

เครื่องบันทึกข้อมูลการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ  
CALIBRATION DATA AUTOMATIC RECORDER



สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เครื่องบันทึกข้อมูลการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ  
CALIBRATION DATA AUTOMATIC RECORDER



เลขหมู่.....  
ลงทะเบียน..... 149464  
วันเดือนปี..... ๕ 8 อ.ค. 2561

b. 12984674  
i. ....

สหกิจศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
"ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์"  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ปีการศึกษา 2559 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# CALIBRATION DATA AUTOMATIC RECORDER






A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ เครื่องบันทึกข้อมูลการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ  
 Calibration Data Automatic Recorder  
 ชื่อนักศึกษา นายนราวิชญ์ แพทย์รักษ์ รหัสนักศึกษา 56051156  
 ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
 ภาควิชา ฟิสิกส์  
 คณะ วิทยาศาสตร์  
 มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)  
 ปีการศึกษา 2559  
 อาจารย์ที่ปรึกษา ดร. วิฑูรย์ ยินดีสุข

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้  
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
 ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม กรรมการ	
ดร.พิชชานันท์ อิศเรษฐิโสภณ กรรมการ	
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	เครื่องบันทึกข้อมูลการสอบเทียบแบบอัตโนมัติ
ชื่อนักศึกษา	นายณราวิชญ์ แพทยารักษ์ รหัสนักศึกษา 56051156
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข

### บทคัดย่อ

สหกิจศึกษานี้มีความตั้งใจทำขึ้นเพื่อให้นักศึกษาได้เรียนรู้ถึงการทำงานจริง ของการทำงาน ในอนาคตเพื่อให้นักศึกษาได้มีประสบการณ์มากขึ้น โดยมีหัวข้อในการทำโครงการพิเศษกับบริษัทคือ การสร้างเครื่องมือที่สามารถช่วยในเรื่องของงานของบริษัท เราจึงได้สร้างเครื่องมือที่ใช้ในการบันทึก ค่าอุณหภูมิโดยอัตโนมัติ เพื่อลดความผิดพลาดของการบันทึกค่าซึ่งมีผลต่อการสอบเทียบเครื่องมือ เป็นอย่างมาก เราเล็งเห็นถึงความสำคัญในส่วนนี้ และทำการปรับปรุงขั้นตอนการสอบเทียบให้ใช้เวลา ลดลงและมีเวลาในการสอบเทียบที่แน่นอน ทำให้ผู้ทำการสอบเทียบสามารถวางแผนการทำงานได้ ในแต่ละครั้งการสอบเทียบ โดยการบันทึกค่าของข้อมูลนั้นมีการบันทึกค่าอัตโนมัติลงการ์ดความจำ ซึ่ง สะดวกและสามารถนำไปคำนวณต่อได้ง่าย และลดความผิดพลาดที่เกิดจากการบันทึกข้อมูลแบบจด บันทึก

**คำสำคัญ:** เครื่องบันทึกข้อมูลการสอบเทียบ

Title	Calibration Data Automatic Recorder
Students	Narawit Peattayarak Student ID 56051111
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Dr.Witoon Yindeesuk

### Abstract

This Co-operative Education is intended to make students learn the real work of future work to give students more experience. The topic of doing a special project with the company is to create tools that can help with the work of the company. So we created a tool to record the temperature automatically to reduce the error of recording, which greatly affects the instrument calibration. We recognize the importance of this part. Therefore, the calibration process has been improved to reduce time and increase accuracy, allowing calibrators to schedule their calibration intervals. The recording of data is automatically saved to a memory card, which is convenient and can be easily recalculated and reduce errors caused by log recording

**Keywords:** Calibration data automatic recorder

## กิตติกรรมประกาศ

สหกิจศึกษาเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับการช่วยเหลือและการสนับสนุนจากบุคคลผู้มีพระคุณหลายท่าน ซึ่งต้องกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข อาจารย์ประจำสาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษาสหกิจศึกษาฯ ที่ได้ให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิด และเสนอแนะแนวทางแก้ไขปัญหา ทำให้สหกิจศึกษาเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และเป็นที่น่าภูมิใจเป็นอย่างมาก

ขอขอบพระคุณ นายคมสรร์ ศิริติกุล ที่ได้ให้คำแนะนำทุกๆ เรื่อง ในส่วนที่นอกเหนือจากการทำงาน และสอนทักษะการปรับตัวให้เข้ากับงานที่ทำ

ขอขอบพระคุณ นางสาวยุวรินทร์ จิรรัตน์วิศาล หัวหน้าห้องปฏิบัติการ ที่ได้ให้คำแนะนำ และสอนทักษะความรู้การทำงาน สนับสนุนอุปกรณ์และสอนการใช้เครื่องมือต่างๆ ในการทำโครงการพิเศษนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณพี่ๆในแผนก และผู้บริหาร ในแผนกควบคุมคุณภาพ ที่คอยแนะนำแนวทางต่างๆ และช่วยปรับปรุงในหลายๆสิ่ง ช่วยสอนประสบการณ์ ของการใช้ชีวิตในการทำงาน

ขอขอบคุณพี่ๆที่บริษัท ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำ สนับสนุน และคอยให้ยืมอุปกรณ์ต่างๆ ทำให้สหกิจศึกษาสำเร็จลุล่วงมาได้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ สาขาฟิสิกส์ ทุกคนที่คอยให้คำปรึกษาช่วยเหลือในหลายๆส่วนของโครงการพิเศษนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลในครอบครัว ผู้คอยสนับสนุนเลี้ยงดูช่วยเหลือเป็นทุนทรัพย์และคอยเป็นแรงผลักดันให้ผู้จัดทำมีกำลังใจในการทำสหกิจศึกษาฯ ตลอดจนบุคคลต่างๆที่ให้ความช่วยเหลืออีกมาก ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและปรารถนาดีของท่านเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณและขอบคุณไว้ในโอกาสนี้

นราวิชญ์ แพทยารักษ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>3</b>
2.1 เทอร์โมคัปเปิล	3
2.2 AD595	6
2.3 การแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล	7
2.3.1 Flash ADCs	7
2.3.2 SAR ADCs	8
2.3.3 Delta-Sigma	9
2.4 การสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์	10
2.4.1 Serial Peripheral Interface Bus (SPI Bus)	10
2.4.2 Inter-IC Communication (I <sup>2</sup> C)	11
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์	13
2.5.1 Arduino	14
2.6 Kalman Filter Algorithm	18
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>19</b>
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	19
3.2 ออกแบบและเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับแผงวงจร	23
3.2.1 การออกแบบวงจร	23
3.2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับแผงวงจร	25
3.3 เขียนโปรแกรมควบคุม	26
3.4 ปรับแก้ค่า	27
3.5 ทำกล่องใส่เครื่องมือ	27
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	<b>28</b>
4.1 ผลการบันทึกข้อมูลจากเครื่องที่เราสร้างขึ้น	30

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2 การทดลองใช้งานจริงกับเครื่องจำลองอุณหภูมิและความชื้น ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และที่ความชื้น 85%	39
4.3 อภิปรายผล	42
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	43
5.1 สรุปผลการวิจัย	43
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
เอกสารอ้างอิง	44
ภาคผนวก	45



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแบบต่างๆ	4
2.2 ตัวอย่างย่านการใช้งาน และคุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน	5
4.1 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 0 °C	30
4.2 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 25 °C	30
4.3 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 30 °C	31
4.4 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 40 °C	31
4.5 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 45 °C	32
4.6 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 50 °C	32
4.7 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 55 °C	33
4.8 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 60 °C	33
4.9 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 65 °C	34
4.10 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 70 °C	34
4.11 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 75 °C	35
4.12 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 80 °C	35
4.13 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 85 °C	36
4.14 ค่าที่ได้จากการทำลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 90 °C	36
4.15 ค่าที่ได้จากการอ่านค่าจากเครื่องมือมาตรฐานที่เวลาเดียวกัน	37
4.16 ผลการเปรียบเทียบของจากเครื่องมือทั้งสอง	37
4.17 ค่าที่ได้จากการวัดความจำ	41

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลอันเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ของซีเบค	3
2.2 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานทั้ง 7 แบบ ที่อุณหภูมิต่างๆ	4
2.3 บล็อกไดอะแกรมของไอซี AD595	6
2.4 โครงสร้างภายในของ Flash ADC	7
2.5 โครงสร้างภายในของ SAR ADC	8
2.6 โครงสร้างภายในของ Delta-Sigma ADC	9
2.7 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์	13
2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino	14
2.9 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino	15
2.10 เลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ต้องการ upload	15
2.11 เลือกหมายเลข Com port ของบอร์ด	16
2.12 Upload โค้ดโปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino	16
2.13 ส่วนต่างๆของ Arduino	17
3.1 โปรแกรม OrCAD ที่ใช้ในการวาดวงจรและทำแบบวงจร	23
3.2 โปรแกรม OrCAD Capture CIS ในการวาดวงจร	24
3.3 โปรแกรม OrCAD Layout Plus ในการจัดอุปกรณ์และทำแบบแผงวงจร	24
3.4 รูปสายวงจรที่จะนำไปรีดบนทองแดง	25
3.5 แผงวงจรที่เชื่อมต่ออุปกรณ์เสร็จสิ้น	25
3.6 กล่องใส่เครื่องมือ	27
4.1 อุปกรณ์ที่ผ่านการประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว	28
4.2 ขั้นตอนการเปรียบเทียบค่ากับอุปกรณ์มาตรฐานที่อุณหภูมิต่างๆ	29
4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อุปกรณ์อ่านได้เทียบกับเครื่องมือมาตรฐานของสายเทอร์โมคัปเปิล A	38
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อุปกรณ์อ่านได้เทียบกับเครื่องมือมาตรฐานของสายเทอร์โมคัปเปิล B	38
4.5 ภาพเครื่องจำลองอุณหภูมิและความชื้น	39
4.6 ภาพการใช้งานจริงกับเครื่องจำลองอุณหภูมิและความชื้น	40
4.7 ภาพเครื่องมือมาตรฐานในการอ่านค่าอุณหภูมิ	40
4.8 แสดงปัจจัยจากการที่มีโลหะหลายชนิดที่ขาขั้วของอินพุต	42

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการสอบเทียบเครื่องมือวัดมีความสำคัญอย่างมากต่อมาตรฐานของบริษัท เนื่องจากเครื่องมือวัดนั้น เมื่อเวลาผ่านไปล้วนมีการคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่วัดได้ จึงต้องมีการสอบเทียบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัด ยังสามารถวัดค่าได้อย่างถูกต้อง โดยบริษัทไมโครชิพ เทคโนโลยี(ไทยแลนด์) ได้เห็นความสำคัญต่อการสอบเทียบเครื่องมือวัด และต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของการทำงานในส่วนนี้ให้มากขึ้น

โดยกระบวนการสอบเทียบในปัจจุบันนี้มีขั้นตอนต่างๆมากมาย และส่วนใหญ่การบันทึกข้อมูลที่ทำการสอบเทียบนั้น เป็นการบันทึกค่าโดยผู้ทำการสอบเทียบแบบการจดลงในกระดาษ ซึ่งการบันทึกแบบนี้มีโอกาสเกิดการบันทึกที่ผิดพลาดได้ การที่บันทึกค่าผิดพลาดไปในบางครั้ง ทำให้ข้อมูลที่ได้นั้นผิดพลาดไป เหตุนี้จึงมีผลต่อการสอบเทียบเป็นอย่างมาก

การบันทึกข้อมูลมีความสำคัญอย่างมาก เราจึงได้เห็นความสำคัญของการบันทึกข้อมูล และได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการเก็บข้อมูลให้ดีขึ้น จึงได้สร้างเครื่องมือนี้ขึ้นมาเพื่อให้การเก็บข้อมูลมีประสิทธิภาพมากขึ้น และยังสามารถลดระยะเวลาในการสอบเทียบในแต่ละครั้งได้มากขึ้นด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อปรับปรุงและพัฒนาขั้นตอนการสอบเทียบของเครื่องจำลองอุณหภูมิและความชื้น
- 2) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของการบันทึกข้อมูล
- 3) เพื่อลดระยะเวลาของการสอบเทียบ

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เพื่อสร้างเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติโดยเก็บข้อมูลใส่การ์ดหน่วยความจำ
- 2) สร้างและทดสอบการทำงานและประสิทธิภาพของการวัดค่าและบันทึกข้อมูล

#### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

- ขั้นตอนที่ 1 กำหนดวัตถุประสงค์และค้นคว้าหัวข้อโครงการพิเศษสหกิจศึกษา
- ขั้นตอนที่ 2 ค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อโครงการพิเศษสหกิจศึกษา
- ขั้นตอนที่ 3 ทดลองเพื่อหาความเป็นไปได้ในการสร้างและออกแบบชิ้นงาน
- ขั้นตอนที่ 4 สร้างและออกแบบชิ้นงานการทำแผ่นวงจรและประกอบชิ้นงาน
- ขั้นตอนที่ 5 เขียนโปรแกรมติดต่อสื่อสารระหว่างอาตุน์กับแผงวงจร
- ขั้นตอนที่ 6 ทดลองเปรียบเทียบค่ากับอุปกรณ์มาตรฐาน ปรับแก้ค่า
- ขั้นตอนที่ 7 ทดลองกับเครื่องมือจริง
- ขั้นตอนที่ 8 วิเคราะห์ผลการทดลอง อภิปรายผล และสรุปผลการทดลอง

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีทักษะความรู้ความเข้าใจในการสร้างอุปกรณ์ส่วนต่างๆของเครื่องมือ
- 2) มีทักษะความรู้ความเข้าใจในการเขียนโปรแกรมในด้านต่างๆ
- 3) มีทักษะในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างทำงาน
- 4) เครื่องบันทึกข้อมูลนี้สามารถนำมาใช้งานได้จริง ในส่วนของการสอบเทียบ

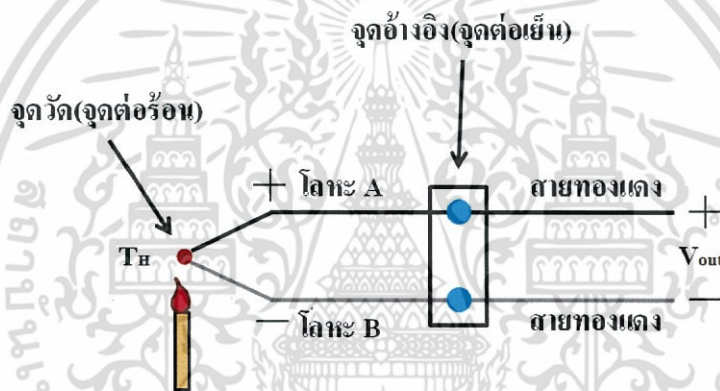


## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เทอร์โมคัปเปิล

เทอร์โมคัปเปิลคืออุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Electro Magnetic Force) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยเปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้เกิดการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ค้นพบโดย Thomas Seebeck นักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันในปี ค.ศ.1821 ในรูปที่ 2.1 เป็นภาพที่ใช้อธิบายผลของซีเบค (Seebeck Effect) [4]



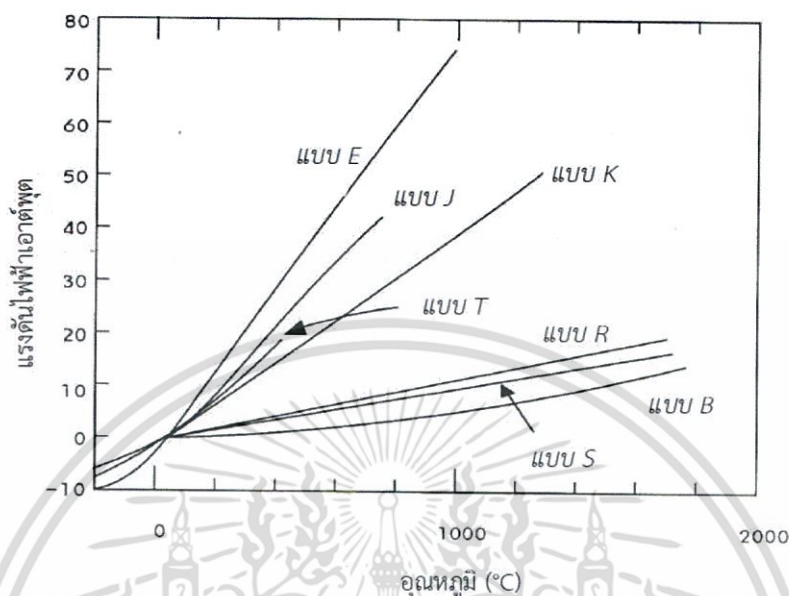
รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของเทอร์โมคัปเปิลอันเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ของซีเบค

ทฤษฎีพื้นฐานของผลจากเทอร์โมอิเล็กทริก เกิดจากการส่งผ่านทางไฟฟ้าและทางความร้อนของโลหะที่ต่างกันจึงทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้าตกคร่อมที่โลหะนั้นความต่างศักย์นี้จะสัมพันธ์กับความจริงที่ว่า อิเล็กตรอนในปลายด้านร้อนของโลหะจะมีพลังงานความร้อนมากกว่าปลายทางด้านเย็น จึงทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วไปหาปลายด้านเย็น ที่อุณหภูมิเดียวกันนี้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะแปรเปลี่ยนไปตามโลหะที่ต่างชนิดกันด้วย ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าโลหะที่ต่างกันจะมีการนำความร้อนที่ต่างกัน

เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน (standard thermocouple) หมายถึง เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ที่ผู้ผลิตทุกรายกำหนดส่วนผสมของคู่สายเทอร์โมคัปเปิลเป็นมาตรฐานเหมือนกันสามารถใช้ตารางเทียบมาตรฐานที่หาได้ทั่วไป

สำหรับเทอร์โมคัปเปิลแบบ non-standard หมายถึง เทอร์โมคัปเปิลที่ผลิตขึ้นมาเพื่อใช้เฉพาะงานมีคุณสมบัติเฉพาะแตกต่างไปจากแบบมาตรฐาน ตารางการสอบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะจัดทำมาให้กับเทอร์โมคัปเปิลตัวนั้น ซึ่งต้องเก็บรักษาตารางสอบเทียบอย่างดี

เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานมี 7 แบบได้แก่ เทอร์โมคัปเปิลแบบ S R B J K T และ E สามารถพิจารณาชนิดของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานจากชนิดของโลหะตัวนำที่ทำเป็นเทอร์โมคัปเปิล



รูปที่ 2.2 แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานทั้ง 7 แบบ ที่อุณหภูมิต่างๆ[4]

ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแต่ละแบบแสดงในตารางที่ 2.1 โดยชื่อแรกของโลหะตัวนำ หมายถึง ขั้วไฟฟ้าที่มีศักย์เป็นบวก (+) และชื่อหลังมีศักย์เป็นลบ (-) และ ตารางที่ 2.2 ย่นการใช้งาน และคุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละแบบ

ตารางที่ 2.1 ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานแบบต่าง ๆ

มาตรฐาน	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
	Constantan: Copper 60% + Nickel 40%

(ที่มา: การวัดและเครื่องมือวัด การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างย่านการใช้งาน และคุณลักษณะของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน

ชนิดเทอร์โมคัปเปิล	ย่านอุณหภูมิใช้งาน (°C)	ย่านอุณหภูมิ (°C)	ค่าความผิดพลาด (°C)	ค่าความไวสูงสุด (โดยประมาณ) ( $\mu V/^\circ C$ )
R		-50 ถึง 250.0	-0.02 ถึง 0.02	6
		250 ถึง 1200.0	-0.005 ถึง 0.005	
		1064 ถึง 1664.5	-0.0005 ถึง 0.001	
		1664.5 ถึง 1768.1	-0.001 ถึง 0.002	
J		-210.0 ถึง 0.0	-0.05 ถึง 0.03	50
		0.0 ถึง 760.0	-0.04 ถึง 0.04	
		760.0 ถึง 1200.0	-0.04 ถึง 0.03	
K		-270.0 ถึง 0.0	-0.02 ถึง 0.04	50
		0.0 ถึง 500.0	-0.05 ถึง 0.04	
		500.0 ถึง 1372.0	-0.05 ถึง 0.06	
T		-200.0 ถึง 0.0	-0.02 ถึง 0.04	60
		0.0 ถึง 400.0	-0.03 ถึง 0.03	

(ที่มา: NIST-ITS 90 [www.srdata.nist.gov/its90/main/](http://www.srdata.nist.gov/its90/main/))

เทอร์โมคัปเปิลแบบ S และ R มีคุณสมบัติที่คล้ายกัน แต่แบบ R ให้ค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่สูงกว่า เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น เตาหลอมเหล็ก อุตสาหกรรมแก้ว โดยสามารถทนอุณหภูมิได้ถึง 1400 °C ใช้งานได้ดีในสถานะที่ไม่เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ไม่เหมาะกับงานที่มีสถานะแบบกัฏกร่อน ไม่เหมาะกับงานในสถานะสุญญากาศ และไม่เหมาะกับงานที่มีไอของโลหะและอโลหะ

เทอร์โมคัปเปิลแบบ B ให้แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าแบบ S และ R แต่มีความแข็งแรงทนทานกว่า เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับแบบ S และ R ไม่เหมาะกับงานในสถานะสุญญากาศ และไม่เหมาะกับงานที่มีไอของโลหะ และอโลหะ

เทอร์โมคัปเปิลแบบ J ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดี นิยมใช้กับงานทั่วไป ราคาไม่แพง เหมาะสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิไม่เกิน 760 °C ไม่เหมาะกับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0 °C นิยมใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก

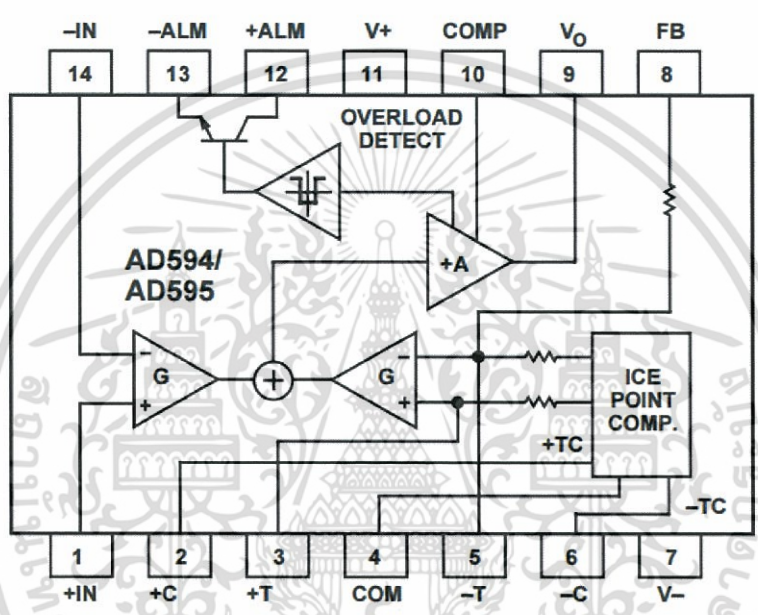
เทอร์โมคัปเปิลแบบ K เป็นเทอร์โมคัปเปิลชนิดที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุด สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J และมีราคาถูกกว่า ทนอุณหภูมิได้ถึง 1300 °C และที่อุณหภูมิต่ำถึง -250 °C มีค่าความเป็นเชิงเส้นสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดอื่น ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูง (ให้อัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิดีกว่าแบบอื่นหรือมีค่าความชันใกล้เคียง 1) สามารถใช้กับงานที่มีการแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) ได้ไม่เหมาะกับงานในสถานะสุญญากาศ (ยกเว้นการใช้งานในช่วงเวลาสั้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทอร์โมคัปเปิลแบบ T เหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิในย่านต่ำเช่น การวัดอุณหภูมิในห้องเย็น (cold storage) และตู้แช่แข็ง (freezer) มีเสถียรภาพในการวัดที่ดี สามารถทนต่อบรรยากาศที่มีการกัดกร่อนและมีความชื้นได้ดี ไม่เหมาะกับงานที่ต้องสัมผัสกับการแผ่รังสีความร้อนโดยตรง

เทอร์โมคัปเปิลแบบ E มีคุณสมบัติคล้ายเทอร์โมคัปเปิลแบบ K แต่ให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตสูงกว่า มีย่านอุณหภูมิใช้งานอยู่ระหว่าง -250 °C ถึง 870 °C [4]

### 2.2 AD595 (Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation)



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมของไอซี AD595 [9]

โดยไอซี AD595 เป็นไอซีที่สามารถขยายสัญญาณจากสายเทอร์โมคัปเปิลอย่างสมบูรณ์แบบ เนื่องจากภายในมีชุดชดเชยจุดความเย็น (ice point comp) โดยขยายสัญญาณแล้วปรับเทียบค่าจะได้ สัญญาณที่ขาออกเป็น 10 mv/°C และลักษณะการขยายสัญญาณเป็นเชิงเส้น สายเทอร์โมคัปเปิล จะเชื่อมต่อกับขาที่ 1 และ 14 โดยค่าสัญญาณที่รับมาจะถูกขยาย โดยมีการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอ้างอิง และมีการชดเชยจากส่วนของ Ice Point Compensation โดยแรงดันไฟฟ้าที่เทียบกับ อุณหภูมิอ้างอิงและมีการชดเชยจะถูกนำไปขยายต่อและมีการส่งค่ากลับมา (feed back) เพื่อ ตรวจสอบกำลังขยายของสัญญาณที่ส่งออก [5]



ในวงจร Comparator ภายใน ถ้ามีสัญญาณอนาล็อกอินพุตเข้ามามากกว่า Reference Voltage จะให้ Logic 1 ออกมา ในทางตรงกันข้ามถ้าสัญญาณอนาล็อกอินพุตน้อยกว่า Reference Voltage จะให้ Logic 0 ออกมา

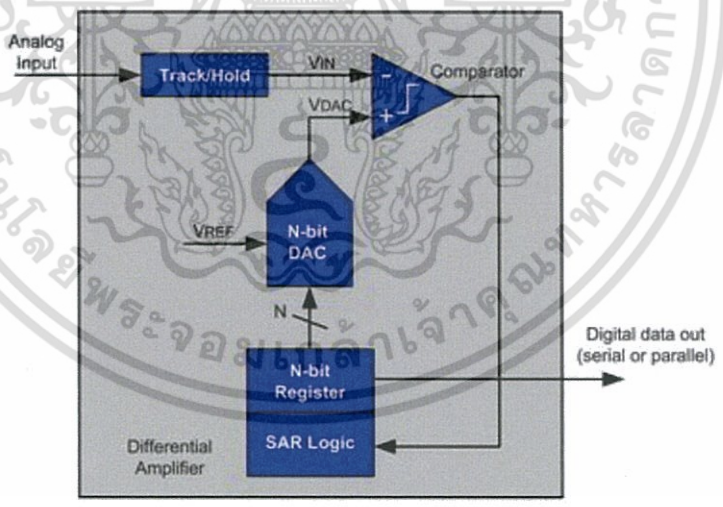
ถ้าให้สัญญาณอนาล็อกอินพุตระหว่าง  $V_{x4}$  และ  $V_{x5}$  แล้ว  $X_1$  ถึง  $X_4$  ผลลัพธ์ได้ Logic 1 และ Comparator ที่เหลือได้ Logic 0 ผลลัพธ์ที่ออกมาจะมีลักษณะเป็น Bar graph หรือเรียกว่า Thermometer Code เพราะมีลักษณะเป็นแท่งไม่ขาดตอน จาก Thermometer Code จะผ่านตัว Decoder เพื่อให้ได้สัญญาณเป็นเลขฐาน 2

จุดที่มีการเปลี่ยนแปลงจาก Logic 1 เป็น Logic 0 แสดงให้เห็นว่าสัญญาณมีค่าน้อยกว่า Reference Voltage ที่จุดนั้น [7]

### 2.3.2 SAR ADCs

Successive-approximation-register (SAR) analog-to-digital converters (ADCs) เป็น ADC ที่มีขายในตลาดมากที่สุด ความละเอียดจะอยู่ในระดับกลางถึงถึงความละเอียดสูง SAR ADCs ให้อัตราการ sampling ถึง 5 Msps ที่ความละเอียด 8-18 bits โครงสร้างแบบ SAR จะให้ประสิทธิภาพสูง กินไฟน้อย และมีขนาดเล็ก

หลักการของ SAR จะเหมือนตาชั่งแบบ balance คือจะมีน้ำหนักที่ไม่ทราบค่าอยู่ด้านหนึ่ง และน้ำหนักที่ทราบค่าอยู่อีกด้านหนึ่ง เราจะเปลี่ยนน้ำหนักที่ทราบค่าไปเรื่อยๆจนกระทั่งตาชั่ง balance เมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามาสัญญาณจะถูก sample เข้ามาและถูก hold ไว้เพื่อเปรียบเทียบกับแรงดันที่ทราบค่า และจะส่งผลลัพธ์ไปที่เอาต์พุต [7]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างภายในของ SAR ADC [7]

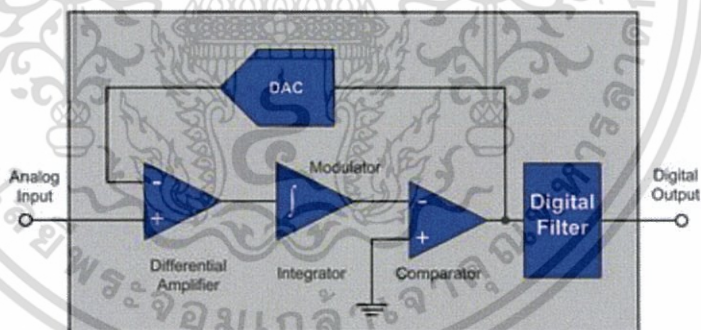
### 2.3.3 Delta-Sigma

Delta-sigma เป็นการแปลงสัญญาณที่มีความละเอียดสูง เป็นการแปลงที่ถือว่าเป็นอุดมคติ (Ideal) และทำงานได้หลายย่านความถี่ ตั้งแต่สัญญาณ DC ไปจนถึงหลัก MHz การทำงานของ Delta-Sigma ADC สัญญาณอินพุตจะถูก Oversample โดยตัว Modulator หลังจากนั้นจะนำสัญญาณมากรองอีกทีเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้นโดย Digital Filter จึงทำให้ได้ค่า ADC ที่มีความละเอียดสูง ที่เรทแซมปลิงต่ำ

เพราะว่า Delta-sigma ทำการ Oversample สัญญาณอินพุตจึงทำให้ได้สัญญาณเรียบขึ้น(Anti-aliasing) และในวงจรส่วน Digital Filter จะมีต้นทุนที่ต่ำกว่า Analog Filter โดยปกติแล้ว ความละเอียดสูงๆจากการแปลงแบบ Delta-sigma จะใช้ในงานด้านเสียง (audio), งานควบคุมในอุตสาหกรรมและงานเครื่องมือวัด

โดยปกติแล้ว Delta-sigma จะรับสัญญาณความแตกต่างระหว่าง 2 อินพุต แทนที่จะเป็นการวัดโวลต์เทียบกราวด์ การวัดสัญญาณความแตกต่าง (Differential) ของอินพุตสามารถนำไปวัดเซ็นเซอร์แบบบริดจ์ เช่นเทอร์โมคัปเปิ้ลได้ Delta-sigma เป็นการแปลงสัญญาณที่แตกต่างกับ SAR การแปลงสัญญาณแบบ SAR จะเหมือนกับการวัดสัญญาณ ณ ตอนนั้น ส่วน Delta-sigma จะเหมือนกับค่าเฉลี่ยของสัญญาณไฟฟ้าใน 1 ช่วงเวลา

โดยส่วนมาก Delta-sigma จะมีบัฟเฟอร์และตัวขยาย Programable gain amplifiers (PGA) อยู่ในตัว บัฟเฟอร์จะมีอิมพีแดนซ์สูงเพื่อให้ต่อตรงกับขาสัญญาณได้โดยไม่มีทำให้วงจรมีค่าอิมพีแดนซ์มีค่าผิดไปจากเดิม ดังนั้น Delta-sigma จึงสามารถใช้วัดสัญญาณที่มีขนาดเล็กได้ดี เช่น สัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิ้ล เพราะมี PGA อยู่ในตัวสามารถปรับค่า gain ได้ตามความเหมาะสม [7]



รูปที่ 2.6 โครงสร้างภายในของ Delta-Sigma ADC [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์

### 2.4.1 Serial Peripheral Interface Bus (SPI Bus)

เป็นรูปแบบหนึ่งของการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์แบบดิจิทัลที่พบเห็นได้บ่อย และใช้กับอุปกรณ์ได้มากกว่าสองอุปกรณ์ขึ้นไปและนำมาต่อกันเป็นบัส (Bus) บัส SPI ส่งและรับข้อมูลทีละบิต (Bit Serial) และใช้สัญญาณ Clock เป็นตัวกำหนดจังหวะการทำงาน (ดังนั้นจึงเรียกว่า Synchronous, Bit-Serial Data Communication) มีการกำหนดบทบาทในการทำงานของอุปกรณ์ในระบบบัส แบ่งเป็น SPI Master และ SPI Slave โดยที่ SPI Master เป็นฝ่ายเริ่มการสื่อสารข้อมูล และสร้างสัญญาณ Clock (มักใช้ชื่อสัญญาณว่า SCK) มากำหนดจังหวะการส่งและรับข้อมูล และด้าน SPI Slave จะเป็นฝ่ายคอยตอบสนอง และในระบบบัส SPI อาจมีอุปกรณ์ที่เป็น SPI Slave ได้มากกว่าหนึ่ง (Single-Master, Multi-Slave) SPI ใช้สัญญาณ 4 เส้น (ใช้งานในแบบที่เรียกว่า 4-Wire SPI) ได้แก่

- 1) Serial Clock (SCK) เป็นสัญญาณ CLK ที่ถูกสร้างโดยอุปกรณ์ที่เป็น SPI Master
- 2) Master-Out Slave-In (MOSI) เป็นสัญญาณสำหรับส่งข้อมูลบิตออกจาก SPI Master ไปยัง SPI Slave
- 3) Master-In Slave-Out (MISO) เป็นสัญญาณสำหรับส่งข้อมูลบิตออกจาก SPI Slave ไปยัง SPI Master
- 4) Slave Select, Active-Low (SS) เป็นสัญญาณที่สร้างโดย SPI Master เพื่อใช้ระบุว่าการสื่อสารกับ SPI Slave หรือไม่ ในกรณีที่มีอุปกรณ์ SPI Slave มากกว่าหนึ่งชุด จะต้องมีสัญญาณ Slave Select มากกว่าหนึ่งเส้น และแยกสำหรับแต่ละอุปกรณ์

เมื่อจะส่ง-รับข้อมูลผ่านบัส SPI Data Transfer (SPI) สัญญาณ Slave Select (SS) จะต้องเปลี่ยนจาก HIGH เป็น LOW จากนั้นข้อมูลหนึ่งไบต์จะถูกเลื่อนบิตและส่งออกทีละบิตจาก SPI Master ตามจังหวะของ SCK และเลือกได้ว่าจะให้บิต Most-Significant Bit (MSB) หรือ Least-Significant Bit (LSB) ถูกส่งออกมาก่อน และในขณะเดียวกันก็จะรับข้อมูลที่ละบิตจาก SPI Slave จนได้ครบหนึ่งไบต์ (หรือกล่าวได้ว่า Data Frame เท่ากับ 8 บิต) ดังนั้นเมื่อ SPI Master ส่งข้อมูลจำนวนหนึ่งไบต์ไปยัง SPI Slave ก็จะได้ข้อมูลหนึ่งไบต์จาก SPI Slave เช่นกัน ในช่วงเวลาที่สัญญาณ SS เป็น LOW อาจมีการส่ง-รับข้อมูลได้มากกว่าหนึ่งไบต์ (Multi-byte SPI transfer)

การทำงานของ SPI มี 4 โหมด จำแนกตามพารามิเตอร์สองตัวที่เรียกว่า Clock Polarity (CPOL) และ Clock Phase (CPHA) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดลักษณะการทำงานอย่างเช่น จะส่ง-รับบิตที่ชอบขาขึ้นหรือลงของสัญญาณ CLK และสัญญาณ CLK จะอยู่ที่ลอจิก HIGH หรือ LOW เมื่อไม่อยู่ในช่วงของการส่งข้อมูลใดๆในบัส SPI (ช่วงที่เรียกว่า Idle) แต่โดยทั่วไปจะใช้ SPI Mode 0 [1]

## 2.4.2 Inter-IC Communication (I<sup>2</sup>C)

การติดต่อสื่อสารระหว่างไอซี โดยบัส I<sup>2</sup>C ได้รับการพัฒนาโดย ฟิลิปส์ (Philips) ด้วยจุดมุ่งหมายหลักคือ ต้องการให้ไอซีหรือโมดูลสามารถติดต่อ ส่งงาน และ ควบคุมภายใต้สายสัญญาณเพียง 2 เส้น เส้นหนึ่งคือ สายสัญญาณนาฬิกาที่ใช้กำหนดจังหวะการทำงาน การต่อร่วมกันของอุปกรณ์บนบัส I<sup>2</sup>C ทำได้ง่ายมาก เพียงต่อสายข้อมูลและสายสัญญาณนาฬิกาของอุปกรณ์แต่ละตัว ขนานหรือพ่วงกันไป ส่วนการกำหนดแอดเดรสหรือตำแหน่งสำหรับติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัว จะใช้รหัสข้อมูลและการกำหนดสถานะโลจิกที่ขาแอดเดรสของอุปกรณ์แต่ละตัวสายข้อมูลบนบัส I<sup>2</sup>C มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า สายข้อมูลอนุกรม หรือ Serial Data line (SDA) ส่วนสายสัญญาณนาฬิกามีชื่อเรียกว่า สายสัญญาณนาฬิกาอนุกรม หรือ Serial Clock line (SCL) ในการอธิบายต่อไปนี้จะเรียกสายสัญญาณทั้งสองว่า SDA และ SCL [8]

คุณสมบัติโดยทั่วไปของบัส I<sup>2</sup>C สาย SDA และ SCL เป็นสายสัญญาณ 2 ทิศทาง (bi-directional line) ต้องมีการต่อตัวต้านทานพูลอัพกับแรงดัน +5V ไว้ตลอดเวลา เพื่อให้สายมีสถานะลอจิกสูงในขณะที่ไม่มีการติดต่อใช้งาน ทั้งยังช่วยป้องกันสัญญาณรบกวนที่อาจมีเข้ามาในสายสัญญาณทั้งสอง วงจรเอาต์พุตของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่บนบัส I<sup>2</sup>C ต้องมีลักษณะเป็นวงจรเดรนเปิด (Open-drain) หรือ คอลเล็กเตอร์เปิด (Open-collector) อัตราการถ่ายเทข้อมูลบนบัส I<sup>2</sup>C สูงถึง 100 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดปกติ และ สูงถึง 400 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดความเร็วสูง อุปกรณ์ที่ต่ออยู่บนบัส I<sup>2</sup>C จะต้องมีความจุไฟฟ้ารวมที่เกิดขึ้นระหว่างสาย SDA และ SCL ไม่เกิน 400pf การเข้าถึงอุปกรณ์บนบัส I<sup>2</sup>C ใช้ข้อมูลสำหรับการเข้าถึงสองค่าคือ 7 บิต (7-bit addressing) หรือ 10 บิต (10-bit addressing)

หลักการของบัส I<sup>2</sup>C บัส I<sup>2</sup>C ประกอบด้วยสายสัญญาณ 2 เส้นคือ SDA และ SCL อุปกรณ์ที่ต่อพ่วงบนบัสสามารถมีได้มากมาย ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดรูปแบบของการติดต่อบนบัส เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบว่า ขณะนี้อุปกรณ์ใดติดต่อกันอยู่ และอุปกรณ์ใดเป็นตัวรับหรือส่ง ต่อไปนี้จะขออธิบายลักษณะ หน้าที และ นิยามของอุปกรณ์บนบัส I<sup>2</sup>C เพื่อเป็นข้อตกลงก่อนอธิบายการทำงานของบัส I<sup>2</sup>C ต่อไป อุปกรณ์ที่เป็นผู้สร้างข้อมูลหรือส่งข้อมูล เรียกว่า ตัวส่ง (transmitter) อุปกรณ์ที่เป็นผู้รับข้อมูล เรียกว่า ตัวรับ (receiver)

อุปกรณ์บนบัส I<sup>2</sup>C สามารถเป็นได้ทั้งตัวรับและส่ง บางอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นตัวรับอย่างเดียว จะไม่มีอุปกรณ์ใดบนบัส I<sup>2</sup>C ที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่งอย่างเดียว อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมจังหวะการติดต่อบนบัส I<sup>2</sup>C เรียกว่า มาสเตอร์ (master) อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมหรืออุปกรณ์ที่ต่อพ่วงเข้าไปบนบัส I<sup>2</sup>C เรียกว่า สเลฟ (slave)

ข้อกำหนด 2 ประการสำคัญของการติดต่อบนบัส I<sup>2</sup>C คือ

1) การถ่ายเทข้อมูลจะเกิดขึ้นได้เมื่อบัสว่างเท่านั้น

2) ในระหว่างการถ่ายเทข้อมูล เมื่อใดก็ตามที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง สายข้อมูลต้องรักษาข้อมูลไว้ อย่าให้เกิดความเปลี่ยนแปลงเด็ดขาด มิฉะนั้นสัญญาณที่เกิดขึ้นจะได้รับการแปลความหมายเป็นสัญญาณควบคุมแทน

ข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญของบัส I<sup>2</sup>C

สถานะที่เกิดขึ้นบนบัส I<sup>2</sup>C มีด้วยกัน 5 สถานะ ดังนี้

1) บัสว่าง (Bus not busy) สถานะนี้เกิดขึ้นเมื่อ สถานะลอจิกบนสาย SDA และ SCL มี

ลอจิกสูงทั้งคู่ นั่นหมายความว่า การถ่ายเทข้อมูลสามารถเริ่มต้นขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) เริ่มต้นการถ่ายทอข้อมูล(start data transfer) เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงลอจิกจากสูงไปต่ำ ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง เรียกสภาวะนี้ว่า สภาวะเริ่มต้น (START)

3) ข้อมูลดำรงอยู่บนบัส(data valid) สภาวะนี้เกิดขึ้นถัดจากสภาวะเริ่มต้น โดยสถานะลอจิกที่เกิดขึ้นบนสาย SDA ก็คือข้อมูลที่ทำการถ่ายทอ เมื่อสาย SCL มีลอจิกสูง สถานะที่สาย SDA ต้องคงที่ เพื่อให้อุปกรณ์รับข้อมูลในจังหวะนั้นว่า เป็น"0" หรือ "1" ข้อมูลอาจเกิดความเปลี่ยนแปลงได้ในขณะที่สาย SCL เป็นลอจิกต่ำ แต่เมื่อใดก็ตามที่ต้องการให้เกิดการถ่ายทอข้อมูลอย่างสมบูรณ์ สถานะลอจิกที่ขา SDA ต้องคงที่ตลอดช่วงเวลาที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูง หากเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะลอจิกในขณะที่สาย SCL มีลอจิกสูงอยู่นั้น อุปกรณ์มาสเตอร์ที่ควบคุมการถ่ายทอข้อมูลจะแปลความหมายเป็นสภาวะหยุด หรือ สภาวะเริ่มต้นก็ได้ ทำให้ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอเกิดความผิดพลาดเกิดขึ้น

4) รับรู้ข้อมูล(acknowledge) เกิดขึ้นหลังจากการถ่ายทอข้อมูลจากตัวส่งมายังตัวรับ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ โดยตัวส่งจะทำการส่งข้อมูลมา 1 บิตเรียกว่า บิตรับรู้ (acknowledge bit) มีสถานะเป็นลอจิกสูง หลังการส่งข้อมูลมาครบถ้วน ส่วนอุปกรณ์มาสเตอร์จะทำการส่งสัญญาณรับรู้พิเศษซึ่งสัมพันธ์กับสัญญาณนาฬิกา อุปกรณ์ สเลฟที่ถูกอ้างอิงในการติดต่อ หรือ กำลังติดต่ออยู่ในขณะนั้นก็จะกำเนิดบิตรับรู้ที่มีสถานะลอจิกต่ำเพื่อตอบสนองให้ทราบว่า ได้รับข้อมูลเรียบร้อยแล้ว [6]

5) หยุดการถ่ายทอข้อมูล (stop data transfer) เกิดขึ้นเมื่อสาย SDA มีการเปลี่ยนแปลงระดับลอจิกจากต่ำไปสูง ในขณะที่สาย SCL มีสถานะลอจิกสูงเรียกสภาวะที่เกิดขึ้นนี้ว่า สภาวะหยุด (STOP)

การทำงานบนบัส I<sup>2</sup>C เริ่มต้นด้วยการเข้าถึงอุปกรณ์เสียก่อน โดยการเข้าถึงอุปกรณ์บนบัส I<sup>2</sup>C นั้นจะใช้การเข้าถึงแบบ 7 หรือ 10 บิต ในกรณีที่มียุกรณ์ต่ออยู่บนบัสไม่มาก ใช้การเข้าถึงแบบ 7 บิตก็เพียงพอ แต่ในบางอุปกรณ์ต้องใช้การเข้าถึงแบบ 10 บิต หลังจากทีติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัวเรียบร้อยแล้ว ก็จะเริ่มต้นการถ่ายทอข้อมูลกันต่อไป

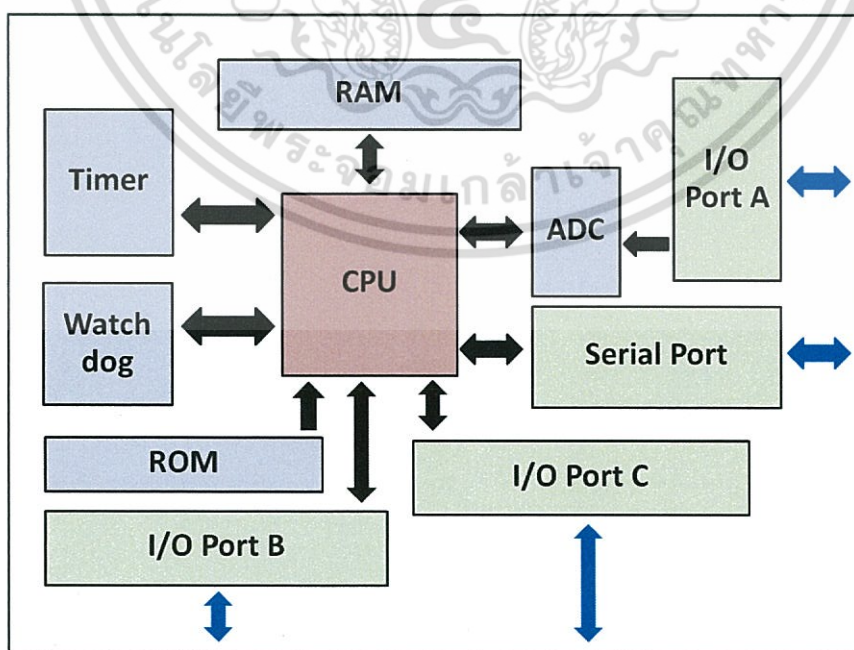
การเข้าถึงแบบ 7 บิต (7-bit addressing) ข้อมูลไบต์แรกที่เกิดขึ้นหลังจากสภาวะเริ่มต้นคือ ข้อมูลที่ใช้อ้างอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อ ใน 7 บิตบนรวมทั้งบิต LSB ด้วยจะเป็นข้อมูลแอดเดรสของอุปกรณ์ สเลฟที่ต้องการติดต่อ โดยแบ่งเป็นบิตกำหนดแอดเดรสคงที่ (fix address bit) จำนวน 4 บิต ซึ่งข้อมูลนี้ที่อุปกรณ์แต่ละตัวจะถูกกำหนดมาจากผู้ผลิต ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ ถัดมาอีก 3 บิตเป็นบิตกำหนดแอดเดรสที่สามารถโปรแกรมได้(programmable address bit) โดยผู้ใช้งานต้องกำหนดสถานะลอจิกให้แก่ขา A0-A2 ของอุปกรณ์ที่มีการเชื่อมต่อแบบบัส I<sup>2</sup>C ส่วนในบิต LSB ที่ใช้กำหนดการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับอุปกรณ์ สเลฟตัวนั้น ๆ หากบิต LSB เป็น "0" หมายถึงต้องการเขียนข้อมูลไปยังอุปกรณ์นั้น ถ้าเป็น "1" จะเป็นการอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ สเลฟ ข้อมูลในไบต์ต่อมาคือ ข้อมูลควบคุม(control byte) ในอุปกรณ์แต่ละตัวจะมีการกำหนดข้อมูลควบคุมที่แตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่น ไอซีเมมโมรี่ของทีวีตรรกะ 24Cxx จะต้องส่งข้อมูลแอดเดรสของหน่วยความจำก่อนที่จะทำการส่งข้อมูลไป ข้อมูลในไบต์ต่อมาคือ ข้อมูลที่ทำการถ่ายทอจริง (data) หลังจากการถ่ายทอข้อมูลในแต่ละไบต์ อุปกรณ์ สเลฟที่ได้รับการติดต่อต้องส่งสัญญาณรับรู้ตอบกลับมาด้วยทุกครั้ง

การเข้าถึงแบบ 10 บิต(10-bit addressing)จะมีข้อมูลเพิ่มเติมขึ้นมาเล็กน้อย โดยในไบต์แรกหลักจากสถานะเริ่มต้น ต้องกำหนดให้ 5 บิตบนมีข้อมูลเป็น 11110 ส่วนอีก 2 บิตถัดมาเป็นบิตแอดเดรสของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อ ในบิต LSB ของข้อมูลไบต์แรกยังคงเป็นการกำหนดว่าต้องการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับอุปกรณ์ สเลฟต์ที่ต้องการติดต่อด้วย ข้อมูลไบต์ต่อมาเป็นข้อมูลแอดเดรสในไบต์ที่ 2 ของอุปกรณ์ที่ต้องการติดต่อด้วย ข้อมูลไบต์ถัดไปจึงเป็นข้อมูลควบคุม ข้อมูลหลังจากนี้ก็จะจะเป็นข้อมูลจริงที่ใช้ในการติดต่อ เช่นเดียวกันกับการเข้าถึงแบบ 7 บิตหลังจากถ่ายทอดข้อมูลครบทุกไบต์ ต้องมีสถานะรับรู้เกิดขึ้น เพื่อให้ขบวนการถ่ายทอดข้อมูลสามารถดำเนินต่อไปได้ [6]

## 2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ อุปกรณ์ควบคุม ขนาดเล็ก ซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอา ซีพียู, หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการบรรจุเข้าไว้ในตัวถังเดียวกัน

ไมโครคอนโทรลเลอร์ถ้าแปลความหมายแบบตรงตัว ก็คือระบบคอนโทรลขนาดเล็กเรียกอีกอย่าง หนึ่งคือเป็นระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยผ่านการออกแบบวงจรให้เหมาะกับงานต่างๆ และยังสามารภโปรแกรมคำสั่งเพื่อควบคุมขา Input/Output เพื่อสั่งงานให้ไป ควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ได้อีกด้วย นับว่าเป็นระบบที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ทั้งทางด้าน Digital และ Analog ยกตัวอย่างเช่น ระบบสัญญาณตอบรับอัตโนมัติ ระบบบัตรคิว, ระบบตอกบัตร พนักงาน และอื่นๆ ยิ่งระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ในยุคปัจจุบันนั้นสามารถทำการเชื่อมต่อกับระบบ Network ของคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้อีกด้วย ดังนั้นการสั่งงานจึงไม่ใช่แค่หน้าแผงวงจร แต่อาจจะเป็นการสั่งงานอยู่คนละซีกโลกผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต [1]



รูปที่ 2.7 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 Arduino

Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดแบบสำเร็จรูปในยุคปัจจุบัน ซึ่งถูกสร้างมาจาก Controller ตระกูล ARM ของ ATMEL ข้อดีของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดคือเรื่องของ Open Source ที่สามารถนำไป พัฒนาต่อเป็นอุปกรณ์ต่างๆได้และความสามารถในการเพิ่ม Boot Loader เข้าไปที่ตัว ARM จึงทำให้การ Upload Code เข้าตัวบอร์ดสามารถทำได้ง่ายขึ้น และยังมีการพัฒนา Software ที่ใช้ในการควบคุมตัวบอร์ด ของ Arduino มีลักษณะเป็นภาษา C++ ที่โปรแกรมเมอร์มีความคุ้นเคยในการใช้งาน ตัวบอร์ดสามารถนำโมดูลมาต่อเพิ่ม ซึ่งทาง Arduino เรียกว่าเป็น shield เพื่อเพิ่มความสามารถเพิ่มขึ้น [2]



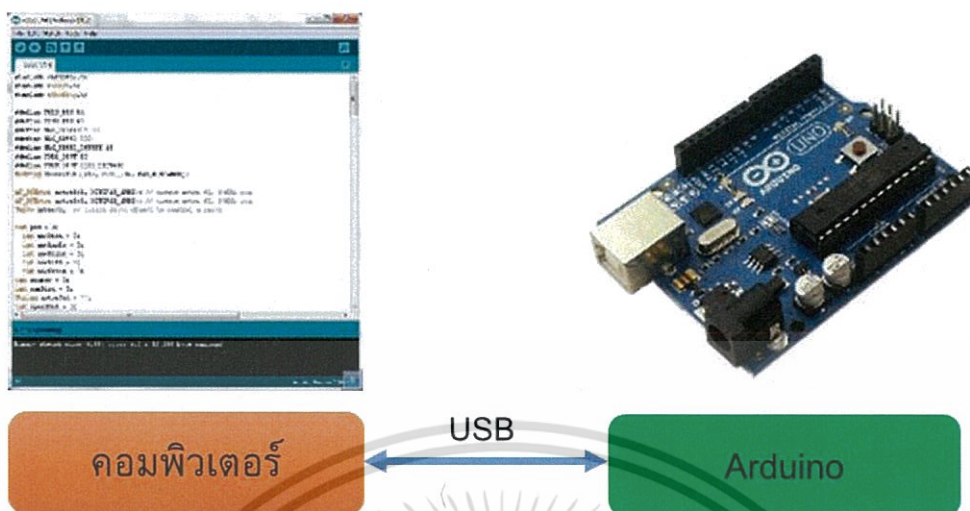
รูปที่ 2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino [2]

#### 2.5.1.1 จุดเด่นที่ทำให้บอร์ด Arduino เป็นที่นิยม

- ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
- มี Arduino Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแรง
- Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
- ราคาไม่แพง
- Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้

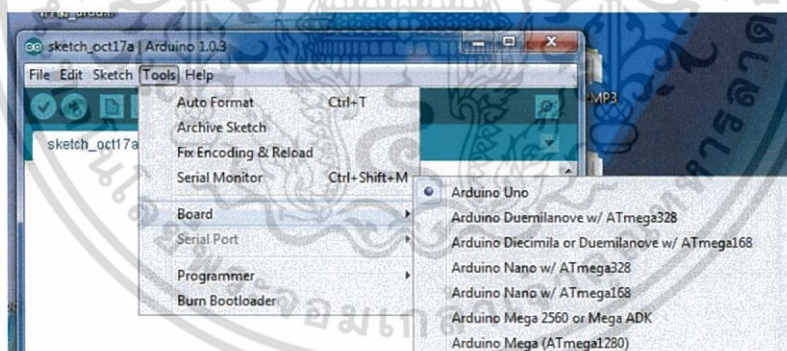
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1.2 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino



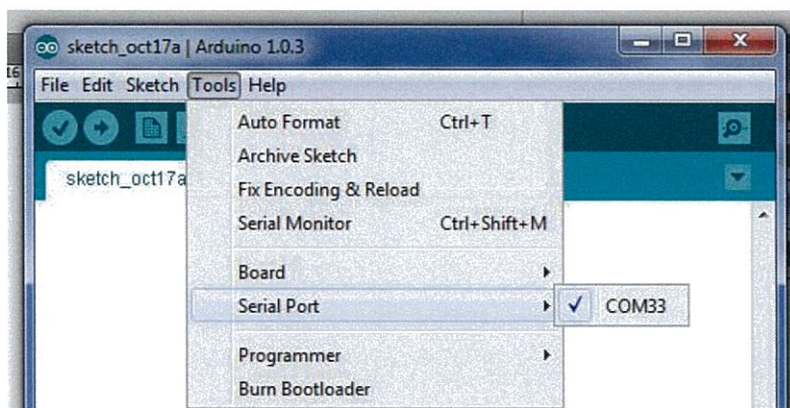
รูปที่ 2.9 รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino [2]

1. เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ ผ่านทางโปรแกรม ArduinoIDE ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <http://Arduino.cc/en/main/software>
2. หลังจากที่เขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ใช้และหมายเลข Com port



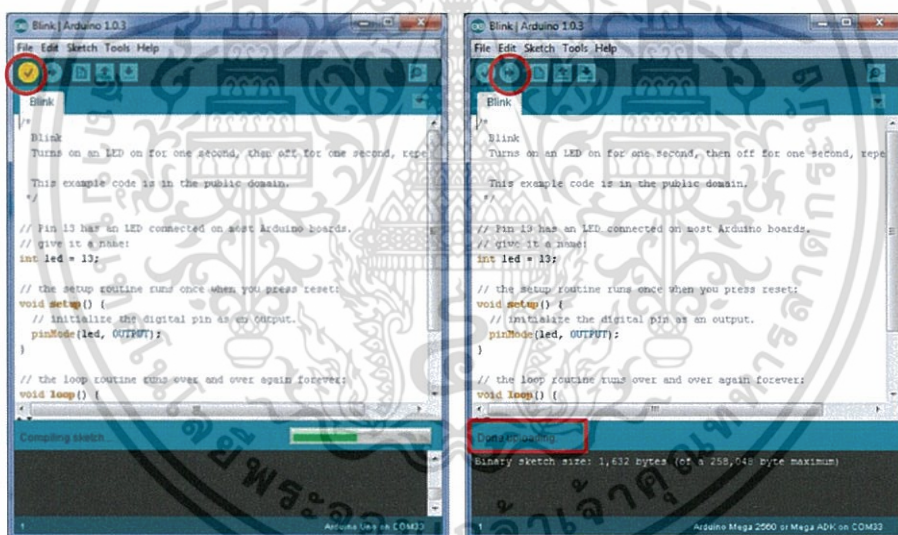
รูปที่ 2.10 เลือกุ่นบอร์ด Arduino ที่ต้องการ upload [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 เลือกหมายเลข Com port ของบอร์ด [2]

3. กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม จากนั้นกดปุ่ม Upload โค้ด โปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino ผ่านทางสาย USB เมื่ออัปโหลดเรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความแถบข้างล่าง “Done uploading” และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที



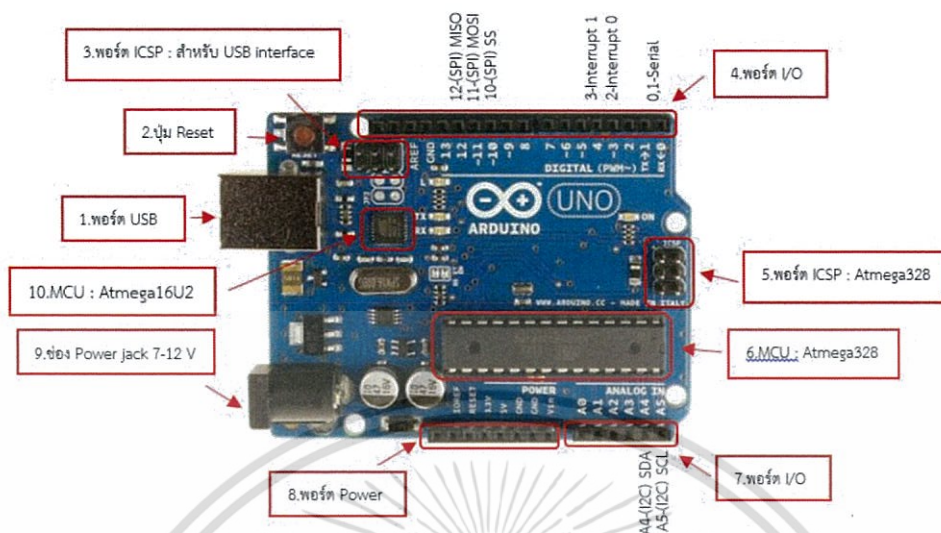
รูปที่ 5 กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และ Compile โค้ดโปรแกรม

รูปที่ 6 Upload โค้ดโปรแกรม

รูปที่ 2.12 Upload โค้ดโปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1.3 Layout & Pin out Arduino Board (Model: Arduino UNO R3)



รูปที่ 2.13 ส่วนต่างๆของ Arduino [2]

1. USB Port: ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button: เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port: ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม VisualComport บน Atmega16U2
4. I/O Port: Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา Tx,Rx Serial, Pin3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port: Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
6. MCU: Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
7. I/O Port: นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5
8. Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND,  $V_{in}$
9. Power Jack: รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU: ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 Kalman Filter Algorithm

โดยปกติสิ่งที่เราต้องการรู้เมื่อวิเคราะห์ระบบก็คือ ณ เวลาหนึ่งๆระบบมีสถานะ (States) เป็นอย่างไร และสถานะของระบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไร ในทางปฏิบัติบ่อยครั้ง การหาสถานะของระบบไม่ใช่เรื่องง่าย เพราะมีข้อจำกัดหลายปัจจัย เช่น ความไม่สมบูรณ์ของเซ็นเซอร์ที่วัดสถานะของระบบและความคลาดเคลื่อนในการวัด วิธีหนึ่งสำหรับหาสถานะของระบบคือใช้ Kalman Filter ซึ่งเป็นสูตรทางคณิตศาสตร์ (Algorithm) พัฒนาโดย ดร. R. E. Kalman ในปี ค.ศ.1960 Kalman Filter ถูกนำมาใช้เป็นที่แรกเพื่อประมาณสถานะของระบบนำร่องของยาน Apollo ในการโคจรในอวกาศ ปัจจุบัน Kalman Filter ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อใช้ประมวลผลข้อมูลจากเซ็นเซอร์หลายประเภท ภายใต้สัญญาณรบกวน (Noise) จากหลายแหล่ง เพื่อหาค่าประมาณของสถานะของระบบที่ดีที่สุด (Data Fusion) การศึกษาเกี่ยวกับระบบโดยทั่วไปมักตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่าความรู้ทุกอย่างเกี่ยวกับระบบถูกต้องแน่นอน 100 เปอร์เซ็นต์ (Deterministic) การใช้สมมติฐานดังกล่าวมีข้อจำกัดในชีวิตจริงเพราะ

1. ไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใดที่สมบูรณ์แบบ 100 เปอร์เซ็นต์ในชีวิตจริงมีตัวแปรเป็นจำนวนมากที่มีผลกระทบต่อระบบซึ่งไม่สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์แบบ อย่างเช่นในการใช้สมการ

$$\dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} = v(t)$$

เพื่อบรรยายการเคลื่อนที่ของเรือบว่าเป็นฟังก์ชันของความเร็วเป็นเพียงการประมาณ ในความเป็นจริงมีปัจจัยอื่นๆ อีกเป็นจำนวนมาก (อุณหภูมิภายนอก อายุการใช้งาน ความสึกหรอ ซึ่งล้วนมีผลต่อเครื่องยนต์และความเร็วของเรือ) ที่เราไม่สามารถนำมาเขียนบรรยายในเชิงคณิตศาสตร์อย่างครบถ้วนสมบูรณ์แบบ

2. ไม่มีเซ็นเซอร์ใดที่วัดค่าได้สมบูรณ์แบบ 100 เปอร์เซ็นต์ในทางปฏิบัติเซ็นเซอร์ทุกชนิดมีความคลาดเคลื่อน (Measurement Noise) จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย นอกจากนี้ในชีวิตจริงมีสถานะของระบบหลายประเภทที่เซ็นเซอร์ไม่สามารถวัดได้โดยตรง เช่น ถาต้องการรู้ตำแหน่งที่บนโลกหลายคนอาจแนะนำให้ใช้ GPS แต่สิ่งที่เครื่องรับ GPS วัดได้จริงๆ ไม่ใช่ตำแหน่งแต่เป็นคลื่นสัญญาณวิทยุที่ถูกส่งมาจากดาวเทียม การที่เครื่องรับ GPS สามารถบอกตำแหน่งได้ก็ด้วยการคำนวณเวลาที่คลื่นใช้เดินทางจากดาวเทียมมาถึงเครื่องรับและแปลงเวลานี้เป็นระยะห่างระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับเพื่อใช้คำนวณหาตำแหน่งอีกต่อหนึ่ง ความพยายามที่จะแสดงความสัมพันธ์เหล่านี้ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ย่อมมีความคลาดเคลื่อนมาเกี่ยวข้อง

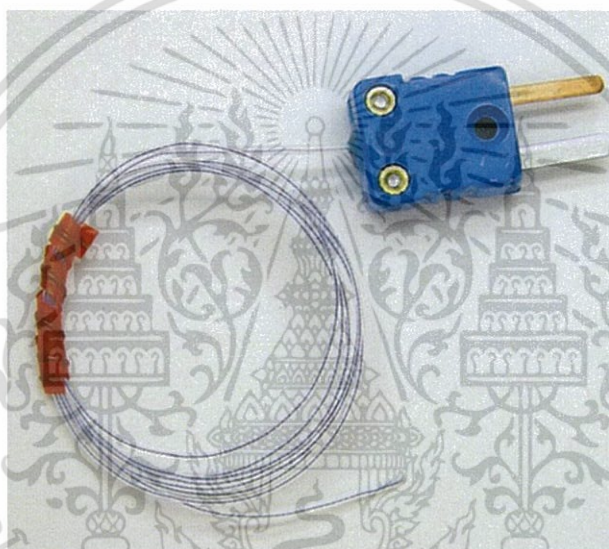
3. ปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ จากตัวอย่างข้างต้นกระแสน้ำ กระแสลม คือปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของเรือบ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะสุ่ม (Random) และเราไม่สามารถควบคุมได้ด้วยข้อจำกัดของการวิเคราะห์แบบ Deterministic ข้างต้น จึงนำไปสู่การวิเคราะห์แบบ Stochastic ซึ่งนำความไม่แน่นอน, ข้อมูลทางสถิติและหลักการของความน่าจะเป็นมารวมพิจารณาด้วย [12]

## บทที่ 3

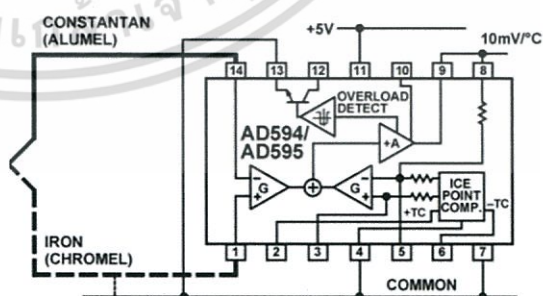
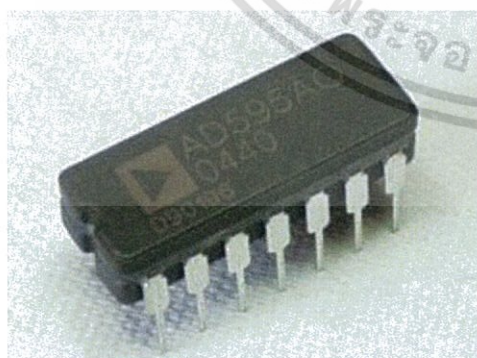
### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในสหกิจศึกษานี้มีแนวคิดในการออกแบบและสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ของงานการสอบเทียบเครื่องมือที่ต้องการความละเอียดอย่างมากและมีความแม่นยำ ค่าที่วัดได้ต้องมีความถูกต้อง และยังส่งผลถึงระยะเวลาในการสอบเทียบที่ลดลง ทำให้ผู้ทำการสอบเทียบสามารถให้ความสำคัญกับงานในส่วนอื่นได้

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

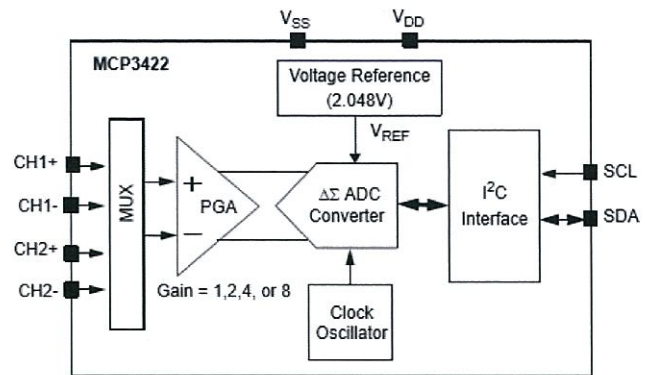


3.1.1 Thermocouple Type-T (Sensor)



3.1.2 IC AD595 (Signal Amplifier) [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3.1.3 IC MCP3422 (Analog to Digital Converter) [10]



3.1.4 Arduino UNO R3 (Controller) [2]



3.1.5 ET-MINI-SPI-SD (Module Recorder )

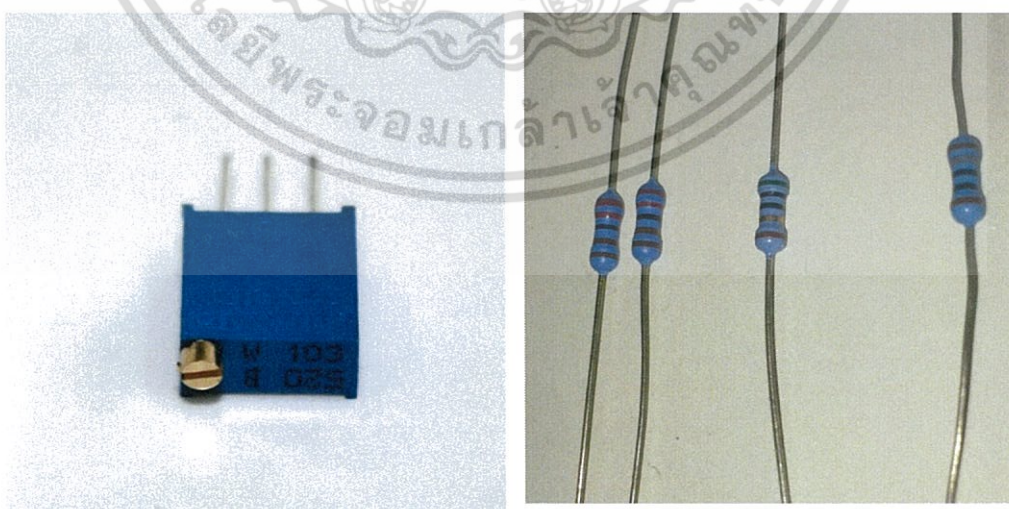
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3.1.6 SD card (memory)



3.1.7 แผ่นทองแดง

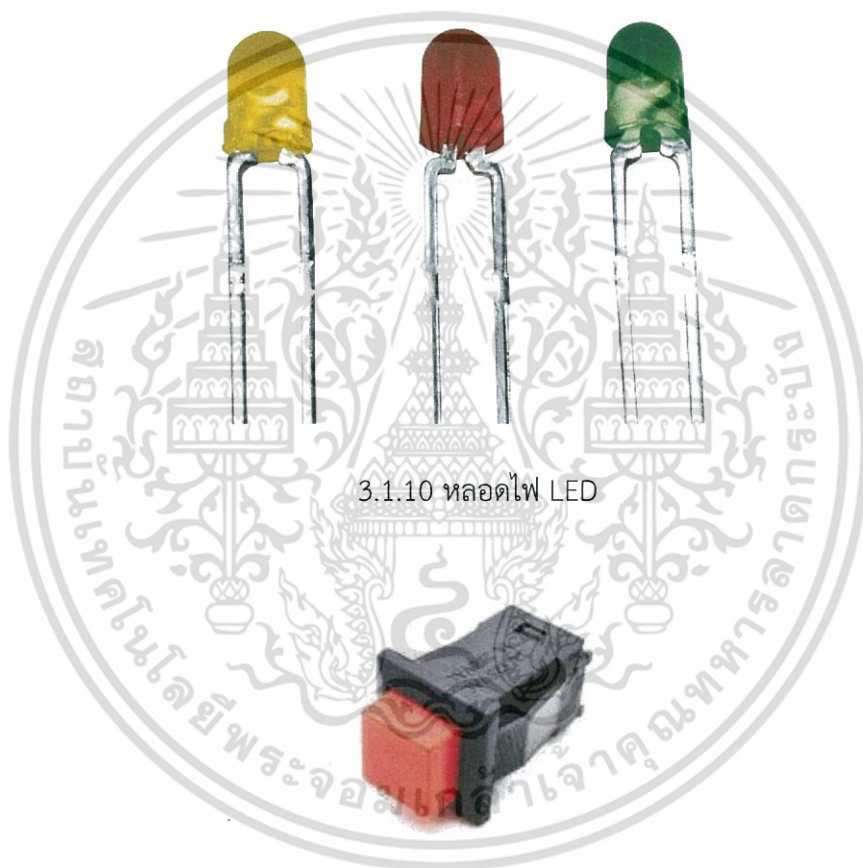


3.1.8 ตัวต้านทานปรับค่าได้ 5กิโลโอห์ม, ตัวต้านทาน 220 โอห์ม, 5กิโลโอห์ม, 10 กิโลโอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3.1.9 ตัวเก็บประจุ



3.1.10 หลอดไฟ LED

3.1.11 สวิตช์ เปิด/ปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 ออกแบบและเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับแผงวงจร

### 3.2.1 การออกแบบวงจร

ในการออกแบบวงจรนี้ได้ใช้โปรแกรม OrCAD โดยได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนวาดวงจร และส่วนจัดอุปกรณ์ทำแผงวงจร



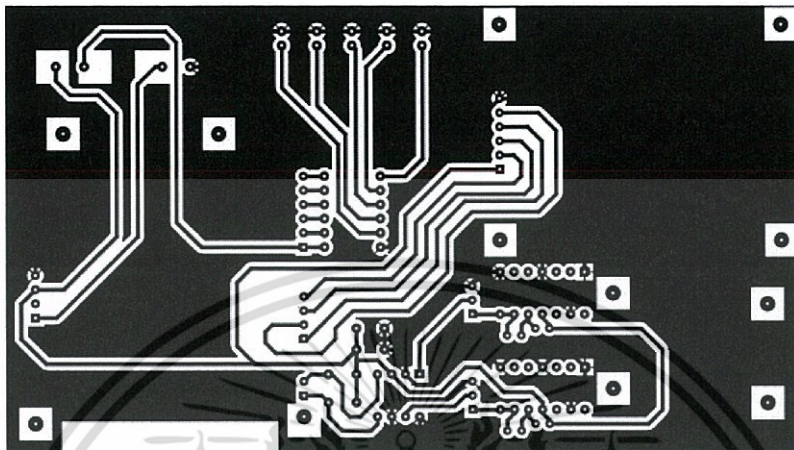
รูปที่ 3.1 โปรแกรม OrCAD ที่ใช้ในการวาดวงจรและทำแผงวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



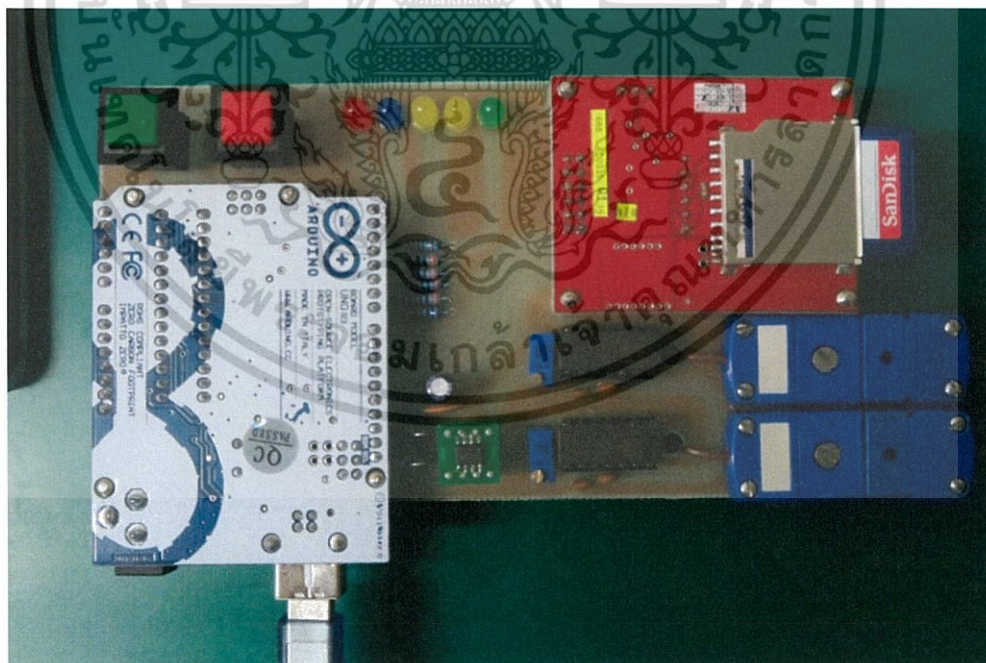
### 3.2.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับแผงวงจร

ขั้นแรกต้องทำแผงวงจร โดยนำแบบวงจรที่เราออกแบบ มาเป็นต้นแบบ โดยการปริ้นรูปแบบวงจรแล้วนำมาติดบนแผ่นทองแดงให้หมึกติดบนแผ่นทองแดง แล้วจึงนำแผ่นทองแดงไปกัดกับน้ำยากัดแผ่นทองแดง



รูปที่ 3.4 รูปลายวงจรที่จะนำไปรีดบนทองแดง

เมื่อกัดทองแดงออกในส่วนที่ไม่ใช่ไฟฟ้าออกแล้ว ก็นำแผ่นวงจรของเรามาบัดกรีเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับแผ่นวงจร

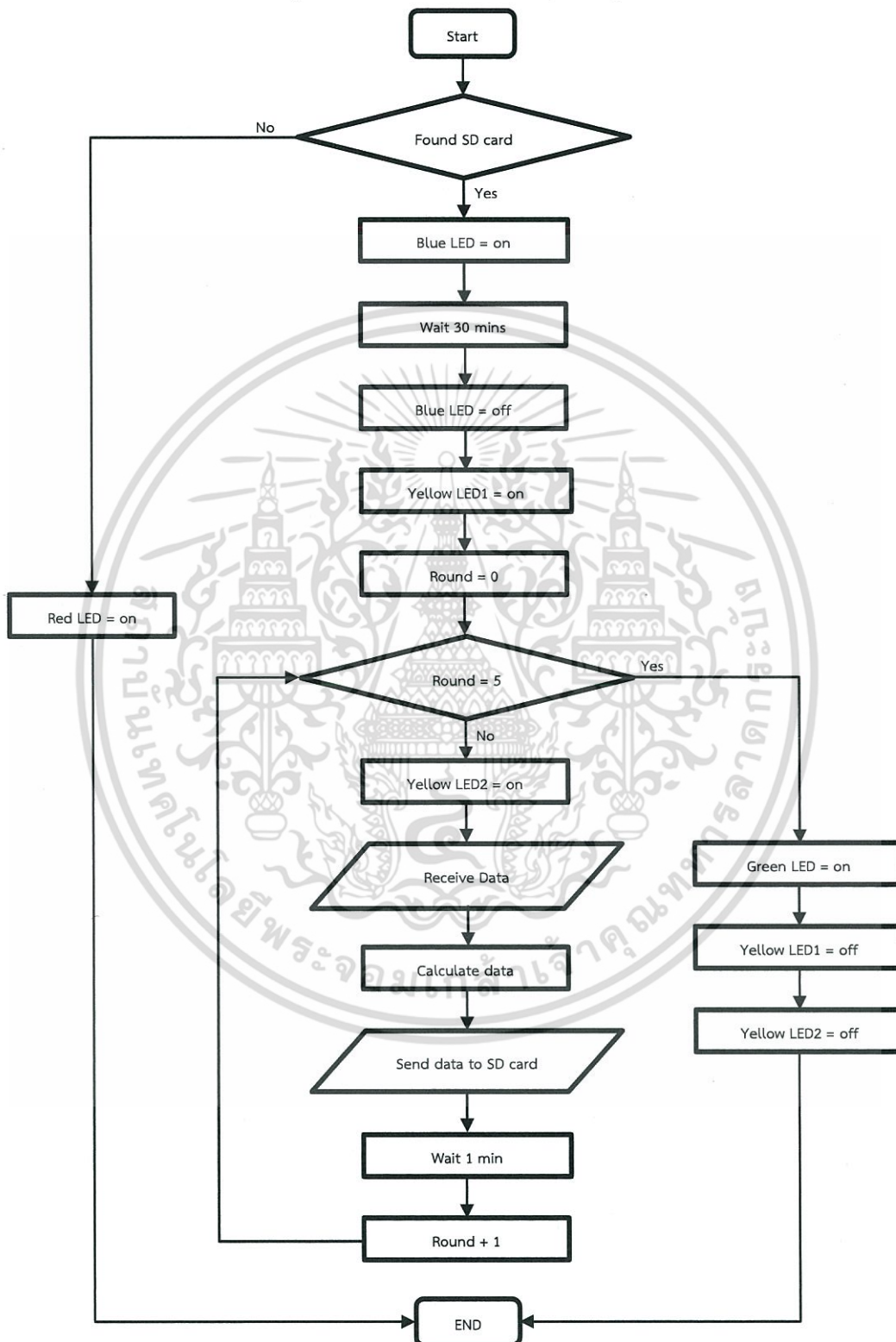


รูปที่ 3.5 แผงวงจรที่เชื่อมต่ออุปกรณ์เสร็จสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 เขียนโปรแกรมควบคุม

โดยควบคุมการรับค่าสัญญาณที่ได้มาตามเวลาที่ตั้งไว้ในแต่ละครั้งของการบันทึกค่า แล้วนำค่าที่อ่านได้มาเข้าสมการเพื่อให้ค่าถูกต้องมากขึ้นแล้วจึงส่งข้อมูลเข้าสู่การ์ดความจำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ปรับแก้ค่า

ค่าที่ได้อาจมีความคลาดเคลื่อน จึงต้องมีการปรับแต่งค่า เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด โดยทำการทดลอง เปรียบเทียบกับเครื่องมาตรฐาน

### 3.5 ทำกล่องใส่เครื่องมือ

เพื่อให้สะดวกในการพกพา และป้องกันเครื่องมือของเรา โดยด้านบนของกล่องจะเป็นแผ่นอะครีลิคใส ที่สามารถมองเห็นไฟ LED แสดงสถานการณ์ทำงานของเครื่องมือ และเราได้เจาะรูสำหรับสวิตช์ เพื่อให้สามารถกดสวิตช์ได้ และมีช่องสำหรับใส่พาวเวอร์แบงค์ และในด้านข้างจะมีช่องสำหรับเสียบการ์ดความจำ และมีจุดเชื่อมต่อสายเทอร์โมคัปเปิลเข้าเครื่องมือของเรา ในส่วนด้านล่างจะมี ช่องสำหรับสายไฟระหว่างพาวเวอร์แบงค์กับแบตเตอรี่

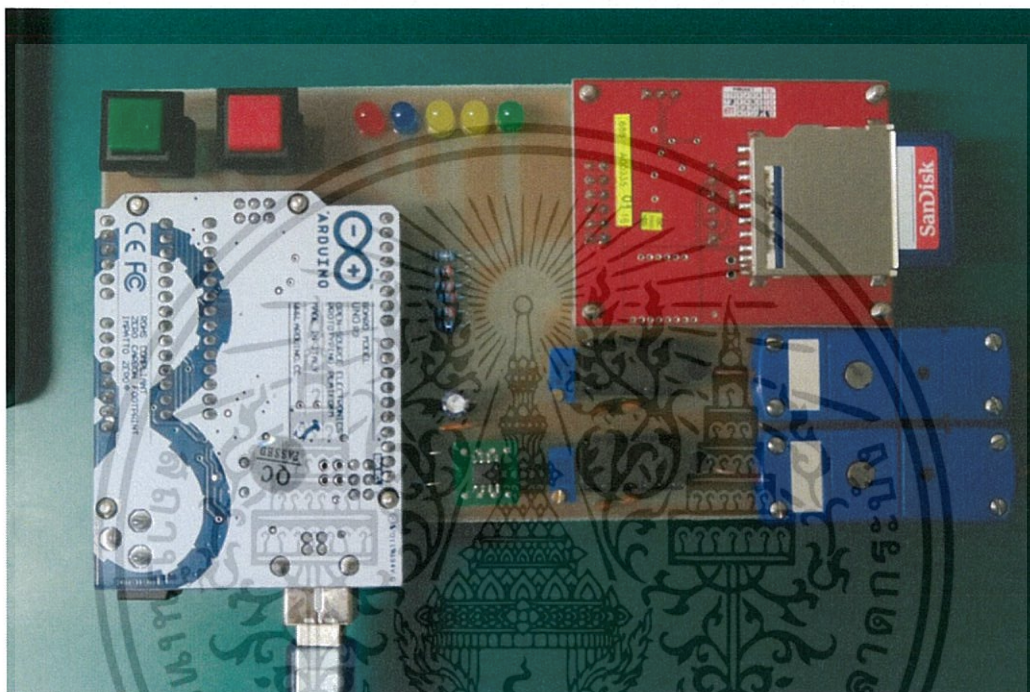


รูปที่ 3.6 กล่องใส่เครื่องมือ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

เมื่อเราประกอบอุปกรณ์ทั้งหมดแล้ว เครื่องมือของเราก็ต้องนำมาทำการ ตรวจสอบในการ อ่านค่าว่าค่าที่ได้จากอุปกรณ์ของเรานั้นสามารถอ่านค่าได้ตรง ถูกต้องแม่นยำหรือไม่ เมื่อเทียบกับ เครื่องมือมาตรฐาน โดยเราได้ใช้สาย RTD standard เป็นมาตรฐาน โดยอ่านค่าและแสดงผลด้วย Multimeter standard ที่มีความถูกต้องเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ที่ผ่านการประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

อันดับแรกเราจะสอบเทียบที่อุณหภูมิ  $0^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ตัวกำเนิด อุณหภูมิคือเครื่อง ICE POINT CELL ที่กำเนิดอุณหภูมิที่  $0^{\circ}\text{C}$  แล้วนำเครื่องมือของเราและเครื่องมือมาตรฐาน (RTD standard) เปรียบเทียบค่าที่อ่านได้

สอบเทียบที่อุณหภูมิมากขึ้นคือ  $25^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$  โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ  $5^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ตัวกำเนิด อุณหภูมิคือเครื่อง HOT POINT CELL โดยมีเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิคือ สาย RTD มาตรฐาน และใช้ เครื่องมัลติมิเตอร์ในการอ่านค่าจากสาย RTD มาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการเปรียบเทียบค่ากับอุปกรณ์มาตรฐานที่อุณหภูมิต่างๆ

โดยทำการตั้งค่าอุณหภูมิของเครื่องกำเนิดอุณหภูมิของเครื่อง ICE POINT CELL และ HOT POINT CELL เมื่อตั้งอุณหภูมิแล้ว เราได้ปล่อยให้เครื่องทำอุณหภูมิเป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้ทำอุณหภูมิได้ตามที่กำหนด แล้วจึงเริ่มทำการเริ่มบันทึกเครื่องมือของเรา และจดบันทึกค่าของเครื่องมือมาตรฐาน (RTD standard) ไปพร้อมๆกันโดยการจับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 ผลการบันทึกข้อมูลจากเครื่องที่เราสร้างขึ้น

จากการบันทึกข้อมูลเราได้ทำการบันทึกค่าทั้งหมด 10 ค่าต่ออุณหภูมิจุดต่างๆ แล้วจึงนำมาเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของค่า โดย Line คือครั้งที่ทำการบันทึก C1 จะเป็นค่าจริงที่ได้จากการอ่านอุณหภูมิและ Xe1 คือการนำค่าที่อ่านได้มาเข้าตัวกรองคาลมาน เพื่อลดสัญญาณรบกวน และการสวิตช์ของข้อมูล และ Temp A คือค่าที่ได้ที่ผ่านการคำนวณให้เปลี่ยนแปลงเป็นค่าที่ถูกต้อง และ C2 , Xe2, Temp B มีความหมายเหมือนกันกับ C1, Xe1, Temp A แต่เป็นค่าของสาย เทอโมคัปเปิลเส้นที่ 2

ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 0 °C

Line	C1	Xe1	Temp A	C2	Xe2	Temp B
1	1.17	1.17	-0.70	0.72	0.72	-0.93
2	1.20	1.19	-0.69	0.72	0.72	-0.93
3	1.19	1.19	-0.69	0.73	0.72	-0.92
4	1.19	1.19	-0.69	0.74	0.73	-0.92
5	1.18	1.19	-0.69	0.73	0.73	-0.92
6	1.18	1.18	-0.69	0.73	0.73	-0.92
7	1.18	1.18	-0.69	0.73	0.73	-0.92
8	1.19	1.18	-0.69	0.73	0.73	-0.92
9	1.18	1.18	-0.69	0.70	0.72	-0.92
10	1.30	1.20	-0.68	0.58	0.71	-0.94

ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 25 °C

Line	C1	Xe 1	Temp A	C2	Xe 2	Temp B
1	27.97	27.97	25.85	28.04	28.04	25.89
2	27.97	27.97	25.85	28.03	28.04	25.88
3	27.97	27.97	25.85	28.04	28.04	25.89
4	27.94	27.96	25.84	28.02	28.03	25.88
5	27.92	27.96	25.84	28.00	28.03	25.87
6	27.90	27.95	25.83	27.98	28.02	25.87
7	27.87	27.94	25.82	27.96	28.01	25.86
8	27.85	27.93	25.81	27.94	28.00	25.85
9	27.87	27.92	25.80	27.93	27.99	25.84
10	27.87	27.91	25.79	27.94	27.99	25.84

ตารางที่ 4.3 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 30 °C

Line	C1	Xe 1	Temp A	C2	Xe 2	Temp B
1	32.86	32.86	30.61	33.00	32.99	30.69
2	32.85	32.85	30.61	33.00	33.00	30.69
3	32.84	32.85	30.61	32.97	32.99	30.68
4	32.84	32.85	30.60	32.97	32.98	30.68
5	32.88	32.85	30.61	32.98	32.98	30.68
6	32.90	32.86	30.62	32.99	32.98	30.68
7	32.89	32.87	30.62	32.99	32.99	30.68
8	32.87	32.87	30.62	32.98	32.99	30.68
9	32.86	32.87	30.62	32.97	32.98	30.68
10	32.86	32.87	30.62	32.97	32.98	30.68

ตารางที่ 4.4 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 40 °C

Line	C1	Xe1	Temp A	C2	Xe2	Temp B
1	42.78	42.78	40.21	43.00	43.00	40.32
2	42.80	42.79	40.22	43.02	43.01	40.33
3	42.82	42.80	40.23	43.03	43.02	40.34
4	42.83	42.81	40.24	43.02	43.02	40.34
5	42.83	42.81	40.24	43.03	43.02	40.34
6	42.83	42.81	40.25	43.02	43.02	40.34
7	42.86	42.82	40.25	43.01	43.02	40.34
8	42.86	42.83	40.26	42.96	43.01	40.33
9	42.85	42.83	40.26	43.06	43.02	40.34
10	42.84	42.83	40.26	43.06	43.02	40.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 45 °C

Line	C1	Xe1	Temp A	C2	Xe2	Temp B
1	47.92	47.92	45.14	48.20	48.20	45.30
2	47.91	47.91	45.14	48.19	48.20	45.29
3	47.88	47.90	45.13	48.16	48.19	45.28
4	47.94	47.91	45.14	48.22	48.19	45.29
5	47.99	47.93	45.16	48.20	48.19	45.29
6	47.99	47.94	45.17	48.23	48.20	45.30
7	47.96	47.94	45.17	48.22	48.20	45.30
8	47.93	47.94	45.17	48.19	48.20	45.30
9	47.92	47.94	45.17	48.16	48.20	45.29
10	47.90	47.93	45.16	48.15	48.19	45.29

ตารางที่ 4.6 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 50 °C

Line	C1	Xe1	Temp A	C2	Xe2	Temp B
1	53.14	53.14	50.13	53.44	53.44	50.29
2	53.15	53.14	50.13	53.45	53.45	50.29
3	53.10	53.13	50.12	53.42	53.44	50.28
4	53.04	53.11	50.10	53.36	53.42	50.26
5	53.03	53.09	50.09	53.35	53.40	50.25
6	53.07	53.09	50.08	53.37	53.40	50.25
7	53.08	53.09	50.08	53.38	53.40	50.24
8	53.04	53.08	50.08	53.35	53.39	50.24
9	53.02	53.07	50.07	53.32	53.38	50.23
10	53.04	53.07	50.07	53.34	53.38	50.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 55 °C

Line	C1	Xe1	Temp A	C2	Xe2	Temp B
1	58.17	58.17	54.91	58.53	58.53	55.11
2	58.32	58.24	54.98	58.63	58.58	55.16
3	58.37	58.29	55.02	58.69	58.62	55.19
4	58.32	58.30	55.03	58.67	58.63	55.21
5	58.27	58.29	55.02	58.63	58.63	55.21
6	58.24	58.28	55.01	58.60	58.62	55.20
7	58.23	58.27	55.01	58.59	58.62	55.20
8	58.20	58.26	55.00	58.56	58.61	55.19
9	58.18	58.25	54.99	58.55	58.60	55.18
10	58.23	58.25	54.99	58.58	58.60	55.18

ตารางที่ 4.8 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 60 °C

Line	C1	Xe1	Temp A	C2	Xe2	Temp B
1	63.54	63.54	59.98	63.94	63.94	60.22
2	63.55	63.54	59.98	63.96	63.95	60.23
3	63.48	63.52	59.96	63.91	63.94	60.22
4	63.43	63.50	59.94	63.87	63.92	60.20
5	63.50	63.50	59.94	63.91	63.92	60.20
6	63.50	63.50	59.94	63.92	63.92	60.20
7	63.42	63.49	59.93	63.86	63.91	60.19
8	63.37	63.47	59.92	63.82	63.90	60.18
9	63.36	63.46	59.90	63.79	63.89	60.17
10	63.33	63.45	59.89	63.77	63.87	60.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 65 °C

Line	C1	Xe1	Temp A	C2	Xe2	Temp B
1	68.73	68.73	64.86	69.20	69.20	65.17
2	68.68	68.71	64.83	69.16	69.18	65.15
3	68.69	68.70	64.83	69.16	69.17	65.14
4	68.76	68.72	64.84	69.21	69.18	65.15
5	68.77	68.73	64.85	69.23	69.19	65.16
6	68.74	68.73	64.86	69.21	69.19	65.16
7	68.74	68.73	64.86	69.20	69.20	65.16
8	68.75	68.74	64.86	69.21	69.20	65.16
9	68.72	68.73	64.86	69.19	69.20	65.16
10	68.66	68.73	64.85	69.14	69.19	65.16

ตารางที่ 4.10 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 70 °C

Line	C1	Xe1	Temp A	C2	Xe2	Temp B
1	74.02	74.02	69.79	74.56	74.56	70.18
2	74.02	74.02	69.79	74.55	74.56	70.17
3	73.94	73.99	69.77	74.49	74.53	70.15
4	73.94	73.98	69.76	74.47	74.52	70.14
5	74.01	73.98	69.76	74.53	74.52	70.14
6	74.03	73.99	69.77	74.55	74.52	70.15
7	73.96	73.99	69.77	74.50	74.52	70.14
8	74.02	73.99	69.77	74.53	74.52	70.14
9	74.12	74.01	69.78	74.61	74.53	70.15
10	74.12	74.02	69.79	74.63	74.54	70.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากรัดความจำที่ทำการบันทึก 75 °C

Line	C1	Xe1	Temp A	C2	Xe2	Temp B
1	79.31	79.31	74.70	79.92	79.92	75.17
2	79.40	79.35	74.75	79.98	79.95	75.20
3	79.65	79.45	74.84	80.17	80.02	75.27
4	79.77	79.53	74.91	80.28	80.09	75.33
5	79.82	79.59	74.97	80.34	80.14	75.37
6	79.74	79.61	74.99	80.29	80.16	75.40
7	79.59	79.61	74.99	80.18	80.17	75.40
8	79.52	79.60	74.98	80.12	80.16	75.39
9	79.51	79.59	74.97	80.09	80.15	75.39
10	79.50	79.58	74.96	80.07	80.14	75.38

ตารางที่ 4.12 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากรัดความจำที่ทำการบันทึก 80 °C

Line	C1	Xe1	TempA	C2	Xe2	TempB
1	84.90	84.90	79.87	85.54	85.54	80.38
2	84.86	84.88	79.85	85.51	85.53	80.37
3	84.80	84.86	79.83	85.46	85.50	80.35
4	84.85	84.85	79.83	85.48	85.50	80.34
5	84.85	84.85	79.82	85.49	85.50	80.34
6	84.75	84.84	79.81	85.40	85.48	80.32
7	84.76	84.82	79.80	85.39	85.47	80.31
8	84.87	84.83	79.80	85.48	85.47	80.31
9	84.90	84.84	79.81	85.50	85.47	80.32
10	84.85	84.84	79.81	85.48	85.47	80.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 85 °C

Line	C1	Xe1	Temp A	C2	Xe2	Temp B
1	90.27	90.27	84.80	90.98	90.98	85.39
2	90.33	90.30	84.83	91.03	91.00	85.42
3	90.30	90.30	84.82	91.00	91.00	85.42
4	90.27	90.29	84.82	90.98	91.00	85.41
5	90.41	90.32	84.84	91.08	91.01	85.43
6	90.49	90.34	84.86	91.15	91.04	85.45
7	90.45	90.36	84.88	91.13	91.05	85.46
8	90.33	90.36	84.87	91.05	91.05	85.46
9	90.30	90.35	84.87	91.01	91.04	85.46
10	90.36	90.35	84.87	91.05	91.05	85.46

ตารางที่ 4.14 ค่าที่ได้จากการทดลองที่เปิดจากการวัดความจำที่ทำการบันทึก 90 °C

Line	C1	Xe1	Temp A	C2	Xe2	Temp B
1	95.76	95.76	89.80	96.53	96.53	90.49
2	95.78	95.77	89.81	96.54	96.54	90.50
3	95.76	95.77	89.81	96.51	96.53	90.49
4	95.79	95.77	89.82	96.54	96.53	90.49
5	95.84	95.79	89.83	96.57	96.54	90.50
6	95.80	95.79	89.83	96.53	96.54	90.50
7	95.77	95.79	89.83	96.52	96.53	90.50
8	95.85	95.79	89.84	96.57	96.54	90.50
9	95.86	95.80	89.84	96.58	96.54	90.51
10	95.80	95.80	89.84	96.52	96.54	90.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการบันทึกข้อมูลไปพร้อมกันของค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือมาตรฐานโดยใช้การจดบันทึกเป็นจำนวน 10 ค่าและจับเวลาบันทึกไปพร้อมๆกับเครื่องมือของเรา

ตารางที่ 4.15 ตัวอย่างค่าที่ได้จากการอ่านค่าจากเครื่องมือมาตรฐานที่เวลาเดียวกัน

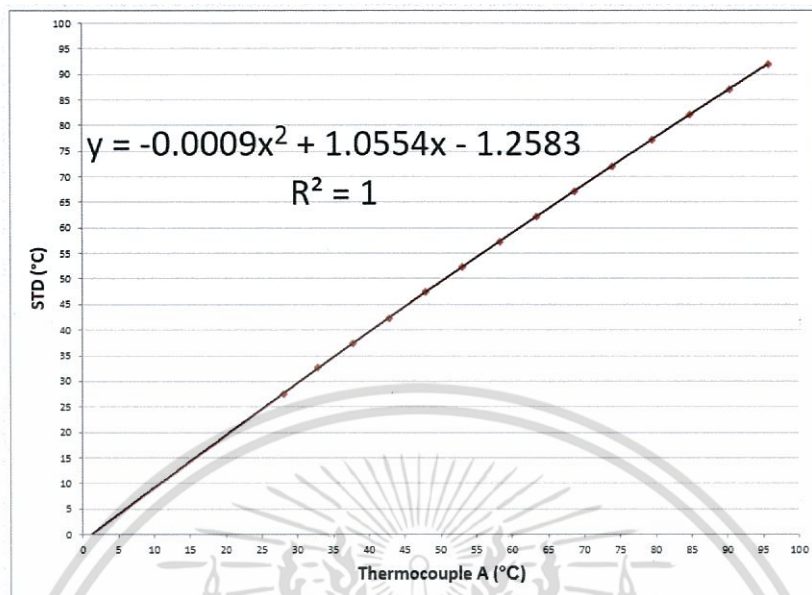
Set	20°C	30°C	35°C	40°C	45°C
1	25.578	32.606	37.397	42.367	47.368
2	25.568	32.596	37.391	42.368	47.364
3	25.560	32.587	37.420	42.367	47.365
4	25.551	32.578	37.425	42.367	47.372
5	25.545	32.570	37.427	42.371	47.382
6	25.532	32.568	37.436	42.372	47.384
7	25.527	32.565	37.440	42.365	47.381
8	25.522	32.559	37.446	42.360	47.375
9	25.519	32.542	37.438	42.364	47.370
10	25.514	32.531	37.428	42.370	47.363

ตารางที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบของจากเครื่องมือทั้งสอง

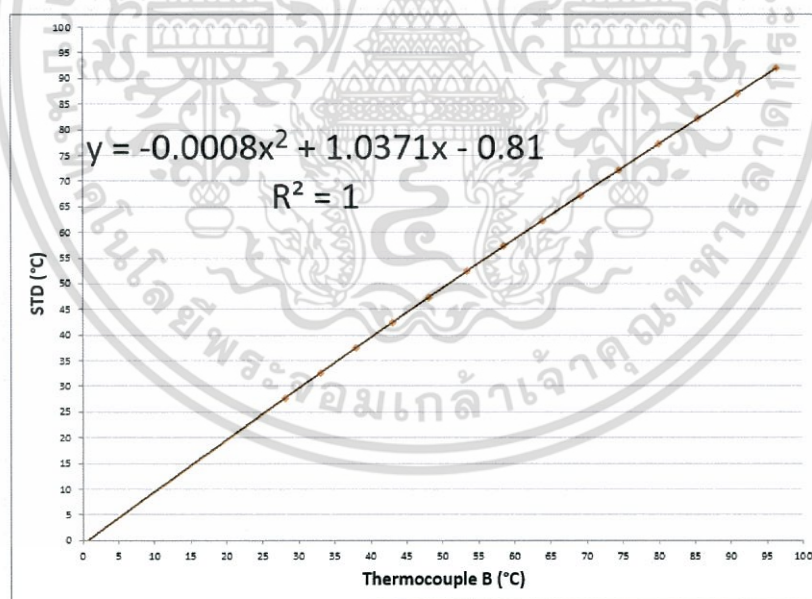
Set Temp	STD	Thermocouple A	Thermocouple B
0	-0.045	1.19	0.72
25	27.578	27.97	28.05
30	32.570	32.86	32.99
35	37.433	37.80	37.98
40	42.367	42.81	43.02
45	47.372	47.93	48.20
50	52.336	53.10	53.41
55	57.282	58.26	58.60
60	62.211	63.50	63.92
65	67.179	68.73	69.19
70	72.128	74.00	74.53
75	77.171	79.52	80.09
80	82.017	84.85	85.49
85	87.026	90.32	91.02
90	91.984	95.78	96.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจึงได้ทำการหาคำนวนปรับค่าที่อุปกรณ์เราอ่านได้ให้เท่ากับเครื่องมือมาตรฐานโดยทำการพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบ



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อุปกรณ์อ่านได้เทียบกับเครื่องมือมาตรฐานสายเทอร์โมคัปเปิล A



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อุปกรณ์อ่านได้เทียบกับเครื่องมือมาตรฐานสายเทอร์โมคัปเปิล B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการพล็อตกราฟจากข้อมูลโดยแกนนอนคือค่าจากเครื่องมือของเราและข้อมูลในแกนตั้งคือค่าของเครื่องมือมาตรฐานที่อ่านได้ โดยเราใช้ Least Squares เป็นเทคนิคการทำให้ได้สมการของเส้นที่ลากผ่านจุดที่พล็อตกราฟออกมา พบว่าค่าตัวแปรกำลังสองนั้นมีผลทำให้มีความเป็นเชิงเส้นลดลงเล็กน้อย (non-linear) แต่จะเห็นได้ว่า ตัวแปรกำลังหนึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกความเป็นเชิงเส้นอย่างมาก และค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงว่าสมการที่ได้มานั้นมีความใกล้เคียงกับข้อมูลแต่ละจุดมาก สามารถอธิบายแนวโน้มได้ถูกต้อง มีความน่าเชื่อถือ

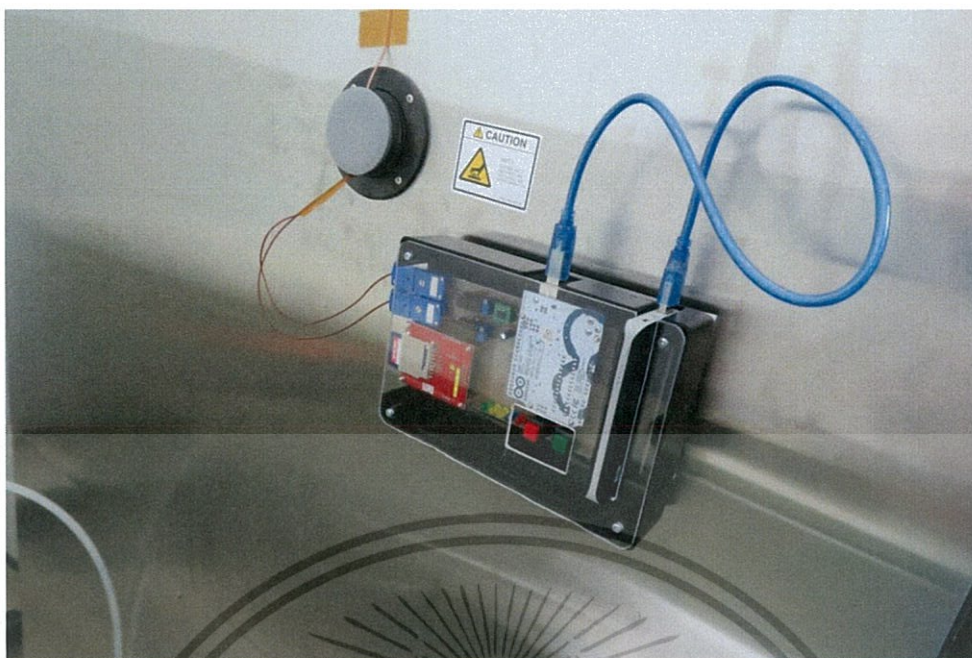
## 4.2 การทดลองใช้งานจริงกับเครื่องจำลองอุณหภูมิและความชื้น ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และที่ความชื้น 85%

เป็นการทดลองใช้งานจริงกับเครื่องจำลองอุณหภูมิและความชื้น ของห้องแล็บโดยเราได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิที่ห้องแล็บใช้คือ 85 °C และที่ความชื้น 85%

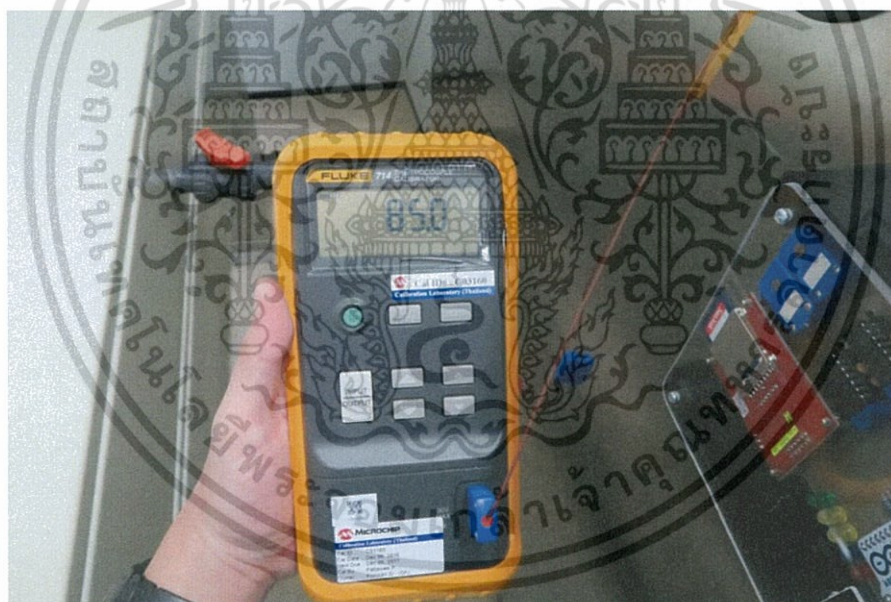


รูปที่ 4.5 ภาพเครื่องจำลองอุณหภูมิและความชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ภาพการใช้งานจริงกับเครื่องจำลองอุณหภูมิและความชื้น



รูปที่ 4.7 ภาพเครื่องมือมาตรฐานในการอ่านค่าอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ค่าที่ได้จากการวัดความจำ

Round	Thermocouple A (Dry bulb sensor)	Thermocouple B (Wet bulb sensor)
1	85.06	81.30
2	85.08	81.31
3	85.07	81.30
4	85.05	81.28
5	85.03	81.29
Average	85.06	81.30

ค่าที่ได้จากสายเทอร์โมคัปเปิล A จะเป็นค่าของอุณหภูมิของเครื่องที่ตั้งไว้ที่ 85 °C และเมื่อนำค่าจากสายทั้งสองคือสายเทอร์โมคัปเปิล A (กระเปาะเปียก) และสายเทอร์โมคัปเปิล B (กระเปาะแห้ง) เมื่อนำมาคำนวณหาความชื้นโดยโปรแกรมของเครื่องจำลองอุณหภูมิเอง จะได้ความชื้นเท่ากับ 85.6% ซึ่งเราได้ทดลองเปรียบเทียบค่ากับกระบวนการแบบเก่าที่ใช้เครื่องอ่านค่าจากเทอร์โมคัปเปิลคือเครื่อง Fluke 714 ที่เป็นเครื่องมือมาตรฐาน พบว่าเครื่อง Fluke 714 อ่านค่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งได้ 85.0 °C และกระเปาะแห้งได้ 81.1 °C เมื่อนำมาคำนวณหาความชื้นจะได้ ความชื้นที่ 85.2% ซึ่งค่าจากเครื่องมือที่เราสร้างขึ้นกับเครื่องมือมาตรฐานถือว่ามีความใกล้เคียงกันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 อภิปรายผล

จากผลการทดลองพบว่าค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์ของเรานั้นมีการคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่เครื่องมาตรฐานวัดได้ ปัจจัยที่ 1 อาจเกิดจากจุดเชื่อมต่อของสายเทอร์โมคัปเปิลกับ ไอซีAD595 มีโลหะอื่นผสมเข้ามา เช่น ตะกั่วที่ใช้ในการบัดกรี แผ่นทองแดงจากแผงบอร์ด ขาโลหะของไอซี และหัวเข้าสายของสายเทอร์โมคัปเปิล และ ปัจจัยที่ 2 อาจเกิดขึ้นจาก ไอซีAD595 นั้นถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับสายเทอร์โมคัปเปิลชนิด K แต่ในงานของเราใช้สายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด T ซึ่งใน ตารางค่าของไอซี AD595 นั้นได้บอกไว้ ว่าสามารถใช้คู่กับสายเทอร์โมคัปเปิล ชนิด T ได้แต่ค่าที่ได้จะคลาดเคลื่อน และต้องปรับแก้ค่า



รูปที่ 4.8 แสดงปัจจัยจากการที่มีโลหะหลายชนิดที่ขาเข้าของอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบค่าระหว่างเครื่องมือมาตรฐานในการสอบเทียบแบบเก่าและเครื่องมือที่เราได้สร้างขึ้นพบว่าการอ่านค่าอุณหภูมิ มีความคลาดเคลื่อนไป 0.07% และการอ่านค่าความชื้นมีความคลาดเคลื่อนไป 0.04% ซึ่งความคลาดเคลื่อนนี้น้อยมากและสามารถใช้เป็นกระบวนการสอบเทียบแบบใหม่ที่ทดแทนแบบเก่าได้ ซึ่งมีข้อดีกว่าแบบเก่าคือความถูกต้องมากขึ้น ความละเอียดของการอ่านค่ามากขึ้น และลดเวลาในการสอบเทียบในแต่ละครั้งได้มากขึ้น

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ก่อนทำการใช้งานเครื่องมือทุกครั้งควรเปิดเครื่องเป็นเวลาอย่างน้อย 10 นาทีเพื่อให้เครื่องพร้อมใช้งาน และควรระวังความชื้นในบางจุดหรือหยดน้ำ ที่อาจหยดลงบนเครื่องมือ อาจทำให้เกิดไฟช็อตกับตัวไอซีได้ และการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิ้ล ไม่ควรให้สายงอหรือหักมากเกินไป เพราะอาจทำให้ค่าที่ได้ผิดพลาดหรือคลาดเคลื่อนไป ซึ่งมีผลต่อการสอบเทียบ



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ทันพงษ์ ภูริรักษ์. ความรู้เกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น. ม.ป.ป. [online].  
เข้าถึงได้จาก :[http://www.sbt.ac.th/new/sites/default/files/TNP\\_Unit\\_1.pdf](http://www.sbt.ac.th/new/sites/default/files/TNP_Unit_1.pdf)
- [2] บทความ Arduino คืออะไร. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก:  
<http://www.thaieasyelec.com/article-wiki/basic-electronics/arduino-arduino.html>
- [3] ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. ผศ.ดร.นวกัทธา หนูนา. **Standard thermocouple / เทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน.** [online]. เข้าถึงได้จาก:  
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6810/standard-thermocouple>
- [4] หลักการและทฤษฎีของเทอร์โมคัปเปิล. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :  
<https://www.pballtechno.com/article/11/A5thermocouple>
- [5] AD595. Analog Devices, Inc. All Rights Reserved [online]. เข้าถึงได้จาก :  
<http://www.analog.com/en/products/amplifiers/specialty-amplifiers/thermocouple-interface-amplifiers/ad595.html#product-overview>
- [6] Embedded Space. ม.ป.ป. [online]. เข้าถึงได้จาก :  
<http://cpre.kmutnb.ac.th/es/learning/index.php?article=arduino-spi-master-slave>
- [7] ADC | Thai Embedded [online]. เข้าถึงได้จาก :  
<http://www.thaiembedded.com/blog/?cat=38>
- [8] Jatuchai. ความรู้เรื่อง I2C ระบบบัสที่มีสัญญาณเพียง 2 เส้น. [online]. เข้าถึงได้จาก :  
<http://www.eclubthai.com/board/index.php?topic=16140.0;wap2>
- [9] Joe Marcin. **Thermocouple Signal Conditioning Using the AD594/AD595.** [online]. เข้าถึงได้จาก :<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-369.pdf>
- [10] MCP3422. © 2009 Microchip Technology Inc. [online]. เข้าถึงได้จาก :  
[ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22088c.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22088c.pdf)
- [11] MCP3422. ©Copyright 1998-2017 Microchip Technology Inc. [online].  
เข้าถึงได้จาก :<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP3422>
- [12] นาวาตรีดร. กฤษฏา แสงเพชรสอง **แนะนำ Kalman Filter Algorithm** [online].  
เข้าถึงได้จาก :[https://www.aimagin.com/downloads/dl/file/id/64/kalman\\_filter.pdf](https://www.aimagin.com/downloads/dl/file/id/64/kalman_filter.pdf)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Code Arduino

```
#include <Wire.h>
#include <SD.h>
#include <SPI.h>
File myFile;
#define MCP3422_ADDRESS 0X68
#define MCP342X_GAIN_FIELD 0X03 // PGA field
#define MCP342X_GAIN_X1 0X00 // PGA gain X1
#define MCP342X_GAIN_X2 0X01 // PGA gain X2
#define MCP342X_GAIN_X4 0X02 // PGA gain X4
#define MCP342X_GAIN_X8 0X03 // PGA gain X8
#define MCP342X_RES_FIELD 0X0C // resolution/rate field
#define MCP342X_RES_SHIFT 2 // shift to low bits
#define MCP342X_12_BIT 0X00 // 12-bit 240 SPS
#define MCP342X_14_BIT 0X04 // 14-bit 60 SPS
#define MCP342X_16_BIT 0X08 // 16-bit 15 SPS
#define MCP342X_18_BIT 0X0C // 18-bit 3.75 SPS
#define MCP342X_CONTINUOUS 0X10 // 1 = continuous, 0 = one-shot
#define MCP342X_CHAN_FIELD 0X60 // channel field
#define MCP342X_CHANNEL_1 0X00 // select MUX channel 1
#define MCP342X_CHANNEL_2 0X20 // select MUX channel 2
#define MCP342X_CHANNEL_3 0X40 // select MUX channel 3
#define MCP342X_CHANNEL_4 0X60 // select MUX channel 4
#define MCP342X_START 0X80 // write: start a conversion
#define MCP342X_BUSY 0X80 // read: output not ready
uint8_t adcConfig = MCP342X_START | MCP342X_CHANNEL_1 | MCP342X_CONTINUOUS;
uint16_t mvDivisor;
const int buttonPin1 = 7; //Switch start
const int ledPin2 = 2; //Green LED Complete
const int ledPin3 = 3; //Yellow LED Recording
const int ledPin4 = 4; //Yellow LED Waiting 30 mins
const int ledPin5 = 5; //Blue LED SD card ok
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

const int ledPin6    = 6; //Red LED SD card Fail or Error
int buttonState1    = 0;
boolean RUN         = 0;
boolean present     = 0;
const int chipSelect = 10;
int Round           = 0 ;
float C1            = 0 ;
float C2            = 0 ;
int mins           = 0 ;
float varVolt1     = 1.12184278324081E-05 ;
float varProcess1  = 1e-8;
float Pc1 = 0.0;
float G1 = 0.0;
float P1 = 1.0;
float Xp1 = 0.0;
float Zp1 = 0.0;
float Xe1 = 0.0;
float TempA = 0.0;
float varVolt2     = 1.12184278324081E-05 ;
float varProcess2  = 1e-8;
float Pc2 = 0.0;
float G2 = 0.0;
float P2 = 1.0;
float Xp2 = 0.0;
float Zp2 = 0.0;
float Xe2 = 0.0;
float TempB = 0.0;

```

```
void checkSD()
```

```

    { Serial.println("check SD card");
      if (!SD.begin(10))
        { Serial.println("Card failed");
          digitalWrite (ledPin6,HIGH);

          return;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
Serial.println("SD card OK");
digitalWrite (ledPin5,HIGH);
present=1;
    delay(2000);
}
void Receive()
{
    adcConfig = MCP342X_START | MCP342X_CHANNEL_1 |
MCP342X_CONTINUOUS;
    int32_t dataCH1;
    uint8_t chanCH1 =0;
    uint8_t gainCH1 =0;
    uint8_t resCH1 =3;
    if (!mcp342xRead(dataCH1, chanCH1, gainCH1, resCH1));
    float mvCH1 = (float)dataCH1/mvDivisor;
    C1 = (float)mvCH1/10;
    Pc1 = P1+ varProcess1;
    G1 = Pc1/(Pc1 + varVolt1);
    P1 = (1-G1)*Pc1;
    Xp1 = Xe1;
    Zp1 = Xp1;
    Xe1 = G1*(C1-Zp1)+Xp1;
    TempA =( -0.0009*(Xe1)*(Xe1)) + (1.0554*(Xe1)) - 1.2583
; // y = -0.0009x2 + 1.0554x - 1.2583

Serial.print(C1);Serial.println(" C <<< CH1 ");
    Serial.print(Xe1);Serial.println(" Xe1 <<< CH2 ");
    delay(20);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

adcConfig = MCP342X_START | MCP342X_CHANNEL_2 |
MCP342X_CONTINUOUS;

int32_t dataCH2;
uint8_t chanCH2 =1;
uint8_t gainCH2 =0;
uint8_t resCH2 =3;

if (!mcp342xRead(dataCH2, chanCH2, gainCH2, resCH2));

float mvCH2 = (float)dataCH2/mvDivisor;
C2 = (float)mvCH2/10;
Pc2 = P2+ varProcess2;
G2 = Pc2/(Pc2 + varVolt2);
P2 = (1-G2)*Pc2;
Xp2 = Xe2;
Zp2 = Xp2;
Xe2 = G2*(C2-Zp2)+Xp2;
TempB =(-0.0008*(Xe2)*(Xe2)) + (1.0371*(Xe2)) - 0.81 ;
//y = -0.0008x2 + 1.0371x - 0.81

Serial.print(C2);Serial.println(" C <<< CH2 ");
Serial.print(Xe2);Serial.println(" Xe2 <<< CH2 ");
}

void writeSD()
{
myFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
if(myFile)
{
myFile.print(Round);
myFile.print(",");
myFile.print(C1);
myFile.print(",");
myFile.print(Xe1);
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

myFile.print(",");
myFile.print(TempA);
myFile.print(",");
myFile.print(C2);
myFile.print(",");
myFile.print(Xe2);
myFile.print(",");
myFile.println(TempB);
myFile.close();
}
}

```

```

uint8_t mcp342xRead(int32_t &data, uint8_t chan, uint8_t gain, uint8_t res)
{
  adcConfig |= chan << 5 | res << 2 | gain;
  mvDivisor = 1 << (gain + 2*res);
  mcp342xWrite(adcConfig);

  uint8_t *p = (uint8_t *)&data;
  uint32_t start = millis();
  do
  {
    Wire.requestFrom(MCP3422_ADDRESS, 4);
    if (Wire.available() != 4)
    {
      Serial.println("read failed");
      return false;
    }

    for (int8_t i = 2; i >= 0; i--)
    {
      p[i] = Wire.read();
    }
  }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

p[3] = p[2] & 0X80 ? 0XFF : 0;
uint8_t s = Wire.read();
if ((s & MCP342X_RES_FIELD) != MCP342X_18_BIT)
{
    p[0] = p[1];
    p[1] = p[2];
    p[2] = p[3];
}
if ((s & MCP342X_BUSY) == 0) return true;
}
while (millis() - start < 500);
Serial.println("read timeout");
return false;
}

```

```

uint8_t mcp342xWrite(uint8_t config)
{
    Wire.beginTransaction(MCP3422_ADDRESS);
    Wire.write(config);
    Wire.endTransmission();
}

```

```

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    Wire.begin();

    pinMode(buttonPin1, INPUT);
    pinMode(ledPin2, OUTPUT);
    pinMode(ledPin3, OUTPUT);
    pinMode(ledPin4, OUTPUT);
    pinMode(ledPin5, OUTPUT);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

pinMode(ledPin6, OUTPUT);

checkSD();

}

void loop()

{
  if(present == 1)
  {
    buttonState1 = digitalRead(buttonPin1);

    if (buttonState1 == HIGH )
    {
      digitalWrite (ledPin5,LOW);
      digitalWrite (ledPin2,LOW);
      myFile = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);
      if(myFile)
      {
        myFile.print("Line");
        myFile.print(",");
        myFile.print("TempA");
        myFile.print(",");
        myFile.println("TempB");
        myFile.close(); }

      RUN = 1 ;
    }
    if (RUN == 1)
    {
      for(int sec =0;sec <=30; sec++)
      {
        digitalWrite (ledPin4,LOW);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาหรับการเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

delay(1000);
digitalWrite (ledPin4,HIGH);
delay(1000);
}
mins ++ ;
Serial.println (mins);

if (mins == 30)
{
  for ( int count = 0; count < 5 ;count++ )
  {
    Receive();
    delay(20);
    Round ++ ;
    writeSD();
    for(int sec =0;sec <=30; sec++)
    {
      digitalWrite (ledPin3,LOW);
      delay(1000);
      digitalWrite (ledPin3,HIGH);
      delay(1000);
    }
  }

  Round = 0;
  RUN = 0;
  mins = 0;
  digitalWrite (ledPin2,HIGH);
  digitalWrite (ledPin3,LOW);
  digitalWrite (ledPin4,LOW);
} } } }

```

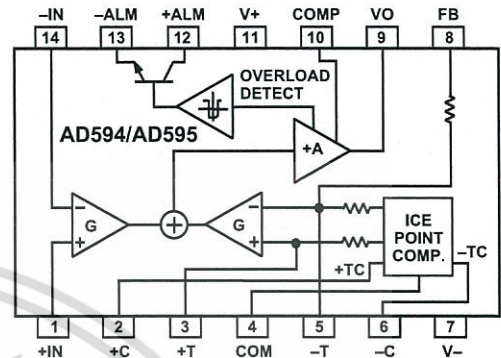
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## AD594/AD595

### FEATURES

**Pretrimmed for Type J (AD594) or  
Type K (AD595) Thermocouples**  
**Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs**  
**Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C**  
**Built-In Ice Point Compensation**  
**Wide Power Supply Range: +5 V to ±15 V**  
**Low Power: <1 mW typical**  
**Thermocouple Failure Alarm**  
**Laser Wafer Trimmed to 1°C Calibration Accuracy**  
**Setpoint Mode Operation**  
**Self-Contained Celsius Thermometer Operation**  
**High Impedance Differential Input**  
**Side-Brazed DIP or Low Cost Cerdip**

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



### PRODUCT DESCRIPTION

The AD594/AD595 is a complete instrumentation amplifier and thermocouple cold junction compensator on a monolithic chip. It combines an ice point reference with a precalibrated amplifier to produce a high level (10 mV/°C) output directly from a thermocouple signal. Pin-strapping options allow it to be used as a linear amplifier-compensator or as a switched output setpoint controller using either fixed or remote setpoint control. It can be used to amplify its compensation voltage directly, thereby converting it to a stand-alone Celsius transducer with a low impedance voltage output.

The AD594/AD595 includes a thermocouple failure alarm that indicates if one or both thermocouple leads become open. The alarm output has a flexible format which includes TTL drive capability.

The AD594/AD595 can be powered from a single ended supply (including +5 V) and by including a negative supply, temperatures below 0°C can be measured. To minimize self-heating, an unloaded AD594/AD595 will typically operate with a total supply current 160 µA, but is also capable of delivering in excess of ±5 mA to a load.

The AD594 is precalibrated by laser wafer trimming to match the characteristic of type J (iron-constantan) thermocouples and the AD595 is laser trimmed for type K (chromel-alumel) inputs. The temperature transducer voltages and gain control resistors

are available at the package pins so that the circuit can be recalibrated for the thermocouple types by the addition of two or three resistors. These terminals also allow more precise calibration for both thermocouple and thermometer applications.

The AD594/AD595 is available in two performance grades. The C and the A versions have calibration accuracies of ±1°C and ±3°C, respectively. Both are designed to be used from 0°C to +50°C, and are available in 14-pin, hermetically sealed, side-brazed ceramic DIPs as well as low cost cerdip packages.

### PRODUCT HIGHLIGHTS

1. The AD594/AD595 provides cold junction compensation, amplification, and an output buffer in a single IC package.
2. Compensation, zero, and scale factor are all precalibrated by laser wafer trimming (LWT) of each IC chip.
3. Flexible pinout provides for operation as a setpoint controller or a stand-alone temperature transducer calibrated in degrees Celsius.
4. Operation at remote application sites is facilitated by low quiescent current and a wide supply voltage range +5 V to dual supplies spanning 30 V.
5. Differential input rejects common-mode noise voltage on the thermocouple leads.

### REV. C

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# AD594/AD595—SPECIFICATIONS (@ +25°C and $V_S = 5\text{ V}$ , Type J (AD594), Type K (AD595) Thermocouple, unless otherwise noted)

Model	AD594A			AD594C			AD595A			AD595C			Units
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
<b>ABSOLUTE MAXIMUM RATING</b>													
$+V_S$ to $-V_S$			36			36			36			36	Volts
Common-Mode Input Voltage	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	$-V_S - 0.15$		$+V_S$	Volts
Differential Input Voltage	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	Volts
<b>Alarm Voltages</b>													
+ALM	$-V_S$		$-V_S + 36$	$-V_S$		$-V_S + 36$	$-V_S$		$-V_S + 36$	$-V_S$		$-V_S + 36$	Volts
-ALM	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	$-V_S$		$+V_S$	Volts
Operating Temperature Range	-55		+125	-55		+125	-55		+125	-55		+125	°C
Output Short Circuit to Common	Indefinite			Indefinite			Indefinite			Indefinite			
<b>TEMPERATURE MEASUREMENT</b> (Specified Temperature Range 0°C to +50°C)													
Calibration Error at +25°C <sup>1</sup>			±3			±1			±3			±1	°C
Stability vs. Temperature <sup>2</sup>			±0.05			±0.025			±0.05			±0.025	°C/°C
Gain Error			±1.5			±0.75			±1.5			±0.75	%
Nominal Transfer Function			10			10			10			10	mV/°C
<b>AMPLIFIER CHARACTERISTICS</b>													
Closed Loop Gain <sup>3</sup>		193.4			193.4			247.3			247.3		
Input Offset Voltage		(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C		(Temperature in °C) × 51.70 μV/°C		(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C		(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C		(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C		(Temperature in °C) × 40.44 μV/°C	μV
Input Bias Current		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1	μA
Differential Input Range	-10		+50	-10		+50	-10		+50	-10		+50	mV
Common-Mode Range	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	$-V_S - 0.15$		$-V_S - 4$	Volts
Common-Mode Sensitivity – RTO			10			10			10			10	mV/V
Power Supply Sensitivity – RTO			10			10			10			10	mV/V
Output Voltage Range													
Dual Supply	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	$-V_S + 2.5$		$+V_S - 2$	Volts
Single Supply	0		$+V_S - 2$	0		$-V_S - 2$	0		$+V_S + 2$	0		$+V_S - 2$	Volts
Usable Output Current <sup>4</sup>		±5		±5		±5		±5		±5		±5	mA
3 dB Bandwidth		15		15		15		15		15		15	kHz
<b>ALARM CHARACTERISTICS</b>													
$V_{CE(SAT)}$ at 2 mA		0.3		0.3		0.3		0.3		0.3		0.3	Volts
Leakage Current			±1			±1			±1			±1	μA max
Operating Voltage at -ALM			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$			$+V_S - 4$	Volts
Short Circuit Current		20		20		20		20		20		20	mA
<b>POWER REQUIREMENTS</b>													
Specified Performance		$+V_S = 5, -V_S = 0$		$+V_S = 5, -V_S = 0$		$+V_S = 5, -V_S = 0$		$+V_S = 5, -V_S = 0$		$+V_S = 5, -V_S = 0$		$+V_S = 5, -V_S = 0$	Volts
Operating <sup>5</sup>		$+V_S$ to $-V_S \leq 30$		$+V_S$ to $-V_S \leq 30$		$+V_S$ to $-V_S \leq 30$		$+V_S$ to $-V_S \leq 30$		$+V_S$ to $-V_S \leq 30$		$+V_S$ to $-V_S \leq 30$	Volts
Quiescent Current (No Load)													
$+V_S$		160	300		160	300		160	300		160	300	μA
$-V_S$		100			100			100			100		μA
<b>PACKAGE OPTION</b>													
TO-116 (D-14)		AD594AD		AD594CD		AD595AD		AD595CD		AD595CD		AD595CQ	
Cerdip (Q-14)		AD594AQ		AD594CQ		AD595AQ		AD595CQ		AD595CQ			

## NOTES

<sup>1</sup>Calibrated for minimum error at +25°C using a thermocouple sensitivity of 51.7 μV/°C. Since a J type thermocouple deviates from this straight line approximation, the AD594 will normally read 3.1 mV when the measuring junction is at 0°C. The AD595 will similarly read 2.7 mV at 0°C.

<sup>2</sup>Defined as the slope of the line connecting the AD594/AD595 errors measured at 0°C and 50°C ambient temperature.

<sup>3</sup>Pin 8 shorted to Pin 9.

<sup>4</sup>Current Sink Capability in single supply configuration is limited to current drawn to ground through a 50 kΩ resistor at output voltages below 2.5 V.

<sup>5</sup> $-V_S$  must not exceed -16.5 V.

Specifications shown in **boldface** are tested on all production units at final electrical test. Results from those tests are used to calculate outgoing quality levels. All min and max specifications are guaranteed, although only those shown in **boldface** are tested on all production units. Specifications subject to change without notice.

## INTERPRETING AD594/AD595 OUTPUT VOLTAGES

To achieve a temperature proportional output of 10 mV/°C and accurately compensate for the reference junction over the rated operating range of the circuit, the AD594/AD595 is gain trimmed to match the transfer characteristic of J and K type thermocouples at 25°C. For a type J output in this temperature range the TC is 51.70 μV/°C, while for a type K it is 40.44 μV/°C. The resulting gain for the AD594 is 193.4 (10 mV/°C divided by 51.7 μV/°C) and for the AD595 is 247.3 (10 mV/°C divided by 40.44 μV/°C). In addition, an absolute accuracy trim induces an input offset to the output amplifier characteristic of 16 μV for the AD594 and 11 μV for the AD595. This offset arises because the AD594/AD595 is trimmed for a 250 mV output while applying a 25°C thermocouple input.

Because a thermocouple output voltage is nonlinear with respect to temperature, and the AD594/AD595 linearly amplifies the

compensated signal, the following transfer functions should be used to determine the actual output voltages:

$$AD594 \text{ output} = (\text{Type J Voltage} + 16 \mu\text{V}) \times 193.4$$

$$AD595 \text{ output} = (\text{Type K Voltage} + 11 \mu\text{V}) \times 247.3 \text{ or conversely:}$$

$$\text{Type J voltage} = (AD594 \text{ output}/193.4) - 16 \mu\text{V}$$

$$\text{Type K voltage} = (AD595 \text{ output}/247.3) - 11 \mu\text{V}$$

Table I lists the ideal AD594/AD595 output voltages as a function of Celsius temperature for type J and K ANSI standard thermocouples, with the package and reference junction at 25°C. As is normally the case, these outputs are subject to calibration, gain and temperature sensitivity errors. Output values for intermediate temperatures can be interpolated, or calculated using the output equations and ANSI thermocouple voltage tables referred to zero degrees Celsius. Due to a slight variation in alloy content between ANSI type J and DIN FE-CUNI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Table I. Output Voltage vs. Thermocouple Temperature (Ambient +25°C,  $V_S = -5\text{ V}, +15\text{ V}$ )**

Thermocouple Temperature °C	Type J Voltage mV	AD594 Output mV	Type K Voltage mV	AD595 Output mV
-200	-7.890	-1523	-5.891	-1454
-180	-7.402	-1428	-5.550	-1370
-160	-6.821	-1316	-5.141	-1269
-140	-6.159	-1188	-4.669	-1152
-120	-5.426	-1046	-4.138	-1021
-100	-4.632	-893	-3.553	-876
-80	-3.785	-729	-2.920	-719
-60	-2.892	-556	-2.243	-552
-40	-1.960	-376	-1.527	-375
-20	-0.995	-189	-0.777	-189
-10	-0.501	-94	-0.392	-94
0	0	3.1	0	2.7
10	0.507	101	0.397	101
20	1.019	200	0.798	200
25	1.277	250	1.000	250
30	1.536	300	1.203	300
40	2.058	401	1.611	401
50	2.585	503	2.022	503
60	3.115	606	2.436	605
80	4.186	813	3.266	810
100	5.268	1022	4.095	1015
120	6.359	1233	4.919	1219
140	7.457	1445	5.733	1420
160	8.560	1659	6.539	1620
180	9.667	1873	7.338	1817
200	10.777	2087	8.137	2015
220	11.887	2302	8.938	2213
240	12.998	2517	9.745	2413
260	14.108	2732	10.560	2614
280	15.217	2946	11.381	2817
300	16.325	3160	12.207	3022
320	17.432	3374	13.039	3227
340	18.537	3588	13.874	3434
360	19.640	3801	14.712	3641
380	20.743	4015	15.552	3849
400	21.846	4228	16.395	4057
420	22.949	4441	17.241	4266
440	24.054	4655	18.088	4476
460	25.161	4869	18.938	4686
480	26.272	5084	19.788	4896

thermocouples Table I should not be used in conjunction with European standard thermocouples. Instead the transfer function given previously and a DIN thermocouple table should be used. ANSI type K and DIN NiCr-Ni thermocouples are composed

### SINGLE AND DUAL SUPPLY CONNECTIONS

The AD594/AD595 is a completely self-contained thermocouple conditioner. Using a single +5 V supply the interconnections shown in Figure 1 will provide a direct output from a type J thermocouple (AD594) or type K thermocouple (AD595) measuring from 0°C to +300°C.

Any convenient supply voltage from +5 V to +30 V may be used, with self-heating errors being minimized at lower supply levels. In the single supply configuration the +5 V supply connects to Pin 11 with the V- connection at Pin 7 strapped to power and signal common at Pin 4. The thermocouple wire inputs connect to Pins 1 and 14 either directly from the measuring point or through intervening connections of similar thermocouple wire type. When the alarm output at Pin 13 is not used it should be connected to common or -V. The precalibrated feedback network at Pin 8 is tied to the output at Pin 9 to provide a 10 mV/°C nominal temperature transfer characteristic.

By using a wider ranging dual supply, as shown in Figure 2, the AD594/AD595 can be interfaced to thermocouples measuring both negative and extended positive temperatures.

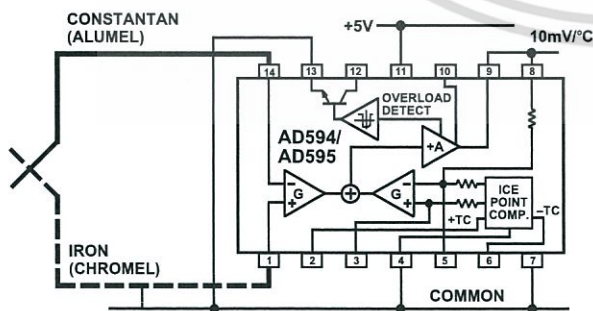


Figure 1. Basic Connection, Single Supply Operation

of identical alloys and exhibit similar behavior. The upper temperature limits in Table I are those recommended for type J and type K thermocouples by the majority of vendors.

# AD594/AD595

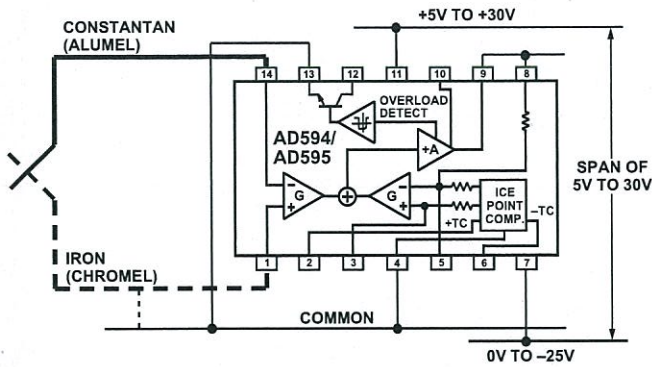


Figure 2. Dual Supply Operation

With a negative supply the output can indicate negative temperatures and drive grounded loads or loads returned to positive voltages. Increasing the positive supply from 5 V to 15 V extends the output voltage range well beyond the 750°C temperature limit recommended for type J thermocouples (AD594) and the 1250°C for type K thermocouples (AD595).

Common-mode voltages on the thermocouple inputs must remain within the common-mode range of the AD594/AD595, with a return path provided for the bias currents. If the thermocouple is not remotely grounded, then the dotted line connections in Figures 1 and 2 are recommended. A resistor may be needed in this connection to assure that common-mode voltages induced in the thermocouple loop are not converted to normal mode.

## THERMOCOUPLE CONNECTIONS

The isothermal terminating connections of a pair of thermocouple wires forms an effective reference junction. This junction must be kept at the same temperature as the AD594/AD595 for the internal cold junction compensation to be effective.

A method that provides for thermal equilibrium is the printed circuit board connection layout illustrated in Figure 3.

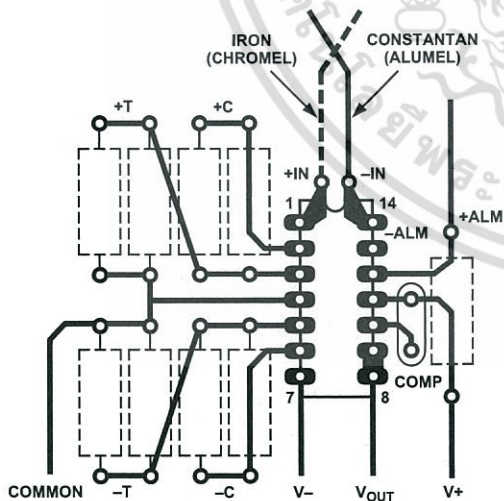


Figure 3. PCB Connections

Here the AD594/AD595 package temperature and circuit board are thermally contacted in the copper printed circuit board tracks under Pins 1 and 14. The reference junction is now composed of a copper-constantan (or copper-alumel) connection and copper-iron (or copper-chromel) connection, both of which are at the same temperature as the AD594/AD595.

The printed circuit board layout shown also provides for placement of optional alarm load resistors, recalibration resistors and a compensation capacitor to limit bandwidth.

To ensure secure bonding the thermocouple wire should be cleaned to remove oxidation prior to soldering. Noncorrosive rosin flux is effective with iron, constantan, chromel and alumel and the following solders: 95% tin-5% antimony, 95% tin-5% silver or 90% tin-10% lead.

## FUNCTIONAL DESCRIPTION

The AD594 behaves like two differential amplifiers. The outputs are summed and used to control a high gain amplifier, as shown in Figure 4.

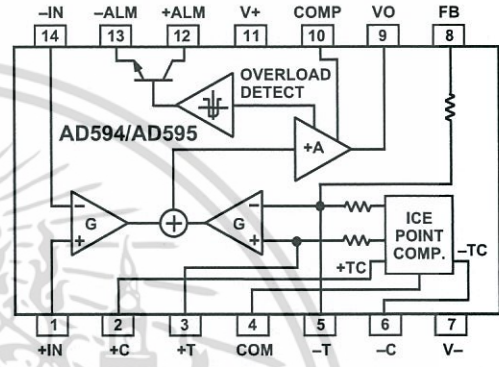


Figure 4. AD594/AD595 Block Diagram

In normal operation the main amplifier output, at Pin 9, is connected to the feedback network, at Pin 8. Thermocouple signals applied to the floating input stage, at Pins 1 and 14, are amplified by gain G of the differential amplifier and are then further amplified by gain A in the main amplifier. The output of the main amplifier is fed back to a second differential stage in an inverting connection. The feedback signal is amplified by this stage and is also applied to the main amplifier input through a summing circuit. Because of the inversion, the amplifier causes the feedback to be driven to reduce this difference signal to a small value. The two differential amplifiers are made to match and have identical gains, G. As a result, the feedback signal that must be applied to the right-hand differential amplifier will precisely match the thermocouple input signal when the difference signal has been reduced to zero. The feedback network is trimmed so that the effective gain to the output, at Pins 8 and 9, results in a voltage of 10 mV/°C of thermocouple excitation.

In addition to the feedback signal, a cold junction compensation voltage is applied to the right-hand differential amplifier. The compensation is a differential voltage proportional to the Celsius temperature of the AD594/AD595. This signal disturbs the differential input so that the amplifier output must adjust to restore the input to equal the applied thermocouple voltage.

The compensation is applied through the gain scaling resistors so that its effect on the main output is also 10 mV/°C. As a result, the compensation voltage adds to the effect of the thermocouple voltage a signal directly proportional to the difference between 0°C and the AD594/AD595 temperature. If the thermocouple reference junction is maintained at the AD594/AD595 temperature, the output of the AD594/AD595 will correspond to the reading that would have been obtained from amplification of a signal from a thermocouple referenced to an ice bath.

The AD594/AD595 also includes an input open circuit detector that switches on an alarm transistor. This transistor is actually a current-limited output buffer, but can be used up to the limit as a switch transistor for either pull-up or pull-down operation of external alarms.

The ice point compensation network has voltages available with positive and negative temperature coefficients. These voltages may be used with external resistors to modify the ice point compensation and recalibrate the AD594/AD595 as described in the next column.

The feedback resistor is separately pinned out so that its value can be padded with a series resistor, or replaced with an external resistor between Pins 5 and 9. External availability of the feedback resistor allows gain to be adjusted, and also permits the AD594/AD595 to operate in a switching mode for setpoint operation.

#### CAUTIONS:

The temperature compensation terminals (+C and -C) at Pins 2 and 6 are provided to supply small calibration currents only. The AD594/AD595 may be permanently damaged if they are grounded or connected to a low impedance.

The AD594/AD595 is internally frequency compensated for feedback ratios (corresponding to normal signal gain) of 75 or more. If a lower gain is desired, additional frequency compensation should be added in the form of a 300 pF capacitor from Pin 10 to the output at Pin 9. As shown in Figure 5 an additional 0.01  $\mu$ F capacitor between Pins 10 and 11 is recommended.

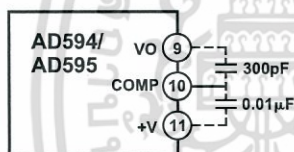


Figure 5. Low Gain Frequency Compensation

#### RECALIBRATION PRINCIPLES AND LIMITATIONS

The ice point compensation network of the AD594/AD595 produces a differential signal which is zero at 0°C and corresponds to the output of an ice referenced thermocouple at the temperature of the chip. The positive TC output of the circuit is proportional to Kelvin temperature and appears as a voltage at +T. It is possible to decrease this signal by loading it with a resistor from +T to COM, or increase it with a pull-up resistor from +T to the larger positive TC voltage at +C. Note that adjustments to +T should be made by measuring the voltage which tracks it at -T. To avoid destabilizing the feedback amplifier the measuring instrument should be isolated by a few thousand ohms in series with the lead connected to -T.

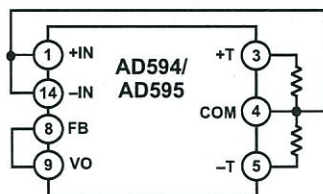


Figure 6. Decreased Sensitivity Adjustment

Changing the positive TC half of the differential output of the compensation scheme shifts the zero point away from 0°C. The zero can be restored by adjusting the current flow into the negative input of the feedback amplifier, the -T pin. A current into

this terminal can be produced with a resistor between -C and -T to balance an increase in +T, or a resistor from -T to COM to offset a decrease in +T.

If the compensation is adjusted substantially to accommodate a different thermocouple type, its effect on the final output voltage will increase or decrease in proportion. To restore the nominal output to 10 mV/°C the gain may be adjusted to match the new compensation and thermocouple input characteristics. When reducing the compensation the resistance between -T and COM automatically increases the gain to within 0.5% of the correct value. If a smaller gain is required, however, the nominal 47 k $\Omega$  internal feedback resistor can be paralleled or replaced with an external resistor.

Fine calibration adjustments will require temperature response measurements of individual devices to assure accuracy. Major reconfigurations for other thermocouple types can be achieved without seriously compromising initial calibration accuracy, so long as the procedure is done at a fixed temperature using the factory calibration as a reference. It should be noted that intermediate recalibration conditions may require the use of a negative supply.

#### EXAMPLE: TYPE E RECALIBRATION—AD594/AD595

Both the AD594 and AD595 can be configured to condition the output of a type E (chromel-constantan) thermocouple. Temperature characteristics of type E thermocouples differ less from type J, than from type K, therefore the AD594 is preferred for recalibration.

While maintaining the device at a constant temperature follow the recalibration steps given here. First, measure the device temperature by tying both inputs to common (or a selected common-mode potential) and connecting FB to VO. The AD594 is now in the stand alone Celsius thermometer mode. For this example assume the ambient is 24°C and the initial output VO is 240 mV. Check the output at VO to verify that it corresponds to the temperature of the device.

Next, measure the voltage -T at Pin 5 with a high impedance DVM (capacitance should be isolated by a few thousand ohms of resistance at the measured terminals). At 24°C the -T voltage will be about 8.3 mV. To adjust the compensation of an AD594 to a type E thermocouple a resistor, R1, should be connected between +T and +C, Pins 2 and 3, to raise the voltage at -T by the ratio of thermocouple sensitivities. The ratio for converting a type J device to a type E characteristic is:

$$r (AD594) = (60.9 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) / (51.7 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) = 1.18$$

Thus, multiply the initial voltage measured at -T by  $r$  and experimentally determine the R1 value required to raise -T to that level. For the example the new -T voltage should be about 9.8 mV. The resistance value should be approximately 1.8 k $\Omega$ .

The zero differential point must now be shifted back to 0°C. This is accomplished by multiplying the original output voltage VO by  $r$  and adjusting the measured output voltage to this value by experimentally adding a resistor, R2, between -C and -T, Pins 5 and 6. The target output value in this case should be about 283 mV. The resistance value of R2 should be approximately 240 k $\Omega$ .

Finally, the gain must be recalibrated such that the output VO indicates the device's temperature once again. Do this by adding a third resistor, R3, between FB and -T, Pins 8 and 5. VO should now be back to the initial 240 mV reading. The resistance value

# AD594/AD595

of R3 should be approximately 280 kΩ. The final connection diagram is shown in Figure 7. An approximate verification of the effectiveness of recalibration is to measure the differential gain to the output. For type E it should be 164.2.

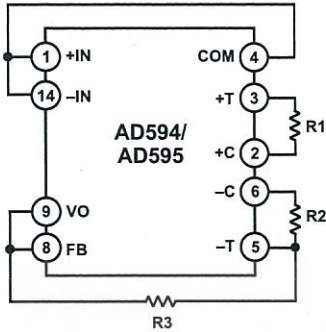


Figure 7. Type E Recalibration

When implementing a similar recalibration procedure for the AD595 the values for R1, R2, R3 and r will be approximately 650 Ω, 84 kΩ, 93 kΩ and 1.51, respectively. Power consumption will increase by about 50% when using the AD595 with type E inputs.

Note that during this procedure it is crucial to maintain the AD594/AD595 at a stable temperature because it is used as the temperature reference. Contact with fingers or any tools not at ambient temperature will quickly produce errors. Radiational heating from a change in lighting or approach of a soldering iron must also be guarded against.

### USING TYPE T THERMOCOUPLES WITH THE AD595

Because of the similarity of thermal EMFs in the 0°C to +50°C range between type K and type T thermocouples, the AD595 can be directly used with both types of inputs. Within this ambient temperature range the AD595 should exhibit no more than an additional 0.2°C output calibration error when used with type T inputs. The error arises because the ice point compensator is trimmed to type K characteristics at 25°C. To calculate the AD595 output values over the recommended -200°C to +350°C range for type T thermocouples, simply use the ANSI thermocouple voltages referred to 0°C and the output equation given on page 2 for the AD595. Because of the relatively large nonlinearities associated with type T thermocouples the output will deviate widely from the nominal 10 mV/°C. However, cold junction compensation over the rated 0°C to +50°C ambient will remain accurate.

### STABILITY OVER TEMPERATURE

Each AD594/AD595 is tested for error over temperature with the measuring thermocouple at 0°C. The combined effects of cold junction compensation error, amplifier offset drift and gain error determine the stability of the AD594/AD595 output over the rated ambient temperature range. Figure 8 shows an AD594/AD595 drift error envelope. The slope of this figure has units of °C/°C.

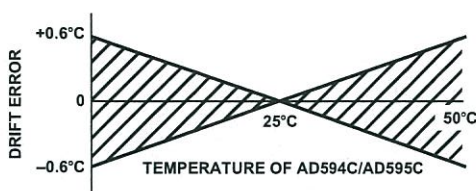


Figure 8. Drift Error vs. Temperature

### THERMAL ENVIRONMENT EFFECTS

The inherent low power dissipation of the AD594/AD595 and the low thermal resistance of the package make self-heating errors almost negligible. For example, in still air the chip to ambient thermal resistance is about 80°C/watt (for the D package). At the nominal dissipation of 800 μW the self-heating in free air is less than 0.065°C. Submerged in fluorinert liquid (unstirred) the thermal resistance is about 40°C/watt, resulting in a self-heating error of about 0.032°C.

### SETPOINT CONTROLLER

The AD594/AD595 can readily be connected as a setpoint controller as shown in Figure 9.

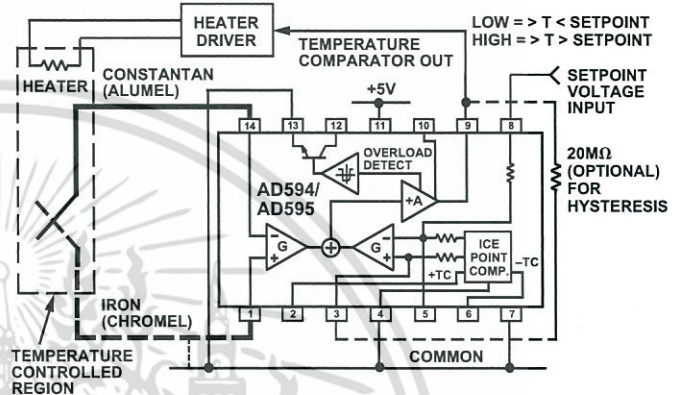


Figure 9. Setpoint Controller

The thermocouple is used to sense the unknown temperature and provide a thermal EMF to the input of the AD594/AD595. The signal is cold junction compensated, amplified to 10 mV/°C and compared to an external setpoint voltage applied by the user to the feedback at Pin 8. Table I lists the correspondence between setpoint voltage and temperature, accounting for the nonlinearity of the measurement thermocouple. If the setpoint temperature range is within the operating range (-55°C to +125°C) of the AD594/AD595, the chip can be used as the transducer for the circuit by shorting the inputs together and utilizing the nominal calibration of 10 mV/°C. This is the centigrade thermometer configuration as shown in Figure 13.

In operation if the setpoint voltage is above the voltage corresponding to the temperature being measured the output swings low to approximately zero volts. Conversely, when the temperature rises above the setpoint voltage the output switches to the positive limit of about 4 volts with a +5 V supply. Figure 9 shows the setpoint comparator configuration complete with a heater element driver circuit being controlled by the AD594/AD595 toggled output. Hysteresis can be introduced by injecting a current into the positive input of the feedback amplifier when the output is toggled high. With an AD594 about 200 nA into the +T terminal provides 1°C of hysteresis. When using a single 5 V supply with an AD594, a 20 MΩ resistor from V<sub>O</sub> to +T will supply the 200 nA of current when the output is forced high (about 4 V). To widen the hysteresis band decrease the resistance connected from V<sub>O</sub> to +T.

**ALARM CIRCUIT**

In all applications of the AD594/AD595 the -ALM connection, Pin 13, should be constrained so that it is not more positive than  $(V+) - 4\text{ V}$ . This can be most easily achieved by connecting Pin 13 to either common at Pin 4 or  $V-$  at Pin 7. For most applications that use the alarm signal, Pin 13 will be grounded and the signal will be taken from +ALM on Pin 12. A typical application is shown in Figure 10.

In this configuration the alarm transistor will be off in normal operation and the 20 k pull up will cause the +ALM output on Pin 12 to go high. If one or both of the thermocouple leads are interrupted, the +ALM pin will be driven low. As shown in Figure 10 this signal is compatible with the input of a TTL gate which can be used as a buffer and/or inverter.

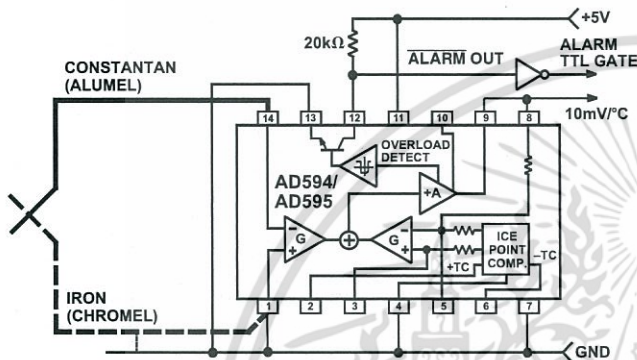


Figure 10. Using the Alarm to Drive a TTL Gate ("Grounded" Emitter Configuration)

Since the alarm is a high level output it may be used to directly drive an LED or other indicator as shown in Figure 11.

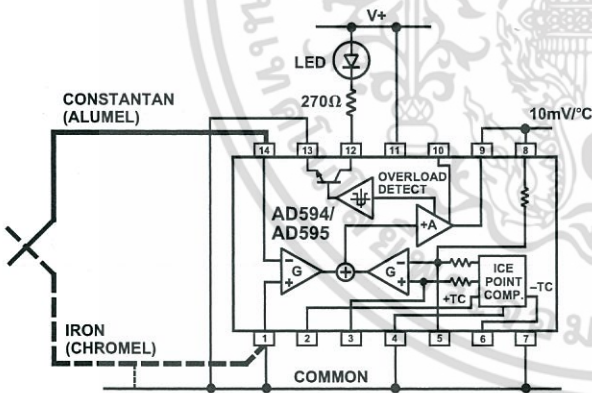


Figure 11. Alarm Directly Drives LED

A 270  $\Omega$  series resistor will limit current in the LED to 10 mA, but may be omitted since the alarm output transistor is current limited at about 20 mA. The transistor, however, will operate in a high dissipation mode and the temperature of the circuit will rise well above ambient. Note that the cold junction compensation will be affected whenever the alarm circuit is activated. The time required for the chip to return to ambient temperature will depend on the power dissipation of the alarm circuit, the nature of the thermal path to the environment and the alarm duration.

The alarm can be used with both single and dual supplies. It can be operated above or below ground. The collector and emitter of the output transistor can be used in any normal switch configuration. As an example a negative referenced load can be driven from -ALM as shown in Figure 12.

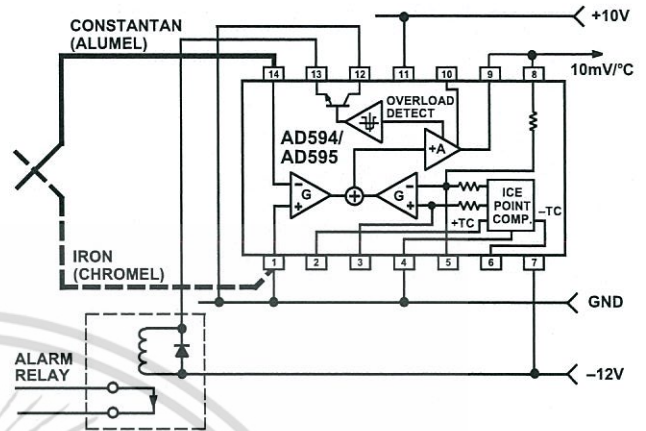


Figure 12. -ALM Driving A Negative Referenced Load

The collector (+ALM) should not be allowed to become more positive than  $(V-) + 36\text{ V}$ , however, it may be permitted to be more positive than  $V+$ . The emitter voltage (-ALM) should be constrained so that it does not become more positive than 4 volts below the  $V+$  applied to the circuit.

Additionally, the AD594/AD595 can be configured to produce an extreme upscale or downscale output in applications where an extra signal line for an alarm is inappropriate. By tying either of the thermocouple inputs to common most runaway control conditions can be automatically avoided. A +IN to common connection creates a downscale output if the thermocouple opens, while connecting -IN to common provides an upscale output.

**CELSIUS THERMOMETER**

The AD594/AD595 may be configured as a stand-alone Celsius thermometer as shown in Figure 13.

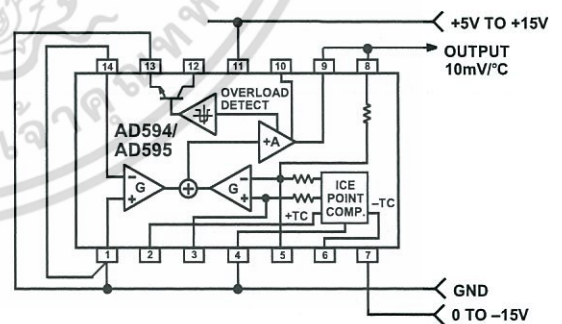


Figure 13. AD594/AD595 as a Stand-Alone Celsius Thermometer

Simply omit the thermocouple and connect the inputs (Pins 1 and 14) to common. The output now will reflect the compensation voltage and hence will indicate the AD594/AD595 temperature with a scale factor of 10 mV/ $^{\circ}\text{C}$ . In this three terminal, voltage output, temperature sensing mode, the AD594/AD595 will operate over the full military  $-55^{\circ}\text{C}$  to  $+125^{\circ}\text{C}$  temperature range.

## THERMOCOUPLE BASICS

Thermocouples are economical and rugged; they have reasonably good long-term stability. Because of their small size, they respond quickly and are good choices where fast response is important. They function over temperature ranges from cryogenics to jet-engine exhaust and have reasonable linearity and accuracy.

Because the number of free electrons in a piece of metal depends on both temperature and composition of the metal, two pieces of dissimilar metal in isothermal and contact will exhibit a potential difference that is a repeatable function of temperature, as shown in Figure 14. The resulting voltage depends on the temperatures, T1 and T2, in a repeatable way.

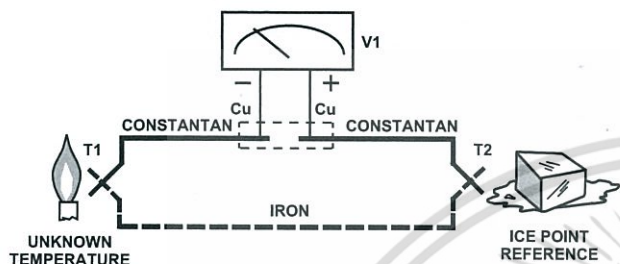


Figure 14. Thermocouple Voltage with 0°C Reference

Since the thermocouple is basically a differential rather than absolute measuring device, a known reference temperature is required for one of the junctions if the temperature of the other is to be inferred from the output voltage. Thermocouples made of specially selected materials have been exhaustively characterized in terms of voltage versus temperature compared to primary temperature standards. Most notably the water-ice point of 0°C is used for tables of standard thermocouple performance.

An alternative measurement technique, illustrated in Figure 15, is used in most practical applications where accuracy requirements do not warrant maintenance of primary standards. The reference junction temperature is allowed to change with the environment of the measurement system, but it is carefully measured by some type of absolute thermometer. A measurement of the thermocouple voltage combined with a knowledge of the reference temperature can be used to calculate the measurement junction temperature. Usual practice, however, is to use a convenient thermoelectric method to measure the reference temperature

and to arrange its output voltage so that it corresponds to a thermocouple referred to 0°C. This voltage is simply added to the thermocouple voltage and the sum then corresponds to the standard voltage tabulated for an ice-point referenced thermocouple.

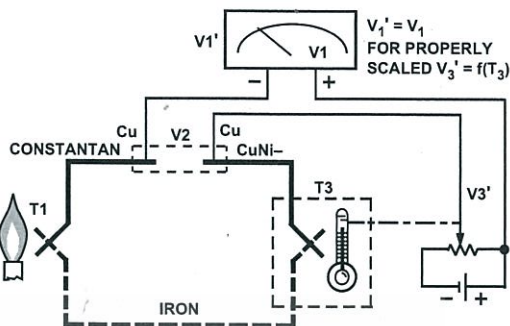


Figure 15. Substitution of Measured Reference Temperature for Ice Point Reference

The temperature sensitivity of silicon integrated circuit transistors is quite predictable and repeatable. This sensitivity is exploited in the AD594/AD595 to produce a temperature related voltage to compensate the reference of "cold" junction of a thermocouple as shown in Figure 16.

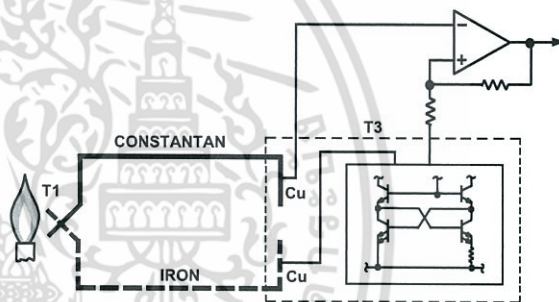


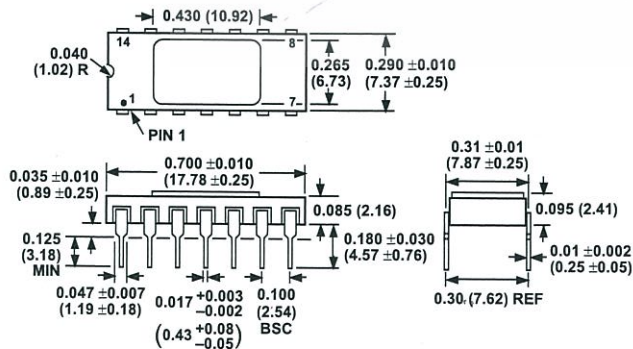
Figure 16. Connecting Isothermal Junctions

Since the compensation is at the reference junction temperature, it is often convenient to form the reference "junction" by connecting directly to the circuit wiring. So long as these connections and the compensation are at the same temperature no error will result.

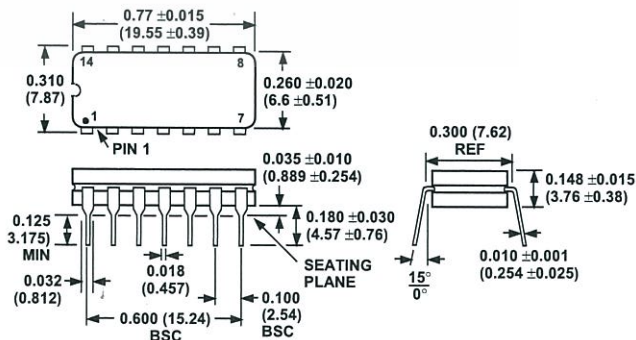
## OUTLINE DIMENSIONS

Dimensions shown in inches and (mm).

### TO-116 (D) Package



### Cerdip (Q) Package





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

