การสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัมมาตรฐาน ด้วยเทคนิคการเปรียบเทียบในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ

รุ่งโรจน์ จันทร์สูง และชาญวิทย์ มากะ
กองรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ถนนติวานนท์ นนทบุรี 11000

บทคัดย่อ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ โดยกองรังสีและเครื่องมือแพทย์ ได้ทำการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทตินัมมาตรฐาน (Standard Platinum Resistance Thermometer, SPRT) ด้วยเทคนิคเปรียบเทียบในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ โดยใช้วิธีคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ตามวิธีมาตรฐานซึ่งกำหนดโดยหน่วยวัดอุณหภูมิระหว่างประเทศ ปี 1990 (International Temperature Scale of 1990, ITS-90) การสอบเทียบด้วยวิธีใช้อ่างสอบเทียบอุณหภูมินี้แตกต่างจากวิธีมาตรฐานที่กำหนดใน ITS-90 ดังนั้น จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลการวัดของ SPRT กับ SPRT มาตรฐานที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส พบว่า ค่าเฉลี่ยผลการวัดของ SPRT ทั้งสองเหมือนกันและยอมรับได้ดี

บทนำ

เนื่องจากเครื่องวัดอุณหภูมิมีหลายชนิดแต่ละชนิดมีวิธีการใช้งานและความถูกต้องของการวัดแตกต่างกัน เพื่อให้การวัดเป็นมาตรฐานเดียวกัน คณะกรรมการระหว่างชาติว่าด้วยน้ำหนักและการวัด (International Committee of Weights and Measures, CIPM) จึงได้กำหนดมาตรฐานสากลของการวัดอุณหภูมิขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1927 มาตรวัดอุณหภูมิได้รับการแก้ไขปรับปรุงอีกหลายครั้ง และครั้งสุดท้ายได้เปลี่ยนมาเป็น International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) กำหนดใช้อย่างเป็นทางการเมื่อวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา ITS-90 ได้กำหนดอุณหภูมิไว้ทั้งอุณหภูมิเคลวิน สัญลักษณ์ T_{90} และอุณหภูมิเซลเซียส สัญลักษณ์ t_{90} โดยความสัมพันธ์ของอุณหภูมิคือ $t_{90} = T_{90} - 273.15$ กำหนดอุณหภูมิในช่วงตั้งแต่ 0.65K จนถึงอุณหภูมิที่สูงที่สุดที่สามารถวัดได้ด้วย Planck's Radiation Law โดยใช้จุดอุณหภูมิที่ทำให้เกิดสภาพสมดุลทางสภาวะของสารบริสุทธิ์ (Fixed Point) เป็นตัวกำหนดมาตราวัดแบ่งมาตราวัดอุณหภูมิออกเป็นช่วง ๆ เพื่อให้อุณหภูมิ T_{90} ระหว่างจุดกำหนดมาตราวัดอุณหภูมินั้นมีความถูกต้องมากที่สุด โดยในแต่ละช่วงของอุณหภูมิเหล่านั้นได้ถูกกำหนดให้ใช้อุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิและสมการความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับคุณสมบัติของอุปกรณ์นั้น ๆ เป็นการเฉพาะสำหรับช่วงอุณหภูมิแต่ละช่วง ดังนี้

1. ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 0.65K และ 5.0K อุณหภูมิ T_{90} ถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่าง Vapour-Pressure-Temperature ของก๊าซฮีเลียม ^{3}He และ ^{4}He โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์ ชนิด Vapour Pressure Thermometer เป็นอุปกรณ์ในการวัด

2. ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 3.0K และ 24.5561K หรือจุดสามสถานะของนีออน (Neon Triple Point)

Accepted for publication, 22 March 2006

อุณหภูมิ T_{90} ถูกกำหนดจากค่าที่ได้จากการสอบเทียบ Helium Constant Volume gas thermometer ที่ Fixed Point ทั้ง 3 จุด คือ ที่จุดสามสถานะของนีออน จุดสมดุลสามสถานะของไฮโดรเจน (Equilibrium Hydrogen Triple Point) และที่อุณหภูมิระหว่าง 3.0K และ 5.0K อีกหนึ่งจุด แล้วใช้ Interpolation Equations หาอุณหภูมิที่อยู่ในระหว่างช่วง

3. ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 13.8033K และ 961.78˚C หรือ จุดสมดุลสามสถานะ ของไฮโดรเจน และจุดเยือกแข็งของเงิน (Freezing Point of Silver) อุณหภูมิ T_{90} ถูกกำหนดจากค่าที่ได้จากการสอบเทียบ Standard Platinum Resistance Thermometer (SPRT) กับชุดของ Fixed Point ที่ถูกกำหนดขึ้น แล้วใช้ Interpolation Equations หาค่าอุณหภูมิที่อยู่ในระหว่างช่วง

4. ช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 961.78˚C หรือสูงกว่าจุดเยือกแข็งของเงิน (Freezing Point of Silver) อุณหภูมิ T_{90} ถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของ Fixed Point และ Planck's Radiation Law

สำหรับช่วงอุณหภูมิระหว่าง 13.8033K ถึง 961.78˚C เป็นช่วงที่ใช้งานการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิทั่วไปรวมทั้งงานด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์ด้วย นอกจากการแบ่งอุณหภูมิออกเป็นช่วงดังกล่าวแล้ว ITS-90[1] ยังได้กำหนด Fixed Point ไว้เพื่อเป็นตัวกำหนดค่าของอุณหภูมิในช่วงต่าง ๆ ของ Platinum Resistance Thermometer (PRT) ดังตารางที่ 1 สำหรับการหาอุณหภูมิ T_{90} จะมีสมการส่วนเบี่ยงเบน (Deviation Functions) ของช่วงอุณหภูมิและสมการอ้างอิง (Reference Functions) อุณหภูมิย่อยในแต่ละช่วง ITS-90 กำหนดให้อุณหภูมิสอบเทียบ 83.8058K ถึง 961.78˚C มีสมการอ้างอิง 8 สมการ คือ สมการอ้างอิงช่วงย่อย (sub-ranges) ของอุณหภูมิ[2] ที่ 4 ถึงสมการอ้างอิงช่วงย่อยที่ 11 และแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการอ้างอิงช่วงย่อยด้วยสัญลักษณ์เป็นตัวอักษร a ถึง d (ตารางที่ 2)

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบอุณหภูมิ กองรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข ใช้ SPRT เป็นวัสดุอ้างอิง (Reference Standard) ได้รับการสอบเทียบจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (National Institute of Metrology (Thailand), NIMT) ด้วยวิธี Fixed Point ตามวิธีการของ ITS-90 เพื่อที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบอุณหภูมิจะเก็บรักษา SPRT นี้ไว้เป็นมาตรฐานอ้างอิงของห้องปฏิบัติการ (Reference Standard Laboratory) ต้องรักษาความเสถียรของ SPRT ไว้โดยการไม่นำมาใช้ในงานสอบเทียบปกติ (ห้องปฏิบัติการกำหนดให้ SPRT มาตรฐานอ้างอิงของห้องปฏิบัติการจะต้องได้รับการสอบเทียบใหม่ทุก ๆ 5 ปี) จึงต้องทำการสอบเทียบเพื่อถ่ายค่าความถูกต้องไปยังเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานปฏิบัติงาน (Working Standard Thermometer) เนื่องจากห้องปฏิบัติการสอบเทียบอุณหภูมิ กองรังสีและเครื่องมือแพทย์ ไม่มีชุดของ Fixed Point ทำให้ไม่สามารถสอบเทียบตามวิธีการของ ITS-90 ได้ แต่จะใช้แนวทางและวิธีการคำนวณของ ITS-90 ในการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานปฏิบัติงานโดยใช้กระติกน้ำแข็ง (Ice Bath) และอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ เพื่อหาค่าความต้านทานที่จุดสามสถานะของน้ำและสัมประสิทธิ์ของสมการส่วนเบี่ยงเบนของช่วงอุณหภูมิ โดยมีขอบเขตของการสอบเทียบที่อุณหภูมิ -35˚C ถึง 419.527˚C เนื่องจากอ่างสอบเทียบอุณหภูมิที่ห้องปฏิบัติการมีอยู่สามารถสร้างอุณหภูมิได้ต่ำสุดที่อุณหภูมิ -35˚C และอุณหภูมิสูงสุดที่เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานอ้างอิงได้รับการสอบเทียบมาคือ 419.527˚C

ตารางที่ 1 จุดสอบเทียบอุณหภูมิ ตาม ITS-90

No	Temperature		Substance[a]	State[b]	$W_r(T_{90})$[c]
	T_{90}/K	t_{90}/ °C			
1	3 to 5	-270.15 to -268.15	He	V	
2	13.8033	-259.3467	e-H_2	T	0.001 190 07
3	~17	~-256.15	e-H_2 (or He)	V (or G)	
4	~20.3	-252.85	e-H_2 (or He)	V (or G)	
5	24.5561	-248.5939	Ne	T	0.008 449 74
6	54.3584	-218.7916	O_2	T	0.091 718 04
7	83.8058	-189.3442	Ar	T	0.215 859 75
8	234.3156	-38.8344	Hg	T	0.844 142 11
9	273.16	0.01	H_20	T	1.000 000 00
10	302.9146	29.7646	Ga	M	1.118 138 89
11	429.7485	156.5985	In	F	1.609 801 85
12	505.078	231.928	Sn	F	1.892 797 68
13	692.677	419.527	Zn	F	2.568 917 30
14	933.473	660.323	Al	F	3.376 008 60
15	1234.93	961.78	Ag	F	4.286 420 53
16	1337.33	1064.18	Au	F	
17	1357.77	1084.62	Cu	F	

[a] All substances except ^{3}He are of natural isotopic composition, e-H_2 is hydrogen at the equilibrium concentration of the ortho- and para-molecular forms.

[b] For complete definitions and advice on the realization of these various states, see "Supplementary Information for the ITS-90". The symbols have the following meanings: V: vapour pressure point; T: Triple Point (temperature at which the solid, liquid and vapour phases are in equilibrium); G: gas thermometer point; M, F melting point, freezing point (temperature, at a pressure of 101 325 Pa, at which the solid and liquid phases are in equilibrium)

[c] Temperatures are determined in terms of the referent ratio of the resistance $R(T_{90})$ at a temperature T_{90} and the resistance $R(273.16K)$ at the triple point of water. This ratio, $W_r(T_{90})$, is : $W_r(T_{90}) = R(T_{90})/R(273.16K)$

ตารางที่ 2 สัมประสิทธิ์สมการส่วนเบี่ยงเบนช่วงย่อยอุณหภูมิสำหรับ SPRT ตาม ITS-90

Sub-range	Calibration Points	Coefficients	Remark
83.8058 K to 273.16 K	Ar, Hg, WTP	a_4, b_4	หมายเลข 4 ถึง 11 ที่ห้อยอยู่ท้ายตัวอักษร ยกเว้นอักษร d เพื่อแสดงให้รู้ว่าอุณหภูมิสอบเทียบอยู่ในสมการอ้างอิงช่วงย่อยใด
-38.8344˚C to 29.7646˚C	Hg, WTP, Ga	a_5, b_5	
0˚C to 29.7646˚C	WTP, Ga	a_{11}	
0˚C to 156.5985˚C	WTP, In	a_{10}	
0˚C to 231.928˚C	WTP, In, Sn	a_9, b_9	
0˚C to 419.527˚C	WTP, Sn, Zn	a_8, b_8	
0˚C to 660.323˚C	WTP, Sn, Zn, Al	a_7, b_7, c_7	
0˚C to 961.78˚C	WTP, Sn, Zn, Al, Ag	a_6, b_6, c_6, d	

วัสดุและวิธีการ

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องแสดงผลการวัดอุณหภูมิแบบตัวเลขสามารถแสดงผลการวัดในหน่วยของค่าความต้านทานและหน่วยองศาเซลเซียส

2. อ่างสอบเทียบอุณหภูมิชนิดใช้ซิลิโคนเป็นตัวกลาง (อุณหภูมิ -35˚C ถึง 110˚C)

3. อ่างสอบเทียบอุณหภูมิชนิดใช้ซิลิโคนเป็นตัวกลาง (อุณหภูมิ 40˚C ถึง 280˚C)

4. อ่างสอบเทียบอุณหภูมิชนิดใช้อากาศเป็นตัวกลาง และผงทองแดง (อุณหภูมิ 35˚C ถึง 600˚C)

5. SPRT มาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard) และ SPRT มาตรฐานปฏิบัติงาน (Working Standard) หรือเรียกในการสอบเทียบว่า Unit Under Calibration (UUC)

6. น้ำแข็งที่ทำจากน้ำกลั่น กระติกน้ำแข็ง (Ice Bath) และเครื่องบดน้ำแข็ง

วิธีการสอบเทียบ

1. ต่อ SPRT มาตรฐานอ้างอิง และ UUC เข้ากับเครื่องแสดงผลการวัดอุณหภูมิแบบตัวเลข[3] ตั้งค่าแสดงผลการวัดค่าของ SPRT มาตรฐานอ้างอิงแสดงเป็นองศาเซลเซียส และให้แสดงผลการวัดของ UUC เป็นหน่วยของค่าความต้านทานคือโอห์ม (Ω) เริ่มการสอบเทียบจากอุณหภูมิต่ำไปอุณหภูมิสูง ที่จุดสอบเทียบ Ice Point บันทึกเฉพาะ UUC เลือกอ่างสอบเทียบตามความสามารถในการสร้างอุณหภูมิ โดยอ่างสอบเทียบอุณหภูมิชนิดใช้อากาศเป็นตัวกลาง จะเติมผงทองแดงลงไปด้วยเพื่อลดความแปรปรวนของอุณหภูมิภายในหลุม

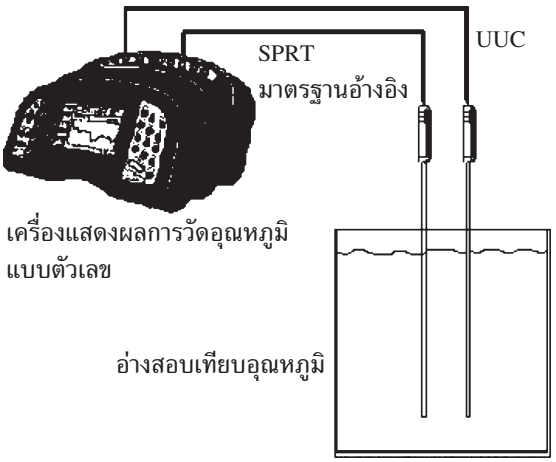
2. นำ SPRT มาตรฐานอ้างอิง และ UUC จากอุณหภูมิห้องจุ่มลงในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิให้ลึกเท่าๆ กันเพื่อลดผลกระทบจากความไม่เป็นรูปแบบเดียวกัน เหมือนกันของอุณหภูมิในแนวตั้งตรง (Axial Uniformity) และไม่น้อยกว่า 20 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัดบวกความยาวของขดลวดแพลทตินัม[4] หรือ Element และตำแหน่งการจุ่มให้อยู่ใกล้กันเพื่อลดผลกระทบจากความไม่เป็นรูปแบบเดียวกัน เหมือนกันของอุณหภูมิในแนวรัศมี (Radial Uniformity)

3. ตั้งค่าอุณหภูมิที่อ่างสอบเทียบอุณหภูมิ[5-7] เริ่มที่ -35 ˚C รออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะเสถียรภาพ (Stability) สังเกตที่ไฟของเครื่องจะกระพริบอย่างสม่ำเสมอสลับกันระหว่างสีเขียวและสีแดง

4. ที่เครื่องแสดงผลการวัดอุณหภูมิแบบตัวเลขบันทึกผลการวัดอุณหภูมิของ SPRT มาตรฐานอ้างอิง และของ UUC จำนวนจุดละ 200 ค่า สลับกันทุก ๆ 5 วินาที

5. บันทึกค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากเครื่องแสดงผลการวัดอุณหภูมิแบบตัวเลข ลงในแบบบันทึกผลการสอบเทียบ

6. กลับไปทำการสอบเทียบอุณหภูมิใหม่ตามข้อ 3 ถึงข้อ 5 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิจุดสอบเทียบใหม่ไปที่อุณหภูมิอื่นคือ 0˚C, 0.05˚C, 29.5˚C, 230˚C และ 419˚C ตามลำดับ (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 แสดงระบบการสอบเทียบ SPRT

7. คำนวณความต้านทานของ UUC ที่จุดสามสถานะของน้ำด้วยวิธี Interpolation ระหว่างอุณหภูมิ 0˚C และ 0.05˚C

8. คำนวณค่า $W_r(T_{90})$ ของอุณหภูมิที่จุดสอบเทียบ -35˚C, 29.5˚C, 230˚C และ 419˚C โดยใช้สมการอ้างอิงอุณหภูมิย่อยในแต่ละช่วงดังนี้

เมื่อ $W_r(T_{90})$ คือค่าอัตราส่วนความต้านทานของ SPRT มาตรฐานอ้างอิงที่อุณหภูมิจุดสอบเทียบต่อความต้านทานของ SPRT มาตรฐานอ้างอิงที่อุณหภูมิจุดสามสถานะของน้ำ (Water Triple Point, WTP) และค่าคงที่ A_0, A_i, B_0, B_i, C_0, C_i, D_0 และ D_i ระบุค่าไว้ใน ITS-90 ที่อุณหภูมิ -35˚C สมการอ้างอิงคือ

$$\mathrm{In}[W_r(T_{90})] = A_0 + \sum_{i=1}^{12} Ai\,\{[\mathrm{In}(T_{90}/273.16\mathrm{K}) + 1.5]/1.5\}^i$$

หรือ

$$T_{90}/273.16\mathrm{K} = B_0 + \sum_{i=1}^{15} Bi\,\{(W_r(T_{90})^{1/6} - 0.65)/0.35\}^i$$

ที่อุณหภูมิ 29.5˚C, 230˚C และ 419˚C สมการอ้างอิงคือ

$$W_r(T_{90}) = C_0 + \sum_{i=1}^{9} Ci\,\{(T_{90}/\mathrm{K} - 754.15)/481\}^i$$

หรือ

$$T_{90}/\mathrm{K} - 273.15 = D_0 + \sum_{i=1}^{9} Di\,\{(W_r(T_{90}) - 2.64)/1.64\}^i$$

9. คำนวณค่า $W(T_{90})$ ของอุณหภูมิจุดที่สอบเทียบ -35˚C, 29.5˚C, 230˚C และ 419˚C โดยใช้สมการ

$$W(T_{90}) = R(T_{90})/R(273.16\mathrm{K})^{(2)}$$

$W(T_{90})$ คืออัตราส่วนของค่าความต้านทาน UUC ที่อุณหภูมิจุดสอบเทียบต่อค่าความต้านทานของ UUC ที่อุณหภูมิจุดสามสถานะของน้ำ

10. ที่อุณหภูมิจุดสอบเทียบ -35˚C, 29.5˚C, 230˚C และ 419˚C จากตารางที่ 2 อุณหภูมิ -35˚C ถึง 29.5˚C อยู่ในช่วงย่อยที่ 5 และอุณหภูมิ 230˚C ถึง 419 ˚C อยู่ในช่วงย่อยที่ 8 โดยแต่ละจุดสอบเทียบจะใช้สมการ

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

แต่ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการส่วนเบี่ยงเบน c และ d ที่ช่วงย่อยที่ 5 และ 8 มีค่าเท่ากับ 0 ได้สมการที่ใช้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของสมการส่วนเบี่ยงเบนที่

จุดสอบเทียบ -35°C, 29.5°C, 230°C และ 419°C เหมือนกันทั้ง 4 สมการคือ

$W(T_{90}) - W_r(T_{90}) = a[W(T_{90})-1] + b[W(T_{90})-1]^2$

11. คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สมการส่วนเบี่ยงเบน โดยแทนค่า $W_r(T_{90})$ จากข้อ 8 และ $W(T_{90})$ จากข้อ 9 ของอุณหภูมิ -35°C, 29.5°C, 230°C และ 419°C ลงในสมการข้อ 10 ทั้ง 4 สมการ ได้สัมประสิทธิ์ a และ b ของช่วงย่อยที่ 5 (a5, b5) และสัมประสิทธิ์ a และ b ของช่วงย่อยที่ 8 (a8, b8)

12. กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของสมการส่วนเบี่ยงเบนที่คำนวณได้จากข้อ 11 คือ a5, b5, a8, b8 และ PTW ของ UUC ที่คำนวณได้จากข้อ 7 ลงในหน่วยความจำของเครื่องแสดงผลการวัดอุณหภูมิแบบตัวเลข และปรับให้เครื่องแสดงผลการวัดของ UUC แสดงผลการวัดเป็นองศาเซลเซียส

13. นำ SPRT อ้างอิง และ UUC มาวัดอุณหภูมิที่อ่างสอบเทียบที่ตั้งอุณหภูมิไว้ 100°C บันทึกผลการวัดอุณหภูมิของ SPRT มาตรฐานอ้างอิง และของ UUC จำนวนจุดละ 200 ค่า สลับกันทุก ๆ 5 วินาที บันทึกค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากเครื่องแสดงผลการวัดอุณหภูมิแบบตัวเลขลงในแบบบันทึกผลการสอบเทียบ

14. ประเมินความไม่แน่นอนของการวัด

การประเมินความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ UUC พิจารณาจากแหล่งที่จะทำให้ผลการสอบเทียบผิดพลาดไปซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท

1. ความไม่แน่นอนสุ่ม (Random error) คือผลการวัดแต่ละครั้งไม่ซ้ำกัน เมื่อทำการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ผลของการวัดไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากตัวแปรอิสระ เช่นการรบกวนจากสภาพแวดล้อมสามารถทำให้ลดลงได้โดยการเพิ่มจำนวนครั้งในการวัดให้มากขึ้น

2. ความผิดพลาดของระบบ (Systematic error) คือความผิดพลาดในการวัดที่เกิดจากความผิดพลาดในระบบการวัดเอง มีลักษณะที่เกิดขึ้นเท่าเดิมตลอดเวลาไม่ว่าจะทำการวัดซ้ำกี่ครั้ง เช่น ความผิดพลาดที่เกิดจากคุณลักษณะการเลื่อนค่าของเครื่องมือวัดความละเอียดของสเกล (Resolution) ของเครื่องมือวัด การสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัด ค่าความผิดพลาดที่รู้ได้จากผลการสอบเทียบมาตรฐานเครื่องมือวัดที่ใช้ในการวัด ฯลฯ ความผิดพลาดประเภทนี้สามารถใช้ค่าแก้ลดผลของความผิดพลาดลงได้

จากการสอบเทียบ UUC แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนในกระบวนการสอบเทียบสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$T_x = t_{stc} + t_{dst} + t_{rd} + t_{rru} + t_{reu} + t_{uni} + t_{rrs} + t_{res}$

t_{stc} = ค่าจากรายงานผลการสอบเทียบ SPRT มาตรฐานอ้างอิง

t_{dst} = ค่าลอยเลื่อน (drift) ของ SPRT มาตรฐานอ้างอิง มาจากคุณสมบัติเฉพาะ

t_{rd} = ค่าจากรายงานผลการสอบเทียบเครื่องแสดงผลการวัดอุณหภูมิแบบตัวเลข

t_{rru} = ความละเอียดของสเกลของเครื่องแสดงผล UUC

t_{reu} = ความทวนซ้ำได้ของผลการวัด UUC

t_{uni} = ความไม่เป็นรูปแบบเดียวกัน เหมือนกันของอุณหภูมิในอ่างของเหลวจากการทดลองของห้องปฏิบัติการ

t_{rrs} = ความละเอียดของสเกลของเครื่องแสดงผล SPRT มาตรฐานอ้างอิง

t_{res} = ความทวนซ้ำได้ของผลการวัด SPRT มาตรฐานอ้างอิง

นำแหล่งที่มาทั้งหมดมาคำนวณในตารางการประเมินค่าความไม่แน่นอน (ตารางที่ 3 และ 4)

ตารางที่ 3 ตารางการประเมินแหล่งของความไม่แน่นอนในการสอบเทียบ

Symbol	*Source of uncertainty*	*Value ±*	*Probability distribution*	*Divisor*	C_i	$U_i(T_x)$ ± m°C	V_I or V_{eff}
t_{stc}	Calibration of SPRT		normal	2	1		α
t_{dst}	Drift in SPRT		rectangular	$\sqrt{3}$	1		α
t_{rd}	Calibration of readout		normal	2	SPRT		α
t_{rru}	Readout UUC resolution		rectangular	$\sqrt{3}$	Sensitivity		α
t_{reu}	UUC repeatability		normal	1			n-1
t_{uni}	Bath non-uniformity		rectangular	$\sqrt{3}$	1		α
t_{rrs}	Readout SPRT resolution		rectangular	$\sqrt{3}$	1		α
t_{res}	SPRT repeatability		normal	1	1		n-1
$U_c(T_x)$	Combined standard		normal				> 500
U	Expanded uncertainty		(k=2)				> 500

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการประเมินแหล่งของความไม่แน่นอนในการสอบเทียบ UUC ที่อุณหภูมิ 29.5°C

Symbol	*Source of uncertainty*	*Value ±*	*Probability distribution*	*Divisor*	*Ci Sensitivity coefficient*	$U_i(T_x)$ ± m°C	V_I or V_{eff}
t_{stc}	Calibration of SPRT	3 m°C	normal	2	1	1.5000	α
t_{dst}	Drift in SPRT	2 m°C	rectangular	$\sqrt{3}$	1	1.1547	α
t_{rd}	Calibration of readout	0.2 mΩ	normal	2	10.4*	1.0400	α
t_{rru}	Readout UUC resolution	0.005 mΩ	rectangular	$\sqrt{3}$	10.4*	0.0300	α
t_{reu}	UUC repeatability**	0.38 mΩ	normal	1	10.4*	3.9520	199
t_{uni}	Bath non-uniformity	5.5 m°C	rectangular	$\sqrt{3}$	1	3.1754	α
t_{rrs}	Readout SPRT resolution	0.05 m°C	rectangular	$\sqrt{3}$	1	0.0283	α
t_{res}	SPRT repeatability**	4.48 m°C	normal	1	1	4.4800	199
$U_c(T_x)$	Combined standard		normal			7.1020	>500
U	Expanded uncertainty		(k=2)			14.204	>500
						0.014°C	

* Sensitivity coefficient = (34.97613°C + 419.1486°C)/(65.40964Ω − 21.904687Ω) ≅ 10.4 C/Ω

** การวัดค่า Repeatability เนื่องจากเป็นการวัดแบบต่อเนื่องจึงถือว่าเป็นการวัดเพียง 1 รอบ

เมื่อ *Symbol* สัญลักษณ์แหล่งที่มาของความไม่แน่นอน

Source of uncertainty แหล่งที่มาของความไม่แน่นอน

Value ปริมาณของความไม่แน่นอน

Probability distribution ลักษณะการกระจายตัวของแหล่งที่มาของความไม่แน่นอน

Divisor ค่าตัวหารเพื่อปรับให้แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนเป็น การกระจายตัวแบบปกติ

C_i สัมประสิทธิ์ความไว (sensitivity coefficient) เพื่อปรับให้หน่วยของแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนเป็นหน่วยเดียวกัน

$U_i(T_x)$ ปริมาณความไม่แน่นอนมาตรฐานของแต่ละปริมาณแหล่งที่มาของความไม่แน่นอน

V_I *or* V_{eff} เป็นค่าองศาอิสระ (Degree of Freedom) หรือ จำนวนครั้งของการวัดลบหนึ่ง (n-1)

$U_c(T_x)$ ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$U_c(T_x) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} C_i^2 U_i^2(T_X)}$$

U ความไม่แน่นอนขยายตามระดับความเชื่อมั่นที่พิจารณา หาได้จากผลคูณของค่า Coverage factor k กับค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม $U_c(T_x)$

$$U = kU_c(T_x)$$

ผล

ผลการวัดอุณหภูมิของ SPRT มาตรฐานอ้างอิงและค่าความต้านทานของ SPRT มาตรฐานปฏิบัติงานและผลการคำนวณ $W_r(T_{90})$ และ $W(T_{90})$ ที่อุณหภูมิของอ่างสอบเทียบต่าง ๆ (ตารางที่ 5)

ผลความต้านทานที่จุดสามสถานะของน้ำของ SPRT มาตรฐานปฏิบัติงานจากการคำนวณด้วยวิธี Interpolation เท่ากับ 25.478678 โอห์ม

ผลการคำนวณตาม ITS-90 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการส่วนเบี่ยงเบนช่วงอุณหภูมิของ SPRT มาตรฐานปฏิบัติงานช่วงย่อย 5 และ 8 คือ a5 = 1.163857E-05, b5 = 1.033331E-03, a8 = -2.823617E-05, b8 = -1.302039E-04

ผลการวัดอุณหภูมิที่อ่างสอบเทียบที่ตั้งอุณหภูมิไว้ 100˚C โดยใช้ SPRT มาตรฐานอ้างอิง

ตารางที่ 5 ผลการสอบเทียบ SPRT มาตรฐานอ้างอิง กับ SPRT มาตรฐานปฏิบัติงาน

อุณหภูมิที่ใช้สอบเทียบ	อุณหภูมิที่ (˚C) SPRT อ้างอิงวัดได้	ความต้านทาน (Ω) ที่ SPRT ปฏิบัติงานวัดได้	$W_r(T_{90})$	$W(T_{90})$
0.0˚C	-	25.477578 ± 0.000084	-	-
0.05˚C	0.03212 ± 0.00423	25.481112 ± 0.000437	-	-
-35˚C	-34.97613 ± 0.00369	21.904687 ± 0.000380	0.859707	0.859726
29.5˚C	29.47304 ± 0.00448	28.459183 ± 0.000379	1.116965	1.116980
230˚C	229.86026 ± 0.02499	48.026029 ± 0.000980	1.885077	1.884950
419˚C	419.1486 ± 0.0148	65.40964 ± 0.00055	2.567595	2.567230

และ SPRT มาตรฐานปฏิบัติงาน ได้ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิเป็น 100.02200°C ± 0.00383 และ 100.01449°C ± 0.00324 ตามลำดับ

การทดสอบทางสถิติด้วยวิธี t-test เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลการวัด (Means) ปรากฏว่าค่าเฉลี่ยของผลการวัดที่ได้จากการวัดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานปฏิบัติงาน เทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานอ้างอิงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P-value>0.05) แสดงว่าค่าที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานปฏิบัติงาน มีความถูกต้องไม่แตกต่างจากการใช้เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานอ้างอิงวัด

จากการประเมินค่าความไม่แน่นอน[8] ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ตัวประกอบครอบคลุม (K) = 2 ที่อุณหภูมิจุดสอบเทียบ -35°C, 29.5 °C, 230 °C และ 419 °C แสดงตามเลขนัยสำคัญ 2 ตำแหน่ง มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ ± 0.015°C, ± 0.014°C, ± 0.055°C และ ± 0.29 °C ตามลำดับ

วิจารณ์

จากวิธีการที่ใช้อ่างของเหลว อ่างแบบแห้งและกระติกน้ำแข็งเป็นตัวสร้างอุณหภูมิแทนการใช้วิธี Fixed Point จะมีขีดจำกัดที่ไม่สามารถสร้างอุณหภูมิให้เท่ากับจุดอ้างอิงตามมาตรฐานของ ITS-90 ทำให้ผลการสอบเทียบจะผิดพลาดไปบ้าง เนื่องจากค่าอ้างอิง $W_r(T_{90})$ และ $W(T_{90})$ ที่ใช้ในการคำนวณของสมการส่วนเบี่ยงเบน นอกจากนั้นความไม่เป็นเอกรูป (Non-uniformity) ของอุณหภูมิในอ่างของเหลวหรืออ่างแบบแห้งและความทวนซ้ำได้ของการวัด (Repeatability of Measurement) จะเป็นแหล่งที่มาส่วนใหญ่ของความไม่แน่นอน ในกรณีของอ่างแบบแห้งที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจะมีความแปรปรวนของอุณหภูมิภายในหลุมมาก เนื่องจากแหล่งกำเนิดความร้อนและ SPRT อยู่ห่างกัน (Thermometer Fit) ต้องทำการลดความแปรปรวนให้น้อยลงโดยการเติมผงทองแดงลงไปในหลุมสอบเทียบแทนที่อากาศ ทำให้อุณหภูมิในหลุมมีความแปรปรวนน้อยลง ส่วนจุดสอบเทียบที่มีอุณหภูมิสูง ๆ หรือต่ำมาก ๆ ความสามารถที่จะรักษาอุณหภูมิให้เสถียรของอ่างของเหลวหรืออ่างแบบแห้งเป็นเรื่องที่ยาก เนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนกับอากาศภายนอก (Stem Conduction) ทำให้อุณหภูมิที่วัดได้มีความแปรปรวนมากจากการประเมินค่าความไม่แน่นอนที่อุณหภูมิสูง ๆ หรือต่ำมาก ๆ จากอุณหภูมิบรรยากาศห้องสอบเทียบจะมีค่ามาก สำหรับวิธีการหาค่าความต้านทานของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานปฏิบัติงานที่จุดสามสถานะของน้ำโดยวิธี Interpolate จะให้ค่าความถูกต้องของค่าความต้านทานดีกว่าการวัดที่อุณหภูมิของน้ำแข็งที่ 0°C อย่างเดียวแล้วนำมาเป็นค่าความต้านทานที่จุดสามสถานะของน้ำ สำหรับวิธีการที่จะลดข้อผิดพลาดต่าง ๆในการสอบเทียบให้น้อยลงควรเลือกจุดสอบเทียบให้ใกล้เคียงจุดอ้างอิงของ ITS-90 ให้มากที่สุดและควรใช้อ่างสอบเทียบที่มีตัวกลางเป็นของเหลวตลอดช่วงของการสอบเทียบ ใช้การวัดค่าความต้านทานที่จุดสามสถานะของน้ำจากเครื่องสร้างจุดสามสถานะของน้ำ (Triple Point of Water Cells) จะทำให้ได้ค่าความต้านทานที่จุดสามสถานะของน้ำและค่าสัมประสิทธิ์ของสมการส่วนเบี่ยงเบนช่วงอุณหภูมิถูกต้องยิ่งขึ้นและค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบจะลดลง จะส่งผลให้ความสามารถของการวัดที่ดีที่สุด (Best Measurement Capability, BMC) ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบอุณหภูมิดีขึ้น

สรุป

จากวิธีการดังกล่าวทำให้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบอุณหภูมิ กองรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ สามารถถ่ายค่าความถูกต้องของผลการวัด จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานอ้างอิง ที่ได้รับการสอบเทียบจากมาตรฐานแห่งชาติไปยังเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานปฏิบัติงานที่ใช้เป็นมาตรฐานในงานสอบเทียบให้กับผู้ขอรับบริการในช่วงอุณหภูมิ -35°C ถึง 419°C ซึ่งผลการวัดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานปฏิบัติงานไม่ต้องใช้ค่าแก้ (Correction) และผลการวัดสามารถสอบกลับได้ (Traceability) ถึงระดับชาติเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการส่งเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานปฏิบัติงานไปสอบที่อื่น (ห้องปฏิบัติการกำหนดให้สอบเทียบใหม่ทุกปี) นอกจากนั้นในการสอบเทียบห้องปฏิบัติการสอบเทียบอุณหภูมิไม่ต้องจัดหาอุปกรณ์เพิ่มเติมอีก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คุณศิริ ศรีมโนรถ หัวหน้ากลุ่มมาตรฐานเครื่องวัดรังสีและเครื่องมือห้องปฏิบัติการ คุณอรรถโกวิท สงวนสัตย์ หัวหน้ากลุ่มคุ้มครองผู้บริโภคด้านรังสี กองรังสีและเครื่องมือแพทย์ คุณนวพร อนันตสินกุล นักวิทยาศาสตร์การแพทย์ 8ว กองเครื่องสำอางและวัตถุอันตราย ที่ให้คำแนะนำตรวจแก้ไขเนื้อหาต้นฉบับ

เอกสารอ้างอิง

1. Preston-Thomas H. The International temperature scale of 1990 (ITS-90). Ottawa: Metrologia; 1990. p.3 - 8.
2. Bentley RB Resistance and liquid-in-glass thermometry. Tanncry Road (Singapore): Springer-Verlag Singapore Pte. Ltd.; 1998. p.3 - 8, p.161 - 72.
3. Hart Scientific. 1560 Black stack user manual. Utah: Hart Scientific publication; 1995 - 1998.
4. Hart Scientific. Temperature Metrology. Utah: Hart Scientific publication; 1992.
5. Hart Scientific. Model 7081 Calibration bath user's guide. Utah: Hart Scientific publication; 1993 - 2001.
6. Hart Scientific. 6020 Series Calibration baths user's guide. Utah: Hart Scientific publication; 1995.
7. Hart Scientific. Model 9122 Dry-Well Calibrator user manual. Hart Scientific publication; 1996.
8. United Kingdom Accreditation Service. The expression of uncertainty and confidence in measurement (M3003). NAMAS Publication; 1997.

Calibration of Standard Platinum Resistance Thermometer by Comparison Technique Using in Wells-Temperature Calibration Bath

Rungrote Chansoong and Chanwit Maka

Division of Radiation and Medical Devices, Department of Medical Sciences, Tiwanond Road, Nonthaburi 11000, Thailand.

ABSTRACT The temperature calibration laboratory of the Division of Radiation and Medical Devices, Department of Medical Sciences had performed in-house calibration of Standard Platinum Resistance Thermometer (SPRT) using temperature controlled bath. Temperature coefficient had been calculated using method provided by International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). Since calibration point were different from ITS-90, the calibrated SPRT was to measure temperature and compare with standard SPRT at 100°C. It was found that both of them have good agreement in mean value.

Key words : Standard Platinum Resistance Thermometer, ITS-90