บทที่ 5
การวัดอุณหภูมิ

ถ้ามีผู้ถามว่า "อุณหภูมิคืออะไร" จะได้คำตอบต่างๆ กันแล้วแต่พื้นฐานความรู้และอาชีพของแต่ละบุคคล เช่น นักวิทยาศาสตร์หรือนักมาตรวิทยาจะให้คำตอบว่า "อุณหภูมิหมายถึงค่าเชิงปริมาณที่กำหนดให้สอดคล้องกับสถานะที่สมดุลทางอุณหพลศาสตร์หนึ่งๆ ของสาร" นักกฎหมายจะให้คำตอบว่า "อุณหภูมิ หมายถึง ตัวเลขที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานที่มีการรับรองอย่างเป็นทางการ" หรือในกรณีของวิศวกรที่ทำงานเกี่ยวข้องกับเครื่องมือวัด อาจจะให้คำตอบว่า "อุณหภูมิ หมายถึงค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่มีการถ่ายทอดหรือเทียบย้อนกลับไปยังมาตรฐานของประเทศอย่างถูกต้องได้"

ไม่ว่าอุณหภูมิจะมีความหมายใดก็ตาม ทุกๆ คำตอบมีส่วนถูกต้องด้วยกันทั้งสิ้น ในแง่ของระบบมาตรวิทยาทางอุณหภูมิ กล่าวคือ มีการกำหนดมาตรวัดอุณหภูมิ มีระบบจัดทำมาตรฐานของประเทศให้เป็นไปตามมาตรฐานสากล ตลอดจนมีกฎหมายรองรับและมีการบังคับให้มีการปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎหมาย

5.1 นิยามหน่วยรากฐานของอุณหภูมิ

ในระบบเอสไอ หน่วยวัดอุณหภูมิพื้นฐาน คือ อุณหภูมิทางอุณหพลศาสตร์มีหน่วยเป็นเคลวิน (Kelvin) ตั้งขึ้นเพื่อเป็นเกียรติแก่ลอร์ดเคลวิน (Lord Kelvin)

ดังนั้น **เคลวิน คือหน่วยของอุณหภูมิทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งเท่ากับ 1/273.16 ของอุณหภูมิทางอุณหพลศาสตร์ของจุดสามสภาวะของน้ำ**

โดยการกำหนดให้จุดสามสภาวะของน้ำ (triple point of water) เท่ากับ 0.01°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดสภาวะสมดุลของน้ำขณะอยู่ในสภาวะเป็นของแข็ง ของเหลว และไอ

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเซลเซียสและอุณหภูมิทางอุณหพลศาสตร์ทั้งในอดีตและปัจจุบันยังคงใช้อยู่เหมือนเดิม คือ

$$t/^{\circ}C = T_{90}/K - 273.15 \quad \ldots\ldots (1)$$

มาตรวัดอุณหภูมิที่กำหนดให้ใช้มาตั้งแต่ดั้งเดิมและยังคงใช้ได้จนถึงปัจจุบัน คือ กำหนดให้อุณหภูมิเยือกแข็งของน้ำเป็น $0^{\circ}C$ (273.15 K) อุณหภูมิที่ต่ำกว่านี้ ให้ระบุเป็น $-X^{\circ}C$ หรือเป็น Kelvin (K) ส่วนอุณหภูมิที่สูงกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำระบุเป็น $+X^{\circ}C$

จะเห็นว่าจุดสามสภาวะของน้ำ (= 273.16 K โดยนิยาม) ตรงกับ $0.01^{\circ}C$ (โดยการทดลอง) ดังนั้น อุณหภูมิที่น้ำเดือดเป็น $100^{\circ}C$ (373.15 K)

5.2 หน่วยวัดอุณหภูมิระหว่างประเทศ

เนื่องจากเครื่องวัดอุณหภูมิมีหลากหลายชนิด แต่ละชนิดมีวิธีการใช้งานและความถูกต้องของการวัดแตกต่างกัน เพื่อให้การวัดเป็นมาตรฐานสำหรับใช้งานโดยทั่วไป และทำให้ผลของการวัดสามารถอ้างอิงซึ่งกันและกันได้ ดังนั้น BIPM (CIPM) จึงได้กำหนดมาตรฐานสากลของการวัดอุณหภูมิขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1927 โดยให้ชื่อว่า International Temperature Scale of 1927 (ITS-27) และมาตรวัดอุณหภูมิก็ได้รับการแก้ไขปรับปรุงอีกหลายครั้ง คือในปี ค.ศ. 1948 (ITS-48) ในปี ค.ศ. 1968 โดยเปลี่ยนชื่อเป็น International Practical Temperature Scale of 1968 (IPTS-68) แก้ไขเพิ่มเติมปี ค.ศ. 1975 และครั้งสุดท้ายได้เปลี่ยนมาเป็น International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) กำหนดให้มีผลใช้บังคับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา

ประเทศต่างๆ ได้ยอมรับและใช้มาตรฐานสากลของอุณหภูมิทางปฏิบัติ (International Practical Temperature Scale 1968) ซึ่งได้กำหนดขึ้นโดยที่ประชุมของ

กลุ่มประเทศผู้นำทางอุตสาหกรรม ในปี ค.ศ. 1968 (แก้ไขเพิ่มเติมในปี ค.ศ. 1975) เรียกโดยย่อว่า **IPTS-68** ได้กำหนดจุดอ้างอิงมาตรฐานของอุณภูมิโดยจุดแข็งตัว (freezing point) หรือจุดสามสภาวะ (triple point) ซึ่งเป็นจุดที่มีสภาวะคงที่ของอุณหภูมิของสารบริสุทธิ์ต่างๆ เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงมาตรฐานในการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิ ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 IPTS-68 อุณหภูมิอ้างอิง (reference temperature) หรือ fixed points

สถานะสมดุล	T_{68}/K	t_{68}/°C
จุดสามสภาวะของไฮโดรเจน	13.81	-259.34
จุดสมดุลในสภาวะก๊าซและของเหลวของไฮโดรเจนที่ความดัน 33330.6 ปาสกัล	17.042	-256.108
จุดเดือดของไฮโดรเจน	20.28	-252.87
จุดเดือดของนีออน	27.102	-246.048
จุดสามสภาวะของอ๊อกซิเจน	90.188	-182.962
จุดสามสภาวะของน้ำ	273.16	0.01
จุดเดือดของน้ำ	373.15	100
จุดแข็งตัวของดีบุก	505.1181	231.9683
จุดแข็งตัวของสังกะสี	692.73	419.58
จุดแข็งตัวของเงิน	1235.08	961.93
จุดแข็งตัวของทอง	1337.58	1064.33

เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้วัดอุณหภูมิจาก 13.81 K ถึง 630.74°C คือ เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัม (platinum resistance thermometer) ซึ่งมีตัวต้านทานทำจากแพลทตินัมบริสุทธิ์อันหนึ่ง เป็นอิสระจากความเครียด (strain-free) อัตราส่วนของความต้านทาน $W(T_{68})$ นิยามจาก

$$W(T_{68}) = \frac{R(T_{68})}{R(273.15\ K)} \qquad \ldots\ldots\ (2)$$

ซึ่ง R เป็นความต้านทาน ต้องไม่น้อยกว่า 1.39250 ที่ T_{68} = 373.15 K

เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้วัดอุณหภูมิจาก 630.74°C ถึง 1064.43°C คือ เทอร์โมคัปเปิล (platinum-10% rhodium/platinum thermocouple) ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับอุณหภูมิ (electromotive force-temperature) จะใช้สมการควอดราติก (quadratic equation)

อุณหภูมิสูงกว่า 1064.43°C IPTS-68 ได้นิยามให้ใช้กฎการแผ่รังสีของพลางค์ (Planck's radiation law) โดยใช้อุณหภูมิ 1064.43°C (1337.58 K) เป็นอุณหภูมิอ้างอิง และค่า 0.014388 micron kelvin สำหรับ c_2 เครื่องมือที่ใช้คือ Pyrometer

ต่อมาคณะกรรมการมาตรฐานการวัดระหว่างประเทศ[The International Committee of Weighs and Measures(CIPM)] ได้ตกลงที่จะเปลี่ยนแปลงค่ามาตรฐานของอุณหภูมิ จากเดิม คือ IPTS-68 เป็นค่าใหม่ คือ ITS-90 (International Temperature Scale of 1990) นับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2533 เป็นต้นไป ทำให้ผู้ที่เกี่ยวข้องในเรื่องนี้ต้องทำความเข้าใจ รวมทั้งการเตรียมการต่างๆ ในการให้บริการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางอุณหภูมิ เพื่อผลประโยชน์ทางด้านการมาตรฐานของชาติโดยส่วนรวม

การเปลี่ยนแปลงครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่มนุษย์เราได้พยายามเสาะแสวงหาสิ่งใหม่ๆ ที่ดีกว่า ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงกว่า โดยการวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งคณะกรรมการมาตรฐานการวัดระหว่างประเทศได้ยอมรับและได้ประกาศการเปลี่ยนแปลงล่วงหน้าไว้แล้วตั้งแต่ต้นปี พ.ศ. 2532 (ค.ศ. 1989) ซึ่งจะมีผลให้เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงใหม่นี้ตั้งแต่ต้นปี พ.ศ. 2533 (ค.ศ. 1990) เป็นต้นไป

หลักการของ Intenational Temperature Scale มีดังต่อไปนี้

1. อาศัยปรากฏการณ์ตามธรรมชาติของการเกิดจุดที่มีอุณหภูมิคงที่ หรือ fixed points ที่สามารถทำให้เกิดขึ้นได้เสมอเมื่อต้องการ ได้แก่ ระดับอุณหภูมิที่ทำให้เกิด Equilibrium phase states ของสารบริสุทธิ์ต่างๆ เช่น triple points, melting points และ freezing points ของสารบริสุทธิ์ โดยใช้อุณหภูมิที่จุดนี้เป็นอุณหภูมิอ้างอิงในมาตรวัดอุณหภูมิ (temperature scale)

ITS-90 กำหนดให้ใช้ fixed points สำหรับเป็นอุณหภูมิอ้างอิงจำนวน 14 จุด เริ่มตั้งแต่อุณหภูมิต่ำสุด คือ boiling point ของ ^{4}He จนถึงอุณหภูมิสูงสุด คือ freezing point ของทองแดง

2. ใช้อุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่เหมาะสมและให้ผลการวัดที่ถูกต้องมากที่สุดในยุคสมัยนั้นๆ เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิระหว่าง fixed points ต่างๆ ดังกล่าวแล้ว ทั้งนี้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของอุปกรณ์วัดนั้นกับอุณหภูมิ ซึ่งกำหนดไว้ในรูปของสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของอุปกรณ์กับอุณหภูมิ

ITS-90 ได้กำหนดให้ใช้อุปกรณ์มาตรฐานสำหรับวัดอุณหภูมิระหว่าง fixed points แบ่งตามระดับของอุณหภูมิ ดังนี้

ก. ใช้ vapor pressure thermometer ในช่วงอุณหภูมิ 0.65 ถึง 5.0 K

ข. ใช้ helium gas thermometer ในช่วงอุณหภูมิ 3.0 K ถึง 24.5561 K

ค. ใช้ platinum resistance thermometer ในช่วงอุณหภูมิ 13.8033 K ถึง 961.78°C

ง. ใช้ radium pyrometer ที่อุณหภูมิสูงกว่า 961.78°C

สาเหตุสำคัญของการเปลี่ยนแปลง คือ การพัฒนาให้มาตรฐานการวัดมีค่าถูกต้องสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม IPTS-68 ได้มีการปรับปรุงมาแล้วครั้งหนึ่งเมื่อปี ค.ศ. 1975 ซึ่ง IPTS-68 ก็กลายเป็น IPTS-68(75) แต่ก็ยังมีข้อบกพร่องหลายประการที่ควรจะปรับปรุงแก้ไข คือ

1. Lower Limit ของ Temperature อยู่ที่ 13.81 K

มาตรวัดอุณหภูมิ (Temperature scale) กำหนดขึ้นจากชุดของ Fixed Points Standard Instruments และ Specified Equation สำหรับ IPTS-68 นั้นยังไม่สามารถจะหา Fixed Points และ Standard Instrument ณ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 13.81 K ได้ ส่วน ITS-90 ได้มีการพัฒนาให้สามารถขยายมาตรวัดอุณหภูมิ จาก 13.81 K ไปเป็น 0.65 K ซึ่งเกือบถึง 0 K ถือได้ว่าเป็น absolute zero หรือ thermal energy เป็น 0 (ศูนย์)

2. ความไม่แม่นยำเมื่อเทียบกับอุณหภูมิทางอุณหพลศาสร์

อุณหภูมิทางอุณหพลศาสตร์นั้นถือว่าเป็นหน่วยของปริมาณทางฟิสิกส์ขั้นปฐมซึ่งเป็นอุณหภูมิมาตรฐานของเครื่องมือมาตรฐาน ความไม่แม่นยำดังกล่าวเนื่องมาจากเครื่องมือมาตรฐานไม่สามารถจะอ่านค่าอุณหภูมิจากอุณหภูมิมาตรฐานตามความเป็นจริงได้

3. ความไม่สามารถในการถอดแบบหรือจำลองแบบ(Irreproducibility) ให้เหมือนเดิม

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในย่านอุณหภูมิ 630°C ถึง 1064°C ซึ่งใช้เทอร์โมคับเปิลแบบ S (Pt-10% Rh/Pt) เป็นเครื่องมือมาตรฐานนั้น irreproducibility ไม่ดีไปกว่า ± 0.2°C ซึ่งไม่เป็นที่น่าพอใจนัก ความไม่พึงพอใจดังกล่าว นำไปสู่การศึกษาคุณสมบัติของเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัม (PRT) ที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปถึงจุดแข็งตัวของทอง (1064.43°C) และขยาย radiation scale จากเดิม จุดแข็งตัวของทองลงมาเป็นจุด

แข็งตัวของเงิน (962°C)

จากข้อเสียของเทอร์โมคับเปิลที่มี reproducibility ต่ำ เทอร์โมคับเปิลจึงถูกจำกัดไม่ใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานของ ITS-90 แต่จะใช้ PRT_s แทน โดยการให้จุดแข็งตัวของทองเป็น upper calibration point ของ PRT_s และเป็น reference point ของ radiation thermometry ด้วย จากการใช้ PRT_s แทนเทอร์โมคับเปิลนั้น irreproducibility จะลดลงจาก ± 0.2°C เป็นประมาณ ± 10 mK (0.01°C) ซึ่งจะเห็นว่า PRT_s ดีกว่าเทอร์โมคับเปิลมาก

ITS-90 ได้กำหนดมาตรวัดอุณหภูมิโดยเริ่มต้นจากอุณหภูมิ 0.65 K จนถึงอุณหภูมิสูงสุดที่วัดได้โดยอาศัย Planck's Radiation Law และเพื่อให้ได้อุณหภูมิ T_{90} ที่มีความถูกต้องมากที่สุดและง่ายต่อการปฏิบัติ ITS-90 จึงได้แบ่งอุณหภูมิออกเป็นช่วงหลักและช่วงย่อย และได้กำหนดนิยามของอุณหภูมิ T_{90} ในแต่ละช่วงไว้ในรูปของ reference function และ deviation equation (function) ดังนี้

1. **อุณหภูมิ 0.65 K ถึง 5.0 K**

ให้นิยามของอุณหภูมิ T_{90} ในเทอมของความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอและอุณหภูมิของก๊าซ ^3He และ ^4He โดยใช้ Vapor-pressure thermometer เป็นอุปกรณ์ในการวัด

2. **อุณหภูมิ 3.0 K ถึง 24.5561 K** (TP ของก๊าซนีออน)

ให้นิยามของอุณหภูมิ T_{90} ในเทอมของ helium gas thermometer of constant volume ที่สอบเทียบกับ fixed points 3 จุด คือ จุดสามสภาวะของนีออน (24.5561 K) จุดสามสภาวะของไฮโดรเจน (13.8033 K) และอีกจุดหนึ่งระหว่างอุณหภูมิ 3.0 K และ 5.0 K โดยใช้ vapor-pressure thermometer ของช่วงอุณหภูมิในข้อ 1

3. **อุณหภูมิ 13.8033 K ถึง 1234.93 K** (961.78°C)

ให้นิยามของอุณหภูมิ T_{90} ไว้ในเทอมของอัตราส่วนความต้านทานของ platinum resistance thermometer (PRT) ที่สอบเทียบกับ fixed points ต่างๆ

ตามที่กำหนดในITS-90 และสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานที่วัดได้ในรูปของสมการ reference function และสมการส่วนเบี่ยงเบนของค่าที่วัดได้กับค่าที่แท้จริง (deviation equation)

4. อุณหภูมิสูงกว่า 1234.93 K (961.78°C)

ให้นิยามของอุณหภูมิ T_{90} ในเทอมของ fixed point และ Planck's radiation equation และใช้ optical pyrometer

fixed points ที่ ITS-90 กำหนด แสดงไว้ในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 Fixedpointsof ITS-90

Material	Equilibrium state	Temperature T_{90} (K)	Temperature T_{90} (°C)
He	VP	3 to 5	-270.15 to -268.15
e-H,	TP	13.8033	-259.3467
≈-H_2 (or He)	VP (or CVGT)	~ 17	~ -256.15
≈-H_2 (or He)	VP (or CVGT)	~ 20.3	~ -252.85
Ne	TP	24.5561	-248.5939
O_2	TP	54.3584	-218.7916
Ar	TP	83.8058	-189.3442
Hg	TP	234.3156	- 38.8344
H_2O	TP	273.16	0.01
Ga	MP	302.9146	29.7646
In	FP	429.7485	156.5985
sn	FP	505.078	231.928
Zn	FP	692.677	419.527
Al	FP	933.473	660.323
Ag	FP	1234.93	961.73
Au	FP	1337.33	1064.18
cu	FP	1357.77	1084.62

หมายเหตุ

e-H_2 คือ equilibrium hydrogen

VP คือ vapor pressure point

CVGT คือ constant volume gas thermometer point

TP คือ triple point

FP คือ freezing point

MP คือ melting point

การหาค่าอุณหภูมิ T_{90} ใดๆ ในช่วงอุณหภูมิหลักระหว่าง TP ของไฮโดรเจน (13.8033 K) ถึง FP ของเงิน (967.78°C)

ในช่วงอุณหภูมิ ITS-90 กำหนดให้ SPRT (Standard Platinum Resistance Thermometer) เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการหาค่า T_{90} ใดๆ โดยกำหนด Reference function ของแต่ละช่วงอุณหภูมิไว้ดังต่อไปนี้

1. ช่วงอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิ 13.8033 K ถึง 273.16 K

Reference function ของช่วงอุณหภูมิ คือ

$$\ln[Wr(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} A_i \left[\frac{\ln(T_{90}/273.16K)+1.5}{1.5} \right]^i \quad \ldots\ldots\ldots (3)$$

หรือ

$$T_{90}/273.16K = B_0 + \sum_{i=1}^{15} B_i \left[\frac{Wr(T_{90})^{1/6} - 0.65}{0.35} \right]^i \quad \ldots\ldots\ldots (4)$$

เมื่อ $W(T_{90}) = R(T_{90}) / R(273.16K)$ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการวัด

และ $Wr(T_{90})$ เป็นค่าที่ได้จากสมการreference function

$R(T_{90})$ = ค่าความต้านทานของ SPRT ณ อุณหภูมิ T_{90} ใดๆ

$R(273.16K)$ = ค่าความต้านทานของ SPRT ณ อุณหภูมิสามสภาวะของน้ำ (273.16K)

A_o, A_1, B_o และ B_1 แสดงไว้ในตารางที่ 5.3

2. **ช่วงอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิ 0°C ถึง 961.78°C**

Reference function ในช่วงอุณหภูมินี้คือ

$$Wr(T_{90}) = C_o + \sum_{i=1}^{9} C_i \left[\frac{T_{90}/K - 754.15}{481} \right]^i \qquad \ldots\ldots (5)$$

หรือ

$$T_{90}/K - 273.15 = D_o + \sum_{i=1}^{9} D_i \left[\frac{Wr(T_{90}) - 2.64}{1.64} \right]^i \qquad \ldots\ldots (6)$$

ค่าคงที่ C_o, C_1, D_o, และ D_1 ได้จากตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าคงที่ A_1, A_2, B_0, B_1, C_0, C_1, D_0 และ D_1 ในสมการ Reference function (3), (4), (5) และ (6)

Constant or Coeffidient	Value	Constant or Coefficient	Value
A_0	-2.135 347 29	B_0	0.183 324 722
A_1	3.163 247 20	B_1	0.240 975 303
A_2	-1.801 435 97	B_2	0.209 108 771
A_3	0.717 272 04	B_3	0.190 439 972
A_4	0.503 440 27	B_4	0.142 646 498
A_5	-0.616 993 95	B_5	0.077 993 465
A_6	-0.053 323 22	B_6	0.012 475 611
A_7	0.280 213 62	B_7	-0.032 267 127
A_8	0.107 152 24	B_8	-0.075 291 522
A_9	-0.293 028 65	B_9	-0.091 173 542
A_{10}	0.044 598 72	B_{10}	0.076 201 285
A_{11}	0.118 686 32	B_{11}	0.123 833 526
A_{12}	-0.052 481 34	B_{12}	-0.029 201 193
		B_{13}	-0.091 173 542
		B_{14}	0.076 201 285
		B_{15}	0.026 025 526
C_0	2.781 572 54	D_0	439.932 854
C_1	1.646 509 16	D_1	472.416 020
C_2	-0.137 143 so	D_2	37.684 434
C_3	-0.006 497 67	D_3	7.472 018
C_4	-0.002 344 44	D_4	2.920 828
C_5	0.005 118 68	D_5	2.005 184
C_6	0.001 879 82	D_6	-0.963 864
C_7	-0.002 044 72	D_7	-0.188 732
C_8	-0.000 461 22	D_8	0.191 203
C_9	0.000-457 24	D_9	0.043 025

สำหรับ deviation equation นั้น ITS-90 ได้กำหนดขึ้น ดังนี้

1. **ช่วงอุณหภูมิจุดสามสภาวะของไฮโดรเจน (13.8033K) ถึงจุดสามสภาวะของน้ำ (273.16K)** deviation equation ของช่วงอุณหภูมินี้ คือ

$$W(T_{90}) - Wr(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 11 \; t \; b[W(T_{90}) - 1]^2 + t \sum_{i-1}^{5} c_i[\ln W(T_{90})]^{1+n} \quad \ldots\ldots (7)$$

ในกรณีที่ใช้ SPRT เพียงอย่างเดียววัดอุณหภูมิตลอดช่วงอุณหภูมินี้ PRT จะต้องสอบเทียบกับ fixed point จำนวน 6 จุด คือ จุดสามสภาวะ (TP) ของไฮโดรเจน (13.8033K) นีออน (24.5561K) อ๊อกซิเจน (54.3584K) อาร์กอน (83.8058K) ปรอท (234.3156K) และน้ำ (273.16K) รวมทั้งอีก 2 จุดระหว่างอุณหภูมิ 16.9K 17.1K กับอุณหภูมิ 20.2K และ 20.4K เมื่อใช้วัดด้วย vapor pressure thermometer หรืออีก 2 จุดระหว่างอุณหภูมิ 17.025K และ 17.45K กับอุณหภูมิ 20.26K และ 20.28K เมื่อวัดด้วย gas thermometer อย่างไรก็ตามเพื่อให้ง่ายต่อการปฏิบัติและทำให้ได้ค่าอุณหภูมิ T_{90} ถูกต้องมากที่สุด ITS-90 จึงได้แบ่งออกเป็นช่วงย่อยๆ ดังนี้

1.1 **ช่วงอุณหภูมิ TP ของนีออน (24.5561K) ถึง TP ของน้ำ (0.01°C)** PRT ที่ใช้เฉพาะในช่วงอุณหภูมินี้ ให้สอบเทียบกับ fixed point จำนวน 6 จุด คือ TP ของไฮโดรเจน นีออน อ๊อกซิเจน อาร์กอน ปรอท และน้ำ

ในกรณีนี้ deviation equation จะเป็น

$$W(T_{90}) - Wr(T_{90}) = a_2[W(T_{90}) - 11 \; t \; b_2[W(T_{90}) - 1]^2 + \sum_{i=1}^{3} c_i[\ln W(T_{90})]^{1+n} \quad \ldots\ldots (8)$$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ a_2, b_2, c_1, c_2 และ c_3 ของ PRT หาได้จากการสอบเทียบ PRT ที่ fixed point ต่างๆ ดังกล่าว และ n = 0

1.2 **ช่วงอุณหภูมิ TP ของอ๊อกซิเจน (54.3584K) ถึง TP ของน้ำ (0.01°C)** PRT ที่ใช้ในช่วงอุณหภูมินี้ ใช้สอบเทียบกับ fixed point จำนวน 4 จุด คือ TP ของอ๊อกซิเจน อาร์กอน ปรอท และน้ำ deviation equation จะเป็น

$$W(T_{90}) - Wr(T_{90}) = a_3[W(T_{90}) - 1] + b_3[W(T_{90}) - 1]^2 + c_1[\ln W(T_{90})]^{1+n} \quad \ldots\ldots (9)$$

n = 1 และสัมประสิทธิ์ a_3, b_3 และ c_1 หาได้จากการสอบเทียบPRT ที่จุด fixed point ทั้ง 4

1.3 **ช่วงอุณหภูมิ TP ของอาร์กอน (83.8058K) ถึง TP ของน้ำ (0.01°C)** PRT ที่ใช้ในช่วงอุณหภูมินี้ ใช้สอบเทียบกับfixed point จำนวน 3 จุด คือ TP ของอาร์กอน ปรอท และน้ำ deviation equation จะเป็น

$$W(T_{90}) - Wr(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]\ln W(T_{90}) \quad \ldots\ldots (10)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a, b หาได้เมื่อสอบเทียบPRT กับ fixed point ทั้ง 3 จุดดังกล่าว

2. **ช่วงอุณหภูมิ 0°C จนถึงจุดแข็งตัว (FP) ของเงิน (961.78°C)**

หากใช้ SPRT เพียงอย่างเดียวสำหรับตลอดช่วงอุณหภูมินี้ จะต้องสอบเทียบ PRT กับ fixed point จำนวน 5 จุด คือ TP ของน้ำ (0.01°C) FP ของดีบุก (231.928°C) สังกะสี (419.527°C) อะลูมิเนียม (660.323°C) และเงิน (961.78°C) deviation equation คือ

$$W(T_{90}) - Wr(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 1] + b[W(T_{90}) - 1]^2 + c[W(T_{90}) - 1]^3 + d[W(T_{90}) - W(660.323^\circ C)]^2 \quad \ldots\ldots (11)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d หาได้เมื่อสอบเทียบ PRT กับ fixed point ทั้ง 5 จุด ดังกล่าว เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า FP ของอะลูมิเนียม จะได้ d = 0 เพื่อให้ง่ายต่อการปฏิบัติ และได้ผลการวัดที่ถูกต้องมากที่สุด ITS-90 จึงได้แบ่งช่วงอุณหภูมิออกเป็นช่วงย่อยๆ ดังนี้

2.1 ช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง FP ของอะลูมิเนียม (660.323°C)

PRT ที่ใช้ในช่วงอุณหภูมินี้ ให้สอบเทียบกับ fixed point ต่างๆ จำนวน 4 จุด คือ TP ของน้ำ FP ของดีบุก สังกะสี และอะลูมิเนียม ดังนั้น deviation equation คือ

$$W(T_{90}) - Wr(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 11 \text{ t } b[W(T_{90}) - 1]^2 \text{ t } c[W(T_{90}) - 1]^3 \quad \ldots\ldots (12)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ a, b และ c ของPRT หาได้เมื่อสอบเทียบ PRT กับ fixed point ทั้ง 4 จุดดังกล่าว

2 . 2 ช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง FP ของสังกะสี (419.527°C)

PRT ที่ใช้ในช่วงอุณหภูมินี้ ให้สอบเทียบกับ fixed point จำนวน 3 จุด คือTPของน้ำ FP ของดีบุก และของสังกะสี จะได้ deviation equation เป็น

$$W(T_{90}) - Wr(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 11 \text{ t } b[W(T_{90}) - 1]^2 \quad \ldots\ldots (13)$$

ค่าสัมประสิทธิ์a, bหาได้จากการสอบเทียบPRT กับ fixed point ทั้ง 3 จุดดังกล่าว

2.3 ช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง FP ของดีบุก (231.928°C)

PRT ที่ใช้ในช่วงอุณหภูมินี้ ให้สอบเทียบกับ fixed point 3 จุด คือTPของน้ำ FP ของอินเดียม (156.5985°C) และของดีบุก จะได้สมการของ deviation equation และหาสัมประสิทธิ์a, b ได้เช่นเดียวกับข้อ 2.1

2.4 ช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง FP ของอินเดียม (156.5985°C)

PRT ที่ใช้เฉพาะช่วงอุณหภูมินี้ ให้สอบเทียบกับ fixed point 2 จุด คือ TP ของน้ำ และ FP ของอินเดียม deviation equation จะได้

$$W(T_{90}) - Wr(T_{90}) = a[W(T_{90}) - 11 \quad \ldots\ldots (14)$$

สัมประสิทธิ์ a หาได้จากการสอบเทียบ PRT กับ fixed point ทั้ง 2 จุดดังกล่าว

2 . 5 ช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึงจุดหลอม (MP) ของแกลเลียม (29.7646°C) Pm ที่ใช้ในช่วงอุณหภูมินี้ ให้สอบเทียบกับ fixed point 2 จุด คือ TP ของน้ำ และ MP ของแกลเลียม สมการ deviation equation และสัมประสิทธิ์ a หาได้เช่นเดียวกับข้อ 2.4

3. ช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า FP ของเงิน (961.78°C)

การวัดอุณหภูมิในช่วงนี้ใช้ Planck's Radiation Law ดังนั้น อุณหภูมิ T_{90} หาได้จากสมการ

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda[T_{90}(X)]} = \frac{\exp(C_2[\lambda T_{90}(X)]^{-1}) - 1}{\exp(C_2[\lambda T_{90}]^{-1}) - 1} \quad \ldots\ldots (15)$$

เมื่อ $L_\lambda(T_{90})$ และ $L_\lambda[T_{90}(X)]$ = spectral concentration on the radiance of a blackbody at wavelength λ (in vacuum) at T_{90} and $T_{90}(X)$

$T_{90}(X)$ = [T_{90}(Ag) = 961.78°C] หรือ [T_{90}(Au) = 1064.18°C] หรือ [T_{90}(Cu) = 1084.62°C]

C_2 = Planck's constant = 0.014388 micron kelvin

exp = 2.718

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบ IPTS-68 กับ ITS-90

IPTS-68		ITS-90	
Temperature	Xandard Instrumen	Temperature	Xandard Instrument
13.81K to 630.74°C	PRTs	3.0K to 24.6K	Gas Thermometer (CVGT)
630.74°C to 1064.43°C	Thermocouple (Pt-10% Rh/Pt)	13.81K to 961.93°C	PRTs
above 1064.43°C	Pyrometers using Planck's radiation law	above 961.93°C	Pyrometers using Plan&radiation law

CVGT = constant volume gas thermometer

PRTs = platinum resistance thermometer

5.3 มาตรฐานอุณหภูมิ

มาตรฐานอุณหภูมิของแต่ละประเทศใช้ระบบมาตรฐานสากลของอุณหภูมิในทางปฏิบัติ IPTS-68 ต่อมาใช้ ITS-90 แทน ดังตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 การเก็บรักษามาตรฐานอุณหภูมินั้น เพื่อที่จะให้สามารถทราบค่าที่แท้จริงของตัวมาตรฐานอยู่เสมอ และเพื่อให้มีความมั่นใจว่าผลของการวัดและการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิเป็นที่เชื่อถือ

ได้ ตัวมาตรฐานและเครื่องมือวัดที่ใช้ประกอบในการปฏิบัติงาน จะต้องได้รับการตรวจสอบและ/หรือสอบเทียบเป็นประจำตามระยะเวลาที่กำหนดโดยสม่ำเสมอ

5.3.1 **มาตรฐานอุณหภูมิจากจุดแข็งตัวของสารบริสุทธิ์**

การวัดอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการจะใกล้เคียงกับความสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ ซึ่งใช้ในการนิยามเรื่องของอุณหภูมิมากที่สุด จึงมีการกำหนดวิธีการวัด เรียกว่า International Practical Temperature Scale (IPTS) ภายหลังได้เปลี่ยนเป็น International Temperature Scale (ITS)

ITS มีไว้เพื่อกำหนดมาตรวัดของอุณหภูมิทางอุณหพลศาสตร์ในลักษณะที่ปฏิบัติได้ทั่วกัน ซึ่งกล่าวไว้ว่า อุณหภูมิของสภาวะสมดุลของน้ำแข็งและน้ำที่มีอากาศอยู่อย่างอิ่มตัว มีค่าเป็น 0°C และอุณหภูมิของไอน้ำกลั่นตัวหรือน้ำกลายเป็นไอที่มีความกดดันหนึ่งบรรยากาศ มีค่าเป็น 100°C และกำหนดค่าคงที่ของอุณหภูมิเป็นจุดๆ เรียกว่า **จุดคงตัวพื้นฐาน** (Basic fixed points) ได้แก่ จุดคงตัวของอ๊อกซิเจน จุดคงตัวของน้ำแข็ง จุดคงตัวของกำมะถัน จุดคงตังของเงิน และจุดคงตัวของทอง เป็นต้น ดังแสดงอยู่ในตารางที่ 5.1 และตารางที่ 5.2 นอกจากนี้ยังมีจุดคงตัวทุติยภูมิอยู่อีกจำนวนหนึ่ง เช่น จุดระเหิดของคาร์บอนไดออกไซด์ จุดของปรอทแข็งตัว ฯลฯ

5.3.2 **เทอร์โมมิเตอร์ชนิดความต้านทานแพลทตินัม**

การวัดอุณหภูมิด้วยวิธี Resistance Thermometer เป็นการวัดอุณหภูมิโดยอาศัยคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิของตัวนำ

ตัวนำมีหลายชนิด เช่น ทอง ทองแดง นิเกิล แพลทตินัม เงิน และโลหะผสมบางชนิด ซึ่งในจำนวนตัวนำโลหะเหล่านี้ ทอง ทองแดง นิเกิล และเงิน เป็นตัวนำที่มีความต้านทานต่ำ จึงไม่ค่อยเหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำเทอร์โมมิเตอร์

สำหรับตัวนำที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน ควรมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานค่อนข้างมากเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง

อุณหภูมิ

2. การเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ ควรมีลักษณะเป็นเส้นตรง (linear change)

3. การเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิมีค่าคงที่เสมอ

4. มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลง

5. มีความทนต่อการเป็นสนิม

6. ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง

7. สามารถผลิตได้ง่าย

8. มีความคงทนต่อการใช้งาน

9. ราคาไม่แพงมากนัก

10. มีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานในแต่ละรอบของการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิค่าคงที่เสมอ

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของตัวนำไฟฟ้าที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แสดงในตารางที่ 5.5 แล้ว จะเห็นว่าแพลทตินัมมีคุณสมบัติเหนือกว่าตัวนำชนิดอื่น เหมาะสมที่สุดที่จะใช้เป็นเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน ถึงแม้ว่าโลหะแพลทตินัมจะมีราคาค่อนข้างสูง แต่ราคาของเทอร์โมมิเตอร์ชนิดนี้มิได้ขึ้นอยู่กับราคาของแพลทตินัมเพียงอย่างเดียว โลหะแพลทตินัมที่ใช้ทำเทอร์โมมิเตอร์แต่ละอันก็ใช้จำนวนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ตารางที่ 5.5 Properties of materials used in the sensors of resistace thermometer

Material	Temperature Coefficient (%/K)	Law	Resistivity	Range °C	Stability
Pt	0.4	Quadratic	Medium	-260 to t 1200	High
Ni	0.6	Quadratic	Medium	-200 to +350	Medium
cu	0.4	Linear	LOW	-200 to +200	Medium
Rh 5% Fe	0.4	Quadratic	Medium	-272 to +400	High
Thermistor	-4	A.exp(B/T)	High	-200 to +200	Medium

ดังนั้น เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานส่วนใหญ่ในปัจจุบันจึงทำด้วยแพลทตินัม เนื่องจากมีความไว หรือ sensitivity สูง อย่างไรก็ตามอาจมีอยู่บ้างที่ทำด้วยโลหะผสมระหว่างโรเดียม กับเหล็ก 5% เพราะมีความไวเท่าเทียมกับแพลทตินัม แต่จะสามารถใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิ -272°C ถึง 400°C เท่านั้น

เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัม แบ่งได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ

1. **เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัมมาตรฐาน** (Standard Platinum Resistance Thermometer, SPRT)

2. เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัมสำหรับงานอุตสาหกรรม (Industrial Platinum Resistance Thermometer, IPRT)

1. **เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัมมาตรฐาน** (SPRT) สำหรับ IPTS-68 ใช้เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัมมาตรฐานเป็นเครื่องมือในการหาอุณหภูมิจากช่วงตั้งแต่ 13.81K ถึง 630.74°C โดยหาจุดคงตัว 3 จุดด้วยกัน คือ จุดสามสภาวะของน้ำ จุดแข็งตัวของดีบุก และจุดแข็งตัวของสังกะสี

สำหรับจุดคงตัวต่างๆ ตาม IPTS-68 ได้แสดงอยู่ในตารางที่ 5.1 แล้ว

ลวดแพลทตินัมที่ใช้ทำ SPRT จะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.075 มิลลิเมตร และมีความต้านทาน 25.5 โอห์มที่ 0°C ตาม IPTS-68 อัตราส่วนของความต้านทาน $R(100^\circ C)/R(0^\circ C)$ จะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$\frac{R(100^\circ C)}{R(0^\circ C)} \geq 1.3925 \qquad \ldots\ldots (16)$$

หรือ

$$\alpha = (1/100)\left(\frac{R(100^\circ C)}{R(0^\circ C)} - 1\right) \geq 0.003925 \qquad \ldots\ldots (17)$$

ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 0°C ถึง 630.74°C จะมีจุดคงตัว 3 จุด คือ จุดสามสภาวะของน้ำ (273.16K หรือ 0.01°C) จุดแข็งตัวของดีบุก (273.9681°C) และจุดแข็งตัวของสังกะสี (419.58°C) และใช้สมการเหล่านี้ในการสอบเทียบ SPRTs

$$t_{se} = t' \; t \; M(t') \qquad \ldots\ldots (18)$$

ซึ่ง t' และ $M(t')$ หาได้จากสมการ

$$t' = (1/\alpha)[R(t')/R(0) - 1] + \delta(t'/100)(t'/100 - 1) \quad \ldots\ldots (19)$$

และ $$M(t') = (0.045)(t'/100)(t'/100 + 1)(t'/419.58 - 1)(t'/630.74 - 1) \quad \ldots\ldots (20)$$

สมการ (19) เขียนได้ใหม่เป็น

$$W(t') = R(t')/R(0) = 1 + At' + Bt'^{4} \quad \ldots\ldots (21)$$

ค่าคงที่ α และ δ จากสมการ (19) หาได้จากความสัมพันธ์ของค่าคงที่ A และ B ในสมการ (21) โดยที่

$$\alpha = A + 100B$$

$$\delta = -10^{4}B/(A + 100B)$$

ดังนั้น ค่าคงที่ R(0), α, และ δ หรือ R(10), A และ B หาได้โดยการวัดความต้านทานจาก SPRT ที่จุดคงตัวทั้งสามจุด วิธีการสอบเทียบโดยการหาจุดคงตัวเหล่านี้ เรียกว่า การสอบเทียบปฐมภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัม (primary calibration of standard platinum resistance thermometer)

2. **เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัมสำหรับงานอุตสาหกรรม** (IPRT) เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานสำหรับใช้ในงานอุตสาหกรรมในปัจจุบัน ส่วนใหญ่ทำด้วยโลหะแพลทตินัม ถึงแม้ว่าเทอร์โมมิเตอร์ชนิดนี้ไม่ต้องการความถูกต้องในการวัดสูงมาก เท่ากับเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัมมาตรฐาน (SPRT) ก็ตาม แต่ก็ต้องทำให้ดีกว่า SPRT คือ ความมั่นคง แข็งแรง สามารถทนทานต่อการกระแทก shock หรือการสั่นสะเทือนได้เป็นอย่างดี

ก. IPRT ไม่จำเป็นต้องมีคุณสมบัติตามคุณสมบัติของ SPRT ที่กำหนดใน ITS-90 แต่ต้องมีคุณลักษณะที่เหมาะสม ดังนี้

มีค่าดัชนีแสดงความบริสุทธิ์ของแพลทตินัม คือ

α = $0.00385\,^{\circ}C^{-1}$ สำหรับ IPRT ตาม IEC-751(19)

α = $0.00392\,^{\circ}C^{-1}$ สำหรับ sub-standard IPRT

เมื่อ $\alpha = (R_{100} - R_0)/100R_0\ ^{\circ}C^{-1}$

R_{100} = ความต้านทานของ IPRT ที่ 100°C

R_o = ความต้านทานของ IPRT ที่ 0°C

ข. สมการสำหรับคำนวณค่าอุณหภูมิสอดแทรก (interpolation equation) ของ IPRT IEC-751 ได้กำหนดความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความต้านทานของ IPRT ในช่วงอุณหภูมิ 0°C - 850°C ไว้ดังนี้

$$R_t = R_o(1 + At + Bt^2)$$

ส่วนในช่วงอุณหภูมิระหว่าง -200°C ถึง 0°C ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิ จะเป็นดังนี้

$$R_t = R_o[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)^3]$$

ค่าคงที่ A, B และ C นั้น IEC-751 ได้กำหนดไว้ให้ด้วย

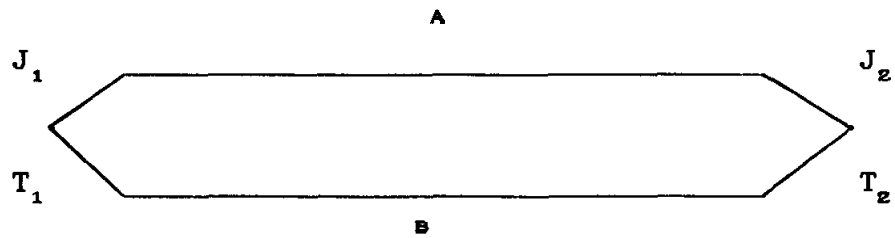
5.3.3 เทอร์โมคัปเปิล

ในการวัดอุณหภูมิเราไม่สามารถจะวัดโดยตรงได้ แต่เราสามารถวัดได้โดยอาศัยผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ ซึ่งผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์จะทำให้เกิดตัวแปรสัญญาณทางกลหรือเชิงไฟฟ้าแบบต่างๆ อันได้แก่ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง ความดัน แรงดันไฟฟ้า อิมพีแดนซ์ เป็นต้น ขนาดของสัญญาณเหล่านี้จะเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิซึ่งจะถูกป้อนเข้าเครื่องรับ เพื่อชี้หรือบันทึกหรือเข้าเครื่องแปรเป็นสัญญาณอื่นๆ ต่อไป

ถ้าเราให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันแก่ตัวนำไฟฟ้า ความร้อนหรืออุณหภูมิจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของอิเลกตรอน ซึ่งจะทำให้เกิด emf (electromotive force) ขึ้นบริเวณนั้น ขนาดและทิศทางของ emf จะขึ้นอยู่กับขนาดและทิศทางของ Temperature Gradient และ Material ที่ใช้เป็นตัวนำอันนั้น Voltage ที่ตกคร่อมระหว่างปลายทั้งสองของตัวนำจะเท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของ emf ที่เกิดขึ้นตลอดสาย

ในทางปฏิบัติ เราจะเอาโลหะหรือสารกึ่งตัวนำที่มี Seebeck Coefficient (μ_v/C) ที่ต่างกัน หรือโลหะต่างชนิดกันมาต่อเข้าด้วยกันทั้งสองข้าง แล้วทำให้อุณหภูมิที่

ส่วนต่อทั้งสองนี้แตกต่างกัน จะทำให้เกิดมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าและมีกระแสไหล เราเรียกของสิ่งนี้ว่า เทอร์โมคับเปิล (Thermocouple) ปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า Seebeck Effect ซึ่งค้นพบโดย Thomas Seebeck ในปี ค.ศ. 1821



ขนาดและแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ T_1 และ T_2 ที่จุด J_1 และ J_2 ตามลำดับ และขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ A, B ที่นำมาต่อกันด้วย ถ้า $T_1 = T_2$ emf ที่ J_1 และ J_2 จะมีค่าเท่ากัน ผลบวกทางพีชคณิตจะทำให้ emf = 0 ซึ่งจะทำให้ไม่มีกระแสไหลในวงจร แต่ถ้า $T_1 \neq T_2$ เมื่อไร emf ที่เกิดขึ้นที่ J_1 และ J_2 จะไม่เท่ากัน ทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร ทิศทางของกระแสก็จะถูกกำหนดโดย emf ของจุดต่อที่มีอุณหภูมิมากกว่า

เทอร์โมคับเปิลเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้มากทั้งในการวิจัยและในอุตสาหกรรม สำหรับวัดอุณหภูมิ ใน IPTS-68 กำหนดให้ เทอร์โมคับเปิลที่ทำด้วยแพลทตินัม 10% โรเดียม/แพลทตินัม (Pt-10% Rh/Pt themocouple) เป็นเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (standard themometer) ในช่วงอุณหภูมิ 630.74°C ถึง 1064.43°C

เทอร์โมคับเปิลประกอบด้วยลวดโลหะ 2 ชนิดที่ไม่เหมือนกันซึ่งอาจเป็นโลหะบริสุทธิ์ โลหะผสม (alloy) และมีโพเทนชิโอมิเตอร์ (potentiometer) เป็นเครื่องชี้บอก (indicator) ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับผลต่างของอุณหภูมิทั้งสองของลวดที่เชื่อมกัน

ในปัจจุบันมีเทอร์โมคับเปิลที่ใช้กันอยู่ประมาณ 20 กว่าแบบ แต่ที่ถูกกำหนด

เป็นมาตรฐานมีอยู่ 7 แบบด้วยกัน ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ผลิตใช้เป็นมาตรฐานเดียวกัน แต่ละแบบก็มี Seebeck Coefficient และความเหมาะสมในการใช้งานต่างกันไป เทอร์โมคับเปิล ทั้ง 7 แบบ ได้แก่ J K E T R S B ซึ่งยังแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

กลุ่มที่ 1 เรียกว่า **Noble Metal Thermocouple หรือ Rare Metal Thermocouple** มี 3 แบบ คือ S R B

กลุ่มที่ 2 เรียกว่า **Base Metal Thermocouple** มี 4 แบบ คือ J K E และ T

1. **Type S** เป็น Platinum-10% Rhodium Alloy (+) Versus Platinum (-) Thermocouple สามารถใช้งานในสภาพที่เป็น Oxidizing และ Inert Atmosphere ได้ต่อเนื่องในสภาพอุณหภูมิได้สูงถึง 1400°C ไม่เหมาะสมกับการใช้งานสำหรับสภาวะงานที่เป็น Reducing, Vacuum หรือสภาพที่มีไอของโลหะ เช่น ตะกั่ว สังกะสี และไอของโลหะ เช่น ซัลเฟอร์ อาเซนิก ฟอสฟอรัส ซึ่งจะทำให้อายุการใช้งานสั้นลง ถ้าจำเป็นต้องใช้จะต้องป้องกันด้วย Protecting Tube ที่เป็นอโลหะ สายที่เป็นเส้นบวกที่มีส่วนผสมของ Rhodium เมื่อใช้งานในสภาวะปกติประมาณ 10 ปี Rhodium จะค่อยๆ เปลี่ยนสภาพไปเป็น Paradium ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเปลี่ยนไป

2. **Type R** เป็น Platinum-13% Rhodium Alloy (+) Versus Platinum (-) Thermocouple คุณสมบัติและการใช้งานจะคล้ายกับ Type S แต่จะให้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามากกว่า วัดอุณหภูมิได้สูงถึง 1482°C

3. **Type B** เป็น Platinum-30% Rhodium Alloy (+) Versus Platinum-6% Rhodium Alloy (-) Thermocouple วัดอุณหภูมิได้ถึง 1750°C

4. **Type J** เป็น Iron (+) Versus Copper - Nickel Alloy Thermocouple หรือ Iron-Constantan หรือ IC Type J Thermocouple ส่วนที่ทำด้วยเหล็กจะเป็นขั้วบวก Constantan ซึ่งเป็นส่วนผสมของนิเกิลกับทองแดงจะเป็นขั้วลบ เหมาะสำหรับงานที่เป็น Vacuum Oxidizing, Reducing หรือ Inert อุณหภูมิ

ใช้งานสูงสุดไม่เกิน 760°C ไม่เหมาะสำหรับงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 0°C อย่างไรก็ตาม หากอุณหภูมิใช้งานมีอุณหภูมิสูงกว่า 538°C จะต้องใช้สายที่เทอร์โมคับปิลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น จะช่วยยืดอายุการใช้งาน เพราะสายเล็กจะเกิด Oxidizing ได้ง่าย

5. **Type K** เป็น Nickel-10% Chromium Alloy (+) Versus Nickel-5% Aluminium Alloy (-) Thermocouple หรือ Chromel-Alumel หรือ CA เป็นแบบที่นิยมใช้กันมากในงานอุตสาหกรรม เพราะราคาถูกกว่าตระกูลแพลทตินัม วัดอุณหภูมิได้สูงกว่าในแบบ Base Metal ด้วยกัน สามารถใช้กับสภาวะงานที่เป็น Oxidizing หรือ Inert ได้ดีกว่าแบบอื่น สามารถทนอุณหภูมิได้สูงถึง 1370°C

6. **Type E** เป็น Nickel-10% Chromium Alloy (+) Versus Copper-Nickel Alloy (-) Thermocouple หรือ CRC เป็นแบบที่ให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าความร้อนมากกว่าทุกแบบ อุณหภูมิในงานระหว่าง -250 ถึง 871°C เหมาะสำหรับการใช้งานในสภาวะ Oxidizing หรือ Reducing ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ ก็คล้ายกับเทอร์โมคับเปิลแบบ K

7. **Type T** เป็น Copper (+) Versus Copper-Nickel Alloy (-) Thermocouple หรือ Copper-Constantan หรือ CC เป็นเทอร์โมคับเปิลที่เหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิที่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งของน้ำ ปกติสามารถวัดอุณหภูมิได้ต่ำถึง -184°C แต่อุณหภูมิในทางบวกวัดได้ต่ำกว่าแบบอื่นๆ (ได้เพียง 371°C) มีความทนต่อการกัดกร่อนเนื่องจากความชื้นได้ดี สามารถใช้งานในสภาพที่เป็น Vacuum, Oxidizing, Reducing และ Inert ได้ดี ไม่เหมาะกับงานที่ต้องสัมผัสกับการแผ่รังสีโดยตรง

5.3.4 เครื่องวัดอุณภูมิโดยใช้แสง

ตามที่ IPTS-68 ใช้เครื่องมือมาตรฐานสำหรับวัดอุณภูมิที่สูงกว่า 1064.43°C (จุดแข็งตัวของทอง) โดยอาศัยกฎการแผ่รังสีของพลางค์ (Planck's Radiation Law) เครื่องมือนั้น คือ Optical Pyrometer ในทางปฏิบัติอาจจะใช้photoelectric optical pyrometer หรือvisual optical pyrometer เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

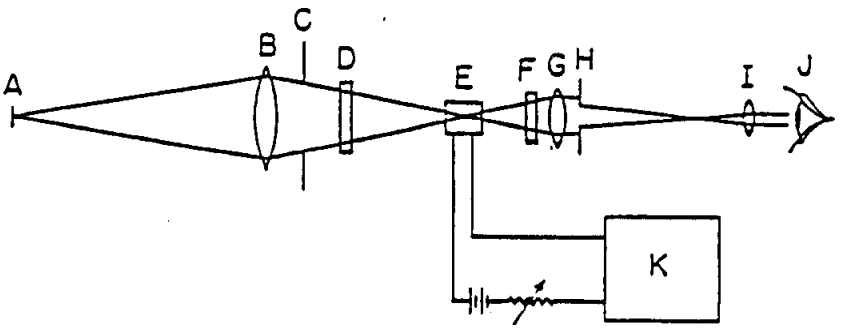
ในช่วงนี้ สมการที่ใช้มีดังนี้

$$\frac{N_\lambda(T_{os})}{N_\lambda(T_{os}(Au))} = \frac{\exp[C_2/\lambda T_{os}(Au)] - 1}{\exp[C_2/\lambda T_{os}] - 1}$$

ซึ่ง $N_\lambda(T_{os})$ = spectral radiance ของวัตถุดำที่มีความยาวคลื่น λ ที่อุณหภูมิ T_{os}

$N_\lambda(T_{os}(Au))$ = spectral radiance ของวัตถุดำที่มีความยาวคลื่น λ จุดแข็งตัวของทอง $T_{os}(Au)$

C_2 = 1.438 เซนติเมตรองศา



รูปที่ 5.1 Schematic diagram of an optical pyrometer.

A = source

B = Objective lens

C = Objective aperture

D = Absorption filter (เมื่อใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1300°C)

E = Pyrometer lamp

F = red filter

G = microscope objective lens

H = microscope aperture stop

I = microscope ocular

J = eye

K= current measuring instrument

หลอดไฟ (lamp) มาตรฐานจะใช้ในการสอบเทียบ optical pyrometer ใน optical pyrometer (ดังรูปที่ 5.1) จะมี inner small lamp ซึ่งมี tungsten filament บางๆ อยู่ เมื่อความสว่างของดวงไฟ (lamp brightness) จับคู่ (match) กับวัตถุ ภาพของ lamp filament จะหายไป หมายความว่าอุณหภูมิของ lamp filament จะเท่ากับอุณหภูมิของวัตถุหรือหลอดไฟมาตรฐาน ทำโดยการเพิ่มหรือลดกระแสไฟฟ้าให้แก่ filament และอ่านจุดของการจับคู่ของ filament ของ pyrometer วิธีการนี้จะทำ 4 ครั้ง ค่าของหลอดไฟมาตรฐานอ่านจากโวลต์มิเตอร์แบบตัวเลข (digital voltmeter)

5.4 การวัดอุณหภูมิ

การวัดอุณหภูมิ นับว่าเป็นหัวใจของการปฏิบัติงาน ในงานอุตสาหกรรมจะเป็นการควบคุมกระบวนการทั้งหลายในอุตสาหกรรมตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน อุณหภูมิถือว่าเป็นปริมาณพื้นฐานที่สุดอันหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรม โดยเฉพาะอุตสาหกรรมกระบวนการทางความร้อน สภาพที่จะทำการวัดอุณหภูมิในอุตสาหกรรมจึงมีมากมายหลากหลายแบบแตกต่างกันไป ไม่มีกฎเกณฑ์ตายตัวว่าจะต้องทำหรือใช้อุปกรณ์เช่นใด นอกจากการคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆ ในการวัด ความเข้าใจสาเหตุแห่งความคลาดเคลื่อนต่างๆ อย่างถ่องแท้ ตลอดจนขีดจำกัดของแต่ละอุปกรณ์และวิธีการ ปกติแล้วเราจะเลือกเครื่องมือ

ที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากความละเอียดถูกต้องและความสะดวกและสภาวะพิเศษใดๆ ที่จำเป็น ตำแหน่งที่ติดตั้งตัววัดก็จะต้องเข้าถึงง่าย สะดวก และเป็นตัวแทนที่ดีที่จะให้ผลการวัดถูกต้อง นอกจากนี้การตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องวัดก่อนและหลังการใช้งานก็เป็นสิ่งจำเป็นเช่นกัน

5.4.1 **มาตรวัดอุณหภูมิ**

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ITS มีไว้เพื่อกำหนดมาตรวัดอุณหภูมิทางพลศาสตร์ และการวัดอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการจะใกล้เคียงกับสมดุลทางอุณหพลศาสตร์ แต่ในทางอุตสาหกรรมจะมีสภาพแตกต่างไป การกำหนดค่าคงที่ทางอุณหภูมิเป็นจุดๆ ซึ่งเรียกว่าจุดคงตัว ในการประมาณค่าระหว่างแต่ละจุดคงตัว จะกำหนดสูตรเป็นช่วงๆ ดังนี้

1. **จาก -190°C ถึงจุดคงตัวน้ำแข็ง** ใช้อ้างอิงอุณหภูมิของ Standard Platinum Resistance Thermometer ด้วยสูตร

$$R_t = R_o[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)^3] \quad \text{..... (22)}$$

ค่าคงที่ R_o, A, และ B หาได้จากการสอบเทียบจากจุดคงตัวของน้ำแข็ง ไอน้ำ และกำมะถัน ส่วนค่าคงที่ C หาได้จากการสอบเทียบจากจุดคงตัวอ๊อกซิเจน และความบริสุทธิ์ และสภาพทางฟิสิกส์ของแพลทตินัม ต้องเป็นไปตามอัตราส่วน ดังนี้

R_t/R_o ไม่น้อยกว่า 1.390 สำหรับ t = 100°C

R_t/R_o ไม่น้อยกว่า 2.645 สำหรับ t = 444°C

และ R_t/R_o ไม่น้อยกว่า 0.250 สำหรับ t = -182.97°C

2. **จากจุดคงตัวน้ำแข็ง ถึง 660°C** ใช้สูตร

$$R_t = R_o(1 + At + Bt^2) \quad \text{..... (23)}$$

3. **จาก 660°C ถึง จุดคงตัวของทอง** ใช้อ้างอิงอุณหภูมิของ Standard Platinum-Platinum Rhodium Thermocouple ที่มี junction หนึ่งอยู่ที่ 0°C และใช้สูตรคำนวณ emf คือ

$$e = a + bt + ct^2 \quad \text{..... (24)}$$

โดยที่ค่าคงที่ a, b, c ได้มาจากการสอบเทียบที่จุดแข็งตัวของพลวงและจุดคงตัวของเงิน

กับทอง

4. **เหนือจุดคงตัวของทองขึ้นไป** ให้ใช้อัตราส่วนความเข้ม J_2 ของการแผ่รังสีเดียวด้วยความยาวคลื่น λ เซนติเมตร จากวัตถุดำ (blackbody) ที่อุณหภูมิ t ต่อความเข้ม J_1 ของการแผ่รังสีเดิมที่จุดคงตัวของทอง ในการหาอุณหภูมิจากสูตร

$$\ln J_2/J_1 = (C_2/\lambda)[1/1336 - 1/(t+273)] \quad ..... (25)$$

ค่าคงที่ C_2 = 1.432 ซม.องศา และ $\lambda(t+273)$ ต้องมีค่าน้อยกว่า 0.3 องศาเท่านั้น

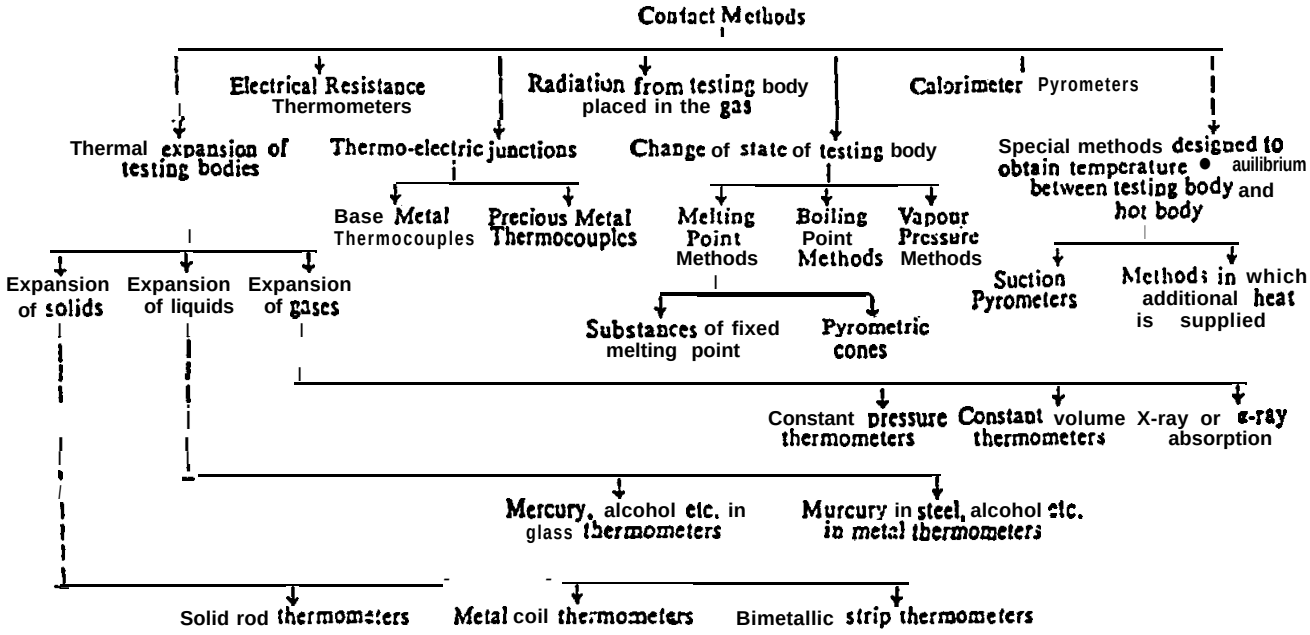
สิ่งที่ทำให้การวัดอุณหภูมิในงานอุตสาหกรรมแตกต่างกันไป ได้แก่ ความร้อนที่ดูดกลืนโดยเครื่องวัดจากความร้อน (ที่จะวัดอุณหภูมิ) จะขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง และตำแหน่ง รวมทั้งความเร็วและคุณสมบัติของของที่ร้อน การสูญเสียความร้อนด้วยการแผ่รังสีของเครื่องวัดซึ่งจะขึ้นกับสภาพการแผ่รังสีของเครื่องวัด และสภาพแวดล้อมกับอุณหภูมิ

5.4.2 วิธีการที่ใช้ในเครื่องวัดอุณหภูมิ

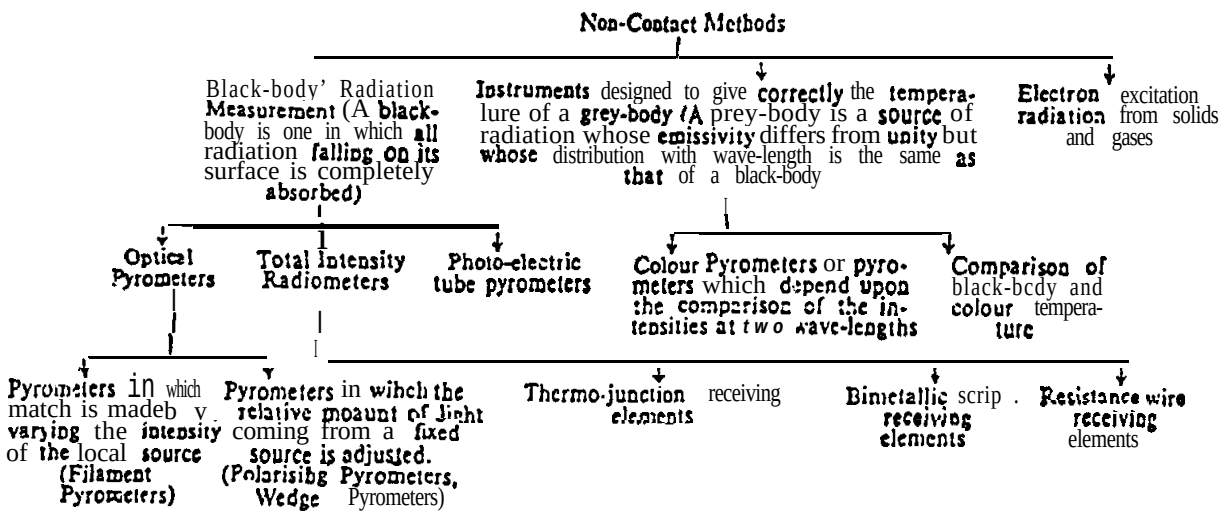
การเพิ่มอุณหภูมิจะเนื่องมาจากการเพิ่ม activity ระดับโมเลกุลของสสาร เมื่อได้รับความร้อน ซึ่งเป็นการเพิ่มพลังงานภายในของวัสดุด้วย อุณหภูมิของระบบจึงแปรตามพลังงาน ซึ่งอาจอยู่ในรูปของการเคลื่อนไหว การสั่น หรืออื่นๆ มีสมบัติบางอย่างที่สังเกตเห็นได้จากการที่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ซึ่งเราใช้เป็นหลักการในการวัดอุณหภูมิ สมบัตินี้อาจเป็นของระบบเอง เรียกว่า hot body หรือ hot system หรือสามารถใช้ระบบย่อยช่วยโดยทำให้มีสมดุลกับระบบในทางอุณหพลศาสตร์ เรียกว่าใช้ test body การวัดอุณหภูมิจริงจะเป็นการหาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัตถุหนึ่งอย่างหรือมากกว่า ที่จะทำให้ระบบมีสมดุลทางความร้อน ดังนั้นจึงแบ่งวิธีการวัด ออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. วิธีที่ต้องสัมผัสกับวัตถุนั้น ดังในแผนภูมิที่ 5.1
2. วิธีที่ไม่ต้องสัมผัสกับวัตถุนั้น ดังในแผนภูมิที่ 5.2

แผนภูมิที่ 5.1 วิธีที่ต้องสัมผัสกับวัตถุ



แผนภูมิที่ 5.2 วิธีที่ไม่ต้องสัมผัส



จากวิธีการวัดดังกล่าวแล้ว เราสามารถแยกหลักการวัดตามหลักการทางฟิสิกส์ที่จะนำไปใช้ ดังต่อไปนี้

1. Change of state เช่นที่ใช้ในการกำหนดจุดคงตัวต่างๆ

2. Fusion หมายถึง การเปลี่ยนจากของแข็งไปเป็นของเหลว เช่น น้ำแข็งละลาย หรือโลหะหลอมเหลว ได้แก่ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิก อุตสาหกรรมเหล็ก กระบวนการเชื่อม เป็นต้น มักจะใช้ในช่วงอุณหภูมิ 650°C ถึง 2000°C

3. Vaporisation เช่น ของเหลวในกระเปาะแคปซูล มักใช้ในช่วง -6°C ถึง 370°C

4. Expansion เช่น ในเทอร์โมมิเตอร์แบบหลอดแก้ว แบบไบเมตัล หากเป็นก๊าซจะใช้กฎของก๊าซ (Gas Law) มักใช้ในช่วง -130°C ถึง 540°C ถ้าเป็นของเหลว จะนำไปใช้ในช่วง -4°C ถึง 540°C พวกที่ใช้ของเหลวจะต้องคำนึงถึง manometric effect ด้วย พวกที่เป็นของแข็งมักใช้อุณหภูมิไม่เกิน 115°C เช่นที่มีใช้ในเครื่องใช้ประจำบ้าน

5. Radiation properties ใช้วัดที่อุณหภูมิสูงๆ ใช้สูตรของ Stefan-Boltzmann เช่น radiation pyrometer

6. Optical properties เช่น ผิวโลหะแผ่รังสีที่ความยาวคลื่นต่างๆ หากอุณหภูมิสูงจะมีความยาวคลื่นลดลง ทำให้มีบางช่วงอุณหภูมิที่แผ่รังสีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่มองเห็นได้ มักใช้ในช่วง 540°C ถึง 1205°C วิธีนี้จะขึ้นอยู่กับความชำนาญในการแยกแยะความแตกต่างของผู้วัด แต่ใน optical pyrometer จะใช้การที่ไส้หลอดจะถูกกลืนหายไปจนมองความแตกต่างไม่เห็นในการใช้วัด

7. Sound velocity ใช้หลักที่ความเร็วเสียงแปรตามรากที่สองของอุณหภูมิสมบูรณ์ ใช้วัดอุณหภูมิของก๊าซได้จนถึง 1100°C ในห้องปฏิบัติการสามารถวัดได้สูงถึง 2475°C นอกจากนี้ยังมีการใช้อัลตราโซนิกกับ Rhenium wire ซึ่งสามารถวัดได้สูงถึง 3160°C

8. Motion of electrons ใช้เครื่องมืออิเลกทรอนิกในห้องปฏิบัติการวัดการเคลื่อนที่ของอิเลกตรอน สามารถวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ 0 K ถึง 2750°C

9. Electrical properties ใช้ความต้านทานไฟฟ้า เรียกว่า Resistance thermometer และ thermistor ใช้ร่วมกับวงจรวัดต่างๆ เช่น Ratiometer, Wheatstone bridge ทั้งแบบ Null balance และ Deflection Galvanometer

10. Thermo electricity laws เช่น Thermocouple ซึ่งพัฒนาจาก Seebeck effect thermocouple pyrometer ซึ่งประกอบด้วย Peltier effect และ Thomson effect ในเครื่องมือวัดทั่วไปในงานอุตสาหกรรมจะมีการเลือกวัสดุเฉพาะเพื่อวัด emf เนื่องจาก Peltier effect เท่านั้น จะใช้ร่วมกับเครื่องวัดต่างๆ ซึ่งมี 2 แบบคือ Deflection pyrometer และ Potentiometer pyrometer

11. Laser Technology ใช้ Laser beams ที่ประยุกต์ในการวัดอุณหภูมิของก๊าซร้อน

5.4.3 เครื่องวัดอุณหภูมิ

เราอาจแยกเครื่องวัดอุณหภูมิเป็น 2 กลุ่มง่ายๆ ดังนี้

1. **Conventional Type** ได้แก่ เทอร์โมมิเตอร์แบบหลอดแก้วทั่วไป แบบหน้าปัทม์

2. **Transducer Type** ได้แก่ Thermocouple และ Resistance thermometer และ thermistor

ในอุตสาหกรรมกระบวนการในอดีตจะใช้แบบแรกมาก ปัจจุบันแบบที่สองได้รับความนิยมสูงขึ้น เนื่องจากความสะดวกและละเอียดแม่นยำที่มีสูงกว่า และใช้ในงานควบคุมอัตโนมัติได้อย่างเหมาะสม

ปัจจุบันเครื่องวัดอุณหภูมิจะถูกนำไปสอบเทียบมาตรฐานด้านอุณหภูมิตาม ITS-90 ซึ่งจะถ่ายทอดมาตรฐานจากจุดคงตัวต่างๆ ไปยัง Standard Thermocouple, Resistance Thermometer และ Standard liquid-in-glass thermometer แล้วจึงใช้อุปกรณ์เครื่องวัดเหล่านี้เป็นตัวถ่ายทอดไปยังเครื่องวัดในอุตสาหกรรมต่อไป วิธีการสอบเทียบเครื่องวัดแต่ละชนิด จะมีเขียนกำหนดมาตรฐานที่เป็นเอกสารต่างๆ ตามหน่วยงานมาตรวิทยา

การวัดค่าความต้านทานของเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน

การวัดค่าความต้านทานของเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานต้องใช้เครื่องวัดความต้านทานที่ออกแบบและสร้างขึ้นโดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการความถูกต้องสูงหรือด้วยเครื่องวัดทางไฟฟ้าในกรณีที่ไม่ต้องการความถูกต้องมากนัก

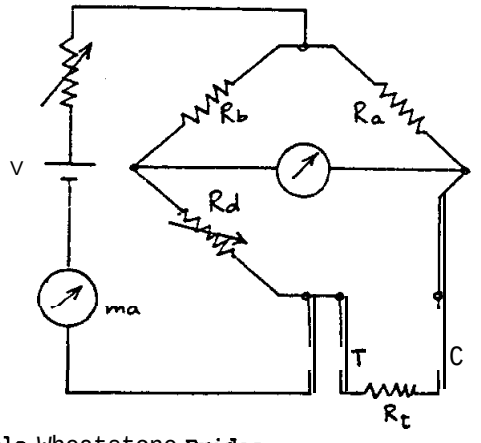
1. **Constant Voltage Ohmmeter** เป็นเครื่องวัดความต้านทานแบบธรรมดาที่สุด ซึ่งได้แก่ Ohmmeter ของเครื่อง Multimeter ทั่วไป ซึ่งวัดค่าความต้านทานโดยการให้ voltage ค่าคงที่บนความต้านทานที่ต้องการวัด แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทาน ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$R = V/I \qquad \text{..... (26)}$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว จะเห็นได้ว่าความต้านทานจะเป็นสัดส่วนผกผันกับกระแสไฟฟ้า ดังนั้น Scale ของ Ohmmeter ซึ่งสอบเทียบในเทอมของความต้านทาน จึงเป็น scale ที่ไม่ linear โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอุณหภูมิสูง อย่างไรก็ตาม ส่วนที่ดีของเครื่องวัดแบบนี้ คือสามารถทำ constant voltage ได้ง่ายโดยใช้ dry cell battery

2. **Constant Current Ohmmeter** เป็นเครื่องวัดความต้านทานที่ได้พัฒนาขึ้นมาอีกระดับหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเป็นแบบที่ใช้ใน digital multimeter เป็นการวัด voltage ตกคร่อมความต้านทานที่ต้องการวัด จากสมการ (26) จะเห็นได้ว่า ค่าความต้านทานจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ voltage ดังนั้น scale ของ voltmeter ที่สอบเทียบในเทอมของความต้านทานจะเป็น scale ที่ linear จึงให้ความถูกต้องดีกว่า เครื่องวัดแบบนี้ที่เป็นชนิด analog จะให้ resolution ได้สูงถึง 0.1%

3. **Wheatstone bridge** เป็นเครื่องวัดความต้านทานของเทอร์โมมิเตอร์แบบง่ายๆ โดยอาศัย net work ของความต้านทาน (หรือ impedance) โดยการวัดความต้านทาน (R_t) ของเทอร์โมมิเตอร์ในเทอมของ reference resistance (R_d) และอัตราส่วนของความต้านทานใน network อีก 2 ตัว คือ R_a และ R_b ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 Simple Wheatstone Bridge

ขณะเมื่อ bridge balance จะได้ความสัมพันธ์ของความต้านทานดังนี้

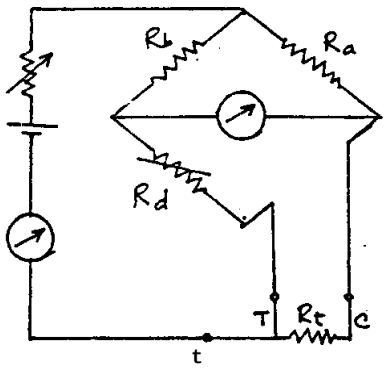
$$R_a/R_b = R_t/R_d$$

หรือ $$R_t = (R_a/R_b).R_d \quad \ldots\ldots (27)$$

เมื่อ R_d คือ decade resistance ที่ได้รับการสอบเทียบแล้ว

Wheatstone bridge ในรูปที่ 5.2 เป็นแบบง่ายๆ ซึ่งจะให้ผลของการวัดมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ทั้งนี้เป็นเพราะค่าความต้านทานที่วัดได้ จะมีค่าความต้านทานของสายนำของเทอร์โมมิเตอร์รวมอยู่ด้วย ยิ่งกว่านั้นในความเป็นจริงอุณหภูมิของสายนำและ sensor ก็ยังแตกต่างกัน รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์ของความต้านทานกับอุณหภูมิทั้งของเทอร์โมมิเตอร์และสายนำก็ยังแตกต่างกันด้วย จึงทำให้ bridge ชนิดนี้วัดความต้านทานของเทอร์โมมิเตอร์มีความถูกต้องไม่ดีกว่า $\pm$ 1%

4. **Three-Lead Bridge** เมื่อพิจารณาหลักการของ Wheatstone bridge ที่ใช้กับ PRT แล้ว จะเห็นได้ว่าวิธีที่จะทำให้ได้ผลการวัดความต้านทานของเทอร์โมมิเตอร์ถูกต้องยิ่งขึ้นนั้น จะต้องหาทางขจัดค่าความต้านทานของสายนำออกไปจากค่าที่วัดได้ให้มากที่สุด วิธีหนึ่งที่ทำได้คือใช้วิธีต่อ 3 สาย ดังแสดงในรูปที่ 5.3 ซึ่งเรียกว่า Three-Lead Bridge ในปลายข้างหนึ่งของ sensor จะมีสายนำเพิ่มขึ้นมาอีก 1 สาย สำหรับใช้เป็น current lead เมื่อ bridge อยู่ในสภาวะสมดุล ความต้านทานของสายนำ T และ C จะชดเชยกันหมดไป แต่โดยความเป็นจริงแล้วอาจจะไม่สามารถขจัดค่าความต้านทานของสายนำให้หมดไปได้โดยสิ้นเชิง เพราะสายนำ T และ C ย่อมมีความต้านทานไม่เท่ากัน



รูปที่ 5.3 Three - Lead Bridge