

การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบและสร้าง
ต้นแบบเครื่องสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดระดับอ้างอิง ขนาด 10 นิวตัน-เมตร
A Study of Possibility of Design and Construction
Prototype of 10 N·m Reference Torque Calibration Machine

ณัฐพล แส่นคำ*, ทศนัย แส่นพลพัฒน์ และ รัตพล คงชนะ

ห้องปฏิบัติการแรงบิด ฝ่ายมาตรวิทยาเชิงกล สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

3/4-5 หมู่ที่ 3 ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: Email: nattapon@nimt.or.th, โทรศัพท์: 025 775 100 ต่อ 2238, โทรสาร: 025 775 095

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษา ออกแบบ และสร้างต้นแบบเครื่องสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิด ที่คำนึงถึงการผลิตและจัดหาส่วนประกอบภายในประเทศเป็นสำคัญ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดการใช้งานเครื่องมือมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard) ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดที่มีความถูกต้องในระดับ ≥ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ลดการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศที่มีราคาสูง และรองรับการสอบเทียบที่ถูกร้องขอจากทางห้องปฏิบัติการระดับทุติยภูมิ (Secondary laboratory) และจากทางภาคอุตสาหกรรม

ต้นแบบเครื่องสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดที่ออกแบบและสร้างขึ้น มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ทรานส์ดิวเซอร์วัดแรงบิดระดับอ้างอิง (Reference torque standard) ความถูกต้อง 0.03 เปอร์เซ็นต์ ที่ถูกสอบเทียบจากเครื่องมือมาตรฐานระดับปฐมภูมิ, แอร์เบริงออกแบบสร้างขึ้นให้สามารถทนแรงกดได้มากกว่า 200 นิวตัน อิทธิพลของความเสียดทานและการสั่นสะเทือน ≤ 30 มิลลิกรัม, เกียร์ทดรอบขนาด 1:3600, รางลิเนียร์ (Linear guide) พร้อมฐาน อุปกรณ์เชื่อมต่อที่ใช้กำลังน้ำมัน (Hydraulic coupling) และอุปกรณ์เชื่อมต่อแบบยืดหยุ่น (Flexible coupling) นำมาประกอบกันเป็นระบบการวัด ประเมินความสามารถในการวัดและการสอบเทียบ (Calibration and measurement capability) ของระบบที่สร้างขึ้นโดยพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of measurement) ที่เกิดจากปริมาณที่มีอิทธิพลต่อการวัด เช่น ลักษณะสมบัติทางมาตรวิทยาของเครื่องมือวัดแรงบิด ความเสียดทานและการสั่นสะเทือนของแอร์เบริง รวมถึงทำการเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องสอบเทียบแรงบิดมาตรฐานปฐมภูมิ จากการประเมินดังกล่าวพบว่าระบบมีความสามารถในการวัดและการสอบเทียบ 0.04 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($k=2$) ซึ่งสามารถใช้สอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดตามวิธีการมาตรฐาน EURAMET/cg-14/v.01, DIN 51309: 2005, BS 7882: 2008, DKD-R 3-7: 2003 และ ISO 6789 (E): 2008 ได้

คำหลัก: เครื่องสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิด, ความสามารถในการวัดและการสอบเทียบ และความไม่แน่นอนของการวัด

Abstract

This paper reports on a study, design, and construction of the prototype of the 10 Newton·m reference torque calibration machine by mainly considering the supply and domestic production. The purpose is threefold: (1) to reduce the use of the primary standard on calibration of torque with the accuracy rate at ≥ 0.2 percent; (2) to reduce the high cost of imported equipment; and (3) to support the calibration requested by the secondary laboratory and industries.

The prototype of torque calibration machine consists of the important components: the reference torque standard with ≤ 0.03 percent accuracy that is calibrated by primary standards; the air bearing that is designed to support a lateral force more than 200 Newton; the influence of friction and

vibration that is ≤ 30 milligram; the gear with ratio 1:3600; the linear guide with base; the hydraulic coupling; and the flexible coupling. All of the components are assembled to be the measurement system. The calibration and measurement capability is evaluated by considering the uncertainties of the measurements caused by the influence of mechanical properties of the torque measuring device and the friction and vibration of the air bearing, including the measurement comparison of the primary torque standards. From the uncertainty evaluation, the calibration and measurement capability is about 0.04 percent expressed at 95 percent confidence level ($k = 2$), which can be used to calibrate the torque measuring device according to the calibration standard EURAMET/cg-14/v.01, DIN 51309: 2005, BS 7882: 2008, DKD-R 3-7: 2003 and ISO 6789 (E): 2008.

Keywords: Torque calibration machine, Calibration and measurement capability and Uncertainty of measurement.

1. บทนำ

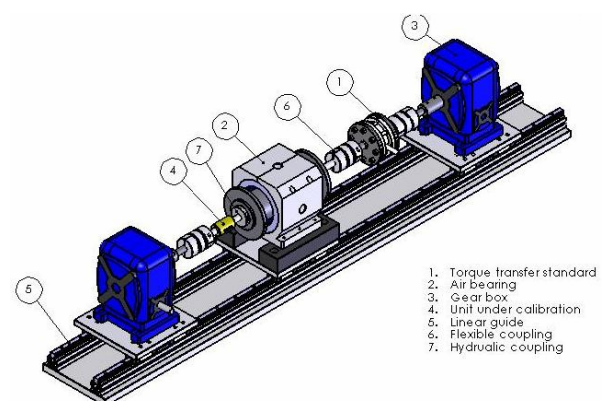
การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดที่มีความถูกต้องสูงในระดับ ≤ 0.2 % นิยมใช้เครื่องสอบเทียบแรงบิดมาตรฐานประเภทน้ำหนักตายตัว (Deadweight torque standard machine) [1, 2, 3] เนื่องจากมีความถูกต้องแม่นยำ และมีเสถียรภาพสูง แต่กระบวนการสอบเทียบค่อนข้างยุ่งยาก ใช้เวลาในการปฏิบัติงาน และจำเป็นต้องอาศัยทักษะของผู้ปฏิบัติงานสูง ส่วนเครื่องมือที่มีความถูกต้องในระดับ > 0.2 % ขึ้นไปนิยมใช้เครื่องสอบเทียบแรงบิดประเภทเปรียบเทียบค่าโดยตรง (Direct comparison) [4] ซึ่งที่ใช้งานง่าย สะดวก รวดเร็ว สอบเทียบได้ทั้งแบบต่อเนื่อง และแบบทีละขั้นตอน สามารถใช้สอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดตามวิธีการมาตรฐาน EURAMET/cg-14/v.01 [5], DIN 51309: 2005 [6], BS 7882: 2008 [7], DKD-R 3-7: 2003 [8] และ ISO 6789 (E): 2008 [9] ได้

ในปัจจุบันเครื่องมือสอบเทียบแรงบิดประเภทนี้มีราคาที่สูงมาก ยังไม่สามารถผลิตในประเทศ จำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เนื่องจากในการออกแบบประกอบ และทวนสอบต้องอาศัยทักษะ ความรู้ ความชำนาญเฉพาะทาง และเครื่องมือวัดที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง ดังนั้นสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ในฐานะผู้มีหน้าที่ จัดทำ รักษา และพัฒนาหน่วยวัดแห่งชาติ จึงได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบ และสร้างต้นแบบเครื่องสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดระดับอ้างอิงพิสัยการวัด 1-10 N·m (10 N·m TCM) ขึ้น โดยคำนึงถึงการจัดการและผลิตส่วนประกอบต่าง ๆ ภายในประเทศทั้งหมด

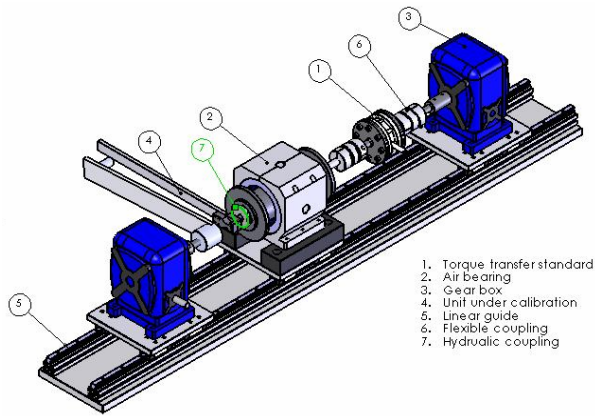
2. ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1 หลักการพื้นฐานของการประกอบระบบ

รูปที่ 1 และรูปที่ 2 แสดงแนวความคิดในการจัดเรียงและติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดที่จัดสร้างขึ้น ร่างลิเนียร์ทั้งสองถูกติดตั้งให้ขนานกันบนฐานรองรับ เกียร์และแอร์เบริงถูกวางบนแผ่นอลูมิเนียมที่ติดตั้งเข้ากับร่างลิเนียร์ จัดเรียงให้เกียร์ทั้ง 2 และแอร์เบริงร่วมศูนย์ โดยเอียงศูนย์กันไม่เกิน ± 50 μm โดยใช้เกจวัดระยะ ติดตั้งทรานส์ดิวเซอร์วัดแรงบิดระดับอ้างอิงเข้ากับเกียร์ และแอร์เบริงผ่านอุปกรณ์เชื่อมต่อแบบยืดหยุ่นเพื่อช่วยลดผลจากการปรับแนวที่ผิดพลาด (Misalignment) ในกรณีที่เป็นการวัดแรงบิดบริสุทธิ์ (Pure torque) เช่น การสอบเทียบเครื่องมือประเภทสกรู การติดตั้งดังรูปที่ 1 ส่วนการสอบเทียบเครื่องมือประเภทประแจ สามารถติดตั้งได้ดังรูปที่ 2



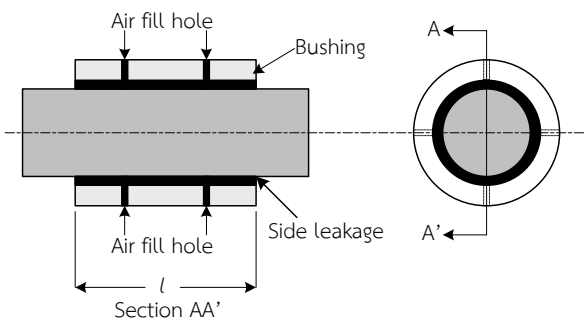
รูปที่ 1 การจัดเรียงและติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดประเภทสกรู



รูปที่ 2 การจัดเรียงและติดตั้งส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดประเภทประแจ

2.2 การออกแบบสร้างแอร์แบร์ริง

แอร์แบร์ริงที่เลือกใช้ในงานวิจัยเป็นแบบ อากาศ-สถิตยศาสตร์ (Aerostatic) ชนิดข้อสั้มผัส (Journal) ซึ่งประกอบด้วย เฟลาข้อสั้มผัส และบล็อก (bushing) รูปแบบทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 3 ใช้วัสดุประเภท เหล็กกล้าไร้สนิม AISI440C ชุบแข็งที่ 50 ± 2 HRC



รูปที่ 3 แอร์แบร์ริงชนิดข้อสั้มผัส (Journal air bearing)

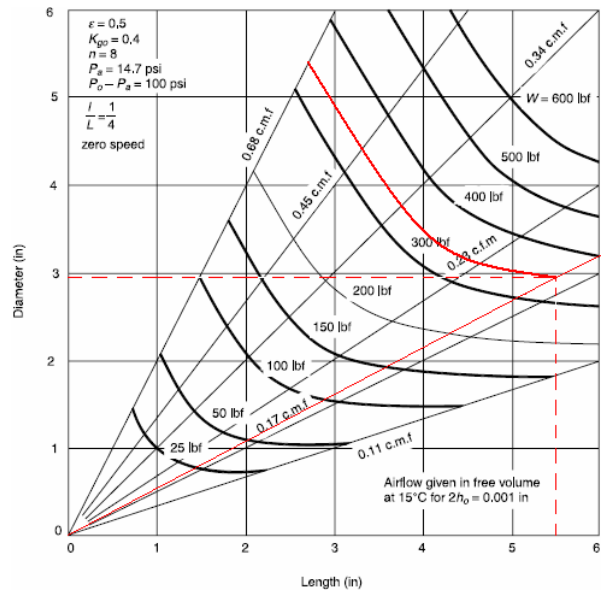
รูปที่ 4 [10] แสดงถึงประสิทธิภาพของแอร์แบร์ริงชนิดที่ใช้ในงานวิจัย ที่คำนวณจากการจ่ายแรงดันแก๊ส ($P_o - P_o$) ที่ 100 psi (ประมาณ 6.89 bars) โดยถ้าต้องการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้เป็นอื่น สามารถคำนวณได้ดังนี้

- แรงดันแก๊สอื่น ๆ คูณโหลด (W) ด้วย $\frac{(P_o - P_o)}{100}$
- ช่องว่างขนาดอื่น ๆ คูณการไหลด้วย $\left(\frac{2h_o}{0.001} \right)^3$
- ที่ $(P_o - P_o) = 75 \text{ lbf/in}^2$ คูณการไหลด้วย 0.65

- ที่ $(P_o - P_o) = 50 \text{ lbf/in}^2$ คูณการไหลด้วย 0.27
- ที่ $(P_o - P_o) = 25 \text{ lbf/in}^2$ คูณการไหลด้วย 0.14
- ความแข็งตึงในแนวรัศมี (Radial stiffness),

$$K = \frac{2W}{h_o} \text{ และ ความแข็งตึงในแนวเฉียง (Tilt stiffness)}$$

$$\text{เท่ากับ } \frac{KL^2}{16}$$



รูปที่ 4 ประสิทธิภาพการทำงานโดยทั่วไปของแอร์แบร์ริงชนิดข้อสั้มผัสที่มีการจ่ายแรงดันอย่างง่าย

จากการทดลองก่อนทำการวิจัยนี้ ได้ทดลองใช้งาน บล็อกชนิดรูพรุน (Porous air bushing) ของ NEWWAY air bearing ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75.020 mm ที่มีอยู่ ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของแอร์แบร์ริงที่สร้างขึ้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการออกแบบให้ บล็อกมีขนาดเท่ากับที่มีอยู่คือ เส้นผ่านศูนย์กลางใน (75.020 + 0.005) mm เส้นผ่านศูนย์กลางนอก 100 mm ยาว 140 mm การร่วมศูนย์กันของผิวนอกและผิวในไม่เกิน 0.010 mm ผิวในเจียรนัยละเอียด 0.5 μm กำหนดให้เฟลาข้อสั้มผัสมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (75.000 - 0.005) mm ยาว 150 mm ความขนาน 0.004 mm ผิวเจียรนัยละเอียด 0.5 μm

เนื่องด้วยข้อจำกัดในความถูกต้องและแม่นยำของเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน ทางผู้ผลิตสามารถสร้าง บล็อกได้ในขนาด 75.026 mm เฟลาข้อสั้มผัสขนาด 74.951 mm ส่วนพารามิเตอร์อื่น ๆ เป็นไปตามที่กำหนด

ทำให้มีช่องว่างรัศมี (h_o) 0.037 mm ดังนั้นเมื่อนำค่ามิติของปลอกที่สร้างขึ้นไปเปรียบเทียบกับรูปที่ 4 แสดงดังเส้นประพบว่าแอร์แบริงที่สร้างขึ้นสามารถรับโหลดได้ประมาณ 330 lbf ที่แรงดันเกจ 100 lbf/in² แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการจ่ายแรงดันให้กับระบบให้น้อย เพื่อลดอิทธิพลของแรงลมและการสั่นสะเทือน ซึ่งจากการทดลองพบว่าแอร์แบริงทำงานได้ดีที่สุดที่แรงดันเกจประมาณ 4 bars (≈ 58 lbf/in²) ขึ้นไป ดังนั้นเมื่อคำนวณที่แรงดันดังกล่าวทำให้ระบบสามารถรับโหลดได้

$$330 \times \left(\frac{58}{100} \right) = 191.4 \text{ lbf หรือประมาณ } 444.8 \text{ N}$$

และที่แรงดัน 58 lbf/in² ต้องการอัตราการไหล

$$(0.23 \times 0.51) \times \left(\frac{2h_o}{0.001} \right)^3 = 0.37 \text{ ft}^3/\text{min หรือ}$$

ประมาณ 0.0105 m³/min

ซึ่งทั้งแรงดันและอัตราการไหลที่คำนวณได้อู่ภายใต้ความสามารถของระบบการจ่ายที่มีอยู่ อีกทั้งโหลดที่ใช้ในระบบการวัดแรงบิดบวกกับน้ำหนักของเพลาช้อสัมผัสและอุปกรณ์เชื่อมต่ออื่น ๆ ก็ไม่เกิน 200 N ทำให้มั่นใจว่าแอร์แบริงที่ออกแบบสร้างขึ้นสามารถทำงานได้

2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และความไม่แน่นอนของการวัดของระบบ (Mathematical model and uncertainty of measurement)

แรงบิดที่ได้จากเครื่องมือต้นแบบถูกอธิบายโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้

$$M = M_{\text{Ref}} - \sum_{i=1}^n (\delta M_i) \quad (1)$$

โดย

M_{Ref}	ค่าแรงบิดจากทรานสดิวเซอร์อ้างอิง พร้อมด้วยความไม่แน่นอนของการวัด (Torque value from reference torque transducer with uncertainty of measurement)
δM_1	แรงบิดเสียดทานของแอร์แบริง (Frictional torque of air bearing)
δM_2	อิทธิพลของอุณหภูมิต่อทรานสดิวเซอร์อ้างอิง (Temperature effect)

สำหรับปริมาณอินพุตที่ไม่มีสหสัมพันธ์กัน ความไม่แน่นอนมาตรฐานสัมบูรณ์ $u(M)$ ของแรงบิด M แสดงโดยกฎการแพร่ดังสมการที่ (2) ซึ่งความไม่แน่นอนมาตรฐานสัมพัทธ์ $w(M) = u(M)/M$

$$w(M) = \sqrt{w^2(M_{\text{Ref}}) + \sum_{i=1}^n w^2(\delta M_i)} \quad (2)$$

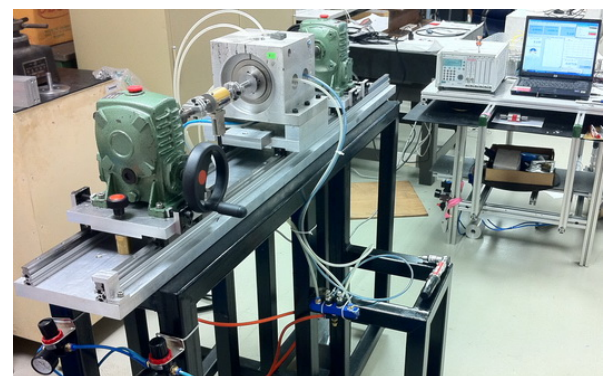
3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

1. ประกอบ ทดสอบ และสอบเทียบระบบ
2. ประเมินความไม่แน่นอนของการวัดของระบบ
3. ยืนยันความสามารถในการวัดและการสอบเทียบของระบบ

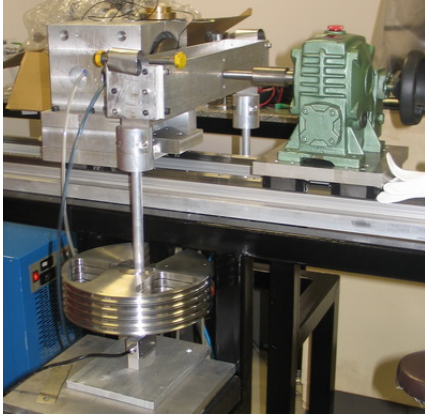
3.1 ประกอบ และทดสอบระบบ

3.1.1 ประกอบและติดตั้งระบบตามหลักการและเงื่อนไขตามหัวข้อ 2.1 แสดงการประกอบที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 5 จากนั้นทดลองจ่ายและปรับแรงดันที่เหมาะสมให้กับแอร์แบริง เพื่อทดสอบการสัมผัสกันระหว่างปลอกกับเพลาช้อสัมผัส โดยใช้วงจรทางไฟฟ้า แล้วทำการทดสอบฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์เชื่อมต่อทุกชิ้น



รูปที่ 5 เครื่องมือทดสอบเครื่องวัดแรงบิดขนาด 10 N·m ที่ประกอบขึ้น

3.1.2 ทดลองหาแรงบิดเสียดทานของแอร์แบริง ซึ่งจะถูกแสดงอยู่ในรูปของความสามารถในการทวนซ้ำได้ของการวัด (Repeatability of measurement) โดยใช้เครื่องชั่งในหน่วยมิลลิกรัม โดยติดตั้งคานความยาว 0.2 m เข้ากับเพลาช้อสัมผัส แล้วต่อแขนที่ติดตั้งถาดรองรับตุ้มน้ำหนักเข้ากับปลายทั้งสองด้านของคาน ให้ถาดด้านหนึ่งแนบกับเครื่องชั่งพอดี เครื่องชั่งที่ใช้มีความแยกขีด (resolution) 10 mg แสดงการติดตั้งดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การติดตั้งชุดทดสอบความผิดและการสั่นสะเทือน

เนื่องจากระบบถูกสร้างเพื่อรองรับการสอบเทียบทั้งการวัดแรงบิดบริสุทธิ์ (Pure torque) กรณีสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดประเภทสกรู และวัดแรงบิดพร้อมด้วยแรงตามขวาง (Torque with cross force) กรณีสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดประเภทประแจ ซึ่งรูปแบบนี้จะมีแรงจากด้านข้าง (lateral force) เข้ามากระทำต่อแบริ่งจากการจ่ายแรงที่ก้านของประแจ ดังนั้นการทดลองจึงถูกออกแบบให้สามารถสะท้อนถึงเหตุการณ์ในการทำการวัดทั้ง 2 แบบ เมื่อพิจารณาที่วิธีการมาตรฐาน DKD-R 3-7: 2003 พบว่าระยะของก้านประแจสั้นสุดที่ต้องจ่ายแรงคือ 0.1 m ดังนั้นในการสอบเทียบประแจที่ 10 N·m แอร์เบริ่งจะถูกกดด้วยแรงขนาด 100 นิวตัน หรือคิดเป็นน้ำหนักประมาณ 10.22324 kg

- ทดสอบในสถานะที่ไม่มีโหลดกระทำต่อแบริ่ง โดยวางตุ้มน้ำหนักเข้าออกจำนวน 5 ครั้ง ที่ตุ้มขนาด 20, 50 และ 100 มิลลิกรัม

- ทดสอบในสถานะที่มีโหลดกระทำต่อแบริ่ง โดยยึดปลายถาดด้านหนึ่งเข้ากับโครงสร้างเพื่อจ่ายโหลดคงที่ขนาด 40, 60, 80 และ 100 N บนถาดด้านที่ติดกับเครื่องชั่ง

- ในแต่ละโหลดคงที่ 40, 60, 80 และ 100 N ให้วางตุ้มน้ำหนักเข้าออกจำนวน 5 ครั้ง ที่ตุ้มขนาด 20, 50 และ 100 mg

- บันทึกผลการทดลองทั้งหมดแล้วนำไปประมวลผลเพื่อประเมินหาความไม่แน่นอนของการวัดต่อไป

3.2 การเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องแรงบิดมาตรฐานปฐมภูมิ

เพื่อเป็นการยืนยันความสามารถในการวัดและการสอบเทียบของระบบที่สร้างขึ้น ดังนั้นจึงต้องทำการ

เปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องแรงบิดมาตรฐานปฐมภูมิทั้งในแบบแรงบิดบริสุทธิ์ และแรงบิดพร้อมด้วยแรงตามขวาง ตามวิธีการดังนี้

3.2.1 การเปรียบเทียบผลการวัดแบบแรงบิดบริสุทธิ์

ตัวกลางเปรียบเทียบ (Artifact) เป็นทรานสดิวเซอร์วัดแรงบิดรุ่น TCTP/10 N·m ของ มว. ที่จัดทำขึ้นเอง ความถูกต้อง 0.2 % และใช้ทรานสดิวเซอร์อ้างอิงรุ่น TT1/10 N·m ของ Rauter Finland ความถูกต้อง 0.03 % ทำการสอบเทียบทรานสดิวเซอร์ทั้ง 2 ตามวิธีการมาตรฐาน DIN 51309: 2005 โดยเครื่องแรงบิดมาตรฐาน DmBN/1000 N·m ของ GTM Germany (1 kN·m TSM) ที่มีความไม่แน่นอนของการวัด 0.01 % จากนั้นนำทรานสดิวเซอร์ TT1/10 N·m มาติดตั้งที่เครื่องสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดที่สร้างขึ้น (10 N·m TCM) เพื่อใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงในการสอบเทียบ TCTP/10 N·m ตามวิธีการมาตรฐาน DIN 51309: 2005 เช่นเดียวกัน

3.2.2 การเปรียบเทียบผลการวัดแบบแรงบิดพร้อมด้วยแรงตามขวาง

ตัวกลางเปรียบเทียบเป็นประแจวัดแรงบิดอ้างอิง (Reference torque wrench) รุ่น DmTS/20 N·m ของ GTM Germany ความถูกต้อง 0.2 % สอบเทียบตามวิธีการมาตรฐาน DKD-R 3-7: 2003 ที่ 10 N·m โดย 1 kN·m TSM และ 10 N·m TCM

4. ผลการสอบเทียบ การประเมินความไม่แน่นอนของการวัด และการเปรียบเทียบผลการวัด

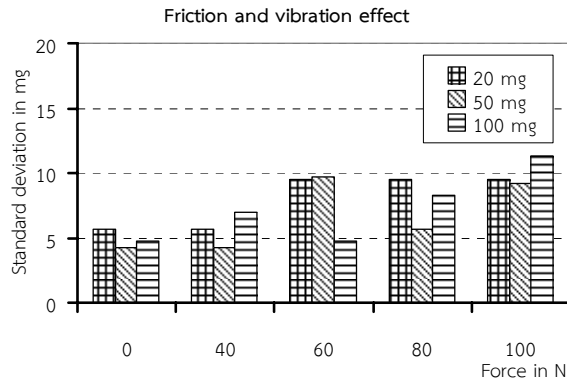
ผลการสอบเทียบปริมาณความผิด และการสั่นสะเทือนที่มีผลต่อระบบการวัดแรงบิดถูกนำมาประเมินเป็นความไม่แน่นอนของการวัดของเครื่องมือต้นแบบที่สร้างขึ้น ส่วนผลการเปรียบเทียบผลการวัดถูกนำมายืนยันความสามารถในการวัดและการสอบเทียบ

4.1 ผลการสอบเทียบความผิดและการสั่นสะเทือน

จากผลการสอบเทียบดังรูปที่ 7 พบว่าแรงบิดเสียดทานในรูปของความสามารถในการทนซ้ำได้ของการวัดทั้งในสถานะที่ไม่มีโหลด และทุก ๆ โหลดคงที่ มีค่าไม่ดีกว่า 12 mg ประเมินให้อยู่ในรูปของแรงบิด โดยสมการ

$$M_f = mg \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) \cdot L \text{ จะได้ } 0.000012 \text{ N·m ซึ่งจาก}$$

การสังเกตระหว่างทำการสอบเทียบพบว่าค่าที่แกว่งไปมา (fluctuate) ของเครื่องซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของแอร์เบริ่ง



รูปที่ 7 แรงบิดเสียดทานของแอร์แบร์ริง

4.2 ผลการประเมินความไม่แน่นอนของการวัดของระบบ

จากผลของแรงบิดเสียดทาน (0.000012 N·m) และอิทธิพลของอุณหภูมิต่อทรานดิวเซอร์อ้างอิง (ข้อมูลจากผู้ผลิต 0.005 %/°C) สามารถประเมินหาความไม่แน่นอนของการวัดของ 10 N·m TCM ตามสมการที่ (2) และแสดงตัวอย่างการคำนวณที่ค่าแรงบิด 1 N·m และ 10 N·m ดังตารางที่ 1 และ 2

ตารางที่ 1 งบความไม่แน่นอนของการวัดที่ 1 N·m

Quantity	Estimate	Probability distribution	Rel. standard uncertainty $w(x_i)$	Sensitivity coefficient c_i	Rel. uncertainty contribution $w(y)$ in %
X_1	x_i				
M_{Ref}	1 N·m	Normal	0.015 %	1	0.015
δM_1	0.000012 N·m	Normal	0.00054 %	1	0.00054
δM_2	2 °C	Rectangular	0.5774 °C	0.005	0.0029
Combined relative standard uncertainty, $w_c(M)$					0.0153
Relative expanded uncertainty, $W(M)$ at $k=2$					0.031

ตารางที่ 2 งบความไม่แน่นอนของการวัดที่ 10 N·m

Quantity	Estimate	Probability distribution	Rel. standard uncertainty $w(x_i)$	Sensitivity coefficient c_i	Rel. uncertainty contribution $w(y)$ in %
X_1	x_i				
M_{Ref}	10 N·m	Normal	0.015 %	1	0.015
δM_1	0.000012 N·m	Normal	0.00054 %	1	0.00054
δM_2	2 °C	Rectangular	0.5774 °C	0.005	0.0029
Combined relative standard uncertainty, $w_c(M)$					0.0153
Relative expanded uncertainty, $W(M)$ at $k=2$					0.031

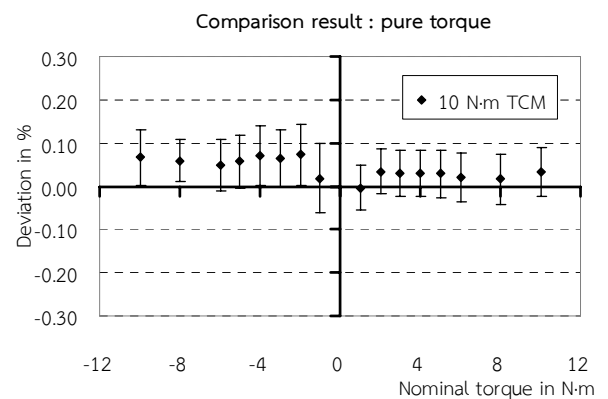
จากตารางที่ 1 และ 2 พบว่าเครื่องมือต้นแบบที่สร้างขึ้นมีความไม่แน่นอนของการวัด 0.04 % ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($k=2$) ซึ่งสามารถใช้สอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดระดับความถูกต้อง ≥ 0.2 % ได้

4.3 ผลการเปรียบเทียบผลการวัด

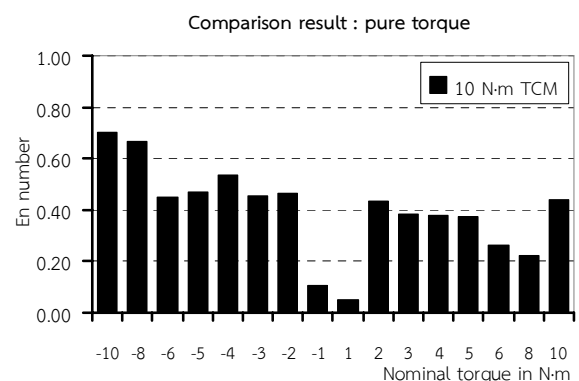
การเปรียบเทียบการวัด ถูกประเมินโดยใช้แนวทาง ISO/IEC GUIDE 4-1: 1997 และ ISO/IEC GUIDE 43-2: 1997 “Proficiency Testing by the Interlaboratory Comparisons” [11, 12] หาค่าเบี่ยงเบนของผลการวัด (10 N·m TCM) จากค่าที่วัดโดย 1 kN·m TSM และหาค่า E_n number

4.3.1 ผลการเปรียบเทียบผลการวัดแรงบิดบริสุทธิ์

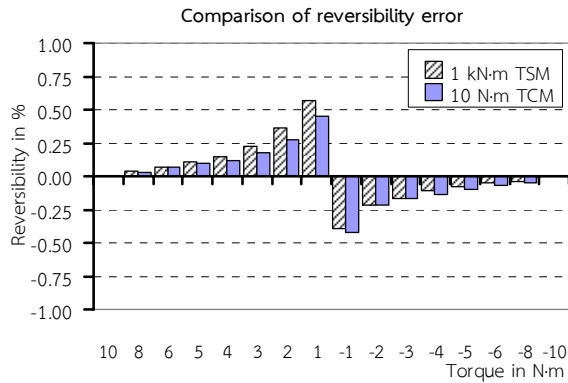
รูปที่ 8 แสดงการเบี่ยงเบนจากค่าอ้างอิง และความไม่แน่นอนของการวัด รูปที่ 9 แสดงองศาความเท่าเทียมในรูปของ E_n number ของทุก ๆ ค่าวัด และรูปที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการผันกลับได้ (Reversibility error, h) โดยเครื่อง 10 N·m TCM และ 1 kN·m



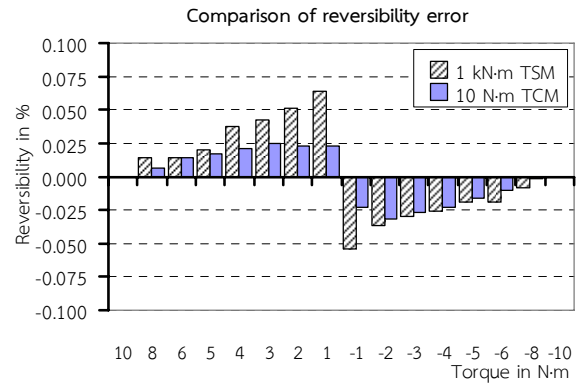
รูปที่ 8 ความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์จากค่าอ้างอิงพร้อมด้วย ความไม่แน่นอนของการวัด



รูปที่ 9 องศาความเท่าเทียมในรูปของ E_n number



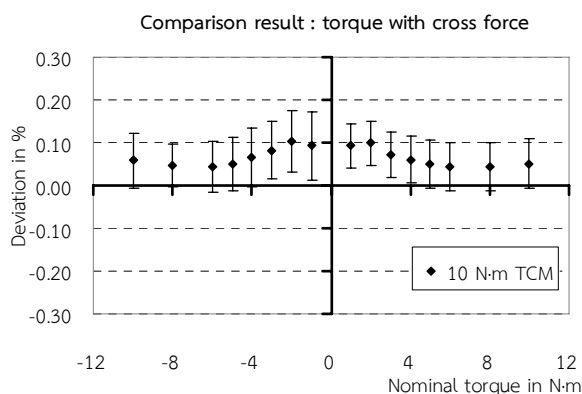
รูปที่ 10 ความคลาดเคลื่อนการผันกลับได้ของการวัด



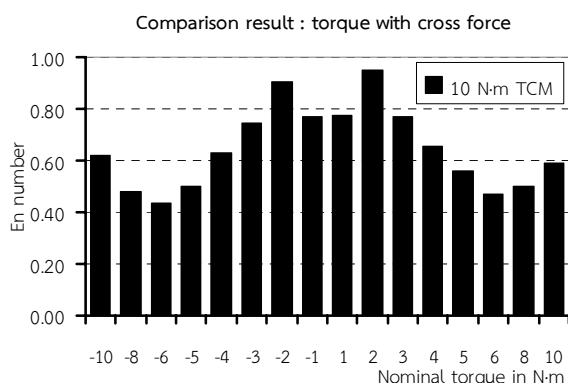
รูปที่ 13 ความคลาดเคลื่อนการผันกลับได้ของการวัด

4.3.2 ผลการเปรียบเทียบผลการวัดแรงบิดพร้อมด้วยแรงตามขวาง

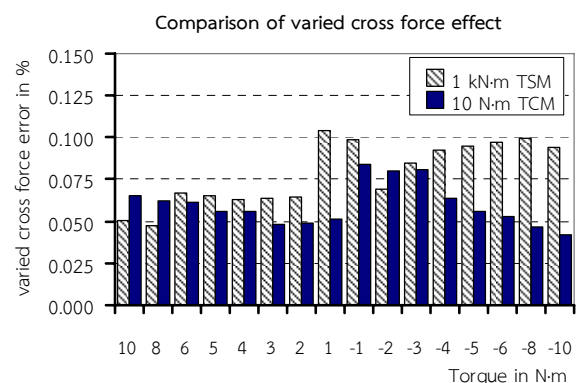
รูปที่ 11 แสดงการเบี่ยงเบนจากค่าอ้างอิง และความไม่แน่นอนของการวัด รูปที่ 12 แสดงองศาความเท่าเทียมในรูปของ E_n number ของทุก ๆ ค่าวัด และรูปที่ 13 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนการผันกลับได้ (Reversibility error, h)



รูปที่ 11 ความเบี่ยงเบนสัมพัทธ์จากค่าอ้างอิงพร้อมด้วยความไม่แน่นอนของการวัด



รูปที่ 12 องศาความเท่าเทียมในรูปของ E_n number



รูปที่ 14 ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงตามขวาง

รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงตามขวางของการวัด (Varied cross force effect) โดยเครื่อง 1 kN·m TSM และ 10 N·m TCM

5. การอภิปรายผล และสรุปผลการวิจัย

ต้นแบบเครื่องสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดขนาด 10 N·m ที่ออกแบบสร้างขึ้นโดยมีแอร์เบริงแบบอากาศสถิตยศาสตร์ ชนิดข้อสัมผัส เป็นองค์ประกอบหลักทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สามารถรับโหลดได้ตามที่กำหนด และมีผลของแรงบิดเสียดทานอยู่ในระดับที่ดี (0.000012 N·m) เมื่อประเมินความไม่แน่นอนของการวัดทั้งระบบ พบว่ามีค่า 0.04 % ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($k=2$) เพียงพอต่อการเป็นเครื่องมือระดับมาตรฐานอ้างอิง ใช้ในการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดที่มีระดับความถูกต้อง ≥ 0.2 % ขึ้นไป ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์

การยืนยันความสามารถของระบบการวัดที่สร้างขึ้น ถูกตัดสิน และแสดงในเชิงปริมาณเป็นสองเกณฑ์ คือ ความเบี่ยงเบนจากค่าอ้างอิง และ E_n number ซึ่งผลการเปรียบเทียบทุกจุดการวัดอยู่ภายใต้การยืนยันความไม่แน่นอนของการวัด และมีค่า E_n น้อยกว่า 1

ลักษณะสมบัติทางมาตรวิทยาของเครื่องมือวัด แรงบิดที่สำคัญที่นำมาพิจารณา คือ ความคลาดเคลื่อน การผันกลับได้ของการวัดและความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแรงตามขวาง ที่ได้จากการสอบเทียบ โดยเครื่องมือมาตรฐานทั้ง 2 (1 kN·m TSM และ 10 N·m TCM) มีความสอดคล้องกัน โดยมีความต่างอยู่ภายใต้ความไม่แน่นอนของการวัดที่กำหนด

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Diedert, P. and Dietmar, M. (1994). Determination of the friction of aerostatic radial bearings for the lever-mass system of torque standard machines, paper presented in the XII IMEKO WORLD CONGRESS, September 5-9, 1994, Torino, Italy.

[2] Oliveira, R., Cabral, L., Kolwinski, U. and Schwind, D. (2005). PERFORMANCE OF THE NEW PRIMARY TORQUE STANDARD MACHINE OF INMETRO, BRAZIL, paper presented in the 19th International IMEKO TC3 Conference, February, 2005, Cairo, Egypt.

[3] Jose, A., Jorge, L. and Alfonso, L. (2006). TORQUE STANDARD MACHINE AT CEM, paper presented in the XVIII IMEKO WORLD CONGRESS, September 17-22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil.

[4] Diedert, P. (1996). Proposal for the Design of Torque Calibration Machines Using the Principle of a Component System, paper presented in the Proceedings of the 15th IMEKO TC3 Conference, October 7-11, 1996, Madrid, Spain.

[5] European Association of National Metrology Institutes. (2007). EURAMET/cg-14/v.01: Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices, July 2007.

[6] Working Committee NMP 811 Materials testing machines. (2005). DIN 51309: Materials

testing machines - Calibration of static torque measuring devices, Germany, December 2005.

[7] ISE/NFE/4/1. (2008). BS 7882: Method for calibration and classification of torque measuring devices, England, January 2008.

[8] The technical committee Force, Pressure, Mass of the German Calibration Service (Deutscher Kalibrierdienst-DKD) in Cooperation with the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). (2003). DKD-R 3-7: Static calibration of torque transfer wrenches, Braunschweig, August 2003.

[9] International Organization for Standardization. TC 29/SC 10. (2003). ISO 6789: Assembly tools for screws and nuts-Hand torque tools-Requirement and test methods for design conformance testing, quality conformance testing and recalibration procedure, 2003.

[10] V.C.VENKATESH and SUDIN IZMAN (2007). Precision engineering, Tata McGraw-Hill, New Delhi.

[11] ISO/IEC GUIDE 43-1: Proficiency testing by interlaboratory comparisons – Part1: Development and operation of proficiency testing schemes, 1997.

[12] ISO/IEC GUIDE 43-2: Proficiency testing by interlaboratory comparison – Part2: Development and operation of proficiency testing schemes, 1997.