การออกแบบเครื่องวัดแรงบิดแบบโรตารี่

Rotary Torque meter Design

รัชต มั่งมีชัย[1] และ ณัฐพล แสนคำ[2]
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 ถนนเชื่อมสัมพันธ์ เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530[1]
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ 3/4-5 หมู่ที่ 3 ต. คลองห้า อ. คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120[2]
E-mail: r_mangmeechai@yahoo.com[1] และ nattapon@nimt.or.th[2]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ออกแบบเครื่องวัดแรงบิดแบบโรตารี่ โดยใช้หลักการ วัดการบิดตัวของเหล็กทรงกระบอกตันด้วยสเตรนเกจ แรงบิดของเครื่องจักรจะถูกส่งผ่านเหล็กทรงกระบอกตันยาว 450 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 19.05 มิลลิเมตร ตำแหน่งกึ่งกลางเพลาถูกลดขนาดลงเหลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.7 มิลลิเมตร และติดตั้งสเตรนเกจ สัญญาณขนาดเล็กของสเตรนเกจ ถูกขยายด้วย INA 125 ให้มีขนาด 200 เท่า วัดสัญญาณและจ่ายไฟเข้าวงจรโดยผ่านสลิปริง เครื่องวัดแรงบิดพิกัดสูงสุด 50 นิวตัน·เมตร ความเร็วรอบ 3,000 รอบต่อนาที ด้วยหลักการออกแบบเครื่องวัดนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบเครื่องวัดแรงบิดขนาดต่าง ๆ ได้

Abstract

The rotatory torque meter was designed in this project. The torque meter works by measuring the torque of solid cylindrical steel with strain gauges. The mechanical torque is transmitted to a 450 mm long, 19.05 mm diameter cylindrical shaft steel. The shaft's diameter was lowered to 11.7 mm in the middle, and two strain gauges were installed. The small signal from the strain gauge is amplified by INA 125, which has a voltage gain of 200. A slip ring measures the torque signal and supplies electricity to the torque meter. The torque meter has a 50 N·m torque rating and a 3,000 rpm speed. This rotary torque meter design methodology can apply to design another torque-rated rotary torque meter.

1. บทนำ

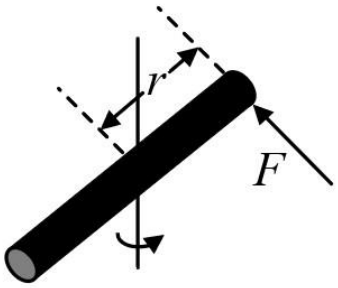
กำลังด้านออกของมอเตอร์โดยทั่วไปจะแสดงในหน่วยของแรงม้าและหน่วยวัตต์ ในการหาค่ากำลังด้านออกของมอเตอร์พิจารณาได้จากผลคูณของความเร็วเชิงมุมกับแรงบิดซึ่งค่าแรงบิดหาได้จากเครื่องวัดแรงบิด ปัจจุบันเครื่องวัดแรงบิดจากการหมุนมี 2 ประเภทคือ เครื่องวัดแรงบิดแบบไดนาโม และเครื่องวัดแรงบิดแบบโรตารี่ เครื่องวัดแรงบิดจากการหมุนมีบริษัทต่าง ๆ ผลิตเพื่อจำหน่ายแต่ราคาสูงจึงเป็นที่มาของการทำงานวิจัยเครื่องวัดแรงบิดแบบโรตารี่ราคาต่ำ ธนกร กะหะกะสิทธิ์, ณัฐชนน พุ่มผะกา วายุ อาศัยและศุภวิชญ์ ประเสริฐสังข์, ในปี พ.ศ.2563 ทำแท่นทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้า [1] แบบไดนาโมมิเตอร์โดยมีเซ็นเซอร์วัดแรงบิดติดไว้ที่สเตเตอร์ใช้

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นภาระทางกล สามารถวัดแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ได้ แต่ขั้นตอนในการทดสอบค่อนข้างยุ่งยาก Logicbus [2] ผลิต FUTEK's Rotary Torque Sensor สามารถวัดแรงบิดได้ 0-100 นิวตัน·เมตร พิกัดความเร็วรอบ 7,000 รอบต่อนาที ราคาประมาณ 124,000 บาท งานวิจัยนี้ออกแบบเครื่องวัดแรงบิดของเครื่องจักรแบบโรตารี่ เครื่องวัดแรงบิดใช้หลักการวัดการบิดตัวของเหล็กทรงกระบอกตันโดยใช้สเตรนเกจ แรงบิดของเครื่องจักรส่งผ่านเหล็กทรงกระบอกตันยาว 450 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 19.05 มิลลิเมตร ต่ำแหน่งกึ่งกลางเพลาถูกลดขนาดลง เหลือเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.7 มิลลิเมตร และติดตั้งสเตรนเกจ สัญญาณขนาดเล็กของสเตรนเกจถูกขยายด้วย INA 125 ให้มีขนาด 200 เท่า วัดสัญญาณและจ่ายไฟเข้าวงจรโดยผ่านสลิปริง สลิปริงมี 3 ขั้ว ขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2 เป็นขั้วที่จ่ายไฟเลี้ยงให้กับวงจร ขั้วที่ 3 เป็นขั้ววัดสัญญาณเอาต์พุตที่เกิดจากวงจรขยายสัญญาณ มีพิกัด 0.0 - 4.0 โวลต์ เครื่องวัดแรงบิดมีพิกัดสูงสุด 50 นิวตัน·เมตร ความเร็วรอบสูงสุด 3,000 รอบต่อนาที ด้วยหลักการสร้างเครื่องวัดนี้สามารถนำไปออกแบบเครื่องวัดแรงบิดของเครื่องจักรขนาดต่าง ๆ ได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แรงบิด (Torque) [3]

เมื่อมีแรงที่กระทำกับระบบแล้วทำให้ระบบหมุนรอบแกนหมุนหนึ่ง เรียกได้ว่าเกิด แรงบิด



รูปที่ 1 แรงที่กระทำกับแท่งโลหะ

โดยแรงบิดนิยามจากผลคูณของแรงกับระยะกระจัดที่ตั้งฉากจุดหมุนถึงแนวของแรง ดังรูปที่ 1

$$M_t = Fr \tag{1}$$

M_t : แรงบิด (N·m)

F : แรง (N)

r : รัศมี (m)

ความเครียดจากแรงบิดเท่ากับความเค้นบิดหารด้วยโมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น

$$\gamma = 2 \times \varepsilon @ 45° = \frac{\tau}{G} \tag{2}$$

γ : ความเครียดจากแรงบิด

τ : ความเค้นบิด (N/m^2)

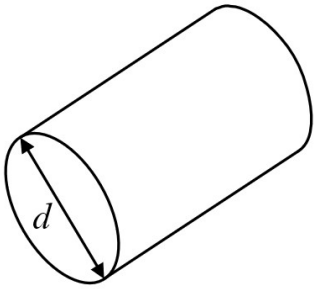
G โมดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (N/m^2)

ความเค้นบิดเท่ากับแรงบิดคูณรัศมี หารด้วย Polar moment of inertia

$$\tau = M_t \frac{r}{J} \tag{3}$$

J : Polar moment of inertia (mm^2)

Polar moment of inertia สำหรับเพลากลมตันดังรูปที่ 2 หาได้จากสมการที่ 4



รูปที่ 2 เพลากลมตัน

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{32} \quad (4)$$

d : เส้นผ่านศูนย์กลาง (mm)

การวัดความเครียดสามารถหาโมเมนต์แรงบิดได้ดังสมการที่ 5

$$M_t = \gamma G(\pi \frac{r^3}{2}) \quad (5)$$

2.2 สเตรนเกจ [4]

สเตรนเกจ คืออุปกรณ์ที่เปลี่ยนค่าความต้านทานไฟฟ้าเนื่องจากแรงหรือความเครียดซึ่งมากระทำบนตัวมันได้แก่ เปียโซรีซิสทีฟหรือเกจแบบสารกึ่งตัวนำ เกจความต้านทานคาร์บอน เกจขดลวดแบบโลหะและเกจความต้านทานแบบฟอยล์

เกจแฟกเตอร์ (Gauge Factor) ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเครียดและค่าความต้านทาน เป็นเพียงค่าประมาณเท่านั้น จะพบว่าความไม่บริสุทธิ์ของโลหะ ชนิดของโลหะ และตัวแปรอื่น ๆ มีผลให้ความถูกต้องเปลี่ยนแปลง ส่วนการบอกลักษณะจำเพาะของ Strain Gauges จะบอกมาในรูปแบบเกจแฟกเตอร์ (GF) ซึ่งค่าดังกล่าวนี้กำหนดได้เป็น

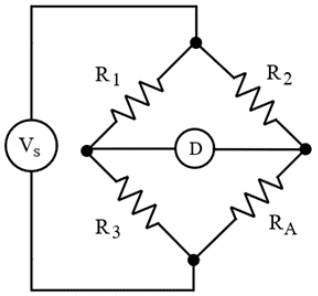
$$GF = \rho \frac{\Delta R / R}{strain} = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} \quad (6)$$

GF : เกจแฟกเตอร์

$\Delta R / R$: เศษส่วนการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของเกจความเครียด (Ω / Ω)

$\Delta l / l$: เศษส่วนการเปลี่ยนแปลงความยาว (mm/mm)

การนำสเตรนเกจไปใช้ในวงจรไฟฟ้าต้องจ่ายแรงดันและมีการจัดวงจรให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าสัญญาณที่ต้องการ วงจรไฟฟ้าที่ใช้งานคือ วีทสโตนบริดจ์ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรวีทสโตนบริดจ์

R_1, R_2, R_3 จะมีค่าคงที่ ในตอนที่ไม่มีแรงมากระทำต่อสเตรนเกจ R_3 และ R_A จะเท่ากัน แรงดันเอาต์พุตจะเป็น 0 V เมื่อมีแรงกระทำ ค่าความต้านทาน R_A จะเปลี่ยนแปลงทำให้มีแรงดันเอาต์พุตแปรผันตรงตามแรงที่กระทำ

3. การออกแบบ

การออกแบบเครื่องวัดแรงบิดแบบโรตารี่ทอร์กมีส่วนประกอบคือ การออกแบบวงจรขยายสัญญาณและการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องวัดแรงบิด

3.1 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณ

ออกแบบอัตราขยายจากการกำหนดแรงดันอินพุตที่ 0 - 10 mV และแรงดันเอาต์พุตที่ 2 - 4 V โดยจะมี Gain(A) อยู่ระหว่าง 200 - 500 เท่า จึงเลือกใช้

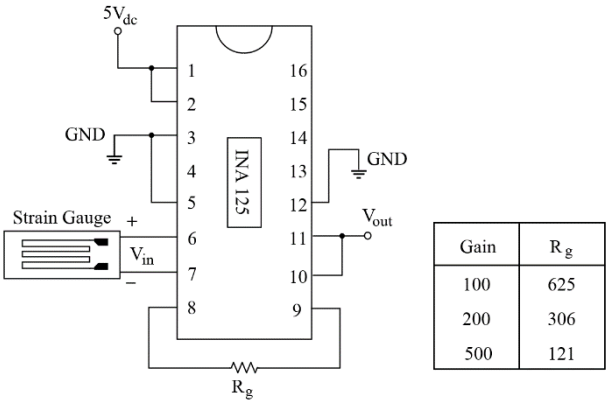
อัตราขยายที่ 200 เท่าตามอัตราขยายที่แนะนำในดาต้าชีท

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} \qquad (7)$$

A : อัตราขยาย

V_{in} : แรงดันอินพุต (V)

V_{out} : แรงดันเอาต์พุต (V)



Gain	R_g
100	625
200	306
500	121

รูปที่ 4 วงจรขยายสัญญาณ 200-500 เท่า

3.2 การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องวัดแรงบิด

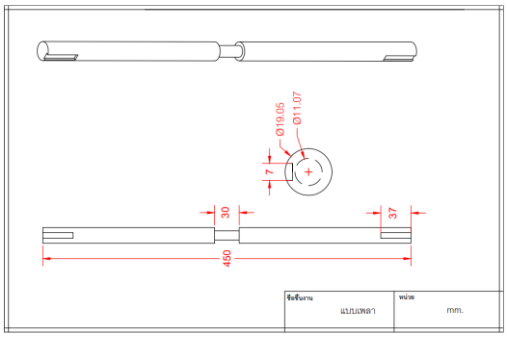
การออกแบบชิ้นส่วนเครื่องวัดแรงบิดประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ แบบเพลา แบบสลิปริง แบบฐานเครื่องวัดแรงบิด แบบคัปปลิ้งสำหรับสอบเทียบและแบบแขนเหล็กสอบเทียบและยึดเพลา

เครื่องวัดแรงบิดขนาด 50 นิวตัน·เมตร แบบเพลากลมตัน ติดตั้งสเตรนเกจแบบ full bridge มี sensitivity 2.0 มิลลิโวลต์/โวลต์ ที่สเตรน 2000 x 10^{-6} วัสดุเป็น S45C ซึ่งมีสมบัติ Torsional modulus 80,000 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร แทนค่าในสมการที่ 5

$$50000 = 2000 \times 10^{-6} \times 80000(\pi \frac{r^3}{2})$$

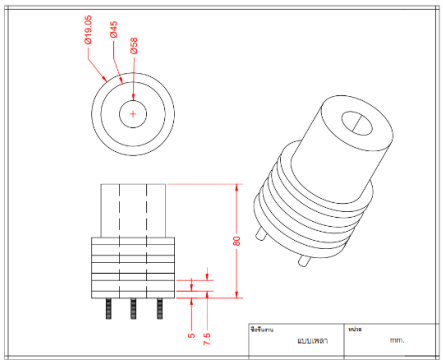
$$r = 5.8377 \text{ mm.}$$

ได้รัศมีบริเวณที่ติดตั้งสเตรนเกจ 5.83 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แบบเพลากลมตัน

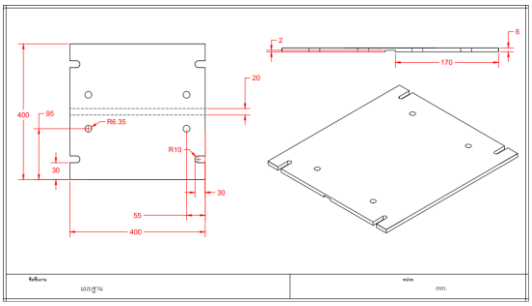
เพลาสำหรับโรตารี่ มีเซ็นเซอร์วัดแรงบิดกับวงจรขยายสัญญาณติดไว้กับตัวเพลา การป้อนไฟเลี้ยงและวัดแรงดันเอาต์พุตต้องมีการต่อสายไฟเข้าและออกจำนวน 3 เส้น ออกแบบสลิปริงให้สวมเข้ากับเพลา 19.05 มิลลิเมตร จำนวนขั้วของสลิปริง 3 ขั้ว พิกัดกระแส 5 แอมป์ แรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์ ความเร็วรอบที่ 1,500 รอบต่อนาที ความยาวของตัวสลิปริงทั้งหมด 50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แบบสลิปริง

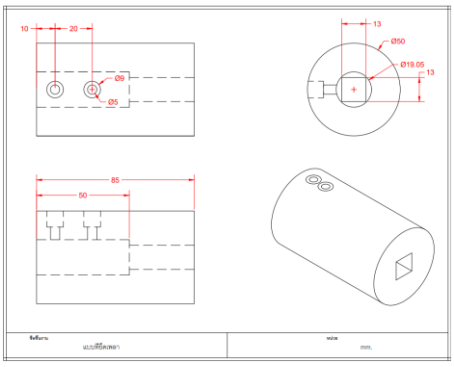
ฐานของเครื่องวัดแรงบิดประกอบไปด้วยเหล็กปรับระดับความสูงของเพลา แบริ่ง สลิปริงและเพลาทั้งหมด มีน้ำหนักประมาณ 10 กิโลกรัม เลือกใช้

เหล็กหนาขนาด 9 มิลลิเมตร กว้าง 400 มิลลิเมตร ยาว 360 มิลลิเมตร ร่องสไลด์กว้าง 20 มิลลิเมตร สูง 4 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 7

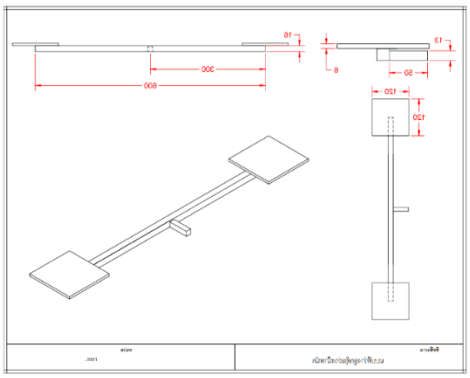


รูปที่ 7 ฐานเครื่องวัดแรงบิด

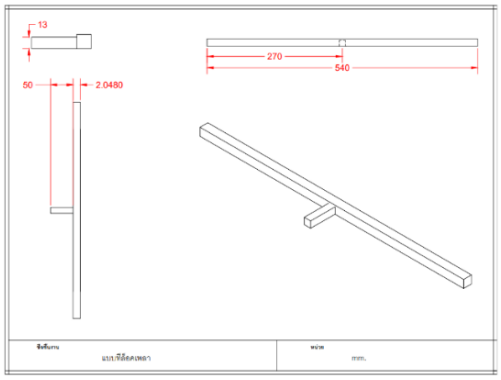
ในการสอบเทียบจะต้องยึดเพลาไม่ให้เคลื่อนที่ จากรูปที่ 8 (ก) ออกแบบเพื่อใช้สวมเพลาทั้งสองฝั่งกับแขนเหล็ก ด้านที่สวมกับเพลามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.05 มิลลิเมตร ด้านสวมกับแขนเหล็กมีขนาด 13*13 มิลลิเมตร รูปที่ 8 (ข) เป็นฝั่ง Drive ออกแบบใช้วางลูกตุ้มถ่วงน้ำหนัก รูปที่ 8 (ค) เป็นฝั่ง Load ออกแบบใช้ในการยึดเพลาขณะ Calibrate Torque จากรูปที่ 9 ประกอบด้วยส่วนของมอเตอร์ทำหน้าที่ขับโหลดต่อกับด้าน Drive, Torque detector ทำหน้าที่วัดการบิดตัวของเพลา และส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทำหน้าที่ต่ออยู่ด้าน Load



(ก) คัปปลิ้งสวมเพลา

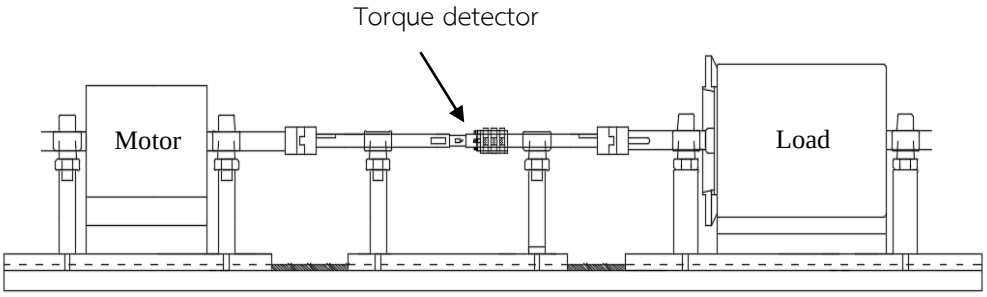


(ข) แขนเหล็กสวมคัปปลิ้งฝั่ง Drive

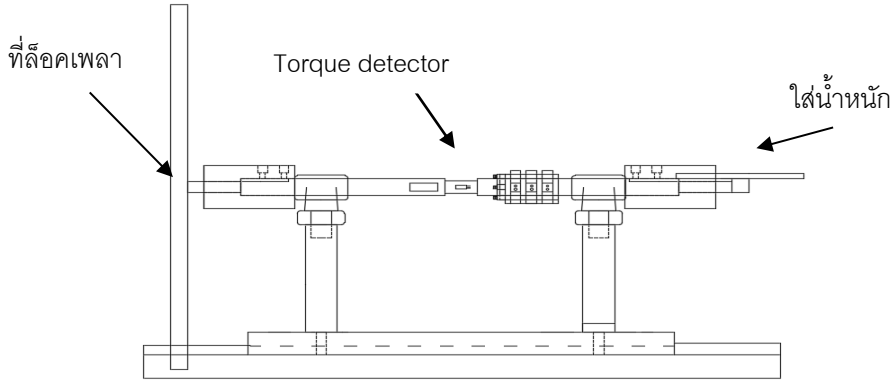


(ค) แขนเหล็กสวมคัปปลิ้งฝั่ง Load

รูปที่ 8 แบบอุปกรณ์สำหรับสอบเทียบ



รูปที่ 9 การติดตั้งเครื่องวัดแรงบิด



รูปที่ 10 ฐาน Calibrate Torque

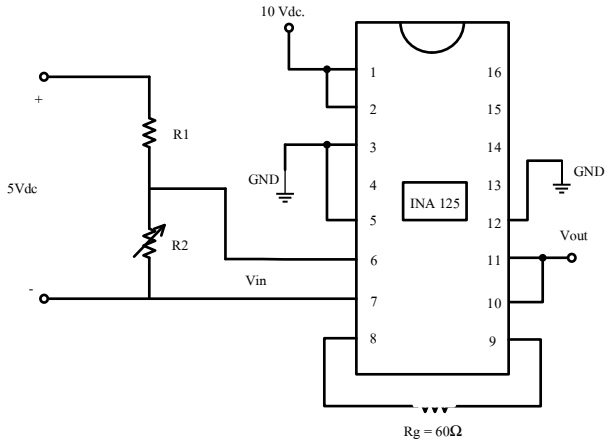
จากรูปที่ 10 ประกอบด้วยส่วนที่ล็อคเพลาอยู่ฝั่ง Load ยึดให้เพลาอยู่กับที่ ส่วนของ Torque detector ทำหน้าที่วัดการบิดตัวของเพลาขณะถ่วงน้ำหนัก และส่วนที่ใส่น้ำหนักทำหน้าที่อยู่ฝั่ง Drive จะใช้วางลูกตุ้มขณะสอบเทียบ

4. การทดลอง

การทดลองเครื่องวัดแรงบิดแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ การทดลองวงจรขยายสัญญาณ การ Calibrate Torque และการสอบเทียบกับสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

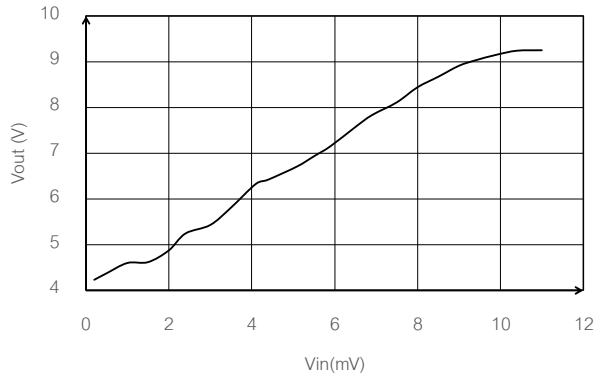
4.1 ทดลองวงจรขยายสัญญาณ

เพื่อหาอัตราขยาย โดยต่อวงจรดังรูปที่ 11



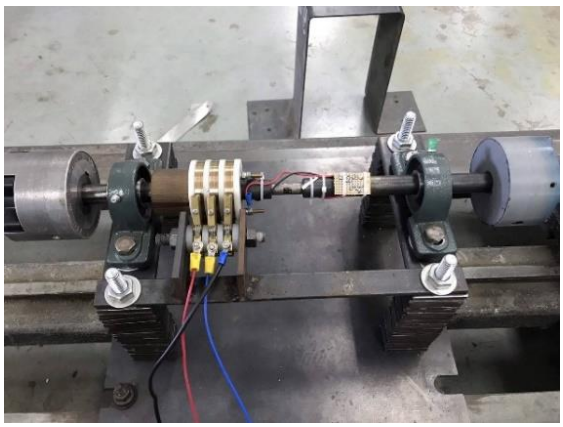
รูปที่ 11 วงจรขยายสัญญาณ INA125

จากรูปที่ 11 ใช้วงจรโวลต์เตจดีไวเดอร์จำลองเป็นแรงดันอินพุตให้กับวงจร และ ปรับค่า R_2 ให้มีแรงดันอินพุต 0-10 mV ผลการทดลองดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ทดลองวงจรขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 12 แรงดันเอาต์พุต มีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันอินพุต โดยอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 840 - 3007 เท่า มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น และการจ่ายไฟเลี้ยงให้สเตรนเกจ 10 V ทำให้สเตรนเกจมีอุณภูมิสูง จึงลดแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้า INA125 เท่ากับ 5 V และเลือก $R_g = 300\Omega$ เพื่อให้ได้อัตราขยายเท่ากับ 200 เท่า ติดตั้ง Rotary torque ลงบนแท่น Calibration เพื่อทดสอบ อัตราการขยายสัญญาณ ของวงจรขยายสัญญาณ กับ Strain gauge หลังปรับปรุงแรงดันไฟฟ้าป้อนเข้าและ ค่า R_g ดังรูปที่ 14

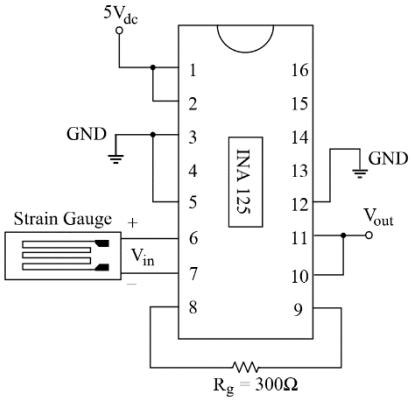


รูปที่ 13 การติดตั้งวงจรขยายสัญญาณบนเพลา

จากรูปที่ 13 บัดกรีขาของสเตรนเกจเข้ากับวงจรขยายสัญญาณ แล้วใช้เคเบิ้ลไทรัดแผ่น PCB เพื่อยึดวงจรให้ติดอยู่บนเพลา และต่อสายไฟต่าง ๆ เข้ากับสลิปริง

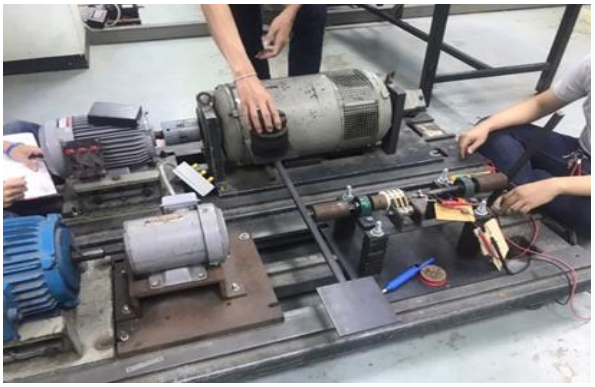
4.2 การ Calibrate Torque

การ Calibrate Torque ต่อวงจรดังรูปที่ 14



Gain	R_g
100	625
200	306
500	121

รูปที่ 14 วงจรขยายสัญญาณ A = 200 เท่า



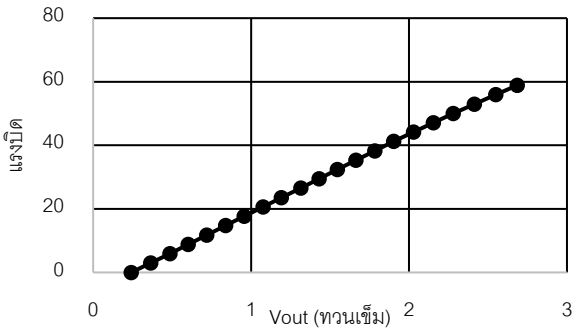
รูปที่ 15 การทดลอง Calibrate Torque

ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ให้กับวงจรขยายสัญญาณและสเตรนเกจ ทำการบันทึกผลแรงดันอินพุตและเอาต์พุตขณะยังไม่ได้ถ่วงน้ำหนัก หลังจากนั้นเพิ่มน้ำหนักในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาครั้งละ 1 กิโลกรัมจนถึง 20 กิโลกรัมแล้วบันทึกผล และทดลองอีกครั้งในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

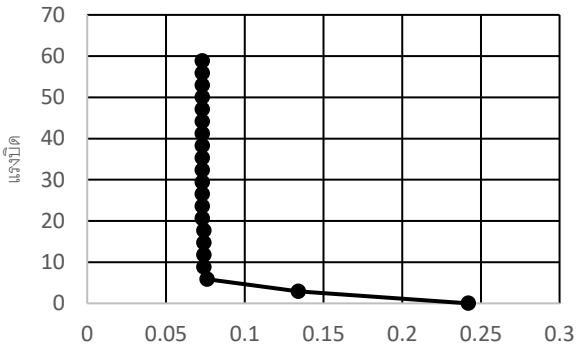
ตารางที่ 1 ผลการทดลอง Calibrate Torque ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

น้ำหนัก (kg)	แรงดันของวงจรขยายสัญญาณ				แรงบิด (N·m)
	ทวนเข็ม		ตามเข็ม		
	อินพุต (mV)	เอาต์พุต (V)	อินพุต (mV)	เอาต์พุต (V)	
0	1.1	0.241	1.1	0.242	0.00
1	1.7	0.364	0.5	0.134	2.94
2	2.3	0.485	0	0.076	5.89
3	2.8	0.602	-0.6	0.074	8.83
4	3.4	0.719	-1.1	0.074	11.77
5	4	0.838	-1.7	0.074	14.72
6	4.6	0.955	-2.3	0.074	17.66
7	5.1	1.075	-2.8	0.073	20.60
8	5.7	1.191	-3.3	0.073	23.54
9	6.3	1.314	-3.9	0.073	26.49
10	6.9	1.43	-4.5	0.073	29.43
11	7.4	1.545	-5	0.073	32.37
12	8	1.663	-5.5	0.073	35.32
13	8.6	1.783	-6.1	0.073	38.26
14	9.2	1.903	-6.7	0.073	41.20
15	9.8	2.028	-7.3	0.073	44.15
16	10.4	2.154	-7.9	0.073	47.09
17	11.1	2.28	-8.5	0.073	50.03
18	11.7	2.413	-9.1	0.073	52.97
19	12.3	2.548	-9.8	0.073	55.92
20	13	2.685	-10.5	0.073	58.86

จากตารางที่ 1 การวัดแบบตามเข็มนาฬิกาไม่สามารถใช้งานได้เพราะวงจรขยายสัญญาณไม่สามารถขยายแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่าศูนย์โวลต์ได้ ส่วนแบบทวนเข็มนาฬิกาสามารถแสดงผลการถ่วงน้ำหนักได้ถึง 0 - 20 กิโลกรัมและ แรงบิด 0 - 58.860 นิวตัน·เมตร ได้



(ก) ทวนเข็มนาฬิกา



(ข) ตามเข็มนาฬิกา

รูปที่ 16 แรงบิดกับแรงดันเอาต์พุต

จากรูปที่ 16 (ก) ค่าแรงบิดกับแรงดันเอาต์พุตทางด้านทวนเข็มนาฬิกามีความเป็นเชิงเส้น สามารถใช้สมการเชิงเส้นในการคำนวนหาแรงบิดได้ดังสมการที่ 8 และแรงดันเอาต์พุตดังสมการที่ 9 โดยใช้ค่า Deflection (ได้มาจากการนำค่าแรงดันเอาต์พุตที่ 0 N·m ไปลบค่าแรงดันเอาต์พุต ของทุก ๆ ค่าแรงบิด) จากตารางที่ 1 โดยที่สมการจะไม่มีค่า Intercept เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดจากความผันแปรของค่าศูนย์ที่จะส่งผลให้การใช้สมการเชิงเส้นแปลงเป็นค่าแรงบิดเกิด Offset

$$y = -24.5178 \cdot x \quad (8)$$

$$x = -0.04078 \cdot y \quad (9)$$

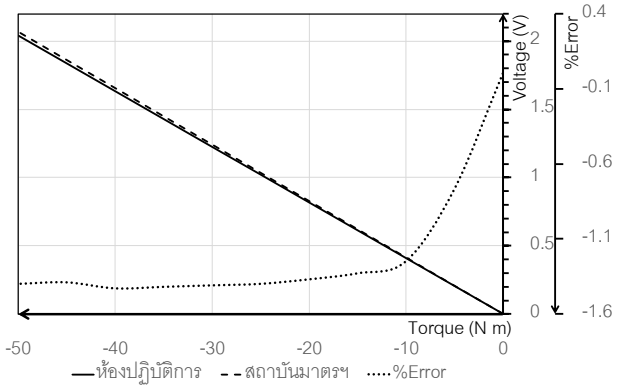
y : ค่าแรงบิด (N·m)

x : ค่าแรงดันเอาต์พุต (V)

ส่งเครื่องวัดแรงบิดแบบโรตารี่สอบเทียบที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ สอบเทียบบนพื้นฐานของแนวทางการสอบเทียบ DAkkS-DKD-R 3-8: 2010 “Static Calibration of Torque Wrench Calibration Devices” [5] ได้ผลการการสอบเทียบตาม Certificate NO. MFT-0027-22 [6] ผลการเปรียบเทียบการทดสอบทั้ง 2 แห่ง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบแรงบิดระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติกับห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

แรงบิด (N m)	แรงดันของวงจรขยายสัญญาณ				% Error
	ห้องปฏิบัติการ		สถาบันมาตรฯ		
	ทวนเข็ม	ตามเข็ม	ทวนเข็ม	ตามเข็ม	ทวนเข็ม
0	0	-	0	-	-
-5	0.2039	-	0.2055	-	-0.77
-10	0.408	-	0.413	-	-1.25
-15	0.612	-	0.620	-	-1.33
-20	0.816	-	0.827	-	-1.37
-25	1.020	-	1.034	-	-1.40
-30	1.223	-	1.241	-	-1.41
-35	1.427	-	1.448	-	-1.42
-40	1.631	-	1.655	-	-1.43
-45	1.835	-	1.861	-	-1.39
-50	2.039	-	2.068	-	-1.40



รูปที่ 17 เปรียบเทียบแรงบิดระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติกับห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

จากผลการการสอบเทียบตาม Certificate No. MFT-0027-22 ค่าแรงบิดและแรงดันเอาต์พุตทิศทวนเข็มนาฬิกาสามารถ แสดงเป็นสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$M_{ai} = -2.4178E+01 \cdot X_i \qquad (10)$$

$$X_{ai} = -4.1359E+01 \cdot M_i \qquad (11)$$

X: แรงดันเอาต์พุต (V)

M : แรงบิด (N·m)

พบว่าเครื่องวัดแรงบิดที่สร้างขึ้นมีความไม่แน่นอนของการวัดแบบช่วง (Relative uncertainty interval, W' ที่ k = 2) [5] หรือเรียกอีกอย่างว่าความถูกต้อง เท่ากับ $\pm$ 1.3 % ที่พิสัยการวัด (5 ถึง 50) N·m, $\pm$ 0.58 % ที่พิสัยการวัด (10 ถึง 50) N·m และ $\pm$ 0.20 % ที่พิสัยการวัด (25 ถึง 50) N·m สามารถนำไปใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังของมอเตอร์ได้ดีในพิสัยการวัด (25 ถึง 50) N·m เฉพาะในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

จากสมการที่ (9) สามารถแทนค่าแรงบิด (0-50) N·m เพื่อหาค่าแรงดันเอาต์พุตในจุดที่จะทำการเปรียบเทียบผลการวัด สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ได้ผลการเปรียบเทียบดังตารางที่ 2 พบว่าผลการทดลองสอบเทียบ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้ากำลัง ค่าความผิดพลาดสูงสุด -1.43 % ค่าความผิดพลาดต่ำสุด -0.77 % และค่าความผิดพลาดเฉลี่ย -1.32 %

5. สรุปผล

จากการทดลองที่ 4.1 อัตราขยายของวงจรขยายสัญญาณมีความไม่เป็นเชิงเส้นจากรูปที่ 13 ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.2 – 0.5 mV ค่า Gain จะมีค่า 300-3,007 เท่า ทำการปรับลดแรงดันป้อนเข้าเหลือ 5 V และ $R_g = 300\Omega$ ได้ค่า Gain 206- 219 เท่า และมีความเป็นเชิงเส้น ตามตารางที่ 1 และรูปที่ 16 (ก)

ผลการสอบเทียบจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ พบว่าเครื่องวัดแรงบิดที่สร้างขึ้น สามารถนำไปใช้ในการทดสอบหาค่ากำลังของมอเตอร์ได้ดีในพิสัยการวัด (25 ถึง 50) N·m เฉพาะในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งมีความถูกต้องอยู่ที่ $\pm$ 0.20 %

การนำเอาตุ้มน้ำหนักมาแขวนที่คานเพื่อกำเนิดค่าแรงบิดในการสอบเทียบเครื่องวัดแรงบิดของห้องปฏิบัติการ ฯ เพื่อเปรียบเทียบค่ากับสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ พบว่ามีค่าของความคลาดเคลื่อนตั้งแต่ -0.77 % ไปจนถึง -1.43 % ทั้งนี้อาจเกิดเนื่องจากความคลุมเคลือในการประเมิน Effective length ที่แท้จริงของคาน มุมของคานที่ไม่สามารถทำให้ตั้งฉากกับแนวแรงที่มากระทำทุกจุดวัด ความผันแปรของอุณหภูมิขณะทำการวัดที่ส่งผลต่อความยาวของคาน เป็นต้น และอีกส่วนก็เกิดจาก Sensitivity ของเครื่องวัดแรงบิดเองที่มีต่อการผันแปรของอุณหภูมิแวดล้อมขณะทำการสอบเทียบ เนื่องจากห้องปฏิบัติการไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิขณะทำการสอบเทียบได้เท่ากับที่สถาบันมาตร ฯ แต่อย่างไรก็ตาม การนำเอาตุ้มน้ำหนักมาแขวนที่คานเพื่อกำเนิดค่าแรงบิดสามารถนำมาใช้ทวนสอบเครื่องมือวัดแรงบิดที่สร้างขึ้นได้โดยมีความถูกต้องของระบบการวัดที่ $\pm$ 1.50 %

เนื่องจากวงจรขยายสัญญาณไม่สามารถขยายแรงดันไฟฟ้าด้านลบได้จึงไม่สามารถนำเครื่องวัดแรงบิดนี้ทดสอบมอเตอร์ในทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกาได้ ด้วยวิธีการสร้างเครื่องวัดแรงบิดแบบโรตารี่นี้ สามารถนำไปสร้างเครื่องวัดแรงบิดแบบโรตารี่ที่พิกัดอื่นได้ จากผลการทดสอบระหว่างสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติกับห้องปฏิบัติการมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร แรงบิดมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ย -1.32 เปอร์เซ็นต์

งานในอนาคตทางห้องปฏิบัติการ ฯ มีแผนจะทำการ Balance bridge ให้มีค่าใกล้เคียงศูนย์ รวมถึงทำการชดเชยผลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อ Zero error และ Span error รวมถึงการสร้างวงจรขยายสัญญาณที่สามารถขยายสัญญาณได้ทั้งการวัดตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา เพื่อเพิ่มระดับความถูกต้องและสามารถนำไปทดสอบกำลังของมอเตอร์ให้ได้ทั้งในทิศทางตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา

เอกสารอ้างอิง

[1] ธนกร กะหะกะสิทธิ์, ณัฐชนน พุ่มผะกา, วายุ อาศัย และ ศุภวิชญ์ ประเสริฐสังข์ “แท่นทดสอบเครื่องจักรกลไฟฟ้า”, ปริญญานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต, 2563

[2] logicbus.com/FSH02058_p_6879.html

[3] คณาจารย์ ภาควิชาฟิสิกส์ “คู่มือปฏิบัติการฟิสิกส์ 1 PHYS0190” หน้าที่ 43-46, 2562

[4] พจนาฎ สุวรรณมณี, “เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์เบื้อง,” หน้าที่ 201-267, 2516

[5] The technical committee Force, Pressure, Mass of the German Calibration Service (Deutscher Kalibrierdienst-DKD) in Cooperation with the Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), DAkkS-DKD-R 3-8, (2010). Static calibration of torque wrench calibration devices, Braunschweig, December 2010.

[6] National Institute of Metrology (Thailand) “Certificate NO: MFT-027-22” 2022