

The definition of temperature

Temperature Measurements

The temperature of a medium is an expression of its content of thermodynamic energy. The thermodynamic energy represents the average velocity of the unarranged molecular movement in the material. To measure a temperature is therefore different from measuring one of the other basic units. Metres for example can be measured with an inch rule without affecting or changing the length. To measure temperature is different. Actually, the content of thermodynamic energy in the medium should be measured, based on the definition. This is of course not possible in practice and therefore a measuring principle is used, where the medium affects a sensor / a sensor element. The measurement must take so long that molecules in sensor and medium assume the same mean velocity. When this has been reached, the two bodies will have the same temperature (measurement medium and temperature sensor).

To achieve this, the following 3 conditions must be fulfilled:

The bodies must not exchange heat with external or internal sources.

The bodies must be in mutual balance.

The bodies have had thermal contact through sufficiently long time.

PRINCIPLES OF TEMPERATURE MEASUREMENT

Electrical temperature measurement is based on electrically measurable changes that are taking place in materials when exposed to temperature changes.

These changes could for example be:

Changes in resistance in conducting materials, Changes in resistance in semiconductors
Thermal voltage, Drop in diode voltage, Drop in transistor voltage, Changes in frequency

The principles are used for the following thermometers:

Resistance thermometers	Thermocouples
Thermistors	Frequency thermometers, etc.

Temperature is a measurement variable, which is familiar to every person. Temperature variations occur during the daily and yearly cycles of our planet. Because of its importance, temperature is one of the most commonly measured engineering variables. Temperature is actually the macroscopic manifestation of the energy level of atoms and molecules. This implies that there is a lower limit to temperature, **the absolute zero**. This is the temperature at which the atoms stop moving. Note that many thermodynamic equations are based on temperature scales starting at absolute zero (such as the ideal gas equation).

Temperature Scales

- Celsius °C (absolute scale Kelvin K)
- Fahrenheit °F (absolute scale Rankine °R)

Conversion Equations:

$K = ^\circ C + 273.15$ $^\circ F = 1.8^\circ C + 32$
 $^\circ R = ^\circ F + 459.67$ $^\circ C = (^{\circ}F - 32)/1.8$

$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{Rankine} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)_{Kelvin}$

	Kelvin	Degrees Celsius
Absolute zero (precisely by definition)	0 K	-273.15 °C
Coldest measured temperature ^[34]	450 pK	-273.149 999 999 55 °C
One millikelvin (precisely by definition)	0.001 K	-273.149 °C
Water's triple point (precisely by definition)	273.16 K	0.01 °C
Water's boiling point ^[A]	373.1339 K	99.9839 °C
Incandescent lamp ^[B]	2500 K	≈2,200 °C
Sun's visible surface ^{[D][36]}	5,778 K	5,505 °C
Lightning bolt's channel ^[E]	28 kK	28,000 °C
Sun's core ^[E]	16 MK	16 million °C
Thermonuclear weapon (peak temperature) ^{[E][37]}	350 MK	350 million °C

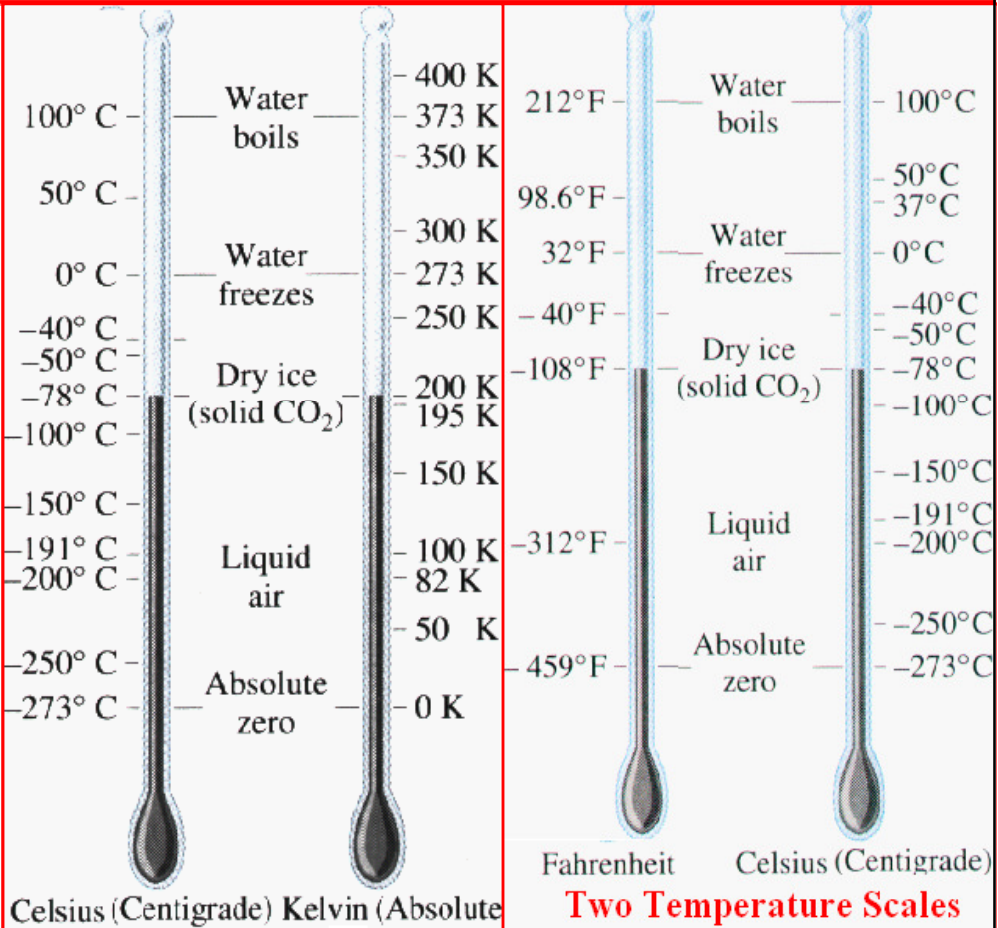


TABLE 2-1 Primary points for the International Practical Temperature Scale of 1968

Point	— Temperature —	
	°C	°F
Normal pressure = 14.6959 psia = 1.0132×10^5 N/m ²		
Triple point of equilibrium hydrogen	-259.34	-434.81
Boiling point of equilibrium hydrogen at $\frac{25}{76}$ normal pressure	-256.108	-428.99
Normal boiling point (1 atm) of equilibrium hydrogen	-252.87	-423.17
Normal boiling point of neon	-246.048	-410.89
Triple point of oxygen	-218.789	-361.82
Normal boiling point of oxygen	-182.962	-297.33
Triple point of water	0.01	32.018
Normal boiling point of water	100	212.00
Normal freezing point of zinc	419.58	787.24
Normal freezing point of silver	961.93	1763.47
Normal freezing point of gold	1064.43	1947.97

Secondary fixed points for the International Practical Temperature Scale of 1968

Point	Temperature,	Point	Temperature,
Triple point, normal H ₂	-259.194	Boiling point, Hg	356.66
Boiling point, normal H ₂	-252.753	Boiling point, S	444.674
Triple point, Ne	-248.595	Freezing point, Cu-Al eutectic	548.23
Triple point, N ₂	-210.002	Freezing point, Sb	630.74
Boiling point, N ₂	-195.802	Freezing point, Al	660.74
Sublimation point, CO ₂ (normal)	-78.476	Freezing point, Cu	1084.5
Freezing point, Hg	-38.862	Freezing point, Ni	1455
Ice point	0	Freezing point, Co	1494
Triple point, phenoxibenzene	26.87	Freezing point, Pd	1554
Triple point, benzoic acid	122.37	Freezing point, Pt	1772
Freezing point, In	156.634	Freezing point, Rh	1963
Freezing point, Bi	271.442	Freezing point, Ir	2447
Freezing point, Cd	321.108		
Freezing point, Pb	327.502		





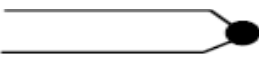
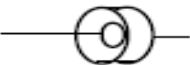

Interpolation procedures for International Practical Temperature Scale of 1968

Range, °C	Procedure
-259.34 to 0	Platinum resistance thermometer with cubic polynomial coefficients determined from calibration, at fixed points, using four ranges.
0 to 630.74	Platinum resistance thermometer with second degree polynomial coefficients determined from calibration at three fixed points in range
630.74 to 1064.43	Standard platinum-platinum rhodium (10%) thermocouple with second-degree polynomial coefficients determined from calibration at antimony, silver, and gold points.

Range, °C	Procedure
Above 1064.43	<p>Temperature defined by:</p> $\frac{J_t}{J_{Au}} = \frac{e^{C_2/2\lambda(T_{Au}+T_0)} - 1}{e^{C_2/2\lambda(T+T_0)} - 1}$ <p>J_t/J_{Au} = radiant energy emitted per unit time, per unit area, and per unit wavelength at wavelength λ, at temperature T, and gold-point temperature T_{Au}, respectively</p> <p>$C_2 = 1.438$ cm - K $T_0 = 273.16$ K</p>

Temperature Sensors (summary)

There are many different types of temperature sensors on the market. They can be primarily distinguished based on price, linearity, suitable temperature range, stability, ruggedness and suitability for integration into automated measurement systems.

Device	Physical principle	Advantage	Disadvantage
Liquid-in-Glass thermometer 	Thermal expansion of liquid	Simple, inexpensive	Not suitable for wide range of temperatures or measurement automation
Bimetallic thermometer 	Difference in thermal expansion coefficient causes mechanical bending	Simple, inexpensive, used in many dial thermometers	Limited temperature range
Resistance Temperature Detectors (RTD) 	Metal wire changes its resistance with temperature (higher temperature = higher resistance)	Most stable, Most accurate, more linear than thermocouple	Expensive, current source required, small resistance change, low absolute resistance, self heating
Device	Physical principle	Advantage	Disadvantage
Thermistor 	Semiconductor reduces its resistance with increased temperature	High output, fast	Non-linear, limited range, fragile, current source required, self heating
Thermocouple 	Dissimilar metals generate emf voltage across junction if at different reference temperatures	Self-powered, simple, rugged, inexpensive, wide variety, wide temperature range	Non-linear, low voltage, reference required, least stable least sensitive
I.C. Sensor 	Integrated circuit on chip senses temperature, amplifies and conditions signal	Most linear, highest output, inexpensive	$T < 200^{\circ}\text{C}$, power supply required, slow, self-heating, limited configuration
Radiative Temperature Sensor 	Detects radiated thermal energy at a specific wavelength	Non-contact, temperature measurement at a distance	Wavelength sensitivity, cost, allowable operating temperatures, adjustment for surface emissivity

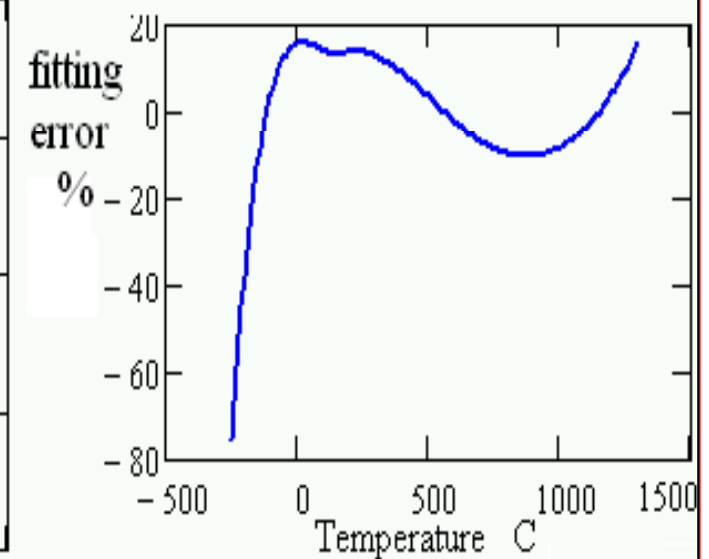
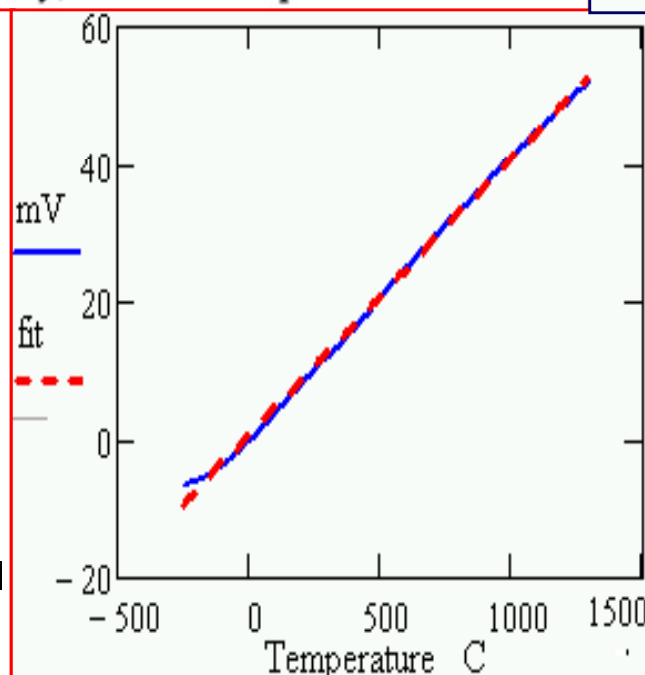
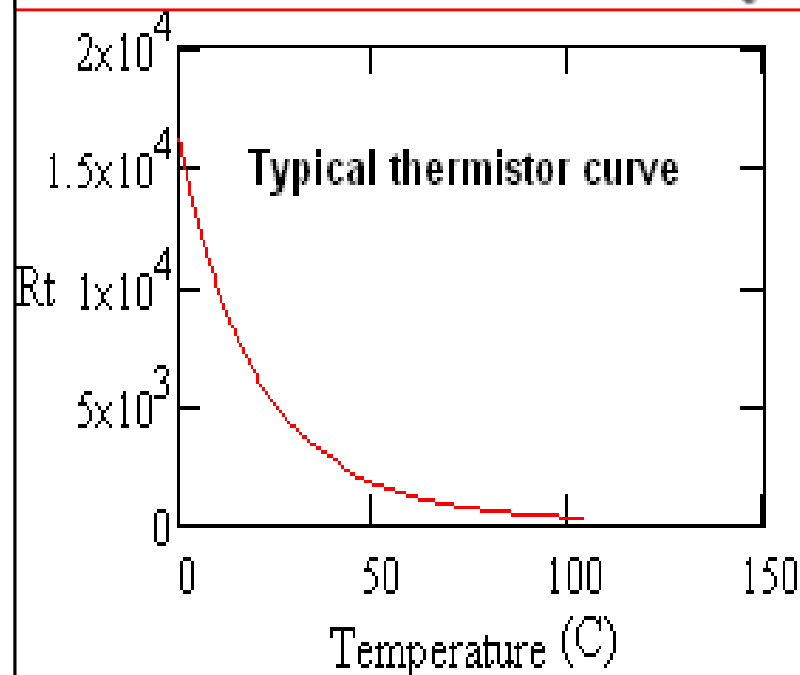
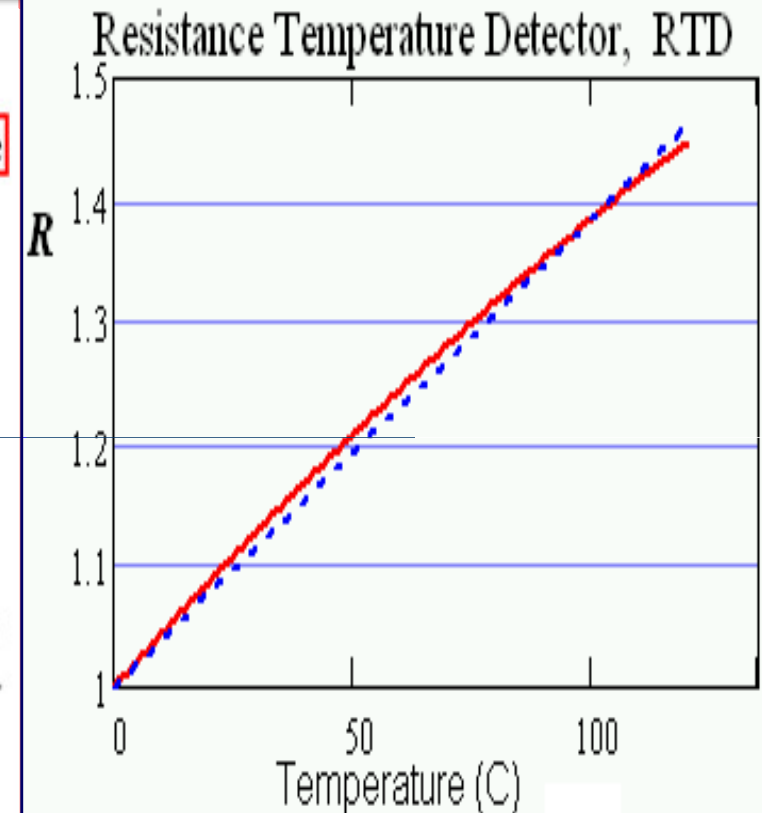
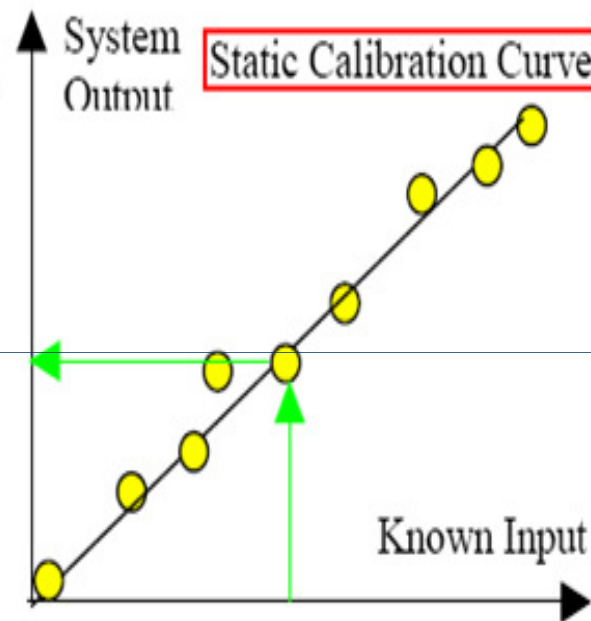
All temperature measuring sensors have to be calibrated before use to check their accuracy

Calibration is applying a range of known input values to the instrument and observing the system output

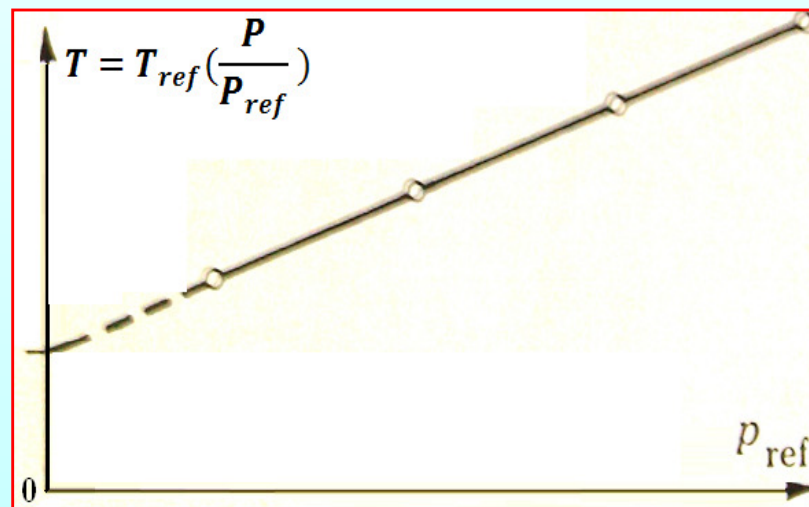
1. A static calibration curve can be determined from a plot of the calibration data. This curve is used later during an actual unknown measurement. An output is measured to return the unknown input.

2. Estimates of the accuracy and precision of the instrument can be determined from the static calibration curve.

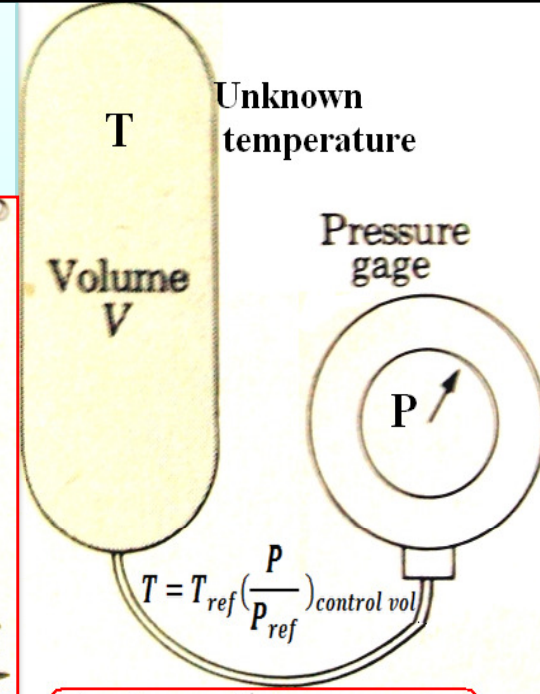
3. Calibration certificates should be available for all instruments you are using. A schedule to check the calibration of each instrument regularly, should be in place.



Ideal-Gas Thermometer: ideal gas law, $PV=mRT$, where $R=\check{R}/M$, \check{R} =universal gas constant =8314.5 J/kg.mol.K, M =molecular weight. Volume is exposed to standard reference temperature T_{ref} & we read pressure P_{ref} & we keep T_{ref} =cons., we change amount of gas in tank, we get different values of P_{ref} . In general we have small difference in gas ratio as quantity of gas is varied. If curve is extrapolated To zero pressure, true temperature Is obtained as defined by the ideal-gas eqn of thermometer that may be Used to measure temperatures as low as 1 K by extrapolation.

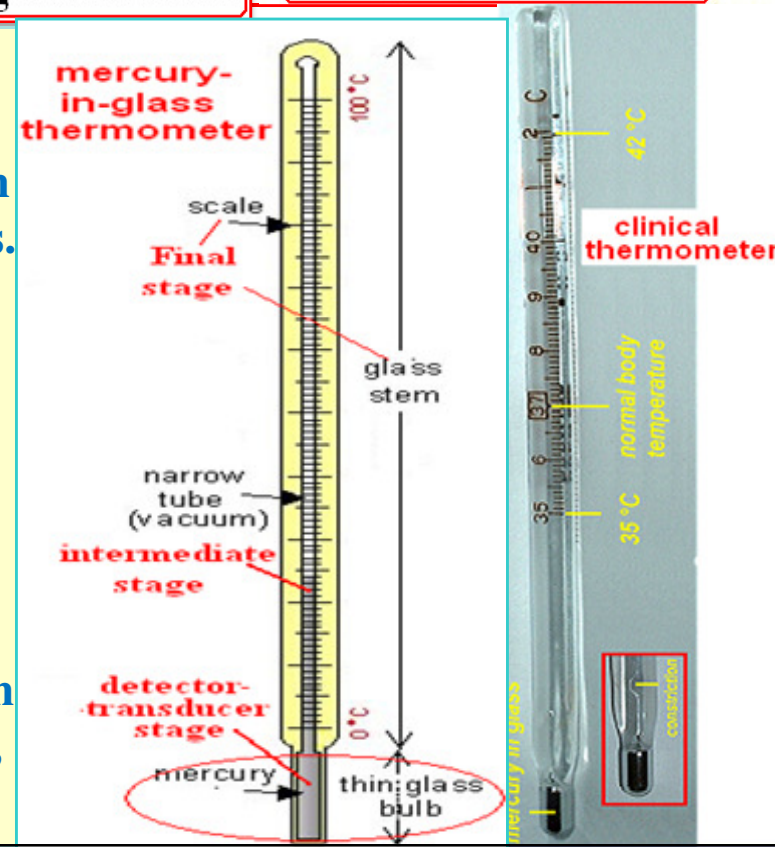


Results of measurements with Ideal-gas thermometer

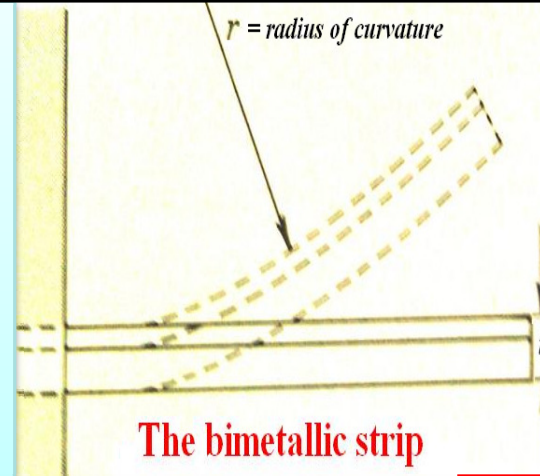


ideal-gas thermometer

Liquid-in-glass Thermometer: it is mechanical transducer. It has limited range & may not be used for automation, inexpensive not very accurate measurement. Mercury & Alcohol (higher expansion coefficient but limited low temp.) are most commonly used liquids. Expansion seen on scale is difference between expansion of liquid & expansion of glass, so errors may be due difference of depth of bulb immersed. To correct for combination effect, thermometers must be calibrated for a certain specified depth of immersion. High-grade thermometers have mark engraved to specify proper depth of immersion. Very precise mercury-in-glass thermometers be obtained from National Bureau of Standards with calibration data for each. Filling space above mercury with a gas like nitrogen increases pressure on mercury to increase its boiling temperature, and permits use of thermometer at higher temperatures.

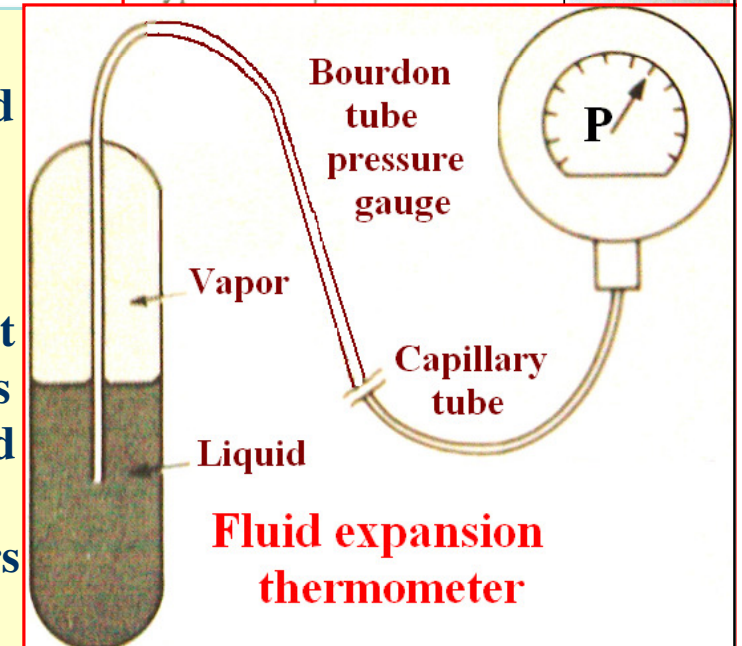


Bimetallic Strip: it is mechanical transducer. Consists of two pieces of metal with different coefficient of expansion are bonded together. If strip at temp. higher than bonding temp., strip bends in one direction & vis-versa. Radius of curvature depends on temp. It has limited range & may be used for automation, inexpensive not accurate measurement.



Mechanical properties of commonly used thermal materials		
Material	Thermal coefficient of expansion per °C	Modulus of elasticity psi
Invar	1.7×10^{-6}	21.4×10^6
Yellow brass	2.02×10^{-5}	14.0×10^6
Monel 400	1.35×10^{-5}	26.0×10^6
Inconel 702	1.25×10^{-5}	31.5×10^6
Stainless-steel type 316	1.6×10^{-5}	28×10^6

Fluid expansion thermometers: mechanical transducer, economical, versatile, widely used devices for industrial applications. Has limited range & may not be used for automation, inexpensive not accurate measurement. Increase in temp. causes liquid or gas expansion increasing pressure on gauge. System must be calibrated directly. Temp. of capillary tube may affect measurement. Capillary tube must be at temp. less than liquid bulb so that fluid in capillary will always be in subcooled liquid state, while pressure will be uniquely specified for each temp. in the equilibrium mixture contained in the bulb. Capillary tubes 60m long may be used. Electric pressure transducers may be used to get more accuracy or higher transient response.



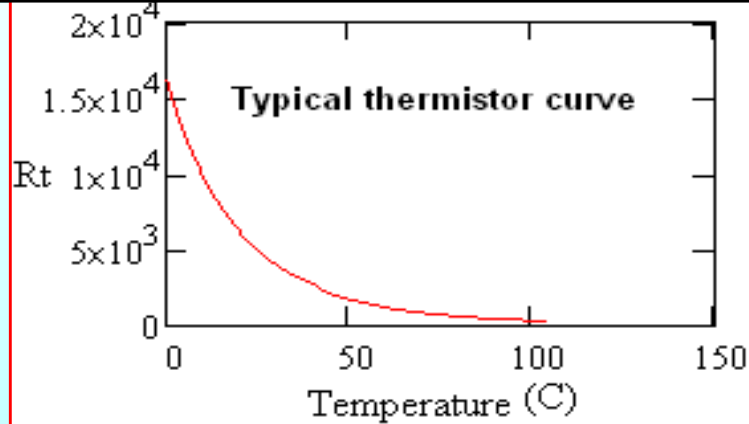
Temperature measurement by electrical Effects:

Resistance thermometer

Resistance thermometers, called resistance temperature detectors or resistive thermal devices (RTDs), are temperature sensors that exploit the predictable change in electrical resistance of some materials with changing temperature. As they are almost invariably made of platinum, they are often called **platinum resistance thermometers (PRTs)**. They are slowly replacing the use of thermocouples in many industrial applications below 600 °C, due to higher accuracy and repeatability.

Electrical-Resistance Thermometer:

consists of resistive element/wire, exposed to temperature to be measured by finding change in resistance. Only for narrow temp. range, we define linear resistance-temperature coefficient, α , as $\alpha = (R_2 - R_1) / R_1 (T_2 - T_1)$.



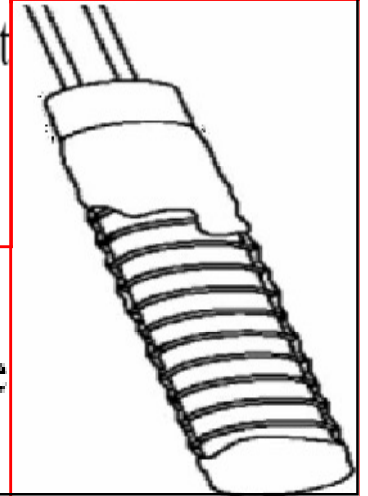
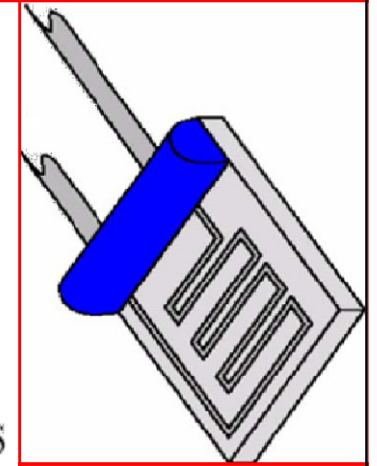
But for wider temp. range, resistance is quadratic eqn.: $R(T) = R_o(1 + aT + bT^2)$, Platinum thermometer (PRT) is used widely. In all cases, care to be made to ensure that resistance wire is free of mechanical stress or effect of moisture.

Resistance-temp. coefficient, room temp.	
Nickel	0.0067
Iron (alloy)	0.002 to 0.006
Tungsten	0.0048
Aluminum	0.0045
Copper	0.0043
Lead	0.0042
Silver	0.0041
Gold	0.004
Platinum	0.00392
Mercury	0.00099
Manganin	± 0.00002
Carbon	-0.0007
Electrolytes	-0.02 to -0.09
Semiconductor (thermistors)	-0.068 to +0.14

General description of Resistance Thermometers:

There are many categories; carbon resistors, film, and wire-wound types are the most widely used.

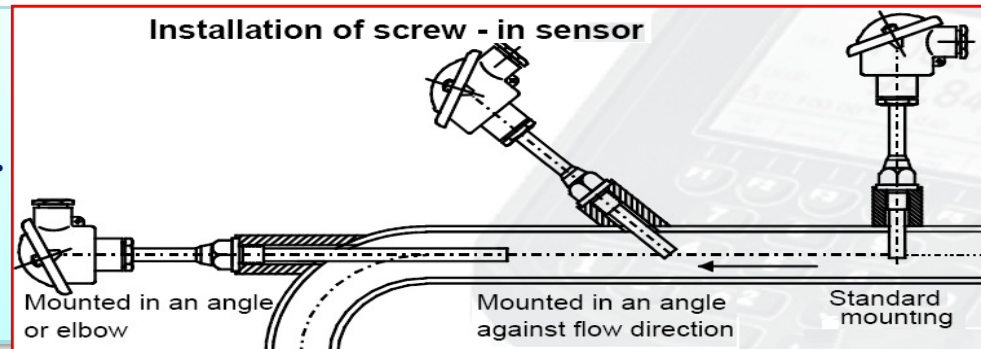
- *Carbon resistors* are widely available and are very inexpensive. They have very reproducible results at low temperatures. They are the most reliable form at extremely low temperatures. They generally do not suffer from significant hysteresis or strain gauge effects.
- *Film thermometers* have a layer of platinum on a substrate; the layer may be extremely thin, perhaps one micrometer. Advantages of this type are relatively low cost (the high cost of platinum being offset by the tiny amount required) and fast response. Such devices have improved performance although different expansion rates of substrate and platinum give "strain gauge" effects and stability problems.
- *Wire-wound thermometers* can have greater accuracy, especially for wide temperature ranges. The coil diameter provides a compromise between mechanical stability and allowing expansion of the wire to minimize strain and consequential drift.



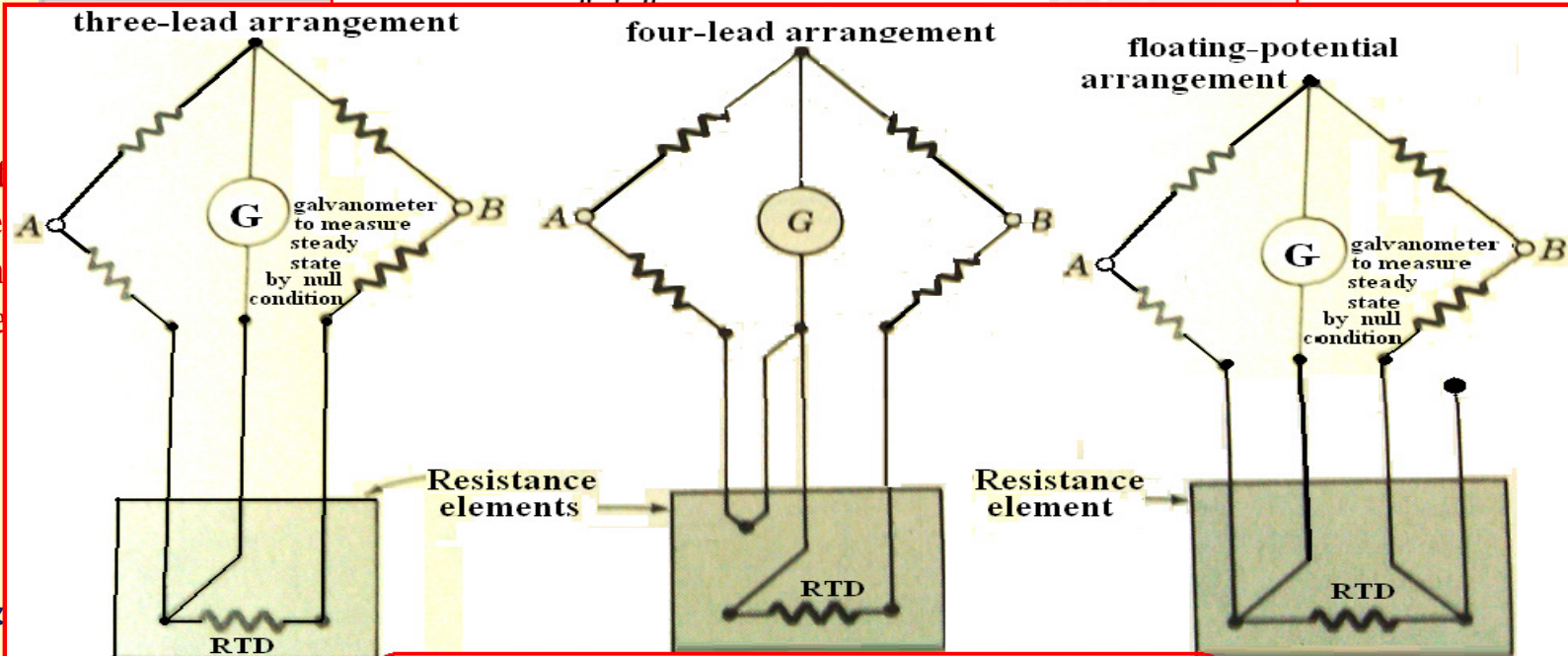
Coil elements have largely replaced wire-wound elements in industry. This design has a wire coil which can expand freely over temperature, held in place by some mechanical support which lets the coil keep its shape. This design is similar to that of a SPRT, the primary standard upon which ITS-90 is based, while providing the durability necessary for industrial use. The current international standard which specifies tolerance, and temperature-to-electrical resistance relationship for platinum resistance thermometers is IEC 60751:2008. By far most common device used in industry have nominal resistance 100 ohms at 0 °C, and are called Pt100 sensors ('Pt' is symbol for platinum). sensitivity of standard 100 ohm sensor is a nominal 0.385 ohm/°C. RTDs with sensitivity of 0.375 and 0.392 ohm/°C as well as a variety of others are also available.

Connection of Resistance-Temperature

RTD: various methods are used to insert RTD in place of the unknown temperature (as seen). In all cases, care must be made to ensure that RTD is free of mechanical stresses & strong transients so to get some accurate results.

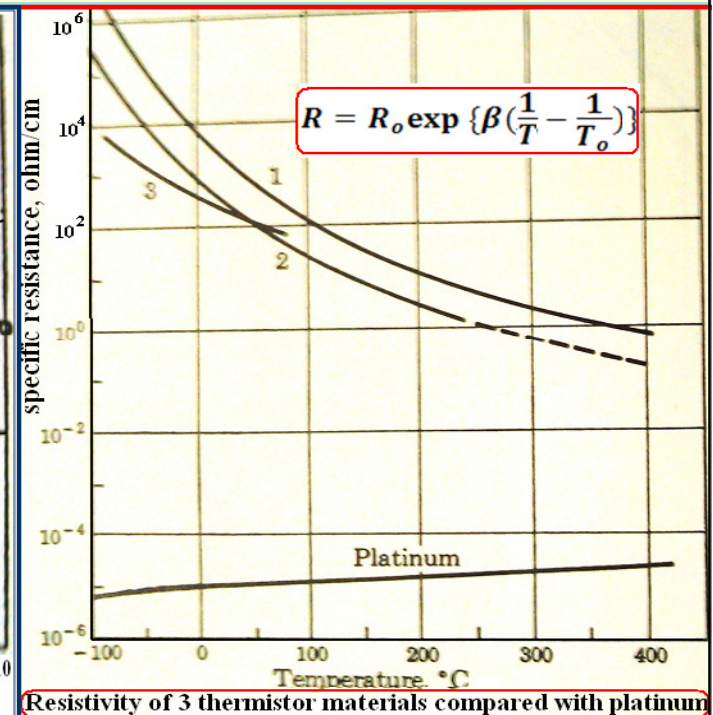
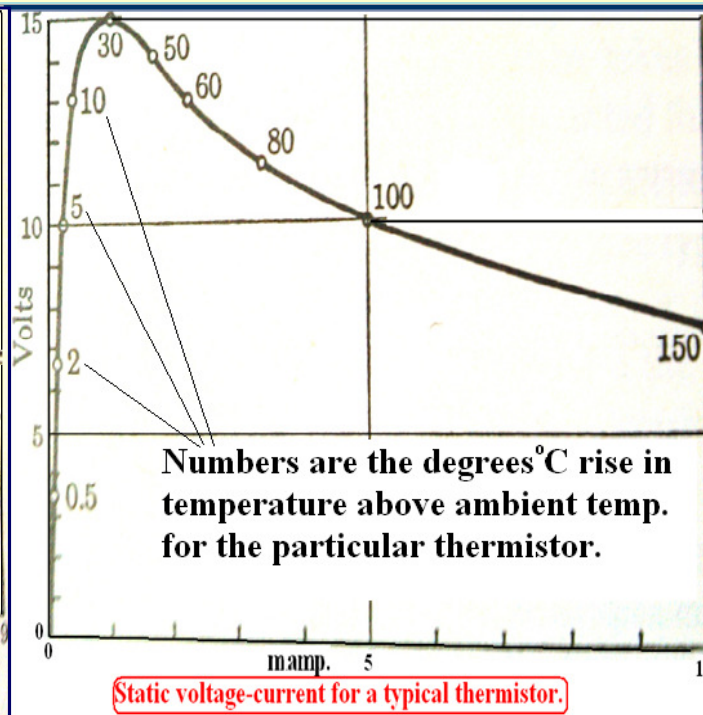
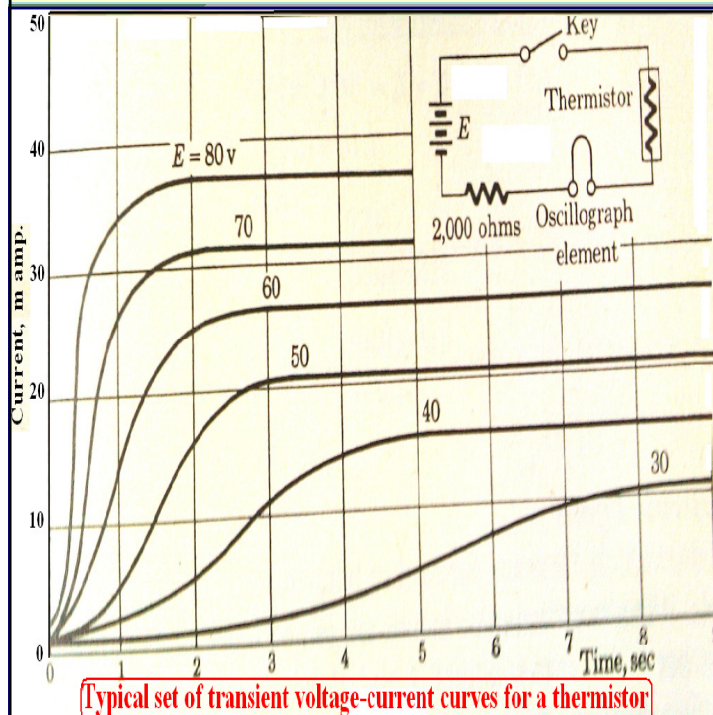


Change of resistance to be done by Wheatstone bridge or resistance potentiometer. At steady-state measurement, null condition is to be made while unsteady measurement needs using deflection bridge. Errors are due to resistance of the lead wires connecting the RTD to a bridge circuit. Several arrangements may be used to correct for this effect. Interchanging leads & average of readings is used.



Methods of connecting for lead resistance with RTD

Thermistor: is a semiconductor device has $-(ve)$ & exponential resistance temp. coefficient, in contrast to $+(ve)$ polynomial coefficient of most RTD metals. Numerical values of β varies between 3500-4600 K depending on material/temperature. Transients response is seen to increase as voltage E is increased.

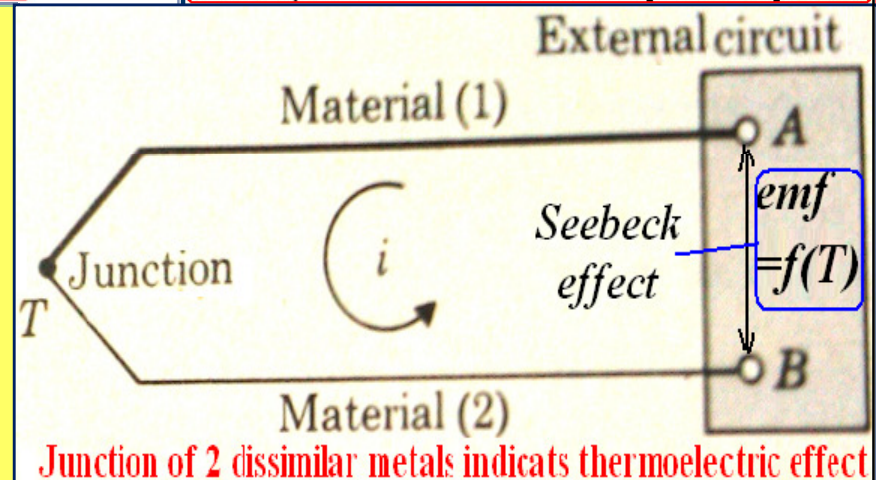


Thermo-electric Effect, thermocouples: the most common electric transducers used widely to measure temperature.

Seebeck effect (the main one): if junction of two dissimilar metals is connected, we will get $emf = f(\text{Temp. of junction})$.

Peltier effect: if junction of two dissimilar metals connected to external circuit AB, we have a change in the above emf .

Thomson effect: if temp. gradient exists along either or both materials, we may get another change in the above emf .

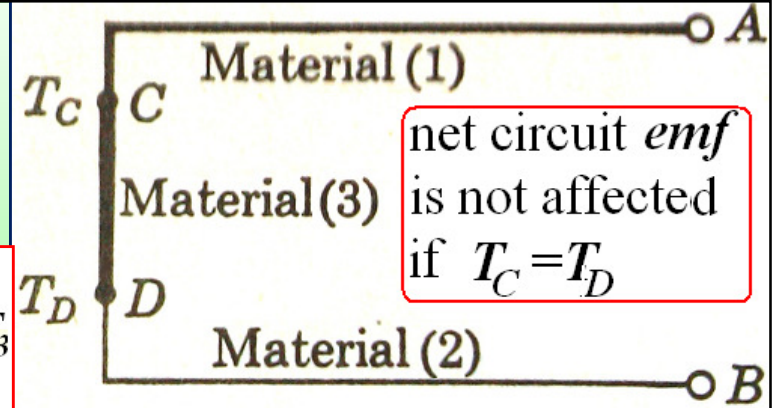
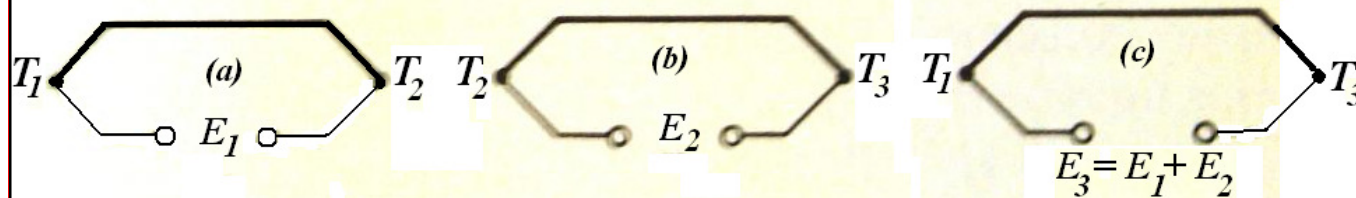


Thermo-electric circuits include combination of Seebeck+Peltier+Thomson effects. To measure emf we connect to voltage measuring device, there will be another thermal emf due to device connection wires. This emf depends on the temperature of connection wires.

Analysis of thermoelectric circuits: we have 2 rules:

1-Law of intermediate metals: if 3rd metal is connected in circuit, net *emf* is not affected if new connections at same temp. ($T_C = T_D$).

2-Law of intermediate temperatures: as shown we get $E_3 = E_1 + E_2$



Law of intermediate metals

Reference temperature: we have 2 junctions, one at unknown T , 2nd at reference temp. = 0.0°C as shown. System in fig.A is necessary if the binding ports at the potentiometer are at different temperatures. But system in fig.B is satisfactory if binding ports at voltmeter are at same temp. To be effective, system in A must have copper binding ports; ie., binding ports & lead wires must be of the same material.

Most Standard thermocouples calibration data/tables/charts based on Reference temperature = 0.0°C

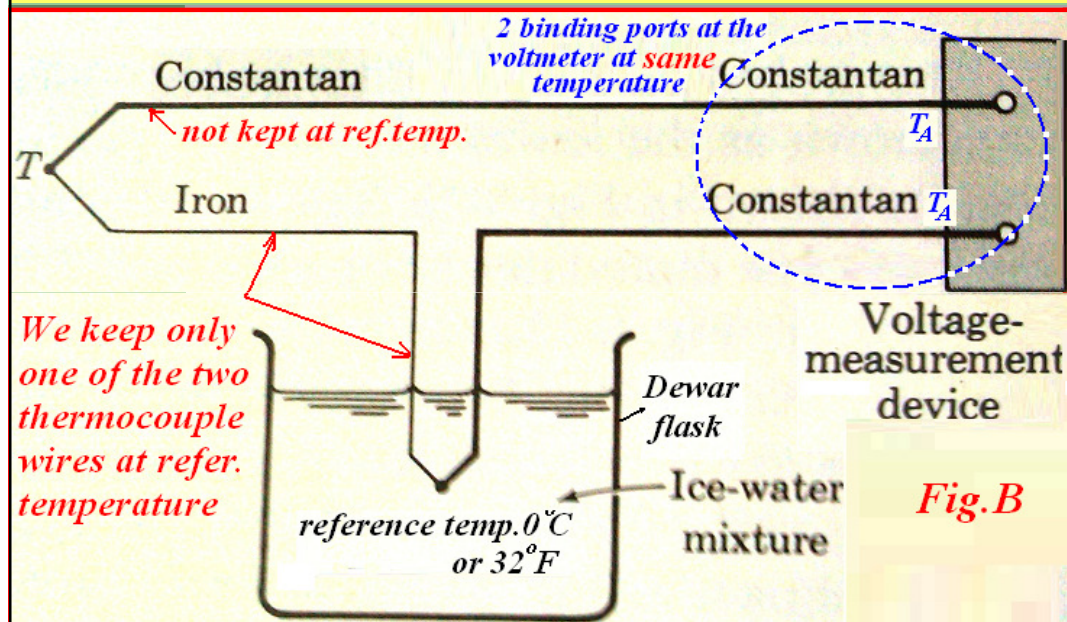


Fig. B

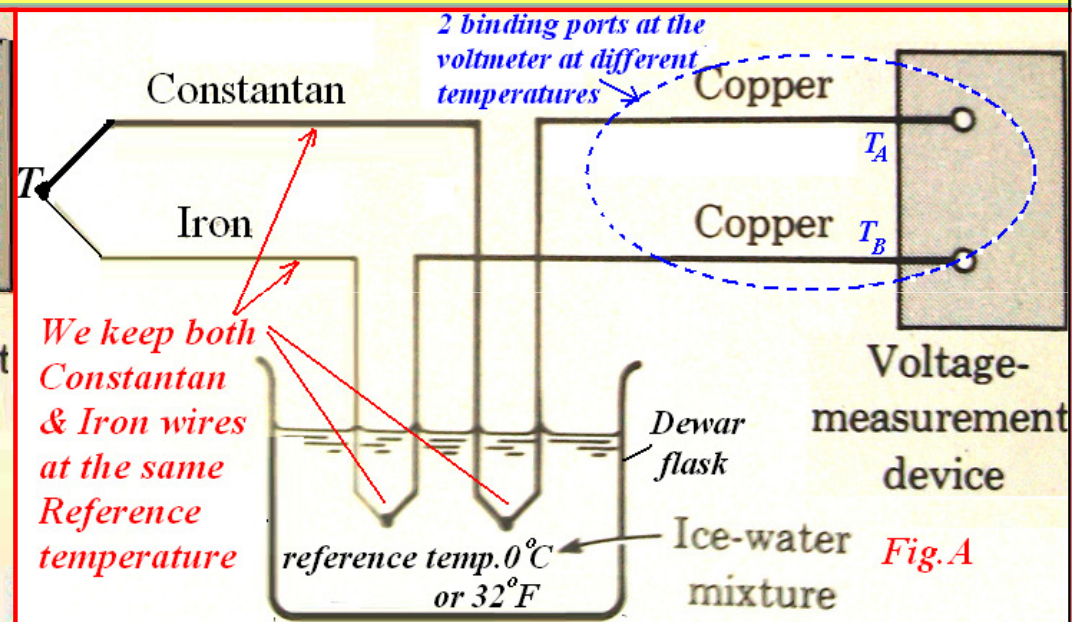


Fig. A

Electronic Reference Junction

It is inconvenient to use an ice bath as reference junction. Therefore modern input boards for thermocouples have on-board thermistors, which measure the ambient temperature. The ambient temperature then serves as reference junction temperature and on-board software compensates for fluctuating ambient temperature.

Types of Thermocouples

A large number of thermocouples are available based on choice of materials used to manufacture them. The materials affect price, temperature range and suitability for a particular measurement purpose.

Thermocouples have been standardized and are designed by letter code that denotes, which two materials compose the thermocouple. A selection of thermocouples is shown below.

Type	Metal		Standard Color Code		Ω /Double Foot 20 AWG	Seebeck Coefficient S (mV/°C) @ T(°C)	°C Standard Wire Error	NBS Specified Materials Range* (°C)
	+	-	+	-				
B	Platinum- 6% Rhodium	Platinum- 30% Rhodium	—	—	0.2	6 600	4.4-8.6	0-1820**
E	Nickel- 10% Chromium	Constantan	Violet	Red	0.71	58.5 0	1.7-4.4	-270 to 1000
J	Iron	Constantan	White	Red	0.36	50.2 0	1.1-2.9	-210 to 760
K	Nickel- 10% Chromium	Nickel	Yellow	Red	0.59	39.4 0	1.1-2.9	-270 to 1372
N (AWG 14)	Nicrosil	Nisil	—	—	39	600	—	0-1300
N (AWG 28)	Nicrosil	Nisil	—	—	26.2	0	—	-270 to 400
R	Platinum- 13% Rhodium	Platinum	—	—	0.19	11.5 600	1.4-3.8	-50 to 1768
S	Platinum- 10% Rhodium	Platinum	—	—	0.19	10.3 600	1.4-3.8	-50 to 1768
T	Copper	Constantan	Blue	Red	0.30	38 0	0.8-2.9	-270 to 400
W-Re	Tungsten- 5% Rhenium	Tungsten- 26% Rhenium	—	—	19.5	600	—	0-2320

Example 1 A J-type thermocouple, whose reference junction is at 0°C, produces a emf output voltage of 4.115 mV. What is the temperature at the measurement junction of the thermocouple ?

The table for J-type thermocouples is referenced at 0°C. Therefore, we simply need to find the temperature from the table, which would generate a emf of 4.115mV. Inspection of the table shows that the temperature is between 78 and 79°C, interpolation gives 78.7°C

Example 2 A J-type thermocouple, whose reference junction is at 21.1°C, produces a emf output voltage of 2.878 mV. What is the temperature at the measurement junction of the thermocouple ?

The table for J-type thermocouples is referenced at 0°C. From the table we see that at 21.1°C, the thermocouple would produce an $emf_{0,21}$ of 1.076 mV. Using the law of successive or intermediate temperatures we get $emf_{0,T} = emf_{0,21} + emf_{21,T} = 1.076\text{mV} + 2.878\text{mV} = 3.954\text{ mV}$

Interpolating data in table for J-type thermocouples we find temperature with 3.954 mV as $T=75.7^\circ\text{C}$.

Thermocouple-Equations, Tables& Charts:

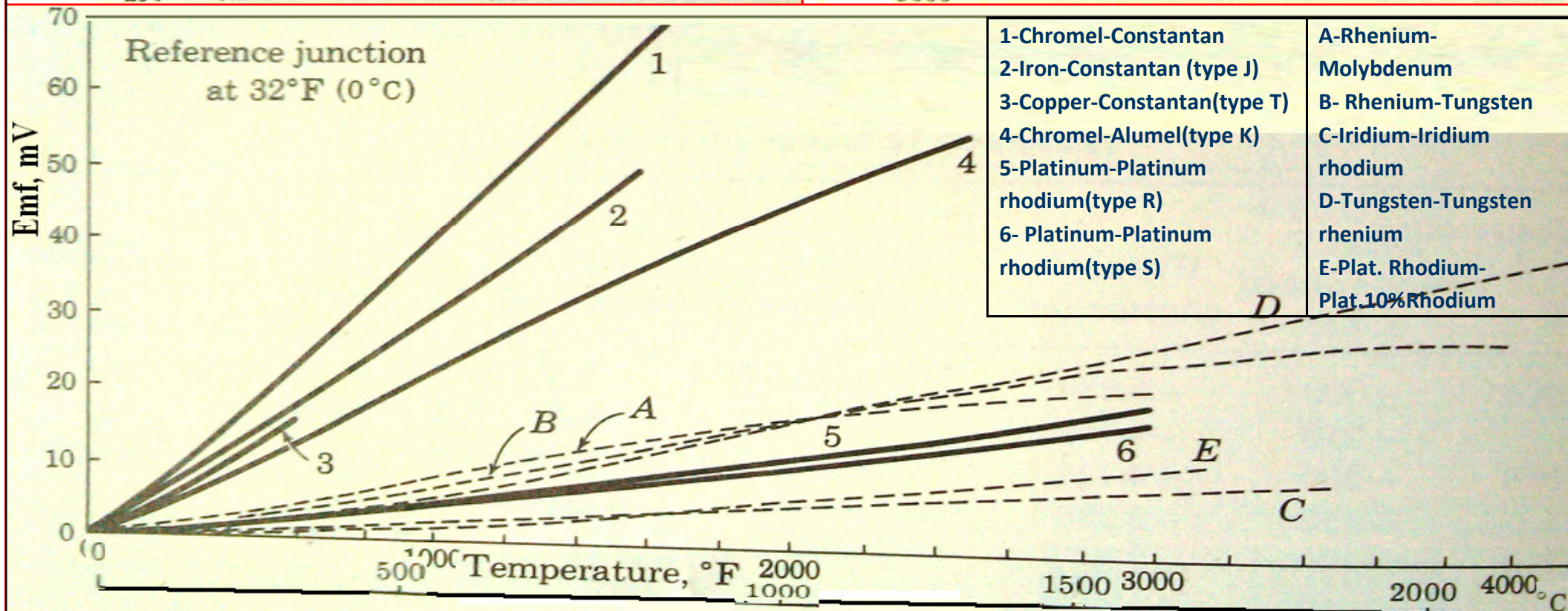
Output characteristics of the most common thermocouples are shown in next tables & charts.

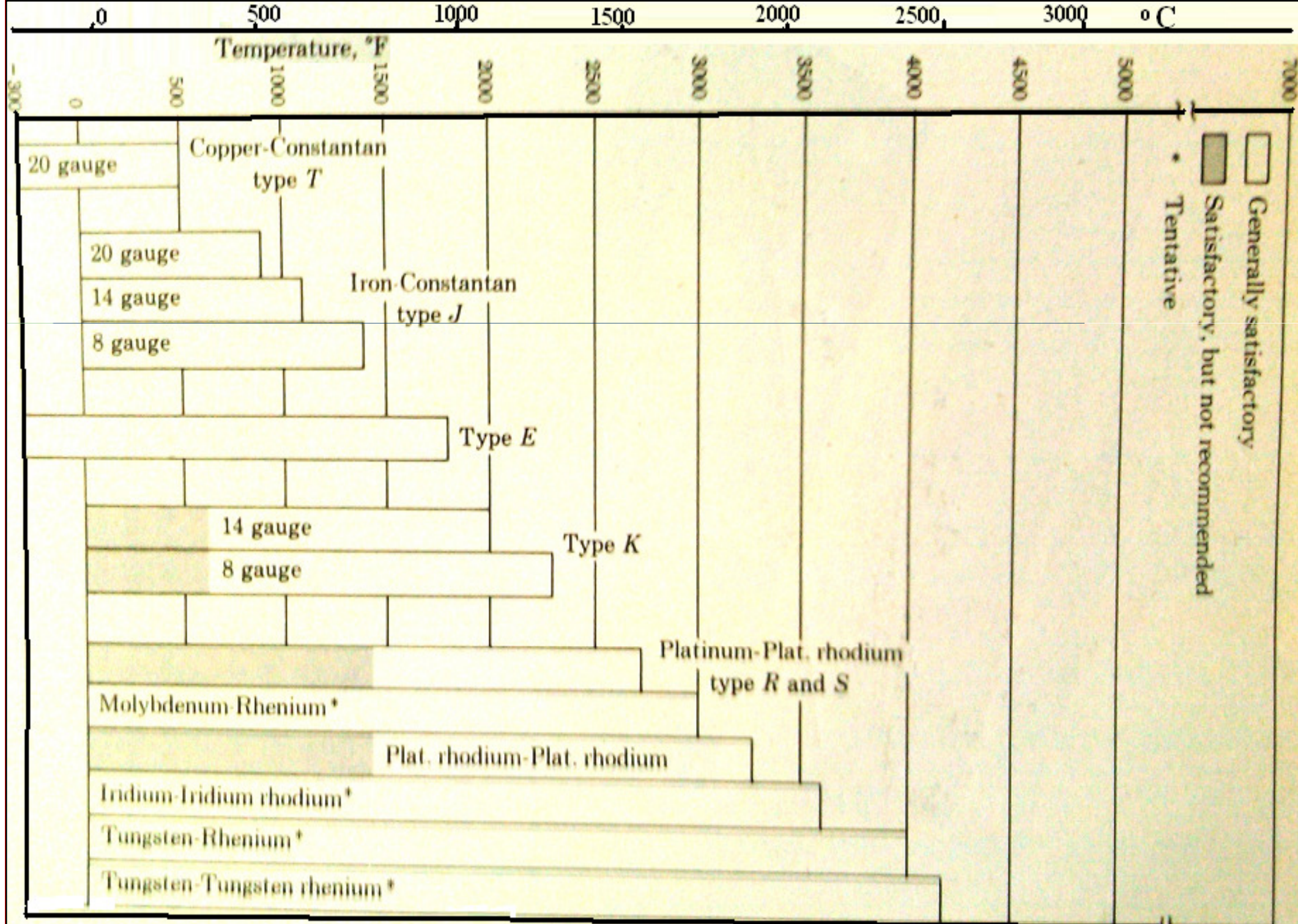
Thermal emf in absolute millivolts for thermocouples (at $T_{ref}=0.0^{\circ}\text{C}$)

Temperature $^{\circ}\text{C}$	Temperature $^{\circ}\text{F}$	Type T Copper- constantan	Chromel- constantan	Type J Iron- constantan	Type K Chromel- alumel	Type S Platinum 10%rhodium
-184.4	-300	-5.284	-8.30	-7.52	-5.51	
	-250	-4.747		-6.71	-4.96	
-128.9	-200	-4.111	-6.40	-5.76	-4.29	
	-150	-3.380		-4.68	-3.52	
-73.3	-100	-2.559	-3.94	-3.49	-2.65	
	-50	-1.654		-2.22	-1.70	
-17.78	0	-0.670	-1.02	-0.89	-0.68	
	50	0.389		0.50	0.40	
37.78	100	1.517	2.27	1.94	1.52	0.221
	150	2.711		3.41	2.66	0.401
93.33	200	3.967	5.87	4.91	3.82	0.595
	250	5.280		6.42	4.97	0.800

Thermal emf in absolute millivolts for thermocouples (at $T_{ref}=0.0^{\circ}\text{C}$)

Temperature $^{\circ}\text{C}$	Temperature $^{\circ}\text{F}$	Type T Copper- constantan	Chromel- constantan	Type J Iron- constantan	Type K Chromel- alumel	Type S Platinum 10%rhodium
148.9	300	6.647	9.71	7.94	6.09	1.017
	350	8.064		9.48	7.20	1.242
204.4	400	9.525	13.75	11.03	8.31	1.474
	450	11.030		12.57	9.43	1.712
260	500	12.575	17.95	14.12	10.57	1.956
	600	15.773	22.25	17.18	12.86	2.458
371.1	700	19.100	26.65	20.26	15.18	2.977
	800		31.09	23.32	17.53	3.506
537.8	1000		40.06	29.52	22.26	4.596
	1200		49.04	36.01	26.98	5.726
815.6	1500		62.30		33.93	7.498
	1700		70.90		38.43	8.732
1093	2000				44.91	10.662
	2500				54.92	13.991
1649	3000					17.292



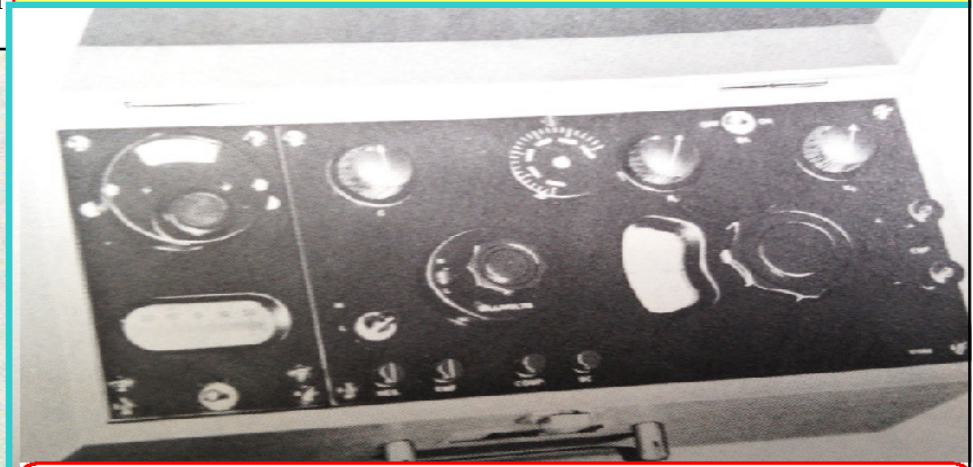


Summary of operating temperature range of different types of thermocouples

Thermoelectric power: Output voltage, E , of simple thermocouple circuit is: $E = (A.T + 0.5 B.T^2 + 0.33 T^3)$. The sensitivity, or thermoelectric power is $S = dE/dt = (A + B.T + C.T^2)$. The output is in millivolt & needs sensitive potentiometer or DC millivoltmeter. Careful arrangements must be made for accurate results. The resistance of lead wires has no effect if we use potentiometer at null condition (zero current flow).

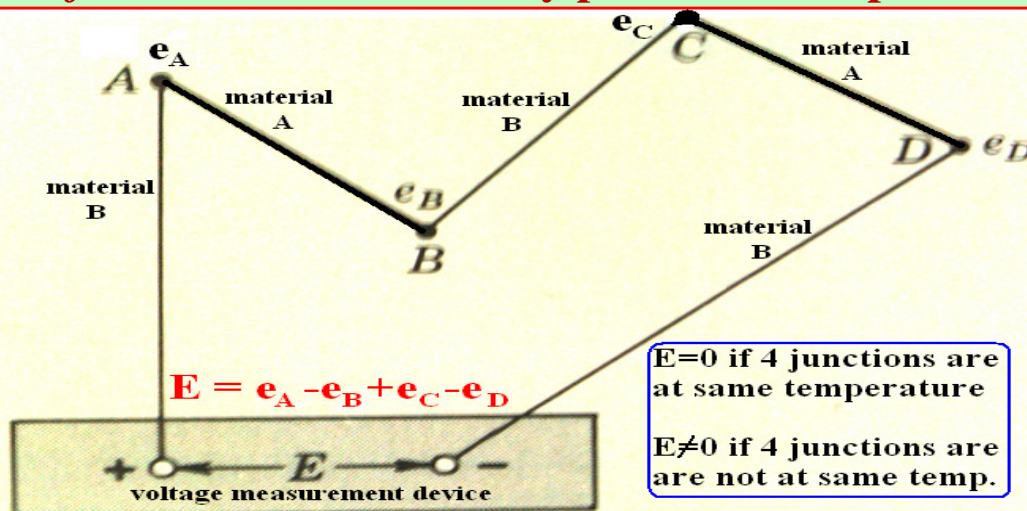
Thermoelectric sensitivity, $S = dE/dt$ of thermoelement made of materials listed against platinum, **micro-volt / °C** ($T_{ref} = 0.0\text{ °C}$)

Bismuth	−72	Silver	6.5
Constantan	−35	Copper	6.5
Nickel	−15	Gold	6.5
Potassium	−9	Tungsten	7.5
Sodium	−2	Cadmium	7.5
Platinum	0	Iron	18.5
Mercury	0.6	Nichrome	25
Carbon	3	Antimony	47
Aluminum	3.5	Germanium	300
Lead	4	Silicon	440
Tantalum	4.5	Tellurium	500
Rhodium	6	Selenium	900

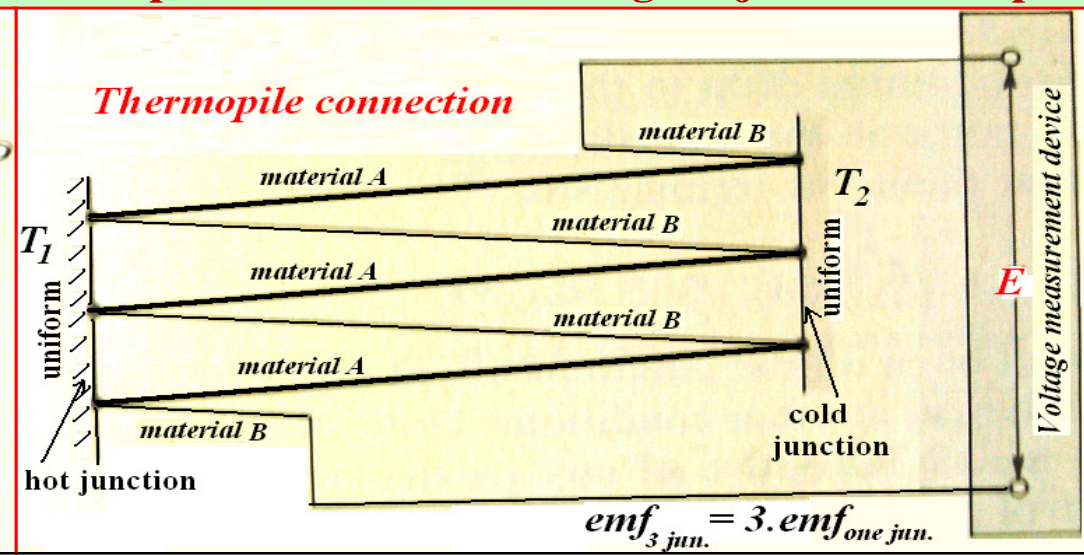


Typical manually balanced thermocouple potentiometer

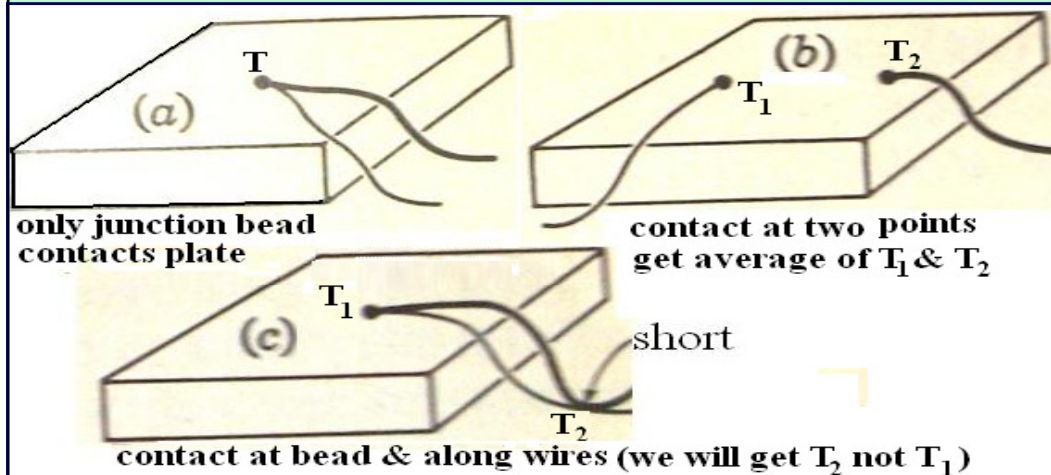
Thermopile arrangement: used for more sensitive circuit to duplicate output *emf* (or we get the average temp. of the 4 hot junctions if T_1 not uniform & cold junctions are at same temp). We must ensure that all junctions are electrically insulated from one another. We use **series connection** of thermocouples (must be even # of junctions for same material at voltmeter) to check if 4 joints are at same temp. or not. Net *emf* is not indicative of any particular temp. & it is not representative of an average of junctions temp.



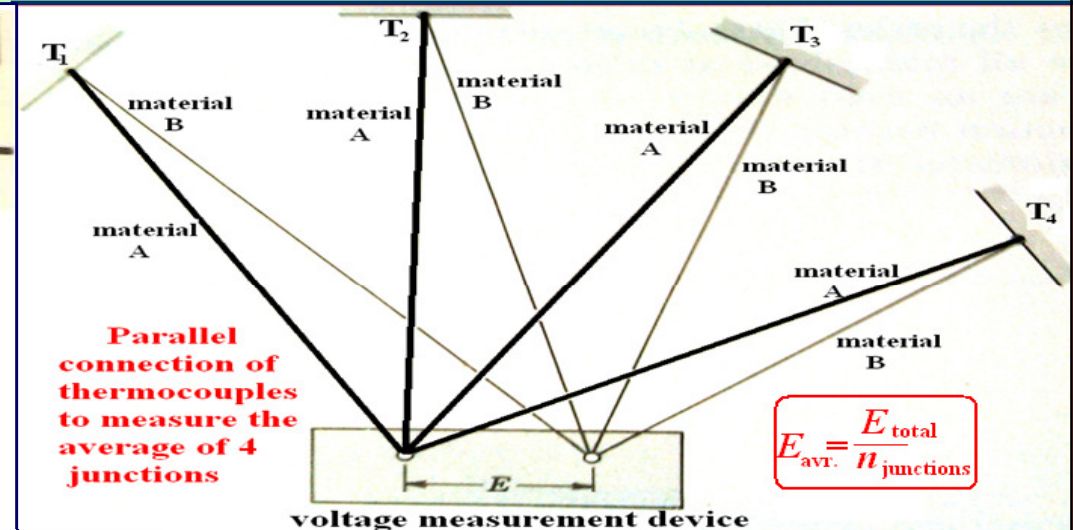
Series connection of thermocouples (even junctions)



Parallel Thermopile arrangement: used to get the average temperature of a number of points which are at different temperatures. There can be a small error due to current flow in lead wires as result of the difference in potential bet. Junctions. Resistance of wires will affect the reading to some extent. The method of installation of thermocouple on metal plate will define the type of errors in results as shown.



Installation of thermocouples on a metal plate



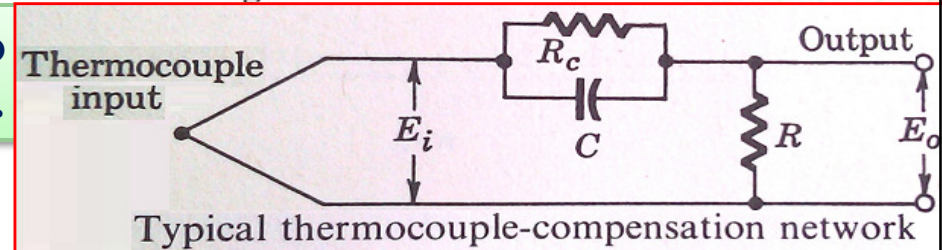
Thermocouple Compensation: using an electric network to get higher frequency response for transient measurement.

Thermo-couples Calibration system

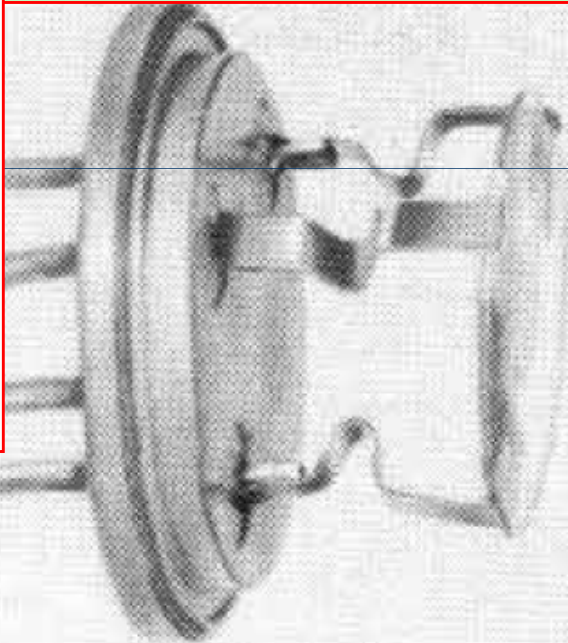
High Accuracy Multi-Well Calibration System

FEATURES:

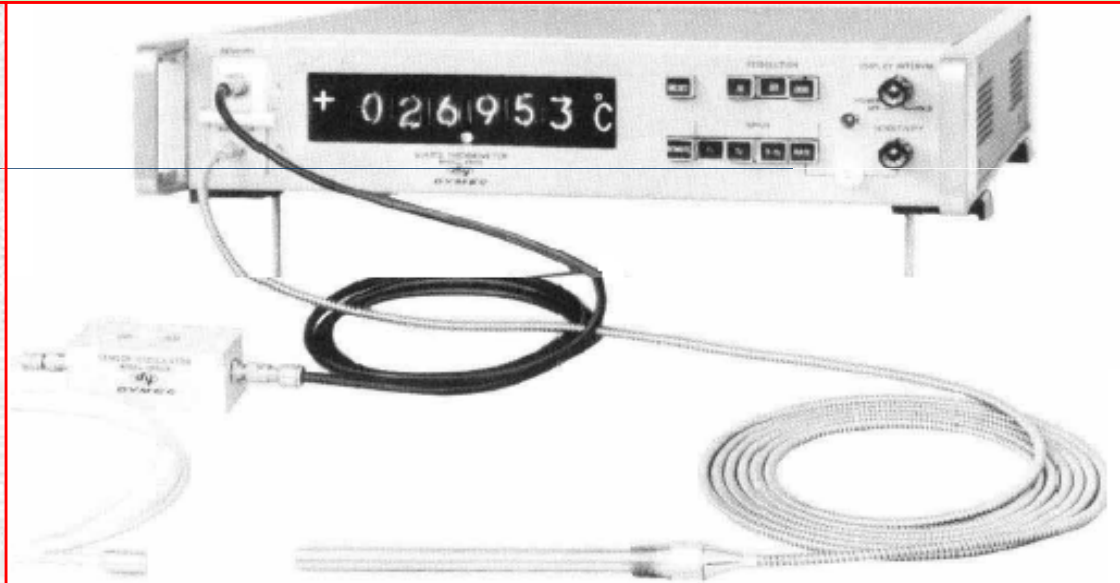
- High accuracy low and high temperature dry well capable of laboratory as well as field calibration
- Polished stainless steel cabinet construction
- Only one block covers the whole range
- Small footprint for field use
- Fast cooling time from 100°C to -95°C in 55 minutes
- Temperature metrology wells permit calibration of RTD, thermocouple and any other temperature sensors at one controlled temperature
- Advance block design provides excellent temperature stability in both low and high range
- Designed for metrology laboratories and instrumentation department requirements



Quartz-Crystal Thermometer: based on sensitivity of resonant frequency of quartz crystal to measure temperature & difference in temp. If proper angle of cut is used with the crystal, there is very linear relation between resonant frequency & temp. Commercial devices utilize electric digital counters readouts to measure frequency. Since measurement process relies on frequency measurement, device is insensitive to noise pick up in connecting cables.

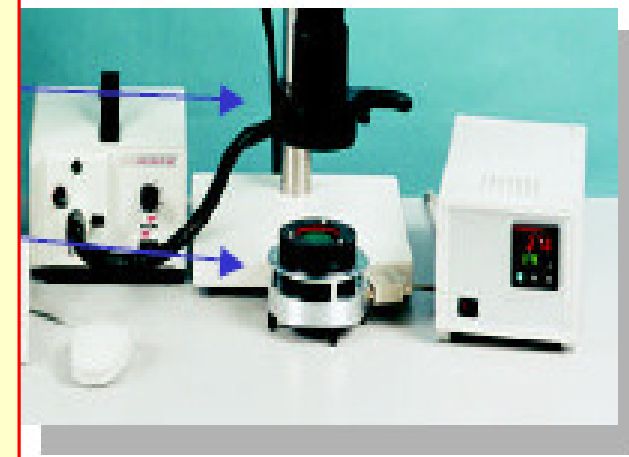


Close-up view of quartz sensor mounted on header.
Sensor is later sealed in helium atmosphere.



Two-channel version of Quartz Thermometer can measure temperature sensed by either probe or difference between probes. Sensor oscillator is normally located within cabinet but is self-contained and can be located externally for remote measurements.

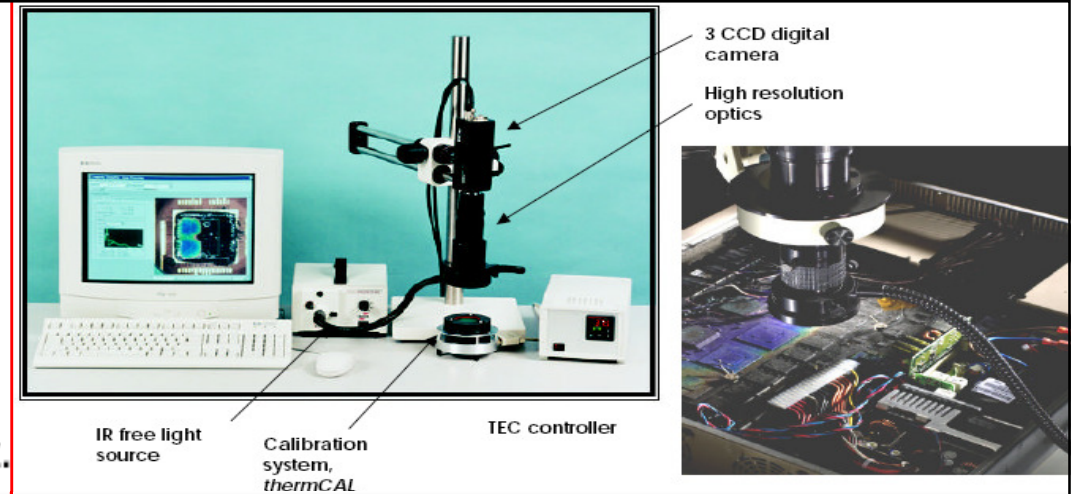
Liquid-Crystal Thermography, LCT: Cholesteric liquid crystals, formed from compounds/esters of cholesterol, show interesting response to temp. Over reproducible temp. range, liquid crystal will show **all colors of the visible spectrum**. By varying chemical formation, LCT can be made operate from below 0°C to several hundred °C. LCT is used to measure surface temp. if sprayed over surface. Optics/color record system to be used to produce temperature-color coded image. LCT used as water based slurry or precoated on blackened substrate of paper or Mylar.



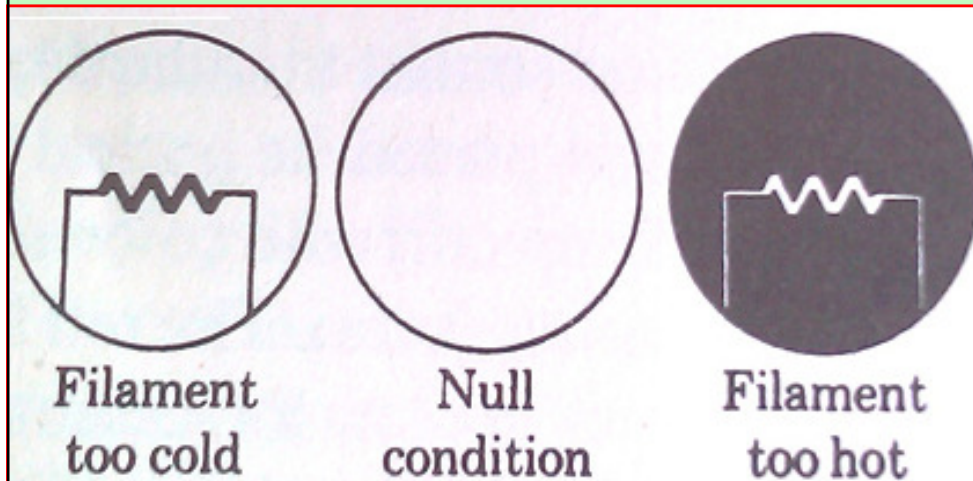
How Does LCT work?

The following steps are taken when measuring surface temperature with an LCT system

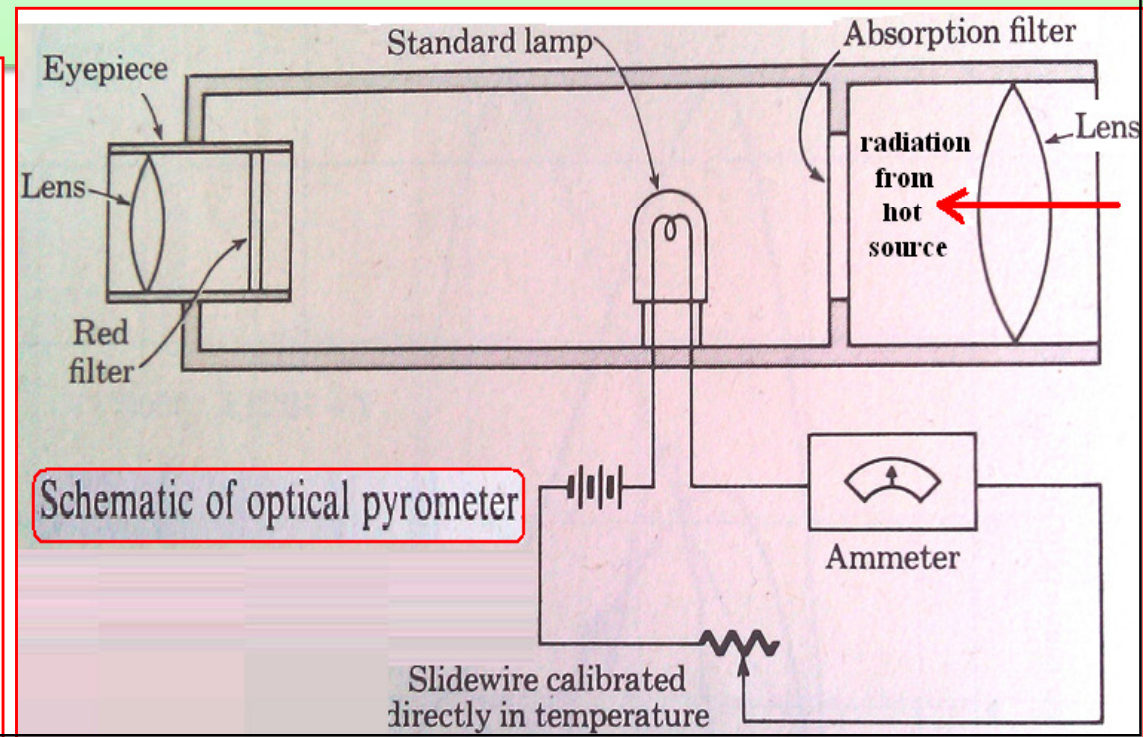
- Select optics suitable for spatial resolution required.
- Select the appropriate liquid crystal and calibrate it.
- Coat the test specimen with black paint.
- Spray the test specimen with liquid crystal.
- Apply power to test specimen and start measurement.



Temperature measurement by Radiation: By adjusting the lamp current, color of filament may be made to match color of incoming radiation. Red filter is installed in eyepiece to ensure that comparisons are made for essentially monochromatic radiation, thus eliminating some of the uncertainties resulting from variation of radiation properties with wavelength. The appearance of the lamp filament is viewed from eyepiece. When balance conditions are achieved, the filament will seem to disappear in the total incoming radiation. Temperature calibration is made in terms of the lamp heating current which get the null condition.



Appearance of lamp filament in eyepiece of optical pyrometer.



القياس عملية مهمة وجوهرية
بصفة عامة وللتحكم الآلي خاصةً
ويوجد مقرر إجباري للقياسات بكل
جوانبها النظرية والعملية - الوحدة
الثانية يتم تغطيتها مع المزيد من
التفاصيل في مقرر القياسات

الأهداف بإكمال الوحدة الثانية يكون المتدرب قادراً على:

- * أن يعرف مكونات عنصر الحس.
- * أن يفهم مفهوم الحساسات النشطة والخاملة
- * أن يعرف أنواع عناصر الحس الخاصة بقياس الوضع، السرعة، القوة، درجة الحرارة، الضغط، مستوى سائل ومعدل التدفق.
- * أن يعدد ويشرح كيفية تحويل الإشارة.
- * أن يتعرف على مختلف أنواع محولات الإشارة.

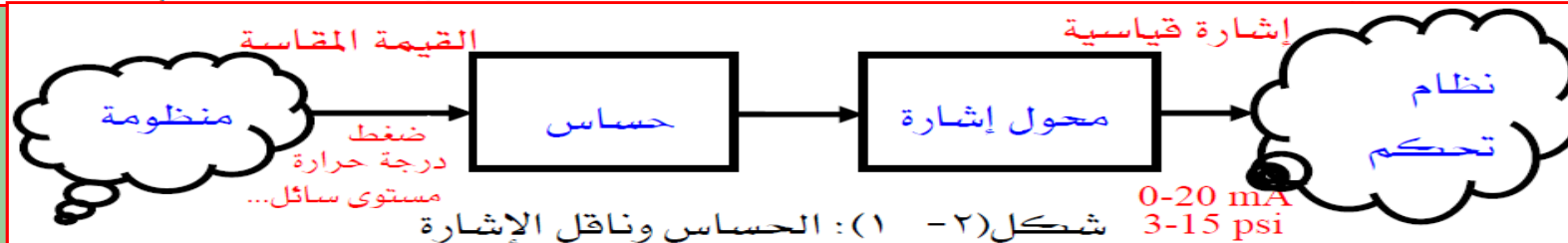
الوحدة الثانية: عناصر القياس ومحولات الإشارة

في هذا الباب سوف نقوم بعرض أحد المكونات الأساسية لمنظومة التحكم الآلي والذي يتعلق بقياس الكميات الطبيعية، التي تمثل إحدى أهم أسس عملية التحكم الآلي مثل قياس: درجة الحرارة، الضغط، مستوى سائل، معدل التدفق، الوضع، السرعة والقوة.

١- عنصر الحس Sensor

١- ١ تعريف:

عنصر الحس هو عنصر يقوم بقياس قيمة فيزيائية ثم يحولها إلى قيمة فيزيائية مختلفة (عادة تكون كهربائية). هذه القيمة التي تمثل القيمة المقاسة سوف تستعمل مثلاً كإشارة تحكم.



شكل (٢-١): الحساس وناقل الإشارة

١- ٣ الحساس الخامل Passive sensor

الحساس عبارة عن معاوقة impedance حيث لأحد بارامتراتنا علاقة مع القيمة المقاسة. ينتج عن تغيير قيمة المعاوقة التالي:

- ❖ تغيير في مقاسات الحساس، وهذا هو مبدأ عمل العديد من حساسات الوضع، المقاومة المتغيرة، لفيفة كهربائية ذات قلب متحرك، مكثف بذراع متحرك.
- ❖ إزاحة نتيجة قوة، ضغط، تسارع وهو حساس التنسو Tenso-sensor. وهناك نوعان من الحساسات:

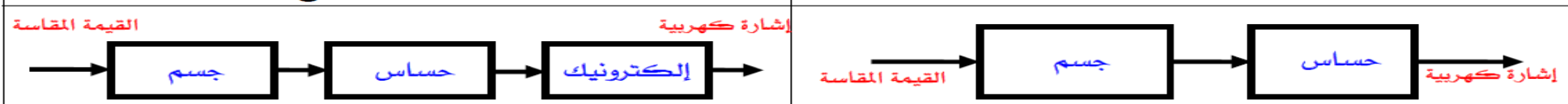
١- ٢ الحساس النشط Active sensor

هذا الحساس يعمل بمبدأ التأثير الفيزيائي الذي يضمن تحويل شكل طاقة القيمة الفيزيائية (طاقة ميكانيكية، طاقة حرارية، طاقة إشعاعية... الخ) إلى طاقة كهربائية، وهذه الحساسات التقليدية هي:

- ❖ حساس حراري - كهربائي thermoelectric sensor
- ❖ حساس بيزو - كهربائي Piezoelectric sensor
- ❖ حساس إلكترومغناطيسي Electromagnetic sensor
- ❖ حساس كهربائي - ضوئي Photoelectric sensor
- ❖ حساس فولتي - ضوئي Photovoltaic sensor

حساس مدمج

حساس مؤلف



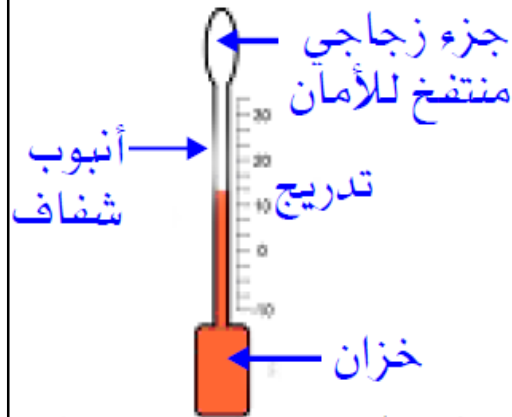
٢- عناصر قياس الكميات الطبيعية ٢-١ عناصر قياس درجة الحرارة:

٢-١-٣ ترمومترات التمدد Dilatation thermometers

هذه الترمومترات تعمل بمبدأ تمدد الأجسام والذي يكون صورة لقيمة درجة الحرارة، حيث نلاحظ أن حجم الجسم يزداد بتصاعد درجة الحرارة والعكس صحيح وهذا يعني أن العلاقة عكسية، والذي يمكننا من عمل علاقة عملية. مبدأ تمدد الأجسام ينطبق أيضا على السوائل والغازات وبذلك نجد أن هناك ثلاثة أنواع من هذه الترمومترات.

أ- الترمومترات التي تعمل بمبدأ تمدد سائل:

يتكون من خزان متصل من الأعلى بأنبوب شفاف ذو مساحة مقطع صغيرة وينتهي من الأعلى عند جزء زجاجي منتفخ للأمان. تحت تأثير ارتفاع أو انخفاض درجة الحرارة فإن السائل يتمدد أو يتقلص ونقرأ درجة الحرارة المناسبة على التدرج المبين في الشكل.



بنتان (Pentane)	200 → -20 °C
ethanol	110 → -100
toluene	90 → -100
creosote - ethanol	10 → -200
زئبق (Mercury)	38 → +650
Mercury - Thallium	58 → +650
Mercury - Gallium	0 → 1 000

❖ السوائل المستخدمة هي المذكورة في الجدول التالي

حسب مجال درجة الحرارة °C ويتم اختيار مادة الأنبوب الشفاف حسب درجة الحرارة القصوى كالتالي:

❖ زجاج Iena حتى 450 °C.

❖ زجاج Supermax حتى 630 °C.

❖ مادة silica نقية ومنصهرة حتى 1000 °C.

شكل ٢-٣: ترمومتر يعمل بمبدأ تمدد سائل

ب- الترمومترات التي تعمل بمبدأ تمدد الغاز:

معادلة الغاز المثالي هي: $PV = nRT$

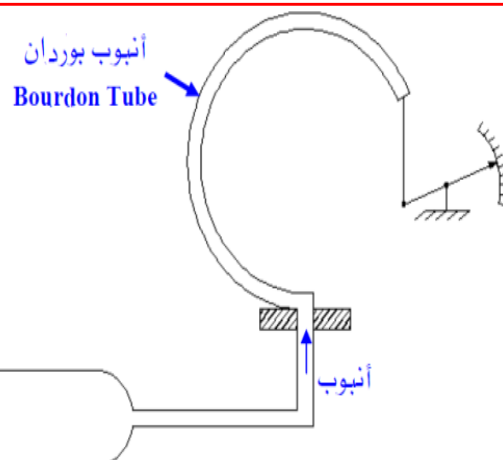
حيث: P : الضغط المطلق، V : حجم الغاز، $R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ، T : درجة الحرارة المطلقة °K.

نلاحظ أننا إذا أخذنا كمية غاز في وعاء مغلق: $P = \{RT\} / \{V\}$

حيث R/V ثابت وبذلك يصبح ضغط الغاز له علاقة تناسبية مع درجة الحرارة.

helium	-267,8 °C
hydrogen	-239,9 °C
nitrogen	-147,1 °C
Carbonic gaz	-31,1 °C

❖ الغازات المستخدمة هي المذكورة في الجدول التالي حسب درجة الحرارة التي يصبح فيها الغاز سائلا: من إيجابيات ترمومتر الغاز أنه دقيق حيث إن دقته 1% في المجال الصناعي



شكل ٢-٤: ترمومتر غازي

ج- الترمومترات التي تعمل بهدأ تمدد الأجسام:

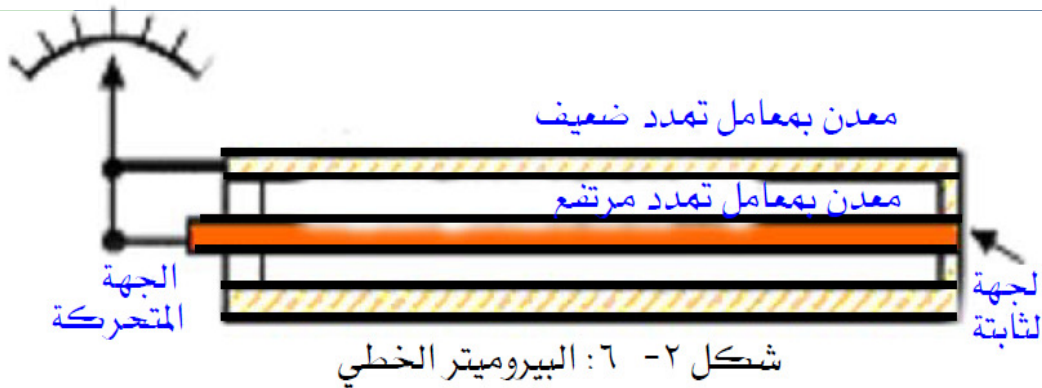
عندما نرفع درجة حرارة قضيب معدني إلى درجة معينة α نلاحظ أنه هناك علاقة بين درجة الحرارة وطول القضيب المعدني L ، وبذلك يصبح التمدد الخطي للمعدن قيمة ترمومترية.

❖ ترمومتر الشريحتين:

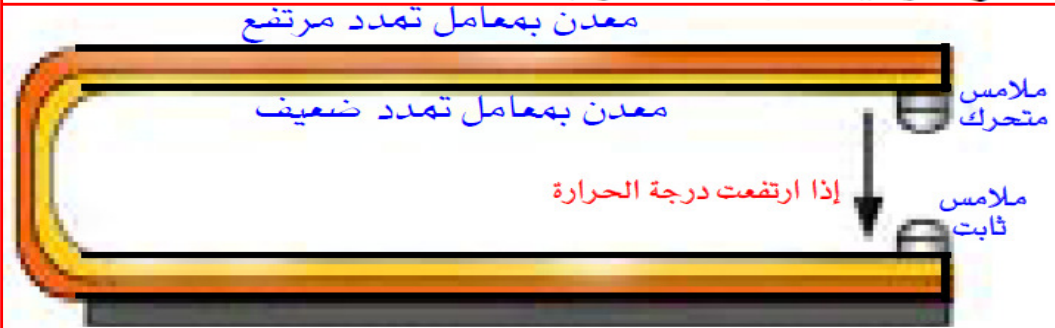
ويتكون من شريحتين من معدنين مختلفين بحيث يكونا معاملي التمدد مختلفين اختلافا كبيرا، وهاتين الشريحتين ملحومتين على طول مساحة التلامس، عندما تتغير درجة الحرارة فإن تمددهما سوف يكون مختلفا وبذلك يحصل انحناء الشريحتين.
مثلا: خليط الحديد Iron alloy معدن شديد التمدد بينما معدن Invar قليل التمدد.

❖ البيروميتر الخطي Linear pyrometer (لقياس درجات الحرارة المرتفعة):

عندما ترتفع درجة الحرارة فإن المعدن ذو معامل التمدد المرتفع يتمدد نحو اليسار وبذلك يتغير وضع المؤشر في اتجاه عقارب الساعة.



شكل ٢- ٦: البيروميتر الخطي



شكل ٢- ٥: ترمومتر الشريحتين من معدنين مختلفين

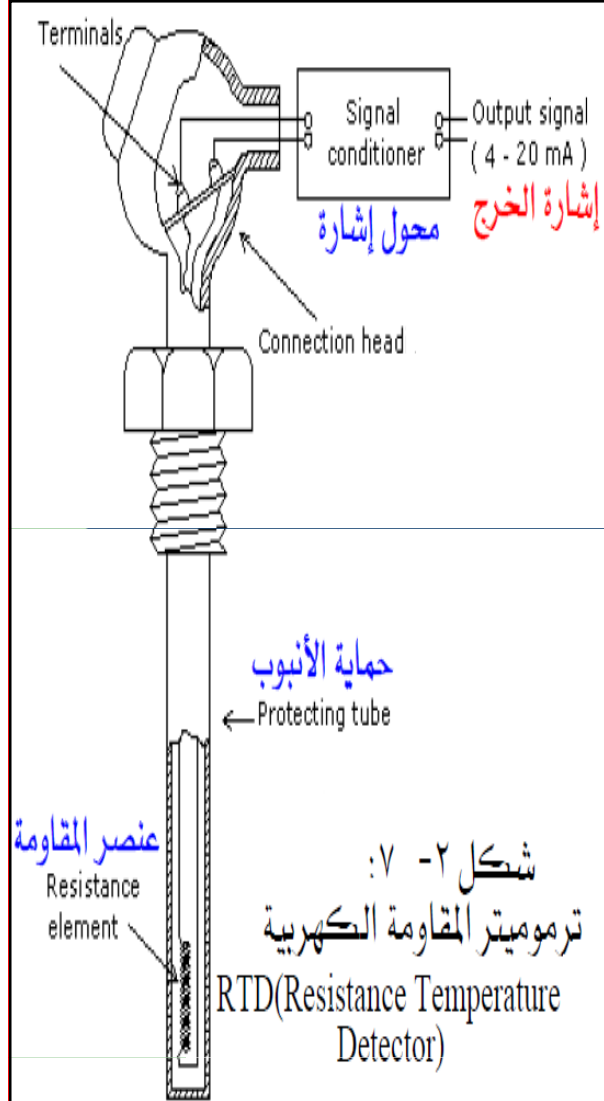
٢- ١- ٤ الترمومترات الكهربائية Electric thermometers:

في هذا النوع من الحساسات يمكن قراءة درجة الحرارة بطريقة مباشرة، وهذا قليل الاستخدام في المجال الصناعي. الحساسات الكهربائية التي تتابع الوضع لها إيجابية أكثر من حيث المرونة في الاستخدام (معلومة قابلة للنقل، التخزين) مع المحافظة على دقة كافية للاستخدامات الصناعية وعديد الاستخدامات في المختبرات.

ونجد في المجال الصناعي تركيبة خاصة بهذه الحساسات وهي المبينة في الشكل التالي. وتنقسم الترمومترات الكهربائية إلى قسمين:

- الحساسات الخاملة Passive sensor باستخدام المقاومة أو الثرميستور.
- الحساسات النشطة Active sensor باستخدام الازدواج الحراري.

ترموتر المقاومة الكهربائية أو الثرميستور هذا النوع من الحساسات يتركز حول تأثير درجة الحرارة على المقاومة الكهربائية للموصل. وعليه فإن قياس درجة الحرارة تحول إلى قياس مقاومة كهربية، ونجد نوعين من الترمومترات ترمومتر المقاومة الكهربائية والثرميستور.



أ- ترمومتر المقاومة الكهربائية: يكون الموصل عنصر معدني، ونستطيع أن نوجد علاقة بين المقاومة R ودرجة الحرارة T وممثلة في المعادلة التالية:

$$R = R_0(1 + a_1 T + a_2 T^2)$$

R : المقاومة (الوحدة: ohm) عند درجة حرارة T °C
 R_0 : المقاومة (الوحدة: ohm) عند درجة حرارة 0 °C
 a_1, a_2 : ثابتان، لإيجاد قيمة a_1 و a_2 يلزمنا ثلاثة معادلات، وعليه سوف نستخدم الجدول التالي الذي يبين العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة لمادة البلاتين:

درجة الحرارة (°C)	المقاومة	إشارة الخرج (mA)
0	100.0	4
25	109.9	8
50	119.8	12
75	129.6	16
100	139.3	20

هذه المعادلات تكون كالتالي:

(أ) عند 100 °C: $100.0 = R_0(1 + 0a_1 + 0^2a_2)$
 (ب) عند 119.8 °C: $119.8 = R_0(1 + 50a_1 + 50^2a_2)$
 (ج) عند 139.3 °C: $139.3 = R_0(1 + 100a_1 + 100^2a_2)$

ثم نستنتج من المعادلة (أ): $R_0 = 100$

ثم نقوم بتعويض $R_0 = 100$ في المعادلتين (ب) و (ج) فيصبحان:

(د) عند 119.8 °C: $0.198 = 50a_1 + 2500a_2$
 (هـ) عند 139.3 °C: $0.393 = 100a_1 + 10000a_2$
 وأخيرا نستنتج a_1 و a_2 :
 $a_2 = -6 \times 10^{-7}$ $a_1 = 0.00399$

فتصبح العلاقة كالتالي:

$$R = 100(1 + 0.00399T - 6 \times 10^{-7}T^2)$$



وفي ما يلي جدول يبين بعض المعادن المستخدمة لقياس درجة الحرارة ومجال درجة الحرارة لكل نوع من هذه المعادن.

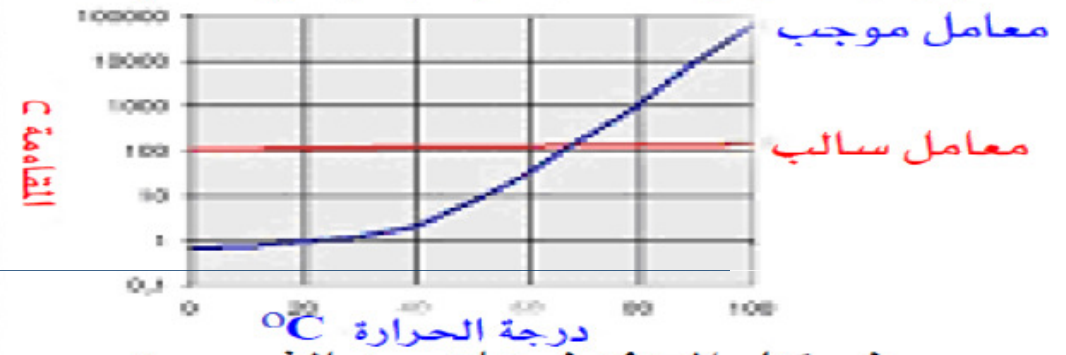
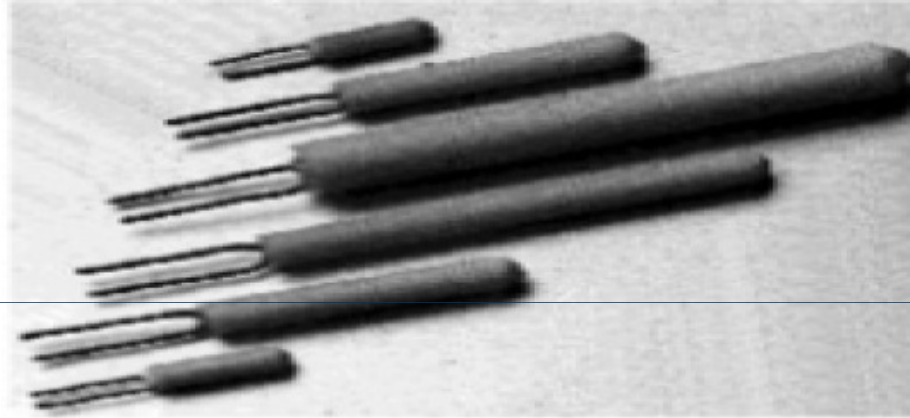
النحاس	-190 → 250
النيكل	-60 → 180
البلاتين	-250 → 1100

البلاتين هو المعدن الأكثر استخداما، في الشكل التالي نبين مسبار PT100

ب- الثرميستور:

الثرميستور هو شبه موصل مصنوع من أكسيد الحديد تم ضغطه إلى مستويات عالية عند درجة حرارة مرتفعة حوالي 1000°C و 150 بار، من مكونات الثرميستور مثلا:

❖ أكسيد الحديد Fe_2O_3 . ❖ ألومينات المغنيسيوم $MgAl_2O_4$ ❖ تيتانيوم القصدير Zn_2TiO_4 . وهناك نوعان من الثرميستور النوع الأول بمعامل حراري سالب والثاني بمعامل حراري موجب وتغير درجة الحرارة في النوعين حسب الرسم البياني التالي:



شكل ٢-٩: نوعان من الثرميستور بمعامل حراري سالب وموجب

شكل ٢-١٠: ثرميستور في شكل أسطوانات

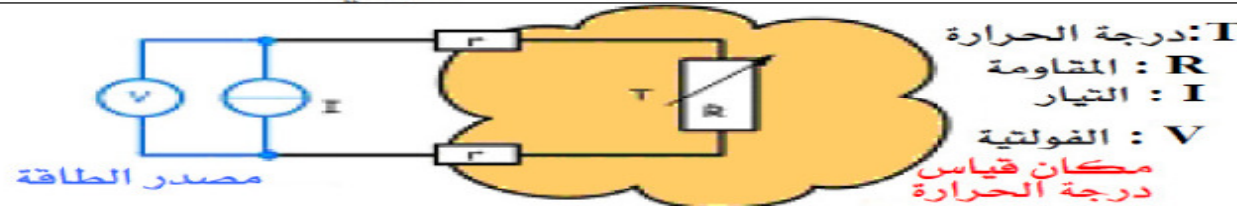
من إيجابيات الثرميستور أن حجمه صغير، حيث يتم صنعه في شكل أسطوانات (القطر = ١ إلى 12 مم، الطول = 5 إلى 50 مم). وأيضاً في شكل أقراص أو خرزات. ومن إيجابيات الثرميستور أيضاً أنه ذو حساسية عالية، ولكن تغير المقاومة مع درجة الحرارة لاخطى.

❖ طريقة قياس درجة الحرارة:

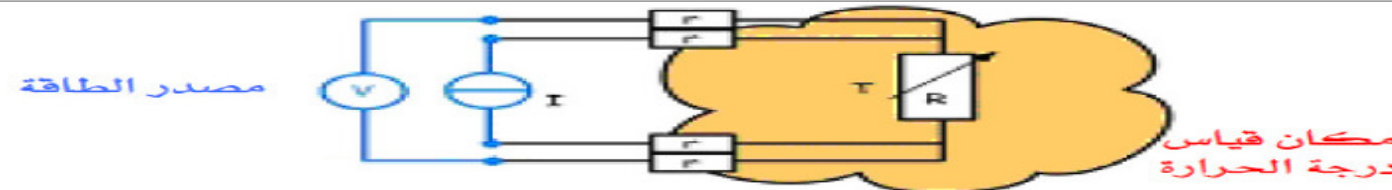
هناك ثلاثة طرق للقياس نلخصها في الجدول التالي:

المخطط الكهربى

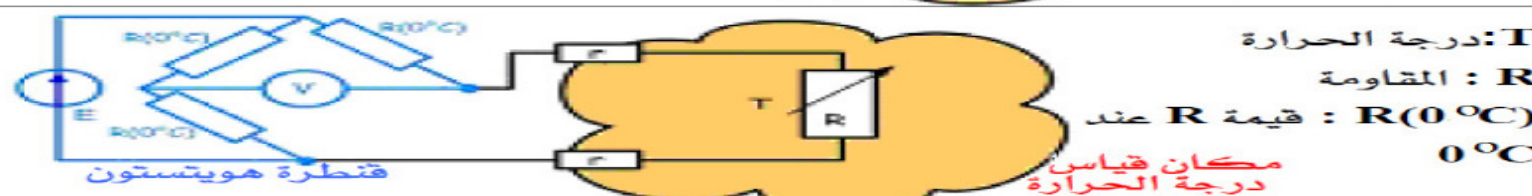
طريقة القياس



١- سلكين مع مصدر طاقة



٢- أربع أسلاك مع مصدر طاقة

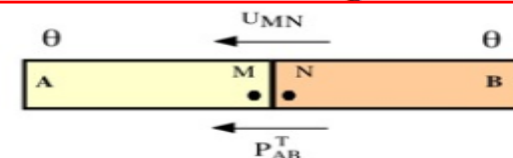


٣- باستخدام قنطرة هويتستون Wheatstone

ج- الازدواج الحراري:

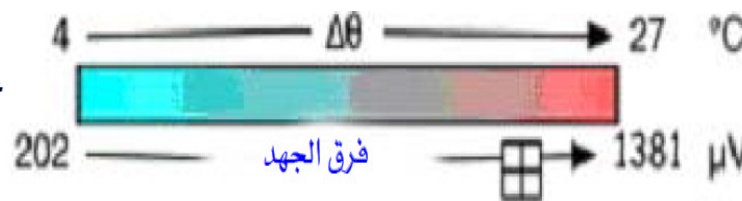
مفهوم الازدواج الحراري في المعادن الموصلة وشبه الموصلة هو ما يحصل تغيرات في الشحنات الحرارية والكهربائية في المعدن. حيث إنه عندما يتلاصق معدنين مختلفين كما هو مبين في الشكل ويكونان في نفس درجة الحرارة يتولد فرق جهد حسب نوع المعدنين ودرجة الحرارة. فمثلا عند استخدام معدني حديد/نحاس - نيكل نلاحظ تغير فرق الجهد كما هو مبين في الجدول التالي:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	50	101	151	202	253	303	354	405	456
10	507	558	609	660	711	762	814	865	916	968
20	1019	1071	1122	1174	1226	1277	1329	1381	1433	1485



شكل ٢- ١: تلاصق معدنين مختلفين

مثال: نريد إيجاد قيمة فرق الجهد للازدواج الحراري عند 4°C و 27°C. باستخدام الجدول فرق الجهد يساوي 202µV عند 4°C و 1381µV عند 27°C. وبذلك يكون فرق الجهد: (1381-202) يعني 1179µV.



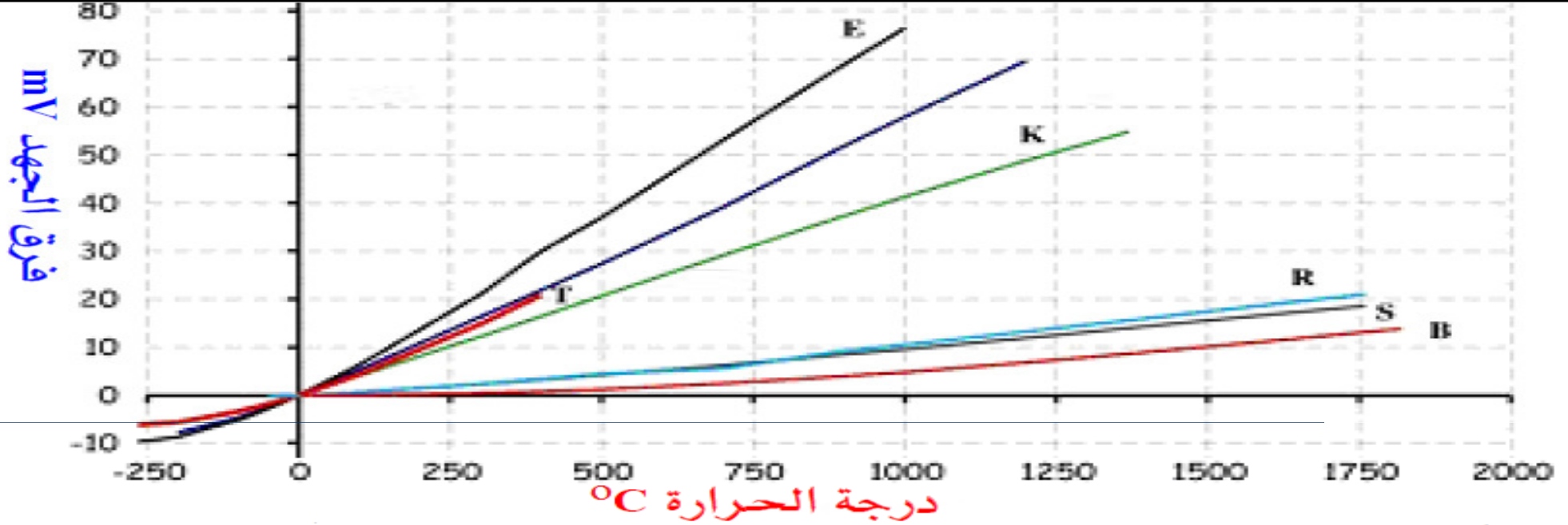
فرق الجهد للازدواج الحراري عند 4°C و 27°C.

❖ أنواع الازدواج الحراري:

لعمل ازدواج حراري يجب اختيار معدنين يمتازا بدقة وحساسية كبيرة كما يجب أخذ خاصية التآكل بعين الاعتبار (بيئة مؤكسدة أو كبريتية.... الخ) ويبين لنا الجدول التالي خصائص بعض الازدواجات الحرارية الأكثر استخداما:

النوع		مجال درجة الحرارة	%	
E	نيكل-كروم	0°C à 800°C	1,5	استخدام في فراغ
	نحاس - نيكل	-40°C à 900°C		أو بيئة مؤكسدة
R	بلاتين 13% - روديوم	0°C à 1600°C	1	
	بلاتين	0°C à 1700°C		
S	بلاتين 10% - روديوم	0°C à 1550°C	1	مقاوم للأكسدة
	بلاتين	0°C à 1700°C		والتآكل

النوع		مجال درجة الحرارة	%	
K	نيكل - كروم	0°C à 1100°C	1,5	صالح لبيئة مؤكسدة
	نيكل - ألومينيوم	-180°C à 1300°C		صالح لبيئة مؤكسدة
T	نحاس	-185°C à 300°C	0,5	
	نحاس - نيكل	-250°C à 400°C		
J	حديد	20°C à 700°C	1,5	مقاوم لتآكل
	نحاس - نيكل	-180°C à 750°C		



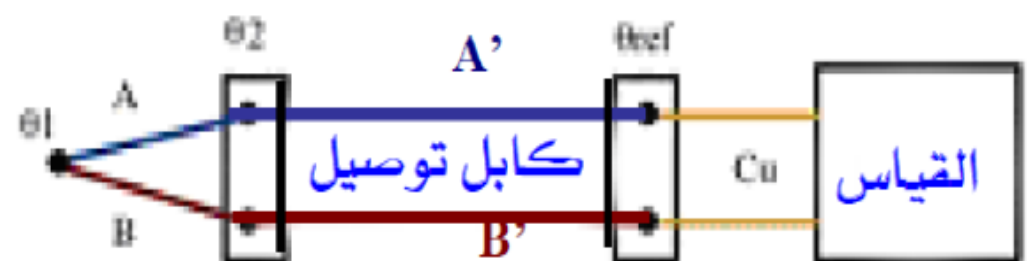
شكل ٢-١: العلاقة بين فرق الجهد ودرجة الحرارة حسب كل نوع ازدواج حراري

❖ كابل التوصيل في الازدواج الحراري:

عندما يكون ثمن معادن الازدواج الحراري مرتفع وتكون المسافة طويلة بين مكان التقاطد درجة الحرارة وجهاز الاستقبال كما هو مبين في الشكل التالي، نضطر لاستخدام كابل توصيل من خصائص هذا الكابل $A'B'$ أنه لا يغير فرق الجهد الذي يولده الازدواج الحراري AB ، في الجدول التالي نبين التوصيلات الأكثر استخداماً.

ملاحظة: الازدواج الحراري له قدرة حرارية أقل (زمن استجابة أقل) ودرجة حرارة تشغيل تصل إلى 2700°C يعني أكبر من حساسات المقاومة الكهربائية، كما يمكن استخدام الازدواج الحراري في درجات الحرارة المنخفضة.

سالب	موجب	سالب	موجب
Constantan	نحاس	Constantan T	نحاس
Constantan	حديد	Constantan J	حديد
ألومينيوم	كروم	Constantan V	نحاس
بلاتين	بلاتين روديوم - 10 %	Cupronickel S	نحاس



شكل ٢-١٣: كابل توصيل الازدواج الحراري

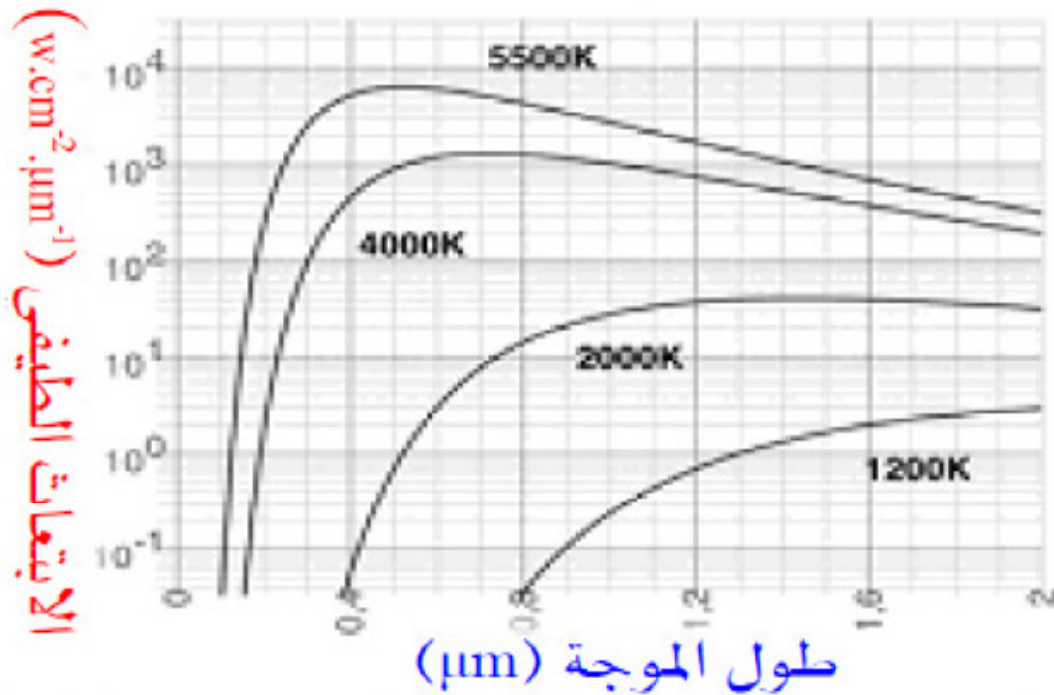
د- البيروميتر الضوئي:

البيروميتر الضوئي هو طريقة لقياس درجة الحرارة تستند إلى العلاقة بين درجة الحرارة الجسم والإشعاع الحراري (تحت الحمراء أو المرئي) الذي يصدره الجسم. الحساسات المستخدمة إذن هي حساسات ضوئية، ضوئية - كهربائية أو حرارية.

أهمية البيروميتر الضوئي تكمن في قياس درجة الحرارة بدون ملامسة الأشياء. وهي طريقة جيدة في الظروف التي تمنعنا من استخدام الحساسات الحرارية الكلاسيكية:

- درجة حرارة مرتفعة جدا (أكبر من 2000°C) - قياس على مسافات كبيرة.
- بيئة صعبة. - جسم متحرك. - تحديد نقاط الحرارة.

الرسم البياني التالي يبين الابتعاث الطيفي Spectral emittance حسب طول الموجة لدرجات حرارة مختلفة.



شكل ٢-١ أ: البيروميتر الضوئي شكل ٢-١ ب: الابتعاث الطيفي حسب طول الموجة

نلاحظ في الرسم البياني تزايد الابتعاث مع درجة الحرارة مع انتقال الطيف من الأشعة تحت الحمراء إلى الإشعاع المرئي (من $0.4\mu\text{m}$ إلى $0.8\mu\text{m}$) كلما زادت درجة الحرارة.

❖ تحت 500°C الإشعاع الحراري يكون بالكامل في مجال الأشعة تحت الحمراء.

❖ في حالة الشمس (5000°K) الطول الأقصى يتناسب مع حساسية العين.

هناك ثلاثة أنواع من البيروميترات:

- **بيروميتر أحادي اللون monochromatic pyrometer** ($\lambda=0.65\mu m$) والجدول التالي يبين لنا حدود استخدام الحساسات الضوئية - الكهربائية في البيروميترات الضوئية:

0 °C	مقاومة ضوئية In Sb	100 °C	مقاومة ضوئية Pb S	600 °C	ديود ضوئي Si
-50 °C	مقاومة ضوئية Hg Cd Te	50 °C	مقاومة ضوئية Pb Se	200 °C	ديود ضوئي Ge

- **بيروميتر ثنائي اللون bichromatic pyrometer** ، هذا البيروميتر يمكن اعتباره بيروميترين أحادي اللون يستخدم مجالين متقاربين من الإشعاع الحراري متمركز على طولين للموجة λ_1 و λ_2 .
 - بيروميتر لقياس الطاقة: مجموعة طيف الإشعاع الحراري للهدف يتم التقاطها عن طريق حساس له نطاق واسع وهو من النوع الحراري. عمليا تتم معايرة البيروميتر في ظروف الاستخدام عن طريق ازدواج حراري إذا أمكن ذلك.

هـ- المقياس الحراري المملوء بالنيتروجين Gas-filled thermal system:

هذا المقياس (شكل ٢ - ١٥) يستطيع أن يقيس درجات حرارة في نطاق $268^{\circ}C$ - إلى $760^{\circ}C$. وهو يستخدم أسطوانة مملوءة بالنيتروجين، أو البخار غاطسة في السائل الذي نريد قياس درجة حرارته، كعنصر حس درجة حرارة عند طرفه الأسفل. وهناك أنبوب شعري يوصل الأسطوانة بالمنفاخ الذي يحول الضغط إلى قوة على الناحية اليمنى بينما في الجهة اليسرى يوجد منفاخ التغذية المرتدة الذي يولد توازن مع القوة. منفاخ التغذية المرتدة تم توصيلة بتضييق عند خط الإمداد وفوهة وقلاب من الناحية الأخرى. تم معايرة تضييق الإمداد بحيث يكون ضغط المنفاخ 3psi عندما تكون المسافة بين الفوهة والقلاب في أقصى حد لها. ضغط المنفاخ سوف يتزايد حتى 15psi عندما تكون الفوهة مغلقة بالكامل.

