

การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงบิดและแรงในแนวแกน Design of Torque and Thrust Measuring Device

ชณัตต์ รัตนสมาวัง^{1*} และ ปรียา ตระกูลทิวารกร²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร 0-2218-6593 โทรสาร 0-2252-2889 *อีเมล Chanat.R@eng.chula.ac.th

Chanat Ratanasumawong^{1*}, and Pariya Trakultivakorn²

^{1,2} Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,
Bangkok, 10330, Thailand

Tel: 0-2218-6593, Fax: 0-2252-2889, *E-mail: Chanat.R@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาเกี่ยวกับกำลังเครื่องยนต์ หรือการทดสอบเครื่องจักรกลหมุนในหลายๆ ครั้ง มีความจำเป็นต้องทราบแรงบิดเพื่อนำไปคำนวณค่าต่างๆ หรือเพื่อใช้ในการควบคุมสภาวะการทดสอบให้แม่นยำ อย่างไรก็ตามอุปกรณ์วัดแรงบิดที่มีความแม่นยำนั้นมีราคาแพง จึงมีความต้องการพัฒนาอุปกรณ์วัดแรงบิดที่สามารถผลิตใช้ได้เอง มีความแม่นยำ และมีราคาถูกขึ้น ในบทความนี้กล่าวถึงแนวคิดในการออกแบบอุปกรณ์วัดแรงบิด ซึ่งสามารถวัดแรงในแนวแกนไปได้พร้อมๆ กัน โดยเมื่อเกิดแรงทั้งสองแบบพร้อมๆ กัน แรงหนึ่งจะไม่ส่งผลให้การวัดแรงอีกแรงหนึ่งคลาดเคลื่อนไป อุปกรณ์นี้ใช้หลักการของการเสียรูปของคาน้ำครี เนื่องจากโมเมนต์ดัดเมื่อมีแรงมากระทำ และวัดการเสียรูปโดยใช้สเตรนเกจ บทความนี้ยังได้แสดงถึงอุปกรณ์วัดต้นแบบ และผลการสอบเทียบไว้ด้วย จากผลการสอบเทียบพบว่า ค่าความแม่นยำของเครื่องมือเป็นที่น่าพอใจ แรงในแนวแกนส่งผลให้การวัดแรงบิดคลาดเคลื่อนไปเพียงเล็กน้อย ผลการสอบเทียบรับรองได้ว่าอุปกรณ์นี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง

คำหลัก การวัดแรงบิด การวัดแรงในแนวแกน สเตรนเกจ

Abstract

Torque measurement is very important for the study in the field of engine testing or rotating machine testing. Torque is necessary for calculating engine power or using to control experimental condition during testing. However accurate torque meter is expensive, then torque meter that has acceptable accuracy, inexpensive and easy to produce is required. In this paper, the design concept of torque and thrust meter is described. This device can measure torque and thrust force

simultaneously. Thrust force does not affect or has just only small effect to the torque measuring, and vice versa. The principle of this device is the measurement of the deformation of webs due to bending moment by using straingages. This paper also shows the model of the device and calibrating results. From the results, it is found that the accuracy is fairly good. Thrust force has only small effect to the torque measurement. This verifies that the designed torque meter is usable in practice.

Keywords Torque meter, Thrust meter, Straingage

1. บทนำ

การศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพเครื่องยนต์ หรือการทดสอบเครื่องจักรกลหมุนในหลายๆ ครั้ง มีความจำเป็นต้องทราบแรงบิดเพื่อนำไปคำนวณกำลังของเครื่องยนต์ หรือจำเป็นต้องทราบแรงบิดเพื่อควบคุมให้สภาวะการทดสอบมีความแม่นยำ ตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ เช่น ในการทดสอบการสันดาปของเฟือง แรงบิดจะสัมพันธ์กับการสัมผัสกันของผิวฟันเฟือง ซึ่งส่งผลอย่างมากต่อการสันดาปที่เกิดขึ้น ในกรณีเช่นนี้ หากไม่ทราบแรงบิดจะไม่สามารถควบคุมสภาวะการทดลองให้แม่นยำ น่าเชื่อถือได้ นอกจากนี้การทดสอบเครื่องจักรกลหมุนบางประเภท เช่น การหมุนของใบพัด กังหัน หรือการหมุนขบกันของเฟืองเฉียง นอกจากแรงบิดแล้ว ระบบเหล่านี้ยังมีแรงในแนวแกนเกิดขึ้นด้วย การวัดแรงในแนวแกนในกรณีเช่นนี้มีความจำเป็นเช่นกัน

โดยทั่วไปการวัดแรงบิด หรือแรงในแนวแกนมักจะใช้อุปกรณ์จำพวกโพลีเอสเตอร์ในการวัดแรง ซึ่งโดยหลักการแล้ว โพลีเอสเตอร์จะสร้างโดยการดัดสเตรนเกจเข้ากับวัสดุรูปร่างต่างๆ แล้วแต่นขนาดของแรงและการใช้งาน โพลีเอสเตอร์ส่วนมากจะวัดแรงได้เพียงชนิดเดียว ไม่

¹ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

² นิสิตภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

แรงบิดก็แรงในแนวแกน การวัดแรงหลายๆ ชนิดจำเป็นต้องใช้โหลดเซลล์หลายๆ ตัว ซึ่งนอกจากสิ้นเปลืองแล้ว ยังอาจมีปัญหาจากการวัดแรงผสมที่เกิดขึ้นได้

ในบทความนี้จะนำเสนอแนวคิดในการออกแบบโหลดเซลล์ ซึ่งสามารถวัดแรงบิด และแรงในแนวแกนได้พร้อมๆ กัน และแสดงถึงต้นแบบของโหลดเซลล์ซึ่งได้ทดลองสร้างขึ้น โดยเป้าหมายของอุปกรณ์วัดนี้ จะออกแบบเพื่อใช้งานกับการทดสอบขนาดเล็ก ซึ่งมีแรงบิดและแรงในแนวแกนไม่สูงนัก

2. เกณฑ์ในการออกแบบ

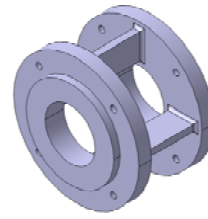
อุปกรณ์ที่ออกแบบนี้ จะออกแบบเพื่อใช้กับการทดสอบเครื่องยนต์ขนาดเล็ก รวมถึงการทดสอบเครื่องจักรกลหมุนอื่นๆ ซึ่งมีแรงบิดไม่มากนัก โดยจะออกแบบให้สามารถวัดแรงบิดได้ในช่วง 0-75 Nm สำหรับแรงในแนวแกนนั้น เนื่องจากการทดสอบแรงบิดโดยทั่วไปนั้นแรงนี้มีค่าน้อย อย่างไรก็ตามได้มีการออกแบบเพื่อให้สำหรับการทดสอบอื่นที่จำเป็นต้องมีการวัดแรงในแนวแกนตามสมควร โดยได้ออกแบบให้อุปกรณ์นี้สามารถวัดแรงในแนวแกนได้ในช่วงไม่เกิน 100 N

เนื่องจากอุปกรณ์นี้จะใช้วัดแรงบิดในขณะที่เครื่องจักรกลหมุนอยู่ จึงออกแบบให้อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีขนาดไม่ใหญ่นัก เพื่อให้ผลของโมเมนต์ความเฉื่อยของอุปกรณ์วัด ส่งผลกระทบบ่อยน้อยที่สุด นอกจากนี้เนื่องจากต้องการให้อุปกรณ์นี้วัดแรงบิด และแรงในแนวแกนได้พร้อมๆ กัน จึงต้องออกแบบให้การวัดแรงทั้งสองชนิดไม่ส่งผลกระทบบอกกัน เพื่อให้ค่าที่วัดได้เป็นค่าของแรงบิด หรือแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นจริง หรือให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด

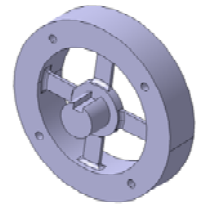
3. แนวคิดในการออกแบบรูปร่างลักษณะของอุปกรณ์วัดแรงบิดและแรงในแนวแกน

อุปกรณ์วัดแรงบิดและแรงในแนวแกนที่ออกแบบ แสดงในรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) ตามลำดับ อุปกรณ์นี้จะใช้หลักการการเกิดโมเมนต์ดัดและการเกิดความเครียดที่ครีป 4 ครีป เมื่อมีแรงบิดหรือแรงในแนวแกนกระทำ ความเครียดที่เกิดขึ้นสามารถวัดได้โดยการติดสเตรนเกจที่ผิวทั้งสองข้างของครีปแต่ละตัว รวมเป็นแปดตัวสำหรับอุปกรณ์วัดแรงบิด และอีกแปดตัวสำหรับอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน การออกแบบอุปกรณ์วัดวิธีนี้ โดยปกติ จะให้ความไวมากกว่าการวัดความเครียดเนื่องจากการยืด หรือหดตัวของวัสดุในแนวแกนเนื่องจากแรงกดหรือแรงดึง และมีความไวมากกว่าการวัดแรงบิดโดยการติดสเตรนเกจทำมุม 45° กับเพลลาที่มีความสามารถในการรับแรงบิดเท่าๆ กัน

อุปกรณ์วัดแรงทั้งสองชนิดออกแบบให้แยกออกจากกันได้ ผู้ใช้สามารถแยกใช้อุปกรณ์วัดแรงชนิดใดชนิดหนึ่งได้ เมื่อต้องการวัดแรงชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียว และเมื่อต้องการวัดแรงบิดและแรงในแนวแกนพร้อมๆ กัน ก็สามารถนำมาประกอบเข้าด้วยกันได้ สำหรับอุปกรณ์วัดแรงบิด เนื่องจากแรงที่กระทำ เป็นแรงบิดตามแนวเส้นรอบวง จึงออกแบบการเชื่อมต่อกับชิ้นส่วนอื่นโดยหน้าแปลน และยึดด้วยสลักเกลียว ส่วนอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนนั้น เนื่องจากแรงกระทำ เป็นแรงในแนวแกน จึงออกแบบให้การเชื่อมต่อทำโดยใช้ลิ้มยึดบน



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 อุปกรณ์วัดแรงบิดและแรงในแนวแกน

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของสแตนเลสสตีล 304

Modulus of elasticity (GPa)	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Poisson ratio
200	230	500 - 700	0.27

เพลลา ทำให้แรงในแนวแกนสามารถส่งผ่านเพลลาไปที่อุปกรณ์วัดได้โดยตรง

เพื่อให้สามารถวัดแรงบิดและแรงในแนวแกนได้พร้อมๆ กัน โดยแรงทั้งสองชนิดส่งผลกระทบบอกกันน้อย จึงได้ออกแบบให้ขนาดความหนาครีปของอุปกรณ์วัดแรงบิด บางกว่าความกว้างครีปของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน เมื่ออุปกรณ์ได้รับแรงบิด ครีปของชิ้นส่วนวัดแรงบิดจะเสียรูป โดยที่ครีปของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนเสียรูปน้อย ในทางกลับกัน ความหนาครีปของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนมีค่าน้อยกว่าความยาวครีปของอุปกรณ์วัดแรงบิดมาก ดังนั้นเมื่อมีแรงในแนวแกนมากระทำ ครีปของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนจะเสียรูปเพียงตัวเดียว

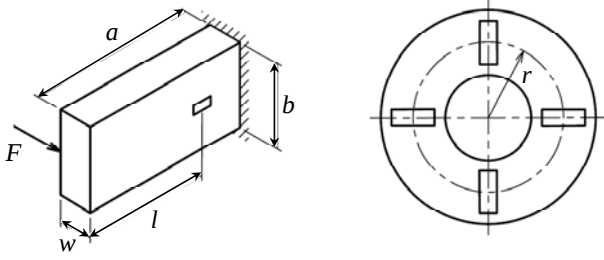
เนื่องจากการใช้งานอุปกรณ์วัดแรงนี้ อาจจะต้องใช้งานในสภาวะอุณหภูมิ และความชื้นต่างๆ เพื่อป้องกันการเกิดสนิมของอุปกรณ์ จึงเลือกใช้วัสดุทำชิ้นงานเป็นสแตนเลสสตีล 304 โดยคุณสมบัติทางกลของสแตนเลสสตีล 304 แสดงในตารางที่ 1 สำหรับช่วงการใช้งานนั้น จะออกแบบให้ความเค้นสูงสุดมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความเค้นคราก (คิดค่าความปลอดภัยเท่ากับ 2) เนื่องจากในช่วงนี้การเสียรูปของวัสดุต่อแรงที่กระทำจะมีความเป็นเชิงเส้นสูง และยังช่วยลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ฮิสเทรีซิสลงได้ [1]

4. การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงบิด

อุปกรณ์วัดแรงบิดมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 1(ก) เมื่อมีแรงบิดมากระทำ ครีปแต่ละอันจะเสียรูป การเสียรูปของครีปแต่ละอันสามารถประมาณได้เป็นการการโก่งงอของคานยื่น ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยแรง F แสดงถึงแรงที่กระทำ เนื่องจากแรงบิดที่ต้องการวัด T ความสัมพันธ์ของแรง F กับแรงบิด T แสดงดังสมการที่ (1)

$$T = nFr \quad (1)$$

โดย n คือ จำนวนครีปที่รับแรง ในที่นี้จะออกแบบให้มี 4 ครีป และ r เป็นระยะวัดจากจุดศูนย์กลางมายังกึ่งกลางของครีป ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะติดสเตรนเกจ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การออกแบบครีปของอุปกรณ์วัดแรงบิด

แรง F จะส่งผลให้เกิดความเค้นเนื่องจากโมเมนต์ดัด ซึ่งมีค่ามากที่สุดที่ปลายครีป ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการที่ (2)

$$\sigma = \frac{Faw}{2I} \quad (2)$$

โดย ระยะ a และ w แสดงดังรูปที่ 2 ส่วน I คือโมเมนต์ความเฉื่อยของหน้าตัดครีป ค่า I สามารถหาได้จากสมการที่ (3) ดังนี้

$$I = \frac{1}{12}bw^3 \quad (3)$$

แทนค่าแรง F จากสมการที่ (1) และ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย I จากสมการที่ (3) ลงในสมการที่ (2) จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ต้องการ กับความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุด ดังแสดงในสมการที่ (4)

$$\sigma = \frac{6Ta}{nr bw^2} \quad (4)$$

ทำการเลือกมิติต่างๆ ของอุปกรณ์วัดแรงบิดดังนี้ $a = 40$ mm, $b = 20$ mm, $w = 8$ mm, $r = 35$ mm และจำนวนครีป n เท่ากับ 4 เมื่อแทนแรงบิดที่ต้องการให้วัดได้ถึง 75 Nm ในสมการที่ (4) จะได้ค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 100.44 MPa ซึ่งมีค่าน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของค่าความเค้นครากตามที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อพิจารณาถึงความเค้น ณ ตำแหน่งที่ติดเกาซึ่งมีระยะ $l = 30$ mm ดังแสดงในรูปที่ 2 ด้วยวิธีการเดียวกับการพิจารณาความเค้นสูงสุด พบว่าจะเกิดความเค้นเท่ากับ 75.33 MPa ซึ่งทำให้เกิดความเครียดกับเกาเท่ากับ 376.7 $\mu\epsilon$

การวัดสัญญาณความเครียด จะทำโดยติดสเตรนเกจ 8 ตัว ทั้งสองข้างของครีปทั้ง 4 และต่อสเตรนเกจเป็นวงจรบริดจ์ ดังแสดงในรูปที่ 3 การติดสเตรนเกจเป็นคู่ๆ ทั้งสองข้างของครีปจะช่วยให้เกิดผลคลาดเคลื่อนซึ่งอาจเกิดขึ้นเมื่อมีแรงในแนวแกนนอกเหนือจากแรงบิดถูกหักล้างหมดไป ผลแรงบิดที่วัดได้ก็จะแม่นยำมากขึ้น [2] การต่อแบบนี้ เมื่อสเตรนเกจมีการยืดหดเนื่องจากแรงบิด จะทำให้ความต่างศักย์ที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไป ตามสมการที่ (5)

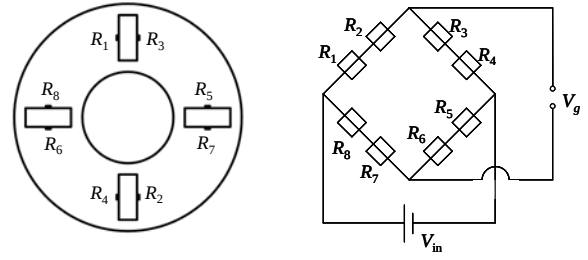
$$\delta V_g \approx \frac{GF}{8}(\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_3 - \epsilon_4 + \epsilon_5 + \epsilon_6 - \epsilon_7 + \epsilon_8)V_{in} \quad (5)$$

โดย δV_g คือความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไป

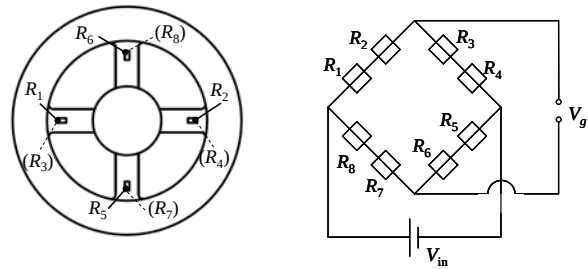
V_{in} คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใส่ให้วงจรบริดจ์

GF คือค่าตัวประกอบเกา

ϵ_i คือความเครียดที่เกิดขึ้นที่เกาตัวที่ i



รูปที่ 3 การติดสเตรนเกจบนอุปกรณ์วัดแรงบิด และการต่อสเตรนเกจเป็นวงจรบริดจ์



รูปที่ 4 การติดสเตรนเกจบนอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน และการต่อสเตรนเกจเป็นวงจรบริดจ์

จากสมการที่ (5) จะสามารถหาค่าความไวของการวัดได้ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$\text{sensitivity} = \frac{\delta V_g}{T} \approx \frac{GF}{8} \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2 - \epsilon_3 - \epsilon_4 + \epsilon_5 + \epsilon_6 - \epsilon_7 + \epsilon_8)}{T} V_{in} \quad (6)$$

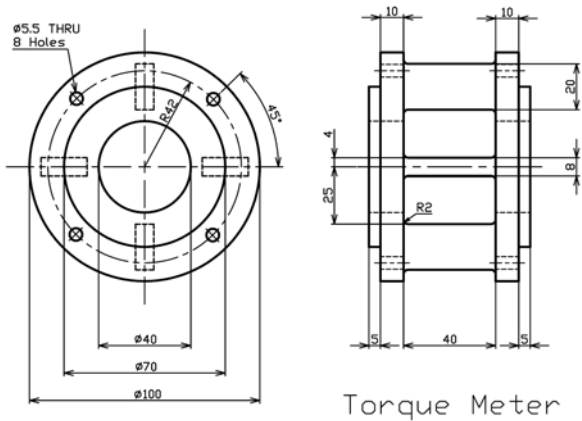
เมื่อแทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใส่ให้วงจรบริดจ์ V_{in} เท่ากับ 5 V ค่าตัวประกอบเกา GF เท่ากับ 2 แรงบิด T เท่ากับ 75 Nm และค่าความเครียดที่เกิดขึ้น 376.7 $\mu\epsilon$ ลงในสมการที่ (6) จะพบว่าความไวของอุปกรณ์วัดแรงบิดมีค่าเท่ากับ 50.22 $\mu V(Nm)^{-1}$

5. การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน

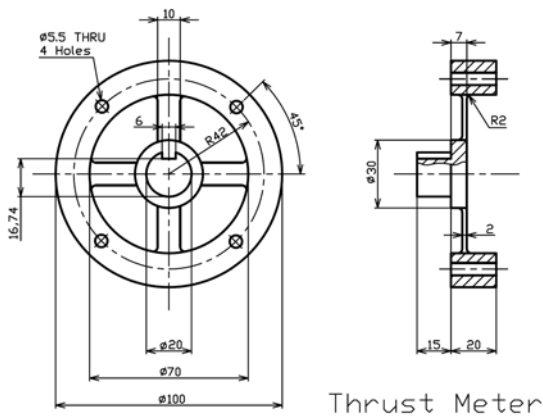
อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 1(ข) อุปกรณ์นี้ใช้หลักการเช่นเดียวกับอุปกรณ์วัดแรงบิด เมื่อมีแรงในแนวแกนมากระทำ จะทำให้ครีปทั้งสี่เกิดการดัด เกิดค่าความเค้นดัด และความเครียดซึ่งวัดได้โดยการติดสเตรนเกจทั้งสองข้างของครีป ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยเกาที่แสดงด้วยตัวอักษรในวงเล็บหมายถึง เกาที่ติดไว้ด้านหลังของครีป

ในกรณีที่วัดแรงบิดพร้อมๆ กับแรงในแนวแกน เนื่องจาก สเตรนเกจได้ถูกออกแบบให้ติดที่แกนกลางของครีป ซึ่งเป็นตำแหน่งแกนนิวทรอลสำหรับการดัดเนื่องจากแรงบิด ดังนั้นจึงถือได้ว่าอุปกรณ์นี้สามารถวัดแรงในแนวแกนได้ โดยมีผลกระทบจากแรงบิดน้อย

สำหรับการคำนวณเพื่อออกแบบนั้น สามารถทำได้เช่นเดียวกับอุปกรณ์วัดแรงบิด โดยจะประมาณการเสียรูปของครีปเป็นการโค้งงอ



รูปที่ 5 แบบของอุปกรณ์วัดแรงบิด



รูปที่ 6 แบบของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน

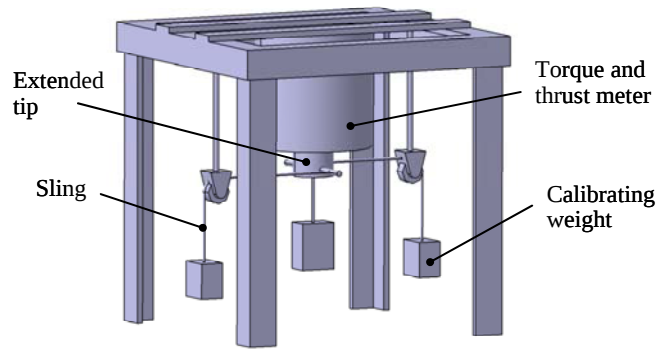
ของคานยื่นเช่นกัน ในกรณีนี้ความสัมพันธ์ของแรงในแนวแกน กับ ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากสมการที่ (7) ดังนี้

$$\sigma = \frac{6F_a a}{nbw^2} \quad (7)$$

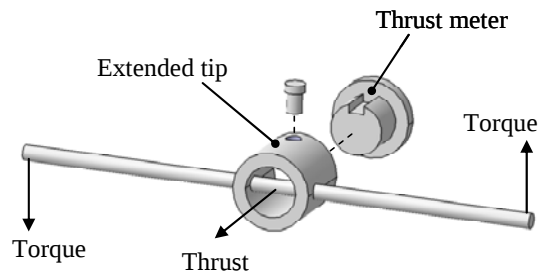
โดย F_a คือแรงในแนวแกนที่ต้องการ n เป็นจำนวนครีป ส่วนมิติต่างๆ เป็นเช่นเดียวกับกรณีอุปกรณ์วัดแรงบิด

ทำการเลือกมิติต่างๆ ของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนดังนี้ $a = 20$ mm, $b = 10$ mm, $w = 2$ mm และจำนวนครีป n เท่ากับ 4 เมื่อแทนแรงในแนวแกนที่ต้องการวัดให้ได้ถึง 100 N ในสมการที่ (7) จะได้ค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 75 MPa ซึ่งน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความเค้นครากตามที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อพิจารณาถึงความเค้น ณ ตำแหน่งที่ติดเกจซึ่งมีระยะ $l = 10$ mm จะพบว่าเกิดความเค้นเท่ากับ 37.5 MPa ซึ่งทำให้เกิดความเครียดที่เกจเท่ากับ 187.5 $\mu\epsilon$ เมื่อนำมาหาค่าความไวของการวัดตามสมการที่ (6) โดยแทนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใส่ให้วงจรบริดจ์ V_{in} เท่ากับ 5 V ค่าตัวประกอบเกจ GF เท่ากับ 2 และแรงในแนวแกน F_a เท่ากับ 100 N จะได้ค่าความไวเท่ากับ 18.75 $\mu V(N)^{-1}$

จากการออกแบบขนาดในหัวข้อที่ 4 และ 5 จะได้อุปกรณ์วัดแรงบิดและแรงในแนวแกนดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6



รูปที่ 7 ชุดสอบเทียบ



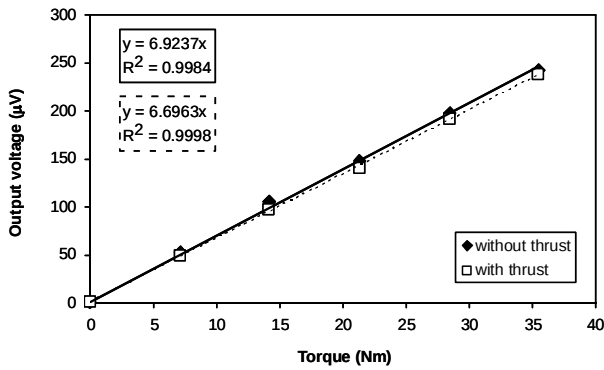
รูปที่ 8 การประกอบปลายเสริม กับอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน

6. วิธีการสอบเทียบอุปกรณ์วัด

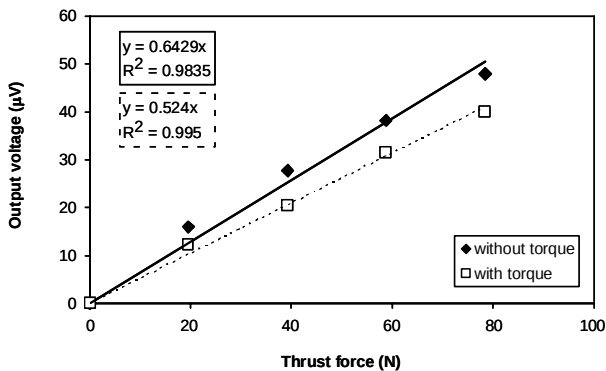
ชุดทดสอบเพื่อใช้สอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงบิดและแรงในแนวแกน แสดงดังรูปที่ 7 ชุดทดสอบนี้ประกอบด้วย 1) โครงสร้างเหล็กที่มีความแข็งแรงเพียงพอ ที่จะยึดชิ้นงานได้โดยไม่มีการเสียรูป หรือมีการเสียรูปน้อยมากเมื่อทำการสอบเทียบ 2) ปลายเสริม ที่สร้างขึ้นสำหรับยึดส่วนปลายของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน เพื่อให้ภาระแรงดึง และแรงบิด และ 3) สลิง และตุ้มน้ำหนัก

จากรูปที่ 7 ด้านที่รับแรงบิดของอุปกรณ์วัดแรงบิดและแรงในแนวแกน จะถูกยึดติดกับโครงสร้างเหล็กด้านบน ด้วยสลักเกลียว 4 ตัว ส่วนด้านล่างซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน จะถูกยึดติดกับปลายเสริม วิธีการยึดแสดงในรูปที่ 8 โดยใช้สลักเกลียวขันอัดลงร่องลิ้น ส่วนของปลายเสริมจะถูกประกอบกับแกนเหล็กกลมและลวดสลิง เพื่อให้แรงบิดโดยการถ่วงน้ำหนักต่อไป สำหรับแรงในแนวแกนนั้นจะให้โดยร้อยลวดสลิงคล้องแกนเหล็ก และถ่วงน้ำหนักเพื่อให้แรงในแนวแกนโดยตรง

เนื่องจากอุปกรณ์นี้ถูกออกแบบให้รับแรงบิด และแรงในแนวแกน ได้พร้อมๆ กัน ดังนั้นการสอบเทียบจึงแบ่งออกเป็น 4 ส่วน เพื่อให้ครอบคลุมกรณีการใช้งานต่างๆ การสอบเทียบทั้ง 4 ส่วนได้แก่ 1) การสอบเทียบแรงบิดเพียงอย่างเดียว 2) การสอบเทียบแรงในแนวแกนเพียงอย่างเดียว 3) การสอบเทียบแรงบิดโดยมีแรงในแนวแกนกระทำอยู่ด้วย และ 4) การสอบเทียบแรงในแนวแกนโดยมีแรงบิดกระทำอยู่ด้วย



รูปที่ 9 ผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงบิด



รูปที่ 10 ผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน

การสอบเทียบแรงบิดเพียงอย่างเดียว นั้น จะถ่วงน้ำหนักทำให้เกิดแรงบิดในช่วง 0-35 Nm ส่วนการสอบเทียบแรงในแนวแกนนั้น ก็ทำเช่นเดียวกับกรณีสอบเทียบแรงบิดเพียงอย่างเดียว โดยจะถ่วงน้ำหนักทำให้เกิดแรงดึงในช่วง 0-80 N สัญญาณไฟฟ้าที่วัดได้จากสเตรนเกจจะถูกส่งเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ซึ่งจะขยายสัญญาณขึ้นอีก 100 เท่าและส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์ การวัดและเก็บข้อมูลทำโดยโปรแกรม LabVIEW

เพื่อตรวจสอบว่าแรงสองชนิดที่ต้องการวัด ส่งผลกระทบต่อกันหรือไม่ จึงมีการสอบเทียบแรงบิดโดยมีแรงในแนวแกนกระทำ และการสอบเทียบแรงในแนวแกนโดยมีแรงบิดกระทำ โดยในที่นี้เมื่อสอบเทียบแรงบิด จะให้แรงในแนวแกนขนาด 60 N พร้อมกันไปด้วย ในทางกลับกัน เมื่อทดสอบแรงในแนวแกน จะให้แรงบิด 35 Nm พร้อมกันไปด้วย การวัดสัญญาณทำเช่นเดียวกับการสอบเทียบส่วนที่ 1 และ 2

7. ผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัด

ผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงบิดในส่วนที่ 1 และ 3 แสดงในรูปที่ 9 แกนตั้งคือค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากวงจรบริดจ์ มีหน่วยเป็นไมโครโวลต์ (μV) ส่วนแกนนอนคือค่าแรงบิดที่กระทำต่ออุปกรณ์ มีหน่วยเป็น นิวตัน-เมตร (Nm) ผลการทดลองเส้นที่บ่งบอกผลการสอบเทียบแรงบิดขณะไม่มีแรงในแนวแกนมากระทำ ส่วนเส้นประคือผลสอบเทียบแรงบิดในขณะที่มีแรงในแนวแกนมากระทำ 60 N สมการการถดถอยเชิงเส้น และค่าสหสัมพันธ์ของทั้งสองกรณี แสดงในกรอบเส้นทึบ และกรอบเส้นประ ตามลำดับ

จากผลการสอบเทียบพบว่า การสอบเทียบทั้งสองกรณีมีความเป็นเชิงเส้นสูง ดูได้จากค่าสหสัมพันธ์ (Correlation, R^2) ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 นอกจากนี้ผลการสอบเทียบแรงบิดทั้งสองกรณี ทั้งมีแรงและไม่มีแรงในแนวแกนมากระทำมีค่าใกล้เคียงกัน โดยความชันมีค่าแตกต่างกันเพียง 3.4% ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แรงในแนวแกนส่งผลกระทบต่อ การวัดแรงบิดน้อยมาก ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้

รูปที่ 10 แสดงถึงผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน (ส่วนที่ 2 และ 4) โดยเส้นทึบในกราฟ คือผลการสอบเทียบแรงในแนวแกนในขณะที่ไม่มีแรงบิดมากระทำ ส่วนเส้นประคือผลการสอบเทียบแรงในแนวแกนขณะมีแรงบิด 35 Nm กระทำร่วมด้วย สมการการถดถอยเชิงเส้น และค่าสหสัมพันธ์ของทั้งสองกรณี แสดงในกรอบเส้นทึบ และเส้นประตามลำดับ

จากผลการสอบเทียบพบว่า การสอบเทียบทั้งสองกรณีมีความเป็นเชิงเส้นสูง โดยมีค่าสหสัมพันธ์ประมาณ 0.98-0.99 อย่างไรก็ตามความชันของกราฟทั้งสองเส้นต่างกันพอสมควร แสดงให้เห็นว่า การให้แรงบิดส่งผลกระทบต่อการวัดแรงในแนวแกนค่อนข้างมาก

8. อภิปรายการออกแบบ และการสอบเทียบอุปกรณ์วัด

จากผลการสอบเทียบพบว่า แรงในแนวแกนจะส่งผลกระทบน้อยมากต่อการวัดแรงบิด อย่างไรก็ตาม การวัดแรงในแนวแกนกลับได้รับผลกระทบมาก หากมีแรงบิดมากระทำ ทั้งนี้เนื่องจาก การออกแบบให้ครีบบางของอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนบางเกินไป เมื่อมีแรงบิดมากระทำ ครีบบางนี้จะเสียรูปได้ง่าย จึงเกิดความเครียดเนื่องจากแรงบิดเพิ่มขึ้นมาด้วย การออกแบบความหนาของครีบบางให้หนาขึ้นน่าจะช่วยแก้ปัญหานี้ได้ อย่างไรก็ตามการเพิ่มความหนาของครีบบางจะทำให้ความไวในการวัดแรงในแนวแกนลดลง

นอกจากนี้ ถึงแม้ว่าผลการสอบเทียบในทุกกรณีแสดงให้เห็นถึงความเป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้มีความแม่นยำในการวัดมาก อย่างไรก็ตามความชันของกราฟ ซึ่งแสดงถึงความไวในการวัดในทุกกรณีมีค่าน้อยกว่าที่ออกแบบไว้มาก ทำให้อุปกรณ์นี้อาจมีปัญหา เมื่อใช้วัดแรงบิดหรือแรงในแนวแกนที่มีการเปลี่ยนแปลงในปริมาณน้อยๆ สาเหตุของความแตกต่างของความไวนี้อาจเป็นผลมาจากการคำนวณการเสียรูปของครีบบาง ซึ่งประมาณการเสียรูปเป็นการทดแทนที่จะเป็นการบิด หรืออาจเป็นผลมาจากความผิดพลาดในการสอบเทียบ เช่น โครงสร้างหลักที่ใช้มีความแข็งแรงไม่เพียงพอ เกิดการเสียรูปขึ้นระหว่างการสอบเทียบ รวมถึง ทิศทางของแรงที่ให้กับแกนหลักซึ่งยึดติดกับปลายต่อ ในขณะการสอบเทียบแรงบิด และแรงในแนวแกน ไม่ได้มุมที่ถูกต้อง ทำให้ขนาดแรงบิด และแรงในแนวแกนที่เกิดขึ้นจริงในอุปกรณ์วัดแรงขณะสอบเทียบ แตกต่างจากแรงบิดและแรงในแนวแกนที่ต้องการ

9. สรุป

บทความนี้แสดงถึง การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงบิดและแรงในแนวแกน ซึ่งใช้หลักการเสียรูปของครีบบาง ขณะที่มีความมากระทำ จากผลการสอบเทียบยืนยันได้ว่า อุปกรณ์นี้สามารถใช้งานได้จริง มีความเป็นเชิงเส้นสูง ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำในการวัด แรงในแนวแกนส่งผล

ต่อการวัดแรงบิดเพียงเล็กน้อย ในขณะที่แรงบิดส่งผลกระทบบ
ค่อนข้างมากต่อการวัดแรงในแนวแกน อย่างไรก็ตามความไวของ
อุปกรณ์นี้ ยังมีค่าไม่มากนัก และควรต้องปรับปรุงในการออกแบบครั้ง
ต่อไป

10. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่ให้การสนับสนุนเงินอุดหนุนสำหรับโครงการนี้ ขอขอบคุณ อ. เอกอุ
ธรรมกรบัญญัติ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ม.บูรพา อ. กวี ศรีทองกุล
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล ม.อีสเทิร์นเอเซีย และ คุณสุบิน ชันดี ครู

ช่างภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยให้
คำปรึกษา และสนับสนุนการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

- [1] A.F. Molland and S.R. Turnock, A Propeller Thrust and Torque Dynamometer for Wind Tunnel Models, Strain and International Journal for Experimental Mechanics, Vol.38, Issue 1, Feb. 2002, pp.3-10.
- [2] R.S. Figliola and D.E. Beasley, Theory and Design for Mechanical Measurements, Wiley, 2006.