

CALIBRATION OF DIGITAL THERMOMETER WITH TEMPERATURE SENSOR

TM/CG01/TT01/V04

September 2012

THERMOMETRY METROLOGY DEPARTMENT
NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY (THAILAND)



CALIBRATION OF DIGITAL THERMOMETER WITH TEMPERATURE SENSOR

วัตถุประสงค์ : เพื่อแนะนำแนวทางในการสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โมมิเตอร์ที่ต่อรวมกับหัววัดอุณหภูมิ (Digital Thermometer with Temperature Sensor) ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยสอบย้อนกลับไปยังสเกลอุณหภูมิระหว่างประเทศ ITS-90

CALIBRATION OF DIGITAL THERMOMETER WITH TEMPERATURE SENSOR

สารบัญ

ขอบข่าย	3
คำนำ	3
คำนิยาม	3
การสอบเทียบ	6
กระบวนการสอบเทียบ	9
การประเมินค่าความไม่แน่นอน	10
การรายงานผล	21
เอกสารอ้างอิง	22

ขอบข่าย

เอกสารฉบับนี้ใช้เป็นแนวทางประกอบการสอบเทียบ ดิจิทัลเทอร์โมมิเตอร์ที่ต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิ (Digital Thermometer with Temperature Sensor) ครอบคลุมหัววัดแบบความต้านทาน (Resistance Thermometer Sensor) และหัววัดแบบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Sensor) โดยวิธีการเทียบค่ากับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Comparison method) ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ เท่านั้น

คำนำ

การสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โมมิเตอร์ที่ต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิ (Digital Thermometer with Temperature Sensor) ด้วยวิธีการเทียบค่ากับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Comparison method) โดยแบ่งตามชนิดของหัววัดที่ต่อร่วม ได้แก่ การสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โมมิเตอร์ที่ต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน (Digital Thermometer with RTD Sensor) และการสอบเทียบดิจิทัลเทอร์โมมิเตอร์ที่ต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิล (Digital Thermometer with Thermocouple Sensor) ซึ่งวิธีการสอบเทียบทั้งสองแบบมีกระบวนการสอบเทียบเหมือนกัน อาจต่างกันที่องค์ประกอบที่นำมาใช้ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด สาเหตุดังกล่าวเกิดจากหัววัดอุณหภูมิที่ต่อร่วมอยู่กับ “หน่วยแสดงผล” หรืออาจเรียกว่า “ดิจิทัลเทอร์โมมิเตอร์” มีลักษณะการทำงานที่ต่างกัน กล่าวคือถ้าใช้หัววัดอุณหภูมิชนิดความต้านทาน ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัด (Error) ของเครื่องมือเกิดจากปัจจัยสองส่วน คือ หน่วยแสดงผลกับหัววัดอุณหภูมิ แต่ถ้าใช้หัววัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล ค่าความคลาดเคลื่อนของการวัด (Error) ของเครื่องมือเกิดจากปัจจัยสามส่วน คือ หน่วยแสดงผล หัววัดอุณหภูมิและอุณหภูมิแวดล้อมรอบหน่วยแสดงผล ซึ่งปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นอาจนำมาใช้เป็นองค์ประกอบในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัด ส่วนลักษณะโดยรายละเอียดของการสอบเทียบ จะได้นำเสนอในเอกสารนี้ในลำดับต่อไป

คำนิยาม

- **สเกลอุณหภูมิระหว่างประเทศ ITS-90 (International Temperature Scale 1990, ITS-90) :**

เป็นสเกลอุณหภูมิมาตรฐานซึ่งถูกกำหนดขึ้นโดยคณะกรรมการที่ปรึกษาว่าด้วยการวัดอุณหภูมิ (Consultative Committee for Thermometry) ในปี ค.ศ. 1990 โดยเป็นการประมาณค่าสเกลอุณหภูมิอุณหพลวัต (Thermodynamic temperature) เพื่อความสะดวกและส่งผลให้การวัดอุณหภูมิในระดับนานาชาติมีค่าเป็นหนึ่งเดียวกัน

- **เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Standard Thermometer, STD) :**

เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานในเอกสารฉบับนี้หมายถึง เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานที่ใช้แสดงค่าอุณหภูมิ ซึ่งเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานจะต้องผ่านการสอบเทียบและรู้ค่าแก้ของอุณหภูมิที่อ่านได้ รวมทั้งความไม่แน่นอนของเทอร์โมมิเตอร์

เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน อาจประกอบด้วยหน่วยแสดงผล (Displaying Measuring Instrument) ต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิ (Temperature Sensor) ที่สามารถถอดแยกออกจากกันได้ หรือไม่สามารรถแยกออกจากกันได้

- **เทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (Thermometer Under Calibration, TUC) :**

เทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ในเอกสารฉบับนี้หมายถึง ดิจิทัลเทอร์โมมิเตอร์ที่ต่อรวมอยู่กับหัววัดอุณหภูมิ (Digital Thermometer with Temperature Sensor)

- **แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (Temperature Source) :**

เป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิซึ่งใช้ในกระบวนการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์สามารถแยกตามชนิดของตัวกลางที่ฝังดังนี้

1. แหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Liquid Bath)
2. แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบแห้งหรือใช้อากาศเป็นตัวกลาง (Dry Block)
3. แหล่งกำเนิดอุณหภูมิใดๆ เช่น Fluidise Bath

- **การสอบเทียบ (Calibration) :**

การปฏิบัติงานที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ ที่ถูกระบุไว้ โดยในขั้นแรกสร้างความสัมพันธ์อันหนึ่งระหว่างค่าปริมาณต่างๆ กับความไม่แน่นอนการวัดต่างๆ ที่ได้จากมาตรฐานการวัด และสิ่งบ่งชี้ต่างๆ ที่สมนัยซึ่งมาพร้อมกับความไม่แน่นอนการวัดที่เชื่อมสัมพันธ์อันหนึ่งเพื่อให้ได้ผลการวัดอันหนึ่งจากสิ่งบ่งชี้สิ่งหนึ่ง [2]

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

ความใกล้เคียงของการเป็นไปตามกันระหว่างค่าปริมาณที่วัดได้กับปริมาณจริงของสิ่งที่ถูกวัด [3]

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

คุณสมบัติหนึ่งของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ เพื่อบ่งชี้การกระจายของอุณหภูมิที่พื้นที่ใช้งานของแหล่งกำเนิดที่อุณหภูมิใดๆ ซึ่งการกระจายของอุณหภูมินี้อาจส่งผลต่อการผลการวัดระหว่างเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบ

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

เสถียรภาพ (stability) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ คือการคงที่ของอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิใดๆ ในช่วงเวลาหนึ่งๆ หากอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้นๆ หรือแหล่งกำเนิดอุณหภูมิมีความไม่เสถียร (instability) เกิดขึ้น ก็ย่อมที่จะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ของทั้งเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

- **ความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์ (Resolution of Thermometer) :**
การเปลี่ยนแปลงที่เล็กที่สุดในปริมาณที่กำลังถูกวัดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอันหนึ่งซึ่งสังเกตเห็นได้ในค่าบ่งชี้ที่สมนัย [2]
- **ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of Measurement) :**
พารามิเตอร์ที่ไม่มีค่าเป็นลบที่ใช้บ่งบอกลักษณะเฉพาะของการกระจายของค่าปริมาณของสิ่งที่ถูกวัด โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่ใช้ [2] และอาจกล่าวได้ว่าความไม่แน่นอนในการวัดเป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณของคุณภาพของผลการวัด ทำให้ผลการวัดนั้น สามารถเปรียบเทียบกับสิ่งอ้างอิง หรือมาตรฐานอื่นๆได้ โดยปกติแล้วการประมาณความไม่แน่นอนโดยจะใช้แนวทาง GUM ซึ่งได้รับการยอมรับโดยทั่วไป [4]
- **GUM (Guide to Expression of Uncertainty in Measurement) :**
คำแนะนำว่าด้วยการแสดงความไม่แน่นอนในการวัด ซึ่งตีพิมพ์และเผยแพร่โดย BIPM (International Bureau of Weights and Measures), IEC (International Electrotechnical Commission), IFCC (International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine), ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation), ISO (International Organization for Standardization), IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) และ OIML (International Organization of Legal Metrology) [4]
- **การทวนซ้ำได้ของผลการวัด (Repeatability of results of measurement) :**
ความใกล้เคียงของการเป็นไปตามกันระหว่างการวัดที่ติดต่อกันของสิ่งที่ถูกวัดอันเดิมภายใต้เงื่อนไขคงเดิมของการวัด [3]
- **การเลื่อน (Drift) :**
การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าที่บ่งชี้ตลอดช่วงเวลาที่ใช้งานอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงมาตรวิทยาของเครื่องมือวัด
- **ค่าแก้ (Correction value) :**
ค่าที่บวกเพิ่มเข้าไปทางพิชคณิตกับผลการวัดที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ [3]
- **ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Error) :**
องค์ประกอบของความคลาดเคลื่อนในการวัดโดยที่ในการวัดซ้ำหลายๆครั้งยังคงมีความคงตัวหรือการแปรผันในลักษณะที่ทำนายได้ [2]
- **ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor) :**

ตัวเลขที่มากกว่าหนึ่งที่นำมาคูณกับความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวมเพื่อให้ได้ความไม่แน่นอนการวัดขยาย [2]

- **ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐาน (Standard Uncertainty) :**

ความไม่แน่นอนการวัดซึ่งแสดงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน [2]

- **ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม (Combined Standard Uncertainty) :**

ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานซึ่งได้จากการใช้ความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานแต่ละตัวที่เชื่อมสัมพันธ์กับปริมาณเข้าในแบบจำลองการวัด [2]

- **ปริมาณเข้า (Input Quantity) :**

ปริมาณซึ่งต้องถูกวัด หรือปริมาณที่มีค่าที่หาได้ทางใดทางหนึ่งเพื่อคำนวณค่าปริมาณที่วัดได้ของสิ่งที่ถูกวัด [2]

- **ความไม่แน่นอนการวัดขยาย (Expanded Measurement Uncertainty) :**

ผลคูณของความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวมและตัวประกอบครอบคลุมซึ่งมีค่ามากกว่าหนึ่ง [2] ซึ่งในการรายงานผลการสอบเทียบจะใช้ในการรายงานถึงค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบนั้นๆ

การสอบเทียบ

1. เครื่องมือ/มาตรฐานที่ใช้

1.1 เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Standard thermometer) ควรมีความถูกต้องในการวัดดีกว่าเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

1.2 แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (Temperature Source) ที่มีความลึกเหมาะสมหรือมีความลึกไม่น้อยกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัววัดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ซึ่งอาจจะใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Liquid Bath) แหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้อากาศเป็นตัวกลาง (Dry Block) หรือแหล่งกำเนิดอุณหภูมิใดๆ ที่ทราบค่าคุณสมบัติเฉพาะของแหล่งกำเนิดอุณหภูมินั้น

2. สภาพแวดล้อมและเงื่อนไขในการสอบเทียบ

กระบวนการสอบเทียบควรอยู่ในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการให้มีความเหมาะสม และไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องมือวัดต่างๆ หรือตามที่อยู่ผลิตรระบุไว้ และในขณะที่ทำการสอบเทียบอุณหภูมิภายในของห้องปฏิบัติการควรไม่มีการเปลี่ยนแปลงจนส่งผลกระทบต่อกระบวนการสอบเทียบ รวมทั้งควรหลีกเลี่ยงแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ ด้วย

3. การเตรียมเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

- 3.1 ตรวจสอบลักษณะภายนอกของเทอร์โมมิเตอร์ดังกล่าวว่ามีการชำรุดใดๆ หรือไม่ พร้อมตรวจสอบการทำงานว่ายังใช้งานได้อยู่หรือไม่
- 3.2 ควรเก็บเทอร์โมมิเตอร์ที่จะสอบเทียบในอุณหภูมิห้องสอบเทียบอย่างน้อย 2 ชั่วโมงก่อนจะนำมาสอบเทียบ หรือตามคำแนะนำของผู้ผลิต เพื่อปรับสภาพเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

4. การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสอบเทียบ

- 4.1 ตรวจสอบว่าเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานที่จะใช้ในการสอบเทียบว่าอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน
- 4.2 ตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานให้ตรงกับค่าที่ได้จากการสอบเทียบล่าสุดในหรือตรงกับหัววัดอุณหภูมิที่จะนำมาใช้งาน(กรณีหน่วยแสดงผลมีการเก็บบันทึกค่าสัมประสิทธิ์ของหัววัดอุณหภูมิได้)
- 4.3 ทำการตรวจสอบหัววัดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ที่จะสอบเทียบว่าเป็นชนิดใด เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการสอบเทียบและการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด การตรวจสอบดังกล่าวควรอ้างอิงข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตเทอร์โมมิเตอร์นั้นๆ เป็นหลัก
- 4.4 ทำการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิซึ่งการติดตั้งควรเป็นไปตามข้อกำหนดของหัววัดอุณหภูมิในแต่ละชนิดตามความเหมาะสม (ควรติดตั้งให้ใกล้กันมากที่สุดและที่ระดับความลึกเท่ากัน)
- 4.5 ในกรณีใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิซึ่งมีตัวแสดงค่าอุณหภูมิ และต้องการใช้อุณหภูมิที่อ่านได้นี้เป็นอุณหภูมิมาตรฐานนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่ชุดแหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบนี้จะต้องได้รับการสอบเทียบก่อนที่จะนำมาใช้ในการสอบเทียบ
- 4.6 เปิดเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานทิ้งไว้เพื่อ Warm up เป็นเวลาไม่น้อยกว่าครึ่งชั่วโมงหรือตามเวลาที่กำหนดจากบริษัทผู้ผลิตเทอร์โมมิเตอร์นั้นๆ ก่อนเริ่มกระบวนการสอบเทียบ

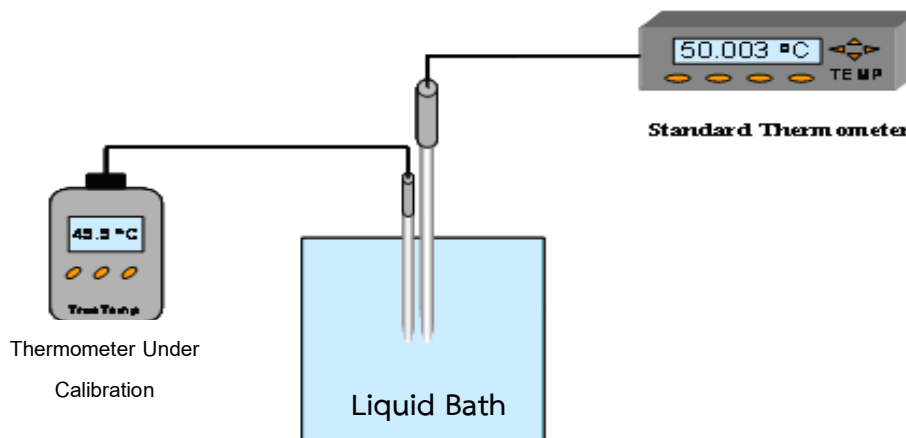
5. Measuring set-up

การติดตั้งหัววัดอุณหภูมิลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิควรติดตั้งที่ระยะความลึกไม่น้อยกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง สำหรับการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์นั้นจะมีลักษณะการติดตั้งที่คล้ายกัน แตกต่างกันที่แหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่นำมาใช้ ปกติจะสามารถแยกได้ 2 ชนิด คือ แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Liquid Bath) และแหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบให้อากาศเป็นตัวกลาง (Dry Block) โดยมีรายละเอียดในการติดตั้งดังนี้

5.1 การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Liquid Bath) ในการสอบเทียบ

การใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้ของเหลวเป็นตัวกลางสามารถใช้งานได้หลายช่วงอุณหภูมิขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้ตัวกลาง เช่น ช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 0 °C จะใช้ตัวกลางเป็นแอลกอฮอล์ ช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 0 °C แต่

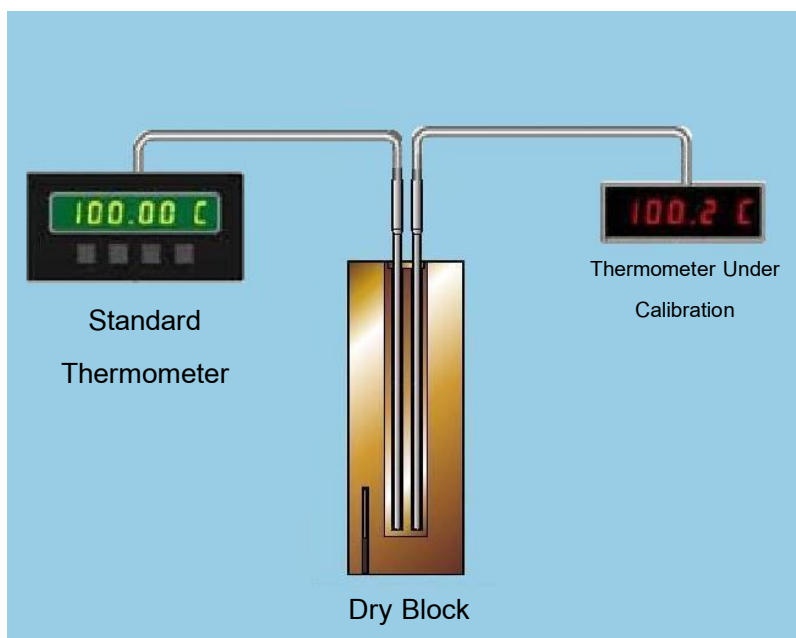
ไม่เกิน 100 °C จะใช้น้ำสะอาดเป็นตัวกลางและช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 100 °C จะใช้ซิลิโคนออย (Silicone oil) เป็นตัวกลาง (ซิลิโคนบางชนิดสามารถใช้เป็นตัวกลางได้ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ -80 °C ถึง 250 °C) การใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบนี้สามารถสอบเทียบเทอร์มิเตอร์ที่มีหัววัดได้หลายๆขนาด เพราะไม่มีข้อจำกัดในการจุ่มหัววัดลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมินั้นๆ (พื้นที่ในการจุ่มหัววัดควรอยู่ในพื้นที่การประเมินคุณสมบัติเฉพาะของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ) ดังแสดงในรูปที่ 1 และหรือให้เป็นไปตามหัวข้อ 4.4



รูปที่1: การสอบเทียบเทอร์มิเตอร์โดยใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง
(Liquid Bath)

5.2 การติดตั้งเทอร์มิเตอร์ลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้อากาศเป็นตัวกลาง (Dry Block) ในการสอบเทียบ

การใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้อากาศเป็นตัวกลาง สามารถสร้างอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -80 °C ถึง 960 °C (ขึ้นอยู่กับความสามารถของแหล่งกำเนิดอุณหภูมินั้นๆ) การใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบนี้จะมีข้อจำกัดในการจุ่มหัววัดลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ เนื่องจากขนาดของช่องใส่ (Bore) หัววัดอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิชนิดนี้ จะถูกกำหนดจากผู้ผลิตไว้เรียบร้อยแล้ว เช่น ขนาด 4 มิลลิเมตร ขนาด 6 มิลลิเมตร หรือ 10 มิลลิเมตร เป็นต้น การที่จะติดตั้งหัววัดลงในช่องใส่ (Bore) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบนี้ ควรให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัดอุณหภูมิเล็กกว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องใส่ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร สำหรับช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 660 °C จะเป็น 1 มิลลิเมตร แต่ถ้าไม่เป็นดังที่กล่าวมาควรนำวัสดุทนความร้อนมาปิดด้านบนของช่องใส่หัววัดอุณหภูมิเพื่อป้องกันการสูญเสียความร้อน และหรือต้องพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการสูญเสียความร้อนของหัววัดอุณหภูมิ การติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 2 และหรือเป็นไปตามหัวข้อ 4.4



รูปที่2: การสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์โดยใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้อากาศเป็นตัวกลาง (Dry Block)

6. กระบวนการสอบเทียบ

6.1 ช่วงอุณหภูมิสำหรับการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ที่ต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิ

- 6.1.1 ควรเริ่มสอบเทียบจากอุณหภูมิอ้างอิงจากนั้นจึงสอบเทียบจากอุณหภูมิต่ำสุดไปสู่อุณหภูมิสูงสุด และกลับมาที่อุณหภูมิอ้างอิงอีกครั้งเพื่อเป็นการหาค่า short term stability กรณีที่ค่าความไม่แน่นอนที่คาดหวังที่ต้องการน้อยกว่า 0.02°C ควรเริ่มสอบเทียบจากอุณหภูมิต่ำสุดไปสู่อุณหภูมิสูงสุดและจากอุณหภูมิสูงสุดไปสู่ต่ำสุด โดยจุดสอบเทียบของทั้งสองต้องเป็นจุดสอบเทียบเดียวกัน เพื่อเป็นการหาค่า hysteresis 6.1.3 ในกรณีที่มีเพียงหนึ่งจุดสอบเทียบให้ทำ reproduce เพื่อเป็นการหา short term stability

6.2 หัววัดอุณหภูมิและหน่วยแสดงผล

- 6.2.1 หัววัดอุณหภูมิที่ต่อร่วมกับหน่วยแสดงผลที่สามารถบันทึก แก๊ซ ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของหัววัดอุณหภูมิได้ ควรได้รับการตรวจสอบและบันทึกค่าก่อนกระบวนการสอบเทียบจะเริ่มขึ้น เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการสอบเทียบและการนำไปใช้งาน
- 6.2.2 ควรบันทึกระยะเวลาความลึกในจุ่มหัววัดอุณหภูมิลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิขณะทำการสอบเทียบ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการสอบเทียบและการนำไปใช้งาน
- 6.2.3 ในกรณีหน่วยแสดงผลสามารถต่อกับหัววัดอุณหภูมิได้หลายๆ หัววัดและสามารถถอดแยกออกได้ เมื่อจะทำการสอบเทียบควรบันทึกช่องที่หัววัดอุณหภูมิต่อร่วมกับหน่วยแสดงผล เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการสอบเทียบและการนำไปใช้งาน

6.3 การบันทึกผลการสอบเทียบ

การบันทึกผลให้บันทึกค่าอุณหภูมิของเทอร์มิเตอร์มาตรฐาน (STD) และค่าอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (TUC) ควรบันทึกผลในเวลาใกล้เคียงกัน และควรบันทึกผลอย่างน้อย 3 ครั้ง

6.4 นำผลที่ได้จากการวัดในข้อที่ 6.3 มาทำการหาค่าแก้ไขให้แก่เทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการทำการสอบเทียบตามสมการที่ 1

$$\text{ค่าแก้ไข (Correction)} = \text{ค่าจริง (True value)} - \text{ค่าที่อ่านได้ (Uncorrected value)} \quad (1)$$

โดย ค่าจริง คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน(STD)

ค่าที่อ่านได้ คือ ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (TUC)

7. การประเมินความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในการสอบเทียบ

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของการสอบเทียบระหว่างเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (ที่ประกอบด้วยหัววัดอุณหภูมิพร้อมกับหน่วยแสดงผล) กับเทอร์โมมิเตอร์ที่ต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิได้ดังสมการที่ 2 สำหรับเทอร์โมมิเตอร์ที่ต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล

$$C_x = (t_s - t_{tuc}) + \delta t_s + \delta t_{s,d} + \delta t_I + \delta t_{I,d} + \delta t_{res,std} + \delta t_{reu,tuc} + \delta t_{uni} + \delta t_{sta} + \delta t_{st} + \delta t_{IRJ} + \delta t_{In} + \delta t_{hc} \quad (2)$$

เมื่อ C_x = ค่าแก้ไขของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

t_s = ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้โดยเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

t_{tuc} = ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้โดยเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

δt_s = ค่าแก้ไขเนื่องจากค่าความไม่แน่นอนของหัววัดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

$\delta t_{s,d}$ = ค่าแก้ไขเนื่องจากการเลื่อนค่า (drift) ของหัววัดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

δt_I = ค่าแก้ไขเนื่องจากค่าความไม่แน่นอนของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

$\delta t_{I,d}$ = ค่าแก้ไขเนื่องจากการเลื่อนค่า (drift) ของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

$\delta t_{res,std}$ = ค่าแก้ไขเนื่องจากค่าความละเอียด (resolution) ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

$\delta t_{reu,tuc}$ = ค่าแก้ไขเนื่องจากค่าความละเอียด (resolution) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ

δt_{uni} = ค่าแก้ไขเนื่องจากค่าความไม่เป็นหนึ่งเดียว (non-uniformity) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ

δt_{sta} = ค่าแก้ไขเนื่องจากค่าความไม่เสถียร (instability) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ

δt_{st} = ค่าแก้ไขเนื่องจากความสามารถในการทำซ้ำในช่วงเวลาสั้นๆ (short term stability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ

- δt_{hc} = ค่าแก้เนื่องจากการนำความร้อนของก้านหัววัดอุณหภูมิ (Stem conduction of Temperature Sensor) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ
- δt_{IRJ} = ค่าแก้เนื่องจากการวัดค่าอุณหภูมิภายในหน่วยแสดงผลคลาดเคลื่อน (Internal Junction Error) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ กรณีที่หัววัดอุณหภูมิเป็นชนิดเทอร์โมคัปเปิล
- δt_{In} = ค่าแก้เนื่องจากค่าความไม่เป็นเอกรูปของหัววัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิล (Inhomogeneity of Thermocouple) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ

ตัวอย่างการคำนวณความไม่แน่นอนการสอบเทียบ

ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ Digital Thermometer with TC Sensor ที่อุณหภูมิ 300 °C ซึ่งจากสมการที่ 2 ความไม่แน่นอนต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์สามารถแจกแจงได้ดังนี้

- ค่าความไม่แน่นอนของหัววัดเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน, $u(\delta t_s)$: ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการสอบเทียบหัววัดอุณหภูมิมาตรฐาน ซึ่งมีการกระจายของความไม่แน่นอนลักษณะแบบปกติ (Normal distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ตัวอย่างที่ 1 : จากรายงานผลการสอบเทียบของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานที่ 300 °C มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 0.5 °C ด้วยระดับความเชื่อมั่นในการวัด (Confidence level) ที่ 95 % ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, k) เท่ากับ 2 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานในการสอบเทียบครั้งนี้คือ

$$u(\delta t_s) = \frac{U}{k}$$

$$u(\delta t_s) = \frac{0.5}{2.0} = 0.25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่า(drift) ของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐาน, $u(\delta t_{s,d})$:

การเลื่อนค่าคือ การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าที่บ่งชี้ของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานตลอดระยะเวลาที่ใช้งาน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงมาตริยาของเครื่องมือวัด การเลื่อนค่าของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานนี้สามารถหาได้จากประวัติการสอบเทียบที่ผ่านมาของหัววัดอุณหภูมินั้นๆ ในกรณีที่เทอร์โมมิเตอร์ผ่านการสอบเทียบมาเพียงหนึ่งครั้ง จะสามารถหาการเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์ได้จากค่าที่ระบุไว้ในคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเทอร์โมมิเตอร์นั้นๆ หรืออาจใช้ค่าที่ได้จากการตรวจสอบเครื่องมือระหว่างช่วงการใช้งาน (Intermediate Check) โดยค่าที่ได้ควรจะมาจากการตรวจสอบไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง

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

ตัวอย่างที่ 2 : จากประวัติการสอบเทียบตลอดระยะเวลาการใช้งานหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานมีการเลื่อนค่าเท่ากับ ± 0.5 °C ความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการเลื่อนค่านี้คือ

$$u(\delta t_{s,d}) = \frac{\pm Value}{\sqrt{3}}$$

$$u(\delta t_{s,d}) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.2887 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- ค่าความไม่แน่นอนของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน, $u(\delta t_1)$:

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

ตัวอย่างที่ 3 : จากใบรายงานผลการสอบเทียบของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ $0.003 \text{ } \Omega$ ด้วยระดับความเชื่อมั่นในการวัด (Confidence level) ที่ 95 % ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, k) เท่ากับ 2 โดยขณะใช้งาน หน่วยแสดงผลจะต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิชนิด $25 \text{ } \Omega$ ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณ output ต่อ Input (Sensitivity Coefficient, C_i) ประมาณ $10 \text{ } ^\circ\text{C} / \Omega$ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานในการสอบเทียบครั้งนี้คือ

$$u(\delta t_1) = \frac{U}{k} * C_i$$

$$u(\delta t_1) = \frac{0.003}{2.0} * 10 = 0.015 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่า (drift) ของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน, $u(\delta t_{1,d})$:

การเลื่อนค่าคือ การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าที่บ่งชี้ของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานตลอดระยะเวลาที่ใช้งาน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงมาตริวิทยาของเครื่องมือวัด การเลื่อนค่าของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานนี้สามารถหาได้จากประวัติการสอบเทียบที่ผ่านมาของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานนั้นๆ ในกรณีที่ผ่านมาการสอบเทียบมาเพียงหนึ่งครั้ง จะสามารถหาการเลื่อนค่าได้

จากค่าที่ระบุไว้ในคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเทอร์โมมิเตอร์นั้น ๆ หรืออาจใช้ค่าที่ได้จากการตรวจสอบเครื่องมือระหว่างช่วงการใช้งาน (Intermediate Check) โดยค่าที่ได้ควรจะมาจากการตรวจสอบไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง

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

ตัวอย่างที่ 4 : จากประวัติการสอบเทียบตลอดระยะเวลาการใช้งานหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานมีการเลื่อนค่าเท่ากับ $\pm 0.0005 \Omega$ ความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการเลื่อนค่านี้คือ

$$u(\delta t_{I,d}) = \frac{\pm Value}{\sqrt{3}} * C_i$$

$$u(\delta t_{I,d}) = \frac{0.0003}{\sqrt{3}} * 10 = 0.0017 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียด (resolution) ของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน, $u(\delta t_{res, std})$:

การที่เครื่องมือแสดงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงที่เล็กที่สุดที่สามารถสังเกตเห็นได้ ซึ่งจะถูกกำหนดลักษณะเฉพาะจากทางผู้ผลิต การกระจายของความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากค่าความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์จะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ตัวอย่างที่ 5 : ความละเอียดในการแสดงผลของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานมีค่าเท่ากับ $\pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความละเอียดของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานคือ

$$u(\delta t_{res, std}) = \frac{\pm 0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียด (resolution) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ, $u(\delta t_{res, tuc})$:

การที่เครื่องมือแสดงค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงที่เล็กที่สุดที่สามารถสังเกตเห็นได้ ซึ่งจะถูกกำหนดลักษณะเฉพาะจากทางผู้ผลิต การกระจายของความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากค่าความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์จะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ตัวอย่างที่ 6 : เทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบมีความละเอียดของการอ่านค่า $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์นี้ คือ

$$u(\delta t_{\text{reu, tuc}}) = \frac{\pm 0.05}{\sqrt{3}} = 0.029 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจาก repeatability ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน, $u(t_s)$:

การทวนซ้ำได้ (repeatability) ของการวัดคือความเที่ยงตรงการวัดภายใต้ชุดของเงื่อนไขการทวนซ้ำได้ของการวัด ค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะได้รับการประเมิน โดยการวิเคราะห์เชิงสถิติของค่าปริมาณที่วัดซ้ำหลายๆครั้ง ซึ่งการกระจายของความไม่แน่นอน จะมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ จำนวนชุดข้อมูลที่วัดลบลด้วยหนึ่ง ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจาก repeatability ของเทอร์โมมิเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 3

$$u(t_s) = S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

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

n คือจำนวนครั้งของการวัดซ้ำ

S_x คือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากการวัด ซึ่งหาได้ตามสมการที่ 4

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(m-1)} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

เมื่อ x_i คือข้อมูลที่ได้จากการวัด

m คือจำนวนข้อมูลที่ทำกรวัด

\bar{x} คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการวัดซึ่งหาได้โดยสมการที่ 5

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} \quad (5)$$

ตัวอย่างที่ 7 : ผลจากการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (กำหนดเป็น: TUC) และเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (กำหนดเป็น: Standard) โดยมีผลการวัดซ้ำครั้งเดียว ดังนี้

Standard / °C	TUC / °C	TUC / °C	Standard / °C
300.90	300.0	300.0	300.70
300.90	300.0	300.0	300.70

300.80	300.0	300.0	300.60
300.80	300.0	300.0	300.70
300.80	300.0	300.0	300.80

โดยที่ สำหรับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน จะมีค่าแก้ที่อุณหภูมิ 300 °C เป็น 0.1 °C
จากข้อมูลข้างต้นจะสามารถหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานวัดได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = \frac{3007.7}{10} = 300.77 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ดังนั้นอุณหภูมิที่แท้จริงของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานคือ 300.77 °C + 0.1 °C = 300.87 °C
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจากการวัดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน คือ

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (x_i - 300.77)^2} = 0.095 \text{ } ^\circ\text{C}$$

จะได้ว่า ESDM มีค่าเป็น $S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \frac{0.095 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{10}} = 0.030 \text{ } ^\circ\text{C}$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ (repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานคือ

$$u(t_S) = S_{\bar{x}} = 0.030 \text{ } ^\circ\text{C}$$

โดยมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) = 10-1 = 9

- ความไม่แน่นอนเนื่องจาก repeatability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ, $u(t_{inc})$:

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการทวนซ้ำ (repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกับความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในกรณีของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานซึ่งความไม่แน่นอนในการวัดจะสามารถหาได้ตามสมการที่ 3 เช่นกัน

ตัวอย่างที่ 8 : จากชุดข้อมูลตัวอย่างที่ 7 สามารถหาค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการทวนซ้ำ(repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบได้ตามลำดับขั้นดังนี้

ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบวัดได้สามารถหาได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = \frac{3000}{10} = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจากการวัดของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ คือ

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (x_i - 300)^2} = 0.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

ซึ่งทำให้ได้ค่า ESDM เป็น $S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \frac{0.0 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{1}} = 0.0 \text{ } ^\circ\text{C}$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ (repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ คือ

$$u(t_{\text{rec}}) = 0.0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

โดยมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) = 10-1 = 9

- ความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นหนึ่งเดียว (non-uniformity) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ, $u(\delta t_{\text{uni}})$:

ค่า Non-uniformity แหล่งกำเนิดอุณหภูมิไม่ว่าจะเป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลางหรือแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้อากาศเป็นตัวกลาง จะได้ค่าดังกล่าวจากการประเมินคุณสมบัติหรือจากผลของการสอบเทียบ ซึ่งผลดังกล่าวต้องครอบคลุมช่วงอุณหภูมิใช้งาน ลักษณะการกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นหนึ่งเดียว (non-uniformity) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ตัวอย่างที่ 9 : ผลการจากประเมินคุณสมบัติเฉพาะของค่าความไม่แน่นอนหนึ่งเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่าเท่ากับ $\pm 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการไม่เป็นหนึ่งเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิคือ

$$u(\delta t_{\text{uni}}) = \frac{0.3 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.173 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- ความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เสถียร (instability) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ, $u(\delta t_{sta})$:

ค่าความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิไม่ว่าจะเป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลางหรือแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้อากาศเป็นตัวกลาง จะได้ค่าดังกล่าวจากการประเมินคุณสมบัติหรือจากผลของการสอบเทียบ ซึ่งผลดังกล่าวต้องครอบคลุมช่วงอุณหภูมิใช้งาน ลักษณะการกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ตัวอย่างที่ 10 : ผลการจากประเมินคุณสมบัติเฉพาะของค่าความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่าเท่ากับ ± 0.3 °C ดังนั้นความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิคือ

$$u(\delta t_{sta}) = \frac{0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.173 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- ความไม่แน่นอนเนื่องจากเสถียรของเครื่องมือในเวลาสั้นๆ (short term stability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่นำมาสอบเทียบ, $u(\delta t_{st})$:

การวัด Short term stability มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจความเสถียรของเทอร์โมมิเตอร์ที่นำมาสอบเทียบ และสามารถนำมาใช้ในเป็นตัวการประมาณค่าเสถียรของเครื่องมือได้ ในกรณีที่ไม่ต้องการค่าความไม่แน่นอนที่สูงมาก

การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจาก Short term stability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบจะลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ตัวอย่างที่ 11 : จากการหา Short term stability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่นำมาสอบเทียบ โดยการใช้ค่าแก้ที่อุณหภูมิแรกที่ทำกรสอบเทียบและอุณหภูมิแรกหลังจากเสร็จสิ้นการสอบเทียบทุกๆ มีค่าเท่ากับ ± 0.1 °C ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจาก Short term stability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ จะมีค่าเท่ากับ

$$u(\delta t_{st}) = \frac{0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.058 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- ความไม่แน่นอนเนื่องจากการนำความร้อนของก้านหัววัดอุณหภูมิ (Stem conduction of Temperature Sensor) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ, $u(\delta t_{hc})$:

Stem conduction of Temperature Sensor คือ ผลกระทบจากการนำความร้อนของก้านหัววัดอุณหภูมิที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 6 มิลลิเมตร [6] และใช้ร่วมกับแหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้

อากาศเป็นตัวกลางที่มีขนาดช่องใส่ (bore) ใหญ่กว่าหัววัดอุณหภูมิ 0.5 มิลลิเมตร และหรือระยะความลึกในการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิน้อยกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัดอย่างใดอย่างหนึ่ง การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจาก Stem conduction of Temperature Sensor ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ การแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ตัวอย่างที่ 13 : จากการหา Stem conduction of Temperature Sensor ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบที่จุดสอบเทียบสูงสุด มีค่าอยู่ ± 0.1 °C ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจาก Stem conduction of Temperature Sensor ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ จะมีค่าเท่ากับ

$$u(\delta t_{hc}) = \frac{0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.058 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- ความไม่แน่นอนเนื่องจากการชดเชยค่าอุณหภูมิภายในหน่วยแสดงผลคลาดเคลื่อน (Internal Junction Error) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ กรณีที่หัววัดอุณหภูมิที่ต่อรวมเป็นแบบเทอร์โมคัปเปิล, $u(\delta t_{IRJ})$:

การชดเชยค่าอุณหภูมิภายในของหน่วยแสดงผลคลาดเคลื่อนมีสาเหตุมาจากสภาวะแวดล้อมรอบๆ เทอร์โมมิเตอร์ที่นำมาสอบเทียบ ส่งผลต่อผลการวัดของเครื่องมือที่นำมาสอบเทียบ สามารถจำลองสภาวะแวดล้อมหรือใช้ค่าจากผู้ผลิตเพื่อหาค่าดังกล่าว

การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากการชดเชยค่าอุณหภูมิภายในหน่วยแสดงผลคลาดเคลื่อน (Internal Junction Error) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่นำมาสอบเทียบ มีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ตัวอย่างที่ 14 : จากข้อกำหนดของผู้ผลิตระบุ Internal junction error มีค่าเท่ากับ 0.1 °C ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง 1 °C ถ้าห้องปฏิบัติการสอบเทียบกำหนดการควบคุมอุณหภูมิห้องอยู่ที่ 23 ± 3 °C ซึ่งค่าดังกล่าวจะส่งผลทำให้ผลการวัดผิดพลาดประมาณ ± 0.3 °C ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจาก internal junction error ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ จะมีค่าเท่ากับ

$$u(\delta t_{IRJ}) = \frac{0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.173 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- ความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นเอกรูปของหัววัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิล (Inhomogeneity of Thermocouple), $u(\delta t_{In})$:

ความไม่เป็นเอกรูปของเทอร์โมคัปเปิลเป็นสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลทุกตัว จะมีค่ามาหรือน้อยขึ้นอยู่กับคุณภาพของเทอร์โมคัปเปิล การใช้งานและการบดจ่อของสายเทอร์โมคัปเปิล ซึ่งค่าความไม่แน่นอน

เหล่านี้สามารถนำค่าที่หน่วยงานต่างๆ ได้ทำการทดสอบไว้มาใช้เป็นอ้างอิงในการใช้งานได้ เช่น APMP (Asia Pacific Metrology Programme), EUROMET (European Collaboration in Measurement Standards) หรือจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ แต่หากมีความสามารถที่จะทำการทดสอบเองได้ ก็จะทำให้ค่าความไม่แน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลมีความถูกต้องมากขึ้น

การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าความไม่แน่นอนของหัววัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิล ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ การแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ตัวอย่างที่ 15 : ค่าความไม่แน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้ทำการทดลองไว้ เทอร์โมคัปเปิลชนิดโลหะพื้นฐานมีค่าอยู่ 0.3 % of output ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าดังกล่าวได้ เช่น ถ้าสอบเทียบที่เทอร์โมมิเตอร์อุณหภูมิ 300 °C ค่าความไม่แน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลจะมีค่าเท่ากับ 0.9 °C ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานค่าความไม่แน่นอนของหัววัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิล ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ จะมีค่าเท่ากับ

$$u(\delta t_{in}) = \frac{0.9 \text{ } ^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.52 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- **งบความไม่แน่นอน (Uncertainty budget) ในการสอบเทียบ**

เมื่อทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นการสอบเทียบตามวิธีการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ความไม่แน่นอนต่างๆ เหล่านี้สามารถนำมารวมไว้ในรูปแบบของงบความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเพื่อหาว่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combined standard uncertainty, u_c) ที่เกิดขึ้นในการสอบเทียบนั้นมีค่าเท่าใด ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมสามารถหาได้ตามสมการที่ 6

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{x_i}^2 c_i^2} \quad (6)$$

เมื่อ u_{x_i} คือค่าความไม่แน่นอนในมาตรฐานของแต่ละองค์ประกอบ

c_i คืออัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณ output ต่อ Input

หาค่าความองศาความเป็นอิสระยังผล Effective Degree of Freedom โดยใช้สูตรของ Welch-Satterthwait เพื่อหาค่าตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, k) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการ ด้วยการนำค่าที่คำนวณได้จากสมการ 7 ไปเทียบจากตาราง Student's "t" distribution

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_1^4(y)}{v_1} + \frac{u_2^4(y)}{v_2} + \dots + \frac{u_n^4(y)}{v_n}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (7)$$



นำความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม u_c ที่ได้จากสมการที่ 6 คูณด้วยค่าตัวประกอบครอบคลุมจะได้เป็นค่าของความไม่แน่นอนมาตรฐานขยาย (Expanded standard uncertainty, U) ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ 8

$$U = k u_c \tag{8}$$

ตารางที่ 1 ตัวอย่างงบความไม่แน่นอน (Uncertainty budget) การสอบเทียบเทอร์มิสเตอร์ที่ต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิชนิดเทอร์โมคัปเปิลที่อุณหภูมิ 300 °C ในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่เป็น Liquid Bath

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	300.87	-	0.097 °C	9	Normal	1.0	-	0.097 °C
t_x	300.0	-	0.000 °C	9	Normal	1.0	-	0.000 °C
δt_s	0	-	0.25 °C	∞	Normal	1.0	-	0.25 °C
$\delta t_{s,d}$	0	-	0.2887 °C	∞	Normal	1.0	-	0.2887 °C
δt_i	0	-	0.0015 Ω	∞	Normal	10 / Ω	-	0.015 °C
$\delta t_{i,d}$	0	-	0.00173 Ω	∞	Rectangular	10 / Ω	-	0.0173 °C
$\delta t_{res,std}$	0	-	0.0029 °C	∞	Rectangular	1.0	-	0.0029 °C
$\delta t_{reu,tuc}$	0	-	0.029 °C	∞	Rectangular	1.0	-	0.029 °C
δt_{uni}	0	-	0.173 °C	∞	Rectangular	1.0	-	0.173 °C
δt_{sta}	0	-	0.173 °C	∞	Rectangular	1.0	-	0.173 °C
δt_{st}	0	-	0.058 °C	∞	Rectangular	1.0	-	0.058 °C
δt_{hc}	0	-	0.058 °C	∞	Rectangular	1.0	-	0.058 °C
δt_{IRJ}	0	-	0.173 °C	∞	Rectangular	1.0	-	0.173 °C
δt_{In}	0	-	0.52 °C	∞	Rectangular	1.0	-	0.52 °C
u_c								0.7236 °C
C_x	0.87 °C				$k=2$			1.45 °C

8. การรายงานผล

เพื่อให้การรายงานผลการสอบเทียบเป็นไปตาม มอก.17025 ในข้อ 5.10 ใบบรายงานผลการสอบเทียบจะต้องประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ อย่างน้อยดังนี้ [5]

1. หัวเรื่อง
2. ชื่อและที่อยู่ของห้องปฏิบัติการ และสถานที่ทำการสอบเทียบ
3. ชื่อที่อยู่ของลูกค้า
4. การชี้แจงเฉพาะของรายงานผลการสอบเทียบ และมีการชี้แจงในแต่ละหน้า และการชี้แจงถึงการสิ้นสุดรายงานผลการสอบเทียบ
5. ระบุวิธีที่ใช้ ระบุกลุ่มของหัววัดอุณหภูมิ สภาวะที่ทำการทดสอบ Internal Junction error (กรณีทำการทดสอบเอง)
6. รายละเอียดของตัวอย่าง และการชี้แจงอย่างไม่ครบเครือ
7. วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง และวันเดือนปีที่ทำการสอบเทียบ
8. ผลการสอบเทียบ พร้อมกับหน่วยวัดที่เหมาะสม
9. ชื่อ หน้าที่ และลายมือชื่อ หรือการชี้แจงอื่นที่เทียบเท่าของบุคคลที่มีอำนาจหน้าที่ในการออกใบรับรองผลการสอบเทียบ
10. ข้อความที่ระบุว่ารายงานนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาสอบเทียบเท่านั้นและใบรับรองผลการสอบเทียบจะต้องรวมถึงข้อมูลดังต่อไปนี้ ในกรณีที่เป็นต่อการแปลผลการสอบเทียบ
11. ภาวะต่างๆ ที่สอบเทียบซึ่งมีผลต่อการวัด
12. หลักฐานที่แสดงถึงการสอบกลับได้ของการวัด



เอกสารอ้างอิง

1. ANSI/NCSL, Calibration & Measurement & Test Equipment - General Requirements, ANSI/NCSL Z540-1, 1994
2. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML : International vocabulary of metrology-Basic and associated terms, 3rd edition, JCGM 200:2008 (En/Th), 2008
3. Metrology – in short, 3rd edition
4. ISO, Guide to the expression of uncertainty in measurement, 1st edition, 1995, ISBN 92-67-10188-9
5. ISO/IEC 17025, General requirement for the competence of testing and calibration laboratories, 2nd edition, 2005
6. Calibration of Temperature Block Calibrators, Euramet / cg-13 / v0.1, July 2007, European Association of National Metrology Institutes (EURAMET).