

เอกสารวิชาการ

เรื่องที่ 1

การศึกษาผลการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วแบบจุ่มแช่ทั้งหมด
ที่อุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C โดยวิธีการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

โดย

นายเอกสิทธิ์ ตุ่มสิทธิ์

นายณฤเบศ เนินทอง

นายนริศ สำเร็จผล

เลขทะเบียนวิชาการ	64(2)-0404-090
สถานที่ดำเนินการ	สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์
ระยะเวลาดำเนินการ	ตุลาคม 2563 – เมษายน 2564
การเผยแพร่	เว็บไซต์สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ https://qcontrol.dld.go.th/

การศึกษาผลการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วแบบจุ่มแช่ทั้งหมด ที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C โดยวิธีการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน

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

บทคัดย่อ

การศึกษาผลการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วแบบจุ่มแช่ทั้งหมด (LIGT-total immersion) ที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C โดยวิธีการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ตาม Guidelines of calibration of liquid in glass thermometer เลขที่ TM/CG02/TT01/V03 โดยใช้ digital thermometer with PRT 25 ohms เป็นเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ใช้อ่างสอบเทียบอุณหภูมิ ที่บรรจุน้ำมันซิลิโคนเป็นแหล่งสร้างอุณหภูมิ และเลือกใช้ LIGT-total immersion ที่มีช่วงการวัดอุณหภูมิที่ -38 °C ถึง 2 °C มีค่าความละเอียดที่ 0.1 °C รุ่น ASTM 62C-86 จำนวน 3 แท่ง ดังนี้ S/N: 9714075 (LIGT1), S/N: 0678290 (LIGT2) และ S/N: 8005-1528 (LIGT3) เป็นตัวอย่างสอบเทียบในการศึกษาครั้งนี้ โดยทำการสอบเทียบ LIGT-total immersion ที่จุดอุณหภูมิ -30 °C, -15 °C และ 0 °C ได้ผลการสอบเทียบ คือ ค่าแก้±ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% โดยเรียงตามลำดับตัวอย่าง ดังนี้ LIGT1, LIGT2 และ LIGT3 ที่อุณหภูมิ -30 °C ได้ผลการสอบเทียบเท่ากับ $(-0.0357) \pm 0.082$ °C, $(-0.0417) \pm 0.082$ °C และ 0.0389 ± 0.085 °C ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ -15 °C ได้ผลการสอบเทียบเท่ากับ $(-0.0275) \pm 0.082$ °C, $(-0.0319) \pm 0.082$ °C และ 0.0185 ± 0.083 °C ตามลำดับ และที่อุณหภูมิ 0 °C ได้ผลการสอบเทียบเท่ากับ $(-0.0148) \pm 0.078$ °C, $(-0.0189) \pm 0.078$ °C และ 0.0175 ± 0.079 °C ตามลำดับ ดังนั้นค่าขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด (Calibration and Measurement Capability, CMC) ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ ซึ่งครอบคลุมช่วงอุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C จึงเท่ากับ 0.085 °C

การทวนสอบผลการสอบเทียบตาม ISO 14253-1 (2017) ที่อุณหภูมิ -30 °C และ -15 °C พบว่า ไม่ผ่านเกณฑ์การทวนสอบ แต่ค่าความไม่แน่นอนของการวัดขยายต่ำกว่าค่า maximum permissible errors (MPE) ของ LIGT ตามมาตรฐาน ASTM E1-03a (2003) จึงต้องใช้ค่าแก้ แต่สำหรับจุดอุณหภูมิ 0 °C ให้ผลผ่านเกณฑ์การทวนสอบ จึงไม่จำเป็นต้องใช้ค่าแก้เมื่อนำไปใช้วัดอุณหภูมิที่ 0 °C จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าค่า CMC มีค่าต่ำกว่าค่า MPE ที่ต่ำที่สุดของ LIGT ตามมาตรฐาน ASTM E1-03a (2003) 1.2 เท่า ดังนั้นห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ จึงสามารถให้บริการสอบเทียบ LIGT-total immersion ที่ช่วงอุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C ได้ นอกจากนี้เมื่อนำค่า CMC มาเปรียบเทียบกับห้องปฏิบัติการอื่นที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 ในขอบข่ายการสอบเทียบ LIGT-total immersion ที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C จากสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) จะถูกจัดอยู่ในลำดับที่ 10 จาก 16 ห้องปฏิบัติการ โดยผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถใช้ขอการรับรอง ISO/IEC 17025 กับ สมอ. ได้

คำสำคัญ : สอบเทียบ, เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วแบบจุ่มแช่ทั้งหมด, อุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C

เลขทะเบียนวิชาการ : 64(2)-0404-090

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

Study of the calibration results of the total immersion liquid in glass thermometers from -30 °C to 0 °C by comparison standard thermometer method

Aekasit Tumsit^{1/} Naruebeth Noentong^{1/} Naris Sumrejpol^{1/}

Abstract

Study of the calibration results of the total immersion liquid in glass thermometers (LIGT-total immersion) from -30 °C to 0 °C was conducted by comparison method with standard thermometer according to Guideline of calibration of liquid in glass thermometer, guideline no. is TM/CG02/TT01/V03. The digital thermometer with 25 ohms PRT and silicone oil within calibration bath were used as standard thermometer and temperature source, respectively. Three bars of LIGT-total immersion, ASTM 62C-86 model with -38 °C to 2 °C range and 0.1 °C resolution, included, LIGT1 (S/N: 9714075), LIGT2 (S/N: 0678290) and LIGT3 (S/N: 8005-1528) were selected for samples in this study. The calibration results were reported as correction values $\pm$ expanded measurement uncertainty at a confidence level of approximately 95% as follow at -30 °C, LIGT1, LIGT2 and LIGT3 were $(-0.0357) \pm 0.082$ °C, $(-0.0417) \pm 0.082$ °C and 0.0389 ± 0.085 °C, respectively, at -15 °C were $(-0.0275) \pm 0.082$ °C, $(-0.0319) \pm 0.082$ °C and 0.0185 ± 0.083 °C, respectively and at 0 °C were $(-0.0148) \pm 0.078$ °C, $(-0.0189) \pm 0.078$ °C and 0.0175 ± 0.079 °C, respectively. Therefore, the calibration and measurement capability (CMC) in this study, which covers the temperature range -30 °C to 0 °C, was 0.085 °C.

The calibration results were verified according to ISO 14253-1 (2017), the study found that at -30 °C and -15 °C, that calibration results failed to meet the verification criteria but the expanded measurement uncertainty lower than maximum permissible errors (MPE) of LIGT according to ASTM E1-03a (2003). Therefore, the correction value have to add when use at that temperature point. On the other hand, at 0 °C, the calibration results passed the verification criteria thus the correction value is unnecessary at 0 °C temperature point. This CMC value was compared with the lowest of MPE of LIGT-total immersion. This study found that the CMC value had 1.2 times lower than the lowest of MPE of LIGT-total immersion according to ASTM E1-03a (2003) indicated the capability to calibrate LIGT- total immersion from -30 °C to 0 °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 10th out of 16th laboratories. The results from this study can be used for ISO/IEC 17025 accreditation with TISI.

Keywords : calibration, liquid in glass thermometers (total immersion), temperature from -30 °C to 0 °C

Registered No. : 64(2)-0404-090

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

บทนำ

เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว (Liquid in glass thermometer; LIGT) เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล ด้วยหลักการขยายตัวหรือหดตัวของของเหลว เมื่อของเหลวได้รับความร้อน อุณหภูมิจะเพิ่มสูงขึ้นของเหลวจะขยายตัว และหดตัวลงเมื่ออุณหภูมิของเหลวลดลง

ส่วนประกอบของ LIGT ประกอบด้วยส่วนที่เป็นกระเปาะสำหรับบรรจุของเหลว (bulb) ก้านแก้ว (stem) หรือ ท่อทางเดินของเหลว (capillary) และ ขีดวัดอุณหภูมิ (scale) ซึ่งแบ่งเป็น ขีดวัดอุณหภูมิหลัก (main scale) และขีดวัดอุณหภูมิสำหรับอ่านอุณหภูมิอ้างอิง (auxiliary scale) แล้วยังมีห้องรองรับของเหลว 2 ชนิด ได้แก่ ห้องหดตัว (contraction chamber) อยู่ด้านล่างของขีดวัดอุณหภูมิหลัก มีจุดประสงค์เพื่อลดความยาวของเทอร์โมมิเตอร์ และ ห้องขยายตัว (expansion chamber) อยู่บริเวณส่วนท้ายของเทอร์โมมิเตอร์ เพื่อป้องกันแรงดันของเหลวไหลขึ้นไปด้านบนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Knake, 2011) ตามรูปที่ 1

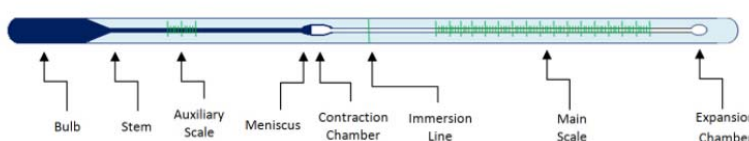


Figure 1: Anatomy of a LIG Thermometer

รูปที่ 1 ส่วนประกอบของเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว (Knake, 2011)

ของเหลวที่นิยมบรรจุภายใน LIGT ได้แก่ โปรท โปรท-แทลเลียมยูเทคติกอัลลอย โทลูอิน หรือของเหลวอื่นๆ ที่ย้อมด้วยสีแดง (ASTM, 2003) เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วแบบโปรทสามารถใช้ได้ในช่วง -38°C ถึง 450°C เนื่องจากโปรทมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนสูง ส่วน LIGT ที่บรรจุแทลเลียม/โลหะผสมโปรท สามารถวัดได้ถึง -50°C แต่ในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า -38°C สามารถวัดได้โดยใช้ LIGT ที่บรรจุแอลกอฮอล์หรือโทลูอินซึ่งครอบคลุมช่วง -80°C ถึง 75°C และ -80°C ถึง 110°C (NATA, 2019)

LIGT แบบจุ่มแช่ทั้งหมด (total immersion) ตามที่กำหนดในมาตรฐาน ASTM E1-03a (ASTM, 2003) ใช้วัดอุณหภูมิในช่วง -38°C ถึง 405°C ซึ่งห้องปฏิบัติการของสำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ ใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดอุณหภูมิในงานต่างๆ เช่น ใช้เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิงของน้ำในการสอบเทียบเครื่องแก้วและอุปกรณ์วัดปริมาตร ใช้เป็นเทอร์โมมิเตอร์อ้างอิงในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ใช้ตรวจสอบเครื่องมือในการทำ ice point และใช้อ้างอิงในการตรวจสอบหาค่า temperature coefficient of standard ในกระบวนการสอบเทียบตู้ควบคุมอุณหภูมิ ใช้ในการวัดอุณหภูมิในตู้ควบคุมอุณหภูมิ เช่น ตู้เพาะเชื้อ ตู้เย็น ตู้แช่แข็ง เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้องปฏิบัติการทดสอบที่ใช้ตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำสำหรับเก็บสารเคมี สารมาตรฐาน หรือ ตัวอย่างทดสอบ เช่น ที่ช่วงอุณหภูมิ -5°C ถึง -30°C มีการใช้ LIGT ในการเผื่อระวังอุณหภูมิของตู้แช่แข็งเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อสารเคมีหรือสารมาตรฐานที่เก็บรักษาก่อนนำมาใช้งาน

เทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว เป็นอุปกรณ์ที่ต้องได้รับการสอบเทียบ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าค่าการวัดที่ถูกต้องและสามารถสอบย้อนกลับไปยังหน่วยระหว่างประเทศได้ การสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว ทำได้โดยวิธีเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ที่มีความสามารถในการวัดดีกว่า 3-10 เท่าของเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว ตามข้อกำหนดใน ISO 10012 (ISO, 2003) ซึ่งปัจจุบันนิยมใช้ digital thermometer with platinum resistance thermometer (DT with PRT) หรือ resistance temperature detector (RTD) เป็นเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐานสำหรับการสอบเทียบ LIGT และแหล่งกำเนิดอุณหภูมิที่ใช้สอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว นิยมใช้อ่างที่มีของเหลวเป็นตัวกลาง (liquid bath) และมีความลึกเหมาะสมสอดคล้องกับเทอร์โมมิเตอร์ที่ต้องการสอบเทียบ (NIMT, 2012³) ของเหลวที่เป็นตัวกลาง เช่น แอลกอฮอล์จะนำมาใช้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 0°C ส่วนช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 0°C แต่ไม่เกิน 100°C จะใช้น้ำสะอาดเป็นตัวกลางและช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 100°C จะใช้น้ำมันซิลิโคน (silicone oil) เป็นตัวกลาง ซึ่งน้ำมันซิลิโคนบางชนิดสามารถใช้เป็นตัวกลางได้ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ -80°C ถึง 250°C (NIMT, 2012³)

วิธีการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว ทำได้โดยการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน โดยสามารถอ้างอิงได้หลายวิธี ได้แก่

วิธี ASTM E77-14: Standard test method for inspection and verification of thermometers (ASTM, 2017) เป็นวิธีมาตรฐานของการตรวจสอบลักษณะภายนอกและขนาด ทดสอบความคงทนของสี ทดสอบเสถียรภาพของกระเปาะ และทดสอบความถูกต้องของสเกล ที่ใช้ในการทวนสอบ LIGT ซึ่งได้กำหนดไว้ในข้อกำหนด ASTM E1 (ASTM, 2003) และ ASTM E2251 (ASTM, 2010) อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้ก็สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วแบบต่างๆได้ ซึ่งในมาตรฐาน ASTM E77-14 (ASTM, 2017) ได้กล่าวถึงลักษณะการจุ่มของ LIGT ซึ่งจำแนกออกเป็น 3 กลุ่ม คือ เทอร์โมมิเตอร์ชนิดจุ่มแช่แบบสมบูรณ์ (LIGT-complete immersion) เทอร์โมมิเตอร์ชนิดจุ่มแช่บางส่วน (LIGT-partial immersion) และ เทอร์โมมิเตอร์ชนิดจุ่มแช่ทั้งหมด (LIGT-total immersion) แต่ LIGT-complete immersion นั้น ไม่ได้กำหนดไว้ในมาตรฐานของ ASTM E1 (ASTM, 2003) ดังนั้นมาตรฐาน ASTM E77-14 (ASTM, 2017) จึงได้กำหนดลักษณะการจุ่มไว้เพียง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 คือ LIGT-total immersion และ กลุ่มที่ 2 คือ LIGT-partial immersion และ เทอร์โมมิเตอร์ชนิดจุ่มแช่บางส่วนแบบพิเศษ (LIGT- special use partial-immersion) ซึ่งจะมีการระบุค่าของอุณหภูมิของ emergent mercury column หรือ stem ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ เป็นวิธีที่มีรายละเอียดการสอบเทียบและการทวนสอบ LIGT แต่มีข้อเสียคือต้องใช้อุปกรณ์ที่ใช้มีความเฉพาะ เช่น อ่างสอบเทียบอุณหภูมิเป็นแบบมีใบพัดกวนของเหลว และมีฝาปิดที่ผลิตจากวัสดุที่ไม่นำความร้อน เช่น Phenolic Plastic ที่มีรูสำหรับติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งไม่มีจำหน่ายทั่วไป จะต้องผลิตขึ้นเอง เป็นต้น รวมทั้งไม่มีรายละเอียดการหาค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ดังนั้นผู้ใช้วิธีนี้จึงต้องอ้างอิงวิธีการหาค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย จากแหล่งอ้างอิงอื่นประกอบ เช่น M3003 (UKAS, 2019) เป็นต้น

วิธี Guideline of calibration of liquid in glass thermometer (TM/CG02/TT01/V03) (NIMT, 2012³) ของ National Institute of Metrology (Thailand); NIMT เป็นแนวทางสำหรับการสอบเทียบเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว โดยวิธีการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -80 °C ถึง 400 °C ซึ่งสามารถทำได้ 2 แบบ โดยแบ่งตามลักษณะการจุ่ม คือ การสอบเทียบ LIGT-total immersion และ การสอบเทียบ LIGT-partial immersion ซึ่งการจุ่มทั้งสองแบบมีกระบวนการสอบเทียบที่ต่างกันตามลักษณะการจุ่มของตัวเทอร์โมมิเตอร์ ความแตกต่างในการจุ่มของเทอร์โมมิเตอร์นั้น เกิดจากการออกแบบเทอร์โมมิเตอร์ เพื่อวัตถุประสงค์ในการนำเทอร์โมมิเตอร์ไปใช้งาน ซึ่ง LIGT-total immersion จะเหมาะสมกับการวัดอุณหภูมิในภาชนะที่มีความลึกเหมาะสมและสอดคล้องกับอุณหภูมิที่ทำการวัด ส่วน LIGT-partial immersion จะเหมาะสมกับการวัดอุณหภูมิในภาชนะที่มีความลึกจำกัด แต่ต้องมีวิธีการแก้ค่าขณะนำไปใช้งาน ซึ่ง LIGT-total immersion จะให้ค่าการวัดที่ถูกต้องสูงกว่าการสอบเทียบ LIGT-partial immersion ซึ่งวิธีนี้มีข้อดีคือ จัดทำขึ้นโดย NIMT ซึ่งมีรายละเอียดในวิธีการสอบเทียบและการหาค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ที่เป็นขั้นตอนชัดเจน และไม่ได้กำหนดคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับสอบเทียบ จึงสามารถเลือกใช้ได้หลายแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมและงบประมาณของห้องปฏิบัติการสอบเทียบ นอกจากนี้ยังมีรายละเอียดการออกรายงานผลสอบเทียบ การประกันคุณภาพ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน

และวิธี Liquid in glass thermometer calibration service ของ National Institute of Standards and Technology; NIST (Wise, 1998) เป็นวิธีสำหรับให้บริการการสอบเทียบเครื่องวัดอุณหภูมิที่ครอบคลุมช่วง -196 °C ถึง 538 °C ส่วนใหญ่เป็น LIGT แต่มีการสอบเทียบ เครื่องวัดอุณหภูมิประเภทอื่นด้วย เช่น thermistors, industrial platinum resistance thermometers, thermocouples and digital thermometer systems เทอร์โมมิเตอร์ของลูกค้าจะถูกสอบเทียบในอ่างควบคุมอุณหภูมิคงที่ ตามข้อกำหนดของ National Bureau of Standards Publications (NBS) ซึ่งลูกค้าจะได้รับรายงานการสอบเทียบซึ่งประกอบด้วยผลการสอบเทียบและอื่นๆ ที่เป็นข้อมูลสำคัญที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมมิเตอร์ และค่าความไม่แน่นอนสำหรับเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วที่แม่นยำที่สุด ซึ่งวิธีนี้มีรายละเอียดการสอบเทียบ และคุณลักษณะเฉพาะของเทอร์โมมิเตอร์แบบ Calorimetric thermometers และ Beckmann thermometers โดยมีค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับ (tolerance) และ ช่วงค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ที่แสดงใน

ตารางจำเพาะเจาะจง แต่มีข้อเสียคือ เป็นวิธีที่ไม่ครอบคลุมการสอบเทียบ LIGT แบบ ASTM thermometers โดยมีระบุในวิธีให้สอบเทียบและทวนสอบตาม ASTM E-1 และ ASTM E-77

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ (สตส.) เป็นห้องปฏิบัติการที่ให้บริการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ให้กับห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบ สตส. ที่มีการใช้ LIGT-total immersion แบบ ASTM thermometer สำหรับเป็นเทอร์โมมิเตอร์อ้างอิงในการสอบเทียบสาขาเคมี ใช้ในการวัดอุณหภูมิในตู้ควบคุมอุณหภูมิในห้องปฏิบัติการทดสอบ เช่น ตู้เพาะเชื้อ ตู้เย็น ตู้แช่แข็ง เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้องปฏิบัติการทดสอบที่ใช้ตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิต่ำสำหรับเก็บสารเคมีหรือสารมาตรฐาน ที่ช่วงอุณหภูมิ -5°C ถึง -30°C จึงมีการใช้ LIGT-total immersion ในการเผ่าระวังอุณหภูมิของตู้แช่แข็งเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อสารเคมีหรือสารมาตรฐานที่เก็บรักษาก่อนนำมาใช้งาน และ LIGT-total immersion เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ต้องได้รับการสอบเทียบก่อนนำมาใช้งาน ดังนั้นห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. จึงต้องพัฒนาความสามารถของห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิให้ได้รับรองความสามารถการสอบเทียบในรายการ LIGT-total immersion ที่อุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C เพื่อรองรับการให้บริการของห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบได้

ดังนั้นห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. จึงได้ทำการศึกษาค่าแก้ (correction value) หมายถึง ค่าที่บวกเข้าไปทางพีชคณิตกับผลการวัดที่ไม่ได้รับการแก้ไขเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (NIMT, 2012³) ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย (expanded measurement uncertainty) หมายถึง ผลคูณของความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวมและตัวประกอบครอบคลุมซึ่งมีค่ามากกว่าหนึ่ง (NIMT, 2012³) และค่าขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด (calibration and measurement capability; CMC) ที่เป็นรูปแบบค่าเดียว (single value) ซึ่งครอบคลุมช่วงการวัด (ILAC, 2013) โดยเลือกจากค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ในการสอบเทียบ LIGT-total immersion ที่อุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C โดยวิธีการเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (comparison method) และเลือกใช้วิธีตาม Guideline of calibration of liquid in glass thermometer (TM/CG02/TT01/V03) (NIMT, 2012³) เนื่องจากเป็นวิธีที่เหมาะสมกับเครื่องมือที่ใช้ในการสอบเทียบของห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. และมีรายละเอียดการสอบเทียบและการหาความไม่แน่นอนการวัดขยาย ที่เป็นขั้นตอนชัดเจน รวมทั้งวิธีนี้มีรายละเอียดการออกรายงานผลสอบเทียบ การประกันคุณภาพ และข้อแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน และเป็นวิธีที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. ได้เข้าร่วมการทดสอบความชำนาญประจำปี 2021 กับ ศูนย์บริหารจัดการทดสอบความชำนาญ กรมวิทยาศาสตร์บริการ สำหรับใช้ประกอบยื่นขอรับรองขอบข่ายการสอบเทียบ LIGT ซึ่งได้ผลการทดสอบที่น่าพึงพอใจ (satisfactory) โดยมีค่า $|E_n|$ scores < 1.0 ทุกช่วงการสอบเทียบ แม้ว่าวิธี ASTM E77-14 (ASTM, 2017) เป็นวิธีมาตรฐาน แต่ ไม่เหมาะสมกับห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. เนื่องจาก ห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. ใช้อ่างสอบเทียบที่ใช้ปั๊มในการดันของเหลว และไม่มีอุปกรณ์จำเพาะตามวิธีการ ส่วนวิธี Liquid in glass thermometer calibration service ของ NIST (Wise, 1998) ไม่ครอบคลุมการสอบเทียบ LIGT แบบ ASTM thermometers ซึ่งเป็นแบบที่ส่วนใหญ่ใช้ในห้องปฏิบัติการทดสอบและสอบเทียบ สตส. จึงไม่เหมาะสมกับการสอบเทียบของ สตส.

การศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการสอบเทียบ LIGT ที่จุดอุณหภูมิ -30°C , -15°C และ 0°C ซึ่งเป็นจุดอุณหภูมิต่ำ กลาง และสูง ครอบคลุมช่วงการวัดที่อุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C ซึ่งผลการสอบเทียบ ได้แก่ ค่าแก้ และ ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ที่ได้จากค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งต่างๆของการสอบเทียบ จะถูกนำมาศึกษาผ่านการทวนสอบ ตาม ISO 14253-1 (ISO, 2017) เพื่อตรวจสอบความใช้ได้ของ LIGT โดยนำค่าความผิดพลาด (error) และค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย เปรียบเทียบกับค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับ (maximum permissible errors; MPE) ของ LIGT-total ตาม ASTM E1-03a (ASTM, 2003) เพื่อประเมินเครื่องมือว่าผ่านเกณฑ์ยอมรับหรือไม่ และจำเป็นต้องใช้ค่าแก้ในการวัดอุณหภูมิหรือไม่ และเลือกค่า CMC จากค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ที่ครอบคลุมช่วงการวัดที่อุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C จำนวน 1 ค่า มาเปรียบเทียบกับค่า MPE ที่ต่ำที่สุดของเครื่องมือใน สตส. ซึ่งได้สำรวจในปี 2564 เพื่อพิจารณาความสามารถในการให้บริการสอบเทียบ LIGT-total immersion ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. นอกจากนี้ทำการเปรียบเทียบค่า CMC ที่ได้จากการศึกษา กับค่า CMC ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบอื่นในประเทศไทยที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 ในขอบข่ายการสอบเทียบ LIGT-total

immersion ช่วงการวัดที่อุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C กับสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) เพื่อดูลำดับความสามารถในการให้บริการของห้องปฏิบัติการสอบเทียบ เนื่องจากค่า CMC มีความสำคัญที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบต้องแสดงสำหรับการขอรับรอง ISO/IEC 17025 จาก สมอ. เพราะบ่งบอกถึงความสามารถในการวัดของห้องปฏิบัติการในขอบข่ายที่ขอการรับรองและเป็นข้อมูลให้ผู้รับบริการใช้พิจารณาเลือกใช้บริการห้องปฏิบัติการสอบเทียบ LIGT-total immersion

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% ethanol สำหรับเช็ดทำความสะอาดเครื่องมือ

3. ตัวอย่างที่ศึกษา

LIGT-total immersion จำนวน 3 แท่ง ที่มีช่วงการวัดอุณหภูมิที่ -38°C ถึง 2°C และมีความละเอียด 0.1°C รุ่น ASTM 62C-86 ประกอบด้วย S/N: 9714075 (LIGT1), S/N: 0678290 (LIGT2) และ S/N: 8005-1528 (LIGT3)

4. วิธีศึกษา

4.1 ดำเนินการสอบเทียบ

นำ LIGT-total immersion ที่กำหนดให้เป็น Thermometer Under Calibration; TUC (NIMT, 2012³) มาปรับสภาพในห้องสอบเทียบที่จัดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิมาตรฐาน พร้อมหัววัด ในข้อ 1.1 เป็นเวลาอย่างน้อย 72 ชั่วโมง ก่อนทำการสอบเทียบ โดยเสียบ LIGT-total immersion ไว้บน stand base และใช้ clamp จับยึดไว้ในแนวตั้งฉากกับพื้น เมื่อครบเวลาดำเนินการทำความสะอาด หัววัดอุณหภูมิ PRT_{cal} และตัวอย่าง LIGT1 ด้วย 95% ethanol ก่อนดำเนินการสอบเทียบ ต่อหัววัดอุณหภูมิ PRT_{cal} เข้ากับเครื่อง DT และจุ่มลงในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ โดยมีระยะจุ่มไม่น้อยกว่า 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter) ของ PRT_{cal} และใช้ clamp จับยึด PRT_{cal} โดยกำหนดให้ DT with PRT_{cal} เป็น Standard Thermometer; STD (NIMT, 2012³) ในการศึกษาครั้งนี้ทำการจุ่มหัววัดอุณหภูมิ ชนิด PRT_{cal} ที่ 120 มิลลิเมตร จากนั้นจุ่ม LIGT1 ตามการจุ่มแบบ total immersion ให้ใกล้กับหัววัด

อุณหภูมิ PRT_{cal} มากที่สุด ตามรูปที่ 2 โดยทำการสอบเทียบภายใต้ภาวะแวดล้อมที่ควบคุมอุณหภูมิ $23.0 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ ที่ $50 \pm 10 \text{ \%RH}$



รูปที่ 2 การจุ่มเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน และเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้วที่นำมาสอบเทียบในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ

และตั้งค่าอุณหภูมิอ่างสอบเทียบให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการโดยเริ่มสอบเทียบจากอุณหภูมิ $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ รอจนอุณหภูมิเข้าสู่สภาวะสมดุล ทำการอ่านและบันทึกอุณหภูมิของ STD และ TUC ต่อเนื่องกันดังนี้

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

นับการอ่านเป็น 1 รอบ ทำการอ่านอุณหภูมิซ้ำอีก 4 รอบ โดยเว้นระยะห่างในแต่ละรอบ 30 วินาที เมื่อครบ 5 รอบ ให้ทำการสอบเทียบที่อุณหภูมิ $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และทำการสอบเทียบที่จุดอุณหภูมิ $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ อีกครั้ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลหาค่า short term stability ในการสอบเทียบในแต่ละจุดอุณหภูมิจะได้จำนวนค่าการวัดของ STD จำนวน 10 ค่า และค่าการวัดของ TUC จำนวน 10 ค่า เมื่อสอบเทียบ LIGT1 เรียบร้อยแล้ว จึงดำเนินการสอบเทียบ LIGT2 และ LIGT3 เช่นเดียวกัน และคำนวณหาค่าเฉลี่ย (average) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD) ด้วย โปรแกรมประมวลผล Microsoft excel และ ค่าแก้ จากอุณหภูมิที่วัดได้ของ STD – TUC (NIMT, 2012³) ซึ่งอุณหภูมิที่วัดได้ของ STD ที่อุณหภูมิ $-30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ต้องรวมค่าแก้จากใบรับรองการสอบเทียบ ส่วนที่อุณหภูมิ $-15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แทนค่าที่วัดได้ลงใน สมการ polynomial ลำดับที่ 3 ที่ได้จากการหาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ตามข้อ 4.2.2.3 เมื่อแทนค่าในสมการ จะได้ค่าอุณหภูมิที่รวมค่าแก้แล้ว

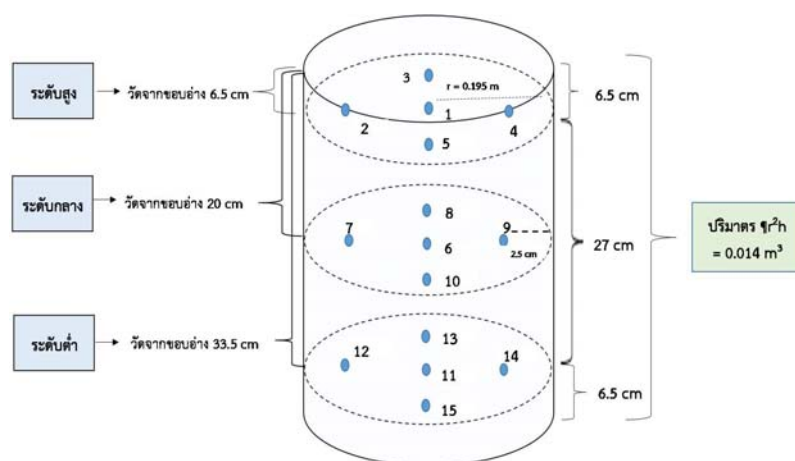
4.2 ดำเนินการหาค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งต่างๆของการสอบเทียบ (source of uncertainty) ; Ux_i

4.2.1 ค่าความไม่แน่นอนของอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ ได้แก่ ค่าความไม่แน่นอนจากความไม่เสถียรภาพ (instability) โดยหาจากค่าความเสถียรภาพ (stability) และ ค่าความไม่แน่นอนจากความไม่เป็นหนึ่งเดียวกัน (non-uniformity) หาจากค่าความเป็นหนึ่งเดียวกัน (uniformity) โดยทำการตรวจสอบตามระดับความลึก 3 ระดับ ดังนี้ วัดระดับความลึกด้านใน 40 เซนติเมตร แบ่งช่วงการใช้งานตามระยะการจุ่ม (working space) ออกเป็น 3 ระดับคือ ระดับสูง ระดับกลาง และระดับต่ำ ตามรูปที่ 3 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 3 โดยจุดที่อยู่บริเวณรอบๆ จุดกึ่งกลางจะอยู่ห่างจากขอบอ่างสอบเทียบ 2.5 เซนติเมตร



รูปที่ 3 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 , -15°C และ 0°C รอจนอุณหภูมิภายในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วจึงอ่านอุณหภูมิที่หน้าจอเครื่อง DT และเก็บข้อมูลที่ระดับสูง ตำแหน่งละ 3 ชั่วโมง 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 ตามภาคผนวก ข้อ 1.1

ตารางที่ 1 การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิภายในอ่างสอบเทียบ สำหรับหาค่า stability

ที่ระดับ	ความลึก (cm.)	จุดที่วัดอุณหภูมิ ของ 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 , -15°C และ 0°C รอจนอุณหภูมิภายในอ่างสอบเทียบเข้าสู่สภาวะสมดุลแล้วจึงอ่านอุณหภูมิที่หน้าจอเครื่อง DT โดยทำการวัดตามตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่ 1 ถึง 7 ตำแหน่งละ 3 ชั่วโมง 5 รอบ บันทึกผลค่าการวัดเพื่อนำไปคำนวณค่า uniformity ตามสูตรดังนี้

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

และเลือกค่า maximum of uniformity ของแต่ละอุณหภูมิมาใช้เป็นค่า non-uniformity of bath ตามภาคผนวก ข้อ 1.2

ตารางที่ 2 การกำหนดจุดวัดอุณหภูมิภายในอ่างสอบเทียบ สำหรับหาค่า uniformity

ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิที่	จุดที่วัดอุณหภูมิ ของ 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 ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบจากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (DT with PRT_{cal})

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

ค่า drift of standard หาได้จากค่า specification ของ DT with PRT_{cal} ตามข้อ 1.1.1 และ ภาคผนวก ข้อ 2.1

4.2.2.2 หาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการอ่านค่าความละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (resolution of standard; u_{res_STD}) หาได้ดังนี้

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

4.2.2.3 หาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (non linearity; u_{nl})

นำผลการสอบเทียบ จากใบรับรองการสอบเทียบของ DT with PRT_{cal} มาใช้คำนวณหาค่า non linearity โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า STD value และ ค่า UUC reading ของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ด้วยวิธีการทำ 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 ซึ่งจะได้ออกกราฟ ตามภาคผนวกรูปที่ 4 เมื่อแทนค่าอุณหภูมิของ UUC reading จากใบรับรองการสอบเทียบลงในค่า x จะได้ค่า UUC fitting และหาค่า non linearity จาก $|UUC \text{ fitting} - STD \text{ value}|$ ตาม ภาคผนวก ข้อ 2.3

4.2.2.4 หาค่าความไม่แน่นอนจากเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (uncertainty of standard; u_{cal_STD})

นำค่า uncertainty จากใบรับรองการสอบเทียบ DT with PRT_{cal} ที่จุดอุณหภูมิ -30°C และ 0°C มาใช้หาค่า uncertainty of standard สำหรับที่อุณหภูมิ -15°C ใช้ค่า uncertainty ที่สูงที่สุดของช่วงการวัดที่ครอบคลุมอุณหภูมิ -15°C ตามภาคผนวก ข้อ 2.4

4.2.2.5 หาค่าความไม่แน่นอนจากการทวนซ้ำได้ 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 หาค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากความสามารถในการอ่านของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ (readability of TUC; $u_{\text{res_TUC}}$)

$$\text{readability of TUC} = \frac{\text{resolution ของ TUC}}{2} \quad \text{ตามภาคผนวกข้อ 3.1}$$

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

นำข้อมูลการสอบเทียบ ที่อุณหภูมิ -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 หาค่าความไม่แน่นอนจากการทวนซ้ำได้ ของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ (repeatability of TUC; $u_{\text{rep_TUC}}$)

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, readability 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

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

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

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

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

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

4.7 นำค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ที่มีค่าสูงสุดมาสรุปเป็นค่า CMC ในช่วงการวัดที่อุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C

4.8 นำค่าความผิดพลาด (error) ซึ่งได้จากค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของ TUC – STD (BIPM, 2012) และค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ของการศึกษาการสอบเทียบ LIGT-immersion ทั้ง 3 แห่ง มาทวนสอบตาม ISO 14253-1 (ISO, 2017) โดยเปรียบเทียบกับค่า MPE ตามมาตรฐาน ASTM E1-03a (ASTM, 2003) เพื่อศึกษาผลการทวนสอบเครื่องมือว่าผ่านตามเกณฑ์หรือไม่ และจำเป็นต้องนำค่าแก้ไขใช้ในการวัดหรือไม่

4.9 นำค่า CMC มาเปรียบเทียบกับค่า MPE ที่ต่ำที่สุดของ LIGT ตามมาตรฐาน ASTM E1-03a ของเครื่องมือใน สตส. โดยนำค่า CMC หาดด้วย ค่า $|\pm 0.1|$ $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งเป็นค่า MPE ที่ต่ำที่สุดของ LIGT จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่า CMC ที่ได้จากการศึกษากับค่า CMC ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบในประเทศไทยที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 ในขอบข่ายการสอบเทียบ LIGT-total immersion ที่อุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C กับสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) เพื่อดูลำดับความสามารถในการให้บริการของห้องปฏิบัติการสอบเทียบ โดยเรียงลำดับจากค่า CMC ที่ต่ำที่สุดเป็นลำดับแรก ซึ่งหมายถึงลำดับที่ดีที่สุดแล้วเรียงต่อมา หากพบว่ามีค่า CMC เท่ากันให้พิจารณาที่ช่วงการสอบเทียบของห้องปฏิบัติการที่มีความสามารถในช่วงการสอบเทียบมากกว่าเป็นลำดับก่อน และถ้ามีห้องปฏิบัติการที่มีการแบ่งช่วงมากกว่า 1 ให้พิจารณาค่า CMC และความสามารถในช่วงการสอบเทียบควบคู่กัน โดยพิจารณาค่า CMC ที่ต่ำกว่า และความสามารถในช่วงการสอบเทียบที่ห้องปฏิบัติการมีมากกว่าเป็นลำดับก่อน

ผลและวิจารณ์ผล

1. ผลการสอบเทียบในส่วน ค่าแก้ไข และ ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ของการสอบเทียบ LIGT-total immersion

การสอบเทียบ LIGT-total immersion ที่อุณหภูมิ -30°C , -15°C และ 0°C โดยการเปรียบเทียบกับ DT with PRT_{cal} ซึ่งได้รับการสอบเทียบจาก Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR) ใบรับรองเลขที่ PSL-T 667/63 วันที่สอบเทียบ 27 เมษายน 2563 ที่อุณหภูมิ -30°C และ 0°C นำค่าแก้ไขทั้ง 2 จุดอุณหภูมิ ตามใบรับรองการสอบเทียบมารวมกับค่าการวัดของ DT with PRT_{cal} ส่วนที่อุณหภูมิ -15°C ไม่ได้สอบเทียบ แต่มีจุดสอบเทียบที่อุณหภูมิ -30°C และ 0°C ที่ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิ -15°C จึงสามารถหาค่าการวัดที่รวมค่าแก้ไขแล้วจากการแทนค่าอุณหภูมิที่วัดได้ ของจุดอุณหภูมิ -15°C ลงในสมการ $y = 3E-10x^3 + 5E-07x^2 + 1x + 0.001$ ตามภาคผนวก รูปที่ 4 ซึ่งเป็นสมการ polynomial ลำดับที่ 3 (Inseok et al., 2015) ที่เกิดจากการทำ interpolate ตาม ITS-90 (BIPM, 2018) และเป็นสมการเดียวกันกับการหาค่า non linearity ซึ่งเป็นค่าแหล่งความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นจากการใช้ค่าแก้ไขของการวัดอุณหภูมิในจุดที่ไม่ได้ส่งเครื่องมือสอบเทียบ ดังนั้นเมื่อมีการใช้ค่าแก้ไข จากการทำ interpolate ในจุดอุณหภูมิที่ไม่ได้สอบเทียบ จึงต้องมีการนำค่า non linearity เข้าไปประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายด้วย เมื่อได้ผลการสอบเทียบแล้วทำการหาค่า average และ SD ของ STD และ TUC และหาค่าแก้ไขของ

TUC ซึ่งผลการสอบเทียบของ LIGT-total immersion, S/N: 9714075 (LIGT1), S/N: 0678290 (LIGT2) และ S/N: 8005-1528 (LIGT3) โดยเปรียบเทียบกับ DT with PRT_{cal} ที่อุณหภูมิ -30°C , -15°C และ 0°C ได้ค่าแก้ และ ค่า SD ตามตารางที่ 3

สำหรับการหาค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายทำได้โดยการนำค่า SD จากตารางที่ 3 และค่าที่ได้จากการทดลองและคำนวณของค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งต่างๆ ตามภาคผนวก ข้อที่ 1-3 และตารางที่ 9-16 มาคำนวณให้เป็นค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐาน ด้วยการหารค่าการแจกแจง หรือ ค่า k และคูณกับค่า C_i ตามวิธีศึกษาข้อ 4.3 รวมค่ากำลัง 2 ของค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานแหล่งต่างๆ แล้วถอดรากที่ 2 ของผลรวมนั้น จะได้ค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม ตามสูตรในวิธีศึกษาข้อ 4.4 ทำการหาค่า V_{eff} ตามสูตรในวิธีศึกษาข้อ 4.5 นำค่า V_{eff} ที่ได้ไปหาค่า k จากตาราง t -distribution ใน M3003 (UKAS, 2019) และนำค่า k คูณกับค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม ตามวิธีศึกษาข้อ 4.6 ก็จะได้ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% ในแต่ละจุดอุณหภูมิ ซึ่งต้องรายงานผลการสอบเทียบตามข้อกำหนดของ ILAC-P14:01 (ILAC, 2013) โดยค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ต้องมีค่านัยสำคัญไม่เกิน 2 ตำแหน่ง ตามตารางที่ 4 และ 5

นำค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย จากตารางที่ 4 และ 5 มาสรุปค่า CMC ของการสอบเทียบ LIGT-total immersion ตามวิธีศึกษาข้อ 4.7 พบว่า LIGT3 ที่อุณหภูมิ -30°C มีค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายสูงที่สุดในช่วงการวัดที่อุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C ดังนั้นค่า CMC จะเท่ากับ 0.085°C

จากการศึกษาพบว่าค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งต่างๆ ที่มีค่าสูงและมีผลต่อค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายของการสอบเทียบ LIGT-total immersion ได้แก่ค่า readability of TUC ดังนั้น หากมีอุปกรณ์ที่สามารถช่วยในการขยายเพื่อเพิ่มความสามารถในการแบ่งขีดการวัดของ LIGT ก็จะช่วยให้สามารถลดค่า readability of TUC และได้ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ต่ำลง ส่งผลให้ค่า CMC ต่ำลงด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าค่า short term stability ของ LIGT3 มีค่าสูง จึงส่งผลต่อค่า CMC ในการศึกษาครั้งนี้ ดังนั้นหากต้องการ ค่า CMC ที่ต่ำกว่านี้ในการยื่นขอการรับรอง อาจจัดหา LIGT ที่มีความเสถียรมากมาทำการสอบเทียบแทน

ตารางที่ 3 ผลการสอบเทียบ และค่าแก้ ของ LIGT1, LIGT2 และ LIGT3 ที่อุณหภูมิ -30 °C, -15 °C และ 0 °C

อุณหภูมิที่ สอบเทียบ		-30 °C						-15 °C						0 °C					
Round number	STD (°C)	TUC LIGT1 (°C)	STD (°C)	TUC LIGT2 (°C)	STD (°C)	TUC LIGT3 (°C)	STD (°C)	TUC LIGT1 (°C)	STD (°C)	TUC LIGT2 (°C)	STD (°C)	TUC LIGT3 (°C)	STD (°C)	TUC LIGT1 (°C)	STD (°C)	TUC LIGT2 (°C)	STD (°C)	TUC LIGT3 (°C)	
1	-30.0416	-30.0	-30.0357	-30.0	-29.9599	-30.0	-15.0342	-15.0	-15.0353	-15.0	-14.9776	-15.0	-0.0146	0.0	-0.0233	0.0	0.0211	0.0	
2	-30.0387	-30.0	-30.0393	-30.0	-29.9757	-30.0	-15.0310	-15.0	-15.0335	-15.0	-14.9791	-15.0	-0.0186	0.0	-0.0253	0.0	0.0190	0.0	
3	-30.0355	-30.0	-30.0421	-30.0	-29.9550	-30.0	-15.0270	-15.0	-15.0319	-15.0	-14.9814	-15.0	-0.0181	0.0	-0.0164	0.0	0.0176	0.0	
4	-30.0329	-30.0	-30.0445	-30.0	-29.9472	-30.0	-15.0236	-15.0	-15.0303	-15.0	-14.9838	-15.0	-0.0157	0.0	-0.0161	0.0	0.0159	0.0	
5	-30.0299	-30.0	-30.0471	-30.0	-29.9676	-30.0	-15.0215	-15.0	-15.0286	-15.0	-14.9855	-15.0	-0.0068	0.0	-0.0136	0.0	0.0138	0.0	
Average	-30.0357	-30.0	-30.0417	-30.0	-29.9611	-30.0	-15.0275	-15.0	-15.0319	-15.0	-14.9815	-15.0	-0.0148	0.0	-0.0189	0.0	0.0175	0.0	
Repeatability (SD)	0.0045	0.0	0.0043	0.0	0.0105	0.0	0.0050	0.0	0.0025	0.0	0.0031	0.0	0.0045	0.0	0.0049	0.0	0.0027	0.0	
Correction		-0.0357		-0.0417		0.0389		-0.0275		-0.0319		0.0185		-0.0148		-0.0189		0.0175	

*ค่าอุณหภูมิของ STD และ TUC เป็นค่าเฉลี่ยของแต่ละรอบ

ตารางที่ 4 ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ของ LIGT1, LIGT2 และ LIGT3 ที่อุณหภูมิ -30 °C และ 15 °C

อุณหภูมิที่สอบเทียบ							-30 °C						-15 °C					
Source of uncertainty							LIGT1		LIGT2		LIGT3		LIGT1		LIGT2		LIGT3	
Symbol (U_{xi})	Type	Probability Distribution	Divisor	C_i	V_i		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	1.0	9	0.0045	0.0045	0.0043	0.0043	0.0105	0.0105	0.0050	0.0050	0.0025	0.0025	0.0047	0.0047
u_{cal_STD}	B	Uncertainty of Standard	Normal	2	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	0.017	0.030	0.017	0.030	0.017	0.030	0.017	0.030	0.017	0.030	0.017
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	0.0234	0.0135	0.0234	0.0135	0.0234	0.0135
u_{sta}	B	Instability of bath	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0129	0.0074	0.0129	0.0074	0.0129	0.0074	0.0125	0.0072	0.0125	0.0072	0.0125	0.0072
u_{nl}	B	Non linearity	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0021	0.0012	0.0021	0.0012	0.0021	0.0012	0.0021	0.0012	0.0021	0.0012	0.0021	0.0012
u_{rep_TUC}	A	*Repeatability of TUC	Normal	1	1.0	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
u_{res_TUC}	B	Readability of TUC	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03
u_{st}	B	Short term stability	Rectangular	1.732	1.0	∞	-0.0115	-0.0066	-0.0142	-0.0082	-0.0186	-0.0107	-0.0115	-0.0066	-0.0142	-0.0082	-0.0186	-0.0107
u_C	-	Combined Measurement Standard Uncertainty	Normal					0.0406		0.0408		0.0425		0.0408		0.0408		0.0415
$V_{eff} =$								60654.61		73457.73		2389.65		39167.61		643120.23		293868.26
$k =$								2		2		2		2		2		2
U	-	Expanded Measurement Uncertainty	Normal					0.0820		0.0816		0.0850		0.0816		0.0816		0.0830
		Expanded Measurement Uncertainty (report)						0.082		0.082		0.085		0.082		0.082		0.083

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

ตารางที่ 5 ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ของ LIGT1, LIGT2 และ LIGT3 ที่อุณหภูมิ 0 °C

อุณหภูมิที่สอบเทียบ							0 °C					
Symbol (U_{xi})	Type	Source of uncertainty	Probability Distribution	Divisor	C_i	V_i	LIGT1		LIGT2		LIGT3	
							Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)	Value (°C)	U_i (°C)
u_{rep_STD}	A	*Repeatability of Standard	Normal	1	1.0	9	0.0045	0.0045	0.0049	0.0049	0.0027	0.0027
u_{cal_STD}	B	Uncertainty of Standard	Normal	2	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	0.017	0.030	0.017	0.030	0.017
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	∞	0.0149	0.0086	0.0149	0.0086	0.0149	0.0086
u_{sta}	B	Instability of bath	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0059	0.0034	0.0059	0.0034	0.0059	0.0034
u_{nl}	B	Non linearity	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002	0.0003	0.0002
u_{rep_TUC}	A	*Repeatability of TUC	Normal	1	1.0	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
u_{res_TUC}	B	Readability of TUC	Rectangular	1.732	1.0	∞	0.05	0.03	0.05	0.03	0.05	0.03
u_{st}	B	Short term stability	Rectangular	1.732	1.0	∞	-0.0115	-0.0066	-0.0142	-0.0082	-0.0186	-0.0107
u_C	-	Combined Standard Uncertainty	Normal					0.0388		0.0392		0.0396
$V_{eff} =$								48417.33		37289.41		424469.02
$k =$								2		2		2
U	-	Expanded Measurement Uncertainty	Normal					0.0776		0.0784		0.0792
		Expanded Measurement Uncertainty (report)						0.078		0.078		0.079

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

2. ผลการทวนสอบ LIGT-total immersion ทั้ง 3 แห่ง

จากการทวนสอบผลการสอบเทียบ LIGT-total immersion ตาม ISO 14253-1 (ISO, 2017) โดยเปรียบเทียบกับค่า MPE ตามมาตรฐาน ASTM E1-03a (ASTM, 2003) มีค่า MPE ของ LIGT-total immersion รุ่น ASTM 62C-86 เท่ากับ ± 0.1 °C ตามวิธีการศึกษา ข้อ 4.8 ได้ผลการทวนสอบตามตารางที่ 6 ซึ่งพบว่า LIGT1, LIGT2 และ LIGT3 ที่อุณหภูมิ -30 °C และ -15 °C ไม่ผ่านเกณฑ์การทวนสอบ เพราะมีผลรวมของค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย (E+U และ E+(-U)) สูงกว่าค่า MPE แต่มีค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ต่ำกว่าค่า MPE หากผู้ใช้ต้องการนำ LIGT ทั้ง 3 แห่ง ไปใช้งานที่จุดอุณหภูมิ -30 °C และ -15 °C จำเป็นต้องนำค่าแก้ไขรวมกับค่าที่วัดได้ด้วย ส่วนที่อุณหภูมิ 0 °C LIGT ทั้ง 3 แห่ง มีผลรวมของค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ต่ำกว่าค่า MPE จึงผ่านเกณฑ์การทวนสอบ โดยไม่จำเป็นต้องใช้ค่าแก้ไข รวมกับค่าที่วัดได้เมื่อนำไปใช้งาน

เนื่องจาก LIGT เป็นเครื่องมือวัดอุณหภูมิและใช้ปรับแก้ค่าที่วัดได้จึงต้องได้รับการสอบเทียบ ตามข้อกำหนด 6.4.6 ตามมาตรฐาน มอก. 17025-2561 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562) และเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิ ที่ส่งผลต่อความใช้ได้ของผลการทดสอบหรือสอบเทียบ จึงต้องให้ความแม่นยำการวัด (accuracy) ตามข้อกำหนด 6.4.5 ตามมาตรฐาน มอก. 17025-2561 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562) ดังนั้นจึงควรนำค่าแก้ไขรวมกับค่าที่วัดได้ด้วยเพื่อให้มีความแม่นยำการวัดที่สูงยิ่งขึ้น

ตารางที่ 6 แสดงการทวนสอบ ผลการสอบเทียบ LIGT-total immersion ทั้ง 3 แห่ง ตาม ISO 14253-1 (2017)

Temp	MPE/tolerance		Calibration results		Verification		Verification Results		Remark
(°C)	± (°C)	S/N - LIG No.	*Error (°C)	± Uncertainty (°C)	E+U (°C)	E+(-U) (°C)	E+U	E+(-U)	usability
-30	0.1	9714075 - LIGT1	0.0357	0.082	0.1177	-0.0463	Fail	pass	have to add correction
		0678290 - LIGT2	0.0417	0.082	0.1237	-0.0403	Fail	pass	have to add correction
		8005-1528 - LIGT3	-0.0389	0.085	0.0461	-0.1239	pass	Fail	have to add correction
-15	0.1	9714075 - LIGT1	0.0275	0.082	0.1095	-0.0545	Fail	pass	have to add correction
		0678290 - LIGT2	0.0319	0.082	0.1139	-0.0501	Fail	pass	have to add correction
		8005-1528 - LIGT3	-0.0185	0.083	0.0645	-0.1015	pass	Fail	have to add correction
0	0.1	9714075 - LIGT1	0.0148	0.078	0.0928	-0.0632	pass	pass	need't to add correction
		0678290 - LIGT2	0.0189	0.078	0.0969	-0.0591	pass	pass	need't to add correction
		8005-1528 - LIGT3	-0.0175	0.079	0.0615	-0.0965	pass	pass	need't to add correction

3. ผลการศึกษาค่า CMC ที่ได้จากการศึกษา

3.1 ผลการเปรียบเทียบค่า CMC กับ ค่า MPE ที่ต่ำที่สุดของ สตส.

จากผลการสำรวจ LIGT-total immersion ของ สตส. ปี 2564 เมื่อวันที่ 19 มีนาคม 2564 รวม 5 ยี่ห้อ จำนวนทั้งสิ้น 71 ชิ้น พบว่า LIGT-total immersion ที่ใช้ในช่วงอุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C มีเพียง 2 ยี่ห้อ และ 3 รุ่น ที่มีค่า MPE เท่ากับ ± 0.1 °C ซึ่งเป็นค่าที่ต่ำที่สุด ตามมาตรฐาน ASTM E1-03a (ASTM, 2003) ได้แก่รุ่น ASTM 62C-86, ASTM 63C-86 และ ASTM 90C-86 และเมื่อเปรียบเทียบค่า CMC ที่ได้จากการศึกษารั้งนี้กับค่า MPE ที่ต่ำที่สุด โดยนำค่า $|\pm 0.1|$ °C หารด้วย 0.085 °C ตามวิธีการศึกษา ข้อ 4.9 ได้เท่ากับ 1.2 แสดงว่าค่า CMC จากการศึกษารั้งนี้ ต่ำกว่าค่า MPE 1.2 เท่า ตามตารางที่ 7 ทำให้ผู้ใช้บริการสอบเทียบทราบว่าหากส่งสอบเทียบ LIGT-total immersion ที่มีค่าความละเอียด 0.1 °C และมีประวัติการเลื่อนค่าต่ำ ที่ช่วงอุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C ภายใต้การควบคุมภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. จะได้ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยายไม่เกิน ± 0.085 °C ซึ่งต่ำกว่าค่า MPE ของ LIGT-total immersion

ตารางที่ 7 ค่า MPE ของ LIGT-total immersion ของ สตส. จากการสำรวจ เมื่อวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2564 ที่ใช้ในช่วงอุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C

Brand	Model	Range ($^{\circ}\text{C}$)	Resolution ($^{\circ}\text{C}$)	MPE ($\pm^{\circ}\text{C}$)	เปรียบเทียบค่า CMC กับ MPE
AMA or Gold Brand	ASTM 62C-86	-38 to 2	0.1	0.1	<1.2 เท่า
	ASTM 63C-86	-8 to 32	0.1	0.1	<1.2 เท่า
	ASTM 90C-86	0 to 30	0.1	0.1	<1.2 เท่า
Barnstead ERTCO	R-020-1BLSR	-5 to 15	0.5	1	<11.6 เท่า
H-B Instrument	90300-67	-5 to 15	0.5	1	<11.6 เท่า
	F-010-1BLSR	-30 to 0	0.5	1	<11.6 เท่า
Fisher Scientific	-	-10 to 100	1	3	<34.9 เท่า

3.2 ผลการเปรียบเทียบค่า CMC จากการศึกษากับห้องปฏิบัติการอื่นที่ได้รับรอง ISO/IEC 17025

เมื่อนำค่า CMC ที่ได้จากการศึกษาไปเปรียบเทียบกับค่า CMC ของห้องปฏิบัติการอื่นในประเทศไทยที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 ในขอบข่ายการสอบเทียบ LIGT-total immersion จาก สมอ. เพื่อพิจารณาความสามารถในการให้บริการสอบเทียบเครื่องมือของ สตส. ตามวิธีการศึกษา ข้อ 4.9 พบว่ามีห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองการสอบเทียบ LIGT-total immersion จำนวน 20 ห้องปฏิบัติการ แต่ที่ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C มีจำนวน 16 ห้องปฏิบัติการ พบว่าค่า CMC ที่ได้จากการศึกษานี้อยู่ในลำดับที่ 10 จาก 16 ห้องปฏิบัติการ โดยที่ลำดับที่ 15 และ 16 เป็นห้องปฏิบัติการที่มีค่า CMC 2 ช่วง แต่มีช่วงการสอบเทียบที่ไม่เท่ากัน จึงพิจารณา ค่า CMC ควบคู่กับความสามารถในช่วงการสอบเทียบที่ห้องปฏิบัติการมีความสามารถทำได้มากกว่าเป็นลำดับก่อน ตามตารางที่ 8 ในทางปฏิบัตินั้น การเลือกห้องปฏิบัติการสำหรับการสอบเทียบ LIGT-total immersion ที่มีค่า CMC เท่ากับ หรือสูงกว่าค่า MPE ของเครื่องมือ จะส่งผลต่อการยอมรับเครื่องมือได้ เพราะห้องปฏิบัติการสอบเทียบไม่สามารถรายงานค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ต่ำกว่าค่า CMC ที่ได้รับการรับรอง ตามข้อกำหนดของ ILAC-P14:01 (ILAC, 2013) ทางผู้ให้บริการสอบเทียบจึงจำเป็นต้องพิจารณาค่า CMC ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบ ที่จะให้บริการให้เหมาะสมกับเกณฑ์การยอมรับของเครื่องมือด้วย

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่า CMC ที่ได้จากการศึกษากับห้องปฏิบัติการอื่นในประเทศไทยที่ได้รับรอง ISO/IEC 17025 จาก สมอ. ปี 2564 (ข้อมูลวันที่ 19 มีนาคม 2564)

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ	ช่วงการสอบเทียบ (°C)	ค่า CMC	ลำดับค่า CMC (จากน้อยไปมาก)	เปรียบเทียบค่า CMC กับ MPE ที่ $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ	-40 to 90	15 mK	1	<6.7 เท่า
ฝ่ายวิเคราะห์คุณภาพ บ.ปตท. น้ำมันและการค้าปลีก จำกัด (มหาชน)	-45 to 151	0.020 °C	2	<5.0 เท่า
บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ศูนย์มาตรวิทยา	-38 to 80	0.032 °C	3	<3.1 เท่า
บริษัท ชัดเชสเทคเวย์ จำกัด	-40 to 25	0.040 °C	4	<2.5 เท่า
บริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด	-40 to 250	0.044 °C	5	<2.3 เท่า
บริษัทมาสเตอร์ คาลิเบรชั่น จำกัด	-30 to 0	0.045 °C	6	<2.2 เท่า
สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)	-50 to 0	0.054 °C	7	<1.9 เท่า
บริษัท ไทย-เกาหลี คาลิเบรชั่น เซ็นเตอร์ จำกัด	-38 to 0	0.061 °C	8	<1.6 เท่า
บริษัท QUALITY CALIBRATION CO.,LTD.	-30 to <50	0.079 °C	9	<1.3 เท่า
สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์	-30 to 0	0.085 °C	10	<1.2 เท่า*
อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิเพื่อสถาบันอาหาร	-35 to 0	0.091 °C	11	<1.1 เท่า
บริษัท แคลิเบรชั่น แลบบอราทอรี	-30 to 100	0.10 °C	12	=1.0 เท่า
ศูนย์มาตรวิทยา บริษัท เอสซี ไอ อีโคเซอร์วิส เซส จำกัด	-30 to 70	0.12 °C	13	>0.8 เท่า
บริษัท ไทฮาท แคลิเบรชั่น จำกัด	-38 to 55	0.16 °C	14	>0.6 เท่า
บริษัท แคลลิเบรเทค จำกัด	-30 to <-20	0.18 °C	15	>0.6 เท่า
	-20 to 200	0.092 °C		<1.1 เท่า
ศูนย์ห้องปฏิบัติการและวิจัยทางการแพทย์ และการเกษตรแห่งเอเชีย จำกัด	-30 to -10	0.30 °C	16	>0.3 เท่า
	>-10 to 34	0.089 °C		<1.1 เท่า

*ค่า CMC จากผลการศึกษาของ สตส.

สรุปผล

ผลการสอบเทียบ LIGT-total immersion ที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C จำนวน 3 แห่ง โดยใช้ DT with PRT_{cal} 25 ohms เป็นเครื่องมือมาตรฐาน ใช้อ่างสอบเทียบอุณหภูมิ เป็นแหล่งสร้างอุณหภูมิ และใช้น้ำมันซิลิโคนเป็นตัวกลางในการนำอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ -40 °C ถึง 120 °C โดยวิธีเปรียบเทียบกับเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน ตาม Guideline of calibration of liquid in glass thermometer (TM/CG02/TT01/V03 (NIMT, 2012³) ซึ่งการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการสอบเทียบที่จุดอุณหภูมิ -30 °C, -15 °C และ 0 °C พบว่า

1. ผลการสอบเทียบของ LIGT-total immersion S/N: 9714075 (LIGT1), S/N: 0678290 (LIGT2) และ S/N: 8005-1528 (LIGT3) ได้ผลการสอบเทียบโดยแสดงตามแบบ M3003 (UKAS, 2019) คือ $y \pm U$ โดยที่ y คือ ค่าแก้ และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนการวัดขยาย ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% ซึ่งเรียงตามลำดับตัวอย่าง LIGT1, LIGT2 และ LIGT3

- ที่อุณหภูมิ -30 °C ได้ผลการสอบเทียบเท่ากับ $(-0.0357) \pm 0.082^{\circ}\text{C}$, $(-0.0417) \pm 0.082^{\circ}\text{C}$ และ $0.0389 \pm 0.085^{\circ}\text{C}$

- ที่อุณหภูมิ -15 °C ได้ผลการสอบเทียบเท่ากับ $(-0.0275) \pm 0.082^{\circ}\text{C}$, $(-0.0319) \pm 0.082^{\circ}\text{C}$ และ $0.0185 \pm 0.083^{\circ}\text{C}$

- ที่อุณหภูมิ 0 °C ได้ผลการสอบเทียบ เท่ากับ $(-0.0148) \pm 0.078^{\circ}\text{C}$, $(-0.0189) \pm 0.078^{\circ}\text{C}$ และ $0.0175 \pm 0.079^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นค่า CMC ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ในการสอบเทียบ LIGT-total immersion ที่ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C เท่ากับ 0.085 °C

2. ผลการทดสอบ LIGT-total immersion ตามมาตรฐาน ISO 14253-1 (ISO, 2017) โดยนำค่าความผิดพลาด และค่าความไม่แน่นอนขยาย เปรียบเทียบกับค่า MPE ตามมาตรฐาน ASTM E1-03a (ASTM, 2003) พบว่า LIGT1, LIGT2 และ LIGT3 ที่จุดอุณหภูมิ -30°C และ -15°C ไม่ผ่านเกณฑ์การทดสอบ แต่ผู้ใช้เครื่องมือสามารถนำเครื่องมือไปใช้ได้โดยต้องใช้ค่าแก้ ส่วนที่จุดอุณหภูมิ 0°C ผ่านเกณฑ์การทดสอบ ทั้ง 3 แห่ง

3. ผลเปรียบเทียบค่า CMC ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้กับค่า MPE ที่ต่ำที่สุดตามมาตรฐาน ASTM E1-03a (ASTM, 2003) ของเครื่องมือใน สตส. ปี 2564 ซึ่งเท่ากับ $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ปรากฏว่า ค่า CMC ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ ต่ำกว่าค่า MPE 1.2 เท่า ดังนั้นห้องปฏิบัติการสอบเทียบ สตส. จึงสามารถให้บริการสอบเทียบ LIGT-total immersion ของ สตส. ได้

4. ผลเปรียบเทียบค่า CMC กับห้องปฏิบัติการอื่นๆ ของประเทศไทยที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 ในขอบข่ายการสอบเทียบ LIGT-total immersion ที่ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C จาก สมอ. ปี 2564 (ข้อมูลวันที่ 19 มีนาคม 2564) ห้องปฏิบัติการสอบเทียบสาขาอุณหภูมิ สตส. ถูกจัดอยู่ในลำดับที่ 10 จาก 16 ห้องปฏิบัติการ

ข้อเสนอแนะ

ห้องปฏิบัติการควรจัดหาอุปกรณ์สำหรับการขยายสเกลของเทอร์โมมิเตอร์ชนิดแท่งแก้ว เช่น กล้อง digital microscope เป็นต้น เพื่อเพิ่มความสามารถในการอ่านค่าอุณหภูมิของ TUC จะทำให้ค่า readability of TUC ของการสอบเทียบต่ำลง ส่งผลให้ค่าความไม่แน่นอนขยาย และค่า CMC ต่ำลงด้วย ซึ่งค่า CMC นั้น จะแสดงอยู่ในใบรับรองที่ สมอ. ออกให้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบ หากมีค่า CMC ที่ต่ำในขอบข่ายการรับรองนั้น จะเป็นข้อได้เปรียบเชิงพาณิชย์สำหรับการให้บริการสอบเทียบ เนื่องจากการมีค่า CMC ที่ต่ำจะบ่งบอกถึงความสามารถของห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้จะสามารถนำไปใช้ประกอบการยื่นขอการรับรองขอบข่ายการสอบเทียบกับหน่วยรับรองได้แล้ว ยังสามารถนำมาใช้ประกอบการจัดทำคู่มือการสอบเทียบ LIGT ที่ช่วงอุณหภูมิ -30°C ถึง 0°C ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับห้องปฏิบัติการอื่นที่ต้องการพัฒนาห้องปฏิบัติการให้ได้รับการรับรองเป็นห้องปฏิบัติการสอบเทียบอุณหภูมิได้

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 สิงห์วิวัฒน์ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ดร.อ้อยใจ อ่องหรั่ง และ ดร.จริยา บัวเจริญ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ให้คำปรึกษาในการทำการศึกษาดังกล่าว

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

ขอขอบคุณ คุณสุณัฐวดี โชติชม นักวิทยาศาสตร์การแพทย์ และบุคลากรห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือสาขาอุณหภูมิ กลุ่มพัฒนาระบบคุณภาพห้องปฏิบัติการในความร่วมมือปฏิบัติงานให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2562. GLA-23, ข้อเสนอแนะประกอบกรตรวจสอบการตรวจประเมิน ตาม มอก.17025-2561. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (TISI) กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2564. GLA-26, ข้อเสนอแนะการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัด. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (TISI) กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ.
- ASTM. 2003. ASTM E1-03a, Standard specification for ASTM liquid-in-glass thermometers. ASTM International. United States.
- ASTM. 2010. ASTM E 2251, Standard specification for liquid-in-glass ASTM thermometers with low-hazard precision liquids. ASTM International. United States.
- ASTM. 2017. ASTM E77-14, International standard test method for inspection and verification of thermometers. ASTM International. United States.
- BIPM. 2018. Guide to the realization of the ITS-90 platinum resistance thermometry. The International Bureau of Weights and Measures. France.
- BIPM. 2012. JCGM 200, International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM), 3rd edition. The International Bureau of Weights and Measures. France.
- 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.
- Knake, M. 2011. The anatomy of a liquid-in-glass thermometer. Retrieved February 22, 2021. from AASHTO re:source. <http://aashtoresource.org/university/newsletters/newsletters/2016/08/02/the-anatomy-of-a-liquid-in-glass-thermometer>.
- NATA. 2019. General accreditation guidance: Liquid-in-glass thermometers - selection and use. National Association of Testing Authorities. Australia.
- NIMT. 2012^a. Guideline of calibration of liquid-In-glass thermometer (TM/CG02/TT01/V03). First edition, Thermometry Metrology Department, National Institute of Metrology.Thailand.
- NIMT. 2012^b. Guideline of calibration of digital thermometer with temperature sensor (TM/CG01/TT01/V04) First edition. Thermometry Metrology Department, National Institute of Metrology. Thailand.
- UKAS. 2019. M3003, The expression of uncertainty and confidence in measurement. 4th edition. United Kingdom Accreditation Service. United Kingdom.
- Wise, J. 1998. NIST measurement services: Liquid-in-glass thermometer calibration service, Special Publication 250-23. National Institute of Standards and Technology. United States.

ภาคผนวก

ค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งต่างๆของการสอบเทียบ

1. ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ จากอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ

1.1 ค่าความเสถียรภาพของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (stability)

ตารางที่ 9 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 10 ค่า stability ที่อุณหภูมิ -15 °C

Stability at -15 °C															
จุดที่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Maximum	-14.9950	-14.9603	-14.9493	-14.9613	-14.9530	-14.9669	-14.9514	-14.9714	-14.9561	-14.9585	-14.9600	-14.9641	-14.9635	-14.9461	-14.9574
Minnimum	-14.9750	-14.9669	-14.9717	-14.9732	-14.9715	-14.9834	-14.9725	-14.9874	-14.9780	-14.9743	-14.9784	-14.9815	-14.9885	-14.9648	-14.9741
Stability	0.0100	0.0033	0.0112	0.0060	0.0093	0.0083	0.0106	0.0080	0.0110	0.0079	0.0092	0.0087	0.0125	0.0094	0.0084
Max of Stability	0.0125														

ตารางที่ 11 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														

1.2 ค่าความเป็นหนึ่งเดียวกันของแหล่งกำเนิดอุณหภูมิ (uniformity)

ตารางที่ 12 ค่า uniformity ที่อุณหภูมิ -30 °C และ -15 °C

Temp	-30 °C							-15 °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
Maximum	0.0222	0.0223	0.0182	0.0144	0.0187	0.0221	0.0183	0.0232	0.0221	0.0191	0.0234	0.0150	0.0232	0.0218
Max of Uniformity	0.0223							0.0234						

ตารางที่ 13 ค่า uniformity ที่อุณหภูมิ 0 °C

Temp	0 °C						
จุดที่	6 กับ 2	6 กับ 4	6 กับ 12	6 กับ 14	2 กับ 14	4 กับ 12	1 กับ 11
Maximum	0.0149	0.0070	0.0036	0.0063	0.0070	0.0057	0.0077
Max of Uniformity	0.0149						

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

2.1 ค่าการเลื่อนค่าของเทอร์มิเตอร์มาตรฐาน (drift of standard)

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

2.2 ค่าความละเอียดของเทอร์มิเตอร์มาตรฐาน (resolution of standard)

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

2.3 ค่าความไม่เป็นเชิงเส้นของเทอร์โมมิเตอร์มาตรฐาน (non-linearity)

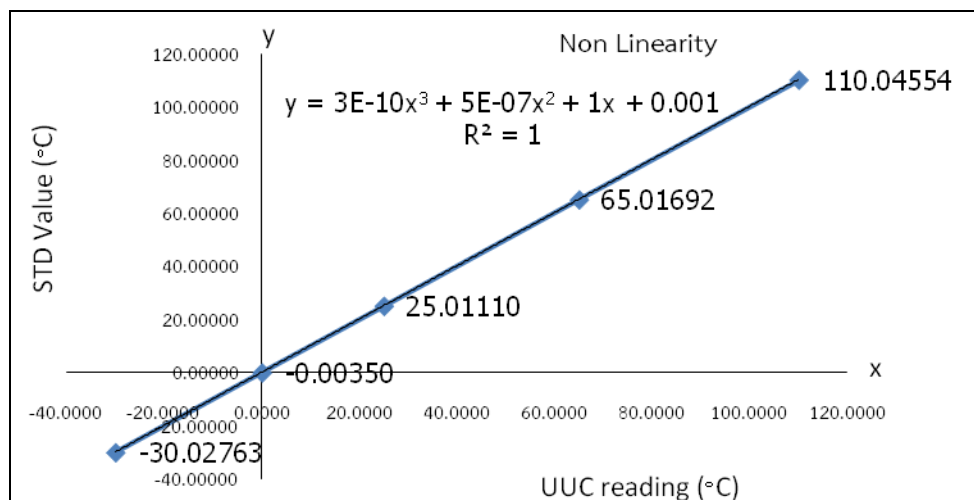
ตารางที่ 14 ค่า non-linearity

*STD Value (°C) (แกน y)	*UUC Value (°C) (แกน x)	*Correction (°C) (แกน y – แกน x)	UUC Fitting (°C) (y Fitting)	Non Linearity (°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

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

** ใช้ค่า non linearity เท่ากับ 0.0021 °C ในการหาค่า uncertainty ที่อุณหภูมิ -15 °C เนื่องจากเป็นค่าที่สูงที่สุดในช่วงการวัดที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C

อุณหภูมิ 15 °C ใช้ค่า non linearity ที่สูงที่สุดซึ่งครอบคลุมช่วงการวัดที่อุณหภูมิ -30 °C ถึง 0 °C ซึ่งเท่ากับ 0.0021



หมายเหตุ	
STD Value :	แกน y คือ ค่าอุณหภูมิของ Reference standard จากใบรับรองผลการสอบเทียบ
UUC Reading :	แกน x คือ ค่าอุณหภูมิของ Sensor จากใบรับรองผลการสอบเทียบ
UUC Reading Fitting :	ค่าอุณหภูมิของ Sensor ที่ได้จากการแทนค่าในสมการเชิงเส้น
Non Linearity :	ค่าการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้นของ Sensor จากทุกช่วงอุณหภูมิ ที่สอบเทียบ คำนวณได้จาก y Fitting - แกน y

รูปที่ 4 กราฟแสดงค่า Non Linearity

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

ตารางที่ 15 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

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

** ที่อุณหภูมิ -15 °C ใช้ค่า Uncertainty เท่ากับ 0.030 °C เนื่องจากค่า uncertainty ของผลการสอบเทียบ DT with PRT_{cal} มีค่า 0.030 °C เท่ากันทุกช่วงอุณหภูมิ

3. ค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ จากตัวอย่างสอบเทียบ LIGT1, LIGT2 และ LIGT3

3.1 ค่าความสามารถในการอ่านของเทอร์โมมิเตอร์ที่สอบเทียบ (readability of TUC)

$$\text{readability of TUC} = 0.1/2 = 0.05$$

3.2 ค่าความเสถียรของเครื่องมือในเวลาสั้นๆ (short term stability)

ตารางที่ 16 ค่า short term stability ของ LIGT1, LIGT2 และ LIGT3

	LIGT1 (S/N: 9714075)				LIGT2 (S/N: 678290)				LIGT3 (S/N: 8005-1528)			
	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	-30.0357	-30.0	-30.0203	-30.0	-30.0417	-30.0	-30.0275	30.0	-29.9611	-30.0	-29.9425	-30.0
Correction	-0.0357		-0.0242		-0.0417		-0.0275		0.0389		0.0575	
Short term Stability				-0.0115				-0.0142				-0.0186