

CALIBRATION
OF
INDUSTRIAL PLATINUM RESISTANCE THERMOMETER

TM/CG03/TT01/V02

July 2014

THERMOMETRY METROLOGY DEPARTMENT
NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY (THAILAND)



CALIBRATION OF INDUSTRIAL PLATINUM RESISTANCE THERMOMETER

วัตถุประสงค์ : เพื่อแนะนำแนวทางในการสอบเทียบ Industrial Platinum Resistance Thermometer
ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $650\text{ }^{\circ}\text{C}$



สารบัญ

ขอบข่าย	4
คำนำ	4
คำนิยาม	4
การสอบเทียบ	7
กระบวนการสอบเทียบ	9
การประเมินค่าความไม่แน่นอน	10
การรายงานผล	23
เอกสารอ้างอิง	24
ภาคผนวก	26

ขอบข่าย

เอกสารฉบับนี้ใช้เป็นแนวทางประกอบการสอบเทียบ Industrial Platinum Resistance Thermometer (IPRT) โดยวิธีการเทียบค่ากับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Comparison method) ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $650\text{ }^{\circ}\text{C}$

คำนำ

การสอบเทียบ IPRT ด้วยวิธีการเทียบค่ากับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน มีวิธีการรายงานผลการสอบเทียบ 2 วิธี คือ การรายงานผลการสอบเทียบและค่าความไม่แน่นอนการวัดเฉพาะจุดอุณหภูมิที่สอบเทียบ และการรายงานผลการสอบเทียบโดยรายงานสัมประสิทธิ์และค่าความไม่แน่นอนการวัดตลอดช่วงอุณหภูมิที่สอบเทียบรวมด้วย โดยการรายงานผลการสอบเทียบ IPRT รายงานค่าความต้านทานเท่านั้น ไม่ครอบคลุมการรายงานผลการสอบเทียบ IPRT เป็นอุณหภูมิ

คำนิยาม

- **เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Standard Thermometer, STD) :**
เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานในเอกสารฉบับนี้หมายถึง เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทินัมมาตรฐาน (Standard Platinum Resistance Thermometer)
- **เทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (Thermometer Under Calibration, TUC) :**
เทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ในเอกสารฉบับนี้หมายถึง IPRT
- **แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (Temperature Source) :**
เป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิซึ่งใช้ในการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์สามารถแยกตามชนิดของตัวกลางที่ใช้ดังนี้
 1. แหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Liquid Bath)
 2. แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบแห้งหรือใช้อากาศเป็นตัวกลาง (Dry Block)
 3. แหล่งกำเนิดอุณหภูมิใดๆ เช่น Fluidize Bath

- **การสอบเทียบ (Calibration) :**

การปฏิบัติงานภายใต้เงื่อนไขที่ระบุ ซึ่งในขั้นแรกสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณกับความไม่แน่นอน การวัดที่ได้จากมาตรฐานการวัด และค่าบ่งชี้กับความไม่แน่นอนการวัดที่เชื่อมสัมพันธ์ค่าบ่งชี้ขึ้น และในขั้นที่สอง จะใช้ข้อมูลดังกล่าวสร้างความสัมพันธ์ เพื่อให้ได้ผลการวัดจากค่าบ่งชี้ [1]

- **ความถูกต้องของการวัด (Accuracy of measurement) :**

ความใกล้เคียงของการเป็นไปตามกันระหว่างค่าปริมาณที่วัดได้กับปริมาณจริงของสิ่งที่ถูกวัด [1]

- **ความเป็นหนึ่งเดียวกันของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (Uniformity of Temperature Source) :**

คุณสมบัติหนึ่งของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ เพื่อบ่งชี้การกระจายของอุณหภูมิในพื้นที่ใช้งานของแหล่งกำเนิดที่อุณหภูมิใด ๆ ซึ่งการกระจายของอุณหภูมินี้อาจส่งผลกระทบต่อผลการวัดระหว่างเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบ

- **ความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (Instability of Temperature Source) :**

ความเสถียร (Stability) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ คือการคงที่ของอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิใด ๆ ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ หากอุณหภูมินี้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้น ๆ หรือแหล่งกำเนิดอุณหภูมิมีความไม่เสถียร (instability) เกิดขึ้น ก็ย่อมที่จะส่งผลกระทบต่อค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ของทั้งเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

- **ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of Measurement) :**

พารามิเตอร์ที่ไม่มีค่าเป็นลบที่ใช้บ่งบอกลักษณะเฉพาะของการกระจายของค่าปริมาณของสิ่งที่ถูกวัด โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่ใช้ [1] และอาจกล่าวได้ว่าความไม่แน่นอนในการวัดเป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณของคุณภาพของผลการวัด ทำให้ผลการวัดนั้น สามารถเปรียบเทียบกับสิ่งอ้างอิง หรือมาตรฐานอื่น ๆ ได้โดยปกติแล้วการประมาณความไม่แน่นอนโดยจะใช้แนวทาง JCGM 100:2008 ซึ่งได้รับการยอมรับโดยทั่วไป [2]

- **การทวนซ้ำได้ของการวัด (Measurement Repeatability) :**

ความเที่ยงตรงการวัดภายใต้ชุดของเงื่อนไขการทวนซ้ำได้ของการวัด [1]

- **เงื่อนไขความเที่ยงตรงระหว่างการวัด** (Intermediate precision condition of measurement) :
เงื่อนไขของการวัดจากชุดของเงื่อนไขซึ่งรวมถึง วิธีดำเนินการวัดเดียวกัน ผู้ปฏิบัติงานคนเดียวกัน ระบบวัดเดียวกัน เงื่อนไขการทำงานคนเดียวกัน และสถานที่ปฏิบัติงานเดียวกัน และการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้งบนวัตถุเดิม หรือที่มีลักษณะคล้ายเดิมในช่วงระยะเวลาที่ไม่สั้นจนเกินไป แต่อาจรวมถึงเงื่อนไขอื่นที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลง [1]
- **การเลื่อนเชิงเครื่องมือ** (Instrument drift) :
การเปลี่ยนแปลงที่ต่อเนื่อง หรือการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นตามเวลาในค่าบ่งชี้ อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงมาตรวิทยาของเครื่องมือวัด [1]
- **ตัวประกอบครอบคลุม** (Coverage factor) :
ตัวเลขที่มากกว่าหนึ่งที่นำมาคูณกับความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวมเพื่อให้ได้ความไม่แน่นอนการวัดขยาย [1]
- **ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐาน** (Standard measurement uncertainty) :
ความไม่แน่นอนการวัดซึ่งแสดงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน [1]
- **ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม** (Combined standard measurement uncertainty) :
ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานซึ่งได้จากการใช้ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานแต่ละตัวที่เชื่อมสัมพันธ์กับปริมาณเข้าในแบบจำลองการวัด [1]
- **ความไม่แน่นอนการวัดขยาย** (Expanded measurement uncertainty) :
ผลคูณของความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวมและตัวประกอบครอบคลุมซึ่งมีค่ามากกว่าหนึ่ง [1] ซึ่งในการรายงานผลการสอบเทียบจะใช้ในการรายงานถึงค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบนั้น ๆ

การสอบเทียบ

1. เครื่องมือ

- 1.1 เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ต้องมีความถูกต้องในการวัดดีกว่าเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
- 1.2 หน่วยแสดงผล (Digital Thermometer Readout) สามารถแสดงค่าอุณหภูมิสำหรับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน และค่าความต้านทานสำหรับเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
- 1.3 แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ควรมีความลึกเหมาะสม สามารถแบ่งตามประเภทของตัวกลางที่ใช้ คือ แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Liquid Bath) และแหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบให้อากาศเป็นตัวกลาง (Dry Block)

2. สภาพแวดล้อมและเงื่อนไขในการสอบเทียบ

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบต้องควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสม และไม่ส่งผลกระทบต่อผลการวัด และในขณะที่ทำการสอบเทียบ อุณหภูมิภายในของห้องปฏิบัติการไม่ควรเปลี่ยนแปลงจนส่งผลกระทบต่อกระบวนการสอบเทียบ รวมทั้งควรหลีกเลี่ยงปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลการวัดด้วย

3. การเตรียมเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

- 3.1 ตรวจสอบลักษณะภายนอกของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบว่ามีการชำรุดหรือมีความผิดปกติใด ๆ หรือไม่ ตัวอย่างเช่น สาย/ขั้วปลายสาย รอยขีดข่วน/บุบของหัววัด เป็นต้น
- 3.2 ตรวจสอบความเสถียรของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบด้วยวิธีการอบอ่อน (Annealing) ก่อนสอบเทียบ ทั้งนี้เงื่อนไขและวิธีการอบอ่อนนั้น ขึ้นอยู่กับวิธีการปฏิบัติงานของแต่ละห้องปฏิบัติการ

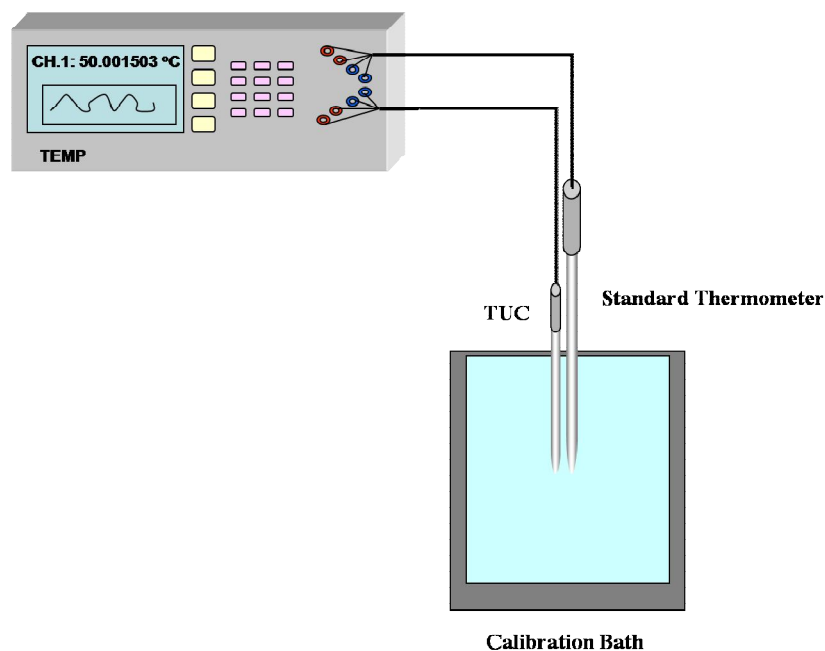
4. การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสอบเทียบ

- 4.1 ตรวจสอบว่าเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและหน่วยแสดงผลที่จะใช้ในการสอบเทียบให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน
- 4.2 ตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานให้ตรงกับค่าที่ได้จากการสอบเทียบล่าสุด
- 4.3 ในกรณีใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิซึ่งมีตัวแสดงค่าอุณหภูมิ และต้องการใช้อุณหภูมิที่อ่านได้นี้เป็นอุณหภูมิมาตรฐานนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ชุดแหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบนี้จะต้องได้รับการสอบเทียบก่อนที่จะนำมาใช้ในการสอบเทียบ

5. Measuring set-up

การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ควรติดตั้งที่ระยะความลึกไม่น้อยกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัววัดอุณหภูมิ หรือเป็นไปตามข้อกำหนดของหัววัดอุณหภูมิ และควรติดตั้งที่ระดับความลึกเท่ากันและใกล้กันมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 1

กรณีใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง พื้นที่ในการจุ่มหัววัดควรอยู่ในพื้นที่การประเมินคุณสมบัติเฉพาะของแหล่งกำเนิดอุณหภูมินั้น ๆ



รูปที่ 1: การสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์โดยใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง

กรณีใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้อากาศเป็นตัวกลาง จะมีข้อจำกัดในการจุ่มหัววัดลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ เนื่องจากขนาดของช่องใส่ (Bore) หัววัดอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดอุณหภูมินี้ จะถูกกำหนดจากผู้ผลิตไว้เรียบร้อยแล้ว เช่น ขนาด 4 มิลลิเมตร ขนาด 6 มิลลิเมตร หรือ 10 มิลลิเมตร เป็นต้น การที่จะติดตั้งหัววัดลงในช่องใส่ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบนี้ ควรให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัดอุณหภูมิลึกกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องใส่ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตรสำหรับช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 660 °C จะเป็น 1 มิลลิเมตร แต่ถ้าไม่เป็นดังที่กล่าวมาควรนำวัสดุทนความร้อนมาปิดด้านบนของช่องใส่หัววัดอุณหภูมิเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน หรือต้องพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียความร้อนของหัววัดอุณหภูมิ

6. กระบวนการสอบเทียบ

6.1 การกำหนดจุดสอบเทียบและลำดับการสอบเทียบ

การกำหนดจำนวนจุดสอบเทียบและลำดับการสอบเทียบขึ้นอยู่กับค่าความไม่แน่นอนการวัดที่ต้องการ โดยทั่วไปจะเริ่มสอบเทียบจากอุณหภูมิอ้างอิง จากนั้นจึงสอบเทียบจากอุณหภูมิต่ำสุดไปสู่อุณหภูมิสูงสุด และกลับมาที่อุณหภูมิอ้างอิงอีกครั้งเพื่อหาค่าความเสถียรในช่วงเวลาสั้น ๆ (short term stability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ กรณีที่ค่าความไม่แน่นอนการวัดที่ต้องการมีค่าน้อยกว่า 0.02°C ต้องเริ่มสอบเทียบจากอุณหภูมิต่ำสุดไปสู่อุณหภูมิสูงสุดและจากอุณหภูมิสูงสุดไปสู่ต่ำสุด โดยจุดสอบเทียบของทั้งสองต้องเป็นจุดสอบเทียบเดียวกันเพื่อหาค่า hysteresis

6.2 การสอบเทียบ

- 6.2.1 การบันทึกผลให้บันทึกค่าอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน และค่าความต้านทานของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ควรบันทึกผลในเวลาทีใกล้เคียงกัน อย่างน้อย 30 ค่า นอกจากนี้ควรบันทึกระยะจุ่มของเทอร์โมมิเตอร์ในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิขณะทำการสอบเทียบ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการสอบเทียบและการนำไปใช้งาน
- 6.2.2 คำนวณหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน และค่าความต้านทานเฉลี่ยของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบของแต่ละจุดสอบเทียบ หากจุดสอบเทียบเป็นแบบ hysteresis loop ให้นำค่าอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและค่าความต้านทานของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ที่จุดสอบเทียบเดียวกันทั้งขาขึ้นและขาลงมาหาค่าเฉลี่ย
- 6.2.3 สำหรับกรณีรายงานผลการสอบเทียบโดยรายงานสัมประสิทธิ์และค่าความไม่แน่นอนการวัดตลอดช่วงอุณหภูมิที่สอบเทียบร่วมด้วย ให้หาค่าสัมประสิทธิ์จากความสัมพันธ์ของ Callendar-Van Dusen

ช่วงอุณหภูมิ -80°C ถึง 0°C

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3]$$

และช่วงอุณหภูมิ 0°C ถึง 650°C

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$$

และสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature coefficient) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 \times R_0}$$

โดย R_{100} คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ที่อุณหภูมิ 100 °C

R_0 คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ที่อุณหภูมิ 0 °C

7. การประเมินความไม่แน่นอนการวัด

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$C = t_s - t_{TUC} + \delta t_s + \delta t_{DS} + \delta t_{IS} + \delta t_{ITUC} + \delta t_{DIS} + \delta t_{DITUC} + \delta t_{RIS} + \delta t_{RITUC} + \delta t_{Uni} + \delta t_{Sta} + \delta t_{ST} + \delta t_{SH} + \delta t_{Sc}$$

โดย C = ค่าแก้ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

t_s = ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้โดยเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

t_{TUC} = ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้โดยเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

δt_s = ค่าแก้เนื่องจากค่าความไม่แน่นอนของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

δt_{DS} = ค่าแก้เนื่องจากการเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

δt_{IS} = ค่าแก้เนื่องจากค่าความไม่แน่นอนของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

δt_{ITUC} = ค่าแก้เนื่องจากค่าความไม่แน่นอนของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

δt_{DIS} = ค่าแก้เนื่องจากการเลื่อนค่าของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

δt_{DITUC} = ค่าแก้เนื่องจากการเลื่อนค่าของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

δt_{RIS} = ค่าแก้เนื่องจากค่าความละเอียด (resolution) ของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

δt_{RITUC} = ค่าแก้เนื่องจากค่าความละเอียด (resolution) ของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

δt_{ST} = ค่าแก้เนื่องจากความเสถียรในช่วงเวลาสั้นๆ (short term stability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ หรือค่า

δt_{Uni} = ค่าแก้เนื่องค่าความไม่เป็นหนึ่งเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ

δt_{Sta} = ค่าแก้เนื่องจากค่าความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ

δt_{SH} = ค่าแก้เนื่องจาก self heating ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

δt_{Sc} = ค่าแก้เนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดและการคำนวณของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (กรณีความไม่แน่นอนการวัดทั้งช่วงอุณหภูมิ)

ตัวอย่างการคำนวณความไม่แน่นอนของการวัด

ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนการวัดของการสอบเทียบ IPRT ที่อุณหภูมิ 200 °C

Item	Standard Reading (°C)	UUC Reading (Ω)	Item	Standard Reading (°C)	UUC Reading (Ω)
1	199.9900	177.3185	16	199.9911	177.3191
2	199.9902	177.3185	17	199.9911	177.3192
3	199.9904	177.3186	18	199.9909	177.3191
4	199.9905	177.3187	19	199.9905	177.3190
5	199.9905	177.3188	20	199.9902	177.3189
6	199.9905	177.3188	21	199.9904	177.3189
7	199.9902	177.3188	22	199.9906	177.3189
8	199.9903	177.3188	23	199.9907	177.3190
9	199.9904	177.3188	24	199.9909	177.3190
10	199.9902	177.3189	25	199.9911	177.3191
11	199.9903	177.3188	26	199.9911	177.3191
12	199.9905	177.3189	27	199.9905	177.3189
13	199.9907	177.3191	28	199.9900	177.3188
14	199.9910	177.3191	29	199.9898	177.3187
15	199.9910	177.3191	30	199.9895	177.3186
Average				199.9905	177.3189
Standard Deviation				0.0004	0.0002

ตารางที่ 1: ผลการสอบเทียบ IPRT ที่อุณหภูมิ 200 °C

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการทวนซ้ำได้ของการวัดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน : $u(t_s)$

การทวนซ้ำได้ของการวัดคือความเที่ยงตรงการวัดภายใต้ชุดของเงื่อนไขการทวนซ้ำได้ของการวัดค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะได้รับการประเมิน โดยการวิเคราะห์เชิงสถิติของค่าปริมาณที่วัดซ้ำหลายๆครั้ง ซึ่งการกระจายของความไม่แน่นอนจะมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ จำนวนชุดข้อมูลที่วัดด้วยจำนวนของสัมประสิทธิ์

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ของการวัดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$u(t_s) = S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

เมื่อ $S_{\bar{x}}$ คือ Experimental standard deviation of the mean (ESDM)

n คือ จำนวนครั้งของการวัดซ้ำ

S_x คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากการวัด

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(m-1)} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}$$

เมื่อ x_i คือ ข้อมูลที่ได้จากการวัด

m คือ จำนวนข้อมูลที่ทำกรวัด

\bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการวัด

จากผลการวัดพบว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จำนวน 30 ค่า มีค่าเป็น $0.0004 \text{ } ^\circ\text{C}$ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ของการวัดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานจะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} u(t_s) &= \pm \frac{0.0004}{\sqrt{1}} \\ &= \pm 0.0004 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ความไม่แน่นอนเนื่องจากการทวนซ้ำได้ของการวัดของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ : $u(t_{TVC})$

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการทวนซ้ำได้ของการวัดของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ สามารถหาได้เช่นเดียวกับค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ของการวัดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

จากผลการวัดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความต้านทานที่อ่านได้จำนวน 30 ค่า มีค่าเป็น 0.0002Ω ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ของการวัดของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบจะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} \text{Uncertainty contribution} &= u(t_x) \times C_i \quad ; \text{ Sensitivity Coefficient } (C_i) = 2.7 \text{ } ^\circ\text{C } \Omega^{-1} \\ &= \pm \frac{0.0002 \times 2.7}{\sqrt{1}} \\ &= \pm 0.00054 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

โดยมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) จำนวนชุดข้อมูลที่วัดลบลด้วยจำนวนของสัมประสิทธิ์

ค่าความไม่แน่นอนของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน : $u(\delta t_s)$

ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ซึ่งมีการกระจายของความไม่แน่นอนแบบปกติ (Normal distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

จากรายงานผลการสอบเทียบของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานที่ $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ มีค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายเท่ากับ $\pm 0.002 \text{ } ^\circ\text{C}$ ด้วยระดับความเชื่อมั่นในการวัด (Confidence level) ที่ 95 % ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, k) เท่ากับ 2 ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานคือ

$$\begin{aligned} u(\delta t_s) &= \pm \frac{0.002}{2} \\ &= \pm 0.001 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน : $u(\delta t_{DS})$

การเลื่อนค่าคือการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าที่บ่งชี้ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานตลอดระยะเวลาที่ใช้ งาน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงมาตริวิทยาของเครื่องมือวัด การเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานนี้สามารถหาได้จากประวัติการสอบเทียบที่ผ่านมาของเทอร์โมมิเตอร์นั้น ๆ ในกรณีที่เทอร์โมมิเตอร์ผ่านการสอบ

เทียบมาเพียงหนึ่งครั้งจะสามารถหาการเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์ได้จากค่าที่ระบุไว้ในคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเทอร์โมมิเตอร์นั้น ๆ หรืออาจใช้ค่าที่ได้จากการตรวจสอบเครื่องมือระหว่างช่วงการใช้งาน (Intermediate Check) โดยค่าที่ได้ควรจะมาจากการตรวจสอบไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง โดยการกระจายของความไม่แน่นอนจะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

จากประวัติการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานมีการเลื่อนค่าเท่ากับ ± 0.005 °C/year ความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานคือ

$$\begin{aligned}\delta t_{DS} &= \pm 0.005 \text{ } ^\circ\text{C/year} \\ u(\delta t_{DS}) &= \pm \frac{0.005}{\sqrt{3}} \\ &= \pm 0.0029 \text{ } ^\circ\text{C/year}\end{aligned}$$

ค่าความไม่แน่นอนของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน : $u(\delta t_{IS})$

ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ซึ่งมีการกระจายของความไม่แน่นอนลักษณะแบบปกติ (Normal distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

จากใบรายงานผลการสอบเทียบของหน่วยแสดงผล มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ $0.0003 \text{ } \Omega$ ด้วยระดับความเชื่อมั่นในการวัด (Confidence level) ที่ 95 % ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, k) เท่ากับ 2 ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานคือ

$$\begin{aligned}U &= \pm 0.0003 \text{ } \Omega \\ \text{standard uncertainty} &= \pm \frac{0.0003}{2} \\ \text{Uncertainty contribution} &= u(\delta t_{IS}) \times C_i \quad ; \text{ Sensitivity coefficient } (C_i) = 2.7 \text{ } ^\circ\text{C } \Omega^{-1} \\ &= \pm \frac{0.0003 \times 2.7}{2} \\ &= \pm 0.00041 \text{ } ^\circ\text{C}\end{aligned}$$

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่าของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน : $u(\delta t_{DIS})$

การเลื่อนค่าคือ การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าที่บ่งชี้ของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานตลอดระยะเวลาที่ใช้งาน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงมาตริวิทยาของเครื่องมือวัด การเลื่อนค่าของหน่วยแสดงผลนี้สามารถหาได้จากประวัติการสอบเทียบที่ผ่านมาของหน่วยแสดงผลนั้นๆ ในกรณีที่ผ่านการสอบเทียบมาเพียงหนึ่งครั้ง จะสามารถหาการเลื่อนค่าได้จากค่าที่ระบุไว้ในคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของหน่วยแสดงผล หรืออาจใช้ค่าที่ได้จากการตรวจสอบเครื่องมือระหว่างช่วงการใช้งาน (Intermediate Check) โดยค่าที่ได้ควรจะมาจากการตรวจสอบไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง

การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่าของหน่วยแสดงผลจะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

จากประวัติการสอบเทียบของหน่วยแสดงผลมีการเลื่อนค่าเท่ากับ $\pm 0.0001 \Omega/\text{year}$ ความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการเลื่อนค่าของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานจะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} \text{Uncertainty contribution} &= u(\delta t_{DIS}) \times C_i \quad ; \text{ Sensitivity Coefficient } (C_i) = 2.7 \text{ } ^\circ\text{C } \Omega^{-1} \\ &= \pm \frac{0.0001 \times 2.7}{\sqrt{3}} \\ &= \pm 0.00016 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ค่าความไม่แน่นอนของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ : $u(\delta t_{TUC})$

ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ซึ่งมีการกระจายของความไม่แน่นอนลักษณะแบบปกติ (Normal distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

จากใบรายงานผลการสอบเทียบของหน่วยแสดงผล มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 0.0003Ω ด้วยระดับความเชื่อมั่นในการวัด (Confidence level) ที่ 95 % ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, k) เท่ากับ 2 ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบคือ

$$\begin{aligned} U &= \pm 0.0003 \Omega \\ \text{standard uncertainty} &= \pm \frac{0.0003}{2} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \text{Uncertainty contribution} &= u(\delta t_{ITUC}) \times C_i \quad ; \text{ Sensitivity coefficient } (C_i) = 2.7 \text{ } ^\circ\text{C } \Omega^{-1} \\ &= \pm \frac{0.0003 \times 2.7}{2} \\ &= \pm 0.00041 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่าของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ : $u(\delta t_{DITUC})$

การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่าของหน่วยแสดงผลจะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

จากประวัติการสอบเทียบของหน่วยแสดงผลมีการเลื่อนค่าเท่ากับ $\pm 0.0001 \text{ } \Omega/\text{year}$ ความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการเลื่อนค่าของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบจะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} \text{Uncertainty contribution} &= u(\delta t_{DITUC}) \times C_i \quad ; \text{ Sensitivity Coefficient } (C_i) = 2.7 \text{ } ^\circ\text{C } \Omega^{-1} \\ &= \pm \frac{0.0001 \times 2.7}{\sqrt{3}} \\ &= \pm 0.00016 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียดของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน : $u(\delta t_{RIS})$

ความละเอียดของหน่วยแสดงผลคือ การเปลี่ยนแปลงค่าของหน่วยแสดงผลที่เล็กที่สุดที่สามารถสังเกตเห็นได้ ซึ่งถูกกำหนดในลักษณะเฉพาะของหน่วยแสดงผลนั้น ๆ การกระจายของความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากค่าความละเอียดของหน่วยแสดงผลจะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ความละเอียดในการแสดงผลของหน่วยแสดงผลมีค่าเท่ากับ $\pm 0.0001 \text{ } ^\circ\text{C}$ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความละเอียดของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานคือ

$$u(\delta t_{RIS}) = \frac{\pm 0.00005}{\sqrt{3}} = 0.00003 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียดของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ : $u(\delta t_{RITUC})$

การกระจายของความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากค่าความละเอียดของหน่วยแสดงผลจะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ความละเอียดในการแสดงผลของหน่วยแสดงผลมีค่าเท่ากับ $\pm 0.0001 \Omega$ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความละเอียดของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบคือ

$$\begin{aligned} \text{Uncertainty contribution} &= u(\delta t_{RITUC}) \times C_i \quad ; \text{ Sensitivity Coefficient } (C_i) = 2.7 \text{ } ^\circ\text{C } \Omega^{-1} \\ &= \pm \frac{0.00005 \times 2.7}{\sqrt{3}} \\ &= \pm 0.00008 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่แน่นอนเพียงอย่างเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ : $u(\delta t_{Uni})$

ค่าความไม่แน่นอนเพียงอย่างเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิไม่ว่าจะเป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลางหรือแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้อากาศเป็นตัวกลาง จะได้ค่าดังกล่าวจากการประเมินคุณสมบัติหรือจากผลของการสอบเทียบ ซึ่งผลดังกล่าวต้องครอบคลุมช่วงอุณหภูมิใช้งาน การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่แน่นอนเพียงอย่างเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ผลการจากประเมินคุณสมบัติเฉพาะของค่าความไม่แน่นอนเพียงอย่างเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ มีค่าเท่ากับ $\pm 0.003 \text{ } ^\circ\text{C}$ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความไม่แน่นอนเพียงอย่างเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิคือ

$$\begin{aligned} u(\delta t_{Uni}) &= \pm \frac{0.003}{\sqrt{3}} \\ &= \pm 0.0017 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ : $u(\delta t_{Sta})$

ค่าความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิไม่ว่าจะเป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลางหรือแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้อากาศเป็นตัวกลาง จะได้ค่าดังกล่าวจากการประเมินคุณสมบัติหรือจากผลของการสอบเทียบ ซึ่งผลดังกล่าวต้องครอบคลุมช่วงอุณหภูมิใช้งาน ลักษณะการกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่

เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ผลการจากประเมินคุณสมบัติเฉพาะของค่าความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 200 °C มีค่าเท่ากับ ± 0.003 °C ดังนั้นความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิคือ

$$\begin{aligned} u(\delta t_{Sta}) &= \pm \frac{0.003}{\sqrt{3}} \\ &= \pm 0.0017 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ความไม่แน่นอนเนื่องจากความเสถียรในช่วงเวลาสั้นๆ ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ : $u(\delta t_{ST})$

ค่าความเสถียรของเครื่องมือในช่วงเวลาสั้น ๆ สามารถใช้ในการประมาณค่าความเสถียรของเครื่องมือได้ในกรณีที่ไม่ต้องการค่าความไม่แน่นอนการวัดที่ต่ำมาก การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากความเสถียรในช่วงเวลาสั้นๆ ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบจะมีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ค่าความเสถียรในช่วงเวลาสั้นๆ ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ มีค่าเท่ากับ $\pm 0.0011 \text{ } \Omega$ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจาก Short term stability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ จะมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} u(\delta t_{Hys}) &= \pm \frac{0.0011}{2} \\ \text{Uncertainty contribution} &= u(\delta t_{Hys}) \times C_i \quad ; \text{ Sensitivity Coefficient } (C_i) = 2.7^\circ\text{C } \Omega^{-1} \\ &= \pm \frac{0.0006 \times 2.7}{\sqrt{3}} \\ &= \pm 0.0009 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

ความไม่แน่นอนเนื่องจาก self heating ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ : $u(\delta t_{SH})$

Self heating ของเทอร์โมมิเตอร์ประเมินจากความแตกต่างของอุณหภูมิเนื่องจากความต้านทานที่อ่านได้จากการวัดซึ่งใช้กระแสต่างกันโดย, $I_1 = 1 \text{ mA}$ และ $I_2 = 1.414 \text{ mA}$ ความไม่แน่นอนเนื่องจาก self heating จะสามารถหาได้จาก

$$u^2(\delta t_{SH}) = 8R_S^2 \Delta X_{SH}^2 \frac{I_2^4}{I_2^2 - I_1^2} \left(\frac{u^2(I)}{I^2} \right)$$

โดย R_s คือ ค่าความต้านทานที่ 0°C

ΔX_{SH} คือ the self heating correction

$$\Delta X_{SH} = \frac{I_1^2}{I_2^2 - I_1^2} (X(I_2) - X(I_1)),$$

$X(I)$ คือ $X(I) = \frac{R(t)}{R_s}$

I คือ sensing current, $I_1 = 1\text{ mA}$, $I_2 = 1.414\text{ mA}$,

$u(I)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของกระแสที่ใช้งาน ซึ่งจะกำหนดไว้ในลักษณะเฉพาะของหน่วยแสดงผล

กำหนดให้กระแสที่ใช้สูงสุดคือ 1.414 mA และค่าความไม่แน่นอนของกระแสที่ใช้งาน ซึ่งกำหนดไว้ในลักษณะเฉพาะของหน่วยแสดงผลคือ 0.2% ดังนั้น ค่าความไม่แน่นอนของกระแสที่ใช้งานจะมีค่าเป็น $u(I) = 0.002 \times 1.414 = 0.000008$

ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของความไม่แน่นอนเนื่องจาก self heating จะมีค่าคงที่ดังนี้

$$c = 8 \frac{I_2^4}{I_2^2 - I_1^2} \left(\frac{u^2(I)}{I^2} \right) = 8 \left(\frac{1.414^2}{1.414^2 - 1^2} \right) \left(\frac{0.000008}{1.414^2} \right) = 0.00013$$

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจาก self heating ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบที่อุณหภูมิ 200°C มีค่าเป็น $\pm 0.000\ 001\ \Omega$ โดยมีการกระจายของความไม่แน่นอนเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

$$\begin{aligned} \text{Uncertainty contribution} &= u(\delta t_{SH}) \times C_i \\ &= \pm \frac{0.000\ 001 \times 2.7}{\sqrt{3}} \\ &= \pm 0.000\ 001\ ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

หมายเหตุ : ความไม่แน่นอนเนื่องจาก self heating ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบจะต้องพิจารณาเมื่อค่าความไม่แน่นอนการวัดที่ต้องการมีค่าน้อยกว่า 0.02°C

ความไม่แน่นอนเนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดและการคำนวณของเทอร์มิสเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ : $u(\delta t_{sc})$

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดและการคำนวณของเทอร์มิสเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบสามารถหาได้จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดและการคำนวณโดยใช้สัมประสิทธิ์ R_0, A, B และ C ซึ่งการกระจายของความไม่แน่นอนการวัดมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับจำนวนชุดข้อมูลที่วัดลบลด้วยจำนวนของสัมประสิทธิ์

Item	Standard Reading (°C)	UUC Reading (Ω)	Resistance Calculation (Ω)	Resistance Difference (Ω)	Item	Standard Reading (°C)	UUC Reading (Ω)	Resistance Calculation (Ω)	Resistance Difference (Ω)
1	199.9900	177.3185	177.31995	0.0015	16	199.9911	177.3191	177.32035	0.0013
2	199.9902	177.3185	177.32000	0.0015	17	199.9911	177.3192	177.32034	0.0012
3	199.9904	177.3186	177.32009	0.0014	18	199.9909	177.3191	177.32027	0.0012
4	199.9905	177.3187	177.32012	0.0014	19	199.9905	177.3190	177.32014	0.0012
5	199.9905	177.3188	177.32012	0.0013	20	199.9902	177.3189	177.32000	0.0011
6	199.9905	177.3188	177.32011	0.0013	21	199.9904	177.3189	177.32009	0.0012
7	199.9902	177.3188	177.32001	0.0012	22	199.9906	177.3189	177.32015	0.0012
8	199.9903	177.3188	177.32004	0.0013	23	199.9907	177.3190	177.32020	0.0013
9	199.9904	177.3188	177.32007	0.0012	24	199.9909	177.3190	177.32026	0.0012
10	199.9902	177.3189	177.32000	0.0011	25	199.9911	177.3191	177.32034	0.0012
11	199.9903	177.3188	177.32003	0.0012	26	199.9911	177.3191	177.32033	0.0012
12	199.9905	177.3189	177.32014	0.0012	27	199.9905	177.3189	177.32011	0.0012
13	199.9907	177.3191	177.32018	0.0011	28	199.9900	177.3188	177.31994	0.0011
14	199.9910	177.3191	177.32031	0.0012	29	199.9898	177.3187	177.31986	0.0012
15	199.9910	177.3191	177.32033	0.0012	30	199.9895	177.3186	177.31976	0.0012
Average						199.9905	177.3189	177.32012	0.00124
Standard Deviation						0.0004	0.0002	0.00015	0.00010

ตารางที่ 2: ผลการสอบเทียบและการคำนวณค่าความต้านทานของ IPRT ที่อุณหภูมิ 200 °C

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดและการคำนวณโดยใช้สัมประสิทธิ์ R_0, A, B และ C มีค่าเท่ากับ 0.0001Ω ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดและการคำนวณของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ จะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} \text{Uncertainty contribution} &= u(\delta t_{SC}) \times C_i \quad ; \text{ Sensitivity Coefficient } (C_i) = 2.7^\circ\text{C } \Omega^{-1} \\ &= \pm \frac{0.0001 \times 2.7}{\sqrt{1}} \\ &= \pm 0.0003^\circ\text{C} \end{aligned}$$

งบความไม่แน่นอน (Uncertainty budget)

เมื่อทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นการสอบเทียบตามวิธีการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ความไม่แน่นอนต่าง ๆ เหล่านี้สามารถนำมารวมไว้ในรูปแบบของงบความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเพื่อหาว่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combined standard uncertainty, u_c) ที่เกิดขึ้นในการสอบเทียบนั้นมีค่าเท่าใด ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมสามารถหาได้ดังนี้

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{x_i}^2 c_i^2}$$

เมื่อ u_{x_i} คือ ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของแต่ละองค์ประกอบ

c_i คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณ output ต่อ Input

การคำนวณค่าความองศาความเป็นอิสระยังผล Effective Degree of Freedom โดยใช้สูตรของ Welch-Satterthwait เพื่อหาค่าตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, k) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการ ด้วยการนำค่าที่คำนวณได้ไปเทียบกับตาราง Student's "t" distribution

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_1^4(y)}{v_1} + \frac{u_2^4(y)}{v_2} + \dots + \frac{u_n^4(y)}{v_n}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

นำความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม u_c ที่ได้คูณด้วยค่าตัวประกอบครอบคลุมจะได้เป็นค่าของความไม่แน่นอนมาตรฐานขยาย (Expanded standard uncertainty, U)

$$U = k u_c$$

ตารางที่ 1 ตัวอย่างงบความไม่แน่นอน (Uncertainty budget) การสอบเทียบ IPRT ที่อุณหภูมิ 200 °C

Quantity X_i	Estimate x_i	Standard Uncertainty $u(X_i)$		Effective Degree of freedom (ν_i)	Probability Distribution	Sensitivity Coefficient (C_i)	Uncertainty Contribution $u_i(Y)$	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
t_s	199.991 8 °C	-	0.4 mK	29	Normal	1.0	-	0.4 mK
t_x	177.355 6 Ω	-	0.2 mΩ	26	Normal	2.7	-	0.6 mK
δt_s	0 K	-	1.0 mK	∞	Normal	1.0	-	1.0 mK
δt_{DS}	0 K	-	2.9 mK	∞	Rectangular	1.0	-	2.9 mK
δt_{IS}	0 K	-	0.15 mΩ	∞	Normal	2.7	-	0.41 mK
δt_{DIS}	0 K	-	0.1 mΩ	∞	Rectangular	2.7	-	0.2 mK
δt_{ITUC}	0 K	-	0.15 mΩ	∞	Normal	2.7	-	0.41 mK
δt_{DITUC}	0 K	-	0.1 mΩ	∞	Rectangular	2.7	-	0.2 mK
δt_{RIS}	0 K	-	0.03 mK	∞	Rectangular	1.0	-	0.03 mK
δt_{RITUC}	0 K	-	0.03 mΩ	∞	Rectangular	2.7	-	0.08 mK
δt_{ST}	0 K	-	0.35 mΩ	∞	Rectangular	2.7	-	0.9 mK
δt_{Uni}	0 K	-	1.7 mK	∞	Rectangular	1.0	-	1.7 mK
δt_{Sta}	0 K	-	1.7 mK	∞	Rectangular	1.0	-	1.7 mK
δt_{SH}	0 K	-	0.001 mΩ	∞	Rectangular	2.7	-	0.001 mK
t_s	199.991 8 °C							4 mK

Expanded uncertainty of measurement: $U = k \cdot u(C_x) = 2 \cdot 4 \text{ mK} = 8 \text{ mK}$

ตารางที่ 2 ตัวอย่างงบความไม่แน่นอน (Uncertainty budget) การสอบเทียบ IPRT ช่วงอุณหภูมิ

Quantity X_i	Estimate x_i	Standard Uncertainty $u(X_i)$		Effective Degree of freedom (ν_i)	Probability Distribution	Sensitivity Coefficient (C_i)	Uncertainty Contribution $u_i(Y)$	
		Relative	Absolute				Relative	Absolute
δt_{SC}	0 K	-	0.1 m Ω	26	Normal	2.7	-	0.3 mK
δt_S	0 K	-	1.0 mK	∞	Normal	1.0	-	1.0 mK
δt_{DS}	0 K	-	2.9 mK	∞	Rectangular	1.0	-	2.9 mK
δt_{IS}	0 K	-	0.15 m Ω	∞	Normal	2.7	-	0.41 mK
δt_{DIS}	0 K	-	0.1 m Ω	∞	Rectangular	2.7	-	0.2 mK
δt_{ITUC}	0 K	-	0.15 m Ω	∞	Normal	2.7	-	0.41 mK
δt_{DITUC}	0 K	-	0.1 m Ω	∞	Rectangular	2.7	-	0.2 mK
δt_{RIS}	0 K	-	0.03 mK	∞	Rectangular	1.0	-	0.03 mK
δt_{RITUC}	0 K	-	0.03 m Ω	∞	Rectangular	2.7	-	0.08 mK
δt_{ST}	0 K	-	0.35 m Ω	∞	Rectangular	2.7	-	0.9 mK
δt_{Uni}	0 K	-	1.7 mK	∞	Rectangular	1.0	-	1.7 mK
δt_{Sta}	0 K	-	1.7 mK	∞	Rectangular	1.0	-	1.7 mK
δt_{SH}	0 K	-	0.001 m Ω	∞	Rectangular	2.7	-	0.001 mK
								4 mK

Expanded uncertainty of measurement: $U = k \cdot u(C_x) = 2 \cdot 4 \text{ mK} = 8 \text{ mK}$

8. การรายงานผล

เพื่อให้การรายงานผลการสอบเทียบเป็นไปตาม มอก.17025 ในข้อ 5.10 ใบรายงานผลการสอบเทียบจะต้องประกอบด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ อย่างน้อยดังนี้ [3]

1. หัวเรื่อง
2. ชื่อและที่อยู่ของห้องปฏิบัติการ และสถานที่ที่ทำการสอบเทียบ
3. การชี้แจงเฉพาะของรายงานผลการสอบเทียบ และมีการชี้แจงในแต่ละหน้า และการชี้แจงถึงการสิ้นสุดรายงานผลการสอบเทียบ
4. ชื่อที่อยู่ของลูกค้า
5. ระเบียบวิธีที่ใช้
6. รายละเอียดของตัวอย่าง และการชี้แจงอย่างไม่คลุมเครือ
7. วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง และวันเดือนปีที่ทำการสอบเทียบ
8. ผลการสอบเทียบ พร้อมกับหน่วยวัดที่เหมาะสม
9. ชื่อ หน้าที่ และลายมือชื่อ หรือการชี้แจงอื่นที่เทียบเท่าของบุคคลที่มีอำนาจหน้าที่ในการออกใบรับรองผลการสอบเทียบ
10. ข้อความที่ระบุว่ารายงานนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาสอบเทียบเท่านั้นและใบรับรองผลการสอบเทียบจะต้องรวมถึงข้อมูลดังต่อไปนี้ ในกรณีที่เป็นต่อการแปลผลการสอบเทียบ
11. ภาวะต่างๆ ที่สอบเทียบซึ่งมีผลต่อการวัด ระยะจุ่มของหัวเทอร์โมมิเตอร์
12. ค่าความไม่แน่นอนของการวัด
13. หลักฐานที่แสดงถึงการสอบกลับได้ของการวัด



เอกสารอ้างอิง

1. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML : International vocabulary of metrology-Basic and associated terms, 3rd edition, JCGM 200:2008 (En/Th), 2008
2. ISO, Guide to the expression of uncertainty in measurement, 1st edition, 1995, ISBN 92-67-10188-9
3. ISO/IEC 17025, General requirement for the competence of testing and calibration laboratories, 2nd edition, 2005



ภาคผนวก
ตัวอย่างใบรายงานผลการสอบเทียบ

Certificate of Calibration

Certificate No. : TT-0001-14
 Issued by : Temperature Laboratory
 Metrology Department
 1 Moo 1, Klong 5, Klong Luang, Pathumthani 12120

Page 1 of 3 Pages

Measurement Item : Industrial Platinum Resistance Thermometer

Manufacturer : ABC

Serial Number : 1234

Customer : Thailand Calibration
 123 Moo 3, Samsen-Nai, Phayathai, Bangkok
 10400

Received Date : 1 January 2014

Measurement Date : 15 January 2014

Date
 16 January 2014

Phathom
 Authorized Signatory

Phat
 Person in charge

ENVIRONMENTAL CONDITIONS:

The measurement was carried out in an ambient temperature of $(23.0 \pm 2.0) ^\circ\text{C}$ and the relative humidity of $(55 \pm 10) \%$.

MEASUREMENT METHOD:

The Industrial Platinum Resistance Thermometer was calibrated according to calibration procedure CP-TT 1 by comparison with Standard Platinum Resistance Thermometers (SPRTs) in calibration baths. The calibration was performed in the sub-range from 233.15 K ($-40 ^\circ\text{C}$) to 523.15 K ($250 ^\circ\text{C}$). The thermometer resistances were measured with continuous currents of 1 mA at approximately immersion depth of at least 150 mm.

RESULTS:

The table in the following page gives the corresponding values of thermometer resistance (R) as a function of temperature (T) and their associated measurement uncertainties. In addition the new unique constants for the temperature – resistance relationship are reported.

UNCERTAINTIES:

The uncertainty stated is the expanded uncertainty obtained by multiplying the standard uncertainty by the coverage factor $k = 2$. It has been determined in accordance with DAkS-DKD-3 or EA publication EA-4/02 M: 2013 “Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration” and JCGM 100:2008 “Evaluation of measurement data - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”. The value of the measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

TRACEABILITY:

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

MEASUREMENT RESULTS:

Temperature (°C)	UUC Resistance (Ω)	Uncertainty (mK)
-39.995 6	84.288 30	15
-10.008 4	96.112 66	15
-0.000 9	100.033 91	15
99.993 9	138.555 45	15
199.996 2	175.901 24	20
250.003 5	194.143 68	20

Note :

The calibration results were fitted using least square method to obtain the new unique constants, A, B and C. The temperature – resistance relationships can be calculated using the interpolation function below:

For temperature range -40 °C to 0 °C.

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3)$$

For temperature range 0 °C to 250 °C.

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$$

Where

$$A = 0.003\ 909\ 52\ \text{°C}^{-1}$$

$$R_0 = 100.033\ 76\ \Omega$$

$$B = -5.860\ 512\ \text{E-}07\ \text{°C}^{-2}$$

$$R_t = \text{resistance (in ohms) at temperature, } t\ (\text{°C})$$

$$C = -1.121\ 402\ \text{E-}11\ \text{°C}^{-4}$$

The estimated temperature measurement uncertainty when using this equation for whole range is

20 mK and the temperature coefficient α was calculated from $\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} = 0.003\ 850\ 92\ \text{°C}^{-1}$.

End of Certificate of Calibration