เซ็นเซอร์ หรือ ทรานสดิวเซอร์ (Sensors or Transducers)

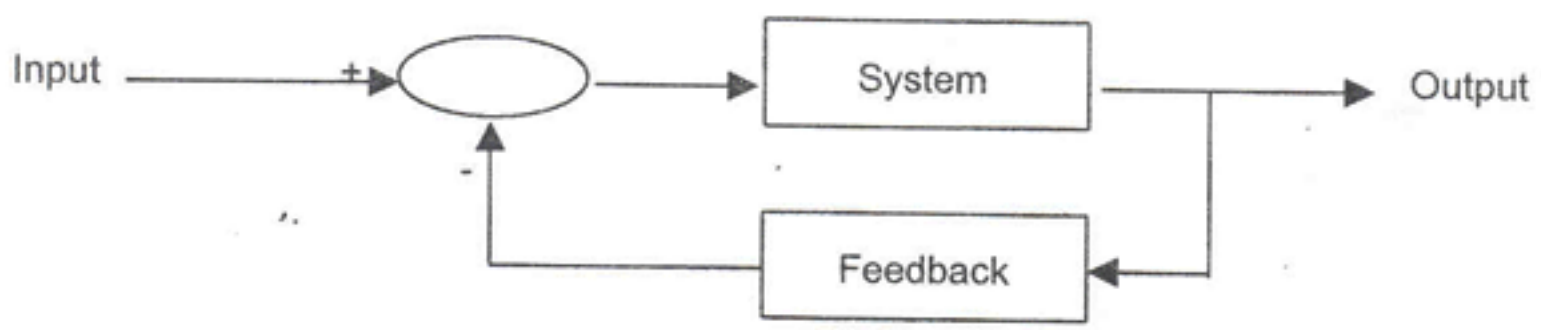
แปลและเรียบเรียงโดย

นาวาโท สมมารถ ภูมาระบี่

นาวสาวรี สิทธิรักษ์ พรเกษี

บทนำ

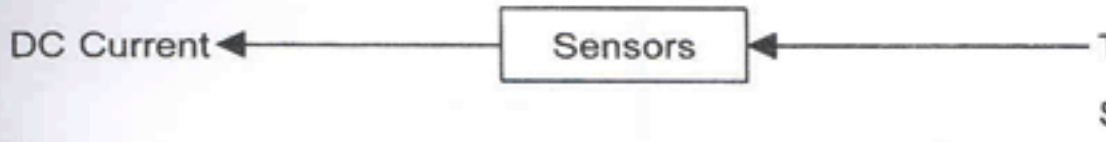
สำหรับระบบควบคุมที่ต้องการค่าความถูกต้องแน่นอนมาก ๆ จะต้องใช้ระบบควบคุมแบบปิด (Closed Loop Control System) คือจะมีการวัดค่าความผิดพลาดให้มีค่าน้อยที่สุดหรือได้ตามที่กำหนดไว้ โดยจะมีเครื่องมือวัดค่าความคลาดเคลื่อนในส่วน Feedback ที่เรียกว่าเซนเซอร์หรือ ทรานสดิวเซอร์ (Sensor or Transducer)



รูปที่ ๑. แผนผังวงจรควบคุมแบบปิด

เซ็นเซอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนค่าที่ทำการวัดในลักษณะต่าง ๆ เช่น การไหลของของเหลว อุณหภูมิ ศวามชื้น เป็นต้น แล้วเปลี่ยนค่าที่วัดได้ให้เป็นค่าทางไฟฟ้าหรือแรงดันในรูปแบบไฟฟ้ากระแสตรง (DC Current) ตัวอย่างเช่น การวัดค่าอุณหภูมิที่ยอดสูบเครื่องยนต์ขับเคลื่อนเรือ จะใช้ Temperature-sensor ที่เรียกว่า Thermocouple ทำการวัดค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นแล้วเปลี่ยนค่าความร้อนที่ได้ให้เป็นค่ากระแสไฟฟ้าหรือแรงดันแล้วส่งมาให้ระบบควบคุม เพื่อทำการเปรียบเทียบค่ากระแสหรือแรงดันที่ส่งมากับค่าที่เป็นเกณฑ์อ้างอิงที่อยู่ในส่วนควบคุมเครื่องจักร เมื่อใดที่พบว่าค่าที่ได้เกินเกณฑ์ที่กำหนดก็จะมีระบบเตือน เช่น อุณหภูมิสูงเกินที่กำหนด เพื่อให้เจ้าหน้าที่ดำเนินการแก้ไขป้องกันอันตราย

โดยทั่วไปสัญญาณที่ออกจากเซ็นเซอร์ (Output) เป็นสัญญาณทางไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนทางด้านเข้า (Input) ก็จะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องมือนั้นๆ ดังรูป



ต่อจากนี้จะเป็นการอธิบายหลักการทำงานของเครื่องมือชนิดนี้โดยจะแบ่งออกตามวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น ใช้เพื่อวัดค่าอุณหภูมิ เป็นต้น

เซ็นเซอร์สำหรับวัดค่าอุณหภูมิ (Temperature Sensor)

เซ็นเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิจะใช้สำหรับระบบที่ต้องการความถูกต้องทางอุณหภูมิหรือกล่าวอีกอย่างว่าใช้อุณหภูมิในกระบวนการควบคุมนั่นเอง เราสามารถใช้หลักการกำหนดความแตกต่างที่เกิดตามธรรมชาติเกี่ยวกับอุณหภูมิ คือ ความร้อนจะไหลเข้าสู่ที่เย็นกว่าเสมอมาทำการสร้างเครื่องมือชนิดนี้

โดยทั่วไปหน่วยของอุณหภูมิที่ใช้จะมีอยู่ ๓ หน่วย คือ

๑. องศาเซลเซียส (^{0}C) มีจุดเดือดที่ ๑๐๐ องศาเซลเซียส์ และจุดเยือกแข็งที่ ๐ องศาเซลเซียส

๒. องศาฟาเรนไฮน์ (^{0}F) มีจุดเดือดที่ ๒๑๒ องศาฟาเรนไฮน์ และจุดเยือกแข็งที่ ๓๒ องศาฟาเรนไฮน์

๓. องศาเคลวิน (K) มีจุดเดือดที่ ๓๗๓ องศาเคลวิน และจุดเยือกแข็งที่ ๒๗๓ องศาเคลวิน

สำหรับแบบของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าอุณหภูมิมีอยู่หลายแบบ แต่จะกล่าวเพียงสองแบบที่นิยมใช้ คือ แบบทางการกล และแบบทางไฟฟ้า

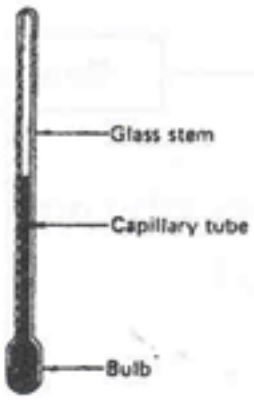
เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบทางการกล (Mechanical Temperature Sensing)

เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบทางการกลจะใช้หลักการวัดค่าอัตราการขยายตัวและหดตัว (ปริมาตรที่เปลี่ยน) ของสารที่นำมาใช้ซึ่งอาจจะเป็น ปรอท ก๊าซ หรือ ของแข็ง ก็ได้ สารเหล่านี้เมื่อได้รับความร้อน เช่น สารปรอท ความร้อนจะทำให้สารปรอทเกิดการขยายตัวเพิ่มขึ้นในอัตราการขยายตัว ๐.๐๑% ต่อ 1 ^{0}F หรือ แอลกอฮอล์ จะมีอัตราการขยายตัว ๐.๐๗% ต่อ 1 ^{0}F (๐.๑% ต่อ 1 ^{0}C)

ชนิดของเครื่องมือแบบทางการกล

แบบหลอดแก้วตรง (Glass-Stem Thermometer)

แบบหลอดแก้วตรงนี้จะเป็นแบบดั้งเดิม โดยใช้วิธีการบรรจุของเหลวจำพวกปรอทหรือก๊าซใส่ลงในหลอดแก้วที่สร้างเป็นหลอดแก้วตรงเรียวและมีกระเปาะสำหรับบรรจุของเหลว หรือก๊าซที่ตอนปลายส่วนล่างดังรูป

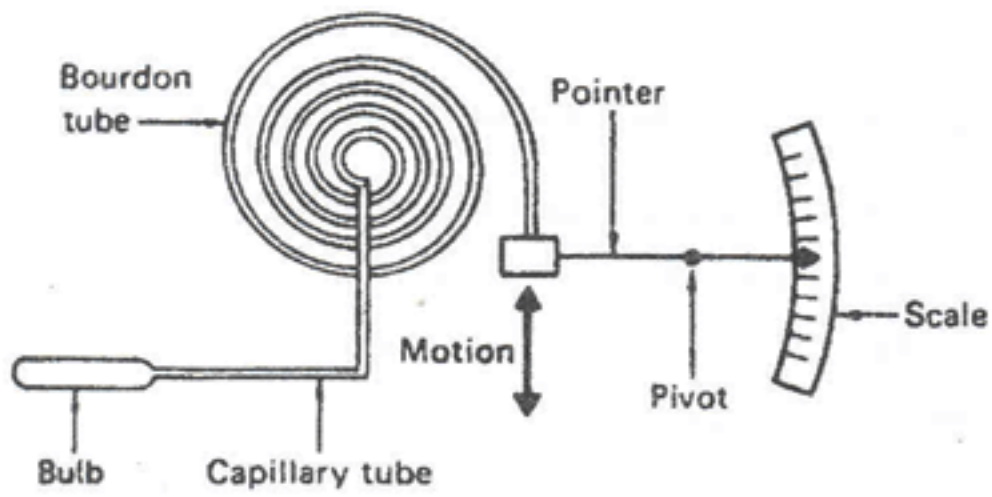


รูปที่ ๒. Glass-Stem Thermocouple

เมื่อใดที่มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้สารที่บรรจุอยู่ขยายตัวโดยจะมีการเทียบอัตราส่วนที่กำหนด ข้างหลอดแก้วไว้เรียบร้อยแล้ว เครื่องมือวัดแบบนี้ยังคงมีใช้อยู่ในปัจจุบันแต่ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในระบบ ควบคุมเพราะยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่มาก ส่วนใหญ่จะนิยมใช้ในทางการแพทย์

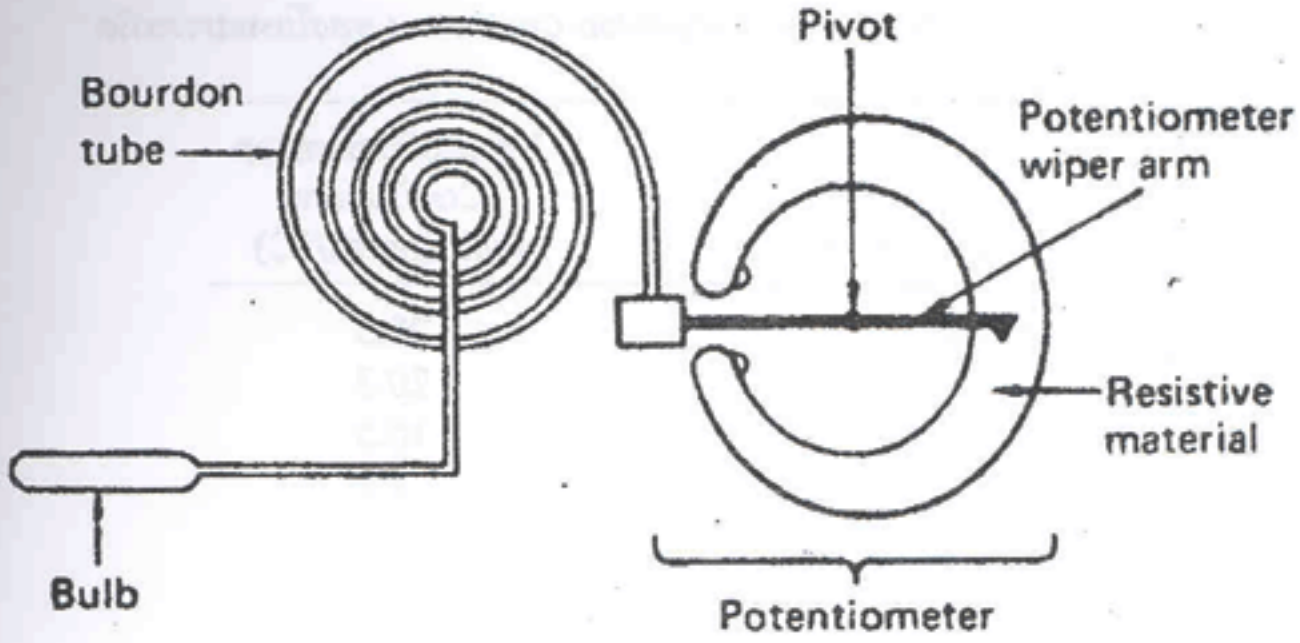
แบบท่อก้นหอย (Filled-System Thermometer)

ใช้หลักการเช่นเดียวกับแบบหลอดแก้วตรง แต่จะมีส่วนที่เรียกว่ากระเปาะ (Bulb) เป็นส่วนที่จะใส่ ไว้ในส่วนที่ต้องการวัดค่าอุณหภูมิ ภายในกระเปาะจะบรรจุของเหลวหรือก๊าซ เมื่อมีความร้อน ของเหลวหรือ ก๊าซจะขยายตัวเข้ามาในท่อก้นหอยที่ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งจะต่ออยู่กับส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (ดังรูปที่ ๓) เกิดการขยายตัว ทำให้เข็มเกิดการเคลื่อนที่เช่นกัน



รูปที่ ๓. Filled-System Thermometer

สำหรับเครื่องมือวัดชนิดนี้สามารถนำมาใช้กับระบบควบคุมได้แต่จะต้องมีการนำมาใช้ร่วมกับ อุปกรณ์ที่ช่วยแปลงค่าสัญญาณที่เรียกว่า Potentiometer หรือ อุปกรณ์แปลงค่าให้เป็นค่าอัตราการ เปลี่ยนแปลงแบบเส้นตรง (LVDT) ดังแสดงในรูปที่ ๔



รูปที่ ๔. Filled System Connected to Potentiometer

สาเหตุที่ต้องมีการแปลงค่าอุณหภูมิเป็นค่าทางกระแสไฟฟ้าก่อนเพื่อที่จะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบในระบบควบคุม เครื่องมือวัดชนิดนี้ยังเหมาะที่จะนำไปใช้กับบริเวณที่มีความสูงกว่าระดับน้ำทะเลถึง ๑๐๐ เมตร (๓๐๐ ฟุต) และยังให้ค่าความถูกต้องถึง ๐.๕% แต่เครื่องมือชนิดนี้ยังมีความไม่แน่นอนเพียงพอที่จะนำมาใช้ในการควบคุมระบบทีเดียว เนื่องจากว่าจะเกิดความคลาดเคลื่อนได้ง่ายบริเวณที่ส่วนเป็น Bourdon Tube และ Capillary Tube ดังนั้นจึงมีการพัฒนาเป็นแบบ ที่เรียกว่า Bimetallic Thermometer

Bimetallic Thermometer

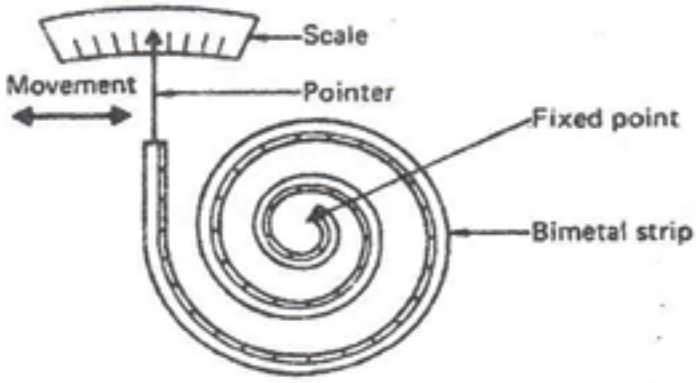
เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบ Bimetallic Thermometer จะใช้หลักการของการขยายตัวที่ไม่เท่ากันของโลหะสองชนิดเมื่อได้รับความร้อนซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะมีอัตราการขยายตัวที่แตกต่างกันนำมาประกบติดกัน โลหะที่นิยมใช้ ก็คือ อะลูมินัม (Aluminum) ทองเหลือง (Brass) ทองแดง (Copper) ทองแดงผสมนิกเกิล (Copper-nickle Alloy) ทองแดงผสมนิกเกิลและโคบอลต์ (Copper-nickle-cobalt Alloy) ซึ่งโลหะแต่ละชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (Linear Expansion Coefficient) ที่ต่างกัน ดังตารางที่ ๑

ตารางที่ ๑ ตารางค่า Linear Expansion Coefficient ของโลหะบางชนิด

Substance	Linear Expansion Coefficient (Millionths/°C)
Aluminum	23.5
Brass	20.3
Copper	16.5
Invar (copper-nickel alloy)	1.2
Kovar (copper-nickel-cobalt alloy)	5.9

โดยทั่วไปจะนำโลหะที่มีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวที่มีค่าสูงมาประกบกับตัวที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต่ำ ที่นิยมมากก็คือ ระหว่างทองแดงกับโลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล

สำหรับรูปร่างจะเป็นแบบกันหอย ดังแสดงในรูปที่ ๕



รูปที่ ๕. Bimetallic Thermometer

จากรูปเมื่อโลหะได้รับความร้อน ส่วนที่เป็น Bimetal-strip จะขยายตัวไม่เท่ากันทำให้เกิดการยืดหรือหดตัวแบบอัตราส่วนคงที่ จะส่งผลทำให้เข็มชี้แสดงค่า

การหาค่าการขยายตัวของแถบโลหะแบบเป็นเส้นตรงสามารถหาได้จากสมการ

$$y = \frac{3(C_A - C_B)(T_2 - T_1)L^2}{4D}$$

y คือ ค่าการยืดหรือหดตัว

C_A คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะ A

C_B คือ สัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะ B

T_1 คือ อุณหภูมิต่ำสุด

T_2 คือ อุณหภูมิสูงสุด

L คือ ความยาวของแถบโลหะ

D คือ ความหนาของแถบโลหะ

หมายเหตุ ค่าการยืดหรือหดตัวจะสัมพันธ์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

นอกจากนี้ยังมีการทำแถบโลหะแบบขดเป็นก้นหอย ซึ่งจะมีการหาค่าการยืดและหดตัวด้วยสมการต่อไปนี้

$$y = \frac{9(C_A - C_B)(T_2 - T_1)RL}{4D}$$

เมื่อ R คือ รัศมีเมื่อนำมาคดเป็นวงก้นหอย

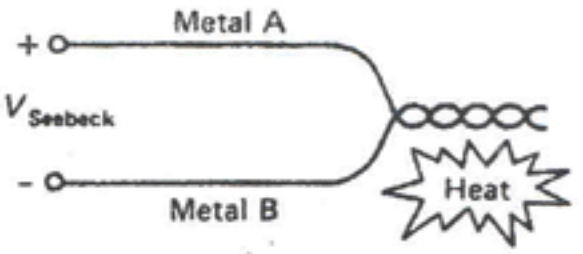
แบบขดก้นหอยจะให้ค่าการวัดที่แน่นอนกว่าและสามารถวัดอุณหภูมิได้มากกว่า ๒๐๐^{0}C อุปกรณ์การวัดอุณหภูมิแบบนี้นิยมใช้กับระบบควบคุมที่ไม่สลับซับซ้อนมากนัก ส่วนใหญ่จะใช้เป็นส่วนควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์การทำงานของระบบควบคุมด้วยอุณหภูมิ เป็นต้น

เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบใช้กระแสไฟฟ้า

สำหรับเครื่องมือใช้วัดอุณหภูมิแบบใช้ระบบไฟฟ้าจะนิยมใช้กับระบบควบคุมที่ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์โดยจะเป็นส่วนหนึ่งของระบบ สำหรับเครื่องมือวัดแบบใช้ไฟฟ้าจะมีอยู่หลายชนิด เช่น Thermocouple, Thermister, Resistance Temperature Detector, Semiconductor Temperature Sensor เป็นต้น

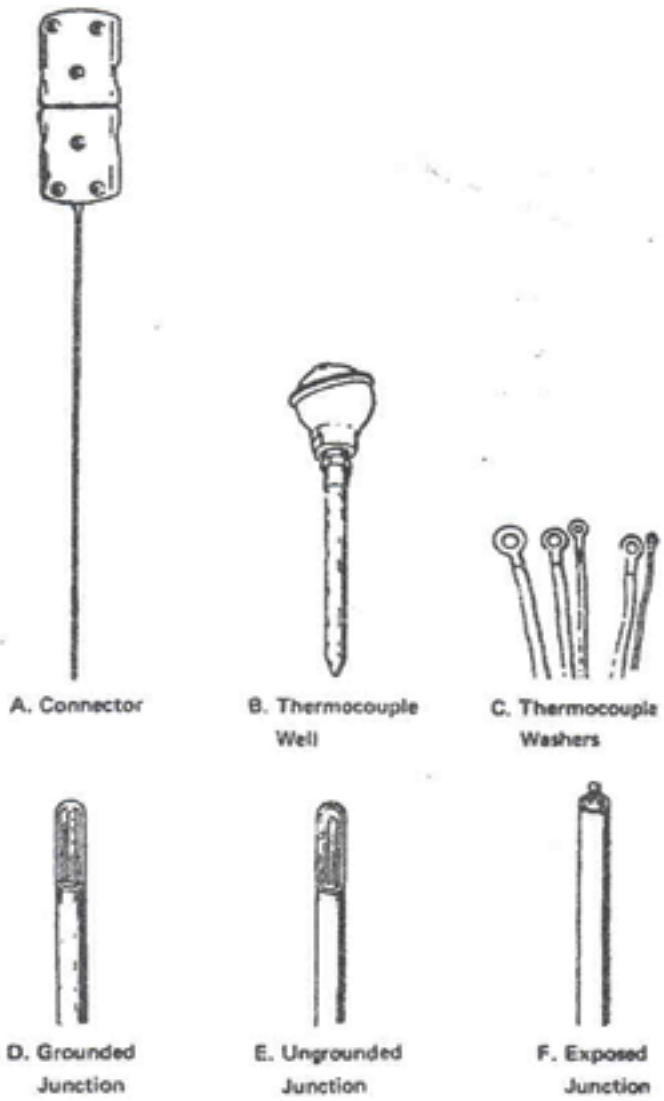
Thermocouple

สำหรับ sensor แบบนี้ได้ค้นพบโดยบังเอิญโดยนักวิทยาศาสตร์ ชื่อ Thomas Seebeck นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน พบว่าเมื่อนำขดลวดโลหะสองชนิดที่ต่างกันมาพันกันเป็นเกลียวแล้วให้ความร้อนที่ปลายข้างหนึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลในขดลวด เมื่อทำการวัดที่ปลายด้านหนึ่งระหว่างสายลวดทั้งสองปรากฏว่ามีแรงดันเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อความร้อนเปลี่ยนแปลงจะมีผลทำให้แรงดันเปลี่ยนไปด้วย



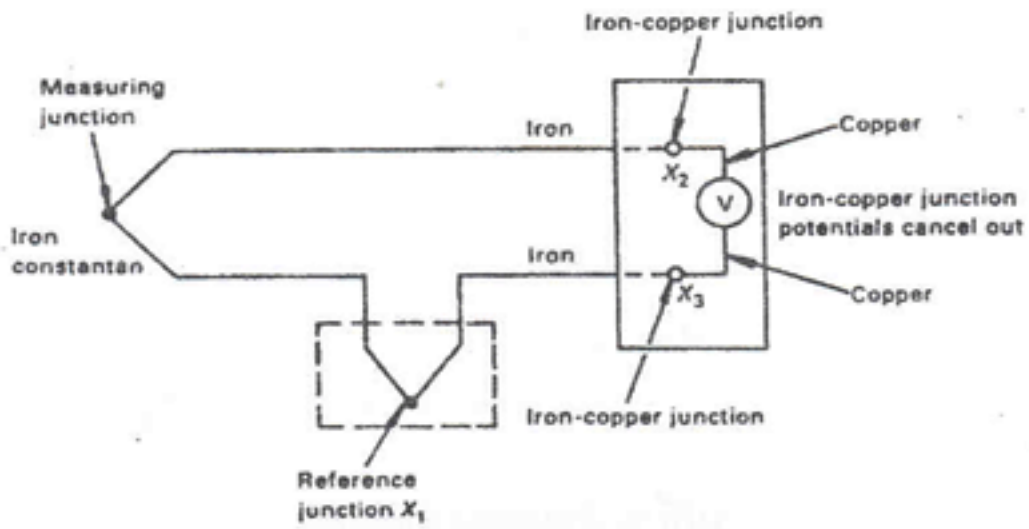
รูปที่ ๖. Potential Difference

Thermocouple แบบนี้นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะว่า ราคาไม่แพง ขั้นตอนการทำงานไม่ยุ่งยาก และยังมีย่านการวัดที่กว้างมากถึง ๒๕๐๐ ^{0}C หรือ ๔๕๐๐ ^{0}F และสามารถผลิตออกมาได้หลายรูปตามความเหมาะสมของงาน ดังรูปที่ ๗



รูปที่ ๗. Thermocouple ชนิดต่าง ๆ

สำหรับวงจรการต่อสามารถแสดงได้ดังรูป ต่อไปนี้

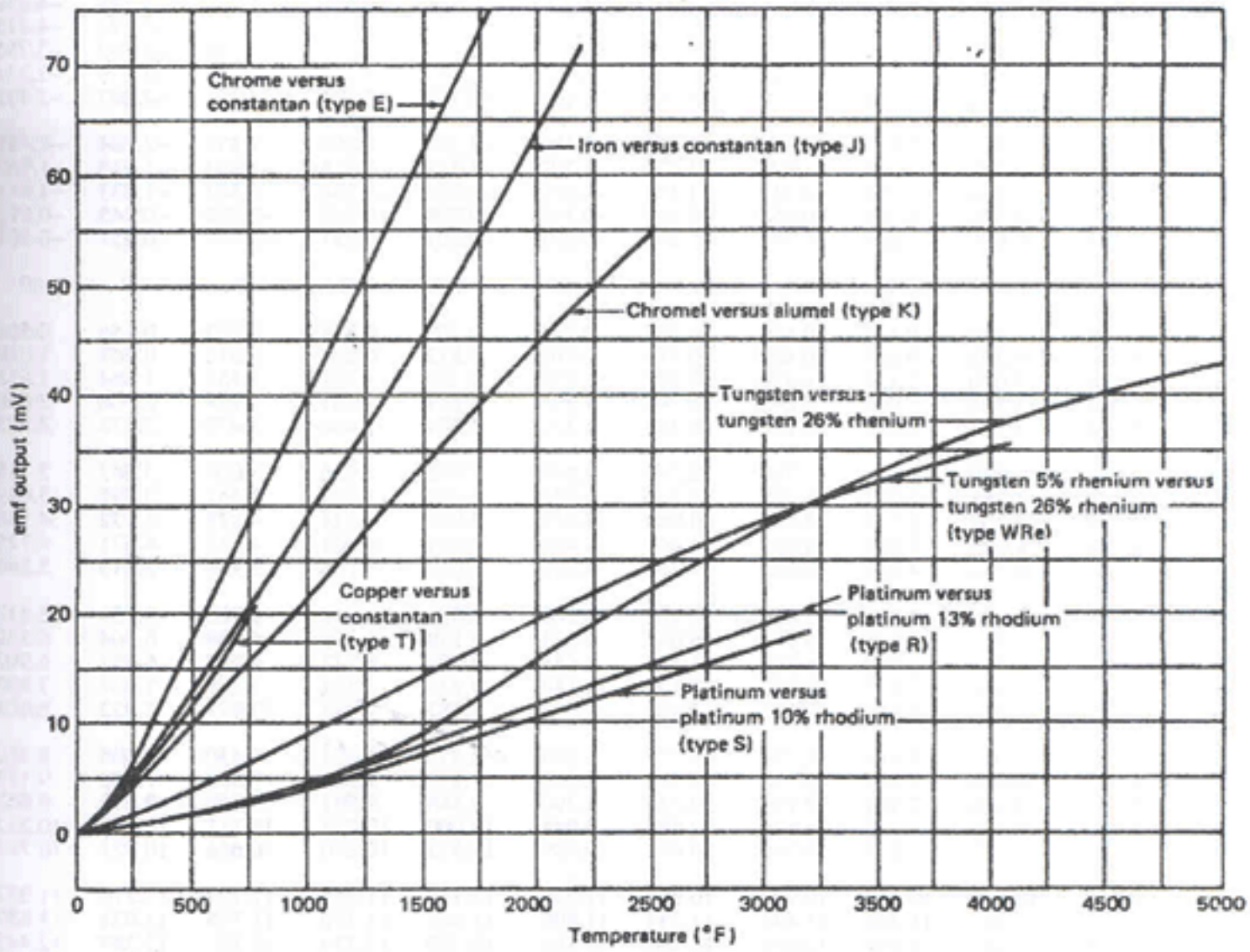


รูปที่ ๘. แสดงการต่อวงจรของ Thermocouple แบบทั่ว ๆไป

การทำงานของเครื่องมือวัด จะใช้ส่วนที่เป็น Measuring Junction ใส่ไว้ในบริเวณที่ต้องการวัดอุณหภูมิ และภายในอุปกรณ์จะมีส่วนที่เรียกว่า Reference Junction ซึ่งอาจมีลักษณะเป็นวงจงทางไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดค่าเกณฑ์สำหรับใช้เปรียบเทียบค่า ส่วนโลหะที่ใช้ในการทำส่วนใหญ่จะเป็นโลหะประเภทเหล็ก (Iron) กับ โลหะผสม ทองแดงกับนิกเกิล (Constantan)

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการทำงานในส่วนที่เป็น Reference Junction โดยใช้ร่วมกับระบบคอมพิวเตอร์ คือ เครื่องมือวัดจะส่งอุณหภูมิมาเข้าคอมพิวเตอร์หลังจากนั้นจะมีโปรแกรมแปลงค่าสัญญาณเป็นรูปดิจิตอลแล้วไปเปรียบเทียบค่ากับโปรแกรมที่ออกแบบไว้แล้ว ส่งผลไปให้ระบบควบคุมแบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อสั่งการทำงานต่อไป

รูปที่ ๙. แสดงชนิดของโลหะที่ใช้ทำ Sensor ชนิดต่าง ๆ สัมพันธ์กับความต่างศักดิ์ที่เกิดขึ้น



จากรูปที่ ๙ จะแสดงถึงความสัมพันธ์ของ Electrical Thermocouple ชนิดต่าง ๆ สัมพันธ์กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (mV) กับอุณหภูมิที่เปลี่ยน (^{0}F) ส่วนตารางที่ ๒ เป็นตารางแสดงค่าตัวอย่าง **Type J** ณ จุดต่าง ๆ

ตารางที่ ๒ ความสัมพันธ์ระหว่าง Electrical thermocouple Type J กับแรงเคลื่อนไฟฟ้า

DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
					THERMOELECTRIC VOLTAGE IN ABSOLUTE MILLIVOLTS							
-210	-8.096											-210
-200	-7.890	-7.912	-7.934	-7.955	-7.976	-7.996	-8.017	-8.037	-8.057	-8.076	-8.096	-200
-190	-7.659	-7.683	-7.707	-7.731	-7.755	-7.778	-7.801	-7.824	-7.846	-7.868	-7.890	-190
-180	-7.402	-7.429	-7.455	-7.482	-7.508	-7.533	-7.559	-7.584	-7.609	-7.634	-7.659	-180
-170	-7.122	-7.151	-7.180	-7.209	-7.237	-7.265	-7.293	-7.321	-7.348	-7.375	-7.402	-170
-160	-6.821	-6.852	-6.883	-6.914	-6.944	-6.974	-7.004	-7.034	-7.064	-7.093	-7.122	-160
-150	-6.499	-6.532	-6.565	-6.598	-6.630	-6.663	-6.695	-6.727	-6.758	-6.790	-6.821	-150
-140	-6.159	-6.194	-6.228	-6.263	-6.297	-6.331	-6.365	-6.399	-6.433	-6.466	-6.499	-140
-130	-5.801	-5.837	-5.874	-5.910	-5.946	-5.982	-6.018	-6.053	-6.089	-6.124	-6.159	-130
-120	-5.426	-5.464	-5.502	-5.540	-5.578	-5.615	-5.653	-5.690	-5.727	-5.764	-5.801	-120
-110	-5.036	-5.076	-5.115	-5.155	-5.194	-5.233	-5.272	-5.311	-5.349	-5.388	-5.426	-110
-100	-4.632	-4.673	-4.714	-4.755	-4.795	-4.836	-4.876	-4.916	-4.956	-4.996	-5.036	-100
-90	-4.215	-4.257	-4.299	-4.341	-4.383	-4.425	-4.467	-4.508	-4.550	-4.591	-4.632	-90
-80	-3.785	-3.829	-3.872	-3.915	-3.958	-4.001	-4.044	-4.087	-4.130	-4.172	-4.215	-80
-70	-3.344	-3.389	-3.433	-3.478	-3.522	-3.566	-3.610	-3.654	-3.698	-3.742	-3.785	-70
-60	-2.892	-2.938	-2.984	-3.029	-3.074	-3.120	-3.165	-3.210	-3.255	-3.299	-3.344	-60
-50	-2.431	-2.478	-2.524	-2.570	-2.617	-2.663	-2.709	-2.755	-2.801	-2.847	-2.892	-50
-40	-1.960	-2.008	-2.055	-2.102	-2.150	-2.197	-2.244	-2.291	-2.338	-2.384	-2.431	-40
-30	-1.481	-1.530	-1.578	-1.626	-1.674	-1.722	-1.770	-1.818	-1.865	-1.913	-1.960	-30
-20	-0.995	-1.044	-1.093	-1.141	-1.190	-1.239	-1.288	-1.336	-1.385	-1.433	-1.481	-20
-10	-0.501	-0.550	-0.600	-0.650	-0.699	-0.748	-0.798	-0.847	-0.896	-0.945	-0.995	-10
0	0.000	-0.050	-0.101	-0.151	-0.201	-0.251	-0.301	-0.351	-0.401	-0.451	-0.501	0
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	0.507	0
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.813	0.865	0.916	0.967	1.019	10
20	1.019	1.070	1.122	1.174	1.225	1.277	1.329	1.381	1.432	1.484	1.536	20
30	1.536	1.588	1.640	1.693	1.745	1.797	1.849	1.901	1.954	2.006	2.058	30
40	2.058	2.111	2.163	2.216	2.268	2.321	2.374	2.426	2.479	2.532	2.585	40
50	2.585	2.638	2.691	2.743	2.796	2.849	2.902	2.956	3.009	3.062	3.115	50
60	3.115	3.168	3.221	3.275	3.328	3.381	3.435	3.488	3.542	3.595	3.649	60
70	3.649	3.702	3.756	3.809	3.863	3.917	3.971	4.024	4.078	4.132	4.186	70
80	4.186	4.239	4.293	4.347	4.401	4.455	4.509	4.563	4.617	4.671	4.725	80
90	4.725	4.780	4.834	4.888	4.942	4.996	5.050	5.105	5.159	5.213	5.268	90
100	5.268	5.322	5.376	5.431	5.485	5.540	5.594	5.649	5.703	5.758	5.812	100
110	5.812	5.867	5.921	5.976	6.031	6.085	6.140	6.195	6.249	6.304	6.359	110
120	6.359	6.414	6.468	6.523	6.578	6.633	6.688	6.742	6.797	6.852	6.907	120
130	6.907	6.962	7.017	7.072	7.127	7.182	7.237	7.292	7.347	7.402	7.457	130
140	7.457	7.512	7.567	7.622	7.677	7.732	7.787	7.843	7.898	7.953	8.008	140
150	8.008	8.063	8.118	8.174	8.229	8.284	8.339	8.394	8.450	8.505	8.560	150
160	8.560	8.616	8.671	8.726	8.781	8.837	8.892	8.947	9.003	9.058	9.113	160
170	9.113	9.169	9.224	9.279	9.335	9.390	9.446	9.501	9.556	9.612	9.667	170
180	9.667	9.723	9.778	9.834	9.889	9.944	10.000	10.055	10.111	10.166	10.222	180
190	10.222	10.277	10.333	10.388	10.444	10.499	10.555	10.610	10.666	10.721	10.777	190
200	10.777	10.832	10.888	10.943	10.999	11.054	11.110	11.165	11.221	11.276	11.332	200
210	11.332	11.387	11.443	11.498	11.554	11.609	11.665	11.720	11.776	11.831	11.887	210
220	11.887	11.943	11.998	12.054	12.109	12.165	12.220	12.276	12.331	12.387	12.442	220
230	12.442	12.498	12.553	12.609	12.664	12.720	12.776	12.831	12.887	12.942	12.998	230
240	12.998	13.053	13.109	13.164	13.220	13.275	13.331	13.386	13.442	13.497	13.553	240
250	13.553	13.608	13.664	13.719	13.775	13.830	13.886	13.941	13.997	14.052	14.108	250
260	14.108	14.163	14.219	14.274	14.330	14.385	14.441	14.496	14.552	14.607	14.663	260
270	14.663	14.718	14.774	14.829	14.885	14.940	14.995	15.051	15.106	15.162	15.217	270
280	15.217	15.273	15.328	15.383	15.439	15.494	15.550	15.605	15.661	15.716	15.771	280
290	15.771	15.827	15.882	15.938	15.993	16.048	16.104	16.159	16.214	16.270	16.325	290

300	16.325	16.380	16.436	16.491	16.547	16.602	16.657	16.713	16.768	16.823	16.879	300
310	16.879	16.934	16.989	17.044	17.100	17.155	17.210	17.266	17.321	17.376	17.432	310
320	17.432	17.487	17.542	17.597	17.653	17.708	17.763	17.818	17.874	17.929	17.984	320
330	17.984	18.039	18.095	18.150	18.205	18.260	18.316	18.371	18.426	18.481	18.537	330
340	18.537	18.592	18.647	18.702	18.757	18.813	18.868	18.923	18.978	19.033	19.089	340
350	19.089	19.144	19.199	19.254	19.309	19.364	19.420	19.475	19.530	19.585	19.640	350
360	19.640	19.695	19.751	19.806	19.861	19.916	19.971	20.026	20.081	20.137	20.192	360
370	20.192	20.247	20.302	20.357	20.412	20.467	20.523	20.578	20.633	20.688	20.743	370
380	20.743	20.798	20.853	20.909	20.964	21.019	21.074	21.129	21.184	21.239	21.295	380
390	21.295	21.350	21.405	21.460	21.515	21.570	21.625	21.680	21.736	21.791	21.846	390
400	21.846	21.901	21.956	22.011	22.066	22.122	22.177	22.232	22.287	22.342	22.397	400
410	22.397	22.453	22.508	22.563	22.618	22.673	22.728	22.784	22.839	22.894	22.949	410
420	22.949	23.004	23.060	23.115	23.170	23.225	23.280	23.336	23.391	23.446	23.501	420
430	23.501	23.556	23.612	23.667	23.722	23.777	23.833	23.888	23.943	23.999	24.054	430
440	24.054	24.109	24.164	24.220	24.275	24.330	24.386	24.441	24.496	24.552	24.607	440
450	24.607	24.662	24.718	24.773	24.829	24.884	24.939	24.995	25.050	25.106	25.161	450
460	25.161	25.217	25.272	25.327	25.383	25.438	25.494	25.549	25.605	25.661	25.716	460
470	25.716	25.772	25.827	25.883	25.938	25.994	26.050	26.105	26.161	26.216	26.272	470
480	26.272	26.328	26.383	26.439	26.495	26.551	26.606	26.662	26.718	26.774	26.829	480
490	26.829	26.885	26.941	26.997	27.053	27.109	27.165	27.220	27.276	27.332	27.388	490
500	27.388	27.444	27.500	27.556	27.612	27.668	27.724	27.780	27.836	27.893	27.949	500
510	27.949	28.005	28.061	28.117	28.173	28.230	28.286	28.342	28.398	28.455	28.511	510
520	28.511	28.567	28.624	28.680	28.736	28.793	28.849	28.906	28.962	29.019	29.075	520
530	29.075	29.132	29.188	29.245	29.301	29.358	29.415	29.471	29.528	29.585	29.642	530
540	29.642	29.698	29.755	29.812	29.869	29.926	29.983	30.039	30.096	30.153	30.210	540
550	30.210	30.267	30.324	30.381	30.439	30.496	30.553	30.610	30.667	30.724	30.782	550
560	30.782	30.839	30.896	30.954	31.011	31.068	31.126	31.183	31.241	31.298	31.356	560
570	31.356	31.413	31.471	31.528	31.586	31.644	31.702	31.759	31.817	31.875	31.933	570
580	31.933	31.991	32.048	32.106	32.164	32.222	32.280	32.338	32.396	32.455	32.513	580
590	32.513	32.571	32.629	32.687	32.746	32.804	32.862	32.921	32.979	33.038	33.096	590
600	33.096	33.155	33.213	33.272	33.330	33.389	33.448	33.506	33.565	33.624	33.683	600
610	33.683	33.742	33.800	33.859	33.918	33.977	34.036	34.095	34.155	34.214	34.273	610
620	34.273	34.332	34.391	34.451	34.510	34.569	34.629	34.688	34.748	34.807	34.867	620
630	34.867	34.926	34.986	35.046	35.105	35.165	35.225	35.285	35.344	35.404	35.464	630
640	35.464	35.524	35.584	35.644	35.704	35.764	35.825	35.885	35.945	36.005	36.066	640
650	36.066	36.126	36.186	36.247	36.307	36.368	36.428	36.489	36.549	36.610	36.671	650
660	36.671	36.732	36.792	36.853	36.914	36.975	37.036	37.097	37.158	37.219	37.280	660
670	37.280	37.341	37.402	37.463	37.525	37.586	37.647	37.709	37.770	37.831	37.893	670
680	37.893	37.954	38.016	38.078	38.139	38.201	38.262	38.324	38.386	38.448	38.510	680
690	38.510	38.572	38.633	38.695	38.757	38.819	38.882	38.944	39.006	39.068	39.130	690
700	39.130	39.192	39.255	39.317	39.379	39.442	39.504	39.567	39.629	39.692	39.754	700
710	39.754	39.817	39.880	39.942	40.005	40.068	40.131	40.193	40.256	40.319	40.382	710
720	40.382	40.445	40.508	40.571	40.634	40.697	40.760	40.823	40.886	40.950	41.013	720
730	41.013	41.076	41.139	41.203	41.266	41.329	41.393	41.456	41.520	41.583	41.647	730
740	41.647	41.710	41.774	41.837	41.901	41.965	42.028	42.092	42.156	42.219	42.283	740
750	42.283	42.347	42.411	42.475	42.538	42.602	42.666	42.730	42.794	42.858	42.922	750
760	42.922											760
DEG C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	DEG C

จากตารางที่ ๒ สามารถนำมาใช้ช่วยในการหาค่าได้สะดวกขึ้น

เอกสารอ้างอิง

Jackson, Leslie. INSTRUMENTATION AND CONTROL SYSTEMS. Thomas Reed Publications Limited, P. 313 – 325.