

การเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดและผลการทวนสอบของวิธีการสอบเทียบ ตู้บ่มเพาะเชื้อของ 2 วิธี ระหว่าง TLAS G-20 และ Euramet CG-20

เอกสิทธิ์ ตุ่มสิทธิ์

บทคัดย่อ

ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดและผลการทวนสอบของวิธีการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อของ 2 วิธี ระหว่าง TLAS G-20 และ Euramet CG-20 โดยสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อที่มีค่าการแยกขาดที่ 0.1°C และมีปริมาตรไม่เกิน 1 ลูกบาศก์เมตร ที่จุดสอบเทียบ : 25°C , 35°C , 37°C , 44°C และ 65°C ตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดครั้งนี้ พบว่าวิธี Euramet CG-20 ได้ค่าความไม่แน่นอนของการวัดสูงกว่า 2.55, 3.92, 3.56, 3.11 และ 3.00 เท่าของวิธี TLAS G-20 ตามลำดับจุดสอบเทียบ ซึ่งผลการเปรียบเทียบของ 2 วิธี ระหว่าง TLAS G-20 และ Euramet CG-20 พบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ($|E_n| < 1.0$) ดังนั้นห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือสาขาอุณหภูมิ สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ (สตส.) จึงสามารถสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อให้กับผู้รับบริการได้ทั้ง 2 วิธี แต่อย่างไรก็ตามเกณฑ์การยอมรับของผู้รับบริการนั้นเป็นส่วนสำคัญที่ต้องนำมาประกอบการตัดสินใจในการเลือกวิธีการสอบเทียบ ตัวอย่างเช่นการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อที่จุดสอบเทียบ 35°C ด้วยวิธี Euramet CG-20 มีเกณฑ์การยอมรับที่ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ตามวิธี FDA BAM online test method Chapter 4 พบว่าผลการทวนสอบไม่ผ่าน ในทางกลับกันการสอบเทียบด้วยวิธี TLAS G-20 ได้ผลการทวนสอบผ่าน ดังนั้นวิธี Euramet CG-20 จึงไม่ใช่ตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับห้องปฏิบัติการที่มีเกณฑ์การยอมรับที่ต่ำ ซึ่งวิธี TLAS G-20 มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ต่ำกว่า จึงมีโอกาสมากกว่าการทวนสอบมากกว่า ดังนั้นวิธี TLAS G-20 จึงเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า แต่ในกรณีที่วิธีทดสอบเชื้อทางจุลชีววิทยาอื่นๆ มีเกณฑ์การยอมรับที่กว้างกว่า เช่น ที่เกณฑ์การยอมรับ $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ จากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าทั้ง 2 วิธีให้ผลการทวนสอบผ่านทุกจุดสอบเทียบ ดังนั้นในกรณีนี้ผู้รับบริการจึงสามารถเลือกใช้วิธีสอบเทียบได้ทั้ง 2 วิธี

การศึกษานี้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือสาขาอุณหภูมิ สตส. ได้ข้อมูลสำคัญของวิธีสอบเทียบทั้ง 2 วิธี ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการขอรับรองการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อจากสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม โดยเฉพาะวิธี Euramet CG-20 ที่จะเป็นทางเลือกเพิ่มเติมให้ผู้รับบริการของกรมปศุสัตว์ในอนาคต

คำสำคัญ : การสอบเทียบ, temperature controlled enclosures, incubator, TLAS G-20 , Euramet CG-20

เลขทะเบียนวิชาการ : 68(2)-0304-020

สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ 91 หมู่ 4 ถนนติวานนท์ ตำบลบางกะดี อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000
ผู้รับผิดชอบ, e-mail: savadiny22@hotmail.com

Comparison of the uncertainty of measurement and verification results of two incubator calibration methods between the TLAS G-20 method and Euramet CG-20 method

Aekasit Tumsit

Abstract

The purpose of this study was to compare the uncertainty of measurement and verification results of two calibration methods for incubators between TLAS G-20 and Euramet CG-20 by calibrating incubators with a resolution of 0.1 °C and a volume of less than 1 cubic meter at the calibration points : 25 °C, 35 °C, 37 °C, 44 °C and 65 °C, respectively.

The results of the comparison of the uncertainty of measurement found that the Euramet CG-20 method had the uncertainty of measurement values that were 2.55, 3.92, 3.56, 3.11 and 3.00 times higher than the TLAS G-20 method in the order of calibration points, but the comparison results of the two methods between TLAS G-20 and Euramet CG-20 were found to be satisfactory ($|E_n| < 1.0$). Therefore, Temperature Calibration Laboratory of the Bureau of Quality Control of Livestock Products (BQCLP) can calibrate incubators for service recipients in both methods. However, the service recipient's acceptance criteria are an important factor that must be considered in deciding on the calibration method. For example, the calibration of the incubator at the calibration point of 35 °C using the Euramet CG-20 method had an acceptance criteria of ± 0.5 °C according to the FDA BAM online test method Chapter 4. The results of the verification showed that failed. On the other hand, the verification result of the calibration using the TLAS G-20 method showed that pass. Therefore, the Euramet CG-20 method is not a suitable choice for laboratories with low acceptance criteria, but the TLAS G-20 method has a lower the uncertainty of measurement, which has a higher chance of passing verified. Therefore, the TLAS G-20 method is a better choice. However, in the case of other microbiological testing methods with broader acceptance criteria, such as the acceptance criteria of ± 1.0 °C, from the results of this study, the verification results of both methods showed that pass all calibration points. Therefore, in this case, the service recipient can choose to use both calibration methods.

In this study, the Temperature Calibration Laboratory of the BQCLP obtained important information on both calibration methods, which will be useful for requesting certification for incubator calibration from the Thai Industrial Standards Institute, especially the Euramet CG-20 method, which will be an additional option for the Department of Livestock Development service recipients in the future.

Keywords : calibration, temperature controlled enclosures, incubator, TLAS G-20 , Euramet CG-20

Registered No. : 68(2)-0304-020

Bureau of Quality Control of Livestock Products 91 Moo 4, Tiwanon Rd., Bangkadi, Mueang, Pathumthani 12000

Corresponding author, e-mail: savadiny22@hotmail.com

บทนำ

ตู้บ่มเพาะเชื้อ (Incubator) เป็นชนิดของตู้ควบคุมอุณหภูมิ (Temperature controlled chamber) ที่ห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ด้านชีววิทยาและจุลชีววิทยาใช้บ่มเพาะเชื้อ เลี้ยงเชื้อ มีส่วนประกอบสำคัญคือ แหล่งกำเนิดความร้อน โดยตู้บ่มเพาะเชื้อบางรุ่นมีพัดลมช่วยกระจายความร้อนให้มีความสม่ำเสมอ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้นตู้บ่มเพาะเชื้อ จึงต้องได้รับการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการที่ได้รับรองมาตรฐาน ISO/IEC 17025 เพื่อให้ได้ผลการควบคุมอุณหภูมิที่ถูกต้อง นำเชื่อถือ และสามารถสอบกลับได้ไปยัง SI Units ทั้งเป็นการสร้างความมั่นใจในประสิทธิภาพของผลทดสอบ ตามข้อกำหนด ISO/IEC 17025: 2017 ข้อ 7.7.1 (b) ที่ระบุว่า การเลือกใช้เครื่องมือที่ได้รับการสอบเทียบเพื่อให้ได้ผลที่สามารถสอบกลับได้ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562) นอกจากเครื่องมือที่นำมาใช้งานต้องได้รับการสอบเทียบแล้ว ห้องปฏิบัติการต้องทำการทวนสอบอย่างเหมาะสม เพื่อประเมินเครื่องมือก่อนนำมาใช้งาน ตามข้อกำหนด ISO/IEC 17025: 2017 ข้อ 6.4.4 ที่ระบุว่า ห้องปฏิบัติการต้องทวนสอบเครื่องมือว่าเป็นไปตามเกณฑ์ที่ระบุก่อนนำไปใช้งานหรือนำกลับมาใช้งานใหม่ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562)

ตู้บ่มเพาะเชื้อเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญและถูกนำมาใช้เป็นจำนวนมากในห้องปฏิบัติการทดสอบ สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ (สตส.) กรมปศุสัตว์ ซึ่งเป็นห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025: 2017 โดยมีภารกิจหลักคือ ดำเนินการตรวจสอบคุณภาพและความปลอดภัยของสินค้าปศุสัตว์ ให้เป็นไปตามกฎหมายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับสินค้าปศุสัตว์ ได้แก่ เนื้อสัตว์และผลผลิตจากสัตว์ นมและผลิตภัณฑ์นม อาหารสัตว์ ยาสัตว์และวัตถุอันตรายด้านการปศุสัตว์ รวมทั้งศึกษา ค้นคว้า วิเคราะห์ และวิจัยทางห้องปฏิบัติการ เพื่อพัฒนาระบบการตรวจสอบคุณภาพและความปลอดภัยของสินค้าปศุสัตว์ให้ได้ตามมาตรฐานสากล ดังนั้นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการทดสอบ จึงต้องได้รับการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการที่ได้รับรองมาตรฐาน ISO/IEC 17025 และมีการทวนสอบอย่างเหมาะสม เพื่อให้เกิดความมั่นใจในผลทดสอบ ซึ่งเกณฑ์การยอมรับของตู้บ่มเพาะเชื้อของแต่ละห้องปฏิบัติการนั้น ส่วนใหญ่จะกำหนดเกณฑ์การยอมรับตามวิธีทดสอบ ตัวอย่างเช่น ห้องปฏิบัติการทดสอบ สตส. ที่ทดสอบเชื้อ *Escherichia coli* หรือ Coliform bacteria ด้วยวิธี FDA BAM online test method Chapter 4 (P. FENG (ret.) et al., 2020) ในตัวอย่างเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ ไข่และผลิตภัณฑ์ไข่ เครื่องในสัตว์ รังนกและผลิตภัณฑ์รังนก หรือหนังสัตว์ บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 35 °C มีเกณฑ์การยอมรับที่ ± 0.5 °C หรือ ในการทดสอบเชื้อ *Staphylococcus aureus* ด้วยวิธี ISO 6888-1: 2021 บ่มเชื้อที่อุณหภูมิ 35 °C หรือ 37 °C มีเกณฑ์การยอมรับที่ ± 1.0 °C เป็นต้น นอกจากนี้ห้องปฏิบัติการทดสอบยังใช้ตู้บ่มเพาะเชื้อในกระบวนการทดสอบการฆ่าเชื้อของเครื่องนึ่งไอน้ำความดันสูง (Autoclave) โดยใช้เชื้อ *Geobacillus stearothermophilus* ซึ่งเป็น Biological Indicators และเรียกการทดสอบนี้ว่า spore test ในการบ่มเพาะเชื้อหลังจากกระบวนการฆ่าเชื้อจะใช้อุณหภูมิในช่วง 55 °C – 65 °C เพราะเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของเชื้อ *Geobacillus stearothermophilus* (Marjon H.J. et al., 2018) ปัจจุบัน spore test ที่ผลิตขึ้นมีหลายยี่ห้อ เช่น ยี่ห้อ Millipore บ่มที่ 65 °C (Merck KGaA., 2000) ยี่ห้อ BIONOVA บ่มที่ 55 °C – 62 °C (Terragene S.A., 2023) และ ยี่ห้อ 3M บ่มที่ 56 °C ± 2 °C (3M Company, 2016) เป็นต้น ซึ่งอุณหภูมิในการทดสอบจะมีความแตกต่างกัน ดังนั้นห้องปฏิบัติการจึงต้องทำตามคำแนะนำของผู้ผลิต และใช้เกณฑ์การยอมรับตามคำแนะนำผู้ผลิต หากผู้ผลิตไม่ได้รับไว้ให้ใช้เกณฑ์การยอมรับเครื่องมือตามที่ห้องปฏิบัติการกำหนด

วิธีการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ มีหลายวิธีแต่วิธีที่นำมาใช้ในประเทศไทย คือ TLAS G-20 : Guidelines for Calibration and Checks of Temperature Controlled Enclosures (TISI, 2008) จัดทำขึ้นโดย Thai Laboratory Accreditation Scheme, Thai Industrial Standards Institute, Ministry of Industry เพื่อใช้เป็นวิธีสอบเทียบตู้ควบคุมอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -90°C ถึง 500°C โดยการเปรียบเทียบผลการวัดร่วมกับเครื่องมือมาตรฐาน ซึ่งสามารถใช้ได้กับตู้ควบคุมอุณหภูมิแบบที่ใช้อากาศหรือก๊าซ ที่จำเพาะเจาะจงกับพื้นที่ใช้งานภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิ โดยที่วิธี TLAS G-20 ได้อธิบายขั้นตอนสำหรับการวัดคุณลักษณะเฉพาะ ได้แก่ ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (temperature uniformity) ความเสถียรของอุณหภูมิ (temperature stability) และความแม่นยำ ในสภาวะคงที่และไม่มีภาระบรรจุ โดยที่ไม่วัดตัวแปรอื่น เช่น ความชื้น หรือระบบหมุนเวียนอากาศ เป็นต้น

ในปีค.ศ. 2017 องค์การมาตรวิทยาแห่งยุโรป หรือ EURAMET ประเทศเยอรมัน ได้จัดทำวิธี Euramet CG-20 : Guidelines on the Calibration of Temperature and / or Humidity Controlled Enclosures ฉบับที่ 5 (Euramet, 2017) สำหรับเป็นวิธีสอบเทียบตู้ควบคุมอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ -90°C ถึง 500°C ด้วยอากาศหรือก๊าซ โดยการเปรียบเทียบผลการวัดร่วมกับเครื่องมือมาตรฐาน ภายใต้ปริมาตรของตู้ควบคุมอุณหภูมิในตำแหน่งที่ถูกกำหนดไว้ ที่ความดันบรรยากาศ และการทำงานขณะอยู่ในสภาวะคงตัว โดยไม่ได้รวมองค์ประกอบอื่นๆ อาทิเช่น ความชื้น การไหลของอากาศ และอื่นๆ โดยแสดงวิธีการวัดอุณหภูมิของความเสถียรของอุณหภูมิ ความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ การแปรผันรวม (overall variation) และความแม่นยำ ซึ่งวิธีนี้ทำขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อร่างข้อกำหนดทางเทคนิคขั้นพื้นฐานสำหรับห้องปฏิบัติการที่ดำเนินการสอบเทียบตู้ควบคุมอุณหภูมิ และสอดคล้องกับวิธีการสอบเทียบที่ใช้เพื่อให้ได้ผลการสอบเทียบที่เชื่อถือได้และเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวาง โดยไม่ได้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทดแทนวิธีที่มีอยู่เดิม และยังมีข้อเสนอแนะสำหรับหน่วยรับรองระบบที่ให้การรับรองห้องปฏิบัติการสอบเทียบตู้ควบคุมอุณหภูมิ

ต่อมาในปีค.ศ. 2021 สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สมอ.) กระทรวงอุตสาหกรรม ประเทศไทย มีนโยบายที่จะยกระดับห้องปฏิบัติการสอบเทียบ โดยผลักดันให้ใช้วิธีการสอบเทียบที่เทียบเท่าหรือสามารถอ้างอิงได้กับวิธีการมาตรฐานที่ได้รับการพัฒนาโดยองค์กรที่มีความสามารถทางวิชาการและมีความน่าเชื่อถือ จึงได้จัดทำเอกสารอ้างอิง GLA-20 : ข้อเสนอแนะการตีความและการนำ Euramet CG -20 ไปใช้สอบเทียบตู้ควบคุมอุณหภูมิ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2564) และพัฒนาขึ้นเพื่อให้เป็นเอกสารวิชาการที่ใช้ประกอบและสนับสนุนแนวทางตามเอกสาร Euramet CG-20: Guidelines on the Calibration of Temperature and / or Humidity Controlled Enclosures ขององค์การมาตรวิทยาแห่งยุโรป หรือ EURAMET เพื่อสนับสนุนการนำวิธี Euramet CG -20 มาใช้ในการพัฒนาวิธีการและคู่มือการสอบเทียบตู้ควบคุมอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการสอบเทียบ โดยมีสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ รับผิดชอบในการสร้างความรู้ความเข้าใจให้แก่ผู้มีส่วนได้เสีย สร้างความชัดเจนความกระจ่างและลดความคลุมเครือ เนื่องจากเป็นผู้ริเริ่มการจัดทำโครงการพัฒนาเอกสารฉบับนี้ และมีฐานะเป็นผู้เชี่ยวชาญทางวิชาการเกี่ยวกับการสอบเทียบมาตรฐานการวัด

ปัจจุบันนี้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือสาขาอุณหภูมิ สตส. ได้รับรองมาตรฐาน ISO/IEC 17025: 2017 ในขอบข่ายการสอบเทียบ temperature controlled enclosures (incubator) ด้วยวิธี TLAS G-20 จากสมอ. และรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัด (uncertainty of measurement) (BIPM, 2008) ในทุกการสอบเทียบ ตามข้อกำหนด 17025: 2017 ข้อ 7.6.2 ที่ระบุว่า ห้องปฏิบัติการที่ทำกิจกรรมการสอบเทียบ รวมถึงการสอบเทียบเครื่องมือของตนเอง ต้องประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดสำหรับทุกการสอบเทียบ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562) ผลการสอบเทียบและค่าความไม่แน่นอนของการวัดจึงเป็นข้อมูลที่สำคัญในใบรับรอง

การสอบเทียบที่ผู้รับบริการนำไปใช้งาน ซึ่งวิธีการสอบเทียบเป็นหนึ่งในปัจจัยที่กำหนดค่าความไม่แน่นอนของการวัด ดังนั้นเพื่อให้ได้วิธีการสอบเทียบตรงตามความต้องการของผู้รับบริการ ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือสาขา อุณหภูมิตตส. จึงได้ศึกษาวิธีการสอบเทียบเพิ่มเติม โดยทำการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัด และผลการ ทวนสอบ (verification result) ของวิธีการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อของ 2 วิธี ระหว่าง TLAS G-20 และ Euramet CG-20 ที่จุดสอบเทียบ 25 °C, 35 °C, 37 °C, 44 °C และ 65 °C โดยมีความคาดหวังว่าจะได้รับข้อมูลของทั้ง 2 วิธี สอบเทียบที่เป็นประโยชน์ต่อการขอรับรองจาก สมอ. และเพิ่มทางเลือกให้กับผู้รับบริการของ ตตส. ในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1.1 Data logger with PRT ที่มีค่าการแยกขีดที่ $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ พร้อมหัววัด PRT จำนวน 9 หัววัด (PRT 1-9) และอีก 1 หัววัด ซึ่งหุ้มด้วยท่อหัดสีดำ (PRT 10) ใบรับรองการสอบเทียบเลขที่ 23-1170-027 วันที่สอบเทียบ 5 กันยายน 2023
- 1.2 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (digital thermo-hygrometer) ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง $25.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีค่าการแยกขีดที่ $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ และสามารถวัดค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้ในช่วง $50\text{ \%RH} \pm 30\text{ \%RH}$ มีค่าการแยกขีดที่ $0.1\text{ \%RH}$ ใบรับรองการสอบเทียบเลขที่ 23T6397 วันที่สอบเทียบ 7 กรกฎาคม 2023
- 1.3 Digital multimeter สำหรับวัดความดันไฟฟ้า ใบรับรองการสอบเทียบเลขที่ 23E5768 วันที่สอบเทียบ 28 มิถุนายน 2023
- 1.4 อ่างสอบเทียบอุณหภูมิ (calibration bath) ใบรับรองการสอบเทียบเลขที่ 230115CA52 วันที่สอบเทียบ 16 มกราคม 2023
- 1.5 หลอดแก้วปลายด้านหนึ่งปิดที่มีขนาดความยาวประมาณ 20 – 30 เซนติเมตร และมีช่องสำหรับใส่หัววัด PRT ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.7 – 1.0 เซนติเมตร
- 1.6 ตู้บ่มเพาะเชื้อ สำหรับทดสอบแหล่งความไม่แน่นอนของการวัดที่อุณหภูมิ $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่มีปริมาตรไม่เกิน 1 ลูกบาศก์เมตร
- 1.7 คอมพิวเตอร์และโปรแกรมสำหรับเครื่อง data logger พร้อมโปรแกรมควบคุมการทำงาน Fluke DAQ 6.0 และโปรแกรมประมวลผล Microsoft excel
- 1.8 ฟอยล์อลูมิเนียม
- 1.9 อุปกรณ์จับยึดสาย PRT สำหรับติดตั้งภายในตู้บ่มเพาะเชื้อ
- 1.10 กระจก้าบรรจุจานเพาะเลี้ยงเชื้อเปล่าขนาด $32 \times 35 \times 10$ เซนติเมตร จำนวน 2 ใบ
- 1.11 กระจก้าบรรจุจานเพาะเลี้ยงเชื้อเปล่าขนาด $60 \times 40 \times 18$ เซนติเมตร จำนวน 4 ใบ
- 1.12 ไชควงวัดไฟฟ้า

2. สารเคมี

- 2.1 น้ำมันซิลิโคน (silicone oil) ยี่ห้อ DOW ชื่อผลิตภัณฑ์ XIAMETER™ PMX-200 Silicone Fluid 5 cst (CASRN: 63148-62-9) สำหรับใช้เป็นตัวกลางในการนำอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิ $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $65\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 2.2 95% เอทานอล (95% ethanol) สำหรับเช็ดทำความสะอาดเครื่องมือ

3. ตัวอย่างที่ศึกษา

- ตู้บ่มเพาะเชื้อ ที่มีปริมาตรไม่เกิน 1 ลูกบาศก์เมตร จำนวน 5 เครื่อง

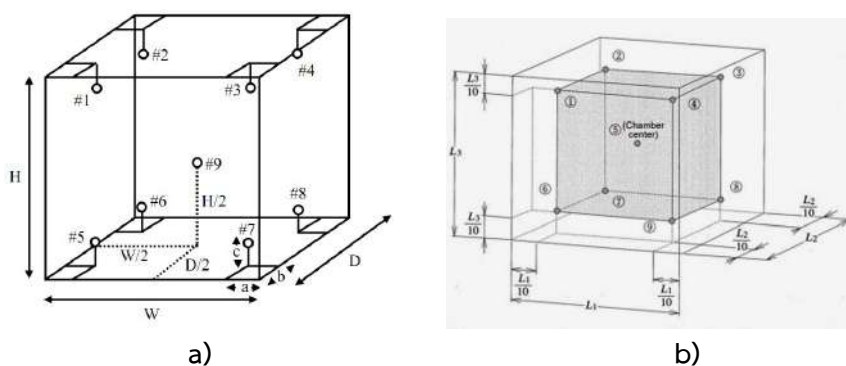
4. วิธีศึกษา

4.1 การสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ ตาม TLAS G-20 และ Euramet CG-20 มีวิธีการดังนี้

4.1.1 จัดเตรียมและตรวจสอบตู้บ่มเพาะเชื้อที่เป็นตัวอย่างสอบเทียบ หรือ unit under calibration (UUC) โดยตรวจสอบขอบยางประทุ (seal) บานพับ ปลั๊กไฟ ปุ่มปรับอุณหภูมิให้อยู่ในสภาวะที่พร้อมใช้งานและไม่มีการรั่วไหลของกระแสไฟฟ้าโดยใช้ไขควงวัดไฟฟ้าตรวจสอบ

4.1.2 เช็ดทำความสะอาดหัววัด PRT ด้วย 95% เอทานอล

4.1.3 ติดตั้งหัววัด PRT ที่ต่อกับเครื่อง data logger จำนวน 9 หัววัด ให้ครอบคลุมพื้นที่การใช้งานของตู้บ่มเพาะเชื้อ ที่ตำแหน่งต่างๆ โดยที่ตรงตำแหน่งมุมของตู้บ่มเพาะเชื้อจะต้องห่างจากผนังของ ตู้บ่มเพาะเชื้อเป็นระยะ 5-10 เซนติเมตร และหัววัด PRT ที่เป็นตำแหน่งอ้างอิง โดยต้องอยู่ในตำแหน่งจุดกึ่งกลาง (geometric center) ของตู้บ่มเพาะเชื้อ โดยการติดตั้งที่จุดดังกล่าวต้องมีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางไม่เกิน ± 2.5 เซนติเมตร ตามภาพที่ 1 ซึ่งในการสอบเทียบจะใช้หัววัด PRT เดียวกันของแต่ละตำแหน่งในตู้บ่มเพาะเชื้อ โดยแต่ละตำแหน่งที่ติดตั้งใช้หัววัด PRT ตามตารางที่ 1

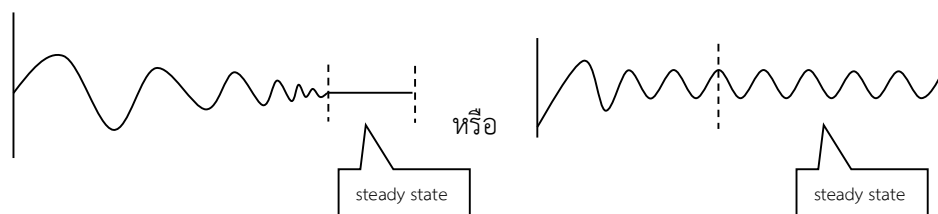


ภาพที่ 1 ตำแหน่งการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิในตู้บ่มเพาะเชื้อตามวิธี a) TLAS G-20 (TLAS, 2008) และ b) Euramet CG-20 ตาม IEC 60068-3-5 (EURAMET, 2017)

ตารางที่ 1 ตำแหน่งต่างๆของ datalogger with PRT No. CALT_T01(101) ถึง CALT_T01(109) ที่ติดตั้งในการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ ตามวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20

Datalogger with PRT No.	position of TLAS G-20	position of Euramet CG-20
CALT_T01(101)	1	1
CALT_T01(102)	2	2
CALT_T01(103)	3	4
CALT_T01(104)	4	3
CALT_T01(105)	5	6
CALT_T01(106)	6	7
CALT_T01(107)	7	9
CALT_T01(108)	8	8
CALT_T01(109)	9 (Ref.)	5 (Ref.)

4.1.4 รวบรวมสายของหัววัด PRT เข้าด้วยกัน พร้อมกับปิดประตูตู้บ่มเพาะเชื้อให้สนิท และต่อปลั๊กรวมหัววัด PRT เข้ากับเครื่อง data logger ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม Fluke DAQ 6.0 ทำการเปิดเครื่องและตั้งอุณหภูมิตามที่ต้องการสอบเทียบ รอให้อุณหภูมิของตู้บ่มเพาะเชื้อถึงค่าที่ตั้งไว้ โดยดูจากกราฟอุณหภูมิของหัววัดอ้างอิงหัววัดที่ 9 ตามวิธี TLAS G-20 (TLAS, 2008) หรือหัววัดที่ 5 ตามวิธี Euramet CG-20 (Euramet, 2017) และทำการบันทึกข้อมูลหลังจากอุณหภูมิภายในตู้บ่มเพาะเชื้อเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) ซึ่งกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง หรือ 5 cycle ตามภาพที่ 2 โดยที่ระหว่างการสอบเทียบใช้เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในการวัดภาวะแวดล้อม และใช้ digital multimeter วัดแรงดันไฟฟ้าขณะสอบเทียบ โดยควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์อยู่ในช่วง $50\text{ \%RH} \pm 20\text{ \%RH}$ และ แรงดันไฟฟ้า (voltage supplied) โดยควบคุมให้มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 10% ระหว่างการสอบเทียบ หรืออยู่ในช่วง $(220\text{ Volt} \pm 10\%) \text{ Volt}$ เพื่อไม่ให้ภาวะแวดล้อมและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดการควบคุมส่งผลกระทบต่อเครื่องมือมาตรฐานและผลการสอบเทียบ



ภาพที่ 2 ลักษณะกราฟอุณหภูมิที่สภาวะคงที่ (steady state)

4.1.5 บันทึกค่าการวัดอุณหภูมิจำนวน 10 ค่า จากส่วนแสดงผลอุณหภูมิหน้าตู้บ่มเพาะเชื้อ โดยครอบคลุมช่วงเวลาในการเก็บค่าจากหัววัดภายในตู้บ่มเพาะเชื้อ เพื่อนำมาคำนวณค่าการทวนซ้ำได้ (repeatability) ของตู้บ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบ ในขณะเดียวกันทำการบันทึกข้อมูลการวัดอุณหภูมิ ทุกๆ 10 วินาที จนครบจำนวน 180 ข้อมูล และนำไปใช้คำนวณด้วยโปรแกรมประมวลผล Microsoft excel เพื่อหาค่าเฉลี่ย (average) ค่าสูงสุด (maximum) ค่าต่ำสุด (minimum) ค่าความเสถียรภาพของอุณหภูมิ (temperature stability) ค่าความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (temperature uniformity) และค่าการแปรผันรวม (overall variation) ของตู้บ่มเพาะเชื้อ ซึ่งค่าทางสถิติเหล่านี้จะถูกใช้ในการคำนวณค่าปริมาณการวัดอุณหภูมิและค่าความไม่แน่นอนของการวัด ส่วนค่าการแปรผันรวมไม่ได้ใช้สำหรับการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดในการศึกษาครั้งนี้ แต่ในการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อตามปกตินั้น ห้องปฏิบัติการต้องรายงานค่าการแปรผันรวมในใบรับรองการสอบเทียบด้วย โดยค่าการแปรผันรวมสามารถคำนวณได้ตามสูตรดังนี้

$$\text{overall variation} = T_{\text{Max}} - T_{\text{Min}}$$

โดยที่ T_{Max} คือ อุณหภูมิสูงสุดของตู้บ่มเพาะเชื้อที่วัดได้

T_{Min} คือ อุณหภูมิต่ำสุดของตู้บ่มเพาะเชื้อที่วัดได้

4.2 การหาค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐาน (standard measurement uncertainty)

ค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐาน หาได้จากแหล่งค่าความไม่แน่นอนของการวัดชนิดต่างๆ แล้วหารด้วยค่าการแจกแจงของข้อมูล และคูณด้วยค่า sensitivity coefficient ; C_i ซึ่งการแจกแจงของข้อมูลชนิด normal distribution ตามปกติหารด้วย 1 ยกเว้นค่าความไม่แน่นอนของผลการสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐาน จะหารด้วย 2 เพราะได้มาจากค่าความไม่แน่นอนของการวัด ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% ซึ่งมีค่า coverage factor; k เท่ากับ 2 ส่วนการแจกแจงข้อมูลชนิด rectangular distribution หารด้วย $\sqrt{3}$ หรือ ประมาณ 1.732 แต่หากเป็นค่าความไม่แน่นอนของการแยกขีดของเครื่องมือ (resolution) ต้องหารด้วย 2 ก่อนแล้วจึงหารด้วย $\sqrt{3}$ หรือหารด้วย $2\sqrt{3}$ จากนั้นนำมาคูณด้วย sensitivity coefficient ; C_i ซึ่งค่า C_i คือ ปริมาณการเปลี่ยนแปลง output ต่อ Input หากไม่มีการแปลงหน่วยการวัด ค่า C_i จะมีค่าเท่ากับ 1.0 แต่ถ้ามีการแปลงหน่วยการวัด ค่า C_i จะมีค่าเปลี่ยนไปตามการแปลงหน่วยการวัดนั้น โดยแหล่งค่าความไม่แน่นอนของการวัดชนิดต่างๆ ของการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ มี 2 แหล่งใหญ่ คือ แหล่งค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ได้จากเครื่องมือสอบเทียบ และแหล่งค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากเครื่องมือมาตรฐาน ซึ่งแบ่งเป็นแหล่งค่าความไม่แน่นอนของการวัดได้ดังนี้

4.2.1 แหล่งค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ได้จากเครื่องมือสอบเทียบ แบ่งได้เป็น 5 แหล่งดังนี้

4.2.1.1 ค่าความไม่แน่นอนของการทวนซ้ำได้ [repeatability of UUC indicator; $u(\delta T_{Rep_UUC})$] คำนวณจากค่าการทวนซ้ำได้ของตู้บ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบ จากผลการสอบเทียบหน้าตู้บ่มเพาะเชื้อข้อ 4.1.5 โดยคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{repeatability of UUC indicator} = \frac{\text{repeatability} \cdot C_i}{\sqrt{3}}$$

$$\text{โดยที่ค่า repeatability} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

ค่า n คือ จำนวนครั้งของการวัด และค่า S คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard division) หาได้จากสูตรนี้

$$S = \sqrt{\frac{1}{(m-1)} \sum_{j=1}^m (q_j - \bar{q})^2}$$

ซึ่งค่า m = จำนวนข้อมูลที่ทำกรวัด

q_j = ค่าผลการวัด

$\bar{q}$ = ค่าเฉลี่ยผลการวัด

4.2.1.2 ค่าความไม่แน่นอนของความเสถียรของอุณหภูมิ [temperature stability of UUC; $u(\delta T_{stab})$] คำนวณจากค่าความเสถียรของตู้บ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบ จากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ ข้อ 4.1.5 โดยคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{temperature stability of UUC} = \frac{\text{temperature stability} \cdot C_i}{\sqrt{3}}$$

โดยที่ค่า temperature stability =
$$\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}$$

ซึ่งค่า $T_{\max}$ คือ อุณหภูมิสูงสุดของตู้บ่มเพาะเชื้อที่วัดได้

$T_{\min}$ คือ อุณหภูมิต่ำสุดของตู้บ่มเพาะเชื้อที่วัดได้

4.2.1.3 ค่าความไม่แน่นอนของความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ [temperature uniformity of UUC; $u(\delta T_{\text{Uni}})$] คำนวณจากค่าความสม่ำเสมอของตู้บ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบ จากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ ข้อ 4.1.5 โดยคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{temperature uniformity of UUC} = \frac{\text{temperature uniformity} \cdot C_i}{\sqrt{3}}$$

โดยที่ temperature uniformity = $\max |T_c - T_i|$

ซึ่งค่า T_c คือ อุณหภูมิของตู้บ่มเพาะเชื้อ ที่อ่านได้จากตำแหน่งกึ่งกลางของตู้บ่มเพาะเชื้อ

T_i คือ อุณหภูมิของตู้บ่มเพาะเชื้อ ที่อ่านได้จากแต่ละตำแหน่งที่มุมหรือผนังของตู้บ่มเพาะเชื้อ

4.2.1.4 ค่าความไม่แน่นอนของผลกระทบจากการโหลด [loading effect; $u(\delta T_{\text{Load}})$]

4.2.1.4.1 ในกรณีที่สอบเทียบตามวิธี TLAS G-20 คำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{loading effect} = \frac{20\% \times \text{temperature uniformity} \cdot C_i}{\sqrt{3}}$$

โดยที่ temperature uniformity คำนวณตามสูตรข้อ 4.2.1.3

4.2.1.4.2 ในกรณีที่สอบเทียบตามวิธี Euramet GC-20 ให้ทำการตรวจสอบค่า loading effect โดยการวัดอุณหภูมิตู้บ่มเพาะเชื้อในสภาวะไม่มีบรรจุโหลด และมีบรรจุโหลดไม่น้อยกว่า 40% ของปริมาตรพื้นที่ใช้งานในตู้ โดยใส่วัสดุบรรจุโหลดตามตารางที่ 2 และจัดวางวัสดุบรรจุโหลดและหัววัดอุณหภูมิ ตามตัวอย่างภาพที่ 3 โดยที่ร้อยละของการบรรจุโหลด คำนวณได้ตามสูตรดังนี้

$$\text{ร้อยละของการบรรจุโหลด (\%)} = \frac{(\text{ปริมาตรของตระกร้าที่บรรจุงานเพาะเลี้ยงเชื้อเปล่า} \times \text{จำนวนตระกร้าที่ใช้}) \times 100}{\text{ปริมาตรพื้นที่ใช้งานตู้บ่มเพาะเชื้อ}}$$

และคำนวณค่า loading effect ตามสูตรดังนี้

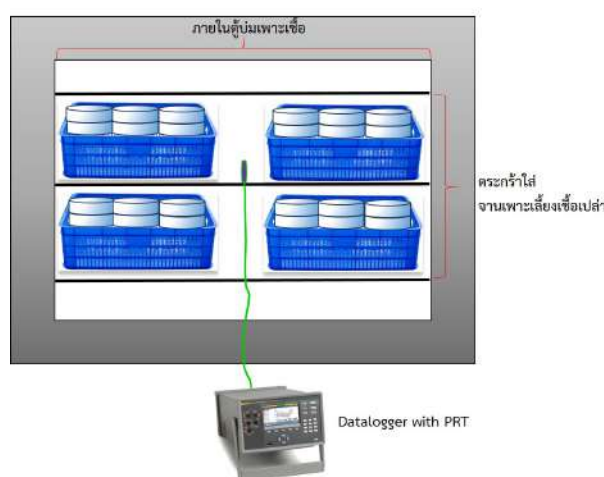
$$\text{loading effect} = \frac{20\% \times |T_{\text{ref.empty}} - T_{\text{ref.Load}}| \cdot C_i}{\sqrt{3}}$$

โดยที่ $T_{\text{ref.empty}}$ คือ อุณหภูมิที่ตำแหน่งอ้างอิงที่วัดได้ขณะตู้บ่มเพาะเชื้อในสภาวะไม่มีบรรจุโหลด

$T_{\text{ref.Load}}$ คือ อุณหภูมิที่ตำแหน่งอ้างอิงที่วัดได้ขณะตู้บ่มเพาะเชื้อในสภาวะมีบรรจุโหลด

ตารางที่ 2 ปริมาณการใช้วัสดุบรรจุโหลดและร้อยละของการบรรจุโหลด

ตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N	Cal Point (°C)	ปริมาตรพื้นที่ใช้	ขนาดตระกร้าที่บรรจุ	จำนวนตระกร้าที่บรรจุ	ร้อยละของ การบรรจุ โหลด (%)
		งานตู้บ่มเพาะ เชื้อ (m ³)	งานเพาะเลี้ยงเชื้อ เปล้า (cm)	งานเพาะเลี้ยงเชื้อ เปล้า (ใบ)	
20190000013001	25	400.0	60x40x18	4	43.2
12-18771	35	400.0	60x40x18	4	43.2
04-66267	37	400.0	60x40x18	4	43.2
04-92541	44	400.0	60x40x18	4	43.2
20230000001553	65	53.0	32x35x10	2	42.3



ภาพที่ 3 ตัวอย่างการวางวัสดุบรรจุโหลดและหัววัดอุณหภูมิของการทดสอบค่า Loading effect ในสภาวะที่มีบรรจุโหลด

4.2.1.5 ค่าความไม่แน่นอนของการแยกชุดของเครื่องมือสอบเทียบ [resolution of UUC indicator; $u(\delta T_{\text{Res_UUC}})$] คำนวณจากค่าการแยกชุดของตู้บ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบ ซึ่งได้มาจาก specification ของตู้บ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบ โดยคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{resolution of UUC indicator} = \frac{\text{resolution ของ ตู้บ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบ} \cdot C_i}{2\sqrt{3}}$$

4.2.2 ค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานที่ได้จากเครื่องมือมาตรฐาน แบ่งได้เป็น 7 ค่าดังนี้

4.2.2.1 ค่าความไม่แน่นอนของผลการสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐาน [calibration of standard; $u(\delta T_{\text{Cal_STD}})$] คำนวณจากค่าความไม่แน่นอนของการวัดสูงสุดของ data logger with PRT หัววัดที่ 1 ถึง 9 จากใบรับรองผลการสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐาน โดยคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{calibration of standard} = \frac{\text{uncertainty of measurement} \cdot C_i}{2}$$

4.2.2.2 ค่าความไม่แน่นอนของการแยกชัดของเครื่องมือมาตรฐาน [resolution of standard; $u(\delta T_{\text{Res_STD}})$] คำนวณจากค่าการแยกชัดของเครื่องมือมาตรฐาน ซึ่งได้มาจาก specification โดยค่า resolution ของเครื่องมือมาตรฐานที่ต่อกับหัววัดประเภท PRT มีค่า resolution เท่ากับ 0.001 °C ซึ่งนำมาใช้คำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{resolution of standard} = \frac{\text{resolution ของ data logger with PRT} \cdot C_i}{2\sqrt{3}}$$

4.2.2.3 ค่าความไม่แน่นอนของการเลื่อน [drift of standard; $u(\delta T_{\text{Drift_STD}})$] คำนวณจากค่าการเลื่อนของค่าสัมบูรณ์ของผลต่างที่มากที่สุดระหว่างค่า correction ปีล่าสุดและปีก่อน ของ data logger with PRT หัววัดที่ 1 ถึง 9 ที่ครอบคลุมอุณหภูมิที่ 25 °C ถึง 65 °C จากใบรับรองผลการสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐาน โดยคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{drift of standard} = \frac{|\text{drift}| \text{ ของ data logger with PRT} \cdot C_i}{\sqrt{3}}$$

4.2.2.4 ค่าความไม่แน่นอนของผลกระทบจากการแผ่รังสีของเครื่องมือมาตรฐาน [radiation effect of standard; $u(\delta T_{\text{Rad}})$] หาได้จากการตรวจสอบการวัดอุณหภูมิของเครื่องมือมาตรฐานหลังจากสอบเทียบแล้ว โดยทำการติดตั้งหัววัด PRT ที่เคลือบด้วยท่อหัดสีดำ และหัววัด PRT อ่างอิงปกติ (ที่ไม่เคลือบด้วยท่อหัดสีดำ) ในตำแหน่งอ้างอิง ตรงจุดกึ่งกลางตุ้มเพาะเชื้อ โดยให้หัววัดทั้ง 2 ใกล้กันมากที่สุดแต่ต้องไม่ติดกัน ที่อุณหภูมิ 25 °C ถึง 65 °C เพื่อให้ครอบคลุมช่วงการวัด และนำค่าของผลต่างของอุณหภูมิในช่วงการวัดที่ครอบคลุมจุดใช้งานมาใช้เป็นค่า radiation effect โดยค่า radiation effect of standard คำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{radiation effect of standard} = \frac{\text{radiation effect} \cdot C_i}{\sqrt{3}}$$

โดยที่ค่า radiation effect = Max of ($T_{\text{ref}} - T_{\text{rad}}$)

ซึ่งค่า T_{ref} คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่วัดด้วยหัววัด PRT อ่างอิงที่ไม่เคลือบด้วยท่อหัดสีดำ

T_{rad} คือ อุณหภูมิที่หัววัดวัดด้วยหัววัด PRT ที่เคลือบด้วยท่อหัดสีดำ

4.2.2.5 ค่า self heating effect of standard; $u(\delta T_{\text{Self_Heat}})$ คำนวณจากค่า self heating effect ตามสูตรดังนี้

$$\text{self heating effect of standard} = \frac{\text{self heating effect} \cdot C_i}{\sqrt{3}}$$

ซึ่งค่า self heating effect สามารถหาได้ 2 แบบ ตามวิธีการสอบเทียบ ดังนี้

4.2.2.5.1 ค่า self heating effect ตามวิธี TLAS G-20 หาได้จากการตรวจสอบโดยเลือกหัววัด PRT จำนวน 2 หัววัด โดยหัววัดที่ 1 จุ่มในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ โดยตรงที่ตำแหน่งกึ่งกลางของอ่างสอบเทียบและความลึก

ที่ไม่น้อยกว่า 15 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัววัด PRT ส่วนหัววัดที่ 2 ใส่หัววัดลงในหลอดแก้วปลายปิด ที่ตำแหน่งเดียวกัน และใช้กระดาษฟอยล์ลุ่มนิยมาปิดบริเวณด้านบนของหลอดแก้วเพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว โดยตรวจสอบที่อุณหภูมิ 25 °C ถึง 65 °C เพื่อให้ครอบคลุมช่วงการวัด รอเวลาจนอุณหภูมิในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิคงที่แล้ว เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที เก็บผลการวัดอุณหภูมิจากหัววัดทั้ง 2 หัววัด จำนวน 180 ค่า และนำผลต่างที่สูงที่สุดระหว่างค่าอุณหภูมิที่อ่านได้โดยตรงจากของเหลวในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ ลบกับค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากหัววัดอุณหภูมิภายในหลอดแก้วมาใช้เป็นค่า self heating effect of standard ตามสูตรดังนี้

$$\text{self heating effect} = \text{Max of } (|T_{\text{liquid}} - T_{\text{air}}|)$$

โดยที่ T_{liquid} คือ อุณหภูมิที่วัดในของเหลว (ใน silicone oil)

T_{air} คือ อุณหภูมิที่วัดในอากาศ (ในหลอดแก้ว)

4.2.2.5.2 ค่า self heating effect ตามวิธี Euramet CG-20 หาได้จากการคำนวณตามสูตรดังนี้

$$\text{self heating effect } (^{\circ}\text{C}) = P/h$$

โดยที่ P คือ ค่า Power (W) ที่กระแส 1 mA , $P = R \times I^2$; R (IEC, 2022) และ I (Fluke Corporation, 2013)

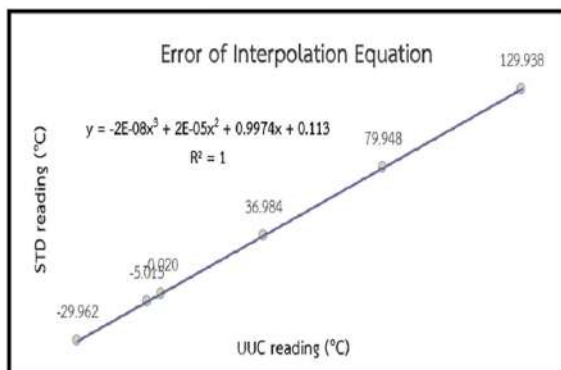
h คือ ค่า self – heating constant (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2564)

4.2.2.6 ค่า temperature coefficient of standard; $u(\delta T_{\text{Temp_Coeff}})$ หาได้จากการตรวจสอบการวัดอุณหภูมิที่จุดอุณหภูมิอ้างอิง โดยนำหัววัด PRT จุ่มในอ่างสอบเทียบอุณหภูมิ ที่จุดอุณหภูมิอ้างอิง 0.00 °C ขณะที่เครื่องมือมาตรฐานตั้งในตู้บ่มเพาะเชื้อที่จุดอุณหภูมิ 15 °C, 25 °C และ 35 °C เนื่องจากในภาวะการสอบเทียบได้ควบคุมอุณหภูมิในขณะสอบเทียบที่ 25 ± 10 °C จึงต้องทดสอบผลกระทบที่อุณหภูมิ 15 °C, 25 °C และ 35 °C และนำผลต่างของการวัดอุณหภูมิที่มากที่สุดระหว่างอุณหภูมิ 15 °C กับ 25 °C และอุณหภูมิ 35 °C กับ 25 °C มาใช้คำนวณค่า temperature coefficient of standard ตามสูตรดังนี้

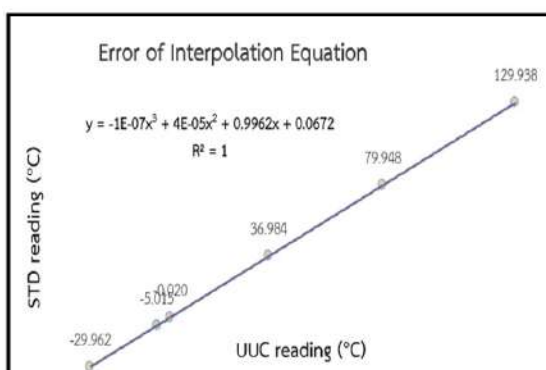
$$\text{temperature coefficient of standard} = \frac{\text{max of difference temperature } .C_i}{\sqrt{3}}$$

4.2.2.7 ค่า error of interpolation equation; $u(\delta T_{\text{Error_Inter}})$ หาได้จากการทำ interpolate ตาม ITS-90 (BIPM, 2018) โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า STD value และ ค่า UUC reading จากใบรับรองผลการสอบเทียบ data logger with PRT เลขที่ 23-1170-027 และใช้สมการ polynomial ลำดับที่ 3 หรือ third-order polynomial equation (Inseok et al., 2015) ในโปรแกรม Microsoft excel จะได้กราฟสมการ polynomial (y) ตามภาพที่ 4-12 และสมการ polynomial ตามตารางที่ 3 ซึ่งเมื่อแทนค่าอุณหภูมิ (UUC reading) ลงในค่า x ของสมการ polynomial จะได้ค่า UUC fitting แล้วเลือกค่าที่มากที่สุดจากค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่าง UUC fitting และ STD value ของ data logger with PRT ทั้ง 9 หัววัดสำหรับหาค่า error of interpolation equation ตามสูตรดังนี้

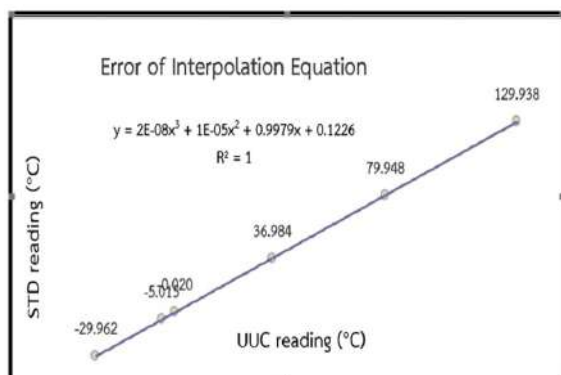
$$\text{error of interpolation equation} = \frac{\text{max of } |UUC \text{ fitting} - \text{STD value}| .C_i}{\sqrt{3}}$$



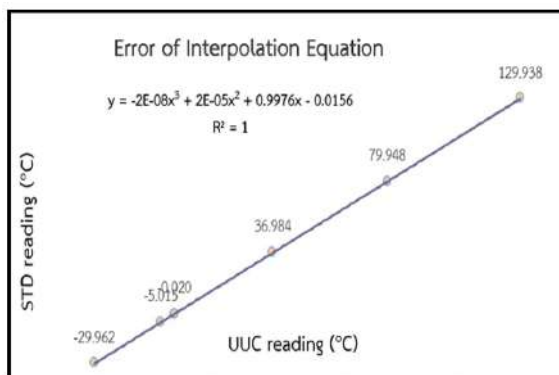
ภาพ 4 กราฟแสดงค่าสมการ polynomial (y)
จากผลการสอบเทียบ data logger
with PRT ID No.CALT_T01(101)



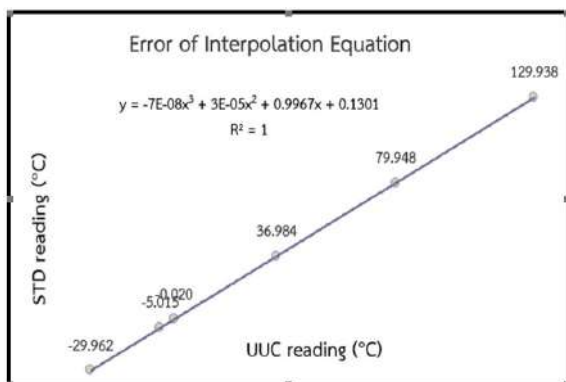
ภาพ 5 กราฟแสดงค่าสมการ polynomial (y)
จากผลการสอบเทียบ data logger
with PRT ID No.CALT_T01(102)



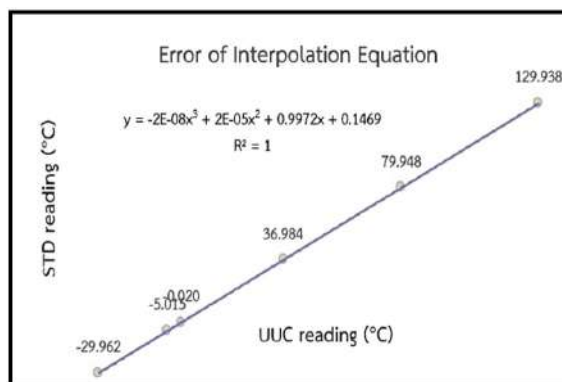
ภาพ 6 กราฟแสดงค่าสมการ polynomial (y)
จากผลการสอบเทียบ data logger
with PRT ID No.CALT_T01(103)



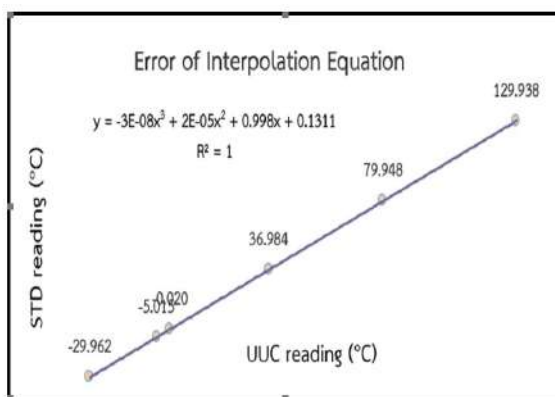
ภาพ 7 กราฟแสดงค่าสมการ polynomial (y)
จากผลการสอบเทียบ data logger
with PRT ID No.CALT_T01(104)



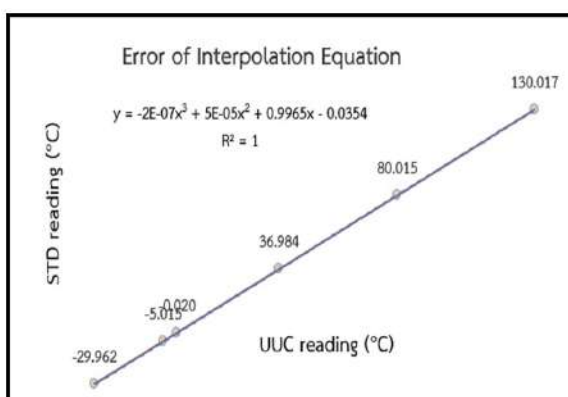
ภาพ 8 กราฟแสดงค่าสมการ polynomial (y)
จากผลการสอบเทียบ data logger
with PRT ID No.CALT_T01(105)



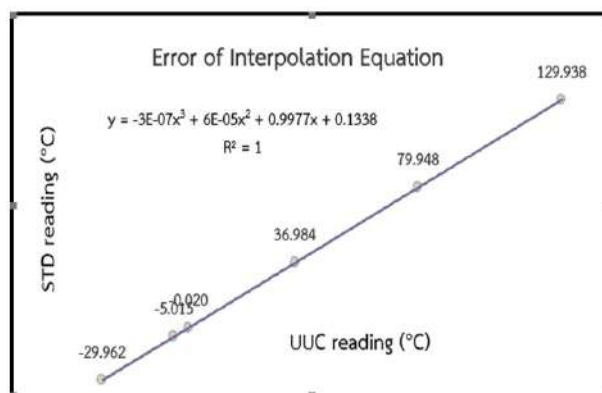
ภาพ 9 กราฟแสดงค่าสมการ polynomial (y)
จากผลการสอบเทียบ data logger
with PRT ID No.CALT_T01(106)



ภาพ 10 กราฟแสดงค่าสมการ polynomial (y)
จากผลการสอบเทียบ data logger
with PRT ID No.CALT_T01(107)



ภาพ 11 กราฟแสดงค่าสมการ polynomial (y)
จากผลการสอบเทียบ data logger
with PRT ID No.CALT_T01(108)



ภาพ 12 กราฟแสดงค่าสมการ polynomial (y) จากผลการสอบเทียบ
data logger with PRT ID No.CALT_T01(109)

ตารางที่ 3 สมการ polynomial ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า STD value และค่า UUC Reading จาก
ใบรับรองผลการสอบเทียบ data logger with PRT เลขที่ 23-1170-027

ID No. of PRT	Polynomial equation
CALT_T01(101)	$y = -2E-08x^3 + 2E-05x^2 + 0.9974x + 0.113$
CALT_T01(102)	$y = -1E-07x^3 + 4E-05x^2 + 0.9962x + 0.0672$
CALT_T01(103)	$y = 2E-08x^3 + 1E-05x^2 + 0.9979x + 0.1226$
CALT_T01(104)	$y = -2E-08x^3 + 2E-05x^2 + 0.9976x - 0.0156$
CALT_T01(105)	$y = -7E-08x^3 + 3E-05x^2 + 0.9967x + 0.1301$
CALT_T01(106)	$y = -2E-08x^3 + 2E-05x^2 + 0.9972x + 0.1469$
CALT_T01(107)	$y = -3E-08x^3 + 2E-05x^2 + 0.998x + 0.1311$
CALT_T01(108)	$y = -2E-07x^3 + 5E-05x^2 + 0.9965x - 0.0354$
CALT_T01(109)	$y = -3E-07x^3 + 6E-05x^2 + 0.9977x + 0.1338$

4.3 คำนวณค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม (combined standard measurement uncertainty; u_c)

4.3.1 วิธีสอบเทียบ TLAS G-20 คำนวณค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม โดยนำค่าที่ได้จากข้อ 4.2 มาคำนวณหา u_c ตามสูตรดังนี้

$$u_c = \sqrt{u(\delta T_{\text{Rep_UUC}})^2 + u(\delta T_{\text{Stab}})^2 + u(\delta T_{\text{Load}})^2 + u(\delta T_{\text{Res_UUC}})^2 + u(\delta T_{\text{Cal_STD}})^2 + u(\delta T_{\text{Res_STD}})^2 + u(\delta T_{\text{Drift_STD}})^2 + u(\delta T_{\text{Self_Heat}})^2 + u(\delta T_{\text{Temp_Coeffi}})^2 + u(\delta T_{\text{Error_Inter}})^2}$$

4.3.2 วิธีสอบเทียบ Euramet CG-20 คำนวณค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม โดยนำค่าที่ได้จากข้อ 4.2 มาคำนวณหา u_c ตามสูตรดังนี้

$$u_c = \sqrt{u(\delta T_{\text{Rep_UUC}})^2 + u(\delta T_{\text{Stab}})^2 + u(\delta T_{\text{Uni}})^2 + u(\delta T_{\text{Load}})^2 + u(\delta T_{\text{Res_UUC}})^2 + u(\delta T_{\text{Cal_STD}})^2 + u(\delta T_{\text{Res_STD}})^2 + u(\delta T_{\text{Drift_STD}})^2 + u(\delta T_{\text{Self_Heat}})^2 + u(\delta T_{\text{Temp_Coeffi}})^2 + u(\delta T_{\text{Error_Inter}})^2}$$

4.4 หาค่า coverage factor ; k จาก ค่า effective degree of freedom (V_{eff}) คำนวณได้จากสมการ Welch-Satterthwaite ดังนี้

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

และนำค่า V_{eff} ไปหาค่า k จากตาราง t -distribution ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% (โดยใช้ที่ 95.45 %) ในมาตรฐาน M3003 (UKAS, 2022) ตามภาพที่ 13

Degrees of freedom, ν	Values of $t_{\alpha}(\nu)$ from the t -distribution for ν degrees of freedom					
	$p = 68.27 \%$	$p = 90 \%$	$p = 95 \%$	$p = 95.45 \%$	$p = 99 \%$	$p = 99.73 \%$
1	1.84	6.31	12.71	13.97	63.66	255.78
2	1.32	2.92	4.30	4.53	9.92	19.21
3	1.20	2.35	3.18	3.31	5.84	9.22
4	1.14	2.13	2.78	2.87	4.60	6.62
5	1.11	2.02	2.57	2.65	4.03	5.51
6	1.09	1.94	2.45	2.52	3.71	4.90
7	1.08	1.89	2.36	2.43	3.50	4.53
8	1.07	1.86	2.31	2.37	3.36	4.28
9	1.06	1.83	2.26	2.32	3.25	4.09
10	1.05	1.81	2.23	2.28	3.17	3.96
11	1.05	1.80	2.20	2.25	3.11	3.85
12	1.04	1.78	2.18	2.23	3.05	3.76
13	1.04	1.77	2.16	2.21	3.01	3.69
14	1.04	1.76	2.14	2.20	2.98	3.64
15	1.03	1.75	2.13	2.18	2.95	3.59
16	1.03	1.75	2.12	2.17	2.92	3.54
17	1.03	1.74	2.11	2.16	2.90	3.51
18	1.03	1.73	2.10	2.15	2.88	3.48
19	1.03	1.73	2.09	2.14	2.86	3.45
20	1.03	1.72	2.09	2.13	2.85	3.42
25	1.02	1.71	2.06	2.11	2.79	3.33
30	1.01	1.70	2.04	2.09	2.75	3.27
35	1.01	1.70	2.03	2.07	2.72	3.23
40	1.01	1.68	2.02	2.06	2.70	3.20
45	1.01	1.68	2.01	2.06	2.69	3.18
50	1.01	1.68	2.01	2.05	2.68	3.16
100	1.005	1.660	1.984	2.025	2.626	3.077
∞	1.000	1.645	1.960	2.000	2.576	3.000

ภาพที่ 13 ตาราง t -distribution (UKAS, 2024)

4.5 ประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด (uncertainty of measurement; U) หรือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัดขยาย (expanded measurement uncertainty; U) ตามสูตรดังนี้

$$U = u_c \cdot k$$

4.6 สร้างตารางเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดระหว่างวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20

4.7 เปรียบเทียบวิธีการสอบเทียบระหว่างวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20 โดยใช้หลักการทางสถิติ E_n score (E_n) ตาม ISO 13528: 2022 ปกตินิยมใช้ E_n score ในการเปรียบเทียบผลสอบเทียบระหว่างห้องปฏิบัติการ การทดสอบความชำนาญ และเปรียบเทียบวิธีสอบเทียบ ซึ่งค่า E_n score คำนวณตามสูตรดังนี้

$$E_n = \frac{X_{\text{lab}} - X_{\text{ref}}}{\sqrt{U_{\text{lab}}^2 + U_{\text{ref}}^2}}$$

โดยค่า X_{lab} เป็นผลการวัดของวิธี TLAS G-20

ค่า X_{ref} ให้เป็นผลการวัดของวิธี Euramet CG-20

ค่า U_{lab} เป็นค่าความไม่แน่นอนของการวัดของวิธี TLAS G-20 และ

ค่า U_{ref} เป็นค่าความไม่แน่นอนของการวัดของวิธี Euramet CG-20

และมีการประเมินผล E_n score ดังนี้

$|E_n| < 1.0$ หมายถึง ผลการเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธีให้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ (satisfactory)

$|E_n| \geq 1.0$ หมายถึง ผลการเปรียบเทียบทั้ง 2 วิธีให้ผลอยู่ในเกณฑ์ไม่น่าพอใจ (unsatisfactory)

4.8 ทวนสอบผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อโดยนำค่าปริมาณที่วัดได้ และค่าความไม่แน่นอนของการวัด มาประเมินความใช้ได้ของตู้บ่มเพาะเชื้อ โดยเปรียบเทียบกับตัวอย่างเกณฑ์การยอมรับ (acceptance criteria) ตามตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวอย่างเกณฑ์การยอมรับตู้บ่มเพาะเชื้อตามจุดอุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	Acceptance criteria (°C)	Methods/References	Microbiological test
25	±1	ISO 10272-1: 2017	<i>Campylobacter</i> spp.
25	±1	ISO 11290-1: 2017	<i>Listeria monocytogenes</i> and <i>Listeria</i> spp.
25	±1	ISO 21527-2: 2008	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Wallemia sebi</i> , <i>Aspergillus</i> <i>restrictus</i> , <i>Eurotium rubrum</i>
35	±0.5	FDA BAM online test Method Chapter 4 : 2020	<i>Escherichia coli</i> , Coliform bacteria
35	±1	ISO 6888-1: 2021	<i>Staphylococcus aureus</i>
37	±1	ISO 6888-1: 2021	<i>Staphylococcus aureus</i>
37	±1	ISO 21528-1: 2017	<i>Enterobacteriaceae</i>
37	±1	ISO 21528-2: 2017	<i>Salmonella</i> spp.
44	±1	Nordic committee on food analysis, NMKL method no.68	<i>Enterococcus</i> spp.
44	±1	ISO 16649-2, 2001	<i>Escherichia coli</i>
65	±1*	Merck Microbiology Manual 12 th	<i>Geobacillus stearothermophilus</i>

*เกณฑ์การยอมรับเครื่องมือของห้องปฏิบัติการ

ผลและวิจารณ์ผล

1. ผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ

การสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อที่จุดสอบเทียบ 25 °C, 35 °C, 37 °C, 44 °C และ 65 °C ใช้ตัวอย่างตู้บ่มเพาะเชื้อ Serial No. 20190000013001, 12-18771, 04-66267, 04-92541 และ 20230000001553 ตามลำดับจุดสอบเทียบ และใช้ data logger with PRT เป็นเครื่องมือมาตรฐาน ใบรับรองการสอบเทียบเลขที่ 23-1170-027 สอบเทียบวันที่ 7 กันยายน 2523 และติดตั้งทั้งหมด 9 ตำแหน่งสอบเทียบ ได้ค่าปริมาณการวัดอุณหภูมิเฉลี่ย 180 ค่าของแต่ละหัววัดต่อจุดสอบเทียบอุณหภูมิ ด้วยวิธี TLAS G-20 ตามตารางที่ 5 และวิธี Euramet CG-20 ตามตารางที่ 6

จากผลการสอบเทียบ พบว่าที่จุดสอบเทียบเดียวกันของทั้ง 2 วิธี ให้ค่าปริมาณการวัดที่ใกล้เคียงกันถึงแม้จะมีการกำหนดหมายเลขตำแหน่งการติดตั้งหัววัดอุณหภูมิที่แตกต่างกันของ 2 วิธี แต่เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ใช้เครื่องมือมาตรฐานและหัววัดอุณหภูมิเครื่องเดียวกันตรงตามตำแหน่งที่ติดตั้ง และเก็บค่าปริมาณการวัดในขณะที่อุณหภูมิภายในตู้คงที่ จึงทำให้ได้ค่าปริมาณการวัดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งหากเป็นการสอบเทียบที่ต่างห้องปฏิบัติการกัน หรือใช้เครื่องมือมาตรฐานและหัววัดอุณหภูมิต่างเครื่องกัน อาจเกิดความแตกต่างของค่าปริมาณการวัด เพราะเครื่องมือมาตรฐานและหัววัดแต่ละเครื่องมีค่าความแม่นยำการวัด (measurement accuracy) และค่าแก้ (correction) ที่ไม่เท่ากัน ส่วนค่าการแปรผันรวม (overall variation) ที่ได้จากการสอบเทียบตามตารางที่ 7 แม้ว่าจะไม่ได้ถูกใช้สำหรับการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดและการทวนสอบผลการสอบเทียบ แต่ในการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อให้ผู้รับบริการตามปกติในห้องปฏิบัติการต้องรายงานค่าการแปรผันรวมในใบรับรองการสอบเทียบด้วย เพื่อให้ผู้รับบริการทราบถึงประสิทธิภาพของตู้บ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบ โดยค่าการแปรผันรวมหากยังมีค่าสูง จะแสดงถึงประสิทธิภาพของตู้บ่มเพาะเชื้อที่ต่ำลง ดังนั้นตู้บ่มเพาะเชื้อที่มีประสิทธิภาพต่ำ มีอายุการใช้งานนาน หรือมีความผิดปกติ มักพบการแสดงค่า overall variation ที่สูงมาก ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ค่า overall variation เป็นไปตามประสิทธิภาพของตู้ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละเครื่องและจุดอุณหภูมิซึ่งไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้เพราะใช้ต่างอุณหภูมิกันและไม่ใช่อุณหภูมิประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 5 ค่าปริมาณการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ ตามวิธี TLAS G-20

Position	Calibration point (°C)				
	25	35	37	44	65
1	25.237	35.154	37.309	44.124	64.631
2	25.260	35.271	37.358	44.088	65.034
3	25.252	35.149	37.325	44.190	64.690
4	25.263	35.253	37.316	44.169	65.079
5	25.219	34.954	37.007	44.000	64.633
6	25.260	35.316	37.384	44.108	64.986
7	25.217	35.035	36.926	43.976	64.755
8	25.281	35.207	37.271	44.079	64.993
9 (Ref.)	25.216	35.113	36.844	44.125	64.841

ตารางที่ 6 ค่าปริมาณการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยของการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ ตามวิธี Euramet CG-20

Position	Calibration point (°C)				
	25	35	37	44	65
1	25.238	35.151	37.309	44.117	64.736
2	25.261	35.269	37.356	44.295	65.034
3	25.264	35.252	37.314	44.218	65.080
4	25.252	35.149	37.326	44.292	64.788
5 (Ref.)	25.217	35.010	37.030	43.874	65.074
6	25.220	34.951	37.006	43.861	64.719
7	25.261	35.321	37.382	43.792	64.787
8	25.282	35.209	37.267	44.076	64.994
9	25.218	35.034	36.924	43.976	64.756

ตารางที่ 7 ค่าการแปรผันรวม (overall variation) ของตู้บ่มเพาะเชื้อ

ตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N (°C)	Cal point (°C)	Overall variation	
		TLAS G-20	Euramet CG-20
20190000013001	25	0.085	0.077
12-18771	35	0.422	0.453
04-66267	37	0.475	0.515
04-92541	44	0.308	0.601
20230000001553	65	0.504	0.505

2. ผลการหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดมาตรฐานของการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ

จากผลการหาค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานของการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อจากแหล่งค่าความไม่แน่นอนของการวัดชนิดต่างๆ จะได้ค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐาน ตามตารางที่ 8 -19 พบว่าค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานของวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20 ที่เป็นค่าเดียวกันในการประมาณค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานมีจำนวน 7 ค่า ซึ่งถูกแบ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานที่ได้จากตัวอย่างสอบเทียบ 1 ค่า โดยได้จากค่า specification ของตัวอย่างสอบเทียบ ได้แก่ ค่า resolution of UUC indicator ส่วนอีก 6 ค่าได้จากเครื่องมือมาตรฐาน โดยที่ค่า calibration of standard, drift of standard และ error of interpolation equation ได้จากผลการสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐาน ค่า resolution of standard ได้มาจากค่า specification ของเครื่องมือมาตรฐาน ส่วนค่า radiation effect of standard และค่า temperature coefficient of standard ได้มาจากผลการทดสอบแหล่งค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่มีผลกระทบต่อเครื่องมือมาตรฐาน ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานทั้ง 7 ค่านี้ จึงไม่ใช่ปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างกันของค่าความไม่แน่นอนของการวัดระหว่างการสอบเทียบวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20

ส่วนค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานที่มีค่าเท่ากันของทั้ง 2 วิธี ได้แก่ ค่า repeatability of UUC indicator ซึ่งได้จากการสอบเทียบ มีค่าเท่ากับ 0.0 ทุกจุดสอบเทียบ เนื่องจากระหว่างการสอบเทียบเป็นสภาวะที่ตู้บ่มเพาะเชื้อเข้าสู่ steady state ทำให้ส่วนแสดงผลอุณหภูมิหน้าตู้บ่มเพาะเชื้อวัดอุณหภูมิแสดงค่าอุณหภูมิได้คงที่ จะได้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0 และเมื่อนำมาหารด้วยค่าการแจกแจง $\sqrt{3}$ และคูณด้วย C_1 จึงได้ค่า repeatability of UUC indicator เท่ากับ 0.0 เช่นกัน นอกจากการเก็บค่าปริมาณการวัดขณะที่ตู้บ่มเพาะเชื้อเข้าสู่ steady state แล้ว อีกปัจจัยที่จะทำให้ตู้บ่มเพาะเชื้อมีค่า repeatability of UUC indicator ที่ดี คือประสิทธิภาพของตู้บ่มเพาะเชื้อ ดังนั้นหากตู้บ่มเพาะเชื้อที่ใช้มานานเป็นระยะเวลานานและมีประสิทธิภาพการควบคุมอุณหภูมิต่ำลง อาจทำให้ค่าการควบคุมอุณหภูมิไม่คงที่ ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่ส่วนแสดงผลอุณหภูมิหน้าตู้ไม่คงที่ด้วย และทำให้ค่า repeatability of UUC indicator และค่าความไม่แน่นอนของการวัดมีค่ามากขึ้นด้วย ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ค่า repeatability of UUC indicator จึงไม่ได้เป็นปัจจัยที่จะทำให้เกิดความแตกต่างของค่าความไม่แน่นอนของการวัดระหว่าง 2 วิธี

และอีกค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานที่มีความแตกต่างกันของทั้ง 2 วิธีมีทั้งสิ้น 4 ค่า คือ temperature stability, temperature uniformity, loading effect และ self heating effect of standard โดยที่ค่า temperature stability และ temperature uniformity จากการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อของทั้ง 2 วิธีมีค่าที่ต่างกัน แต่เนื่องจากใช้ตัวอย่างเดียวกัน และภายในเวลาใกล้เคียงกัน จึงได้ค่า temperature stability, temperature uniformity ที่มีความใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่า temperature stability จึงส่งผลกระทบต่อค่าความไม่แน่นอนของการวัด ต่างจากค่า temperature uniformity ถึงแม้ว่าทั้ง 2 วิธีจะได้ค่าใกล้เคียงกัน แต่ถูกนำมาประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ต่างกัน โดยที่วิธี Euramet CG-20 นำมาใช้ในการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดโดยตรง แต่วิธี TLAS G-20 ถูกนำไปใช้คำนวณหาค่า loading effect ส่วนค่า loading effect ของวิธี Euramet CG-20 ได้จากการตรวจสอบตัวอย่างระหว่างสภาวะไม่มีบรรจุหลอด และมีบรรจุหลอด ดังนั้นในวิธี Euramet CG-20 หากค่า temperature uniformity และ loading effect ยังมีค่ามากก็จะส่งผลกระทบต่อค่าความไม่แน่นอนของการวัดมากขึ้น ส่วนค่า self heating effect of standard ในวิธี TLAS G-20 ได้จากผลต่างของอุณหภูมิในการตรวจสอบการวัดอุณหภูมิของหัววัดอุณหภูมิจากของเหลวในอ่างสอบเทียบโดยตรงและในอากาศภายในหลอดแก้ว แต่วิธี Euramet CG-20 ใช้การคำนวณจากค่ามาตรฐาน และค่า specification ของเครื่องมือ ซึ่งในการศึกษานี้พบว่าค่า self heating effect of standard มีค่าต่างกันเล็กน้อย จึงมีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อค่าความไม่แน่นอนของการวัดระหว่าง 2 วิธี

ดังนั้นจากผลการหาค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานทั้ง 12 ค่า ในการศึกษาครั้งนี้ สรุปได้ว่าค่า temperature uniformity และ loading effect ส่งผลกระทบต่อความแตกต่างของค่าความไม่แน่นอนของการวัดระหว่าง 2 วิธี มากที่สุด

ตารางที่ 8 ค่าความไม่แน่นอนของการทวนซ้ำได้ (repeatability of UUC indicator)

ตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N	Cal point (°C)	Repeatability of UUC indicator (TLAS G-20) (°C)	Repeatability of UUC indicator (Euramet CG-20) (°C)
20190000013001	25	0.0	0.0
12-18771	35	0.0	0.0
04-66267	37	0.0	0.0
04-92541	44	0.0	0.0
20230000001553	65	0.0	0.0

ตารางที่ 9 ค่าความไม่แน่นอนของความเสถียรของอุณหภูมิ (temperature stability) ของตูบ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบ

ตูบ่มเพาะเชื้อ S/N	Cal point (°C)	Temperature stability (TLAS G-20) (°C)	Temperature stability (Euramet CG-20) (°C)
20190000013001	25	0.008	0.008
12-18771	35	0.036	0.036
04-66267	37	0.018	0.035
04-92541	44	0.053	0.041
20230000001553	65	0.037	0.036

ตารางที่ 10 ค่าความไม่แน่นอนของความสม่ำเสมอของอุณหภูมิ (temperature uniformity) ของตูบ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบ

ตูบ่มเพาะเชื้อ S/N	Cal point (°C)	Temperature uniformity (Euramet CG-20) (°C)
20190000013001	25	0.039
12-18771	35	0.248
04-66267	37	0.278
04-92541	44	0.281
20230000001553	65	0.285

ตารางที่ 11 ค่าความไม่แน่นอนของผลกระทบจากการโหลด (loading effect) ของตูบ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบ

ตูบ่มเพาะเชื้อ S/N	Cal point (°C)	Loading effect (TLAS G-20) (°C)	Loading effect (Euramet CG-20) (°C)
20190000013001	25	0.008	0.006
12-18771	35	0.029	0.005
04-66267	37	0.054	0.010
04-92541	44	0.026	0.011
20230000001553	65	0.039	0.002

ตารางที่ 12 ค่าความไม่แน่นอนของการแยกชัดของเครื่องมือสอบเทียบ (resolution of UUC indicator)

ตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N	Cal Point (°C)	Resolution of UUC indicator (°C)
20190000013001	25	0.03
12-18771	35	0.03
04-66267	37	0.03
04-92541	44	0.03
20230000001553	65	0.03

ตารางที่ 13 ค่าความไม่แน่นอนของผลการสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐาน (calibration of standard)

Cal point (°C)	Calibration of standard (Uncertainty) (°C)
25	0.020
35	0.020
37	0.020
44	0.020
65	0.020

ตารางที่ 14 ค่าความไม่แน่นอนของการแยกชัดของเครื่องมือมาตรฐาน (resolution of standard)

Cal point	Resolution of standard (°C)
25	0.0003
35	0.0003
37	0.0003
44	0.0003
65	0.0003

ตารางที่ 15 ค่าความไม่แน่นอนของการเลื่อนของเครื่องมือมาตรฐาน (drift of standard)

Cal point	Drift of standard (°C)
25	0.023
35	0.023
37	0.023
44	0.059
65	0.059

ตารางที่ 16 ค่าความไม่แน่นอนของผลกระทบจากการแผ่รังสีของเครื่องมือมาตรฐาน (radiation effect of standard)

Temp (°C)	Radiation effect of standard (°C)
25	0.002
35	0.006
37	0.011
44	0.020
65	0.033

ตารางที่ 17 ค่า self heating effect of standard

Temp (°C)	Self heating effect of standard (TLAS G-20) (°C)	Self heating effect of standard (Euramet CG-20) (°C)
25	0.027	0.127
35	0.012	0.013
37	0.033	0.013
44	0.010	0.014
65	0.020	0.014

ตารางที่ 18 ค่า temperature coefficient of standard

Temperature (°C)	Temperature coefficient of standard (°C)
15 to 35	0.020

ตารางที่ 19 ค่า error of interpolation equation ของ data logger with PRT

Temp (°C)	Error of interpolation equation (°C)
25	0.009
35	0.009
37	0.009
44	0.017
65	0.017

3. ผลการหาค่าความไม่แน่นอนของการวัด และผลการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดระหว่างวิธี

TLAS G-20 และ Euramet CG-20

จากผลการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด ได้ค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม (u_c) ของวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20 ตามตารางที่ 20 และจากการคำนวณค่า effective degree of freedom (V_{eff}) โดยดูค่าจากตาราง t -distribution ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95.45% ได้ค่า effective degree of freedom (V_{eff}) ทุกจุดอุณหภูมิสอบเทียบทั้ง 2 วิธี เท่ากับ ∞ และค่า coverage factor (k) ทุกจุดสอบเทียบทั้ง 2 วิธี เท่ากับ 2 ตามตารางที่ 21 ดังนั้นจึงได้ผลการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด (U) ของทั้ง 2 วิธีได้ตามตารางที่ 36-37 ในภาคผนวก ก และ ข และผลการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดระหว่างวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20 ตามตารางที่ 22

จะเห็นว่าผลการคำนวณค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม (u_c) ของวิธี Euramet CG-20 มีค่าสูงกว่าวิธี TLAS G-20 ทำให้ค่าความไม่แน่นอนของการวัด (U) สูงกว่าด้วย ซึ่งที่ผลการประมาณค่า U ในวิธี Euramet CG-20 มีค่าสูงกว่าวิธี TLAS G-20 หลายเท่า เนื่องจากการประมาณค่า U มีการนำแหล่งค่าความไม่แน่นอนของการวัดมาคำนวณต่างกัน โดยในวิธี Euramet CG-20 มีจำนวนแหล่งค่าความไม่แน่นอนของการวัดมากกว่า 1 ชนิด คือ temperature uniformity นอกจากนี้ค่า loading effect ของวิธี Euramet CG-20 ได้จากการทดสอบความแตกต่างของสภาวะบรรจุโหลดซึ่งมีค่าสูงกว่าค่า loading effect ของวิธี TLAS G-20 ที่หาจาก 20% ของ ค่า temperature uniformity แต่ถึงแม้ว่าค่า u_c ของทั้ง 2 วิธีจะแตกต่างกันมาก แต่เมื่อนำไปคำนวณค่า effective degree of freedom (V_{eff}) กลับให้ค่า V_{eff} เท่ากับ ∞ เท่ากัน ทุกจุดสอบเทียบ ทำให้ได้ค่า coverage factor (k) ทั้ง 2 วิธี มีค่าเท่ากับ 2 ทุกจุดสอบเทียบ ที่ความเชื่อมั่นประมาณ 95%

ตารางที่ 20 ค่าความไม่แน่นอนการวัดมาตรฐานรวม (u_c)

ตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N	Cal point (°C)	u_c (TLAS G-20) (°C)	u_c (Euramet CG-20) (°C)
20190000013001	25	0.055	0.141
12-18771	35	0.067	0.255
04-66267	37	0.082	0.284
04-92541	44	0.097	0.294
20230000001553	65	0.099	0.299

ตารางที่ 21 ค่า effective degree of freedom (V_{eff}) และ coverage factor (k)

ตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N	Cal point (°C)	TLAS G-20 (p=95.45%)		Euramet CG-20 (p=95.45%)	
		V_{eff}	k	V_{eff}	k
20190000013001	25	∞	2	∞	2
12-18771	35	∞	2	∞	2
04-66267	37	∞	2	∞	2
04-92541	44	∞	2	∞	2
20230000001553	65	∞	2	∞	2

ตารางที่ 22 ค่าความไม่แน่นอนของการวัด (U) และ ผลเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดระหว่างวิธี
TLAS G-20 และ Euramet CG-20

ตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N	Cal point (°C)	U TLAS G-20 ($k=2$)	U Euramet CG-20 ($k=2$)	ผลการเปรียบเทียบ U TLAS G-20 และ U Euramet CG-20
20190000013001	25	0.11	0.28	>2.55 เท่า
12-18771	35	0.13	0.51	>3.92 เท่า
04-66267	37	0.16	0.57	>3.56 เท่า
04-92541	44	0.19	0.59	>3.11 เท่า
20230000001553	65	0.20	0.60	>3.00 เท่า

4. ผลการเปรียบเทียบวิธีการสอบเทียบระหว่างวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20 โดยใช้หลักการทางสถิติ E_n scores (E_n)

จากผลการเปรียบเทียบวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20 โดยใช้ค่าสถิติ E_n scores ตาม ISO 13528: 2022 พบว่า ค่า $|E_n|$ มีค่าน้อยกว่า 1.0 ทุกตำแหน่งการสอบเทียบและทุกจุดสอบเทียบ ดังนั้นผลการเปรียบเทียบวิธีการสอบเทียบระหว่าง 2 วิธีนี้ ให้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ (satisfactory) ตามตารางที่ 23

ในการศึกษานี้ได้กำหนดให้ผลการสอบเทียบของวิธี Euramet CG-20 เป็นค่าอ้างอิง (Reference) และวิธี TLAS G-20 เป็นค่าของห้องปฏิบัติการ (Lab) เนื่องด้วยวิธี Euramet CG-20 เป็นวิธีมาตรฐานที่ได้รับการพัฒนาโดยองค์กรมาตรวิทยาแห่งยุโรป ที่มีความสามารถทางวิชาการและมีความน่าเชื่อถือ ส่วนวิธี TLAS G-20 เป็นวิธีที่ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือสาขาอุณหภูมิ สดส. ได้รับการรับรองจาก สมอ. และจัดทำขึ้นโดย สมอ. เพื่อให้เป็นวิธีมาตรฐานเพื่อใช้ในประเทศ ดังนั้นจึงกำหนดให้วิธี TLAS G-20 เป็นค่าของห้องปฏิบัติการ จากผลการเปรียบเทียบของทั้ง 2 วิธี ให้ผลอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ดังนั้นห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือสาขาอุณหภูมิ จึงสามารถขอการรับรองในวิธี Euramet CG-20 จากสมอ. เพิ่มอีกหนึ่งวิธีมาใช้สอบเทียบได้ ซึ่งจะทำให้ผู้รับบริการของ สดส. สามารถเลือกวิธีการสอบเทียบที่เหมาะสมกับความต้องการได้

ตารางที่ 23 ค่า E_n scores ของผลการเปรียบเทียบวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20

TLAS G-20 Position	Euramet CG-20 Position	$ E_n $				
		25 °C	35 °C	37 °C	44 °C	65 °C
1	1	0.00	0.01	0.00	0.01	0.17
2	2	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00
3	4	0.00	0.00	0.00	0.16	0.15
4	3	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00
5	6	0.00	0.01	0.00	0.22	0.14
6	7	0.00	0.01	0.00	0.51	0.31
7	9	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
8	8	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
9 (Ref.)	5(Ref.)	0.00	0.20	0.31	0.40	0.37

5. ผลการทวนสอบของการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อตามวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20

จากผลการทวนสอบการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ Serial No. 20190000013001, 12-18771, 04-66267, 04-92541 และ 20230000001553 ที่จุดสอบเทียบ 25 °C, 35 °C, 37 °C, 44 °C และ 65 °C ตามลำดับ โดยติดตั้งหัววัดอุณหภูมิจำนวน 9 ตำแหน่งการสอบเทียบตามวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20 พบว่า ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C ให้ผลการทวนสอบ ผ่านทุกจุดสอบเทียบและทุกตำแหน่งการสอบเทียบตามตารางที่ 24 - 30 และ 32 - 35 และภาพผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ ภาพที่ 14 - 20 และ 22 - 25 ยกเว้นที่จุดอุณหภูมิ 35 °C ที่สอบเทียบด้วยวิธี Euramet CG-20 ที่มีค่า acceptance criteria เท่ากับ ± 0.5 °C ซึ่งให้ผลการทวนสอบ ไม่ผ่านทุกตำแหน่งการสอบเทียบ ตามตารางที่ 31 และภาพที่ 21

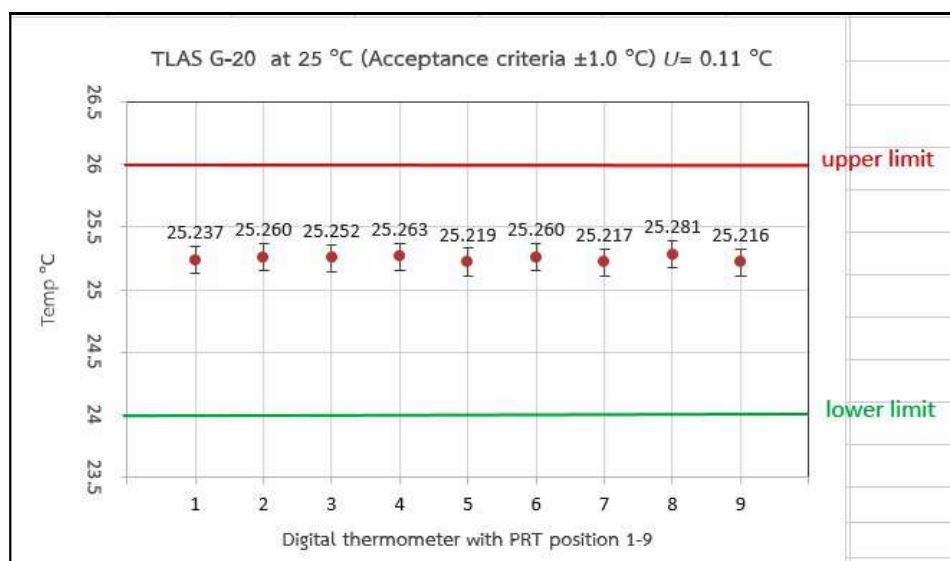
จะเห็นได้ว่าถึงแม้ทั้ง 2 วิธีจะให้ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ต่างกันมาก แต่เมื่อทวนสอบที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C ผลการทวนสอบยังผ่านทุกจุดสอบเทียบและทุกตำแหน่งการสอบเทียบ ดังนั้นตู้บ่มเพาะเชื้อของห้องปฏิบัติการที่ใช้เกณฑ์การยอมรับเครื่องมือของผู้รับบริการ หรือ เกณฑ์การยอมรับของวิธีทดสอบที่มีค่า acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C เช่น วิธี ISO 10272-1: 2017, ISO 11290-1: 2017, ISO 21527-2: 2008, ISO 6888-1: 2021, ISO 21528-1: 2017, ISO 21528-2: 2017, Nordic committee on food analysis, NMKL method no.68, ISO 16649-2: 2001 เป็นต้น จะสามารถนำตู้บ่มเพาะเชื้อไปใช้งานได้ แต่ที่ผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อด้วยวิธี Euramet CG-20 ที่จุดอุณหภูมิ 35 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 0.5 °C ให้ผลการทวนสอบไม่ผ่านทุกตำแหน่งการสอบเทียบนั้น เนื่องจากการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดในวิธีสอบเทียบ Euramet CG-20 มีค่าสูงในขณะที่ค่า acceptance criteria ของวิธีทดสอบค่อนข้างต่ำ ดังนั้นเมื่อนำค่าปริมาณที่วัดได้รวมกับค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะเกินช่วงของ acceptance zone ทำให้ไม่สามารถนำตู้บ่มเพาะเชื้อไปใช้ได้ ในขณะที่การสอบเทียบด้วยวิธี TLAS G-20 ให้ผลการทวนสอบผ่านทุกตำแหน่งการสอบเทียบ เพราะได้ค่าความไม่แน่นอนของการวัดต่ำกว่า เมื่อนำค่าปริมาณที่วัดได้รวมกับค่าความไม่แน่นอนของการวัดจึงไม่เกินช่วงของ acceptance zone ซึ่งหากผู้รับบริการต้องการใช้ตู้บ่มเพาะเชื้อในการทดสอบเชื้อ *Escherichia coli* หรือ Coliform bacteria ด้วยวิธีทดสอบ FDA BAM online Chapter 4 จึงควรเลือกห้องปฏิบัติการสอบเทียบของ สตส. หรือ ห้องปฏิบัติการอื่นที่สอบเทียบด้วยวิธี TLAS G-20 ก็จะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า เพราะมีโอกาสผ่านการทวนสอบมากกว่า วิธี Euramet CG-20 ทั้งนี้หากผู้รับบริการมีเกณฑ์การยอมรับที่ ± 1.0 °C ขึ้นไป ก็สามารถเลือกสอบเทียบได้ทั้ง 2 วิธี ซึ่งการที่ผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อด้วยวิธี Euramet CG-20 ได้ค่าความไม่แน่นอนของการวัดมากกว่าวิธี TLAS G-20 เพราะนำค่า temperature uniformity มาใช้ในการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัดเพิ่มอีก 1 แหล่ง ดังนั้นวิธี Euramet CG-20 จึงอาจไม่ใช่ตัวเลือกที่ดีในการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อที่ใช้งานมานานที่มีประสิทธิภาพต่ำลง เพราะมีค่า temperature uniformity ค่อนข้างสูง ทำให้ค่าความไม่แน่นอนของการวัดในวิธี Euramet CG-20 สูงมากยิ่งขึ้น และถึงแม้ว่าการสอบเทียบด้วยวิธี TLAS G-20 จะมีโอกาสผ่านเกณฑ์การทวนสอบสูงกว่าการสอบเทียบด้วยวิธี Euramet CG-20 ในการประเมินความใช้ได้ของเครื่องมือหลังจากส่งสอบเทียบก็ตาม แต่การที่วิธี Euramet CG-20 มีค่าความไม่แน่นอนในการวัดสูงนั้น อาจเหมาะสมกับผู้รับบริการที่ต้องการค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่มีการทดสอบหาค่า Loading effect ที่ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงของผู้ใช้ และยังเป็นผลดีกับห้องปฏิบัติการที่ต้องการซื้อตู้บ่มเพาะเชื้อใหม่โดยกำหนดให้ใช้วิธี Euramet CG-20 เป็นวิธีสอบเทียบในการตรวจรับเครื่องมือ เพราะโอกาสผ่านเกณฑ์การยอมรับในกระบวนการตรวจรับจะมีความจำกัดมากยิ่งขึ้น ทำให้ห้องปฏิบัติการได้รับเครื่องมือที่มีค่า

specification ที่ดีขึ้น และยังทำให้ผู้ผลิตเครื่องมือต้องมีการปรับตัวและพัฒนาเครื่องมือให้มีค่า specification ที่ดียิ่งขึ้นกว่าเดิม เพื่อรองรับเกณฑ์การยอมรับเครื่องมือในกระบวนการตรวจรับเครื่องมือของผู้ซื้อในอนาคต

ตารางที่ 24 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 20190000013001 ตามวิธี TLAS G-20
จุดสอบเทียบ 25 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

Position	y	U	Acceptance zone (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	25.237	0.11	24-26 °C	25.347	25.127	pass
2	25.260	0.11	24-26 °C	25.370	25.150	pass
3	25.252	0.11	24-26 °C	25.362	25.142	pass
4	25.263	0.11	24-26 °C	25.373	25.153	pass
5	25.219	0.11	24-26 °C	25.329	25.109	pass
6	25.260	0.11	24-26 °C	25.370	25.150	pass
7	25.217	0.11	24-26 °C	25.327	25.107	pass
8	25.281	0.11	24-26 °C	25.391	25.171	pass
9 (Ref.)	25.216	0.11	24-26 °C	25.326	25.106	pass

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

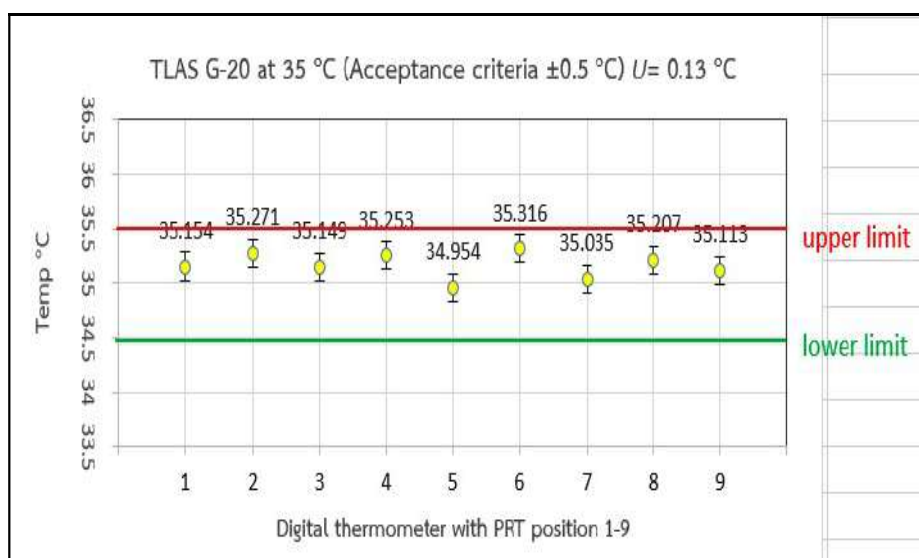


ภาพ 14 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 20190000013001
ตามวิธี TLAS G-20 ที่จุดสอบเทียบ 25 °C acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

ตารางที่ 25 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 12-18771 ตามวิธี TLAS G-20 จุดสอบเทียบ 35 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 0.5 °C

Position	y	U	Acceptance zone (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	35.154	0.13	34.5-35.5 °C	35.284	35.024	pass
2	35.271	0.13	34.5-35.5 °C	35.401	35.141	pass
3	35.149	0.13	34.5-35.5 °C	35.279	35.019	pass
4	35.253	0.13	34.5-35.5 °C	35.383	35.123	pass
5	34.954	0.13	34.5-35.5 °C	35.084	34.824	pass
6	35.316	0.13	34.5-35.5 °C	35.446	35.186	pass
7	35.035	0.13	34.5-35.5 °C	35.165	34.905	pass
8	35.207	0.13	34.5-35.5 °C	35.337	35.077	pass
9 (Ref.)	35.113	0.13	34.5-35.5 °C	35.243	34.983	pass

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

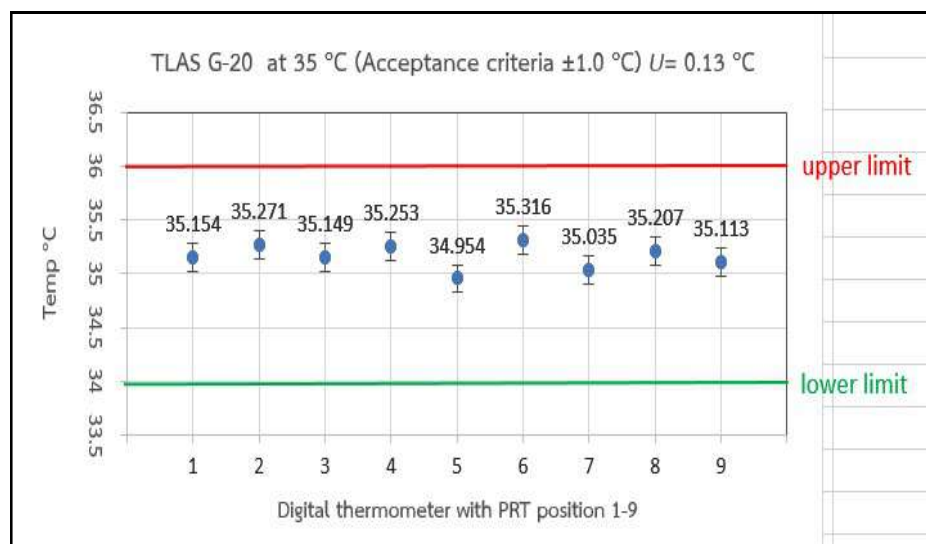


ภาพ 15 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 12-18771 ตามวิธี TLAS G-20 ที่จุดสอบเทียบ 35 °C acceptance criteria เท่ากับ ± 0.5 °C

ตารางที่ 26 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 12-18771 ตามวิธี TLAS G-20 จุดสอบเทียบ 35 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

Position	y	U	Acceptance zone (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	35.154	0.13	34.0-36.0 °C	35.284	35.024	pass
2	35.271	0.13	34.0-36.0 °C	35.401	35.141	pass
3	35.149	0.13	34.0-36.0 °C	35.279	35.019	pass
4	35.253	0.13	34.0-36.0 °C	35.383	35.123	pass
5	34.954	0.13	34.0-36.0 °C	35.084	34.824	pass
6	35.316	0.13	34.0-36.0 °C	35.446	35.186	pass
7	35.035	0.13	34.0-36.0 °C	35.165	34.905	pass
8	35.207	0.13	34.0-36.0 °C	35.337	35.077	pass
9 (Ref.)	35.113	0.13	34.0-36.0 °C	35.243	34.983	pass

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

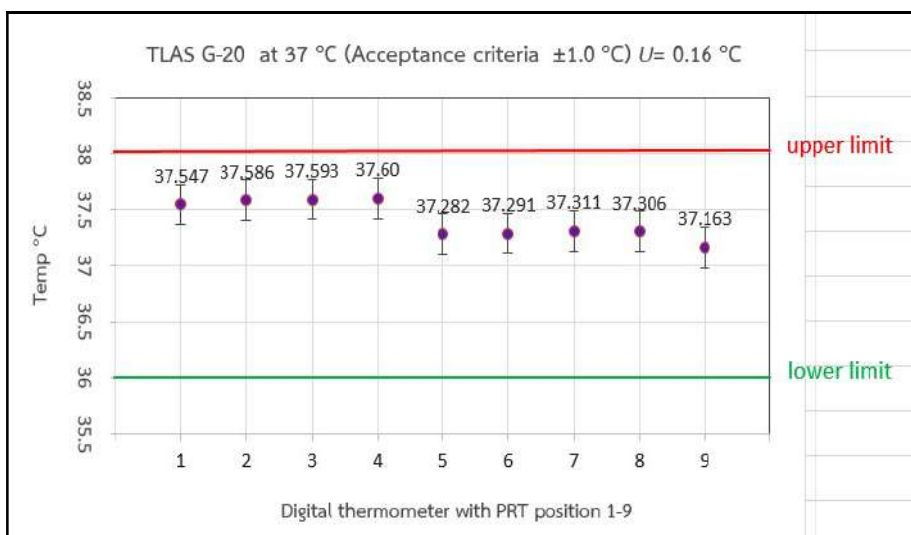


ภาพ 16 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 12-18771 ตามวิธี TLAS G-20 จุดสอบเทียบ 35 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

ตารางที่ 27 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 04-66267 ตามวิธี TLAS G-20 จุดสอบเทียบ 37 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

Position	y	U	Acceptance zone (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	37.309	0.16	36.0-38.0 °C	37.469	37.149	pass
2	37.358	0.16	36.0-38.0 °C	37.518	37.198	pass
3	37.325	0.16	36.0-38.0 °C	37.485	37.165	pass
4	37.316	0.16	36.0-38.0 °C	37.476	37.156	pass
5	37.007	0.16	36.0-38.0 °C	37.167	36.847	pass
6	37.384	0.16	36.0-38.0 °C	37.544	37.224	pass
7	36.926	0.16	36.0-38.0 °C	37.086	36.766	pass
8	37.271	0.16	36.0-38.0 °C	37.431	37.111	pass
9 (Ref.)	36.844	0.16	36.0-38.0 °C	37.004	36.684	pass

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

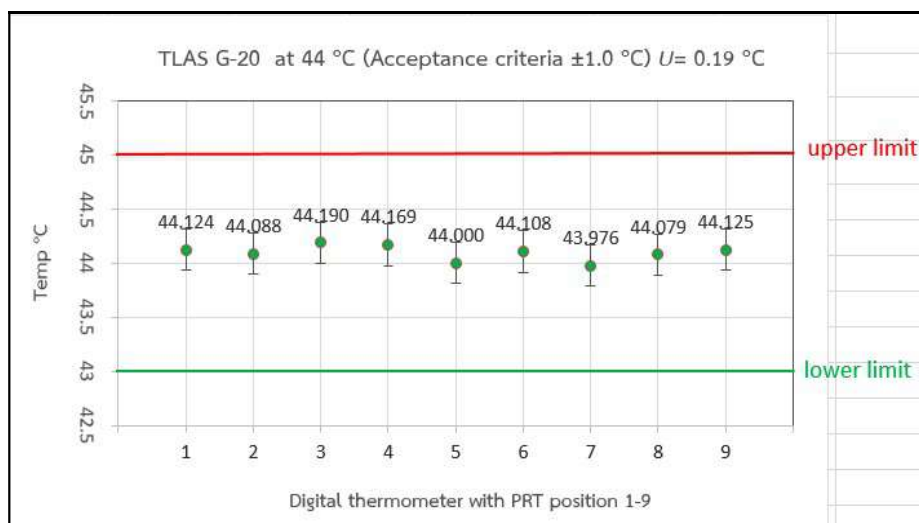


ภาพ 17 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 04-66267 ตามวิธี TLAS G-20 จุดสอบเทียบ 37 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

ตารางที่ 28 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 04-92541 ตามวิธี TLAS G-20 จุดสอบเทียบ 44 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

Position	y	U	Acceptance zone (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	44.124	0.19	43.0-45.0 °C	44.314	43.934	pass
2	44.088	0.19	43.0-45.0 °C	44.278	43.898	pass
3	44.190	0.19	43.0-45.0 °C	44.380	44.000	pass
4	44.169	0.19	43.0-45.0 °C	44.359	43.979	pass
5	44.000	0.19	43.0-45.0 °C	44.190	43.810	pass
6	44.108	0.19	43.0-45.0 °C	43.298	43.918	pass
7	43.976	0.19	43.0-45.0 °C	44.166	43.786	pass
8	44.079	0.19	43.0-45.0 °C	44.269	43.889	pass
9 (Ref.)	44.125	0.19	43.0-45.0 °C	44.315	43.935	pass

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

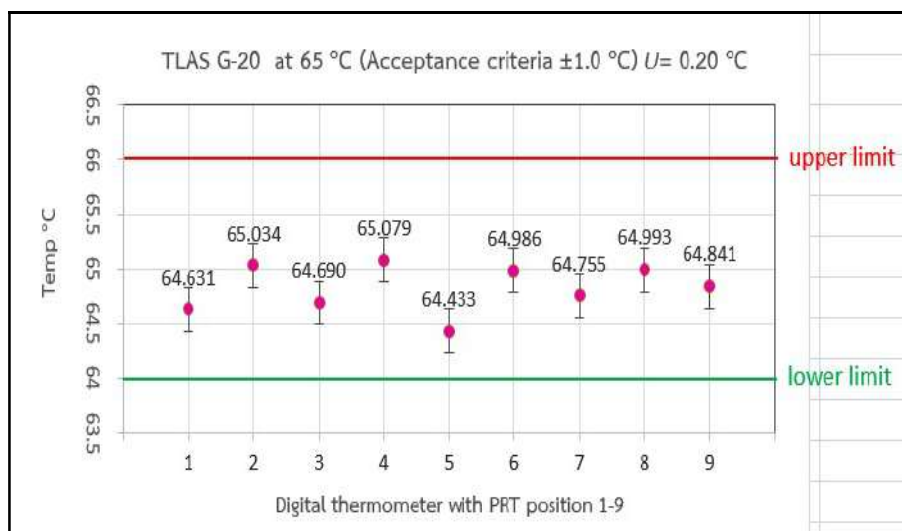


ภาพ 18 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 04-92541 ตามวิธี TLAS G-20 จุดสอบเทียบ 44 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

ตารางที่ 29 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 20230000001553 ตามวิธี TLAS G-20 จุดสอบเทียบ 65 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

Position	y	U	Acceptance zone (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	64.631	0.20	64.0-66.0 °C	64.831	64.431	pass
2	65.034	0.20	64.0-66.0 °C	65.234	64.834	pass
3	64.690	0.20	64.0-66.0 °C	64.890	64.490	pass
4	65.079	0.20	64.0-66.0 °C	65.279	64.879	pass
5	64.633	0.20	64.0-66.0 °C	64.833	64.433	pass
6	64.986	0.20	64.0-66.0 °C	65.186	64.786	pass
7	64.755	0.20	64.0-66.0 °C	64.955	64.555	pass
8	64.993	0.20	64.0-66.0 °C	65.193	64.793	pass
9 (Ref.)	64.841	0.20	64.0-66.0 °C	65.041	64.641	pass

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

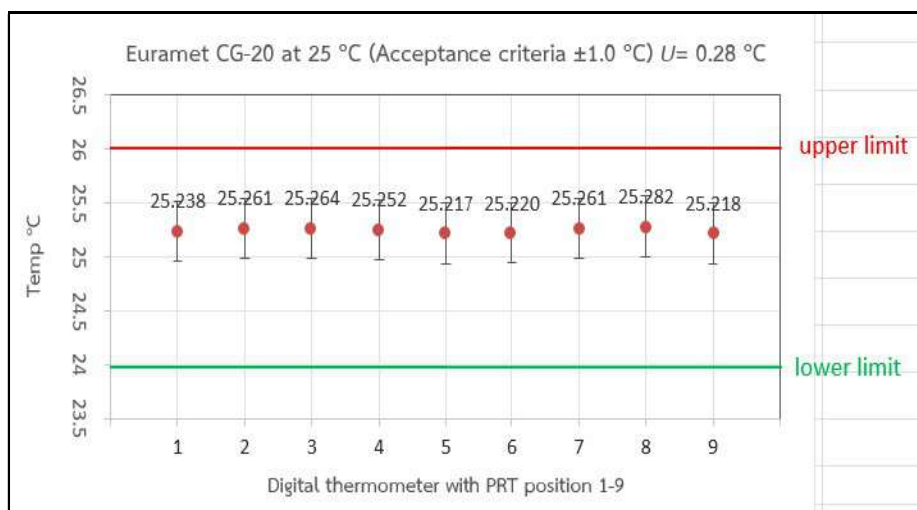


ภาพ 19 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 20230000001553 ตามวิธี TLAS G-20 จุดสอบเทียบ 65 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

ตารางที่ 30 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 20190000013001 ตามวิธี EURAMET CG-20
จุดสอบเทียบ 25 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

Position	y	U	Acceptance zone (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	25.238	0.28	24-26 °C	25.518	24.958	pass
2	25.261	0.28	24-26 °C	25.541	24.981	pass
3	25.264	0.28	24-26 °C	25.544	24.984	pass
4	25.252	0.28	24-26 °C	25.532	24.972	pass
5 (Ref.)	25.217	0.28	24-26 °C	25.497	24.937	pass
6	25.220	0.28	24-26 °C	25.500	24.940	pass
7	25.261	0.28	24-26 °C	25.541	24.981	pass
8	25.282	0.28	24-26 °C	25.562	25.002	pass
9	25.218	0.28	24-26 °C	25.498	25.938	pass

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

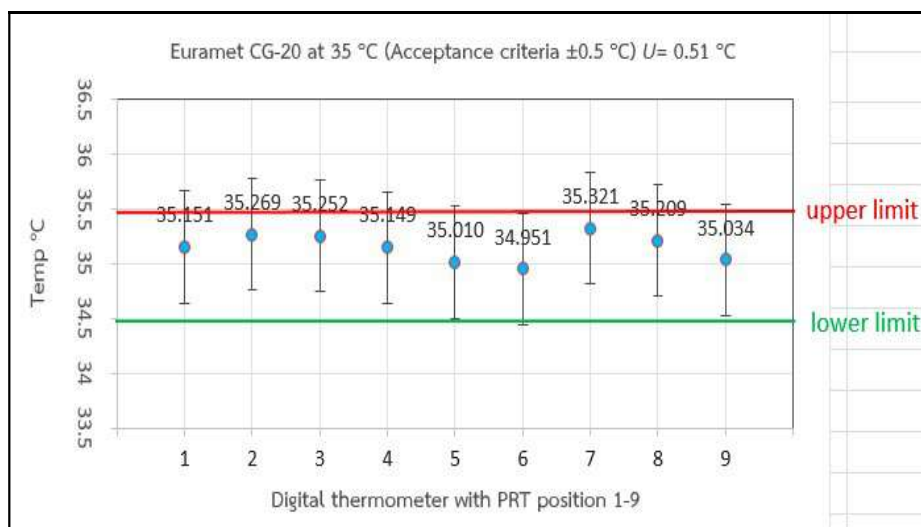


ภาพ 20 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 20190000013001
ตามวิธี EURAMET CG-20 จุดสอบเทียบ 25 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

ตารางที่ 31 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 12-18771 ตามวิธี EURAMET CG-20 จุดสอบเทียบ 35 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 0.5 °C

Position	y	U	Acceptance zone (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	35.151	0.51	34.5-35.5 °C	35.661	34.641	fail
2	35.269	0.51	34.5-35.5 °C	35.779	34.759	fail
3	35.252	0.51	34.5-35.5 °C	35.762	34.742	fail
4	35.149	0.51	34.5-35.5 °C	35.659	34.639	fail
5 (Ref.)	35.010	0.51	34.5-35.5 °C	35.520	34.500	fail
6	34.951	0.51	34.5-35.5 °C	35.461	34.441	fail
7	35.321	0.51	34.5-35.5 °C	35.831	34.811	fail
8	35.209	0.51	34.5-35.5 °C	35.719	34.699	fail
9	35.034	0.51	34.5-35.5 °C	35.544	34.524	fail

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

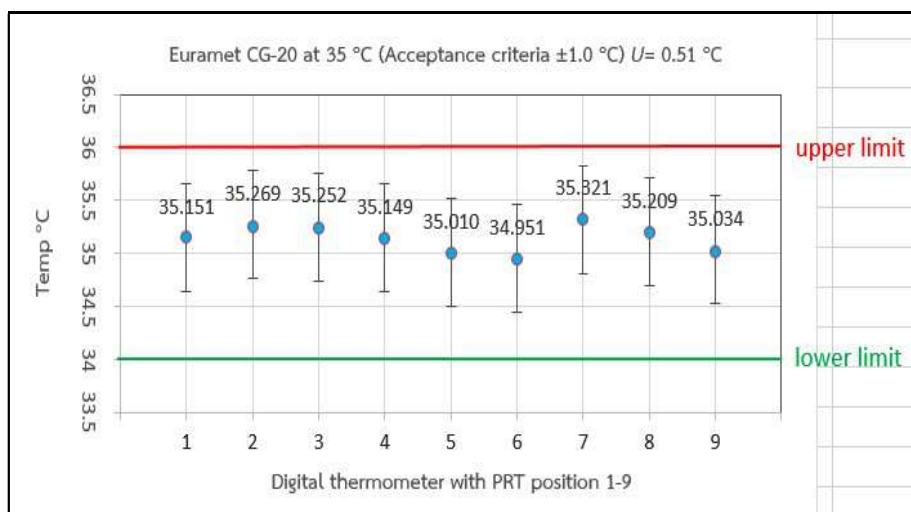


ภาพ 21 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N:12-18771 ตามวิธี EURAMET CG-20 จุดสอบเทียบ 35 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 0.5 °C

ตารางที่ 32 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 12-18771 ตามวิธี EURAMET CG-20
จุดสอบเทียบ 35 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

Position	y	U	Acceptance zone (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	35.151	0.51	34.0-36.0 °C	35.661	34.641	pass
2	35.269	0.51	34.0-36.0 °C	35.779	34.759	pass
3	35.252	0.51	34.0-36.0 °C	35.762	34.642	pass
4	35.149	0.51	34.0-36.0 °C	35.659	34.639	pass
5 (Ref.)	35.010	0.51	34.0-36.0 °C	35.520	34.500	pass
6	34.951	0.51	34.0-36.0 °C	35.461	34.441	pass
7	35.321	0.51	34.0-36.0 °C	35.831	34.811	pass
8	35.209	0.51	34.0-36.0 °C	35.719	34.699	pass
9	35.034	0.51	34.0-36.0 °C	35.544	34.524	pass

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

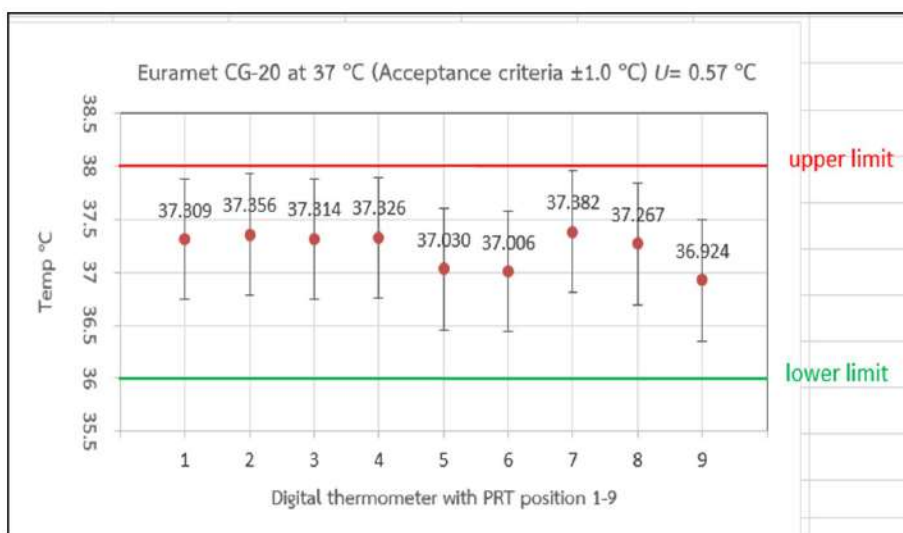


ภาพ 22 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 12-18771
ตามวิธี EURAMET CG-20 จุดสอบเทียบ 35 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

ตารางที่ 33 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 04-66267 ตามวิธี EURAMET CG-20
จุดสอบเทียบ 37 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

Position	y	U	Acceptance zone (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	37.309	0.57	36.0-38.0 °C	38.009	36.609	pass
2	37.356	0.57	36.0-38.0 °C	38.056	36.656	pass
3	37.314	0.57	36.0-38.0 °C	38.014	36.614	pass
4	37.326	0.57	36.0-38.0 °C	38.026	36.626	pass
5 (Ref.)	37.030	0.57	36.0-38.0 °C	37.543	36.143	pass
6	37.006	0.57	36.0-38.0 °C	38.706	36.306	pass
7	36.382	0.57	36.0-38.0 °C	37.082	36.682	pass
8	37.267	0.57	36.0-38.0 °C	37.967	36.567	pass
9	36.924	0.57	36.0-38.0 °C	37.624	36.224	pass

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

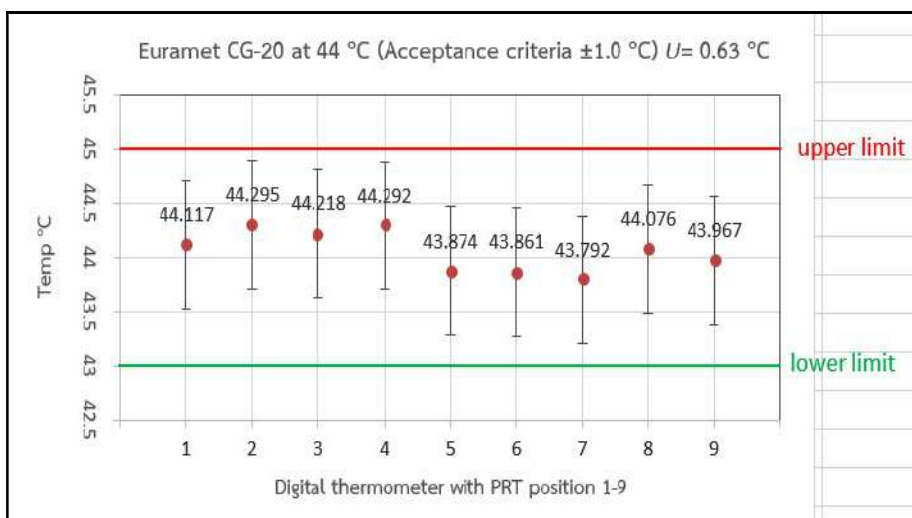


ภาพ 23 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 04-66267
ตามวิธี EURAMET CG-20 จุดสอบเทียบ 37 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

ตารางที่ 34 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้หม่เพาะเชื้อ S/N: 04-92541 ตามวิธี EURAMET CG-20
จุดสอบเทียบ 44 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

Position	y	U	Acceptance criteria (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	44.117	0.59	43.0-45.0 °C	44.707	43.527	pass
2	44.295	0.59	43.0-45.0 °C	44.885	43.705	pass
3	44.218	0.59	43.0-45.0 °C	44.808	43.628	pass
4	44.292	0.59	43.0-45.0 °C	44.882	43.702	pass
5 (Ref.)	43.874	0.59	43.0-45.0 °C	44.464	43.284	pass
6	43.861	0.59	43.0-45.0 °C	44.451	43.271	pass
7	43.792	0.59	43.0-45.0 °C	44.383	43.202	pass
8	44.076	0.59	43.0-45.0 °C	44.666	43.486	pass
9	43.967	0.59	43.0-45.0 °C	44.557	43.377	pass

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด

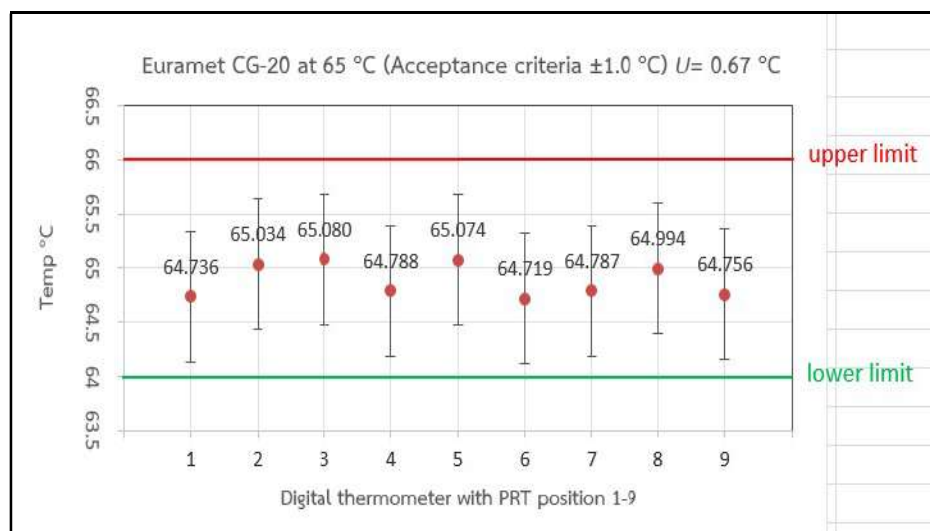


ภาพ 24 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้หม่เพาะเชื้อ S/N: 04-92541
ตามวิธี EURAMET CG-20 จุดสอบเทียบ 44 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

ตารางที่ 35 ผลการทวนสอบของผลสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 20230000001553 ตามวิธี EURAMET CG-20
จุดสอบเทียบ 65 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

Position	y	U	Acceptance criteria (°C)	y+U	y-U	Verification result
1	64.736	0.60	64.0-66.0 °C	65.336	64.136	pass
2	65.034	0.60	64.0-66.0 °C	65.634	64.434	pass
3	65.080	0.60	64.0-66.0 °C	65.680	64.480	pass
4	64.788	0.60	64.0-66.0 °C	65.388	63.188	pass
5 (Ref.)	64.074	0.60	64.0-66.0 °C	65.674	64.474	pass
6	64.719	0.60	64.0-66.0 °C	65.319	64.119	pass
7	64.787	0.60	64.0-66.0 °C	65.387	64.187	pass
8	64.994	0.60	64.0-66.0 °C	65.594	64.394	pass
9	64.756	0.60	64.0-66.0 °C	65.356	64.156	pass

y คือ ค่าปริมาณวัดได้เฉลี่ย และ U คือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัด



ภาพ 25 ผลการทวนสอบ 9 ตำแหน่งจากผลการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อ S/N: 20230000001553
ตามวิธี EURAMET CG-20 จุดสอบเทียบ 65 °C ที่ acceptance criteria เท่ากับ ± 1.0 °C

สรุปผล

การเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดและผลการทวนสอบของวิธีการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อของ 2 วิธี ระหว่าง TLAS G-20 และ Euramet CG-20 โดยใช้ data logger with PRT เป็นเครื่องมือมาตรฐาน ใบรับรองการสอบเทียบเลขที่ 23-1170-027 สอบเทียบวันที่ 5 กันยายน 2523 โดยติดตั้งหัววัดอุณหภูมิทั้งหมด 9 ตำแหน่งสอบเทียบ ใช้ตู้บ่มเพาะเชื้อที่มีค่าการแยกขีดที่ 0.1°C มีปริมาตรไม่เกิน 1 ลูกบาศก์เมตร Serial No. 20190000013001, 12-18771, 04-66267, 04-92541 และ 20230000001553 เป็นตัวอย่างสอบเทียบ และสอบเทียบที่จุดสอบเทียบ 25°C , 35°C , 37°C , 44°C และ 65°C ตามลำดับ

จากผลการสอบเทียบพบว่า ค่าปริมาณการวัดอุณหภูมิเฉลี่ยทั้ง 2 วิธีมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่งของแต่ละจุดสอบเทียบ และมีค่าการแปรผันรวมที่แตกต่างกันไปตามประสิทธิภาพของแต่ละตู้บ่มเพาะเชื้อ ส่วนผลการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัด พบว่าวิธี Euramet CG-20 มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดมากกว่า 2.55, 3.92, 3.56, 3.11 และ 3.00 เท่าของวิธี TLAS G-20 ตามลำดับ แต่มีผลการเปรียบเทียบวิธีอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ โดยมีค่า $|E_n| < 1.0$ ทุกจุดสอบเทียบและทุกตำแหน่งการสอบเทียบ ส่วนผลการทวนสอบตู้บ่มเพาะเชื้อที่สอบเทียบด้วยวิธี Euramet CG-20 ที่จุดสอบเทียบ 35°C มีค่า acceptance criteria เท่ากับ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ตามวิธีทดสอบ FDA BAM online Chapter 4 พบว่า ผลการทวนสอบไม่ผ่านทุกตำแหน่งการสอบเทียบ ในทางกลับกันผลการสอบเทียบด้วยวิธี TLAS G-20 ได้ผลการทวนสอบผ่านทุกตำแหน่งการสอบเทียบ ส่วนผลการทวนสอบของทั้ง 2 วิธี ที่จุดสอบเทียบ 25°C , 35°C , 37°C , 44°C และ 65°C ตามเกณฑ์การยอมรับเครื่องมือของห้องปฏิบัติการ หรือ เกณฑ์การยอมรับของวิธีทดสอบที่มีค่า acceptance criteria เท่ากับ $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ เช่น ISO 10272-1: 2017, ISO 11290-1: 2017, ISO 21527-2: 2008, ISO 6888-1: 2021, ISO 21528-1: 2017, ISO 21528-2: 2017, Nordic committee on food analysis, NMKL method no.68, ISO 16649-2: 2001 เป็นต้น พบว่าได้ผลการทวนสอบผ่านทุกจุดสอบเทียบและทุกตำแหน่งการสอบเทียบ

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือสาขาอุณหภูมิ สตส. สามารถนำวิธี TLAS G-20 และ Euramet CG-20 ไปให้บริการสอบเทียบได้ทั้ง 2 วิธี แต่ขึ้นอยู่กับเกณฑ์การยอมรับของผู้รับบริการ ซึ่งวิธี Euramet CG-20 ไม่ใช่ตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับห้องปฏิบัติการทดสอบที่มีเกณฑ์การยอมรับต่ำ เช่น เกณฑ์การยอมรับของวิธีทดสอบ FDA BAM online Chapter 4 ที่มีค่า acceptance criteria เท่ากับ $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ แต่ควรเลือกใช้วิธี TLAS G-20 ที่มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ต่ำกว่า ซึ่งจะเป็นทางเลือกที่ดีกว่า เพราะมีโอกาสผ่านการทวนสอบสูงกว่า แต่ในกรณีที่ห้องปฏิบัติการมีเกณฑ์การยอมรับที่กว้างกว่า ตามวิธีทดสอบเชื้อทางจุลชีววิทยาในมาตรฐานอื่นๆ เช่น ที่เกณฑ์การยอมรับ $\pm 1.0^{\circ}\text{C}$ จากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า ทั้ง 2 วิธีให้ผลการทวนสอบผ่านทุกจุดสอบเทียบ ดังนั้นในกรณีนี้ผู้รับบริการจึงสามารถเลือกใช้วิธีสอบเทียบได้ทั้ง 2 วิธี และการศึกษาครั้งนี้ทำให้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือสาขาอุณหภูมิ สตส. ได้ผลการสอบเทียบ ผลการเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนของการวัดและผลการทวนสอบ รวมทั้งผลการเปรียบเทียบวิธีสอบเทียบทั้ง 2 วิธี สำหรับใช้ประกอบการตัดสินใจของห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือสาขาอุณหภูมิ สตส. ในการขอการรับรองวิธี Euramet CG-20 เพิ่มอีกหนึ่งวิธี เพื่อเป็นทางเลือกให้แก่ผู้รับบริการของ สตส. และห้องปฏิบัติการอื่นๆของกรมปศุสัตว์ในอนาคต เช่น สถาบันสุขภาพสัตว์ และศูนย์วิจัยและพัฒนาการสัตวแพทย์ภาคต่างๆ เป็นต้น

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการสอบเทียบตู้บ่มเพาะเชื้อครั้งนี้ ใช้ตัวอย่างตู้บ่มเพาะเชื้อที่มีขนาดไม่เกิน 1 ลูกบาศก์เมตร ทำการสอบเทียบทั้งหมด 9 ตำแหน่ง แต่หากตู้บ่มเพาะเชื้อมีขนาดเกิน 1 ลูกบาศก์เมตร แนะนำให้เพิ่มจำนวนตำแหน่งติดตั้งหัววัดอุณหภูมิ เป็น 13 ตำแหน่ง ตามวิธีการสอบเทียบ

ตู้บ่มเพาะเชื้อที่ใช้เป็นตัวอย่างในการศึกษาเป็นชนิดของตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ช่วงอุณหภูมิปานกลาง หากต้องการศึกษาตู้ควบคุมช่วงอุณหภูมิต่ำหรือช่วงอุณหภูมิสูง เช่น ตู้เย็น ตู้แช่แข็ง หรือตู้อบลมร้อน สามารถดำเนินการตามขั้นตอนของการศึกษานี้ได้ แต่ต้องเปลี่ยนจุดสอบเทียบและจุดอุณหภูมิที่ใช้ในการตรวจสอบแหล่งค่าความไม่แน่นอนของการวัด รวมทั้งเกณฑ์การยอมรับเครื่องมือในการทวนสอบผลการสอบเทียบ

และในการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้เครื่องมือมาตรฐานในการสอบเทียบ ยี่ห้อ Fluke รุ่น 2638A และตัวอย่างสอบเทียบทั้งหมดเป็นตู้บ่มเพาะเชื้อของสำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ ดังนั้นผลการสอบเทียบ ได้แก่ค่าปริมาณการวัด และค่าความไม่แน่นอนของการวัด จึงเป็นค่าที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้เท่านั้น หากใช้เครื่องมือมาตรฐานเครื่องอื่น ต่างยี่ห้อ ต่างรุ่น หรือใช้ตัวอย่างสอบเทียบต่างกัน ผลการสอบเทียบที่ได้อาจแตกต่างจากการศึกษานี้

ส่วนค่าการแปรผันรวม เป็นค่าที่ได้จากการสอบเทียบและใช้รายงานประสิทธิภาพของตู้บ่มเพาะเชื้อ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ไม่สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากสอบเทียบที่จุดสอบเทียบต่างกันในแต่ละตู้บ่มเพาะเชื้อ แต่หากผู้สนใจต้องการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมอุณหภูมิของตู้บ่มเพาะเชื้อ ต้องออกแบบการศึกษาโดยกำหนดที่จุดสอบเทียบเดียวกันในตู้บ่มเพาะเชื้อคนละตู้และควบคุมปัจจัยอื่นๆที่มีผลกระทบ จึงจะได้ข้อมูลความแตกต่างของประสิทธิภาพในแต่ละตู้บ่มเพาะเชื้อ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ น.สพ.อุดม เจือจันทร์ ผู้อำนวยการสำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ ที่ให้โอกาสและการสนับสนุนในการศึกษาทดลอง

ขอขอบคุณ น.สพ.สมชาย วงศ์สมุทร ผู้เชี่ยวชาญด้านตรวจสอบคุณภาพน้ำนมและผลิตภัณฑ์นม และคุณวิภาดา สิริสมภพชัย ผู้เชี่ยวชาญด้านการวิเคราะห์คุณภาพสินค้าปศุสัตว์ ที่ให้คำปรึกษาในการทำการการศึกษาทดลอง

ขอขอบคุณ น.สพ. ชูศักดิ์ อาจสูงเนิน หัวหน้ากลุ่มตรวจสอบคุณภาพยาสัตว์และวัตถุอันตรายด้านการปศุสัตว์ น.สพ.ชัยวุฒิ วิสุทธิ หัวหน้ากลุ่มพัฒนาระบบคุณภาพห้องปฏิบัติการ คุณภิรมภรณ์ เกื่อนล้ำแก้ว หัวหน้ากลุ่มบริหารจัดการห้องปฏิบัติการ คุณสรเฉลิม ศักดิ์ศรี นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการ คุณกำชัย สิงห์วิวัฒน์ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ดร.อ้อยใจ อ่องทราย และ ดร.จริยา บัวเจริญ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ และคณะกรรมการวิชาการ สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำในการทำการการศึกษาทดลอง

ขอขอบคุณ คุณสุนัฐวดี โชติชม นักวิทยาศาสตร์การแพทย์ และบุคลากรงานสอบเทียบเครื่องมือสาขาอุณหภูมิ กลุ่มพัฒนาระบบคุณภาพห้องปฏิบัติการในความร่วมมือปฏิบัติงานให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2562. GLA-23, ข้อเสนอแนะประกอบกรตรวจสอบประเมิน ตาม มอก.17025-2561. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (TISI) กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ. 35 หน้า.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2564. GLA-20, ข้อเสนอแนะการตีความและการนำ Euramet CG-20 ไปใช้สอบเทียบตู้ควบคุมอุณหภูมิ. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (TISI) กระทรวงอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ. 30 หน้า.
- BIPM. 2008. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM) – ประมวลศัพท์มาตรฐานระหว่างประเทศ แนวคิดพื้นฐานและแนวคิดทั่วไปพร้อมคำศัพท์ที่เชื่อมสัมพันธ์ (วีไอเอ็ม), 3rd edition. JCGM 200:2008. The International Bureau of Weights and Measures. France. 130 pages.
- BIPM. 2018. Guide to the realization of the ITS-90 platinum resistance thermometry. The International Bureau of Weights and Measures. France. 56 pages.
- Euramet. 2017. Guidelines on the Calibration of Temperature and/or Humidity controlled Enclosures. 5th edition. The European Association of National Metrology Institutes. Germany. 12 pages.
- Fluke Corporation. 2013. 2638A Hydra Series III Data Acquisition Unit Users Manual. 1st edition. Fluke Corporation. USA. 126 pages.
- IEC. 2022. IEC 60751, Industrial Platinum Resistance Thermometers and Platinum Temperature sensors. 3rd edition. International Electrotechnical Commission. Switzerland. 52 pages.
- 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. 7 pages.
- ISO. 2001. ISO 16649-2, Microbiology of the food and animal feeding stuffs – Horizontal method for the enumeration of β -glucuronidase – positive *Escherichia coli* – Colony-count technique at 44 °C using 5 – Bromo – 4 – chloro -3 – indolyl β – D - glucuronide. 2nd edition. The International Organization for Standardization. Switzerland. 8 pages.
- ISO. 2008. ISO 21527-2, Microbiology of the food and animal feeding stuffs – Horizontal method for the enumeration of yeasts and moulds – Part 2: Colony count technique in products with water activity less than or equal to 0,95. 1st edition. The International Organization for Standardization. Switzerland. 9 pages.
- ISO. 2017. ISO 10272-1, Microbiology of the food chain – Horizontal method for detection and enumeration of *Campylobacter* spp. – Part 1 Detection method. 2nd edition. The International Organization for Standardization. Switzerland. 32 pages

- ISO. 2017. ISO 11290-1, Microbiology of the food chain – Horizontal method for the detection and enumeration of *Listeria monocytogenes* and of *Listeria spp.* – Part 1 Detection method. 2nd edition. The International Organization for Standardization. Switzerland. 36 pages.
- ISO. 2017. ISO/IEC 17025: 2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. 3rd edition. The International Organization for Standardization. Switzerland. 30 pages.
- ISO. 2017. ISO 21528-1, Microbiology of the food chain - Horizontal method for the detection and enumeration of Enterobacteriaceae – Part 1: Detection of Enterobacteriaceae. 2nd edition. The International Organization for Standardization. Switzerland. 17 pages.
- ISO. 2017. ISO 21528-2, Microbiology of the food chain - Horizontal method for the detection and enumeration of Enterobacteriaceae – Part 2: Colony-count technique. 2nd edition. The International Organization for Standardization. Switzerland. 15 pages.
- ISO. 2021. ISO 6888-1, Microbiology of the food chain - Horizontal method for the enumeration of coagulase-positive staphylococci (*Staphylococcus aureus* and other species) - Part 1: Method using Baird-Parker agar medium. 2nd edition. The International Organization for Standardization. Switzerland. 20 pages.
- ISO. 2022. ISO 13528, Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. 3rd edition. The International Organization for Standardization. Switzerland. 93 pages.
- Marjon H.J., Wells-Bennika, Patrick W.M. Janssen, Verena Klaus, Chi Yang, Marcel H. Zwietering, Heidi M.W. Den Besten. 2018. Heat resistance of spores of 18 strains of *Geobacillus stearothermophilus* and impact of culturing conditions. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168160518308833>. Accessed June 6, 2024.
- Merck KGaA. 2000. Merck Microbiology Manual. 12th eds. Merck KGaA. Darmstadt, Germany. 689 pages
- NMKL 2011. NMKL method No.68. Enterococcus, Determination in foods and feeds No. 68. In Nordic Committee on Food Analysis. Oslo, Norway. 7 pages.
- P. FENG, S. D. WEAGANT, M.A. GRANT, W. BURKHARDT. 2020. FDA BAM online test method Chapter 4: Enumeration of *Escherichia coli* and the Coliform Bacteria. [Online]. Available: <http://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-4-enumeration-escherichia-coli-and-coliform-bacteria>. Accessed October 9, 2020.
- Terragene S.A. 2023. Quality Certification Certificado de calidad Bionova® BT20. Santa Fe, Argentina. 2 pages.
- TISI. 2008. TLAS G-20, Publication Reference, Guidelines for Calibration and Checks of Temperature Controlled Enclosures. Thai Laboratory Accreditation Scheme. Thai Industrial Standards Institute. Ministry of Industry. Thailand. 20 pages.
- UKAS. 2024. M3003, The expression of uncertainty and confidence in measurement. 6th edition, United Kingdom Accreditation Service. United Kingdom. 90 pages.
- 3M Company. 2016. 3MTM ATTESTTM STEAM INCUBATOR (56°C). 3M Company. MN, USA. 2 pages.

ภาคผนวก ก

ตารางที่ 36 ตารางการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด ตามวิธี TLAS G-20

Calibration point							25 °C		35 °C		37 °C		44 °C		65 °C	
Symbol (U_{xi})	Type	Source of Uncertainty	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)
U_{Cal_STD}	B	Calibration of Standard	Normal	2.0	1.0	∞	0.040	0.020	0.040	0.020	0.040	0.020	0.040	0.020	0.040	0.020
U_{drift_STD}	B	Drift of Standard	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.0391	0.023	0.0391	0.023	0.0391	0.023	0.1029	0.059	0.1029	0.059
U_{res_STD}	B	Resolution of Standard	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.0005	0.0003	0.0005	0.0003	0.0005	0.0003	0.0005	0.0003	0.0005	0.0003
U_{Rad}	B	Radiation of Standard	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.004	0.002	0.010	0.006	0.019	0.011	0.035	0.020	0.058	0.033
U_{Self_Heat}	B	Self heating of Standard	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.047	0.027	0.020	0.012	0.058	0.033	0.017	0.010	0.034	0.020
U_{Temp_Coeffi}	B	Temperature Coefficient of Standard	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.034	0.020	0.034	0.020	0.034	0.020	0.034	0.020	0.034	0.020
U_{Error_Inter}	B	Error of interpolation equation	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.0149	0.009	0.0149	0.009	0.0149	0.009	0.0293	0.017	0.0293	0.017
U_{rep_UUC}	A	Repeatability of UUC indicator	Normal	1.0	1.0	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U_{res_UUC}	B	Resolution of UUC indicator	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.05	0.029	0.05	0.029	0.05	0.029	0.05	0.029	0.05	0.029
U_{load}	B	Loading effect	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.0134	0.008	0.0506	0.029	0.093	0.054	0.0448	0.026	0.0676	0.039
U_{stab}	B	Temperature Stability of UUC	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.014	0.008	0.063	0.036	0.031	0.018	0.091	0.053	0.064	0.037
u_C	-	Combined Standard Uncertainty	Normal					0.055		0.067		0.082		0.097		0.099
$V_{eff} =$								∞		∞		∞		∞		∞
$k =$								2		2		2		2		2
U	-	Uncertainty of Measurement	Normal					0.11		0.13		0.16		0.19		0.20

ภาคผนวก ข

ตารางที่ 37 ตารางการประมาณค่าความไม่แน่นอนของการวัด ตามวิธี Euramet CG-20

Calibration point							25 °C		35 °C		37 °C		44 °C		65 °C	
Symbol (U_{xi})	Type	Source of Uncertainty	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)
U_{Cal_STD}	B	Calibration of Standard	Normal	2.0	1.0	∞	0.040	0.020	0.040	0.020	0.040	0.020	0.040	0.020	0.040	0.0020
U_{drift_STD}	B	Drift of Standard	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.0391	0.023	0.0391	0.023	0.0391	0.023	0.1029	0.059	0.1029	0.059
U_{res_STD}	B	Resolution of Standard	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.0005	0.0003	0.0005	0.0003	0.0005	0.0003	0.0005	0.0003	0.0005	0.0003
U_{Rad}	B	Radiation of Standard	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.004	0.002	0.010	0.006	0.019	0.011	0.035	0.020	0.058	0.033
U_{Self_Heat}	B	Self heating of Standard	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.220	0.127	0.023	0.013	0.023	0.013	0.023	0.014	0.025	0.014
U_{Temp_Coeffi}	B	Temperature Coefficient of Standard	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.034	0.020	0.034	0.020	0.034	0.020	0.034	0.020	0.034	0.020
U_{Error_Inter}	B	Error of interpolation equation	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.0149	0.009	0.0149	0.009	0.0149	0.009	0.0293	0.017	0.0293	0.017
U_{rep_UUC}	A	Repeatability of UUC indicator	Normal	1.0	1.0	9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U_{res_UUC}	B	Resolution of UUC indicator	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.05	0.029	0.05	0.029	0.05	0.029	0.05	0.029	0.05	0.029
U_{load}	B	Loading effect	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.0102	0.006	0.0088	0.005	0.018	0.010	0.0196	0.011	0.0036	0.002
U_{stab}	B	Temperature Stability of UUC	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.013	0.008	0.063	0.036	0.060	0.035	0.072	0.041	0.062	0.036
U_{Uni}	B	Temperature Uniformity of UUC	Rectangular	1.7321	1.0	∞	0.067	0.039	0.429	0.248	0.481	0.278	0.486	0.281	0.494	0.285
u_C	-	Combined Standard Uncertainty	Normal					0.141		0.255		0.284		0.294		0.299
$V_{eff} =$								∞		∞		∞		∞		∞
$k =$								2		2		2		2		2
U	-	Uncertainty of Measurement	Normal					0.28		0.51		0.57		0.59		0.60