



การพัฒนาอุปกรณ์วัดการะบิด

DEVELOPMENT OF TORQUE TRANSDUCER

นายสหภาพ	ยืนทรัพย์	รหัสนิสิต	58362858
นางสาวสุดารัตน์	กองดี	รหัสนิสิต	58362872
นายอภิรมย์	โอ่งอิน	รหัสนิสิต	58362940

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2561




ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ	การพัฒนาอุปกรณ์วัดการะบิด		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายสหภาพ ยืนทรัพย์	รหัสนิสิต	58362858
	นางสาวสุภารัตน์ กองดี	รหัสนิสิต	58362872
	นายอภิรมย์ โฉ่งอิน	รหัสนิสิต	58362940
ที่ปรึกษาโครงการ	ผศ.ดร.รัตนา การบุญบุญนันท์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2561		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล


.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ผศ.ดร.รัตนา การบุญบุญนันท์)


.....กรรมการ

(ผศ.ชพงศ์ ช่วยเพ็ญ)


.....กรรมการ

(ดร.ปองพันธ์ โอทกานนท์)

หัวข้อโครงการ	การพัฒนาอุปกรณ์วัดภาระบิด		
ผู้ดำเนินงาน	นายสหภาพ	ยืนทรัพย์	รหัสนิสิต 58362858
	นางสาวสุดารัตน์	กองดี	รหัสนิสิต 58362872
	นายอภิรมย์	โอ่งอิน	รหัสนิสิต 58362940
ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตนา การุญบุญญานันท์		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2561		

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์วัดภาระบิดที่สามารถวัดภาระบิดได้สูงสุด 150 นิวตัน-เมตร เลือกใช้วัสดุสแตนเลส 304 ทำชิ้นงาน จากการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2016 ได้รูปแบบชิ้นงานที่มีความเหมาะสมคือ ชิ้นงานที่มีลักษณะทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร ลดขนาดเพลากลางเหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร รัศมีฟิลเลต 150 มิลลิเมตร ทำการเจาะร่องขนาด 5 มิลลิเมตรบนเพลากลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สำหรับใส่สายสัญญาณ ติดสเตรนเกจชนิด KFG-5-350-C1-16L1M2R ขนาด 350 โอห์ม จำนวน 4 ตัว บนเพลากลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ต่อบางจรแบบวีทสโตนบริดจ์ และส่งถ่ายสัญญาณไฟฟ้าผ่านแหวนลื่น ทำการทดสอบอุปกรณ์วัดภาระบิดที่พัฒนาด้วยแทนทดสอบ โดยการใส่ก้อนน้ำหนักบนที่แขวนที่ใช้ลวดสลิงคล้องผ่านจานหมุนเพื่อไปบิดอุปกรณ์วัดภาระบิด ทดสอบภาระบิดที่แรงกระทำในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกาที่มุม 0 องศา และ 90 องศา จากการทดสอบพบว่ามีค่า Rate of sensitivity 0.9137 $\mu/(N \cdot m)$, Regression error สูงสุด 3.29%FSO, Repeatability error สูงสุด 5.06%FSO, Hysteresis error สูงสุด 6.91%FSO และ Reproducibility error สูงสุด 7.08%FSO

Project title Development of Torque Transducer

Name Mr. Sahapap Yuensap ID. 58362858
 Miss Sudarat Kongdee ID. 58362872
 Mr. Apirom Ongin ID. 58362940

Project advisor Asst. Prof. Dr. Rattana Karoonboonyanan

Major Mechanical Engineering

Department Mechanical Engineering

Academic year 2018

Abstract

The objective of this research is to design, build and test the torsional load transducer for measuring the torsional load up to 150 N-m. Stainless steel 304 was chosen as the material for designing and building the load cell. Each design of shaft was simulated by Finite Element Method (FEM) run on SolidWorks 2016 program. The stepped shaft design was a 350-mm long round cylinder with the outer diameter of 35 mm at both ends, and 25 mm at the middle part which was 120 mm long with a fillet radius of 150 mm. On the cylinder shaft of 35 mm was made a 5-mm slot for passing the signal wire. Four 350-Ohm strain gauges, KFG-5-350-C1-16L1M2R type, were installed as Wheatstone bridge circuits on a cylinder shaft of 25 mm and transmission of electrical signals through a slip ring. The torques were applied in the test platform by putting lumps of weight hanging on a rope looped through the plate in clockwise and counterclockwise direction at the angle of 0 degree and 90 degrees. The results showed that rate of sensitivity was 0.9137 μ /(N-m), maximum regression error was 3.29%FSO, maximum repeatability error was 5.06%FSO, maximum hysteresis error was 6.91%FSO and maximum reproducibility error was 7.08%FSO.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตนา การุญบุญญานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่สละเวลาให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย และความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์เกี่ยวกับโครงการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ท่านคอยชี้แนะ ทำให้คณะผู้วิจัยได้รับข้อมูลที่ครบถ้วนสามารถนำมาใช้วิเคราะห์ วางแผน และสรุปข้อมูลได้อย่างราบรื่นตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ และ ดร.ปองพันธ์ โอทกานนท์ ซึ่งเป็นกรรมการสอบโครงการปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ เพื่อให้โครงการวิจัยมีความถูกต้องสมบูรณ์มากที่สุด

ขอขอบพระคุณภาคีวิชาชีพวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดลอมที่ให้ความอนุเคราะห์อำนวยความสะดวกในเรื่องเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบ

สุดท้ายนี้ ผู้ดำเนินโครงการขอขอบพระคุณบิดามารดา ผู้ให้การดูแลที่สนับสนุนด้านการศึกษาตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาคีวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่านที่มอบความรู้ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับโครงการปริญญานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงมาด้วยดี

นายสหภาพ ยืนทรัพย์

นางสาวสุดารัตน์ กองดี

นายอภิรมย์ โองอิน

เมษายน 2562

ลำดับสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัด (mm^2)
a,b	ค่าความกว้างและยาวของวัสดุ (m)
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)
c	รัศมีผิวนอก (m)
E	โมดูลัสของแรง (GPa)
G	โมดูลัสของแรงเฉือน (GPa)
J	โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว (m^4)
Ks	ค่าคงที่ความสัมพันธ์ หรือ เกจเพ็คเตอร์
l	ความยาวของวัสดุ (m)
R	ความต้านทานทางไฟฟ้าเดิมของสเตรนเกจ (Ω)
ΔR	ความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสเตรนเกจมีการยืดหดตัว (Ω)
T	ขนาดแรงบิด (N-m)
V	อัตราส่วนปัวซองส์
γ	ความเครียดแรงเฉือน
ϵ	ความเครียด
ρ	สภาพความต้านทานของวัสดุ (Ωm)
τ	ความเค้นเฉือน (N/m^2)
τ'	ความเค้นเฉือนที่รัศมี r ใดๆ (N/m^2)

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองปริญญาโท	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
ลำดับสัญลักษณ์	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Outputs)	1
1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcomes)	1
1.5 ขอบเขตของโครงการ	2
1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงการ	2
1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงการ	2
1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินงาน	2

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	3
2.1 สเตรนเกจ	3
2.2 การออกแบบอุปกรณ์วัดภาระบิด	16
2.3 แหวนลื่น (Slip ring)	27
2.4 การสอบเทียบ (Calibration)	30
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	36
3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	36
3.2 การออกแบบอุปกรณ์วัดภาระบิด	36
3.3 การสร้างอุปกรณ์วัดภาระบิด การติดตั้งสเตรนเกจและการต่อวงจร	51
3.4 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดภาระบิด	58
บทที่ 4 ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล	69
4.1 ภาระบิดที่กระทำในทิศตามเข็มนาฬิกาที่มุม 0 และ 90 องศา	69
4.2 ภาระบิดที่กระทำในทิศทวนเข็มนาฬิกาที่มุม 0 และ 90 องศา	70
4.3 ภาระบิดที่กระทำในสองทิศทางที่มุม 0 และ 90 องศา	71
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	73
5.1 บทสรุป	73
5.2 ข้อเสนอแนะ	74
เอกสารอ้างอิง	75
ภาคผนวก ก กราฟและตารางผลการทดลอง	77
ภาคผนวก ข แบบรายละเอียดของอุปกรณ์วัดภาระบิด	86

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน	2
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ความคาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัดการระเบิดในทิศทางทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกาที่ 0 และ 90 องศา	71
ตารางที่ 5.1 คุณลักษณะของอุปกรณ์วัดการระเบิดต้นแบบ	73



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Shear	3
รูปที่ 2.2 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Bending Beam	4
รูปที่ 2.3 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Canister	4
รูปที่ 2.4 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Pancake	5
รูปที่ 2.5 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด S-Beam	5
รูปที่ 2.6 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Single Point	6
รูปที่ 2.7 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Double End Shear Beam	6
รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างสเตรนเกจตามมาตรฐาน	7
รูปที่ 2.9 วงจรวีทสโตนบริดจ์	10
รูปที่ 2.10 วงจรบริดจ์สมดุล	10
รูปที่ 2.11 รูปประกอบเพื่อพิจารณาสมการบริดจ์ไม่สมดุล	12
รูปที่ 2.12 แสดงการต่อวงจรบริดจ์แบบต่างๆ	14
รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการติดตั้งสเตรนเกจ	16
รูปที่ 2.14 เพลากลมตันภายใต้ภาระบิด	18
รูปที่ 2.15 ภาคตัดเพลลา	19
รูปที่ 2.16 มุมบิดของการวัดแบบ Pure torque	20
รูปที่ 2.17 มุมบิดของการวัดแบบ Torque with cross force	22
รูปที่ 2.18 เซนเซอร์วัดแรงบิดแบบ Strain-gauged Shaft	24
รูปที่ 2.19 ตัวอย่างเซนเซอร์วัดแรงบิดแบบ Strain-gauged Shaft	24
รูปที่ 2.20 โครงสร้าง Strain Gauge ที่ต่อกันเป็นวงจร Wheatstone Bridge	25

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของ Slip Ring	28
รูปที่ 2.22 แสดงตัวอย่างของ Slip Ring ที่ใช้ในเซนเซอร์วัดการบิดแบบ Strain-gauge Shaft	28
รูปที่ 2.23 ลักษณะของแหวนลื่น (Slip ring)	29
รูปที่ 2.24 การติดตั้งด้วยการสวมแหวนลื่น (Slip ring) เข้ากับเพลา (Shaft)	29
รูปที่ 2.25 Calibration curve	30
รูปที่ 2.26 การใส่แรงเพื่อให้เกิดโมเมนต์บิด	31
รูปที่ 2.27 ลักษณะของชิ้นงาน	32
รูปที่ 2.28 แสดงแบบเครื่องมือวัดพร้อมสัญญาณตรวจสอบร่วม	33
รูปที่ 2.29 เครื่องวัดการบิดขนาด 50 N.m ที่จัดทำตามรูปแบบ	33
รูปที่ 2.30 การติดตั้งตัวรับสัญญาณชนิดต่างๆ	34
รูปที่ 2.31 แบบอุปกรณ์วัดแรงบิด	35
รูปที่ 2.32 แบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน	35
รูปที่ 2.33 ชุดสอบเทียบ	35
รูปที่ 2.34 การประกอบปลายเสริม กับอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน	35
รูปที่ 3.1 ค่าความเค้นเพลลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.67 mm	38
รูปที่ 3.2 ค่าความเครียดเพลลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.67 mm	38
รูปที่ 3.3 ค่าความเค้น กรณียึดด้านล่างและแรงบิดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	39
รูปที่ 3.4 ค่าความเครียด กรณียึดด้านล่างและแรงบิดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	39
รูปที่ 3.5 ค่าความเค้น กรณียึดด้านล่างและแรงบิดทิศทางตามเข็มนาฬิกา	40
รูปที่ 3.6 ค่าความเครียด กรณียึดด้านล่างและแรงบิดทิศทางตามเข็มนาฬิกา	40

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 ค่าความเค้น กรณียึดด้านบนและแรงบิดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	41
รูปที่ 3.8 ค่าความเครียด กรณียึดด้านบนและแรงบิดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	41
รูปที่ 3.9 ค่าความเค้น กรณียึดด้านบนและแรงบิดทิศทางตามเข็มนาฬิกา	42
รูปที่ 3.10 ค่าความเครียด กรณียึดด้านบนและแรงบิดทิศทางตามเข็มนาฬิกา	42
รูปที่ 3.11 การเปิดชิ้นงาน	43
รูปที่ 3.12 เลือกชิ้นงานทำ simulation	43
รูปที่ 3.13 คำสั่ง simulation	44
รูปที่ 3.14 ตั้งชื่อชิ้นงาน	44
รูปที่ 3.15 กำหนดวัสดุ	45
รูปที่ 3.16 เลือกวัสดุ AISI 304	45
รูปที่ 3.17 ชนิดจับยึดชิ้นงาน	46
รูปที่ 3.18 ตำแหน่งยึดจับชิ้นงาน	46
รูปที่ 3.19 ชนิด Load	47
รูปที่ 3.20 ตำแหน่ง Torque	47
รูปที่ 3.21 สร้างเอลิเมนต์	48
รูปที่ 3.22 ปรับขนาดของเอลิเมนต์	48
รูปที่ 3.23 คำสั่ง Run	49
รูปที่ 3.24 ค่าการคำนวณ	49
รูปที่ 3.25 ค่าความเค้นวอนมิสมี่	50
รูปที่ 3.26 ค่าความเครียด	50

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.27 สร้างชิ้นงาน	51
รูปที่ 3.28 ตำแหน่งการติดสเตรนเกจ	52
รูปที่ 3.29 ชิ้นงานหลังติดตั้งสเตรนเกจ	52
รูปที่ 3.30 ปิดสเตรนเกจด้วยแผ่นโพลียูเรเทน	53
รูปที่ 3.31 ติด Stain Gauge Terminal ลงบนเพลลา	53
รูปที่ 3.32 บัดกรีเชื่อมสายไฟลง Terminal	54
รูปที่ 3.33 ต่อสายสัญญาณเข้ากับสเตรนเกจ	54
รูปที่ 3.34 แสดงการต่อสายสัญญาณเข้าวงจรวีทสโตนบริดจ์	55
รูปที่ 3.35 เคลือบเพลลาด้วย SB Tape	55
รูปที่ 3.36 เคลือบเพลลาด้วย VM Tape	56
รูปที่ 3.37 เคลือบเพลลาด้วยซิลิโคน	56
รูปที่ 3.38 ขั้วต่อ Slip ring	57
รูปที่ 3.39 สายนำสัญญาณ	57
รูปที่ 3.40 วงจรของ Indicator	58
รูปที่ 3.41 แท่นยึดสลีปริง (Slip ring)	59
รูปที่ 3.42 แผ่นประกบกับแท่นยึดสลีปริง	59
รูปที่ 3.43 แผ่นประกบกับด้านบนสลีปริง	60
รูปที่ 3.44 หน้าแปลน	60
รูปที่ 3.45 แผ่นงานเซาะร่อง	61
รูปที่ 3.46 ที่แขวนก้อนน้ำหนักร	61

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.47 ติดตั้งเข้ากับโครงเหล็ก	62
รูปที่ 3.48 แทนทดสอบ	62
รูปที่ 3.49 ต่อสายสัญญาณจากอุปกรณ์วัดภาระบิดกับเครื่อง indicator	63
รูปที่ 3.50 รูปแบบการใส่ภาระบิด	64
รูปที่ 3.51 การใส่ภาระบิดทิศทางตามเข็มนาฬิกา	64
รูปที่ 3.52 การใส่ภาระบิดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	64
รูปที่ 4.1 การทดสอบที่ 0 องศา และ 90 องศา ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา	69
รูปที่ 4.2 การทดสอบที่ 0 องศา และ 90 องศา ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	70
รูปที่ 4.3 แสดงค่าความเครียดกับภาระบิดที่กระทำในสองทิศทางที่ 0 องศา และ 90 องศา	71
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคาดเคลื่อนต่างๆ กับแรงกระทำ	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

การออกแบบเครื่องจักรกลประเภทที่ใช้การหมุน จำเป็นต้องมีการทดสอบคุณสมบัติทางกล และการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยการวัดภาระบิด เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากำลังของเครื่องจักรกล เพื่อตรวจสอบความแม่นยำของเครื่องจักรที่ออกแบบให้มีความน่าเชื่อถือและเพิ่มสมรรถนะเครื่องจักรให้ได้คุณภาพ

การทดสอบความสามารถในการทำงานของเครื่องจักรที่ถูกออกแบบไว้จำเป็นต้องใช้เครื่องมือทดสอบภาระบิด แต่โดยทั่วไปเครื่องมือทดสอบภาระบิดมีราคาสูง ทางคณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดภาระบิดให้มีราคาถูก

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อสามารถออกแบบ สร้างและทดสอบอุปกรณ์วัดภาระบิด ให้มีราคาถูกและมีประสิทธิภาพ

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Outputs)

ได้อุปกรณ์วัดภาระบิดที่มีประสิทธิภาพในการวัดภาระบิด

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcomes)

1.4.1 ได้อุปกรณ์วัดภาระบิดที่สามารถใช้งานได้จริง

1.4.2 อุปกรณ์วัดภาระบิดสามารถวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 สเตรนเกจ

2.1.1 ทฤษฎีสเตรนเกจ

สเตรนเกจเป็นเครื่องมือที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียด (Strain) ในวัสดุ ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงกระทำภายนอก โดยอาจเกิดจากแรง ความดัน โมเมนต์ ความร้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัสดุ แบ่งออกเป็นความเครียดแบบดึงและความเครียดแบบอัดซึ่งผลจากการเปลี่ยนรูปร่างของสเตรนเกจ ทำให้เกิดเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

สเตรนเกจสามารถตรวจวัดการยืดหรือหดตัวภายในโครงสร้าง สำหรับอุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้สำหรับวัดแรง ความดัน ความเร่ง ระยะการกระจัด และแรงบิดเพื่อใช้ในการประเมินความปลอดภัยและความแข็งแรงของโครงสร้าง ดังนั้นสเตรนเกจจึงถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลาย

2.1.2 ประเภทของโพลดเซลล์แบบสเตรนเกจ

โพลดเซลล์แบบสเตรนเกจมีการออกแบบสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกันไป แบ่งออกเป็น

2.1.2.1 โพลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Shear Beam (รูปที่ 2.1) ทิศทางการรับแรงกดรองรับน้ำหนักได้สูงสุด 10 ตัน ใช้สำหรับแทนชั่งพื้นและชั่งน้ำหนักในถัง



รูปที่ 2.1 โพลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Shear Beam

ที่มา : บริษัท แพ็คโตมาร์ท จำกัด

2.1.2.2 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Bending Beam (รูปที่ 2.2) ทิศทางการรับแรงกด เหมาะกับงานทั่วไปและงานซึ่งบนสายพานรองรับน้ำหนักสูงสุด 0.5 ตัน



รูปที่ 2.2 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Bending Beam

ที่มา : บริษัท แฟ็คโตมาร์ท จำกัด

2.1.2.3 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Canister (รูปที่ 2.3) ทิศทางการรับแรงกด เหมาะกับซึ่งรถบรรทุกน้ำหนักตั้งแต่ 10 ถึง 50 ตัน



รูปที่ 2.3 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Canister

ที่มา : บริษัท แฟ็คโตมาร์ท จำกัด

2.1.2.4 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Pancake (รูปที่ 2.4) ทำจากสแตนเลส ทิศทางการรับแรงกดและแรงดึงตั้งแต่ 2 ถึง 20 ตัน



รูปที่ 2.4 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Pancake

ที่มา : บริษัท แฟ็คโตมาร์ท จำกัด

2.1.2.5 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด S-beam (รูปที่ 2.5) สามารถวัดได้ทั้งแรงกด และแรงดึงที่น้ำหนักรองรับน้ำหนักสูงสุด 0.5 ตัน



รูปที่ 2.5 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด S-Beam

ที่มา : บริษัท แฟ็คโตมาร์ท จำกัด

2.1.2.6 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Single Point (รูปที่ 2.6) ทิศทางการรับแรงกด สำหรับเครื่องชั่งขนาดเล็กที่น้ำหนักน้อยๆ ไม่เกิน 200 กิโลกรัม



รูปที่ 2.6 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Single Point

ที่มา : บริษัท แฟ็คโตมาร์ท จำกัด

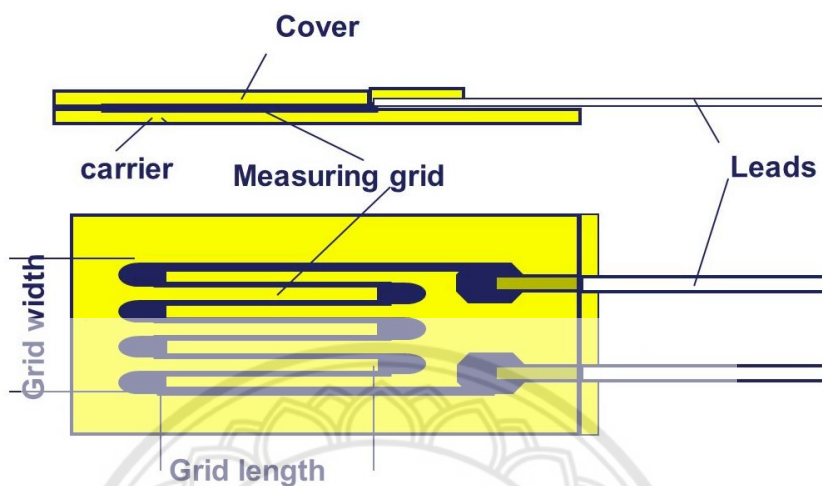
2.1.2.7 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Double End Shear Beam (รูปที่ 2.7) ทิศทางการรับแรงกด สำหรับงานชั่งที่น้ำหนักมากๆที่ 10 ถึง 50 ตัน



รูปที่ 2.7 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจชนิด Double End Shear Beam

ที่มา : บริษัท แฟ็คโตมาร์ท จำกัด

2.1.3 โครงสร้างของสเตรนเกจ



รูปที่ 2.8 ลักษณะโครงสร้างสเตรนเกจตามมาตรฐาน

ที่มา : Morrisk (2017)

ลักษณะโครงสร้างสเตรนเกจตามมาตรฐาน (รูปที่ 2.8) ประกอบด้วยขดลวดตัวต้านทานทางไฟฟ้าทำจากโลหะผสมแผ่นบางที่มีความหนาประมาณ 3 ถึง 6 ไมครอน ซึ่งยึดติดอยู่บนฐานที่เป็นแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ที่มีความหนาประมาณ 15 ถึง 16 ไมครอน ซึ่งฟิล์มโพลีเมอร์นี้เป็นฐานยึดติดกับอุปกรณ์ที่ต้องการวัด โดยระยะของขดลวดใช้เป็นระยะเกจในการวัด โดยปลายของขดลวดมีบริเวณกว้างสำหรับยึดกับสายไฟ

2.1.4 หลักการทำงาน

เมื่อสเตรนเกจยึดติดกับอุปกรณ์ที่ต้องการวัด จึงทำให้ขดลวดโลหะผสมเป็นตัวรับสัญญาณซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวต้านทานทางไฟฟ้า เมื่อสเตรนเกจยึดหรือหดตัวทางกล จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่อความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นที่มีค่าคงที่ กำหนดความสัมพันธ์หลัก ดังสมการ (2.1)

$$\Delta R / R = K_s \cdot \epsilon \quad (2.1)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าเดิมของสเตรนเกจ (Ω)

ΔR คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสเตรนเกจมีการยืดหรือหดตัว (Ω)

K_s คือ เกจแฟกเตอร์ ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามชนิดของโลหะของขดลวด

ϵ คือ ความเครียด

2.1.5 การวิเคราะห์แรงสเตรนเกจ

ลักษณะความต้านทานมีความสัมพันธ์ ดังสมการ (2.2)

$$R = \frac{\rho l}{ab} \quad (2.2)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพความต้านทานของวัสดุ (Ωm)

l คือ ความยาวของวัสดุ (m)

a, b คือ ค่าความกว้างและยาวของวัสดุ (m)

นำค่าลอการิทึมฐาน e คูณตลอด สมการที่ (2.2)

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - \ln a - \ln b \quad (2.3)$$

หาอนุพันธ์ได้ตลอดทั้งสมการ (2.3)

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{da}{a} - \frac{db}{b} \quad (2.4)$$

เนื่องจาก ρ คงที่ตลอดวัสดุ ดังนั้นอนุพันธ์จึงเท่ากับศูนย์ สามารถเขียนสมการที่ (2.4) ได้เป็น

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{da}{a} - \frac{db}{b} \quad (2.5)$$

เนื่องจากความสัมพันธ์ของอัตราส่วนปัวซองส์ จะได้ว่า

$$-\frac{da}{a} = -\frac{db}{b} = \nu \frac{dl}{l} \quad (2.6)$$

เมื่อ ν คือ อัตราส่วนปัวซองส์

จากสมการ (2.6) และสมการ (2.5) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu) \frac{dl}{l} \quad (2.7)$$

จากความสัมพันธ์ของความเครียด

$$\epsilon = \frac{dl}{l} \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.7) และสมการ (2.8) ให้ $dR \approx \Delta R$ จะได้

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu)\epsilon \quad (2.9)$$

โดยให้ $(1 + 2\nu) = K_s$ เรียกว่า เกจเพ็คเตอร์ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของวัสดุ

จากความสัมพันธ์ข้างต้น สามารถวัดแรงได้จากความสัมพันธ์ของฮุก โดย

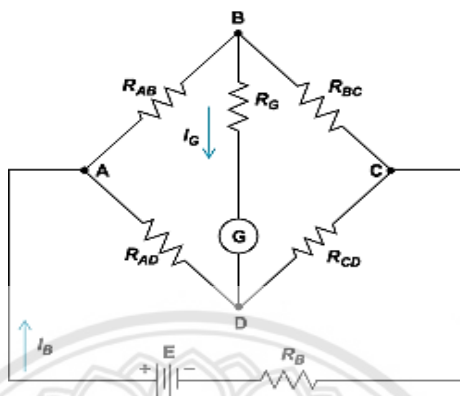
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.10)$$

2.1.6 วงจรวีทสโตนบริดจ์

วงจร“Wheatstone Bridge”เป็นวงจรที่ถูกค้นพบ ในปี 1833 โดยมีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Sir Charles Wheatstone เป็นผู้ค้นพบ รูปแบบวงจรบริดจ์มีลักษณะไม่ซับซ้อน อธิบายง่าย จึงถูกใช้กันอย่างแพร่หลายและสามารถประยุกต์การทำงานได้หลากหลาย

2.1.6.1 หลักการพื้นฐานของวงจรวีทสโตนบริดจ์

พิจารณาจากรูปที่ 2.9 เป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์ประกอบด้วยตัวต้านทาน 4 ตัว มีกัลวานอมิเตอร์วัดกระแสไฟที่วิ่งผ่านอยู่ มีไฟออกจากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจ่ายเลี้ยงในวงจรตรงระหว่างจุด A และจุด C



รูปที่ 2.9 วงจรวีทสโตนบริดจ์

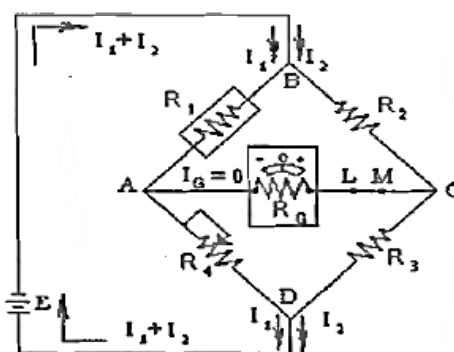
ที่มา : ธานี (2556)

2.1.6.2. ทฤษฎีของวีทสโตนบริดจ์

1.) ทฤษฎีบริดจ์สมดุล (Balanced Bridge)

ในวงจรวีทสโตนบริดจ์สมดุลแล้วจะไม่มีกระแสไหลผ่านจากจุด A ไปจุด C และไม่มีแรงดันตกคร่อมระหว่าง A-C (ตามรูปที่ 2.10) จากความสัมพันธ์

$$E = IR \tag{2.11}$$



รูปที่ 2.10 วงจรวีทสโตนบริดจ์สมดุล

ที่มา : อารังศักดิ์ และคณะ (2545)

และเมื่อไม่มีแรงดันตกคร่อมที่ระหว่างจุด A ไปจุด C จึงทำให้ A กับ C มีค่าแรงดันเท่ากัน และทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน จุด B ไปจุด A และ จุด B ไปจุด C มีค่าเท่ากัน

$$E_{B-A} = E_{B-C} \quad (2.12)$$

หรือ
$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (2.13)$$

และจากที่กล่าวมา ทำให้กระแสที่วิ่งผ่าน $R_1 = R_4$ คือ I_1 และกระแสที่วิ่ง ผ่าน $R_2 = R_3$ คือ I_2

เพราะ $I_G = 0$

$$E_{A-D} = E_{C-E} \quad (2.14)$$

หรือ

$$I_4 R_4 = I_3 R_3 \quad (2.15)$$

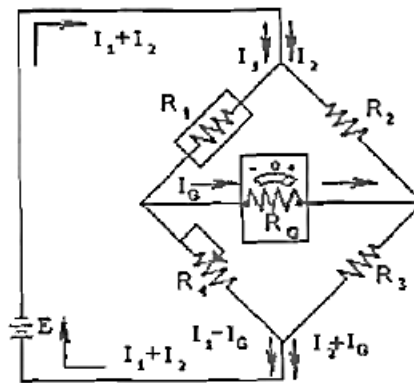
เมื่อนำสมการที่ (2.13) หารด้วยสมการที่ (2.15) จะได้ว่า

$$\frac{I_1 R_1}{I_4 R_4} = \frac{I_2 R_2}{I_3 R_3} \quad (2.16)$$

หรือ
$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad (2.17)$$

2.) ทฤษฎีบริดจ์ไม่สมดุล (Unbalanced Bridge)

ในกรณีทฤษฎีบริดจ์ไม่สมดุลเมื่อมีแรงกระทำต่อชิ้นวัสดุจนทำให้เกิดการเสียรูปของชิ้นงาน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อความต้านทานในวงจรบริดจ์ จะทำให้วงจรบริดจ์ไม่สมดุลอีกต่อไป
พิจารณารูปที่ 2.11 ประกอบ



รูปที่ 2.11 รูปประกอบเพื่อพิจารณาสมการบริดจ์ไม่สมดุล

ที่มา : อารงค์ศักดิ์ และคณะ (2545)

การวิเคราะห์ที่ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า มีกระแสไหลผ่านกัลวานอมิเตอร์ ซึ่งการพิจารณาเราใช้ กฎของ Kirchhoff ทั้งสองข้อที่ว่า

1. กฎของจุด (Point Rule) กล่าวว่า “ผลบวกทางพีชคณิตของกระแสไฟฟ้าที่จุดชุมทางใด ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์”
2. กฎของวง (Loop Rule) กล่าวว่า “ผลบวกทางพีชคณิตของแรงดันไฟฟ้าในรบบวงใด ๆ ย่อมมีค่าเท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของ IR ในวงรอบนั้นๆ”

$$\sum E = \sum IR \quad (2.18)$$

หมายเหตุ : โดยที่ E ที่มีทิศเดียวกับกระแสเป็นบวกตรงข้ามกับกระแสเป็นลบ โดยเฉพาะกฎของวง เราพิจารณาพร้อมรูปที่ 2.11 จะได้

สำหรับแรงดันที่ตกคร่อม R_1 และ R_4

$$R_1 I_1 + R_4 (I_1 - I_G) = E \quad (2.19)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$I_1 (R_1 + R_4) - R_4 I_G = E \quad (2.20)$$

สำหรับแรงดันที่ตกคร่อม R_1, R_2, R_G

$$I_1 R_1 + R_G I_G - R_2 I_2 = 0 \quad (2.21)$$

สำหรับแรงดันที่ตาคร่อม R_3, R_4, R_G

$$R_3 (I_2 + I_G) + R_G I_G - R_4 (I_1 - I_G) = 0 \quad (2.22)$$

เขียนใหม่ได้เป็น

$$R_3 I_2 - R_4 I_1 + I_G (R_G + R_3 + R_4) = 0 \quad (2.23)$$

ทั้งสามสมการแก้สมการเพื่อหาค่า I_G โดยใช้กฎของคราเมอร์

$$I_G = \frac{\begin{pmatrix} R_1 + R_4 & E & 0 \\ R_1 & 0 & -R_2 \\ -R_4 & 0 & R_4 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} R_1 + R_4 & -R_4 & 0 \\ R_1 & R_G & -R_2 \\ -R_4 & R_G + R_3 + R_4 & R_3 \end{pmatrix}} \quad (2.24)$$

โดยการหาค่าตัวกำหนด (determinant) ทั้งบนและล่างจะได้

$$I_G = \frac{E(R_2 R_4 - R_1 R_3)}{R_2 (R_1 + R_4)(R_G + R_3 + R_4) + R_1 R_3 R_4 - R_2 R_4^2 + R_G R_3 (R_1 + R_4)} \quad (2.25)$$

สามารถตรวจสอบบริจัจสมมูล จะได้ $I_G = 0$ ซึ่งในวงจรวิทสโตนบริจัจ นิยมใช้ตัวต้านทานขนาดเดียวกันหมด ให้เป็น R พิจารณาผลต่างและเทอมที่มีกำลังสูงเราจะไม่พิจารณา จะได้สมการ (2.25) เป็น

$$I_G = \frac{E \Delta R}{4R(R + R_G)} \quad (2.26)$$

แทนค่าจากสมการ (2.1) ลงในสมการ (2.26) จะได้

$$I_G = \frac{E K_s \epsilon}{4(R + R_G)} \quad (2.27)$$

ใส่ค่า R_G ทั้งสมการ เพื่อจะได้ E_0

$$E_0 = I_G R_G = \frac{EK_s \epsilon R_G}{4(R + R_G)} \quad (2.28)$$

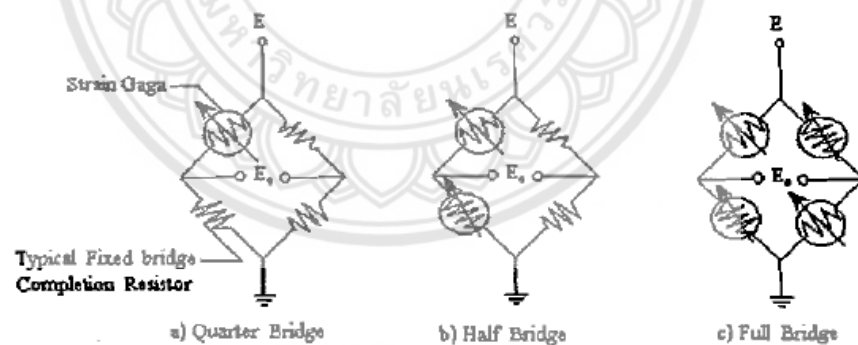
ถ้าวางจรเปิด ทำให้แรงดันตกคร่อม R , เป็นศูนย์ ดังนั้นใส่ค่าลิมิตที่ $R_G \rightarrow \infty$

$$E'_0 = \lim_{R_G \rightarrow \infty} E_0 = \frac{\frac{d}{dR_G}(EK_s \epsilon R_G)}{\frac{d}{dR_G}(4(R + R_G))} \quad (2.29)$$

เขียนสมการ (2.29) โดยให้ค่าของความเครียดอยู่ในรูป micro จะได้

$$\frac{E_0}{E} = \left[\frac{K_s \times \mu \epsilon \times 10^6}{4} \right] \quad (2.30)$$

การต่อวงจรมีหลายแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการต่อวงจรบริดจ์แบบต่างๆ

ที่มา : ชำรงค์ศักดิ์ และคณะ (2545)

1. quarter bridge ตัวต้านทาน 3 ตัวและตัวเกจ 1 ตัว
2. Half Bridge ใช้ตัวเกจ 2 ตัว ตัวต้านทาน 2 ตัว
- 3 Full Bridge ใช้ตัวเกจทั้ง 4 ตัว

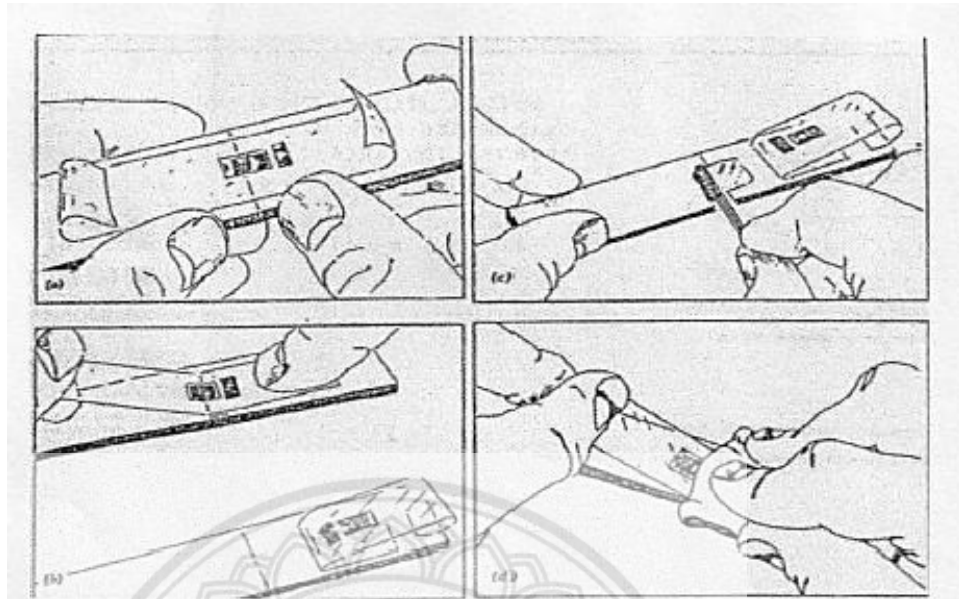
2.1.7 การติดตั้งสเตรนเกจ

สเตรนเกจเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความเครียดของชิ้นงาน ซึ่งสามารถนำไปหาความเค้นของชิ้นงาน ค่าที่ถูกต้องของสเตรนเกจจะต้องไม่มีความผิดพลาดของการส่งผ่านสัญญาณและไม่มี การสูญเสียสัญญาณ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการวัด จะต้องติดตั้งสเตรนเกจเข้ากับชิ้นงานให้ดี โดยจะต้อง ใช้กาวชนิดพิเศษ การติดสเตรนเกจส่วนใหญ่จะวัดบริเวณพื้นผิวของชิ้นงานด้านในหรือด้านนอกก็ได้ คุณภาพของการติดตั้งและเลือกใช้สเตรนเกจ มีอิทธิพลมากต่อความแม่นยำ

สเตรนเกจและการติดตั้งมีความสำคัญ โดยทั่วไปอาจใช้วิธีการเปรียบเทียบระหว่างชุด หนึ่งกับอีกชุดหนึ่ง เพื่อที่จะได้ชุดที่เหมาะสมที่สุดหรือมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังนั้นจึงควร เลือกใช้วิธีที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าเหมาะสม บางครั้งพิจารณาความซับซ้อน หรือราคาด้วย ทุก องค์ประกอบที่เลือกใช้ไม่ว่าชนิดของสเตรนเกจ ตัวยึดติด ตัวป้องกัน จะขึ้นกับจุดที่ต้องการวัด อุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ประกอบในการวัดต้องได้รับการทดสอบเพื่อตรวจประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือ และความเหมาะสมก่อนที่จะนำมาใช้ประกอบในการวัด สมบัติต่าง ๆ ของอุปกรณ์เหล่านี้จะต้อง เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานคุณภาพ

ขั้นตอนการติดตั้งสเตรนเกจบนผิวหน้าวัตถุรับแรงดังรูปที่ 2.13 มีดังนี้

- 1) ทำการปรับสภาพผิวหน้าของวัตถุรับแรงบริเวณที่ต้องการจะติด โดยใช้กระดาษทราย เบอร์ 200-300 ซัดให้เรียบแต่ห้ามเงา
- 2) ระบุตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งสเตรนเกจลงบนชิ้นงาน
- 3) นำสเตรนเกจมาติดลงบนเทปใส
- 4) ทากาวลงบนตำแหน่งที่ต้องการติดตั้ง
- 5) ติดตั้งสเตรนเกจกลับลงไปยังตำแหน่งที่จะติดโดยใช้เทปเป็นตัวนำ กดบริเวณสเตรน เกจ จนกระทั่งกาวแห้งแล้วจึงแกะเทปออก



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการติดตั้งสเตรนเกจ

ที่มา : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.2 การออกแบบอุปกรณ์วัดภาระบิด

ภาระบิด คือ ผลของแรงที่กระทำต่อวัตถุเพื่อให้วัตถุหมุนไปรอบจุดหมุน ในทิศทางตั้งฉากจากแนวแรงถึงจุดหมุน ขณะที่เพลลาบิดไปจะมีโมเมนต์ต้าน เนื่องจากความเค้นเฉือนบนเพลลาโดยโมเมนต์ต้านนี้มีค่าเท่ากับตลอดความยาวของเพลลาที่มีทิศทางตรงข้ามกับภาระบิดที่กระทำกับเพลลา

2.2.1 การคำนวณหา Stress Concentration

เมื่อทำการเลือกเพลลามาใช้งานและเพลลาไม่มีการลดขนาด จะใช้สมการ

$$\tau_{\max} = \left(\frac{T_c}{J} \right) \quad (2.31)$$

เมื่อ τ_{\max} คือ ความเค้นเฉือนสูงสุด (N/m^2)

- C คือ รัศมีผิวนอก (m)
 T คือ ขนาดแรงบิด (N-m)
 J คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงขั้ว (m⁴)

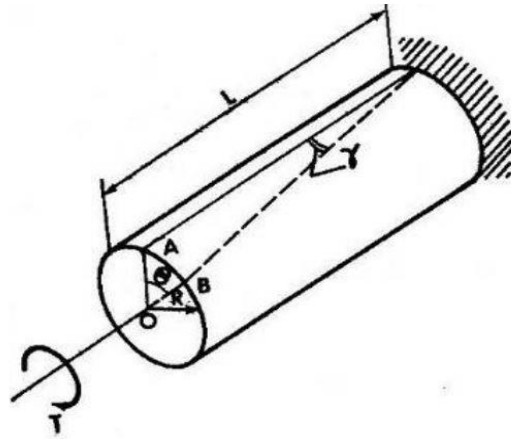
ความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นกับเพลลา ไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงได้ที่จะต้องมีการลดพื้นที่หน้าตัดให้เล็กลง จึงต้องทำให้เพลลา มีร่องลิ้นหรือฟิลเล็ต ซึ่งการทำฟิลเล็ตจะทำให้เกิดค่าความเข้มข้นของความเค้น (Stress concentration) โดยจุดนั้นของวัสดุจะเกิดความเสียหายก่อนตำแหน่งอื่นบนเพลลา โดยใช้สมการ

$$\tau_{\max} = K \left(\frac{T_C}{J} \right) \quad (2.32)$$

เมื่อ K คือ ตัวประกอบความเค้นหนาแน่น

2.2.2 มุมบิด

พิจารณาเพลลากลมตันรัศมี R อยู่ภายใต้ภาระบิด T ที่ปลายข้างหนึ่ง ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งยึดแน่นดังรูปที่ 2.14 ผลจากภาระบิดนี้ทำให้เส้นรัศมีที่ปลายอิสระของเพลลา บิดไปเป็นมุมเรเดียน จุด A เลื่อนไปอยู่ที่ B และ AB ร่องรับมุมที่ปลายยึดแน่น ดังนั้นจึงเป็นมุมที่เปลี่ยนแปลงตามแนวยาวของเพลลา ซึ่งก็คือ ความเครียดเฉือนของเพลลา



รูปที่ 2.14 เพลากลมตันภายใต้การบิด

ที่มา : ญัฐพล และ ทศนัย (2553)

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

ดังนั้น curve AB = $R\theta \approx L\gamma$

$$\gamma = \frac{R\theta}{L}$$

(2.33)

จากนิยามโมดูลัสของแรงเฉือน $G = \frac{\tau}{\gamma}$ แทนลงในสมการ (2.33) จะได้

$$\frac{\tau}{R} = \frac{G\theta}{L} = \frac{\tau'}{r}$$

(2.34)

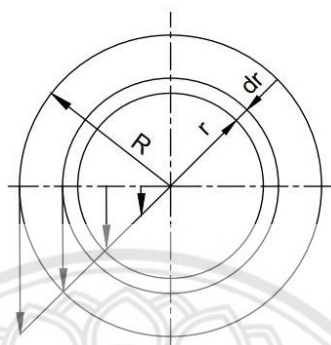
เมื่อ τ' คือ ความเค้นเฉือนที่รัศมี r ใดๆ (N/m^2)

G คือ โมดูลัสของแรงเฉือน (N/m^2)

τ คือ ความเค้นเฉือน (N/m^2)

2.2.3 แรงบิดและโมเมนต์ความเฉื่อย

พิจารณาองค์ประกอบบนภาคตัดเพลา ที่รัศมี r และหนา dr ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ภาคตัดเพลา

ที่มา: ฉัฐพล และ ทศนัย (2553)

ความเค้นเฉือนบนองค์ประกอบนี้คือ τ' และแรงบนองค์ประกอบนี้คือ $dF = \tau' \times 2\pi r dr$ แรงนี้ทำให้เกิดโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางเพลา ซึ่งทำให้เกิดแรงบิด

$dT = dF \times r = (\tau' \times 2\pi r dr) \times r = 2\pi \tau' r^2 dr$ แต่เนื่องจากความเค้นเฉือน มีค่าเปลี่ยนแปลง

ตามรัศมี r ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนรูป τ' ให้อยู่ในรูป r โดยใช้สมการที่ (2.34) $\tau' = \frac{G\theta}{L} r$ ให้ได้สมการ

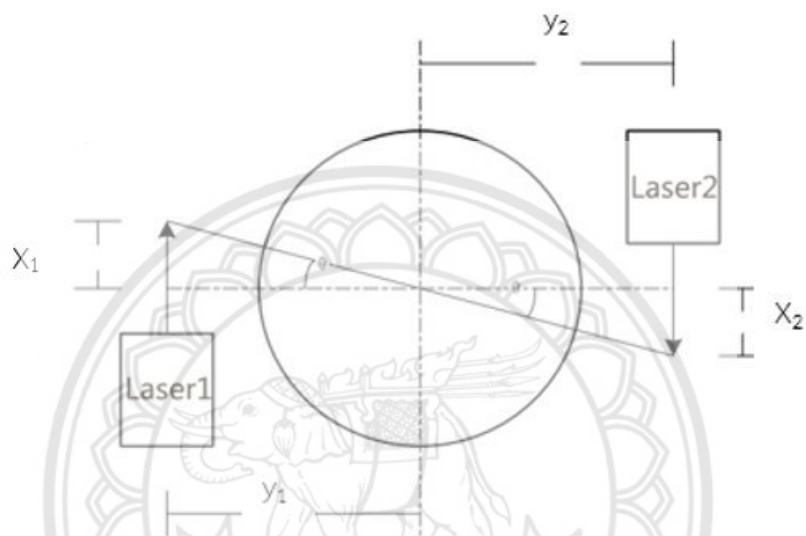
แรงบิด

$$T = \int_0^R 2\pi \frac{G\theta}{L} r^3 dr = \frac{G\theta}{L} \int_0^R 2\pi r^3 dr \quad (2.35)$$

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

2.2.4 การประมวลผลการวัดมุมบิดแบบ 2 แกน

จากสมมติฐานที่กล่าวว่า การทำงานในสภาวะ Pure torque ระยะกระจัด x_1 และ x_2 ต้องมีค่าคงที่เท่ากัน



รูปที่ 2.16 มุมบิดของการวัดแบบ Pure torque

ที่มา: ณัฐพล และ ทศนัย (2553)

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (2.36)$$

ดังนั้น

$$\bar{x} = \frac{x'_1 + x'_2}{2} \quad (2.37)$$

เพราะฉะนั้น

$$x'_1 = \bar{x} \quad (2.38)$$

$$x'_2 = \bar{x} \quad (2.39)$$

เมื่อ x'_1 และ x'_2 คือ ระยะที่ถูกชดเชยความไม่สมบูรณ์ในการให้สัญญาณ และกำหนดให้ค่าชดเชย $\Delta x_1 = \Delta x_2$ เป็น

$$\Delta x_1 = \bar{x} - x_1 \quad (2.40)$$

$$\Delta x_2 = \bar{x} - x_2 \quad (2.41)$$

จากสมการที่ (2.38),(2.39) และ (2.40),(2.41) จะได้สมการ

$$x'_1 = x_1 + \Delta x_1 \quad (2.42)$$

$$x'_2 = x_2 + \Delta x_2 \quad (2.43)$$

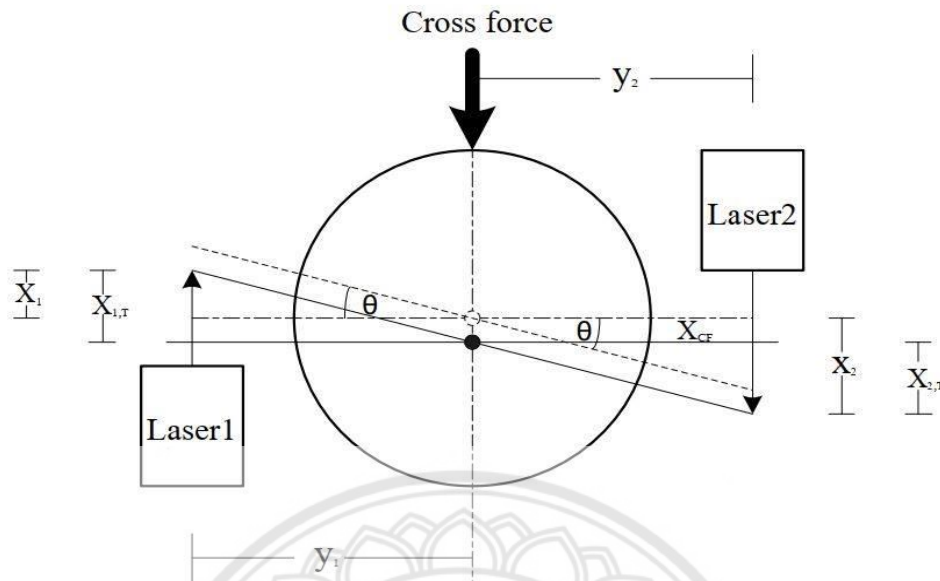
ค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกนเป็น ระยะการกระจัด x_1 และ x_2 ดังรูปที่ 2.16

ส่วน y_1 และ y_2 เป็นระยะที่ถูกกำหนด ดังนั้นสามารถหามุมที่บิดไปของเครื่องมือวัดแรงบิดได้

$$\text{จาก } \tan \theta_i = \frac{x_i}{y_i}$$

$$\theta_i = \arctan \frac{x_i}{y_i} \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2 \quad (2.44)$$

ในกรณีที่เป็น Torque with cross force ระยะการกระจัดที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน จะเป็นดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 มุมบิดของการวัดแบบ Torque with cross force

ที่มา: ธีรพล และ ทศนัย (2553)

จากรูปที่ 2.17 เขียนสมการได้เป็น

$$x_1 = x_{1,T} - \Delta x_{CF} \quad (2.45)$$

$$x_2 = x_{2,T} + \Delta x_{CF} \quad (2.46)$$

เมื่อ x_1 และ x_2 คือระยะกระจัดที่ได้จากอุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกนจากการบิดและมีโมเมนต์ดัดรวมอยู่ $x_{1,T}$ และ $x_{2,T}$ คือระยะกระจัดที่เกิดจากการบิด ส่วน Δx_{CF} คือระยะกระจัดที่เกิดจาก Cross force ให้ $x_{1,T} = x_{2,T} = x_T$ จากนั้นนำสมการที่ (2.46) ลบออกด้วยสมการที่ (2.45) จะได้

$$\Delta x_{CF} = \frac{x_2 - x_1}{2} \quad (2.47)$$

เมื่อนำสมการที่ (2.45) บวกด้วยสมการที่ (2.46) จะได้

$$x_T = \frac{x_2 + x_1}{2} \quad (2.48)$$

เมื่อ $y_1 = y_2 = y$ และจาก $\tan\theta = \frac{x_T}{y}$ ดังนั้น สามารถหามุมที่บิดไปได้ดังสมการ

$$\theta_i = \arctan \frac{x_T}{y} \quad (2.49)$$

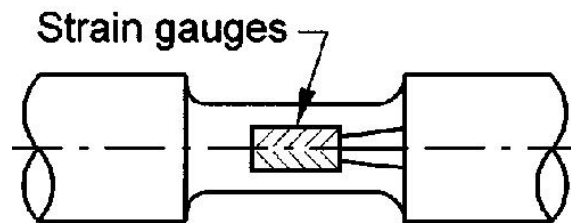
2.2.5 การวัดแรงบิด

แรงบิดเป็นสิ่งจำเป็นที่เราต้องทราบค่า ในการคำนวณค่ากำลังทางกลนั้นจำเป็นต้องทราบค่าแรงบิดจึงจะคำนวณได้ ดังนั้นเซนเซอร์วัดแรงบิดนับได้ว่าเป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่งที่มีบทบาทที่สำคัญมากในงานที่เกี่ยวข้องกับทางกล เช่น การทดสอบวัดแรงบิดจากเครื่องยนต์, การทดสอบวัดแรงบิดจากมอเตอร์ เป็นต้น

ในปัจจุบันได้มีการคิดค้นการวัดแรงบิดหลากหลายวิธี บางวิธีก็เป็นการปรับปรุงมาจากวิธีดั้งเดิม โดยการวัดแรงบิดในปัจจุบันมีดังต่อไปนี้

- 1) Moment Arm
- 2) Strain-gauged Shaft
- 3) Clamp-on Collar
- 4) Optical
- 5) Toothed Wheel
- 6) Magneto strictive
- 7) Laser
- 8) Capacitive

การวัดแรงบิดที่นิยมมากที่สุดและง่ายที่สุดคือแบบ Strain-gauged Shaft การวัดแรงบิดด้วย Strain-gauged Shaft จะวัดแรงบิดโดยการนำเอา Strain Gage ยึดไว้ที่ตรงกลางของ Torsion Bar ซึ่งการบิดตัวของ Torsion Bar จะทำให้ Strain Gage บิดไปด้วย ทำให้ความต้านทานของ Strain Gage มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการบิด Torsion Bar ลักษณะของ Strain-gauged Shaft แสดงดังรูปที่ 2.18 และรูปที่ 2.19 แสดงตัวอย่างของเซนเซอร์วัดแรงบิดแบบ Strain-gauged Shaft



รูปที่ 2.18 เซนเซอร์วัดแรงบิดแบบ Strain-gauged Shaft

ที่มา : ธิติกร (2013)

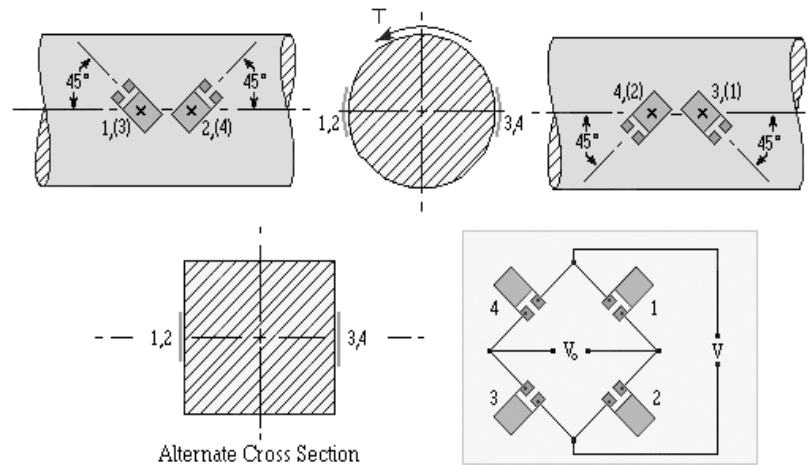


รูปที่ 2.19 ตัวอย่างเซนเซอร์วัดแรงบิดแบบ Stain-gauged Shaft

ที่มา : ธิติกร (2013)

2.2.6 ความต้านทานของ Strain Gauge แบบ Wheatstone Bridge

เนื่องจากความต้านทานของ Strain Gauge ที่ติดตั้งที่ Torsion Bar นั้นมีค่าน้อยมาก ทำให้ตรวจวัดค่าการเปลี่ยนแปลงได้น้อยมากจึงใช้วงจร Wheatstone Bridge มาช่วยแก้ปัญหาทำให้สามารถตรวจวัดค่าได้มากขึ้น การติดตั้ง Strain Gauge ทั้งหมด 4 ตัวในตำแหน่งต่างๆ บน Torsion Bar ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 โครงสร้างและการจัดตำแหน่งการวัดวาง Strain Gauge ทั้ง 4 ตัวที่ต่อกันเป็นวงจร

Wheatstone Bridge บน Torsion Bar

ที่มา : ธิติกร (2013)

การติดตั้ง Strain Gauge ทั้งหมด 2 ด้าน ที่ Torsion Bar ด้านละ 2 ตัว โดย Strain Gauge ตัวที่ 1 และ 3 จะติดตั้งตรงแนวเดียวกัน แต่อยู่คนละด้านของ Torsion Bar และกลับหัวกลับหาง ส่วน Strain Gauge ตัวที่ 2 และ 4 ก็เช่นเดียวกัน และจะต่อวงจรที่เราเรียกว่า Wheatstone Bridge โดย V คือแรงดันแหล่งจ่าย ในขณะที่ V_0 คือแรงดันด้านออกที่แปรผันตามความต้านทานของ Strain Gauge หรือเป็นแรงดันที่แปรผันตามแรงบิด

เนื่องจากการวัดแรงบิดแบบนี้สามารถใช้วัดได้ทั้งแบบ Static (แกนด้านหนึ่งถูกยึด เช่นการวัดแรงบิดของการขันเกลียว) และแบบ Dynamic (แกนหมุนทั้งสองด้าน เช่นการวัดแรงบิดของไดนาโมมิเตอร์ขณะกำลังหมุน) ในกรณีที่เป็นการวัดแบบ Static จะไม่มีปัญหา เพราะมีด้านหนึ่งยึดอยู่กับที่ จึงสามารถต่อวงจรไฟฟ้าเข้าไปที่วงจรบริดจ์นี้ได้ แต่ถ้าจะวัดแรงบิดแบบ Dynamic ที่ Torsion Bar เอง ก็ต้องหมุนไปด้วยทั้งสองด้าน จึงต้องมีการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างส่วนที่อยู่กับที่และส่วนที่หมุนได้

2.2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็นวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาค่าตอบของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า โดยแบ่งโครงสร้างออกเป็นชิ้นส่วนย่อยเรียกว่า เอลิเมนต์ แต่ละชิ้นส่วนย่อยมีจุดต่อเชื่อมกันเรียกว่า Nodes ซึ่งใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเค้นของชิ้นส่วนในการคำนวณหาค่าความเค้น

(stress) ความเครียด (strain) หรือการเสียรูปทรง (deformation) ของชิ้นส่วนนั้นได้ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นที่นิยมในทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์หาความแข็งแรงของชิ้นส่วนเครื่องกล สะพาน อาคารและโครงสร้างอื่นๆ นอกจากนี้ยังใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ เช่น การสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลและโครงสร้างอื่นๆ

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนทั่วไปสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใดๆของชิ้นส่วนโดยการจัดสมการเชิงอนุพันธ์ จะได้ผลลัพธ์ที่เรียกว่า ผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) สำหรับโครงสร้างที่มีความซับซ้อนประกอบด้วยส่วนเว้า ส่วนโค้ง ทำให้มีพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ และมีการเปลี่ยนแปลงโหลดแบบฉับพลัน จึงไม่สามารถใช้สมการเชิงอนุพันธ์หาผลเฉลยแบบแม่นยำตรงได้ ดังนั้นจึงประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์หาผลเฉลยโดยแก้สมการเชิงพีชคณิต ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงใช้แก้ปัญหาทางกลศาสตร์วิศวกรรม

2.2.7.1 หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หลักการทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ แบ่งชิ้นงานออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆให้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม เรียกว่า เอลิเมนต์ โดยแต่ละเอลิเมนต์จะมีจุดต่อเรียกว่า Node แล้วจึงสร้างสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับแต่ละชิ้นส่วนย่อยแล้วนำมารวมเป็นระบบสมการเพื่อแก้หาผลเฉลยโดยประมาณตามจุดต่อต่างๆของชิ้นงาน

2.2.7.2 ขั้นตอนพื้นฐานของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

- 1) สร้างแบบจำลอง (geometric construction)
- 2) แบ่งโครงสร้างออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยที่ต่อกันด้วยโหนด (discretization)
- 3) กำหนดพฤติกรรมทางกายภาพของเอลิเมนต์ แล้วสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์
- 4) กำหนดเงื่อนไขเบื้องต้น สภาวะโหลด ขอบเขตของปัญหา และสมบัติของวัสดุ
- 5) แก้หาคำตอบของสมการ ซึ่งคำตอบคือค่าการกระจัดที่โหนดต่างๆ
- 6) วิเคราะห์ผลลัพธ์ที่แสดงลักษณะชิ้นรูปร่างของความเครียด รูปร่างของความดัน รูปร่างของความเค้น เป็นต้น

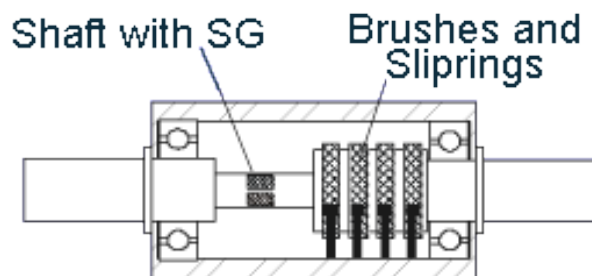
2.2.7.3 ข้อดีของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

- 1) ใช้วิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อน เช่น การสั่นสะเทือน(vibration) การถ่ายเทความร้อน(heat transfer) การโก่งเดาะ(buckling) เป็นต้น
- 2) ทำให้ทราบข้อมูลของผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะการใช้งานจริงโดยไม่ต้องทำการทดสอบ เช่น ความสามารถในการทนต่อแรงที่มากกระทำ การเสียรูปร่างขณะใช้งาน เป็นต้น
- 3) ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ไขและทำการทดสอบจนมั่นใจว่าชิ้นส่วนคุณสมบัติตามต้องการก่อนนำไปผลิตจริง ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและปริมาณของเสียที่อาจจะเกิดขึ้นได้
- 4) ใช้วิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนที่มีความแข็งแรงต่ำและคุณภาพแตกต่างกันไปตามแกนสามเหลี่ยมตั้งฉาก(orthotropic) ได้
- 5) สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาที่วัสดุมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิได้ เช่น สภาพพลาสติก (plasticity) ความคืบ (Creep) การบวมตัว (swelling)

2.3 แหวนลื่น (Slip ring)

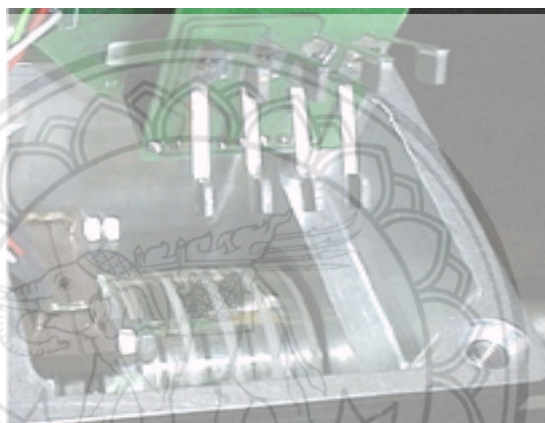
2.3.1 หลักการของแหวนลื่น (Slip ring)

Slip Ring หรือแหวนลื่นนี้เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดที่จะจ่ายแรงดันเข้าและอ่านค่าสัญญาณแรงบิดจากวงจร Wheatstone Bridge โครงสร้างของ Slip Ring จะเหมือนกับ Slip Ring ของมอเตอร์ไฟตรงแบบมีแปรงถ่านนั่นเอง โดยจุดทั้ง 4 ของวงจร Wheatstone Bridge จะต่อกับวงจรรายนอกผ่าน Slip Ring ทั้ง 4 ตัว ดังรูปที่ 2.21 แสดงโครงสร้างของ Slip Ring ที่ใช้ในเซนเซอร์วัดแรงบิด และรูปที่ 2.22 แสดงตัวอย่างของ Slip Ring ที่ใช้ในเซนเซอร์วัดแรงบิดแบบ Strain-gauge Shaft



รูปที่ 2.21 โครงสร้างของ Slip Ring

ที่มา : ธิติกร (2013)

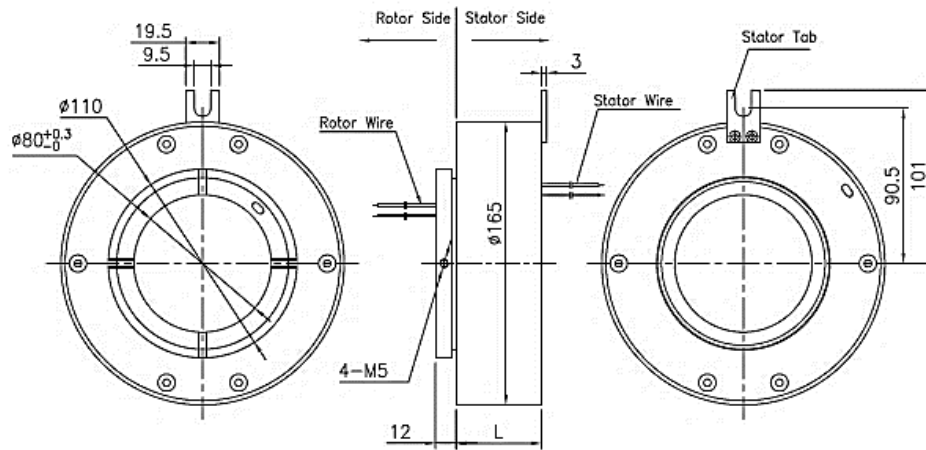


รูปที่ 2.22 แสดงตัวอย่างของ Slip Ring ที่ใช้ในเซนเซอร์วัดการบิดแบบ Strain-gauge Shaft

ที่มา : ธิติกร (2013)

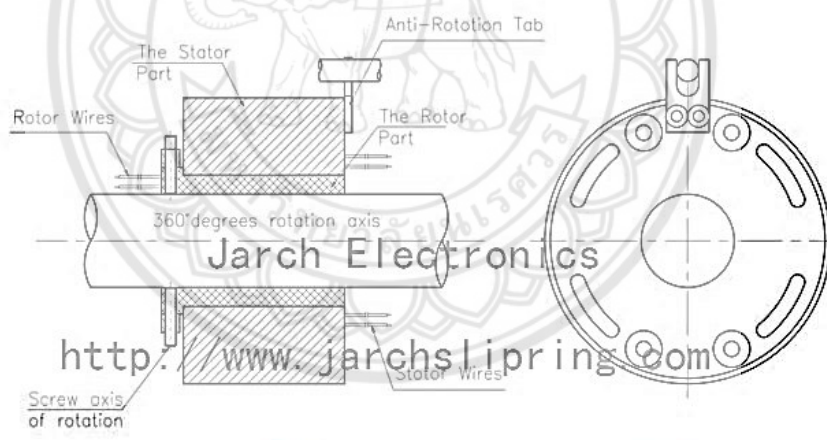
2.3.2 รูปแบบแหวนลื่น (Slip ring)

แหวนลื่นสามารถนำมาใช้ในระบบไฟฟ้าและระบบเครื่องกล ที่ระบบมีการหมุนอย่าง ไม่ต่อเนื่องและการหมุนต่อเนื่อง โดยการถ่ายโอนพลังงานหรือข้อมูลจากแกนที่หยุดนิ่ง ไปยังโครงสร้างที่ หมุนได้ สามารถเพิ่มความสามารถในการใช้ระบบไฟฟ้าและความสามารถทางเครื่องกล ลดการ ออกแบบระบบที่ยุ่งยาก ลดความเสียหายที่เกิดขึ้นขณะเกิดการหมุน และช่วยไม่ให้เกิดการพันของ สายไฟที่เกิดจากการหมุน



รูปที่ 2.23 ลักษณะของแหวนลื่น (Slip ring)

ที่มา : บริษัท เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด



รูปที่ 2.24 การติดตั้งด้วยการสวมแหวนลื่น (Slip ring) เข้ากับเพลา (Shaft)

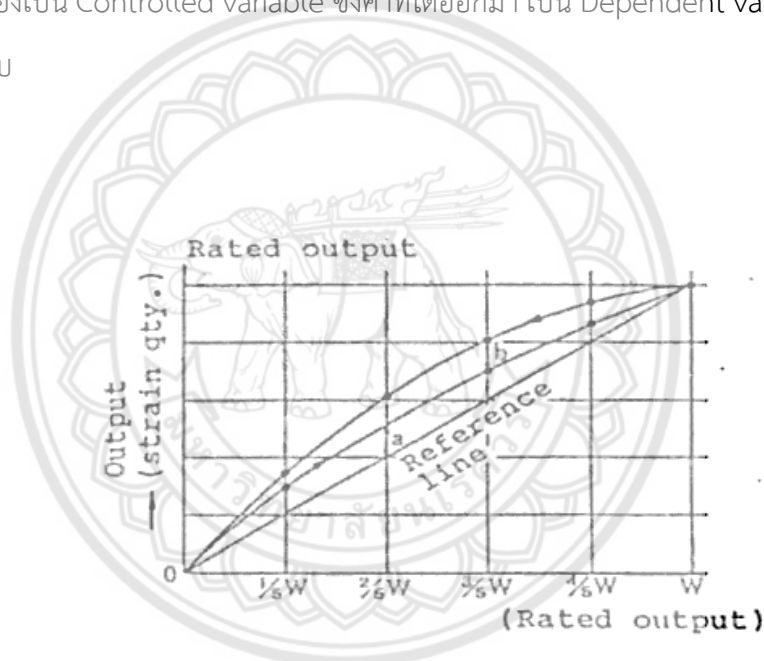
ที่มา : บริษัท เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด

2.4 การสอบเทียบ

2.4.1 ความหมายการสอบเทียบ

การสอบเทียบ คือ การหาความสัมพันธ์ของค่าที่ป้อนเข้าไปกับค่าที่ได้ออกมา ที่ได้จากระบบการวัด การปรับเทียบทำได้โดยการให้ค่าที่ป้อนเข้าที่ทราบค่าแน่นอนหรือเป็นค่ามาตรฐาน แล้วทำการวัดค่าที่ได้ออกมาที่ได้จากระบบการวัดนั้น ๆ

Calibration curve คือ กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างค่าที่ป้อนเข้าไปกับค่าที่ได้ ออกมา ที่ได้จากการปรับเทียบ โดยให้ค่าป้อนเข้าเป็นแกนนอน และค่าที่ได้ออกมาเป็นแกนตั้ง ค่าป้อนเข้าต้องเป็น Controlled variable ซึ่งค่าที่ได้ออกมา เป็น Dependent variable ที่ได้จากการปรับเทียบ



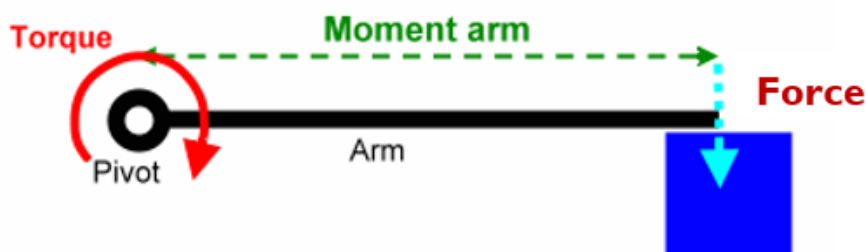
รูปที่ 2.25 Calibration curve

ที่มา : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2.4.2 หลักการสอบเทียบภาระบิด

การสอบเทียบภาระบิดมีวิธีการสอบเทียบโดยใช้หลักการแขนโยกแล้วถ่วงน้ำหนักที่ปลายคาน ซึ่งน้ำหนักที่นำมาทดสอบต้องผ่านการสอบเทียบมาก่อน การถ่วงน้ำหนักเพื่อให้เกิดโมเมนต์บิดที่

เพลา แล้วนำไปเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักที่ใส่ไปกับค่าที่อ่านได้ จากนั้นสร้างสมการความสัมพันธ์ออกมา

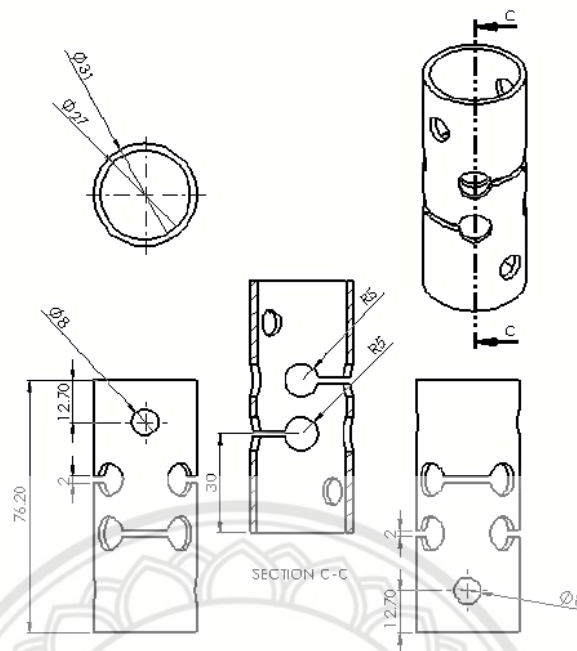


รูปที่ 2.26 การใส่แรงเพื่อให้เกิดโมเมนต์บิด

ที่มา : Dave (2014)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

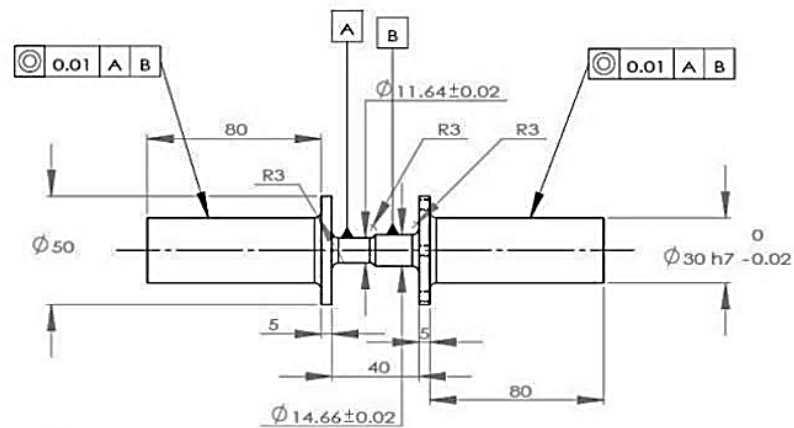
รัตนา และ เกติษฐ์ (2556) ได้ออกแบบ สร้างและทดสอบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและ
 ภาระบิดซึ่งวัดแรงในแนวแกนได้สูงสุด 500 นิวตัน และวัดภาระบิดได้สูงสุด 500 นิวตัน-เมตร ใช้สแตน
 เลส 304 โดยทำชิ้นงานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 31 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
 ภายใน 27 มิลลิเมตร สูง 76.2 มิลลิเมตร เจาะรูกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จำนวน 4
 รู ทำการเจาะร่องขนาดกว้าง 2 มิลลิเมตรในแนวระดับทะลุถึงกันระหว่างสองรู เจาะรูขนาดเส้นผ่าน
 ศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตรทะลุทั้งสองด้านสำหรับร้อยสลัก ติดตั้งสเตรนเกจขนาด 350 โอห์ม ชนิด FG-5-
 350-C1-16L30C2R ยี่ห้อ KYOWA ที่มีระยะ gage length 5 mm. จากผลการทดสอบกรณีโหลด
 เซลล์รับแรงในแนวแกน มีค่า rate of sensitivity 0.3520 μN , Repeatability error สูงสุด 0.768
 %FSO, Hysteresis error สูงสุด 1.761 %FSO, Regression error สูงสุด 1.126 %FSO และส่วน
 เบี่ยงเบนมาตรฐาน(S) = 10.8532 N สำหรับกรณีที่โหลดเซลล์รับภาระบิดเพียงอย่างเดียวมีค่าเท่ากับ
 28.5573 $\mu\text{N.m}$, 1.187 %FSO, 2.219 %FSO, 0.991%FSO, และ S=0.4746 N.m ตามลำดับ



รูปที่ 2.27 ลักษณะของชิ้นงาน

ที่มา : รัตนา และ เกดิษฐ์ (2556)

โชคชัย และ ทศนัย (2558) ได้ทำการออกแบบและสร้าง Torque transducer ที่ส่วนรับปริมาณภาระบิดมีรูปทรงเพลาตัน ใช้วัสดุเป็นเหล็ก Tool steel เกรด DC 53 แกนวัดภาระบิดประกอบด้วย ส่วนรับปริมาณภาระบิดที่ความจุ 50 N.m ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.64 mm และส่วนที่สองทำหน้าที่เป็นมาตรฐานตรวจสอบที่ความจุ 100 N.m ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14.66 mm และแกนวัดภาระบิดมีขนาด 30 mm โดยใช้วงจร Strain gauge แบบ Biaxial รุ่น FCT-2-350-C2-11 ยี่ห้อ TML ที่มีระยะ gage length 2 mm การออกแบบถูกยืนยันด้วยการวิเคราะห์ตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่ามีความถูกต้องอยู่ในระดับ class 0.2 ตามมาตรฐาน DIN 51309 ทั้งสองช่องสัญญาณมีความเสถียรอยู่ที่ $\pm 0.032\%$ และ $\pm 0.072\%$ ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบจ่ายภาระเกินพิกัดที่ 130% 150% 200% และ 300% พบว่าเครื่องมือวัดภาระบิดทั้งสองช่องสัญญาณยังคงมีความเสถียร เมื่อทำการจ่ายภาระพิกัดเกิน 600% พบว่าสัญญาณวัดปริมาณภาระบิดให้ค่าเปลี่ยนไป -50% นอกจากนั้นค่าอัตราส่วนของสัญญาณวัดภาระบิดกับสัญญาณตรวจสอบเปลี่ยนไป 50%



รูปที่ 2.28 แสดงแบบเครื่องมือวัดพร้อมสัญญาณตรวจสอบร่วม

ที่มา : โชคชัย และ ทศนัย (2558)

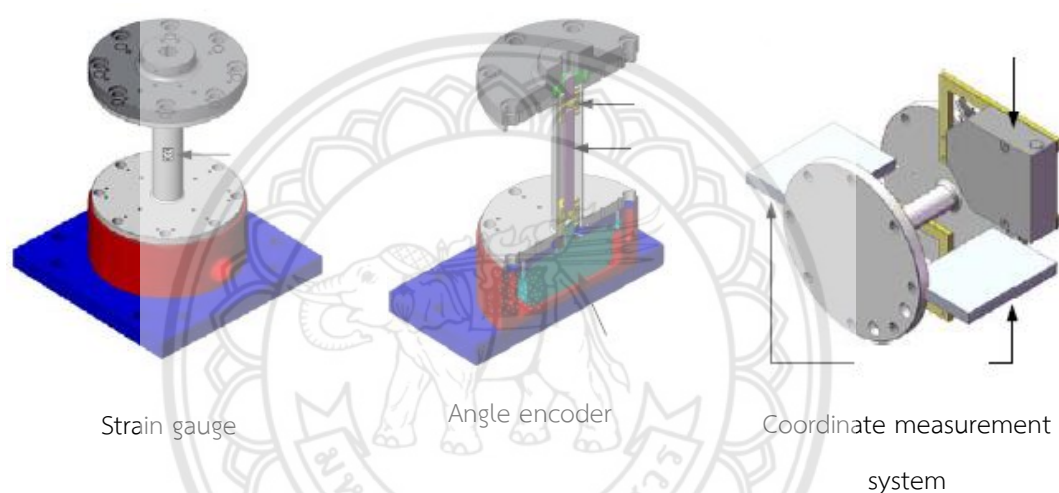


รูปที่ 2.29 เครื่องวัดการบิดขนาด 50 N.m ที่จัดทำตามรูปแบบ

ที่มา : โชคชัย และ ทศนัย (2558)

ณัฐพล และ ทศนัย (2553) ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดแรงบิดต้นแบบ โดยใช้การวัดมุมของการเปลี่ยนรูปร่างวัสดุ ใช้ตัวแกนวัดแรงบิดให้รับแรงบิดสูงสุด 200 N.m ที่ Sensitivity 1000 $\mu\text{Strain}(2\text{mV/V})$ และมุมบิด 1 องศา และติดตั้งอุปกรณ์วัดสัญญาณแรงบิด 3 แบบ คือ Strain gauge, อุปกรณ์วัดมุม Angle encoder และอุปกรณ์วัดมุมแบบ 2 แกน (Coordinate measurement system) ลักษณะเป็นเพลากลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 27.69 mm เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25.00 mm และมีความยาว 125 mm เลือกเหล็ก DC53 เป็นวัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือ

วัด ชุบแข็งที่ 50 ± 2 HRC ผลการทดลองพบว่าสัญญาณจาก Strain gauge มีความเที่ยงเบนตามปริมาณแรงและตำแหน่งมุมที่แรงกระทำบนแกนรับแรงบิด $\pm 0.15\%$ ในขณะที่สัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุมแบบ Angle encoder มีความเที่ยงเบนตามปริมาณแรงและตำแหน่งมุมที่แรงกระทำบนแกนรับแรงบิด $\pm 0.30\%$ ส่วนสัญญาณจากระบบวัด 2 แกน มีความเที่ยงเบนตามปริมาณแรง $\pm 0.15\%$ แต่ไม่มีผลต่อ ตำแหน่งมุมที่แรงกระทำบนแกนรับแรงบิด ความถูกต้องของเครื่องมือวัดต้นแบบถูกประเมินทางมาตรวิทยา โดยใช้การสอบเทียบตามมาตรฐาน DKD-R: 2300 โดยใช้ Torque transfer wrench ที่มีความถูกต้อง $\pm 10\%$ เป็นมาตรฐานอ้างอิง

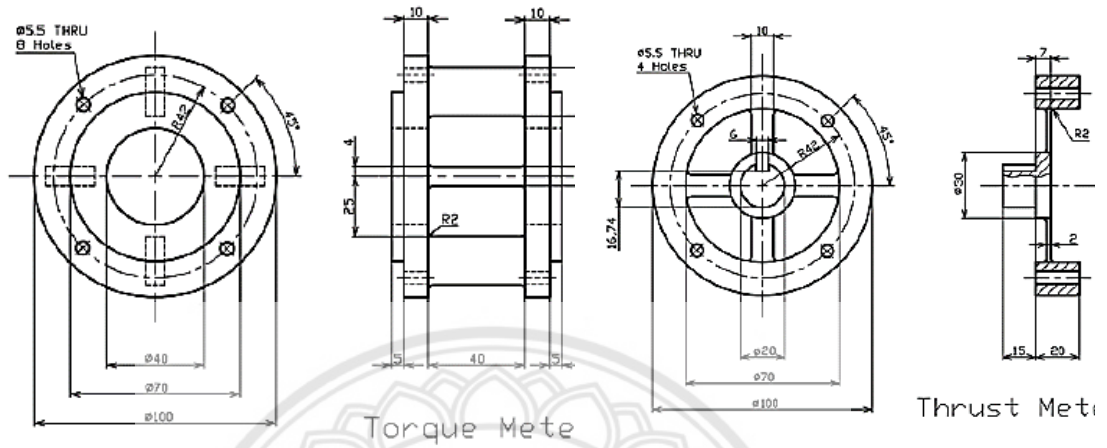


รูปที่ 2.30 การติดตั้งตัวรับสัญญาณชนิดต่างๆ

ที่มา : ญัฐพล และ ทศนัย (2553)

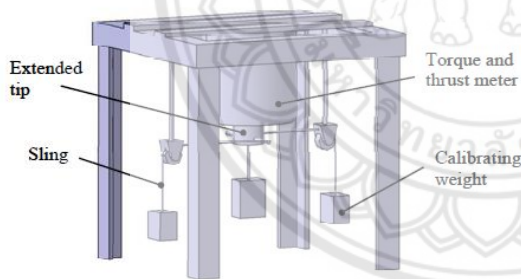
ชนัดต์ และ ปรีย (2550) ได้มีการพัฒนาอุปกรณ์วัดภาระบิดและแรงในแนวแกน เพื่อจะนำไปศึกษากำลังของเครื่องยนต์และมีความจำเป็นต้องทราบค่าแรงบิดเพื่อนำไปคำนวณหาค่าต่างๆ โดยได้เลือกใช้วัสดุทำชิ้นงานเป็น Stainless Steel 304 ออกแบบให้สามารถวัดแรงบิดได้ในช่วง 0 - 75 N.m และวัดแรงในแนวแกนได้ในช่วงไม่เกิน 100 N ติดสเตรนเกจบนอุปกรณ์วัดภาระบิดโดยการต่อสเตรนเกจเป็นแบบวงจรวีทสโตนบริดจ์ ในการออกแบบอุปกรณ์วัดภาระบิดสามารถวัดแรงในแนวแกนไปได้พร้อมๆกัน เมื่อเกิดแรงใน 2 แนวแรงพร้อมกัน โดยแรงหนึ่งจะไม่ส่งผลให้การวัดแรงอีกแรงหนึ่งคลาดเคลื่อนไป แรงในแนวแกนส่งผลให้การวัดแรงบิดคลาดเคลื่อนไปเพียงเล็กน้อย จากผล

การสอบเทียบทั้ง 2 กรณีมีความเป็นเชิงเส้นสูง โดยมีค่าสหสัมพันธ์ประมาณ 0.98 – 0.99 พบว่าเครื่องมือมีความแม่นยำสามารถนำไปใช้งานได้จริง

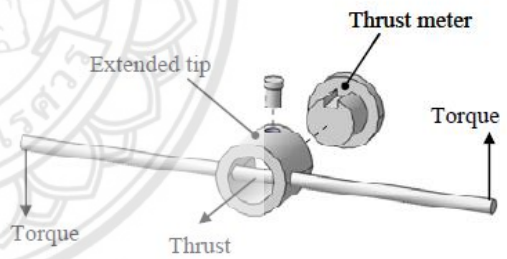


รูปที่ 2.31 แบบอุปกรณ์วัดแรงบิด

รูปที่ 2.32 แบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน



รูปที่ 2.33 ชุดสอบเทียบ



รูปที่ 2.34 การประกอบปลายเสริม กับ
อุปกรณ์วัดแรงในแนวแกน

ที่มา : ชนัตต์ และ ปรีย (2550)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

โครงการพัฒนาอุปกรณ์วัดภาระบิดมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ออกแบบและทดสอบด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สร้างอุปกรณ์วัดภาระบิด สอบเทียบเครื่องมือวัด วิเคราะห์และสรุปผลการทดสอบ

3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาข้อมูลที่บ่งบอกถึงรายละเอียดต่างๆ ของการออกแบบเครื่องมือวัดภาระบิด รวมถึงเอกสาร การวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยได้ทำการศึกษา ดังนี้

- 1) สเตรนเกจ
- 2) การออกแบบอุปกรณ์วัดภาระบิด
- 3) แหวนลื่น
- 4) การสอบเทียบ
- 5) งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดผลการศึกษาแสดงในบทที่ 2

3.2 การออกแบบอุปกรณ์วัดภาระบิด

3.2.1 การหาขนาดอุปกรณ์วัดภาระบิด

มีข้อกำหนดในการหาขนาดของอุปกรณ์วัดภาระบิดดังนี้

- 1) รับภาระบิดได้ 150 N.m
- 2) เล็กสแตนเลส 304 ที่มีค่า Yield Strength = 206 MPa, Elastic Modulus = 190 GPa, Shear Modulus = 75 GPa
- 3) กำหนดการเสียรูป 1000 μ rad

คำนวณหาขนาดเพลลาได้จากสมการ 3.1

$$T = \gamma \cdot G \cdot \left(\frac{\pi D^3}{16} \right) \quad (3.1)$$

โดยที่ T คือ ขนาดแรงบิด (N.m)

γ คือ ความเครียดแรงเฉือน (μrad)

G คือ โมดูลัสของแรงเฉือน (GPa)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)

ขั้นตอนการออกแบบอุปกรณ์วัดภาระบิด มีดังต่อไปนี้

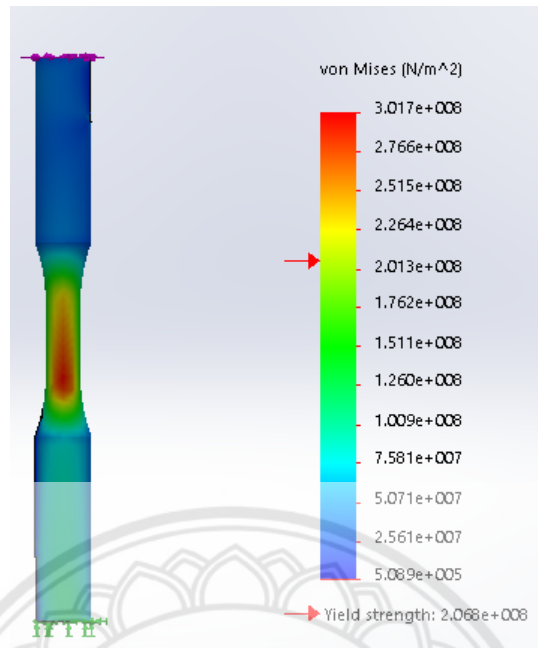
1. คำนวณหาขนาดของอุปกรณ์วัดภาระบิด

จากสมการ ที่ 3.1 $T = \gamma \times G \times \left(\frac{\pi D^3}{16} \right)$

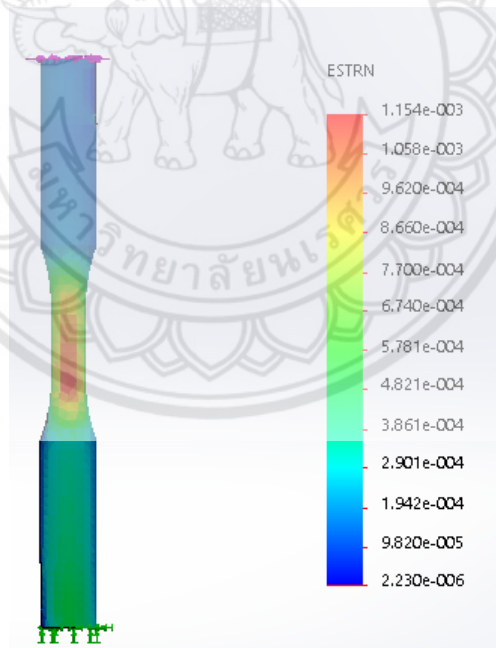
$$150 = 1000 \times 10^{-6} \times 75 \times 10^9 \times \left(\frac{\pi \times D^3}{16} \right)$$

$$D = 21.67 \text{ mm.}$$

เนื่องจากใช้โปรแกรม Solid work ในการวิเคราะห์การเสียรูปชิ้นงานที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.67 mm ซึ่งค่าที่ได้จากการใช้โปรแกรมคำนวณ มีค่าความเครียดและความเค้นสูงกว่าค่า Yield Strength ของวัสดุ ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2 จึงเพิ่มขนาดเพลลาให้มีขนาด 25 mm เมื่อนำไปวิเคราะห์การเสียรูปอีกครั้ง ได้ค่าความเค้น 195.8 MPa ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งมีค่าความเค้นต่ำกว่าค่า Yield Strength ดังนั้นจึงเลือกเพลลาขนาดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm



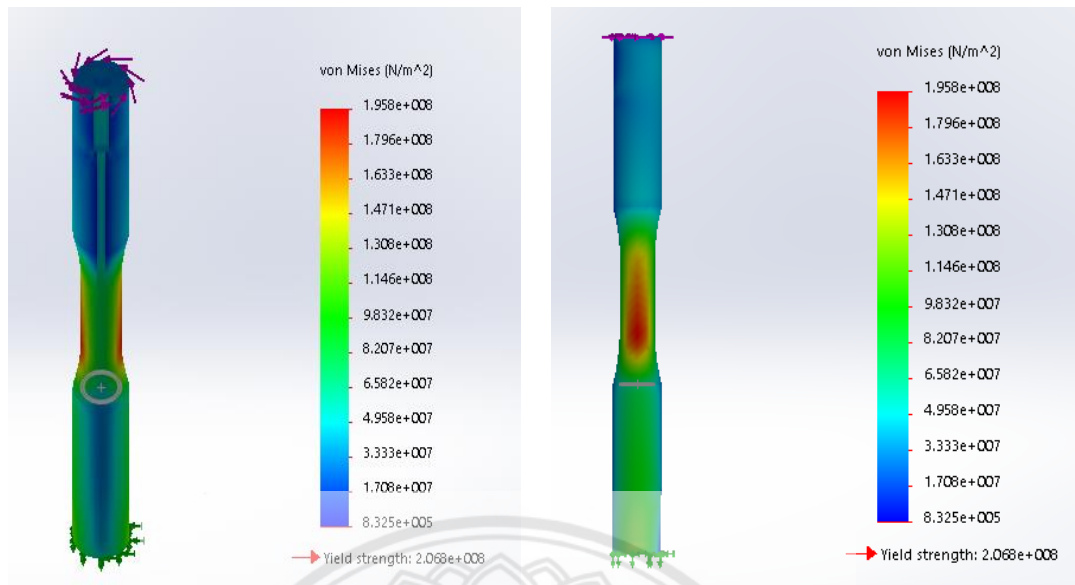
รูปที่ 3.1 ค่าความเค้นเพลานาตเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.67 mm



รูปที่ 3.2 ค่าความเครียดเพลานาตเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.67 mm

2. ทำการวิเคราะห์การเสียรูปของเพล

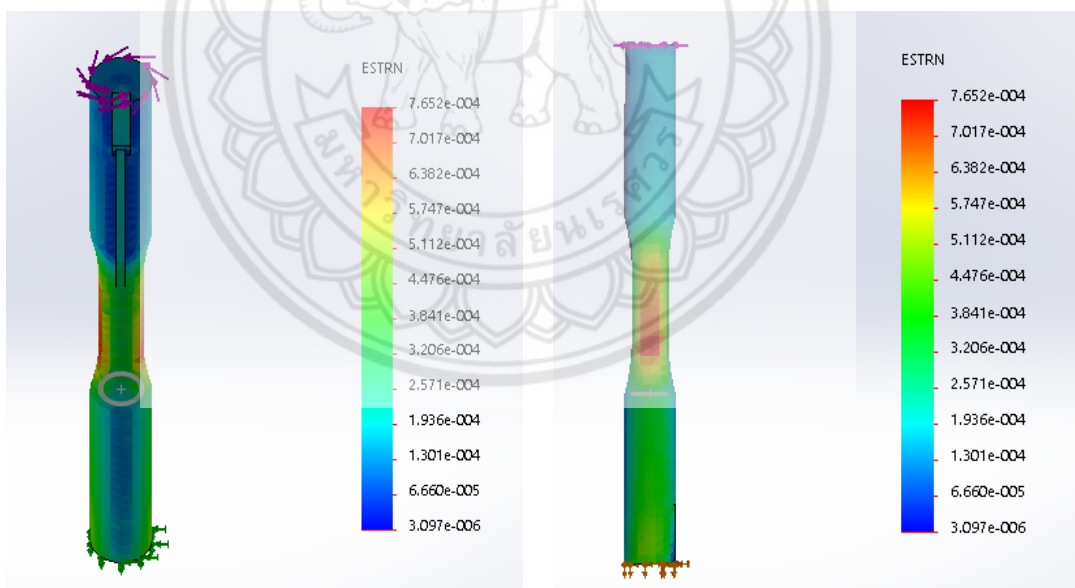
ใช้โปรแกรม Solid work วิเคราะห์การเสียรูปของเพล เพื่อหาตำแหน่งการติดสเตรนเกจ



ก) ด้านหน้า

ข) ด้านข้าง

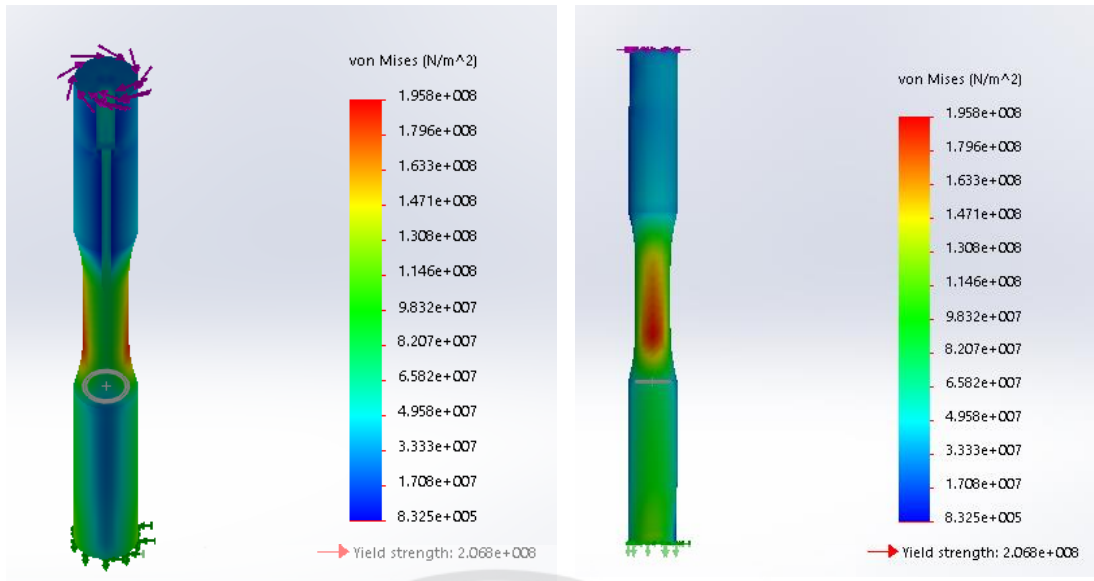
รูปที่ 3.3 ค่าความเค้น กรณียึดด้านล่างและภาระบิดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



ก) ด้านหน้า

ข) ด้านข้าง

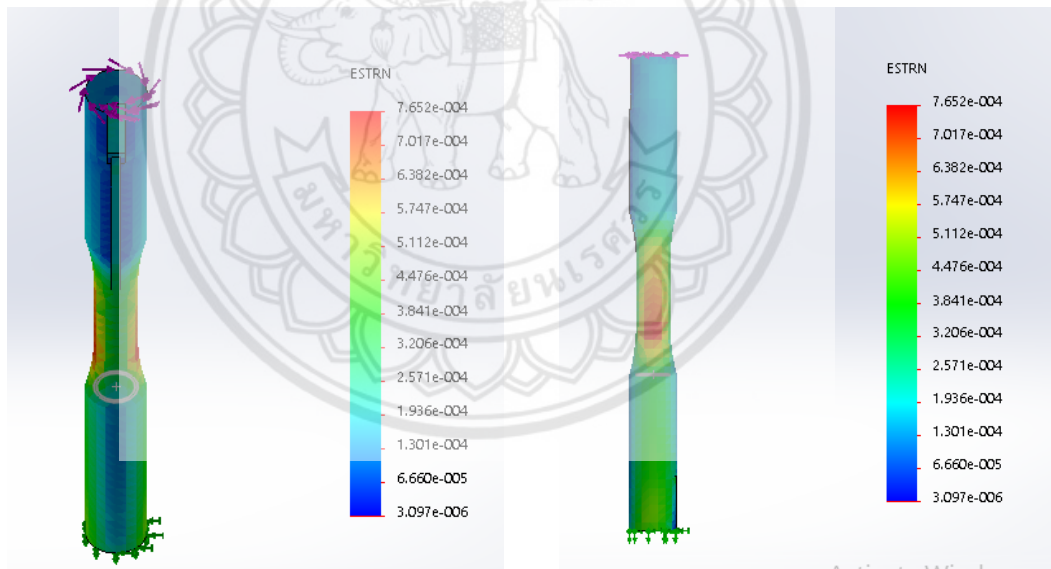
รูปที่ 3.4 ค่าความเครียด กรณียึดด้านล่างและภาระบิดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



ก) ด้านหน้า

ข) ด้านข้าง

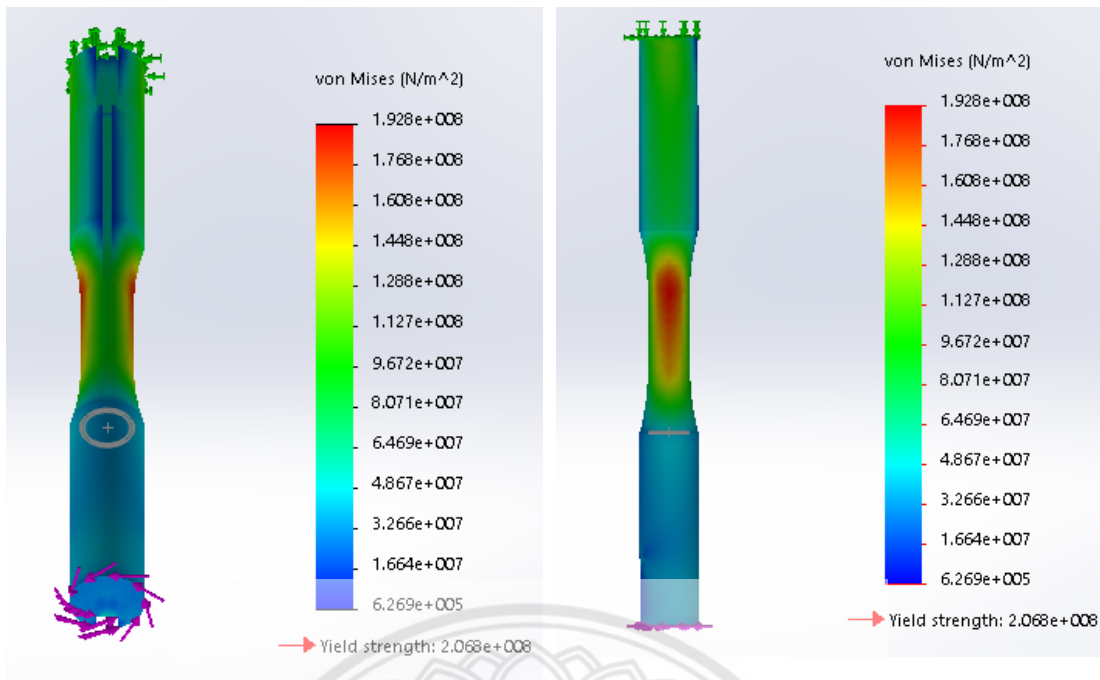
รูปที่ 3.5 ค่าความเค้น กรณียึดด้านล่างและภาระบิดทิศทางตามเข็มนาฬิกา



ก) ด้านหน้า

ข) ด้านข้าง

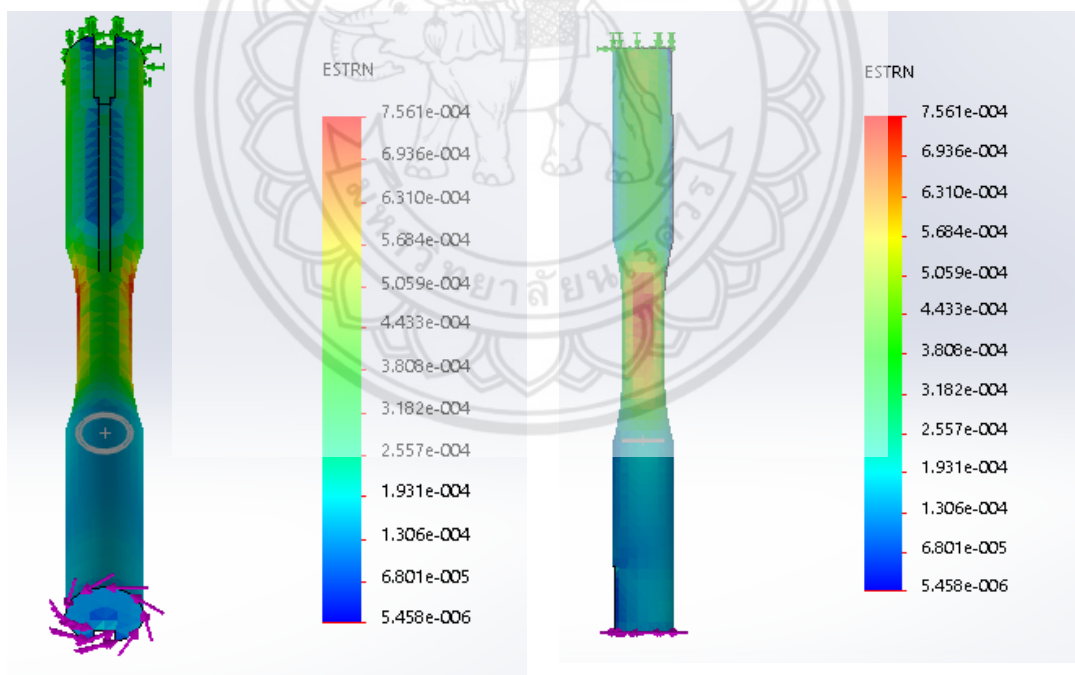
รูปที่ 3.6 ค่าความเครียด กรณียึดด้านล่างและภาระบิดทิศทางตามเข็มนาฬิกา



ก) ด้านหน้า

ข) ด้านข้าง

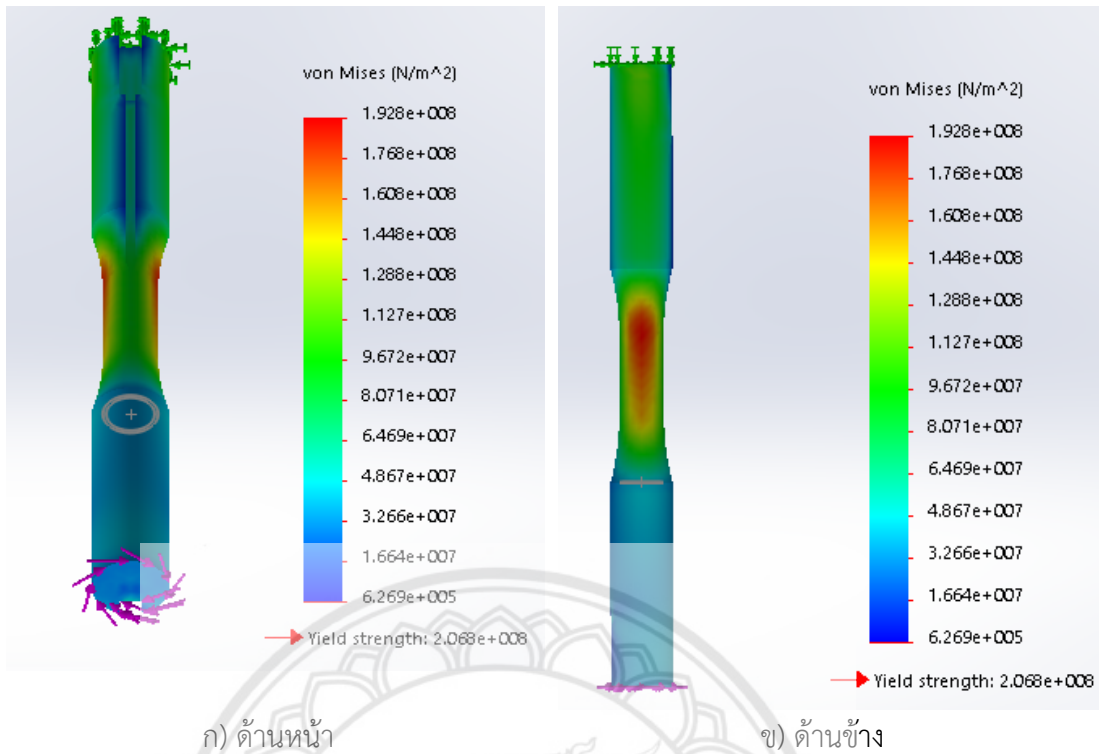
รูปที่ 3.7 ค่าความเค้น กรณียึดด้านบนและภาระบิดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



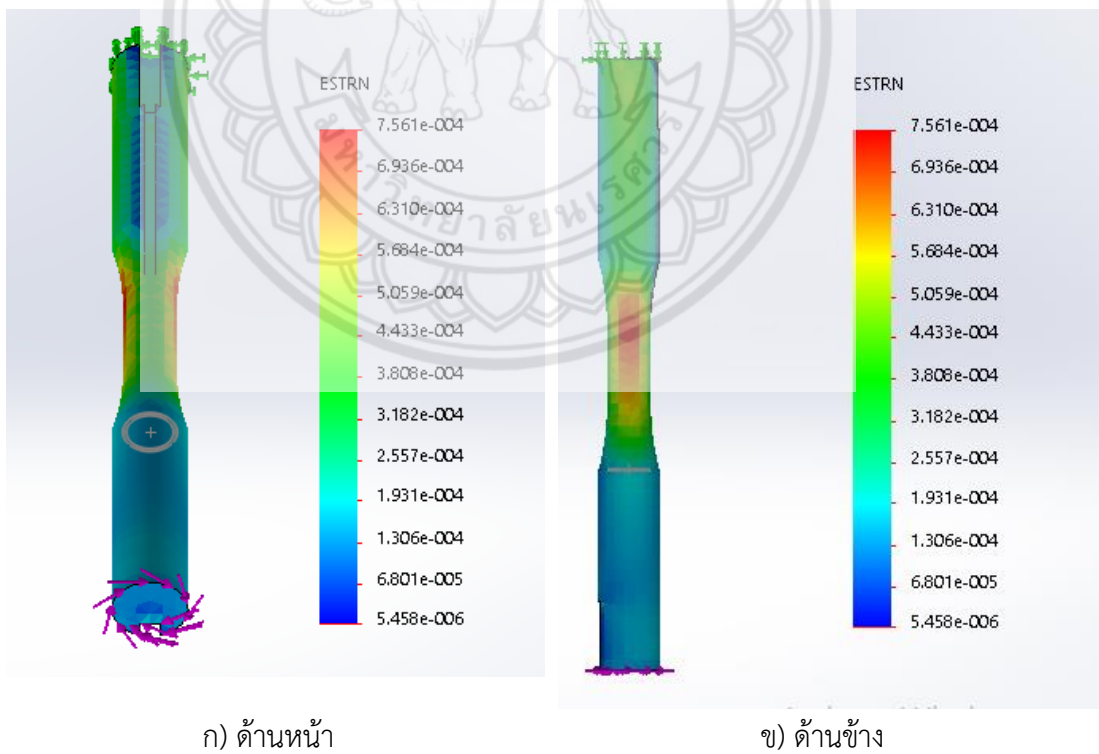
ก) ด้านหน้า

ข) ด้านข้าง

รูปที่ 3.8 ค่าความเครียด กรณียึดด้านบนและภาระบิดทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.9 ค่าความเค้น กรณียึดด้านบนและภาระบิดทิศทางตามเข็มนาฬิกา

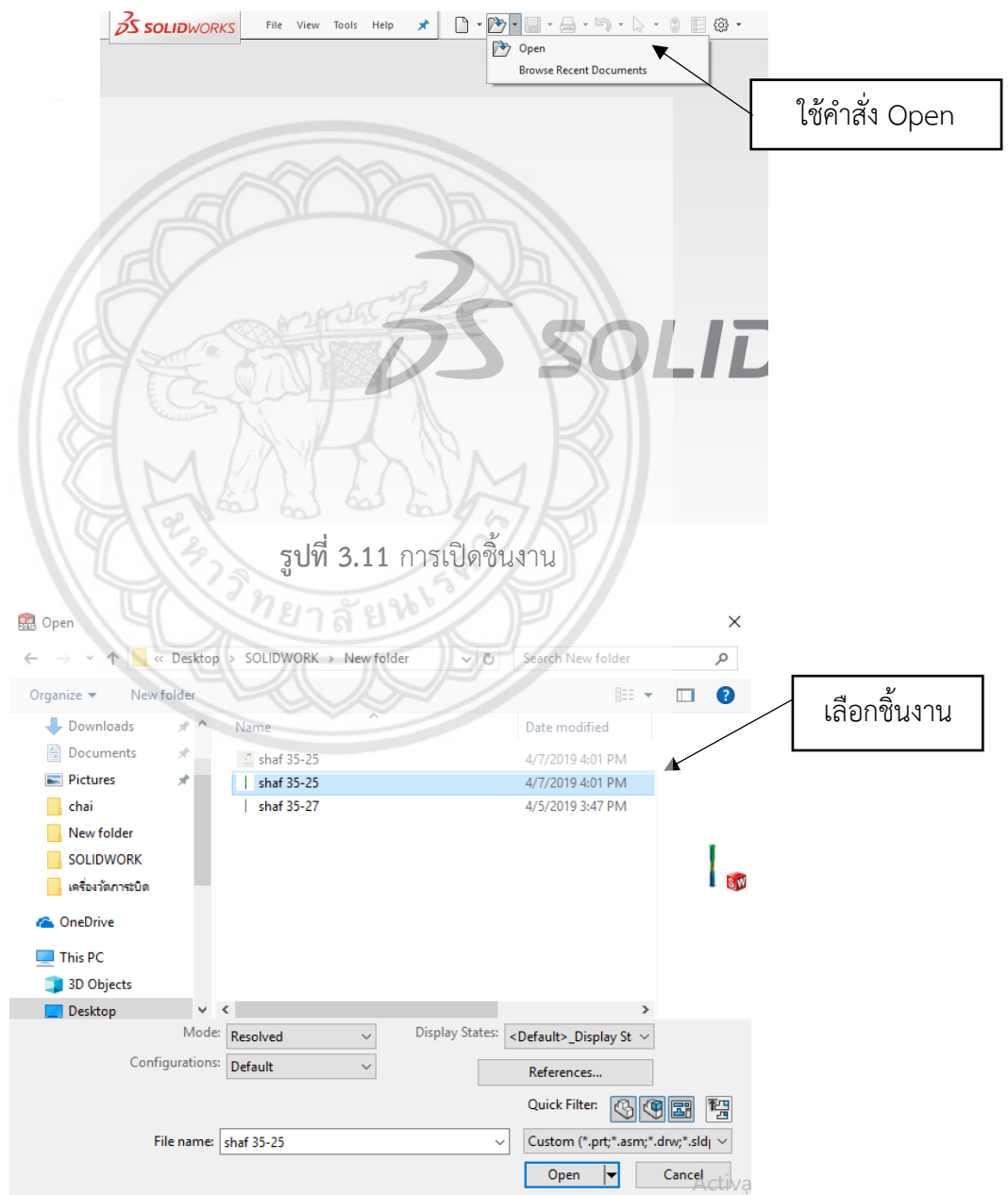


รูปที่ 3.10 ค่าความเครียด กรณียึดด้านบนและภาระบิดทิศทางตามเข็มนาฬิกา

3.2.2 การวิเคราะห์การเสีรูปของชิ้นงาน

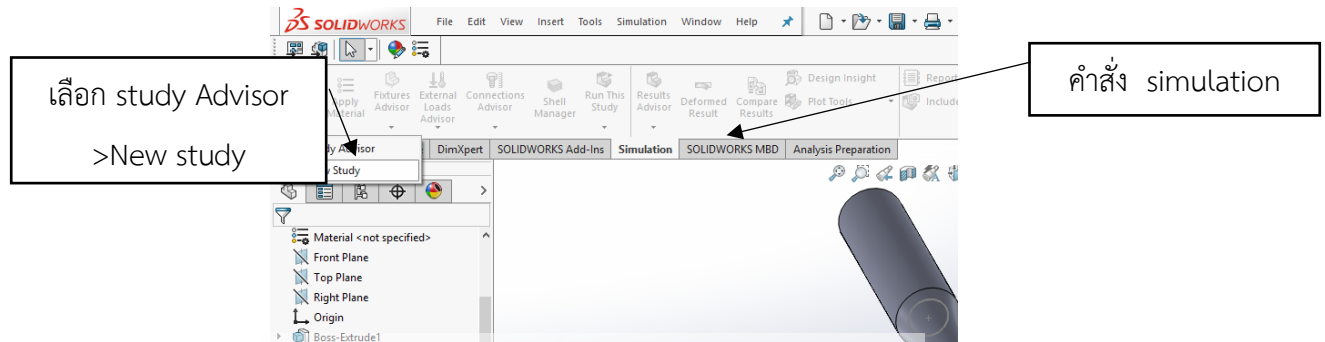
ขั้นตอนการวิเคราะห์การเสีรูปของชิ้นงาน ด้วยโปรแกรม solidworks simulation มีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

3.2.2.1 เปิดไฟล์ชิ้นงานที่จะทำการ simulation โดยใช้คำสั่ง Open ดังรูปที่ 3.11 แล้วเลือกชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เลือกชิ้นงานทำ simulation

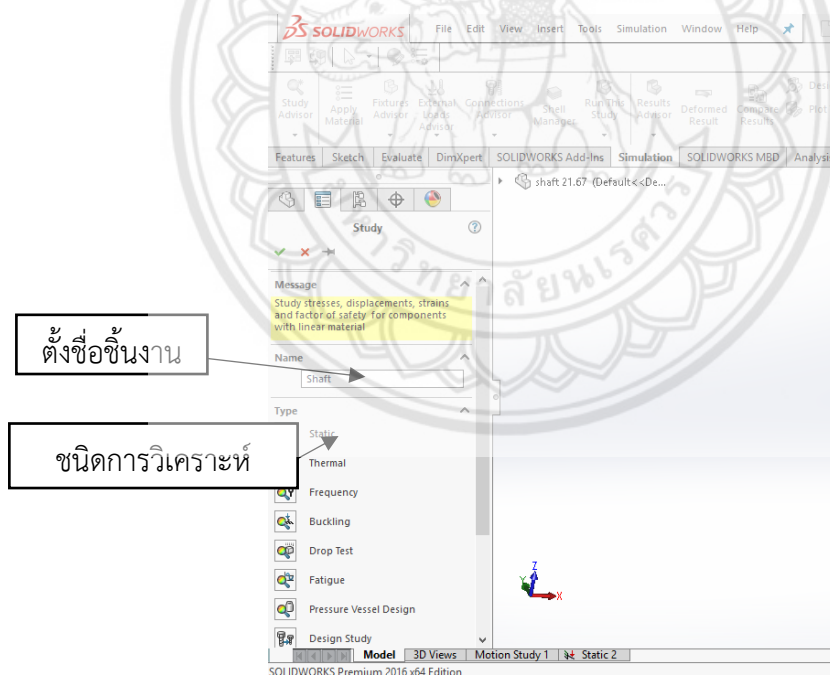
3.2.2.2 เลือกใช้คำสั่ง simulation โดยคลิกตรงแถบเมนู แล้วคลิก study Advisor จากนั้นเลือก New study เพื่อสร้าง simulation ชิ้นงานใหม่



รูปที่ 3.13 คำสั่ง simulation

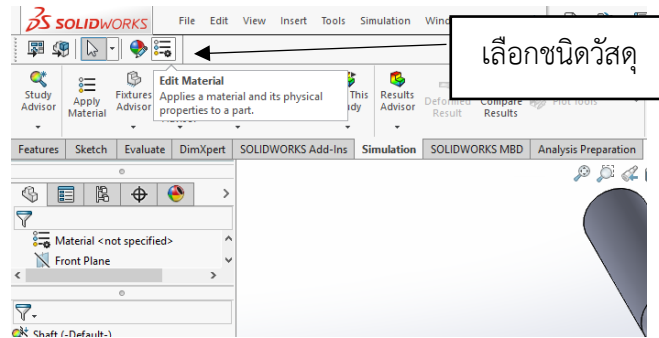
จากนั้นตั้งชื่อชิ้นงาน แล้วเลือกการวิเคราะห์แรงภายใต้แรงสถิต (static) ดังรูป

3.14



รูปที่ 3.14 ตั้งชื่อชิ้นงาน

กำหนดวัสดุของชิ้นงานโดยคลิก Edit Material ดังรูป แล้วเลือก AISI 304 (สแตนเลส 304) ดังรูป 3.15

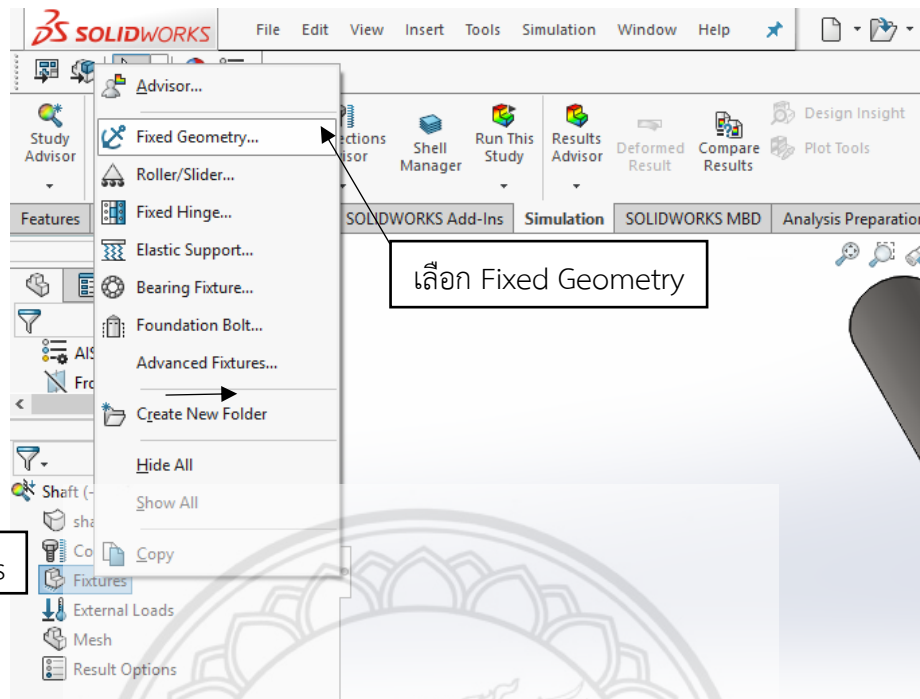


รูปที่ 3.15 กำหนดวัสดุ

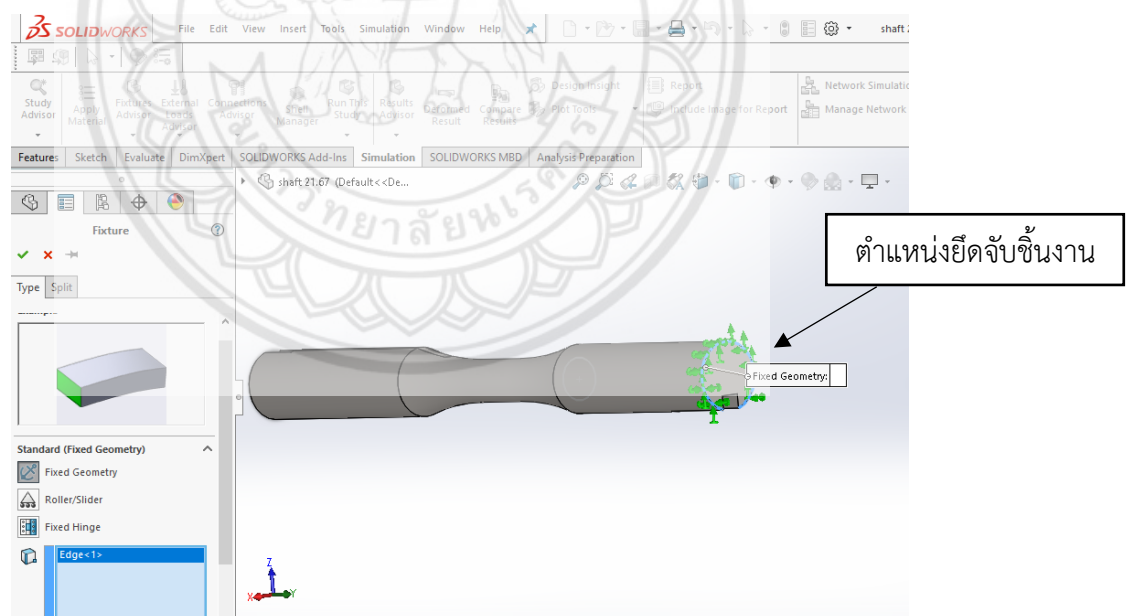
Property	Value	Units
Elastic Modulus	1.9e+011	N/m ²
Poisson's Ratio	0.29	N/A
Shear Modulus	7.5e+010	N/m ²
Mass Density	8000	kg/m ³
Tensile Strength	517017000	N/m ²
Compressive Strength		N/m ²
Yield Strength	206807000	N/m ²
Thermal Expansion Coefficient	1.8e-005	/K
Thermal Conductivity	16	W/(m·K)

รูปที่ 3.16 เลือกวัสดุ AISI 304

3.2.2.3 ทำการยึดชิ้นงานด้านหนึ่งไว้ โดยคลิกขวา Fixtures จากนั้นเลือก Fixed Geometry แล้วเลือกตำแหน่งที่ต้องการยึดจับชิ้นงาน

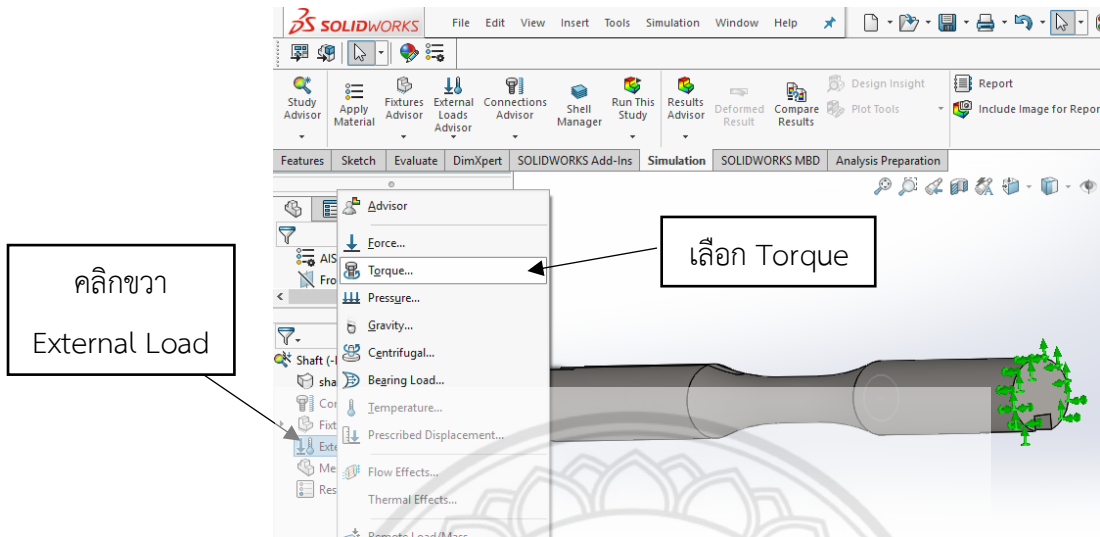


รูปที่ 3.17 ชนิดจับยึดชิ้นงาน



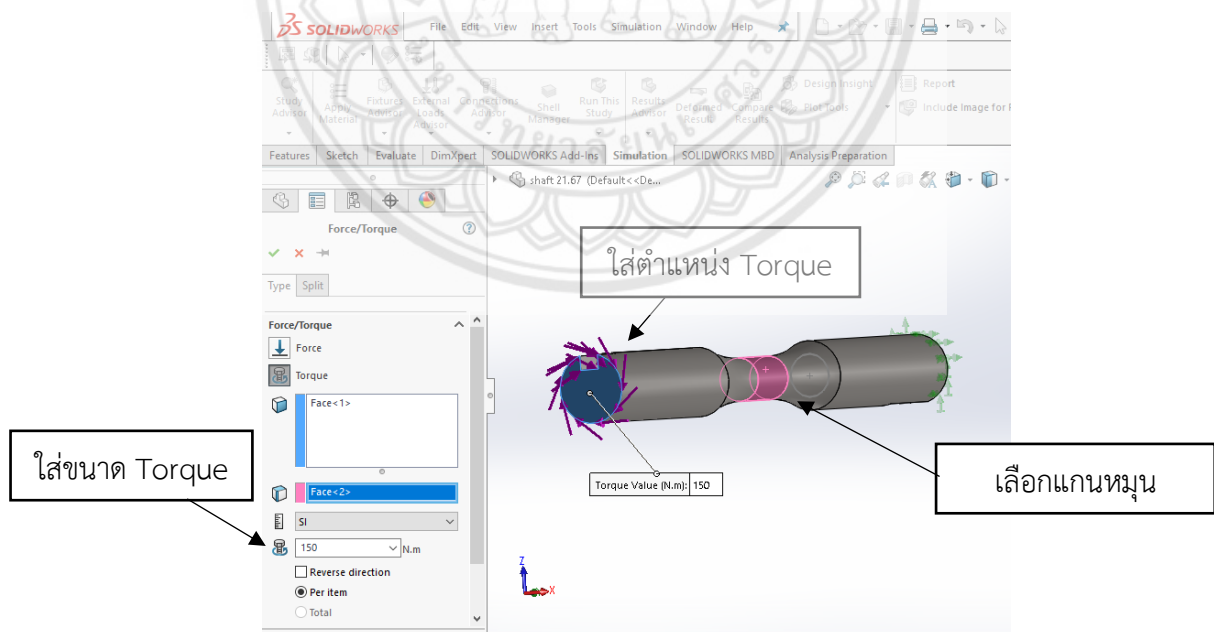
รูปที่ 3.18 ตำแหน่งยึดจับชิ้นงาน

3.2.2.4 ใส่โหลดให้กับชิ้นงาน โดยคลิกขวา External Load แล้วเลือก Torque



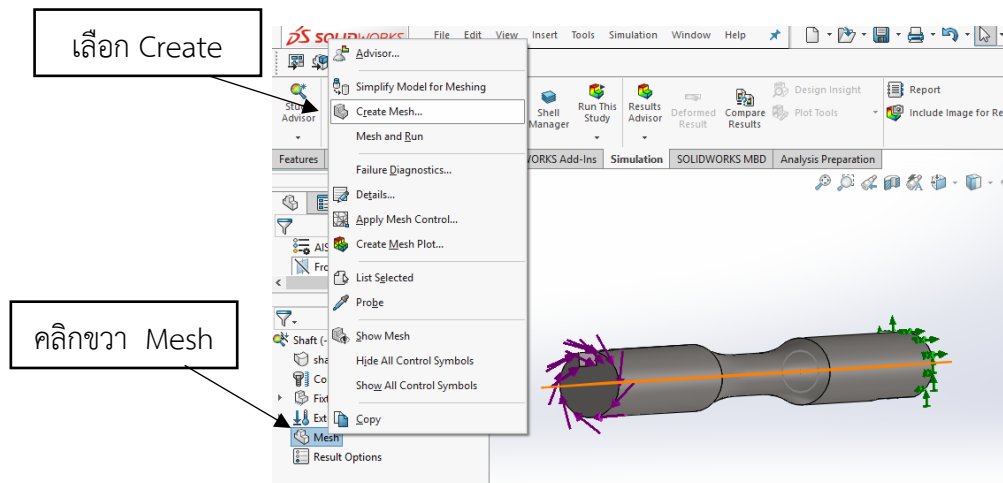
รูปที่ 3.19 ชนิด Load

จากนั้นเลือกตำแหน่งที่ต้องการใส่ Torque แล้วเลือกตำแหน่งแกนหมุน และใส่ขนาดของ Torque เท่ากับ 150 นิวตันเมตร



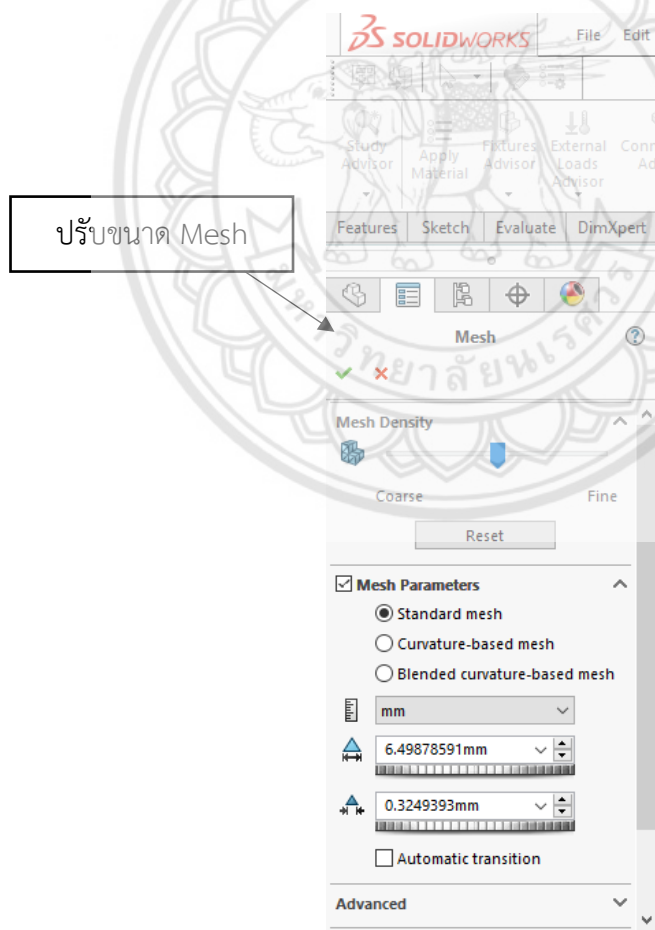
รูปที่ 3.20 ตำแหน่ง Torque

3.2.2.5 สร้างเอลิเมนต์ โดยคลิกขวา Mesh แล้วเลือก Create Mesh ดังรูป 3.21



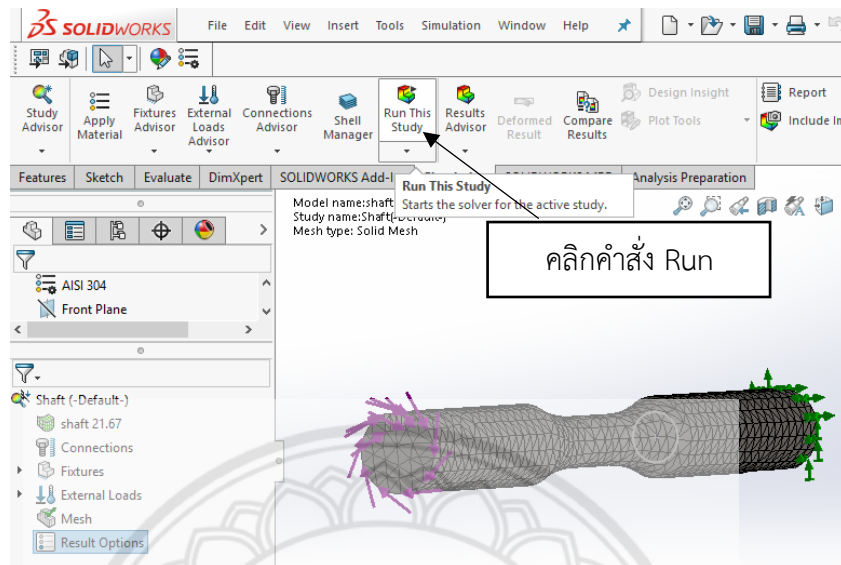
รูปที่ 3.21 สร้างเอลิเมนต์

ปรับขนาดของเอลิเมนต์ ตามความเหมาะสมของชิ้นงาน



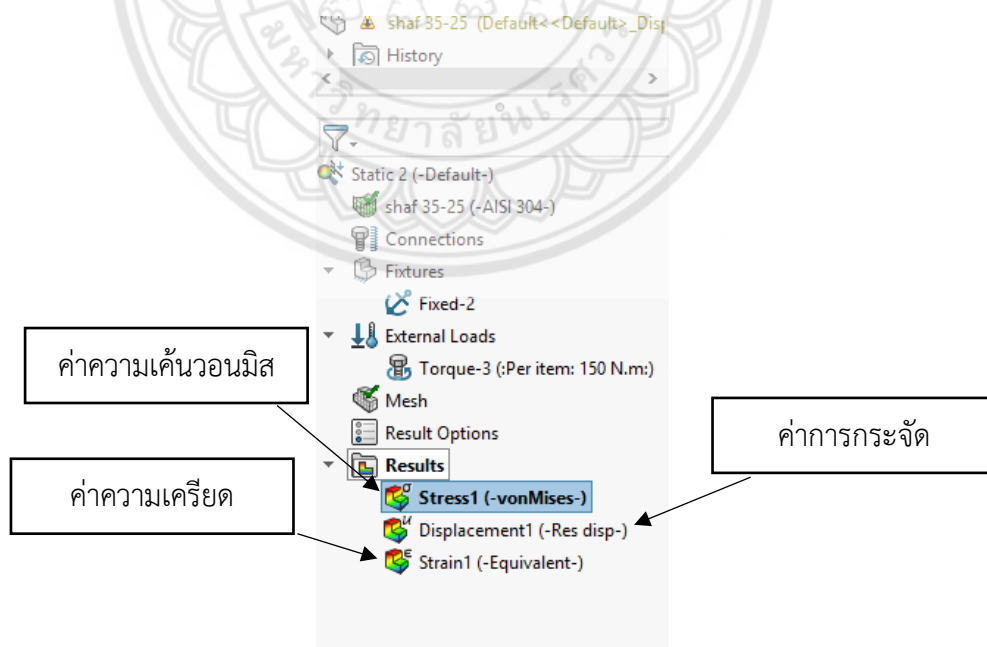
รูปที่ 3.22 ปรับขนาดของเอลิเมนต์

3.2.2.6 ทำการคลิกคำสั่ง Run ดังรูป เพื่อให้โปรแกรมคำนวณค่าออกมา



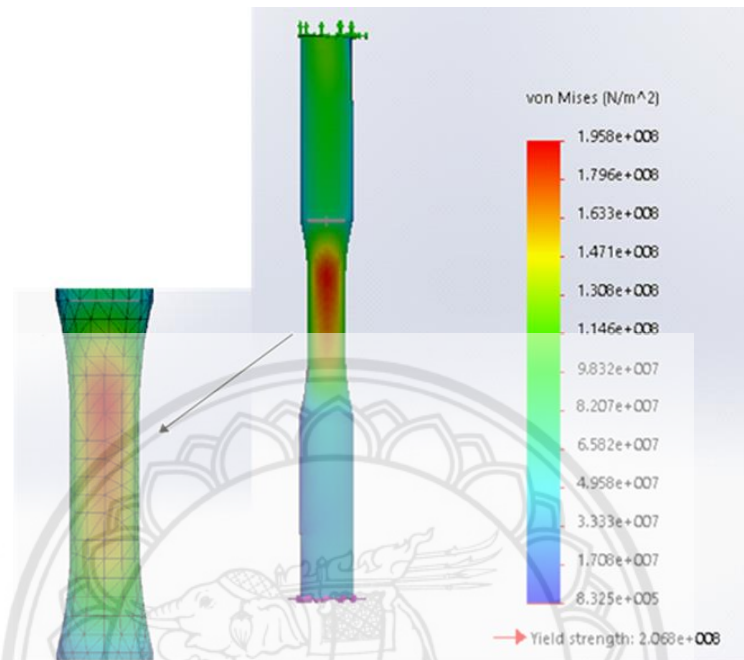
รูปที่ 3.23 คำสั่ง Run

3.2.2.7 แสดงค่าการคำนวณที่ได้ โดยโปรแกรมจะแสดงค่าความเค้นวอนนิส ค่าการกระจัด และค่าความเครียด ดังรูปที่ 3.24



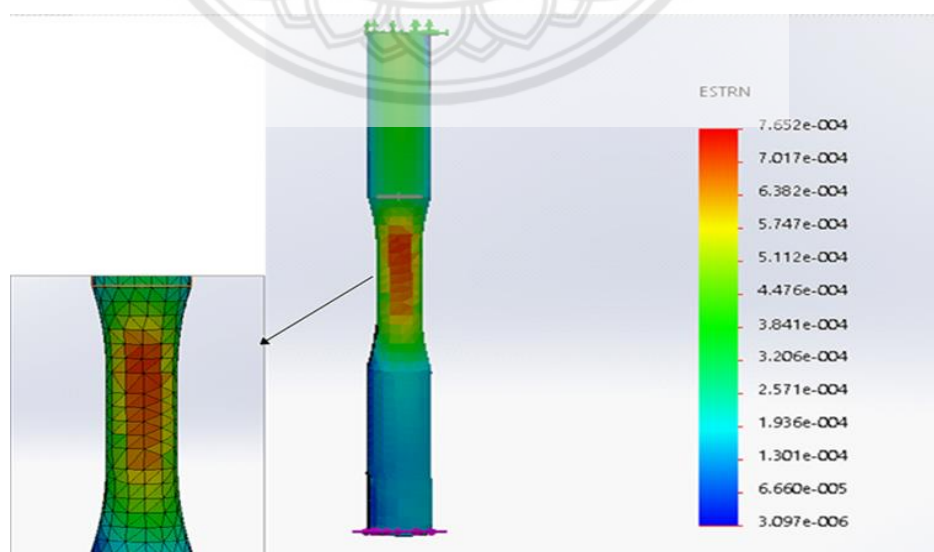
รูปที่ 3.24 ค่าการคำนวณ

ผลจากการทำ simulaton ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่าค่าความเค้นวอนมิสมี
ค่า 195.8 MPa ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ค่าความเค้นวอนมิสมี เพลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm

และผลจากการทำ simulaton ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่าค่าความเครียดมีค่า
765.2 $\epsilon\mu$ ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ค่าความเครียดเพลาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 mm

3.3 การสร้างอุปกรณ์วัดภาระบิด การติดตั้งสเตรนเกจและการต่อวงจร

3.3.1 การสร้างชิ้นงาน

จากการสร้างชิ้นงานด้วยโปรแกรม Solidwork และวิเคราะห์โมเดลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นำแบบที่ได้ไปสร้างชิ้นงาน โดยใช้แท่งเพลาสแตนเลส 304 ขึ้นรูปด้วยวิธีการกลึงให้ได้ขนาดตามแบบ และขัดผิวชิ้นงานให้เรียบ แสดงดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 สร้างชิ้นงาน

3.3.2 การติดตั้งสเตรนเกจและการต่อวงจร

ขั้นตอนการติดตั้งสเตรนเกจและการต่อวงจร

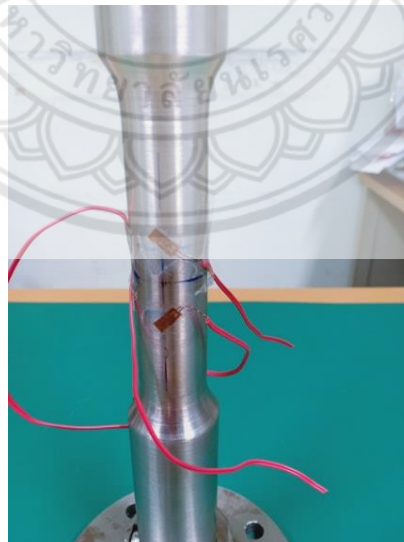
3.3.2.1 ทำความสะอาดผิวของเพลาด้วย Acetone

3.3.2.2 กำหนดตำแหน่งสเตรนเกจจากจุดที่จะเกิดความเค้นและเครียดสูงสุดโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



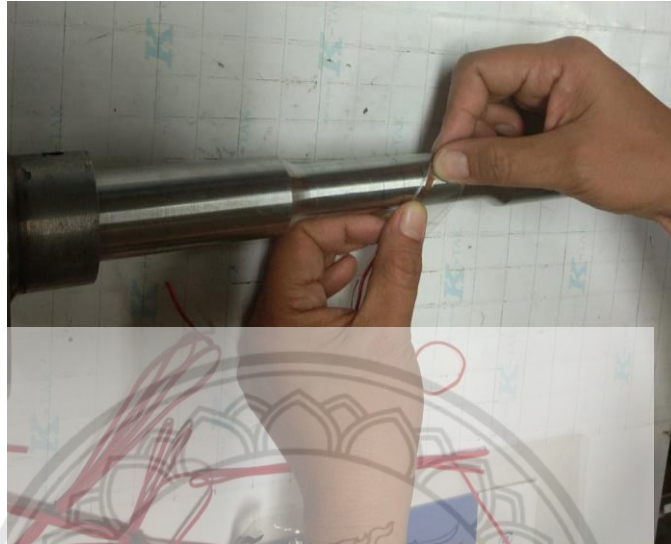
รูปที่ 3.28 ตำแหน่งการติดสเตรนเกจ

3.3.2.3 หยอดกาวลงบนสเตรนเกจโดยเลือกใช้สเตรนเกจชนิด KFG-5-350-C1-16L1M2R แล้วให้วางสเตรนเกจลงบนผิวของเพลลา ในขณะที่เดียวกันให้ทำการปรับตำแหน่งโดยเล็งจากเส้นที่มาร์คไว้ก่อนหน้า



รูปที่ 3.29 ชิ้นงานหลังติดตั้งสเตรนเกจ

3.3.2.4 ปิดทับสเตรนเกจด้วยแผ่นโพลีเอทเธนกดให้แน่นนานประมาณ 1 นาทีแล้ว
นำแผ่นโพลีเอทเธนออก



รูปที่ 3.30 ปิดสเตรนเกจด้วยแผ่นโพลีเอทเธน

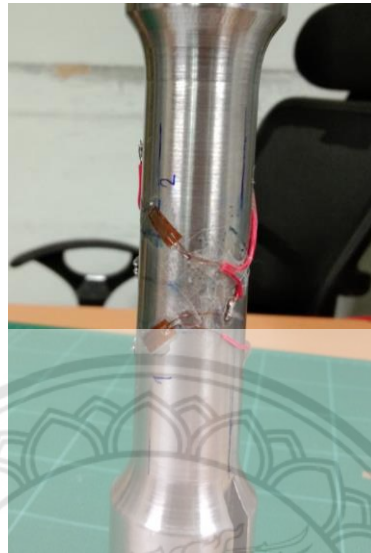
3.3.2.5 ตรวจสอบความเรียบร้อย ทำอีก 3 ตัวที่เหลือ

3.3.2.6 ติดสก็อตเทปใสใต้สายสัญญาณเพื่อป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร จากนั้นจึงติด Stain
Gauge Terminal



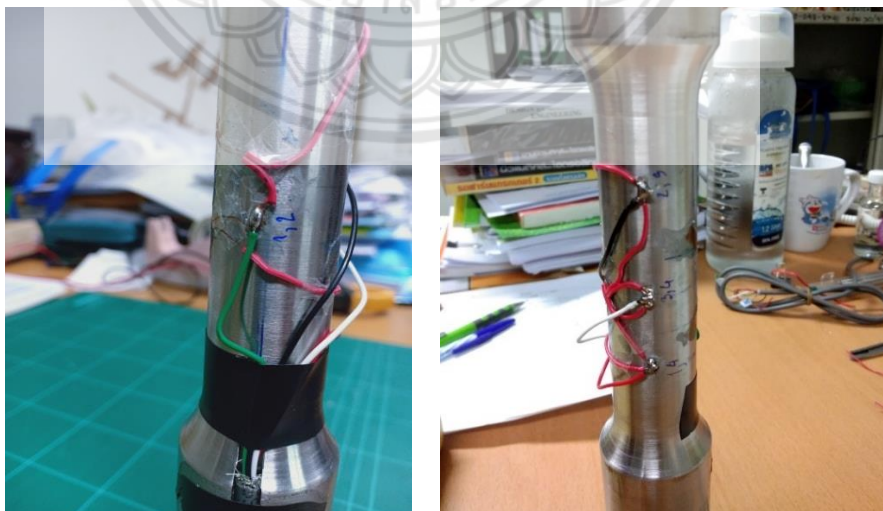
รูปที่ 3.31 ติด Stain Gauge Terminal ลงบนเพลลา

3.3.2.7 ต่อสายสัญญาณของสเตรนเกจแล้วบัดกรีเชื่อมเข้ากับ Stain Gauge Terminal เป็นวงจรวีทสโตนบริดจ์



รูปที่ 3.32 บัดกรีเชื่อมสายไฟลง Terminal

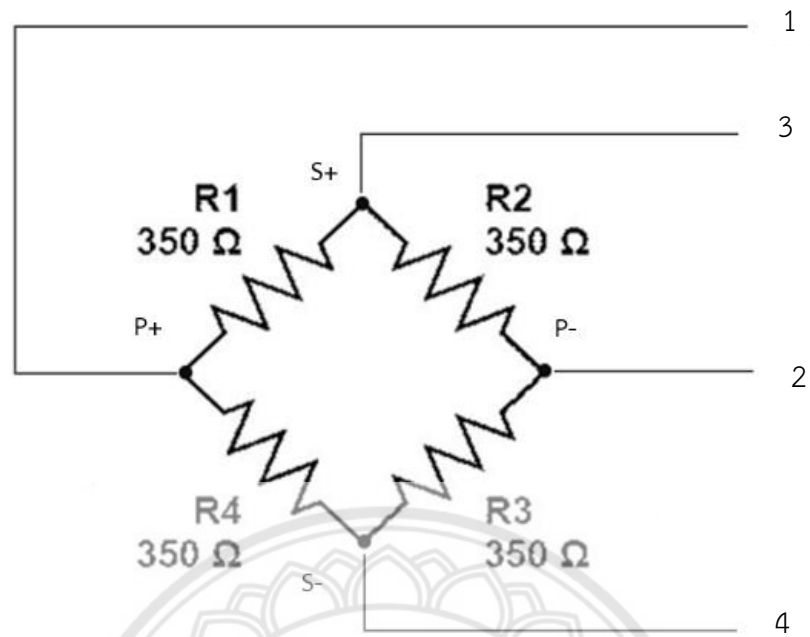
3.3.2.8 บัดกรีเชื่อมสายสัญญาณเข้ากับแต่ละโหนด (Node) ของวงจรวีทสโตนบริดจ์เพื่อส่งสัญญาณออก



ก) ต่อสายสัญญาณ

ข) เชื่อมสายสัญญาณเข้ากับโหนด

รูปที่ 3.33 ต่อสายสัญญาณเข้ากับสเตรนเกจ



รูปที่ 3.34 แสดงการต่อสายสัญญาณเข้าวงจรวิทสโตนบริดจ์

3.3.2.9 เคลือบผิวชิ้นแรกด้วย SB Tape และทับลงบนสเตรนเกจเพื่อป้องกันความชื้น



รูปที่ 3.35 เคลือบเพลตด้วย SB Tape

3.3.2.10 เคลือบผิวอีกชั้นด้วย VM Tape พันทับ SB Tape เพื่อป้องกันความชื้น และการ
กระแทก



รูปที่ 3.36 เคลือบเพลาด้วย VM Tape

3.3.2.11 ทา Shin Etsu silicone รอบผิวของเพล่าที่ลดขนาดแล้วเพื่อกันกระแทก

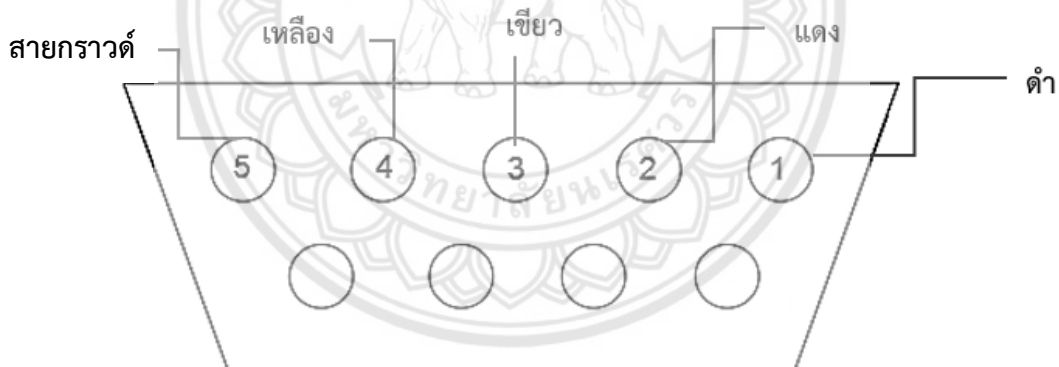


รูปที่ 3.37 เคลือบเพลาด้วยซิลิโคน

3.3.2.12 สวมเพลากล้าเข้ากับสลีปริง (Slip ring) แล้วนำสายสัญญาณสเตรนเกจที่ติดไว้บนเพลากล้าออกมาต่อเข้ากับขั้วต่อของ Slip ring ดังรูปที่ 3.38

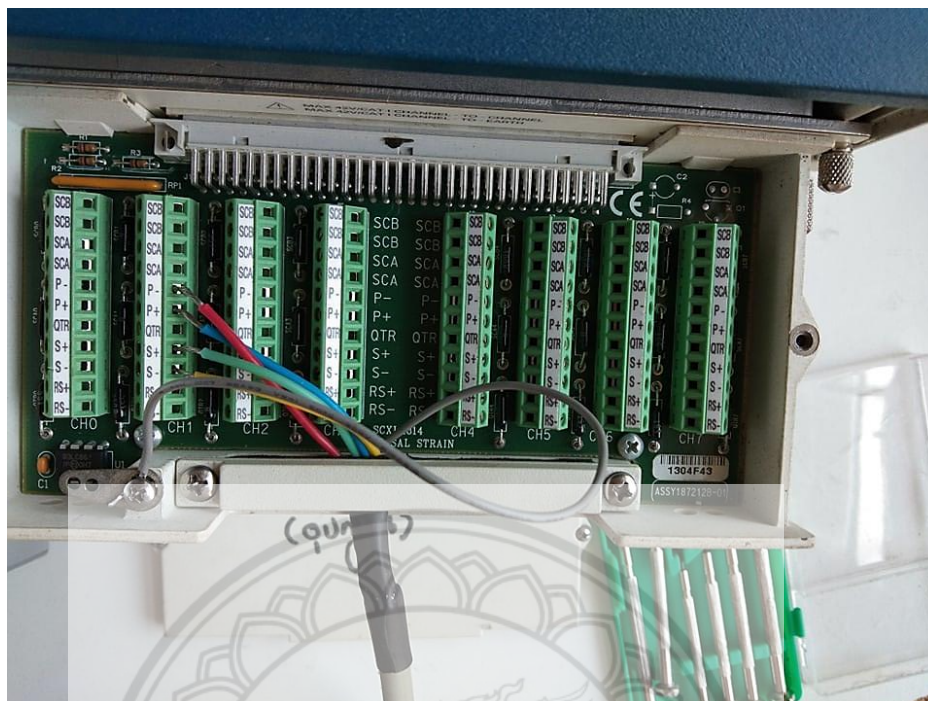


รูปที่ 3.38 ขั้วต่อ Slip ring



รูปที่ 3.39 สายนำสัญญาณ

3.3.2.13 เชื่อมสายสัญญาณจาก Slip ring เข้ากับแผงวงจรของ Indicator เพื่อใช้อ่านและบันทึกค่าความเครียดโดยโปรแกรม Instruments Measurement and Automation Explorer

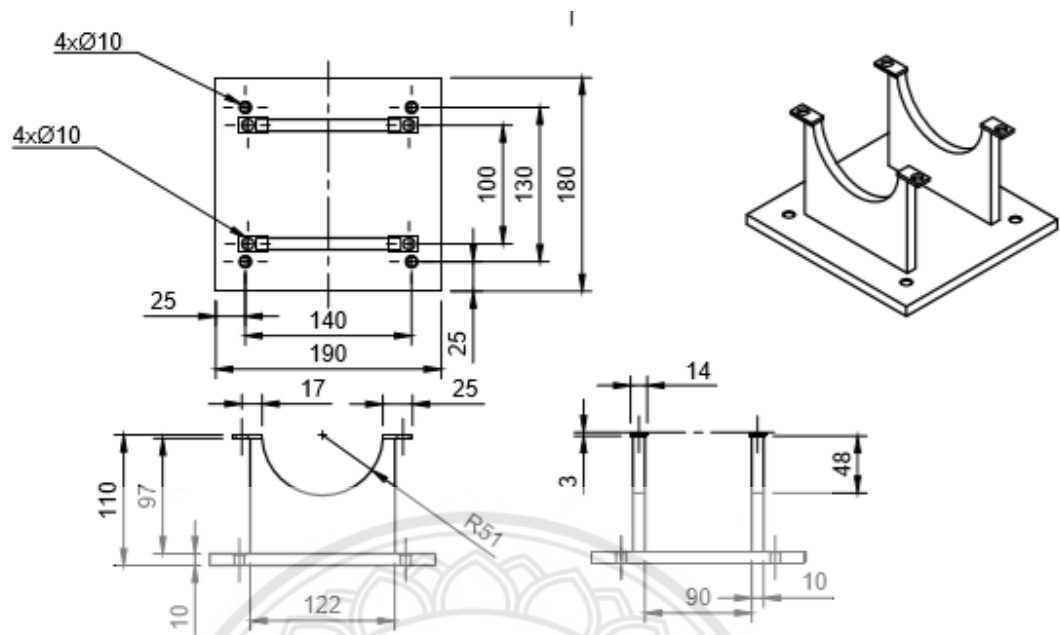


รูปที่ 3.40 การ์ดของ Indicator

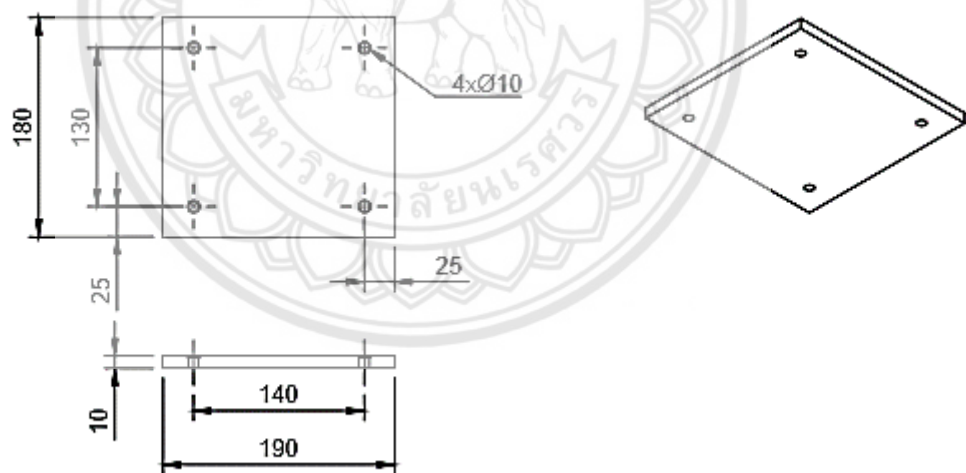
3.4 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดภาระบิด

3.4.1 การออกและสร้างแท่นสำหรับทดสอบอุปกรณ์วัดภาระบิด

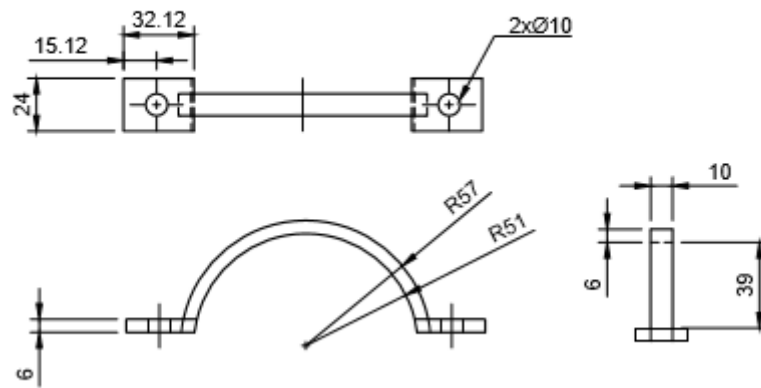
แท่นทดสอบถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นแผ่นประกบเข้ากับโครงเหล็กดังรูป 3.47 โดยใช้เนื้อยึดระหว่างแผ่นบนกับแผ่นล่างเข้าด้วยกัน โดยแผ่นบนจะมีแท่นสำหรับไว้ยึดแหวนลิ้น ในการทดสอบจะใส่ก้อนน้ำหนักมาตรฐานบนที่แขวนน้ำหนัก โดยใช้รัศมีของแผ่นจานเป็นแขนของแรงบิดเพื่อทำให้เกิดแรงบิดในทิศทางตั้งฉาก และรัศมีแผ่นจานหาได้จากสูตร $T = Fxr$ โดยกำหนด $T=150 \text{ N.m}$ และก้อนน้ำหนักมาตรฐานจำนวน 10 ก้อนขนาด 100 kg จะได้รับรัศมีจานเท่ากับ 15.29 cm แล้วทำการเซาะร่องของแผ่นเพื่อคล้องลวดสลิง



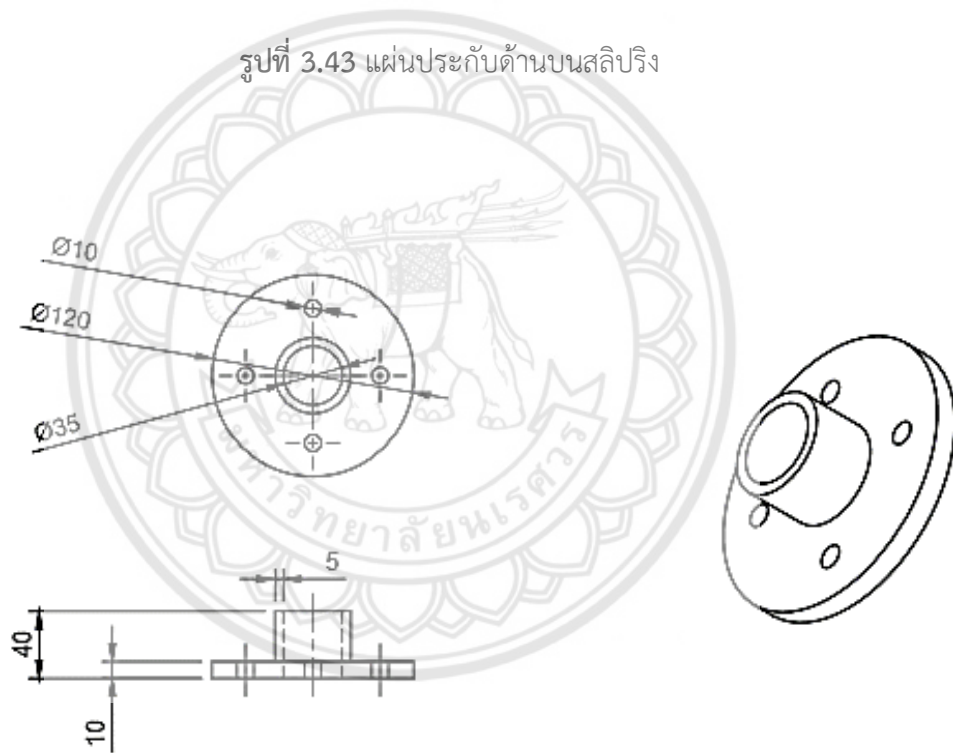
รูปที่ 3.41 แท่นยึดสลีปรिंग (Slip ring)



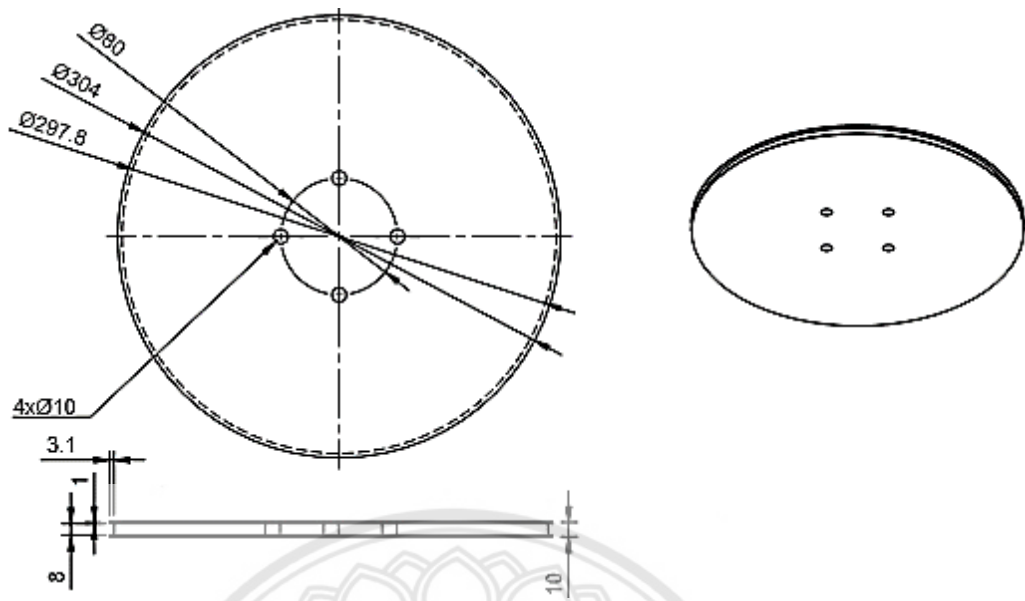
รูปที่ 3.42 แผ่นประกบกับแท่นยึดสลีปรिंग



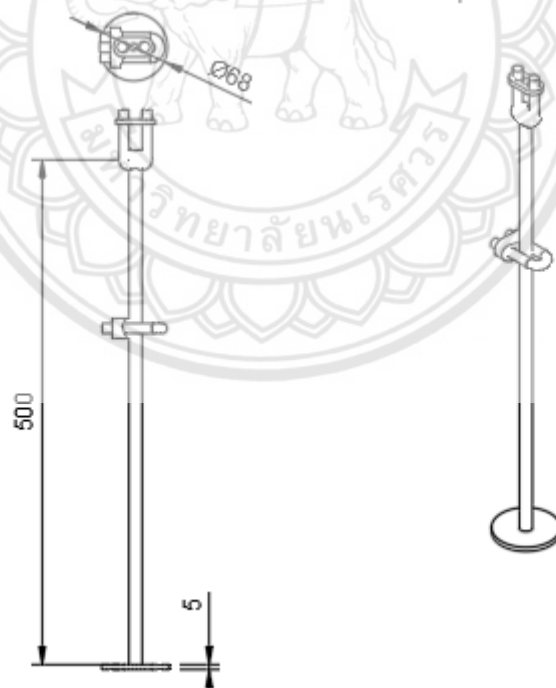
รูปที่ 3.43 แผ่นประกบกับด้านบนสลีปริง



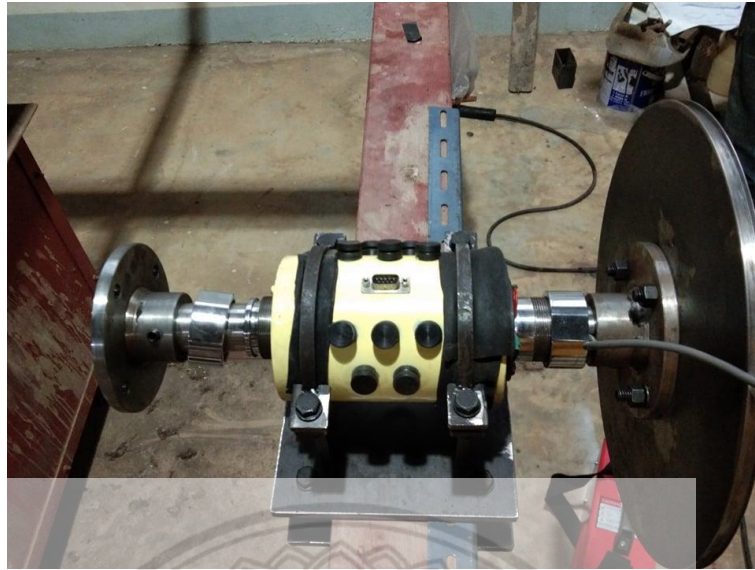
รูปที่ 3.44 หน้าแปลน



รูปที่ 3.45 แผ่นงานเซาะร่อง



รูปที่ 3.46 ที่แขวนก้นน้ำหนัก



รูปที่ 3.47 ติดตั้งเข้ากับโครงเหล็ก



รูปที่ 3.48 แทนทดสอบ

3.4.2 การสอบเทียบอุปกรณ์วัดภาระบิตด้วยแท่นทดสอบ

มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

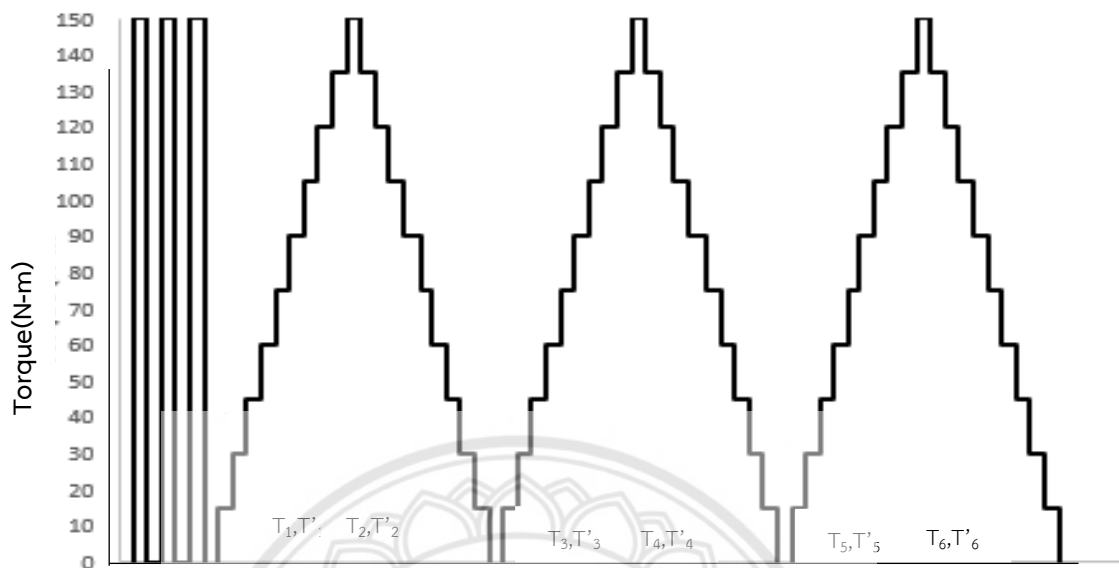
1) ติดตั้งอุปกรณ์วัดภาระบิตเข้ากับแท่นทดสอบ ต่อสายสัญญาณจากอุปกรณ์วัดภาระบิตกับเครื่อง indicator และใช้โปรแกรม Instruments Measurement and Automation Explorer อ่านค่าสัญญาณ



รูปที่ 3.49 ต่อสายสัญญาณจากอุปกรณ์วัดภาระบิตกับเครื่อง indicator

2) ทำ Pre load เป็นการวอร์มสเตรนเกจ โดยการใส่น้ำหนักที่ 0 กิโลกรัม แล้วอ่านค่าความเครียดที่อ่านได้จากเครื่อง indicator แล้วบันทึกผล จากนั้นใส่ Full load ที่ 100 กิโลกรัม แล้วอ่านค่าความเครียด ทำซ้ำ 3 ครั้ง

3) ทำการทดสอบภาระบิตในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา โดยใส่ด้วยก้อนน้ำหนักขนาด 10 กิโลกรัม ลงบนที่แขวนน้ำหนัก เพื่อให้เกิดภาระบิต 15 นิวตัน.เมตร จากนั้นทำการบันทึกค่าความเครียดที่อ่านได้ และเพิ่มน้ำหนักทีละ 10 กิโลกรัม จนครบ 100 กิโลกรัม และทำการเอาน้ำหนักออกครั้งละ 10 กิโลกรัมออกจนหมด ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง โดยใส่น้ำหนักดังรูปที่ 3.50

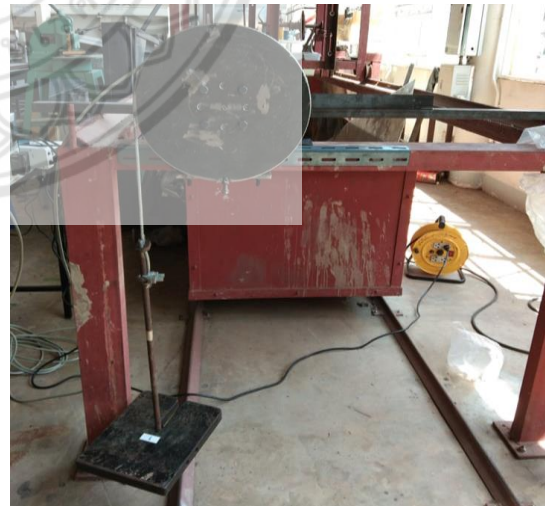


รูปที่ 3.50 รูปแบบการใส่ภาระบิด

- 4) ทำการทดสอบข้อ 2 ซ้ำ โดยทำการหมุนเพล่าไป 90 องศา
- 5) ทำการทดสอบในข้อ 3 และ 4 ซ้ำ โดยการใส่ภาระบิดไปในทิศตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 3.51 การใส่ภาระบิดทิศทางตามเข็ม



รูปที่ 3.52 การใส่ภาระบิดทิศทางทวนเข็ม

- 6) วิเคราะห์ผลการทดสอบ

3.4.3 การวิเคราะห์ผลการสอบเทียบอุปกรณ์วัดภาระบิตด้วยแท่นทดสอบ

เมื่อพิจารณาจากการทดสอบด้วยแท่นทดสอบ โดยมีรูปแบบการใส่ภาระบิต ดังรูปที่ 3.50 และได้ทำการทดสอบซึ่งประยุกต์ใช้มาตรฐาน ISO 376:2011(E) โดยใส่ภาระบิตในทิศทางทวนเข็ม และตามเข็ม พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนมี ดังต่อไปนี้

1) Reproducibility error , b

$$b = \left| \frac{\mathcal{E}_{\max} - \mathcal{E}_{\min}}{\overline{\mathcal{E}}_N} \right| \times 100 \quad (3.2)$$

เมื่อ b = ค่า reproducibility error , %FSO

\mathcal{E}_{\max} = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรีส์ T_1 และ T_1, μ

\mathcal{E}_{\min} = ค่าความเครียดที่อ่านได้ต่ำสุดจากข้อมูลซีรีส์ T_1 และ T_1, μ

$\overline{\mathcal{E}}_N$ = ค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตำแหน่งใส่ภาระบิตสูงสุด 150 นิวตัน จากข้อมูลซีรีส์ T_1

และ T_1, μ

2) Repeatability error , b'

$$b' = \left| \frac{\mathcal{E}_{\max} - \mathcal{E}_{\min}}{\overline{\mathcal{E}}_N} \right| \times 100 \quad (3.3)$$

เมื่อ b' = ค่า repeatability error , %FSO

\mathcal{E}_{\max} = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรีส์ T_1, T_3 และ T_5, μ

\mathcal{E}_{\min} = ค่าความเครียดที่อ่านได้ต่ำสุดจากข้อมูลซีรีส์ T_1, T_3 และ T_5, μ

$\overline{\mathcal{E}}_N$ = ค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตำแหน่งใส่ภาระบิตสูงสุด 150 นิวตัน-เมตร จากข้อมูลซีรีส์

T_1, T_3 และ T_5, μ

3) Hysteresis error , V

$$V_1 = \left| \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_N} \right| \times 100 \quad (3.4)$$

$$V_2 = \left| \frac{\varepsilon_4 - \varepsilon_3}{\varepsilon_N} \right| \times 100 \quad (3.5)$$

$$V_3 = \left| \frac{\varepsilon_6 - \varepsilon_5}{\varepsilon_N} \right| \times 100 \quad (3.6)$$

$$V_4 = \left| \frac{\varepsilon'_2 - \varepsilon'_1}{\varepsilon_N} \right| \times 100 \quad (3.7)$$

$$V_5 = \left| \frac{\varepsilon'_4 - \varepsilon'_3}{\varepsilon_N} \right| \times 100 \quad (3.8)$$

$$V_6 = \left| \frac{\varepsilon'_6 - \varepsilon'_5}{\varepsilon_N} \right| \times 100 \quad (3.9)$$

$$V = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6}{6} \quad (3.10)$$

เมื่อ V = ค่าเฉลี่ย hysteresis error , % FSO

ε_1 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรีย์ T_1, μ

ε_2 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรีย์ T_2, μ

ε_3 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรีย์ T_3, μ

ε_4 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรีย์ T_4, μ

ε_5 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรีย์ T_5, μ

- \mathcal{E}_6 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรี่ T₆, μ
 \mathcal{E}'_1 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรี่ T₁, μ
 \mathcal{E}'_2 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรี่ T₂, μ
 \mathcal{E}'_3 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรี่ T₃, μ
 \mathcal{E}'_4 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรี่ T₄, μ
 \mathcal{E}'_5 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรี่ T₅, μ
 \mathcal{E}'_6 = ค่าความเครียดที่อ่านได้สูงสุดจากข้อมูลซีรี่ T₆, μ
 \mathcal{E}'_N = ค่าความเครียดที่ตำแหน่งใส่ภาระบิตสูงสุด 150 นิวตัน-เมตร จากข้อมูลแต่ละซีรี่, μ

4) Zero error , f_0

$$f_0 = \left| \frac{\mathcal{E}_f - \mathcal{E}_0}{\overline{\mathcal{E}_N}} \right| \times 100 \quad (3.11)$$

เมื่อ \mathcal{E}_f = ค่าความเครียดที่ตำแหน่งภาระบิตลดลงเหลือ 0 นิวตัน-เมตร, μ

\mathcal{E}_0 = ค่าความเครียดที่ตำแหน่งเริ่มต้น ภาระบิต 0 นิวตัน-เมตร, μ

\mathcal{E}_N = ค่าความเครียดที่ตำแหน่งใส่ภาระบิตสูงสุด 150 นิวตัน-เมตร, μ

5) Regression error , f_r

$$f_r = \left| \frac{\mathcal{E}_a - \mathcal{E}_r}{\overline{\mathcal{E}_N}} \right| \times 100 \quad (3.12)$$

เมื่อ f_r = ค่า regression error, % FSO

\mathcal{E}_a = ค่าความเครียดเฉลี่ยจากข้อมูลทุกซีรีส์ ณ ค่าภาระบิตหนึ่งๆ, μ

\mathcal{E}_r = ค่าความเครียดที่ได้จากสมการ regression, μ

\mathcal{E}_N = ค่าความเครียดเฉลี่ยที่ตำแหน่งใส่ภาระบิตสูงสุด 150 นิวตัน-เมตร จากข้อมูลทุกซีรีส์, μ

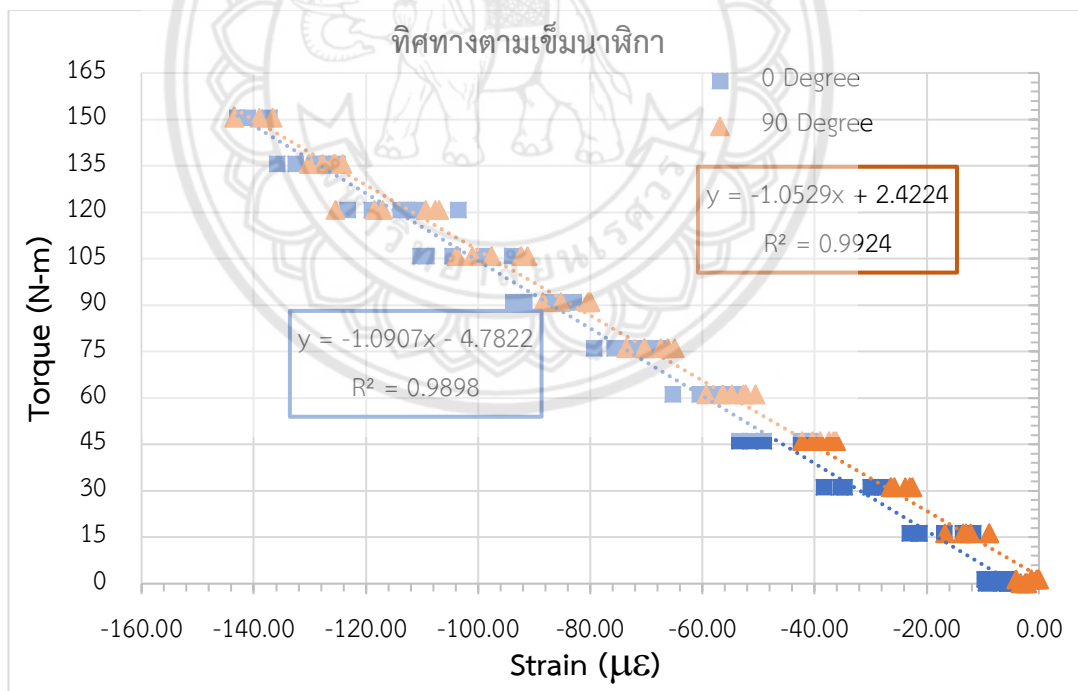


บทที่ 4

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

4.1 การกระบิดที่กระทำในทิศตามเข็มนาฬิกาที่มุม 0 และ 90 องศา

ผลของการกระบิดกับค่าความเครียดที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนที่ 0 องศา และ 90 องศา ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา จะเห็นได้ว่าที่แรงบิด 0 (N-m) มีค่าความเครียดที่อ่านได้ -14.54 ($\mu\epsilon$) และ -6.43 ($\mu\epsilon$) ตามลำดับ โดยเมื่อนำค่าการกระบิดที่ทำการทดสอบมาพล็อตร่วมกับค่าความเครียด จะได้กราฟดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การทดสอบที่ 0 องศา และ 90 องศา ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

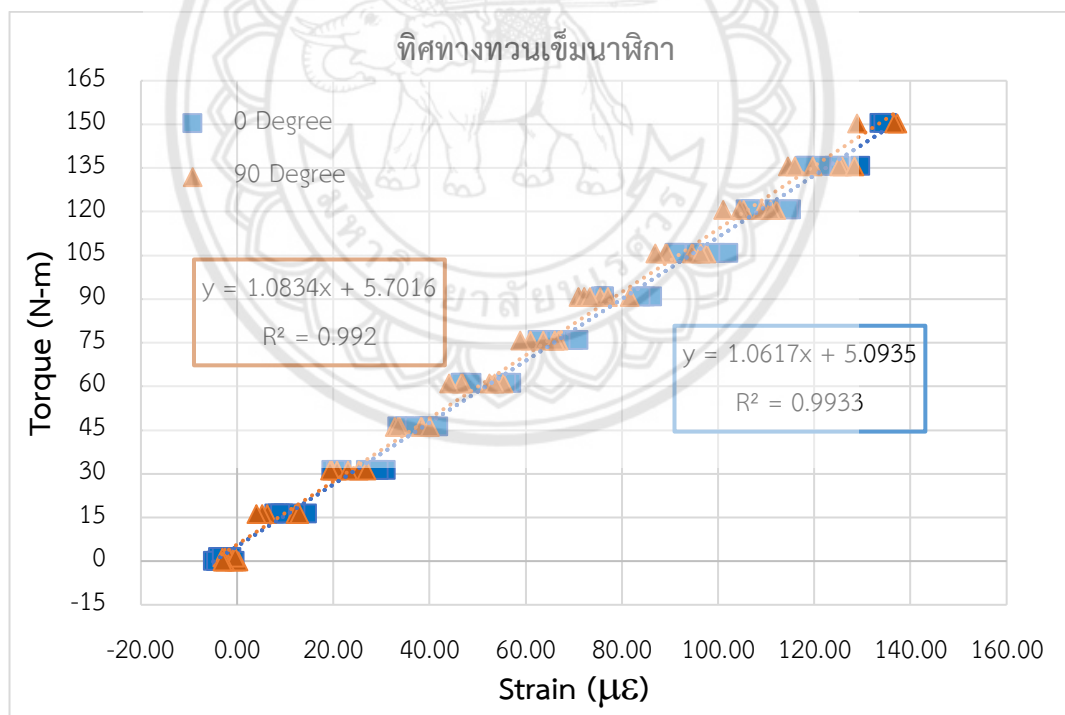
ความสัมพันธ์ระหว่างภาระบิดกับค่าความเครียดที่ได้จากการวัดในทิศตามเข็มนาฬิกา ที่ 0 และ 90 องศา พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จึงประมาณด้วยสมการการถดถอย (Regression Equation)

$$\text{ตามเข็มนาฬิกาที่ } 0 \text{ องศา คือ } T = -1.0907\varepsilon - 4.7822 \quad (4.1)$$

$$\text{ตามเข็มนาฬิกาที่ } 90 \text{ องศา คือ } T = -1.0529\varepsilon + 2.4224 \quad (4.2)$$

4.2 ภาระบิดที่กระทำในทิศทวนเข็มนาฬิกาที่มุม 0 และ 90 องศา

ผลของภาระบิดกับค่าความเครียดที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนที่ 0 องศา และ 90 องศา ในทิศทวนเข็มนาฬิกา จะเห็นได้ว่าที่แรงบิด 0 (N-m) มีค่าความเครียดที่อ่านได้ $-10.68 (\mu\varepsilon)$ และ $-3.99 (\mu\varepsilon)$ โดยเมื่อนำค่าภาระบิดที่ทำการทดสอบมาพล็อตร่วมกับค่าความเครียด จะได้กราฟดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การทดสอบที่ 0 องศา และ 90 องศา ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

ความสัมพันธ์ระหว่างภาระบิดกับค่าความเครียดที่ได้จากการวัดในทิศทวนเข็มนาฬิกา ที่ 0 และ 90 องศา พบว่ามีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง จึงประมาณด้วยสมการการถดถอย (Regression Equation)

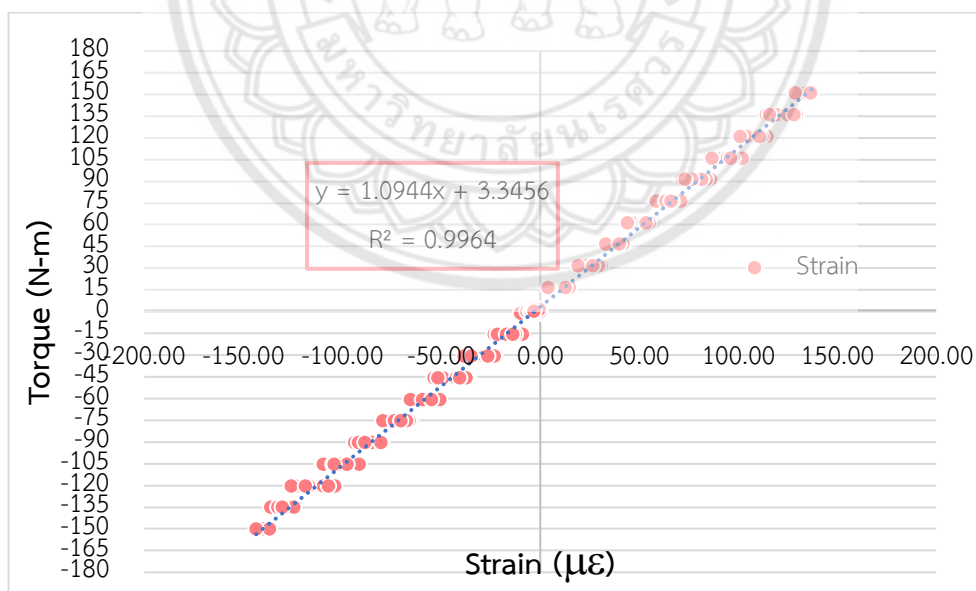
ตามเข็มนาฬิกาที่ 0 องศา คือ $T = 1.0834\varepsilon + 5.7016$ (4.3)

ตามเข็มนาฬิกาที่ 90 องศา คือ $T = 1.0617\varepsilon + 5.0935$ (4.4)

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 เมื่อดูความชันของกราฟที่มุม 0 และ 90 องศา มีความชันใกล้เคียงกันทั้งทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกาโดยมีความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง โดยมีผลต่างระหว่างกราฟโดยเฉลี่ยที่ 20.43 เปอร์เซ็นต์ และ 11.70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ที่ภาระบิดมีค่าเท่ากับ 0 นิวตัน-เมตร แต่ความเครียดที่อ่านได้ไม่เท่ากับ 0 เนื่องจากมีค่าตกค้างของความเครียดในสเตรนเกจ

4.3 ภาระบิดที่กระทำในสองทิศทางที่มุม 0 และ 90 องศา

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงให้เห็นว่าผลของการเปลี่ยนมุมบิดที่ 0 และ 90 องศาในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกาต่างกันอย่างน้อยมาก ทำให้สามารถหาค่าของความเครียดทั้งหมดเป็นกราฟที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงค่าความเครียดกับภาระบิดที่กระทำในสองทิศทางที่ 0 องศา และ 90 องศา

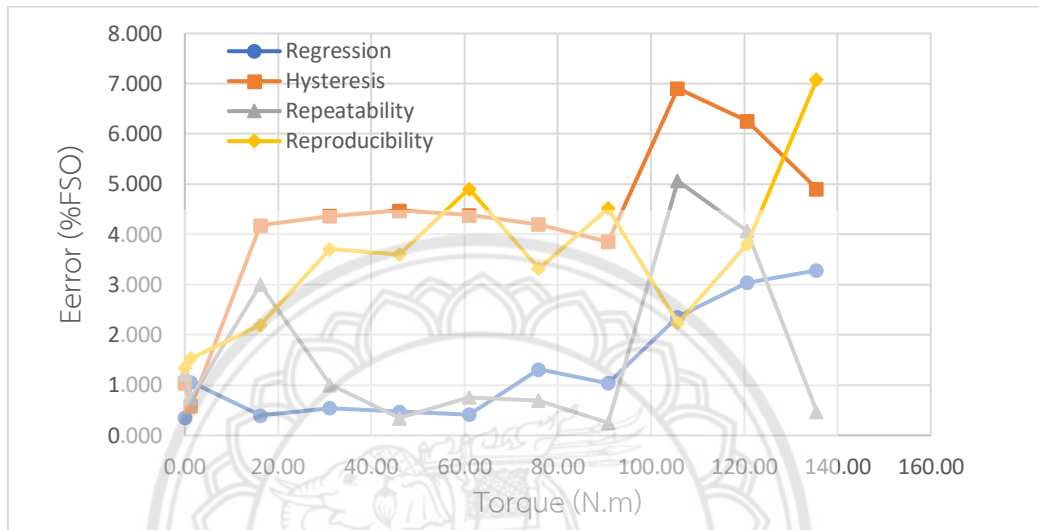
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเครียดกับภาระบิดที่กระทำในสองทิศทางที่ 0 องศา และ 90 องศา ทำให้ได้สมการสำหรับคำนวณหาภาระบิดของอุปกรณ์วัดภาระบิดที่พัฒนาขึ้น คือ

$$T=1.0944\varepsilon + 3.3456$$

(4.5)

เมื่อ T คือ ภาระบิด (N.m)

ε คือ ความเครียด ($\mu\varepsilon$)



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความคาดเคลื่อนต่างๆ กับแรงกระทำ

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ความคาดเคลื่อนของอุปกรณ์วัดภาระบิดในทิศทางทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกาที่ 0 และ 90 องศา

Parameters	
Range	Input 0 to 150 N.m
	Output -3.057 to 133.998 μ
Rate of sensitivity	0.9137 μ /(N.m)
Zero error	(Max) 1.27% FSO
Repeatability error	(Max) 5.06% FSO
Reproducibility error	(Max) 7.08% FSO
Hysteresis error	(Max) 6.91% FSO
Regression error	(Max) 3.29% FSO

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

การออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์วัดภาระบิดเพื่อใช้ในการวัดภาระบิดได้สูงสุด 150 นิวตัน-เมตร สามารถสรุปได้ดังนี้

1) อุปกรณ์วัดภาระบิดทำจากวัสดุสแตนเลส 304 ทำชิ้นงาน จากการออกแบบและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2016 ได้รูปแบบชิ้นงานที่มีความเหมาะสมคือ ชิ้นงานที่มีลักษณะทรงกระบอกตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ยาว 350 มิลลิเมตร ลดขนาดเพลากลางเหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร รัศมีฟิลเลต 150 มิลลิเมตร ทำการเจาะร่องขนาด 5 มิลลิเมตรบนเพลากลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร สำหรับใส่สายสัญญาณ ติดสเตรนเกจชนิด KFG-5-350-C1-16L1M2R ขนาด 350 โอห์ม จำนวน 4 ตัว บนเพลากลางเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร และต่อวงจรแบบวีทสโตนบริดจ์

2) ผลการทำ simulation ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่าค่าความเค้นอยู่ในช่วง 195.8 MPa และค่าความเครียดอยู่ในช่วง 765.2 $\mu\epsilon$ ซึ่งค่า simulation ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบซึ่งค่าความเครียดสูงสุดที่อ่านได้มีค่าเพียง -142.93 $\mu\epsilon$

3) สมการที่ใช้ในการประมาณค่าภาระบิด คือ $T=1.0944\epsilon + 3.3456$

เมื่อ T คือ ภาระบิด (N-m)

ϵ คือ ค่าความเครียด ($\mu\epsilon$)

4) คุณลักษณะของอุปกรณ์วัดภาระบิดต้นแบบดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 คุณลักษณะของอุปกรณ์วัดภาระบิดต้นแบบ

Parameters	
Range	Input 0 to 150 N.m
	Output -3.057 to 133.998 μ
Rate of sensitivity	0.9137 μ /(N.m)
Zero error	(Max) 1.27% FSO
Repeatability error	(Max) 5.06% FSO
Reproducibility error	(Max) 7.08% FSO
Hysteresis error	(Max) 6.91% FSO
Regression error	(Max) 3.29% FSO

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ความเครียดจากผลของภาระบิดมีค่าไม่สูงมาก ควรลดขนาดเพลลาในขั้นตอนการออกแบบเพื่อให้สามารถวัดการเสียรูปได้ดีขึ้น

5.2.2 ค่าความคาดเคลื่อนโดยรวมค่อนข้างสูง ควรมีการควบคุมอุณหภูมิของสถานที่ในขณะการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. หลักการของระบบวัด สืบค้นเมื่อ 15 ตุลาคม 2018, จาก http://www.lib.kps.ku.ac.th/SpecialProject/Agricultural_Engineering/2547/Bs/BanditKu/chapter2.pdf
- ชนัตต์ รัตนสุมาวงศ์ และ ปรีย ตระกูลทิวาร. (2550). การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิด. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม 2550, จังหวัดชลบุรี
- โชคชัย วาดทอง และ ทศนัย แสนพลพัฒน์. (2558). เครื่องวัดแรงบิดขนาด 50 Nm พร้อมสัญญาณตรวจสอบพร้อม. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหกรรม ประจำปี พ.ศ. 2558, 6-7 สิงหาคม 2558, กรุงเทพฯ
- ณัฐพล แสนคำ และ ทศนัย แสนพลพัฒน์. (2553). ต้นแบบเครื่องวัดแรงบิดแบบใหม่โดยใช้หลักการวัดมุมที่เปลี่ยนรูปไป. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24, 20-22 ตุลาคม 2553, จังหวัดอุบลราชธานี
- ธัญย์ ธนาทิพย์. (2556). วงจรบริดจ์ไฟฟ้ากระแสตรง สืบค้นเมื่อ 18 ตุลาคม 2018, จาก <http://ee53-2c-kmutt.blogspot.com/2013/11/dc-bridge.html>
- อัครศักดิ์ สุวานิชวงศ์ ภาณุวัฒน์ จ้อยกมล วิชชากร เมืองใจ และวิรัตน์ แตนนารัตน์. (2545). การศึกษาหลักการทำงานของสเตรนเกจและการดัดปรับภาวะสัญญาณจากสเตรนเกจ. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- ธิดิกร แสมรันฤทธิ์. (2013). เทคโนโลยีของเซนเซอร์วัดแรงบิด สืบค้นเมื่อ 18 ตุลาคม 2018, จาก http://www.thailandindustry.com/indust_newweb/articles_preview.php?cid=19241
- บริษัท เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ จำกัด. ผ่าน Bore Slip Ring & แหวนสลิปแคปซูล สืบค้นเมื่อ 15 ตุลาคม 2018, จาก <http://thai.throughboreslipring.com/>
- บริษัท แฟ็คโตมาร์ท จำกัด. ประเภทของ Load Cell แบบสเตรนเกจ สืบค้นเมื่อ 15 ตุลาคม 2018, จาก <https://mall.factomart.com/type-of-load-cell/>

รัตนา การบุญบุญญานันท์ และ เกดิษฐ์ กว้างตระกูล. (2556). การออกแบบอุปกรณ์วัดแรงในแนวแกนและภาระบิด, รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวรประจำปีงบประมาณ 2556

รศ.ดร. ชาวสวน กาญจนรัมย์. อุปกรณ์วัดความเครียด (strain gage) สืบค้นเมื่อ 15 ตุลาคม 2018, จาก
<http://charnnarong.me.engr.tu.ac.th/charnnarong/My%20classes/ME321/Lab3.pdf>

Dave Tutelman. (2014). Physical principles for the golf swing. Retrieved April 9, 2019, from <https://www.tutelman.com/golf/swing/principles1.php>

Morrisk, B. (2017). How Does a Metal Foil Strain Gauge Work[Video file]. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=H2wrDB0XDNk>



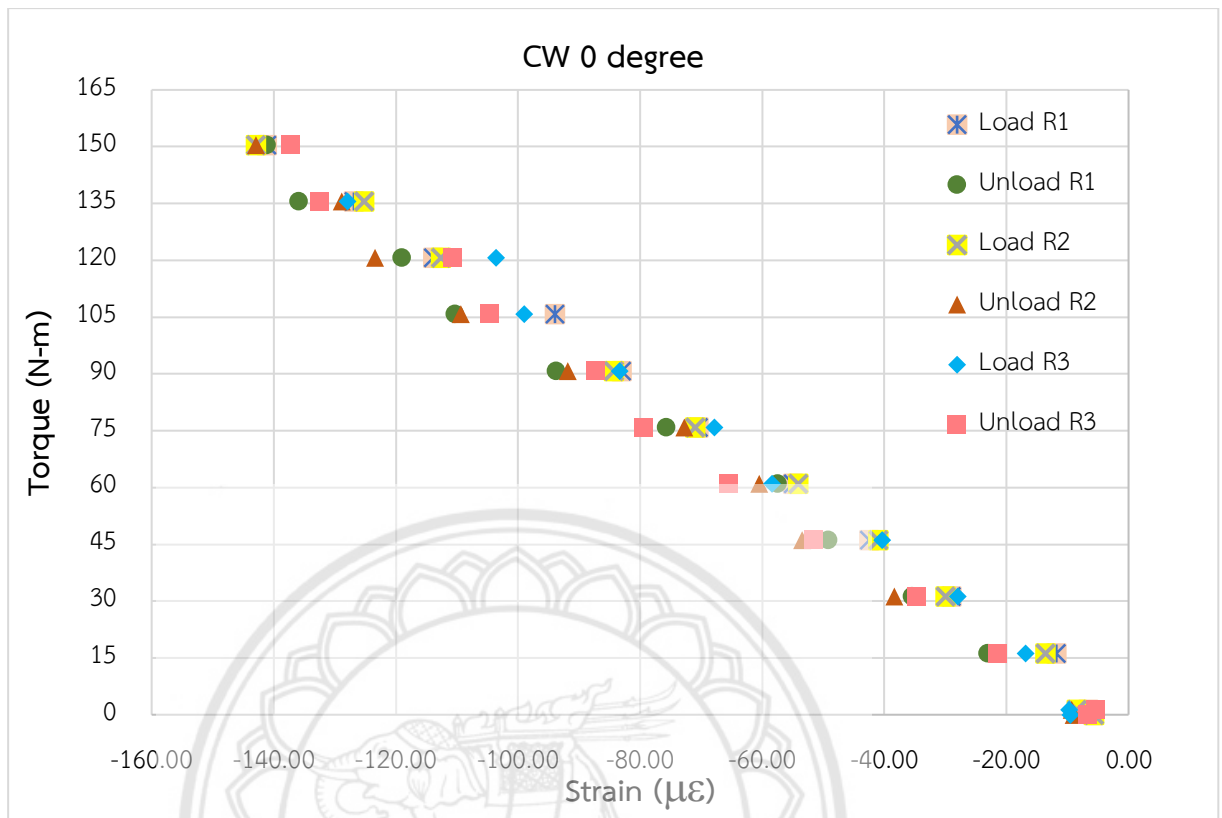
ภาคผนวก ก

กราฟและตารางผลการทดลอง



ตารางที่ ก1. ค่าการทดสอบมุม 0 องศา ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

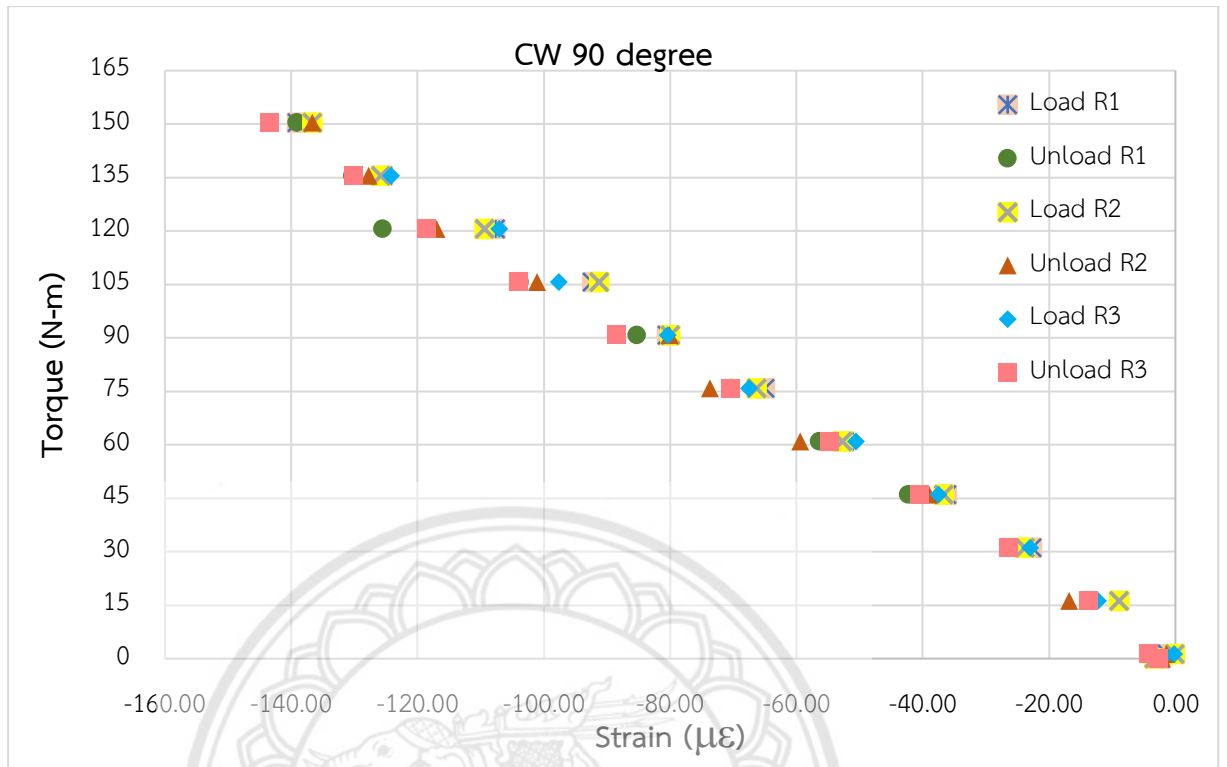
0 degree				
Load no.	Total Torque (N-m)	Strain ($\mu\epsilon$)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0.00	-5.7758	-5.5988	-9.4881
0.1	1.34	-6.5346	-8.4611	-9.7744
1	16.25	-11.7990	-13.5640	-16.8980
2	31.16	-28.9780	-30.0220	-28.0090
3	46.08	-42.4910	-41.0030	-40.3770
4	60.99	-54.9240	-54.1400	-58.4400
5	75.90	-70.4230	-70.9990	-67.8210
6	90.81	-83.0770	-84.3140	-83.2990
7	105.72	-93.9700		-99.0120
8	120.63	-113.8200	-112.6600	-103.6200
9	135.54	-126.8500	-125.1900	-127.9600
10	150.45	-141.1800	-142.9300	-137.2100
9	135.54	-135.8800	-128.9100	-132.5400
8	120.63	-118.9900	-123.3700	-110.7200
7	105.72	-110.2700	-109.3100	-104.6400
6	90.81	-93.7680	-91.8000	-87.2590
5	75.90	-75.6940	-72.8020	-79.3640
4	60.99	-57.4510	-60.5400	-65.3850
3	46.08	-49.1140	-53.4600	-51.5430
2	31.16	-35.4620	-38.3630	-34.7360
1	16.25	-23.0500	-21.5330	-21.3830
0.1	1.34	-6.1008	-9.3516	-5.3398
0	0.00	-5.7576	-8.9685	-6.7008



รูปที่ ก1 แสดงกราฟการทดสอบมุม 0 องศา ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ตารางที่ ก2. ค่าการทดสอบมุม 90 องศา ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

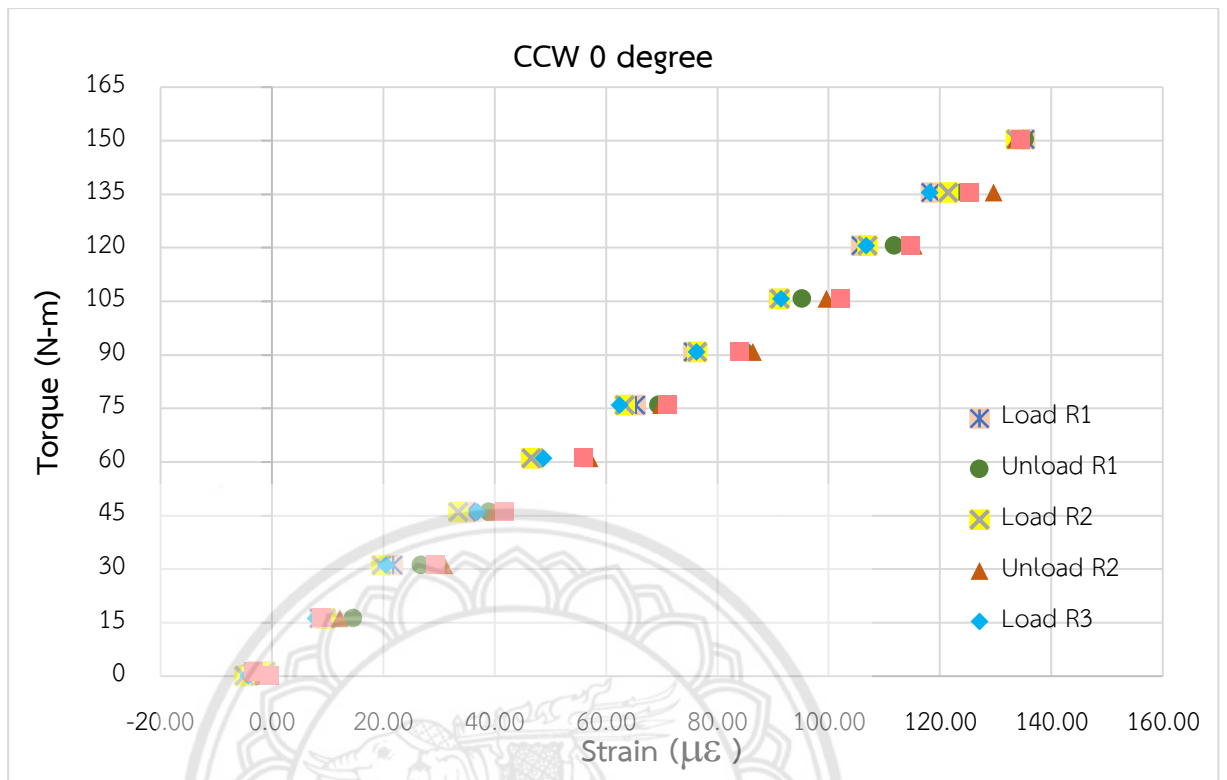
90 degree				
Load no.	Total Torque (N-m)	Strain ($\mu\epsilon$)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0.00	-2.3873	-3.3257	-2.1387
0.1	1.34	-1.3444	-0.0429	-0.2070
1	16.25	-8.9525	-8.8705	-12.2820
2	31.16	-22.6670	-23.8450	-23.0320
3	46.08	-36.1680	-36.6940	-37.4820
4	60.99	-52.3640	-52.7400	-50.5710
5	75.90	-65.0130	-66.2750	-67.4950
6	90.81	-80.5400	-80.0070	-80.4260
7	105.72	-92.3350	-91.2100	-97.6230
8	120.63	-107.7100	-109.4100	-107.0200
9	135.54	-125.4800	-125.8100	-124.2200
10	150.45	-139.0600	-136.7100	-143.4900
9	135.54	-130.3100	-127.7300	-130.1100
8	120.63	-125.5300	-117.0100	-118.4800
7	105.72	-103.8100	-101.1000	-103.8800
6	90.81	-85.2930	-80.1050	-88.5370
5	75.90	-70.3560	-73.7030	-70.4190
4	60.99	-56.4090	-59.4350	-54.7810
3	46.08	-42.2750	-39.0410	-40.4440
2	31.16	-25.8780	-26.4140	-26.4900
1	16.25	-13.0590	-16.8450	-13.6390
0.1	1.34	-0.4257	-1.4346	-4.1493
0	0.00	-3.3257	-2.1487	-2.5876



รูปที่ ก2 แสดงกราฟการทดสอบมุม 90 องศา ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ตารางที่ ก3. ค่าการทดสอบมุม 0 องศา ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

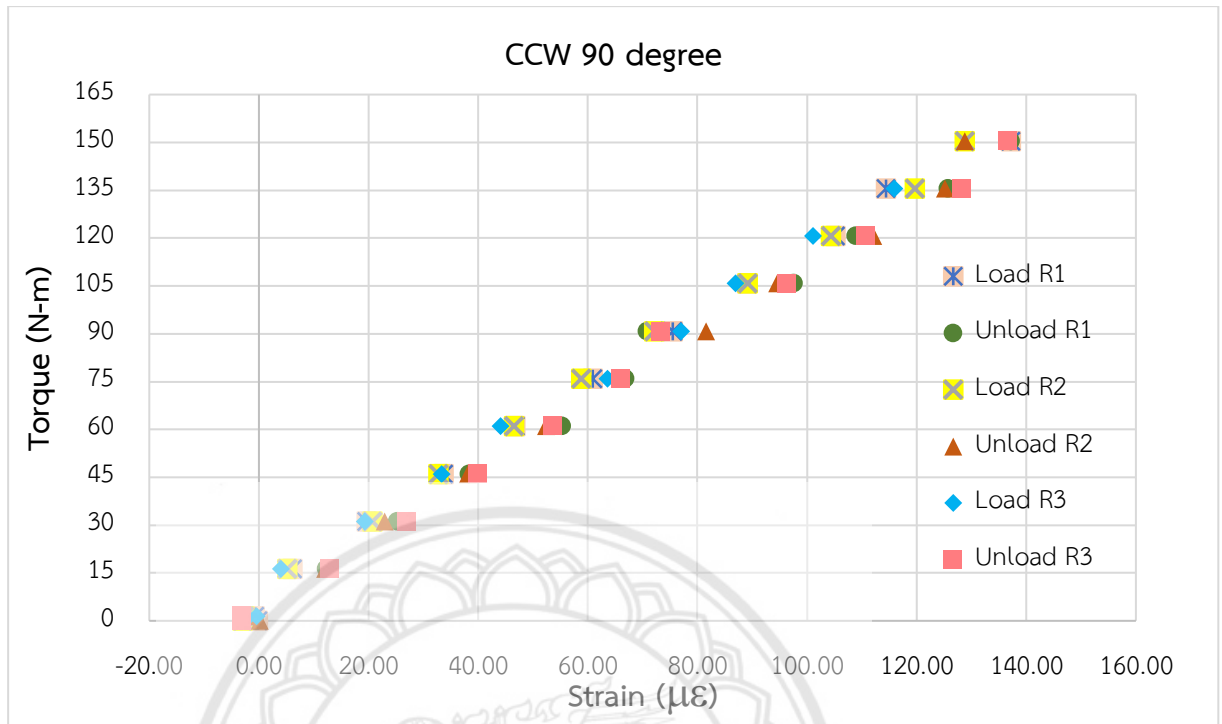
0 degree				
Load no.	Total Torque (N-m)	Strain ($\mu\epsilon$)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0.00	-4.2957	-4.9587	-4.2673
0.1	1.34	-2.7939	-1.1305	-2.9077
1	16.25	8.5243	9.6315	7.8371
2	31.16	21.7310	19.6720	20.5190
3	46.08	34.9820	33.4190	36.9710
4	60.99	46.9520	46.5290	48.8030
5	75.90	65.3770	63.4000	62.4560
6	90.81	75.6370	76.4220	76.2040
7	105.72	91.0630	91.1860	91.4590
8	120.63	105.7900	107.0100	106.7500
9	135.54	118.3300	121.4700	118.0700
10	150.45	135.2500	133.6100	134.4240
9	135.54	124.1100	129.6000	125.3700
8	120.63	111.7800	115.2300	114.7500
7	105.72	95.2670	99.5750	102.1500
6	90.81	84.8360	86.3820	83.9550
5	75.90	69.4510	69.9290	71.0290
4	60.99	46.5370	57.0080	55.9620
3	46.08	38.9720	39.9010	41.8950
2	31.16	26.8500	30.9080	29.4940
1	16.25	14.6530	12.2110	8.9852
0.1	1.34	-3.8540	-2.7127	-3.1800
0	0.00	-2.0621	-1.5637	-0.3913



รูปที่ ก3 แสดงกราฟการทดสอบมุม 0 องศา ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

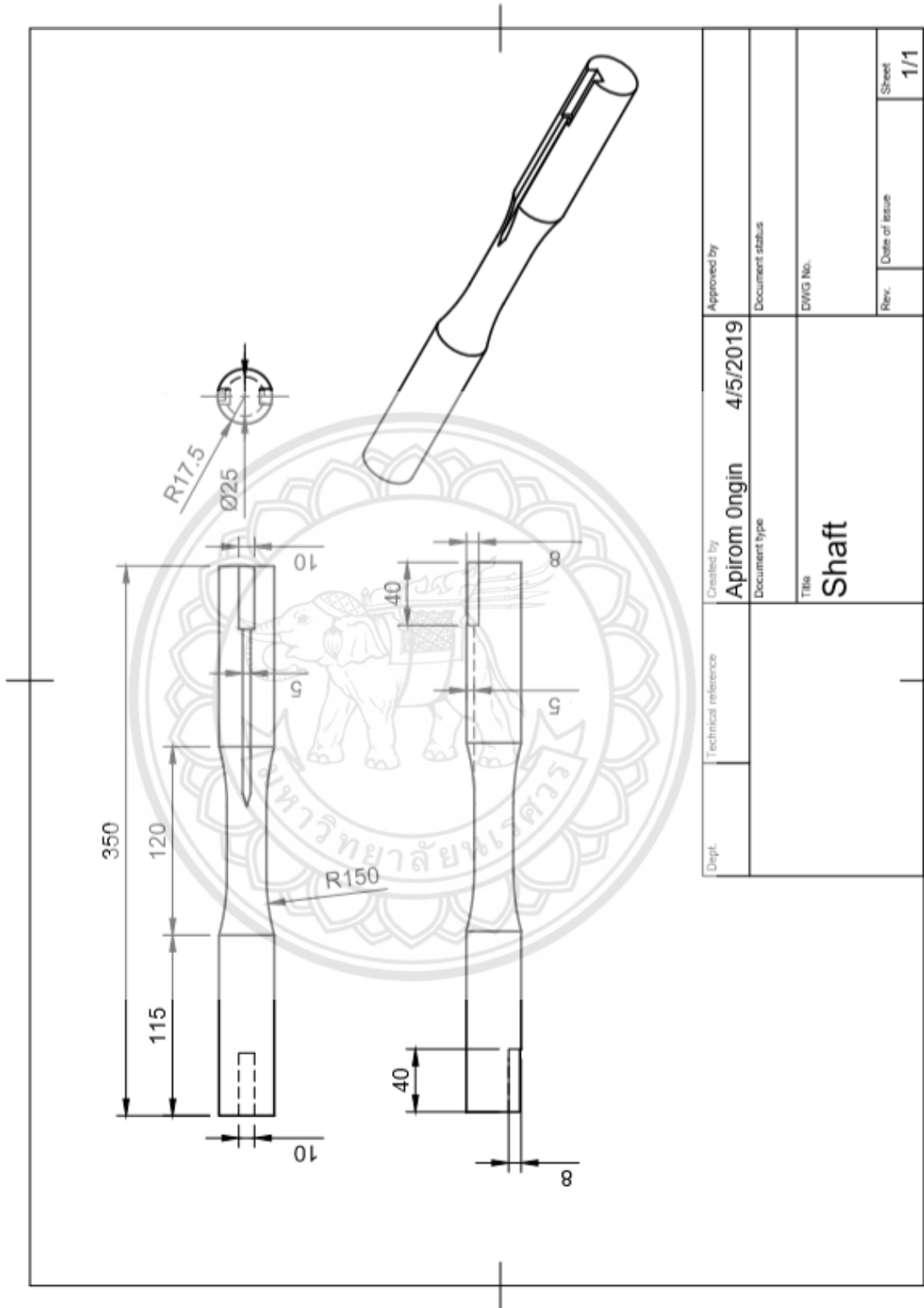
ตารางที่ ก4. ค่าการทดสอบมุม 90 องศา ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

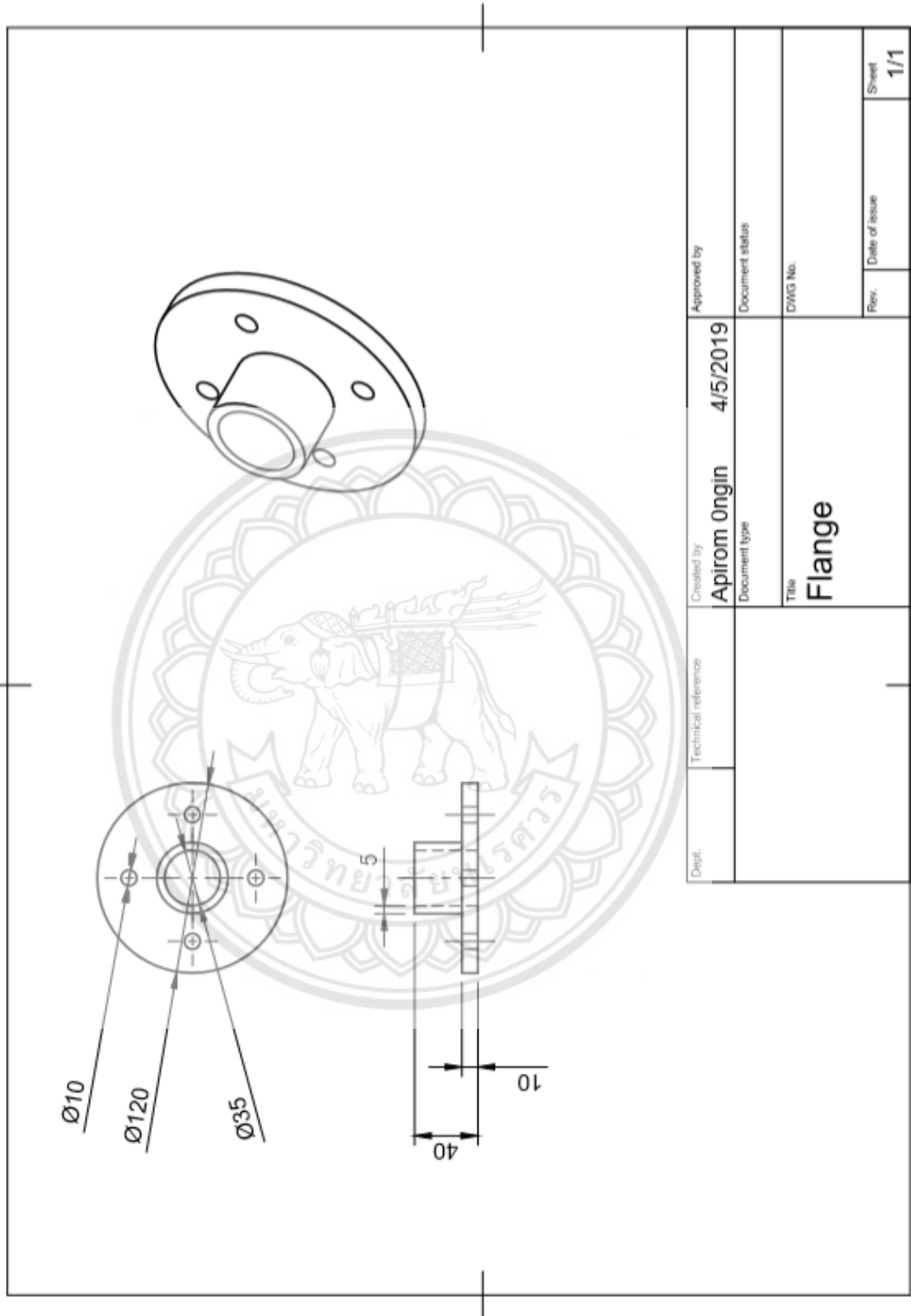
90 degree				
Load no.	Total Torque (N-m)	Strain ($\mu\epsilon$)		
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	0.00	-0.1511	-2.9699	-2.6160
0.1	1.34	-0.8351	-2.6138	-0.4425
1	16.25	6.1624	5.1266	3.9634
2	31.16	19.6640	20.7310	19.2920
3	46.08	33.7330	32.7300	33.3460
4	60.99	46.7750	46.5800	44.0700
5	75.90	60.8820	58.8510	63.6080
6	90.81	75.4970	72.1090	76.9830
7	105.72	89.0650	89.2300	86.9100
8	120.63	105.2200	104.4000	101.0500
9	135.54	114.4300	119.6600	115.8800
10	150.45	137.1600	128.8100	136.6000
9	135.54	125.7900	125.1400	128.2400
8	120.63	108.9500	112.0300	110.8400
7	105.72	97.5290	94.5110	96.3180
6	90.81	70.8830	81.5690	73.3360
5	75.90	66.8280	66.0350	66.0210
4	60.99	55.3180	52.3780	53.5110
3	46.08	38.3320	38.1720	40.0180
2	31.16	25.3090	22.9930	26.8760
1	16.25	12.2740	12.0220	12.9090
0.1	1.34	-1.7787	-0.3956	-3.0730
0	0.00	-0.7439	0.1592	-3.1380



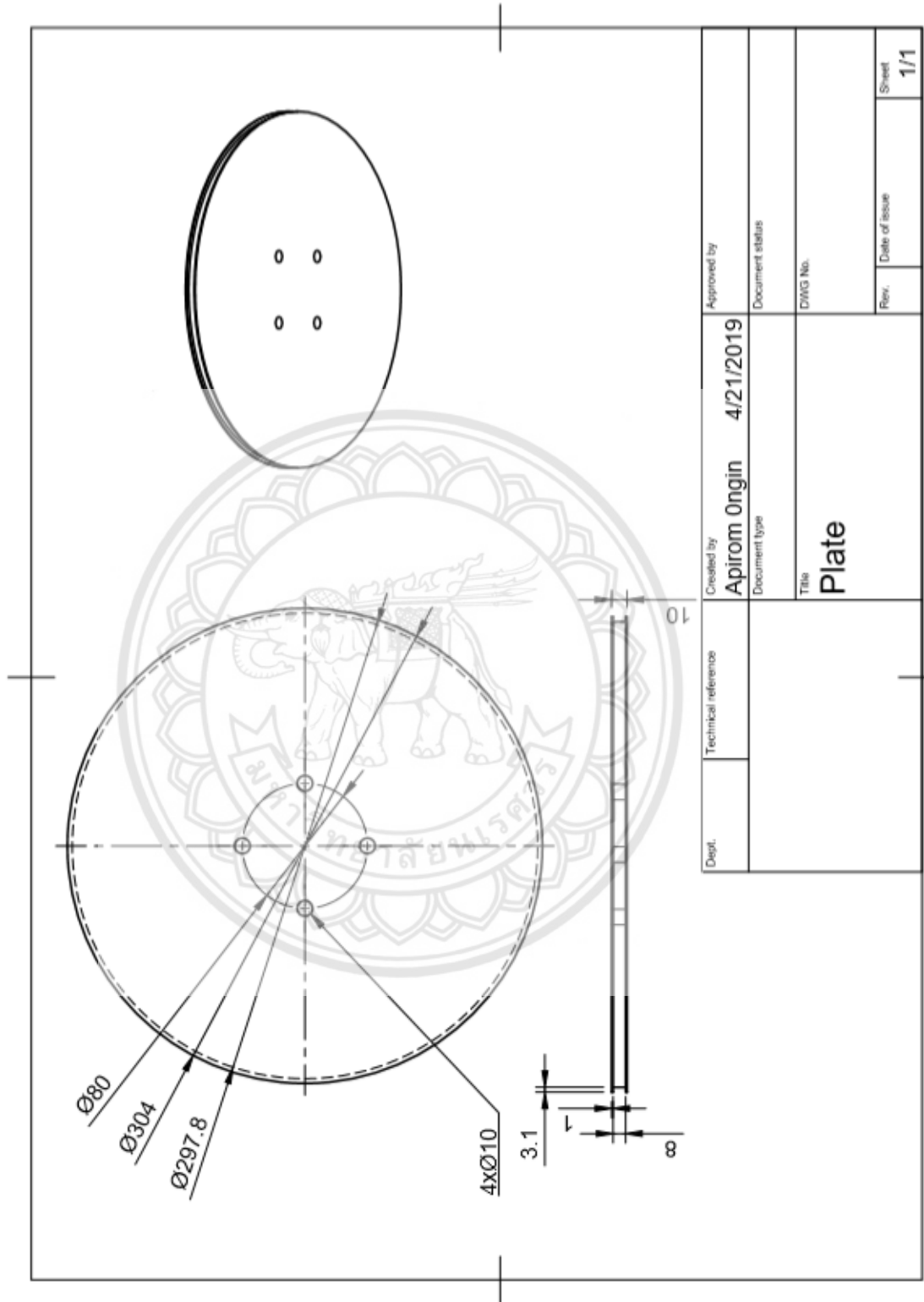
รูปที่ ก4 แสดงกราฟการทดสอบมุม 90 องศา ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



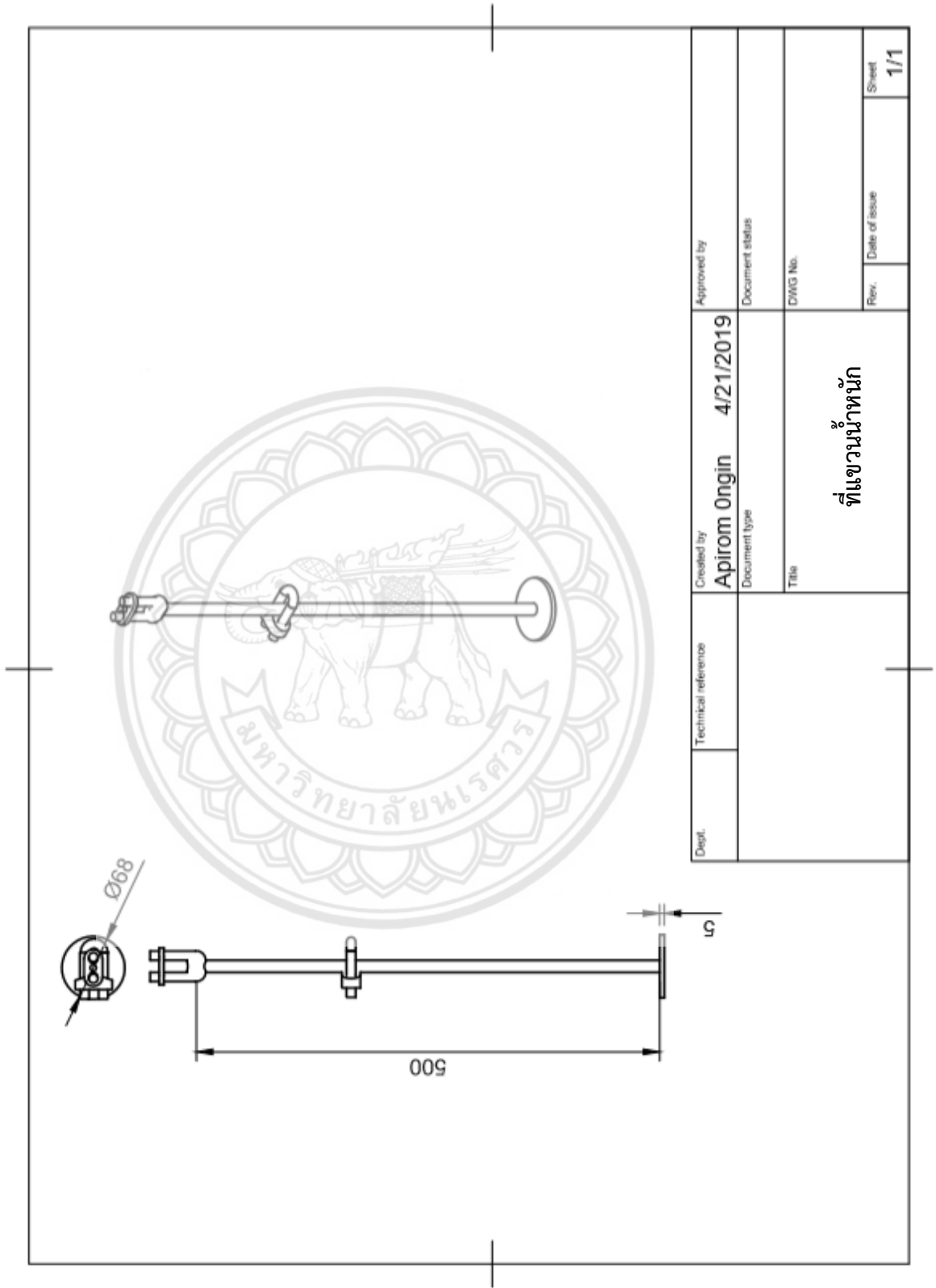




Dept.	Technical reference	Created by Apirom Ongin	4/5/2019	Approved by	
		Document type		Document status	
		Title Flange		DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet	1/1



Dept.	Technical reference	Created by Apirom Ongin	4/21/2019	Approved by	
		Document type		Document status	
		Title	Plate	DWG No.	
				Rev.	Date of issue
					Sheet 1/1



Dept.	Technical reference	Created by Apirom Ongin	4/21/2019	Approved by	
		Document type		Document status	
		Title	ที่แขวนน้ำหนัก	DWG No.	
				Rev.	Date of issue

