

การสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.001 มิลลิกรัม และ 0.01 มิลลิกรัม
ด้วยวิธี EURAMET cg-18 เพื่อรองรับงานสอบเทียบด้านปริมาตร

รัฐกานต์ ศรีศิริ* อาจารย์ ภาวะเกตุ

บทคัดย่อ

ปัจจุบันห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือ สาขามวล ได้รับการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025:2017 สำหรับการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธี UKAS LAB 14 อย่างไรก็ตาม การพัฒนาศักยภาพห้องปฏิบัติการให้สามารถรองรับวิธีการสอบเทียบที่หลากหลายมีความสำคัญต่อการสนับสนุนงานสอบเทียบในสาขาที่เกี่ยวข้อง โดยเฉพาะงานสอบเทียบด้านปริมาตรที่ต้องใช้ผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง ด้วยวิธี EURAMET cg-18 การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาผลการสอบเทียบและประเมินค่าความไม่แน่นอนของเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.001 มิลลิกรัม ที่จุดสอบเทียบ 0.001 ถึง 50 กรัม และความละเอียด 0.01 มิลลิกรัม ที่จุดสอบเทียบ 0.001 ถึง 200 กรัม ด้วยวิธี EURAMET cg-18 จากผลการศึกษา พบว่า การประเมินประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องชั่งทั้ง 2 เครื่อง มีระบบการชั่งที่ดีและให้ค่าการวัดที่ถูกต้องและแม่นยำ เมื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่งตามหลัก GUM และ EURAMET cg-18 มีแนวโน้มของค่าความไม่แน่นอนของการชั่งเพิ่มขึ้นตามขนาดของมวล เนื่องจากความไม่แน่นอนแบบ type B ที่มาจากแหล่งใหญ่ของความไม่แน่นอนเนื่องจากมวลอ้างอิง $u(m_{ref})$ มีความแปรผันตามขนาดของมวลที่ชั่ง ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงมาตรวิทยาของมาตรฐาน EURAMET cg-18 ทั้งนี้ ค่าความไม่แน่นอนของการชั่งจะถูกนำมาใช้กำหนดค่า CMC สำหรับยื่นขอขยายขอบข่ายการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 รายการสอบเทียบ non-automatic weighing instruments วิธี EURAMET cg-18 version 4.0 (11/2015) นอกจากนี้ ผลการทวนสอบเครื่องชั่งความละเอียด 0.001 มิลลิกรัม และ 0.01 มิลลิกรัม จำนวน 5 เครื่อง ให้ผลการทวนสอบผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้น วิธี EURAMET cg-18 สามารถนำไปใช้เป็นวิธีสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ให้กับงานสอบเทียบด้านปริมาตร เพื่อช่วยเพิ่มขีดความสามารถในการให้บริการสอบเทียบเครื่องมือ ด้านมวล และสนับสนุนการดำเนินงานสอบเทียบให้สอดคล้องตามมาตรฐาน ASTM E542-22

คำสำคัญ : การสอบเทียบ เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ EURAMET cg-18

เลขทะเบียนวิชาการ: 69(2)-0304-017

สำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ ถนนติวานนท์ ตำบลบางกะดี อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000

*ผู้รับผิดชอบ, e-mail: rattakan.s@gmail.com

Calibration of Electronic Balances with resolutions of 0.001 mg and 0.01 mg using the EURAMET cg-18 method for supporting volumetric calibration

Rattakan Srisiri* Ajaree Karakad

Abstract

At present, mass calibration laboratory have been accredited in accordance with ISO/IEC 17025:2017 for the calibration of electronic balances using the UKAS LAB 14 method. However, strengthening laboratory capability to support a broader range of calibration methodologies is essential for ensuring measurement traceability in related fields, particularly in volumetric calibration, which requires reliable balance calibration results obtained using the EURAMET cg-18 method. This study aims to investigate the calibration performance and evaluate the weighing uncertainty of electronic balances with resolutions of 0.001 mg and 0.01 mg using the EURAMET cg-18 method. The balance with a resolution of 0.001 mg was calibrated at points ranging from 0.001 g to 50 g, while the balance with a resolution of 0.01 mg was calibrated from 0.001 g to 200 g. The results showed that both balances demonstrate good weighing system performance and provide accurate measurement results. The evaluation of weighing uncertainty, conducted in accordance with the principles of guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) and EURAMET cg-18, indicates that uncertainty increases with increasing applied mass. This trend is primarily attributed to type B uncertainty components, particularly the uncertainty associated with the reference mass $u(m_{ref})$ which varies proportionally with the magnitude of the applied mass. This behavior is consistent with the metrological analysis described in EURAMET cg-18. The resulting weighing uncertainties will be used to establish the calibration and measurement capability (CMC) for extending the laboratory's accredited scope under ISO/IEC 17025 for the calibration of non-automatic weighing instruments (NAWI) using EURAMET cg-18 version 4.0 (11/2015). In addition, verification tests performed on five balances with resolutions of 0.001 mg and 0.01 mg met the specified acceptance criteria. Therefore, the EURAMET cg-18 method can be effectively applied for calibrating electronic balances used in volumetric calibration, thereby enhancing mass calibration service capability and supporting calibration practices in accordance with ASTM E542-22.

Keywords : Calibration, Electronic balance, EURAMET cg-18

Registered No. : 69(2)-0304-017

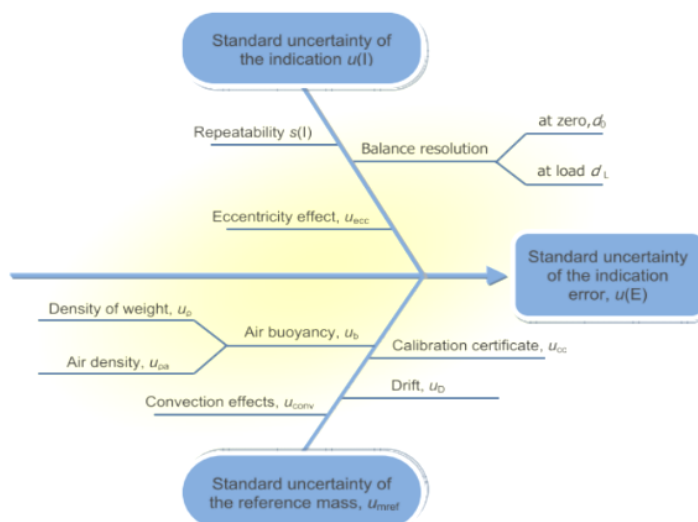
Bureau of Quality Control of Livestock Products, Tiwanon Rd., Bangkadi, Mueang, Pathumthani, 12000

*Corresponding author, e-mail: rattakan.s@gmail.com

บทนำ

เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ เป็นเครื่องมือวัดที่นิยมนำมาใช้ชั่งน้ำหนักในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากมีค่าความละเอียดในการอ่านค่าน้ำหนักได้สูง สามารถใช้งานได้สะดวก และดูแลรักษาง่าย (จิตตกานต์, 2565) อย่างไรก็ตาม เครื่องชั่งที่ใช้งานเป็นประจำอาจให้ค่าความถูกต้อง และแม่นยำลดลง อันเป็นผลมาจากการใช้งานและปัจจัยภายนอก เช่น การกระแทกของกลไกหรือสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ซึ่งจะนำไปสู่การสึกหรอหรือการเสื่อมสภาพของกลไกเมื่อเวลาผ่านไป (Rahman *et al.*, 2015) ดังนั้น เครื่องชั่งที่ใช้งานในห้องปฏิบัติการ จึงควรได้รับการสอบเทียบและบำรุงรักษาด้วยวิธีที่ถูกต้องอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้มั่นใจในผลการวัดที่แม่นยำและเชื่อถือได้ การสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์เป็นหนึ่งในกิจกรรมสำคัญในการประกันคุณภาพของห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025:2017 ข้อ 6.4.6 ที่ระบุว่า “เครื่องมือวัดต้องได้รับการสอบเทียบในกรณีความแม่นยำการวัดหรือความไม่แน่นอนของการวัดมีผลต่อความใช้ได้ของผลที่รายงาน และ/หรือเพื่อให้ผลที่รายงานสามารถสอบกลับได้ทางมาตรวิทยา” (ISO, 2017b) การสอบเทียบจึงช่วยให้ห้องปฏิบัติการมั่นใจในประสิทธิภาพของเครื่องมือ และสามารถตัดสินใจได้ว่าควรนำเครื่องมือชิ้นๆ มาใช้งานต่อไปหรือไม่ เพื่อป้องกันปัญหาที่เกิดจากการใช้เครื่องมือที่ไม่มีคุณลักษณะเหมาะสมทางมาตรวิทยา และช่วยลดความเสี่ยงจากข้อผิดพลาดในการควบคุมคุณภาพของผลการวัด

การสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ตามมาตรฐาน EURAMET calibration guide no. 18 (EURAMET cg-18) จัดทำขึ้นโดยเครือข่ายความร่วมมือด้านมาตรวิทยาของยุโรป เป็นวิธีสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่อัตโนมัติ (non-automatic weighing instruments: NAWI) ซึ่งเป็นเครื่องชั่งที่ต้องใช้ผู้ปฏิบัติงานในการดำเนินการชั่ง เช่น การยก-วางวัตถุบนเครื่องชั่ง รวมทั้งการอ่านผลการชั่ง โดยเครื่องชั่งสามารถแสดงค่าและกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เอง (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562) และในการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ใช้ตุ้มน้ำหนักตามมาตรฐาน OIML R111-1 สำหรับเป็นตุ้มน้ำหนักอ้างอิง และมีการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดจาก 2 แหล่งใหญ่ คือ standard uncertainty of the indication, $u(I)$ และ standard uncertainty of the reference mass, $u(m_{ref})$ แต่ละแหล่งประกอบด้วย 4 แหล่งย่อย รวมเป็น 8 แหล่งย่อย ดังรูปที่ 1 (Válcu *et al.*, 2016) โดยมีการนำแหล่งความไม่แน่นอนของ eccentricity และ convection effects มาใช้ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดเพิ่มเติม จึงทำให้ครอบคลุมแหล่งความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์มากกว่าวิธีอื่น



รูปที่ 1 Ishikawa diagram of uncertainty components in the calibration of the balance (ที่มา Vălcu *et al.*, 2016)

นอกจากนี้ วิธี EURAMET cg-18 ยังได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนอย่างเป็นระบบตาม guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) ที่ให้ความสำคัญกับการประเมินแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนทั้งแบบ type A ที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลการวัดซ้ำ และ type B ที่ได้จากข้อมูลอื่น เช่น ข้อกำหนดของผู้ผลิต ผลการสอบเทียบที่ผ่านมา ฯลฯ จากนั้นจะนำค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน (standard uncertainty) ของแต่ละองค์ประกอบมารวมกันเป็นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (combined standard uncertainty, $u(E)$) แล้วขยายด้วยตัวประกอบครอบคลุม (coverage factor, k) เพื่อให้ได้ค่าความไม่แน่นอนขยาย (expanded uncertainty, $U(E)$) ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% และรายงานผลการสอบเทียบในรูปแบบ “ $y \pm U$ ” (BIPM, 2008) และด้วยเหตุที่ความไม่แน่นอนของการวัดสามารถเกิดขึ้นได้ทุกครั้งที่มีการถ่ายทอดความถูกต้องของการวัดในแต่ละระดับ ซึ่งอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น เครื่องมือวัด สภาวะแวดล้อม ฯลฯ (อัจฉราและสิวินีย์, 2551) จึงต้องพิจารณาแหล่งของความไม่แน่นอนของการชั่งให้ครอบคลุมทุกแหล่งและประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่งด้วยวิธีที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล เพื่อให้ผลการวัดที่ได้มีความน่าเชื่อถือ ปัจจุบันวิธี EURAMET cg-18 ถูกนำมาใช้แพร่หลายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบทั้งในทวีปยุโรป อเมริกา รวมถึงเอเชีย เช่น ไทย ญี่ปุ่น สิงคโปร์ และมาเลเซีย (Fritsch, 2019; Haller *et al.*, 2020) สำหรับประเทศไทย ภายใต้โครงการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางคุณภาพของประเทศ (national quality infrastructure: NQI) โดยความร่วมมือระหว่างสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมและสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้จัดทำเอกสาร “ข้อเสนอแนะ (การตีความ) การนำ EURAMET calibration guide no. 18 ไปใช้สำหรับการสอบเทียบเครื่องชั่งแบบไม่อัตโนมัติ (publication reference GLA-25-00)” และประกาศใช้เมื่อวันที่ 16/08/2562 เพื่อเป็นแนวทาง

สอบเทียบตามเอกสารขอแนะนำ EURAMET calibration guide no.18 version 4 (2015) สำหรับให้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบหรือห้องปฏิบัติการทดสอบที่ทำการสอบเทียบด้วยตนเอง (In-house calibration) สามารถนำไปใช้จัดทำขั้นตอนการสอบเทียบและการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่งสำหรับยื่นขอรับการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 ตลอดจนเป็นแนวทางในการตรวจประเมินของผู้ตรวจประเมินด้านวิชาการ GLA-25-00 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2562) จึงอาจกล่าวได้ว่าวิธีสอบเทียบ EURAMET cg-18 เป็นวิธีที่สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมให้การยอมรับและแนะนำให้ใช้ในห้องปฏิบัติการ

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือ สาขามวล มีหน้าที่รับผิดชอบในการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ และตุ้มน้ำหนักให้กับห้องปฏิบัติการภายในสำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ ปัจจุบันได้รับการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025:2017 ในรายการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยวิธี UKAS LAB 14 และได้สังเกตเห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาศักยภาพห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือ ด้านมวล ให้ครอบคลุมวิธีสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ จึงมีแนวคิดจะขยายขอบข่ายการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการ รายการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยวิธี EURAMET cg-18 ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานสากลที่ใช้ในห้องปฏิบัติการสอบเทียบทั่วโลก เพื่อเพิ่มทางเลือกให้ผู้ขอรับบริการสามารถเลือกใช้วิธีสอบเทียบที่เหมาะสม และสามารถรองรับงานสอบเทียบด้านปริมาตรที่มีความต้องการใช้ผลการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยวิธี EURAMET cg-18 ตามคำแนะนำของมาตรฐาน ASTM E542-22 (ASTM, 2022) การศึกษาในครั้งนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลการสอบเทียบและประเมินค่าความไม่แน่นอนของเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.001 มิลลิกรัม ที่จุดสอบเทียบ 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 และ 50 กรัม และความละเอียด 0.01 มิลลิกรัม ที่จุดสอบเทียบ 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150 และ 200 กรัม ด้วยวิธี EURAMET cg-18 version 4.0 (11/2015) และทวนสอบ (verification) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในงานสอบเทียบด้านปริมาตร โดยใช้เกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบด้านปริมาตร ตามมาตรฐาน ISO 10012:2003 และ ISO 8655-2:2002 เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนด 6.4.4 ของ ISO/IEC 17025:2017 ที่ต้องทำการทวนสอบเครื่องมือวัด เพื่อยืนยันว่าเครื่องมือวัดมีคุณลักษณะเป็นไปตามเกณฑ์ที่ระบุไว้ ก่อนจะนำไปใช้สอบเทียบให้กับผู้ขอรับบริการ นอกจากนี้ ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือ สาขามวล ยังสามารถนำค่า $U(E)$ ที่ได้จากการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่งไปใช้กำหนดค่าขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด (calibration and measurement capability: CMC) ซึ่งเป็นค่าที่เล็กที่สุดที่เชื่อว่าห้องปฏิบัติการจะสามารถทำได้ระหว่างการสอบเทียบและการวัด (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2564) สำหรับยื่นขอขยายขอบข่ายการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการให้บริการสอบเทียบเครื่องมือ ด้านมวล ด้วยมาตรฐานการสอบเทียบที่ได้รับการยอมรับในระดับสากล และสนับสนุนความต้องการใช้

ผลการสอบเทียบด้วยวิธี EURAMET cg-18 ของห้องปฏิบัติการสอบเทียบด้านปริมาตรและห้องปฏิบัติการทดสอบตัวอย่างสินค้าปศุสัตว์

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1.1 ตุ่มน้ำหนักมาตรฐาน OIML R111-1 class E2 ขนาด 0.001 ถึง 200 กรัม
- 1.2 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
- 1.3 เครื่องวัดความดันบรรยากาศ
- 1.4 ถุงมือผ้า
- 1.5 Tweezer
- 1.6 อุปกรณ์ทำความสะอาด เช่น แอลกอฮอล์ กระดาษ kimwipe แปรงขนนุ่ม

2. ตัวอย่างที่ศึกษา

2.1 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ จำนวน 5 เครื่อง สำหรับกำหนดค่า CMC และทวนสอบผลการสอบเทียบ ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องชั่ง	ความละเอียด (มิลลิกรัม)	ค่าความสามารถสูงสุด (กรัม)	วัตถุประสงค์ในการใช้
B01	0.001	52	กำหนดค่า CMC และทวนสอบฯ
B02	0.01	210	กำหนดค่า CMC และทวนสอบฯ
B03	0.01	220	ทวนสอบฯ
B04	0.01	210	ทวนสอบฯ
B05	0.01	220	ทวนสอบฯ

3. วิธีการ

3.1 การเตรียมตุ่มน้ำหนักและเครื่องชั่งก่อนการสอบเทียบ

3.1.1 นำตุ่มน้ำหนักมาตรฐาน OIML R111-1 class E2 ขนาด 0.001 ถึง 200 กรัม วางไว้ในห้องสอบเทียบที่เครื่องชั่งตั้งอยู่ เป็นเวลาอย่างน้อย 2 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน EURAMET cg-18

3.1.2 ทำการตรวจสอบสถานะแวดล้อมภายในห้องทั้งก่อนและหลังสอบเทียบ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ ให้อยู่ในช่วงเกณฑ์ที่กำหนด ดังนี้ อุณหภูมิ 25.0 ± 5.0 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 55.0 ± 15.0 %RH โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ และความดันบรรยากาศ $1,010 \pm 10$ hPa โดยใช้เครื่องวัดความดันบรรยากาศ

3.1.3 ทำการตรวจสอบระดับลูกน้ำ โดยการปรับระดับลูกน้ำให้อยู่ตรงกึ่งกลาง เพื่อปรับเครื่องชั่งให้อยู่ในแนวระนาบ

3.1.4 เปิดเครื่องชั่งก่อนการสอบเทียบอย่างน้อย 30 นาที เพื่อปรับสภาพเครื่องชั่ง จากนั้นทำการกระตุ้นการทำงานของเครื่องชั่ง (pre load) โดยวางตุ้มน้ำหนักที่มีขนาดใกล้เคียงกับค่าความสามารถสูงสุดของเครื่องชั่งลงบนกลางจานชั่ง อย่างน้อย 3 ครั้ง

3.1.5 ทำการปรับตั้งเครื่องชั่งก่อนการสอบเทียบ โดยใช้ฟังก์ชัน internal calibration

3.2 การสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

ทำการสอบเทียบเครื่องชั่ง B01 ที่จุดสอบเทียบ 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 และ 50 กรัม และเครื่องชั่ง B02 ที่จุดสอบเทียบ 0.001, 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150 และ 200 กรัม ด้วยวิธี EURAMET cg-18 โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน OIML R111-1 class E2 ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนดตามข้อ 3.1.2 เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องชั่ง จากการทดสอบ 3 พารามิเตอร์ ดังนี้

3.2.1 ทดสอบความเที่ยงของเครื่องชั่ง (repeatability test)

3.2.1.1 เลือกใช้ตุ้มน้ำหนักขนาด 50 และ 200 กรัม สำหรับเครื่องชั่ง B01 และ B02 ตามลำดับ เนื่องจากมีขนาดใกล้เคียงกับค่าความสามารถสูงสุดของเครื่องชั่ง

3.2.1.2 ทำการกดปุ่ม tare ที่เครื่องชั่ง เมื่อเครื่องชั่งอ่านค่าได้ศูนย์ วางตุ้มน้ำหนักลงบนกลางจานชั่ง รอจนค่านิ่งและบันทึกค่าที่อ่านได้ จากนั้นยกตุ้มน้ำหนักออกแล้วทำซ้ำจนครบ 10 ครั้ง

3.2.1.3 คำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: SD) ของผลการชั่งทั้ง 10 ครั้ง

3.2.2 ทดสอบความคลาดเคลื่อนของการอ่านค่าของเครื่องชั่ง (test for error of indication)

3.2.2.1 เลือกใช้ตุ้มน้ำหนักที่ระบุขนาดตามจุดสอบเทียบตั้งแต่ 0.001 ถึง 50 กรัม สำหรับเครื่องชั่ง B01 และตั้งแต่ 0.001 ถึง 200 กรัม สำหรับเครื่องชั่ง B02

3.2.2.2 ทำการกดปุ่ม tare ที่เครื่องชั่ง เมื่อเครื่องชั่งอ่านค่าได้ศูนย์ วางตุ้มน้ำหนักขนาด 0.001 กรัม ลงบนกลางจานชั่ง รอจนค่านิ่งและบันทึกค่าที่อ่านได้ แล้วยกตุ้มน้ำหนักออกและทำซ้ำจนครบ 4 ครั้ง จากนั้นเปลี่ยนวางตุ้มน้ำหนักขนาดอื่น โดยเพิ่มน้ำหนักจากน้อยไปมากจนครบทุกน้ำหนัก

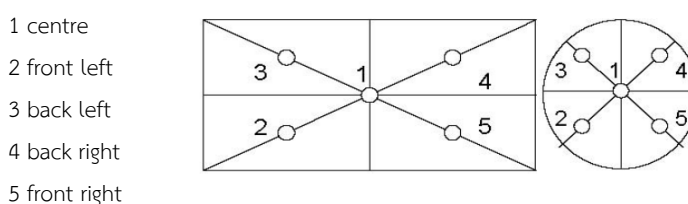
3.2.2.3 คำนวณหาค่าเฉลี่ยของผลการชั่งทั้ง 4 ครั้งของตุ้มน้ำหนักแต่ละขนาด เพื่อนำมาใช้หาค่า correction ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลต่างระหว่างค่า conventional mass กับค่าเฉลี่ยของผลการชั่งตุ้มน้ำหนักแต่ละขนาด

3.2.3 ทดสอบความผิดพลาดเนื่องจากการวางน้ำหนักไม่ตรงกลางจานชั่ง (eccentricity test)

3.2.3.1 เลือกใช้ตุ้มน้ำหนักขนาด 20 และ 100 กรัม สำหรับเครื่องชั่ง B01 และ B02 ตามลำดับ เนื่องจากมีขนาดไม่น้อยกว่า 1/3 ของค่าความสามารถสูงสุดของเครื่องชั่ง

3.2.3.2 ทำการกดปุ่ม tare ที่เครื่องชั่ง เมื่อเครื่องชั่งอ่านค่าได้ศูนย์ วางตุ้มน้ำหนักลงบนกลางจานชั่งตรงตำแหน่งที่ 1 (centre) รอจนค่านิ่งและบันทึกค่าที่อ่านได้ ยกตุ้มน้ำหนักออกแล้วทำซ้ำจนครบ 3 ครั้ง จากนั้นย้ายตุ้มน้ำหนักไปวางตำแหน่งที่ 2 (front left), 3 (back left), 4 (back right) และ 5 (front right) ตามลำดับ ตามรูปที่ 2 โดยแต่ละตำแหน่งทำซ้ำจนครบ 3 ครั้ง แล้วจึงย้ายไปตำแหน่งถัดไป

3.2.3.3 คำนวณหาค่าเฉลี่ยของผลการชั่งทั้ง 3 ครั้งจากแต่ละตำแหน่ง จากนั้นนำค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่ 2, 3, 4 และ 5 มาลบกับค่าเฉลี่ยของตำแหน่งที่ 1 ตามลำดับ แล้วเลือกค่ามากที่สุดจากทั้ง 5 ตำแหน่ง โดยไม่คิดเครื่องหมาย เพื่อใช้เป็นค่าความผิดพลาดสูงสุดเนื่องจาก eccentricity



รูปที่ 2 ตำแหน่งการวางตุ้มน้ำหนักบนจานชั่งแบบสี่เหลี่ยมและวงกลม สำหรับการทดสอบ eccentricity (ที่มา EURAMET, 2015)

3.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง ตามมาตรฐาน EURAMET cg-18 มาจาก 2 แหล่งใหญ่ คือ ความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าของเครื่องชั่ง $u(I)$ และความไม่แน่นอนเนื่องจากมวลอ้างอิง $u(m_{ref})$ ดังนี้

3.3.1 ความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าของเครื่องชั่ง $u(I)$ ประกอบด้วย 4 แหล่งย่อย ได้แก่ ความไม่แน่นอนเนื่องจากการทำซ้ำของเครื่องชั่ง $u(\delta I_{rep})$, ความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าที่ no load $u(\delta I_{digo})$, ความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าที่ at load $u(\delta I_{digL})$ และความไม่แน่นอนเนื่องจาก eccentricity $u(\delta I_{ecc})$ ดังสมการที่ 1

$$u(I) = \sqrt{u^2(\delta I_{rep}) + u^2(\delta I_{digo}) + u^2(\delta I_{digL}) + u^2(\delta I_{ecc})} \quad \text{สมการที่ 1}$$

3.3.1.1 ความไม่แน่นอนเนื่องจากการทำซ้ำของเครื่องชั่ง, $u(\delta I_{rep})$ เป็นการแจกแจงแบบ normal distribution สามารถคำนวณจากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของผลการชั่งน้ำหนัก 10 ครั้ง ที่ได้จากข้อ 3.2.1 ดังสมการที่ 2

$$u(\delta I_{rep}) = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad \text{สมการที่ 2}$$

โดยที่ SD = ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของเครื่องชั่ง จากการทดสอบ repeatability
 n = จำนวนครั้งที่ทำการชั่งในการทดสอบ error of indication

3.3.1.2 ความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าที่ no load, $u(\delta I_{dig0})$ เป็นการแจกแจงแบบ rectangular distribution สามารถคำนวณจากค่าความละเอียดของเครื่องชั่ง ดังสมการที่ 3

$$u(\delta I_{dig0}) = \frac{d_0}{2\sqrt{3}} \quad \text{สมการที่ 3}$$

โดยที่ d_0 = ค่าความละเอียดของเครื่องชั่งที่ no load

3.3.1.3 ความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าที่ at load, $u(\delta I_{digL})$ เป็นการแจกแจงแบบ rectangular distribution สามารถคำนวณจากค่าความละเอียดของเครื่องชั่ง ดังสมการที่ 4

$$u(\delta I_{digL}) = \frac{d_L}{2\sqrt{3}} \quad \text{สมการที่ 4}$$

โดยที่ d_L = ค่าความละเอียดของเครื่องชั่งที่ at load

3.3.1.4 ความไม่แน่นอนเนื่องมาจาก eccentricity, $u(\delta I_{ecc})$ เป็นการแจกแจงแบบ rectangular distribution สามารถคำนวณจากค่าความผิดพลาดสูงสุดเนื่องมาจาก eccentricity ที่ได้จากข้อ 3.2.3 ดังสมการที่ 5

$$u(\delta I_{ecc}) = \frac{I|\Delta I_{ecc}|_{max}}{(2L_{ecc}\sqrt{3})} \quad \text{สมการที่ 5}$$

โดยที่ I = ค่าเฉลี่ยที่เครื่องชั่งอ่านได้ ณ จุดสอบเทียบ
 $|\Delta I_{ecc}|_{max}$ = ค่าความผิดพลาดสูงสุดเนื่องมาจาก eccentricity
 L_{ecc} = ค่ามวลที่ใช้ในการทดสอบ eccentricity

3.3.2 ความไม่แน่นอนเนื่องมาจากมวลอ้างอิง $u(m_{ref})$ ประกอบด้วย 4 แหล่งย่อย ได้แก่ ความไม่แน่นอนเนื่องมาจากค่ามวลของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน $u(\delta m_c)$, ความไม่แน่นอนเนื่องจากการ drift ของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน $u(\delta m_D)$, ความไม่แน่นอนเนื่องจากการแก้ค่าแรงพยางอากาศ $u(\delta m_B)$ และความไม่แน่นอนเนื่องมาจาก convection effects $u(\delta m_{conv})$ ดังสมการที่ 6

$$u(m_{ref}) = \sqrt{u^2(\delta m_c) + u^2(\delta m_D) + u^2(\delta m_B) + u^2(\delta m_{conv})} \quad \text{สมการที่ 6}$$

3.3.2.1 ความไม่แน่นอนเนื่องมาจากค่ามวลของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน, $u(\delta m_c)$ เป็นการแจกแจงแบบ normal distribution สามารถคำนวณจากค่าความไม่แน่นอนของตุ้มน้ำหนักมาตรฐานจากใบรับรองผลการสอบเทียบปีล่าสุด ดังสมการที่ 7

$$u(\delta m_c) = \frac{U}{k} \quad \text{สมการที่ 7}$$

โดยที่ U = ค่าความไม่แน่นอนของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน
 k = ค่า coverage factor

3.3.2.2 ความไม่แน่นอนเนื่องจากการ drift ของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน, $u(\delta m_D)$ เป็นการแจกแจงแบบ rectangular distribution สามารถคำนวณจากค่าความไม่แน่นอนของตุ้มน้ำหนักมาตรฐานจากใบรับรองผลการสอบเทียบปีล่าสุด ดังสมการที่ 8

$$u(\delta m_D) = \frac{k_D U(\delta m_c)}{\sqrt{3}} \quad \text{สมการที่ 8}$$

โดยที่ k_D = ค่าบ่งบอกคุณภาพของตุ้มน้ำหนัก มีค่าเท่ากับ 2
 U = ค่าความไม่แน่นอนของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน

3.3.2.3 ความไม่แน่นอนเนื่องจากการแก้ค่าแรงพุงอากาศ, $u(\delta m_B)$ เป็นการแจกแจงแบบ rectangular distribution สามารถคำนวณจากค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ (maximum permissible error: *mpe*) ของตุ้มน้ำหนักตามมาตรฐาน OIML R111-1 เนื่องจากการปรับตั้งเครื่องชั่ง (internal calibration) ก่อนการสอบเทียบ ดังสมการที่ 9

$$u(\delta m_B) = \left(\frac{mpe}{4}\right)/\sqrt{3} \quad \text{สมการที่ 9}$$

โดยที่ *mpe* = ค่า maximum permissible errors ของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน OIML R111-1 อ้างอิงจาก Table 1 ของมาตรฐาน OIML R111-1 (OIML, 2004)

3.3.2.4 ความไม่แน่นอนเนื่องจากการ convection effects, $u(\delta m_{conv})$ เป็นการแจกแจงแบบ rectangular distribution สามารถคำนวณจากค่าความผิดพลาดเนื่องจากการพาความร้อน ดังสมการที่ 10

$$u(\delta m_{conv}) = \frac{\Delta m_{conv}}{\sqrt{3}} \quad \text{สมการที่ 10}$$

โดยที่ Δm_{conv} = ค่าความผิดพลาดเนื่องจากการ convection effects อ้างอิงจากตาราง F2.1 ของมาตรฐาน EURAMET cg-18 (EURAMET, 2015)

3.3.3 ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (combined standard uncertainty: $u(E)$) สามารถคำนวณจากผลรวมของความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าของเครื่องชั่ง $u(I)$ กับความไม่แน่นอนเนื่องจากมวลอ้างอิง $u(m_{ref})$ ดังสมการที่ 11

$$u(E) = \sqrt{u^2(I) + u^2(m_{ref})} \quad \text{สมการที่ 11}$$

โดยที่ $u(I)$ = ความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าของเครื่องชั่ง
 $u(m_{ref})$ = ความไม่แน่นอนเนื่องจากมวลอ้างอิง

3.3.4 ความไม่แน่นอนขยาย (expanded uncertainty: $U(E)$) สามารถคำนวณจากค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม, $u(E)$ จากข้อ 3.3.3 คูณกับค่า coverage factor, k ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 ดังสมการที่ 12

$$U(E) = k \times u(E) \quad \text{สมการที่ 12}$$

โดยค่า k สามารถประเมินได้จากตาราง t-distribution ที่ระดับความเชื่อมั่น 95.45 % ซึ่งได้จากการคำนวณค่า effective degree of freedom, V_{eff} จากสมการ Welch-Satterthwaite ดังสมการที่ 13

$$V_{eff} = \frac{u^4(E)}{u^4(\delta I_{rep})} \times (n - 1) \quad \text{สมการที่ 13}$$

โดยที่ $u(E)$ = ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม
 $u(\delta I_{rep})$ = ความไม่แน่นอนเนื่องจากการทำซ้ำของเครื่องชั่ง
 n = จำนวนครั้งในการทดสอบ repeatability test

จากนั้น นำค่า V_{eff} ที่คำนวณได้ไปเทียบค่าจากตาราง t-distribution โดยอ้างอิงจากภาคผนวก B.6 ของมาตรฐาน UKAS M3003 (UKAS, 2024) เพื่อหาค่า k ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95%

3.4 การกำหนดค่าขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด (CMC) และเปรียบเทียบค่า CMC กับเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบด้านปริมาตร

3.4.1 ทำการกำหนดค่า CMC โดยการระบุช่วงการสอบเทียบและขอบข่ายการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการสอบเทียบ ตามเอกสารวิชาการ เรื่อง ขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด (calibration and measurement capability : CMC) TLA-03-01 06/2564 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2564) โดยใช้ค่าความไม่แน่นอนขยาย $U(E)$ ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% ที่ได้จากการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง ตามข้อ 3.3 โดยนำค่า $U(E)$ ของเครื่องชั่ง B01 มาใช้กำหนดค่า CMC ที่ช่วงการสอบเทียบ ตั้งแต่ 0.001 ถึง 50 กรัม และค่า $U(E)$ ของเครื่องชั่ง B02 มาใช้กำหนดค่า CMC ตั้งแต่ 100 ถึง 200 กรัม สำหรับยื่นขอขยายขอบข่ายการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 รายการสอบเทียบ non-automatic weighing instruments วิธี EURAMET cg-18 version 4.0 (11/2015) กับสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

3.4.2 นำค่า CMC จากข้อ 3.4.1 ที่ช่วงการสอบเทียบ ตั้งแต่ 0.001 ถึง 200 กรัม มาเทียบกับเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องแก้ววัดปริมาตร ที่กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ไม่เกิน 0.0006 กรัม ตาม ISO 10012:2003 และการสอบเทียบ piston pipette ที่กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ไม่เกิน 0.0002 กรัม ตาม ISO 8655-2:2002

3.5 การทวนสอบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.001 มิลลิกรัม และ 0.01 มิลลิกรัม

3.5.1 ทำการสอบเทียบเครื่องชั่ง B03, B04 และ B05 ที่จุดสอบเทียบ 0.01, 0.1, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 และ 200 กรัม ตามข้อ 3.2 และประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่งที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% ตามข้อ 3.3 โดยใช้ตุ้มน้ำหนักขนาด 200 กรัม สำหรับหาค่า SD และตุ้มน้ำหนักขนาดตามจุดสอบเทียบตั้งแต่ 0.01 ถึง 200 กรัม สำหรับหาค่า correction และ $U(E)$ ในขณะที่ เครื่องชั่ง B01 และ B02 จะใช้ข้อมูลผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง ตามตารางที่ 2 โดยใช้ค่า SD ที่จุดสอบเทียบ 50 และ 200 กรัม ตามลำดับ และค่า correction และ $U(E)$ ที่จุดสอบเทียบ 0.001, 0.01, 0.1, 1, 2, 5, 10, 20 และ 50 กรัม สำหรับเครื่องชั่ง B01 และที่จุดสอบเทียบ 0.01, 0.1, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 และ 200 กรัม สำหรับเครื่องชั่ง B02

3.5.2 นำค่า SD, correction และ $U(E)$ มาใช้ในการทวนสอบเครื่องชั่ง B01 ถึง B05 โดยใช้วิธีการทวนสอบเครื่องชั่งของงานสอบเทียบด้านปริมาตร ซึ่งพิจารณาจากคุณลักษณะของเครื่องชั่ง ตามข้อกำหนดการใช้งานและเกณฑ์การยอมรับ ดังนี้

3.5.2.1 เปรียบเทียบค่าพิสัยระหว่างค่าน้ำหนักที่ใช้งานกับค่าน้ำหนักสูงสุดของเครื่องชั่ง โดยค่าน้ำหนักที่ใช้งานต้องไม่เกินค่าน้ำหนักสูงสุดของเครื่องชั่ง

3.5.2.2 เปรียบเทียบค่าความละเอียดของน้ำหนักที่ใช้งานกับค่าความละเอียดของเครื่องชั่ง โดยค่าความละเอียดของน้ำหนักที่ใช้งานต้องไม่เกินค่าความละเอียดของเครื่องชั่ง

3.5.2.3 ค่าความผิดพลาดรวมของเครื่องชั่ง สามารถประเมินได้จากผลรวมของ 4 พารามิเตอร์ โดยในส่วนของพารามิเตอร์ B จะทำการทวนสอบตาม ISO 14253-1:2017 ในขณะที่ พารามิเตอร์ A, C และ D อ้างอิงแนวทางการทวนสอบตาม (สมโภชน์, 2548) เพื่อให้ครอบคลุมคุณลักษณะของเครื่องชั่ง

3.5.2.3.1 พารามิเตอร์ A: ความทวนซ้ำ สามารถคำนวณจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ที่ได้จากการชั่งซ้ำของการทดสอบ repeatability คูณด้วย 2

3.5.2.3.2 พารามิเตอร์ B: ความคลาดเคลื่อนของค่าชั่งบอก สามารถคำนวณจากผลรวมของค่า correction ที่มากที่สุด กับค่า $U(E)$ ที่มากที่สุด โดยไม่คิดเครื่องหมาย

3.5.2.3.3 พารามิเตอร์ C: ความแปรปรวนของอุณหภูมิ หาได้จากค่าความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิของเครื่องชั่ง (sensitivity drift) เทียบกับค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิขณะสอบเทียบ ซึ่งเครื่องชั่ง B01 ถึง B05 มีค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิของเครื่องชั่ง เท่ากับ 1 ppm/°C

3.5.2.3.4 พารามิเตอร์ D: ความสามารถในการอ่านละเอียด สามารถคำนวณจากค่าความละเอียดของเครื่องชั่ง หารด้วย 2

จากนั้น นำค่าที่ได้จากข้อ 3.5.2.3.1 ถึง 3.5.2.3.4 มาคำนวณหาค่าความผิดพลาดรวมของเครื่องชั่ง ตามสูตรดังนี้

$$\text{ค่าความผิดพลาดรวมของเครื่องชั่ง} = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + D^2}$$

3.5.2.3.5 นำค่าความผิดพลาดรวมของเครื่องชั่งมาเทียบกับเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบ piston pipette ที่กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ไม่เกิน 0.0002 กรัม สำหรับใช้ในการทวนสอบเครื่องชั่ง B01 และการสอบเทียบเครื่องแก้ววัดปริมาตร กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ ไม่เกิน 0.0006 กรัม สำหรับใช้ในการทวนสอบเครื่องชั่ง B02 ถึง B05

ผลและวิจารณ์

1. ผลการสอบเทียบและประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง

ผลการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.001 มิลลิกรัม (เครื่องชั่ง B01) ที่จุดสอบเทียบ 0.001 ถึง 50 กรัม ด้วยวิธี EURAMET cg-18 โดยใช้ตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน OIML R111-1 class E2 ภายใต้สภาวะแวดล้อมขณะสอบเทียบที่อุณหภูมิ 23.5 ± 0.1 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 53.5 ± 1.3 %RH และความดันบรรยากาศ $1,006 \pm 0$ hPa โดยทำการทดสอบ 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ repeatability, error of indication และ eccentricity แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า จากการทดสอบ repeatability ที่มวล 50 กรัม มีค่า *SD* ต่ำเท่ากับ 0.0000017 กรัม สะท้อนถึงความเสถียรของระบบการชั่งและการตอบสนองของโหลดเซลล์ที่มีความสม่ำเสมอภายใต้เงื่อนไขการทดสอบเดียวกัน ซึ่งบ่งบอกว่าเครื่องชั่งมีความเที่ยงตรง (precision) ในขณะที่ ค่า correction ที่ได้จากการทดสอบ error of indication ที่ช่วงมวล 0.001 ถึง 50 กรัม มีค่าต่ำอยู่ในช่วง (-0.000002) ถึง 0.000006 กรัม สะท้อนให้เห็นว่าเครื่องชั่งมีความถูกต้องแม่นยำ (accuracy) เนื่องจากเครื่องชั่งมีความสามารถในการแสดงค่าน้ำหนักได้ใกล้เคียงกับค่ามวลอ้างอิง อย่างไรก็ตาม การที่ค่า correction มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมวลที่ชั่งเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับพฤติกรรมของโครงสร้างโหลดเซลล์ของเครื่องชั่งที่มีการเบี่ยงเบนตามน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปในเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดสูง (Hong and Lee, 2019) นอกจากนี้ ค่าความผิดพลาดสูงสุดเนื่องจาก eccentricity ที่มวล 20 กรัม มีค่าเท่ากับ 0.000012 กรัม แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากตำแหน่งการวางน้ำหนักบนจานชั่งมีขนาดค่อนข้างต่ำ และสะท้อนถึงระบบถ่ายทอดแรงสู่โหลดเซลล์ที่มีความสมดุลและสม่ำเสมอ (OIML, 2006)

ผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง B02 ที่จุดสอบเทียบ 0.001 ถึง 200 กรัม โดยใช้วิธี EURAMET cg-18 และตุ้มน้ำหนักมาตรฐานชุดเดียวกันกับเครื่องชั่ง B01 ภายใต้สภาวะแวดล้อมขณะสอบเทียบที่

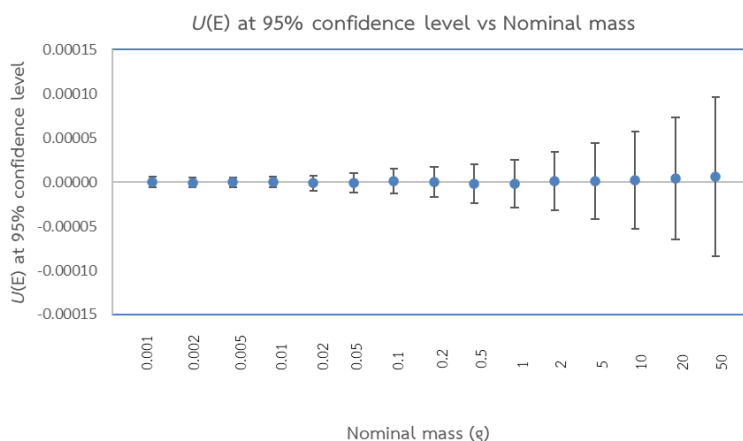
อุณหภูมิ 23.9 ± 0.1 °C ความชื้นสัมพัทธ์ 53.2 ± 1.3 %RH และความดันบรรยากาศ $1,006 \pm 0$ hPa ตามตารางที่ 2 โดยผลการทดสอบ repeatability ที่มวล 200 กรัม มีค่า SD ต่ำเท่ากับ 0.000010 กรัม แสดงให้เห็นว่าเครื่องชั่งมีความเที่ยงตรง ในขณะที่ผลการทดสอบ error of indication ที่แสดงเป็นค่า correction ที่ช่วงมวล 0.001 ถึง 200 กรัม พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง (-0.00002) ถึง 0.00004 กรัม ซึ่งส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงศูนย์ สามารถบ่งบอกได้ว่าเครื่องชั่งมีความถูกต้องแม่นยำ ทั้งนี้ เมื่อพิจารณาที่ช่วงมวลสูงขึ้น พบว่า ค่า correction มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยที่มวล 100 และ 200 กรัม มีค่า correction เท่ากับ 0.00002 และ 0.00004 กรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ ผลการทดสอบ eccentricity ที่มวล 100 กรัม เท่ากับ 0.00003 กรัม แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากตำแหน่งการวางน้ำหนักบนจานชั่งมีขนาดค่อนข้างต่ำเช่นเดียวกับเครื่องชั่ง B01

ตารางที่ 2 ผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง B01 และ B02 ด้วยวิธี EURAMET cg-18

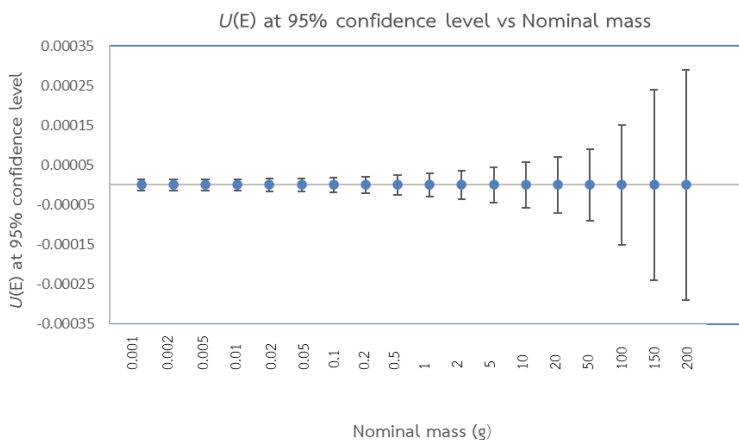
Nominal mass (g)	ผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง (g)							
	B01				B02			
	SD	eccentricity	correction	$U(E)$ at 95% confidence level	SD	eccentricity	correction	$U(E)$ at 95% confidence level
0.001			0.000000	± 0.0000058			0.000000	± 0.000015
0.002			0.000000	± 0.0000058			0.000000	± 0.000015
0.005			0.000000	± 0.0000058			0.000000	± 0.000015
0.01			0.000000	± 0.0000060			-0.000001	± 0.000015
0.02			-0.000001	± 0.0000084			-0.000001	± 0.000016
0.05			-0.000001	± 0.000011			-0.000001	± 0.000017
0.1			0.000001	± 0.000014			-0.000001	± 0.000019
0.2			0.000000	± 0.000017			0.000000	± 0.000021
0.5			-0.000001	± 0.000022			-0.000001	± 0.000026
1			-0.000002	± 0.000027			-0.000001	± 0.000030
2			0.000001	± 0.000033			0.000000	± 0.000035
5			0.000001	± 0.000043			-0.000001	± 0.000045
10			0.000002	± 0.000055			-0.000002	± 0.000057
20		0.000012	0.000004	± 0.000069			-0.000001	± 0.000070
50	0.000017		0.000006	± 0.000090			-0.000002	± 0.000090
100						0.000003	0.000002	± 0.00015
150							0.000002	± 0.00024
200					0.000010		0.000004	± 0.00029

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% ตามหลัก GUM และมาตรฐาน EURAMET cg-18 โดยใช้ค่า SD , correction และค่าความผิดพลาดสูงสุดเนื่องจาก eccentricity จากการทดสอบ 3 พารามิเตอร์ข้างต้น พบว่า เครื่องชั่ง B01 ที่ช่วงมวล 0.001 ถึง 50 กรัม มีค่า $U(E)$ เพิ่มขึ้นจาก ± 0.0000058 ถึง ± 0.000090 กรัม ดังตารางที่ 2 ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของค่า $U(E)$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากมวลต่ำไปสูง ซึ่งการเพิ่มขึ้นในลักษณะดังกล่าวสามารถพบได้เช่นเดียวกันกับเครื่องชั่ง B02 โดยช่วงมวล 0.001 ถึง 200 กรัม มีค่า $U(E)$ เพิ่มขึ้นจาก ± 0.000015

ถึง ± 0.00029 กรัม ตามตารางที่ 2 จากการพิจารณาค่า $U(E)$ ของเครื่องชั่งทั้ง 2 เครื่อง พบว่า ในช่วงมวลต่ำ เครื่องชั่ง B01 จะมีค่า $U(E)$ ต่ำกว่าเครื่องชั่ง B02 ซึ่งสอดคล้องกับค่าความละเอียดของเครื่องชั่ง (0.001 มิลลิกรัม) และประสิทธิภาพของการอ่านค่าของเครื่องชั่งที่เหมาะสมสำหรับการวัดมวลขนาดเล็ก ในขณะที่เครื่องชั่ง B02 ที่มีความละเอียดต่ำกว่า (0.01 มิลลิกรัม) จึงเหมาะกับการวัดในช่วงมวลที่กว้างกว่า และเมื่อสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $U(E)$ กับค่า nominal mass ดังรูปที่ 3 (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นว่า ค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของมวล



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $U(E)$ at 95% confidence level และ nominal mass ของเครื่องชั่ง B01 (ก) และ B02 (ข) โดยที่ ● = correction และ I = $U(E)$ at 95% confidence level

เมื่อพิจารณาผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่งที่มาจากแหล่งของความไม่แน่นอน 2 แหล่งใหญ่ คือ ความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าของเครื่องชั่ง $u(I)$ และความไม่แน่นอนเนื่องจากมวลอ้างอิง $u(m_{ref})$ ของเครื่องชั่ง B01 และ B02 ตามตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ พบว่า ค่าความไม่แน่นอนจากหลายแหล่งมีแนวโน้มแปรผันตามขนาดของมวลที่ชั่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ความไม่แน่นอนแบบ type B ที่มาจากแหล่งใหญ่ของความไม่แน่นอนเนื่องจากมวลอ้างอิง $u(m_{ref})$ ได้แก่ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่ามวลของตุ้มน้ำหนักมาตรฐาน $u(\delta m_C)$ พบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องตามการวิเคราะห์เชิงมาตรวิทยาของมาตรฐาน EURAMET cg-18 ที่ระบุว่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่ามวลของตุ้มน้ำหนักมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบมักจะไม่แน่นอนสัมบูรณ์คงที่ (absolute uncertainty) ในระดับที่สอดคล้องกับค่าที่ระบุในใบรับรองการสอบเทียบ และจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของมวลที่ชั่ง

ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการ drift ของตุ้มน้ำหนัก $u(\delta m_D)$ พบว่าเป็นอีกหนึ่งแหล่งของความไม่แน่นอนที่ส่งผลทำให้ค่า $U(E)$ เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่ามวลจริงของตุ้มน้ำหนักสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตามระยะเวลาการใช้งาน ซึ่งเกิดจากปัจจัยหลายประการ เช่น การสึกหรอของผิววัสดุ การสะสมของสิ่งปนเปื้อน หรือการดูดซับความชื้น ที่สามารถส่งผลให้ค่ามวลของตุ้มน้ำหนักเบี่ยงเบนไป โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงของค่ามวลหรือค่า drift ของตุ้มน้ำหนัก มักเกิดจากการสะสมของสิ่งปนเปื้อนบนพื้นผิวของตุ้มน้ำหนัก ซึ่งเกิดจากการดูดซับสารจากอากาศหรือสิ่งแวดล้อม โดยรอบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Höglström *et al.*, 2010 ที่ศึกษาพื้นผิวของตุ้มน้ำหนักสแตนเลส ด้วยเทคนิค atomic force microscopy พบว่า พื้นผิวของตุ้มน้ำหนักสามารถดูดซับสิ่งปนเปื้อนจากสภาพแวดล้อมได้ ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดความไม่เสถียรของค่ามวลเมื่อเวลาผ่านไป นอกจากนี้ ข้อกำหนดทางมาตรวิทยาของตุ้มน้ำหนักตามมาตรฐาน OIML R111-1 ยังระบุว่าค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้ จะเพิ่มขึ้นตามค่ามวลของตุ้มน้ำหนัก จึงสะท้อนให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่ามวลในเชิงสัมบูรณ์สามารถมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ เมื่อมวลมีค่าสูงขึ้น (OIML, 2004) ด้วยเหตุนี้ ความไม่แน่นอนเนื่องจากการ drift ของตุ้มน้ำหนัก จึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่า nominal mass และส่งผลให้ค่า $U(E)$ ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% เพิ่มขึ้นตามมวลที่ชั่ง

ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากการแก้ค่าแรงพยุงอากาศ $u(\delta m_B)$ พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของมวลเช่นเดียวกัน เนื่องจากเมื่อทำการชั่งน้ำหนักในอากาศ จะมีแรงพยุงจากอากาศที่ผลักขึ้นบนวัตถุ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาตรของวัตถุและความหนาแน่นของอากาศ (air density) โดยทั่วไป เมื่อมวลมากขึ้น ปริมาตรของวัตถุจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงพยุงอากาศมากขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้น้ำหนักที่เครื่องชั่งอ่านได้มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม แม้ว่าสภาวะแวดล้อมขณะทำการสอบเทียบเครื่องชั่งทั้ง 2 เครื่อง ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความดันบรรยากาศ จะมีค่าอยู่ในช่วงเกณฑ์สภาวะแวดล้อมที่กำหนด แต่การแปรปรวนของความหนาแน่นของอากาศที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมขณะสอบเทียบ สามารถส่งผลให้เกิดการสูญเสียแรงพยุงอากาศได้เช่นกัน กล่าวคือ เมื่อความหนาแน่นของอากาศเปลี่ยนแปลง ปริมาณแรงพยุงที่กระทำต่อตุ้มน้ำหนักจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งอาจทำให้ค่ามวลที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ดังนั้น แม้สภาวะแวดล้อมจะถูกควบคุมให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ก็ยังคงต้องพิจารณาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอากาศ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการประเมินความถูกต้องและความไม่แน่นอนของผลการสอบเทียบเครื่องชั่งที่ต้องการความแม่นยำสูง (Malengo, 2014)

นอกจากนี้ ความไม่แน่นอนเนื่องจาก convection effects $u(\delta m_{conv})$ และความไม่แน่นอนเนื่องจาก eccentricity $u(\delta I_{ecc})$ ซึ่งเป็นสองแหล่งความไม่แน่นอนที่เพิ่มเข้ามาในการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง ตามมาตรฐาน EURAMET cg-18 ที่สอดคล้องกับหลักการประเมินความไม่แน่นอนของ GUM ที่ระบุว่าต้องพิจารณาความไม่แน่นอนให้ครอบคลุมทุกแหล่งที่มีนัยสำคัญต่อผลการสอบเทียบ (BIPM, 2008) จากผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง พบว่า ผลของการพาความร้อนเป็นอีกปัจจัยที่ทำให้ค่า $U(E)$ เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการขนย้ายตุ้มน้ำหนักมาตรฐานไปยังห้องสอบเทียบ ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิของตุ้มน้ำหนักอาจไม่เท่ากับอุณหภูมิของเครื่องชั่งหรือสภาวะแวดล้อมโดยรอบ จึงทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิของตุ้มน้ำหนักกับอุณหภูมิโดยรอบ แต่ภายหลังจากที่นำตุ้มน้ำหนักไปวางไว้ในห้องสอบเทียบใกล้กับเครื่องชั่ง เพื่อปรับสมดุลของอุณหภูมิในช่วงเวลาหนึ่ง จะทำให้ความแตกต่างของอุณหภูมิเริ่มต้นลดลงจนเหลือผลต่างของอุณหภูมิน้อยลง จนเกิดความเสถียรของอุณหภูมิ โดยทั่วไปตุ้มน้ำหนักขนาดเล็กจะเกิดความเสถียรของอุณหภูมิเร็วกว่าตุ้มน้ำหนักขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตุ้มน้ำหนักที่มีขนาดเล็กกว่า 10 กรัม จะมีค่า $u(\delta m_{conv})$ เท่ากับศูนย์ เนื่องจากไม่มีผลต่างของอุณหภูมิ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน EURAMET cg-18 นอกจากนี้ เมื่อวางตุ้มน้ำหนักลงบนจานชั่ง อาจมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ยังคงอยู่ ทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศรอบน้ำหนักที่ชั่ง จนทำให้เกิดแรงเสียดทานของอากาศที่กระทำต่อผิวของตุ้มน้ำหนัก (parasitic forces) ที่ส่งผลให้ค่า apparent mass มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการพาความร้อน (Δm_{conv}) และจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของมวล

อย่างไรก็ตาม จากผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่งที่มาจากแหล่งใหญ่ของความไม่แน่นอนเนื่องจากการอ่านค่าของเครื่องชั่ง $u(I)$ พบว่า ค่า $u(\delta I_{rep})$, $u(\delta I_{digo})$ และ $u(\delta I_{digL})$ มีค่าคงที่ตลอดช่วงมวลที่ทำการประเมิน เนื่องจากค่าความไม่แน่นอนจากทั้ง 3 แหล่งไม่แปรผันตามขนาดของมวล ยกเว้นค่าความไม่แน่นอนเนื่องจาก eccentricity, $u(\delta I_{ecc})$ ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของมวล แต่จะแสดงค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อขนาดของมวลสูงขึ้น เช่น เครื่องชั่ง B01 ที่มวลตั้งแต่ 10 กรัมขึ้นไป และเครื่องชั่ง B02 ที่มวลตั้งแต่ 100 กรัมขึ้นไป ซึ่งแตกต่างจากค่าความไม่แน่นอนจาก 4 แหล่งย่อยที่มาจากแหล่งใหญ่ของความไม่แน่นอนเนื่องจากมวลอ้างอิง $u(m_{ref})$ ที่สามารถเห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นได้ตั้งแต่ช่วงมวลต่ำ ทั้งนี้ เนื่องจากเครื่องชั่งทั้ง 2 เครื่อง เป็นเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดสูงและถูกออกแบบมาให้ตอบสนองต่อแรงกดที่กระทำในแนวตั้งผ่านจุดศูนย์กลางของจานชั่งลงสู่โหลดเซลล์ แต่เมื่อใช้งานจริง ตำแหน่งของตุ้มน้ำหนักที่วางบนจานชั่งอาจเอียงศูนย์ (off-center loading) ทำให้เกิดการกระจายแรงที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างเชิงกลของเครื่องชั่งเกิดการโก่งตัว และความไม่สมบูรณ์ของระบบถ่ายโอนแรง ทำให้ค่าที่อ่านได้เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งที่วางวัตถุ จนกลายมาเป็นความคลาดเคลื่อนจากการวางน้ำหนักเอียงศูนย์ (eccentric loading error) (Salahinejad and Aflaki, 2007) ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่าขนาดของมวลที่ใช้ชั่งมีผลค่อนข้างน้อยต่อค่า $u(\delta I_{ecc})$ เมื่อเทียบกับตำแหน่งการวางตุ้มน้ำหนักบนจานชั่ง

ตารางที่ 3 ผลการประเมินความไม่แน่นอนของเครื่องชั่ง B01

Symbol	Type	Nominal mass (g)								
		0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5
$u(\delta I_{rep})$	A	0.0000009	0.0000009	0.0000009	0.0000009	0.0000009	0.0000009	0.0000009	0.0000009	0.0000009
$u(\delta I_{dig0})$	B	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003
$u(\delta I_{digL})$	B	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003
$u(\delta I_{ecc})$	B	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000001
$u(\delta m_c)$	B	0.0000010	0.0000010	0.0000010	0.0000010	0.0000015	0.0000020	0.0000025	0.0000030	0.0000040
$u(\delta m_D)$	B	0.0000023	0.0000023	0.0000023	0.0000023	0.0000035	0.0000046	0.0000058	0.0000069	0.0000092
$u(\delta m_B)$	B	0.0000009	0.0000009	0.0000009	0.0000012	0.0000014	0.0000017	0.0000023	0.0000029	0.0000036
$u(\delta m_{conv})$	B	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
$u(I)$		0.0000010	0.0000010	0.0000010	0.0000010	0.0000010	0.0000010	0.0000010	0.0000010	0.0000010
$u(m_{ref})$		0.0000027	0.0000027	0.0000027	0.0000028	0.0000041	0.0000053	0.0000067	0.0000081	0.0000107
$u(E)$		0.0000029	0.0000029	0.0000029	0.0000030	0.0000042	0.0000054	0.0000068	0.0000082	0.0000107
V_{eff}		970	970	970	1111	4268	11664	29330	62019	179807
k		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
$U(E)$ at 95% confidence level		0.0000058	0.0000058	0.0000058	0.0000060	0.0000084	0.000011	0.000014	0.000017	0.000022

ตารางที่ 3 (ต่อ)

Symbol	Type	Nominal mass (g)					
		1	2	5	10	20	50
$u(\delta I_{rep})$	A	0.0000009	0.0000009	0.0000009	0.0000009	0.0000009	0.0000009
$u(\delta I_{digo})$	B	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003
$u(\delta I_{digL})$	B	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003	0.0000003
$u(\delta I_{ecc})$	B	0.0000002	0.0000003	0.0000009	0.0000017	0.0000035	0.0000087
$u(\delta m_c)$	B	0.0000005	0.0000006	0.0000008	0.0000010	0.0000013	0.0000015
$u(\delta m_D)$	B	0.0000115	0.0000139	0.0000185	0.0000231	0.0000289	0.0000346
$u(\delta m_B)$	B	0.0000043	0.0000058	0.0000072	0.0000087	0.0000115	0.0000144
$u(\delta m_{conv})$	B	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000058	0.0000058	0.0000173
$u(I)$		0.0000010	0.0000010	0.0000013	0.0000020	0.0000036	0.0000088
$u(m_{ref})$		0.0000133	0.0000162	0.0000214	0.0000273	0.0000342	0.0000439
$u(E)$		0.0000133	0.0000162	0.0000214	0.0000274	0.0000344	0.0000448
V_{eff}		429219	944784	2876919	7731695	19209066	55256647
k		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
$U(E)$ at 95% confidence level		0.000027	0.000033	0.000043	0.000055	0.000069	0.000090

ตารางที่ 4 ผลการประเมินความไม่แน่นอนของเครื่องชั่ง B02

Symbol	Type	Nominal mass (g)								
		0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5
$u(\delta I_{rep})$	A	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005
$u(\delta I_{digo})$	B	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003
$u(\delta I_{digoL})$	B	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003
$u(\delta I_{ecc})$	B	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
$u(\delta m_c)$	B	0.0000010	0.0000010	0.0000010	0.0000010	0.0000015	0.0000020	0.0000025	0.0000030	0.0000040
$u(\delta m_D)$	B	0.0000023	0.0000023	0.0000023	0.0000023	0.0000035	0.0000046	0.0000058	0.0000069	0.0000092
$u(\delta m_B)$	B	0.0000009	0.0000009	0.0000009	0.0000012	0.0000014	0.0000017	0.0000023	0.0000029	0.0000036
$u(\delta m_{conv})$	B	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
$u(I)$		0.0000066	0.0000066	0.0000066	0.0000066	0.0000066	0.0000066	0.0000066	0.0000066	0.0000066
$u(m_{ref})$		0.0000027	0.0000027	0.0000027	0.0000028	0.0000041	0.0000053	0.0000067	0.0000081	0.0000107
$u(E)$		0.0000071	0.0000071	0.0000071	0.0000072	0.0000078	0.0000085	0.0000094	0.0000104	0.0000126
V_{eff}		37	37	37	39	53	75	112	168	363
k		2.07	2.07	2.07	2.06	2.05	2.03	2.00	2.00	2.00
$U(E)$ at 95% confidence level		0.000015	0.000015	0.000015	0.000015	0.000016	0.000017	0.000019	0.000021	0.000026

ตารางที่ 4 (ต่อ)

Symbol	Type	Nominal mass (g)								
		1	2	5	10	20	50	100	150	200
$u(\delta I_{rep})$	A	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005	0.000005
$u(\delta I_{dig0})$	B	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003
$u(\delta I_{digL})$	B	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003	0.000003
$u(\delta I_{ecc})$	B	0.0000001	0.0000002	0.0000004	0.0000009	0.0000017	0.0000043	0.0000087	0.0000130	0.0000173
$u(\delta m_c)$	B	0.000005	0.000006	0.000008	0.000010	0.000013	0.000015	0.000025	0.000040	0.000050
$u(\delta m_D)$	B	0.0000115	0.0000139	0.0000185	0.0000231	0.0000289	0.0000346	0.0000577	0.0000923	0.0001155
$u(\delta m_B)$	B	0.0000043	0.0000058	0.0000072	0.0000087	0.0000115	0.0000144	0.0000231	0.0000375	0.0000433
$u(\delta m_{conv})$	B	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000058	0.0000058	0.0000173	0.0000289	0.0000462	0.0000462
$u(I)$		0.0000066	0.0000066	0.0000066	0.0000066	0.0000068	0.0000078	0.0000109	0.0000146	0.0000185
$u(m_{ref})$		0.0000133	0.0000162	0.0000214	0.0000273	0.0000342	0.0000439	0.0000730	0.0001169	0.0001409
$u(E)$		0.0000148	0.0000175	0.0000224	0.0000281	0.0000349	0.0000446	0.0000738	0.0001178	0.0001421
V_{eff}		691	1351	3625	8978	21363	56977	427157	2772960	5871361
k		2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
$U(E)$ at 95% confidence level		0.000030	0.000035	0.000045	0.000057	0.000070	0.000090	0.00015	0.00024	0.00029

2. ผลการกำหนดค่าขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด (CMC) และเปรียบเทียบค่า CMC กับค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบด้านปริมาตร

นำค่า $U(E)$ ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% ที่ได้จากการประเมินค่าความไม่แน่นอนของเครื่องชั่ง B01 และ B02 ด้วยวิธี EURAMET cg-18 มาใช้ในการกำหนดค่า CMC ตั้งแต่ 1 มิลลิกรัม ถึง 200 กรัม สำหรับยื่นขอขยายขอบข่ายการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 ตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด (CMC)

รายการสอบเทียบ	ช่วงการสอบเทียบ	ขีดความสามารถของการสอบเทียบและการวัด	วิธีสอบเทียบ
non-automatic weighing instruments	1 mg to 5 mg	5.8 μ g	EURAMET cg-18
	> 5 mg to 10 mg	6.0 μ g	version 4.0
	> 10 mg to 20 mg	8.4 μ g	(11/2015)
	> 20 mg to 50 mg	11 μ g	
	> 50 mg to 100 mg	14 μ g	
	> 100 mg to 200 mg	17 μ g	
	> 200 mg to 500 mg	22 μ g	
	> 0.5 g to 1 g	27 μ g	
	> 1 g to 2 g	33 μ g	
	> 2 g to 5 g	43 μ g	
	> 5 g to 10 g	55 μ g	
	> 10 g to 20 g	69 μ g	
	> 20 g to 50 g	90 μ g	
	> 50 g to 100 g	0.15 mg	
	> 100 g to 200 g	0.29 mg	

เมื่อนำค่า CMC ที่ได้จากช่วงการสอบเทียบตั้งแต่ 1 มิลลิกรัม ถึง 200 กรัม มาเทียบกับเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบด้านปริมาตร โดยใช้เกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของการสอบเทียบเครื่องแก้ววัดปริมาตร ตาม ISO 10012:2003 และการสอบเทียบ piston pipette ตาม ISO 8655-2:2002 พบว่า ค่า CMC ที่ได้มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในทุกช่วงการสอบเทียบ ดังตารางที่ 6 แสดงให้เห็นว่า ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเครื่องมือ สาขามวลมีความสามารถให้บริการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ให้แก่งานสอบเทียบด้านปริมาตร

ซึ่งเป็นไปตามคำแนะนำการใช้บริการสอบเทียบอย่างมีประสิทธิภาพที่ให้ผู้ขอรับบริการพิจารณาเลือกห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่มีค่า CMC อยู่ในเกณฑ์การยอมรับที่กำหนด เพื่อให้ผลการสอบเทียบมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ (คมสัน, 2559) และสามารถรองรับงานสอบเทียบด้านปริมาตรที่มีความต้องการใช้ผลการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยวิธี EURAMET cg-18 ตามคำแนะนำของมาตรฐาน ASTM E542-22 (ASTM, 2022) และเพิ่มทางเลือกการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ให้แก่ผู้ขอรับบริการภายในสำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ได้

ตารางที่ 6 ผลการเปรียบเทียบค่า CMC กับค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบด้านปริมาตร

ช่วงการสอบเทียบ	ค่า CMC	ผลการเปรียบเทียบกับเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้	
		เครื่องแก้ววัดปริมาตร ^a ไม่เกิน 0.0006 g	piston pipette ^b ไม่เกิน 0.0002 g
1 mg to 5 mg	5.8 µg	<103.4 เท่า	<34.5 เท่า
> 5 mg to 10 mg	6.0 µg	<100.0 เท่า	<33.3 เท่า
> 10 mg to 20 mg	8.4 µg	<71.4 เท่า	<23.8 เท่า
> 20 mg to 50 mg	11 µg	<54.5 เท่า	<18.2 เท่า
> 50 mg to 100 mg	14 µg	<42.9 เท่า	<14.3 เท่า
> 100 mg to 200 mg	17 µg	<35.3 เท่า	<11.8 เท่า
> 200 mg to 500 mg	22 µg	<27.3 เท่า	<9.1 เท่า
> 0.5 g to 1 g	27 µg	<22.2 เท่า	<7.4 เท่า
> 1 g to 2 g	33 µg	<18.2 เท่า	<6.1 เท่า
> 2 g to 5 g	43 µg	<14.0 เท่า	<4.7 เท่า
> 5 g to 10 g	55 µg	<10.9 เท่า	<3.6 เท่า
> 10 g to 20 g	69 µg	<8.7 เท่า	<2.9 เท่า
> 20 g to 50 g	90 µg	<6.7 เท่า	<2.2 เท่า
> 50 g to 100 g	0.15 mg	<4.0 เท่า	NE
> 100 g to 200 g	0.29 mg	<2.1 เท่า	NE

หมายเหตุ: ^a ตาม ISO 10012:2003, ^b ตาม ISO 8655-2:2002, NE = not examined

4. ผลการทวนสอบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.001 มิลลิกรัม และ 0.01 มิลลิกรัม

จากการนำค่า SD , correction และ $U(E)$ ที่ได้จากการสอบเทียบเครื่องชั่ง B01 และ B02 ตามตารางที่ 2 และผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง B03 ถึง B05 ตามตารางผนวกที่ 1 มาใช้ในการทวนสอบเครื่องชั่ง B01 ถึง B05 โดยพิจารณาจาก 3 คุณลักษณะของเครื่องชั่ง ได้แก่ ค่าพิสัย ค่าความละเอียดของเครื่องชั่ง และค่าความผิดพลาดรวมของเครื่องชั่ง ตามตารางที่ 7 พบว่า ผลการเปรียบเทียบค่าพิสัยของน้ำหนักที่ใช้งาน และค่าความละเอียดของเครื่องชั่งที่ใช้งาน มีค่าไม่เกินตามข้อกำหนดการใช้งานเครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบด้านปริมาตร เช่น เครื่องชั่ง B01 ค่าน้ำหนักที่ใช้งาน ตั้งแต่ 1 ถึง 50 กรัม ไม่เกินค่าน้ำหนักสูงสุดของเครื่องชั่ง (50 กรัม) ในขณะที่ เครื่องชั่ง B02 ถึง B05 อ่านค่าความละเอียดของน้ำหนักที่ใช้งาน 0.01 กรัม ไม่เกินค่าความละเอียดของเครื่องชั่งที่กำหนดไว้ (0.1 กรัม) นอกจากนี้ เมื่อนำผลของค่าความผิดพลาดรวมของเครื่องชั่งมาเทียบกับเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบด้านปริมาตร พบว่า เครื่องชั่งทั้ง 5 เครื่อง มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ดังนั้น ผลการทวนสอบเครื่องชั่งจาก 3 คุณลักษณะดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่า “ผ่าน” ตามข้อกำหนดการใช้งานและเกณฑ์การยอมรับของงานสอบเทียบด้านปริมาตร จึงสามารถยืนยันได้ว่า เครื่องชั่ง B01 ถึง B05 สามารถนำไปใช้งานต่อไปได้

ตารางที่ 7 ผลการทวนสอบเครื่องชั่ง B01 ถึง B05

เครื่องชั่ง	คุณลักษณะของเครื่องชั่ง (g)						สรุปผล การทวนสอบ
	ค่าพิสัย		ค่าความละเอียด		ค่าความผิดพลาดรวม		
	ข้อกำหนด	น้ำหนัก ที่ใช้งาน	ข้อกำหนด	ความละเอียด ที่ใช้งาน	เกณฑ์การ ยอมรับ	ผล	
B01	50	1 – 50	0.001	0.001	0.0002	0.000098	ผ่าน
B02	200	1 – 200	0.1	0.01	0.0006	0.00033	ผ่าน
B03	200	1 – 200	0.1	0.01	0.0006	0.00031	ผ่าน
B04	200	1 – 200	0.1	0.01	0.0006	0.00042	ผ่าน
B05	200	1 – 200	0.1	0.01	0.0006	0.00038	ผ่าน

สรุปผล

การสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.001 มิลลิกรัม (เครื่องชั่ง B01) และ ความละเอียด 0.01 มิลลิกรัม (เครื่องชั่ง B02) ด้วยวิธี EURAMET cg-18 โดยทำการทดสอบ 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ repeatability, error of indication และ eccentricity พบว่า เครื่องชั่งสามารถแสดงพฤติกรรมการอ่านค่าได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และเที่ยงตรง ตลอดจนมีการกระจายน้ำหนักที่ดี เมื่อประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง ตามหลัก GUM และมาตรฐาน EURAMET cg-18 พบว่า ค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดของมวล ด้วยเหตุที่แหล่งความไม่แน่นอนเนื่องจากมวลอ้างอิง $u(m_{ref})$ มีแนวโน้มแปรผันตามมวลที่ชั่ง ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิง

มาตรฐานของมาตรฐาน EURAMET cg-18 และจากการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง ทำให้ได้ค่า $U(E)$ ที่ระดับความเชื่อมั่นประมาณ 95% มาใช้กำหนดค่า CMC สำหรับช่วงการสอบเทียบ ตั้งแต่ 1 มิลลิกรัม ถึง 200 กรัม เพื่อนำไปใช้สำหรับยื่นขอขยายขอบข่ายการรับรองความสามารถห้องปฏิบัติการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO/IEC 17025 รายการสอบเทียบ non-automatic weighing instruments วิธี EURAMET cg-18 version 4.0 (11/2015) กับสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และเมื่อนำค่า CMC ที่ได้มาเทียบกับเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องแก้ววัดปริมาตร และ piston pipette พบว่า ค่า CMC มีค่าน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในทุกช่วงการสอบเทียบ แสดงให้เห็นว่า วิธี EURAMET cg-18 สามารถนำไปใช้สอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อรองรับงานสอบเทียบด้านปริมาตรที่มีความต้องการใช้ผลการสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ด้วยวิธี EURAMET cg-18 ตามคำแนะนำของมาตรฐาน ASTM E542-22 (ASTM, 2022) ได้ นอกจากนี้ เมื่อทำการทวนสอบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.001 มิลลิกรัม และ 0.01 มิลลิกรัม จำนวน 5 เครื่อง พบว่า เครื่องชั่งทั้ง 5 เครื่อง มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงสามารถนำไปใช้งานต่อไปได้

ข้อเสนอแนะ

การสอบเทียบเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ ความละเอียด 0.001 มิลลิกรัม และ 0.01 มิลลิกรัม ซึ่งเป็นเครื่องชั่งที่มีความละเอียดสูง จำเป็นต้องมีการควบคุมและบันทึกสภาวะแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้สามารถส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่นของอากาศ ซึ่งมีผลต่อค่าชดเชยแรงพยุงอากาศ และอาจก่อให้เกิดผลของการพาความร้อน ดังนั้น ห้องปฏิบัติการจึงควรจัดทำ control chart เพื่อใช้วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมและความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้น ทั้งนี้ การควบคุมสภาวะแวดล้อมอย่างเข้มงวดเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยลดผลกระทบต่อการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการชั่ง และช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการสอบเทียบ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายสัตวแพทย์จิรภัทร อินทร์สุข ผู้อำนวยการสำนักตรวจสอบคุณภาพสินค้าปศุสัตว์ ที่ให้การสนับสนุนในการดำเนินงาน นางสาววิภาดา สิริสมภพชัย ผู้เชี่ยวชาญด้านการวิเคราะห์คุณภาพสินค้าปศุสัตว์ นายสัตวแพทย์ชัยวุฒิ วิสุทธิ นายเอกสิทธิ์ ตุ่มสิทธิ์ สำหรับคำปรึกษาและแนะนำ นายภาณุพันธุ์ สว่างวงศ์ และนายนพดล มะโนลัย สำหรับความช่วยเหลือและความร่วมมือให้ การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- คมสัน ยังจรูญ. 2559. การใช้บริการสอบเทียบอย่างมีประสิทธิภาพ. สำนักบริหารมาตรฐาน 4 สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. แหล่งที่มา: <https://www.tisi.go.th/data/lab/pdf/efficiency.pdf>. [29 กรกฎาคม 2568]
- จิตตกานต์ อินทรีย์. 2565. ผลกระทบของระบบปรับตั้งต่อประสิทธิภาพของเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์. *Bulletin of Applied Sciences*. 11(11): 105-112.
- สมโภชน์ บุญสนิท. 2548. การสอบเทียบเครื่องชั่งในระบบคุณภาพ. กรมวิทยาศาสตร์บริการ, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2562. ข้อเสนอแนะ(การตีความ) การนำ EURAMET Calibration Guide no. 18 ไปใช้สำหรับการสอบเทียบเครื่องชั่งแบบไม้อัตโนมัติ. GLA-25-00, 16/08/2562. แหล่งที่มา: https://www.tisi.go.th/data/lab/lab_pdf/gla_25_00.pdf. [29 กรกฎาคม 2568]
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2564. เอกสารวิชาการ เรื่อง ชีตความสามารถของการสอบเทียบและการวัด (Calibration and Measurement Capability : CMC). TLA-03-01, 06/2564. แหล่งที่มา: https://www.tisi.go.th/data/lab/lab_pdf/TLA-03-00.pdf. [29 กรกฎาคม 2568]
- อัจฉรา เจริญสุข และสิวินีย์ สวัสดิ์อารี. 2551. มาตรฐานเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, ปทุมธานี. 44 หน้า.
- ASTM. 2022. ASTM E542-22 Standard Practice for Gravimetric Calibration of Laboratory Volumetric Instruments. ASTM International. United States.
- Beckert, S. F. 2015. The calibration and measurement capability and its impact on metrological confirmation. XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry” August 30 - September 4, 2015, Prague, Czech Republic.
- BIPM. 2008. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections. First edition. Joint Committee for Guides in Metrology.
- EURAMET. 2015. Guidelines on the Calibration of Non-automatic Weighing Instruments. Calibration Guide no. 18 version 4.0 (11/2015). EURAMET e.V. Germany.
- Fritsch, K. 2017. EURAMET CG-18–Calibration of balances and scales-Update on international distribution and acceptance. IMEKO 23rd TC3, 13th TC5 and 4th TC22 International Conference 30 May to 1 June, 2017, Helsinki, Finland.
- Fritsch, K. 2019. EURAMET cg-18–state-of-the-art calibration guideline for non-automatic weighing instruments. *ACTA IMEKO*. 8(3): 10-18.

- Haller, J., A. Taube, N. Ludolph and E. Hage. 2020. EURAMET cg-18 calibration guide for electronic, non-automatic weighing instruments. Sartorius white paper. [Online]. Available: <https://www.sartorius.com/resource/blob/580734/1c11cdeb1c9440ac0537e8b88dddf69/calibration-guideline-euramet-white-paper-en-sartorius-pdf-data.pdf>. Accessed July 27, 2025.
- Högström, R., V. Korpelainen, K. Riski and M. Heinonen. 2010. Atomic force microscopy studies of surface contamination on stainless steel weights. *Metrologia*. 47(6): 670-676.
- Hong, Y-D. and B. Lee. 2019. Logarithmic Strain Model for Nonlinear Load Cell. *Sensors*. 19(16): 1-7.
- OIML. 2004. OIML R 111-1, Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3 Part 1: Metrological and technical requirements. International Organization of Legal Metrology. France.
- OIML. 2006. OIML R 76-1, Non-automatic weighing instruments Part 1: Metrological and technical requirements - Tests. The International Organization of Legal Metrology. France.
- ISO. 2002. ISO 8655-2:2022, Piston-operated volumetric apparatus Part 2: Pipettes. Second edition. International Organization of Legal Metrology. Switzerland.
- ISO. 2003. ISO 10012:2003, Measurement management systems - Requirements for measurement processes and measuring equipment. First edition. International Organization for Standardization. Switzerland.
- ISO. 2017a. ISO 14253-1:2017, Geometrical product specifications (GPS) - Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment Part 1: Decision rules for verifying conformity or nonconformity with specifications. Third edition. International Organization for Standardization. Switzerland.
- ISO. 2017b. ISO/IEC 17025:2017, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. Third edition. International Organization for Standardization. Switzerland.
- Malengo, A. 2014. Buoyancy effects and correlations in calibration and use of electronic balances. *Metrologia*. 51(5): 441.
- Medina, N. 2019. News on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments. 19th International Congress of Metrology, 27002 (2019).

- Rahman, M.A., M. Afroze, R.M. Mazumdar, M. Moniruzzaman, M.T.H. Bhuiyan, M.H. Razu and M. Khan. 2015. Source of Uncertainties in Uncertainty Estimation of Analytical Balance and Volumetric Glassware Calibration. *World Applied Sciences Journal*. 33(11): 1740-1745.
- Salahinejad, M. and F. Aflaki. 2007. Uncertainty Measurement of Weighing Results from an Electronic Analytical Balance. *Measurement Science Review*. 7(3): 67-75.
- UKAS. 2024. UKAS M3003, The expression of uncertainty and confidence in measurement. sixth edition. United Kingdom Accreditation Service. United Kingdom.
- Vălcu, A., S. Baicu, A. Taină and R. Todor. 2016. Comparative Measurements on an Electronic Weighing Instrument. International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE). doi:10.1109/ICEPE.2016.7781407.

ภาคผนวก

ตารางผนวกที่ 1 ผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง B03, B04 และ B05

Nominal mass (g)	ผลการสอบเทียบเครื่องชั่ง (g)								
	B03			B04			B05		
	<i>SD</i>	correction	<i>U(E)</i> at 95% confidence level	<i>SD</i>	correction	<i>U(E)</i> at 95% confidence level	<i>SD</i>	correction	<i>U(E)</i> at 95% confidence level
0.01		0.00000	±0.000017		-0.00001	±0.000017		-0.00001	±0.000019
0.1		-0.00001	±0.000020		-0.00003	±0.000020		-0.00001	±0.000022
1		0.00000	±0.000030		0.00000	±0.000030		0.00000	±0.000031
2		-0.00001	±0.000036		-0.00001	±0.000036		-0.00002	±0.000036
5		-0.00001	±0.000045		-0.00001	±0.000046		-0.00001	±0.000046
10		0.00001	±0.000057		0.00001	±0.000057		0.00003	±0.000057
20		-0.00001	±0.000070		0.00001	±0.000073		0.00003	±0.000071
50		0.00001	±0.000090		-0.00001	±0.00010		-0.00006	±0.000091
100		0.00002	±0.00015		-0.00008	±0.00018		-0.00007	±0.00015
200	0.000012	0.00001	±0.00029	0.000012	0.00007	±0.00034	0.000013	0.00009	±0.00029