

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

ต้นแบบเครื่องวัดแรงบิดแบบใหม่ โดยใช้หลักการวัดมุมที่เปลี่ยนรูปไป New Prototype of Torque Transducer by Direct Measurement of Deformed Angle

ณัฐพล แสนคำ^{1*} และ ทศนัย แสนพลพัฒน์¹

¹ ห้องปฏิบัติการแรงบิด ฝ่ายมาตรวิทยาเชิงกล สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

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

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

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องมือวัดแรงบิดต้นแบบที่ใช้หลักการวัดมุมที่เปลี่ยนรูปไปโดยตรง มีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบจากปริมาณแรง ที่ปะปนมากับปริมาณแรงบิดที่ถูกวัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงบิดที่ได้จากเครื่องมือประเภทประแจ ตัวแกนวัดแรงบิดถูกออกแบบให้รับแรงบิดสูงสุด 200 N·m ติดตั้งอุปกรณ์รับรู้สัญญาณแรงบิด 3 แบบ คือ Strain gauge, อุปกรณ์วัดมุมแบบ Angle encoder และอุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน (Coordinate measurement system) โดยที่ความเหมาะสมในการออกแบบถูกยืนยันด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการทดลองพบว่าสัญญาณจาก Strain gauge มีความเบี่ยงเบนตามปริมาณแรงและตำแหน่งมุมที่แรงกระทำบนแกนรับแรงบิด $\pm 0.15\%$ สอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานโดยระเบียบวิธี FEA ในขณะที่สัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุมแบบ Angle encoder มีความเบี่ยงเบนตามปริมาณแรงและตำแหน่งมุมที่แรงกระทำบนแกนรับแรงบิด $\pm 0.30\%$ ส่วนสัญญาณจากระบบวัด 2 แกน มีความเบี่ยงเบนตามปริมาณแรง $\pm 0.15\%$ แต่ไม่มีผลต่อตำแหน่งมุมที่แรงกระทำบนแกนรับแรงบิด ความถูกต้องของเครื่องมือวัดต้นแบบถูกประเมินทางมาตรวิทยา โดยการสอบเทียบตามมาตรฐาน DKD-R 3-8: 2003 โดยใช้ Torque transfer wrench ที่มีความถูกต้อง $\pm 0.10\%$ เป็นมาตรฐานอ้างอิง ซึ่งจากผลการสอบเทียบพบว่าเครื่องมือวัดต้นแบบมีความถูกต้องอยู่ที่ $\pm 0.50\%$ สามารถใช้งานเป็น torque wrench calibrator ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งความถูกต้องของเครื่องมือต้นแบบจะสูงขึ้นถ้าใช้อุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน ที่มีความสามารถในการทวนซ้ำได้ของการวัด (Repeatability) ดีกว่า $\pm 0.05 \mu\text{m}$ และความถูกต้องดีกว่า $\pm 0.1 \mu\text{m}$

คำหลัก: มาตรวิทยา, เครื่องมือวัดแรงบิด, มุมบิด, ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

Abstract

This paper studies, designs, and invents the prototype of torque transducer using the direct measurement of the deformed angle. The purpose is to reduce the influence of parasitic force in the torque measurement of wrench types. The maximum capacity of the torque transducer is designed to 200 N.m. The three sensing elements, including the strain gauge, the angle encoder, and the coordinate

measurement system, are applied to use with the transducer. The design is optimized using the finite element analysis (FEA).

The experimental results, which are supported by the FEA simulation methods, show that the $\pm 0.15\%$ deviation of the strain gauge signal is varied by the quantity and act of force position on the torque axis. The deviation of the signal from angle encoder is varied by the quantity and act of force position on the torque axis $\pm 0.25\%$. The deviation of signal from the coordinate measurement system is varied by the quantity of force $\pm 0.15\%$, but it does not affect the position of force that acts on the torque axis. The accuracy of the prototype model is metrologically evaluated by the standard calibration method DKD-R 3-8: 2003 using the torque transfer wrench with the $\pm 0.10\%$ accuracy. Based on the calibration results, the accuracy is $\pm 0.50\%$ and can be used as the torque wrench calibrator properly. The accuracy of the prototype equipment will rise if the 2-axis angle measurement device has the repeatability that is better than $\pm 0.05 \mu\text{m}$ and the accuracy that is better than $\pm 0.1 \mu\text{m}$.

Keywords: Metrology, Torque measuring device, Torsional angle and Finite element

1. บทนำ

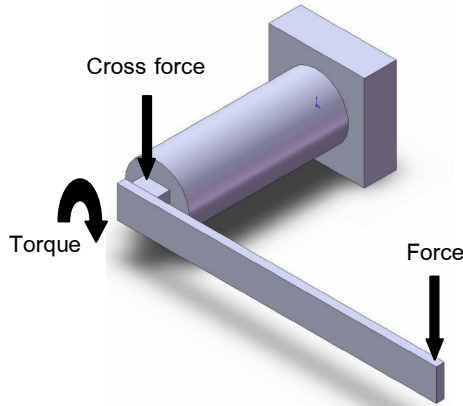
เครื่องมือวัดแรงบิด (Torque transducer, TTS) ในปัจจุบันใช้หลักการวัดการเปลี่ยนรูปไปของวัสดุ นิยมใช้ Strain gauge เป็นตัวรับรู้สัญญาณ เพื่อสะท้อนสมบัติทางกลของวัสดุโดยการแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้า มีสมบัติความแม่นยำสูง และสามารถรับรู้ความเครียด ได้ในระดับไมโครอน แต่มีความไวต่ออุณหภูมิและความชื้นสูง ทั้งยังรับรู้ปริมาณอื่นๆ ที่ปะปนเข้ามาในระบบการวัด เช่น Axial forces, Bending moments และ Lateral forces เป็นต้น ซึ่งปริมาณเหล่านี้ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงบิด ดังนั้นเพื่อความถูกต้องจึงจำเป็นต้องมีการชดเชยปริมาณต่างๆ ที่เข้ามากระทบ

ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีการศึกษาและวิเคราะห์ถึงอิทธิพลต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อ การสอบเทียบ Torque transducer [1-4] ทั้งที่เกิดจากสมบัติของวัสดุเอง และปัจจัยภายนอก อาทิเช่น ผลจาก Eccentric mounting และการ Misalignment ในการติดตั้ง ที่ปะปนมากับค่าแรงบิดที่วัดได้ รวมถึงการพิจารณาถึงอิทธิพลของการหมุนโดยรอบของ Rotary torque transducer ที่ถูกสอบเทียบแบบสถิต (Static) [5] และในส่วนของการพิจารณาถึงอิทธิพลของความแตกต่างระหว่างสภาวะ

แวดล้อมที่ใช้ในการสอบเทียบกับสถานที่ในการใช้งานจริง มีงานวิจัยที่มีการนำเอา Reference torque transducer ไปใช้ในการสอบเทียบนอกสถานที่ให้กับ Rotating torque transducer ในเครื่อง Power test stand [6] ซึ่งผลของงานวิจัยทั้งหมดข้างต้นพบว่าการวัดแรงบิดได้รับผลกระทบจาก ทั้งสมบัติของตัววัสดุเอง และปัจจัยภายนอกดังสิ่งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

เพื่อการหลีกเลี่ยงและลดอิทธิพลจากปัจจัยทางกลต่างๆ ที่จะเข้ามากระทบต่อระบบการวัดแรงบิด จนทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการศึกษาและออกแบบเครื่องมือวัดแรงบิดที่มีคุณสมบัติทนต่อปริมาณที่เข้ามากระทบ และสามารถชดเชยอิทธิพลของ Cross force ที่ทำให้เกิด Bending moment ในการวัดแรงบิดของเครื่องมือประเภทประแจ เครื่องมือที่ออกแบบขึ้นอาศัยหลักการวัดมุมบิดของวัสดุที่ถูกบิดไปโดยตรงด้วยเครื่องมือวัดมุมความละเอียดสูง ที่ไม่มีผลจากอิทธิพลของความแตกต่างของสภาวะแวดล้อมที่ทำการวัด

รูปที่ 1 แสดงการบิดที่เกิดจากการให้แรงกระทำที่ระยะหนึ่งของคานทำให้เกิดการบิด และปริมาณ Cross force กระทำกับแกนเพลลา



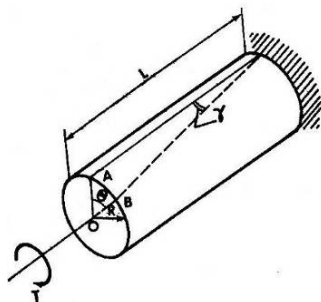
รูปที่ 1 Torque with cross force

2. ทฤษฎีพื้นฐาน

โหลดที่กระทำตั้งฉากกับแกนลักษณะหนึ่งคือการบิด โดยที่ตัวอย่างของชิ้นงานที่รับโหลดในลักษณะนี้ เช่น เผลา อาจจะเป็นเผลากลมตัน (Solid) หรือเผลากลมกลวง (Hollow) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน ตลอดอยู่ภายใต้การบิด ทุกๆ ภาคตัดของเผลาจะอยู่ภายใต้การเค้น ขณะที่เผลาบิดไปจะมีโมเมนต์ต้านทานต่อการบิด เนื่องจากความเค้นเฉือนบนเผลา โมเมนต์ต้านทานนี้จะมีค่าเท่ากับตลอดความยาวเผลา และมีทิศทางตรงข้ามกับโมเมนต์บิดหรือแรงบิดที่กระทำกับเผลา

2.1 มุมบิด

พิจารณาเผลากลมตันรัศมี R อยู่ภายใต้แรงบิด T ที่ปลายข้างหนึ่ง ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งยึดแน่นดังรูปที่ 2 ผลจากแรงบิดนี้ทำให้เส้นรัศมีที่ปลายอิสระของเผลาบิดไปเป็นมุมเรเดียณ จุด A เลื่อนไปอยู่ที่ B และ AB รองรับมุมที่ปลายยึดแน่น ดังนั้นจึงเป็นมุมที่เปลี่ยนแปลงตามแนวยาวของเผลา ซึ่งก็คือความเค้นเฉือนของเผลา



รูปที่ 2 เผลากลมภายใต้แรงบิด

เนื่องจากมุมบิดเป็น $\text{radian} = \frac{\text{curve}}{\text{radius}}$ ดังนั้น

$$\text{curve } AB = R\theta \approx L\gamma$$

$$\gamma = \frac{R\theta}{L} \quad (1)$$

$$\text{จากนิยามของโมดูลัสเฉือน } G = \frac{\tau}{\gamma}$$

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (2)$$

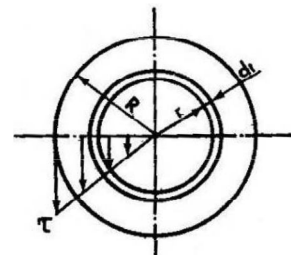
$$\text{ให้สมการ (1) และ (2) เท่ากัน ดังนั้น } \frac{R\theta}{L} = \frac{\tau}{G}$$

$$\frac{\tau}{R} = \frac{G\theta}{L} = \frac{\tau'}{r} \quad (3)$$

เมื่อ τ' เป็นความเค้นเฉือนที่รัศมี r ใดๆ ค่า G คือ โมดูลัสเฉือน มีหน่วยเป็น N/m^2 และ τ คือ ความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็น N/m^2

2.2 แรงบิดและโมเมนต์ความเฉื่อย

พิจารณา Element บนภาคตัดเผลา ที่อยู่ที่รัศมี r และหนา dr ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ภาคตัดเผลา

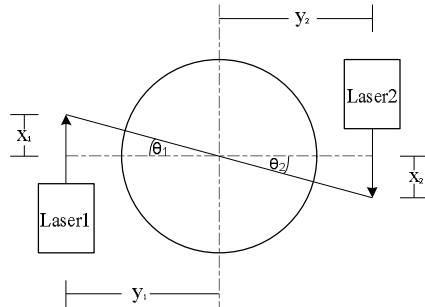
ความเค้นเฉือนบน Element นี้คือ τ' และแรงบน Element นี้คือ $dF = \tau' \times 2\pi r dr$ แรงนี้จะทำให้เกิดโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางเผลา ซึ่งทำให้เกิดแรงบิด $dT = dF \times r = (\tau' \times 2\pi r dr) \times r = 2\pi \tau' r^2 dr$ แต่เนื่องจากความเค้นเฉือน มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามรัศมี r ดังนั้นจะต้องเปลี่ยนรูป τ' ให้อยู่ในรูปของ r โดยใช้สมการที่ (3) $\tau' = \frac{G\theta}{L} r$ ได้สมการแรงบิด

$$T = \int_0^R 2\pi \frac{G\theta}{L} r^3 dr = \frac{G\theta}{L} \int_0^R 2\pi r^3 dr \quad (4)$$

โดยที่เทอม $\int_0^R 2\pi r^3 dr$ นี้คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว (Polar moment of inertia, J)

3. การประมวลผลการวัดมุมบิดแบบ 2 แกน

จากสมมติฐานที่ว่า การทำงานในสภาวะ Pure torque ระยะกระจัด x_1 และ x_2 จะต้องมามีค่าที่เท่ากัน



รูปที่ 4 มุมบิดของการวัดแบบ Pure torque

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (5)$$

ดังนั้น $\bar{x} = \frac{x'_1 + x'_2}{2} \quad (6)$

เพราะฉะนั้น $x'_1 = \bar{x} \quad (7)$

$$x'_2 = \bar{x} \quad (8)$$

เมื่อ x'_1 และ x'_2 คือ ระยะที่ถูกขดเชยความไม่สมบูรณ์ในการให้สัญญาณ และกำหนดให้ค่าขดเชย Δx_1 และ Δx_2 เป็น

$$\Delta x_1 = \bar{x} - x_1 \quad (9)$$

$$\Delta x_2 = \bar{x} - x_2 \quad (10)$$

จากสมการที่ (7), (8) และสมการที่ (9), (10) จะได้สมการ

$$x'_1 = x_1 + \Delta x_1 \quad (11)$$

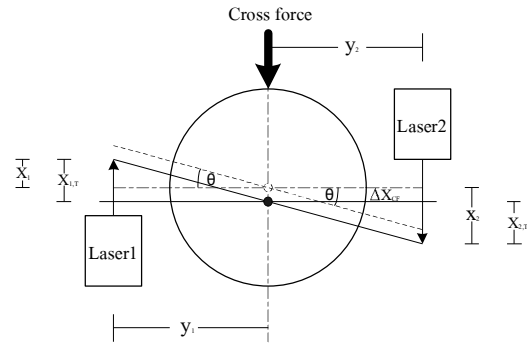
$$x'_2 = x_2 + \Delta x_2 \quad (12)$$

ค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดมุมบิดแบบ 2 แกน เป็นระยะกระจัด x_1 และ x_2 ดังรูปที่ 4 ส่วน y_1 และ y_2 เป็นระยะที่ถูกกำหนด ดังนั้นสามารถหามุมที่บิดไปของเครื่องมือวัดแรงบิดได้ดังสมการที่ (13)

จาก $\tan \theta_i = \frac{x_i}{y_i}$

$$\theta_i = a \tan \frac{x_i}{y_i}, \text{ เมื่อ } i = 1, 2 \quad (13)$$

ในกรณีที่ เป็น Torque with cross force ระยะกระจัดที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดมุมบิดแบบ 2 แกน จะเป็นดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 มุมบิดของการวัดแบบ Torque with cross force

จากรูปที่ 5 เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$x_1 = x_{1,T} - \Delta x_{CF} \quad (14)$$

$$x_2 = x_{2,T} + \Delta x_{CF} \quad (15)$$

เมื่อ x_1 และ x_2 คือระยะกระจัดที่ได้จากอุปกรณ์วัดมุมบิดแบบ 2 แกน จากการบิด และปะปนไปด้วยโมเมนต์ดัด $x_{1,T}$ และ $x_{2,T}$ คือระยะกระจัดที่เกิดจากการบิด

ส่วน Δx_{CF} คือระยะกระจัดที่เกิดจาก Cross force

ให้ $x_{1,T} = x_{2,T} = x_T$ จากนั้นนำสมการที่ (15) ตั้งลบด้วยสมการที่ (14) จะได้

$$\Delta x_{CF} = \frac{x_2 - x_1}{2} \quad (16)$$

และเมื่อนำสมการที่ (14) บวกด้วยสมการที่ (15) จะได้

$$x_T = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (17)$$

ดังนั้นสามารถหามุมที่บิดไปได้ดังสมการที่ (18)

เมื่อ $y_1 = y_2 = y$

จาก $\tan \theta = \frac{x_T}{y}$

$$\theta = a \tan \frac{x_T}{y} \quad (18)$$

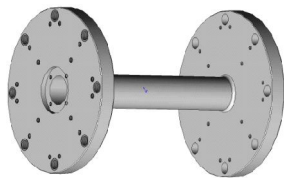
4. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบ TTS ขนาด 200 N·m จำนวน 1 ชิ้น และยืนยันการออกแบบโดยวิธี FEA จากนั้นได้จัดสร้างชิ้นงานตามแบบ พร้อมกับจัดหาอุปกรณ์รับรู้สัญญาณที่มีหลักการต่างกัน 3 ประเภท แล้วดำเนินการเก็บผลการทดลองด้วยขั้นตอนการ

ดำเนินงานที่เฉพาะเจาะจง เพื่อให้มั่นใจว่าผลการทดลองดังกล่าว สามารถนำมาวิเคราะห์หาสมบัติทางมาตรวิทยา เช่น การทวนซ้ำได้ และการทำซ้ำได้ เนื่องจากผลของ Cross force, Zero error และ Hysteresis เป็นต้น หลังจากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการทนต่อ Cross force ในแต่ละตำแหน่งการวัด และการ Varied cross force ที่ 200 N·m และสอบเทียบ TTS ที่จัดสร้างขึ้น

4.1 ออกแบบเครื่องมือวัดแรงบิด

ผู้วิจัยได้ออกแบบ TTS โดยกำหนดให้สามารถรับแรงบิดสูงสุด 200 N·m ที่ Sensitivity 1000 μ Strain (2 mV/V) และมุมบิด 1° ลักษณะเป็นเพลากลมกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 27.69 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25.00 mm และมีความยาว 125 mm ดังรูปที่ 6 ใช้ได้กับตัวรับรู้สัญญาณทั้ง 3 แบบ เลือกลีเกิ้ล DC53 [7] ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสมบัติใช้ทำเครื่องมือวัดที่สามารถหาได้ภายในประเทศ ชุบแข็งที่ 50 ± 2 HRC



รูปที่ 6 เครื่องมือวัดแรงบิด

4.2 ยืนยันการออกแบบโดยวิธี FEA

ยืนยันความถูกต้องโดยพิจารณาถึง Sensitivity และความเหมาะสมของค่า Safety factor ของชิ้นงานที่ออกแบบขึ้น โดยวิเคราะห์การทำงานทั้งแบบ Pure torque และ Torque with cross force

ค่าความเค้นและความเครียดวิเคราะห์จากบริเวณตำแหน่งที่จะติดตั้ง Strain gauge ส่วนค่า Safety factor วิเคราะห์จากตำแหน่งที่ทรานสดิวเซอร์รับสูงสุด

4.3 อุปกรณ์รับรู้สัญญาณ

อุปกรณ์รับรู้สัญญาณทั้ง 3 ประเภท มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

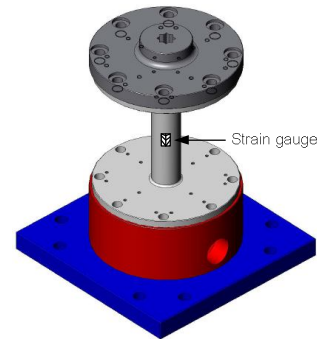
1) Strain gauge เป็นชนิดวัด Shear/Torsion ของ HBM รุ่น 1-XY41-6/120 ต่อวงจรแบบ Full bridge เพื่อให้ได้ sensitivity 2 mV/V

2) Angle encoder ใช้ของ Heidenhain รุ่น ROD 280 ที่มีความแยกชัด 0.0001°

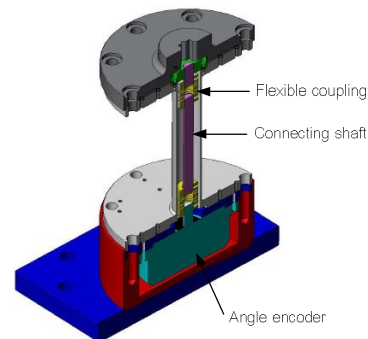
3) อุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน รุ่น LK-G37 ของ KEYENCE ที่มีความเป็นเชิงเส้น 0.05% of F.S. และการทวนซ้ำได้ 0.05 μ m

4.4 การติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณ และวิธีการทดลอง

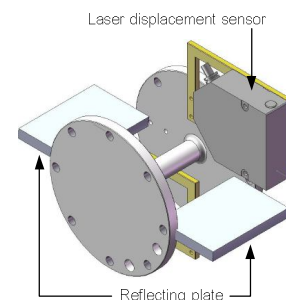
ลักษณะการติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณทั้ง 3 แบบเพื่อทำการเก็บผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 7, 8 และ 9



รูปที่ 7 ตำแหน่งการติดตั้ง Strain gauge



รูปที่ 8 การติดตั้ง Angle encoder

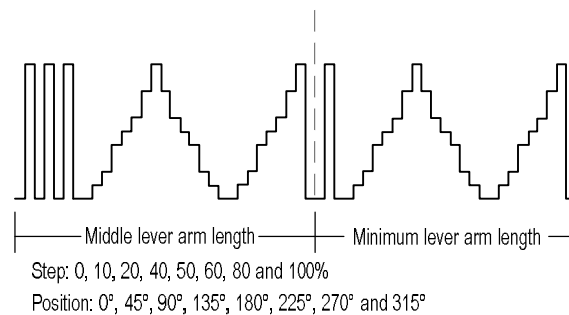


รูปที่ 9 การติดตั้ง Laser displacement sensor

ทำการทดลองโดยใช้ Torque transfer wrench ที่มีความถูกต้อง $\pm 0.10\%$ เป็นมาตรฐานอ้างอิง กำหนดตำแหน่งบนทรานสดิวเซอร์ทุก 45° ให้เป็นตำแหน่งมุม $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ$ และ 315° ตามลำดับ เริ่มเก็บข้อมูลที่ Cross force กระทำกับตำแหน่ง 0° ที่ค่าแรงบิด 0, 10, 20, 40, 50, 60, 80 และ 100% ตามลำดับ อนุกรมการวัดแสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 10 เมื่อเสร็จสิ้นการวัดของตำแหน่ง 0° ให้กระทำต่อจนครบทุกตำแหน่งตามที่กำหนดไว้ และกับตัวรับรู้สัญญาณทั้ง 3 แบบ

ตารางที่ 1 จำนวนครั้งของอนุกรมการวัด

จำนวนครั้งของอนุกรมการวัด			
ระยะด้ามปกติ		ระยะด้ามสั้นสุด	
ขาขึ้น	ขาลง	ขาขึ้น	ขาลง
2	1	2	1



รูปที่ 10 ขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 11 การติดตั้งอุปกรณ์ในเก็บผลการทดลอง

4.5 การสอบเทียบ TTS

หลังจากการทดลองเพื่อหาความสามารถในการทนต่ออิทธิพลของ Cross force แล้ว ก่อนนำเครื่องมือที่สร้างขึ้นไปใช้งานจริงจะต้องทำการสอบเทียบ และ

ประเมินความไม่แน่นอนของการวัดตามวิธีการมาตรฐาน DKD-R 3-8: 2003 "Static calibration of torque wrench calibration devices" [8] โดยเลือกตำแหน่งการวัดที่ตัวรับรู้สัญญาณแต่ละตัวทนต่อ Cross force ดีที่สุดเป็นตำแหน่งในการสอบเทียบ

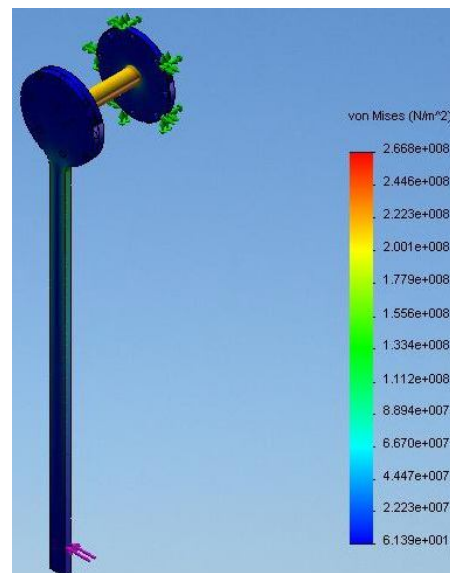
5. ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลที่ได้จากการจำลองการทำงานโดย FEA และผลที่ได้จากการวัดจริงจากตัวรับรู้สัญญาณทั้ง 3 แบบ

5.1 ผลการวิเคราะห์โดย FEA

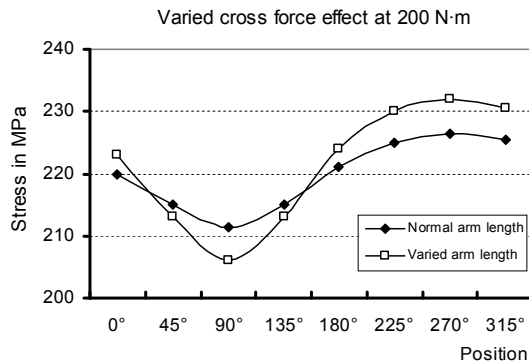
ผลการวิเคราะห์ยืนยันความถูกต้องในการออกแบบแสดงดังตารางที่ 2 เมื่อพิจารณาที่ TTS แบบ Torque with cross force พบว่าได้ค่า Sensitivity ต่ำกว่าที่กำหนดไว้ข้างต้นในข้อ 4.1 ประมาณ 19% เมื่อแปลงให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้าจะได้ sensitivity ประมาณ 1.62034 mV/V และได้ค่า Safety factor ที่สามารถโหลดเกินพิกัดได้ประมาณ 32% ตารางที่ 2 จำนวนครั้งของอนุกรมการวัด

Type of torque Result	Pure torque	Torque with cross force
Stress in MPa	224.13	219.99
Micro strain	869.81	810.17
Safety factor	1.39	1.32



รูปที่ 12 การวิเคราะห์โดย FEA

รูปที่ 12 แสดงการจำลองการทำงาน ในการวิเคราะห์หิทธิพลของ Cross force ที่มีต่อตำแหน่งต่างๆ บน TTS และอิทธิพลของการ Varied cross force บนคอมพิวเตอร์



รูปที่ 13 ความเค้น ณ ตำแหน่งการวัดต่างๆ ที่ Cross force ปกติ และ Varied cross force

ผลการจำลองการทำงานดังรูปที่ 13 แสดงค่าความเค้นในแต่ละตำแหน่งที่เกิดจากการจ่ายค่าแรงบิดให้กับ TTS ที่ Cross force ปกติ และ Varied cross force ที่ตำแหน่ง 0°

การ Varied cross force กระทำโดยจ่ายแรงสูงขึ้นเท่าตัวกระทำกับระยะคานกึ่งหนึ่งของระยะปกติ เป็นการคงค่าแรงบิดให้เท่าเดิม จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า Cross force ไม่เพียงแต่มีผลต่อตำแหน่งในการวัดเท่านั้น การ Varied cross force ก็ส่งผลต่อการวัดแรงบิดเช่นกัน

5.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองของตัวรับรู้สัญญาณทั้ง 3 แบบ ถูกประเมินความคลาดเคลื่อนของการวัดเนื่องจากการ Varied cross force ดังสมการที่ (19)

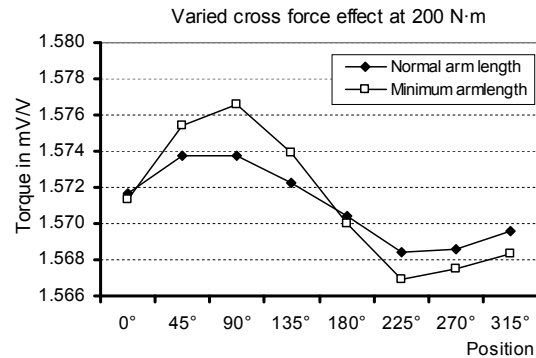
$$b_F = \frac{X_{F_{nor}} - X_{F_{min}}}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (19)$$

เมื่อ $X_{F_{nor}}$ และ $X_{F_{min}}$ คือค่าวัดซ้ำขึ้นของชุดการวัดที่ภาวะ Cross force ปกติ และภาวะ Varied cross force ตามลำดับ

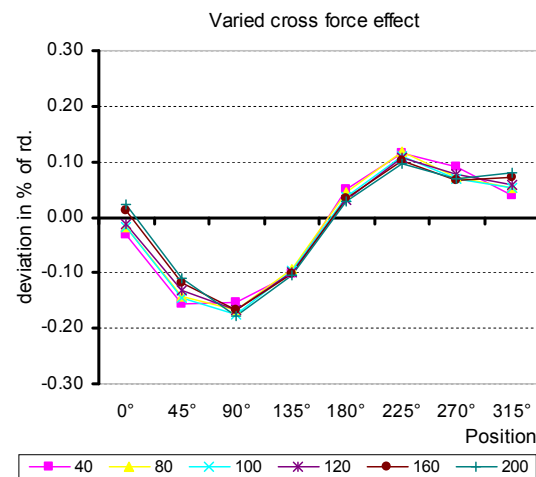
5.2.1 ตัวรับรู้สัญญาณแบบ Strain gauge

รูปที่ 14 แสดงผลการทดลองที่ค่าแรงบิด 200 N·m ในหน่วย mV/V ที่ Cross force ปกติ และ

Varied cross force พบว่าในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัด ได้ค่าแรงบิดที่แตกต่างกันมีรูปแบบเป็นไซน์ แสดงให้เห็นว่าผลการวัดที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์โดย FEA เพียงแต่ค่าที่ได้ต่างเฟสกันเท่านั้น ซึ่งเกิดจากตำแหน่งในการติดตั้ง Strain gauge



รูปที่ 14 แรงบิด ณ ตำแหน่งการวัดต่างๆ ที่ Cross force ปกติ และ Varied cross force



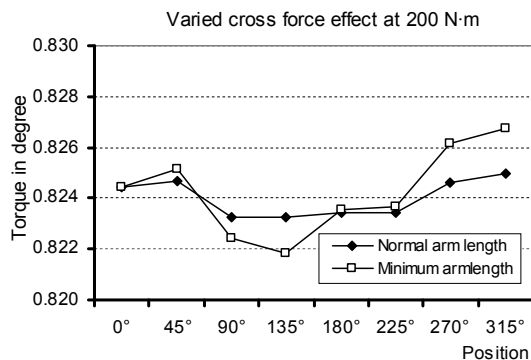
รูปที่ 15 อิทธิพลของการ Varied cross force ต่อการวัดแรงบิดโดยใช้ Strain gauge เป็นตัวรับรู้สัญญาณ

รูปที่ 15 แสดงความคลาดเคลื่อนของการวัดที่เกิดจากการ Varied cross force ประมาณ $\pm 0.15\%$ ที่ค่าแรงบิดตั้งแต่ 20 ถึง 200 N·m แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือนี้ใช้งานได้ดีที่ตำแหน่งมุม 0° และ 180° เนื่องจากมีความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงศูนย์

5.2.2 ตัวรับรู้สัญญาณแบบ Angle encoder

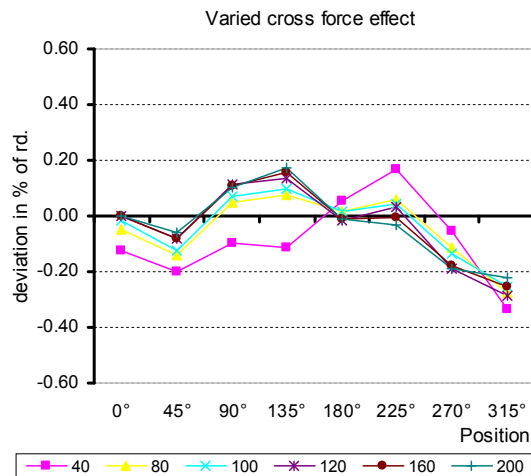
เป็นการวัดมุมบิดของเพลลาโดยตรง โดยติดตั้ง Flexible coupling ระหว่าง Angle encoder และแกน

การวัดของ TTS เพื่อช่วยลดผลกระทบของการ Misalignment แสดงผลดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 แรงบิด ณ ตำแหน่งการวัดต่างๆ ที่ Cross force ปกติ และ Varied cross force

รูปที่ 16 แสดงผลการทดลองที่ค่าแรงบิด 200 N·m ในหน่วยองศา ที่ Cross force ปกติ และ Varied cross force พบว่าในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัด ได้ค่าแรงบิดที่แตกต่างกันอย่างไม่มีรูปแบบ



รูปที่ 17 อิทธิพลของการ Varied cross force ต่อการ วัดแรงบิดโดยใช้ AE เป็นตัวรับรู้สัญญาณ

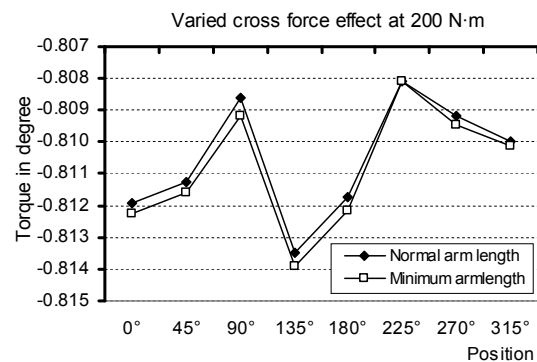
จากรูปที่ 17 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนในการวัด เนื่องจากอิทธิพลของการ Varied cross force ประมาณ $\pm 0.3\%$ ลักษณะความคลาดเคลื่อนไม่มีรูปแบบที่ชัดเจนและมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งแสดงว่า Flexible coupling ที่ใช้ไม่สามารถขจัดอิทธิพลของ Cross force ได้ อีกทั้งเครื่องมือที่ใช้มีความสามารถในการแยกชัดค่อนข้างต่ำ เมื่อพิจารณาถึงการใช้งาน

พบว่าสามารถใช้งานได้ดีบางตำแหน่ง เช่น ที่ตำแหน่ง 0° และ 180°

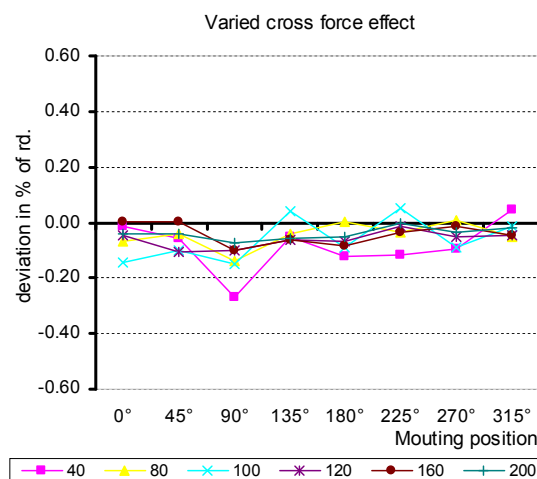
5.2.3 ตัวรับรู้สัญญาณแบบ อุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน

การวัดมุมบิดโดยใช้อุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน เป็นการวัดมุมบิดโดยอ้อม ใช้การวัดระยะกระจัดของการบิดแล้วนำมาคำนวณเป็นมุม ผลการวัดที่ได้แสดงดังรูปที่ 18 และรูปที่ 19

รูปที่ 18 แสดงผลการทดลองที่ค่าแรงบิด 200 N·m ในหน่วยองศา ที่ Cross force ปกติ และ Varied cross force พบว่าในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัด ได้ค่าแรงบิดที่มีความต่างกันในแต่ละตำแหน่งการวัด แต่ได้ผลของ Varied cross force ที่ดี



รูปที่ 18 แรงบิด ณ ตำแหน่งการวัดต่างๆ ที่ Cross force ปกติ และ Varied cross force

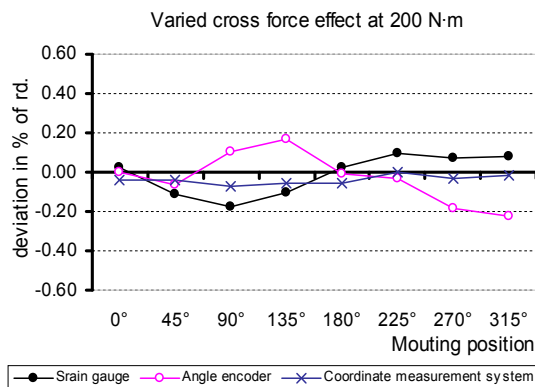


รูปที่ 19 อิทธิพลของการ Varied cross force ต่อการ วัดแรงบิดโดยใช้อุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน

จากรูปที่ 19 พบว่า Cross force ไม่มีผลต่อตำแหน่งของการวัด แต่มีความคลาดเคลื่อนของการวัดเนื่องจากอิทธิพลของการ Varied cross force ประมาณ $\pm 0.15\%$ และมีแนวโน้มที่จะเป็นเส้นตรง ถ้าไม่พิจารณาที่พิสัยการวัดต่ำๆ แสดงว่า การวัดแรงบิดแบบใช้อุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน ให้ค่าที่มีแนวโน้มที่จะเท่ากันทุกตำแหน่งการวัด สามารถใช้งานทรานสดิวเซอร์ที่มุมใดก็ได้ จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากัน ทำให้ไม่จำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งในการใช้งานตายตัว อีกทั้งยังอาจนำค่าแก้ไขใช้ชดเชยความคลาดเคลื่อนได้อีกด้วย

5.3 การเปรียบเทียบผลการทดลอง

จากรูปที่ 20 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดผลกระทบของ Cross force ที่มีต่อสัญญาณแรงบิดของตัวรับรู้สัญญาณทั้ง 3 ประเภท ที่แรงบิด 200 N·m เนื่องจาก Strain gauge สามารถรับรู้สัญญาณทุกทิศทาง ทำให้ไม่สามารถแยกแยะระหว่างแรงที่กระทำกับแรงบิดได้ มีความคลาดเคลื่อน $\pm 0.14\%$ ส่วน Angle encoder ยังคงต้องต่อร่วมกับแกนวัดของ TTS จึงได้รับแรงที่กระทำด้วย แม้จะลดทอนด้วย Flexible coupling ก็ตาม มีความคลาดเคลื่อน $\pm 0.20\%$ แต่อุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน ถูกนำสัญญาณมาคำนวณ และกำจัดการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นที่เกิดจาก Cross force ออก ให้คงเหลือแต่การเปลี่ยนแปลงเชิงมุมเท่านั้นที่นำมาเป็นสัญญาณแรงบิด ทำให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่ $\pm 0.04\%$



รูปที่ 20 อิทธิพลของการ Varied cross force ต่อการวัดแรงบิดของตัวรับรู้สัญญาณทั้ง 3 ประเภท

5.4 ผลการสอบเทียบ TTS

ผลการสอบเทียบ TTS ของตัวรับรู้สัญญาณทั้งสามแบบ คือ Strain gauge, Angle encoder และอุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน ที่ตำแหน่งการวัด 0° พิสัยการวัด 10-100% มีความไม่แน่นอนของการวัด $\pm 0.26\%$, $\pm 0.50\%$ และ $\pm 0.35\%$ ตามลำดับ ซึ่งทั้งหมดสามารถใช้งานเป็น Torque wrench calibrator ได้อย่างเหมาะสมเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ISO 6789: 2005(E) "Assembly tools for screws and nuts-Hand tools-Requirements and test methods for design conformance testing and recalibration procedure" ที่ร้องขอความไม่แน่นอนของการวัดของเครื่องมือมาตรฐานต้องไม่เกิน $\pm 1.0\%$

6. สรุปผลการทดลอง

- 1) วิธีการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลที่เชื่อถือได้ สามารถนำมาใช้ทวนสอบผลการคำนวณ และออกแบบเครื่องมือวัดแรงบิดได้เป็นอย่างดี
- 2) เครื่องมือวัดแรงบิดที่ใช้ Strain gauge เป็นตัวรับรู้สัญญาณ ในการใช้งานกับเครื่องมือประเภทประแจ จำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งในการใช้งานให้ตรงกับตำแหน่งที่ถูกสอบเทียบ
- 3) วิธีการวัดมุมโดย Angle encoder สามารถใช้สร้างเครื่องมือวัดแรงบิดได้ โดยให้ค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ถ้ามีเครื่องมือวัดมุมที่มีความละเอียดสูง และ Flexible coupling ที่ดีกว่าที่มีก็จะสามารถให้ผลการวัดที่ดีขึ้น
- 4) วิธีการวัดมุมโดยอุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน สามารถใช้สร้างเครื่องมือวัดแรงบิดได้ โดยให้ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากผลของ Cross force เท่าๆ กันทุกตำแหน่งการวัด และมีแนวโน้มที่จะสามารถใช้ค่าแก้ไขชดเชยความคลาดเคลื่อนนี้ได้ โดยที่ความถูกต้องของเครื่องมือต้นแบบจะสูงขึ้นถ้าใช้อุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน ที่มีความสามารถในการทวนซ้ำได้ของการวัดดีกว่า $\pm 0.05 \mu\text{m}$ และความถูกต้องดีกว่า $\pm 0.1 \mu\text{m}$
- 5) ตัวรับรู้สัญญาณที่มีความคลาดเคลื่อนตามปริมาณแรง และตำแหน่งมุมที่แรงกระทำบนแกนรับ

แรงบิดน้อยที่สุด คือ อุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน
เหมาะสมที่จะใช้เป็นเครื่องมือมาตรฐานในการสอบ
เทียบเครื่องมือประเภทประแจมากที่สุด และมี
แนวโน้มที่จะสามารถพัฒนาให้มีความถูกต้อง และ
แม่นยำสูงขึ้น

6) เครื่องมือวัดแรงบิดที่จัดสร้างขึ้นโดยใช้ตัวรับรู้
สัญญาณทั้ง 3 แบบ สามารถนำไปใช้งานได้จริงใน
ระดับมาตรฐานถ่ายทอด และมาตรฐานขั้นใช้งาน เพื่อ
ให้บริการถ่ายทอดความถูกต้องของการวัดแรงบิด
และสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
และสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติที่สนับสนุน
งบประมาณในการทำวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Peschel, D., (1993). Mechanical Parasitic Components and Their Influence on the Calibration of Torque Transducers, Proceedings of the 13th IMEKO TC3 Conference, May 10-14, 1993, Helsinki, Finland, pp. 91-96.

[2] Brüge, A., (1996). Influence of Eccentric Mounting on the Calibration of Torque Measuring Devices, 15th IMEKO TC3 Conference, Madrid, Spain, October 7-11 1996, pp. 255-259.

[3] Brüge, A., Peschel, D. and Röske, D., (2000). The Influence of Misalignment on Torque Transducers, Proceedings of the XVIth IMEKO World Congress, September 25-28, 2000, Vienna, Austria, vol. III, pp. 13-17.

[4] Peschel, D. and Röske, D., (1999). Determination of Creep Value Using Short-Term Creep, Proceedings of the XVth IMEKO World Congress, June 13-18, 1999, Osaka, Japan, vol. III, pp. 245-249.

[5] Brüge, A., (1997). Influence of Rotation on Rotary Torque Transducers Calibrated without Rotation, Proceedings of the XIVth IMEKO World Congress, June 1-6, 1997, Tampere, Finland, vol. III, pp. 79-84.

[6] Wegener, G., Bruns, T., (2002). Use of Reference Torque Transducers for the On-Site Calibration of Rotating Torque Transducers in Power Test Stands, Proc. of 18th int. Conf. IMEKO TC3, Celle, Germany, pp. 425-432.

[7] International Mold Steel DC53 General-Purpose Cold Work Die and Mold Steel, www.matweb.com, access on 08/01/2010.

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

[9] Technical Committee ISO/TC 29, Small tools, Subcommittee SC 10, Assembly tools for screw and nuts, pliers and nippers., (2003). ISO 6789: Assembly tools for screws and nuts-Hand tools-Requirements and test methods for design conformance testing and recalibration procedure, 3rd edition, Geneva, Switzerland.