CALIBRATION GUIDELINE

CALIBRATION OF THERMOCOUPLES

TM/CG04/TT01/V02

August 2015

THERMOMETRY METROLOGY DEPARTMENT

NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY (THAILAND)

CALIBRATION GUIDELINE

CALIBRATION OF THERMOCOUPLES

วัตถุประสงค์ : เพื่อแนะนำแนวทางในการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) ชนิดมาตรฐาน ทั้งแบบโลหะพื้นฐาน (Base Metal Thermocouple type K N J E T) และแบบโลหะชั้นสูง (Noble metal Thermocouple ชนิด B R S) ช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -200 °C ถึง 1 600 °C

สารบัญ

0. ขอบข่ายและบทนำ 4
1.ความรู้พื้นฐาน 5
2 .ข้อควรระวัง 6
3. สายชดเชยและขยายระยะ 7
4. รอยต่ออ้างอิงและจุดอุณหภูมิอ้างอิง 7
5. การให้ความร้อน (Heat treatment) 8
6. ระยะการจุ่มและปลอกป้องกัน 9
7. Thermocouple Inhomogeneity 9
8. แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ 10
9. การสอบเทียบ 11
10. การประเมินค่าความไม่แน่นอน 14
11. การรายงานผล 31
เอกสารอ้างอิง 35
ภาคผนวก 36

0. ขอบข่าย

เอกสารฉบับนี้ใช้เป็นแนวทางพื้นฐานของการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouples) โดยวิธีการเทียบค่ากับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Comparison method) เอกสารนี้ครอบคลุมสำหรับการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลชนิดมาตรฐาน E J K N T R S B ที่มีเกณฑ์การยอมรับ สัมประสิทธิ์และตารางเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานอ้างอิงความสัมพันธ์อุณหภูมิ-แรงเคลื่อนไฟฟ้า ตามเอกสารมาตรฐานที่ปรากฏอยู่ในเอกสารอ้างอิง [1-7] และสามารถประยุกต์ใช้ได้ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -200 °C ถึง 1 600 °C

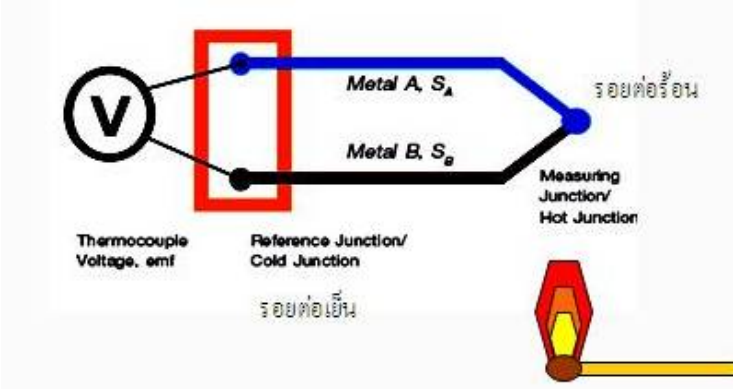
ห้องปฏิบัติการที่เลือกปฏิบัติตามแนวทางการสอบเทียบ และคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลที่ได้รวบรวมไว้ในเอกสารฉบับนี้ จะส่งเสริมให้ได้ผลการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลที่มีความถูกต้องน่าเชื่อถือ และเป็นที่ยอมรับโดยทั่วกันในประเทศไทย นอกจากนี้ยังสนับสนุนการเตรียมความพร้อมสำหรับการประเมินความสามารถ (accreditation) ในสาขาเทอร์โมคัปเปิล

คำนำ

เอกสารฉบับนี้จะนำเสนอแนวทางการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลโดยวิธีการเทียบค่ากับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน โดยมีวิธีการสอบเทียบและประมวลผลข้อมูลที่แตกต่างกันตามลักษณะของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานที่เลือกใช้ ในที่นี้จะแนะนำวิธีการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลด้วยวิธีเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานสองประเภท ได้แก่ เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานประเภทความต้านทานพลาตินั่มมาตรฐานหรือเทอร์โมคัปเปิลชนิด N ที่อุณหภูมิตั้งแต่ -200 °C ถึง 660 °C และเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานประเภทเทอร์โมคัปเปิลแบบโลหะชั้นสูงชนิด S, R หรือ B ที่อุณหภูมิสูงกว่า 660 °C ถึงอุณหภูมิสูงสุดที่ทำการสอบเทียบ โดยผู้ที่ทำการสอบเทียบสามารถนำเอกสารฉบับนี้ไปปรับใช้ให้เหมาะสมกับลักษณะเครื่องมือมาตรฐาน และแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการ โดยให้พิจารณาจากเกณฑ์ระดับความไม่แน่นอนที่ต้องการและช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการใช้งานของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานที่มีอยู่

1. ความรู้พื้นฐาน (Introduction)

- **เทอร์โมคัปเปิล** เครื่องมือวัดอุณหภูมิสร้างจากลวดโลหะนำความร้อนสองเส้นต่างกันเชื่อมปลายด้านหนึ่งเข้าด้วยกันเป็นรอยต่อวัดหรือรอยต่อร้อน (Measurement junction/ Hot junction) ปลายอีกด้านรักษาไว้ที่อุณหภูมิอ้างอิงก่อนต่อเข้ากับเครื่องมือวัดเรียกว่า รอยต่ออ้างอิงหรือรอยต่อเย็น (Reference Junction/Cold junction)



รูปที่ 1 เป็นวงจรเทอร์คับเปิลพื้นฐาน

- **ชนิดของเทอร์โมคัปเปิล** เทอร์โมคัปเปิลชนิดมาตรฐานแบ่งได้ 2 กลุ่มคือกลุ่มโลหะพื้นฐานได้แก่ ชนิด E J K N T และ กลุ่มโลหะชั้นสูง ได้แก่ ชนิด R S B โดยตารางที่ 1 และ 2 ที่ปรากฏในภาคผนวก จะแสดงข้อมูลชนิดของลวดตัวนำ ช่วงอุณหภูมิใช้งานและระดับเกณฑ์การยอมรับ (Tolerance) ตามลำดับ

- **ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force, emf)** ของเทอร์โมคัปเปิล สัมพันธ์กับอุณหภูมิของรอยต่อร้อนและรอยต่อเย็น รวมถึงการกระจายของอุณหภูมิไปตามสายตัวนำเทอร์โมคัปเปิลระหว่างรอยต่อร้อนและรอยต่อเย็นด้วย การสอบเทียบจะมีประสิทธิภาพเมื่อรอยต่อวัดถูกวัดในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิและรอยต่อเย็นถูกรักษาในจุดน้ำแข็ง ในระยะจุ่มที่เหมาะสม

- **ค่าสัมประสิทธ์ซีเบค (Seebeck coefficient, *S*) หรือค่าความไว (sensitivity)** คือค่าที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเอาท์พุทของเทอร์โมคัปเปิลเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 °C เทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิดจะมีค่า Seebeck coefficient (*S*) ที่แตกต่างกัน และยังแตกต่างกันในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิ 0 °C เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะมีค่า *S* เท่ากับ 39 μV/ °C ขณะที่เทอร์โมคัปเปิลชนิด R จะมีค่า *S* เท่ากับ 5 μV/ °C ขณะที่อุณหภูมิ 800 °C เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จะมีค่า *S* เท่ากับ 41 μV/ °C ขณะที่เทอร์โมคัปเปิลชนิด R จะมีค่า *S* เท่ากับ 11 μV/ °C เป็นต้น ผู้สอบเทียบควรเลือกตัวอ่านที่เหมาะสมกับค่าความไวของเทอร์โมคัปเปิลแต่ละชนิด เช่น หากต้องการความถูกต้องละเอียดในระดับ 0.1 °C สำหรับเทอร์โมคัปเปิลชนิด R S หรือ B ตัวอ่านควรมีความละเอียดที่อ่านได้ (resolution) อย่างน้อย 1 μV

- **ปริมาณของ emf** สัมพันธ์กับชนิดของเทอร์โมคัปเปิล และสภาพที่ถูกใช้งาน ภาวะการปนเปื้อน การบิดงอของสาย และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เร็วเกินไป (Thermal shock) ส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงภายในเนื้อวัสดุตัวนำเทอร์โมคัปเปิลบริเวณนั้นและเมื่อสายบริเวณที่เสื่อมอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่าง (Temperature gradient) จะกระทบโดยตรงกับปริมาณของ emf อย่างไรก็ดี การเสื่อมของบริเวณสายเทอร์โมคัปเปิลไม่ส่งกระทบต่อ emf มากนัก หากบริเวณที่เสื่อมสภาพนั้นถูกรักษาไว้ที่อุณหภูมิเดียวกัน

- **เทอร์โมคัปเปิลที่ถูกใช้งาน สภาพของเทอร์โมคัปเปิล และความน่าเชื่อถือของผลการสอบเทียบ**จะลดถอยลงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ดังนั้น ห้องปฏิบัติการจึงมีความจำเป็นที่จะต้องกำหนดช่วงเวลาและวิธีการตรวจสอบค่าเพื่อการบำรุงรักษาเทอร์โมคัปเปิลเป็นประจำ สำหรับเทอร์โมคัปเปิลแบบโลหะพื้นฐานชนิด K N เมื่อใช้งานที่อุณหภูมิสูงกว่า 1 000 °C การเปลี่ยนใหม่ย่อมดีกว่าการสอบเทียบซ้ำ

2. ข้อควรระวังในการสอบเทียบ

ในการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล : เมื่อทำการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลต้องแน่ใจว่าปัจจัยดังต่อไปนี้ได้ถูกทำให้เกิดน้อยที่สุด

- ระยะจุ่มที่ไม่เพียงพอในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิสำหรับรอยต่อร้อน และระยะจุ่มที่ไม่เพียงพอในจุดน้ำแข็งสำหรับรอยต่อเย็น
- ความไม่สม่ำเสมอ และไม่เสถียรตามเวลาของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิสำหรับใช้สอบเทียบ
- ความไม่สม่ำเสมอ และไม่เสถียรตามเวลาของจุดน้ำแข็ง/จุดอุณหภูมิอ้างอิงสำหรับรอยต่อเย็น
- โวลต์เทจอื่น (parasitic voltage) ที่ไม่ใช่สัญญาณเอาท์พุทที่ต้องการวัด เช่น จากขั้วและข้อต่อ สัญญาณรบกวนจากตัวอ่านและแสกนเนอร์ (ถ้ามี)
- ความไม่แน่นอนจากการใช้สายชดเชยหรือสายขยายระยะ
- สัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้า
- การบิด หักงอ เปลี่ยนรูปของสายเทอร์โมคัปเปิล
- ความไม่เป็นเนื้อเดียวของสายเทอร์โมคัปเปิล (Inhomogeneity)
- การออกซิเดชันและการปนเปื้อนทางเคมี และสภาวะแวดล้อมที่ทำการวัด
- การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและโครงผลึกของสายในรูปแบบอื่นๆ
- การสูญเสียความเป็นฉนวน ของบริเวณปลายโพรบและด้ามจับ

3. สายชดเชยและขยายระยะ

ในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลในโรงงานที่ระยะไกล อาจมีความจำเป็นต้องใช้งานร่วมกับสายชดเชยหรือสายขยายระยะ สายขยายระยะ (extension cable) คือสายที่ทำจากวัสดุชนิดเดียวกันกับเทอร์โมคัปเปิล มักใช้กับเทอร์โมคัปเปิลแบบโลหะพื้นฐาน สายชดเชย (compensation cable) คือสายที่ทำจากวัสดุต่างชนิดกับเทอร์โมคัปเปิล แต่มีคุณลักษณะทางอุณหภูมิ-ไฟฟ้าใกล้เคียงกับเทอร์โมคัปเปิลที่จะใช้งานร่วมด้วย สายชดเชยและสายขยายระยะจะมีช่วงอุณหภูมิใช้งานจำกัดอยู่ที่ -40 °C ถึง 200 °C โดยมีเกณฑ์ความถูกต้องที่ยอมรับได้ระบุไว้ใน [1-7]

การใช้สายชดเชยหรือสายขยายระยะที่ดีที่สุดคือ ต่อแบบถาวรเข้ากับเทอร์โมคัปเปิล หรือต้องใช้ข้อต่อเฉพาะชนิดเดียวกับเทอร์โมคัปเปิล อย่างไรก็ดีอาจจะเป็นไปได้ที่ชนิดของข้อต่อโลหะไม่เหมือนกัน และทำให้เกิดสัญญาณที่ไม่ต้องการเนื่องจากโลหะต่างชนิดที่รอยต่อ ดังนั้น บริเวณข้อต่อที่เกิดขึ้นนี้ต้องระวังไม่ให้สัมผัสกับรังสีความร้อน ความแปรปรวนของสิ่งแวดล้อม สัญญาณรบกวนและสนามแม่เหล็ก

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้งานร่วมกับสายชดเชยหรือสายขยายระยะ จะมีความถูกต้องน้อยกว่าเทอร์โมคัปเปิลที่ทำจากสายยาวต่อเนื่อง ไร้รอยต่อระหว่างรอยต่อร้อนและรอยต่อเย็น ความไม่แน่นอนจากการวัดเกิดได้จากการไม่เข้ากันพอดีของสาย ดังนั้น การสอบเทียบควรทำการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลพร้อมสายชดเชยหรือสายขยายระยะที่ใช้ให้เหมือนกับการใช้งานจริงโดยไม่สลับคู่ ในทางปฏิบัติเป็นการยากที่จะประเมินความไม่แน่นอนของข้อต่อของสายชดเชยหรือสายขยายระยะแยกออกมา วิธีที่สามารถทำได้คือตรวจดูการเปลี่ยนแปลงของ emf เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ข้อต่อระหว่างเทอร์โมคัปเปิลกับสายชดเชยหรือสายขยายระยะ สายชดเชยและสายขยายระยะที่ต้องนำมาสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลของลูกค้าเป็นประจำ ควรมีการสอบเทียบเพื่อหาค่าแก้ที่อุณหภูมิที่นำมาใช้งาน โดยสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้ตามเอกสารอ้างอิง ASTM E2730 เวอร์ชันล่าสุด [8]

4. รอยต่ออ้างอิงและจุดอุณหภูมิอ้างอิง

รอยต่ออ้างอิงหรือรอต่อเย็นของเทอร์โมคับเปิลจำเป็นต้องรักษาอยู่ที่อุณหภูมิที่รู้ค่าเสมอ เพื่อให้ง่ายต่อการทราบอุณหภูมิแตกต่างที่แน่นอน ที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าได้ รอยต่อเย็นของเทอร์โมคัปเปิลที่สามารถใช้ร่วมกับจุดน้ำแข็ง รอยต่ออ้างอิงสร้างจากการเชื่อมปลายสายเทอร์โมคัปเปิลที่ตรงข้ามรอยต่อวัดแต่ละสายเข้ากับลวดทองแดง การเชื่อมต่อต้องเชื่อมให้แน่นหนาและระวังไม่ให้เกิดออกไซด์ที่รอยเชื่อม แต่ละรอยเชื่อมต่อต้องหุ้มด้วยฉนวนแยกออกจากกันและทั้งคู่สายต้องบรรจุลงในท่อแก้ว/โลหะปลายปิดที่มีความยาวเพียงพอกับระยะจุ่มที่เหมาะสม ก่อนจุ่มลงในจุดน้ำแข็ง

4.1 **จุดน้ำแข็ง (Ice Point)** ตารางมาตรฐานอ้างอิงแสดงความสัมพันธ์ของ emf – temperature ของเทอร์โมคับเปิลจะเป็นค่าที่รายงาน ณ ที่ อุณหภูมิของรอยต่ออ้างอิง อยู่ ที่ 0 °C เสมอ ดังนั้นในการใช้งานและการสอบเทียบที่ต้องการความถูกต้องสูง จุดหลอมเหลวของน้ำแข็ง (Ice Point) ที่ทำจากเกล็ดน้ำแข็งสะอาดผสมน้ำแข็งสะอาดในอัตรา 3:1 ในกระติกสูญญากาศทรงสูงสามารถใช้เป็นจุด

อุณหภูมิอ้างอิงได้ดีของรอยต่ออ้างอิงของเทอร์โมคัปเปิล เพราะทำได้ง่าย และสามารถควบคุมความเสถียรได้ในระดับ ± 0.01 °C โดยสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้ตามเอกสารอ้างอิง ASTM E563 [9]

4.2 **จุดน้ำแข็งอัตโนมัติ** ในบางกรณีการเตรียม Ice point อาจไม่สะดวก เช่น โรงงานที่มีภาวะความร้อนสูง ใช้งานเทอร์โมคับเปิลจำนวนมากหรือการวัดที่ยาวนาน สามารถเลือกใช้จุดน้ำแข็งอัตโนมัติที่มีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะปรับกระแสควบคุมอุณหภูมิทำความเย็น ข้อควรระวังคืออุปกรณ์ต้องมีความลึกที่เหมาะสม (ระยะจุ่มมากกว่า 15 เท่า ของเส้นผ่านศูนย์กลาง cold Junction) ต้องแน่ใจว่าสามารถรับจำนวน Cold junction ที่ใช้ได้เพียงพอโดยไม่กระทบกับการทำอุณหภูมิ และควรมีการตรวจติดตามอุณหภูมิภายในเครื่องเทียบกับระยะเวลาให้ทราบความเสถียรและแน่ใจว่าเครื่องมือได้ทำอุณหภูมิจริงที่ประมาณศูนย์องศาเซลเซียส ในบางกรณีจุดอ้างอิงอุณหภูมิรอยต่อเย็นอาจไม่ใช่ศูนย์ทำให้อุณหภูมิแตกต่างระหว่างรอยต่อร้อนและรอยต่อเย็นลดลง ดังนั้น ผู้ใช้งานต้องทราบค่าอุณหภูมิรอยต่อเย็นที่ใช้เสียก่อน และนำไปบวกเพิ่มกับสัญญาณที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิล

4.3 **วงจรชดเชยรอยต่ออ้างอิงของเทอร์โมคัปเปิล Cold junction–Compensation (CJC)** ถูกนำมาใช้ร่วมกับตัวอ่านเพื่อความสะดวก โดยผู้ใช้งานไม่ต้องเตรียมจุดอุณหภูมิอ้างอิงแยกออกมา CJC เป็นวงจรภายในเครื่องมือวัด ประกอบด้วย RTD sensor หรือ semiconductor ที่วัดอุณหภูมิแวดล้อม (ambient temperature) ของจุดอ้างอิง ขณะนั้น และเมื่อเลือกชนิดเทอร์โมคับเปิลถูกต้อง CJC จะสร้าง emf ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิและชนิดเทอร์โมคับเปิลชนิดนั้น และนำไปบวกรวมกับ emf output จากเทอร์โมคับเปิล และแปลงให้ได้เป็นค่าอุณหภูมิของหน่วยแสดงผล เพื่อความถูกต้องเครื่องมือวัดนี้ก่อนใช้งานได้รับการสอบเทียบ โดยสามารถหาข้อมูลเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิง Euramet cg-11 Guidelines on the calibration of Temperature Indicators and simulators by electrical Simulation and Measurement เวอร์ชันล่าสุด [10]

5. การให้ความร้อน (Heat treatment) / การอบบ่ม (Annealing)

5.1 เทอร์โมคัปเปิลที่จะทำการสอบเทียบควรมีความเป็นเนื้อเดียว (homogeneous) เทอร์โมคัปเปิลที่มีความไม่เป็นเนื้อเดียว (Inhomogeneity) สูง และถูกใช้งานวัดในแหล่งอุณหภูมิที่มีลักษณะการกระจายของอุณหภูมิที่แตกต่างจากที่ทำการสอบเทียบ สามารถทำให้ผลที่วัดคลาดเคลื่อนต่างไปจากการสอบเทียบได้หลายองศาเซลเซียส

5.2 การให้ความร้อนหรือการอบบ่ม ทำเพื่อให้ความร้อนไปปรับสภาพเทอร์โมคัปเปิลให้มีความเป็นเนื้อเดียวสม่ำเสมอตลอดช่วงสายของเทอร์โมคัปเปิล ทั้งนี้การอบบ่มเพื่อปรับสภาพถือว่าเป็นการปรับแต่งค่าเทอร์โมคัปเปิล หากเป็นการสอบเทียบซ้ำเพื่อเก็บประวัติเครื่องมือ ผู้ปฏิบัติการควรแจ้งให้ลูกค้าทราบก่อนลงมืออบบ่มเทอร์โมคัปเปิล สำหรับเทอร์โมคัปเปิลพลาตินั่มการอบบ่มที่ดีที่สุดสำหรับคือการอบบ่มด้วยกระแสไฟฟ้าที่ให้ความร้อนตลอดสายเปลือยที่อุณหภูมิ (1 100 ถึง 1 400)

องศาเซลเซียส หรือการอบบ่มด้วยความร้อนในเตาที่ครอบคลุมมากกว่าระยะจุ่มที่ใช้ที่อุณหภูมิ 1 100 องศาเซลเซียส

ในทางปฏิบัติเพื่อผลการสอบเทียบที่ดีที่สุด เทอร์โมคัปเปิลควรมีการอบบ่มเพื่อปรับสภาพที่ระยะจุ่มมากที่สุดและอุณหภูมิสูงสุดเป็นเวลาหลายชั่วโมงก่อนเริ่มการสอบเทียบ สำหรับเทอร์โมคัปเปิลแบบโลหะพื้นฐาน การอบบ่มอาจไม่มีความจำเป็น เช่น Type K ที่ใช้งานอุณหภูมิเกินกว่า 500 องศาเซลเซียส การสอบเทียบสามารถทำแบบอุณหภูมิจากน้อยไปหามาก และกลับมาตรวจสอบที่อุณหภูมิเริ่มต้นอีกครั้ง [11]

6. ระยะการจุ่มและปลอกป้องกัน

6.1 เทอร์โมคัปเปิลควรได้รับการสอบเทียบที่ระยะจุ่มใกล้เคียงกับที่ใช้งานมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ระยะจุ่มที่เหมาะสมจะต้องเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสูญเสียความร้อน เทอร์โมคัปเปิลพร้อมปลอกที่เส้นผ่านศูนย์กลางมาก จะต้องจุ่มลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิให้ลึกยิ่งขึ้น โดยระยะจุ่มที่ดีที่สุดควรไม่น้อยกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง หรืออย่างน้อยให้จุ่มในระยะที่ไม่เห็นความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ในการสอบเทียบอาจต้องมีการถอดเปลี่ยนปลอกให้เหมาะสมกับระยะจุ่มที่ต้องการในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ

6.2 ข้อควรระวังในการสอบเทียบ ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของเทอร์โมคัปเปิลที่ถูกสอบเทียบอาจจะแสดงค่านิ่งมากแม้ว่าระยะจุ่มไม่เพียงพอ ดังนั้นไม่ได้หมายความว่าเทอร์โมคัปเปิลอ่านอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบถูกต้อง การจุ่มเทอร์โมคัปเปิลในระยะที่ไม่เหมาะสม (Immersion error) สามารถประเมินค่าความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ตามเอกสารอ้างอิง [12] และภาคผนวก ค.

6.3 เทอร์โมคัปเปิลแบบเปลือยหรือปลอกโลหะที่ใช้งานจุ่มในอ่างของเหลวควบคุมอุณหภูมิ ควรระวังไม่ให้สัมผัสขอบส่วนใดของอ่างและอยู่ห่างจากเทอร์โมคัปเปิลตัวอื่นอย่างน้อย 1 เซนติเมตร เพื่อป้องกันการรั่วไหลของกระแสระหว่างการวัด

6.4 หากใช้งานในภาวะที่ปนเปื้อนที่อุณหภูมิสูงเกินกว่า 1 000 องศาเซลเซียส เทอร์โมคัปเปิลควรใส่ปลอกเซรามิกส์ปลายปิด (High purity Alumina) เมื่อทำการวัดเทอร์โมคัปเปิลที่มีปลอกต้องรอเวลาให้แน่ใจว่าเทอร์โมคัปเปิลเข้าสู่สภาวะเสถียร

6.5 ที่อุณหภูมิสูงกว่า 1 000 องศาเซลเซียส ต้องแน่ใจว่าปลายรอยต่อวัดอยู่ห่างจากปลอกประมาณ 5 มิลลิเมตร เพื่อให้มีพื้นที่พอสำหรับการยืดขยายของสายโลหะเทอร์โมคัปเปิลชนปลอกและลดการเกิดการสูญเสียความเป็นฉนวน (insulation leak) ที่อุณหภูมิสูง

7. ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของสายเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple Inhomogeneity)

7.1 ค่า Thermocouple Inhomogeneity จะส่งผลมากในความไม่แน่นอนทางการวัดของเทอร์โมคัปเปิล สำหรับการวัดที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำสูง มีความจำเป็นต้องทดสอบค่า Inhomogeneity วิธีที่แนะนำคือ การใช้เครื่องกำเนิดความร้อนหรือความเย็นเคลื่อนที่ไปตามโพรบเทอร์โมคัปเปิลช้าๆ ขณะที่ให้ทั้งรอยต่อวัดและรอยต่ออ้างอิงอยู่ที่เดียวกัน ที่จุดอุณหภูมิคงที่ศูนย์

องศาเซลเซียส และวัดหาความแตกต่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละช่วง วิธีนี้ต้องใช้ตัวอ่านดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ที่มีความละเอียดสูงเพราะสัญญาณที่ได้จะต่ำมากและต้องระวังสัญญาณรบกวน

7.2 การทดสอบค่า Inhomogeneity อีกวิธีที่สามารถทำได้คือค่อยๆ จุ่มรอยต่อวัดเทอร์โมคัปเปิลลงแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่มีความเสถียรสูง เช่น อ่างน้ำมันควบคุมอุณหภูมิ หรือ fixed point โดยในวิธีนี้ จะเป็นการเปลี่ยนระยะจุ่มเทอร์โมคัปเปิลให้ผ่านระยะใช้งานที่มีความแตกต่างอุณหภูมิมากที่สุด (ปากเตา) และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้

7.3 การทดสอบทั้งสองวิธีข้างต้น ความแตกต่างมากสุดที่วัดได้ สามารถนำมาประเมินหาค่าความไม่แน่นอนโดยให้ประเมินแบบการกระจายสี่เหลี่ยม ทั้งนี้การประเมินความไม่แน่นอนจาก Inhomogeneity ที่อุณหภูมิอื่นๆ สามารถใช้ได้ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ของ emf จากค่าที่วัดได้ที่อุณหภูมินั้น

7.4 ในกรณีที่ไม่ได้มีระบบสำหรับการทดสอบค่า Inhomogeneity การประเมินค่าความไม่แน่นอนทำได้โดยให้ค่า Inhomogeneity ที่เกิดขึ้นกับเทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ทำการสอบเทียบมีค่าอย่างน้อย 20% ของเกณฑ์การยอมรับ Class 2 ของ IEC 60584-2 (หรือเทียบเท่ากับ standard tolerance ใน ASTM E230) หรืออ้างอิงค่า Inhomogeneity จากงานวิจัยที่น่าเชื่อถือได้

8. แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ

8.1 เทอร์โมคัปเปิลสามารถสอบเทียบโดยใช้จุดกำเนิดอุณหภูมิมาตรฐาน Fixed Points ที่จุดอุณหภูมิคงที่ของการเปลี่ยนสถานะของสสาร หรือสอบเทียบโดยการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานหรือเทอร์โมมิเตอร์อ้างอิงที่อยู่ในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิประเภทต่างๆ เช่น อ่างของเหลวควบคุมอุณหภูมิหรือเตา โดยเลือกใช้ให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่ต้องการสอบเทียบ การสอบเทียบโดยใช้ Fixed Points จะใช้สำหรับเทอร์โมคัปเปิลแบบโลหะชั้นสูง ชนิด R S และ B ที่ต้องการความถูกต้องสูงสุดเท่านั้น

8.2 แหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้สอบเทียบควรมีการตรวจสอบความเสถียรตามเวลาใช้งาน (stability) และการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature profiles/ Uniformity) วิธีการตามเอกสารอ้างอิง [13] โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบเดียวกัน 2 ตัว โดยตัวหนึ่งอยู่ที่ตำแหน่งอ้างอิงของพื้นที่ใช้งาน (มักอยู่ที่จุดกึ่งกลาง) เทอร์โมมิเตอร์ที่เหลือให้ตรวจสอบที่ตำแหน่งต่างๆ ครอบคลุมพื้นที่ที่ใช้งาน การระบุการกระจายของอุณหภูมิในใบรายงานผลการสอบเทียบจะช่วยลดปัญหาระยะจุ่ม

8.3 การเพิ่มความเป็นหนึ่งเดียวกันของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ทำได้โดยการใส่แท่ง equalizing block โลหะ เพื่อช่วยนำความร้อนถ่ายเทอุณหภูมิจากตัวกลางไปยังเทอร์โมมิเตอร์ดียิ่งขึ้น อย่างไรก็ดีที่เตาอุณหภูมิสูงกว่า 1 000 องศาเซลเซียส ที่ใช้กลไกควบคุมอุณหภูมิแบบหลายโซน (เช่น Three zone furnace) การใช้ equalizing block อาจไม่จำเป็น เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีที่มีอิทธิพลมากกว่า จะสามารถทำให้การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่า

9. การสอบเทียบ

9.1 เครื่องมือ

- **เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน** (Standard Thermometer) จะต้องผ่านการสอบเทียบและควรมีความถูกต้องดีกว่าเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (ค่าความไม่แน่นอนในการวัดน้อยกว่า) เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานต้องอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์พร้อมใช้งาน การเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานควรมีค่าน้อยกว่าค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบหรืออยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้
- **หน่วยแสดงผล** (Readout unit) แบบแสดงค่าอุณหภูมิ (Temperature Indicator) หรือแสดงค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า (Digital Voltmeter) สำหรับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ จะต้องได้รับการสอบเทียบให้ครอบคลุมช่วงที่ใช้งาน นอกจากนี้ หน่วยแสดงผลควรได้รับการอุ่นเครื่อง (warm up) ตามขั้นตอนแนะนำก่อนใช้งาน ที่ระบุไว้ในใบรายงานผลการสอบเทียบ หรือคู่มือการใช้งาน
- **แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ** (Heat source) ควรมีความลึกเหมาะสม (หรือมีความลึกไม่น้อยกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหัววัดอุณหภูมิ) และสามารถใช้งานได้ดีตามช่วงอุณหภูมิที่ต้องการสอบเทียบ เช่น Bath, Dry Block หรือ Furnace ทั้งนี้ แหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ควรได้รับการประเมินค่าความเสถียรตามเวลา (Stability) และค่าไม่ความสม่ำเสมอ (Uniformity) ให้ครอบคลุมกับการใช้งาน ตามที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 8
- **จุดกำเนิดอุณหภูมิอ้างอิง** จุดน้ำแข็งที่ใช้ควรผ่านการทดลองวัดค่าอุณหภูมิที่แท้จริง มีผลการประเมินค่าความเสถียรตามเวลา (Stability) และค่าความสม่ำเสมอ (Uniformity)
- **สายขยายระยะและโพรบรอยต่ออ้างอิง** หากมีการนำมาใช้งานร่วมกับเทอร์โมคัปเปิลที่ต้องการสอบเทียบ เพื่อขยายระยะเทอร์โมคัปเปิลให้ถึงจุดกำเนิดอุณหภูมิอ้างอิง **ต้องทำการสอบเทียบที่อุณหภูมิที่ใช้งานในห้องปฏิบัติการ หรือตามวิธีการมาตรฐานที่แนะนำไว้ใน** ASTM E 2730 [8]

9.2 สภาวะแวดล้อมและเงื่อนไขในการสอบเทียบ

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบต้องควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมและไม่ส่งผลกระทบต่อผลการวัด ในขณะทำการสอบเทียบ อุณหภูมิภายในของห้องปฏิบัติการไม่ควรเปลี่ยนแปลงจนส่งผลต่อกระบวนการสอบเทียบ รวมทั้งควรหลีกเลี่ยงปัจจัยอื่น ๆ เช่น สัญญาณรบกวนและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อผลการวัดด้วย

9.3 การตรวจสอบเทอร์โมคัปเปิลเบื้องต้นก่อนการสอบเทียบ

- **ตรวจสอบสภาพทั่วไป** เทอร์โมคัปเปิลในท้องตลาดนั้นมีหลายรูปแบบ เช่น แบบสายอ่อน แบบโพรบโลหะ และแบบโพรบเปลือยในฉนวนเซรามิกส์ ดังนั้นการตรวจสอบนั้นขึ้นกับรูปแบบลักษณะของเทอร์โมคัปเปิล เบื้องต้นการตรวจสอบเพื่อบันทึกความบกพร่องภายนอก เช่น ความสมบูรณ์ของรอยต่อ ข้อต่อต่างๆ ความบิดงอ ความปนเปื้อน ความกัดกร่อนจากความร้อนและความชื้น เป็นต้น หากพบความผิดปรกติของสัญญาณ ให้ทดลองวัดความต้านทานระหว่างปลอกโพรบและสายเทอร์โมคัปเปิล (ทดสอบ

ความสมบูรณ์ของความเป็นฉนวน) หากพบความผิดปรกติที่อาจส่งผลกระทบต่อการสอบเทียบให้ติดต่อแจ้งลูกค้าให้ทราบ

- **ตรวจสอบชนิดของเทอร์โมคัปเปิล**ที่ต้องการสอบเทียบว่าตรงตามลูกค้าระบุ โดยการพิจารณาสีของฉนวน หรือวัดสัญญาณของเทอร์โมคัปเปิล เทียบชนิดกับเอกสารมาตรฐาน การตรวจสอบความผิดปรกติของเทอร์โมคัปเปิลเบื้องต้นสามารถทำได้โดยอุณหภูมิที่รอยต่อวัดสูงกว่ารอยต่อเย็น และให้สังเกตุว่าค่าสัญญาณเอาท์พุทจะเพิ่มขึ้น

9.4 การกำหนดจุดสอบเทียบและลำดับการสอบเทียบ

การกำหนดจำนวนจุดสอบเทียบและลำดับการสอบเทียบขึ้นอยู่กับค่าความไม่แน่นอนการวัดที่ต้องการ โดยทั่วไปจะเริ่มสอบเทียบจากอุณหภูมิอ้างอิงจุดแรก จากนั้นจึงสอบเทียบจากอุณหภูมิต่อไปจาก ต่ำสุดไปสู่อุณหภูมิสูงสุด เพื่อความถูกต้องสูงสุด เมื่อสอบเทียบเสร็จแล้วควรกลับมาที่อุณหภูมิอ้างอิงจุดแรกอีกครั้งเพื่อหาค่าความเสถียรในช่วงเวลาสั้น ๆ (short term stability) หรืออ้างอิงจากค่า short term stability จากการสอบเทียบที่ผ่านมาของเทอร์โมคัปเปิลชนิดเดียวกันและใช้งานในช่วงอุณหภูมิเดียวกันกับ UUC ในกรณีที่ต้องการความถูกต้องเป็นพิเศษสำหรับเทอร์โมคัปเปิลโลหะชั้นสูงแนะนำให้ควรเริ่มสอบเทียบที่อุณหภูมิสูงสุดไปยังต่ำสุด เพื่อลดการเพิ่มขึ้นของค่า Inhomogeneity เนื่องจาก temperature gradient ที่เพิ่มขึ้นระหว่างการสอบเทียบ

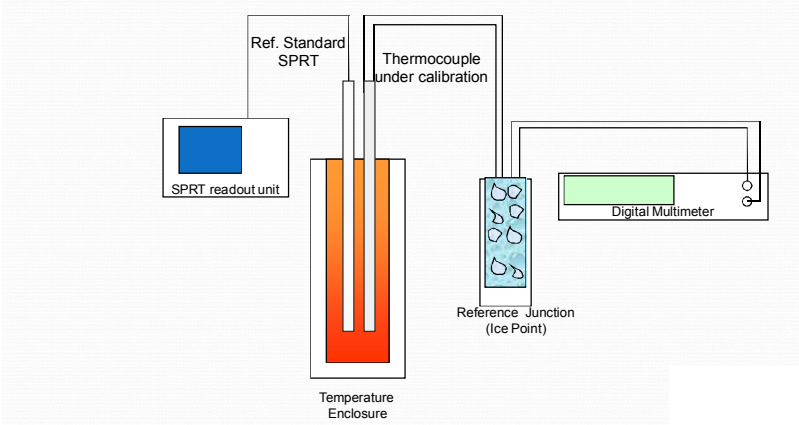
การกำหนดจุดสอบเทียบควรกระจายและครอบคลุมตลอดช่วงที่ใช้งาน แนะนำให้อย่างน้อย 5 จุดสำหรับการสอบเทียบในช่วง (0 ถึง 1 100) องศาเซลเซียส เช่น (300/500/700/900/1 100) องศาเซลเซียส ทั้งนี้ จุดสอบเทียบอาจน้อยหรือมากกว่านี้ ขึ้นกับประวัติการสอบเทียบเดิมและความต้องการใช้งานของลูกค้า

การเพิ่มความเสถียรของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ สามารถทำได้ด้วยวิธีการอบบ่ม (Annealing) ที่อุณหภูมิสูงสุดก่อนสอบเทียบ ทั้งนี้เงื่อนไขและวิธีการอบบ่มนั้น ขึ้นอยู่กับเทคนิควิธีการปฏิบัติงานของแต่ละห้องปฏิบัติการ ดังกล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 5 และควรแจ้งลูกค้าให้ทราบด้วย

9.5 การจัดเตรียมเครื่องมือในการสอบเทียบ

เทอร์โมคัปเปิลจะถูกสอบเทียบโดยวิธีเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทาน หรือเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว, ขึ้นกับช่วงอุณหภูมิ) โดยเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมคับเปิลจะถูกจุ่มลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ระดับการจุ่มเดียวกันและอ่านค่าเปรียบเทียบกัน รูปที่ 2 แสดงการสอบเทียบแบบเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Comparison Method) รอยต่อวัดของเทอร์โมคับเปิลที่ถูกสอบเทียบจะถูกจุ่มลงในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ที่วัดอุณหภูมิโดยเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (SPRT) รอยต่ออ้างอิงของเทอร์โมคับเปิล รักษาอยู่ที่ Ice point (0 $^{\circ}$C) อ่านค่าและบันทึกสัญญาณที่ได้โดยโวลต์มิเตอร์

Digital Voltmeter เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล ก่อนใช้งานจะต้องผ่านการสอบเทียบและมีการวิเคราะห์การเลื่อนค่าระหว่างปีอยู่เสมอ การเตรียมความพร้อมก่อนใช้งานควรมีการอุ่นเครื่องและปฏิบัติตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในคู่มือและใบรับรองการสอบเทียบ หากเลือกใช้หน่วยแสดงผลที่อ่านค่าเป็นอุณหภูมิโดยตรงต้องแน่ใจว่าได้ผ่านการสอบเทียบในภาคการแสดงผลเป็นอุณหภูมิรวมถึงวงจรชดเชยรอบต่อเย็น (ถ้ามี)



รูปที่ 2 การสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแบบเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (Comparison Method)

9.6 ขั้นตอนการสอบเทียบ

- การบันทึกผลให้บันทึก**ค่าอุณหภูมิ**หรือ**ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า**ของของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานเพื่อใช้นำมาหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ใช้ในการสอบเทียบ (STD) และ**ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า**ของเทอร์โมคัปเปิลที่ต้องการสอบเทียบ(UUC) ในช่วงเวลาใกล้เคียงกัน ควรบันทึกผลในเวลาที่ใกล้เคียงกัน (STD UUC UUC STD) อย่างน้อย 5 ชุดนอกจากนี้ควรบันทึกระยะจุ่มของเทอร์โมมิเตอร์ในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิขณะทำการสอบเทียบ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการสอบเทียบและการนำไปใช้งาน
- คำนวณหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเฉลี่ยของเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบของแต่ละจุดสอบเทียบ

หมายเหตุ - ก่อนเริ่มทำการสอบเทียบทุกจุดสอบเทียบ ให้บันทึกค่า background ของ Digital Voltmeter ก่อนและหลังการสอบเทียบเพื่อหาค่าเฉลี่ยและนำมาแก้ค่ากับผลการสอบเทียบที่วัดได้ กรณีค่า background ก่อนและหลังแตกต่างกันมีค่ามากกว่า 1 μV ให้ทำการเก็บผลการวัดแบบสลับขั้วไฟฟ้าบวกลบ ทำโดยหลังจากทำการเก็บข้อมูลได้ครึ่งหนึ่ง และสลับขั้วไฟฟ้าตรงข้าม และนำค่าสัมบูรณ์ (ไม่คิดเครื่องหมาย มาหาค่าเฉลี่ย) เพื่อเพิ่มลดทอนความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เสถียรของโวลต์มิเตอร์

- สามารถใช้เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานสองตัวเพื่ออ่านค่าเทียบเคียงกัน เพื่อลดผลกระทบจากการวัดที่คลาดเคลื่อนที่อุณหภูมิสูง อย่างไรก็ดี ให้คำนึงถึงความไม่แน่นอนจากเครื่องมือสแกนเนอร์ที่นำมาใช้ร่วมด้วย

10. การประเมินความไม่แน่นอนการวัด

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ของค่าความคลาดเคลื่อนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้คือ ค่าความแตกต่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (E) เนื่องจากอุณหภูมิที่รอยต่อวัดของเทอร์โมคัปเปิล UUC ได้รับจากแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (t_X) จากแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐาน E_{ref} ที่สอดคล้องกับอุณหภูมิจริงที่เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานวัดได้ (t) จาก

$$E - E_{ref} = V(t_x) - V_s(t)$$

$$\Delta t = t - t_X$$

อุณหภูมิที่รอยต่อวัดของเทอร์โมคัปเปิล UUC ได้รับจากแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ซึ่งหาค่าอุณหภูมิออกมาได้จากการวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (เทอร์โมคัปเปิล):

$$t_X = t_S(V) + \delta t_D + \delta t_F \quad (1)$$

เมื่อ

$t_S(V)$ = อุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานที่อยู่ในเทอมของ emf ของเทอร์โมคัปเปิลเมื่ออุณหภูมิรอยต่ออ้างอิงอยู่ที่ 0 °C

δt_D = องค์ประกอบความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานมีค่าเทียบเท่ากับ $C_s \delta V_{DS}$

δt_F = องค์ประกอบความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นหนึ่งเดียว (non uniformity) และ ความเสถียรตามเวลาของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (Stability)

การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลมีสองขั้นตอน คือ การประเมินความไม่แน่นอนเนื่องจากอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน และการประเมินความไม่แน่นอนรวมของการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล

ขั้นตอนที่ 1 ประเมินความไม่แน่นอนเนื่องจากอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

อุณหภูมิที่เบี่ยงเบนจะส่งผลต่อสัญญาณเอาท์พุท emf ของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน พิจารณาการกระจายเทอมแรก $t_S(V)$ ในองค์ประกอบค่าความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องเท่ากับ emf (V_S) เทอร์โมมิแตอร์มาตรฐานเทอร์โมคัปเปิล คูณด้วยสัมประสิทธิ์ (C_S)

$$t_X \cong C_S(V_S) + C_S\left\{(\delta V_S + \delta V_{IS} + \delta V_{DIS} + \delta V_{RS}) - \frac{\delta t_{0S}}{C_{S0}} + \delta V_{DS} + \delta V_{InhS} + \delta V_{Contact} + \delta V_{Ext}\right\} + \delta t_F \quad (2A)$$

โดย

1) V_S = ค่า emf ของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานที่วัดออกมาได้โดยโวลต์มิเตอร์ (ค่าเฉลี่ย)
2) δV_S = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน
3) δV_{DS} = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจาก การเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน
4) $\delta V_{IS}, \delta V_{IX}$ = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากการสอบเทียบโวลต์มิเตอร์ (S = STD, X = UUC)

5) $\delta V_{DIS}, \delta V_{DIX}$ = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจาก การเลื่อนค่าในระหว่างปีของโวลต์มิเตอร์

6) $\delta V_{RS}, \delta V_{RX}$ = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจาก ความละเอียดในการอ่านค่า (resolution) ของโวลต์มิเตอร์

7) $\delta V_{InhS}, \delta V_{InhX}$ = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นเนื้อเดียว (Inhomogeneity) ของเทอร์โมคัปเปิล

8) $\delta t_{0S}, \delta t_{0X}$ = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากอุณหภูมิที่รอยต่ออ้างอิง

9) δt_F = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ประกอบด้วยค่า Stability และ Uniformity

10) $\delta V_{Contact}$ = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากข้อต่อและสแกนเนอร์

11) δV_{Ext} = ค่าแก้เนื่องจากการใช้สายชดเชยและขยายระยะ (ถ้าใช้)

12) C_S, C_X = สัมประสิทธิ์ของเทอร์โมคัปเปิลที่อุณหภูมิของรอยต่อวัด ที่ทำการสอบเทียบ

13) C_{S0}, C_{X0} = สัมประสิทธิ์ของเทอร์โมคัปเปิลที่อุณหภูมิของรอยต่ออ้างอิง (ที่ 0 °C)

<u>หมายเหตุ</u> กรณีที่เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานเป็นเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานพลาตินั่ม สำหรับการสอบเทียบที่อุณหภูมิต่ำ การประเมินค่าความไม่แน่นอนเปลี่ยนองค์ประกอบความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน (1 – 8) จะปรับเป็นดังนี้

$$t_X = t_S + \delta t_{CS} + \delta t_D + \delta t_I + \delta t_{DI} + \delta t_{RS} + \delta t_F \quad (2B)$$

โดย

a) t_S = ค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานพลาตินั่มมาตรฐาน

b) δt_{CS} = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

c) δt_{DS} = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่าในระหว่างปีของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

d) δt_I = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบตัวอ่านอุณหภูมิ

e) δt_{DI} = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่าของตัวอ่าน

f) δt_{RS} = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากความละเอียดในการอ่านค่า (resolution) ของตัวอ่าน

g) δt_F = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนเนื่องจากแหล่งประกอบอุณหภูมิ ประกอบด้วยค่า Stability และ Uniformity

10.2 ขั้นตอนที่ 2 ประเมินความไม่แน่นอนรวมของการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล

ประเมินได้จากการนำค่าความไม่แน่นอนรวมส่วนแรก จากความไม่แน่นอนเนื่องจากอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน มาประเมินร่วมกับความไม่แน่นอนส่วนอื่นๆที่เกิดขึ้นจากเทอร์โมคัปเปิลที่ทำการสอบเทียบอีกครั้งให้ได้ความไม่แน่นอนคำตอบสุดท้าย พิจารณา emf ของเทอร์โมคัปเปิลที่ทำการสอบเทียบ (UUC), $V_x(t)$, ที่มีรอยต่อวัดอยู่ที่อุณหภูมิ t_X และรอยต่ออ้างอิงอยู่ที่อุณหภูมิ t_{X0} เขียนแทนเป็นสมการสัญลักษณ์ได้ว่า

$$V_X(t) \cong V_X + \delta V_X + \frac{\delta t}{C_X} - \frac{\delta t_{X0}}{C_X} \quad (3)$$

14) V_X = ค่า emf ของเทอร์โมคัปเปิลที่ถูกทำการสอบเทียบที่วัดออกมาได้โดยโวลต์มิเตอร์ (ค่าเฉลี่ย)

15) δV_X = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนต่างๆที่เกี่ยวข้องกับ UUC (รายละเอียดตามตัวอย่างการประเมินค่าความไม่

แน่นอน)

16) δt = ค่าแก้เนื่องจากความไม่แน่นอนที่ได้ยกมารวมจากการประเมินความไม่แน่นอนเนื่องจากอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบที่วัดได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (ขั้นตอนที่ 1)

<u>ตัวอย่าง</u> การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล Type N เทียบกับเทอร์โมคัปเปิล Type S

ในตัวอย่างนี้ได้ทำการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล Type N (UUC) เทียบกับเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานพลาตินั่มมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 300 °C และการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล Type N (UUC) เทียบกับเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน Type S (STD) ที่อุณหภูมิ 1 000 °C ในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยใช้เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (STD) 1 ตัว โดยให้มีเงื่อนไขบังคับว่าแหล่งกำเนิดอุณหภูมิจะต้องมีข้อมูลของการประเมินค่า Uniformity และ Stability โดยใช้ STD 2 ตัวที่มีคุณสมบัติคล้ายกันมาเรียบร้อยแล้ว ในกรณีที่ต้องการความถูกต้องเป็นพิเศษหรือเตาที่มีค่า non-uniformity สูงอาจใช้ STD 2 ตัวและให้ทำการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย โดยวิธีการสอบเทียบที่ใช้ STD 2 ตัว อย่างละเอียดสามารถหาข้อมูลและคำอธิบายเพิ่มเติมได้จากเอกสารมาตรฐาน Euramet cg-8 เวอร์ชั่นล่าสุด

พิจารณาค่า sensitivity coefficient

	1 100 °C	300 °C	0 °C
STD (Type S & PRT)	C_S = 10.0 μV/°C	C_{SPRT} = 10 °C/ohm	C_{S0} = 5 μV/°C
UUC (Type N)	C_X =38.6 μV/°C	C_X = 35.4 μV/°C	C_{X0} = 35.4 μV/°C

ตัวอย่าง ผลการสอบเทียบและการหาค่าความไม่แน่นอนที่ 300 °C (ใช้เทอร์โมมิเตอร์ PRT เป็น Standard)

Calibration Point	No. of measurement	STD Reading (°C)	UUC Reading (mV)	UUC Reading (mV)	STD Reading (°C)	Average UUC (mV)	Average STD (°C)
300.0	1	299.970	9.300 76	9.300 74	299.970	9.300 75	299.970
	2	299.970	9.300 85	9.300 84	299.971	9.300 85	299.971
	3	299.970	9.300 76	9.300 80	299.970	9.300 78	299.970
	4	299.970	9.300 87	9.300 92	299.971	9.300 90	299.971
	5	299.970	9.300 78	9.300 82	299.972	9.300 80	299.971
	6	299.971	9.300 67	9.300 68	299.970	9.300 68	299.971
	7	299.971	9.300 74	9.300 80	299.973	9.300 77	299.972
	8	299.973	9.300 44	9.300 51	299.974	9.300 48	299.974
	9	299.972	9.300 37	9.300 51	299.970	9.300 44	299.971
	10	299.972	9.300 72	9.300 85	299.973	9.300 79	299.973
	Average					9.300 72	299.971
	ESDM					0.000 05	0.000 37
	C_s	25.9	°C/ohm				
	C_x	35.4	uV/°C	C_{x0}		25.9	

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจาก repeatability ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน,** Type A Uncertainty : $u(t_S)$

จากข้อมูลข้างต้นจะสามารถหาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานวัดได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 299.971 \ ^{\circ}\mathrm{C}$$

ดังนั้น เนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ผ่านการสอบเทียบและมีค่าแก้เท่ากับ 0.0 °C ดังนั้น อุณหภูมิที่แท้จริงของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานคือ 299.971 °C + 0.0 °C = 299.971 °C

เมื่อเทียบค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก STD: 299.971 °C ที่ทำการสอบเทียบได้กับตารางมาตรฐานของเทอร์โมคับเปิล type N จะได้เท่ากับ

$$E_{ref} = 9.340 \text{ mV}$$

เมื่อ E_{ref} คือ emf ที่สอดคล้องกับชนิดของเทอร์โมคัปเปิล UUC ที่ ณ อุณหภูมิที่อ่านได้จาก STD

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจากการวัดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน คือ

$$S_{t_S} = \sqrt{\frac{1}{(10-1)}\sum_{i=1}^{10}(x_i - 299.971)^2} = 0.003\,7\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

จะได้ว่า ESDM มีค่าเป็น $S_{\bar{t}_S} = \frac{S_{t_S}}{\sqrt{n}} = \frac{0.003\,7\ ^{\circ}\mathrm{C}}{\sqrt{1}} = 0.003\ 7\ ^{\circ}\mathrm{C}$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ (repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน คือ

$$u(t_S) = S_{\bar{t}_S} = 0.003\ 7\ ^{\circ}\mathrm{C}$$

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

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจาก repeatability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ,** Type A Uncertainty $u(V_{IX})$:

จากชุดข้อมูลตัวอย่าง สามารถหาค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากทวนซ้ำ(repeatability) ของ UUC ได้ดังนี้ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบวัดได้สามารถหาได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 9.300\,72 \quad \text{mV}$$

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจากการวัดของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ คือ

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(10-1)}\sum_{i=1}^{10}(x_i - 9.300\,72)^2} = 0.000\,15\ \text{mV}$$

ซึ่งทำให้ได้ค่า ESDM เป็น $S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \frac{0.000\,15\text{mV}}{\sqrt{1}} = 0.000\,15\text{mV}$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ (repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบคือ

$$u(V_{IX}) = 0.000\,15\text{mV} = 0.15\ \mu\text{V}$$

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

ตัวอย่าง ตารางการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลที่อุณหภูมิ 300 °C

ส่วนที่ 1 ความไม่แน่นอนจากอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (SPRT)

Symbol $u(X_i)$	Type	Source of uncertainty	Uncertainty value	Probability distribution	Divisor	Sensitivity coef. (c_i)	Standard uncertainty (°C)	Deg. of freedom
$u(t_S)$	A	Repeatibility of STD / SPRT (°C)	0.0004	Normal	1	1.00	0.0004	9
$u(\delta t_S)$	B	Calibration of STD (°C)	0.020	Normal	2	1.00	0.010	∞
$u(\delta t_{DS})$	B	Drift of STD (°C)	0.005	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.003	∞
$u(\delta I_{IS})$	B	Calibration of Indicator (ohm)	0.0004	Normal	2	3.00	0.001	∞
$u(\delta I_{DIS})$	B	Drift of Indicator(ohm)	0.0010	Rec.	SQRT(3)	3.00	0.002	∞
$u(\delta I_{RIS})$	B	Resolution of Indicator (°C)	0.0004	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.000	∞
$u(\delta t_{UniE})$	B	Intability of temp. enclosure(°C)	0.020	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.012	∞
$u(\delta t_{UniE})$	B	Non-uniformity of temp. enclosure(°C)	0.100	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.058	∞
u_C	-	Combinded standard uncertainty		normal			0.0598	> 2000
U	-	Expanded uncertainty		normal (k=...)			0.120	2.00

ส่วนที่ 2 ประเมินความไม่แน่นอนรวมของเทอร์โมคัปเปิลที่ทำการสอบเทียบ (นำค่าความไม่แน่นอนจากตารางที่ 1 มารวม)

Symbol $u(X_i)$	Type	Source of uncertainty	Uncertainty value	Probability distribution	Divisor	Sensitivity coef. (c_i)	Standard uncertainty (uV)	Deg. of freedom
$u(V_{IX})$	A	Indication of UUC(uV)	0.05	Normal	1	1.00	0.05	9
$u(\delta V_{IX})$	B	Calibration of voltmeter (uV)	0.9	Normal	2	1.00	0.43	∞
$u(\delta V_{DIX})$	B	Long term drift of voltmeter (uV)	0.5	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.29	∞
$u(\delta V_{RIX})$	B	Resolution of voltmeter (uV)	0.05	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.03	∞
$u(\delta V_{Inh})$	B	Inhomogeneity estimation 20% of Class 2	0.50	Normal	1	35.42	17.71	∞
$u(\delta V_{hys})$	B	Driff of UUC during calibration (uV)	1.00	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.58	∞
$u(\delta t_{Sta0X})$	B	Instability of TC cold junction (°C)	0.01	Rec	SQRT(3)	25.9	0.15	∞
$u(\delta t_{Uni0X})$	B	Non-Uniformity of TC cold junction (°C)	0.01	Rec	SQRT(3)	25.9	0.15	∞
$u(\Delta t_X)$	B	Deviation of calibration temperature(°C)	0.120	Normal	2	35.4	2.13	∞
$u(\delta V_{CIX})$	B	Correction due to electrical contact (uV)	1.00	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.58	∞
$u(\delta V_{Ext})$	B	Correction due to extension wire (uV)	0.00	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.00	∞
u_C	-	Combinded standard uncertainty		normal			17.87	> 200
U	-	Expanded uncertainty (mV)		normal (k=...)			35.73	2.00
		Expanded uncertainty(°C) =	1.01			Calibration Point (°C) =		299.97

- **ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจาก Standard Platinum Resistance Thermometer ที่อุณหภูมิ 300 °C**

  - เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานพลาตินั่มมาตรฐาน, SPRT ได้ถูกนำมาใช้เป็น STD ที่อุณหภูมิ 300 °C ได้ผ่านการสอบเทียบและใบรายงานผลการสอบเทียบรายงานค่าความไม่แน่นอน (δt_S) ที่อุณหภูมิ 300 °C เท่ากับ $U = \pm 0.020$ °C (coverage factor k=2) การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่แน่นอนในใบรายงานผลการสอบเทียบของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน มีลักษณะเป็นการกระจายแบบระฆังคว่ำ (normal: divisor = k=2)

$$\delta t_S = \pm 0.020\ ^{o}\text{C}$$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_S) = (0.020)/2\ ^{o}\text{C}$

$$= 0.010\ ^{o}\text{C}$$

  - จากการวิเคราะห์ข้อมูลการสอบเทียบที่ผ่านมาพบว่าการเลื่อนค่า (δt_{DS}) ระหว่างการสอบเทียบครั้งล่าสุดของ เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน มีค่าอยู่ไม่เกิน $\pm$ 0.005 °C การเลื่อนค่าของเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะเป็นการกระจายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution : divisor = $\sqrt{3}$) ซึ่งมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

$$\delta t_{DS} = \pm 0.005\ ^{o}\text{C}$$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_{DS}) = (0.005)/\sqrt{3}\ ^{o}\text{C}$

$$= 0.003\ ^{o}\text{C}$$

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจากแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ 300 °C :**

  - ค่า Non-uniformity ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (δt_{UniF}) หาได้จากการประเมินคุณสมบัติหรือจากผลของการสอบเทียบ ผลการจากประเมินคุณสมบัติเฉพาะของค่าความไม่เป็นหนึ่งเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่าเท่ากับ $\pm$ 0.1 °C

$$\delta t_{UniF} = \pm 0.1\ ^{o}\text{C}$$

ดังนั้นความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความไม่เป็นหนึ่งเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิคือ

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_{\text{uniF}}) = \dfrac{0.1\ ^{o}\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.06\ ^{o}\text{C}$

  - ค่าความไม่เสถียรตามเวลาของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (δt_{StaF}) ผลการจากประเมินคุณสมบัติเฉพาะของค่าความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่าเท่ากับ $\pm$ 0.02 °C ดังนั้น

δt_{StaF} $= \pm 0.02\ ^{o}C$

ความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิคือ

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_{staF}) = \frac{0.02\ ^{o}C}{\sqrt{3}} = 0.011\ 5\ ^{o}C$

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจากหน่วยแสดงผลอุณหภูมิของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน SPRT**

- ความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบตัวอ่านอุณหภูมิ (δt_I) หน่วยแสดงผลของ SPRT ได้ถูกสอบเทียบและได้ค่าความไม่แน่นอนในใบรายงานผลการสอบเทียบ U = ± 0.000 4 ohm (coverage factor k=2) การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากตัวอ่านอุณหภูมิ มีลักษณะเป็นการกระจายแบบระฆังคว่ำ (normal: divisor = k=2)

δt_I $= \pm 0.000\ 4\ \Omega$

Estimated standard uncertainty,

$u(\delta t_I)$ $= \pm (0.000\ 4\ \Omega \times 10\ ^{o}C/\Omega)/2$

$= 0.002\ ^{o}C$

- ความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่าของตัวอ่าน (δt_{DI}) ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการสอบเทียบที่ผ่านมา ให้การเลื่อนค่าระหว่างการสอบเทียบครั้งล่าสุดของตัวอ่านตัวอ่านอุณหภูมิของ SPRT มีค่าอยู่ไม่เกิน ± 0.001 Ωการเลื่อนค่าของเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะเป็นการกระจายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution : divisor = $\sqrt{3}$) ซึ่งมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

δt_{DI} $= \pm 0.001\ \Omega$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_{DI})$ $= (0.001\ \Omega \times 10\ ^{o}C/\Omega)/\sqrt{3}$

$= 0.006\ ^{o}C$

- ความไม่แน่นอนเนื่องจากความละเอียดในการอ่านค่า (resolution) ของตัวอ่าน (δt_{RS}) ตัวอ่านอุณหภูมิของ STD ที่ใช้สามารถอ่านค่าได้ละเอียดสุด 0.001 °C ดังนั้น resolution = ± 0.0005 °C

δt_{RS} $= \pm 0.000\ 5\ ^{o}C$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_{RS})$ $= (0.000\ 5)/\sqrt{3}$

$= 0.002\ 9\ ^{o}C$

ตัวอย่าง ผลการสอบเทียบและการหาค่าความไม่แน่นอนที่ 1 000 °C (ใช้เทอร์โมคัปเปิลเป็น Standard)

Calibration Point	No. of measurement	STD Reading (mV)	UUC Reading (mV)	UUC Reading (mV)	STD Reading (mV)	Average UUC (mV)	STD Reading (mV)
1 000.0	1	9.590 92	36.187 55	36.187 28	9.590 93	36.187 42	9.590 93
	2	9.590 77	36.186 67	36.186 44	9.590 80	36.186 56	9.590 78
	3	9.590 71	36.186 44	36.186 44	9.590 71	36.186 44	9.590 71
	4	9.590 78	36.187 20	36.187 26	9.590 86	36.187 23	9.590 82
	5	9.590 76	36.187 79	36.187 75	9.590 86	36.187 77	9.590 81
	6	9.590 87	36.187 17	36.187 40	9.590 85	36.187 28	9.590 86
	7	9.590 75	36.186 61	36.186 79	9.590 72	36.186 70	9.590 73
	8	9.590 74	36.186 54	36.186 74	9.590 72	36.186 64	9.590 73
	9	9.590 75	36.187 23	36.187 57	9.590 82	36.187 40	9.590 79
	10	9.590 89	36.187 80	36.187 91	9.590 91	36.187 86	9.590 90
	Average					36.187 13	9.590 81
	ESDM					0.000 51	0.000 07
	C_S	11.9	°C/ohm		C_{S0}		5.4
	C_X	38.6	uV/°C		C_{X0}		25.9

Type A Uncertainty

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจาก repeatability ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน,** Type A Uncertainty : $u(t_S)$

จากข้อมูลผลการสอบเทียบที่อุณหภูมิ 1 000 °C จะสามารถหาค่าเฉลี่ยของผลการวัดที่เทอร์โมคัปเปิลมาตรฐานวัดได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 9.590\ 8\ \text{mV}$$

ดังนั้น เนื่องจากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานผ่านการสอบเทียบและจากตารางผลการสอบเทียบสามารถทราบได้ว่าที่ emf = 9.590 8 mV สอดคล้องกับค่าของอุณหภูมิ 1 000.35 °C

หมายเหตุ กรณีอ่านค่าอุณหภูมิของ STD โดยตรงจากตัวอ่านเทอร์โมคัปเปิล ให้ทำการแก้ค่าอุณหภูมิจากผลการสอบเทียบเสียก่อน

เมื่อเทียบค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จาก STD: 1 000.35 °C ที่ทำการสอบเทียบได้กับตารางมาตรฐานของเทอร์โมคับเปิล type N จะได้เท่ากับ

$$E_{ref} = 36.268\ 90\ \text{mV}$$

เมื่อ E_{ref} คือ emf ที่สอดคล้องกับชนิดของเทอร์โมคัปเปิล UUC ที่ ณ อุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบ (1 000.35 $^{\circ}$C)

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจากการวัดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน คือ

$$S_{t_S} = \sqrt{\frac{1}{(10-1)}\sum_{i=1}^{10}(x_i - 9.590\,8)^2} = 0.000\,07\ \text{mV}$$

จะได้ว่า ESDM มีค่าเป็น $S_{\bar{t}_S} = \frac{S_{t_S}}{\sqrt{n}} = \frac{0.000\,07\ \text{mV}}{\sqrt{1}} = 0.000\ 07\ \text{mV}$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ (repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานคือ

$$u(t_S) = S_{\bar{t}_S} = 0.000\ 07\ \text{mV} = 0.07\ \mu\text{V}$$

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

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจาก repeatability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ,** Type A Uncertainty : $u(V_{IX})$:

  จากชุดข้อมูลตัวอย่าง สามารถหาค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากทวนซ้ำ(repeatability) ของ UUC ได้ดังนี้ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบวัดได้สามารถหาได้ดังนี้

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 36.187\ 13\ \text{mV}$$

ดังนั้น สรุปความคลาดเคลื่อน $E\text{-}E_{ref}$ = 36.187 13 - 36.268 90 mV = - 81.8 μV

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลจากการวัดของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ คือ

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(10-1)}\sum_{i=1}^{10}(x_i - 36.187\,13)^2} = 0.000\,51\,\text{mV}$$

ซึ่งทำให้ได้ค่า ESDM เป็น $S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} = \frac{0.000\,51\text{mV}}{\sqrt{1}} = 0.000\,51\text{mV}$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากการทวนซ้ำได้ (repeatability) ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบคือ

$$u(V_{IX}) = 0.000\,51\text{mV} = 0.51\ \mu\text{V}$$

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

- **ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจาก Standard Thermocouple ที่อุณหภูมิ 1 000 °C**

- เทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน Type S (STD) ที่อุณหภูมิ 1 000 °C ได้ผ่านการสอบเทียบและในใบรายงานผลการสอบเทียบรายงานค่าความไม่แน่นอน (δt_S) ที่อุณหภูมิ 1 000 °C เมื่อรอยต่อเย็นมีค่าเท่ากับ 0 °C มีค่าเท่ากับ $U = \pm 1.0$ °C (coverage factor k=2) การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่แน่นอนในใบรายงานผลการสอบเทียบของเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน มีลักษณะเป็นการกระจายแบบระฆังคว่ำ (normal:divisor = k=2)

$$\delta t_S = \pm 1.0\ ^{o}\text{C}$$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_S) = (1.0)/\,2\ ^{o}\text{C}$

$$= 0.5\ ^{o}\text{C}$$

- จากการวิเคราะห์ข้อมูลการสอบเทียบที่ผ่านมาพบว่าการเลื่อนค่า (δt_{DS}) ระหว่างการสอบเทียบครั้งล่าสุดของ เทอร์โมคับเปิลมาตรฐาน มีค่าอยู่ไม่เกิน $\pm$ 0.3 °C การเลื่อนค่าของเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะเป็นการกระจายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution : divisor = $\sqrt{3}$) ซึ่งมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

$$\delta t_{DS} = \pm 0.3\ ^{o}\text{C}$$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_{DS}) = 0.3/\sqrt{3}\ ^{o}\text{C}$

$$= 0.173\,2\ ^{o}\text{C}$$

- ค่า Inhomogeneity (δV_{InhS}) ได้ถูกประเมินจาก การสแกนเทอร์โมคัปเปิลในอ่างน้ำมันอุณหภูมิ 180 °C ตลอดช่วงความยาวที่ครอบคลุมการใช้งานของเทอร์โมคัปเปิลและพบว่า เทอร์โมคัปเปิลมีค่า Inhomogeneity = $\pm$ 0.05% of emf output = (0.0005*9.5908 mV) = $\pm$ 0.5 uV ค่า Inhomogeneity ของเทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะเป็นการกระจายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) ซึ่งมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

$$\delta V_{InhS} = \pm 0.5\ \mu\text{V}$$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta V_{InhS}) = 0.5\ /\sqrt{3}\ \text{uV} = 0.3\ \mu\text{V}$

หมายเหตุ : ค่า Inhomogeneity ของ Standard Thermocouple หากในใบรายงานผลระบุว่ารวมอยู่ในค่าความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบแล้ว ให้ใส่ค่าเป็นศูนย์

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจากแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ 1 000 °C :**

- ค่า Non-uniformity ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (δt_{UniF}) หาได้จากการประเมินคุณสมบัติหรือจากผลของการสอบเทียบ ซึ่งผลดังกล่าวต้องครอบคลุมช่วงอุณหภูมิใช้งาน ลักษณะการกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เป็นหนึ่งเดียว (non-uniformity) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞ ผลการจากประเมินคุณสมบัติเฉพาะของค่าความไม่เป็นหนึ่งเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 1 000 °C มีค่าเท่ากับ ± 0.7 °C ดังนั้นความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความไม่เป็นหนึ่งเดียวของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิคือ

$$\delta t_{UniF} = \pm 0.7\ ^{o}\mathrm{C}$$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_{\mathrm{uniF}}) = \dfrac{0.7\ ^{o}\mathrm{C}}{\sqrt{3}} = 0.404\ ^{o}\mathrm{C}$

- ค่าความไม่เสถียรตามเวลาของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (δt_{StaF}) ได้ค่าดังกล่าวจากการประเมินคุณสมบัติหรือจากผลของการสอบเทียบ ลักษณะการกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ผลการจากประเมินคุณสมบัติเฉพาะของค่าความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 1 000 °C มีค่าเท่ากับ ± 0.2 °C ดังนั้นความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจากความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิคือ

$$\delta t_{StaF} = \pm 0.2\ ^{o}\mathrm{C}$$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_{\mathrm{staF}}) = \dfrac{0.2\ ^{o}\mathrm{C}}{\sqrt{3}} = 0.115\ ^{o}\mathrm{C}$

ตัวอย่าง ตารางการประเมินค่าความไม่แน่นอนของเทอร์โมคัปเปิลที่อุณหภูมิ 1 000 °C

ส่วนที่ 1 ความไม่แน่นอนจากอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (เทอร์โมคัปเปิล type S)

UNCERTAINTY BUDGET TABLE (temperature of the temperature source that indicated by STD)

Symbol $u(X_i)$	Type	Source of uncertainty	Uncertainty value	Probability distribution	Divisor	Sen. coef. (c_i)K/uV	Standard uncertainty (°C)	Deg. of freedom
$u(t_S)$	A	Repeatibility of STD (uV)	0.07	Normal	1	0.087	0.006	9
$u(\delta t_S)$	B	Calibration of STD (°C)	1.00	Normal	2	1.0	0.500	∞
$u(\delta t_{DS})$	B	Drift of STD (°C)	0.30	Rec.	SQRT(3)	1.0	0.173	∞
$u(\delta t_{InhS})$	B	Inhomogeneity of STD (uV)	0.50	Rec.	SQRT(3)	0.087	0.025	∞
$u(\delta I_{IS})$	B	Calibration of Indicator (uV)	0.85	Normal	2	0.087	0.037	∞
$u(\delta I_{DIS})$	B	Drift of Indicator(uV)	0.50	Rec.	SQRT(3)	0.087	0.025	∞
$u(\delta I_{RIS})$	B	Resolution of Indicator (uV)	0.05	Rec.	SQRT(3)	0.087	0.003	∞
$u(\delta t_{UniE})$	B	Intability of temp. enclosure(°C)	0.10	Rec.	SQRT(3)	1.0	0.058	∞
$u(\delta t_{UniE})$	B	Drift& uniformity of temp. enclosure(°C)	0.70	Rec.	SQRT(3)	1.0	0.404	∞
$u(\delta t_{Sta0S})$	B	stability of ref. junction (°C)	0.01	Rec.	SQRT(3)	1.0	0.006	∞
$u(\delta t_{Uni0S})$	B	uniformity of ref.junction (°C)	0.01	Rec.	SQRT(3)	1.0	0.006	∞
u_C	-	Combinded standard uncertainty		normal			0.67	> 2000
U	-	Expanded uncertainty	normal (k=…)				1.34	2.00

ส่วนที่ 2 ประเมินความไม่แน่นอนรวมของเทอร์โมคัปเปิลที่ทำการสอบเทียบ (นำค่าความไม่แน่นอนจากขั้นตอนที่ 1 มาใช้ร่วมด้วย)

Symbol $u(X_i)$	Type	Source of uncertainty	Uncertainty value	Probability distribution	Divisor	Sen. coef. (c_i) uV/K	Standard uncertainty (uV)	Deg. of freedom
$u(V_{IX})$	A	Indication of UUC(uV)	0.51	Normal	1	1.00	0.51	9
$u(\delta V_{IX})$	B	Calibration of Indicator (uV)	0.85	Normal	2	1.00	0.43	∞
$u(\delta V_{DIX})$	B	Drift of Indicator(uV)	0.50	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.29	∞
$u(\delta V_{RIX})$	B	Resolution of Indicator (uV)	0.05	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.03	∞
$u(\delta V_{Inh})$	B	Inhomogeneity:20%of Class 2:IEC584-2)	1.50	Nomal	1	38.61	57.92	∞
$u(\delta V_{hys})$	B	Driff of UUC during calibration (uV)	1.00	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.58	∞
$u(\delta t_{Sta0X})$	B	Instability of ref. junction (°C)	0.01	Rec	SQRT(3)	25.93	0.15	∞
$u(\delta t_{Uni0X})$	B	Non-Uniformity of ref.junction (°C)	0.01	Rec	SQRT(3)	25.93	0.15	∞
$u(\Delta t_X)$	B	Deviation of calibration temperature(°C)	1.34	Normal	2	38.61	25.88	∞
$u(\delta V_{CIX})$	B	Correction due to electrical contact (uV)	0.30	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.17	∞
$u(\delta V_{Ext})$	B	Correction due to extension wire (uV)	0.00	Rec.	SQRT(3)	1.00	0.00	∞
u_C	-	Combinded standard uncertainty		normal			63.44	> 2000
U	-	Expanded uncertainty (uV)	normal (k=…)				126.89	2.00
		Expanded uncertainty(°C) =	3.29		Calibration Point (°C) =			1000

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลที่ทำการสอบเทียบ**

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

การวัด Short term stability มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจความเสถียรของเทอร์โมมิเตอร์ที่นำมาสอบเทียบ และสามารถนำมาใช้ในเป็นตัวการประมาณค่าเสถียรของเครื่องมือ และคุณภาพของผลการวัดได้ การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจาก Short term stability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบจะลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

การหา Short term stability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่นำมาสอบเทียบ โดยการใช้ค่าแก้ที่อุณหภูมิแรกที่ทำการสอบเทียบและอุณหภูมิแรกหลังจากเสร็จสิ้นการสอบเทียบ มีค่าเท่ากับ $\pm$ 1 μv ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเนื่องจาก Short term stability ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ จะมีค่าเท่ากับ

$$\delta V_{hys} = \pm 1\ \mu V$$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta V_{hys}) = 1/\sqrt{3}\ \mu V$

$$= 0.577\ \mu V$$

- ค่า Inhomogeneity (δV_{InhX}) ของเทอร์โมคัปเปิลที่ทำการสอบเทียบ ได้ถูกประเมินจากเกณฑ์มาตรฐาน 20% ของเกณฑ์การยอมรับแบบมาตรฐาน (Class 2 : IEC 584-2) ของเทอร์โมคัปเปิล type N ที่อุณหภูมิดังกล่าว เกณฑ์การยอมรับของเทอร์โมคัปเปิล type N = 0.75%* t °C หรือ 2.5 °C (ให้เลือกค่าที่มากกว่า) การประเมินค่า Inhomogeneity ของเทอร์โมคัปเปิลลักษณะนี้ให้เป็นการกระจายแบบระฆังคว่ำ (Normal distribution, k =1) ซึ่งมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

- ค่าความไม่แน่อน Inhomogeneity ของเทอร์โมคัปเปิล type (UUC) ที่ 1 000 °C :

$$\delta V_{InhX} = \pm 20\ \% * 0.75\% * 1\,000\ ^{\circ}C = \pm 1.5\ ^{\circ}C$$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta V_{InhX}) = 1.5/1$

$$= 1.5\ ^{\circ}C$$

- ค่าความไม่แน่อน Inhomogeneity ของเทอร์โมคัปเปิล type (UUC) ที่ 300 °C :

$$\delta V_{InhX} = \pm 20\ \% * 2.5\ ^{\circ}C = \pm 0.5\ ^{\circ}C$$

Estimated standard uncertainty, $u(\delta V_{InhX})$ = 0.5/ 1

= 0.5 °C

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจากโวลต์มิเตอร์**

- ความไม่แน่นอนจากการสอบเทียบ ดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ได้ถูกนำมาใช้ในช่วงเกณฑ์ (Range) 100 mV โดยมีความละเอียดสูงสุดที่อ่านได้อยู่ที่ 0.0001 mV ผ่านการสอบเทียบและมีค่าความไม่แน่นอนรายงานในใบรายงานผลที่ช่วงเกณฑ์ดังกล่าวอยู่ที่ ± 15 µV/V (coverage factor *k*=2) สำหรับการใช้งานวัดสัญญาณเทอร์โมคัปเปิลไม่เกิน 50 mV ความไม่แน่นอนจะมีค่าเท่ากับ ± 15 µV/V * 50 mV = ± 0.000 85 mV การกระจายของความไม่แน่นอนเนื่องจากดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ มีลักษณะเป็นการกระจายแบบระฆังคว่ำ (normal: divisor = *k*=2)

$\delta V_{IS}, \delta V_{IX}$ = ± 0. 85 µV

Estimated standard uncertainty, $u(\delta V_{IS}), u(\delta V_{IX})$ = 0. 85 µV /2

= 0.43 µV

- ความไม่แน่นอนเนื่องจากการเลื่อนค่า ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการสอบเทียบที่ผ่านมา ให้การเลื่อนค่าระหว่างการสอบเทียบครั้งล่าสุดของดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ที่ใช้ มีค่าอยู่ไม่เกิน ± 0.5 µV การกระจายของความไม่แน่นอนมีลักษณะเป็นการกระจายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution : divisor = $\sqrt{3}$) ซึ่งมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

$\delta V_{DIS}, \delta V_{DIX}$ = ± 0.5 µV

Estimated standard uncertainty, $u(\delta V_{DIS}), u(\delta V_{DIX})$ = (0.5)/ $\sqrt{3}$ µV

= 0.29 µV

- ความไม่แน่นอนเนื่องจากความละเอียดในการอ่านค่า (resolution) ของดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ สามารถอ่านค่าได้ละเอียดสุด 0.0001 mV ดังนั้น resolution = ± 0.000 05 mV

$\delta V_{RIS}, \delta V_{RIX}$ = ± 0. 05 µV

Estimated standard uncertainty, $u(\delta V_{RIS}), u(\delta V_{RIX})$ = 0. 05 / $\sqrt{3}$ µV

= 0.029 µV

- ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากข้อต่อ สาย แสกนเนอร์ และระดับสัญญาณรบกวน ประเมินได้จากความแตกต่างของสัญญาณในช่วงเวลาที่กำหนดเมื่อทำการลัดวงจรดิจิตอลโวลต์มิเตอร์ หรือแสกนเนอร์ (ถ้าใช้) ในที่นี้ให้มีค่าอยู่ไม่เกิน ± 1.0 µV การกระจายของความไม่แน่นอนมีลักษณะเป็นการกระจายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution : divisor = $\sqrt{3}$) ซึ่งมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

$\delta V_{Contact}$ = ± 1 μV

Estimated standard uncertainty, $u(\delta V_{Contact})$ = $1/\sqrt{3}$ μV

= 0.577 μV

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจากสายชดเชยและสายขยายระยะ**

- เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้งานร่วมกับสายชดเชยหรือสายขยายระยะ จะมีความถูกต้องน้อยกว่าเทอร์โมคัปเปิลที่ทำจากสายยาวต่อเนื่อง ไร้รอยต่อระหว่างรอยต่ออ้อนและรอยต่อ ดังนั้นควรทำการสอบเทียบสายชดเชยหรือสายขยายระยะที่นำมาใช้ด้วย ให้ประเมินค่าแก้เมื่อใช้สายขยายระยะที่อุณหภูมิ 0 °C - 40 °C ได้ว่ามีค่าอยู่ไม่เกิน ± 0.0 μV (ในที่นี้ไม่ได้ใช้สายขยายระยะ) การกระจายของความไม่แน่นอนมีลักษณะเป็นการกระจายแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution : divisor = $\sqrt{3}$) ซึ่งมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

δV_{ext} = ± 0 μV

Estimated standard uncertainty, $u(\delta V_{ext})$ = $0/\sqrt{3}$ μV

= 0.0 μV

- **ความไม่แน่นอนเนื่องจากจุดอุณหภูมิอ้างอิงของรอยต่อเย็นเทอร์โมคัปเปิล**

- เทอร์โมคัปเปิล จำเป็นต้องมีอุณหภูมิอ้างอิงที่รู้ค่าในการรักษารอยต่อเย็นเสมอ อุณหภูมิอ้างอิงที่นิยมใช้คือจุดน้ำแข็ง (ice point) ผลิตจากน้ำแข็งสะอาดและบดละเอียดผสมน้ำในอัตราส่วนน้ำแข็ง:น้ำ = 3:1 บรรจุลงในกระติกสูญญากาศความลึกไม่น้อยกว่า 20 เซนติเมตร เพื่อให้ครอบคลุมระยะจุ่มของรอยต่อเย็นที่ 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยต่อ อุณหภูมิ การกระจายของอุณหภูมิและความเสถียรตามเวลาควรมีประเมินคุณสมบัติหรือจากผลของการสอบเทียบ ลักษณะการกระจายของความไม่แน่นอนของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular distribution) และมีค่าองศาความเป็นอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับ ∞

ค่าความไม่แน่นอนของจุดน้ำแข็งที่ใช้ในการสอบเทียบครั้งนี้มีค่า การกระจายของอุณหภูมิอยู่ที่ 0.01 °C

δt_{UniS}, δt_{UniX} = ±0.01 °C

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_{UniS})$, $u(\delta t_{UniX})$ = $(0.01)/\sqrt{3}$ °C

= 0.006 °C

และค่าความเสถียรตามเวลาอยู่ที่ ± 0.010 °C ในตลอดเวลาที่ใช้ในการวัด:

δt_{StaS}, δt_{StaX} = ±0.01 °C

Estimated standard uncertainty, $u(\delta t_{StaS})$, $u(\delta t_{StaX})$ = $(0.01)/\sqrt{3}$ °C

= 0.006 °C

- **<u>การประเมินความไม่แน่นอนรวม (Uncertainty budget) ในการสอบเทียบ</u>**
  เมื่อทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นการสอบเทียบตามวิธีการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ความไม่แน่นอนต่างๆเหล่านั้นสามารถนำมารวมไว้ในรูปแบบของงบความไม่แน่นอนในการสอบเทียบเพื่อหาว่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม(Combined standard uncertainty, u_c) ที่เกิดขึ้นในการสอบเทียบนั้นมีค่าเท่าใด

  ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวมสามารถหาได้ตามสมการ

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

เมื่อ u_{x_i} คือค่าความไม่แน่นอนในมาตรฐานของแต่ละองค์ประกอบ

c_i คืออัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณ output ต่อ Input

นำความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม u_c ที่ได้ คูณด้วยค่าตัวประกอบครอบคลุมจะได้เป็นค่าของความไม่แน่นอนมาตรฐานขยาย (Expanded standard uncertainty, *U*)

$$U = ku_c$$

จากตัวอย่างผลการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล Type N (UUC) เทียบกับเทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานพลาตินั่มมาตรฐาน ที่อุณหภูมิ 300 °C และเทอร์โมคัปเปิลมาตรฐาน Type S (STD) ที่อุณหภูมิ 1 000 °C สามารถรายงานผลได้ดังนี้

ที่ 300 °C ค่าความไม่แน่นอนขยาย (expanded uncertainty) ที่เกี่ยวข้องกับการวัด emf ของเทอร์โมคับเปิลที่ถูกสอบเทียบ

$$U = k \cdot u(t_x) = 2 \cdot 17.87\ \mu V = 35.73\ \mu V$$

ใช้สัมประสิทธิ์ของเทอร์โมคัปเปิล Type N ที่ 300 °C (35.4 μV/°C) จะได้ว่า $U = 1.1$ °C

ที่ 1 000 °C ค่าความไม่แน่นอนขยาย (expanded uncertainty) ที่เกี่ยวข้องกับการวัด emf ของเทอร์โมคับเปิลที่ถูกสอบเทียบ

$$U = k \cdot u(t_x) = 2 \cdot 63.44\ \mu V = 127\ \mu V$$

ใช้สัมประสิทธิ์ของเทอร์โมคัปเปิล Type N ที่ 1 000 °C (38.6 μV/°C) จะได้ว่า $U = 3.3$ °C

หมายเหตุ ใช้ค่า coverage factor k =2 สำหรับเปอร์เซนความเชื่อมั่น 95 %

11. การรายงานผล

เพื่อให้การรายงานผลการสอบเทียบเป็นไปตาม มอก.17025 ในข้อ 5.10 ใบรายงานผลการสอบเทียบจะต้องประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ อย่างน้อยดังนี้

1. หัวเรื่อง
2. ชื่อและที่อยู่ของห้องปฏิบัติการ และสถานที่ที่ทำการสอบเทียบ
3. ชื่อที่อยู่ของลูกค้า
4. การชี้บ่งเฉพาะของรายงานผลการสอบเทียบ และมีการชี้บ่งในแต่ละหน้า และการชี้บ่งถึงการสิ้นสุดรายงานผลการสอบเทียบ
5. ระบุวิธีที่ใช้ ระยะจุ่มของหัววัดอุณหภูมิ สภาวะที่ทำการทดสอบ Internal Junction error (กรณีทำการทดสอบเอง)
6. รายละเอียดของตัวอย่าง และการชี้บ่งอย่างไม่ครุมเครือ
7. วันเดือนปีที่รับตัวอย่าง และวันเดือนปีที่ทำการสอบเทียบ
8. ผลการสอบเทียบ พร้อมกับหน่วยวัดที่เหมาะสม
9. ชื่อ หน้าที่ และลายมือชื่อ หรือการชี้บ่งอื่นที่เทียบเท่าของบุคคลที่มีอำนาจหน้าที่ในการออกใบรับรองผลการสอบเทียบ
10. ข้อความที่ระบุว่ารายงานนี้มีผลเฉพาะกับตัวอย่างที่นำมาสอบเทียบเท่านั้นและใบรับรองผลการสอบเทียบจะต้องรวมถึงข้อมูลดังต่อไปนี้ ในกรณีที่จำเป็นต่อการแปลผลการสอบเทียบ
11. ภาวะต่างๆ ที่สอบเทียบซึ่งมีผลต่อการวัด
12. หลักฐานที่แสดงถึงการสอบกลับได้ของการวัด

ตัวอย่างใบรายงานผลการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิล

การรายงานผลการสอบเทียบเทอร์โมคัปเปิลจะรายงานค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่สอดคล้องกับอุณหภูมิที่ต้องการสอบเทียบ รวมถึงการรายงานค่าความคลาดเคลื่อนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบโดยเทียบค่ากับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้ามาตรฐานที่สอดคล้องกับอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบ (E-E_{ref}) โดยสามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์ซีเบคของเทอร์โมคัปเปิลชนิดที่ถูกสอบเทียบมาใช้ในการแปรผลของค่าแก้เป็นอุณหภูมิเพิ่มเติมให้ลูกค้าได้

National Institute of Metrology (Thailand)

Temperature Laboratory

Thermometry Metrology Department

Certificate No. : TT-15-0001

Issued by : Temperature Laboratory, Thermometry Department

For : Temperature Laboratory
3/ 4-5 Moo3, Klong 5, Klong Luang,
Pathumthani 12120

Description : Thermocouple

Model : Type N

Serial No. : 0001

Manufacturer : *NIMT, Thailand*

Date of Calibration : 30 June 2015

		Head of the calibration laboratory	*Person in charge*
MSR No. I-15-010	1 July 2015	(Uthai Norranim)	(Oijai Ongrai)

Description	:	Thermocouple
Model	:	Type N
Serial No.	:	0001
Manufacturer	:	NIMT, Thailand
Range	:	0 °C to 1 100 °C
Date of Received	:	1 June 2015
Measurement Date	:	15 to 30 June 2015

ENVIRONMENTAL CONDITIONS:
The measurement was carried out in an ambient temperature of (23.0 ± 2.0) °C and the relative humidity of (55 ± 10) %.

MEASUREMENT METHOD:
The thermocouple type N at immersion depth 350 mm was calibrated by comparison with a SPRT and standard thermocouple in thermocouple calibration furnace. The reference junction used was an ice point. The temperature scale used was ITS-90.

EXAMPLE

TABULATION OF RESULTS:
The Table 1 in the following page gives the calibration results at the point specified by customer, the difference (E-E_{ref}) from reference values calculated using the reference function from ASTM E230-03 and their associated measurement uncertainties.

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 EA publication EA-4/02 “Expression 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 measurand lies within the assigned range of values with a probability of 95%.

Measurement Results:

The measurement results of the thermocouple type N are reported in the table below:

Temperature (°C)	Thermocouple output (μV)	E-E_{ref} (μV)	E-E_{ref} (°C)	Uncertainty (°C)
299.97	9300.7	-39.4	-1.0	1.3
599.97	20 566.8	-45.2	-1.5	2.5
800.07	28 379.5	-77.7	-1.2	3.0
1 000.35	36 187.1	-81.8	-2.1	3.5

EXAMPLE

Table 1

The uncertainties at each calibration points reported in Table 1 are included the thermocouple inhomogeneity.

Note 1: The inhomogeneity of thermocouple is the variation of thermocouple output along the length of thermocouple wires. The inhomogeneity value is estimated to be 20 % of class 2 tolerance value for type N thermocouple according to EN IEC 60584-2. This uncertainty can be controlled at minimum by using the thermocouple at the same depth of immersion for each use.

End of certificate

เอกสารอ้างอิง

1. ASTM E230, Standard specification and emf tables for standardized thermocouples, American Society for testing and Materials Volume 14.03, U.S.A., 2013.
2. BS EN 60584-1:2013, Thermocouples. EMF specifications and tolerances, 2013.
3. IEC 60584-3:2007, Thermocouples - Part 3: Extension and compensating cables - Tolerances and identification system, 2007.
4. JIS C1602:1995, Thermocouples, Japanese Industral Standard, 1995.
5. JIS C 1610:2012 Extension and compensating cables for thermocouples, Color code, Japanese Industral Standard, 2012.
6. NIST ITS-90 Thermocouple Database 60, Version 2.0 (Web Version) Retrieved August 19, 2015, from http://srdata.nist.gov/its90/main/.
7. NIST Monograph 175, "Temperature Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90" by G. W. Burns et al., Natl. Inst. Stand. Technol. Monograph 175, 1993.
8. ASTM E2730, Standard practice for calibration and use of thermocouple reference junction probes in evaluation of electronic reference junction compensation circuits, Society for testing and Materials Volume 14.03, U.S.A., 2013.
9. ASTM E563, Standard Practice for Preparation and Use of an Ice-Point Bath as a Reference Temperature, Society for testing and Materials Volume 14.03, U.S.A., 2013.
10. Euramet cg-11 (03/2011), Guidelines on the calibration of Temperature Indicators and simulators by electrical Simulation and Measurement, European Association of National Metrology Institutes, 2011.
11. D.R. White and J.V. Nicholas, Traceable temperatures: An Introduction to temperature measurement and calibration, *Immersion error*, pp.134-139, 2nd ed., John Wiley& Sons Ltd., England, 2001.
12. Euramet cg-13 (02/2015), Guidelines on the calibration of Temperature Block Calibrators, European Association of National Metrology Institutes, 2015.
13. ASTM E220, Standard test method for calibration thermocouples by comparison techniques, American Society for testing and Materials Volume 14.03, U.S.A., 2013.
14. EURAMET cg-08 (EA-10/08), Calibration of Thermocouples, European Association of National Metrology Institutes, 2011.
15. EA publication EA-4/02 “Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration” and JCGM 100:2008 “Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”
16. ISO, Guide to the expression of uncertainty in measurement, 1st edition, 1995, ISBN 92-67-10188-9
17. ISO/IEC 17025, General requirement for the competence of testing and calibration laboratories, 2nd edition, 2005
18. R. E. Bentley, *Thermocouple in Temperature Measurement*. Sydney: CSIRO Australia, 2003
19. BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML: International vocabulary of metrology-Basic and associated terms, 3rd edition, JCGM 200:2008 (En/Th), 2008.
20. National Institute of Metrology (Thailand), TM/CG01/TT01/V04, Calibration of Digital Thermometer with temperature sensors, 2012.
21. National Institute of Metrology (Thailand), TM/CG03/TT01/V02, Calibration of INDUSTRIAL PLATINUM RESISTANCE THERMOMETER, 2014.
22. O.Ongrai, Thermocouple Inhomogeneity, Retrieved July 1, 2015, from http://www.nimt.or.th/nimt/upload/contentfile/attach-lab_article-443-396.pdf

23. O.Ongrai, ความไม่แน่นอนในการสอบเทียบดิจิตอล (เทอร์โมคัปเปิล) เทอร์โมมิเตอร์, Update Vol.19(3) , สมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย, 2014.
24. O.Ongrai, เรื่องน่ารู้เมื่อต้องวัดอุณหภูมิ, Metrology info., Vol. 16 (81), สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2014.

ภาคผนวก ก.

หมวดที่ 1 นิยามทั่วไป

- **การสอบเทียบ** (Calibration) : การปฏิบัติงานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด โดยในขั้นแรกเป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง **ค่าปริมาณ**กับ**ความไม่แน่นอนทางการวัด** ที่ได้มาจาก**มาตรฐานการวัด**และ**สิ่งบ่งชี้**ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และในขั้นที่สองเป็นการใช้ข้อมูลดังกล่าวมาสร้างความสัมพันธ์เพื่อให้ได้มาซึ่ง **ผลการวัด** จากสิ่งบ่งชี้
- **ความถูกต้องของการวัด** (Accuracy of measurement) : ความใกล้เคียงของการเป็นไปตามกันระหว่างค่าปริมาณที่วัดได้กับปริมาณจริงของสิ่งที่ถูกวัด
- **การทวนซ้ำได้ของการวัด** (Measurement Repeatability) : ความเที่ยงตรงการวัดภายใต้ชุดของเงื่อนไขการทวนซ้ำได้ของการวัด
- **เงื่อนไขความเที่ยงตรงระหว่างการวัด** (Intermediate precision condition of measurement) :เงื่อนไขของการวัดจากชุดของเงื่อนไขซึ่งรวมถึง วิธีดำเนินการวัดเดียวกัน ผู้ปฏิบัติงานคนเดียวกัน ระบบวัดเดียวกัน เงื่อนไขการทำงานคนเดียวกัน และสถานที่ปฏิบัติงานเดียวกัน และการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้งบนวัตถุเดิม หรือที่มีลักษณะคล้ายเดิมในช่วงระยะเวลาที่ไม่สั้นจนเกินไป แต่อาจรวมถึงเงื่อนไขอื่นที่เกี่ยวข้องกับ การเปลี่ยนแปลง
- **เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน** (Standard Thermometer, STD) :เทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานในเอกสารฉบับนี้หมายถึง
  - เทอร์โมมิเตอร์ความต้านทานแพลทินั่ม (Platinum Resistance Thermometer) สำหรับที่อุณหภูมิไม่เกิน 600 °C
  - เทอร์โมคัปเปิลแบบโลหะชั้นสูง เช่น ชนิด S, R หรือเทียบเท่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 °C ถึง 1 300 °C
- **เทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ** (Thermometer Under Calibration, TUC) : เทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบในเอกสารฉบับนี้หมายถึง เทอร์โมคัปเปิล
- **แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ** (Temperature Source) :เป็นแหล่งกำเนิดอุณหภูมิซึ่งใช้ในการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์สามารถแยกตามชนิดของตัวกลางที่ใช้ดังนี้

  1. แหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้ของเหลวเป็นตัวกลาง (Liquid Bath)

  2. แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบแห้งหรือใช้อากาศเป็นตัวกลาง (Dry Block)

  3. แหล่งกำเนิดอุณหภูมิใดๆ เช่น Fluidized Bath

- **ความเป็นหนึ่งเดียวกันของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ** (Uniformity of Temperature Source) :คุณสมบัติหนึ่งของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ เพื่อบ่งชี้การกระจายของอุณหภูมิที่พื้นที่ใช้งานของแหล่งกำเนิดที่อุณหภูมิใด ๆ ซึ่งการกระจายของอุณหภูมินี้อาจส่งผลต่อการผลการวัดระหว่างเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ทำการสอบเทียบ
- **ความไม่เสถียรของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ** (Instability of Temperature Source) **:** ความเสถียร (Stability) ของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ คือการคงที่ของอุณหภูมิ ณ อุณหภูมิใด ๆ ในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ หากอุณหภูมินี้มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาสั้น ๆ หรือแหล่งกำ เนิดอุณหภูมิมีความไม่เสถียร (instability) เกิดขึ้น ก็ย่อมที่จะส่งผลต่อค่าอุณหภูมิที่อ่านได้ของทั้งเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานและเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ

ภาคผนวก ข.

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลชนิดของลวดตัวนำของเทอร์โมคับเปิลมาตรฐาน

Type	Thermoelements		Temperature Range (°C)
	Positive	Negative	
K	Chromel (Ni9.5Cr0.5Si)	Alumel : (Ni5(Si,Mn,Al))	-200 to 1 260
N	Nicrosil (Ni14.2Cr1.4Si)	Nisil (Ni4.4Si0.1Mg)	-40 to 1 260
E	Ni9.5Cr0.5Si	Constantan :Cu44Ni	-200 to 870
J	~99.5%Fe	Cu44Ni	-40 to 750
T	~99.95%Cu	Cu44Ni	-200 to 350
B	Pt30%Rh	Pt6%Rh	600 to 1 700
R	Pt13%Rh	Pt	0 to 1 480
S	Pt10%Rh	Pt	0 to 1 480
Au/Pt	Au	Pt	0 to 1 000
Pt/Pd	Pt	Pd	0 to 1 500
W5(C)	Tungsten5% Rhenium	Tungsten26% Rhenium	0 to 2 300
W3(D)	Tungsten3% Rhenium	Tungsten25% Rhenium	0 to 2 300

Table 1 ชนิดและช่วงอุณหภูมิการใช้งานของเทอร์โมคับเปิลมาตรฐาน

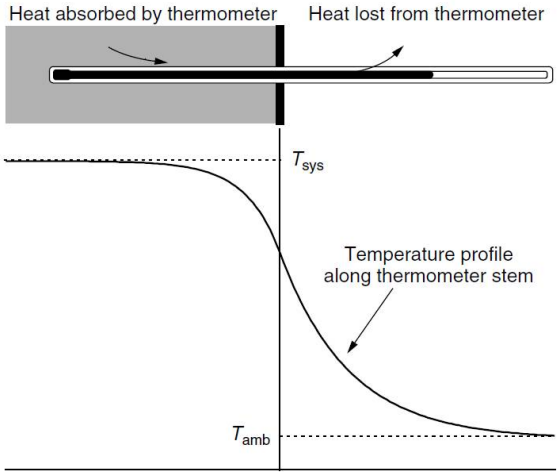
ตารางที่ 2 ช่วงอุณหภูมิใช้งานและระดับเกณฑ์การยอมรับ (Tolerance) ตาม ASTM E230

Thermo-couple Type	Temperature Range		Tolerances with Reference Junction 0°C [32°F]			
			Standard Tolerances		Special Tolerances	
	°C	°F	°C	°F	°C	°F
T	0 to 370	32 to 700	The greater of ±1.0°C or ±0.75 %	Note 2	The greater of ±0.5°C or ±0.4 %	Note 2
J	0 to 760	32 to 1400	The greater of ±2.2°C or ±0.75 %		The greater of ±1.1°C or ±0.4 %	
*E	0 to 870	32 to 1600	The greater of ±1.7°C or ±0.5 %		The greater of ±1.0°C or ±0.4 %	
K or N	0 to 1260	32 to 2300	The greater of ±2.2°C or ±0.75 %		The greater of ±1.1°C or ±0.4 %	
R or S	0 to 1480	32 to 2700	The greater of ±1.5°C or ±0.25 %		The greater of ±0.6°C or ±0.1 %	
B	870 to 1700	1600 to 3100	±0.5 %		±0.25 %	
C	0 to 2315	32 to 4200	The greater of ±4.4°C or 1 %	Note 2	Not applicable	
T[A]	−200 to 0	−328 to 32	The greater of ±1.0°C or ±1.5 %		[B]	
*E[A]	−200 to 0	−328 to 32	The greater of ±1.7°C or ±1 %		[B]	
K[A]	−200 to 0	−328 to 32	The greater of ±2.2°C or ±2 %		[B]	

ภาคผนวก ค.

Immersion errors (ความคลาดเคลื่อนจากระยะการจุ่ม)

พิจารณากระจายของความร้อนของแท่งเทอร์โมมิเตอร์ในแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ทำการวัดไปยังอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม



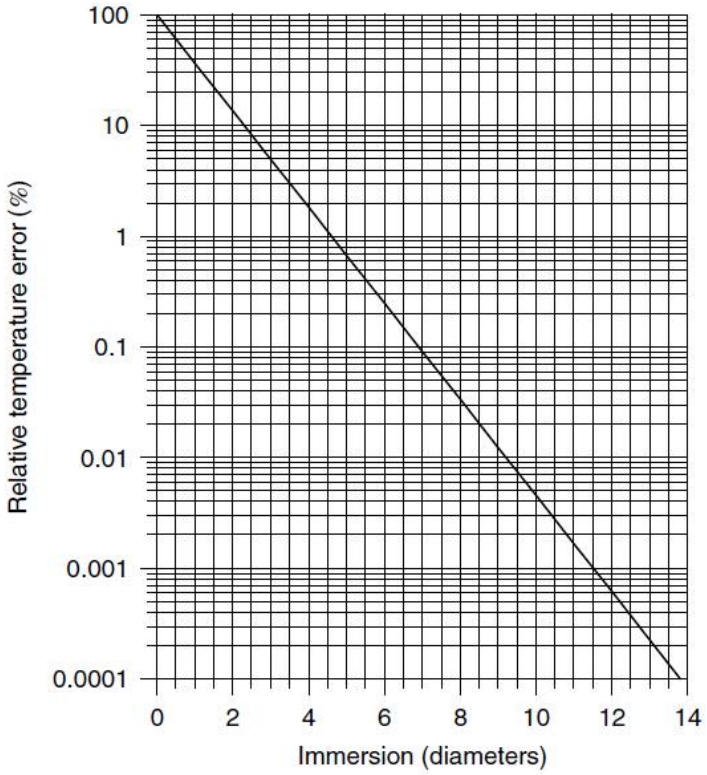
ภาพการไหลของความร้อนไปตามแท่งเทอร์โมมิเตอร์ (จากอุณหภูมิร้อนไปสู่เย็น) เป็นผลให้อุณหภูมิที่เทอร์โมมิเตอร์อ่านได้แตกต่างเล็กน้อยไปจากตัวกลางที่สนใจทำการวัด [10]

จากโมเดลทางคณิตศาสตร์ของการถ่ายเทความร้อน ที่บอกอัตราการไหลของความร้อนจากปลายแท่งเทอร์โมมิเตอร์จะเกี่ยวข้องกับค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิที่อ่านได้จาก

$$\Delta T_{\mathrm{m}} = \left(T_{\mathrm{amb}} - T_{\mathrm{sys}}\right) K \exp\left(\frac{-L}{D_{\mathrm{eff}}}\right)$$

เมื่อ ΔT_{m} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิ; T_{amb} และ T_{sys} อุณหภูมิของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมตามลำดับ ; L คือ ระยะจุ่มของแท่งเทอร์โมมิเตอร์ ; D_{eff} คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งเทอร์โมมิเตอร์ ;K คือ ค่าคงที่ ในที่นี้ให้เท่ากับ 1

จากความสัมพันธ์ที่อ้างถึงข้างต้น สามารถได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะจุ่ม (จำนวนเท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง)และค่าความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิสัมพัทธ์ (Relative temperature error : $\left|\frac{\Delta T_m}{T_{sys}-T_{amb}}\right|$) ได้ดังกราฟ



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนอุณหภูมิสัมพัทธ์ (Relative temperature error : $\left|\frac{\Delta T_m}{T_{sys}-T_{amb}}\right|$) เป็น % และระยะจุ่ม ในจำนวนเท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งเทอร์โมมิเตอร์ [11]

จากข้อมูลดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่า

- สำหรับความถูกต้องระดับ 1% แนะนำการจุ่มแท่งเทอร์โมมิเตอร์ในระยะ 5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง บวกด้วยระยะความยาวของเซนเซอร์ เป็นระยะจุ่มที่สามารถใช้ได้ในการวัดอุณหภูมิทั่วไปในระดับอุตสาหกรรม
- สำหรับความถูกต้องดีขึ้นในระดับ 0.01% แนะนำการจุ่มแท่งเทอร์โมมิเตอร์ในระยะ 10 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง บวกด้วยระยะความยาวของเซนเซอร์ เป็นระยะจุ่มที่ใช้ได้ในการวัดอุณหภูมิในความถูกต้องระดับดีของห้องปฏิบัติการ
- สำหรับความถูกต้องดีมากในระดับ 0.0001% แนะนำการจุ่มแท่งเทอร์โมมิเตอร์ในระยะ 15 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง บวกด้วยระยะความยาวของเซนเซอร์ เป็นระยะจุ่มที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิระดับความถูกต้องมากที่สุด เช่น การวัดในกำเนิดอุณหภูมิมาตรฐาน

โดยรายละเอียดเพิ่มเติมในการประเมินค่าความคลาดคลื่อนเนื่องจาก Immersion error สามารถอ่านเพิ่มเติมได้จาก D.R. White and J.V. Nicholas [11]