10 เครื่องมือวัดอุณหภูมิ
TEMPERATURE INSTRUMENT

10.1 บทนำ

การตรวจวัดและควบคุมอุณหภูมิ เป็นตัวแปรที่สำคัญมากในงานอุตสาหกรรมโดยจะใช้ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) เป็นเซ็นเซอร์ (Sensor) เพื่อรับพลังงานความร้อนแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ป้อนให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ทำการขยายสัญญาณและนำไปประมวลผลแสดงค่าที่วัดได้หรือเพื่อการควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Controlling)

หน่วยวัดอุณหภูมิที่ใช้ในปัจจุบันที่สำคัญคือ องศาเซลเซียส (Celsius Degree : $^{\circ}C$) องศาฟาห์เรนไฮต์ (Fahrenheit Degree : $^{\circ}F$) และองศาเคลวิน (Kelvin : $^{\circ}K$)

1. **องศาเซลเซียส** ($^{\circ}C$) เป็นหน่วยวัดอุณหภูมิที่ถูกค้นคว้าโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนชื่อ Anders Celsius ใน **พ.ศ.** 2244-2287 (ค.ศ. 1701-1744) โดยมีจุดเยือกแข็งของน้ำ $0^{\circ}C$ และจุดเดือดของน้ำ $100^{\circ}C$

2. **องศาฟาห์เรนไฮต์** ($^{\circ}F$) เป็นหน่วยวัดอุณหภูมิที่ค้นคว้าโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อ Gabriel Daniel Fahrenheit ใน **พ.ศ.** 2229-2279 (ค.ศ. 1686-1736) โดยมีจุดเยือกแข็งของน้ำ $32^{\circ}F$ และจุดเดือดของน้ำ $212^{\circ}F$

การเปลี่ยนระหว่างองศาเซลเซียสและองศาฟาห์เรนไฮต์

$$T(^{\circ}C)=\frac{5T(^{\circ}F)}{9}-32 \qquad \text{.....(10.1)}$$

$$T(^{\circ}F)=\frac{9T(^{\circ}C)}{5}+32 \qquad \text{.....(10.2)}$$

3. **องศาเคลวิน** ($^{\circ}K$) เป็นหน่วยวัดอุณหภูมิที่ถูกค้นคว้าโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ Lord Kelvin ใน **พ.ศ.** 2394 (ค.ศ. 1851) โดยกำหนดจุดอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ (Zero Absolute Temperature) ขององศาเคลวินมีค่า $-273.15^{\circ}C$

การเปลี่ยนองศาเซลเซียสและองศาฟาห์เรนไฮต์เป็นองศาเคลวิน

$$T(^{\circ}K) = T(^{\circ}C) + 273.15$$
$$T(^{\circ}K) = \frac{5(T(^{\circ}C) - 32)}{9} + 273.15 \qquad \text{.....(10.3)}$$

10.2 ความต้านทานโลหะกับอุณหภูมิ

(Metal Resistance Versus Temperature)

รูปที่ 10.1 เป็นกราฟของนิกเกิล (Nickel) และพลาตินัม (Platinum) ความต้านทานจะเพิ่มค่าตามอุณหภูมิเกือบจะเป็นเส้นตรง หาค่าความต้านทานของโลหะดังสมการ

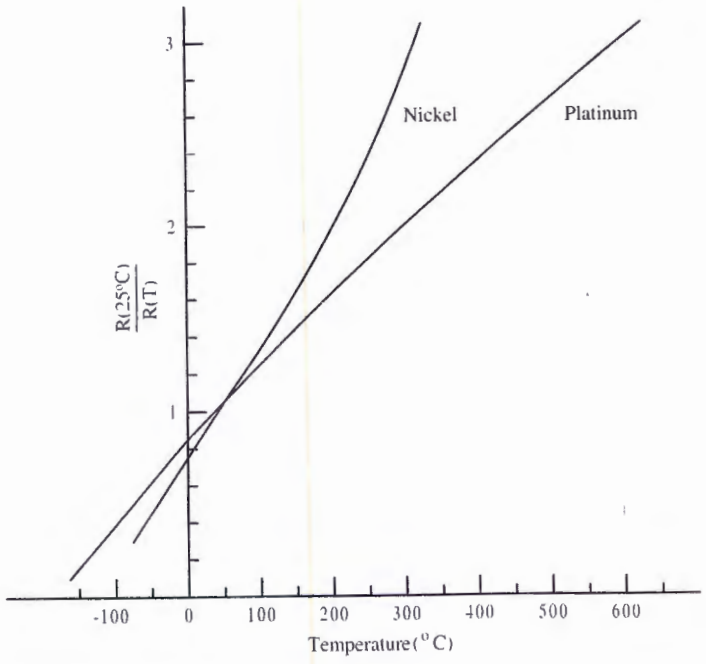
$$R = \rho\frac{l}{A} \qquad \text{.....(10.4)}$$

เมื่อ R คือความต้านทานของโลหะ...Ω

l คือความยาว (length)...m

A คือพื้นที่หน้าตัดของโลหะกลม... m^2

ρ คือความต้านทานจำเพาะของโลหะ... Ω – m

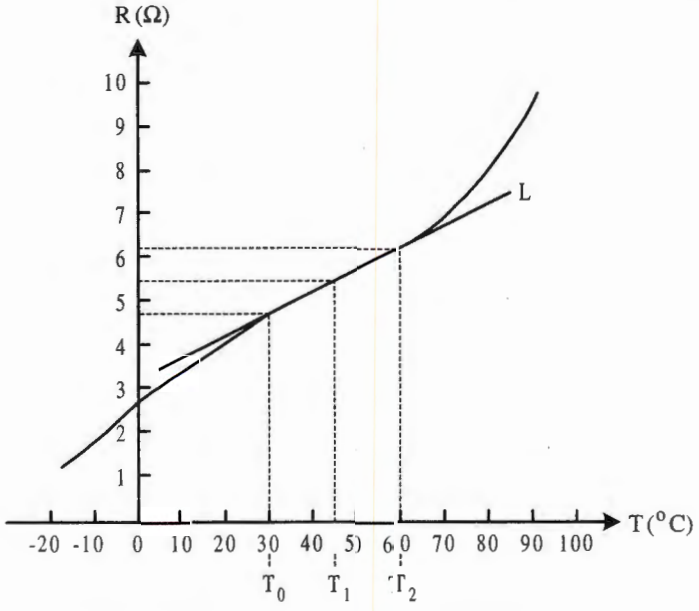


รูปที่ 10.1 กราฟของนิกเกิลและพลาตินัมแสดงความสัมพันธ์ความต้านทานกับอุณหภูมิ

10.2.1 ความต้านทานโดยประมาณกับอุณหภูมิ

(Resistance Versus Temperature Approximation)

การหาค่าความต้านทานโดยประมาณของโลหะกับอุณหภูมิ จะพิจารณาจากกราฟเส้นตรงช่วงอุณหภูมิแคบๆ ดังกราฟ R-T ของรูปที่ 10.2 โดยหาจากความชันหรือสโลป (Slope) ของกราฟช่วงเส้นตรงระหว่างอุณหภูมิ T_1 และ T_2 มี T_0 เป็นอุณหภูมิกึ่งกลาง



รูปที่ 10.2 การหาค่าความต้านทานโดยประมาณที่อุณหภูมิใดๆ

หาค่าความต้านทานโดยประมาณที่อุณหภูมิ T เมื่อ $T_1 < T < T_2$

$$R_{(T)} = R_{(T_0)}[1 + \alpha_0 \Delta T] \qquad \text{.....(10.5)}$$

เมื่อ $R_{(T)}$ คือค่าความต้านทานโดยประมาณที่อุณหภูมิ T ใดๆ ... Ω

$R_{(T_0)}$ คือค่าความต้านทานที่ อุณหภูมิ T_0 หรือที่อุณหภูมิอ้างอิง ... Ω

α_0 คือสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิที่อุณหภูมิ T_0 ... /°C

$\Delta T = T - T_0$

ค่าของ α_0 จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ T_0 และถ้าความชันหรือสโลปที่ช่วงอุณหภูมิอื่น ค่าของ α_0 จะแตกต่างกัน

$$\alpha_0 = \frac{1}{R_{(T_0)}}(\text{Slope at } T_0) \qquad \text{.....(10.6)}$$

จากรูปที่ 10.2 หาค่า α_0 ดังนี้

$$\alpha_0 = \frac{1}{R_{(T_0)}}\left(\frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1}\right) \qquad \text{.....(10.7)}$$

เมื่อ R_1 คือค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ $T_1 \ldots \Omega$

R_2 คือค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ $T_2 \ldots \Omega$

$R_{(T_0)}$ คือค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ $T_0 \ldots \Omega$

ตัวอย่างที่ 10.1 เส้นลวดโลหะที่อุณหภูมิ $30^\circ C$ มีความต้านทาน 150Ω และมีค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานที่ $30^\circ C$ เป็น $0.005/^\circ C$ จงคำนวณหาค่าความต้านทานของเส้นลวดที่อุณหภูมิ $50^\circ C$

วิธีทำ

จากสมการ (10.5) $R_{(T)} = R_{(T_0)}[1 + \alpha_0 \Delta T]$

$$R_{(50^\circ C)} = R_{(30^\circ C)}\left[1 + \alpha_{(30^\circ C)}\Delta T\right]$$

$$R_{(50^\circ C)} = 150\Omega\left[1 + 0.005/^\circ C(50^\circ C - 30^\circ C)\right]$$

$$R_{(50^\circ C)} = 165\Omega \ldots\ldots\#$$

10.2.2 ความต้านทานโดยประมาณกำลังสอง

(Quadratic Approximation Resistance)

การคำนวณค่าความต้านทานของโลหะจะมีค่าความถูกต้องมากขึ้นโดยรวมค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (ΔT) กำลังสอง เข้าในสมการ (10.5) ดังนี้

เมื่อ $T_1 < T < T_2$ $R_{(T)} = R_{(T_0)}\left[1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 (\Delta T)^2\right]$ .....(10.8)

เมื่อ $R_{(T_0)}$ คือค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ T_0

α_1 คือสัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่อุณหภูมิ $T_0 \ldots /^\circ C$

α_2 สัมประสิทธิ์ของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานกำลังสอง ที่อุณหภูมิ $T_0 \ldots /^{\circ}C$

$\Delta T = T - T_0$

ค่า α_1 และ α_2 สามารถหาได้จากตารางหรือกราฟจะมีหน่วยตามชนิดของหน่วยที่ใช้วัดอุณหภูมินั้นๆเช่น $1/^{\circ}C$ กับ $1/(^{\circ}C)^2$ และ $1/^{\circ}F$ กับ $1/(^{\circ}F)^2$

ตัวอย่างที่ 10.2 โลหะชนิดหนึ่งมีค่าความต้านทานกับอุณหภูมิตามตารางการวัดดังนี้

$T(^{\circ}F)$	60	65	70	75	80	85	90
$R(\Omega)$	106.0	107.6	109.1	110.2	111.1	111.7	112.2

จงหาสมการความต้านทานที่อุณหภูมิ T

ก) ความต้านทานโดยประมาณที่อุณหภูมิระหว่าง $60^{\circ}F$ และ $90^{\circ}F$

ข) ความต้านทานโดยประมาณกำลังสองที่อุณหภูมิระหว่าง $60^{\circ}F$ และ $90^{\circ}F$

วิธีทำ

ก) หาสมการความต้านทานโดยประมาณที่อุณหภูมิระหว่าง $60^{\circ}F$ และ $90^{\circ}F$

ที่อุณหภูมิกึ่งกลาง $T_0 = 75^{\circ}F$ มี $R_{(T_0)} = 110.2\Omega$

จาก $$\alpha_0 = \frac{1}{R_{(T_0)}}\left(\frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1}\right)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{110.2\Omega}\left(\frac{112.2\Omega - 106.0\Omega}{90^{\circ}F - 60^{\circ}F}\right) = 0.001875/^{\circ}F$$

จาก $$R_{(T)} = R_{(T_0)}[1 + \alpha_0 \Delta T]$$

$$R_{(T)} = 110.2\Omega\left[1 + 0.001875\Omega/^{\circ}F(T - 75^{\circ}F)\right].....\#$$

ข) หาสมการความต้านทานโดยประมาณกำลังสองที่อุณหภูมิระหว่าง $60^{\circ}F$ และ $90^{\circ}F$

ที่อุณหภูมิกึ่งกลาง $T_0 = 75^{\circ}F$ มี $R_{(T_0)} = 110.2\ \Omega$

ที่ $60^{\circ}F$ $R_{(60^{\circ}F)} = 106.0\Omega$, $R_{(T_0)} = 110.2\Omega$

ที่ $90^{\circ}F$ $R_{(90^{\circ}F)} = 112.2\Omega$, $R_{(T_0)} = 110.2\Omega$

$\Delta T = 60^{\circ}F - 75^{\circ}F$

จาก $R_{(T)} = R_{(T_0)}\left[1+\alpha_1\Delta T+\alpha_2(\Delta T)^2\right]$

ที่ $60^\circ F$

$$106.0\Omega = 110.2\Omega\left[1+\alpha_1(60^\circ F-75^\circ F)+\alpha_2(60^\circ F-75^\circ F)^2\right] \quad .....(10.9)$$

ที่ $90^\circ F$

$$112.2\Omega = 110.2\Omega\left[1+\alpha_1(60^\circ F-75^\circ F)+\alpha_2(60^\circ F-75^\circ F)^2\right] .....(10.10)$$

แก้สมการ (10.9) และ (10.10)

จะได้ $\alpha_1 = 0.001875/^\circ F$

และ $\alpha_2 = -44.36\times10^{-6}/(^\circ F)^2$

ดังนั้น

$$R_{(T)} = 110.2\Omega\left[1+0.001875\Omega/^\circ F(T-75^\circ F)-44.36\times10^{-6}\Omega/^\circ F(T-75^\circ F)^2\right]..\#$$

ตัวอย่างที่ 10.3 จงคำนวณหาค่าความต้านทานโดยประมาณ ค่าความต้านทานโดยประมาณกำลังสองและค่าความผิดพลาดจากตัวอย่างที่ 10.2 ที่อุณหภูมิ $60^\circ F$ และ $85^\circ F$

วิธีทำ

หาค่าความต้านทานโดยประมาณและค่าความผิดพลาด

$$R_{(T)} = R_{(T_0)}[1+\alpha_0\Delta T]$$

ที่ $60^\circ F$ $R_{(60^\circ F)} = 110.2\Omega\left[1+0.001875/^\circ F(60^\circ F-75^\circ F)\right] = 107.1\Omega$ .....#

$$\text{Error} = \left|\frac{X_t - X_m}{X_t}\right| = \left|\frac{106\Omega-107.1\Omega}{106\Omega}\right| = 0.01037 = 1\% .....\#$$

ที่ $85^\circ F$ $R_{(85^\circ F)} = 110.2\Omega\left[1+0.001875/^\circ F(85^\circ F-75^\circ F)\right] = 112.26\Omega$ .....#

$$\text{Error} = \left|\frac{X_t - X_m}{X_t}\right| = \left|\frac{111.7\Omega-112.26\Omega}{111.7\Omega}\right| = 0.05013 = 5\% .....\#$$

หาค่าความต้านทานโดยประมาณกำลังสองและค่าความผิดพลาด

$$R_{(T)} = 110.2\Omega\left[1+0.001875(T-75^\circ F)-44.36\times10^{-6}(T-75^\circ F)^2\right]$$

$$R_{(60^\circ F)} = 110.2\Omega\left[1+0.001875(60^\circ F-75^\circ F)-44.36\times10^{-6}(60^\circ F-75^\circ F)^2\right]$$

$$R_{(60^\circ F)} = 106\Omega .....\#$$

$$\text{Error} = \left|\frac{X_t - X_m}{X_t}\right| = \left|\frac{106\Omega-106\Omega}{106\Omega}\right| = 0\% .....\#$$

การคำนวณหาค่าความต้านทานโดยประมาณกำลังสองจะได้ค่าความถูกต้องมากจนกระทั่งไม่มีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น

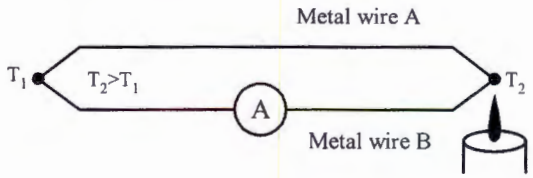
10.3 ทรานสดิวเซอร์อุณหภูมิ (Temperature Transducer)

ทรานสดิวเซอร์อุณหภูมิหรือเซ็นเซอร์อุณหภูมิ (Temperature Sensor) มีหลายชนิด ทำหน้าที่วัดหรือตรวจจับอุณหภูมิเช่น เทอร์โมคัพเปิล อาร์ทีดี เทอร์มิสเตอร์ และไอซีเซ็นเซอร์เป็นต้นซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการตรวจจับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิและให้สัญญาณไฟฟ้าออกมาต่างกัน

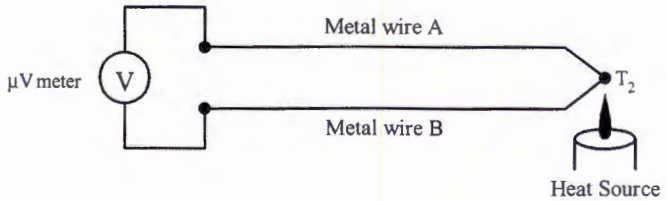
10.4 เทอร์โมคัพเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัพเปิล เป็นเซ็นเซอร์อุณหภูมิที่ผลิตแรงดันไฟฟ้ามีค่าน้อยมากเป็น mV จะอยู่ในช่วง 10mV-80mV เทอร์โมคัพเปิลจะทำด้วยโลหะ 2 ชนิดที่ต่างกันโดยต่อปลายข้างหนึ่งเป็นจุดต่อ (Junction) เพื่อวัดอุณหภูมิ

ใน พ.ศ. 2364 (ค.ศ. 1821) โทมัส ซีเบ็ค (Thomas Seebeck) นักวิทยาศาสตร์เยอรมันค้นพบว่าเมื่อนำลวดโลหะต่างชนิดกันมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกัน ถ้าปลายจุดต่อทั้งสองมีอุณหภูมิแตกต่างกันจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรลวดโลหะนั้นและปริมาณของกระแสไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงตามผลต่างของอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อ แต่ถ้าเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งออกจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเรียกว่าแรงดันไฟฟ้าซีเบ็ค (Seebeck Voltage) ในรูปที่ 10.3 นำลวดโลหะ A และ B เชื่อมต่อเป็นเทอร์โมคัพเปิล



(ก) กระแสไฟฟ้าจะไหลในเทอร์โมคัพเปิลเมื่ออุณหภูมิที่ปลายจุดต่อต่างกัน



(ข) เมื่อเปิดปลายจุดต่อด้านหนึ่งจะมีแรงดันไฟฟ้าซีเบ็คตกคร่อมที่ปลายจุดต่อนั้น

รูปที่ 10.3 แสดงผลการทดลองของซีเบ็ค (Seebeck Effect)

แรงดันไฟฟ้าซีเบ็คดังสมการ

$$e = \alpha \Delta T \qquad \text{.....(10.11)}$$

เมื่อ e คือแรงดันไฟฟ้าซีเบ็ค (Seebeck Voltage)...V

α คือสัมประสิทธิ์ซีเบ็ค (Seebeck Coefficient)... $V/^{\circ}C$

ΔT คือผลต่างของอุณหภูมิที่จุดต่อ... $^{\circ}C$

$\Delta T = T_2 - T_1$ ... $^{\circ}C$

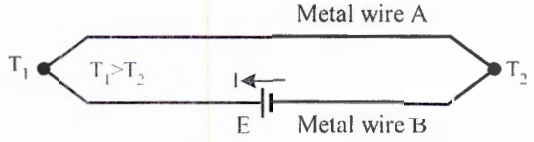
ตัวอย่างที่ 10.4 สัมประสิทธิ์ซีเบ็คของวัสดุชนิดหนึ่ง $\alpha = 50\mu V/^{\circ}C$ ถ้าที่จุดต่อของปลายทั้งสองมีอุณหภูมิ $20^{\circ}C$ และ $100^{\circ}C$ จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าซีเบ็ค

วิธีทำ

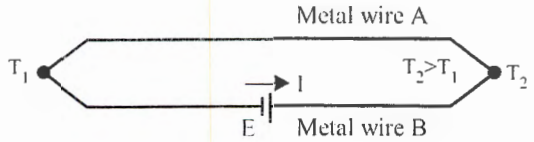
$$e = \alpha \Delta T = (50\mu V/^{\circ}C)(100^{\circ}C - 20^{\circ}C)$$

$$e = 4mV \text{ .....\#}$$

ต่อมาใน พ.ศ. 2377 (ค.ศ. 1834) ยีน ซีเอ เพลเทียร์ (Jean C.A. Peltier) ค้นพบว่าเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้วงจรลวดโลหะของซีเบ็คจะทำให้อุณหภูมิที่ปลายจุดต่อแตกต่างกันโดยปลายด้านหนึ่งจะร้อนขึ้นขณะที่อีกปลายด้านหนึ่งจะเย็น จากการค้นพบของซีเบ็คและเพลเทียร์ ทำให้การศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับเทอร์โมคัพเปิลได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องจนเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้อย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมเช่นในปัจจุบัน



(ก) ป้อนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าทำให้อุณหภูมิ $T_1 > T_2$

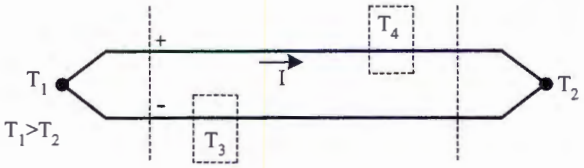


(ข) ป้อนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าทำให้อุณหภูมิ $T_2 > T_1$

รูปที่ 10.4 แสดงผลการทดลองของเพลเทียร์ (Peltier Effect)

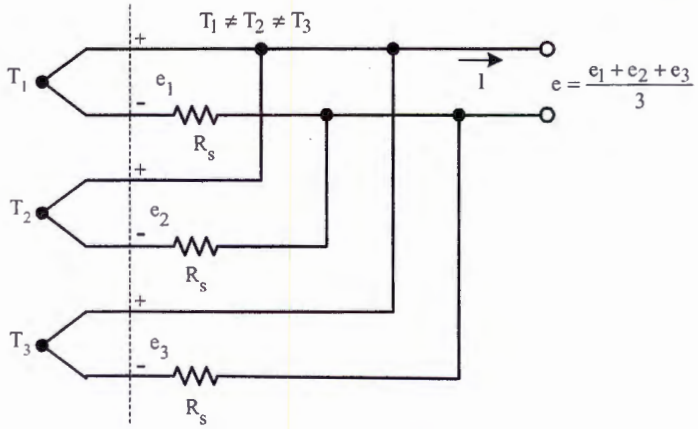
10.4.1 ปรากฏการณ์ของเทอร์โมคัพเปิล (Phenomena of Thermocouple)

1. เทอร์โมคัพเปิลคู่เดียวกัน อุณหภูมิที่มีผลทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าซีเบ็คจะเป็นอุณหภูมิที่ปลายจุดต่อทั้งสองด้านเท่านั้น อุณหภูมิบนจุดต่างๆตามสายไม่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าซีเบ็คดังรูปที่ 10.5

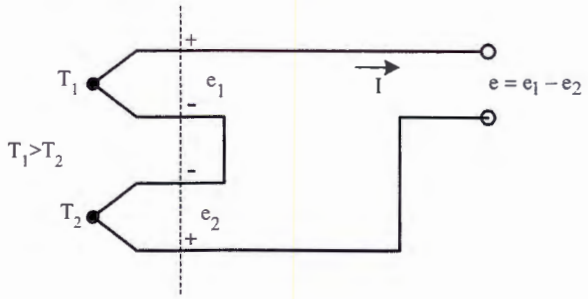


รูปที่ 10.5 อุณหภูมิ T_3, T_4 ช่วงกลางสายไม่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าซีเบ็ค

2. เทอร์โมคัพเปิลต่อขนานกันจะเป็นการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยและแรงดันไฟฟ้าซีเบ็คเฉลี่ยดังรูปที่ 10.6



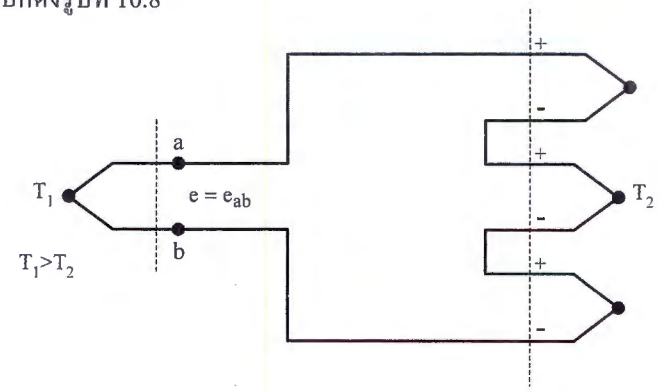
รูปที่ 10.6 เทอร์โมคัพเปิลต่อขนานกันจะเป็นการวัดอุณหภูมิเฉลี่ย



รูปที่ 10.7 เทอร์โมคัพเปิลต่อสลับขั้วกันจะเป็นการวัดผลต่างของอุณหภูมิที่จุดต่อ T_1, T_2

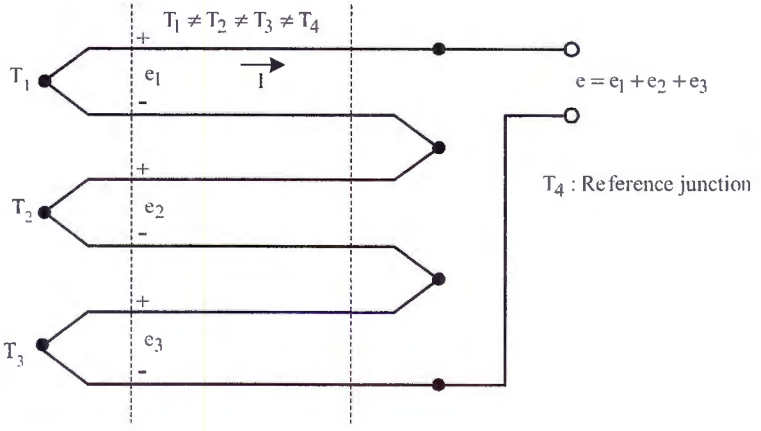
3. เทอร์โมคัพเปิลต่อสลับขั้วกันจะเป็นการวัดผลต่างของอุณหภูมิและผลต่างของแรงดันไฟฟ้าซีเบ็คดังรูปที่ 10.7

4. การต่อเทอร์โมคัพเปิลเพิ่มที่จุดต่อ T_1 หรือ T_2 จะไม่มีผลต่อการเกิดแรงดันไฟฟ้าซีเบ็คดังรูปที่ 10.8



รูปที่ 10.8 การต่อเทอร์โมคัพเปิลเพิ่มจะไม่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าซีเบ็ค

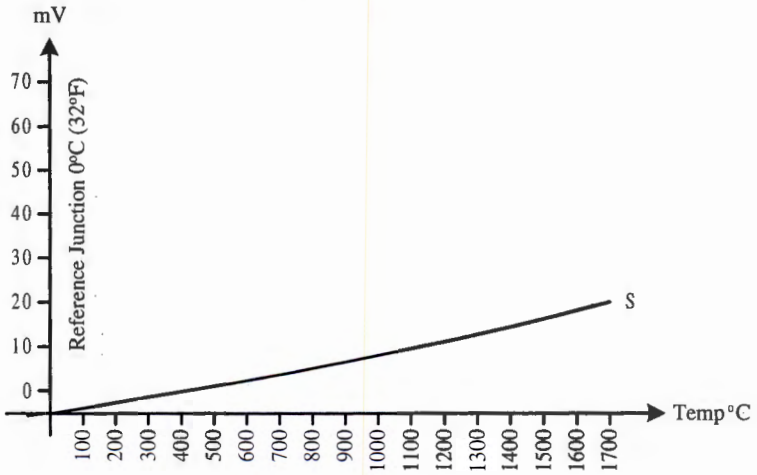
5. เทอร์โมคัพเปิลต่ออนุกรมกันจะได้แรงดันไฟฟ้าซีเบ็ครวมเท่ากับผลรวมแรงดันไฟฟ้าซีเบ็คที่ได้จากเทอร์โมคัพเปิลแต่ละชุดดังรูปที่ 10.9



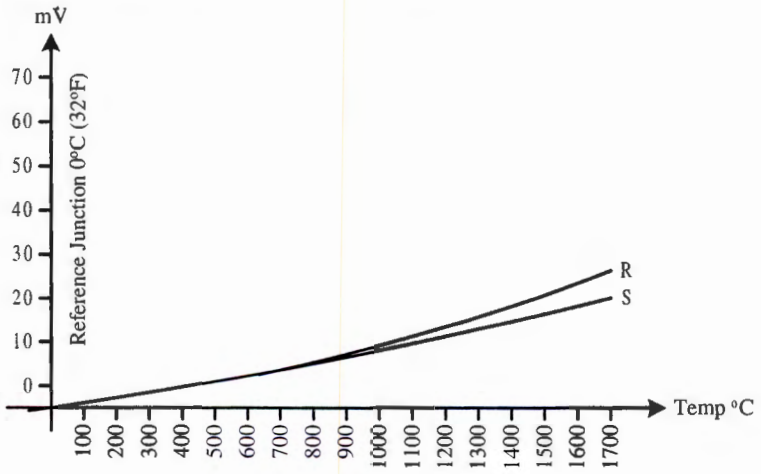
รูปที่ 10.9 เทอร์โมคัพเปิลต่ออนุกรมกันจะได้ผลรวมแรงดันไฟฟ้าซีเบ็ค

10.4.2 ชนิดของเทอร์โมคัพเปิ้ล (Thermocouple Type)

1. เทอร์โมคัพเปิลชนิด S (Type S) เป็นเทอร์โมคัพเปิลที่ผลิตขึ้นในปี พ.ศ. 2429 (ค.ศ. 1886) สายลบทำจากพลาตินัมและสายบวกทำจากโลหะผสมระหว่างพลาตินัม 90% กับโรเดียม 10% วัดอุณหภูมิ 0 °C ถึง 1482° C



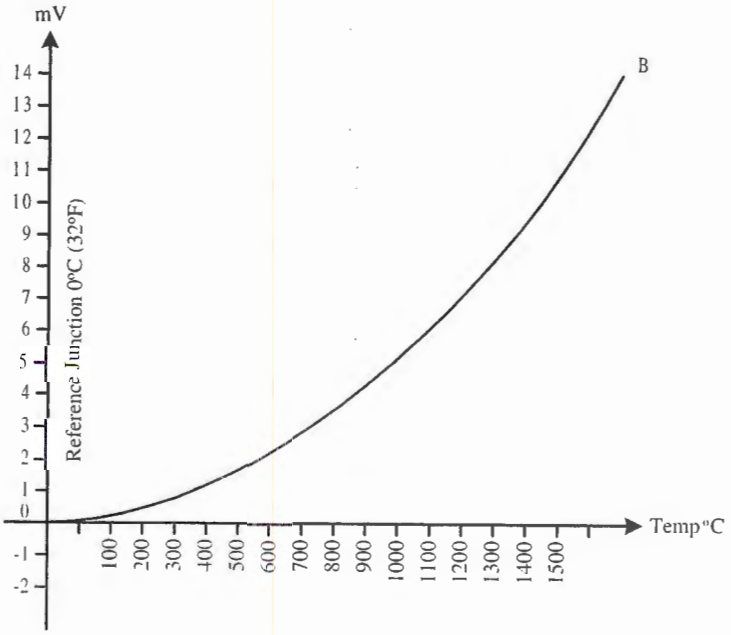
รูปที่ 10.10 กราฟของเทอร์โมคัพเปิลชนิด S



รูปที่ 10.11 กราฟของเทอร์โมคัพเปิลชนิด R เปรียบเทียบกับชนิด S

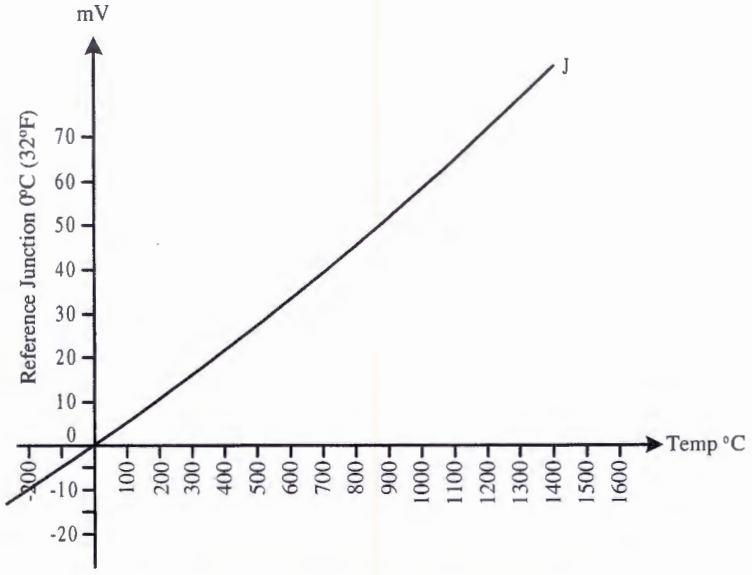
2. เทอร์โมคัพเปิลชนิด R (Type R) เป็นเทอร์โมคัพเปิลที่สายลบจะทำมาจากพลาตินัม สายบวกทำจากโลหะผสมระหว่างพลาตินัม 87% กับโรเดียม 13% จะให้แรงดันไฟฟ้าสูงกว่าแบบ S และวัดอุณหภูมิ 0°C ถึง 1482°C เหมือนชนิด S

3. เทอร์โมคัพเปิลชนิด B (Type B) เทอร์โมคัพเปิลชนิด B ผลิตเมื่อปี พ.ศ. 2497 (ค.ศ. 1954) ที่เยอรมัน สายบวกทำจากโลหะผสมระหว่างพลาตินัม 70% กับโรเดียม 30% และสายลบทำจากพลาตินัม 94% กับโรเดียม 6% เทอร์โมคัพเปิลชนิด B จะให้แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าชนิด S และ R แต่มีคุณสมบัติแข็งแรงและทนทานกว่า สามารถวัดอุณหภูมิได้สูงสุดถึง 1704°C



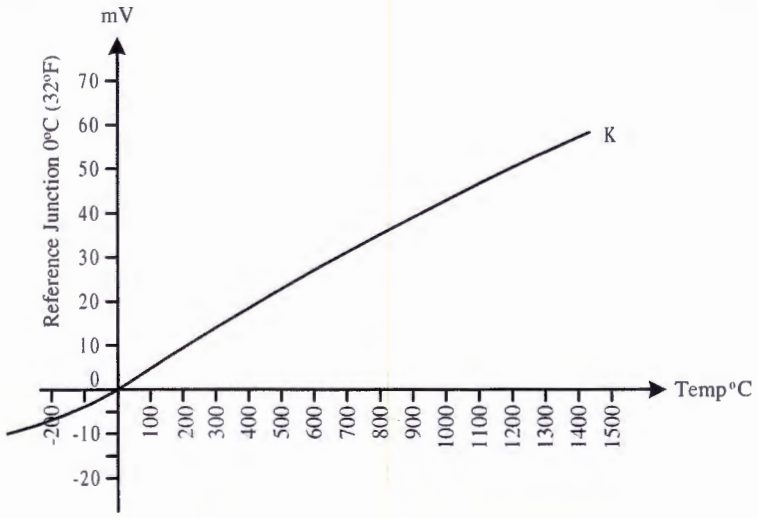
รูปที่ 10.12 กราฟของเทอร์โมคัพเปิลชนิด B

4. เทอร์โมคัพเปิลชนิด J (Type J) สายบวกทำจากเหล็กและสายลบทำจากโลหะผสมระหว่างทองแดง 60% กับนิกเกิล 40% เรียกว่าคอนสแทนแทน (Constantan) ทั้งนี้เพื่อทดแทนพลาตินัมที่มีราคาแพงจะใช้วัดอุณหภูมิ -190°C ถึง 760°C



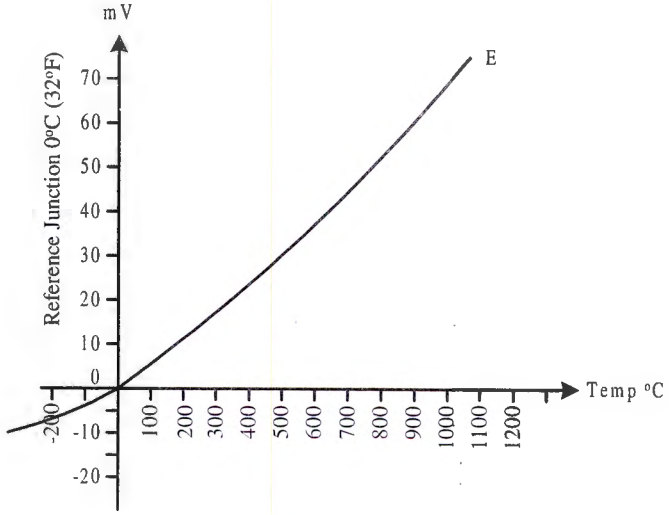
รูปที่ 10.13 กราฟของเทอร์โมคัพเปิลชนิด J

5. เทอร์โมคัพเปิลชนิด K (Type K) เป็นเทอร์โมคัพเปิลที่วัดอุณหภูมิได้สูงกว่าแบบ J สายบวกทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 10% กับโครเมียม 90% สายลบทำจากโลหะผสมระหว่างนิกเกิล 95% กับอีก 5% เป็นส่วนผสมระหว่างอลูมิเนียม แมงกานีสและซิลิกอน ชนิด K ใช้กันมากที่สุดซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิได้ระหว่าง $-190^{\circ}C$ ถึง $1260^{\circ}C$

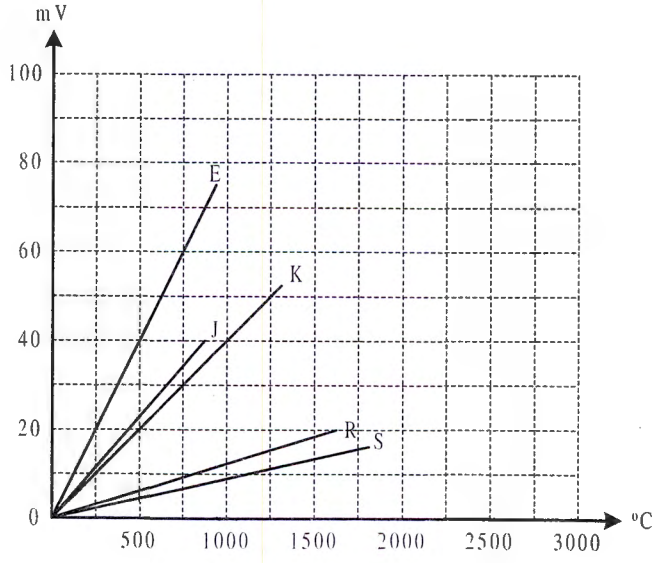


รูปที่ 10.14 กราฟของเทอร์โมคัพเปิลชนิด K

6. เทอร์โมคัพเปิลชนิด E (Type E) สายบวกทำจากโลหะผสมระหว่างโครเมียม 10% กับนิกเกิล 90% สายลบทำจากคอนสแทนแทน อุณหภูมิใช้งาน -100°C ถึง 1260°C



รูปที่ 10.15 กราฟของเทอร์โมคัพเปิลชนิด E



รูปที่ 10.16 เปรียบเทียบกราฟของเทอร์โมคัพเปิลแต่ละชนิด

รูปที่ 10.16 เป็นกราฟแรงดันไฟฟ้าต่ออุณหภูมิของเทอร์โมคัพเปิลโดยชนิด E, J และ K มีความชันหรือสโลปมากซึ่งจะมีความไวการวัดอุณหภูมิสูง ส่วนชนิด R และ S มีความชันน้อยจะมีความไวการวัดอุณหภูมิน้อย โดยปกติแล้วเทอร์โมคัพเปิลที่ทำจากธาตุบริสุทธิ์จะให้กราฟเป็นเชิงเส้นดี แต่จะผลิตแรงดันไฟฟ้าออกมาต่ำ

ตารางที่ 10.1 เทอร์โมคัพเปิลมาตรฐาน

Type	Materials	Normal Range
J	Iron-Constantan	-190°C to 760°C
K	Chromel-Alumel	-190°C to 1260°C
E	Chromel- Constantan	-100°C to 1260°C
S	90% Platinum+10% Rhodium-Platinum	0°C to 1482°C
R	87% Platinum+13% Rhodium-Platinum	0°C to 1482°C

การเปิดตารางของเทอร์โมคัพเปิล

ชนิด J อุณหภูมิอ้างอิง 0°C แรงดันไฟฟ้า $V_{(210^{\circ}C)} = 11.34mV$

ชนิด S อุณหภูมิอ้างอิง 0°C แรงดันไฟฟ้า $V_{(555^{\circ}C)} = 4.768mV$

กรณีที่ค่าแรงดันไฟฟ้าหรือค่าอุณหภูมิมีค่าเป็นทศนิยมจะหาค่าได้ดังสมการ

หาค่าอุณหภูมิ

$$T_M = T_L + \left[\frac{T_H - T_L}{V_H - V_L}\right](V_M - V_L) \qquad \text{.....(10.12)}$$

หาค่าแรงดันไฟฟ้า

$$V_M = V_L + \left[\frac{V_H - V_L}{T_H - T_L}\right](T_M - T_L) \qquad \text{.....(10.13)}$$

เมื่อ T_M, V_M คืออุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการวัด

T_L, V_L คืออุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าที่ค่าต่ำ

T_H, V_H คืออุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าที่ค่าสูง

ตัวอย่างที่ 10.5 เทอร์โมคัพเปิลชนิด K ที่อุณหภูมิอ้างอิง $0^{\circ}C$ มีแรงดันไฟฟ้า 23.72mV จงคำนวณหาอุณหภูมิจุดต่อที่ต้องการวัด

วิธีทำ

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

$$T_M = 570^{\circ}C + \frac{(575^{\circ}C - 570^{\circ}C)}{(23.84mV - 23.63mV)}(23.72mV - 23.63mV)$$

$$T_M = 570^{\circ}C + \frac{5^{\circ}C}{0.21mV}(0.09mV)$$

$$T_M = 572.1^{\circ}C \text{ .....\#}$$

ตัวอย่างที่ 10.6 เทอร์โมคัพเปิลชนิด J ที่อุณหภูมิอ้างอิง $0^{\circ}C$ วัดอุณหภูมิที่จุดต่อได้ $-172^{\circ}C$ จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่เทอร์โมคัพเปิลจะผลิตได้

วิธีทำ

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

$$V_M = -7.27mV + \frac{-7.12mV + 7.27mV}{-170^{\circ}C + 180^{\circ}C}(-172^{\circ}C + 175^{\circ}C)$$

$$V_M = -7.27mV + \frac{0.15mV}{5^{\circ}C}(3^{\circ}C)$$

$$V_M = -7.18mV \text{ .....\#}$$

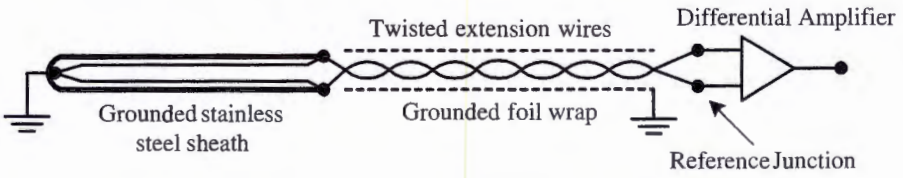
10.4.3 การป้องกันสัญญาณรบกวน (Noise Prevention))

การใช้เทอร์โมคัพเปิลเป็นเซ็นเซอร์อุณหภูมิในงานอุตสาหกรรมจะให้ค่าความแม่นยำในการวัดสูง แรงดันไฟฟ้าที่ผลิตออกจากเทอร์โมคัพเปิลจะน้อยกว่า 50mV ที่พบบ่อยคือ 2-3mV เท่านั้น สภาพแวดล้อมในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีสัญญาณรบกวนจากขบวนการผลิตมากเช่นจากเครื่องจักรกลหรือระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากนี้สัญญาณรบกวนยังมาจากการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวิทยุ โทรทัศน์หรือ ไมโครเวฟ ความแรงของสัญญาณรบกวนจะมากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมคัพเปิล ดังนั้นการติดตั้งต้องป้องกันสัญญาณรบกวนดังกล่าวมี 3 วิธีคือ

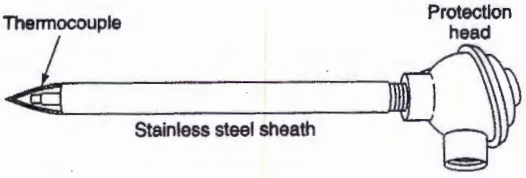
1. สายนำสัญญาณที่ต่อจากเทอร์โมคัพเปิลไปยังภาคขยาย หรือ ส่วนควบคุมการวัดจะต้องบิดเกลียว (Twisted Pair) และหุ้มด้วยปลอกตะกั่ว (Foil Sheath) แล้วต่อลงกราวด์

2. จุดต่อที่วัดอุณหภูมิและตัวเทอร์โมคัพเปิลต้องใส่ไว้ในปลอกโลหะสแตนเลส (Stainless Steel Sheath) และต่อลงกราวด์

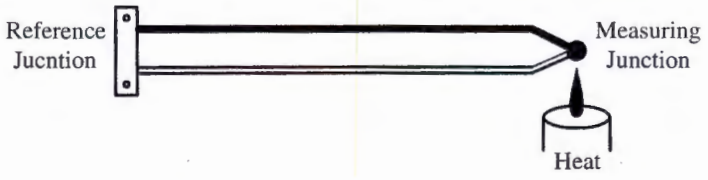
3. สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากเทอร์โมคัพเปิลให้ขยายด้วยวงจรขยายการวัด (Instrumentation Amplifier) เพราะกำจัดสัญญาณรบกวนแบบคอมมอนโหมดได้ดี



รูปที่ 10.17 การติดตั้งเทอร์โมคัพเปิลเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน



(ก) เทอร์โมคัพเปิลที่บรรจุในปลอกโลหะสแตนเลส



(ข) การวัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัพเปิลเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิง

รูปที่ 10.18 แสดงรูปร่างของเทอร์โมคัพเปิล

แรงดันไฟฟ้าของเทอร์โมคัพเปิลแต่ละชนิดจะมีค่าแตกต่างกัน ดังตารางที่ 10.2 ถึง 10.5 แสดงค่าอุณหภูมิของเทอร์โมคัพเปิลเพิ่มทีละ 5°C ที่อุณหภูมิอ้างอิง 0°C และจ่ายแรงดันไฟฟ้าเป็น mV

ตารางที่ 10.2 เทอร์โมคัพเปิลชนิด J ขั้วบวกทำจาก Iron-Constantan

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
−150	−6.50	−6.66	−6.82	−6.97	−7.12	−7.27	−7.40	−7.54	−7.66	−7.78
−100	−4.63	−4.83	−5.03	−5.23	−5.42	−5.61	−5.80	−5.98	−6.16	−6.33
−50	−2.43	−2.66	−2.89	−3.12	−3.34	−3.56	−3.78	−4.00	−4.21	−4.42
−0	0.00	−0.25	−0.50	−0.75	−1.00	−1.24	−1.48	−1.72	−1.96	−2.20
+0	0.00	0.25	0.50	0.76	1.02	1.28	1.54	1.80	2.06	2.32
50	2.58	2.85	3.11	3.38	3.65	3.92	4.19	4.46	4.73	5.00
100	5.27	5.54	5.81	6.08	6.36	6.63	6.90	7.18	7.45	7.73
150	8.00	8.28	8.56	8.84	9.11	9.39	9.67	9.95	10.22	10.50
200	10.78	11.06	11.34	11.62	11.89	12.17	12.45	12.73	13.01	13.28
250	13.56	13.84	14.12	14.39	14.67	14.94	15.22	15.50	15.77	16.05
300	16.33	16.60	16.88	17.15	17.43	17.71	17.98	18.26	18.54	18.81
350	19.09	19.37	19.64	19.92	20.20	20.47	20.75	21.02	21.30	21.57
400	21.85	22.13	22.40	22.68	22.95	23.23	23.50	23.78	24.06	24.33
450	24.61	24.88	25.16	25.44	25.72	25.99	26.27	26.55	26.83	27.11
500	27.39	27.67	27.95	28.23	28.52	28.80	29.08	29.37	29.65	29.94
550	30.22	30.51	30.80	31.08	31.37	31.66	31.95	32.24	32.53	32.82
600	33.11	33.41	33.70	33.99	34.29	34.58	34.88	35.18	35.48	35.78
650	36.08	36.38	36.69	36.99	37.30	37.60	37.91	38.22	38.53	38.84
700	39.15	39.47	39.78	40.10	40.41	40.73	41.05	41.36	41.68	42.00

ตารางที่ 10.3 เทอร์โมคัพเปิลชนิด T ขั้วบวกทำจาก Copper-Constantan

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
−150	−4.603	−4.712	−4.817	−4.919	−5.018	−5.113	−5.205	−5.294	−5.379	
−100	−3.349	−3.488	−3.624	−3.757	−3.887	−4.014	−4.138	−4.259	−4.377	−4.492
−50	−1.804	−1.971	−2.135	−2.296	−2.455	−2.611	−2.764	−2.914	−3.062	−3.207
−0	0.000	−0.191	−0.380	−0.567	−0.751	−0.933	−1.112	−1.289	−1.463	−1.635
+0	0.000	0.193	0.389	0.587	0.787	0.990	1.194	1.401	1.610	1.821
50	2.035	2.250	2.467	2.687	2.908	3.132	3.357	3.584	3.813	4.044
100	4.277	4.512	4.749	4.987	5.227	5.469	5.712	5.957	6.204	6.453
150	6.703	6.954	7.208	7.462	7.719	7.987	8.236	8.497	8.759	9.023
200	9.288	9.555	9.823	10.093	10.363	10.635	10.909	11.183	11.459	11.735
250	12.015	12.294	12.575	12.857	13.140	13.425	13.710	13.997	14.285	14.573
300	14.864	15.155	15.447	15.740	16.035	16.330	16.626	16.924	17.222	17.521
350	17.821	18.123	18.425	18.727	19.032	19.337	19.642	19.949	20.257	20.565

ตารางที่ 10.4 เทอร์โมคัพเปิลชนิด K ขั้วบวกทำจาก Chromel-Alumel

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
−150	−4.81	−4.92	−5.03	−5.14	−5.24	−5.34	−5.43	−5.52	−5.60	−5.68
−100	−3.49	−3.64	−3.78	−3.92	−4.06	−4.19	−4.32	−4.45	−4.58	−4.70
−50	−1.86	−2.03	−2.20	−2.37	−2.54	−2.71	−2.87	−3.03	−3.19	−3.34
−0	0.00	−0.19	−0.39	−0.58	−0.77	−0.95	−1.14	−1.32	−1.50	−1.68
+0	0.00	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.61	1.81
50	2.02	2.23	2.43	2.64	2.85	3.05	3.26	3.47	3.68	3.89
100	4.10	4.31	4.51	4.72	4.92	5.13	5.33	5.53	5.73	5.93
150	6.13	6.33	6.53	6.73	6.93	7.13	7.33	7.53	7.73	7.93
200	8.13	8.33	8.54	8.74	8.94	9.14	9.34	9.54	9.75	9.95
250	10.16	10.36	10.57	10.77	10.98	11.18	11.39	11.59	11.80	12.01
300	12.21	12.42	12.63	12.83	13.04	13.25	13.46	13.67	13.88	14.09
350	14.29	14.50	14.71	14.92	15.13	15.34	15.55	15.76	15.98	16.19
400	16.40	16.61	16.82	17.03	17.24	17.46	17.67	17.88	18.09	18.30
450	18.51	18.73	18.94	19.15	19.36	19.58	19.79	20.01	20.22	20.43
500	20.65	20.86	21.07	21.28	21.50	21.71	21.92	22.14	22.35	22.56
550	22.78	22.99	23.20	23.42	23.63	23.84	24.06	24.27	24.49	24.70
600	24.91	25.12	25.34	25.55	25.76	25.98	26.19	26.40	26.61	26.82
650	27.03	27.24	27.45	27.66	27.87	28.08	28.29	28.50	28.72	28.93
700	29.14	29.35	29.56	29.77	29.97	30.18	30.39	30.60	30.81	31.02
750	31.23	31.44	31.65	31.85	32.06	32.27	32.48	32.68	32.89	33.09
800	33.30	33.50	33.71	33.91	34.12	34.32	34.53	34.73	34.93	35.14
850	35.34	35.54	35.75	35.95	36.15	36.35	36.55	36.76	39.96	37.16
900	37.36	37.56	37.76	37.96	38.16	38.36	38.56	38.76	38.95	39.15
950	39.35	39.55	39.75	39.94	40.14	40.34	40.53	40.73	40.92	41.12
1000	41.31	41.51	41.70	41.90	42.09	42.29	42.48	42.67	42.87	43.06
1050	43.25	43.44	43.63	43.83	44.02	44.21	44.40	44.59	44.78	44.97
1100	45.16	45.35	45.54	45.73	45.92	46.11	46.29	46.48	46.67	46.85
1150	47.04	47.23	47.41	47.60	47.78	47.97	48.15	48.34	48.52	48.70
1200	48.89	49.07	49.25	49.43	49.62	49.80	49.98	50.16	50.34	50.52
1250	50.69	50.87	51.05	51.23	51.41	51.58	51.76	51.94	52.11	52.29
1300	52.46	52.64	52.81	52.99	53.16	53.34	53.51	53.68	53.85	54.03
1350	54.20	54.37	54.54	54.71	54.88					

ตารางที่ 10.5 เทอร์โมคัพเปิลชนิด S ขั้วบวกทำจาก Platinum-Platinum/10% Rhodium

	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
+0	0.000	0.028	0.056	0.084	0.113	0.143	0.173	0.204	0.235	0.266
50	0.299	0.331	0.364	0.397	0.431	0.466	0.500	0.535	0.571	0.607
100	0.643	0.680	0.717	0.754	0.792	0.830	0.869	0.907	0.946	0.986
150	1.025	1.065	1.166	1.146	1.187	1.228	1.269	1.311	1.352	1.394
200	1.436	1.479	1.521	1.564	1.607	1.650	1.693	1.736	1.780	1.824
250	1.868	1.912	1.956	2.001	2.045	2.090	2.135	2.180	2.225	2.271
300	2.316	2.362	2.408	2.453	2.499	2.546	2.592	2.638	2.685	2.731
350	2.778	2.825	2.872	2.919	2.966	3.014	3.061	3.108	3.156	3.203
400	3.251	3.299	3.347	3.394	3.442	3.490	3.539	3.587	3.635	3.683
450	3.732	3.780	3.829	3.878	3.926	3.975	4.024	4.073	4.122	4.171
500	4.221	4.270	4.319	4.369	4.419	4.468	4.518	4.568	4.618	4.668
550	4.718	4.768	4.818	4.869	4.919	4.970	5.020	5.071	5.122	5.173
600	5.224	5.275	5.326	5.377	5.429	5.480	5.532	5.583	5.635	5.686
650	5.738	5.790	5.842	5.894	5.946	5.998	6.050	6.102	6.155	6.207
700	6.260	6.312	6.365	6.418	6.471	6.524	6.577	6.630	6.683	6.737
750	6.790	6.844	6.897	6.951	7.005	7.058	7.112	7.166	7.220	7.275
800	7.329	7.383	7.438	7.492	7.547	7.602	7.656	7.711	7.766	7.821
850	7.876	7.932	7.987	8.042	8.098	8.153	8.209	8.265	8.320	8.376
900	8.432	8.488	8.545	8.601	8.657	8.714	8.770	8.827	8.883	8.940
950	8.997	9.054	9.111	9.168	9.225	9.282	9.340	9.397	9.455	9.512
1000	9.570	9.628	9.686	9.744	9.802	9.860	9.918	9.976	10.035	10.093
1050	10.152	10.210	10.269	10.328	10.387	10.446	10.505	10.564	10.623	10.682
1100	10.741	10.801	10.860	10.919	10.979	11.038	11.098	11.157	11.217	11.277
1150	11.336	11.396	11.456	11.516	11.575	11.635	11.695	11.755	11.815	11.875
1200	11.935	11.995	12.055	12.115	12.175	12.236	12.296	12.356	12.416	12.476
1250	12.536	12.597	12.657	12.717	12.777	12.837	12.897	12.957	13.018	13.078
1300	13.138	13.198	13.258	13.318	13.378	13.438	13.498	13.558	13.618	13.678
1350	13.738	13.798	13.858	13.918	13.978	14.038	14.098	14.157	14.217	14.277
1400	14.337	14.397	14.457	14.516	14.576	14.636	14.696	14.755	14.815	14.875
1450	14.935	14.994	15.054	15.113	15.173	15.233	15.292	15.352	15.411	15.471
1500	15.530	15.590	15.649	15.709	15.768	15.827	15.887	15.946	16.006	16.065
1550	16.124	16.183	16.243	16.302	16.361	16.420	16.479	16.538	16.597	16.657
1600	16.716	16.775	16.834	16.893	16.952	17.010	17.069	17.128	17.187	17.246
1650	17.305	17.363	17.422	17.481	17.539	17.598	17.657	17.715	17.774	17.832
1700	17.891	17.949	18.008	18.066	18.124	18.183	18.241	18.299	18.358	18.416
1750	18.474	18.532	18.590	18.648						

10.5 อาร์ทีดี (RTD)

อาร์ทีดี (RTD : Resistance Temperature Detector) คือตัวตรวจวัดอุณหภูมิที่ทำงานโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

ใน พ.ศ. 2364 (ค.ศ. 1821) ซึ่งเป็นปีเดียวกันที่โทมัส ซีเบ็คค้นพบหลักการเบื้องต้นของเทอร์โมคัพเปิลขณะเดียวกันฮัมพรีย์ เดวิด (Humpkrey David) ค้นพบว่าความต้านทานของโลหะบางชนิดจะเปลี่ยนเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยน จนกระทั่ง พ.ศ. 2414 (ค.ศ. 1871) วิลเลียม ซีเมนส์ (William Siemens) ได้ทดลองใช้ลวดพลาตินัมแทนลวดโลหะพบว่าความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นและใน พ.ศ. 2475 (ค.ศ. 1932) ถูกพัฒนาโดยซีเอช เมเยอรส์ (C.H. Meyers) ทำเป็นเซ็นเซอร์อุณหภูมิเรียกว่าอาร์ทีดี

อาร์ทีดีทำด้วยลวดโลหะที่มีคุณสมบัติความต้านทานจะเพิ่มหรือลดตามการเพิ่มของอุณหภูมิ ความยาวของอาร์ทีดีจะกำหนดค่าความต้านทานที่ต้องการที่อุณหภูมิ $0^{\circ}C$ ลวดโลหะจะพันอยู่บนแกนที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและทนความร้อนสูง เช่น เซรามิก หรือแก้ว ถ้าหากทำด้วยพลาตินัมการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิเป็นเชิงเส้นจึงมีย่านวัดอุณหภูมิกว้างจะใช้ตรวจวัดอุณหภูมิในงานอุตสาหกรรมมาก ความไวของอาร์ทีดีจะคิดจากค่า α_0 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน โดยพลาตินัมมีความไว $0.0039/^{\circ}C$ ถ้าทำด้วยนิกเกิลราคาจะถูกและมีความไว $0.0067/^{\circ}C$ อาร์ทีดีชนิดนิกเกิลจะทำงานไม่เป็นเชิงเส้นจึงใช้ในการตรวจวัดอุณหภูมิในช่วงต่ำๆ

10.5.1 ชนิดของอาร์ทีดี (Types of RTDS)

อาร์ทีดีทำด้วยโลหะหลายชนิด เช่น พลาตินัม นิกเกิล ทองแดง และทังสเตนแต่ละชนิดจะมีย่านวัดอุณหภูมิ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (α_0) แตกต่างกันดังตารางที่ 10.6

ตารางที่ 10.6 อาร์ทีดีชนิดต่างๆ

ชนิดของอาร์ทีดี	ย่านอุณหภูมิ... $^{\circ}C$	สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (α_0) .../$^{\circ}C$
พลาตินัม (Platinum)	-184 ถึง 815	0.0039
นิกเกิล (Nickel)	-73 ถึง 149	0.0067
ทองแดง (Copper)	-51 ถึง 149	0.0042
ทังสเตน (Tungsten)	-73 ถึง 276	0.0045

จากค่าอุณหภูมิของอาร์ทีดีแต่ละชนิดที่ระบุไว้จะเป็นย่านอุณหภูมิที่อาร์ทีดีทำงานในช่วงเชิงเส้นซึ่งจริงๆแล้วจะทำงานย่านอุณหภูมิกว้างกว่านี้เช่นพลาตินัมจะมีย่านอุณหภูมิ $-270^{\circ}C$ ถึง $982^{\circ}C$ และนิกเกิลจะมีย่านอุณหภูมิ $-101^{\circ}C$ ถึง $315^{\circ}C$

ตัวอย่างที่ 10.7 อาร์ทีดีชนิดพลาตินัมมีความต้านทาน 100Ω ที่ $0^{\circ}C$ จงคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อ $^{\circ}C$ และถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนเป็น $100^{\circ}C$ อาร์ทีดีจะมีความต้านทานเท่าไร

วิธีทำ

หา $R/^{\circ}C$ ที่ $0^{\circ}C$

$$R/^{\circ}C = \alpha_0 \times R_0 = 0.0039 \times 100\Omega = 0.39\Omega/^{\circ}C \text{ .....\#}$$

หา R ที่ $100^{\circ}C$

$$R = R_{100^{\circ}C} + R_{0^{\circ}C} = (0.39\Omega \times 100^{\circ}C) + 100\Omega = 139\Omega \text{ .....\#}$$

จากตัวอย่างที่ 10.7 อาร์ทีดีชนิดพลาตินัมจะเปลี่ยนความต้านทาน 0.39Ω ต่อ $1^{\circ}C$ ถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนเป็น $100^{\circ}C$ ความต้านทานจึงเป็น 39Ω ดังนั้น ความต้านทานค่าใหม่ที่ $100^{\circ}C$ ได้จากผลรวมของความต้านทาน 100Ω ที่ $0^{\circ}C$ กับความต้านทาน 39Ω ที่ $100^{\circ}C$

หาความต้านทานของลวดโลหะได้ดังสมการ

$$R_{(T)} = R_{(T_0)}(1 + \alpha_0 \Delta T) \qquad \text{..... (10.14)}$$

เมื่อ $R_{(T)}$ คือความต้านทานของลวดโลหะที่อุณหภูมิ T...Ω

R_0 คือความต้านทานของลวดโลหะที่อุณหภูมิอ้างอิง...Ω

$R_{(T_0)}$ คือความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง...Ω

α_0 คือสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิ.../$^{\circ}C$

$$\alpha_0 = \frac{\Delta R_0 / R_0}{^{\circ}C} \qquad \text{.....(10.15)}$$

เมื่อ α_0 คือสัมประสิทธิ์ความต้านทานต่ออุณหภูมิ.../$^{\circ}C$

ΔR_0 คือการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง... $\Omega/^{\circ}C$

R_0 คือความต้านทานอาร์ทีดีที่อุณหภูมิอ้างอิง... $^{\circ}C$

(อุณหภูมิ $0^{\circ}C$ เป็นอุณหภูมิอ้างอิง)

ตัวอย่างที่ 10.8 ลวดพลาตินัมที่อุณหภูมิจุดเยือกแข็งของน้ำ $0^{\circ}C$ มีความต้านทาน 100Ω ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน $0.39\,\Omega/^{\circ}C$ จงคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของลวดพลาตินัม

วิธีทำ

$$\alpha_0 = \frac{\Delta R_0 / R_0}{^{\circ}C}$$

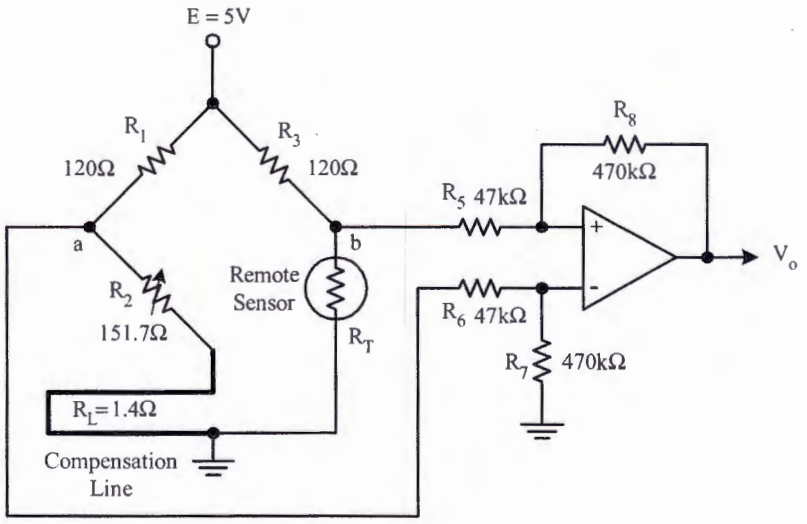
$$\alpha_0 = \frac{0.39\Omega / 100\Omega}{^{\circ}C} = 0.0039/^{\circ}C \ .....\#$$

ตัวอย่างที่ 10.9 ลวดพลาตินัมมีความต้านทาน 150Ω ที่ $20^{\circ}C$ จงคำนวณหาความต้านทานของลวดพลาตินัมที่ $50^{\circ}C$

วิธีทำ

$$R_{(T)} = R_{(T_0)}(1+\alpha_0 \Delta T)$$

$$R_{(T)} = 150\Omega(1+0.0039/^{\circ}C(50-20)^{\circ}C = 167.64\Omega \ .....\#$$



รูปที่ 10.19 การต่ออาร์ทีดีในวงจรบริดจ์ที่มีสายชดเชย

10.5.2 สายชดเชย (Compensation Line)

เนื่องจากอาร์ทีดีจะใช้วัดอุณหภูมิแบบเซ็นเซอร์ระยะไกล (Remote Sensor) การต่ออาร์ทีดีในวงจรบริดจ์จะต้องมีสายชดเชยดังรูปที่ 10.19 ซึ่งเป็นสายตัวนำที่มีความยาว ขนาด และสภาพอุณหภูมิแวดล้อมเหมือนกันกับสายตัวนำด้านขวาที่ต่อจากอาร์ทีดีลงกราวด์โดยสายชดเชยจะทำหน้าที่ลดผลความต้านทานที่เกิดจากด้านขวาของวงจรบริดจ์จึงชดเชยทางด้านซ้ายของวงจรบริดจ์

ตัวอย่างที่ 10.10 รูปที่ 10.19 เป็นวงจรควบคุมอุณหภูมิของเตาอบเครื่องหนึ่ง ที่ตั้งอุณหภูมิทำงาน (Set Point Value) ไว้ที่ $135^{\circ}C$ ควบคุมโดยใช้อาร์ทีดีชนิดพลาตินัมซึ่งมีความต้านทาน 105.8Ω ที่ $15^{\circ}C$ และ 151.7Ω ที่ $135^{\circ}C$ เมื่อปรับ $R_2 = 151.7\Omega$ ทำให้บริดจ์สมดุลพอดี แต่ถ้าเปิดเตาอบตอนแรกมีอุณหภูมิ $15^{\circ}C$ จะทำให้บริดจ์ไม่สมดุล จงคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้า V_0 ที่ $15^{\circ}C$

วิธีทำ

หา I_b, I_a ที่ $15^{\circ}C$ เมื่อบริดจ์ไม่สมดุล $R_{RTD} = 105.8\Omega$

$$I_b = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_L} = \frac{5V}{120\Omega + 151.7\Omega + 1.4\Omega} = 18.308mA$$

$$I_a = \frac{E}{R_3 + R_{RTD} + R_L} = \frac{5V}{120\Omega + 105.8\Omega + 1.4\Omega} = 22.002mA$$

หา V_b, V_a ที่ $15^{\circ}C$ เมื่อบริดจ์ไม่สมดุล

$$V_b = I_b(R_2 + R_L)$$
$$V_b = 18.308mA(151.7\Omega + 1.4\Omega) = 2.803V$$
$$V_a = I_a(R_{RTD} + R_L)$$
$$V_b = 22.002mA(105.85\Omega + 1.4\Omega) = 2.36V$$

หา ΔV_{ab}

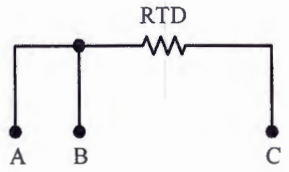
$$\Delta V_{ab} = |V_a - V_b| = |2.36V - 2.803V| = 443mV$$

$$Gain = \frac{V_o}{\Delta V_{ab}} = \frac{R_8}{R_5}$$

$$V_o = \Delta V_{ab} \times \frac{R_8}{R_5}$$

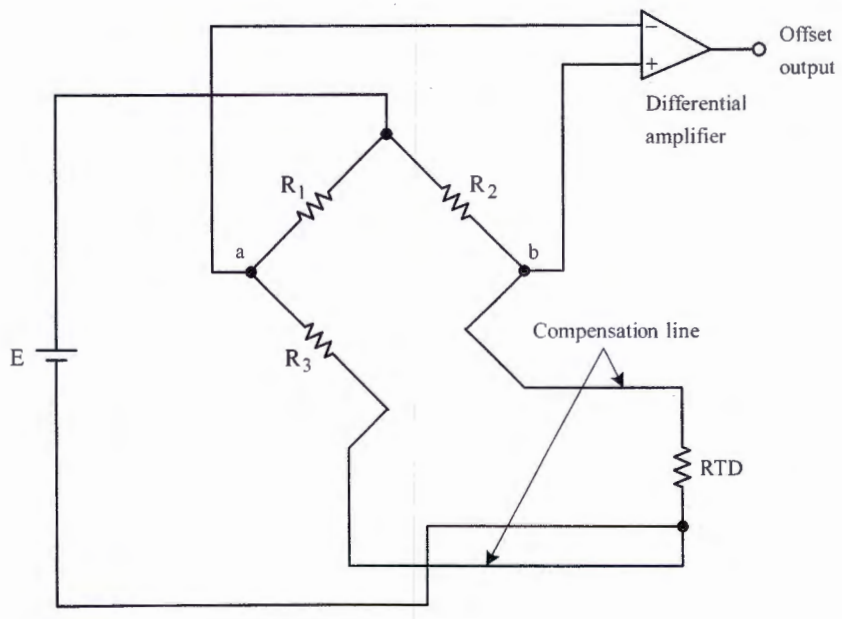
$$V_0 = 443mV \times \frac{470k\Omega}{47k\Omega} = 4.433V \text{ .....\#}$$

การต่อสายชดเชยอาร์ทีดีในวงจรบริดจ์อีกวิธีหนึ่งจะใช้อาร์ทีดีแบบ 3 สายดังรูปที่ 10.20 จะนิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมมาก เมื่อต่ออาร์ทีดีกับวงจรบริดจ์สายที่ต่อระหว่างอาร์ทีดีกับวงจรบริดจ์จะมีความยาวมากทำให้มีผลต่ออุณหภูมิและความต้านทานของสายที่เกิดขึ้นเป็นเหตุให้มีค่าความผิดพลาดการวัดได้ การต่อสายชดเชยจึงลดผลดังกล่าว



รูปที่ 10.20 อาร์ทีดีแบบ 3 สาย

การใช้อาร์ทีดีแบบ 3 สายจะมีสาย A และ B เป็นสายชดเชยโดยสาย A, B และ C ต้องมีความยาวเท่ากันและอยู่ในบรรยากาศที่มีอุณหภูมิเดียวกัน อาร์ทีดีแบบ 3 สายนี้จะให้ค่าความถูกต้องการวัดสูงและมีค่าดริฟท์ (Drift) ต่ำ (ค่าดริฟท์คือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเมื่ออุณหภูมิบรรยากาศเปลี่ยนแปลง) การต่ออาร์ทีดีแบบ 3 สายดังในรูปที่ 10.21



รูปที่ 10.21 การต่ออาร์ทีดีแบบ 3 สายในวงจรบริดจ์ที่มีสายชดเชย

10.5.3 ค่าคงที่กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Dissipation Constant : P_d)

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอาร์ทีดีจะเกิดพลังงานความร้อน ($P = I^2R$) ซึ่งจะเป็นกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากความร้อนในตัว (Self Heating) ซึ่งอาร์ทีดีจะกำหนดค่าไว้เป็นข้อมูล (Specification Sheet) มีหน่วยเป็น $W/^oC$ เช่นระบุไว้ $25mW/^oC$ หมายความว่าพลังงานความร้อนที่สูญเสียจาก $P = I^2R$ ภายในอาร์ทีดีเท่ากับ 25mW เมื่ออาร์ทีดีร้อนขึ้น 1^oC ซึ่งค่าคงที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียนี้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

$$\Delta T = \frac{P}{P_d} \qquad \text{.....(10.16)}$$

เมื่อ ΔT คืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจากความร้อนในตัว...^oC

P คือกำลังไฟฟ้าสูญเสียในอาร์ทีดี...W

P_d คือค่าคงที่กำลังไฟฟ้าสูญเสีย...$W/^oC$

ตัวอย่างที่ 10.11 อาร์ทีดีมี $\alpha_0 = 0.005\Omega/^oC$, $R = 500\Omega$, $P_d = 30mW/^oC$ ที่อุณหภูมิ 20^oC ถ้านำอาร์ทีดีต่อในวงจรบริดจ์รูปที่ 10.21 ที่มี $R_1 = R_2 = 500\Omega$ ให้ R_3 เป็นความต้านทานที่ปรับค่าได้เพื่อให้บริดจ์สมดุล ป้อน $E = 10V$ โดยติดตั้งอาร์ทีดีในที่ที่มีอุณหภูมิ 0^oC จงคำนวณหาค่า R_3 ที่ทำให้บริดจ์สมดุล

วิธีทำ

หาค่า R_{RTD} ของอาร์ทีดีที่ 0^oC (ยังไม่คิดผล Self Heating)

$$R_{(T)} = R_{(T_0)}[1 - \alpha_0 \Delta T]$$

$$R_{(T)} = R_{(T_0)}[1 - \alpha_0 (T - T_0)]$$

$$R_{(0^oC)} = 500\Omega\left[1 - 0.005\Omega/^oC(0^oC - 20^oC)\right] = 450\Omega$$

จะได้ $R_{RTD} = 450\Omega$

หากำลังไฟฟ้าสูญเสียในอาร์ทีดีเมื่อบริดจ์สมดุล

$$I = \frac{E}{R_2 + R_{RTD}} = \frac{10V}{500\Omega + 450\Omega} = 0.011A$$

$$P = I^2R = (0.011A)^2(450\Omega) = 0.054W$$

หาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

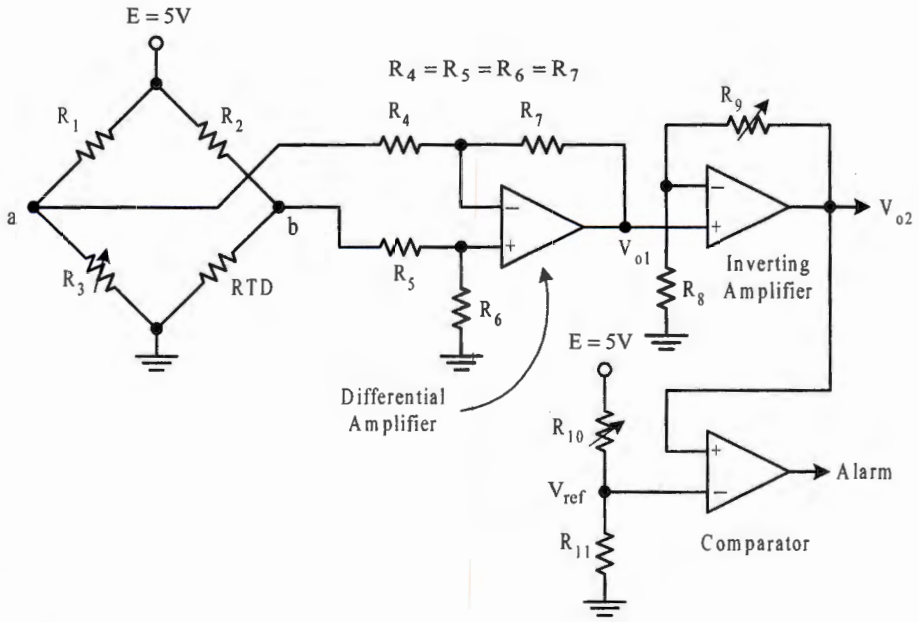
$$\Delta T = \frac{P}{P_d} = \frac{0.054W}{0.030W/^oC} = 1.8^oC$$

หา R_3 จากผลของ Self Heating ซึ่งจะได้ $R_3 = R_{RTD}$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น $1.8^\circ C$ หาความต้านทานของอาร์ทีดี

$$R_{RTD} = 500\Omega\left[1 - 0.005\Omega/^\circ C(1.8^\circ C - 20^\circ C)\right] = 454.5\Omega$$

$$R_3 = R_{RTD} = 454.5\Omega \ldots..\#$$

ตัวอย่างที่ 10.8 จงออกแบบวงจรควบคุมอุณหภูมิที่ใช้อาร์ทีดีเป็นตัวตรวจวัดอุณหภูมิ ในขบวนการอุตสาหกรรมหนึ่งเพื่อควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำระหว่าง $50^\circ C$-$80^\circ C$ และมีแรงดันไฟฟ้า 0-2V มีค่าความผิดพลาด $\pm 1^\circ C$ จากความร้อนในตัว ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง $100^\circ C$ สัญญาณเตือนภัยจะดังขึ้น



วิธีทำ

หาอุณหภูมิกึ่งกลาง (T_0)

อุณหภูมิของไอน้ำระหว่าง $50^\circ C - 80^\circ C$

จะได้ $$T_0 = \frac{50^\circ C + 80^\circ C}{2} = 65^\circ C$$

อาร์ทีดีที่อุณหภูมิ $65^\circ C$ มีข้อมูลดังนี้

$$R_{RTD} = 150\Omega$$

$$\alpha_{(65^\circ C)} = 0.004\Omega/^\circ C$$

$$P_d = 30mW/^\circ C$$

หาความต้านทาน RTD ที่อุณหภูมิ $50^{\circ}C, 80^{\circ}C, 100^{\circ}C$

จากสมการ $R_{(T)} = R_{(T_0)}[1 + \alpha_0 \Delta T]$

ที่ $50^{\circ}C$ $R_{RTD} = 150\Omega[1 + 0.004/^{\circ}C(50^{\circ}C - 65^{\circ}C] = 141\Omega$

ที่ $50^{\circ}C$ จะเป็นสภาวะบริดจ์สมดุลได้ $R_{RTD} = 141\Omega$ ....#

ที่ $80^{\circ}C$ $R_{RTD} = 150\Omega[1 + 0.004/^{\circ}C(80^{\circ}C - 65^{\circ}C] = 159\Omega$

ที่ $100^{\circ}C$ $R_{RTD} = 150\Omega[1 + 0.004/^{\circ}C(100^{\circ}C - 65^{\circ}C] = 171\Omega$

หากำลังไฟฟ้าสูญเสียสูงสุด

ค่าความผิดพลาด $\pm 1^{\circ}C$ เป็นค่าเผื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจาก Self Heating

จาก $\Delta T = \frac{P}{P_d}$

จะได้ $P = P_d \Delta T = (30W/^{\circ}C)(1^{\circ}C) = 30mW$

หากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ไหลผ่าน RTD ที่ $80^{\circ}C$

$$I_{RTD} = \sqrt{\frac{P}{R_{RTD}}} = \sqrt{\frac{30mW}{159\Omega}} = 13.7mA$$

หาแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม RTD ที่ $80^{\circ}C$

$$V_{RTD} = I_{RTD} \times R_{RTD(80^{\circ}C)} = 13.7mA \times 159\Omega = 2.17V$$

พิจารณาวงจรบริดจ์

หา R_2 และ R_1

$$R_2 = \frac{E - V_{RTD}}{I_{RTD}} = \frac{5V - 2.17V}{13.7mA} = 206.5\Omega \text{ ....\#}$$

เลือก $R_2 = 220\Omega$ เพราะเป็นค่ามาตรฐานและให้ $R_1 = R_2 = 220\Omega$ ....#

หา R_3

พิจารณาที่อุณหภูมิ $50^{\circ}C$ จะเป็นสภาวะบริดจ์สมดุลได้ $R_3 = R_{RTD} = 141\Omega$ ....#

หา V_{in}

แรงดันไฟฟ้าอินพุตที่ป้อนให้ Differential Amplifier

$$V_{in} = \Delta V = V_b - V_a = \left(\frac{E}{R_2 + RTD}\right)R_2 - \left(\frac{E}{R_1 + R_3}\right)R_3$$

ที่ $50^{\circ}C$ $V_{in} = \left(\frac{5V}{220\Omega + 141\Omega}\right) \times 141\Omega - \left(\frac{5V}{220\Omega + 141\Omega}\right) \times 141\Omega = 0V$

ได้ $V_{in} = 0V$ ที่ $50^{\circ}C$ เป็นสภาวะบริดจ์สมดุลจะไม่มีแรงดันไฟฟ้าอินพุตเมื่ออุณหภูมิต่ำสุดที่จะต้องออกแบบ

ที่ $80^{\circ}C$ $V_{in} = \left(\frac{5V}{220\Omega + 159\Omega}\right) \times 159\Omega - \left(\frac{5V}{220\Omega + 141\Omega}\right) \times 141\Omega = 0.1447V$

ได้ $V_{in} = 0.1447V$ ที่ $80^{\circ}C$ จะเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตเมื่ออุณหภูมิสูงสุดที่จะต้องออกแบบ

ที่ $100^{\circ}C$ $V_{in} = \left(\frac{5V}{220\Omega + 171\Omega}\right) \times 159\Omega - \left(\frac{5V}{220\Omega + 141\Omega}\right) \times 141\Omega = 0.2338V$

ได้ $V_{in} = 0.2338V$ ที่ $100^{\circ}C$ จะเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตเมื่อสัญญาณเตือนภัยดังขึ้น

พิจารณาวงจร Differential Amplifier

ให้วงจรมีอัตราขยายเป็น 1 จึงจัดให้ $R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = 10k\Omega$ .....#

จาก $V_{o1} = \frac{R_7}{R_4} V_{in} = \frac{R_7}{R_4}(V_b - V_a)$

หาอัตราขยาย (Gain) ที่ $80^{\circ}C$

ที่ $80^{\circ}C$ ได้ $V_{in} = 0.1447V$ และ $V_{o1} = 2V$

$$Gain = \frac{V_{o1}}{V_{in}} = \frac{2V}{0.1447V} = 13.8$$

พิจารณาวงจร Inverting Amplifier

หา R_8, R_9

เลือก $R_8 = 10k\Omega$ .....#

จาก $Gain = \frac{R_9}{R_8} + 1$

$$R_9 = Gain \times R_8 - 1 = 13.8 \times 10k\Omega - 1 = 12.8k\Omega \text{ .....\#}$$

หา V_{o2} ที่ $100^{\circ}C$

$$V_{o2} = Gain \times V_{in} = 13.8 \times 0.2338V = 3.23V$$

ที่ $100^{\circ}C$ $V_{o2} = 3.23V$ จะเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตส่งไปให้วงจร Comparator

พิจารณาวงจร Comparator

หา R_{10}, R_{11}

ที่ $100^{\circ}C$ $V_{o2} = 3.23V$ จะเป็นแรงดันไฟฟ้าอินพุตส่งไปให้วงจร Comparator ซึ่งจะเป็นแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงสูงสุดที่ขาอินพุตอินเวอร์ติ้ง จะได้ $V_{ref} = V_{o2} = 3.23V$

เลือก $R_{11} = 1k\Omega$ .....#

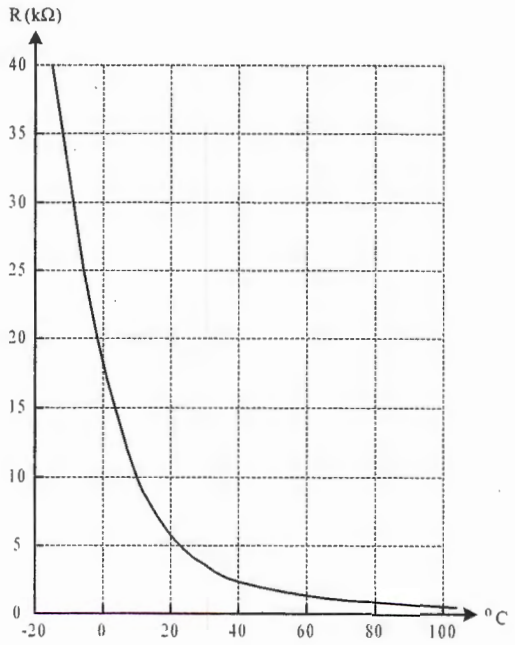
ให้ $E = 5V$ $I_{R_{11}} = \frac{V_{ref}}{R_{11}} = \frac{3.23V}{1k\Omega} = 3.23mA$

$$R_{10} = \frac{E - V_{ref}}{I_{R_{11}}} = \frac{5V - 3.23V}{3.23mA} = 548\Omega \text{ .....\#}$$

10.6 เทอร์มิสเตอร์ (Thermisters : R_T)

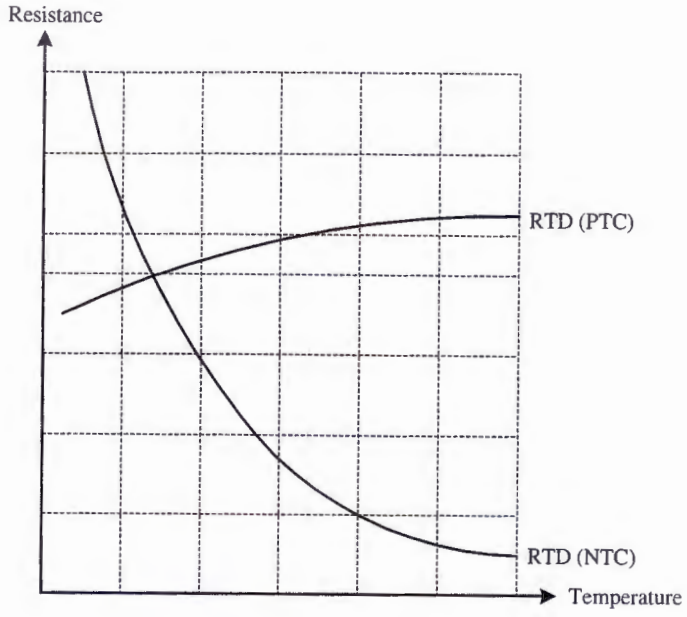
คำว่า Thermister มาจากการสนธิคำระหว่าง Thermal กับ Resistor เทอร์มิสเตอร์จึงเป็นทรานสดิวเซอร์ที่เป็นตัวต้านทานกึ่งตัวนำที่เปลี่ยนค่าความต้านทานตามการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทำจากออกไซด์มี 2 ชนิดคือ

1. ชนิด NTC (Negative Temperature Coefficient) เป็นเทอร์มิสเตอร์ที่ลดค่าความต้านทานเมื่ออุณหภูมิในตัวเทอร์มิสเตอร์เพิ่มขึ้นจะมีความไวต่ออุณหภูมิมากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานกับอุณหภูมิจะไม่เป็นเส้นตรง (Linearity) และมีช่วงใช้งานแคบๆ (Narrow Range Device)

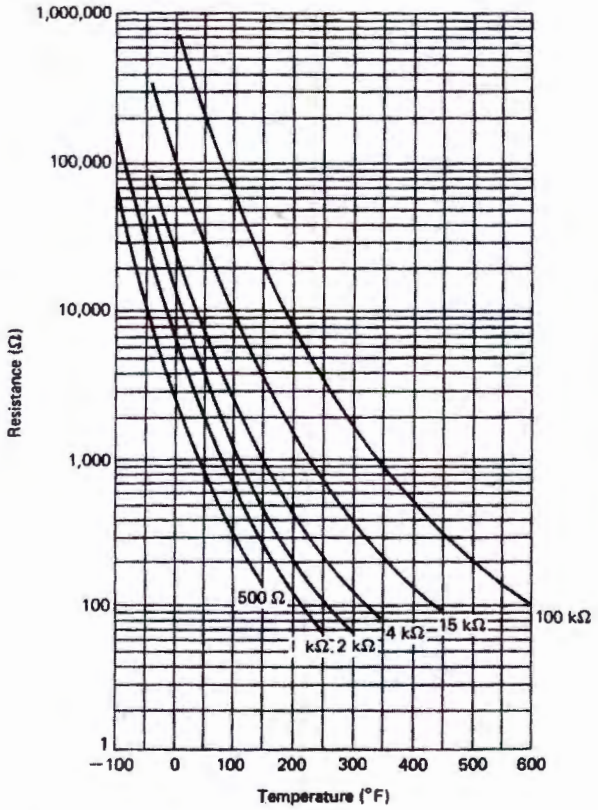


รูปที่ 10.22 กราฟ R-T ของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC

2. ชนิด PTC (Positive Temperature Coefficient) เป็นเทอร์มิสเตอร์ที่เพิ่มค่าความต้านทานเมื่ออุณหภูมิในตัวเทอร์มิสเตอร์เพิ่มขึ้นซึ่งค่าความต้านทานจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในช่วงอุณหภูมิแคบๆ เนื่องจากกราฟ R-T ไม่เป็นเส้นตรงเช่นกัน การใช้งานจะไม่ต้องการความละเอียดมากนัก



รูปที่ 10.23 เปรียบเทียบกราฟ R-T ของอาร์ทีดีแบบ NTC และ PTC



รูปที่ 10.24 กราฟ R-T ของเทอร์มิสเตอร์ที่มีค่าความต้านทานต่างๆ

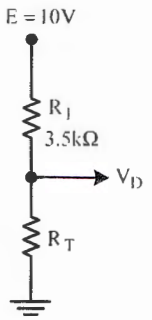
จากรูปที่ 10.23 กราฟ R-T ของอาร์ทีดีชนิดพลาตินัมจะทำงานแบบ PTC นั่นคือค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะเห็นว่ามีความไวต่ำกว่าเทอร์มิสเตอร์ แต่กราฟเกือบเป็นเชิงเส้นย่านอุณหภูมิใช้งานจึงกว้างกว่าส่วนกราฟ R-T ของเทอร์มิสเตอร์แบบ NTC จะลดค่าความต้านทานมากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่จะไม่เป็นเชิงเส้นย่านวัดอุณหภูมิจึงแคบ

จากรูปที่ 10.24 กราฟ R-T ของเทอร์มิสเตอร์ที่มีค่าความต้านทานต่างๆ เช่น เลือกเทอร์มิสเตอร์กราฟ 4kΩ ที่อุณหภูมิ 100°F จะมีความต้านทานประมาณ 2.8 kΩ

ค่าคงที่กำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Dissipation Constant)

ค่าคงที่กำลังไฟฟ้าสูญเสียของเทอร์มิสเตอร์นั้นจะเหมือนกันกับอาร์ทีดีคือจะเกิดจากความร้อนในตัวจะพิจารณาตามสภาพแวดล้อมเช่นในบรรยากาศจะมีค่า 1mW/°C ในน้ำมันมีค่า 10mW/°C

ตัวอย่างที่ 10.12 เทอร์มิสเตอร์ใช้เป็นเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิของห้องถ้ามีค่าความต้านทาน 3.5kΩ ที่อุณหภูมิ 20°C ค่าแรงดันไฟฟ้า $V_D = 5V$ และกราฟ R-T มีค่าสโลป −10%/°C ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย $P_d = 5mW/^oC$ จงคำนวณหาค่าความต้านทานเนื่องจากความร้อนในตัวและแรงดันไฟฟ้า V_D จะมีค่าเท่าไร



วิธีทำ

ที่อุณหภูมิ 20°C จากวงจรถ้าแรงดันไฟฟ้า $V_D = 5V$ จากการป้อนแรงดันไฟฟ้า 10V แสดงว่า $V_{R1} = 5V$ ดังนั้น $R_T = R_1 = 3.5k\Omega$

หากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากความร้อนในตัว

$$P = \frac{V_D^2}{R_T} = \frac{(5V)^2}{3.5k\Omega} = 7.1mW$$

หาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความร้อนในตัว

$$\Delta T = \frac{P}{P_D} = \frac{7.1mW}{5mW/^{o}C} = 1.42^{o}C$$

หา R_T เนื่องจากความร้อนในตัว

$$\alpha_0 = -10\%/^{o}C = -0.1/^{o}C$$
$$R_T = R_{T_0}(1+\alpha_0 \Delta T)$$
$$R_T = 3.5k\Omega\left[1-0.1/^{o}C \times 1.42^{o}C\right]$$
$$R_T = -3k\Omega \ldots..\#$$

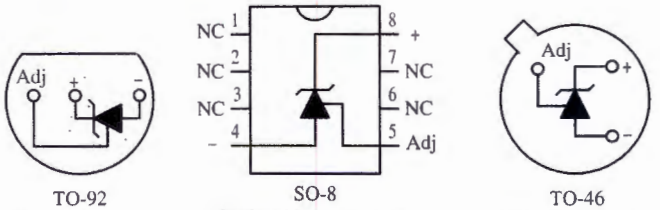
ค่าติดลบแสดงว่าเป็นเทอร์มิสเตอร์ชนิด NTC.....#

หาแรงดันไฟฟ้า V_D เนื่องจากความร้อนในตัว

$$V_D = \left(\frac{E}{R_1+R_T}\right)R_T = \left(\frac{10V}{3.5k\Omega+3k\Omega}\right)\times 3k\Omega = 4.6V \ldots..\#$$

10.7 เซ็นเซอร์อุณหภูมิแบบไอซี (IC Temperature Sensor)

ทรานสดิวเซอร์อุณหภูมิแบบเทอร์โมคัพเปิลจะให้สัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตต่ำมาก และค่าไม่เป็นเชิงเส้นตามอุณหภูมิ ส่วนอาร์ทีดีค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงค่าตามอุณหภูมิจะมีค่าน้อยมากและเทอร์มิสเตอร์จะมีปัญหาค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิไม่เป็นเชิงเส้นเช่นกัน การแก้ปัญหาทางหนึ่งจะใช้เซ็นเซอร์อุณหภูมิแบบไอซีที่นิยมใช้คือ LM335 จะให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต $10mV/^{o}K$



TO-92 Plastic Package (ก) | SO-8 Surface Mount Package (ข) | TO-46 Metal Can Package (ค)

รูปที่ 10.25 ลักษณะไอซี LM335 แบบต่างๆ

ไอซี LM335 เป็นซีเนอร์ไดโอดที่มีความไวต่ออุณหภูมิมากเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าไบอัสกลับจะได้แรงดันไฟฟ้าซีเนอร์ (Zener Voltage : V_Z) เป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

$$V_Z = \left(\frac{10mV}{^oC}\right)T \qquad \text{.....(10.17)}$$

เมื่อ V_Z คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต...V

T คืออุณหภูมิใดๆ... ^oC

เปลี่ยนองศาเคลวินเป็นองศาเซลเซียส โดยที่ $0^oC = 273^oK$ ดังนั้น แรงดันไฟฟ้า V_Z ที่อุณหภูมิ T ใดๆจะมีค่าดังสมการ

$$V_Z = 2.73V + \left(\frac{10mV}{^oC}\right)T \qquad \text{.....(10.18)}$$

ตัวอย่างที่ 10.13 จงคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้า V_Z ที่อุณหภูมิ $T = 30^oC$ และ $T = 0^oC$

วิธีทำ

หา V_Z ที่ 30^oC $\quad V_Z = 2.73V + \left(\frac{10mV}{^oC}\right)T = 2.73V + \left(\frac{10mV}{^oC}\right)\times 30^oC$

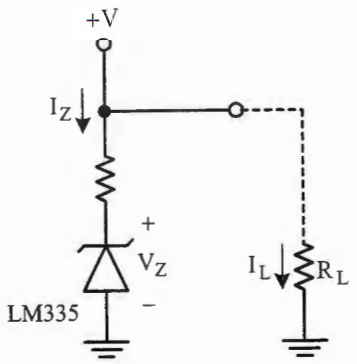
$V_Z = 2.73V + 0.3V = 3.03V$ .....#

หา V_Z ที่ 0^oC $\quad V_Z = 2.73V$ .....#

ตารางที่ 10.7 แสดงย่านอุณหภูมิ 3 ย่านของไอซีเซ็นเซอร์อุณหภูมิ สังเกตว่าจะมีค่าใกล้เคียงกับย่านอุณหภูมิของเทอร์โมคัพเปิลและอาร์ทีดี

ตารางที่ 10.7 ย่านวัดอุณหภูมิของ LM135/235/335

อุปกรณ์	ย่านอุณหภูมิ... ^oC	การใช้งาน
LM135	-55 ถึง +150	ทางทหาร
LM235	-40 ถึง +125	ทางอุตสาหกรรม
LM335	-40 ถึง +100	ทางการค้า



รูปที่ 10.26 วงจรใช้งานอย่างง่ายของ LM335

จากวงจรใช้งานของ LM335 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าไบอัสกลับให้ซีเนอร์ไดโอดจะเกิดกระแสไฟฟ้าซีเนอร์ I_Z ไหลผ่าน LM335 คือ

$$5mA > I_Z > 400\mu A \qquad \text{.....(10.19)}$$

ปกติแล้วกระแสไฟฟ้าซีเนอร์ I_Z จะทดสอบมาจากโรงงานให้ $I_Z = 1mA$ และการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าซีเนอร์ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากความร้อนในตัวที่เพิ่มขึ้น คือ $P_Z = I_Z V_Z$ การทำงานของ LM335 จะให้ค่าความถูกต้องสูงต้องกำหนดให้ $I_Z < 1mA$

$$R_{bias} = \frac{V_{supply} - V_{nominal}}{1mA} \qquad \text{.....(10.20)}$$

เมื่อ R_{bias} คือความต้านทานอนุกรม...Ω

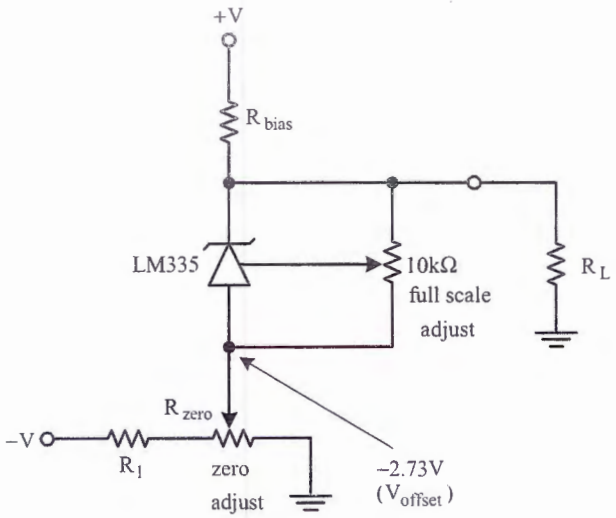
V_{supply} คือแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้วงจร...V

$V_{nominal}$ หรือ V_O คือแรงดันไฟฟ้าใช้งานของ LM335...V

การทำงานในช่วงเชิงเส้นนั้นกระแสไฟฟ้าโหลด (I_L) จะต้องให้น้อยกว่ากระแสไฟฟ้าซีเนอร์ (I_Z)

$$I_L << I_{Z(min)}$$

$$\frac{V_{max}}{R_L} << \frac{V_{supply} - V_{max}}{R_{bias}} \qquad \text{.....(10.21)}$$



รูปที่ 10.27 วงจรใช้งานของ LM335 ที่มีการคาลิเบรท

LM335 จะทำงานเป็นเชิงเส้นโดยอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง $\pm 1^{o}C$ ในรูปที่ 10.27 จะเพิ่มการคาลิเบรท (Calibrate) 2 จุดให้ LM335 โดย R_{zero} จะปรับแรงดันไฟฟ้าออฟเซท (Offset Voltage) เท่ากับ –273V ซึ่ง R_{zero} จะต้องให้มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ R_{bias}

ตัวอย่างที่ 10.14 จงออกแบบวงจรควบคุมอุณหภูมิด้วย LM335 รูปที่ 10.27 ทำงานย่าน $-10\ ^{o}C$ ถึง $+50^{o}C$ ที่อุณหภูมิใช้งาน (Nominal Temperature) $20^{o}C$ แรงดันไฟฟ้าของวงจร $\pm 5V$ และอยากทราบว่าโหลดมีค่าต่ำสุดอย่างน้อยเท่าไร

วิธีทำ

หา V_Z ที่ $20^{o}C$

$$V_Z = 2.73V + \left(\frac{10mV}{^{o}C}\right)T = 2.73V + \left(\frac{10mV}{^{o}C}\right) \times 20^{o}C = 2.93V$$

หา V_O ที่ $20^{o}C$

$$V_O = V_Z + V_{offset} = 2.93V + (-2.73V) = 200mV$$

หา R_{bias}

$$R_{bias} = \frac{V_{supply} - V_{nominal}}{1mA} = \frac{5V - 200mV}{1mA}$$

$$R_{bias} = 4.8k\Omega \ldots..\#$$

เลือก $R_{bias} = 4.7k\Omega \ldots..\#$

หา R_{zero}

เลือก R_{zero} ให้ค่าต่ำสุดที่มีผลต่อกระแสไฟฟ้า I_{bias} น้อยที่สุด

ให้ $R_{zero} << R_{bias}$ เลือก $R_{zero} = 500\Omega$ .....#

หา $V_{max\,T}$ ที่อุณหภูมิ $50^{\circ}C$

$$V_Z = 2.73V + \left(\frac{10mV}{^{\circ}C}\right)T = 2.73V + \left(\frac{10mV}{^{\circ}C}\right) \times 50^{\circ}C = 3.23V$$

$$V_{max\,T} = V_Z + V_{offset}$$

$$V_{max\,T} = 3.23V + (-2.73V) = 0.5V$$

หา R_L

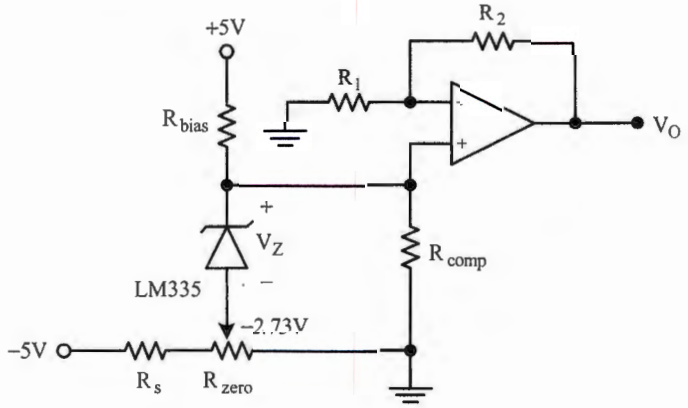
$$I_L << I_{Z(min)}$$

จาก $$\frac{V_{max\,T}}{R_L} << \frac{V_{supply} - V_{max\,T}}{R_{bias}}$$

จะได้ $$R_L >> \frac{V_{max\,T} R_{bias}}{V_{supply} - V_{max\,T}}$$

$$R_L >> \frac{0.5V \times 4.7k\Omega}{5V - 0.5V} = 522\Omega \text{ .....\#}$$

ตัวอย่างที่ 10.27 ถ้าต้องการเพิ่มอุณหภูมิทีละ $0.25^{\circ}C$ จงออกแบบวงจรขยายและถ้าต้องการอัตราขยาย 8 เท่า จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้า V_O



วิธีทำ

หา $V_{nominal}$ ที่ $0.25^{\circ}C$

$$V_{nominal} = V_Z + V_{offset}$$

$$V_{nominal} = 2.73V + \left(\frac{10mV}{^{\circ}C}\right) \times 0.25^{\circ}C + (-2.73V)$$

$$V_{nominal} = 2.5mV$$

หา R_1, R_2 และ R_{comp}

เลือก $R_1 = 3k\Omega$ .....#

$$A_V \approx \frac{R_2}{R_1} + 1$$

$$R_2 = (A_V - 1)R_1 = (8-1)\times 3k\Omega = 21k\Omega \text{ .....\#}$$

$$R_{comp} = R_1 // R_2 = 3k\Omega // 21k\Omega = 3k\Omega \text{ .....\#}$$

หา V_O

$$V_O = A_V \times V_{in} = 8\times 2.5mV = 20mV \text{ .....\#}$$

แบบฝึกหัดที่ 10

1. ก) จงเปลี่ยน $-222^\circ F$ เป็น $^\circ C$, $^\circ K$
   ข) จงเปลี่ยน $150^\circ C$ เป็น $^\circ K$ และ $^\circ F$

2. ก) เทอร์โมคัพเปิลชนิด J วัดแรงดันไฟฟ้า 22.5mV ที่อุณหภูมิอ้างอิง $0^\circ C$ อุณหภูมิจุดต่อเท่าไร
   ข) เทอร์โมคัพเปิลชนิด S วัดแรงดันไฟฟ้า 12.12mV ที่อุณหภูมิอ้างอิง $21^\circ C$ อุณหภูมิจุดต่อเท่าไร

3. ถ้าเทอร์โมคัพเปิลชนิด J นำไปวัดอุณหภูมิ $500^\circ C$ ที่อุณหภูมิอ้างอิง $-10^\circ C$ จะผลิตแรงดันไฟฟ้าเท่าไร

4. ต้องการได้แรงดันไฟฟ้า 1.5V จากเปลวไฟของเทียนไขที่อุณหภูมิ $700^\circ C$ จะต้องใช้เทอร์โมคัพเปิลชนิด K ต่ออนุกรมกันกี่ตัว ถ้าอุณหภูมิห้อง (Nominal Room Temperature) $70^\circ F$

5. อาร์ทีดีมี $\alpha_{(20^\circ C)} = 0.004/^\circ C$ ถ้า $R = 106\Omega$ ที่ $20^\circ C$ จงคำนวณหาความต้านทานของอาร์ทีดีที่ $25^\circ C$

6. อาร์ทีดีของข้อที่ 5 ใช้ในวงจรรูปที่ 10.21 ถ้า $R_1 = R_2 = R_3 = 100\Omega$ และ $E = 10V$ จงคำนวณหาแรงดันไฟฟ้าที่วงจรบริดจ์จ่ายออกมาเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป $1^\circ C$

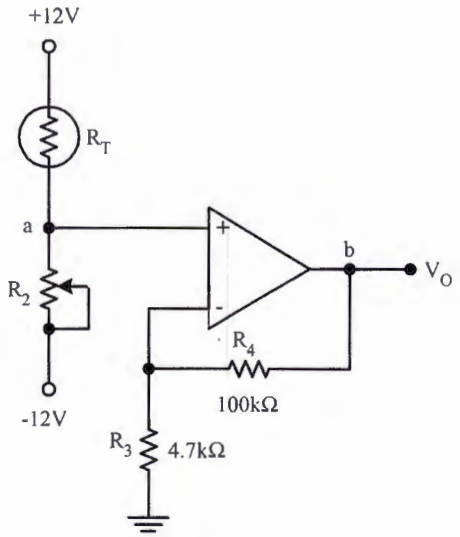
7. ค่าความต้านทานต่ออุณหภูมิของอาร์ทีดีดังค่าตามตาราง จงคำนวณหาความต้านทานโดยประมาณและความต้านทานโดยประมาณกำลังสองที่อุณหภูมิระหว่าง 100°C ถึง 130°C ถ้าสมมุติให้ $T_0 = 115°C$ และให้คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาด

T(°C)	90	95	100	105	110	115	120	125	130
R(Ω)	562.66	568.03	573.40	578.77	584.13	589.48	594.84	600.18	605.52

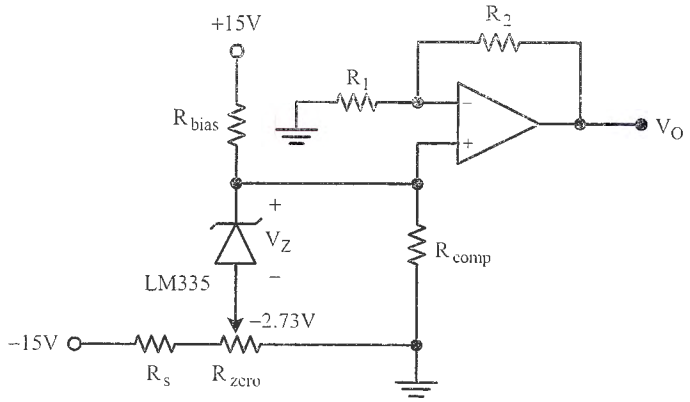
8. สมมุติว่าอาร์ทีดีในข้อที่ 5 มีค่าคงที่กำลังไฟฟ้าสูญเสีย 25mW/°C นำไปใช้ในวงจรที่มีกระแสไฟฟ้า 8mA ไหลผ่านเซ็นเซอร์ ถ้าอาร์ทีดีมีอุณหภูมิ 100°C จงคำนวณหาค่าความต้านทานของอาร์ทีดีและจะชี้ค่าอุณหภูมิเท่าไร

9. อาร์ทีดีมี $\alpha_0 = 0.0034/°C$ มี $R = 100\Omega$ ที่ 20°C จงออกแบบวงจรบริดจ์และออปแอมป์ตามรูปที่ 10.21 ให้ได้แรงดันไฟฟ้า 0-10V ที่อุณหภูมิ 20°C ถึง100°C อาร์ทีดีมีค่าคงที่กำลังไฟฟ้าสูญเสีย 28mW/°C

10. จากวงจรสมมุติที่จุด a มีแรงดันไฟฟ้า $V_a = 10V$ เมื่อเทอร์มิสเตอร์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 65°C จะมีความต้านทาน 2.589kΩ จงคำนวณหาค่า R_2 และ V_O



11. จงคำนวณหาค่าของ R_{bias}, R_L, R_{zero} ป้อน $V_{supply} = \pm 15V$ ย่านอุณหภูมิ 20°C ถึง 70°C ถ้าอุณหภูมิใช้งาน 40°C และคำนวณหาค่า R_L ต่ำสุดที่จะใช้ในวงจร



12. วงจรบริดจ์ใช้ LM335 ควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 49°C โดยที่อุณหภูมิ 49°C จะทำให้บริดจ์สมดุล จงคำนวณหาค่า V_{in} และ R_2 ที่ทำให้ $V_{ref} = V_{in}$ เมื่ออุณหภูมิของ LM335 มากกว่าหรือน้อยกว่า 49°C สภาวะลอจิก (Logic) ที่แรงดันไฟฟ้า V_O เป็นอย่างไร