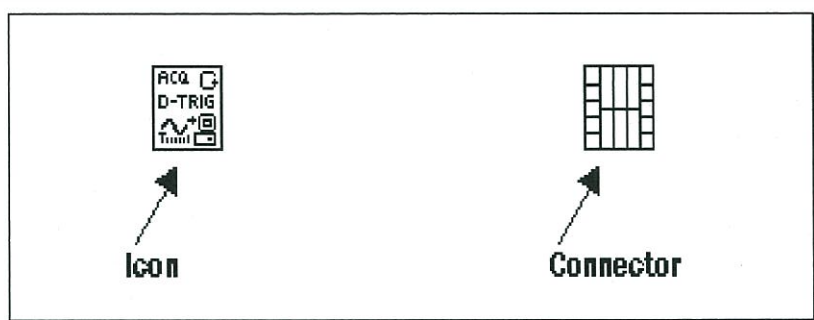
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) Block Diagram เพื่อให้เกิดความเข้าใจง่ายขึ้น เราอาจมอง Block Diagram นี้เป็น เหมือนกับ Source Code หรือโปรแกรมของ LabVIEW ซึ่งปรากฏว่าอยู่ในรูปของภาษา G ซึ่ง Block Diagram นี้ ถือว่าเป็น Executable Program คือสามารถที่จะทำงานได้ทันที และข้อดีอีก ประการ หนึ่งก็คือ LabVIEW จะมีการตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรมตลอดเวลา ทำให้โปรแกรม จะทำงานได้ก็ต่อเมื่อไม่มีข้อผิดพลาดในโปรแกรมเท่านั้นโดยผู้ใช้สามารถที่จะดู รายละเอียดของความ ผิดพลาดแสดงให้เห็นได้ตลอดเวลา ทำให้การเขียนโปรแกรมนั้นง่ายขึ้นมาก ส่วน ประกอบภายใน Block Diagram นี้จะประกอบด้วย ฟังก์ชัน ค่าคงที่ โปรแกรมควบคุมการทำงานหรือโครงสร้าง จากนั้น ในแต่ละส่วนเหล่านี้ ซึ่งจะปรากฏในรูปของ Block เราจะได้รับการต่อสาย (wire) สำหรับ Block ที่ เหมาะสมเข้าด้วยกัน เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง block เหล่านี้ ทำให้ข้อมูลได้รับการประมวลผลตามที่ต้องการ และแสดงผลออกมาให้แก่ผู้ใช้ต่อไป ดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 ลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง block

3) Icon และ Connector เปรียบเสมือนโปรแกรมย่อย Subroutine ในโปรแกรมปกติ ทั่วไปโดย icon จะหมายถึง block diagram ตัวหนึ่งที่มีการส่งข้อมูลเข้าและออกผ่านทาง Connector ซึ่งใน LabVIEW เราจะเรียก Subroutine นี้ว่า sub VI ข้อดีของการเขียนโปรแกรม ด้วยภาษา G นี้ก็คือเราสามารถสร้าง VI ที่ละส่วนขึ้นมาให้ทำงานด้วยตัวเองได้อย่างอิสระ จากนั้น ในภายหลังหาก เราต้องการเราก็สามารถเขียนโปรแกรมอื่นขึ้นมาเพื่อเรียกใช้งาน VI ที่เราเคย สร้างขึ้นก่อนหน้าทีละตัว ซึ่งทำให้ VI ที่เราเขียนขึ้นก่อนกลายเป็น sub VI ไป การเขียนใน ลักษณะนี้เราเรียกว่า เขียนเป็น module สำหรับลักษณะทั่วไปของ Icon และ Connector จะแสดงในรูปต เราจะเห็นว่าเมื่อเราแสดงใน รูปของ Connector เราจะพบว่า มีช่องต่อข้อมูลหรือที่เรียกว่า Terminal ปรากฏให้เห็น



รูปที่ 2.38 ลักษณะTerminal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำศัพท์ต่าง ๆ ที่ใช้กันใน LabVIEW นี้จะแตกต่างจากที่เราใช้กันในภาษาการเขียนโปรแกรมตัวหนังสือทั่วไปในหลายๆด้าน ดังนั้นเพื่อให้ผู้ที่เริ่มใช้ LabVIEW เข้าใจถึงศัพท์ต่าง ๆ ที่ใช้ใน โปรแกรม เราจึงขอเปรียบเทียบศัพท์ที่ใช้ใน LabVIEW กับโปรแกรมพื้นฐานทั่ว ๆ ไปตามตารางที่ได้ แสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบศัพท์ที่ใช้ใน LabVIEW กับโปรแกรมพื้นฐานทั่ว ๆ

LabVIEW	โปรแกรมพื้นฐาน	หน้าที่
VI	Program	ตัวโปรแกรมหลัก
Function	Function	ฟังก์ชันสำเร็จรูปที่สร้างขึ้นมากับโปรแกรมนั้นเช่น sin, log เป็นต้น
Sub VI	Subroutine	โปรแกรมย่อยที่ถูกเรียกใช้โดยโปรแกรมหลัก
Front Panel	user interface	ส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้
Block Diagram	Program code	การเขียนตามขั้นตอนของแต่ละโปรแกรมกำหนดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

หลักการออกแบบสำหรับการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้า

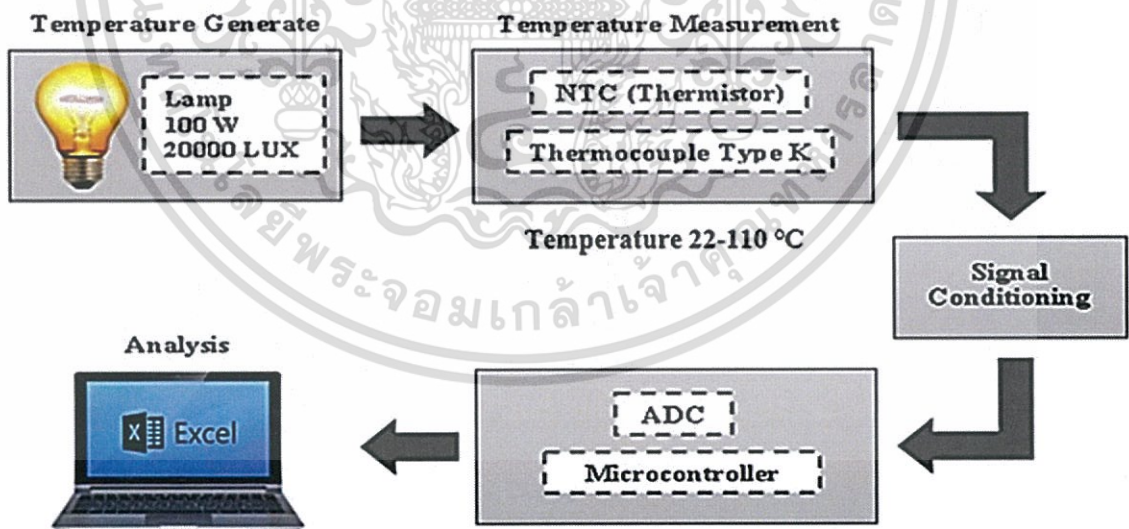
3.1 กล่าวนำ

หลักการออกแบบการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานสิ้นเปลืองอันเนื่องมาจากความร้อนจากความสว่างของหลอดไฟฟ้าในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้า การจำลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้า และการเปรียบเทียบอุณหภูมิอ้างอิง

3.2 การออกแบบการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าด้วยเทอร์โมโพลี และเพลเทียร์

การออกแบบสำหรับการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานสิ้นเปลืองอันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของอุปกรณ์ซึ่งในที่นี้คือความร้อนที่เกิดจากความสว่างของหลอดไฟฟ้านาขนาด 100 Watt ค่าความสว่าง 20000 lux จำนวน 1 หลอด ในเบื้องต้นต้องเข้าใจหลักการและการทำงานภาพรวมของระบบว่ามีหลักการทำงานอย่างไร จากนั้นค่อยพิจารณาในส่วนประกอบย่อย ๆ โครงสร้างการทำงานทั้งหมดของระบบสามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 3.1 โดยสามารถจำแนกออกได้เป็น ดังนี้

- 1) ส่วนกำเนิดอุณหภูมิ คือ หลอดไฟขนาด 100 Watt, ความเข้มแสง 20000 Lux
- 2) ส่วนของเซนเซอร์อุณหภูมิ คือ NTC (Thermistor), เทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K และเพลเทียร์
- 3) ส่วนประมวลผล คือ Arduino Mega 2560 R3
- 4) ส่วนแสดงผล คือ Arduino IDE (Software)

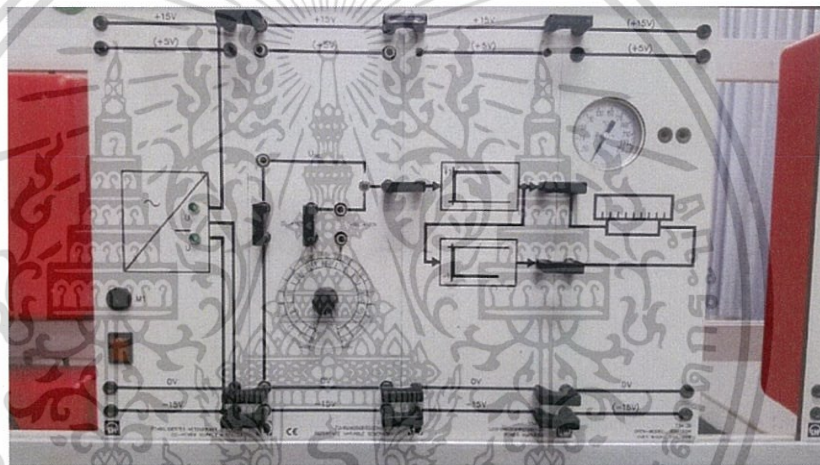


รูปที่ 3.1 โครงสร้างการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนอันเนื่องมาจากความร้อนของแสงสว่างจากหลอดไฟ

3.3 จำลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้า และการปรับเทียบอุณหภูมิอ้างอิง

3.3.1 การจำลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

ในการจำลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานสิ้นเปลืองอันเนื่องมาจากความร้อนจากความสว่างของหลอดไฟนั้นจะใช้ชุดทดลองเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K ในห้องแลปทดลองอุปกรณ์เซนเซอร์ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นตัวอ้างอิงการจำลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.2 เป็นที่ทราบกันดีว่าเทอร์โมคัปเปิ้ลเป็นอุปกรณ์ที่มีความไวต่ออุณหภูมิมาก ซึ่งโครงสร้างภายในประกอบด้วยเส้นลวดโลหะต่างชนิดกันสองเส้นต่อเข้าด้วยกันที่ปลายข้างหนึ่งซึ่งใช้เป็นจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งซึ่งใช้เป็นด้านเอาต์พุตจะถูกนำไปต่อกับมิเตอร์ เมื่อเอาต์พุตที่เป็นรอยต่อร้อนไปวัดอุณหภูมิ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่จุดรอยต่อเย็น เมื่อรอยต่อร้อนของเทอร์โมคัปเปิ้ลได้รับความร้อนเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่รอยต่อเย็นยังมีอุณหภูมิคงที่ ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างจุดสองจุดนี้ทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าที่มิเตอร์แสดงนี้สามารถปรับเทียบให้เป็นค่าที่อยู่ในหน่วย $mV/^{\circ}C$ ได้

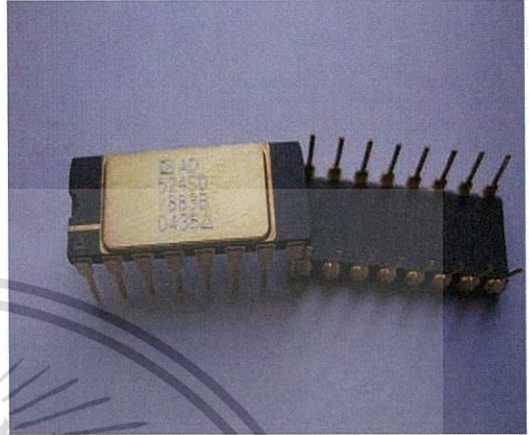
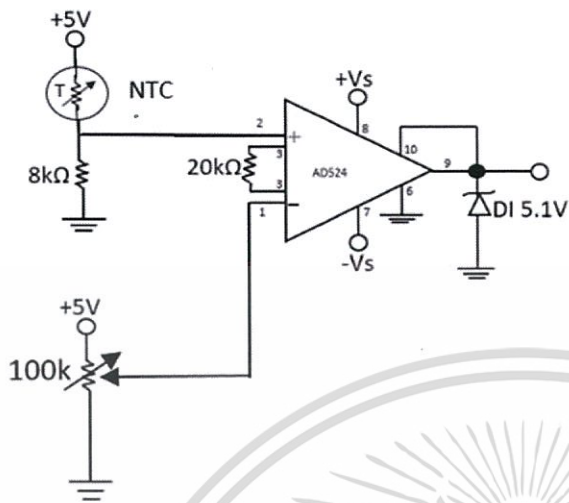


รูปที่ 3.2 ชุดทดลองเทอร์โมคัปเปิ้ล ชนิด K ในห้องแลปทดลองอุปกรณ์เซนเซอร์

3.3.2 การปรับเทียบอุณหภูมิอ้างอิง

ในการออกแบบการชุดทดลองจำเป็นต้องมีส่วนการวัดอุณหภูมิที่ถูกต้อง เทอร์มิสเตอร์ชนิด NTC (TTC3A103F39HAEY) จึงถูกนำมาใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับการวัดอุณหภูมิให้มีความแม่นยำและมีเสถียรภาพมากที่สุด เมื่อเริ่มการทดลองจะทำการวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป เทอร์มิสเตอร์จะทำการวัดค่าอุณหภูมิ เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเมื่อค่าความต้านทานเปลี่ยน และส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไปให้ยัง Arduino Mega 2560 R3 เพื่อแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล จากนั้นจึงทำการปรับเทียบเทอร์มิสเตอร์โดยใช้อุปกรณ์ที่ fluke 51K/J thermometer เป็นตัวอ้างอิงอ้างอิงวิธีการคือ ต่อบอร์ดพร้อมเขียนโปรแกรมวัดค่าแรงดันและค่าอุณหภูมิที่ได้จากเทอร์มิสเตอร์เปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ได้จาก fluke 51K/J thermometer จากนั้นจึงสร้างกราฟในโปรแกรม Microsoft excel นำสมการที่ได้จากกราฟมาเขียนโปรแกรมแสดงอุณหภูมิของเทอร์มิสเตอร์ใน Arduino โดยใช้ชุดทดลองการกำเนิดอุณหภูมิในห้องแลปเซนเซอร์ ซึ่งมีความน่าเชื่อถือแต่ค่าแรงดันที่ออกมาจากเทอร์มิสเตอร์มีค่าน้อยมากเกินกว่าที่บอร์ด Arduino จะประมวลผลได้ จึงต้องทำการเซตค่าแรงดันจากเทอร์มิสเตอร์ที่อุณหภูมิห้องให้เท่ากับทุกตัวด้วยวงจรโดยใช้ ไอซีลอจิก ชนิด AD524 ในการต่อบอร์ดที่มีความเสถียรมากกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยแสดงวงจรดังรูปที่ 3.3 (ข) รวมทั้งมีการขยายสัญญาณได้หลายเท่าเพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่เหมาะสมต่อบอร์ด Arduino



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) วงจรที่ใช้ในการปรับเทียบอุณหภูมิ
(ข) ไอซีลอจิก ชนิด AD524

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 กล่าวนำ

การทดลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าโดยใช้พลังงานความร้อนจากแสงสว่างจากหลอดไฟฟ้าขนาด 100 Watt ค่าความสว่าง 20000 lux เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ได้จากอุปกรณ์เซนเซอร์ที่แตกต่างกัน 2 ชนิดคือ เทอร์โมโพล์ และเพลเทียร์ ซึ่งการทดลองในที่นี่จะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การทดลองการเปรียบเทียบเทอร์มิสเตอร์ และการทดสอบการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากพลังงานความร้อนโดยใช้เทอร์โมโพล์ และเพลเทียร์

4.2 การทดลองการเปรียบเทียบเทอร์มิสเตอร์

การทดลองจะต้องมีการเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการวัดอุณหภูมิดังนี้

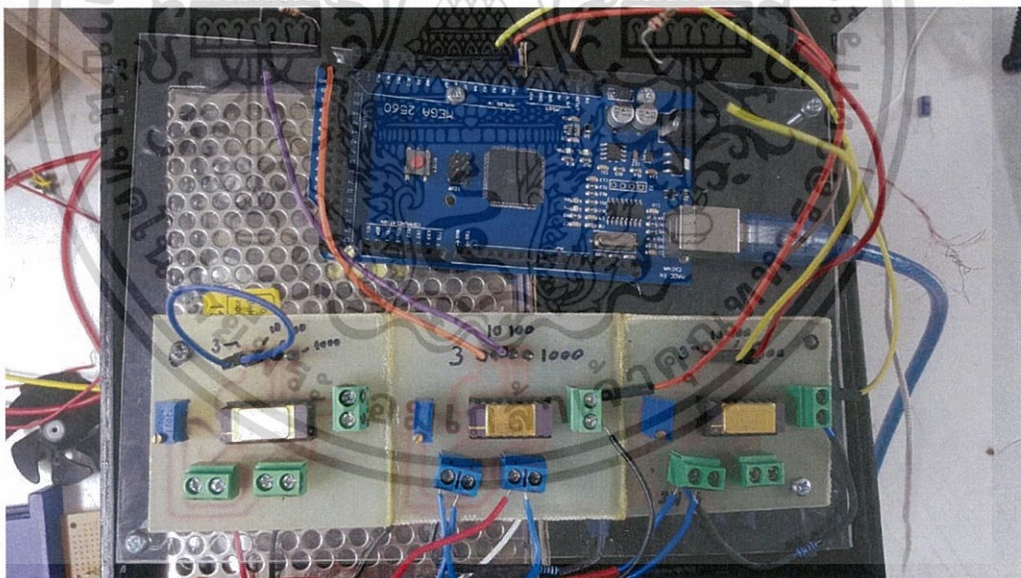
- 1) บอร์ด Arduino Mega 2560 R3
- 2) เทอร์มิสเตอร์แบบ NTC 10Kohm 3 ตัว
- 3) ตัวต้านทานปรับค่าได้ 10Kohm 3 ตัว
- 4) Thermocouple type K
- 5) หลอดไฟขนาด 100 Watt ค่าความเข้มแสง 20000 Lux

4.2.1 ขั้นตอนการทดลองการเปรียบเทียบเทอร์มิสเตอร์

- 1) ติดตั้งชุดกำเนิดอุณหภูมิ ลักษณะดังรูปที่ 4.1
- 2) ต่อวงจรเทอร์มิสเตอร์กับบอร์ด Arduino ดังรูปที่ 4.2
- 3) เขียนโปรแกรม Arduino เพื่อแปลงค่าอนาล็อกเป็นดิจิทัลของเทอร์มิสเตอร์ ดังรูปที่ 4.3
- 4) แสดงผลแบบเวลาจริงด้วยโปรแกรมแลปวิว
- 5) บันทึกผลการทดลองด้วยโปรแกรม Microsoft Excel
- 6) ทำการทดลองจนกระทั่งอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์มิสเตอร์ทั้ง 3 ตัวมีความนิ่งมากที่สุด
- 7) เปรียบเทียบอุณหภูมิจากเทอร์มิสเตอร์กับอุปกรณ์ FLUKE DIGITAL THERMOMETER 52K/J ให้ค่าอุณหภูมิห่างกันไม่เกิน $1\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.1 ลักษณะการติดตั้งหลอดไฟฟ้าสำหรับให้ความร้อน



รูปที่ 4.2 การต่อวงจรเทอร์มิสเตอร์กับบอร์ด Arduino

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

thermistor_10K_green1 | Arduino 1.8.4
File Edit Sketch Tools Help

thermistor_10K_green1

#define thermistorA1 A1 // Analog Pin 1 in
#define thermistorA2 A2 // Analog Pin 2 out
#define thermistorA3 A3 // Analog Pin 3 thermocouple
#define A 3.354016e-03 // For WTCU100 10k thermistor
#define B 2.369890e-04 // For WTCU100 10k thermistor
#define C 1.420131e-04 // For WTCU100 10k thermistor
#define D 4.382051e-08 // For WTCU100 10k thermistor

#define thermistorR1 10000 // R1 value for your thermistor1 (nominal value)
#define thermistorR2 10000 // R2 value for your thermistor2 (nominal value)
#define thermistorR3 10000 // R3 value for your thermistor3 (nominal value)

float padResistance = 9970; // the measured resistance of your pad resistor

float steinhartAndHart1(float rawADC) {
    float resistance = padResistance*((1024.0 / rawADC) - 1);
    float lnRes = log(resistance/thermistorR1);
    float temp1 = (1 / (A * (B * lnRes) + C) * pow(lnRes, 2)) + (D * pow(lnRes, 3));
    return temp1 - 273.15; // Convert Kelvin to Celsius
}

float padResistance2 = 9970; // the measured resistance of your pad resistor

float steinhartAndHart2(float rawADC) {
    float resistance = padResistance2*((1024.0 / rawADC) - 1);
    float lnRes = log(resistance/thermistorR2);
    float temp2 = (1 / (A * (B * lnRes) + C) * pow(lnRes, 2)) + (D * pow(lnRes, 3));
    return temp2 - 273.15; // Convert Kelvin to Celsius
}

```

รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการเขียนโปรแกรม Arduino เพื่อรับค่าจากเทอร์มิสเตอร์

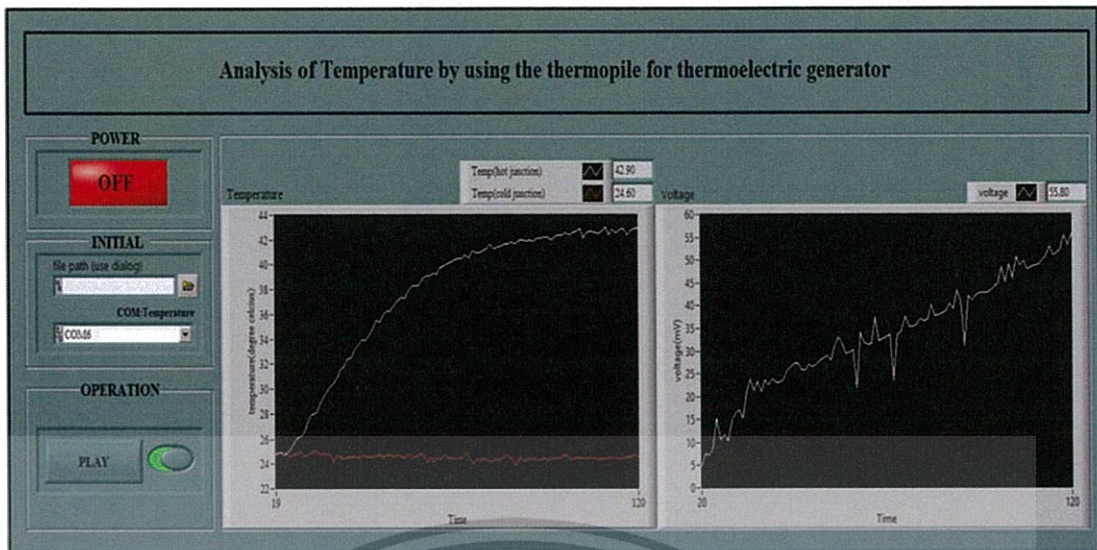
4.2.2 ผลการทดลองการเปรียบเทียบเทอร์มิสเตอร์

เมื่อได้รับค่าจาก Arduino มาแสดงผล ได้แล้วนั้น ก็ได้ออกแบบให้มีการจัดเก็บข้อมูลเอาไว้เพื่อมาแสดงผลในรูปแบบของตารางให้สะดวกต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งออกแบบให้จัดเก็บไฟล์ notepad ที่สามารถนำไปเปิดในโปรแกรม Microsoft excel ได้ โดยตารางที่ 4.1 แสดงค่าอุณหภูมิที่ถูกจัดเก็บ แล้วแสดงผลแบบเวลาจริงได้ลักษณะกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งผลการทดลองของการวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์มิสเตอร์นั้น ค่าที่ได้มีความเสถียรเพียงเล็กน้อย

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บจากโปรแกรมแลปวิว

time	Temp(HJ)	Temp(CJ)	Temp(Tw)
5:14:49 PM	28.868	27.589	12.615
5:14:50 PM	28.776	27.589	12.974
5:14:51 PM	28.776	27.488	13.666
5:14:52 PM	28.776	27.488	13.153
5:14:54 PM	28.776	27.488	12.436
5:14:56 PM	28.776	27.488	12.795
5:14:56 PM	28.776	27.488	13.688
5:14:58 PM	28.684	27.488	13.421
5:15:00 PM	28.684	27.488	13.955
5:15:02 PM	28.868	27.488	13.331
5:15:04 PM	28.776	27.488	12.438
5:15:06 PM	28.868	27.488	13.331
5:15:08 PM	28.868	27.488	13.686
5:15:10 PM	28.776	27.498	13.516
5:15:12 PM	28.776	27.498	13.267
5:15:14 PM	28.776	27.498	13.785
5:15:16 PM	28.868	27.498	13.340
5:15:18 PM	28.888	27.498	12.974
5:15:20 PM	28.868	27.226	13.421
5:15:22 PM	28.868	27.226	13.421
5:15:24 PM	28.776	27.226	13.153
5:15:26 PM	28.684	27.226	12.974
5:15:28 PM	28.776	27.845	12.436
5:15:30 PM	28.593	27.955	12.348
5:15:30 PM	28.593	27.955	12.795
5:15:32 PM	28.593	27.226	14.755
5:15:34 PM	28.593	27.226	14.498
5:15:36 PM	28.503	27.226	13.777
5:15:38 PM	28.593	27.314	12.256
5:15:40 PM	28.776	27.314	12.795
5:15:42 PM	28.776	27.345	13.063
5:15:44 PM	28.776	27.498	12.785
5:15:46 PM	28.868	27.498	12.756
5:15:48 PM	28.868	27.314	11.624
5:15:50 PM	28.868	27.314	13.153
5:15:52 PM	28.868	27.498	15.282
5:15:54 PM	28.868	27.498	14.843
5:15:56 PM	29.344	27.317	13.331
5:15:58 PM	29.318	27.317	13.421
5:16:00 PM	29.144	27.408	13.599
5:16:02 PM	29.163	27.408	13.252
5:16:04 PM	29.163	27.498	13.510
5:16:06 PM	29.263	27.498	13.686
5:16:08 PM	29.328	27.596	13.153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลอุณหภูมิแบบเวลาจริงในโปรแกรมแลปวิว

4.3 การทดลองการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมไพล์ และเพลเทียร์

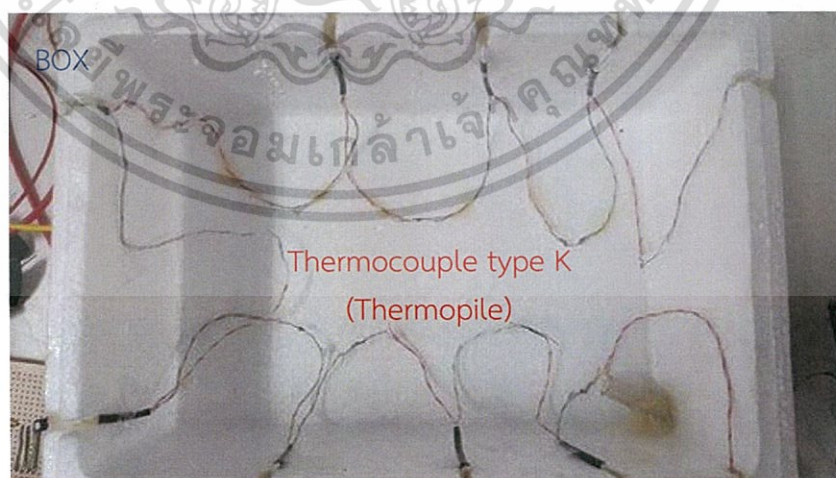
4.3.1 การทดลองการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมไพล์

การทดลองจะต้องมีการเตรียมอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

- 1) เทอร์โมคัปเปิล type K จำนวน 10 เส้น (ความยาวเส้นละ 1 เมตร)
- 2) แบบจำลองแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ
- 3) หลอดไฟขนาด 100 Watt, ความเข้มแสง 20000 Lux
- 4) บอร์ด Arduino Mega 2560 R3

4.3.1.1 ขั้นตอนการทดลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมไพล์

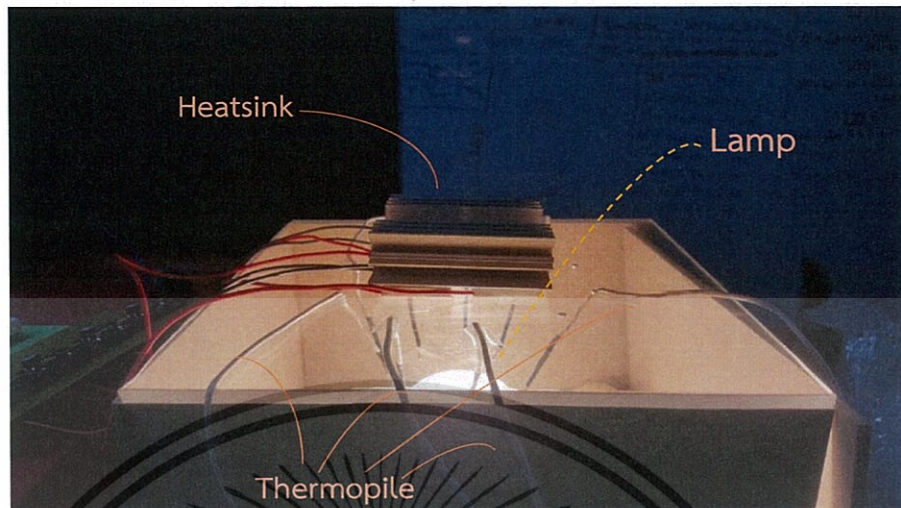
1. ต่อบอร์ด Thermocouple จำนวน 10 เส้นให้ เป็น Thermopile ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงการต่อบอร์ด Thermocouple เป็น Thermopile

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จำลองแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ โดยใช้หลอดไฟขนาด 100 Watt, ความเข้มแสง 20000 lux ซึ่งสามารถให้อุณหภูมิสูงถึง 120 °C

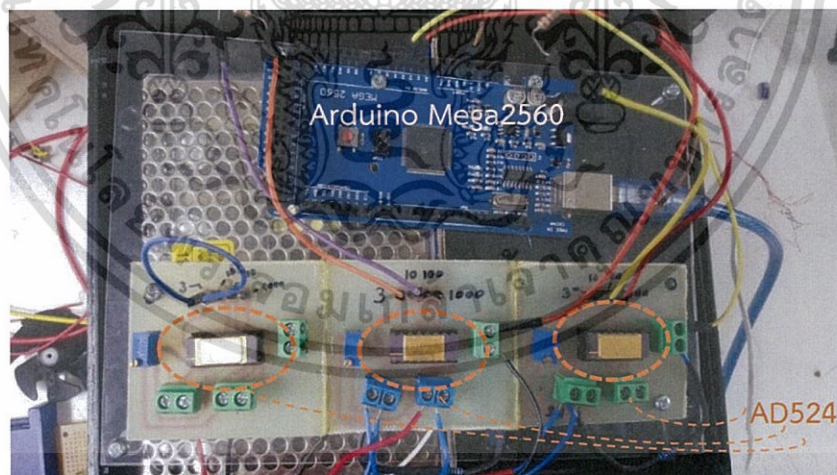


รูปที่ 4.6 แสดงแหล่งจำลองการกำเนิดอุณหภูมิ

3. นำด้านรอยต่อร้อนไปติดตั้งที่แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (หลอดไฟ) โดยให้จุดรอยต่อเย็นเป็นจุดอ้างอิง ที่ 0 °C หรืออุณหภูมิห้อง (22 °C)

4. ใช้เทอร์มิสเตอร์วัดอุณหภูมิ จากทั้ง 2 จุดที่ติดตั้งไว้

5. เขียนโปรแกรมและออกแบบวงจรรับค่า Voltage จาก Thermopile ดังรูปที่ 4.7 แล้วแสดงผลในโปรแกรม Arduino IDE



รูปที่ 4.7 วงจรรับค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Thermopile

6. เริ่มทดลองโดยการ เปิดหลอดไฟ พร้อมกับรันโปรแกรม ซึ่งจะแสดงทั้งค่าอุณหภูมิ และ แรงดันไฟฟ้า โดยกำหนดย่านอุณหภูมิสูงสุด ที่ประมาณ 110 °C โดยมีลักษณะโปรแกรม ดังรูปที่ 4.8

7. ทดลองแบบข้อ 6. สองรูปแบบ คือ ให้จุดเย็น เป็น 0 °C และ 25 °C โดยรูปที่ 4.9 จะแสดงลักษณะโดยรวมของชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. บันทึกและแสดงผลกราฟใน Microsoft Excel

```

sensorValue1 = sensor_temp1/30; // เหนียวหาหาค่าค่าเฉลี่ย 30วินาทีในการคัม
sensorValue2 = sensor_temp2/30;
int sensorValue3 = analogRead(A4);

float voltage1 = sensorValue1 * (5.0 / 1024.0);
float Temp1 = A * exp(B * voltage1); //
Serial.print(" ");
Serial.print(Temp1,1); //show Temp hot junction
Serial.print(" ");

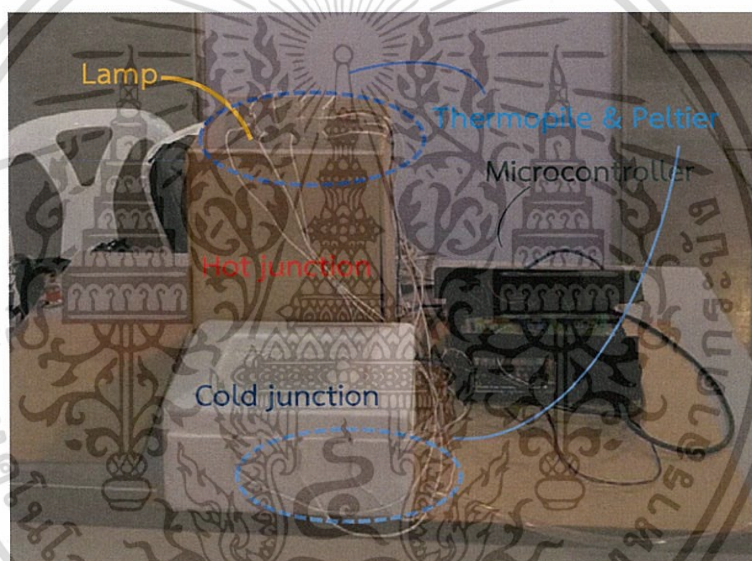
float voltage2 = sensorValue2 * (5.0 / 1024.0);
float Temp2 = A * exp(B * voltage2); //
Serial.print(" ");
Serial.print(Temp2,1); //show cold junction
Serial.print(" ");

float voltage3 = sensorValue3 * (5.0 / 1024.0);
Serial.print(" ");
Serial.println(voltage3/21,4);

delay(500);

```

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างโปรแกรม รับค่าแรงดันไฟฟ้าจาก Thermopile และแสดงผล



รูปที่ 4.9 ชุดทดลอง Thermopile และเพลเทียร์

4.3.1.2 ผลการทดลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมโพล์

จากการทดลอง การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความร้อนจากแสงสว่างของหลอดไฟ ในการวิเคราะห์ผลต่างของอุณหภูมิที่จุด 2 จุด คือ จุดรอยต่อร้อน(อุณหภูมิที่หลอดไฟ) และจุดรอยต่อเย็น(จุดอ้างอิง) ด้วยเทอร์โมโพล์เมื่อกำหนดจุดรอยต่อเย็นที่อุณหภูมิ 0 °C ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ได้มีค่าประมาณ 40 mV และ เมื่อกำหนดจุดรอยต่อเย็นที่อุณหภูมิ 22 °C ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ได้มีค่าประมาณ 25 mV ซึ่งสามารถอธิบายด้วยกราฟได้ว่าที่จุดรอยต่อร้อนเดียวกัน ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ เมื่อกำหนดจุดรอยต่อเย็นเท่ากับ 0 °C ดังรูปที่ 4.10 มีค่ามากกว่า ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ เมื่อกำหนดจุดรอยต่อเย็นที่อุณหภูมิ 22 °C ดังรูปที่ 4.11 หรือสามารถอธิบายได้ว่า ยิ่งอุณหภูมิที่ได้จากหลอดไฟมีค่าสูงมาก ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้ยิ่งมีค่ามาก ดังรูปที่ 4.12 เมื่อนำมาหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน พบว่า เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวเทอร์โมโพล์มีค่า 1.2054 % ดังตารางที่ 4.3

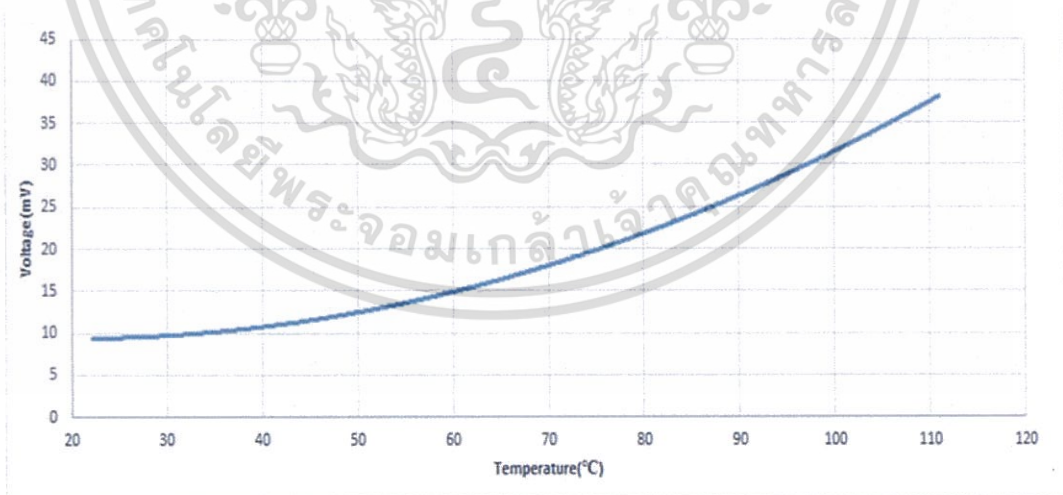
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างตารางบันทึกผลของอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าจากโปรแกรม Microsoft Excel

1	26.6	0.9863
2	27.3	1.1230
3	27.8	1.0547
4	28.7	1.1182
5	28.9	1.1035
6	29.5	1.0840
7	30.3	1.1768
8	30.8	1.0986
9	31.5	1.2451
10	32.0	1.1279

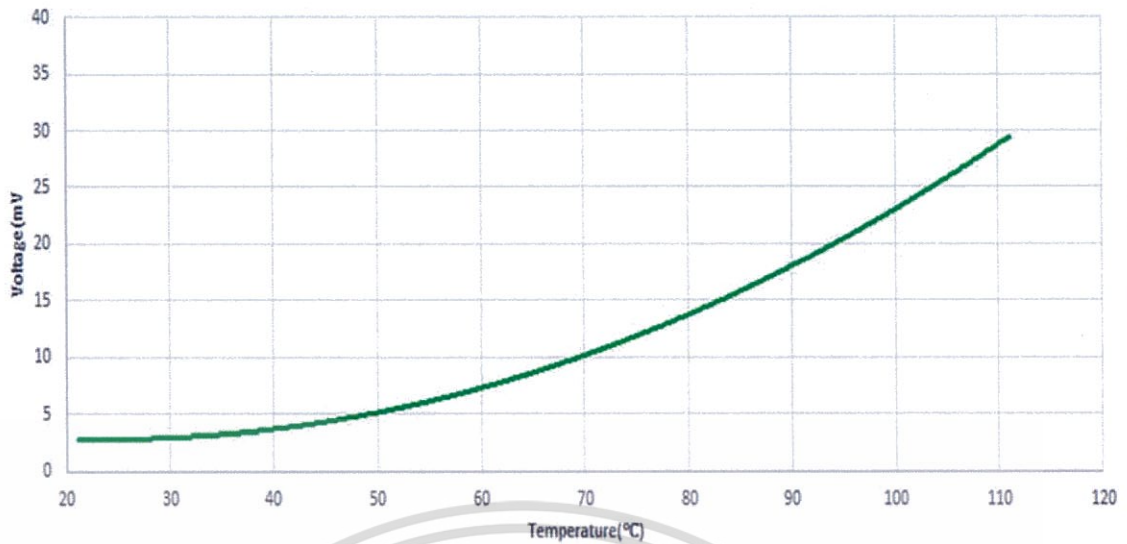
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวเทอร์โมไฟล์

t	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10	avg	error	%error
40	5.5048	5.9453	5.2863	5.2723	5.8999	5.6201	5.2256	4.8318	5.3649	5.2258	5.41768	0.016081	1.608068
45	6.8952	7.0232	7.2232	7.3638	6.9453	6.5029	6.9685	6.5048	6.8054	7.5256	6.97579	0.011553	1.155281
50	7.0421	7.2759	7.1753	7.0256	7.1857	7.0857	7.2232	7.1876	7.0606	7.2337	7.14954	0.015028	1.502754
55	7.8015	7.8735	7.8735	7.8508	7.4557	7.8508	7.8281	7.3404	7.6857	7.7857	7.73457	0.008653	0.865336
60	8.4983	8.6986	8.6986	8.3109	8.4833	8.2459	8.2434	8.3635	8.0483	7.9906	8.35814	0.016769	1.676928
65	9.3754	9.5937	9.5963	9.4784	9.4557	9.4759	9.4268	9.4354	9.4759	9.4207	9.47342	0.010347	1.034684
70	10.9482	10.1287	11.1287	11.1064	11.2459	12.1065	11.5716	10.6655	10.6636	11.6183	11.11834	0.015303	1.530264
75	12.1581	11.8262	13.0519	12.1986	12.4538	14.1572	12.1037	12.1956	12.1612	12.1068	12.44131	0.022764	2.276368
80	14.7914	15.0587	15.0587	14.6636	14.5719	15.0399	15.6636	14.6882	14.7336	14.7808	14.90504	0.007624	0.762427
85	16.4837	16.2449	16.5871	16.4538	16.2685	16.2967	16.2287	16.5882	16.2986	16.2109	16.36611	0.007185	0.718497
90	18.7834	18.5115	18.6115	18.3612	18.4311	18.7636	18.3212	18.3133	18.5287	18.8084	18.54339	0.012943	1.294316
95	21.4927	22.8814	22.9543	22.9814	20.5937	20.3612	21.9912	19.6409	19.9587	19.6409	21.24964	0.011438	1.143831
100	24.7941	24.9041	24.8041	24.2444	24.2213	24.3139	24.7115	24.5133	24.4538	24.5237	24.54842	0.010008	1.000798
105	26.4831	25.8066	25.8016	26.6514	25.6863	26.5516	27.1839	25.1754	25.7798	27.6636	26.27833	0.007792	0.779235
110	30.5507	29.6041	28.6391	31.8489	30.7188	31.7798	29.8489	30.6066	33.2445	30.9188	30.77602	0.007321	0.732128
total error													1.205394

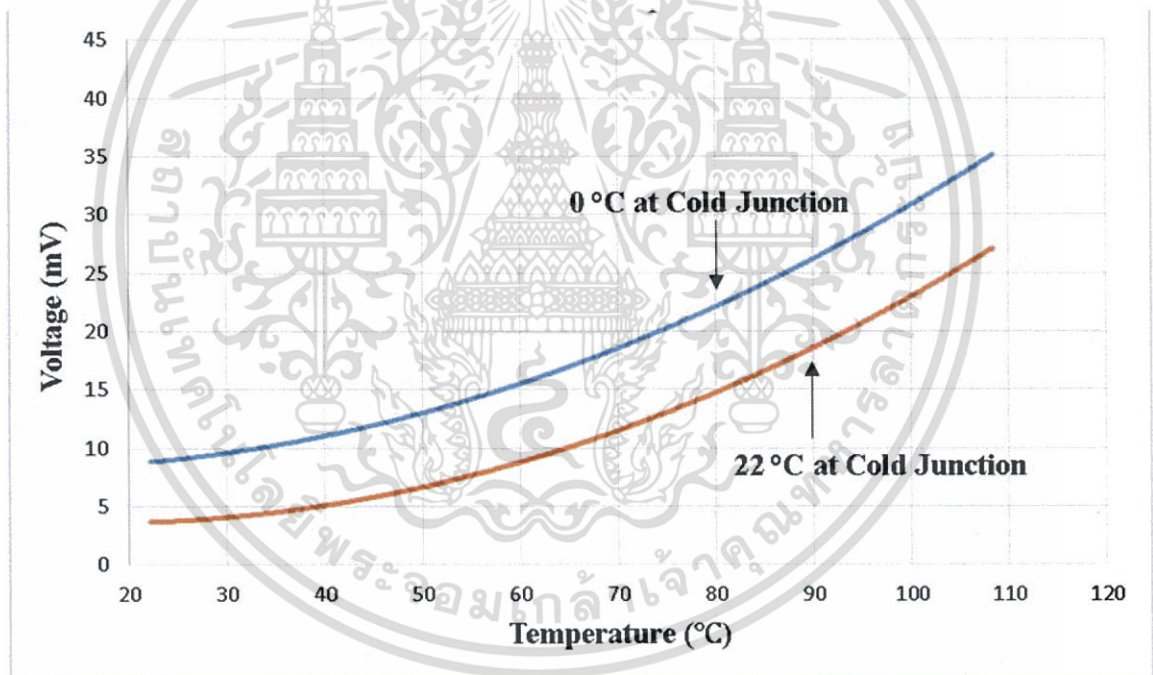


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าจากเทอร์โมไฟล์ ที่อุณหภูมิอ้างอิง 0 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้า
จากเทอร์โมโพล์ที่อุณหภูมิอ้างอิง 22 °C



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้า
จากเทอร์โมโพล์ที่อุณหภูมิ 0 °C และ 22 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การทดลองการวิเคราะห์การกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเพลเทียร์

4.3.2.1 ขั้นตอนการทดลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเพลเทียร์

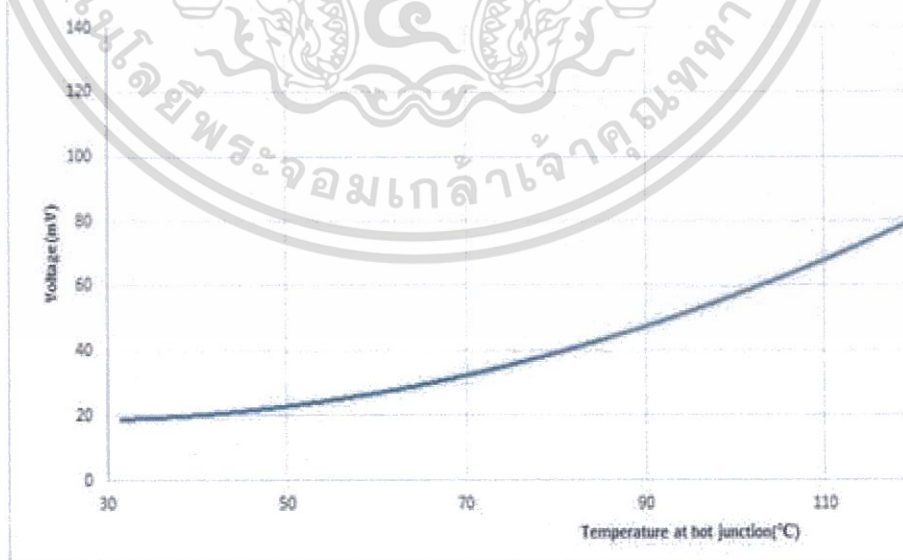
ทำการทดลองโดยใช้แนวทางเดียวกันกับการทดลองเทอร์โมโพลต์ โดยเปลี่ยนอุปกรณ์จากเทอร์โมโพลต์เป็นเพลเทียร์

4.3.2.2 ผลการทดลองการกำเนิดแรงดันไฟฟ้าจากเพลเทียร์

จากการทดลองค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ได้มีค่าประมาณ 65 mV ดังรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิที่ได้จากความร้อนของหลอดไฟ เช่นเดียวกับเทอร์โมโพลต์ ดังรูปที่ 4.14 เมื่อนำมาหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน พบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวเพลเทียร์มีค่า 0.7359 % ดังตารางที่ 4.4

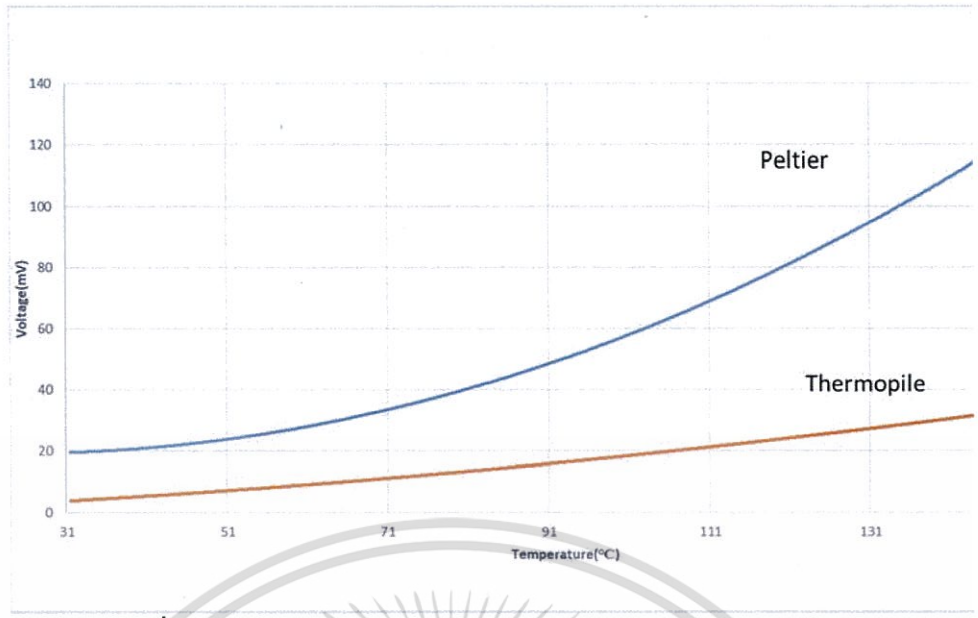
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวเพลเทียร์

t	v1	v2	v3	v4	v5	v6	v7	v8	v9	v10	avg	error	%error
40	38.5048	38.9453	39.9863	38.2723	37.8999	37.6201	37.225	38.8318	39.3649	38.225	38.48754	0.000448	0.044846
45	45.8952	50.2232	50.2232	48.363	43.9453	46.5029	46.968	36.5048	45.8054	49.5256	46.39566	0.010787	1.078678
50	49.6421	51.1759	50.1759	49.9256	50.3857	51.3857	50.2232	50.3876	49.0606	49.4337	50.1796	0.010712	1.071152
55	51.2015	51.8735	52.8735	51.8508	50.4557	51.8508	50.8281	51.3404	51.3857	51.3857	51.50457	0.005884	0.588433
60	52.4983	57.1986	57.1986	53.7109	52.0833	53.2459	53.9434	52.3637	49.5483	49.9906	53.17816	0.012785	1.278457
65	54.9754	54.5937	54.5963	53.4784	54.4557	54.1759	56.2685	55.7354	54.1759	54.9207	54.73759	0.004345	0.434455
70	55.9482	55.1287	57.1287	56.1067	55.2459	55.1068	56.5716	57.6655	57.6636	56.6183	56.3184	0.006573	0.657334
75	56.4581	58.8262	59.4519	57.1986	60.4538	55.571	56.0379	48.5956	58.3612	55.1066	56.60609	0.002614	0.261438
80	57.7914	57.0587	58.0587	57.6636	57.5717	57.0367	57.6636	57.6882	57.7336	57.7808	57.6047	0.003241	0.324105
85	59.4837	59.2447	58.5871	60.4538	58.2685	56.9661	58.1287	58.6882	59.1986	58.7109	58.77303	0.012092	1.209177
90	60.7834	60.0115	60.0115	60.3612	60.4311	59.6636	60.2213	62.0133	60.1287	60.4084	60.4034	0.006291	0.629104
95	61.4927	62.8814	62.9543	62.9814	61.5937	60.3612	59.9912	59.6409	59.9587	59.6409	61.14964	0.00561	0.561017
100	62.7941	62.9041	62.8041	61.2448	60.2213	62.3139	61.7115	62.5133	61.4538	62.5237	62.04846	0.012017	1.201706
105	63.4831	64.8066	63.8016	63.1514	63.6863	64.1514	63.9839	63.1759	64.7798	64.6636	63.96836	0.007586	0.758594
110	65.9507	64.1041	66.6391	64.8489	64.9188	65.779	65.8489	64.106	65.244	65.9188	65.33583	0.009411	0.941092
total error													0.735973



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าของแผ่นเพลเทียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมไฟล์และแผ่นเพลเทียร์ที่อุณหภูมิอ้างอิง 22 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลและอภิปรายผล

จากการศึกษา อุปกรณ์ซึ่งเป็นตัวแปลงพลังงานความร้อนให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าทั้งสองชนิด คือ เทอร์โมโพลี และเพลเทียร์ จากแหล่งกำเนิดความร้อนซึ่งในที่นี้ คือหลอดไฟขนาด 100 Watt ที่มีค่าของความเข้มแสง 20000 lux จำนวน 1 หลอด จะได้ค่าของแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึงค่าของอุณหภูมิหลอดไฟสูงสุดที่ทำได้ของตัวเทอร์โมโพลีได้เท่ากับ 25 mV และของตัวเพลเทียร์เท่ากับ 70 mV ซึ่งสามารถเปรียบเทียบกันได้ว่า เอาต์พุตที่เกิดจากตัวเพลเทียร์มีค่าแรงดันไฟฟ้าโดยประมาณเป็น 3 เท่าของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากตัวเทอร์โมโพลี ซึ่งเมื่ออุณหภูมิระหว่างจตุรรอยต่อร้อนและรอยต่อเย็นมีความแตกต่างกันมาก ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์ทั้งสองจะมีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน ในกรณีนำไปใช้งานจริง ถ้าเพิ่มจำนวนของหลอดไฟให้มีจำนวนมากขึ้น ค่าของอุณหภูมิที่ได้จะสูงมากขึ้น และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์ทั้งสองตัวจะสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งจากการทดสอบอุปกรณ์ทั้งสองตัว ผลจากการวัดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากตัวเทอร์โมโพลี มีค่า 1.2054 % และของตัวเพลเทียร์มีค่า 0.7359 % สามารถสรุปได้ว่า เทอร์โมโพลีมีค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่น้อยกว่าของเพลเทียร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. อุปกรณ์ที่ใช้งานร่วมกับตัวโซลล่าเซลล์ เมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์แปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าแล้วอุปกรณ์ที่ต้องใช้งาน เช่น ตัวแปลงพลังงาน DC to DC เพื่อแปลงค่าพลังงานให้สูงขึ้นแล้วเก็บในแบตเตอรี่ เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ที่สร้างพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นเสียงที่เกิดจากความร้อนของแสงสว่างของหลอดไฟ หากต้องการให้ค่าพลังงานที่ได้มีค่าสูงขึ้นสามารถที่จะไปขับโหลดที่มีพลังงานสูง ๆ ได้ จำเป็นต้องมีอุปกรณ์เช่นนี้เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย รวมไปถึงพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากพลังงานน้ำ พลังงานลม ก็จะมีอุปกรณ์ที่ต่อรวมเช่นเดียวกัน

2. นอกจากแรงดันไฟฟ้าที่เกิดความร้อนของหลอดไฟแล้ว เรายังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับความร้อนที่เกิดจากการทำงานของเครื่องจักรได้ เช่น อุปกรณ์ของเครื่องจักรอุตสาหกรรมในไลน์การผลิตที่มีขนาดใหญ่ ได้แก่ มอเตอร์ บอยเลอร์ ซึ่งเป็นพลังงานความร้อนที่สิ้นเปลือง เราสามารถนำอุปกรณ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาทำการเปลี่ยนจากพลังงานความร้อนเป็นแรงดันไฟฟ้าแล้วเก็บมาใช้งานได้

3. การต่อเข้ากับอินเตอร์เน็ต การมอนิเตอร์เอาต์พุต หรือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อน นอกเหนือจากการแปลงค่าของความร้อนเอามาใช้งานโดยตรงแล้ว เราสามารถที่จะมอนิเตอร์ได้ ยกตัวอย่างเช่น การนำไปใช้งานกับเครื่องจักรอุตสาหกรรม แล้วทำการวัดออกมา เครื่องจักรที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นผิดปกติ เราสามารถที่จะรู้ได้ว่าเกิดความผิดปกติขึ้น แล้วต้องมีการแก้ไขหรือไม่ โดยการต่อเข้ากับอินเตอร์เน็ตเข้ามาที่หน้าจอมอนิเตอร์ สามารถที่จะมอนิเตอร์ได้ตลอดเวลา

บรรณานุกรม

- [1] ทศวรรษ สีตะวัน. เทคโนโลยีเทอร์โมอิเล็กทริก ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558
- [2] นพพร พัชรประภคิตยุทธสิทธิ์ แสนเรือน และ พันธุ์ชัย กาวิชัย “ระบบอัดประจุแบตเตอรี่ด้วยพลังงานเทอร์โมอิเล็กทริก”, การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1, จัดโดยคณะ พลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ, 31 สิงหาคม 2550, โรงแรมเดอะทวินทาวเวอร์ กรุงเทพฯ
- [3] Veljko Zlatic and Alex C. Hewson, “Properties and Applications of Thermoelectric Materials”, Springer, 2008.
- [4] รศ.วิศรุต ศรีรัตนะ “เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ ในงานอุตสาหกรรม”, กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2554
- [5] รศ.ดร. เกษตร์ ศิริสันติสัมฤทธิ์ “เครื่องมือวัดและควบคุมสำหรับใช้งานทางอุตสาหกรรม”, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพ, 2560.
- [6] ทันพงษ์ ภูริรักษ์, ความรู้เกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น, เอกสารประกอบการสอน วิชาไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น, วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี สำนักงานคณะกรรมการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ, หน้า 16-26
- [7] ทันพงษ์ ภูริรักษ์, Arduino IDE ซอฟต์แวร์สำหรับโปรแกรมภาษา C, เอกสารประกอบการสอนวิชาไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น, วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี สำนักงานคณะกรรมการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ, หน้า 16-22
- [8] อติศักดิ์ ร่มพุดตาล “LabVIEW สำหรับงานควบคุมฮาร์ดแวร์” ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2557



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โค้ดแสดงผลอุณหภูมิและค่าแรงดันไฟฟ้า

```
#define A 11.172

#define B 0.7181

double sensor_temp1=0;

double sensor_temp2=0;

double sensor_read1=0;

double sensor_read2=0;

double sensorValue1=0;

double sensorValue2=0;

void setup() {

  Serial.begin(115200);

}

void loop() {

  sensor_temp1=0;

  sensor_temp2=0;

  for(int i=0; i <= 30; i++){

    sensor_read1 = analogRead(A2);

    sensor_read2 = analogRead(A3);

    sensor_temp1+=sensor_read1;

    sensor_temp2+=sensor_read2;

    delay(10);

  }

  sensorValue1 = sensor_temp1/30;

  sensorValue2 = sensor_temp2/30;

  int sensorValue3 = analogRead(A4);

  float voltage1 = sensorValue1 * (5.0 /

1024.0);

  float Temp1 = A * exp(B * voltage1);

  Serial.print(" ");

  Serial.print(Temp1,1);

  Serial.print(" ");

  float voltage2 = sensorValue2 * (5.0 /

1024.0);

  float Temp2 = A * exp(B * voltage2) ;

  Serial.print(" ");

  Serial.print(Temp2,1);

  Serial.print(" ");

  float voltage3 = sensorValue3 * (5.0 /

1024.0);

  Serial.print(" ");

  Serial.println(voltage3/21,4);

  delay(500);

}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข.

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FEATURES

- Low noise: 0.3 μV p-p at 0.1 Hz to 10 Hz**
- Low nonlinearity: 0.003% ($G = 1$)**
- High CMRR: 120 dB ($G = 1000$)**
- Low offset voltage: 50 μV**
- Low offset voltage drift: 0.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$**
- Gain bandwidth product: 25 MHz**
- Pin programmable gains of 1, 10, 100, 1000**
- Input protection, power-on/power-off**
- No external components required**
- Internally compensated**
- MIL-STD-883B and chips available**
- 16-lead ceramic DIP and SOIC packages and 20-terminal leadless chip carrier available**
- Available in tape and reel in accordance with EIA-481A standard**
- Standard military drawing also available**

GENERAL DESCRIPTION

The AD524 is a precision monolithic instrumentation amplifier designed for data acquisition applications requiring high accuracy under worst-case operating conditions. An outstanding combination of high linearity, high common-mode rejection, low offset voltage drift, and low noise makes the AD524 suitable for use in many data acquisition systems. The AD524 has an output offset voltage drift of less than 25 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, input offset voltage drift of less than 0.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, CMR above 90 dB at unity gain (120 dB at $G = 1000$), and maximum nonlinearity of 0.003% at $G = 1$. The gain bandwidth product of the AD524 is 25 kHz ($G = 1000$). The output slew rate of 5 V/ μs and settling time of 15 μs to 0.01% for gains of 1 to 100, makes it suitable for high speed data acquisition systems.

As a complete amplifier, the AD524 does not require any external components for fixed gains of 1, 10, 100, and 1000. For other gain settings between 1 and 1000, only a single resistor is required. The AD524 input is fully protected for both power-on and power-off fault conditions. The AD524 is available in four versions of accuracy and operating temperature range. The economical A grade, the low drift B grade, and lower drift, higher linearity C grade are specified from -25°C to $+85^\circ\text{C}$. The S grade guarantees performance to specification over the extended temperature range -55°C to $+125^\circ\text{C}$. The AD524 is available in a 16-lead ceramic DIP, 16-lead SBDIP, 16-lead SOIC wide packages, and 20-terminal leadless chip carrier.

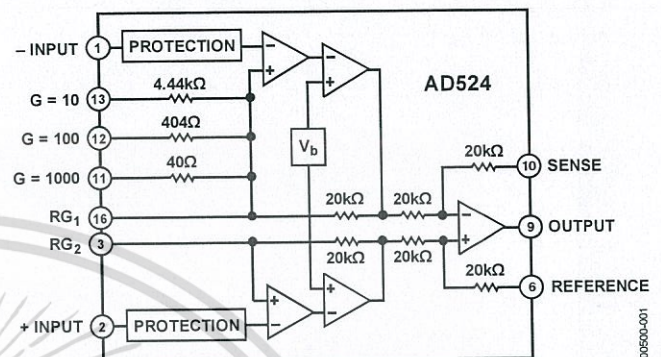
FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM


Figure 1.

PRODUCT HIGHLIGHTS

1. Guaranteed low offset voltage, low offset voltage drift, and low noise for precision high gain applications.
2. Functionally complete with pin programmable gains of 1, 10, 100, and 1000, and single resistor-programmable for any gain.
3. Input and output offset nulling terminals are provided for high precision applications and to minimize offset voltage changes in gain ranging applications.
4. Input protected for both power-on and power-off fault conditions.
5. Superior dynamic performance with a gain bandwidth product of 25 MHz, full power response of 75 kHz and a settling time of 15 μs to 0.01% of a 20 V step ($G = 100$).

Rev. G
Document Feedback

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
 Tel: 781.329.4700 ©1983-2018 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
 Technical Support www.analog.com

TABLE OF CONTENTS

Features	1	Input Offset and Output Offset	15
Functional Block Diagram	1	Gain	16
General Description	1	Input Bias Currents	17
Product Highlights	1	Common-Mode Rejection	17
Revision History	2	Grounding	18
Specifications	3	Sense Terminal	18
Absolute Maximum Ratings	8	Reference Terminal	18
Connection Diagrams	8	Programmable Gain	20
ESD Caution	8	Auto-Zero Circuits	20
Typical Performance Characteristics	9	Error Budget Analysis	21
Test Circuits	14	References	23
Theory of Operation	15	Outline Dimensions	24
Input Protection	15	Ordering Guide	25

REVISION HISTORY

1/2018—Rev. F to Rev. G

Changes to General Description	1
Change to Output Offset Voltage vs. Temperature Parameter, Unit Column, Table 1	3
Added References Section	23
Updated Outline Dimensions	24
Changes to Ordering Guide	25

11/2007—Rev. E to Rev. F

Updated Format	Universal
Changes to General Description	1
Changes to Figure 1	1
Changes to Figure 3 and Figure 4 Captions	8
Changes to Error Budget Analysis Section	21
Changes to Ordering Guide	25

4/1999—Rev. D to Rev. E

SPECIFICATIONS

At $V_s = \pm 15\text{ V}$, $R_L = 2\text{ k}\Omega$ and $T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

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

Table 1.

Parameter	AD524A			AD524B			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN							
Gain Equation (External Resistor Gain Programming)	$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			
Gain Range (Pin Programmable)	1 to 1000			1 to 1000			
Gain Error ¹							
G = 1			±0.05			±0.03	%
G = 10			±0.25			±0.15	%
G = 100			±0.5			±0.35	%
G = 1000			±2.0			±1.0	%
Nonlinearity							
G = 1			±0.01			±0.005	%
G = 10, G = 100			±0.01			±0.005	%
G = 1000			±0.01			±0.01	%
Gain vs. Temperature							
G = 1			5			5	ppm/°C
G = 10			15			10	ppm/°C
G = 100			35			25	ppm/°C
G = 1000			100			50	ppm/°C
VOLTAGE OFFSET (May be Nulled)							
Input Offset Voltage			250			100	μV
vs. Temperature			2			0.75	μV/°C
Output Offset Voltage			5			3	mV
vs. Temperature			100			50	μV/°C
Offset Referred to the Input vs. Supply							
G = 1	70			75			dB
G = 10	85			95			dB
G = 100	95			105			dB
G = 1000	100			110			dB
INPUT CURRENT							
Input Bias Current			±50			±25	nA
vs. Temperature			±100			±100	pA/°C
Input Offset Current			±35			±15	nA
vs. Temperature			±100			±100	pA/°C

Parameter	AD524A			AD524B			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT							
Input Impedance							
Differential Resistance		10 ⁹			10 ⁹		Ω
Differential Capacitance		10			10		pF
Common-Mode Resistance		10 ⁹			10 ⁹		Ω
Common-Mode Capacitance		10			10		pF
Input Voltage Range							
Maximum Differential Input Linear (V _{DL}) ²		±10			±10		V
Maximum Common-Mode Linear (V _{CM}) ²		$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$		V
Common-Mode Rejection DC to 60 Hz with 1 kΩ Source Imbalance							V
G = 1		70			75		dB
G = 10		90			95		dB
G = 100		100			105		dB
G = 1000		110			115		dB
OUTPUT RATING							
V _{OUT} , R _L = 2 kΩ		±10			±10		V
DYNAMIC RESPONSE							
Small Signal – 3 dB							
G = 1		1			1		MHz
G = 10		400			400		kHz
G = 100		150			150		kHz
G = 1000		25			25		kHz
Slew Rate		5.0			5.0		V/μs
Settling Time to 0.01%, 20 V Step							
G = 1 to 100		15			15		μs
G = 1000		75			75		μs
NOISE							
Voltage Noise, 1 kHz							
RTI		7			7		nV/√Hz
RTO		90			90		nV√Hz
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz							
G = 1		15			15		μV p-p
G = 10		2			2		μV p-p
G = 100, 1000		0.3			0.3		μV p-p
Current Noise							
0.1 Hz to 10 Hz		60			60		pA p-p
SENSE INPUT							
R _{IN}		20			20		kΩ ± 20%
I _{IN}		15			15		μA
Voltage Range	±10			±10			V
Gain to Output		1			1		%
REFERENCE INPUT							
R _{IN}		40			40		kΩ ± 20%
I _{IN}		15			15		μA
Voltage Range	±10			±10			V
Gain to Output		1			1		%

Parameter	AD524A			AD524B			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
TEMPERATURE RANGE							
Specified Performance	-25		+85	-25		+85	°C
Storage	-65		+150	-65		+150	°C
POWER SUPPLY							
Power Supply Range	±6	±15	±18	±6	±15	±18	V
Quiescent Current		3.5	5.0		3.5	5.0	mA

¹ Does not include effects of external resistor, R_G .

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

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

V_D = actual differential input voltage.

Example: $G = 10$, $V_D = 0.50$.

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

At $V_S = \pm 15 V$, $R_L = 2 k\Omega$ and $T_A = +25^\circ C$, unless otherwise noted.

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

Table 2.

Parameter	AD524C			AD524S			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN							
Gain Equation (External Resistor Gain Programming)	$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			$\left[\frac{40,000}{R_G} + 1 \right] \pm 20\%$			
Gain Range (Pin Programmable)	1 to 1000			1 to 1000			
Gain Error ¹							
G = 1			±0.02			±0.05	%
G = 10			±0.1			±0.25	%
G = 100			±0.25			±0.5	%
G = 1000			±0.5			±2.0	%
Nonlinearity							
G = 1			±0.003			±0.01	%
G = 10, G = 100			±0.003			±0.01	%
G = 1000			±0.01			±0.01	%
Gain vs. Temperature							
G = 1			5			5	ppm/°C
G = 10			10			10	ppm/°C
G = 100			25			25	ppm/°C
G = 1000			50			50	ppm/°C
VOLTAGE OFFSET (May be Nulled)							
Input Offset Voltage			50			100	μV
vs. Temperature			0.5			2.0	μV/°C
Output Offset Voltage			2.0			3.0	mV
vs. Temperature			25			50	μV
Offset Referred to the Input vs. Supply							
G = 1	80			75			dB
G = 10	100			95			dB
G = 100	110			105			dB
G = 1000	115			110			dB

Parameter	AD524C			AD524S			Unit
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
INPUT CURRENT							
Input Bias Current vs. Temperature			±15			±50	nA
Input Offset Current vs. Temperature		±100			±100		pA/°C
			±10			±35	nA
		±100			±100		pA/°C
INPUT							
Input Impedance							
Differential Resistance		10 ⁹			10 ⁹		Ω
Differential Capacitance		10			10		pF
Common-Mode Resistance		10 ⁹			10 ⁹		Ω
Common-Mode Capacitance		10			10		pF
Input Voltage Range							
Maximum Differential Input Linear (V _{DL}) ²		±10			±10		V
Maximum Common-Mode Linear (V _{CM}) ²		$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$			$12\text{ V} - \left(\frac{G}{2} \times V_D\right)$		V
Common-Mode Rejection DC to 60 Hz with 1 kΩ Source Imbalance							V
G = 1		80			70		dB
G = 10		100			90		dB
G = 100		110			100		dB
G = 1000		120			110		dB
OUTPUT RATING							
V _{OUT} , R _L = 2 kΩ		±10			±10		V
DYNAMIC RESPONSE							
Small Signal – 3 dB							
G = 1		1			1		MHz
G = 10		400			400		kHz
G = 100		150			150		kHz
G = 1000		25			25		kHz
Slew Rate		5.0			5.0		V/μs
Settling Time to 0.01%, 20 V Step							
G = 1 to 100		15			15		μs
G = 1000		75			75		μs
NOISE							
Voltage Noise, 1 kHz							
RTI		7			7		nV/√Hz
RTO		90			90		nV√Hz
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz							
G = 1		15			15		μV p-p
G = 10		2			2		μV p-p
G = 100, 1000		0.3			0.3		μV p-p
Current Noise							
0.1 Hz to 10 Hz		60			60		pA p-p
SENSE INPUT							
R _{IN}		20			20		kΩ ± 20%
I _{IN}		15			15		μA
Voltage Range	±10			±10			V
Gain to Output		1			1		%

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

¹ Does not include effects of external resistor R_G .

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

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

V_D = actual differential input voltage.

Example: $G = 10$, $V_D = 0.50$.

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



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 3.

Parameter	Rating
Supply Voltage	±18 V
Internal Power Dissipation	450 mW
Input Voltage ¹ (Either Input Simultaneously) $ V_{IN} + V_S $	<36 V
Output Short-Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range (R)	-65°C to +125°C
(D, E)	-65°C to +150°C
Operating Temperature Range AD524A/AD524B/AD524C	-25°C to +85°C
AD524S	-55°C to +125°C
Lead Temperature (Soldering, 60 sec)	+300°C

¹ Maximum input voltage specification refers to maximum voltage to which either input terminal may be raised with or without device power applied. For example, with ±18 volt supplies maximum, V_{IN} is ±18 V; with zero supply voltage maximum, V_{IN} is ±36 V.

Stresses at or above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the product. This is a stress rating only; functional operation of the product at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Operation beyond the maximum operating conditions for extended periods may affect product reliability.

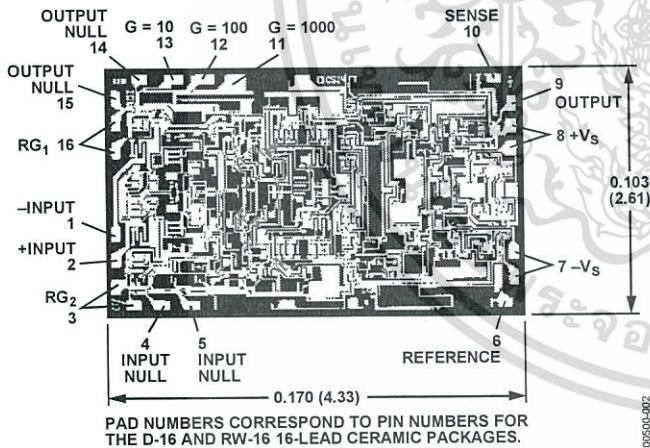


Figure 2. Metallization Photograph Contact factory for latest dimensions; Dimensions shown in inches and (mm)

CONNECTION DIAGRAMS

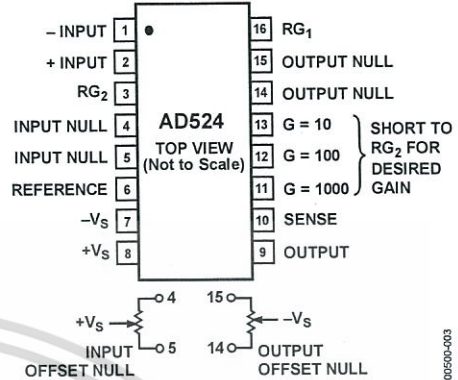


Figure 3. Ceramic (D) and SOIC (RW-16 and D-16) Packages

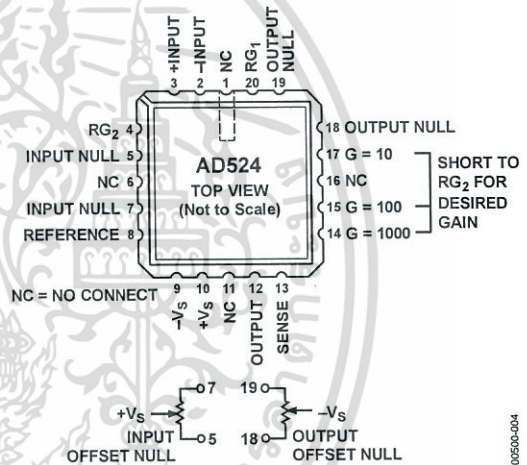


Figure 4. Leadless Chip Carrier (E)

ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device. Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

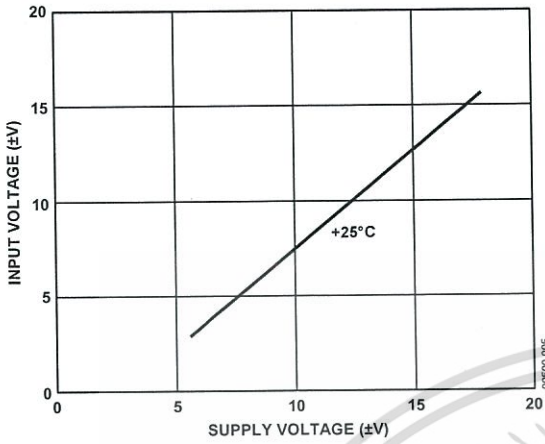


Figure 5. Input Voltage Range vs. Supply Voltage, G = 1

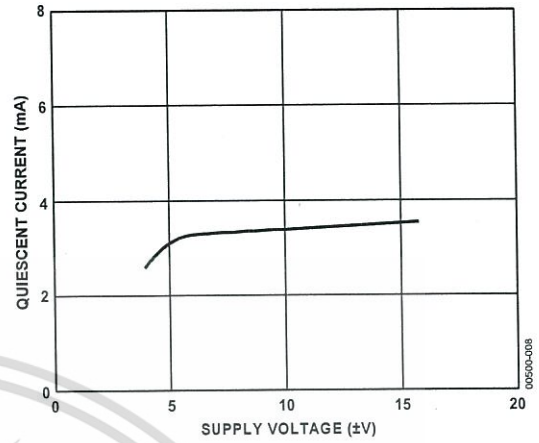


Figure 8. Quiescent Current vs. Supply Voltage

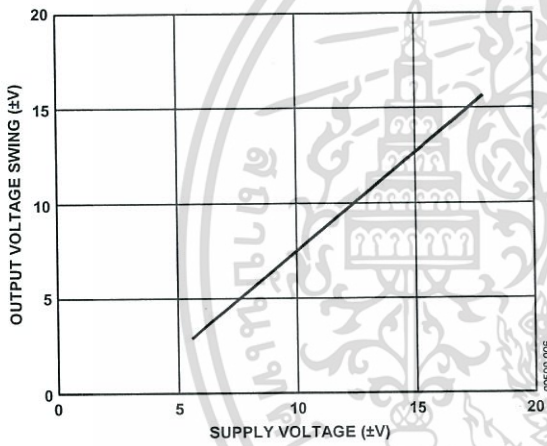


Figure 6. Output Voltage Swing vs. Supply Voltage

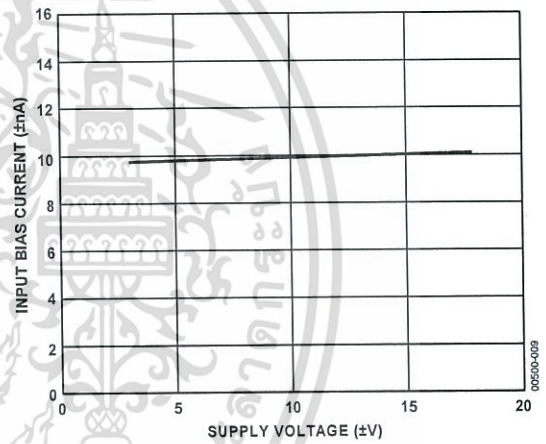


Figure 9. Input Bias Current vs. Supply Voltage

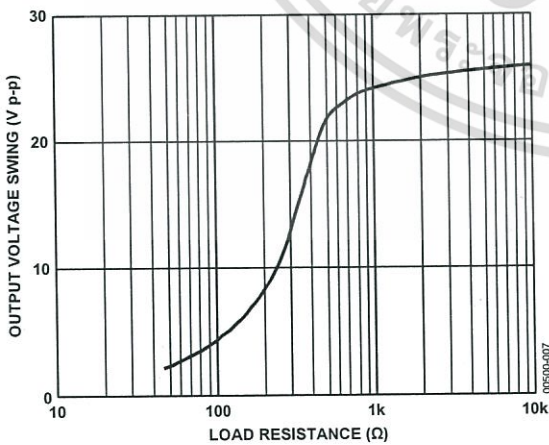


Figure 7. Output Voltage Swing vs. Load Resistance

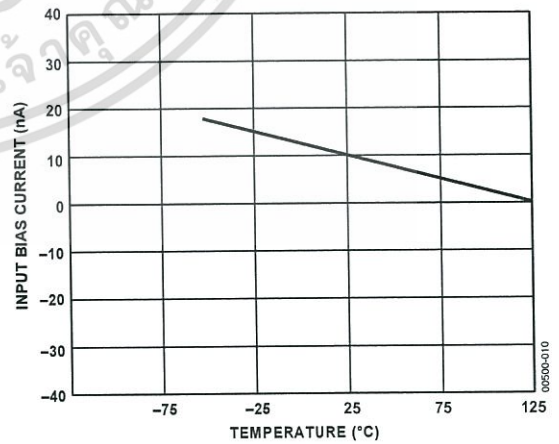


Figure 10. Input Bias Current vs. Temperature

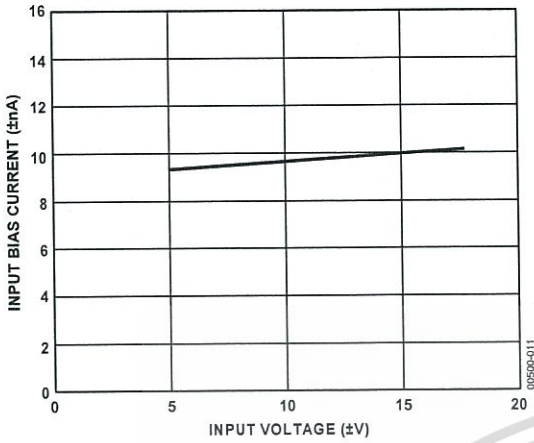


Figure 11. Input Bias Current vs. Input Voltage

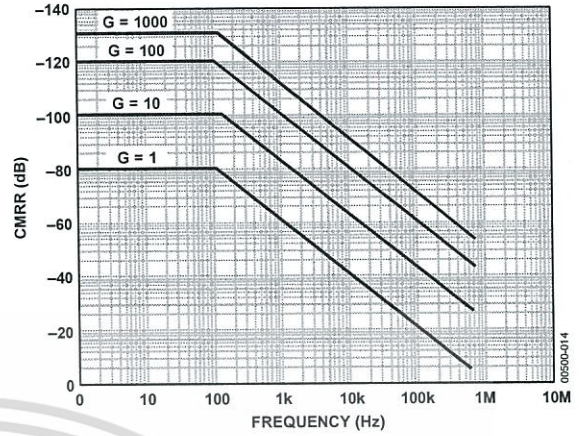


Figure 14. CMRR vs. Frequency, RTI, Zero to 1000 Source Imbalance

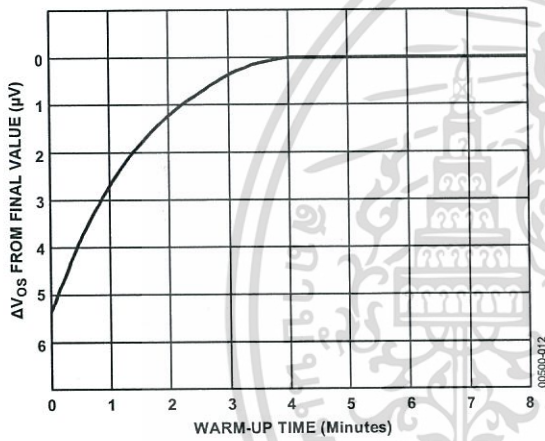


Figure 12. Offset Voltage, RTI, Turn-On Drift

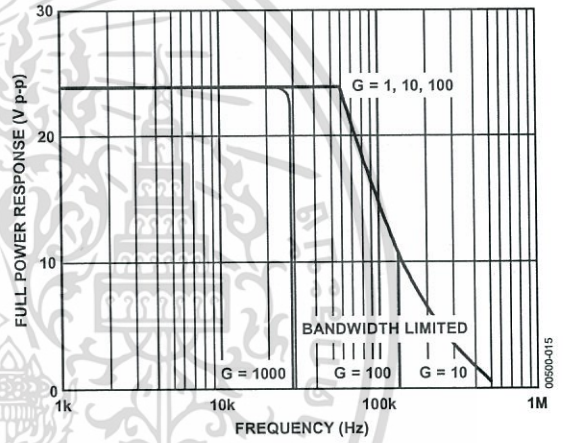


Figure 15. Large Signal Frequency Response

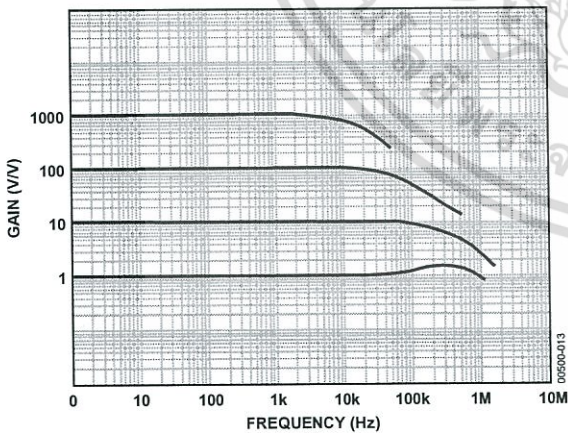


Figure 13. Gain vs. Frequency

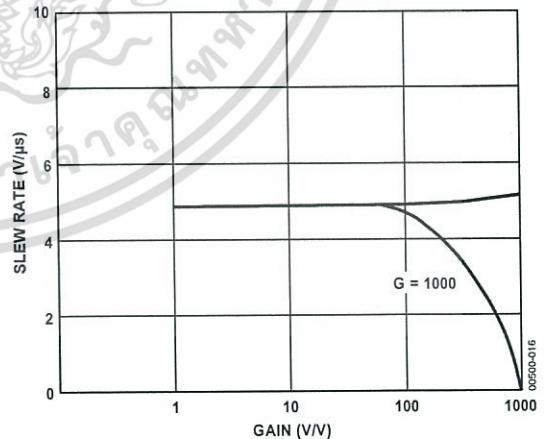


Figure 16. Slew Rate vs. Gain

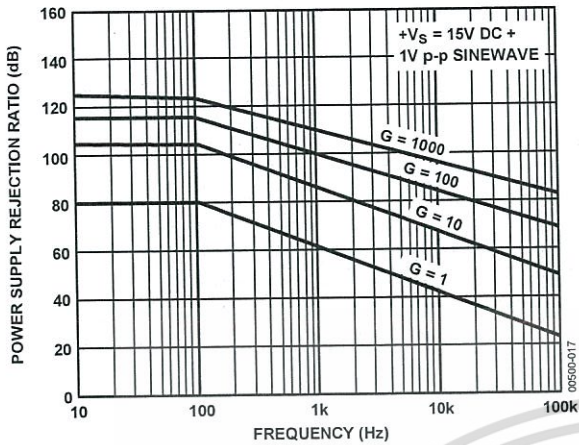


Figure 17. Positive PSRR vs. Frequency

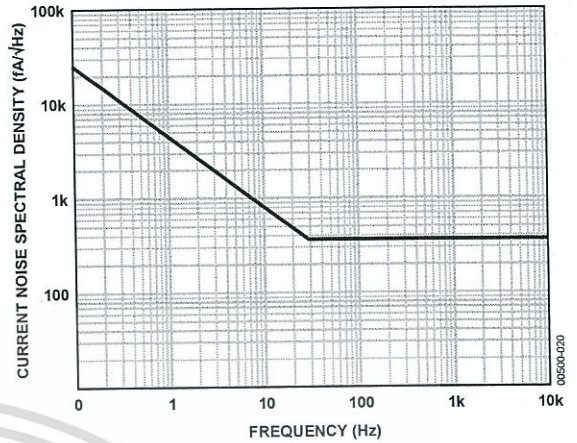


Figure 20. Input Current Noise vs. Frequency

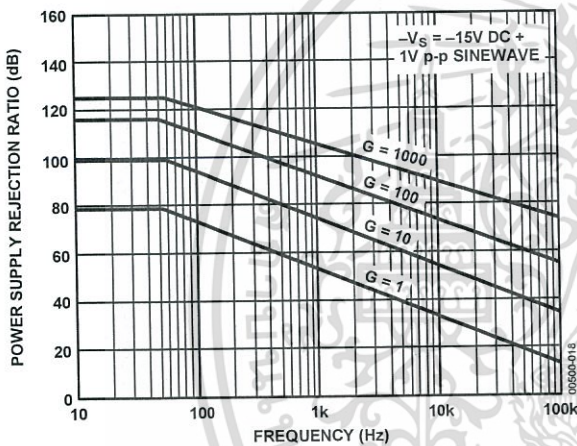


Figure 18. Negative PSRR vs. Frequency

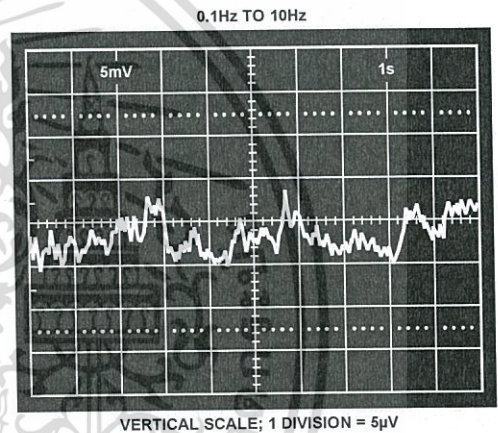


Figure 21. Low Frequency Noise, G = 1 (System Gain = 1000)

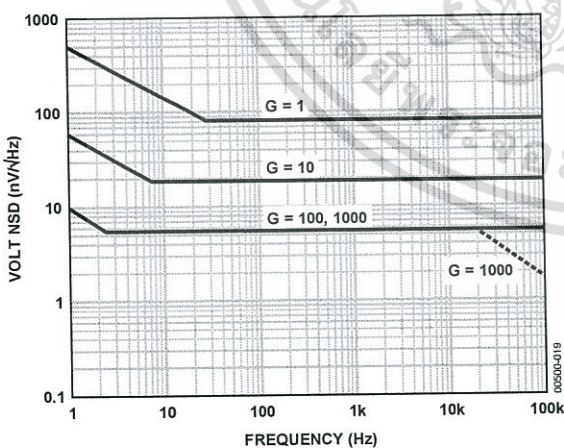


Figure 19. RTI Noise Spectral Density vs. Gain

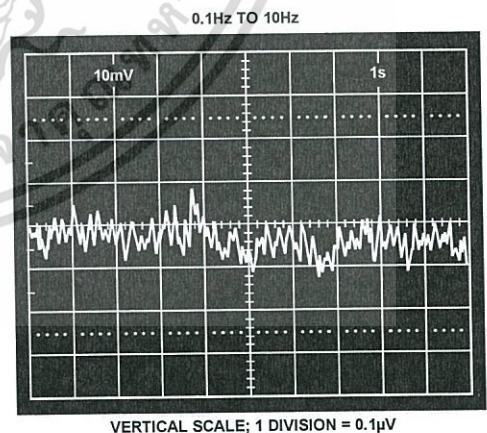


Figure 22. Low Frequency Noise, G = 1000 (System Gain = 100,000)

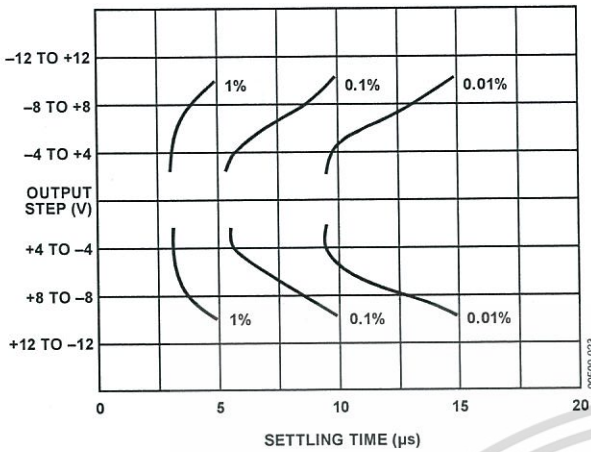


Figure 23. Settling Time, Gain = 1

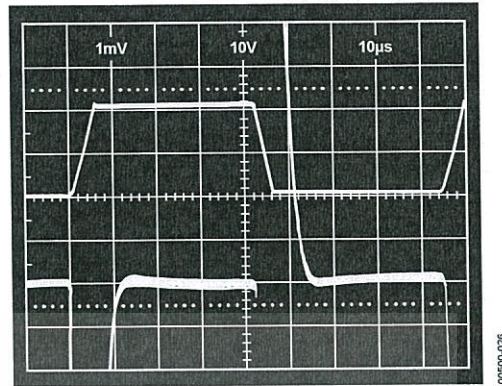


Figure 26. Large Signal Pulse Response and Settling Time, Gain = 10

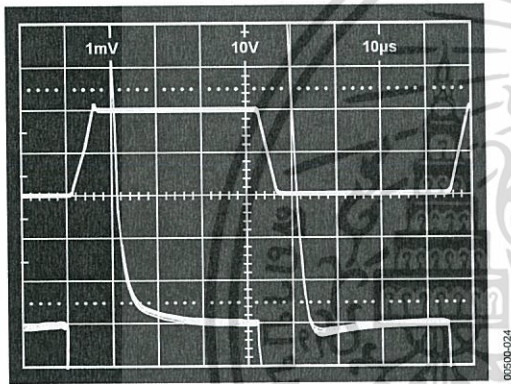


Figure 24. Large Signal Pulse Response and Settling Time, Gain = 1

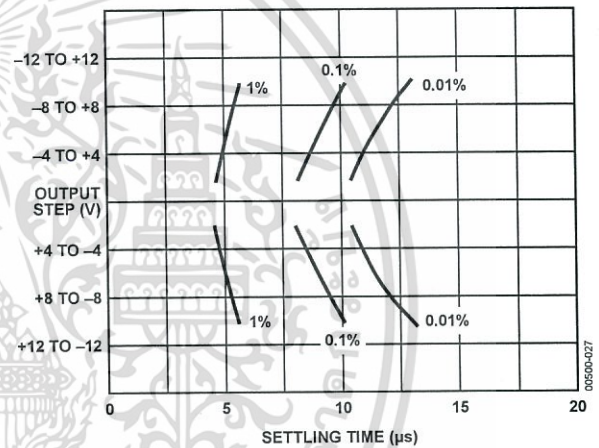


Figure 27. Settling Time, Gain = 100

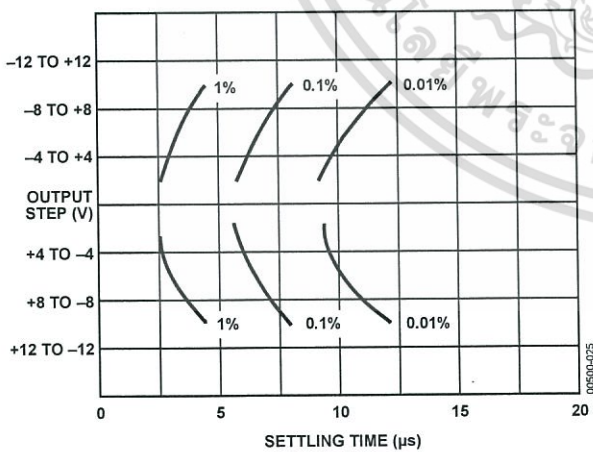


Figure 25. Settling Time, Gain = 10

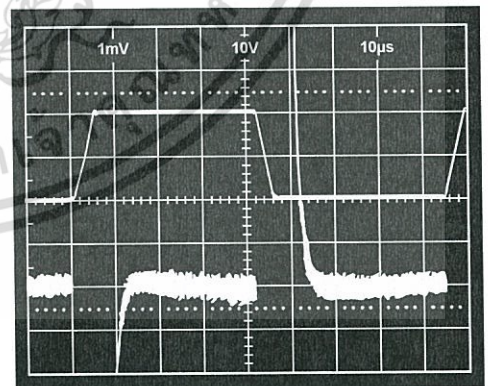


Figure 28. Large Signal Pulse Response and Settling Time, Gain = 100

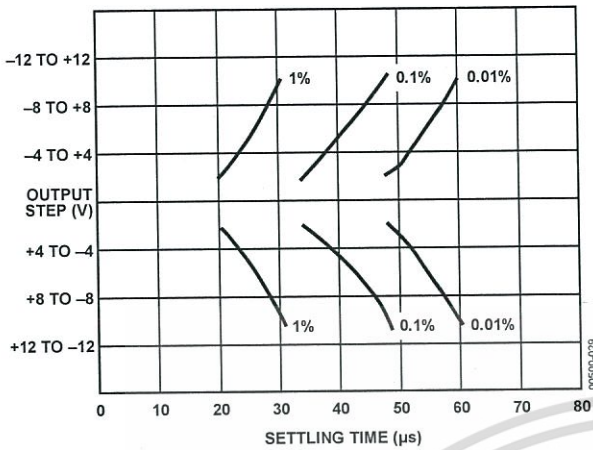


Figure 29. Settling Time, Gain = 1000

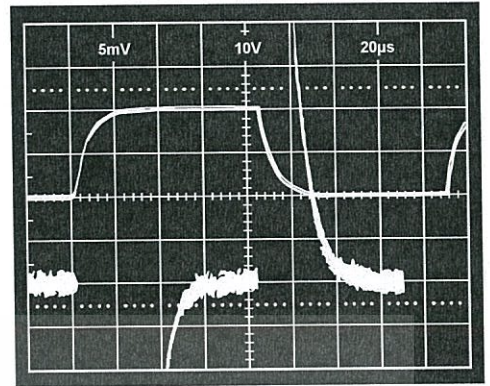


Figure 30. Large Signal Pulse Response and Settling Time, Gain = 1000



THEORY OF OPERATION

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

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

INPUT PROTECTION

As interface amplifiers for data acquisition systems, instrumentation amplifiers are often subjected to input overloads, that is, voltage levels in excess of the full scale for the selected gain range. At low gains (10 or less), the gain resistor acts as a current limiting element in series with the inputs. At high gains, the lower value of R_G does not adequately protect the inputs

from excessive currents. Standard practice is to place series limiting resistors in each input, but to limit input current to below 5 mA with a full differential overload (36 V) requires over 7k Ω of resistance, which adds 10 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ of noise. To provide both input protection and low noise, a special series protection FET is used.

A unique FET design was used to provide a bidirectional current limit, thereby protecting against both positive and negative overloads. Under nonoverload conditions, three channels (CH₂, CH₃, CH₄) act as a resistance ($\approx 1 \text{ k}\Omega$) in series with the input as before. During an overload in the positive direction, a fourth channel, CH₁, acts as a small resistance ($\approx 3 \text{ k}\Omega$) in series with the gate, which draws only the leakage current, and the FET limits I_{DSS} . When the FET enhances under a negative overload, the gate current must go through the small FET formed by CH₁ and when this FET goes into saturation, the gate current is limited and the main FET goes into controlled enhancement. The bidirectional limiting holds the maximum input current to 3 mA over the 36 V range.

INPUT OFFSET AND OUTPUT OFFSET

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

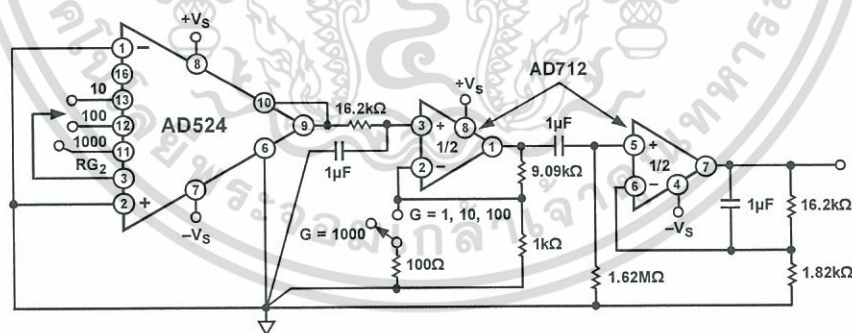


Figure 33. Noise Test Circuit

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

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

$$\text{Total error RTI} = \text{input error} + (\text{output error}/\text{gain})$$

$$\text{Total error RTO} = (\text{gain} \times \text{input error}) + \text{output error}$$

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

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

GAIN

The AD524 has internal high accuracy pretrimmed resistors for pin programmable gains of 1, 10, 100, and 1000. One of the preset gains can be selected by pin strapping the appropriate gain terminal and R_{G2} together (for $G = 1$, R_{G2} is not connected).

The AD524 can be configured for gains other than those that are internally preset; there are two methods to do this. The first method uses just an external resistor connected between Pin 3 and Pin 16 (see Figure 35), which programs the gain according to the following formula:

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

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

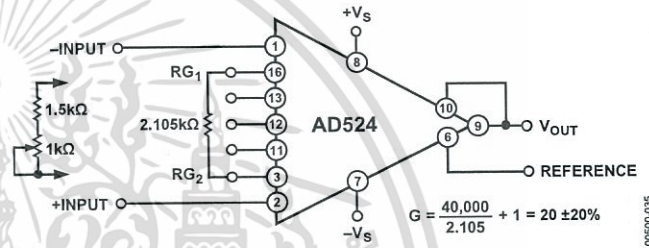


Figure 35. Operating Connections for $G = 20$

The second method uses the internal resistors in parallel with an external resistor (see Figure 36). This technique minimizes the gain adjustment range and reduces the effects of temperature coefficient sensitivity.

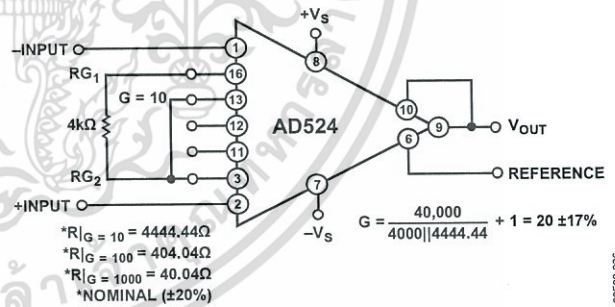


Figure 36. Operating Connections for $G = 20$, Low Gain Temperature Coefficient Technique

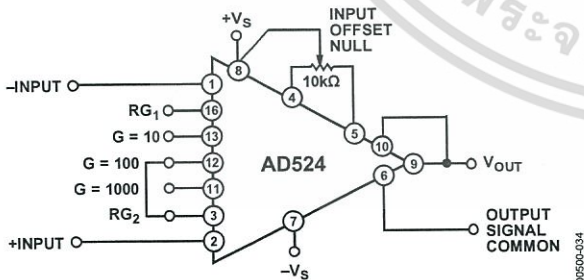


Figure 34. Operating Connections for $G = 100$

00500-035

00500-036

The AD524 can also be configured to provide gain in the output stage. Figure 37 shows an H pad attenuator connected to the reference and sense lines of the AD524. R1, R2, and R3 should be made as low as possible to minimize the gain variation and reduction of CMRR. Varying R2 precisely sets the gain without affecting CMRR. CMRR is determined by the match of R1 and R3.

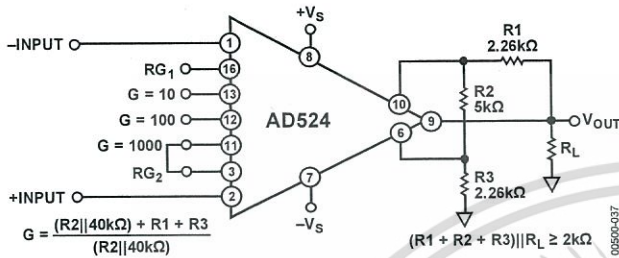


Figure 37. Gain of 2000

Table 4. Output Gain Resistor Values

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

INPUT BIAS CURRENTS

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

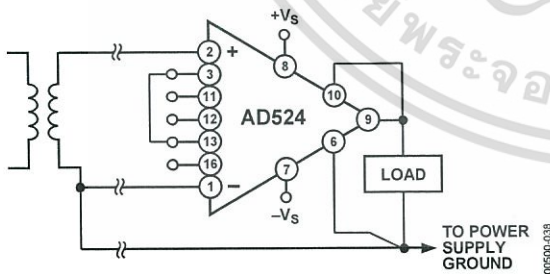


Figure 38. Indirect Ground Returns for Bias Currents—Transformer Coupled

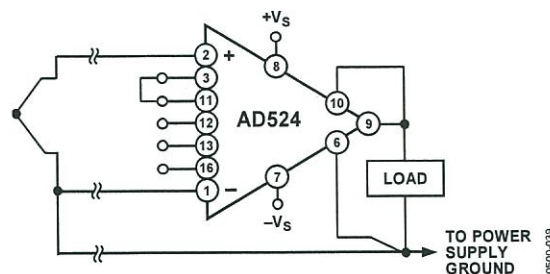


Figure 39. Indirect Ground Returns for Bias Currents—Thermocouple

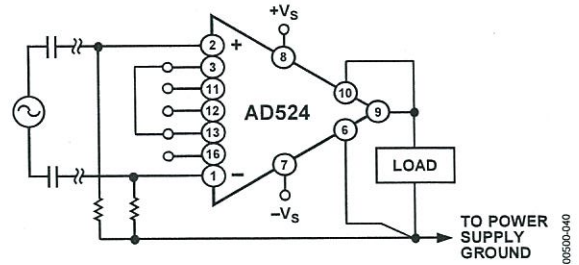


Figure 40. Indirect Ground Returns for Bias Currents—AC-Coupled

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

COMMON-MODE REJECTION

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

In an instrumentation amplifier, ac common-mode rejection is only as good as the differential phase shift. Degradation of ac common-mode rejection is caused by unequal drops across differing track resistances and a differential phase shift due to varied stray capacitances or cable capacitances. In many applications, shielded cables are used to minimize noise. This technique can create common-mode rejection errors unless the shield is properly driven. Figure 41 and Figure 42 show active data guards that are configured to improve ac common-mode rejection by bootstrapping the capacitances of the input cabling, thus minimizing differential phase shift.

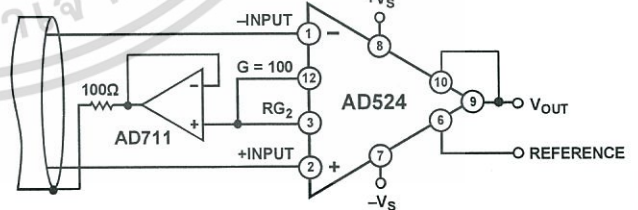


Figure 41. Shield Driver, G ≥ 100

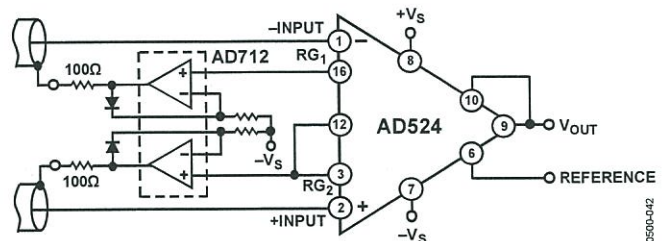


Figure 42. Differential Shield Driver

GROUNDING

Many data acquisition components have two or more ground pins that are not connected together within the device. These grounds must be tied together at one point, usually at the system power-supply ground. Ideally, a single solid ground would be desirable. However, because current flows through the ground wires and etch stripes of the circuit cards, and because these paths have resistance and inductance, hundreds of millivolts can be generated between the system ground point and the data acquisition components. Separate ground returns should be provided to minimize the current flow in the path from the sensitive points to the system ground point. In this way, supply currents and logic-gate return currents are not summed into the same return path as analog signals where they would cause measurement errors.

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

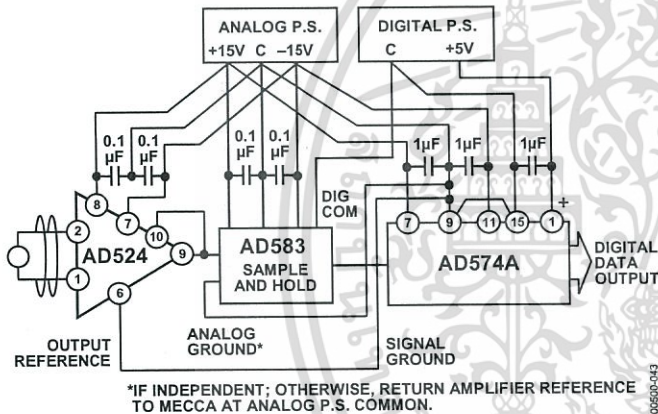


Figure 43. Basic Grounding Practice

SENSE TERMINAL

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

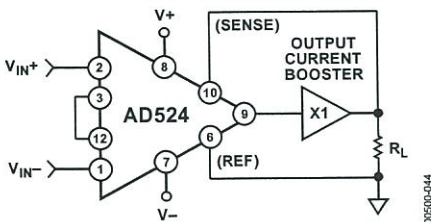


Figure 44. AD524 Instrumentation Amplifier with Output Current Booster

Typically, IC instrumentation amplifiers are rated for a full ± 10 volt output swing into 2 k Ω . In some applications, however, the need exists to drive more current into heavier loads. Figure 44 shows how a high current booster may be connected inside the loop of an instrumentation amplifier to provide the required current boost without significantly degrading overall performance. Nonlinearities and offset and gain inaccuracies of the buffer are minimized by the loop gain of the AD524 output amplifier. Offset drift of the buffer is similarly reduced.

REFERENCE TERMINAL

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

When the AD524 is of the 3-amplifier configuration it is necessary that nearly zero impedance be presented to the reference terminal.

Any significant resistance from the reference terminal to ground increases the gain of the noninverting signal path, thereby upsetting the common-mode rejection of the AD524.

In the AD524, a reference source resistance unbalances the CMR trim by the ratio of 20 k Ω /R_{REF}. For example, if the reference source impedance is 1 Ω , CMR is reduced to 86 dB (20 k Ω /1 Ω = 86 dB). An operational amplifier can be used to provide that low impedance reference point, as shown in Figure 45. The input offset voltage characteristics of that amplifier adds directly to the output offset voltage performance of the instrumentation amplifier.

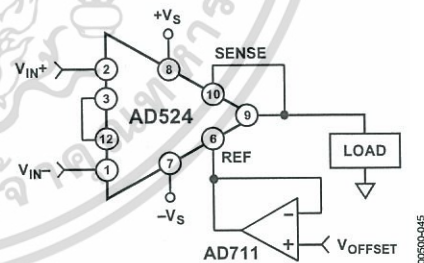
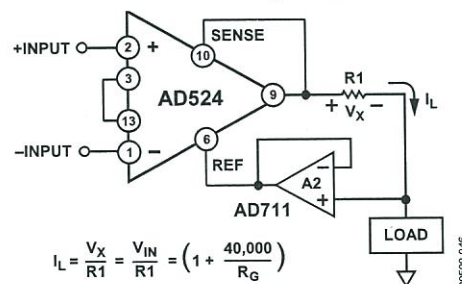


Figure 45. Use of Reference Terminal to Provide Output Offset

An instrumentation amplifier can be turned into a voltage-to-current converter by taking advantage of the sense and reference terminals, as shown in Figure 46.



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

Figure 46. Voltage-to-Current Converter

By establishing a reference at the low side of a current setting resistor, an output current may be defined as a function of input voltage, gain, and the value of that resistor. Because only a small current is demanded at the input of the buffer amplifier (A2)

the forced current, I_L , largely flows through the load. Offset and drift specifications of A2 must be added to the output offset and drift specifications of the AD524.

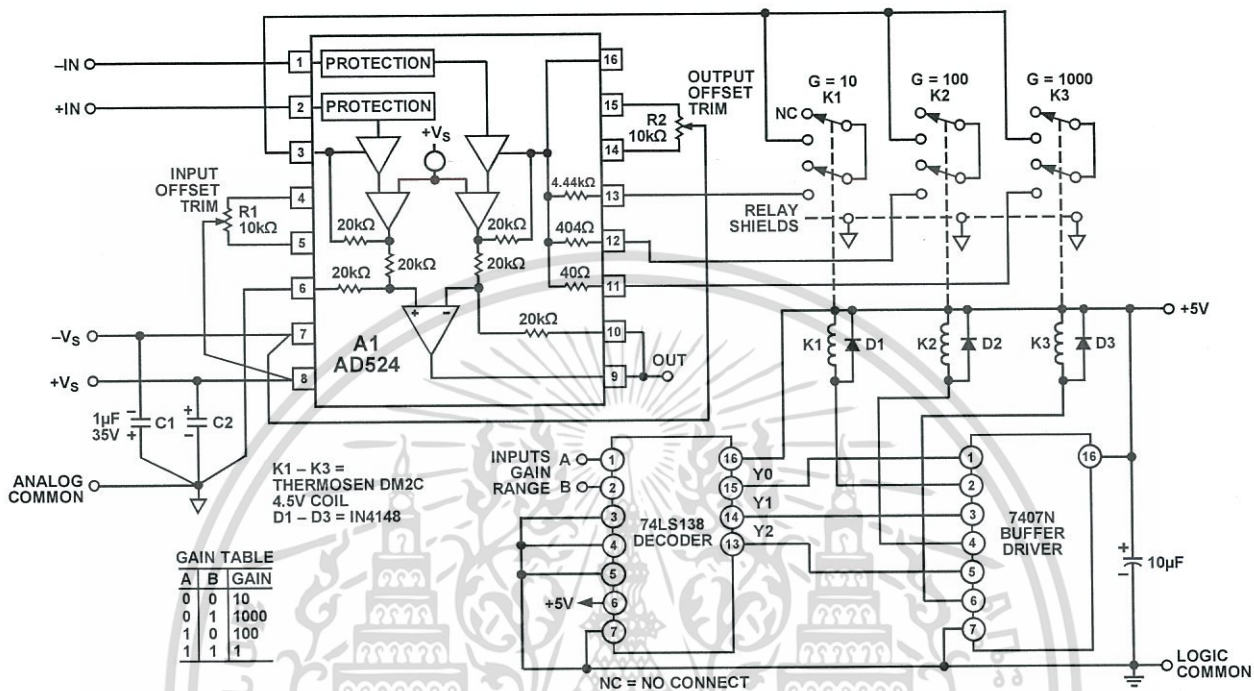


Figure 47. Three-Decade Gain Programmable Amplifier

PROGRAMMABLE GAIN

Figure 47 shows the AD524 being used as a software programmable gain amplifier. Gain switching can be accomplished with mechanical switches such as DIP switches or reed relays. It should be noted that the on resistance of the switch in series with the internal gain resistor becomes part of the gain equation and has an effect on gain accuracy.

The AD524 can also be connected for gain in the output stage. Figure 48 shows an AD711 used as an active attenuator in the output amplifier's feedback loop. The active attenuation presents very low impedance to the feedback resistors, therefore minimizing the common-mode rejection ratio degradation.

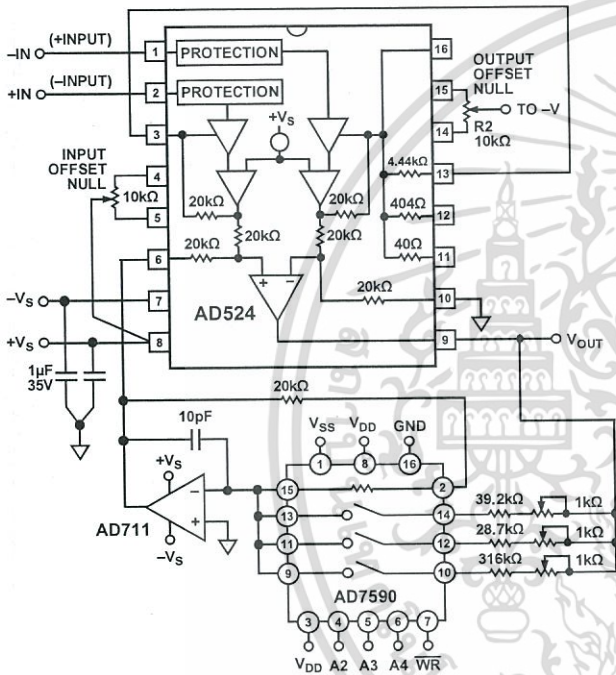


Figure 48. Programmable Output Gain

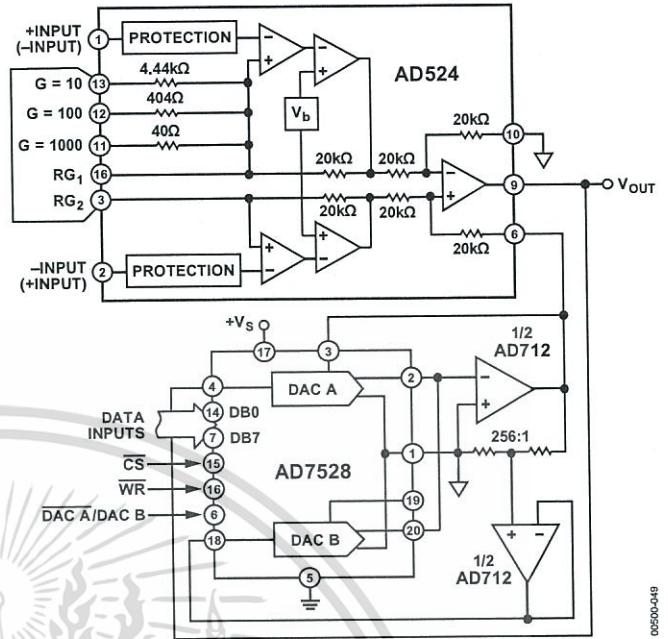


Figure 49. Programmable Output Gain Using a DAC

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

AUTO-ZERO CIRCUITS

In many applications, it is necessary to provide very accurate data in high gain configurations. At room temperature, the offset effects can be nulled by the use of offset trim potentiometers. Over the operating temperature range, however, offset nulling becomes a problem. The circuit of Figure 50 shows a CMOS DAC operating in bipolar mode and connected to the reference terminal to provide software controllable offset adjustments.

00500-049

00500-048

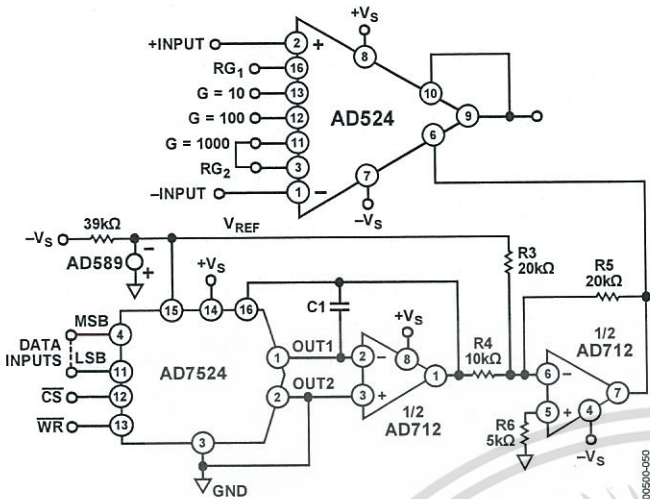


Figure 50. Software Controllable Offset

In many applications, complex software algorithms for auto-zero applications are not available. For those applications, Figure 51 provides a hardware solution.

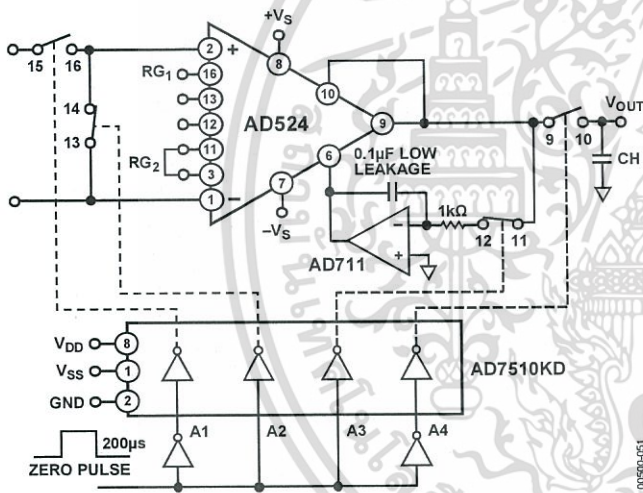


Figure 51. Auto-Zero Circuit

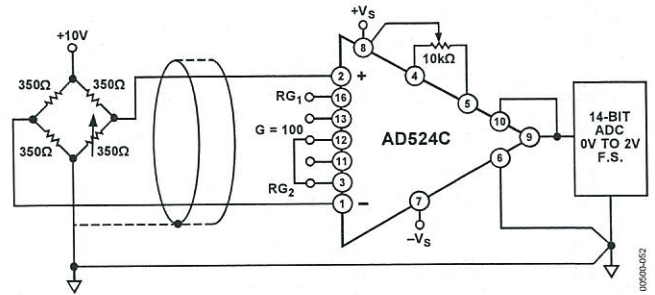


Figure 52. Typical Bridge Application

ERROR BUDGET ANALYSIS

To illustrate how instrumentation amplifier specifications are applied, review a typical case where an AD524 is required to amplify the output of an unbalanced transducer. Figure 52 shows a differential transducer, unbalanced by 100 Ω, supplying a 0 mV to 20 mV signal to an AD524C. The output of the I_A feeds a 14-bit ADC with a 0 V to 2 V input voltage range. The operating temperature range is -25°C to $+85^{\circ}\text{C}$. Therefore, the largest change in temperature, ΔT , within the operating range is from ambient to $+85^{\circ}\text{C}$ ($85^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C} = 60^{\circ}\text{C}$).

In many applications, differential linearity and resolution are of prime importance in cases where the absolute value of a variable is less important than changes in value. In these applications, only the irreducible errors (45 ppm = 0.004%) are significant. Furthermore, if a system has an intelligent processor monitoring the analog-to-digital output, the addition of an autogain/auto-zero cycle removes all reducible errors and may eliminate the requirement for initial calibration. This also reduces errors to 0.004%.

Table 5. Error Budget Analysis

Error Source	AD524C Specifications	Calculation	Effect on Absolute Accuracy at $T_A = 25^\circ\text{C}$	Effect on Absolute Accuracy at $T_A = 85^\circ\text{C}$	Effect on Resolution
Gain Error	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.25\% = 2500 \text{ ppm}$	2500 ppm	2500 ppm	–
Gain Instability	25 ppm	$(25 \text{ ppm}/^\circ\text{C})(60^\circ\text{C}) = 1500 \text{ ppm}$	–	1500 ppm	–
Gain Nonlinearity	$\pm 0.003\%$	$\pm 0.003\% = 30 \text{ ppm}$	–	–	30 ppm
Input Offset Voltage	$\pm 50 \mu\text{V}$, RTI	$\pm 50 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = \pm 2500 \text{ ppm}$	2500 ppm	2500 ppm	–
Input Offset Voltage Drift	$\pm 0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ –	$(\pm 0.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C})(60^\circ\text{C}) = 30 \mu\text{V}$ $30 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 1500 \text{ ppm}$	–	1500 ppm	–
Output Offset Voltage ¹	$\pm 2.0 \text{ mV}$	$\pm 2.0 \text{ mV}/20 \text{ mV} = 1000 \text{ ppm}$	1000 ppm	1000 ppm	–
Output Offset Voltage Drift ¹	$\pm 25 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$	$(\pm 25 \mu\text{V}/^\circ\text{C})(60^\circ\text{C}) = 1500 \mu\text{V}$ $1500 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 750 \text{ ppm}$	–	750 ppm	–
Bias Current-Source Imbalance Error	$\pm 15 \text{ nA}$	$(\pm 15 \text{ nA})(100 \Omega) = 1.5 \mu\text{V}$ $1.5 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 75 \text{ ppm}$	75 ppm	75 ppm	–
Bias Current-Source Imbalance Drift	$\pm 100 \text{ pA}/^\circ\text{C}$	$(\pm 100 \text{ pA}/^\circ\text{C})(100 \Omega)(60^\circ\text{C}) = 0.6 \mu\text{V}$ $0.6 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 30 \text{ ppm}$	–	30 ppm	–
Offset Current-Source Imbalance Error	$\pm 10 \text{ nA}$	$(\pm 10 \text{ nA})(100 \Omega) = 1 \mu\text{V}$ $1 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 50 \text{ ppm}$	50 ppm	50 ppm	–
Offset Current-Source Imbalance Drift	$\pm 100 \text{ pA}/^\circ\text{C}$	$(100 \text{ pA}/^\circ\text{C})(100 \Omega)(60^\circ\text{C}) = 0.6 \mu\text{V}$ $0.6 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 30 \text{ ppm}$	–	30 ppm	–
Offset Current-Source Resistance-Error	$\pm 10 \text{ nA}$	$(10 \text{ nA})(175 \Omega) = 3.5 \mu\text{V}$ $3.5 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 87.5 \text{ ppm}$	87.5 ppm	87.5 ppm	–
Offset Current-Source Resistance-Drift	$\pm 100 \text{ pA}/^\circ\text{C}$	$(100 \text{ pA}/^\circ\text{C})(175 \Omega)(60^\circ\text{C}) = 1 \mu\text{V}$ $1 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 50 \text{ ppm}$	–	50 ppm	–
Common Mode Rejection 5 V DC	115 dB	$115 \text{ dB} = 1.8 \text{ ppm} \times 5 \text{ V} = 8.8 \mu\text{V}$ $8.8 \mu\text{V}/20 \text{ mV} = 444 \text{ ppm}$	444 ppm	444 ppm	–
Noise, RTI (0.1 Hz to 10 Hz)	$0.3 \mu\text{V p-p}$	$0.3 \mu\text{V p-p}/20 \text{ mV} = 15 \text{ ppm}$	–	–	15 ppm
		Total Error	6656.5 ppm	10516.5 ppm	45 ppm

¹ Output offset voltage and output offset voltage drift are given as RTI figures.

Figure 53 shows a simple application in which the variation of the cold junction voltage of a Type J thermocouple-iron ± constantan is compensated for by a voltage developed in series by the temperature sensitive output current of an AD590 semiconductor temperature sensor.

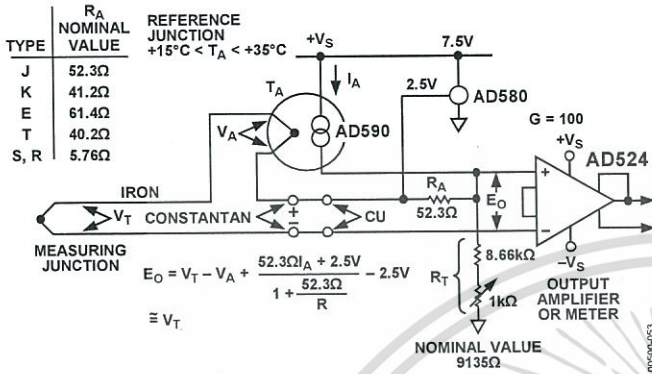


Figure 53. Cold Junction Compensation

The circuit is calibrated by adjusting R_T for proper output voltage with the measuring junction at a known reference temperature and the circuit near 25°C. If resistors with low temperature coefficients are used, compensation accuracy is to within ±0.5°C, for temperatures between +15°C and +35°C. Other thermocouple types may be accommodated with the standard resistance values shown in Table 5. For other ranges

of ambient temperature, the equation in Figure 53 may be solved for the optimum values of R_T and R_A.

The microprocessor controlled data acquisition system shown in Figure 54 includes both auto-zero and autogain capability. By dedicating two of the differential inputs, one to ground and one to the A/D reference, the proper program calibration cycles can eliminate both initial accuracy errors and accuracy errors over temperature. The auto-zero cycle, in this application, converts a number that appears to be ground and then writes that same number (8-bit) to the AD7524, which eliminates the zero error. Because its output has an inverted scale, the autogain cycle converts the A/D reference and compares it with full-scale. A multiplicative correction factor is then computed and applied to subsequent readings.

REFERENCES

- The following reference materials provide additional information that supplements material found in the data sheet.
- A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers, 3RD Edition, 2006.* Analog Devices.
- Application Note, AN-306, *Synchronous System Measures μΩs,* Analog Devices.

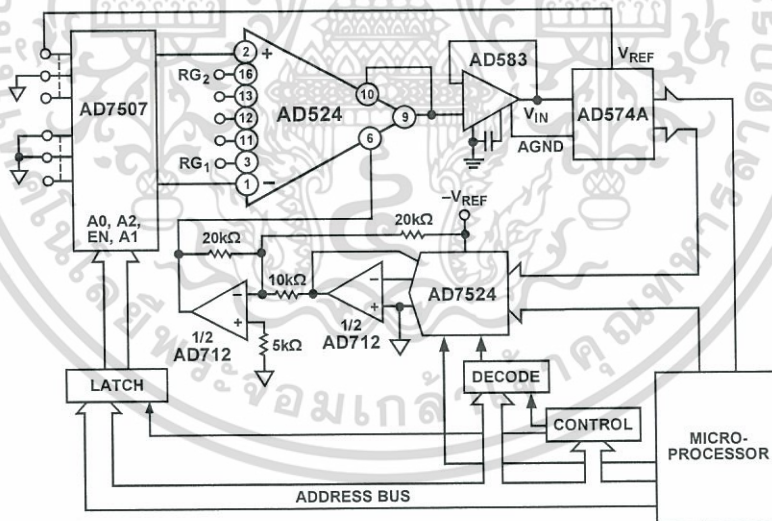
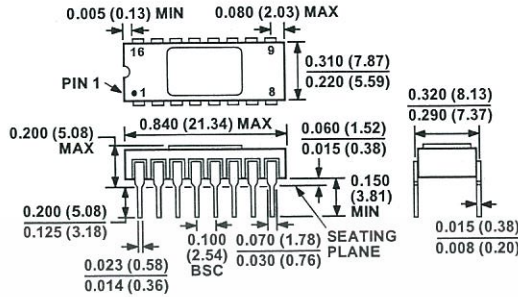


Figure 54. Microprocessor Controlled Data Acquisition System

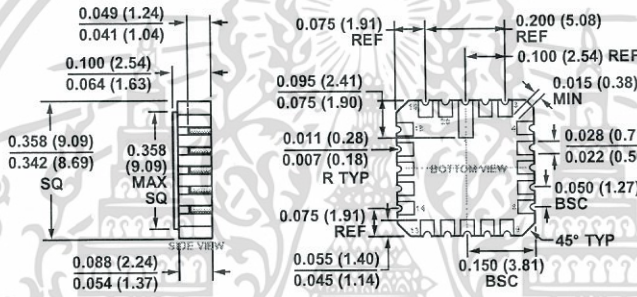
OUTLINE DIMENSIONS



CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCHES; MILLIMETER DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF INCH EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.

Figure 55. 16-Lead Side-Brazed Ceramic Dual In-Line [SBDIP] (D-16)

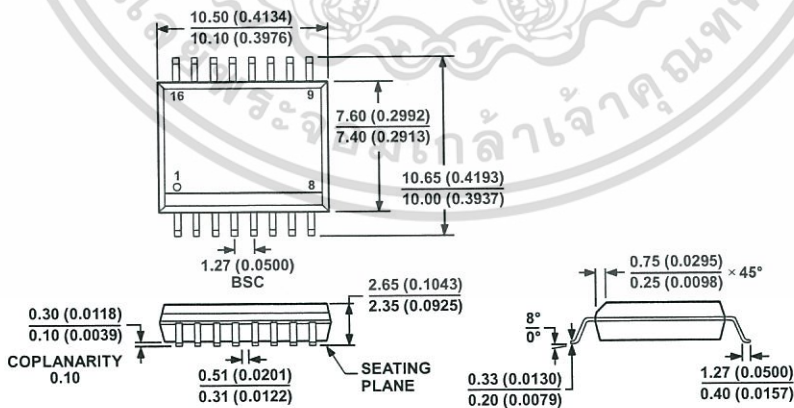
Dimensions shown in inches and (millimeters)



CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCHES; MILLIMETER DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF INCH EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.

Figure 56. 20-Terminal Ceramic Leadless Chip Carrier [LCC] (E-20)

Dimensions shown in inches and (millimeters)



COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MS-013-AA
CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS; INCH DIMENSIONS (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF MILLIMETER EQUIVALENTS FOR REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.

Figure 57. 16-Lead Standard Small Outline Package [SOIC_W] Wide Body (RW-16)

Dimensions shown in millimeters and (inches)

032707-B

ORDERING GUIDE

Model ^{1, 2}	Temperature Range	Package Description	Package Option
AD524AD	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524ADZ	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524AR-16	-40°C to +85°C	16-Lead SOIC_W	RW-16
AD524ARZ-16	-40°C to +85°C	16-Lead SOIC_W	RW-16
AD524ARZ-16-REEL7	-40°C to +85°C	16-Lead SOIC_W, 7" Tape and Reel	RW-16
AD524BD	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524BDZ	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524BE	-40°C to +85°C	20-Terminal LCC	E-20
AD524CD	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524CDZ	-40°C to +85°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524SD	-55°C to +125°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524SD/883B	-55°C to +125°C	16-Lead SBDIP	D-16
5962-8853901EA	-55°C to +125°C	16-Lead SBDIP	D-16
AD524SE/883B	-55°C to +125°C	20-Terminal LCC	E-20
AD524SCHIPS	-55°C to +125°C	Die	

¹ Z = RoHS Compliant Part.

² Refer to the official DESC drawing for tested specifications of the 5962-8853901EA model.

