

เอกสารวิชาการ

เรื่องที่ 2

การศึกษาผลการสอบเทียบ digital thermometer with RTD sensor

ที่อุณหภูมิ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยวิธีการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

โดย

นายเอกสิทธิ์ ตุ่มสิทธิ์

นายณฤเบศ เนินทอง

เลขทะเบียนวิชาการ

64(2)-0404-091

สถานที่ดำเนินการ

สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์

ระยะเวลาดำเนินการ

ตุลาคม 2563 – เมษายน 2564

การเผยแพร่

เว็บไซต์สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์

<https://qcontrol.dld.go.th/>

การศึกษาผลการสอบเทียบ digital thermometer with RTD sensor ที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C โดยวิธีการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

นายเอกสิทธิ์ ตุ่มสิทธิ์^{1/} นายณฤเบศ เนินทอง^{1/}

บทคัดย่อ

การศึกษาผลการสอบเทียบ digital thermometer with RTD sensor (DT with RTD) ที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C โดยวิธีการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ตาม guideline of calibration of digital thermometer with temperature sensor เลขที่ TM/CG01/TT01/V04 โดยใช้ digital Thermometer with PRT 25 ohms เป็นเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ใช้อ่างสอบเทียบอุณหภูมิที่บรรจุน้ำมันซิลิโคนเป็นแหล่งสร้างอุณหภูมิ และใช้ DT with RTD ที่มีค่าความละเอียดที่ 0.01 °C จำนวน 3 เครื่อง ดังนี้ ID No. CAL_LIG32-ch2 (RTD1), ID No. CAL_LIG33-ch1 (RTD2) และ ID No. CAL_LIG34-ch2 (RTD3) เป็นตัวอย่างสอบเทียบ

ผลการทวนสอบของผลการสอบเทียบ DT with RTD ทั้ง 3 ตัวอย่าง ตาม ISO 14253-1 (2017) พบว่า ที่จุดอุณหภูมิ -30 °C, 0 °C, 25 °C, 65 °C และ 100 °C ให้ผลผ่านการทวนสอบทุกจุดอุณหภูมิ จึงไม่จำเป็นต้องใช้ค่าแก้ไขเมื่อนำไปใช้วัดอุณหภูมิ และจากการศึกษาครั้งนี้พบว่าค่าขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด (Calibration and Measurement Capability, CMC) เท่ากับ 0.061 °C ซึ่งมีค่าต่ำกว่า 2.5 เท่าของค่า ค่า tolerance ที่ต่ำที่สุดตามมาตรฐาน IEC 60751 (IEC, 2008) ดังนั้นห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ (สตส.) จึงสามารถให้บริการสอบเทียบ DT with RTD ที่ช่วงอุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C ได้ นอกจากนี้เมื่อนำค่า CMC มาเปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการอื่นที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 ในขอบข่ายการสอบเทียบ DT with RTD ที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C จาก สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) จะถูกจัดอยู่ในลำดับที่ 17 จาก 45 ห้องปฏิบัติการ โดยผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถใช้ขอการรับรอง ISO/IEC 17025 กับ สมอ. และสามารถนำไปใช้จัดทำคู่มือการสอบเทียบ DT with RTD ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. ได้

คำสำคัญ : สอบเทียบ, digital thermometer with RTD sensor, อุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C

เลขทะเบียนวิชาการ : 64(2)-0404-091

^{1/}สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ 91 หมู่ 4 ถนนติวานนท์ ตำบลบางกะดี อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000

Study of result of digital thermometer with RTD sensor calibration from -30 °C to 100 °C by comparison standard thermometer method

Aekasit Tumsit^{1/} Narubeth Noenthong^{1/}

Abstract

Study of the calibration results of the digital thermometer with RTD sensor (DT with RTD) from -30 °C to 100 °C was conducted by comparison method with standard thermometer according to Guideline of calibration of digital thermometer with temperature sensor, guideline no. is TM/CG01/TT01/V04. The digital thermometer with 25 ohms PRT and silicone oil within calibration bath were used as standard thermometer and were used as standard thermometer and temperature source, respectively. Three of DT with RTD, 0.01 °C resolution, included, ID NO. LIG_32-ch2 (RTD1), ID NO. LIG_33-ch1 (RTD2) and ID NO. LIG_34-ch2 (RTD3) were selected for samples in this study.

The verified results of 3 samples of DT with RTD calibration results according to ISO 14253-1 (2017), the study found that at -30 °C, 0 °C, 25 °C, 65 °C and 100 °C, the calibration results passed the verification criteria thus the correction value is unnecessary at that temperature point. This study found that the Calibration and Measurement Capability (CMC) value was 0.061 °C, it had 2.5 times lower than the lowest of tolerance of RTD, according to IEC 60751 (2008), indicated the capability to calibrate DT with RTD in the range -30 °C to 100 °C of the Temperature Calibration Laboratory of Bureau of Quality Control of Livestock Products. Moreover, this CMC value was also compared with the Thai Industrial Standards Institute (TISI) accredited laboratories in the same temperature range. The CMC value from this study was ranked 17th out of 45th laboratories. The results from this study can be used for ISO/IEC 17025 accreditation with TISI and can be used for preparation for the DT with RTD calibration manual of Temperature Calibration Laboratory (BQCLP).

Keywords : calibration, digital thermometer with RTD sensor, temperature from -30 °C to 100 °C

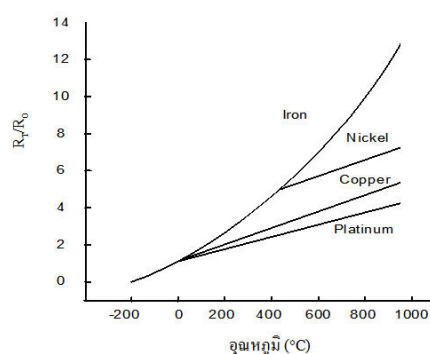
Registered No. : 64(2)-0404-091

^{1/} Bureau of Quality Control of Livestock Products 91 Moo 4, Tiwanon Rd., Bangkadi, Mueang, Pathumthani 12000

บทนำ

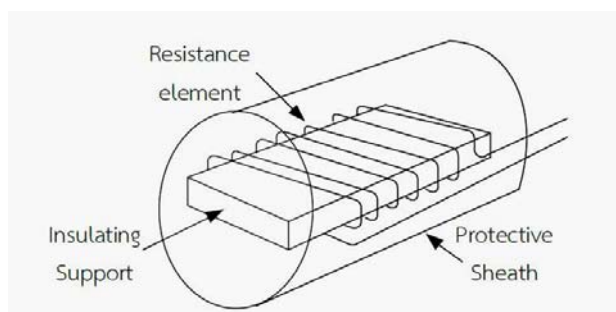
Digital thermometer with RTD sensor (DT with RTD) เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้งานได้ง่าย และให้ความแม่นยำการวัดสูง โดยหัววัดอุณหภูมิที่ต่อกับ digital thermometer เป็นประเภท resistance temperature detector (RTD)

DT with RTD ประกอบด้วยหน่วยแสดงผล เรียกว่า digital thermometer (DT) และ หัววัดอุณหภูมิ ประเภท RTD ซึ่งย่อมาจาก resistance temperature detector (NIMT, 2012) หรือ RT ย่อมาจาก resistance thermometer หัววัดประเภท RTD นิยมทำด้วยลวดโลหะ เช่น ทองแดง นิกเกิล และ แพลตตินัม เป็นต้น หากทำจากทองแดง จะเรียกว่า copper resistance thermometer หรือ CRT ถ้าทำจากนิกเกิล จะเรียกว่า Nickel resistance thermometer หรือ NRT และถ้าทำจากแพลตตินัม จะเรียกว่า platinum resistance thermometer หรือ PRT (OIML R 84, 2003) สำหรับทองแดงและนิกเกิลเป็นวัสดุที่มีราคาถูก ประกอบง่าย จึงนิยมใช้งานในช่วงอุณหภูมิต่ำ โดยทั่วไปการใช้งานในอุตสาหกรรมและในห้องปฏิบัติการนิยมใช้อาร์ทีดีที่ทำมาจากแพลตตินัมมากที่สุด เนื่องจากมีความเที่ยงตรง (precision) และมีความเป็นเชิงเส้น (linearity) สูงที่สุด แต่มีราคาค่อนข้างแพงเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่น และเมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอุณหภูมิของทองแดงและแพลตตินัม จากรูปที่ 1 พบว่า มีลักษณะเป็นเส้นตรงในย่านของอุณหภูมิที่ค่อนข้างกว้าง และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นชัดเจน ซึ่งทองแดงง่ายต่อการทำปฏิกิริยาเคมี จึงนิยมเลือกใช้แพลตตินัม (นวกัทร และ ทวีพล, 2555)



รูปที่ 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานและอุณหภูมิของวัสดุต่าง ๆ (นวกัทร และ ทวีพล, 2555)

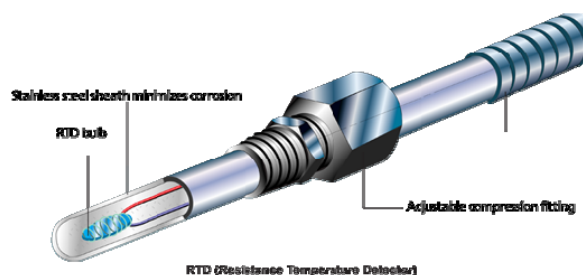
โครงสร้างของ RTD ประกอบด้วยขดลวดความต้านทานที่ทำจากวัสดุชนิดต่างๆ พันรอบแกนหรือหลอดที่มีสภาพเป็นฉนวนไฟฟ้าทนต่อความร้อน ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างภายในของอาร์ทีดี (นวกัทร และ ทวีพล, 2555)

เมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง เพื่อให้ขดลวดร้อนจนอ่อนตัวและนำไปอบร้อนเพื่อคลายความเครียดของเส้นลวด แกนสำหรับพันเส้นลวดส่วนใหญ่ทำมาจากสารประเภทเซรามิกหรือแก้ว หรือแพลตตินัมที่เคลือบด้วยเซรามิก โดยแกนที่ใช้พันขดลวดต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวใกล้เคียงและสัมพันธ์กับการขยายตัวของเส้นลวด

RTD ที่นำไปใช้งานอยู่ในรูปของชีตอาร์ทีดี (sheath RTD) บางครั้งเรียกว่า ปลอกโลหะ (metal sheath) หรือ โพรบ (probe) (นวกัทร และ ทวีพล, 2555) ตามรูปที่ 3



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของ RTD (ที่มา: http://www.tutco.com/temperature_sensors/rtds.php)

RTD สามารถใช้วัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -200°C ถึง 850°C แต่ถ้าเป็นชนิด PRT จะวัดอุณหภูมิได้ตั้งแต่ -196°C ถึง 650°C (OIML R 84, 2003)

DT และ หัววัดอุณหภูมิ ต้องมีการสอบเทียบก่อนการใช้งาน เพื่อให้ทราบค่าจริงและค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายก่อนนำมาใช้วัดอุณหภูมิ โดยที่เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ DT with RTD ควรมีความสามารถในการวัดดีกว่า 3-10 เท่าของ DT with RTD ตามมาตรฐาน ISO 10012: 2003 (ISO, 2003) วิธีการสอบเทียบ DT with RTD ซึ่งสามารถอ้างอิงได้หลายวิธี ได้แก่

วิธี ASTM E644-11: Standard test methods for testing industrial resistance thermometers (ASTM, 2019) เป็นวิธีมาตรฐานที่ครอบคลุมถึงหลักการ เครื่องมือ และขั้นตอนในการสอบเทียบและทดสอบ industrial resistance Thermometers โดยแบ่งการสอบเทียบเป็น 2 วิธี คือ วิธีการเปรียบเทียบ (comparison method) และ วิธีวัดจุดคงที่ (fixed point method) เป็นวิธีวัดอุณหภูมิที่จุดอุณหภูมิสมมูลและเป็นจุดอุณหภูมิที่จำเพาะของคุณสมบัติของสารบริสุทธิ์หรือส่วนผสมของสารบริสุทธิ์นั้น (ASTM, 2019) ASTM E644-11 เป็นวิธีมาตรฐานที่สามารถนำไปใช้สอบเทียบได้ทั้ง DT with RTD และ DT with PRT แต่กำหนดให้ใช้ block ที่ทำจากทองแดง อลูมิเนียม หรือโลหะอื่นๆที่เหมาะสม ใส่ไว้ในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิเพื่อเพิ่มความเสถียรและความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิ ในการหาค่าความไม่แน่นอนจากอ่างสอบเทียบ แต่วิธีนี้ไม่สามารถใช้กับการสอบเทียบ DT with Thermocouple (TC) ได้

วิธี Guideline of calibration of digital thermometer with temperature sensor (TM/CG01/TT01/V04) (NIMT, 2012) ใช้เป็นแนวทางในการสอบเทียบ DT with temperature sensor โดยเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -80°C ถึง 960°C แบ่งตามชนิดของหัววัดที่ต่อร่วม ได้แก่ DT with RTD และ การสอบเทียบ DT with TC sensor (DT with TC) ซึ่งวิธีการสอบเทียบทั้งสองแบบมีกระบวนการสอบเทียบเหมือนกัน แตกต่างกันที่องค์ประกอบที่นำมาใช้ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดขยาย ซึ่งการสอบเทียบ DT with RTD สามารถใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิได้สองชนิด คือ แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้ของเหลวเป็นตัวกลางในการนำอุณหภูมิ ได้แก่ อ่างสอบเทียบอุณหภูมิ หรือ แหล่งกำเนิดอุณหภูมิแบบใช้อากาศเป็นตัวกลางในการนำอุณหภูมิ ได้แก่ dry block (NIMT, 2012³) เป็นวิธีที่สามารถใช้สอบเทียบ DT with RTD และ DT with TC ได้ เพราะมีรายละเอียดการสอบเทียบและการหาค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายที่เป็นขั้นตอน รวมทั้งสามารถใช้แหล่งกำเนิดอุณหภูมิ ได้ทั้ง 2 ชนิด คือ อ่างสอบเทียบอุณหภูมิ และ dry block แต่หัวข้อการรายงานผลยังเป็นไปตาม ISO/IEC 17025 รุ่น 2005 ซึ่งเป็นมาตรฐานฉบับเก่าอยู่ ดังนั้นผู้ใช้ต้องปรับเปลี่ยนให้สอดคล้องกับ ISO/IEC 17025 รุ่น 2017

และวิธี Guidelines on the calibration of temperature indicators and simulators by electrical simulation and measurement (EURAMET/cg-11/v.02) (EURAMET, 2011) เป็นแนวทางการสอบเทียบเครื่องวัดและแสดงค่าไฟฟ้า และ เครื่องวัดและแสดงค่าอุณหภูมิและเครื่องจำลองอุณหภูมิที่ต่อร่วมกับหัววัดประเภทความต้านทานหรือเทอร์โมคัปเปิลที่ได้มาตรฐาน โดยการแปลงค่าอุณหภูมิไปเป็นค่าทางไฟฟ้า แล้วเปรียบเทียบกับค่า

อ้างอิง (EURAMET, 2011) เป็นวิธีที่ใช้สอบเทียบได้ทั้ง DT with RTD และ DT with TC แต่เป็นการสอบเทียบที่ใช้เครื่องกำเนิดทางไฟฟ้าวัดค่าความต้านทานจากหัววัดอุณหภูมิแล้วแปลงค่าทางไฟฟ้าเป็นค่าอุณหภูมิจากตารางอ้างอิงใน IEC 60751 (IEC, 2008) รวมทั้งไม่มีวิธีการหาค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย โดยระบุให้ทำตาม ISO Guide และ EA-4/02

DT with RTD เป็นเครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบ สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ (สตส.) ซึ่งในห้องปฏิบัติการสอบเทียบใช้ทวนสอบ data logger with temperature sensor และ DT with temperature sensor ใช้ตรวจสอบหาค่า self heating transfer of standard และ stem conduction of standard ของการหาค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายในการสอบเทียบ temperature controlled enclosures รวมทั้งใช้วัดอุณหภูมิในตัวควบคุมอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการทดสอบ สตส. จึงต้องใช้งบประมาณในการจัดจ้างสอบเทียบกับหน่วยงานเอกชน ดังนั้นห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. จึงต้องการพัฒนาศักยภาพของห้องปฏิบัติการให้สามารถสอบเทียบและออกใบรับรองการสอบเทียบ DT with RTD ได้ จึงได้ทำการศึกษาค่าแก้ไข (correction value) หมายถึง ค่าที่บวกเข้าไปทางพีชคณิตกับผลการวัดที่ไม่ได้รับการแก้ไขเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (NIMT, 2012³) ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย (expanded measurement uncertainty) หมายถึง ผลคูณของความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวมและตัวประกอบครอบคลุมซึ่งมีค่ามากกว่าหนึ่ง (NIMT, 2012³) และค่าขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด (Calibration and Measurement Capability; CMC) ในการสอบเทียบ DT with RTD ที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C โดยวิธีการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานตาม Guideline of calibration of digital thermometer with temperature sensor (TM/CG01/TT01/V04) (NIMT, 2012³) เพราะเป็นวิธีที่เหมาะสมกับเครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการสอบเทียบ สตส. เนื่องจากวิธี ASTM E644-11 (ASTM, 2019) ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษสำหรับใส่อ่างสอบเทียบในการหาค่าความไม่แน่นอนของอ่างสอบเทียบเช่นเดียวกับวิธี EURAMET/cg-11/v.02 (EURAMET, 2011) ที่ต้องใช้เครื่องกำเนิดทางไฟฟ้าเป็นเครื่องมือสอบเทียบจึงไม่เหมาะสมกับห้องปฏิบัติการ สอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส.

โดยทำการสอบเทียบ DT with RTD 5 จุดอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C และทวนสอบผลการสอบเทียบจากค่าความผิดพลาด (error) และค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย เพื่อประเมินเครื่องมือว่าผ่านเกณฑ์ยอมรับหรือไม่ และจำเป็นต้องใช้ค่าแก้ไขในการวัดอุณหภูมิหรือไม่ และเลือกค่า CMC จากค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายที่ครอบคลุมช่วงการวัดที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C มาเปรียบเทียบกับค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (tolerance) ที่ต่ำที่สุดของเครื่องมือใน สตส. เพื่อพิจารณาความสามารถในการให้บริการสอบเทียบ DT with RTD ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. นอกจากนี้ทำการเปรียบเทียบค่า CMC ที่ได้จากการศึกษา กับค่า CMC ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบอื่นในประเทศไทยที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 ในขอบข่ายการสอบเทียบ DT with RTD ช่วงการวัดที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C กับสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) เพื่อดูลำดับความสามารถในการให้บริการของห้องปฏิบัติการสอบเทียบ เนื่องจากค่า CMC มีความสำคัญที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบต้องแสดงสำหรับการขอรับรอง ISO/IEC 17025 จาก สมอ. เพราะเป็นการแสดงความสามารถในการวัดของห้องปฏิบัติการในขอบข่ายที่ขอการรับรองและเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้บริการสอบเทียบ ในการนำไปใช้พิจารณาเลือกห้องปฏิบัติการสอบเทียบ DT with RTD และใช้เป็นแนวทางในการจัดทำคู่มือการสอบเทียบ DT with RTD ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส.

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1.1 เครื่องวัดอุณหภูมิมาตรฐานพร้อมหัววัด ชนิด PRT (Digital Thermometer with PRT; DT with PRT) Brand FLUKE model 1529-R, Serial No. B73678) มีค่าความละเอียด 0.0001°C โดยมีหัววัดดังนี้

1.1.1 PRT sensor 25 ohms จำนวน 1 แท่ง ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 5628-15-S S/N: 3540 (PRT_{cal})

ที่มีการเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (drift of standard) เท่ากับ $\pm 0.030^{\circ}\text{C}$

1.1.2 PRT sensor 100 ohms จำนวน 2 แท่ง ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 5609-15-S S/N: 04529 (PRT1) และ S/N: 04532 (PRT2)

1.2 อ่างสอบเทียบอุณหภูมิ (calibration bath) ยี่ห้อ Lauda รุ่น UB40JL ความลึก 40 เซนติเมตร

1.3 นาฬิกาจับเวลา

1.4 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (digital thermohygrometer) ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง $23.0 \pm 3^{\circ}\text{C}$ มีค่าความละเอียด 0.1°C และสามารถวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้ในช่วง $50 \pm 10\% \text{RH}$ มีค่าความละเอียด $0.1\% \text{RH}$ ยี่ห้อ Testo รุ่น 608-H2 S/N: 30025541

1.5 คอมพิวเตอร์และโปรแกรมประมวลผล Microsoft excel

2. สารเคมี

2.1 น้ำมันซิลิโคน (silicone oil) ยี่ห้อ DOW ชื่อผลิตภัณฑ์ XIAMETER™ PMX-200 Silicone Fluid 5 cst (CASRN: 63148-62-9) สำหรับใช้เป็นตัวกลางในการนำอุณหภูมิ ได้ในช่วง -40°C ถึง 120°C

2.2 95% เอทานอล (95% ethanol) สำหรับเช็ดทำความสะอาดเครื่องมือ

3. ตัวอย่างที่ศึกษา

DT with RTD จำนวน 3 แท่ง ที่มีค่าความละเอียด 0.01°C ประกอบด้วย

3.1 DT with RTD 25 ohms ID NO. LIG_32 (ch2) - (RTD1)

3.2 DT with RTD sensor 100 ohms ID NO. LIG_33 (ch1) - (RTD2)

3.3 DT with RTD 100 ohms ID NO. LIG_34 (ch2) - (RTD3)

4. วิธีศึกษา

4.1 สอบเทียบ DT with RTD

นำ DT with RTD ที่กำหนดให้เป็น thermometer under calibration (TUC) มาปรับสภาพในห้องสอบเทียบที่จัดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน พร้อมหัววัด ในข้อ 1.1 เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมงก่อนทำการสอบเทียบ โดยจับยึด DT with RTD ด้วย clamp บน stand base ในแนวตั้งฉากกับพื้น และเมื่อครบเวลาดำเนินการทำความสะอาดหัววัดอุณหภูมิของ PRT_{cal} และ ตัวอย่างสอบเทียบ RTD1, RTD2 และ RTD3 ด้วย 95% ethanol ก่อนดำเนินการสอบเทียบ จากนั้นต่อ PRT_{cal} และ RTD1 เข้ากับเครื่อง DT และจุ่มลงในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ โดยมีระยะจุ่มไม่น้อยกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) (NIMT, 2012³) ของ PRT_{cal} โดยกำหนดให้ DT with PRT_{cal} เป็น Standard Thermometer (STD) และใช้ clamp จับยึดแท่ง PRT_{cal} และ RTD1 ไว้ให้ตั้งตรง ในการศึกษารุ่นนี้ทำการจุ่มหัววัดอุณหภูมิ ชนิด PRT_{cal} และ RTD1 ที่ 120 มิลลิเมตร โดยจุ่มหัววัด RTD1 ให้ใกล้กับ PRT_{cal} มากที่สุด ตามรูปที่ 4 โดยทำการสอบเทียบภายใต้ภาวะแวดล้อมที่ควบคุมอุณหภูมิ $23.0 \pm 3^{\circ}\text{C}$ และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ ที่ $50 \pm 10\% \text{RH}$



รูปที่ 4 การจุ่มเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน และ digital thermometer with RTD sensor ในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ จากนั้นตั้งค่าอุณหภูมิอ่างสอบเทียบให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการโดยเริ่มสอบเทียบจากอุณหภูมิ -30°C รอจนอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำการอ่านและบันทึกอุณหภูมิของ DT with PRT_{cal} และ DT with RTD1 ต่อเนื่องกันดังนี้

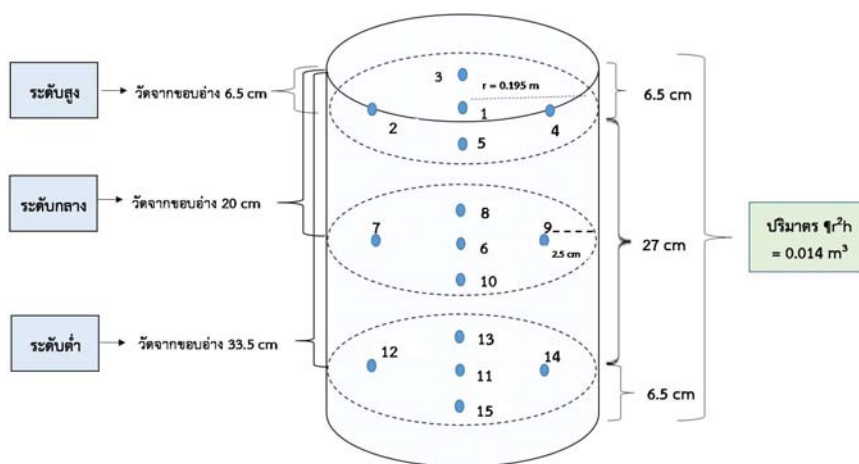
STD $\longrightarrow$ TUC $\longrightarrow$ TUC $\longrightarrow$ STD } 1 รอบ

นับการอ่านเป็น 1 รอบ ทำการอ่านอุณหภูมิซ้ำอีก 4 รอบ โดยเว้นระยะห่างในแต่ละรอบ 30 วินาที เมื่อครบ 5 รอบ ให้ทำการสอบเทียบที่อุณหภูมิ 0°C , 25°C , 65°C , 100°C และทำการสอบเทียบที่จุดอุณหภูมิ -30°C อีกครั้ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลหาค่า short term stability ในการสอบเทียบในแต่ละจุดอุณหภูมิจะได้จำนวนค่าการวัดของ STD จำนวน 10 ค่า และค่าการวัดของ TUC จำนวน 10 ค่า เมื่อสอบเทียบ RTD1 เรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการสอบเทียบ RTD2 และ RTD3 เช่นเดียวกัน และคำนวณหาค่าเฉลี่ย (average) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD) ด้วย โปรแกรมประมวลผล Microsoft excel และค่าแก้จากอุณหภูมิที่วัดได้ของ STD - อุณหภูมิที่วัดได้ของ TUC (NIMT, 2012³) ซึ่งอุณหภูมิที่วัดได้ของ STD ที่อุณหภูมิ -30°C , 0°C , 25°C และ 65°C ต้องรวมค่าแก้จากใบรับรองการสอบเทียบ ส่วนที่อุณหภูมิ 100°C แทนค่าที่วัดได้ลงใน สมการ polynomial ลำดับที่ 3 ที่ได้จากการหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ตามข้อ 4.2.2.3 เมื่อแทนค่าในสมการ จะได้ค่าอุณหภูมิที่รวมค่าแก้แล้ว

4.2 หาค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งต่างๆสำหรับการสอบเทียบ (source uncertainty); U_x

4.2.1 หาค่าความไม่แน่นอนของอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ ได้แก่ ค่าความไม่แน่นอนจากความไม่เสถียรภาพ (instability) โดยหาค่าความเสถียรภาพ (stability) และ ค่าความไม่แน่นอนจากความไม่เป็นหนึ่งเดียวกัน (non-uniformity) หาค่าความเป็นหนึ่งเดียวกัน (uniformity) โดยทำการตรวจสอบตามระดับความลึก 3 ระดับ ดังนี้ วัดระดับความลึกด้านใน 40 เซนติเมตร แบ่งช่วงการใช้งานตามระยะการจุ่ม (working space) ออกเป็น 3 ระดับคือ ระดับสูง ระดับกลาง และระดับต่ำ ตามรูปที่ 5 ดังนี้

- ที่ระดับสูง โดยวัดระยะต่ำจากขอบอ่างสอบเทียบด้านบนลงมา 6.5 เซนติเมตร กำหนดจุดกึ่งกลาง 1 จุด ให้เป็นจุดที่ 1 และบริเวณรอบๆ จุดกึ่งกลางอีก 4 จุด ให้เป็นจุดที่ 2, 3, 4 และ 5
- ที่ระดับกลาง โดยวัดระยะต่ำจากขอบอ่างสอบเทียบด้านบนลงมา 20 เซนติเมตร กำหนดจุดกึ่งกลาง 1 จุด ให้เป็นจุดที่ 6 และบริเวณรอบๆ จุดกึ่งกลางอีก 4 จุด ให้เป็นจุดที่ 7, 8, 9 และ 10
- ที่ระดับต่ำ โดยวัดระยะต่ำจากขอบอ่างสอบเทียบด้านบนลงมา 33.5 เซนติเมตร กำหนดจุดกึ่งกลาง 1 จุด ให้เป็นจุดที่ 11 และบริเวณรอบๆ จุดกึ่งกลางอีก 4 จุด ให้เป็นจุดที่ 12, 13, 14 และ 15 ตามรูปที่ 5 โดยจุดที่อยู่บริเวณรอบๆ จุดกึ่งกลางจะอยู่ห่างจากขอบอ่างสอบเทียบ 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ 5 การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิภายใน Bath

4.2.1.1 หาค่า instability of bath; u_{sta} โดยหาค่า stability

ทำการต่อหัววัด PRT1 และ PRT2 100 ohms เข้ากับ DT และใช้ stand, base, clamp จับยึดแท่ง PRT1 และ PRT2 นำมาจุ่มลงใน silicone oil ตามระดับความลึกและจุดที่กำหนด ตามตารางที่ 1 โดยจุ่มในลักษณะตั้งตรง และเปิดอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ ทำการตั้งค่าช่วงอุณหภูมิที่ต้องการให้เครื่องทำงาน ตามอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ PRT1 วัดอุณหภูมิ ตรงจุดที่ 1, 6 และ 11 ส่วน PRT2 ใช้วัดอุณหภูมิ ตรงจุดที่ 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14 และ 15 โดยตั้งที่อุณหภูมิ -30°C , 0°C , 25°C , 65°C และ 100°C รอจนอุณหภูมิภายในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วจึงอ่านอุณหภูมิที่หน้าจอเครื่อง DT และเก็บข้อมูลที่ระดับสูง ตำแหน่งละ 3 ชั่วโมง จำนวน 5 รอบ และทำที่ ระดับกลาง และระดับต่ำ เช่นเดียวกัน บันทึกผลค่าการวัดเพื่อนำไปคำนวณค่า stability ตามสูตรดังนี้

$$\text{stability} = \frac{(\text{maximum} - \text{minimum}) \text{ ของค่าเฉลี่ยแต่ละจุด}}{2}$$

และเลือกค่า maximum of stability ของแต่ละอุณหภูมิมาใช้เป็นค่า instability of bath ตามภาคผนวกข้อ 1.1

ตารางที่ 1 การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิภายในอ่างสอบเทียบ สำหรับหาค่า stability

ที่ระดับ	ความลึก (cm)	จุดที่วัดอุณหภูมิของ PRT1 กับ PRT2			
		ตำแหน่งที่ 1	ตำแหน่งที่ 2	ตำแหน่งที่ 3	ตำแหน่งที่ 4
สูง	6.5	จุดที่ 1 กับ จุดที่ 2	จุดที่ 1 กับ จุดที่ 3	จุดที่ 1 กับ จุดที่ 4	จุดที่ 1 กับ จุดที่ 5
กลาง	20.0	จุดที่ 6 กับ จุดที่ 7	จุดที่ 6 กับ จุดที่ 8	จุดที่ 6 กับ จุดที่ 9	จุดที่ 6 กับ จุดที่ 10
ต่ำ	33.5	จุดที่ 11 กับ จุดที่ 12	จุดที่ 11 กับ จุดที่ 13	จุดที่ 11 กับ จุดที่ 14	จุดที่ 11 กับ จุดที่ 15

4.2.1.2 หาค่า non-uniformity of bath; u_{uni} โดยหาค่า uniformity

ทำการวัดโดยใช้ DT with PRT1 และ PRT2 100 ohms จุ่มลงใน silicone oil ตรงจุดที่กำหนด ตามตารางที่ 2 โดยจุ่มในลักษณะตั้งตรง และทำการวัดที่อุณหภูมิ -30°C , 0°C , 25°C , 65°C และ 100°C รอจนอุณหภูมิภายในอ่างสอบเทียบเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วจึงอ่านอุณหภูมิที่หน้าจอเครื่อง DT โดยทำการวัดตามตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ 1 ถึง 7 ตำแหน่งละ 3 ชั่วโมง จำนวน 5 รอบ บันทึกผลค่าการวัดเพื่อนำไปคำนวณค่า uniformity ตามสูตรดังนี้

$$\text{uniformity} = \text{maximum ของผลต่างของการวัดแต่ละตำแหน่ง}$$

และเลือกค่า maximum of uniformity ของแต่ละอุณหภูมิมาใช้เป็นค่า non-uniformity of bath ตามภาคผนวกข้อ 1.2

ตารางที่ 2 การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิภายในอ่างสอบเทียบ สำหรับหาค่า uniformity

ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่	จุดที่วัดอุณหภูมิของ PRT1 กับ PRT2
1	จุดที่ 6 กับ จุดที่ 2
2	จุดที่ 6 กับ จุดที่ 4
3	จุดที่ 6 กับ จุดที่ 12
4	จุดที่ 6 กับ จุดที่ 14
5	จุดที่ 2 กับ จุดที่ 14
6	จุดที่ 4 กับ จุดที่ 12
7	จุดที่ 1 กับ จุดที่ 11

4.2.2 ค่าแหล่งความไม่แน่นอนของการสอบเทียบจากเครื่องมือมาตรฐาน (DT with PRT_{cal})

4.2.2.1 หาค่าความไม่แน่นอนจากการเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (drift of standard; $u_{\text{drift_STD}}$)

ค่า drift of standard หาได้จาก specification ของ DT with PRT_{cal} ตามข้อ 1.1.1 หรือตามภาคผนวก ข้อ 2.1

4.1.2.2 หาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการอ่านค่าความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (resolution of standard; $u_{\text{res_STD}}$) หาได้ดังนี้

$$\text{resolution of standard} = \frac{\text{resolution ของ DT with PRT}_{\text{cal}}}{2} \quad \text{ตามภาคผนวก ข้อ 2.2}$$

4.2.2.3 ค่าความผิดพลาดจากสมการในการคำนวณค่าแก้ (error of interpolation equation; $u_{\text{Error_Inter}}$)

นำผลการสอบเทียบ จากใบรับรองการสอบเทียบของ DT with PRT_{cal} มาใช้คำนวณหาค่า error of interpolation equation โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า STD value และ ค่า UUC reading ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ด้วยวิธีทำ interpolate ตาม ITS-90 (BIPM, 2018) โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า STD value และ ค่า UUC reading ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน จากใบรับรองการสอบเทียบและเลือกสมการ polynomial ลำดับที่ 3 หรือ third-order polynomial equation (Inseok et al., 2015) ในโปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งจะได้กราฟ ตามภาคผนวกรูปที่ 7 เมื่อแทนค่าอุณหภูมิของ UUC reading จากใบรับรองการสอบเทียบลงในค่า x จะได้ค่า UUC fitting และหาค่า non linearity จาก IUUC fitting – STD value ตามภาคผนวก ข้อ 2.3

4.2.2.4 ค่าความไม่แน่นอนจากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (uncertainty of standard; $u_{\text{cal_STD}}$)

นำค่า uncertainty จากใบรับรองการสอบเทียบ DT with PRT_{cal} ที่จุดอุณหภูมิ -30 °C, 0 °C, 25 °C และ 65 °C มาใช้หาค่า uncertainty of standard สำหรับอุณหภูมิที่ 100 °C ใช้ค่า uncertainty ที่สูงที่สุดของช่วงการวัดที่ครอบคลุมอุณหภูมิ 100 °C ตามภาคผนวก ข้อ 2.4

4.2.2.5 ค่าความไม่แน่นอนจากการทวนซ้ำได้ ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (repeatability of standard; u_{rep_STD})

นำค่า standard deviation; SD ของ STD จากการสอบเทียบในข้อ 4.1 มาใช้เป็นค่า repeatability of standard

4.2.3 ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ TUC

4.2.3.1 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความสามารถในการอ่านของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ (resolution of TUC; u_{res_TUC})

$$\text{resolution of TUC} = \frac{\text{resolution ของ DT with RTD}}{2} \quad \text{ตามภาคผนวก ข้อ 3.1}$$

4.2.3.2 ค่าความไม่แน่นอนจากความเสถียรของเครื่องมือในเวลาสั้นๆ (short term stability; u_{st})

นำข้อมูลการสอบเทียบในข้อ ที่จุดอุณหภูมิ -30 °C ในข้อ 4.1 มาหาค่า short term stability ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

short term stability = correction อุณหภูมิต่ำสุดครั้งแรก - correction อุณหภูมิต่ำสุดครั้งหลัง
ตามภาคผนวก ข้อ 3.2

4.2.3.3 ค่าความไม่แน่นอนจากการทวนซ้ำได้ ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ (repeatability of TUC; u_{rep_TUC})

นำค่า standard deviation; SD ของ TUC จากการสอบเทียบในข้อ 4.1 มาใช้เป็นค่า repeatability of TUC

4.3 หาค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐาน (standard measurement uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐาน หมายถึง ความไม่แน่นอนการวัดซึ่งแสดงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (NIMT, 2012³) สามารถหาได้โดยนำค่าที่หาได้จากค่าความไม่แน่นอนของแหล่งต่างๆมาทำให้เป็น ค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐาน โดยหารด้วยค่าการแจกแจงของข้อมูล และคูณด้วย sensitivity coefficient ; C_i ซึ่งค่า C_i คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลง output ต่อ Input หากไม่มีการแปลงหน่วย ค่า C_i จะเท่ากับ 1.0 หากมีการแปลงหน่วยการวัด ค่า C_i จะมีค่าเปลี่ยนไปตามการแปลงหน่วยการวัดนั้น โดยค่าความไม่แน่นอนของแหล่งต่างๆหาได้ดังนี้

4.3.1 นำค่า SD (จากการสอบเทียบในข้อ 4.1) มาใช้เป็นค่า repeatability of standard และ repeatability of TUC โดยหารด้วย 1 เพราะเป็นการแจกแจงแบบ normal distribution และคูณด้วยค่า C_i ซึ่งเท่ากับ 1.0

4.3.2 นำค่า maximum of stability, maximum of uniformity, drift of standard, resolution of standard, non linearity, resolution of TUC และ short term stability จากภาคผนวก ข้อ 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 2.3, 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ มาหารด้วย $\sqrt{3}$ หรือ ประมาณ 1.732 เพราะเป็นการแจกแจงแบบ rectangular distribution และคูณด้วยค่า C_i ซึ่งเท่ากับ 1.0

4.3.3 นำค่า uncertainty of standard (STD) ที่ได้จากใบรับรองการสอบเทียบ จากภาคผนวก ข้อ 2.4 หารด้วยค่า coverage factor; k ซึ่งเท่ากับ 2 เนื่องจากเป็นค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และคูณด้วยค่า C_i ซึ่งเท่ากับ 1.0

4.4 หาค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม (combined standard measurement uncertainty; u_c) ได้จากการรวมค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานต่างๆ ซึ่งมีสูตร ดังนี้

$$u_c = \sqrt{u_{rep_STD}^2 + u_{cal_STD}^2 + u_{drift_STD}^2 + u_{res_STD}^2 + u_{uni}^2 + u_{sta}^2 + u_{Error_Inter}^2 + u_{rep_TUC}^2 + u_{res_TUC}^2 + u_{st}^2}$$

4.5 หาค่า coverage factor ; k จาก ค่า Effective degree of freedom (V_{eff}) คำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$V_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_c^4}{V_i}} \quad \text{โดย Degree of freedom } (V_i) = n-1$$

และนำค่า V_{eff} ไปหาค่า k จากตาราง t -distribution ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% (โดยใช้ที่ 95.45 %) ตาม M3003 (UKAS, 2019)

4.6 หาค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย (expanded measurement uncertainty; U) โดย $U = u_c \cdot k$ ซึ่งต้องรายงานค่าความไม่แน่นอนตามข้อแนะนำการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด GLA-26 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2564)

4.7 นำค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ที่มีค่าสูงสุดมาสรุปเป็นค่า CMC ในช่วงการวัดที่อุณหภูมิ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.8 นำค่าความผิดพลาด ซึ่งได้จากการคำนวณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ TUC - อุณหภูมิที่วัดได้ของ STD (BIPM, 2012) และค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายของการศึกษาการสอบเทียบ DT with RTD ทั้ง 3 เครื่อง มาทวนสอบตาม ISO 14253-1 (ISO, 2017) โดยเปรียบเทียบ tolerance ตามมาตรฐาน IEC 60751 (2008) เพื่อศึกษาผลการทวนสอบเครื่องมือว่าผ่านตามเกณฑ์หรือไม่ และจำเป็นต้องนำค่าแก้ไขใช้ในการวัดหรือไม่

4.9 นำค่า CMC มาเปรียบเทียบกับค่า MPE หรือค่า tolerance ที่ต่ำที่สุดของ DT with RTD ตามมาตรฐาน IEC 60751 (2008) ของเครื่องมือใน สตส. โดยนำค่า $|\pm 0.15|$ $^{\circ}\text{C}$ หารด้วย ค่า CMC ซึ่งเป็นค่า tolerance ที่ต่ำที่สุดของ RTD จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่า CMC ที่ได้จากการศึกษากับค่า CMC ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบในประเทศไทยที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 ในขอบข่ายการสอบเทียบ DT with RTD ที่อุณหภูมิ $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ กับ สมอ. เพื่อดูลำดับความสามารถในการให้บริการของห้องปฏิบัติการสอบเทียบ โดยเรียงลำดับจากค่า CMC ที่ต่ำที่สุดเป็นลำดับแรก ซึ่งหมายถึงลำดับที่ดีที่สุดแล้วเรียงต่อมา หากพบว่าค่า CMC เท่ากันให้พิจารณาที่ช่วงการสอบเทียบของห้องปฏิบัติการที่มีความสามารถในช่วงการสอบเทียบมากกว่าเป็นลำดับก่อน และถ้ามีห้องปฏิบัติการที่มีการแบ่งช่วงมากกว่า 1 ให้พิจารณาค่า CMC และความสามารถในช่วงการสอบเทียบควบคู่กัน โดยพิจารณาค่า CMC ที่ต่ำกว่า และความสามารถในช่วงการสอบเทียบที่ห้องปฏิบัติการมีมากกว่าเป็นลำดับก่อน

ผลและวิจารณ์ผล

1. ผลการสอบเทียบ DT with RTD

การสอบเทียบ DT with RTD ที่อุณหภูมิ -30°C , 0°C , 25°C , 65°C และ 100°C โดยการเปรียบเทียบกับ DT with PRT_{cal} 25 ohms ดำเนินการภายในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในช่วง $23.0 \pm 3^{\circ}\text{C}$ และ $50 \pm 10\% \text{RH}$ ซึ่งเป็นภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมและไม่ส่งผลกระทบต่อเครื่องมือวัดตามผู้ผลิตระบุไว้ (NIMT, 2012)

การหาค่าแก้จากการสอบเทียบทั้ง 5 อุณหภูมิของ DT with RTD 3 แท่ง เพื่อให้มีความถูกต้องจากการคำนวณเทียบกับค่าการวัดของ DT with PRT_{cal} ต้องนำค่าแก้ของ DT with PRT_{cal} ที่อุณหภูมิ -30°C , 0°C , 25°C และ 65°C ตามใบรับรองสอบเทียบเลขที่ PSL-T 667/63 ที่ได้จากการสอบเทียบโดย Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR) เมื่อวันที่สอบเทียบ 27 เมษายน 2563 มารวมกับค่าที่วัดได้ของ DT with PRT_{cal} ส่วนที่อุณหภูมิ 100°C ของ DT with PRT_{cal} ไม่มีค่าแก้ เนื่องจากไม่ได้สอบเทียบ แต่มีจุดสอบเทียบที่อุณหภูมิ 65°C และ 110°C ที่ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิ 100°C จึงสามารถหาค่าการวัดที่รวมค่าแก้แล้วจากการแทนค่าอุณหภูมิที่วัดได้ของจุดอุณหภูมิ 100°C ลงในสมการ $y = 3\text{E-}10x^3 + 5\text{E-}07x^2 + 1x + 0.001$ ตามภาคผนวก รูปที่ 7 ซึ่งเป็นสมการ polynomial ลำดับที่ 3 (Inseok et al., 2015) ที่เกิดจากการทำ interpolate ตาม ITS-90 (BIPM, 2018) และเป็นสมการเดียวกันกับการหาค่า error of interpolation equation ซึ่งเป็นค่าแหล่งความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการใช้ค่าแก้ของการวัดอุณหภูมิในจุดที่ไม่ได้ส่งเครื่องมือสอบเทียบ ดังนั้นเมื่อมีการใช้ค่าแก้จากการทำ interpolate ในจุดอุณหภูมิที่ไม่ได้สอบเทียบ จึงต้องมีการนำค่า error of interpolation equation เข้าไปประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายด้วย ซึ่งผลการสอบเทียบของ DT with RTD ได้ค่าแก้ และค่า SD ตามตารางที่ 3 และ 4

สำหรับการหาค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ในแต่ละจุดอุณหภูมิ ทำได้โดยการนำค่า SD ของ DT with และ RTD DT with PRT_{cal} จากตารางที่ 3 และ 4 และค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งต่างๆ ได้แก่ อ่างสอบเทียบอุณหภูมิ ตามภาคผนวก ข้อที่ 1-3 และตารางที่ 11-22 มาคำนวณให้เป็นค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานโดยการหารด้วยค่าการแจกแจง หรือ ค่า k และคูณกับค่า C_i การรวมค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานจากแหล่งต่างๆ ไม่สามารถรวมกันได้โดยตรง ต้องรวมค่ากำลัง 2 ของค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานแต่ละแหล่งก่อน แล้วถอดรากที่ 2 ของผลรวมนั้น เพื่อให้ได้ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% ต้องนำค่า V_{eff} ที่คำนวณได้ไปหาค่า k จากตาราง t -distribution ใน M3003 (UKAS, 2019) และนำค่า k คูณกับค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม การรายงานผลการสอบเทียบตามข้อกำหนดของ ILAC-P14:01 (ILAC, 2013) ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายต้องมีค่านัยสำคัญไม่เกิน 2 ตำแหน่ง ซึ่งผลการคำนวณได้ตามตารางที่ 5-7 สามารถสรุปเป็นค่าแก้ (y) และค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย (U) ของ DT with RTD ID NO. LIG_32 (ch2) - (RTD1), ID NO. LIG_33 (ch1) - (RTD2) และ ID NO. LIG_34 (ch2) - (RTD3) ได้ในรูป $y \pm U$ ดังนี้

- ที่อุณหภูมิ -30°C ได้ผลการสอบเทียบเท่ากับ $0.0014 \pm 0.057^{\circ}\text{C}$, $(-0.0091) \pm 0.059^{\circ}\text{C}$ และ $(-0.0048) \pm 0.059^{\circ}\text{C}$
- ที่อุณหภูมิ 0°C ได้ผลการสอบเทียบเท่ากับ $0.0069 \pm 0.059^{\circ}\text{C}$, $0.0789 \pm 0.060^{\circ}\text{C}$ และ $0.0364 \pm 0.060^{\circ}\text{C}$
- ที่อุณหภูมิ 25°C ได้ผลการสอบเทียบเท่ากับ $0.0143 \pm 0.054^{\circ}\text{C}$, $(-0.0272) \pm 0.054^{\circ}\text{C}$ และ $(-0.0779) \pm 0.056^{\circ}\text{C}$
- ที่อุณหภูมิ 65°C ได้ผลการสอบเทียบเท่ากับ $0.0000 \pm 0.055^{\circ}\text{C}$, $(-0.0795) \pm 0.059^{\circ}\text{C}$ และ $(-0.0665) \pm 0.059^{\circ}\text{C}$
- ที่อุณหภูมิ 100°C ได้ผลการสอบเทียบเท่ากับ $0.0084 \pm 0.058^{\circ}\text{C}$, $(-0.0542) \pm 0.059^{\circ}\text{C}$ และ $(-0.0774) \pm 0.061^{\circ}\text{C}$

นำค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย จากตารางที่ 5 - 7 มาสรุปค่า CMC ของการสอบเทียบ DT with RTD immersion ตามวิธีศึกษาข้อ 4.7 พบว่า RTD3 ที่อุณหภูมิ 100 °C มีค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายสูงที่สุดในช่วงการวัดที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C ดังนั้นค่า CMC จะเท่ากับ 0.061 °C

จากการทดลอง พบว่าในการหาค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งต่างๆ ที่มีค่าสูง ได้แก่ ค่า drift of standard ดังนั้นหากต้องการลดค่า CMC ให้ต่ำลง ต้องใช้เครื่องมือมาตรฐานมีค่าการเลื่อนค่าที่ต่ำ จะทำให้ได้ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายลดต่ำลง ทำให้ได้ค่า CMC ที่ต่ำลงด้วย ซึ่งการเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานสำหรับเครื่องมือใหม่ที่ไม่มีการประวัติการสอบเทียบจะได้จากค่า specification ของเครื่องมือ แต่หากเป็นเครื่องมือที่มีประวัติสอบเทียบจะได้จากผลต่างของค่าแก้ไขในปัจจุบันกับปีก่อน สำหรับหัววัด PRT ค่าการเลื่อนค่าที่เปลี่ยนแปลงไป เกิดจากหลายสาเหตุ โดยสาเหตุสำคัญคือการใช้งานที่ไม่ถูกต้อง เช่น การนำไปวัดอุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการใช้เครื่องมือมาตรฐานที่ใช้สอบเทียบที่อุณหภูมิต่ำและสูงควรแยกกัน หากไม่สามารถทำได้ควรจุ่มไว้ที่อุณหภูมิปกติหรืออุณหภูมิห้องก่อนแล้วจึงค่อยๆ ปรับลดอุณหภูมิขึ้น-ลง การกระทบกระเทือนของเครื่องมือมาตรฐานก็เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการเลื่อนค่าที่สูงขึ้นได้ ดังนั้นจึงควรใช้และเคลื่อนย้ายอย่างระมัดระวังและหลีกเลี่ยงการวางในบริเวณที่มีการสั่นสะเทือน และค่า uncertainty of standard เป็นอีกค่าที่ส่งผลต่อค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ดังนั้นสามารถลดลงได้โดยส่งเครื่องมือมาตรฐานสอบเทียบแบบ direct comparison ซึ่งเป็นการสอบเทียบแยกกันระหว่าง digital thermometer และ PRT ซึ่งการสอบเทียบแบบนี้มีข้อดีคือจะได้ค่า expanded uncertainty ที่ต่ำกว่าแบบ indirect comparison แต่มีค่าใช้จ่ายสูงในการบริการสอบเทียบ และ มีความยุ่งยากในการคำนวณเมื่อนำผลการสอบเทียบมาใช้งาน เพราะต้องแยกค่า source of uncertainty ในส่วนของ DT และหัววัด PRT_{cal} ซึ่งได้แก่ ค่า uncertainty of standard และ ค่า drift of standard เนื่องจากใบรับรองผลการสอบเทียบ DT จะแสดง ค่าแก้ไข และ ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย เป็นค่าความต้านทานไฟฟ้า ที่มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) และ หัววัด PRT_{cal} จะแสดงค่าแก้ไขและค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายเป็นค่าอุณหภูมิ ที่มีหน่วยเป็น °C ดังนั้น จึงต้องแปลงหน่วยการวัดให้เป็นหน่วยการวัดเดียวกันด้วยค่า C_t ก่อนนำมาคำนวณค่าความไม่แน่นอนการวัดรวม

ในการศึกษาครั้งนี้ พบว่าค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานการวัดที่ต่ำสุด คือ ค่าความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (resolution of STD; u_{res_STD}) ที่เท่ากับ 0.0001 °C มีค่าสูงกว่าค่าความละเอียดของ DT with RTD ที่ถูกสอบเทียบ (resolution of TUC; u_{res_TUC}) ซึ่งเท่ากับ 0.01 °C และหาค่า CMC ด้วย โดยค่าความละเอียดของ DT with PRT และ DT with RTD มาจาก specification ของเครื่องมือ แต่ในการคำนวณเป็นค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานต้องนำค่าความละเอียดมาหารด้วย 2 เพื่อให้เป็นค่ากึ่งช่วง semi-range (UKAS, 2019) เนื่องจากได้ค่าการวัดเป็นตัวเลข จึงเรียกว่า resolution of TUC ส่วน Liquid in glass thermometer (LIGT) การอ่านค่าการวัดต้องใช้การมองด้วยตาในการแบ่งความละเอียดของสเกล จึงเรียกว่า readability of TUC ซึ่ง LIGT มีค่าความละเอียดของสเกลสูงสุดเท่ากับ 0.1 °C เมื่อนำมาสอบเทียบแล้วจะได้ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานการวัดขยายที่สูงกว่า DT with RTD ที่ทุกจุดอุณหภูมิสอบเทียบ

ตารางที่ 3 ผลการสอบเทียบ และค่าแก้ ของ RTD1, RTD2 และ RTD3 ที่อุณหภูมิ -30 °C, 0 °C และ 25 °C

อุณหภูมิที่ สอบเทียบ		-30 °C					0 °C					25 °C						
Round number	STD (°C)	TUC RTD1 (°C)	STD (°C)	TUC RTD2 (°C)	STD (°C)	TUC RTD3 (°C)	STD (°C)	TUC RTD1 (°C)	STD (°C)	TUC RTD2 (°C)	STD (°C)	TUC RTD3 (°C)	STD (°C)	TUC RTD1 (°C)	STD (°C)	TUC RTD2 (°C)	STD (°C)	TUC RTD3 (°C)
1	-29.9856	-29.99	-30.0019	-30.00	-30.0024	-30.00	-0.0902	-0.09	-0.1313	-0.20	-0.0228	-0.06	24.7955	24.78	24.6042	24.63	24.6525	24.74
2	-29.9826	-29.98	-30.0053	-30.00	-29.9983	-30.00	-0.0963	-0.10	-0.1364	-0.20	-0.0294	-0.06	24.7993	24.78	24.6078	24.64	24.6557	24.74
3	-29.9789	-29.98	-30.0079	-30.00	-29.9944	-29.99	-0.1030	-0.11	-0.1425	-0.22	-0.0345	-0.08	24.8028	24.79	24.6126	24.64	24.6589	24.74
4	-29.9749	-29.98	-30.0138	-30.01	-29.9914	-29.99	-0.1102	-0.12	-0.1466	-0.23	-0.0390	-0.08	24.8084	24.79	24.6179	24.64	24.6700	24.74
5	-29.9708	-29.98	-30.0166	-30.01	-29.9877	-29.99	-0.1157	-0.12	-0.1488	-0.23	-0.0424	-0.09	24.8153	24.79	24.6218	24.64	24.6737	24.75
Average	-29.9786	-29.98	-30.0091	-30.00	-29.9948	-29.99	-0.1031	-0.11	-0.1411	-0.22	-0.0336	-0.07	24.8043	24.79	24.6128	24.64	24.6621	24.74
Repeatability (SD)	0.0057	0.00	0.0061	0.01	0.0054	0.01	0.0098	0.01	0.0069	0.01	0.0074	0.01	0.0075	0.01	0.0069	0.00	0.0087	0.00
Correction		0.0014		-0.0091		-0.0048		0.0069		0.0789		0.0364		0.0143		-0.0272		-0.0779

ตารางที่ 4 ผลการสอบเทียบ และค่าแก้ ของ RTD1, RTD2 และ RTD3 ที่อุณหภูมิ 65 °C และ 100 °C

อุณหภูมิที่ สอบเทียบ	65 °C						100 °C					
	Round number	STD (°C)	TUC RTD1 (°C)	STD (°C)	TUC RTD2 (°C)	STD (°C)	TUC RTD3 (°C)	STD (°C)	TUC RTD1 (°C)	STD (°C)	TUC RTD2 (°C)	STD (°C)
1	64.6599	64.66	64.5782	64.66	64.6081	64.67	99.5826	99.58	99.5800	99.63	99.6002	99.67
2	64.6649	64.66	64.5845	64.66	64.6002	64.66	99.5864	99.58	99.5778	99.63	99.6047	99.67
3	64.6693	64.67	64.5905	64.67	64.5908	64.66	99.5889	99.58	99.5760	99.63	99.6053	99.68
4	64.6750	64.67	64.5973	64.67	64.5862	64.66	99.5906	99.58	99.5737	99.64	99.6030	99.68
5	64.6808	64.67	64.6022	64.68	64.5821	64.66	99.5935	99.58	99.5719	99.64	99.5998	99.69
Average	64.6700	64.67	64.5905	64.67	64.5935	64.66	99.5884	99.58	99.5758	99.63	99.6026	99.68
Repeatability (SD)	0.0078	0.01	0.0092	0.01	0.0103	0.00	0.0040	0.00	0.0031	0.01	0.0026	0.01
Correction		0.0000		-0.0795		-0.0665		0.0084		-0.0542		-0.0774

ตารางที่ 5 ค่าความไม่แน่นอน ของ RTD1, RTD2 และ RTD3 ที่อุณหภูมิ -30 °C และ 0 °C

อุณหภูมิที่สอบเทียบ							-30 °C						0 °C					
Symbol (U_{xi})	Type	Source of uncertainty	Probability Distribution	Divisor	C_i	V_i	RTD1		RTD2		RTD3		RTD1		RTD2		RTD3	
							Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)
u_{rep_STD}	A	*Repeatability of Standard	Normal	1.0	1.0	9	0.0057	0.0057	0.0061	0.0061	0.0054	0.0054	0.0098	0.0098	0.0069	0.0069	0.0074	0.0074
u_{cal_STD}	B	Uncertainty of Standard	Normal	2.0	1.0	∞	0.030	0.015	0.030	0.015	0.030	0.015	0.030	0.015	0.030	0.015	0.030	0.015
u_{drift_STD}	B	Drift of Standard	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.030	0.0173	0.030	0.0173	0.030	0.0173	0.030	0.0173	0.030	0.0173	0.030	0.0173
u_{res_STD}	B	Resolution of Standard	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003
u_{uni}	B	Non-Uniformity of bath	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0223	0.0129	0.0223	0.0129	0.0223	0.0129	0.0149	0.0086	0.0149	0.0086	0.0149	0.0086
u_{sta}	B	Instability of bath	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0129	0.0074	0.0129	0.0074	0.0129	0.0074	0.0059	0.0034	0.0059	0.0034	0.0059	0.0034
u_{Error_Inter}	B	Error of interpolation equation	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0021	0.0012	0.0021	0.0012	0.0021	0.0012	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002
u_{rep_TUC}	A	*Repeatability of TUC	Normal	1.0	1.0	9	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
u_{res_TUC}	B	Resolution of TUC	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.005	0.003	0.005	0.003	0.005	0.003	0.005	0.003	0.005	0.003	0.005	0.003
u_{st}	B	Short term stability	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0023	0.0013	-0.0086	-0.0050	-0.0137	-0.0079	0.0023	0.0013	-0.0086	-0.0050	-0.0137	-0.0079
u_c	-	Combined Measurement Standard Uncertainty	Normal					0.0285		0.0295		0.0297		0.0296		0.0299		0.0299
$V_{eff} =$								5847.37		4813.86		8095.08		744.04		3121.42		2354.58
$k =$								2		2		2		2		2		2
U	-	Expanded Measurement Uncertainty	Normal					0.0570		0.0590		0.0594		0.0592		0.0598		0.0598
		Expanded Measurement Uncertainty (report)						0.057		0.059		0.059		0.059		0.060		0.060

*ค่า Repeatability of Standard และ Repeatability of TUC จากค่า SD ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 6 ค่าความไม่แน่นอน ของ RTD1, RTD2 และ RTD3 ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 65 °C

อุณหภูมิที่สอบเทียบ							25 °C						65 °C					
Symbol (U_{xi})	Type	Source of uncertainty	Probability Distribution	Divisor	C_i	V_i	RTD1		RTD2		RTD3		RTD1		RTD2		RTD3	
							Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)
u_{rep_STD}	A	*Repeatability of Standard	Normal	1.0	1.0	9	0.0075	0.0075	0.0069	0.0069	0.0087	0.00873	0.0078	0.0078	0.0092	0.0092	0.0103	0.0103
u_{cal_STD}	B	Uncertainty of Standard	Normal	2.0	1.0	∞	0.030	0.015	0.030	0.015	0.030	0.015	0.030	0.015	0.030	0.015	0.030	0.015
u_{drift_STD}	B	Drift of Standard	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.030	0.0173	0.030	0.0173	0.030	0.0173	0.030	0.0173	0.030	0.0173	0.030	0.0173
u_{res_STD}	B	Resolution of Standard	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003
u_{uni}	B	Non-Uniformity of bath	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0130	0.0075	0.0130	0.0075	0.0130	0.0075	0.0189	0.0109	0.0189	0.0109	0.0189	0.0109
u_{sta}	B	Instability of bath	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0113	0.0065	0.0113	0.0065	0.0113	0.0065	0.0084	0.0048	0.0084	0.0048	0.0084	0.0048
u_{Error_Inter}	B	Error of interpolation equation	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002	0.0021	0.0012	0.0021	0.0012	0.0021	0.0012
u_{rep_TUC}	A	*Repeatability of TUC	Normal	1.0	1.0	9	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
u_{res_TUC}	B	Resolution of TUC	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.005	0.003	0.005	0.003	0.005	0.003	0.005	0.003	0.005	0.003	0.005	0.003
u_{st}	B	Short term stability	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0023	0.0013	-0.0086	-0.0050	-0.0137	-0.0079	0.0023	0.0013	-0.0086	-0.0050	-0.0137	-0.0079
u_c	-	Combined Measurement Standard Uncertainty	Normal					0.0268		0.0269		0.0281		0.0277		0.0296		0.0294
$V_{eff} =$								1452.45		2084.44		964.37		1409.10		956.30		596.13
$k =$								2		2		2		2		2		2
U	-	Expanded Measurement Uncertainty	Normal					0.0536		0.0538		0.0562		0.0554		0.0592		0.0588
		Expanded Measurement Uncertainty (report)						0.054		0.054		0.056		0.055		0.059		0.059

*ค่า Repeatability of Standard และ Repeatability of TUC จากค่า SD ตามตารางที่ 3 และ 4

ตารางที่ 7 ค่าความไม่แน่นอน ของ RTD1, RTD2 และ RTD3 ที่อุณหภูมิ 100 °C

อุณหภูมิที่สอบเทียบ							100 °C					
Symbol (U_x)	Type	Source of uncertainty	Probability Distribution	Divisor	C_i	V_i	RTD1		RTD2		RTD3	
							Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)
u_{rep_STD}	A	*Repeatability of Standard	Normal	1.0	1.0	9	0.0040	0.0040	0.0031	0.0031	0.0026	0.0026
u_{cal_STD}	B	Uncertainty of Standard	Normal	2.0	1.0	∞	0.030	0.015	0.030	0.015	0.030	0.015
u_{drift_STD}	B	Drift of Standard	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.030	0.0173	0.030	0.0173	0.030	0.0173
u_{res_STD}	B	Resolution of Standard	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003	0.00005	0.00003
u_{uni}	B	Non-Uniformity of bath	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0254	0.0147	0.0254	0.0147	0.0254	0.0147
u_{sta}	B	Instability of bath	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0131	0.0076	0.0131	0.0076	0.0131	0.0076
u_{Error_inter}	B	Error of interpolation equation	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0038	0.0022	0.0038	0.0022	0.0038	0.0022
u_{rep_TUC}	A	*Repeatability of TUC	Normal	1.0	1.0	9	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
u_{res_TUC}	B	Resolution of TUC	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.005	0.003	0.005	0.003	0.005	0.003
u_{st}	B	Short term stability	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0023	0.0013	-0.0086	-0.0050	-0.0137	-0.0079
u_c	-	Combined Measurement Standard Uncertainty	Normal					0.0288		0.0295		0.0305
$V_{eff} =$								25171.67		72998.79		166981.94
$k =$								2		2		2
U	-	Expanded Measurement Uncertainty	Normal					0.0576		0.0590		0.0610
		Expanded Measurement Uncertainty (report)						0.058		0.059		0.061

*ค่า Repeatability of Standard และ Repeatability of TUC จากค่า SD ตามตารางที่ 4

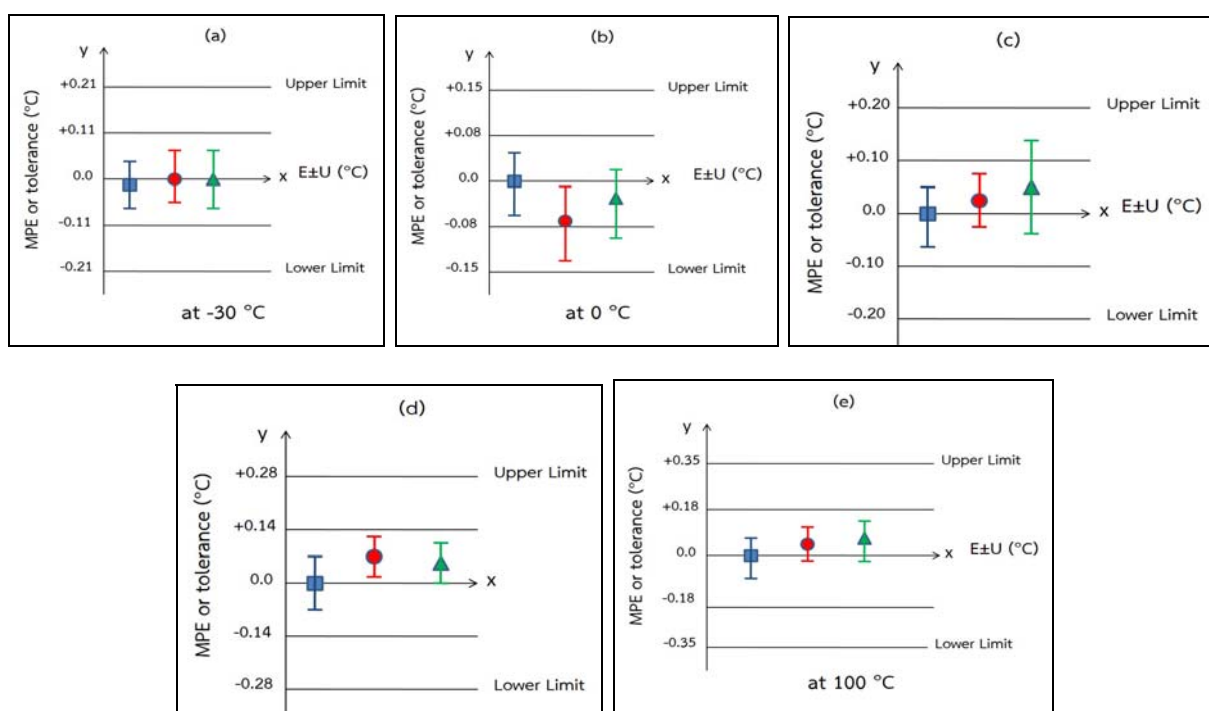
2. ผลการทวนสอบ DT with RTD ทั้ง 3 เครื่อง

จากการทวนสอบผลการสอบเทียบ DT with RTD ตาม ISO 14253-1 (2017) โดยเปรียบเทียบกับค่า tolerance ตามมาตรฐาน IEC 60751 (2008) ซึ่งค่า tolerance ของ RTD (Pt100) class A ที่อุณหภูมิจุดสอบเทียบสามารถหาได้จากการแทนค่าอุณหภูมิ (t) ลงในสมการ $0.15 + 0.002 |t|$ พบว่า ค่า tolerance ที่สูงสุด คือที่จุดอุณหภูมิ 100°C เท่ากับ $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ และที่ต่ำสุดคือที่จุดอุณหภูมิ 0°C เท่ากับ $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ ตามตารางที่ 8 และ RTD1, RTD2 และ RTD3 มีผลรวมของค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายน้อยกว่าค่า tolerance ทุกจุดอุณหภูมิที่ทำการสอบเทียบ ดังตารางที่ 8 หรืออยู่ภายในขีดจำกัดบน (upper limit) และ ขีดจำกัดล่าง (lower limit) ของเกณฑ์การทวนสอบ ตามรูปที่ 6 แสดงว่า RTD ทั้ง 3 เครื่อง ผ่านเกณฑ์การทวนสอบในทุกจุดอุณหภูมิที่สอบเทียบ จึงไม่จำเป็นต้องใช้ค่าแก้ไขรวมกับค่าที่วัดได้เมื่อนำ RTD ทั้ง 3 เครื่อง ไปใช้งาน แต่หากต้องการความแม่นยำการวัดที่สูงยิ่งขึ้น จึงควรนำค่าแก้ไขรวมกับค่าที่วัดได้ด้วย เพราะ DT with RTD เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิและใช้ปรับแก้ค่าที่วัดได้ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนด 6.4.6 ตามมาตรฐาน มอก. 17025-2561 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562) และเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อความใช้ได้ของผลการทดสอบหรือสอบเทียบ จึงต้องให้ความแม่นยำการวัด (accuracy) ตามข้อกำหนด 6.4.5 ตามมาตรฐาน มอก. 17025-2561 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562)

ดังนั้นในการเลือกใช้เทอร์โมมิเตอร์มาใช้งาน ผู้ใช้ต้องพิจารณาจากคุณลักษณะเฉพาะของเทอร์โมมิเตอร์ เช่น ช่วงอุณหภูมิที่สามารถวัดได้ ค่าความละเอียด เกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อน เป็นต้น เพื่อให้เหมาะสมกับประเภทของงานที่ต้องการวัดอุณหภูมิ เช่น ในการวัดอุณหภูมิในตู้ควบคุมอุณหภูมิ ที่มีค่าความละเอียด 0.1°C และมีการใช้งานหลายช่วง ควรใช้ DT with RTD มากกว่า Liquid in glass thermometer (LIGT) เนื่องจาก DT with RTD มีความสามารถในการวัดอุณหภูมิได้กว้าง และมีค่าความละเอียดสูงกว่า LIGT ที่มีค่าความละเอียดสูงสุดที่ 0.1°C แต่มีช่วงการวัดแคบ หรือ LIGT ที่สามารถวัดอุณหภูมิในช่วงกว้าง แต่มีค่าความละเอียดต่ำ

ตารางที่ 8 แสดงการทวนสอบผลการสอบเทียบ DT with RTD ตาม ISO 14253-1 (2017) เปรียบเทียบกับค่า MPE หรือ ค่า tolerance ตามมาตรฐาน IEC 60751 (2008)

Temp(°C)	Tolerance ±(°C)	Verification				Verification Results			*Remark usability
		RTD No.	*Error (°C)	± Uncertainty (°C)	E+U (°C)	E+(-U) (°C)	E+U	E+(-U)	
-30	0.21	RTD1	-0.0014	0.057	0.0556	-0.0584	pass	pass	need't to add correction
		RTD2	0.0091	0.059	0.0681	-0.0499	pass	pass	need't to add correction
		RTD3	0.0048	0.059	0.0638	-0.0542	pass	pass	need't to add correction
0	0.15	RTD1	-0.0069	0.059	0.0521	-0.0659	pass	pass	need't to add correction
		RTD2	-0.0789	0.060	-0.0189	-0.1389	pass	pass	need't to add correction
		RTD3	-0.0364	0.060	0.0236	-0.0964	pass	pass	need't to add correction
25	0.20	RTD1	-0.0143	0.054	0.0397	-0.0683	pass	pass	need't to add correction
		RTD2	0.0272	0.054	0.0812	-0.0268	pass	pass	need't to add correction
		RTD3	0.0779	0.056	0.1339	0.0219	pass	pass	need't to add correction
65	0.28	RTD1	-0.0000	0.055	0.0550	-0.0550	pass	pass	need't to add correction
		RTD2	0.0795	0.059	0.1385	0.0205	pass	pass	need't to add correction
		RTD3	0.0665	0.059	0.1255	0.0075	pass	pass	need't to add correction
100	0.35	RTD1	-0.0084	0.058	0.0496	-0.0664	pass	pass	need't to add correction
		RTD2	0.0542	0.059	0.1132	-0.0048	pass	pass	need't to add correction
		RTD3	0.0774	0.061	0.1384	0.0164	pass	pass	need't to add correction



รูปที่ 6 การทดสอบผลการสอบเทียบ DT with RTD ทั้ง 3 เครื่อง ที่อุณหภูมิ -30 °C (a), 0 °C (b), 25 °C (c), 65 °C (d) และ 100 °C (e) เมื่อ ■ คือ RTD1, ● คือ RTD2 และ ▲ คือ RTD3

3. ผลการเปรียบเทียบค่า CMC ที่ได้จากการศึกษา

3.1 ผลการเปรียบเทียบค่า CMC กับค่า tolerance ของ RTD ที่ต่ำที่สุดตามมาตรฐาน IEC 60751 (2008) ของ สตส.

จากการเปรียบเทียบ ค่า CMC กับค่า tolerance ของ RTD ที่ต่ำที่สุดของ สตส. ตามมาตรฐาน IEC 60751 (2008) ที่จุดอุณหภูมิ -30 °C, 0 °C, 25 °C, 65 °C และ 100 °C พบว่าค่า tolerance ที่ต่ำที่สุดในช่วงอุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C คือที่อุณหภูมิ 0 °C มีค่าเท่ากับ ± 0.15 °C เมื่อนำ $|\pm 0.15|$ °C หารด้วยค่า CMC เท่ากับ 2.5 ตามตารางที่ 9 แสดงว่าค่า CMC จากการศึกษาค้างนี้ ต่ำกว่าค่า tolerance 2.5 เท่า ทำให้ผู้ใช้บริการสอบเทียบทราบว่าหากส่งสอบเทียบ DT with RTD ที่มีค่าความละเอียด 0.01 °C และมีประวัติการเลื่อนค่าต่ำ (โดยผู้ใช้สามารถดูได้จากผลต่างของค่าแก้ของเครื่องมือของปีปัจจุบันและปีก่อน ส่วนเครื่องมือใหม่ที่ยังไม่มีประวัติการสอบเทียบต้องใช้ค่าจาก specification ของเครื่องมือ) ที่ช่วงอุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C ภายใต้การควบคุมภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. จะได้ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายไม่เกิน ± 0.061 °C ซึ่งต่ำกว่าค่า tolerance ของ RTD

ตารางที่ 9 แสดงค่า tolerance ของ DT with RTD ที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 100 °C ตามมาตรฐาน IEC 60751 (IEC, 2008)

Type of sensor	Range (°C)	Resolution (°C)	Temperature	Tolerance = $(\pm) 0.15 + 0.002 t $ *	เปรียบเทียบค่า CMC กับ tolerance
RTD	-30 to 100	0.01	-30	0.21	< 3.4 เท่า
			0	0.15	< 2.5 เท่า
			25	0.20	< 3.3 เท่า
			65	0.28	< 4.6 เท่า
			100	0.35	< 5.7 เท่า

* t หมายถึง จุดอุณหภูมิ

3.2 ผลการเปรียบเทียบค่า CMC กับ ห้องปฏิบัติการอื่นที่ได้รับรอง ISO /IEC17025

เมื่อนำค่า CMC ที่ได้จากการศึกษาไปเปรียบเทียบกับค่า CMC ของห้องปฏิบัติการอื่นในประเทศไทย ที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 ในขอบข่ายการสอบเทียบ DT with RTD จาก สมอ. เพื่อพิจารณาความสามารถในการให้บริการสอบเทียบเครื่องมือของ สตส. พบว่ามีห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองการสอบเทียบ DT with RTD จำนวน 74 ห้องปฏิบัติการ แต่ที่ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิ -30°C ถึง 100°C จำนวน 45 ห้องปฏิบัติการ ดังนั้นค่า CMC ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้อยู่ในลำดับที่ 17 จาก 45 ห้องปฏิบัติการ โดยที่ลำดับที่ 16 ได้แก่ ค่า CMC ของ บริษัท โยโกกาวา (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งเท่ากับ 0.060°C และมีค่าการเปรียบเทียบ ระหว่างค่า CMC กับ ค่า tolerance เท่ากับ 2.50 หรือ 2.5 เท่า (ปัดทศนิยม 1 ตำแหน่ง) ส่วนลำดับที่ 17 ค่า CMC ที่ได้จากการศึกษาของห้องปฏิบัติการสอบเทียบ สาขาอุณหภูมิ สตส. ซึ่งเท่ากับ 0.061°C และมีค่าการเปรียบเทียบ ระหว่างค่า CMC กับ ค่า tolerance เท่ากับ 2.46 หรือ 2.5 เท่า (ปัดทศนิยม 1 ตำแหน่ง) แต่เนื่องจาก บริษัท โยโกกาวา (ประเทศไทย) มีค่า CMC ต่ำกว่าของ สตส อยู่ 0.001°C จึงจัดอยู่ในลำดับที่ 16 ตามตารางที่ 10

หากต้องการให้ได้ค่า CMC ที่ต่ำลง เพื่อเลื่อนลำดับให้ดีขึ้น ห้องปฏิบัติการอาจเปลี่ยนวิธีการสอบเทียบ เป็นวิธี ASTM E644-11 (ASTM, 2019) แต่ต้องจัดหา อ่างสอบเทียบที่มี block ที่ทำจาก ทองแดง อลูมิเนียม หรือ โลหะอื่นๆที่เหมาะสมใส่ในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มความเสถียรและความเป็นหนึ่งเดียวกันของอุณหภูมิ ในอ่างสอบเทียบ และอาจใช้ค่า hysteresis คือ คุณสมบัติของเทอร์โมมิเตอร์ที่อธิบายความผันแปรในความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับอุณหภูมิ (ASTM, 2019) แทนค่า short term stability สำหรับการหาค่า hysteresis ทำได้โดยสอบเทียบอุณหภูมิจากต่ำสุดไปสูงสุด และจากอุณหภูมิสูงสุดไปต่ำสุด โดยทั้งสองต้องเป็นจุดสอบเทียบเดียวกัน (NIMT, 2012) เช่น เมื่อสอบเทียบ DT with RTD ที่จุดอุณหภูมิ -30°C , 0°C , 25°C , 65°C และ 100°C แล้วจึงสอบกลับที่ 100°C , 65°C , 25°C , 0°C และ -30°C ตามลำดับ และหาผลต่างของอุณหภูมิมาเป็นค่า hysteresis ต่างจากค่า short term stability ที่เมื่อสอบเทียบย้อนกลับจะสอบเทียบที่อุณหภูมิต่ำสุดที่จุดเดียว คือ -30°C ซึ่งจะทำให้ได้ค่าสูงกว่าใช้ค่า hysteresis อย่างไรก็ตามการหาค่า hysteresis ไม่เหมาะสมกับการหาค่า CMC สำหรับการขอรับรองในการบริการสอบเทียบทั่วไปเพราะค่อนข้างใช้เวลามากในการสอบเทียบแต่เหมาะกับการสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐานระดับสูงหรือการวิจัย

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบค่า CMC ที่ได้จากการศึกษา กับ ห้องปฏิบัติการอื่นในประเทศไทยที่ได้รับรอง ISO/IEC 17025 จาก สมอ. ปี 2564 (ข้อมูลเมื่อวันที่ 19 มีนาคม 2564)

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ	ช่วงการสอบเทียบ (°C)	ค่า CMC (°C)	เปรียบเทียบค่า CMC กับ ค่า MPE หรือ tolerance ที่ ± 0.15	เรียงลำดับค่า CMC	ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ	ช่วงการสอบเทียบ (°C)	ค่า CMC (°C)	เปรียบเทียบค่า CMC กับ ค่า tolerance ที่ ± 0.15 °C	เรียงลำดับค่า CMC
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	(-60) to 90	15 mK	< 10.0 เท่า	1	บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ศูนย์มาตรวิทยา	(-38) to 80	0.046	<3.3 เท่า	12
	>90 to 250	20 mK	< 7.5 เท่า			>80 to 250	0.054	<2.8 เท่า	
ฝ่ายวิเคราะห์คุณภาพ บริษัท ปตท. น้ำมันและการค้าปลีก จำกัด (มหาชน)	-70 to 190	0.020	< 7.5 เท่า	2	บริษัท เอสพีซีอาร์ จำกัด	(-30) to 100	0.055	<2.7 เท่า	13
ห้องปฏิบัติการมาตรฐานทางแสงและอุณหภูมิ ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย	-80 to < 0	0.025	<6.0 เท่า	3	อุตสาหกรรมพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร	-40 to 0	0.056	<2.7 เท่า	14
	0 to 250	0.020	< 7.5 เท่า			>0 to 100	0.051	<2.9 เท่า	
ศูนย์สอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี บริษัท ควอลิตี้ รีบอร์น จำกัด	(-30) to 200	0.027	< 5.6 เท่า	4	สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)	(-38) to 400	0.060	<2.5 เท่า	15
	(-90) to 200	0.028	< 5.4 เท่า	5	บริษัท โยโกกาวา (ประเทศไทย) จำกัด	-30 to 100	0.060	<2.5 เท่า	16
บริษัท ชัคเซสเทคเวย์ จำกัด	(-40) to 25	0.028	< 5.4 เท่า	6	สำนักงานตรวจสอบคุณภาพสินค้าอุตสาหกรรม	(-30) to 100	0.061	<2.5 เท่า	17
	25 to 100	0.032	< 4.7 เท่า			> -50 to 250	0.062	<2.4 เท่า	18
บริษัท มิราเคิล อินเตอร์เนชั่นแนล เทคโนโลยี จำกัด	> -38 to 200	0.032	4.7 เท่า	7	บริษัท ไทย-เกาหลี คาลิเบรชั่น เซ็นเตอร์ จำกัด	-38 to 120	0.063	<2.4 เท่า	19
บริษัท ห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด	-40 to 250	0.034	< 4.4 เท่า	8	บริษัท คริสตัล คาลิเบรชั่น เซลส์แอนด์ เซอร์วิส จำกัด	(-82) to 50	0.060	<2.5 เท่า	20
บริษัท การบินไทย จำกัด (มหาชน)	(-50) to 0	0.040	< 3.8 เท่า	9	บริษัท ทิปปิกแอสฟัลท์ จำกัด (มหาชน)	>50 to 150	0.065	<2.3 เท่า	
	> 0 to 420	0.025	< 6.0 เท่า			(-38) to 0	0.068	<2.2 เท่า	21
บริษัท อินเตอร์เทมปี เซอร์วิส แอนด์ ซัพพลาย จำกัด	-38 to 200	0.043	< 3.5 เท่า	10		>0 to 150	0.050	<3.0 เท่า	
บริษัท เมเซอร์โทรนิคส์ จำกัด	(-80) to 0	0.030	< 5.0 เท่า	11	บริษัท ลิทธิพรแอสโซซิเอต จำกัด	(-40) to < 0	0.068	<2.2 เท่า	22
	> 0 to 300	0.050	< 3.0 เท่า			0 to 100	0.065	<2.3 เท่า	

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบค่า CMC ที่ได้จากการศึกษา กับ ห้องปฏิบัติการอื่นในประเทศไทยที่ได้รับรอง ISO/IEC 17025 จาก สมอ. ปี 2564 (ข้อมูลเมื่อวันที่ 19 มีนาคม 2564)
(ต่อ)

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ	ช่วงการสอบเทียบ (°C)	ค่า CMC (°C)	เปรียบเทียบค่า CMC กับ ค่า MPE หรือ tolerance ที่ ± 0.15	เรียงลำดับค่า CMC	ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ	ช่วงการสอบเทียบ (°C)	ค่า CMC (°C)	เปรียบเทียบค่า CMC กับ ค่า tolerance ที่ ± 0.15 °C	เรียงลำดับค่า CMC
บริษัท ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัย	(-30) to 50	0.070	<2.1 เท่า	23	บริษัท ไทยฮาท แคลิเบรชั่น จำกัด	(-38) to 55	0.14	> 1.1 เท่า	35
ทางการแพทย์และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด	> 50 to 150	0.061	<2.5 เท่า	24		> 55 to 200	0.16	>0.9 เท่า	
บริษัท ไอโซแคล เทคโนโลยี จำกัด	(-15) to 0	0.076	<2.0 เท่า	25	บริษัท เอสเอ็มไอ อินสตรูเมนต์ จำกัด	(-40) to 200	0.16	> 0.9 เท่า	36
	0 to 50	0.065	<2.3 เท่า		บริษัท อซ์บลิ (ประเทศไทย) จำกัด	(-200) to <200	0.17	> 0.9 เท่า	37
	50 to 100	0.074	<2.0 เท่า		บริษัท แคลลิเบรเทค จำกัด	(-30) to <-20	0.18	> 0.8 เท่า	38
						(-20) to 200	0.095	< 1.6 เท่า	
บริษัท อินเตอร์เทค เทสติ้ง เซอร์วิสเชส (ประเทศไทย) จำกัด	(-30) to 125	0.078	<1.9 เท่า	26	บริษัท ไทยคาลิเบรชั่นเซอร์วิส จำกัด	(-40) to 100	0.20	> 0.8 เท่า	39
บริษัท พรีเมียร์ซิสเต็มเอ็นจิเนียริง จำกัด	-30 to 250	0.082	<1.8 เท่า	27					
บริษัท จิรณี แอสโซซิเอตส์ จำกัด	(-30) to 150	0.082	<1.8 เท่า		บริษัท โปรเฟสชั่นแนล แคริเบรชั่น แอนด์เซอร์วิสเชส จำกัด	(-30) to 25	0.22	> 0.7 เท่า	40
บริษัท ดีเคเอสเอช (ประเทศไทย) จำกัด	(-30) to 200	0.085	<1.8 เท่า	28		>25 to 100	0.20	> 0.8 เท่า	
บริษัท เซาท์เทิร์น คาลิเบรชั่น เซอร์วิส จำกัด	(-50) to 150	0.090	<1.7 เท่า	29	บริษัท แคล. แล็บ. เมทโรโลยี จำกัด	(-40) to 0	0.098	< 1.5 เท่า	41
บริษัท ซิสทอนิกส์ จำกัด	(-40) to 100	0.10	<1.5 เท่า	30	งานอุปกรณ์การแพทย์ คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล	- 30 to 100	0.22	> 0.7 เท่า	42
บริษัท แคลิเบรชั่น แลบบอราทอรี จำกัด	(-40) to 220	0.11	<1.4 เท่า	31	บริษัท ยูไนเต็ด อินสตรูเมนต์ แอนด์ เมโทรโลยี จำกัด	(-30) to 160	0.22	> 0.7 เท่า	43
บริษัท เอส เค เซลส์แอนด์เซอร์วิส จำกัด	(-30) to 125	0.11	<1.4 เท่า	32	บริษัท ยูนิไทย กรุป จำกัด	(-40) to <-20	0.11	< 1.4 เท่า	44
ศูนย์มาตรวิทยา บริษัท เอส ซีไอ อีโคโนมิค เซอร์วิสเชส จำกัด	(-80) to 70	0.08	<1.9 เท่า	33		20 to 250	0.030	>0.5 เท่า	
	>70 to 290	0.14	>1.1 เท่า		บริษัท ออโตเมชั่น เซอร์วิส จำกัด	(-200) to 850	0.30	< 0.5 เท่า	45
บริษัท เทคโนโลยีอินสตรูเมนต์ จำกัด	(-40) to 420	0.15	=1.0 เท่า	34					

สรุปผล

ผลการสอบเทียบ DT with RTD ที่อุณหภูมิ -30°C , 0°C , 25°C , 65°C และ 100°C จำนวน 3 เครื่อง พบว่า RTD2 ที่จุดอุณหภูมิ 65°C มีค่าแก้ที่สูงที่สุด คือเท่ากับ $(-0.0795)^{\circ}\text{C}$ และ RTD3 ที่จุดอุณหภูมิ 100°C มีความไม่แน่นอนการวัดขยายสูงที่สุด คือ เท่ากับ 0.061°C ดังนั้น วิธีการสอบเทียบนี้จึงมีค่า CMC เท่ากับ 0.061°C ซึ่งพบว่า ค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งต่างๆที่สูงที่สุด คือ ค่า drift of standard ของ DT with PRT มีค่าเท่ากับ 0.030°C

จากการทวนสอบผลการสอบเทียบ DT with RTD ตาม ISO 14253-1 (ISO, 2017) พบว่า DT with RTD ผ่านเกณฑ์การทวนสอบทั้ง 3 เครื่องในทุกจุดอุณหภูมิ โดย DT with RTD ที่มีค่าความผิดพลาดรวมกับค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายที่สูงที่สุด คือ RTD2 ที่อุณหภูมิ 0°C เท่ากับ $(-0.1389)^{\circ}\text{C}$ เนื่องจากผลรวมของค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายต่ำกว่าค่า tolerance หรือไม่เกินขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่าง จึงไม่จำเป็นต้องใช้ค่าแก้ไปรวมกับค่าที่วัดได้เมื่อนำไปใช้งาน แต่หากต้องการความแม่นยำการวัดที่สูงยิ่งขึ้นจึงควรนำค่าแก้ไปรวมกับค่าที่วัดได้ด้วย

ผลเปรียบเทียบ ค่า CMC ที่ได้จากการศึกษากับค่า tolerance ของ RTD ที่ต่ำที่สุดของ สตส. พบว่าค่า CMC มีค่าต่ำกว่า 2.5 เท่า ค่า tolerance ของ RTD และกับค่า CMC ของห้องปฏิบัติการอื่น เพื่อพิจารณาความสามารถในการให้บริการสอบเทียบเครื่องมือของ สตส. พบว่ามีห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองการสอบเทียบ DT with RTD จำนวน 74 ห้องปฏิบัติการ แต่ที่ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิ -30°C ถึง 100°C จำนวน 45 ห้องปฏิบัติการ ดังนั้นค่า CMC ที่ได้จากการศึกษานี้อยู่ในลำดับที่ 17 จาก 45 ห้องปฏิบัติการ

ประโยชน์ของการศึกษานี้ นอกจากทำให้ทราบผลการสอบเทียบและผลการทวนสอบของ DT with RTD แล้ว ยังได้ข้อมูลสำหรับใช้ขอการรับรอง ISO/IEC 17025 กับ สมอ. และสามารถนำไปใช้จัดทำคู่มือการสอบเทียบ DT with RTD ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. ได้

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษานี้ พบว่า ค่าการเลื่อนค่า (drift of standard) และค่า uncertainty of standard เป็นแหล่งค่าความไม่แน่นอนที่มีค่าสูงที่สุด ที่มีผลต่อค่า expanded uncertainty ดังนั้นหากต้องการลดค่า drift of standard ห้องปฏิบัติการควรจัดหาเครื่องมือมาตรฐานที่มีความถูกต้องสูงและมีค่าการเลื่อนค่าที่ต่ำกว่นำมาใช้งาน และหากมีงบประมาณเพียงพอควรพิจารณาการส่งเครื่องมือมาตรฐานไปสอบเทียบแบบ direct comparison ซึ่งจะสามารถลดค่า uncertainty of standard ของการสอบเทียบให้ต่ำลง ส่งผลให้ค่า expanded uncertainty ต่ำลง ซึ่งทำให้ได้ค่า CMC ที่ต่ำลงด้วย เนื่องจากค่า CMC นั้น จะถูกแสดงอยู่ในใบรับรองที่ทาง สมอ. รับรองให้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ หากมีค่า CMC ที่ต่ำในขอบข่ายการรับรองนั้น จะเป็นข้อได้เปรียบทางการค้าสำหรับการให้บริการสอบเทียบ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ น.สพ.เลิศชัย จินตพิทักษ์สกุล ผู้อำนวยการสำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ และ สพ.ญ.ดร.พัชรี ทองคำคุณ ผู้อำนวยการสถาบันสุขภาพสัตว์แห่งชาติ (อดีตผู้อำนวยการสำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์) ที่ให้โอกาสและการสนับสนุนในการศึกษาทดลอง

ขอขอบคุณ น.สพ.สมชาย วงศ์สมุทร ผู้เชี่ยวชาญด้านตรวจสอบคุณภาพน้ำนมและผลิตภัณฑ์นม คุณวิภาดา สิริสมภพชัย รักษาการผู้เชี่ยวชาญด้านการวิเคราะห์คุณภาพสินค้าปศุสัตว์ คุณกำชัย สิงห์วัฒน์ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ดร.อ้อยใจ อ่องหรั่ง และ ดร.จริยา บัวเจริญ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ให้คำปรึกษาในการทำการศึกษาดทดลอง

ขอขอบคุณ น.สพ.ชัยวุฒิ วิสุทธิ น.สพ.สิริพงศ์ สุขถาวรเจริญพร และคณะกรรมการวิชาการ สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำในการทำการศึกษาดทดลอง

ขอขอบคุณบุคลากรงานสอบเทียบเครื่องมือสาขาอุณหภูมิ กลุ่มพัฒนาระบบคุณภาพห้องปฏิบัติการในความร่วมมือปฏิบัติงานให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- นวภัทรา และ ทวีพล. 2555. การวัดและเครื่องมือวัด การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร (Measurement and Instrumentation). First edition. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพมหานคร
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2562. GLA-23, ข้อเสนอแนะประกอบการตรวจประเมิน ตาม มอก.17025-2561. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (TISI) กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2564. GLA-26, ข้อเสนอแนะการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (TISI) กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.
- ASTM. 2019. E644-11, Standard test methods for testing industrial resistance thermometers ASTM. ASTM International. United States.
- BIPM. 2012 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), 3rd edition. JCGM 200:2012. The International Bureau of Weights and Measures. France.
- BIPM. 2018. Guide to the realization of the ITS-90 platinum resistance thermometry. The International Bureau of Weights and Measures. France.
- EURAMET. 2011. Guidelines on the calibration of temperature indicators and simulators by electrical simulation and measurement (EURAMET/cg-11/v.02). The European Association of National Metrology Institutes. Germany.
- IEC. 2008. IEC 60751, Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. 2nd edition. International Electrotechnical Commission. Switzerland.
- ILAC. 2013. ILAC-P14:01, ILAC policy for uncertainty in calibration. International Laboratory Accreditation Cooperation. Australia.
- Inseok, Y., Suherlan., Kee Sool, G., Yong-Gyoo K. 2015. Interpolating equation of industrial platinum resistance thermometers in the temperature range between 0 °C and 500 °C. Korea Research Institute of Standards and Science. Korea.

- ISO. 2003. ISO 10012, Measurement management systems-Requirements for measurement processes and measuring equipment. First edition. The International Organization for Standardization. Switzerland.
- ISO. 2017. ISO 14253-1, International Standard, Geometrical product specifications (GPS)-inspection by measurement of workpieces and measuring instruments-Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specification. The International Organization for Standardization. Switzerland.
- NIMT. 2012^a. Guideline of calibration of digital thermometer with temperature sensor (TM/CG01/TT01/V04). First edition. Thermometry Metrology Department, National Institute of Metrology.Thailand.
- NIMT. 2012^b. Guideline of calibration of liquid-In-glass thermometer (TM/CG02/TT01/V03). First edition, Thermometry Metrology Department, National Institute of Metrology.Thailand.
- OIML. 2003. OIML R 84, Platinum, copper, and nickel resistance thermometers (for industrial and commercial use). The International Organization of Legal Metrology (OIML). France.
- TUTCO HEATING SOLUTIONS GROUP. RTDs. [Image]. 2521, March 24. Retrieved from http://www.tutco.com/temperature_sensors/rtds.php.
- UKAS. 2019. M3003, THE expression of uncertainty and confidence in measurement. 4th edition, United Kingdom Accreditation Service. United Kingdom.

ภาคผนวก

ค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งต่างๆของการสอบเทียบ

1. ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ จากอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ

1.1 ค่าความเสถียรภาพของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (stability)

ตารางที่ 11 ค่า stability ที่อุณหภูมิ -30 °C

Stability at -30 °C															
จุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Maximum	-29.9994	-30.0035	-29.9979	-30.0042	-30.0007	-29.9993	-30.0045	-30.0132	-30.0085	-30.0017	-30.0040	-30.0031	-30.0060	-30.0112	-30.0129
Minnimum	-30.0252	-30.0193	-30.0234	-30.0268	-30.0224	-30.0214	-30.0179	-30.0188	-30.0263	-30.0210	-30.0250	-30.0270	-30.0258	-30.0259	-30.0191
Stability	0.0129	0.0079	0.0128	0.0113	0.0109	0.0111	0.0067	0.0028	0.0089	0.0097	0.0105	0.0120	0.0099	0.0074	0.0031
Max of Stability	0.0129														

ตารางที่ 12 ค่า stability ที่อุณหภูมิ 0 °C

Stability at 0 °C															
จุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Maximum	0.0088	0.0051	0.0050	0.0096	0.0050	0.0096	0.0075	0.0065	0.0092	0.0056	0.0088	0.0058	0.0069	0.0095	0.0058
Minnimum	-0.0030	0.0007	-0.0012	0.0007	-0.0012	-0.0008	0.0026	-0.0005	0.0048	-0.0007	-0.0010	0.0015	-0.0024	0.0039	-0.0019
Stability	0.0059	0.0022	0.0031	0.0045	0.0031	0.0052	0.0025	0.0035	0.0022	0.0032	0.0049	0.0022	0.0047	0.0028	0.0039
Max of Stability	0.0059														

ตารางที่ 13 ค่า stability ที่อุณหภูมิ 25 °C

Stability at 25 °C															
จุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Maximum	25.0153	25.0085	25.0106	25.0074	25.0041	25.0124	25.0075	25.0055	25.0158	25.0026	25.0022	25.0025	25.0012	25.0016	25.0035
Minnimum	25.0027	25.0029	25.0030	25.0040	25.0024	24.9899	24.9993	24.9945	24.9958	24.9934	24.9925	24.9938	24.9934	24.9989	24.9943
Stability	0.0063	0.0028	0.0038	0.0017	0.0009	0.0113	0.0041	0.0055	0.0100	0.0046	0.0049	0.0044	0.0039	0.0014	0.0046
Max of Stability	0.0113														

ตารางที่ 14 ค่า stability ที่อุณหภูมิ 65 °C

Stability at 65 °C															
จุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Maximum	65.0174	65.0019	65.0023	65.0115	65.0060	65.0064	65.0064	65.0068	65.0046	65.0035	65.0066	65.0035	65.0040	65.0009	65.0062
Minnimum	65.0006	65.0002	65.0003	65.0055	65.0006	64.9997	65.0001	65.0005	64.9994	65.0003	64.9943	65.0003	65.0005	64.9971	65.0004
Stability	0.0084	0.0009	0.0010	0.0030	0.0027	0.0034	0.0032	0.0032	0.0026	0.0016	0.0062	0.0016	0.0018	0.0019	0.0029
Max of Stability	0.0084														

ตารางที่ 15 ค่า stability ที่อุณหภูมิ 100 °C

Stability at 100 °C															
จุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Maximum	100.0263	100.0097	100.0139	100.0118	100.0086	100.0151	100.0143	100.0179	100.0139	100.0176	100.0265	100.0264	100.0266	100.0093	100.0263
Minnimum	100.0002	100.0038	100.0000	100.0049	100.0035	100.0000	100.0043	99.9985	100.0023	100.0003	100.0003	100.0114	100.0085	100.0009	100.0094
Stability	0.0131	0.0030	0.0070	0.0035	0.0026	0.0076	0.0050	0.0097	0.0058	0.0087	0.0131	0.0075	0.0091	0.0042	0.0085
Max of Stability	0.0131														

1.2 ค่าความเป็นหนึ่งเดียวกันของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (uniformity)

ตารางที่ 16 ค่า uniformity ที่อุณหภูมิ -30 °C และ 0 °C

Uniformity at -30 °C								Uniformity at 0 °C						
จุดที่	6 กับ 2	6 กับ 4	6 กับ 12	6 กับ 14	2 กับ 14	4 กับ 12	1 กับ 11	6 กับ 2	6 กับ 4	6 กับ 12	6 กับ 14	2 กับ 14	4 กับ 12	1 กับ 11
Average	0.0144	0.0174	0.0059	0.0041	0.0132	0.0167	0.0109	0.0073	0.0056	0.0023	0.0050	0.0045	0.0043	0.0053
SD	0.0068	0.0033	0.0050	0.0052	0.0029	0.0039	0.0044	0.0022	0.0007	0.0008	0.0007	0.0020	0.0010	0.0015
Maximum	0.0222	0.0223	0.0182	0.0144	0.0187	0.0221	0.0183	0.0149	0.0070	0.0036	0.0063	0.0070	0.0057	0.0077
Max of Uniformity	0.0223							0.0149						

ตารางที่ 17 ค่า uniformity ที่อุณหภูมิ 25 °C และ 65 °C

จุดที่	Uniformity at 25 °C							Uniformity at 65 °C						
	6 กับ 2	6 กับ 4	6 กับ 12	6 กับ 14	2 กับ 14	4 กับ 12	1 กับ 11	6 กับ 2	6 กับ 4	6 กับ 12	6 กับ 14	2 กับ 14	4 กับ 12	1 กับ 11
Average	0.0036	0.0017	0.0021	0.0019	0.0036	0.0016	0.0026	0.0046	0.0130	0.0013	0.0031	0.0054	0.0120	0.0122
SD	0.0035	0.0019	0.0021	0.0017	0.0016	0.0018	0.0010	0.0000	0.0033	0.0011	0.0017	0.0020	0.0041	0.0044
Maximum	0.0130	0.0072	0.0059	0.0056	0.0076	0.0058	0.0039	0.0046	0.0187	0.0035	0.0063	0.0094	0.0161	0.0189
Max of Uniformity	0.0130							0.0189						

ตารางที่ 18 ค่า uniformity ที่อุณหภูมิ 100 °C

จุดที่	Uniformity at 100 °C						
	6 กับ 2	6 กับ 4	6 กับ 12	6 กับ 14	2 กับ 14	4 กับ 12	1 กับ 11
Average	0.0182	0.0198	0.0208	0.0218	0.0134	0.0226	0.0198
SD	0.0017	0.0032	0.0019	0.0016	0.0043	0.0020	0.0017
Maximum	0.0206	0.0252	0.0243	0.0240	0.0219	0.0254	0.0222
Max of Uniformity	0.0254						

2. ค่าความไม่แน่นอนสำหรับการสอบเทียบ จากเครื่องมือมาตรฐาน (standard thermometer), DT with PRT_{cal}

2.1 ค่าการเลื่อนค่าของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (drift of standard)

drift of standard = specification of DT with $PRT_{cal} = (\pm) 0.030 \text{ }^{\circ}\text{C}$

2.2 ค่าความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (resolution of standard)

resolution of standard = $0.0001/2 = 0.00005 \text{ }^{\circ}\text{C}$

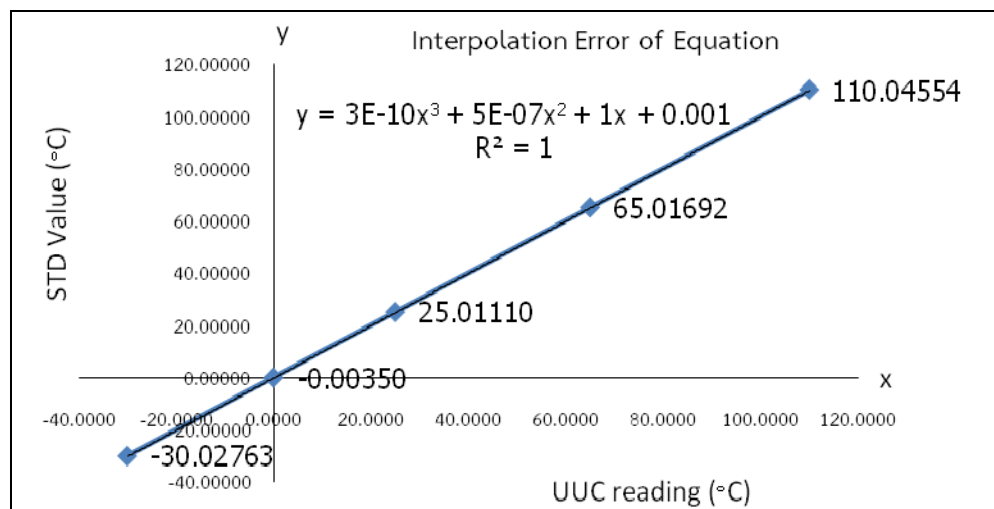
2.3 ค่าความผิดพลาดจากสมการในการคำนวณค่าแก้ (interpolation error of equation)

ตารางที่ 20 ค่า interpolation error of equation

*STD Value (°C) (แกน y)	*UUC Value (°C) (แกน x)	*Correction (°C) (แกน y - แกน x)	UUC Fitting (°C) (y Fitting)	**Interpolation error of equation (°C) (y Fitting - แกน y)
-30.02763	-30.0311	0.0035	-30.0297	0.0021
-0.00350	-0.0048	0.0013	-0.0038	0.0003
25.01110	25.0095	0.0016	25.0108	0.0003
65.01692	65.0158	0.0011	65.0190	0.0021
110.04554	110.0418	0.0037	110.0493	0.0038

* เป็นข้อมูลที่ได้จากใบรับรองการสอบเทียบ DT with PRT_{cal} Cer No. PSL-T 667/63 วันที่สอบเทียบ 27 เมษายน 2563 โดย TISTR

** ใช้ค่า interpolation error of equation เท่ากับ 0.0038 °C ในการหาค่า uncertainty ที่อุณหภูมิ 100 °C เนื่องจากเป็นค่าที่สูงที่สุดในช่วงการวัดที่อุณหภูมิ 65 °C ถึง 110 °C



หมายเหตุ	
STD Value :	แกน y คือ ค่าอุณหภูมิของ Reference standard จากใบรับรองผลการสอบเทียบ
UUC Reading :	แกน x คือ ค่าอุณหภูมิของ Sensor จากใบรับรองผลการสอบเทียบ
UUC Reading Fitting :	ค่าอุณหภูมิของ Sensor ที่ได้จากการแทนค่าในสมการเชิงเส้น
Interpolation Error of Equation	ค่าการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นของ Sensor จากทุกช่วงอุณหภูมิ ที่สอบเทียบ คำนวณได้จาก y Fitting - แกน y

รูปที่ 7 กราฟแสดงค่า interpolation error of equation

2.4 ค่าความไม่แน่นอนจากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน DT with PRT_{cal} (uncertainty of standard)

ตารางที่ 21 ค่า uncertainty of standard

*STD Value (°C)	*UUC Value (°C)	*Correction (°C)	**Uncertainty (°C)
-30.02763	-30.0311	0.0035	0.030
-0.00350	-0.0048	0.0013	0.030
25.01110	25.0095	0.0016	0.030
65.01692	65.0158	0.0011	0.030
110.04554	110.0418	0.0037	0.030

* เป็นข้อมูลที่ได้จากใบรับรองการสอบเทียบ DT with PRT_{cal} Cer No. PSL-T 667/63 วันที่สอบเทียบ 27 เมษายน 2563 โดย TISTR

** ที่อุณหภูมิ 100 °C ใช้ค่า Uncertainty เท่ากับ 0.030 °C เนื่องจากค่า uncertainty ของผลการสอบเทียบ DT with PRT_{cal} มีค่า 0.030 °C เท่ากันทุกช่วงอุณหภูมิ

3. ค่าความไม่แน่นอนสำหรับการสอบเทียบ จากตัวอย่างสอบเทียบ RTD1, RTD2 และ RTD3

3.1 ค่าความสามารถในการอ่านของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ (resolution of TUC)

$$\text{resolution of TUC} = 0.01/2 = 0.005$$

3.2 ค่าความเสถียรของเครื่องมือในเวลาสั้นๆ (short term stability)

ตารางที่ 22 ค่า short term stability ของ RTD1, RTD2 และ RTD3

	DT with RTD1 (ID NO. LIG_32 (ch2))				DT with RTD2 (ID NO. LIG_33 (ch1))				DT with RTD3 (ID NO. LIG_34 (ch2))			
	Temp ครั้งแรก (°C)		Temp ครั้งหลัง(°C)		Temp ครั้งแรก (°C)		Temp ครั้งหลัง(°C)		Temp ครั้งแรก (°C)		Temp ครั้งหลัง(°C)	
	STD	UUC	STD	UUC	STD	UUC	STD	UUC	STD	UUC	STD	UUC
Average	-29.9786	-29.98	-29.9921	-29.99	-30.0091	-30.00	-30.0105	-30.01	-29.9948	-29.99	-29.9511	-29.96
Correction		0.0002		-0.0021		-0.0091		-0.0005		-0.0048		0.0089
Short term Stability				0.0023				-0.0086				-0.0137