GUIDLINE OF CALIBRATION OF LIQUID – IN – GLASS THERMOMETER

TM/CG02/TT01/V03

September 2012

THERMOMETRY METROLOGY DEPARTMENT

NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY (THAILAND)

GUIDLINE OF CALIBRATION OF LIQUID – IN – GLASS THERMOMETER

วัตถุประสงค์ : เพื่อแนะนำแนวทางในการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์แบบแท่งแก้ว (Liquid-in-glass Thermometer) ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ –80 °C ถึง 400 °C โดยสอบย้อนกลับไปยังสเกลอุณหภูมิระหว่างประเทศ ITS-90

CALIBRATION OF
LIQUID – IN – GLASS THERMOMETER

สารบัญ

ขอบข่าย	3
คำนำ	3
คำนิยาม	3
การจัดการเครื่องมือ	7
การตรวจสอบเครื่องมือ	7
การสอบเทียบ	7
กระบวนการสอบเทียบ	10
การประเมินค่าความไม่แน่นอน	11
การรายงานผล	22
การประกันคุณภาพผลการวัด	22
คำแนะนำในการจัดการเครื่องมือ	22
เอกสารอ้างอิง	24

ขอบข่าย

เอกสารฉบับนี้ใช้เป็นแนวทางประกอบการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์แท่งแก้ว (Liquid-in-glass thermometer) ครอบคลุมลักษณะการจุ่ม 2 แบบ คือ ลักษณะการจุ่มแบบจุ่มแช่ทั้งหมด (Total Immersion) และลักษณะการจุ่มแบบจุ่มแช่บางส่วน (Partial Immersion) โดยวิธีการเปรียบเทียบค่ากับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Comparison Method) ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ –80 °C ถึง 400 °C เท่านั้น

คำนำ

การสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว โดยวิธีการเปรียบเทียบค่ากับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Comparison Method) สามารถทำได้สองวิธีแบ่งตามลักษณะการจุ่มของเทอร์โมมิเตอร์ วิธีที่หนึ่งการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วที่มีลักษณะการจุ่มแบบจุ่มแช่ทั้งหมด (Total Immersion) วิธีที่สองการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วที่มีลักษณะการจุ่มแบบจุ่มแช่บางส่วน (Partial Immersion) ทั้งสองวิธีมีกระบวนการสอบเทียบต่างกัน ซึ่งเกิดจากลักษณะการจุ่มของตัวเทอร์โมมิเตอร์เอง ความแตกต่างในการจุ่มของเทอร์โมมิเตอร์นั้น เกิดจากการออกแบบเทอร์โมมิเตอร์ เพื่อวัตถุประสงค์ในการนำเทอร์โมมิเตอร์ไปใช้งาน ซึ่งเทอร์โมมิเตอร์แบบจุ่มแช่ทั้งหมด จะเหมาะสมกับการวัดอุณหภูมิในภาชนะที่มีความลึกเหมาะสม สอดคล้องกับอุณหภูมิที่ทำการวัด สำหรับเทอร์โมมิเตอร์แบบจุ่มแช่บางส่วน จะเหมาะสมกับการวัดอุณหภูมิในภาชนะที่มีความลึกจำกัด แต่ต้องมีวิธีการแก้ค่าขณะนำไปใช้งาน มีความถูกต้องต่ำกว่าแบบแรก โดยรายละเอียดของการสอบเทียบทั้งสองวิธีและการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด จะได้นำเสนอในเอกสารนี้ในลำดับต่อไป

คำนิยาม

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

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

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

  เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานในเอกสารฉบับนี้หมายถึง เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานที่ใช้แสดงค่าอุณหภูมิจริง (True Temperature) และควรมีความถูกต้องสูงกว่าเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ซึ่งเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานจะต้องผ่านการสอบเทียบและรู้ค่าแก้ของอุณหภูมิที่อ่านได้ รวมทั้งความไม่แน่นอนของเทอร์โมมิเตอร์

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

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

  เทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ ในที่นี้หมายถึงเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วที่มีลักษณะการจุ่มแบบจุ่มแช่ทั้งหมดและแบบจุ่มแช่บางส่วน โดยวิธีการเปรียบเทียบค่ากับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Comparison method)

- **แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ** (Temperature Source) :

  แหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้สอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว นิยมใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Liquid Bath) ที่มีความลึกเหมาะสมสอดคล้องกับเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

- **เครื่องมือวัดแสดงผลหรือหน่วยแสดงผล** (Displaying Measuring Instrument) :

  เครื่องมือวัดที่ใช้บ่งชี้ที่สัญญาณออกที่ได้ แสดงในรูปที่สามารถมองเห็นได้ **[2]** เช่น แสดงผลออกมาเป็นความต้านทาน หรือความต่างศักย์ แม้กระทั่งแสดงผลออกมาเป็นอุณหภูมิโดยตรง

- **การสอบเทียบ** (Calibration) :

  ชุดของการปฏิบัติงานภายใต้เงื่อนไขที่ได้ระบุ เพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณกับค่าความไม่แน่นอนการวัดที่ได้จากมาตรฐานการวัดหรือวัสดุอ้างอิงรับรองและสิ่งบ่งชี้ที่สมนัยซึ่งมาพร้อมกับความไม่แน่นอนการวัดที่เชื่อมสัมพันธ์ของเครื่องมือวัด ระบบวัด หรือวัสดุอ้างอิงภายใต้การทดสอบ **[2]**

- **ความถูกต้อง** (Accuracy) :

  ความใกล้เคียงของการเป็นไปตามกันระหว่างค่าปริมาณที่วัดได้กับปริมาณจริงของสิ่งที่ถูกวัด **[3]**

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

  คุณสมบัติหนึ่งของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ เพื่อบ่งชี้การกระจายของอุณหภูมิที่พื้นที่ใช้งานของแหล่งกำเนิดที่อุณหภูมิใด ๆ ซึ่งการกระจายของอุณหภูมินี้อาจส่งผลต่อการวัดระหว่างเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบ

- **ความเสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ** (Stability of Temperature Source) **:**

  เสถียรภาพ (stability) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ คือการคงที่ของอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิใด ๆ ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ หากอุณหภูมินี้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้น ๆ หรือแหล่งกำเนิดอุณหภูมิมีความไม่เสถียร (instability) เกิดขึ้น ก็ย่อมที่จะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ของทั้งเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

- **ความสามารถในการอ่าน** (Readability of TUC) :
  คือความสามารถในการอ่านค่าขีดแบ่งสเกล (scale division) ของเทอร์โมมิเตอร์ได้ดีกว่าขีดแบ่งสเกลปกติ ซึ่งในการแบ่ง อาจเป็นสัดส่วนกับขีดแบ่งสเกล เช่น 1/ 5 ของขีดแบ่งสเกล หมายความว่า บุคคลหรือห้องปฏิบัติการมีความสามารถในการแยกแยะขีดแบ่งสเกลได้ดีกว่าปกติประมาณ 5 เท่า
- **ความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์โมมิเตอร์** (Non-Linearity) :
  ความไม่เป็นเชิงเส้นเป็นสมบัติของเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว อาจมีสาเหตุจากช่วงระหว่างขีดแบ่งสเกลแสดงค่าอุณหภูมิที่ไม่เท่ากัน ความหนาขีดแบ่งสเกล และความไม่สมบูรณ์ของท่อนำ (Capillary) ของเหลว ซึ่งอาจจะส่งผลเมื่อนำเทอร์โมมิเตอร์ไปใช้งานที่อุณหภูมิอื่น ๆ ที่ต่างจากที่สอบเทียบไว้

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

  พารามิเตอร์ที่ไม่มีค่าเป็นลบที่ใช้บ่งบอกลักษณะเฉพาะของการกระจายของค่าปริมาณของสิ่งที่ถูกวัด โดยตั้งอยู่บนพื้นฐานของข้อมูลที่ใช้ **[2]** และอาจกล่าวได้ว่าความไม่แน่นอนในการวัดเป็นตัวชี้วัดเชิงปริมาณของคุณภาพของผลการวัด ทำให้ผลการวัดนั้นสามารถเปรียบเทียบกับผลการวัด สิ่งอ้างอิง สมบัติเฉพาะ หรือมาตรฐานอื่นๆได้โดยปกติแล้วการประมาณความไม่แน่นอนโดยเป็นไปตาม 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]**

- **การทวนซ้ำได้ของเครื่องมือวัด** (Repeatability of a Measuring Instrument) :

  ความใกล้เคียงของการเป็นไปตามกันระหว่างการวัดที่ติดต่อกันของสิ่งที่ถูกวัดอันเดิมภายใต้เงื่อนไขคงเดิมของการวัด **[3]**

- **การเลื่อน** (Drift) :

  การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าที่บ่งชี้ตลอดช่วงเวลาที่ใช้งานอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงมาตรวิทยาของเครื่องมือวัด

- **ค่าแก้** (Correction value) :

  ค่าที่บวกเพิ่มเข้าไปทางพีชคณิตกับผลการวัดที่ยังไม่ได้รับการแก้ไขเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ **[3]**

- **Hysteresis:** ความต่างของผลการวัดที่จุดสอบเทียบเดียวกันอันเป็นผลจากการเพิ่มอุณหภูมิและลดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ

- **Auxiliary Thermometer:** คือเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วที่ใช้วัดอุณหภูมิรอบ ๆ ก้านแก้วของเทอร์โมมิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบแบบจุ่มแช่บางส่วน (Partial Immersion)

- **Emergent stem temperature effect : การวัดอุณหภูมิก้านแก้วของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบมีความคลาดเคลื่อน**

  ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น เป็นความคลาดเคลื่อนของการวัดอุณหภูมิก้านแก้วขณะสอบเทียบ กับค่าอุณหภูมิก้านแก้วที่อ้างอิงจากมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่ถูกกำหนดจากการออกแบบเทอร์โมมิเตอร์นั้น ๆ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้อาจจะส่งผลกับผลการสอบเทียบ
  การประเมินค่าความไม่แน่นอนของ ค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจใช้การประมาณค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 10% ของค่าแก้ที่คำนวณจากสมการดังต่อไปนี้

  จากสมการ

  $$Emergent\ stem\ temperature\ correction = kn(t_{sp} - t_{obs})$$

  เมื่อ k = ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวของของเหลวที่บรรจุในเทอร์โมมิเตอร์
  สัมประสิทธิ์การขยายตัวของ Mercury = 0.00016
  สัมประสิทธิ์การขยายตัวของ Ethanol = 0.00104
  n = จำนวนสเกลแสดงค่าของเทอร์โมมิเตอร์ ในส่วนที่โผล่พ้นจากระดับของเหลวถึงอุณหภูมิที่ทำการวัด
  t_{sp} = ค่าอุณหภูมิก้านแก้วอ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM E1 , Table 4 **[7]**
  t_{obs} = ค่าอุณหภูมิก้านแก้วที่วัดได้ขณะทำการสอบเทียบ

- **ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ** (Systematic Error) :

  องค์ประกอบของความคลาดเคลื่อนในการวัดโดยที่ในการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้งยังคงมีความคงตัวหรือการแปรผันในลักษณะที่ทำนายได้ **[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) :

  ผลคูณของความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวมและตัวประกอบคลอบคลุมซึ่งมีค่ามากกว่าหนึ่ง **[2]** ซึ่งในการรายงานผลการสอบเทียบจะใช้ในการรายงานถึงค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบนั้น ๆ

การสอบเทียบ

1. เครื่องมือ/มาตรฐานที่ใช้

1.1 เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Standard thermometer) ควรมีความถูกต้องกว่าเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

1.2 แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (Temperature Source) ที่มีความลึกที่เหมาะสมหรือมีความลึกไม่น้อยกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัววัดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน และความลึกควรเพียงพอต่อระยะจุ่มของเทอร์โมมิเตอร์ที่จะสอบเทียบ ซึ่งแหล่งกำเนิดอุณหภูมินี้ใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Liquid Bath) หรือแหล่งกำเนิดอุณหภูมิใดๆ ที่ไม่ส่งผลกับผลการสอบเทียบ

1.3 Auxiliary Thermometer ใช้วัดอุณหภูมิก้านแก้ว (Emergent Stem Temperature) สำหรับการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ทีมีลักษณะการจุ่มแบบจุ่มแช่บางส่วน (Partial Immersion) จะประกอบไปด้วย Faden และ Stem

2. การเตรียมเทอร์โมมิเตอร์ที่ก่อนการสอบเทียบ [8]

2.1 ตรวจสอบลักษณะภายนอกของเทอร์โมมิเตอร์ดังกล่าวว่ามีการชำรุดใด ๆ หรือไม่ เช่น การแยกตัวของของเหลว ความสมบูรณ์ของขีดแบ่งสเกล การแตกร้าวของตัวเทอร์โมมิเตอร์ หรืออื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อผลการสอบเทียบ อาจใช้แนวทางดังนี้

- ขีดแบ่งสเกลของเทอร์โมมิเตอร์ ต้องมีความชัดเจน และมีความต่อเนื่องของขีดแบ่งสเกล

- การแยกตัวของของเหลวที่บรรจุในเทอร์โมมิเตอร์ และการติดค้างของของเหลวบริเวณผนังท่อนำของเหลวหรือบริเวณอื่น ๆ
- การปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมในท่อนำของเหลว และความสมบูรณ์ของของเหลวที่บรรจุในกระเปาะของเทอร์โมมิเตอร์

2.2 การเตรียมเทอร์โมมิเตอร์ก่อนการสอบเทียบมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับตัวเทอร์โมมิเตอร์ ไม่ว่าจะเกิดจากการใช้งาน การขนส่งหรืออื่น ๆ และเป็นการเตรียมสภาพความพร้อมให้กับเทอร์โมมิเตอร์ก่อนนำไปสอบเทียบ ส่งผลให้ผลการสอบเทียบของเทอร์โมมิเตอร์มีความน่าเชื่อถือ เช่น ควรเก็บเทอร์โมมิเตอร์ที่อุณหภูมิห้องไม่น้อยกว่า 72 ชั่วโมงหรือวิธีการอื่น เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเทอร์โมมิเตอร์มีความเสถียรเพียงพอ

3. การเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์ในการสอบเทียบ

3.1 ตรวจสอบว่าเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานที่จะใช้ในการสอบเทียบว่าอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งาน

3.2 ตรวจสอบสัมประสิทธิ์ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานให้ตรงกับค่าที่ได้จากการสอบเทียบล่าสุดหรือตรงกับหัววัดอุณหภูมิที่จะนำมาใช้งาน (กรณีหน่วยแสดงผลมีการเก็บบันทึกค่าสัมประสิทธิ์ของหัววัดอุณหภูมิได้)

3.3 ทำการตรวจสอบลักษณะการจุ่มของเทอร์โมมิเตอร์ที่จะสอบเทียบว่าเป็นแบบใด เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการสอบเทียบและการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด การตรวจสอบดังกล่าวควรอ้างอิงข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิตเทอร์โมมิเตอร์นั้น ๆ หรือข้อบ่งชี้ที่แสดงบนตัวเทอร์โมมิเตอร์เป็นหลัก

3.4 ทำการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิซึ่งการติดตั้งควรเป็นไปตามข้อกำหนดของเทอร์โมมิเตอร์ในแต่ละชนิดตามความเหมาะสม

3.5 เปิดเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานทิ้งไว้เพื่อ Warm up เป็นเวลาไม่น้อยกว่าครึ่งชั่วโมงหรือตามเวลาที่กำหนดจากบริษัทผู้ผลิตเทอร์โมมิเตอร์นั้น ๆ ก่อนเริ่มกระบวนการสอบเทียบ

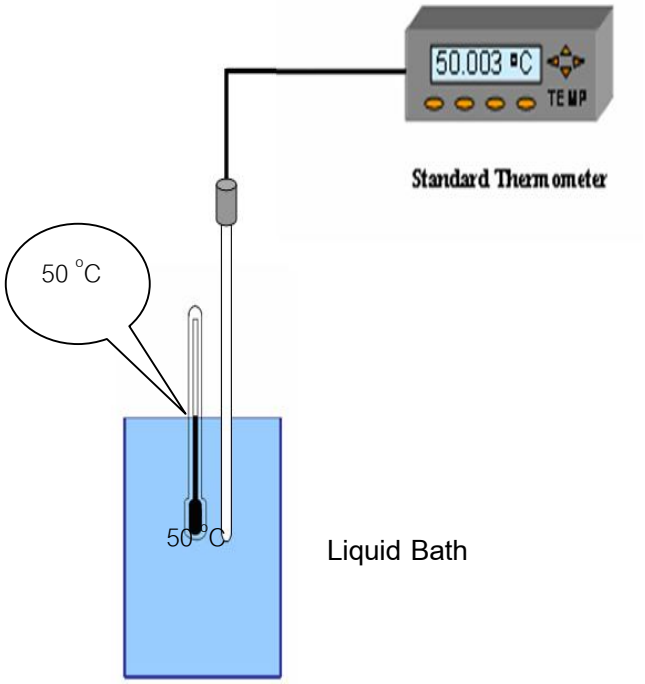
4 Measuring set-up

การติดตั้งหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ โดยให้ระยะจุ่มของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานควรไม่น้อยกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง หรือระยะที่ไม่ส่งผลกระทบต่อผลการวัดของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐาน สำหรับการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วในแหล่งกำเนิดอุณหภูมินั้น ควรติดตั้งตามลักษณะการจุ่มของเทอร์โมมิเตอร์ โดยมีรายละเอียดในการติดตั้งดังนี้

4.1 การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วที่มีลักษณะการจุ่มแบบจุ่มแช่ทั้งหมด (Total Immersion)

การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์แบบจุ่มแช่ทั้งหมดลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ลักษณะนี้ ต้องจุ่มเทอร์โมมิเตอร์จนขีดแบ่งสเกลบอกค่าอุณหภูมิที่จะทำการสอบเทียบให้เสมอกับระดับผิวของของเหลว ซึ่งระยะจุ่มของเทอร์โมมิเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบ เช่น ถ้าต้องการสอบเทียบที่อุณหภูมิ 50 °C ต้องจุ่มเทอร์โมมิเตอร์จนขีดแบ่งสเกลบอกค่าอุณหภูมิ 50 °C เสมอกับระดับผิวของ

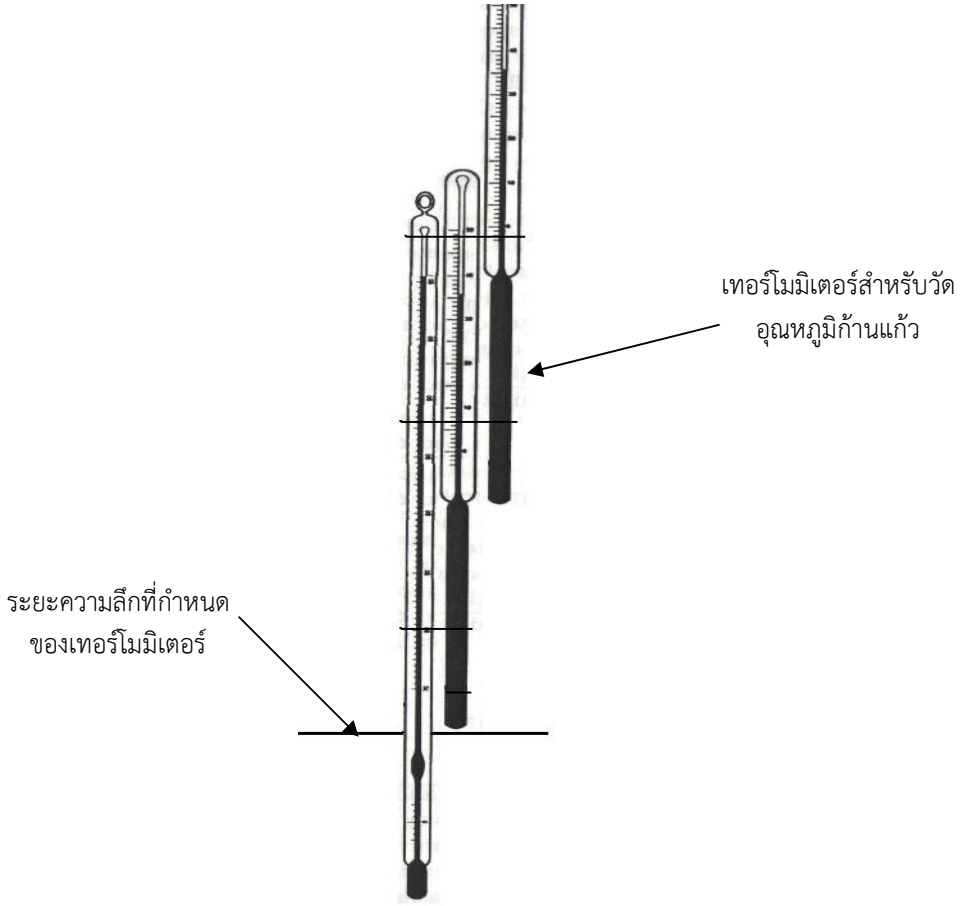
ของเหลว หรือยอมให้ขีดแบ่งสเกลบอกค่าอุณหภูมิ 50 °C สูงกว่าระดับผิวของของเหลวไม่เกิน 10 มิลลิเมตร และตัวเทอร์โมมิเตอร์ควรตั้งฉากกับพื้นในทุกมุม ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่1: การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์แบบจุ่มแช่ทั้งหมด

4.2 การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วที่มีลักษณะการจุ่มแบบจุ่มแช่บางส่วน (Partial Immersion)

การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์แบบจุ่มแช่บางส่วนลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ลักษณะนี้ ต้องจุ่มเทอร์โมมิเตอร์ในระดับความลึกที่ถูกกำหนดไว้บนตัวของเทอร์โมมิเตอร์ให้เสมอกับระดับผิวของของเหลว และทำการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ (Faden thermometer หรือ Stem thermometer) ใช้วัดอุณหภูมิก้านแก้วของเทอร์โมมิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบโดยการแนบติดกับเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบและต้องครอบคลุมตั้งแต่ระดับผิวของของเหลวจนถึงขีดแบ่งสเกลบอกค่าอุณหภูมิที่ต้องการสอบเทียบ เพื่อเก็บค่าอุณหภูมิก้านแก้วของเทอร์โมมิเตอร์ดังกล่าวขณะทำการสอบเทียบ นำไปใช้สำหรับการคำนวณผลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสอบเทียบ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่2: การติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์แบบจุ่มแช่บางส่วน

หมายเหตุ: คำแนะนำในการติดตั้ง Auxiliary Thermometer ให้ดูจากมาตรฐานต่างๆ เช่น ASTM, NML, NIST,

5. กระบวนการสอบเทียบ

5.1 ช่วงอุณหภูมิสำหรับการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์

5.1.1 ควรเริ่มสอบเทียบจากอุณหภูมิต่ำสุดไปสู่อุณหภูมิสูงสุด และกลับมาที่อุณหภูมิต่ำสุดอีกครั้งเพื่อเป็นการหาค่า short term stability โดยก่อนทำการวัดเพื่อหาค่า Short term stability นั้น เทอร์โมมิเตอร์ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขการเตรียมเทอร์โมมิเตอร์ก่อนการสอบเทียบในหัวข้อ 2

5.1.2 กรณีที่ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบน้อยกว่า 0.02 $^{\circ}$C ควรเริ่มสอบเทียบจากอุณหภูมิต่ำสุดไปสู่อุณหภูมิสูงสุดและจากอุณหภูมิสูงสุดไปสู่ต่ำสุด โดยจุดสอบเทียบของทั้งสองต้องเป็นจุดสอบเทียบเดียวกันครั้งเพื่อเป็นการหาค่า hysteresis

5.2 การบันทึกผลการสอบเทียบ

การบันทึกผลให้บันทึกค่าอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน(STD) และค่าอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (TUC) สลับกันไป ยกตัวอย่างเช่น

STD⟶TUC⟶TUC⟶STD
STD⟶TUC⟶TUC⟶STD
STD⟶TUC⟶TUC⟶STD
STD⟶TUC⟶TUC⟶STD
STD⟶TUC⟶TUC⟶STD

5.2.1 ในกรณีที่ทำการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ประเภท Partial immersion ให้บันทึกค่าอุณหภูมิก้านแก้วของเทอร์โมมิเตอร์ที่นำมาสอบเทียบด้วย

5.3 นำผลที่ได้จากการวัดในข้อที่ 5.2 มาทำการหาค่าแก้ให้แก่เทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบตามสมการที่ 1

ค่าแก้ (Correction) = **ค่าจริง** (True value) - **ค่าที่อ่านได้** (Uncorrected value) (1)

โดย **ค่าจริง** คือ ค่าอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (STD)
ค่าที่อ่านได้ คือ ค่าอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (TUC)

6. การประเมินความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในการสอบเทียบ

จากสมการที่ 1 สามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วดังสมการที่ 2

$$C_x = (t_S - t_{tuc}) + \delta t_S + \delta t_{Sd} + \delta t_I + \delta t_{Id} + \delta t_{res,std} + \delta t_{res,tuc} + \delta t_{uni} + + \delta t_{sta} + \delta t_{st} + \delta t_{hys} + \delta t_{nl} + \delta t_{es} \quad (2)$$

เมื่อ C_x = ค่าแก้ของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
t_S = อุณหภูมิที่อ่านได้โดยเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน
t_{tuc} = ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้โดยเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ
δt_S = ค่าแก้เนื่องจากค่าความไม่แน่นอนของหัววัดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน
δt_{Sd} = ค่าแก้เนื่องจากการเลื่อนค่า (drift) ของหัววัดอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน
δt_I = ค่าแก้เนื่องจากค่าความไม่แน่นอนของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน
δt_{Id} = ค่าแก้เนื่องจากการเลื่อนค่า (drift) ของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน
$\delta t_{res,std}$ = ค่าแก้เนื่องจากค่าความละเอียด (resolution) ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน
$\delta t_{res,tuc}$ = ค่าแก้เนื่องจากความสามารถในการอ่านค่า (readability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ

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

δt_{sta} = ค่าแก้เนื่องจากค่าความไม่สเถียร (instability) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ

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

δt_{hys} = ค่าแก้เนื่องจากค่าความแตกต่างของอุณหภูมิที่อ่านได้ระหว่างอุณหภูมิขาขึ้นกับอุณหภูมิขาลง (hysteresis) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ

δt_{nl} = ค่าแก้เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น (non linearity) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ

δt_{es} = ค่าแก้เนื่องจากการวัดอุณหภูมิก้านแก้ว (emergent stem error) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบมีความคลาดเคลื่อน

<u>การคำนวณความไม่แน่นอนต่างๆที่เกิดขึ้นในการสอบเทียบ</u>

ตัวอย่างการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ Liquid-in-Glass Thermometer ชนิด Total Immersion ที่อุณหภูมิ 50 °C ซึ่งจากสมการที่ 2 ความไม่แน่นอนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์สามารถแจกแจงได้ดังนี้

- **ค่าความไม่แน่นอนของหัววัดเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน, $u(\delta t_s)$:**

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

  <u>ตัวอย่างที่ 1</u> : จากรายงานผลการสอบเทียบของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานที่ 50 °C มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 0.01 °C ด้วยระดับความเชื่อมั่นในการวัด (Confidence level) ที่ 95 % ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, *k*) เท่ากับ 2 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานในการสอบเทียบครั้งนี้คือ

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

$$u(\delta t_s) = \frac{0.01}{2.0} = 0.005\ ^{0}\mathrm{C}$$

- **ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่า(drift) ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน, $u(\delta t_{Sd})$:**

  การเลื่อนค่าคือ การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าที่บ่งชี้ของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานตลอดระยะเวลาที่ใช้งาน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงมาตรวิทยาของเครื่องมือวัด การเลื่อนค่าของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานนี้สามารถหาได้จากประวัติการสอบเทียบที่ผ่านมาของหัววัดอุณหภูมินั้น ๆ ในกรณีที่

เทอร์โมมิเตอร์ผ่านการสอบเทียบมาเพียงหนึ่งครั้ง จะสามารถหาการเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์ได้จากค่าที่ระบุไว้ในคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเทอร์โมมิเตอร์นั้น ๆ หรืออาจใช้ค่าที่ได้จากการตรวจสอบเครื่องมือระหว่างช่วงการใช้งาน (Intermediate Check) โดยค่าที่ได้ควรจะมาจากการตรวจสอบไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง

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

ตัวอย่างที่ 2 : จากประวัติการสอบเทียบตลอดระยะเวลาการใช้งานหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานมีการเลื่อนค่าเท่ากับ ± 0.015 °C ความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการเลื่อนค่านี้คือ

$$u(\delta t_{Sd}) = \frac{\pm Value}{\sqrt{3}}$$

$$u(\delta t_{Sd}) = \frac{0.015}{\sqrt{3}} = 0.0087\ ^{0}\mathrm{C}$$

- **ค่าความไม่แน่นอนของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน, $u(\delta t_I)$:**

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

ตัวอย่างที่ 3 : จากใบรายงานผลการสอบเทียบของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน มีค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ 0.003 Ω ด้วยระดับความเชื่อมั่นในการวัด (Confidence level) ที่ 95 % ตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, *k*) เท่ากับ 2 โดยขณะใช้งาน หน่วยแสดงผลจะต่อร่วมกับหัววัดอุณหภูมิชนิด 25 Ω ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณ output ต่อ Input (Sensitivity Coefficient, C_i) ประมาณ 10 ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานของหน่วยแสดงผลของ เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานในการสอบเทียบครั้งนี้คือ

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

$$u(\delta t_I) = \frac{0.003}{2.0} * 10 = 0.015\ ^{o}\mathrm{C}$$

- **ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่า(drift) ของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน, $u(\delta t_{\mathrm{Id}})$:**

  การเลื่อนค่าคือ การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าที่บ่งชี้ของหัววัดอุณหภูมิมาตรฐานตลอดระยะเวลาที่ใช้งาน อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงมาตรวิทยาของเครื่องมือวัด การเลื่อนค่าของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานนี้สามารถหาได้จากประวัติการสอบเทียบที่ผ่านมาของหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานนั้น ๆ ในกรณีที่ผ่านการสอบเทียบมาเพียงหนึ่งครั้ง จะสามารถหาการเลื่อนค่าได้จากค่าที่ระบุไว้ในคุณลักษณะเฉพาะ (Specification) ของเทอร์โมมิเตอร์นั้น ๆ หรืออาจใช้ค่าที่ได้จากการตรวจสอบเครื่องมือระหว่างช่วงการใช้งาน (Intermediate Check) โดยค่าที่ได้ควรจะมาจากการตรวจสอบไม่น้อยกว่า 3 ครั้ง

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

  <u>ตัวอย่างที่ 4</u> : จากประวัติการสอบเทียบตลอดระยะเวลาการใช้งานหน่วยแสดงผลของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานมีการเลื่อนค่าเท่ากับ ± 0.0005 Ω ความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการเลื่อนค่านี้คือ

$$u(\delta t_{\mathrm{Id}}) = \frac{\pm Value}{\sqrt{3}} * C_i$$

$$u(\delta t_{\mathrm{Id}}) = \frac{0.013}{\sqrt{3}} = 0.008\ ^{0}\mathrm{C}$$

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

  เนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์แต่ละชนิดจะมีความละเอียด (resolution) ในการอ่านค่าที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงความไม่แน่นอนในการวัดที่จะเกิดจากเหตุนี้ด้วย ซึ่งค่า resolution ของเทอร์โมมิเตอร์นั้นจะถูกกำหนดไว้ในลักษณะเฉพาะของเทอร์โมมิเตอร์จากทางผู้ผลิต สำหรับการกระจายของความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากค่าความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์จะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

  <u>ตัวอย่างที่ 5</u> : เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานมีความละเอียดของการอ่านค่า 0.001 °C ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์นี้ คือ

$$u(\delta t_{\mathrm{res,std}}) = \frac{\pm 0.0005}{\sqrt{3}} = 0.00029\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

- **ค่าความไม่แน่นอนจากความสามารถในการอ่านค่า (readability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ , $u(\delta t_{\text{reu, tuc}})$:**

ความไม่แน่นอนเนื่องจากความสามารถในการอ่านค่า หรือความสามารถในการอ่านค่าขีดแบ่งสเกล (scale division) ของเทอร์โมมิเตอร์ได้ดีกว่าขีดแบ่งสเกลปกติ ซึ่งในการแบ่งนั้น เป็นสัดส่วนกับขีดแบ่งสเกล เช่น 1/ 5 ของขีดแบ่งสเกลปกติ หมายความว่า บุคคลหรือห้องปฏิบัติการมีความสามารถในการแบ่งขีดแบ่งสเกลได้ดีกว่าปกติประมาณ 5 เท่า ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นที่ต้องคำนึงถึงความผิดพลาดจากการอ่านค่า ซึ่งเป็นองค์ประกอบของความไม่แน่นอนในการวัดที่จะเกิดจากเหตุนี้ สำหรับการกระจายของความไม่แน่นอนอันเนื่องมาจากค่าความสามารถในการอ่านค่ามีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

<u>ตัวอย่างที่ 6</u> : เทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบมีขีดแบ่งสเกล 0.1 °C ห้องปฏิบัติการสามารถแบ่งขีดแบ่งสเกลดีกว่าสเกลปกติเท่ากับ 1/5 ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความสามารถในการอ่านค่าของเทอร์โมมิเตอร์นี้ คือ

มีความสามารถในการแบ่งขีดแบ่งสเกล = 1/ 5
สามารถความสามารถในการอ่านค่า = (0.1 x 1) / 5 = 0.02 °C
ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความสามารถในการอ่านค่า

$$u(\delta t_{\text{res, tuc}}) = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.012 \ ^{\circ}\text{C}$$

- **ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจาก repeatability ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน, $u(t_S)$:**

การทวนซ้ำได้ (repeatability) ของการวัดคือความเที่ยงตรงการวัดภายใต้ชุดของเงื่อนไขการทวนซ้ำได้ของการวัด ค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะได้จากการประเมิน โดยการวิเคราะห์เชิงสถิติของค่าที่วัดซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ซึ่งการกระจายของความไม่แน่นอน จะมีการแจกแจงแบบกติ (Normal distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ จำนวนชุดข้อมูลที่วัดลบด้วยหนึ่ง
ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจาก Repeatability ของเทอร์โมมิเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ 3

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

เมื่อ $S_{\bar{x}}$ คือ Experimental standard deviation of the mean (ESDM)
n คือจำนวนครั้งของการวัดซ้ำ
S_x คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากการวัด ซึ่งหาได้ตามสมการที่ 4

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

เมื่อ x_i คือ ข้อมูลที่ได้จากการวัด

m คือ จำนวนข้อมูลที่ทำการวัด

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการวัดซึ่งหาได้โดยสมการที่ 5

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

<u>ตัวอย่างที่ 7</u> : ผลจากการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ (กำหนดเป็น: TUC) และเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (กำหนดเป็น: Standard) ในการสอบเทียบ โดยผลการวัดทำการวัดซ้ำครั้งเดียว ดังนี้

Standard / °C	TUC / °C	TUC/ °C	Standard / °C
50.990	50.00	50.00	50.990
50.991	50.00	50.00	50.991
50.991	50.00	50.00	50.992
50.992	50.00	50.00	50.992
50.991	50.00	50.00	50.991

จากข้อมูลข้างต้นจะสามารถหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานวัดได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = \frac{509.911}{10} = 50.991 \ ^{\circ}\mathrm{C}$$

ดังนั้นอุณหภูมิที่แท้จริงของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานคือ 50.991 °C
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจากการวัดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน คือ

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(10-1)}\sum_{i=1}^{10}(x_i - 50.991)^2} = 0.00074 \ ^{\circ}\mathrm{C}$$

จะได้ว่า ESDM มีค่าเป็น $S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \frac{0.00074 \ ^{\circ}\mathrm{C}}{\sqrt{1}} = 0.00074 \ ^{\circ}\mathrm{C}$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ (repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานคือ

$$u(t_S) = S_{\bar{x}} = 0.00074 \ ^{\circ}\mathrm{C}$$

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

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

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการทวนซ้ำ (repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบที่มีการทวนซ้ำครั้งเดียว ซึ่งความไม่แน่นอนในการวัดจะสามารถหาได้ตามสมการที่ 3

<u>ตัวอย่างที่ 8</u> : จากชุดข้อมูลตัวอย่างที่ 7 สามารถหาค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากทวนซ้ำ(repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบได้ตามลำดับขั้นดังนี้

ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบวัดได้สามารถหาได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = \frac{500.00}{10} = 50.00 \ ^{\circ}\mathrm{C}$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจากการวัดของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ คือ

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(10-1)}\sum_{i=1}^{10}(x_i - 50.00)^2} = 0.0 \ ^{\circ}\mathrm{C}$$

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

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ (repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ คือ

$$u(t_{TUC}) = S_{\bar{x}} = 0.0 \ ^{\circ}\mathrm{C}$$

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

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

ค่า Non-uniformity ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิไม่ว่าจะเป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง หรือแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้อากาศเป็นตัวกลาง จะได้ค่าดังกล่าวจากการประเมินคุณสมบัติหรือจากผล

ของการสอบเทียบ ซึ่งผลดังกล่าวต้องครอบคลุมช่วงอุณหภูมิใช้งาน ลักษณะการกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นหนึ่งเดียว (non-uniformity) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ตัวอย่างที่ 9 : ผลการจากประเมินคุณสมบัติเฉพาะของค่าความไม่เป็นหนึ่งเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าเท่ากับ ± 0.01 °C ดังนั้นความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความไม่เป็นหนึ่งเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิคือ

$$u(\delta t_{\text{uni}}) = \frac{0.01\ ^{\circ}C}{\sqrt{3}} = 0.0058\ ^{\circ}\text{C}$$

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

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

ตัวอย่างที่ 10 : ผลการจากประเมินคุณสมบัติเฉพาะของค่าความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 50 °C มีค่าเท่ากับ ± 0.01 °C ดังนั้นความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิคือ

$$u(\delta t_{\text{sta}}) = \frac{0.01\ ^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.006\ ^{\circ}\text{C}$$

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

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

ตัวอย่างที่ 11 : จากการหา Short term stability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่นำมาสอบเทียบ โดยการใช้ค่าแก้ที่อุณหภูมิแรกที่ทำการสอบเทียบและอุณหภูมิแรกหลังจากเสร็จสิ้นการสอบเทียบทุก ๆ มีค่าเท่ากับ ±

0.01 ºC ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจาก Short term stability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ จะมีค่าเท่ากับ

$$u(\delta t_{st}) = \frac{0.01\ ^{o}\mathrm{C}}{\sqrt{3}} = 0.003\ ^{o}\mathrm{C}$$

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วที่สอบเทียบ, $u(\delta t_{nl})$:** ความไม่เป็นเชิงเส้นสามารถคาดหมายได้ จากผลที่ได้จากการทดลองสอบเทียบที่อุณหภูมิระหว่างกลางของจุดสอบเทียบนั้น ๆ และเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากการทดลองสอบเทียบกับผลที่คำนวณจากการสอบเทียบ ณ อุณหภูมิระหว่างกลางของจุดสอบเทียบ โดยใช้สมการเส้นตรง หรือใช้วิธีการอื่น เพื่อคาดหมายความผิดพลาดที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วที่สอบเทียบมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞ (ในกรณีที่ค่าความไม่แน่นอนมากกว่า 20 mK ไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณา)

  <u>ตัวอย่างที่ 13</u> : จากการหาความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์โมมิเตอร์ มีค่าอยู่ ± 0.01 °C ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ จะมีค่าเท่ากับ

$$u(\delta t_{nl}) = \frac{0.01\ ^{o}\mathrm{C}}{\sqrt{3}} = 0.006\ ^{o}\mathrm{C}$$

- **งบความไม่แน่นอน (Uncertainty budget) ในการสอบเทียบ**
  เมื่อทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนในที่เกิดขึ้นในการสอบเทียบตามวิธีการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ความไม่แน่นอนต่าง ๆ เหล่านั้นสามารถนำมารวมไว้ในรูปแบบของงบความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเพื่อหาว่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combined standard uncertainty, u_c) ที่เกิดขึ้นในการสอบเทียบนั้นมีค่าเท่าใด
  ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมสามารถหาได้ตามสมการที่ 7

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} u_{x_i}^2 c_i^{\ 2}} \qquad (7)$$

เมื่อ u_{x_i} คือ ความไม่แน่นอนในการวัดที่ประเมินไว้ตามวิธีการข้างต้น

c_i คืออัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณ output ต่อ Input

หาค่าความเป็นองศาความอิสระยังผล Effective Degree of Freedom โดยใช้สูตรของ Welch-Satterthwait เพื่อหาค่าตัวประกอบครอบคลุม (Coverage factor, *k*) ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการ ด้วยการนำค่าที่คำนวณได้จากสมการ 8 ไปเทียบจากตาราง Student's "t" distribution

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\frac{u_1^4(y)}{v_1} + \frac{u_2^4(y)}{v_2} + \ldots + \frac{u_n^4(y)}{v_n}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{n} \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \qquad (8)$$

นำความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม u_c ที่ได้จากสมการที่ 6 คูณด้วยค่าตัวประกอบครอบคลุมจะได้เป็นค่าของความไม่แน่นอนมาตรฐานขยาย (Expanded standard uncertainty, *U*) ดังที่แสดงไว้ในสมการที่ 9

$$U = ku_c \qquad (9)$$

ตารางที่ 1 งบความไม่แน่นอน (Uncertainty budget) การสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วแบบจุ่มแช่ทั้งหมดที่อุณหภูมิ 50 ℃ ในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่เป็น Liquid Bath

Symbol (u_{xi})	Type	Uncertainty value	Probability distribution	Divisor	Sensitivity coefficient (C_i)	Standard uncertainty (^{o}C)	Degrees of freedom
ut_{S}	A	0.00074	normal	1.0	1.0	0.00074	9
ut_{tuc}	A	0.000	normal	1.0	1.0	0.000	9
$u\delta t_{S}$	B	0.01	normal	2.0	1.0	0.005	∞
$u\delta t_{Sd}$	B	0.015	rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.0087	∞
$u\delta t_{I}$	B	0.013	normal	2.0	1.0	0.007	∞
$u\delta t_{Id}$	B	0.013	rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.008	∞
$u\delta t_{res, std}$	B	0.0005	rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.00029	∞
$u\delta t_{res, tuc}$	B	0.02	rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.012	∞
$u\delta t_{uni}$	B	0.01	rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.0058	∞
$u\delta t_{sta}$	B	0.01	rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.006	∞
$u\delta t_{st}$	B	0.005	rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.003	∞
$u\delta t_{hys}$	B	0.006	rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.003	∞
$u\delta t_{nl}$	B	0.01	rectangular	$\sqrt{3}$	1.0	0.006	∞
u_c	-		normal			0.0202	>500
U			normal (k= 2)			0.0404	2.00

หมายเหตุ ในกรณีที่เป็นการสอบเทียบ LIG ประเภท Partial Immersion ให้นำค่า Emergent Stem error มาพิจารณาด้วย

7. การรายงานผล

เพื่อให้การรายงานผลการสอบเทียบเป็นไปตาม มอก.17025 ในข้อ 5.10 ใบรายงานผลการสอบเทียบจะต้องประกอบด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ อย่างน้อยดังนี้ **[5]**

1. หัวเรื่อง
2. ชื่อและที่อยู่ของห้องปฏิบัติการ และสถานที่ที่ทำการสอบเทียบ
3. ชื่อที่อยู่ของลูกค้า
4. การชี้บ่งเฉพาะของรายงานผลการสอบเทียบ และมีการชี้บ่งในแต่ละหน้า และการชี้บ่งถึงการสิ้นสุดรายงานผลการสอบเทียบ
5. ระบุวิธีที่ใช้ พร้อมระบุลักษณะการจุ่มของเทอร์โมมิเตอร์
6. รายละเอียดของตัวอย่าง และการชี้บ่งอย่างไม่ครุมเครือ
7. วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง และวันเดือนปีที่ทำการสอบเทียบ
8. ผลการสอบเทียบ พร้อมกับหน่วยวัดที่เหมาะสม รวมถึงค่า Emergent stem สำหรับเทอร์โมมิเตอร์ที่มีลักษณะการจุ่มแบบจุ่มแช่บางส่วน (Partial Immersion)
9. ชื่อ หน้าที่ และลายมือชื่อ หรือการชี้บ่งอื่นที่เทียบเท่าของบุคคลที่มีอำนาจหน้าที่ในการออกใบรับรองผลการสอบเทียบ
10. ข้อความที่ระบุว่ารายงานนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาสอบเทียบเท่านั้น และใบรับรองการสอบเทียบจะต้องรวมถึงข้อมูลดังต่อไปนี้ ในกรณีที่จำเป็นต่อการแปลผลการสอบเทียบ
11. สภาวะต่าง ๆ ที่สอบเทียบซึ่งมีผลต่อการวัด
12. ค่าความไม่แน่นอนในการวัด หลักฐานที่แสดงถึงการสอบกลับได้ของการวัด

8. การประกันคุณภาพผลการวัด

หลังจากสอบเทียบแล้วเสร็จ ควรทำการทวนสอบผลการวัดที่ได้จากการสอบเทียบเพื่อเป็นการประกันคุณภาพ การทวนสอบให้ดำเนินการตามวิธีการสอบเทียบปกติ โดยเลือกจุดที่ต้องการทวนสอบเพียงบางจุด และทำการเปรียบเทียบผลระหว่างผลที่ได้จากการทวนสอบกับผลที่ระบุในใบรับรองผล เกณฑ์ในการพิจารณา อาจจะพิจารณาจากผลต่างที่ได้ เทียบกับค่าความไม่แน่นอนของการวัด ซึ่งถ้าผลต่างที่เกิดขึ้นจากการทวนสอบไม่มากกว่า 50 % ของค่าความไม่แน่นนอนของการวัด สารมารถสรุปได้ว่า ผลการสอบเทียบในครั้งนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้

9. คำแนะนำในการจัดการเครื่องมือ

- ทอร์โมมิเตอร์ที่มีพิสัยการวัดอุณหภูมิมากกว่า 10 $^{\circ}$C ควรเก็บเทอร์โมมิเตอร์โดยการวางแนวนอนกับพื้นและควรมีวัสดุกันกระแทกรองรับ
- เทอร์โมมิเตอร์ที่มีพิสัยการวัดอุณหภูมิน้อยกว่า 10 $^{\circ}$C ควรเก็บเทอร์โมมิเตอร์โดยการวางตั้งฉากกับพื้นและมีวัสดุกันกระแทกรองรับกระเปาะ

- ก่อนการเคลื่อนย้ายหรือการขนส่งเทอร์โมมิเตอร์ควรทำการตรวจสอบผลที่ Ice point
- ก่อนการเคลื่อนย้ายหรือการขนส่งเทอร์โมมิเตอร์ควรบรรจุในกล่องที่แน่นหนาและมีวัสดุกันกระแทกเพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับเทอร์โมมิเตอร์

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. BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML: International vocabulary of basic and general terms in metrology,2nd edition, 2008,ISBN92-67-01075-1
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. Standard Specification for Liquid-in-Glass ASTM Thermometers with Low-Hazard Precision Liquids, ASTM E2251-07
7. Standard Specification for ASTM Thermometers, ASTM E1- 98
8. Handbook of Temperature Measurement. Volume 2, Resistance and Liquid-in-glass thermometry, Editor, Robin E. Bentley