



การออกแบบอุปกรณ์วัดแรง

Design of force transducer

นายกัณยา	เด่นดวง	รหัสนิสิต	53361801
นายณัฐกานต์	ปิ่นประเสริฐ	รหัสนิสิต	53361948
นางสาวพฤกษา	นุมน้อย	รหัสนิสิต	53362105

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2556

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 20 ก.ค. 2558
เลขทะเบียน..... 1691A007
เลขเรียกหนังสือ..... 45.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๓๓๒ ๕

๒๕๕๖



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ	การออกแบบอุปกรณ์วัดแรง		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายกันยา	เด่นดวง	รหัสสถิติ 53361801
	นายณัฐกานต์	ปิ่นประเสริฐ	รหัสสถิติ 53361948
	นางสาวพุกษา	นุ่มน้อย	รหัสสถิติ 53362105
ที่ปรึกษาโครงการ	ดร.รัตนา การุญบุญญานันท์		
ที่ปรึกษาร่วมโครงการ	ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2556		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบรือรัมย์ อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร.รัตนา การุญบุญญานันท์)

.....ที่ปรึกษาร่วมโครงการ
(ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย)

.....กรรมการ
(อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์สุรเจษฎ์ สุขไชยพร)

ชื่อหัวข้อโครงการงาน	การออกแบบอุปกรณ์วัดแรง		
ผู้ดำเนินโครงการงาน	นายกันยา	เด่นดวง	รหัสนิสิต 53361801
	นายณัฐกานต์	ปิ่นประเสริฐ	รหัสนิสิต 53361948
	นางสาวพุกกา	นุมน้อย	รหัสนิสิต 53362105
ที่ปรึกษาโครงการงาน	ดร.รัตนา การุญบุญญานันท์		
ที่ปรึกษาร่วมโครงการงาน	ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2556		

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงชนิดคอลัมน์ที่สามารถวัดแรงในแนวแกน 1 แนวแกนขนาด 5 กิโลนิวตัน โดยใช้โปรแกรม SolidWorks ในการออกแบบชิ้นงานและวิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้สแตนเลส 304 (Stainless steel 304) มากถึงเพื่อสร้างอุปกรณ์วัดแรง และใช้สเตรนเกจที่มีขนาดความต้านทาน 350 โอห์ม จำนวน 4 ตัว แล้วทำการต่อวงจรบริดจ์ จากนั้นทำการทดสอบด้วยเครื่อง Universal testing machine (UTM) ผลจากการศึกษาและทดสอบพบว่าการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของการทดสอบโหนดเซลล์ของวงจรบริดจ์ I และวงจรบริดจ์ III เมื่อเทียบกับทฤษฎีได้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างตามลำดับดังนี้ 34.33 และ -1.49 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างผลการทดสอบวงจรบริดจ์ III เทียบกับทฤษฎี ที่มีการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้า (V) จาก 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ พบว่าค่า Sensitivity ของอุปกรณ์วัดแรงไม่แตกต่างกัน ซึ่งอยู่ในช่วง 0.8 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตาม ผลจากการทดสอบวงจรบริดจ์ III ที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนอุปกรณ์วัดแรงต่างกัน 3 ตำแหน่งคือ 0 , 120 และ 240 องศา พบว่า Sensitivity แตกต่างกันมาก (6 ถึง 28 เปอร์เซ็นต์) สามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์วัดแรงที่พัฒนาขึ้นนี้ประสบความสำเร็จและมีความสัมพันธ์ของความเครียด (บริดจ์ III) ไปในทิศทางเดียวกับทฤษฎี อย่างไรก็ตามหัวแรงกคควรจะสร้างให้เรียบมากขึ้นเพื่อปรับปรุงผลของการหมุน

Project title	Design of force transducer		
Name	Mr.Kanya Dandung	ID.	53361801
	Mr.Nattakan Punprasert	ID.	53361948
	Miss.Plusksa Numnoy	ID.	53362105
Project advisor	Dr.Rattana Karoonboonyanan		
Project co-advisor	Dr.Sumet Heamawatanachai		
Major	Mechanical Engineering		
Department	Mechanical Engineering		
Academic year	2014		

Abstract

This research focused on design and manufacture of a 5kN-column-type force transducer. Solid-works program was used to design the structure and analyze the installation position of strain gauges with finite elements methods. Stainless steel #304 was machined to create the transducer. Four strain gauges (sizes 350 ohms each) were bonded to the transducer to form wheatstone bridge circuit. Then the transducer was tested with Universal testing machine (UTM). The results of the study and test showed that, the difference percentage of load cell of bridge circuit I and bridge circuit III, comparing with theory were 34.33% and -1.49%, respectively. Three different excitation voltages (2.5, 5 and 10Volts) gave almost no different results in term of the sensitivity of the transducer ranging from 0.8% to 3%. However, the results from three different angular position (0, 120 and 240 degree) of the transducer gave large different results of the sensitivity (6% to 28%). These lead to conclusions that the developed force transducer was successfully made and the force-strain relationship (bridge III) agreed with results in theory. However, the compression adapter should be remake to be more parallel to improve the rotational effect.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจาก ดร.รัตนา การุณ บุญญานันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการและ ดร.สุเมธ เหมะวัฒน์ชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และวิธีการแก้ปัญหา ตลอดจนการดูแลเอาใจใส่ รวมถึง การติดตามการดำเนินงานโดยตลอดระยะเวลาที่ปฏิบัติงาน และขอขอบคุณคณะอาจารย์ภาค วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวรทุกท่าน ที่ได้มอบวิชา ความรู้ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการ ทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบ อาจารย์นพรัตน์ สีหะวงษ์ และ อาจารย์สุรเจษฎ์ สุขไชยพร

นอกจากนี้ต้องขอขอบพระคุณครูช่างวาฤทธิ์ ภมร ที่คอยช่วยอำนวยความสะดวกในเรื่อง ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นการยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ทำการทดลอง ภายในอาคารปฏิบัติการ วิศวกรรมเครื่องกล

สุดท้ายนี้ผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้ให้การดูแล อบรมสั่งสอนและ ให้กำลังใจมาตลอดการดำเนินโครงการ จนสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณเพื่อนที่คอยให้ความ ช่วยเหลือจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงมาด้วยดี

นายกันยา เต็นดวง
นายณัฐกานต์ ปั้นประเสริฐ
นางสาวพฤษชา นุ่มน้อย
พฤษภาคม 2557

ลำดับสัญลักษณ์

A	พื้นที่หน้าตัด (mm^2)
E	อีลาสติคโมดูลัส (GPa)
F	แรงกระทำ (N)
L	ความยาวเริ่มต้น (mm)
L_0	ความยาวที่เปลี่ยนไป (mm)
δ	อัตราการเปลี่ยนแปลงขนาด (mm)
ε	ความเครียด
ν	อัตราส่วนปัวซอง
σ	ความเค้น (N/m^2)
σ_y	ความเค้น (N/m^2)



สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
ลำดับสัญลักษณ์	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูปภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ	3
1.7 สถานที่ปฏิบัติการ	3
1.8 อุปกรณ์ที่ใช้	3
1.9 งบประมาณ	4

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	5
2.1 โพลดเซลล์	5
2.2 ทฤษฎีการออกแบบโพลดเซลล์	10
2.3 สเตรนเกจ	14
2.4 วงจรบริดจ์	18
2.5 การทดสอบโพลดเซลล์	22
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	27
3.1 ขอบเขตของการออกแบบโพลดเซลล์	27
3.2 การออกแบบโพลดเซลล์	28
3.3 การสร้างชิ้นงาน ติดตั้งสเตรนเกจและการต่อวงจร	41
3.4 การทดสอบโพลดเซลล์	44
3.5 วิธีการวิเคราะห์ผลการทดลอง	58
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล	60
4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงวงจรต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	60
4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	66
4.3 ผลของการทดสอบการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนต่อค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง	70

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการทดลอง	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง	78
ภาคผนวก ก	79
ภาคผนวก ข	85
ประวัติผู้จัดทำโครงการ	90



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 การบันทึกค่า preload	56
ตารางที่ 3.2 การเก็บข้อมูลครั้งที่ 1	57
ตารางที่ 3.3 การเก็บข้อมูลครั้งที่ 3	58
ตารางที่ 4.1 ผลของแรงกดกับค่าความเครียดทางทฤษฎีเทียบกับค่าความเครียดที่วัดได้จากการทดลอง โดยเลือกวงจรบรีดจ์ I และ วงจรบรีดจ์ III	61
ตารางที่ 4.2 การนำค่าเฉลี่ยของความเครียดที่อ่านได้ลบด้วยค่าตกค้างของวงจรบรีดจ์ I และวงจรบรีดจ์ III	63
ตารางที่ 4.3 แสดงผลของแรงกดกับค่าความเครียดของโพลีเมอร์ทางทฤษฎีเทียบกับค่าความเครียดที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์	66
ตารางที่ 4.4 การนำค่าเฉลี่ยของความเครียดที่อ่านได้ลบด้วยค่าตกค้างของวงจรบรีดจ์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์	68
ตารางที่ 4.5 ผลของแรงกดกับค่าความเครียดของโพลีเมอร์ทางทฤษฎีเทียบกับค่าความเครียดที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนโพลีเมอร์ที่ 0 , 120 และ 240 องศาตามลำดับ	71
ตารางที่ 4.6 การนำค่าเฉลี่ยของความเครียดที่อ่านได้ลบด้วยค่าตกค้างของวงจรบรีดจ์ III ที่ 0 , 120 และ 240 องศา	73

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain gage loage cell)	6
รูปที่ 2.2 โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก (Hydraulic load cell)	6
รูปที่ 2.3 โหลดเซลล์แบบนิวแมติก รูปตัว “S” (Pneumatic load cell)	7
รูปที่ 2.4 โหลดเซลล์แบบไพโซรีซิสทีฟ (PiezoreSistive)	8
รูปที่ 2.5 โหลดเซลล์แบบแมกเนโตสเตริกทีฟ (Magnetostractive)	8
รูปที่ 2.6 ชั้นส่วนรับน้ำหนักแบบคาน	9
รูปที่ 2.7 ชั้นส่วนรับน้ำหนักแบบคอลัมน์	9
รูปที่ 2.8 ชั้นส่วนรับน้ำหนักแบบวงแหวน	10
รูปที่ 2.9 แผนภูมิความเค้นกับความเครียด	11
รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของสเตรนเกจ	14
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของสเตรนเกจแบบ KFG Type	15
รูปที่ 2.12 ความหมายของสัญลักษณ์แต่ละตัวของสเตรนเกจ	16
รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการติดตั้งสเตรนเกจ	18
รูปที่ 2.14 วงจรบริดจ์	19
รูปที่ 2.15 ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจของวงจรบริดจ์ I	20
รูปที่ 2.16 วงจรบริดจ์ I	20
รูปที่ 2.17 ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจของวงจรบริดจ์ II	21
รูปที่ 2.18 วงจรบริดจ์ II	21
รูปที่ 2.19 ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจของวงจรบริดจ์ III	22
รูปที่ 2.20 วงจรบริดจ์ III	22
รูปที่ 2.21 วิธีการทดสอบโหลดเซลล์ด้วยเครื่อง UTM	23
รูปที่ 2.22 รูปร่างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์	24
รูปที่ 2.23 โครงสร้างโหลดเซลล์ชนิดคอลัมน์ รับน้ำหนักได้ 20 ตัน	25

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.24 การติดสเตรนเกจที่ตำแหน่งต่างๆบน EOR	26
รูปที่ 3.1 รูปลักษณะและขนาดของโพลดเซลล์	29
รูปที่ 3.2 เรียกชิ้นงานที่จะ simulation	30
รูปที่ 3.3 การเลือกชิ้นงาน	30
รูปที่ 3.4 การเรียก simulation	31
รูปที่ 3.5 การตั้งชื่อชิ้นงาน	31
รูปที่ 3.6 การเลือกชนิดแรงกระทำ	32
รูปที่ 3.7 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ	32
รูปที่ 3.8 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุ	33
รูปที่ 3.9 การเลือกชนิดการจับยึด	33
รูปที่ 3.10 การเลือกจุดจับยึด	34
รูปที่ 3.11 กำหนดชนิดแรงกระทำ	34
รูปที่ 3.12 เลือกจุดที่แรงกระทำ	35
รูปที่ 3.13 เลือกคำสั่ง Create Mesh	35
รูปที่ 3.14 การปรับขนาดของเอลิเมนต์	36
รูปที่ 3.15 การแสดงรายละเอียดของโมเดล	36
รูปที่ 3.16 รายละเอียดของโมเดล	37
รูปที่ 3.17 แบบจำลอง Mesh ของโพลดเซลล์	37
รูปที่ 3.18 แสดงผลของคำตอบ	38
รูปที่ 3.19 แสดงผลของคำตอบที่ทำการ simulation	38
รูปที่ 3.20 ความเค้นของโพลดเซลล์	39
รูปที่ 3.21 ความเครียดของโพลดเซลล์	40
รูปที่ 3.22 ชิ้นงานที่สร้างขึ้นที่ได้จากการออกแบบ	41

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.23 วัสดุอุปกรณ์	42
รูปที่ 3.24 ตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจ	43
รูปที่ 3.25 ชิ้นงานหลังจากการติดสเตรนเกจ	43
รูปที่ 3.26 การต่อวงจรบริดจ์ของโพลดเซลล์	44
รูปที่ 3.27 การติดตั้งโพลดเซลล์กับเครื่อง UTM	44
รูปที่ 3.28 indicator (Universal Strain Gage module NI-SCXI-1520	45
รูปที่ 3.29 ปุ่ม Switch ON-OFF	45
รูปที่ 3.30 Controller ของเครื่อง UTM	46
รูปที่ 3.31 หน้าจอเริ่มต้น	46
รูปที่ 3.32 ชุดเมนูของเครื่อง UTM	47
รูปที่ 3.33 การตั้งค่าความเร็วของเครื่อง UTM	47
รูปที่ 3.34 Display	48
รูปที่ 3.35 การติดตั้งโพลดเซลล์	48
รูปที่ 3.36 ปรับค่า F1 F2 และ F3	49
รูปที่ 3.37 Data Neighborhood	49
รูปที่ 3.38 NI-DaQmxTasks	50
รูปที่ 3.39 การตั้งค่าโปรแกรม	51
รูปที่ 3.40 การทดสอบ	51
รูปที่ 3.41 การตั้งชื่อไฟล์	52
รูปที่ 3.42 Number of samples to average และ Next	52
รูปที่ 3.43 Scientific Notation	53
รูปที่ 3.44 ตารางแสดงค่าของแรง (N) และความเครียด (strain)	53
รูปที่ 3.45 การทำการหมุนโพลดเซลล์จากมุม 0 , 120 และ 240 องศา	54

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.46 ขั้นตอนการทดสอบ	55
รูปที่ 4.1 การทดสอบระหว่างวงจรถัดจ I กับ III ที่ 2.5 โวลต์	62
รูปที่ 4.2 การทดสอบวงจรถัดจ I และ วงจรถัดจ III หลังจากหักค่าความเครียดตกค้าง	64
รูปที่ 4.3 การทดสอบวงจรถัดจ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์	67
รูปที่ 4.4 การทดสอบวงจรถัดจ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ หลังจากหักค่าความเครียดตกค้าง	69
รูปที่ 4.5 การทดสอบวงจรถัดจ III ที่ 2.5 โวลต์ และมีมุม 0 , 120 และ 240 องศา	72
รูปที่ 4.6 การทดสอบวงจรถัดจ III ที่ 2.5 โวลต์ ที่มีมุม 0 , 120 และ 240 องศา หลังหักค่าความเครียดตกค้าง	74



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาโครงการ

ในปัจจุบันมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรง (Load cell) หลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้ ซึ่งอุปกรณ์วัดแรงในปัจจุบันถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท เช่น การชั่งน้ำหนัก การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน ใช้ทดสอบทางด้านวัสดุ ทดสอบโลหะ ทดสอบคอนกรีต และทดสอบสมบัติทางกายภาพผลผลิตทางการเกษตร เป็นต้น คณะผู้ดำเนินโครงการจึงมีแนวคิดที่จะเรียนรู้และออกแบบอุปกรณ์วัดแรงขึ้น โดยอุปกรณ์วัดแรงที่จัดทำนั้นจะอาศัยหลักการยืดหดของวัสดุ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าความเค้น (Stress) และ ความเครียด (Strain) ในการตรวจวัดขนาดของแรง อุปกรณ์ที่จะศึกษาและออกแบบเรียกว่า โหลดเซลล์ ซึ่งภายในโหลดเซลล์จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า สเตรนเกจ (strain gage) บรรจุอยู่และเป็นตัวที่ใช้วัดความเครียดโดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงที่มากระทำ

ในการออกแบบโหลดเซลล์จำเป็นต้องอาศัยหลักการและความรู้ในเรื่องของความเค้นและความเครียดในการออกแบบและทำการออกแบบโดยโปรแกรม SolidWorks และ วิเคราะห์หาตำแหน่งการยึดหดโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element) ประกอบกัน เพื่อหาตำแหน่งที่จะติดตั้งสเตรนเกจที่เหมาะสมเพื่อจะได้อุปกรณ์วัดแรงที่เหมาะสม และนำไปทดสอบกับเครื่อง UTM (Universal Testing Machine)

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของสเตรนเกจและอุปกรณ์วัดแรง

1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรง

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.3.1 ได้อุปกรณ์วัดแรงที่สามารถผลิตขึ้นได้เอง
- 1.3.2 สามารถนำอุปกรณ์วัดแรงที่สร้างไปประยุกต์ใช้ในการติดตั้งเพื่อทำการวัดแรง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.4.1 ออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดแรงที่สามารถวัดแรงในแนวแกน 1 แนวแกนขนาด 5 กิโลนิวตัน
- 1.4.2 ออกแบบชิ้นงานด้วย SolidWorks
- 1.4.3 วิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 1.4.4 สร้างอุปกรณ์วัดแรงและทำการทดสอบด้วย เครื่อง UTM

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโพลดเซลล์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด
- 1.5.2 ศึกษาทฤษฎีการออกแบบโพลดเซลล์
- 1.5.3 ออกแบบชิ้นงานให้สามารถรับแรงในแนวแกนขนาด 5 กิโลนิวตันได้โดยใช้โปรแกรม SolidWorks ในการออกแบบและนำโพลดเซลล์ที่ออกแบบไปวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจ
- 1.5.4 สร้างชิ้นงานและติดสเตรนเกจตามตำแหน่งที่เหมาะสมและต่อวงจรไฟฟ้า
- 1.5.5 ทำการทดสอบกับเครื่อง UTM
- 1.5.6 วิเคราะห์ผลจากการทดสอบ
- 1.5.7 สรุปผลการดำเนินงาน
- 1.5.8 จัดทำรายงาน

1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

การดำเนินการ	ระยะเวลา													
	พ.ศ. 2556										พ.ศ. 2557			
	เม.ย	พ.ย	มิ.ย	ก.ค	ส.ค	ก.ย	ต.ค	พ.ย	ธ.ค	ม.ค	ก.พ	มี.ค	เม.ย	พ.ค
ศึกษาค้นคว้าข้อมูล	←→													
ออกแบบโพลดเซลล์				←→										
สร้างโพลดเซลล์						←→								
ทำการทดสอบโพลดเซลล์								←→						
สรุปผลการทดสอบ										←→				
จัดทำรายงาน													←→	

1.7 สถานที่ปฏิบัติการ

1.7.1 อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล

1.8 อุปกรณ์ที่ใช้

1.8.1 สเตรนเกจ

1.8.2 กาวติดสเตรนเกจ

1.8.3 สแตนเลส304

1.8.4 สายสัญญาณ

1.8.5 เครื่อง UTM

1.8.6 เครื่อง indicator (Universal Strain Gage modulen-scxi-1520)

1.9 งบประมาณ

1.9.1 ค่าเอกสารและกระดาษ	1,000 บาท
1.9.2 ค่าอุปกรณ์และสร้างชิ้นงาน	3,200 บาท
1.9.3 ค่าจัดทำรูปเล่มรายงาน	2,000 บาท
รวม	6,200 บาท



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

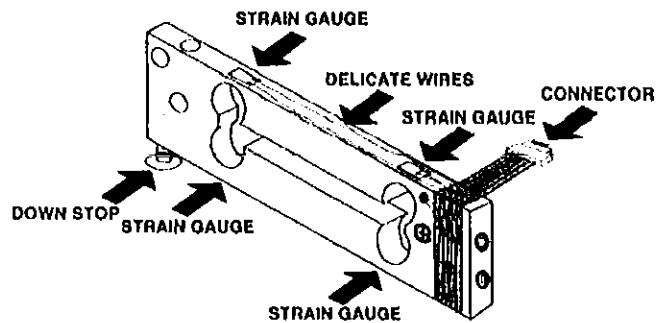
2.1 โหลดเซลล์ (Load cell)[1]

โหลดเซลล์คือ เซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าแรงกด หรือแรงดึง เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เหมาะสำหรับการทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Properties of Parts) โหลดเซลล์ ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภท ได้แก่ การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน (Press fit) ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุ โลหะ ทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ทดสอบไม้ เป็นต้น

2.1.1 ชนิดของโหลดเซลล์ (Load cell)

1.) โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain gage load cell)

หลักการของโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจคือ เมื่อมีน้ำหนักมากระทำ ความเครียดจะเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าในสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ ปกติแล้วมักจะใช้สเตรนเกจวัดความเครียด 4 ตัวต่อเป็นวงจรบริดจ์ (Wheatstone Bridge Circuit) โดยสเตรนเกจทั้งสี่จะเชื่อมต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้แปลงแรงที่กระทำกับตัวของสเตรนเกจไม่ว่าจะเป็นแรงกดหรือแรงดึง ส่งสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้าโดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะมีหน่วยเป็น mV/V (รูปที่ 2.1) หมายความว่า ถ้าจ่ายแรงดัน 10 V ให้กับ Load cell ที่มีคุณสมบัติ 2 mV/V ที่ Full load สมมติว่าน้ำหนักเป็น 2,000 กิโลกรัม ดังนั้นเมื่อมีแรงกระทำต่อโหลดเซลล์ สัญญาณที่อ่านได้ควรจะมีค่าเท่ากับ 20 mV

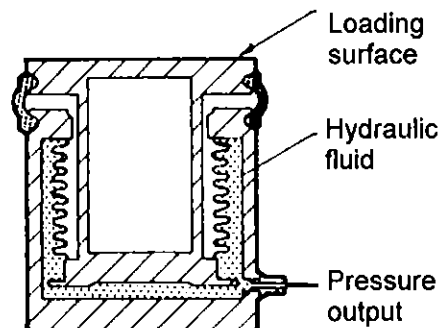


รูปที่ 2.1 โหลดเซลล์แบบสเตรนเกจ (Strain gage load cell)[1]

2.) โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก (Hydraulic load cell)

ลักษณะของการทำงานคือจะวัดน้ำหนักจากการเปลี่ยนแปลงความดันของของเหลวภายในระบบเมื่อมีแรงกระทำที่แท่นรับน้ำหนัก ในโหลดเซลล์แบบไฮดรอลิกที่มีแผ่นไดอะแฟรม โดยแรงจะถูกส่งผ่านลูกสูบเป็นผลให้ของเหลวภายในช่องแผ่นไดอะแฟรมถูกกดอัด ซึ่งการวัดแรงที่เกิดขึ้นสามารถวัดได้จากความดันของของเหลว (รูปที่ 2.2) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำกับแรงดันของของเหลวนี้มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นและไม่ขึ้นกับอุณหภูมิและปริมาณของของเหลวในกระบอกสูบ โดยปกติโหลดเซลล์แบบนี้จะมีความแม่นยำ (accuracy) ในการวัดอยู่ที่ประมาณ 0.3 % ที่ Full Scale ซึ่ง ระดับความแม่นยำนี้เป็นที่ยอมรับได้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป

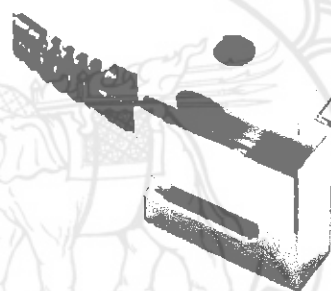
ข้อดีของโหลดเซลล์แบบนี้คือ สามารถที่จะใช้ในพื้นที่ที่อันตราย (hazardous area) เช่น พวกโรงงานที่มีวัตถุไวไฟต่างๆ เนื่องจากโหลดเซลล์แบบนี้ไม่ต้องใช้ไฟฟ้าในการวัด ข้อเสียของโหลดเซลล์แบบไดอะแฟรมนี้ คือสามารถรับแรงสูงสุดได้ไม่เกิน 1000 psi เท่านั้น ซึ่งจะไม่เหมาะกับการใช้ในงานที่ต้องการวัดแรงดันสูง



รูปที่ 2.2 โหลดเซลล์แบบไฮดรอลิก (Hydraulic load cell)[1]

3.) โหลดเซลล์แบบนิวแมติก (Pneumatic load cell)

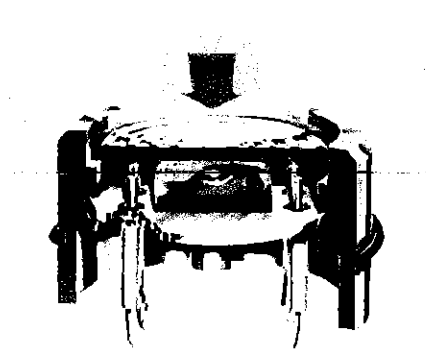
ทำงานโดยใช้หลักการสมดุลแรงเช่นเดียวกับแบบไฮดรอลิก แต่ต่างกันว่า โหลดเซลล์แบบนี้จะมีความแม่นยำกว่าแบบไฮดรอลิก เพราะว่ามีการใช้ช่องว่างหลายช่อง ในการหน่วงความดันของเหลวเพื่อลดแรงสั่นสะเทือน โหลดเซลล์แบบนี้ มักจะใช้วัดสิ่งของที่มีน้ำหนักไม่มากนักในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความสะอาดและความปลอดภัยสูง สำหรับจุดเด่นของโหลดเซลล์แบบนี้ คือสามารถทนแรงกระแทกได้สูงและไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ นอกจากนี้ในระบบนิวแมติกจะไม่ใช้ของเหลวในเครื่องมือวัดเหมือนกับระบบไฮดรอลิก ทำให้ไม่มีของเหลวมาปนเปื้อนโดนสิ่งที่ต้องการจะวัดในกรณีที่ได้อะพาร์ตมีการแตกรั่ว สำหรับข้อเสียของโหลดเซลล์แบบนี้คือความเร็วในการตอบสนองต่ำและต้องใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่สะอาดปลอดภัยความชื้น อีกทั้งยังจะต้องมีการควบคุมอากาศหรือไนโตรเจนภายในเครื่องให้เหมาะสม



รูปที่ 2.3 โหลดเซลล์แบบนิวแมติก รูปตัว “S” (Pneumatic load cell)[1]

4.) โหลดเซลล์แบบไพโซเรซิสทีฟ (Piezoresistive)

มีการทำงานเหมือนกับเกจวัดความเครียด แต่ไพโซเรซิสทีฟ สามารถผลิตสัญญาณออกมาได้ในระดับสูงจึงเหมาะสำหรับ เครื่องชั่งน้ำหนักที่ไม่ซับซ้อนในการวัดเนื่องจากสามารถต่อเข้าโดยตรงกับส่วนแสดงผล (รูปที่ 2.4) อย่างไรก็ตามเครื่องมือวัดลักษณะนี้ได้รับความนิยมลดลงเรื่อย ๆ เพราะตัวขยายสัญญาณที่มีคุณภาพดีนั้นมีราคาแพง นอกจากนี้ไพโซเรซิสทีฟยังมีข้อเสียคือความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณที่ออกกับน้ำหนักที่วัดมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 2.4 โหลดเซลล์แบบไพโซรีซิสทีฟ (Piezoresistive)[1]

5.) โหลดเซลล์แบบแมกเนโตสเตริกทีฟ (Magnetostrictive)

การทำงานของเซนเซอร์แบบนี้ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงในการแผ่สัญญาณแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรที่อยู่ภายใต้แรงที่มากระทำ แรงทำให้เกิดการผิดรูปของสนามแม่เหล็กและจะทำให้เกิดสัญญาณที่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อแรงที่มากระทำ ซึ่งจะใช้หลักการการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กโดยอุปกรณ์ลักษณะนี้จะตรวจวัดการเคลื่อนที่ของแกนแม่เหล็ก และวัดการเหนี่ยวนำของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป ในที่นี้การเคลื่อนที่ของแกนเหล็กจะแปรผันโดยตรงกับน้ำหนักที่วัด สำหรับโหลดเซลล์รูปแบบนี้มีความทนทานมากและยังคงมีใช้อยู่มากโดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมรีดโลหะ (รูปที่ 2.5)

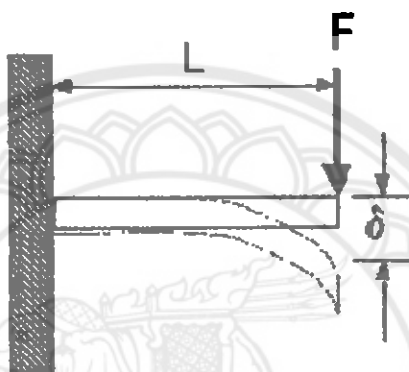


รูปที่ 2.5 โหลดเซลล์แบบแมกเนโตสเตริกทีฟ (Magnetostrictive)[1]

2.1.2 ประเภทของไหลตเซลล์แบบสเตรนเกจ[2]

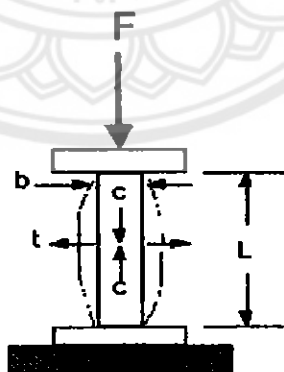
ไหลตเซลล์แบบสเตรนเกจสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังนี้

1.) แบบคาน (cantilever beam) ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคานนี้จะเป็นแบบที่ง่ายที่สุด ดังรูปที่ 2.6 โดยจะยึดปลายด้านหนึ่งไว้ในขณะที่ปลายอีกด้านหนึ่งจะทำหน้าที่รับน้ำหนัก เมื่อมีแรงมากระทำที่ปลายคานจะเกิดโมเมนต์ดัดขึ้น ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ ความเครียดสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ปลายคานด้านที่ยึดไว้



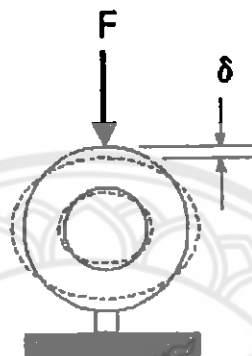
รูปที่ 2.6 ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคาน[2]

2.) แบบคอลัมน์ (column) ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคอลัมน์ ดังรูปที่ 2.7 เมื่อชิ้นส่วนรับแรงกด จะทำให้เกิดความเครียดสูงสุดขึ้นที่ตรงกลางคอลัมน์ โดยจะเกิดแรงกดขึ้นในแนวแกนและเกิดแรงดัดในแนวตั้งฉากกับแกน



รูปที่ 2.7 ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบคอลัมน์[2]

3.) แบบวงแหวน (proving ring) ชิ้นส่วนที่รับน้ำหนักแบบวงแหวน ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งความสามารถในการรับโหลดของมันจะขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความหนา หรือความกว้างของวงแหวน เมื่อมีแรงมากกระทำจะทำให้เกิดการยืดและการหดตัวของผิวด้านในและด้านนอกของวงแหวน ซึ่งจะเกิดมากที่สุด ณ ตำแหน่งที่ทำมุม 90 องศากับแนวแกนของแรงที่มากระทำกับชิ้นส่วนรับน้ำหนัก



รูปที่ 2.8 ชิ้นส่วนรับน้ำหนักแบบวงแหวน[2]

2.2 ทฤษฎีการออกแบบโพลดเซลล์[3]

2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด

ในกรณีที่โครงสร้างมีสมบัติทางกลคงที่ในทุกๆ ตำแหน่งและทิศทาง เนื้อวัสดุกระจายอย่าง ต่อเนื่องโดยไม่มีช่องว่างใด ๆ เกิดขึ้น และถูกกระทำจากแรงที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล ความเค้นตั้งฉาก (normal stress หรือ σ) สามารถนิยามได้จาก แรงที่มีทิศทางตั้งฉากกระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของ วัตถุ หรือ ความหนาแน่นของแรงกระจายบนพื้นที่หน้าตัด โดยมีขนาดเป็นบวก ถ้าแรงที่กระทำเป็น แรงดึง หรือมีขนาดเป็นลบถ้าแรงที่กระทำเป็นแรงอัด หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ ปาสคาล (Pa) ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

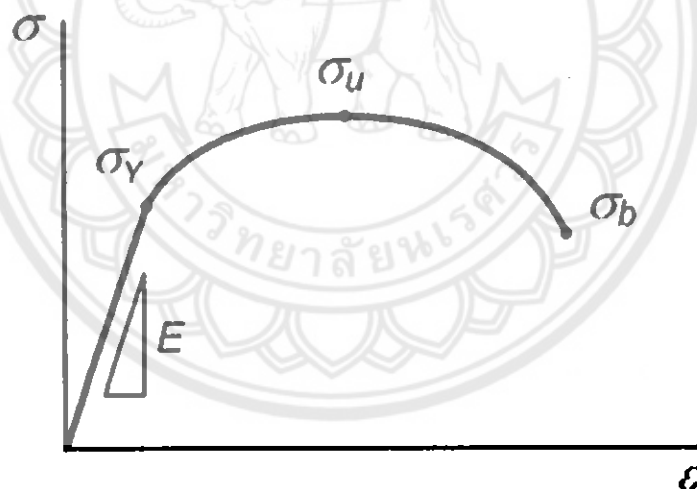
ความเครียด (strain, ϵ) คือ การเสียรูปต่อหน่วยความยาวของวัตถุภายใต้แรงกระทำ สามารถนิยาม ได้จากอัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด (δ) ต่อระยะปกติ (L_0) ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\delta}{L_0} \quad (2.2)$$

ความเครียดตั้งฉากหรือความเครียดตามแนวแกน (normal strain or axial strain หรือ ϵ_{axial}) หมายถึงการเสียรูปต่อหน่วยความยาวในทิศทางเดียวกับแรงที่กระทำ และเรียกการเสียรูปต่อความยาวในทิศทางตั้งฉากกับแรงที่มากระทำนี้ว่า ความเครียดในแนวขวาง (transverse strain หรือ $\epsilon_{\text{transverse}}$) อัตราส่วนระหว่างความเครียดในแนวขวางต่อความเครียดในแนวแกนนั้นเรียกว่า อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio หรือ ν) ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\nu = \frac{\epsilon_{\text{transverse}}}{\epsilon_{\text{axial}}} \quad (2.3)$$

ชิ้นส่วนทางวิศวกรรมตอบสนองกับภาระทางกลด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาด แสดงได้ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดหรือแผนภูมิความเค้นกับความเครียด (stress-strain diagram) ซึ่งถูกสร้างจากการทดสอบการดึง (tension test) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงและการเปลี่ยนแปลงขนาดถูกบันทึกระหว่างการทดสอบ ผลที่ได้นำมาคำนวณความเค้นและความเครียดและแสดงอยู่ในรูปกราฟที่มีความเครียดเป็นแกนนอนและความเค้นเป็นแกนตั้ง ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภูมิความเค้นกับความเครียด[3]

ส่วนแรกของแผนภูมิความเค้นกับความเครียดแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเค้นกับความเครียดซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุจะกลับคืนสู่สภาวะเดิมทันทีเมื่อปล่อยแรงที่มากระทำออก พฤติกรรมเช่นนี้ถูกเรียกว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดแบบอีลาสติก (elastic deformation) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยกฎของฮุก (Hooke's law) ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$\sigma = E\epsilon \quad (2.4)$$

โดย E คือ โมดูลัสของยังส์ (Young's modulus) หรือ โมดูลัสของอีลาสติคิตี (modulus of elasticity) วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบถาวรหรือการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก (plastic deformation) เมื่อเพิ่มความเค้นสูงกว่าความเค้นคราก (yield stress หรือ σ_y) โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติกนี้อาจเรียกว่าการคราก (yielding) ก็ได้ การเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติกจะเพิ่มสูงขึ้นตามความเค้นโดยเมื่อถึงความเค้นดิ่งสูงสุด (ultimate tensile stress หรือ σ_u) พื้นที่รับแรงจะลดขนาดลง (necking) ส่งผลให้ภาระที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติกลดลง และความเค้นที่คำนวณจากพื้นที่รับแรงเริ่มต้นลดลงไปด้วย ถ้ายังออกแรงกระทำกับวัสดุต่อไปในที่สุดวัสดุจะแยกออกจากกัน (breaking) โดยความเค้นที่เกิดการแยกออกจากกันนี้เรียกว่า ความเค้นที่เกิดการแยกออกจากกัน (breaking stress หรือ σ_b) [3]

2.2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์[4]

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์และเป็นวิธีที่นิยมใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง ซึ่งสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง เช่น วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความเค้นของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล โครงสร้าง เครื่องบิน ตัวสะพานและอาคารโครงสร้างอื่น ๆ ที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดี ไม่ว่าวัสดุที่ใช้วิเคราะห์นั้นจะอยู่ในสภาพยืดหยุ่น (elastic) หรือในสภาพยืดตัว (plastic) นอกจากจะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ปัญหาด้านสถิตศาสตร์ดังกล่าวแล้ว ยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านพลศาสตร์ได้ เช่น การสั่นสะเทือนของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล การสั่นสะเทือนของโครงสร้าง รวมทั้งยังสามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อนของของไหล การถ่ายเทมวล เป็นต้น

การวิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนเครื่องจักรกลทั่วไปที่ไม่ซับซ้อนเราสามารถจะหาความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งที่ต้องการทราบ เช่น การกระจัดที่ตำแหน่งใด ๆ ของชิ้นส่วนได้โดยอาศัยสมการเชิงอนุพันธ์ และผลเฉลยที่ได้รับจะเรียกว่า ผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) แต่มีชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและโครงสร้างจำนวนมากที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนที่ประกอบด้วยส่วนเว้า ส่วนโค้งต่าง ๆ ทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นส่วนไม่สม่ำเสมอ และบางบริเวณอาจมีการเปลี่ยนแปลงไหลดอย่างฉับพลัน หรือใช้วัสดุต่างชนิดกัน จึงมีผลทำให้ไม่สามารถจะหาผลเฉลยแม่นยำตรงจากสมการอนุพันธ์สามัญหรือสมการอนุพันธ์ย่อยได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องหาวิธีอื่น เช่น ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ประมาณค่าผลเฉลยโดยการแก้ระบบสมการเชิงพีชคณิต แทนการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ การแก้ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังกล่าว ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบของปัญหา จะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นย่อย ๆ อย่างต่อเนื่องตามรูปร่างลักษณะที่แท้จริงของชิ้นส่วน และจะเรียกชื่อชิ้นส่วนย่อยเหล่านี้ว่า เอลิเมนต์

1.) หลักการของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

หลักการทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ คือ แบ่งโครงสร้างออกเป็นส่วนย่อย ๆ ซึ่งเรียกว่า เอลิเมนต์ ฟังก์ชันการกระจัด (Displacement function) ที่นำมาแทนจะต้องเป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง แต่ละเอลิเมนต์จะโยงกันด้วยจุดต่อ (Node) หรือเส้นขอบหรือผิวรอบเอลิเมนต์สัมผัสกัน และโดยอาศัยคุณสมบัติทางกลของวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหรือชิ้นงาน เราสามารถจะหาการกระจัด ความเค้น ความเครียด ที่เกิดขึ้นที่จุดต่อต่างๆของแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบเป็นโครงสร้างหรือชิ้นงานออกมาได้

2.) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใน solidWorks[4]

กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยทั่วไปประกอบด้วย 7 ขั้นตอน ดังนี้

2.1) นำชิ้นงานที่ออกแบบด้วย solidWorks มาทำการทดสอบทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

2.2) สร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ (CAD model creation)

2.3) เรียกใช้ Simulation ภายในซอฟต์แวร์ SolidWorks

2.4) สร้างโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model)

2.5) กำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (boundary condition)

2.6) คำนวณหาคำตอบ

2.7) แสดงผลลัพธ์ที่ได้

3.) ข้อดีของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์[4]

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มีข้อดีดังนี้

3.1) สามารถสร้างแบบจำลองของโครงสร้างหรือชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อนได้เป็นอย่างดีและสะดวก

3.2) สามารถจำลองการกระทำของโหลดในสภาพต่าง ๆ เช่น โหลดที่กระจายไม่สม่ำเสมอได้ใกล้เคียงกับสภาพจริง

3.3) ใช้วิเคราะห์โครงสร้างหรือชิ้นส่วนระบบเครื่องจักรกลที่ประกอบด้วยวัสดุต่างชนิดกันได้โดยไม่มี ความยุ่งยาก

3.4) สามารถใช้วิเคราะห์ปัญหาไม่ว่า เงื่อนไขบังคับ และจุดรองรับจะอยู่ในลักษณะใด

3.5) สามารถจะเลือกขนาดของเอลิเมนต์ ที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งให้มีขนาดใหญ่หรือเล็กได้ตามความจำเป็น

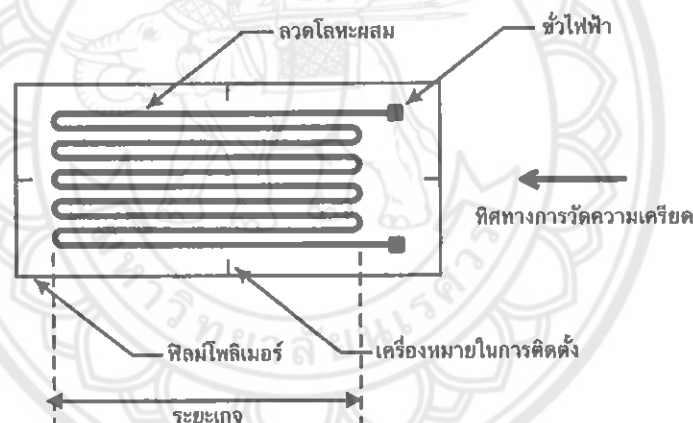
3.6) ในการออกแบบชิ้นส่วน ระบบสามารถจะเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้สะดวกและยังประหยัดค่าใช้จ่ายและเวลาด้วย

3.7) ในระบบการออกแบบและการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลสมัยใหม่ (CAD และ CAM) มักนิยมใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ห้ก่อน ก่อนที่จะผลิตชิ้นส่วนจริง ซึ่งทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและมีความถูกต้องแม่นยำสูง

3.8) ในกรณีของวัสดุยืดหยุ่นตัวไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) หรือการยืดหยุ่นของวัสดุในช่วงพลาสติก ก็ยังสามารถใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ห้สิ่งที่ต้องการได้ สะดวก เช่น ใช้วิเคราะห์การล้าตัว และการคืบ (Creep) ของชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เป็นต้น

2.3 สเตรนเกจ (Strain Gage)[5]

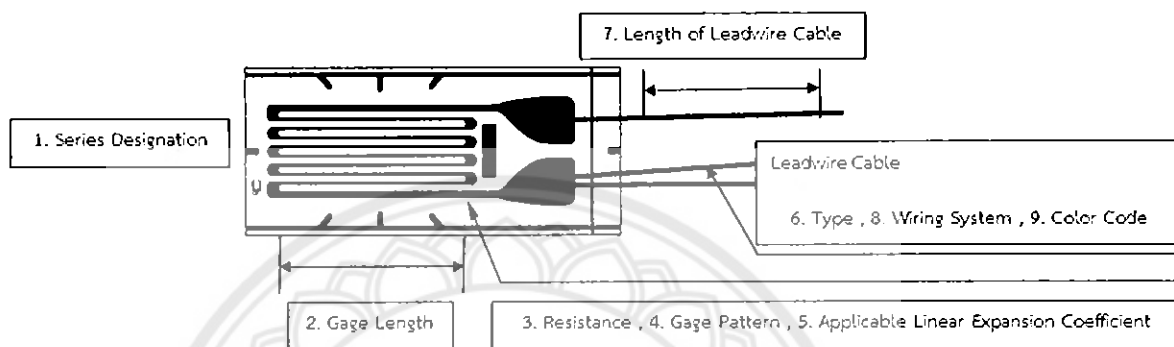
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความเครียดโดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า สเตรนเกจวัดความเครียดประกอบด้วยขดลวดที่ทำจากโลหะผสมที่มีความไวของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าต่อความเครียดสูง ขดลวดโลหะนี้จะถูกยึดติดบนแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ ซึ่งฟิล์มโพลีเมอร์นี้จะถูกยึดติดบนผิวของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่ต้องการวัดความเครียด ระยะของขดลวดใช้เป็นระยะสเตรนเกจในการวัดความเครียด ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของสเตรนเกจ[5]

2.3.1 การอ่านสัญลักษณ์สเตรนเกจ[6]

ในปัจจุบันสเตรนเกจมีให้เลือกใช้งานหลายรูปแบบ หลายประเภท และหลายยี่ห้อให้เลือกใช้ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของการนำไปใช้งาน โดยแต่ละแบบจะมีให้เลือกหลายรุ่นและจะมีสัญลักษณ์แตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 ซึ่งสามารถอ่านสัญลักษณ์ได้ดังนี้



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบของสเตรนเกจแบบ KFG Type[6]

ในโครงการนี้เป็นการออกแบบอุปกรณ์วัดแรงที่ใช้วัสดุเป็นสแตนเลส 304 โดยทำการเลือกใช้สเตรนเกจของ Kyowa รุ่น KFG-5-350-C1-16L30C2R สามารถอ่านสัญลักษณ์ได้จากรูปที่ 2.12 ได้ดังนี้

KFG = general-purpose foil strain gage

5 = gage length : 5 mm

350 = resistance : 350 Ω

C1 = gage pattern : Uniaxial , leads at one end

16 = applicable linear expansion coefficient : stainless steel SUS3304
 $16.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

L = Type : vinyl-coated flat 2 or 3-wire cable

30C = length : 30 CM

2 = wiring system : 2-wire system

R = color code : red

KFG - 2 - 120 - C1 - 11 L 1 M 3 R

① Series Designation	② Gage Length	③ Resistance	④ Gage Pattern	⑤ Applicable Linear Expansion Coefficient	⑥ Type	⑦ Length	⑧ Wiring System	⑨ Color Code
<p>KFG: General-purpose foil strain gage</p> <p>KFGT: Foil strain gage with temp. sensor</p> <p>KFR: Foil strain gage</p> <p>KFW: Waterproof foil strain gage</p> <p>KFWs: Small waterproof foil strain gage</p> <p>KCW: Weldable waterproof foil strain gage</p> <p>KC: Wire strain gage</p> <p>KM: Embedded foil strain gage for concrete</p> <p>KMC: Embedded wire strain gage for concrete</p> <p>KFRP: Foil strain gage for composite materials</p> <p>KFRS: Foil strain gage for printed boards</p> <p>KFP: Foil strain gage for plastics</p> <p>KFML: Foil strain gage for low-elasticity materials</p> <p>KSP: Semiconductor strain gage</p> <p>KSN: Self-temperature-compensation semiconductor strain gage</p> <p>KSPH: High-temperature semiconductor strain gage</p> <p>KSPPL: Ultralinear semiconductor strain gage</p> <p>KHXC: Encapsulated strain gage</p> <p>KHCD: Encapsulated strain gage</p> <p>KHCS: Encapsulated strain gage</p> <p>KHOM: Encapsulated strain gage</p> <p>KHC: Encapsulated strain gage</p> <p>KFL: High-temperature foil strain gage</p> <p>KFH: Weldable high-temp. foil strain gage</p> <p>KFH: High-temperature foil strain gage</p> <p>KFL: Low-temperature foil strain gage</p> <p>KLM: Ultrahigh-elongation wire strain gage</p> <p>KFEL: High-elongation foil strain gage</p> <p>KFN: Noninductive foil strain gage</p> <p>KFS: Shielded foil strain gage</p> <p>KFP: Foil bending strain gage</p> <p>KCH: Foil strain gage with protector</p> <p>KMP: Embedded foil strain gage for plastics</p> <p>KTB: Temperature gage</p> <p>KV: Crack gage</p>	<p>01S: 0.15mm</p> <p>02N: 0.2mm</p> <p>03: 0.25mm</p> <p>04: 0.3mm</p> <p>05: 0.5mm</p> <p>1N: 1mm</p> <p>1S: 1.5mm</p> <p>2N: 2mm</p> <p>3: 3mm</p> <p>4N: 4mm</p> <p>5: 5mm</p> <p>6: 6mm</p> <p>7: 7mm</p> <p>8: 8mm</p> <p>10: 10mm</p> <p>20: 20mm</p> <p>30: 30mm</p> <p>60: 60mm</p> <p>70: 70mm</p> <p>80: 80mm</p> <p>120: 120mm</p>	<p>50: 50Ω</p> <p>60: 60Ω</p> <p>120: 120Ω</p> <p>200: 200Ω</p> <p>350: 350Ω</p> <p>500: 500Ω</p> <p>1K: 1000Ω</p> <p>2K: 2000Ω</p> <p>10K: 10000Ω</p>	<p>A1: Uniaxial, leads at one end (K, KFD gages)</p> <p>A9: Uniaxial, leads at one end (KLM gages)</p> <p>C1: Uniaxial, leads at one end (foil gage)</p> <p>C2: Uniaxial 90°, leads at both ends</p> <p>C3: Uniaxial 0°, leads at both ends</p> <p>C9: Uniaxial, leads at one end (KFN gage)</p> <p>C11: Uniaxial, 2-element, 1mm thick (KFF gage)</p> <p>C12: Uniaxial, 2-element, 2mm thick (KFF gage)</p> <p>C15: Uniaxial 45°, for straining strain, leads at one end</p> <p>C16: Uniaxial 45°, for straining strain, leads at one end</p> <p>C20: Uniaxial, leads at a side (for both axial tension)</p> <p>D1: Biaxial 0°/90°, lead at both ends</p> <p>D2: Biaxial 0°/90°, lead at both ends (for torque)</p> <p>D3: Triaxial 0°/90°/45°, lead at both ends, plane arrangement</p> <p>D4: Triaxial 0°/120°/240°, plane arrangement</p> <p>D6: Quadraxial 0°/90°/90°/150°</p> <p>D8: Uniaxial 5-element 90°</p> <p>D16: Biaxial 0°/90° stacked rosette, round base</p> <p>D17: Triaxial 0°/90°/45° stacked rosette, round base</p> <p>D19: Uniaxial 5-element 0°</p> <p>D20: Biaxial 0°/90° (KFN gage)</p> <p>D22: Triaxial 0°/90°/45°, plane arrangement</p> <p>D25: Triaxial 0°/90°/45°, plane arrangement</p> <p>D28: Triaxial 0°/120°/240°, plane arrangement (for torque)</p> <p>D29: Biaxial 0°/90°, leads at one end, plane arrangement</p> <p>D30: Triaxial 0°/90°/45°, leads at one end, plane arrangement</p> <p>D31: Biaxial 0°/90°, leads at one end (for torque)</p> <p>D39: Biaxial 5-element 0°/90°</p> <p>E3: Uniaxial, lead at both ends (semiconductor gage)</p> <p>E4: Uniaxial, leads at one end (semiconductor gage)</p> <p>E5: Uniaxial, lead at both ends with no base (semiconductor gage)</p> <p>F2: Uniaxial 2-element (semiconductor gage)</p> <p>F3: Biaxial 0°/90° (semiconductor gage)</p> <p>G4: Uniaxial, leads at one end (KH-G4)</p> <p>G8: Uniaxial active/dummy 2-element, in-canal (for KHC)</p> <p>G9: Uniaxial active/dummy 2-element, SUS (for KHC)</p> <p>G10: Uniaxial (for KCH)</p> <p>G11: Uniaxial (for KHOD)</p> <p>G12: Uniaxial active/dummy 2-element (for KHCS)</p> <p>G13: Uniaxial active/dummy 2-element (for KHCC)</p> <p>G14: Full-bridge (for KCW)</p> <p>H1: Uniaxial active/dummy 2-element (for KHC)</p> <p>H15: Uniaxial (for KM-30)</p> <p>H2: Uniaxial (for KM-120)</p> <p>H3: Uniaxial (for KMC)</p> <p>H4: Uniaxial with T thermocouple (for KMC)</p> <p>J1: Uniaxial (for KFS)</p>	<p>1: CFRP, etc. for composite materials</p> <p>Amber (1.1)</p> <p>Diamond (1.2)</p> <p>3: GFRP, etc. for composite materials</p> <p>Silicon (2.3)</p> <p>Sulfur (2.7)</p> <p>5: GFRP, etc. for composite materials</p> <p>Tungsten (4.5)</p> <p>Lumber (5.0)</p> <p>Molybdenum (5.2)</p> <p>Zirconium (5.4)</p> <p>Kobar (5.9)</p> <p>6: GFRP, etc. for composite materials</p> <p>28: Tantalum (6.6)</p> <p>9: CFRP, GFRP, etc. for composite materials</p> <p>Titanium alloy (8.5)</p> <p>Platinum (8.9)</p> <p>Soda-lime glass (9.2)</p> <p>11: Common steel (11.7)</p> <p>SUS631 (10.3)</p> <p>SUS630 (10.6)</p> <p>Cast iron (10.8)</p> <p>Nickel-molybdenum steel (11.3)</p> <p>Beryllium (11.5)</p> <p>Inconel X (12.1)</p> <p>13: NCF, etc. for composites and heat-resistant alloys</p> <p>Nickel (13.3)</p> <p>Printed board (13.0)</p> <p>16: Stainless steel SUS304 (16.2)</p> <p>Beryllium steel (16.7)</p> <p>Copper (16.7)</p> <p>23: 2014-T4 aluminum (23.4)</p> <p>Brass (21.0)</p> <p>Tin (23.0)</p> <p>2024-T4 aluminum (23.2)</p> <p>27: Magnesium alloy (27.0)</p> <p>Composite material GFRP (35.0)</p> <p>65: Acrylic resin (65.0)</p> <p>Polycarbonate (66.6)</p>	<p>B: Glass-coated cable of 3 Ni-clad copper wires</p> <p>C: MI cable (for KHC, KHCD, KHCM, KHCS and KHCC gages)</p> <p>D: Glass-coated cable of 3 FeNi-clad copper wires</p> <p>F: Fluoplastic-coated high/low temp. 3-wire cable (equiv. to L-3 leadwire cable)</p> <p>G: Polyethylene-coated cross-link 3-wire cable</p> <p>H: High/low temp. 3-wire cable (equiv. to L-17 leadwire cable)</p> <p>J: Vinyl-coated normal temp. low-noise 3-wire cable (equiv. to L-13 leadwire cable)</p> <p>L: Vinyl-coated flat 2 or 3-wire cable (L-6, L-7, L-9 or L-10)</p> <p>N: Polyester-coated copper wire cable</p> <p>R: Mid-temp. 2 or 3-wire cable (L-11 or L-12)</p> <p>W: Vinyl-coated flat 3-wire cable (for KM-120)</p> <p>Y: Vinyl-coated flat 2-wire cable (for KM-30)</p>	<p>2: 2-wire system</p> <p>3: 3-wire system</p> <p>In the case of encapsulated gage Number: Length of soft cable</p> <p>N: With bridge adapter</p> <p>F: With compression fitting</p> <p>FV: With both bridge adapter and compression fitting</p>	<p>Color codes are available for only vinyl-coated flat leadwire cables.</p> <p>2-wire system</p> <p>R: Red</p> <p>W: White</p> <p>B: Black</p> <p>G: Green</p> <p>Y: Yellow</p> <p>*Custom-made</p> <p>S: Multi-axial gages (Standard)</p> <ul style="list-style-type: none"> Biaxial (D16) 0° (1st axis): Red 90° (2nd axis): White Triaxial (D17) 0° (1st axis): Red 45° (3rd axis): Green 90° (2nd axis): White <p>3-wire system</p> <p>The insulator color is white and the stripe color code is as follows.</p> <p>R: Red</p> <p>L: Blue</p> <p>B: Black</p> <p>G: Green</p> <p>Y: Yellow</p> <p>*Custom-made</p> <p>S: Multi-axial gages (Standard)</p> <ul style="list-style-type: none"> Biaxial (D16) 0° (1st axis): Red 90° (2nd axis): Black Triaxial (D17) 0° (1st axis): Red 45° (3rd axis): Blue 90° (2nd axis): Black 	

รูปที่ 2.12 ความหมายของสัญลักษณ์แต่ละตัวของสเตรนเกจ[6]

2.3.2 การติดตั้งสเตรนเกจ[5]

การติดตั้งสเตรนเกจที่ดีประกอบด้วย 3 หลักการ คือ

- 1.) ขนาดและทิศทางของความเครียดของวัสดุต้องถ่ายทอดไปยังสเตรนเกจได้อย่างสมบูรณ์
- 2.) ไม่เกิดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน
- 3.) รักษาความสามารถในการวัดความเครียดได้ในเวลาที่ต้องการ

โดยขั้นตอนการติดตั้งสเตรนเกจมีรายละเอียดดังนี้และแสดงได้ดังรูปที่ 2.13

1.) พื้นผิวของวัสดุต้องมีความหยาบที่เหมาะสม เพื่อให้กาวสามารถยึดสเตรนเกจเข้ากับวัสดุได้ดี การเพิ่มความหยาบของผิวในกรณีที่ผิววัสดุเรียบสามารถทำได้โดยการขัดด้วยกระดาษทราย ลักษณะการขัดจะขัดแบบวนๆ (รูปที่ 2.13 (1)) เพื่อขจัดสิ่งสกปรกต่างๆบนผิว เช่น เศษวัสดุ ผุ่น คราบน้ำมัน สารเคมี สี

2.) ทำให้พื้นผิวของวัสดุมีความเรียบโดยทำการขัดไปในทิศทางเดียวกัน (รูปที่ 2.13 (2)) เพราะถ้าพื้นผิวของวัสดุไม่เรียบอาจส่งผลให้สเตรนเกจไม่สามารถยึดติดกับผิววัสดุได้อย่างสมบูรณ์ การทำความสะอาดผิวสามารถทำได้โดยการเช็ดด้วยสารเคมี เช่น อะซิโตน ล้างด้วยน้ำสะอาด และทำให้แห้ง

3.) กาวที่ใช้ติดตั้งสเตรนเกจต้องเป็นกาวที่มีความแข็งแรงสูง ทนทาน และสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุได้ทันที ดังนั้นกาวที่ใช้สำหรับติดตั้งสเตรนเกจจึงขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ การใช้กาวต้องทาลงบนส่วนล่างของฟิล์มโพลีเมอร์ (รูปที่ 2.13 (3)) โดยใช้ในปริมาณที่เหมาะสม มีปริมาณเพียงพอที่จะยึดสเตรนเกจกับผิววัสดุได้อย่างแข็งแรง แต่ไม่มากเกินไปจนส่งผลกระทบกับการเปลี่ยนแปลงของขนาดวัสดุ

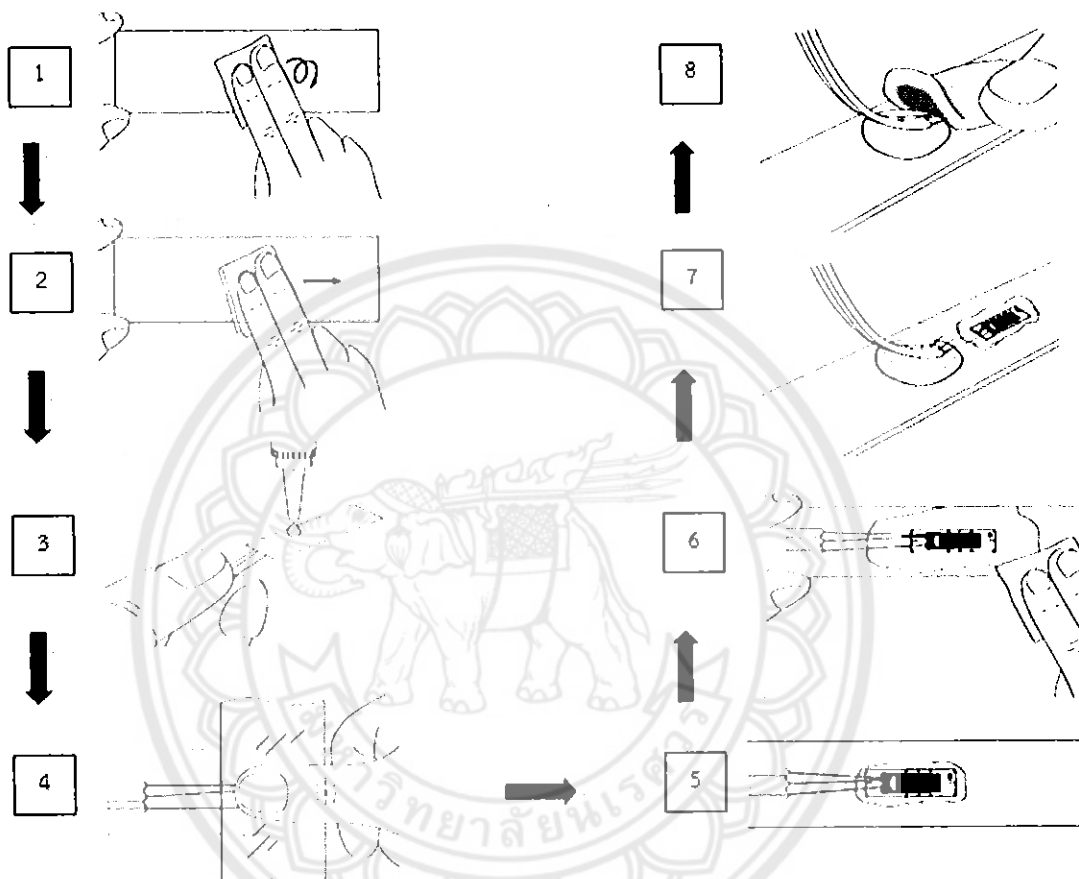
4.) การติดตั้งต้องวางตำแหน่งสเตรนเกจให้อยู่ในทิศทางของความเครียดที่ต้องการวัด (รูปที่ 2.13 (4))

5.) การกระจายกาวต้องสม่ำเสมอและทั่วถึงทุกส่วนของสเตรนเกจ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้แผ่นโพลีเมอร์พิเศษกดสเตรนเกจให้แนบติดกับผิวของวัสดุจนกระทั่งกาวแข็งตัว (รูปที่ 2.13 (5)) โดยแผ่นโพลีเมอร์นี้มีสมบัติไม่ติดกาว และถูกจำหน่ายพร้อมกับสเตรนเกจ กาวติดสเตรนเกจอาจเสื่อมสภาพจากความชื้นได้

6.) ทำความสะอาดคราบต่างๆ เช่น คราบกาว ภายหลังจากการติดสเตรนเกจ (รูปที่ 2.13 (6))

7.) หลังจากทีกาวแข็งตัวอย่างสมบูรณ์แล้วสเตรนเกจควรถูกเคลือบด้วยซีเมนต์เพื่อป้องกันความชื้น (รูปที่ 2.13 (7) และ (8))

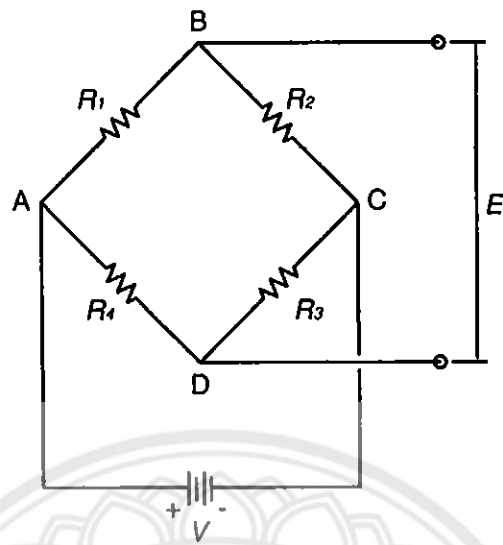
8.) สเตรนเกจอาจถูกดึงจากสายสัญญาณไฟฟ้าจนหลุดจากผิววัสดุได้ ดังนั้นสายสัญญาณไฟฟ้าจึงควรถูกยึดด้วยกาวหรือเทปกาว



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการติดตั้งสเตรนเกจ[5]

2.4 วงจรบริดจ์[3]

การวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นในการใช้เกจวัดความเครียดจึงวัดการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔE) ที่เกิดขึ้นในวงจรวีทสโตนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) ซึ่งสามารถตรวจวัดได้สะดวกกว่าการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรบริดจ์[3]

โดยความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด A และ B และความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด A และ D คำนวณได้จากสมการที่ 2.5 ถึง 2.8

$$V_{AB} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V \quad (2.5)$$

$$V_{AD} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot V \quad (2.6)$$

$$V_{BD} = V_{AD} - V_{AB} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot V - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V \quad (2.7)$$

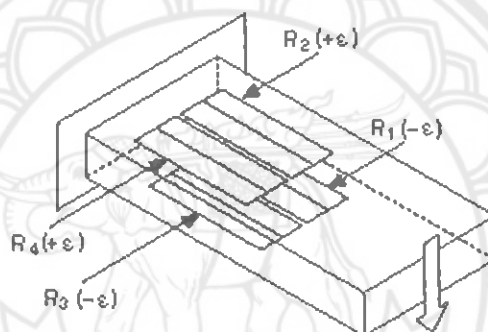
$$V_{BD} = \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot V \quad (2.8)$$

2.4.1 ชนิดของการต่อวงจรบริดจ์[7]

ในการทำการทดสอบจะต้องมีการเลือกวงจรบริดจ์ ซึ่งชนิดของวงจรบริดจ์จะขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้งสเตรนเกจและการต่อวงจร สำหรับวงจรจะมีการต่อลักษณะคล้ายกัน โดยอ้างอิงมาจากฐานข้อมูลโปรแกรม Instruments Measurement and Automation Explorer[7] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการทดสอบโพลดเซลล์ ชนิดของวงจรบริดจ์จะมีด้วยกัน 3 ชนิด ดังนี้

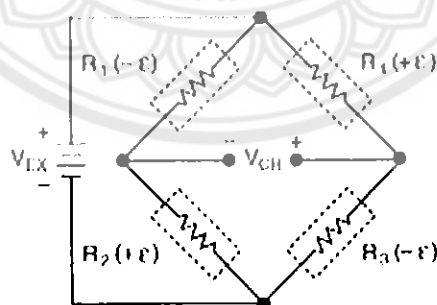
1.) วงจรบริดจ์ I

ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจของวงจรบริดจ์ I ดังรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าการติดตั้งสเตรนเกจติดในแนวเดียวกันทั้ง 4 ตัว เมื่อมีแรงมากระทำ จะทำให้สเตรนเกจทั้ง 4 ตัว เกิดความเครียดตามแนวแกน วงจรไฟฟ้าของวงจรบริดจ์ I แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15 ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจของวงจรบริดจ์ I[7]

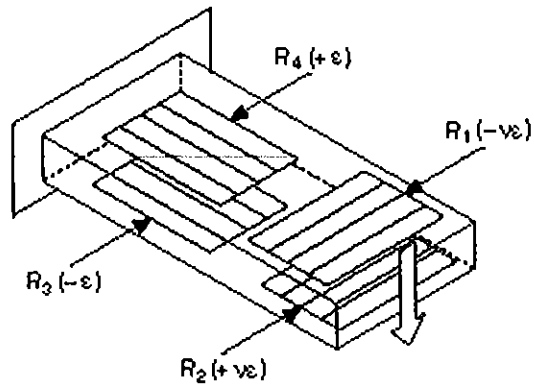
Full-Bridge Type I Circuit Diagram



รูปที่ 2.16 วงจรบริดจ์ I[7]

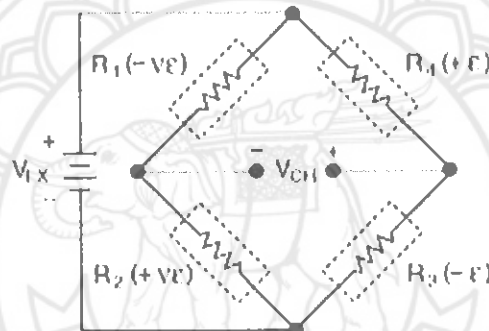
2.) วงจรบริดจ์ II

ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจของวงจรบริดจ์ II จะเห็นได้ว่าการติดตั้งสเตรนเกจมีการติดในแนวยาว 2 ตัว และมีการติดขวางแนวอีก 2 ตัว ดังรูปที่ 2.17 เมื่อมีแรงมากระทำในแนวตั้ง จะทำให้สเตรนเกจเกิดความเครียดตามแนวแกน 2 ตัว และเกิดความเครียดในแนวขวางอีก 2 ตัว ซึ่งความเครียดในแนวขวางที่เกิดขึ้นมีทิศทางตรงกันข้าม วงจรไฟฟ้าของบริดจ์ II แสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจของวงจรถับแรง II[7]

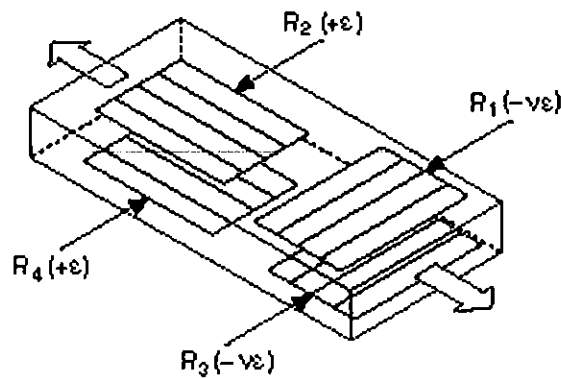
Full-Bridge Type II Circuit Diagram



รูปที่ 2.18 วงจรถับแรง II[7]

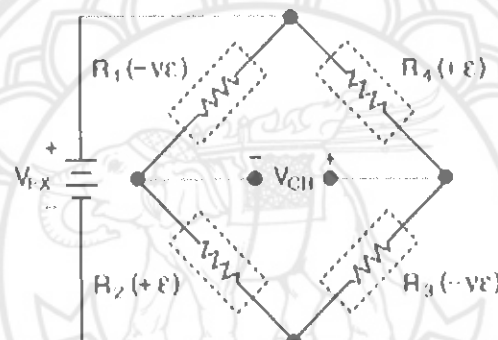
3.) วงจรถับแรง III

ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจของวงจรถับแรง III จะเห็นได้ว่าการติดตั้งสเตรนเกจมีการติดในแนวยาว 2 ตัว และมีการติดขวางแนวอีก 2 ตัว เหมือนกับวงจรถับแรง II แต่ชิ้นงานรับแรงในแนวแกน ดังรูปที่ 2.19 เมื่อชิ้นงานรับแรงในแนวแกนจะทำให้สเตรนเกจเกิดความเครียดตามแนวแกน 2 ตัว และเกิดความเครียดในแนวขวางอีก 2 ตัว ซึ่งความเครียดในแนวขวางที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ตัว มีทิศทางเดียวกัน วงจรไฟฟ้าของวงจรถับแรง III แสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจของวงจรบรีดจ์ III[7]

Full-Bridge Type III Circuit Diagram



รูปที่ 2.20 วงจรบรีดจ์ III[7]

การทำโครงงานนี้ มีการติดตั้งสเตรนเกจในโพลดเซลล์มีลักษณะคล้ายกับรูปที่ 2.19 ซึ่งเป็นวงจรบรีดจ์ III

2.5 การทดสอบโพลดเซลล์

2.5.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบโพลดเซลล์นิยมทดสอบด้วยเครื่อง UTM (Universal testing machine) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมและการศึกษาในการทดสอบสมบัติของวัสดุ โดยเป็นเครื่องที่สามารถให้แรงกระทำต่อชิ้นงานทั้งแรงดึง แรงอัดและดัด เป็นต้น ซึ่งการวัดแรงด้วยเครื่องUTM นั้น ทำได้โดยการอ่านค่าจากโพลดเซลล์ซึ่งติดตั้งที่เครื่องทดสอบแรง โดยเพื่อให้มั่นใจว่าค่าแรงที่อ่านได้มีความถูกต้องและผลการทดสอบวัสดุมีคุณภาพ จำเป็นต้องมีระบบสอบเทียบแรง ซึ่งโดยทั่วไปประยุกต์วิธีการตามมาตรฐาน ISO 7500-1[8]

ขั้นตอนการทดสอบโหลดเซลล์ด้วยเครื่อง UTM มีขั้นตอนดังนี้ (รูปที่ 2.21)

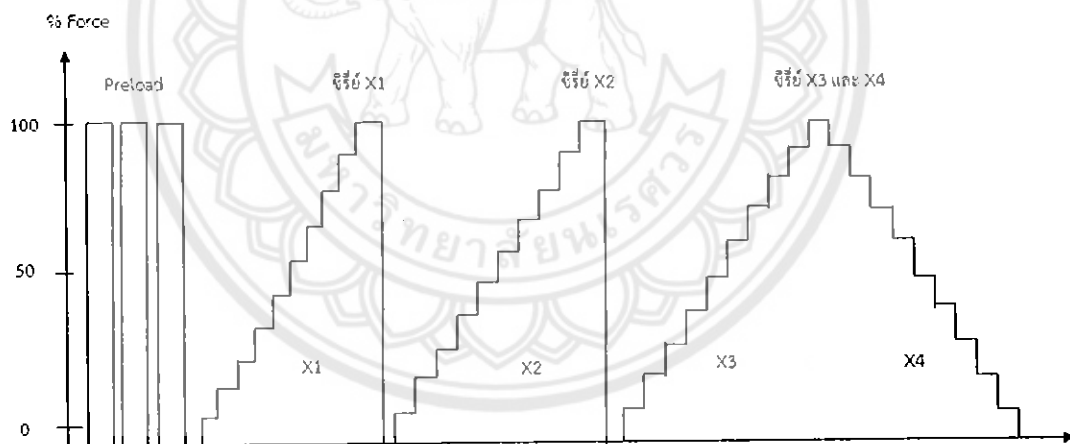
1.) การทำ preload เป็นการทำให้เป็นการวอร์มเครื่องก่อนทำการทดสอบ เริ่มจาก 0 นิวตันถึงแรงสูงสุดที่โหลดเซลล์สามารถรับได้ 100 เปอร์เซ็นต์ (Full load) ทำซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ

2.) ซีรี่ที่ X1 ใส่แรงเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงสูงสุดที่โหลดเซลล์สามารถรับได้จนครบ 100 เปอร์เซ็นต์ แล้วปล่อยแรงออก

3.) ซีรี่ที่ X2 ทำเหมือนกับ ซีรี่ที่ X1

4.) ซีรี่ที่ X3 จะทำแบบเดียวกับซีรี่ที่ X1 และ X2 แต่จะแตกต่างกันที่เมื่อทำการใส่แรงจนครบ 100 เปอร์เซ็นต์แล้ว จะทำการใส่แรงโดยลดขนาดของแรงลงครั้งละ 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงสูงสุดที่โหลดเซลล์สามารถรับได้

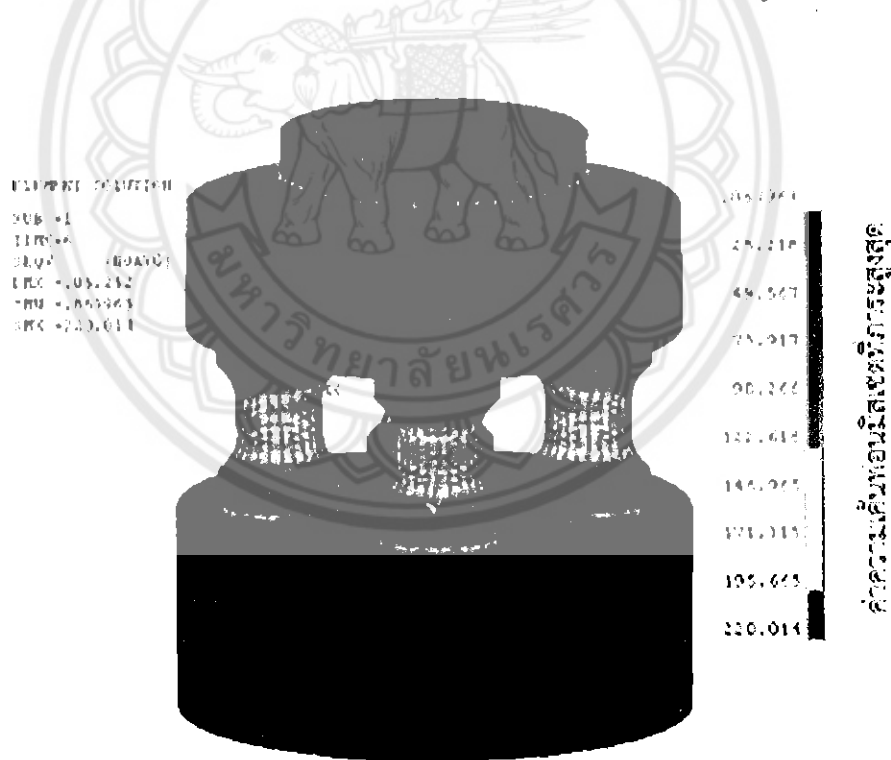
เนื่องจากอาจจะมีข้อผิดพลาดในการสร้างโหลดเซลล์จึงมีการหมุนโหลดเซลล์เป็นมุมต่างๆ เพื่อดูการเยื้องศูนย์



รูปที่ 2.21 วิธีการทดสอบโหลดเซลล์ด้วยเครื่อง UTM

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรสิทธิ์ และสุภกิจ[9] ได้ศึกษาออกแบบโพลีเซลล์ชนิดคอลัมน์ที่มีสมรรถนะรับน้ำหนักได้ 20 ตัน โดยใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขและวิธีการทดลอง การศึกษานี้ได้คำนึงถึงการออกแบบรูปร่างของโพลีเซลล์ภายใต้ข้อจำกัดของความเค้นไม่เกินค่าความเค้นพอนมิสเชส รวมวิเคราะห์ค่าผลตอบสนองความเครียดต่อภาระ ทำการศึกษาโดยสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของโพลีเซลล์ในระนาบ 3 มิติ และพิจารณาอิทธิพลการสัมผัสระหว่างแผ่นกดและโพลีเซลล์ การสร้างแบบจำลองเป็นแบบเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมแปดจุดต่อ และมีแบบจำลองของการสัมผัสเป็นแบบจุดสัมผัสกับพื้นผิว ผลของการศึกษาพบว่ารูปร่างโพลีเซลล์ที่ได้ทำการศึกษา มีค่าความเค้นสูงสุดอยู่ภายใต้ความเค้นครากของวัสดุ และที่ภาระใดๆทิศทางการเค้นหลัก ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งสเตรนเกจมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง รวมทั้งการกระจายความเครียดในแนวแกนบริเวณรอบผิวกึ่งกลางโครงสร้างเสา มีลักษณะกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และค่าความเครียดที่ได้จะมีลักษณะสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นต่อภาระกระทำ โดยที่ค่าความเครียดในแนวยาวจะมีค่าที่สูงกว่าค่าความเครียดในแนวเส้นรอบวง ทำการสร้างทดสอบ และวิเคราะห์ค่าการวัดทางกลของโพลีเซลล์ที่ได้ออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 และ 2.23

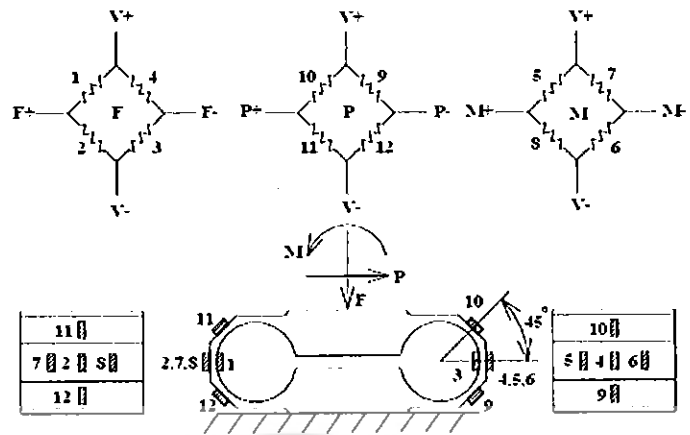


รูปที่ 2.22 รูปร่างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์[9]



รูปที่ 2.23 โครงสร้างโพลีเซลล์ชนิดคอลัมน์ รับน้ำหนักได้ 20 ตัน[9]

สุรินทร์ และคณะ[10] ได้ทำการออกแบบรูปร่างและการจัดเรียงโบริดจอบวมที่เหมาะสม ในการศึกษาจำเป็นต้องทราบขนาด ทิศทางและตำแหน่งของแรงกระทำที่โบริดจอบวม ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางแรงขณะพรวนอยู่ตลอดเวลา เทคนิคการวัดนี้ใช้อุปกรณ์วัดแรง Extended Octagonal Ring (EOR) ร่วมกับ Personal Computer Based Data Acquisition System (PC Based DAQ System) โดยบน EOR จะติดตั้งทรานเจกต์จำนวน 12 ตัวซึ่งต่อเป็นวงจรแบบ Full Bridge จำนวน 3 วงจร (ดังรูปที่ 2.24) สำหรับวัดแรงกด F แรงเฉือน P และโมเมนต์ M ที่เกิดจากแรงต้านทานบนระนาบที่ตั้งฉากกับเพล่าโบริด สัญญาณความต่างศักย์จากวงจรบริดจอบวม EOR จะถูกส่งผ่าน Slip Ring มายังชุดอุปกรณ์ขยายสัญญาณซึ่งขยายสัญญาณ 100 เท่า สัญญาณจะถูกส่งไปยัง Analog to Digital Card ภายในคอมพิวเตอร์จากนั้นโปรแกรม Lab View จะแสดงผลและบันทึกสัญญาณจากทั้ง 3 วงจร โปรแกรมจะทำการกรองสัญญาณที่บันทึกไว้และประมวลผลโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณความต่างศักย์จากทั้ง 3 วงจรกับแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับโบริดซึ่งได้จากการสอบเทียบ ผลจากการทดลองจะทราบขนาด ทิศทาง รวมถึงตำแหน่งของแรงต้านทานลัพท์ที่กระทำกับโบริดจอบวมหนึ่งใบที่ตำแหน่งการหมุนพรวนต่างๆ จากการทดลองวัดแรงกระทำที่โบริดขณะพรวนในกระบอกทรายที่ระดับความลึก 12 เซนติเมตร ระยะการตัด 3 เซนติเมตร ความเร็วจอบวม 50 รอบต่อนาที พบว่าสามารถวัดแรงและโมเมนต์ที่กระทำกับโบริดจอบวมได้ดีโดยสามารถวัดความเปลี่ยนแปลงของแรงขนาด 1 นิวตันได้และขนาดของสัญญาณรบกวนเล็กน้อยเมื่อเทียบกับขนาดของสัญญาณที่เกิดจากการพรวน



รูปที่ 2.24 การติดสเตรนเกจที่ตำแหน่งต่างๆบน EOR[10]



บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 ขอบเขตของการออกแบบโพลดเซลล์

การออกแบบโพลดเซลล์ ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบดังต่อไปนี้

- 1.) การนำโพลดเซลล์ไปใช้งาน
- 2.) วัสดุที่เลือกนำมาทำโพลดเซลล์ ควรจะทนต่อแรงกดได้ดี มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน และทนต่อการสึกกร่อน
- 3.) คุณสมบัติของโพลดเซลล์ สามารถรับแรงตามที่ออกแบบไว้โดยไม่เกิดความเสียหายของชิ้นงาน

โครงการวิจัยที่ทำการศึกษา มีขอบเขตการออกแบบโพลดเซลล์ดังนี้

- 1.) ออกแบบและสร้างโพลดเซลล์ที่สามารถวัดแรงกดในแนวแกน 1 แนวแกน ขนาด 5 กิโลนิวตัน
- 2.) เลือกโพลดเซลล์ชนิดคอลัมน์
- 3.) ออกแบบชิ้นงานด้วย SolidWorks
- 4.) เลือกใช้ สแตนเลส 304 ในการสร้างชิ้นงาน
- 5.) วิเคราะห์หาตำแหน่งการติดตั้งสเตรนเกจ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
- 6.) เลือกใช้ สเตรนเกจ Kyowa รุ่น KFG-5-350-C1-16L30C2R
- 7.) สร้างโพลดเซลล์
- 8.) ทำการทดสอบด้วย เครื่อง UTM

จากขอบเขตของการออกแบบโพลดเซลล์ดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

- 1) การออกแบบโพลดเซลล์
- 2) การสร้างชิ้นงาน ติดตั้งสเตรนเกจและต่อวงจร
- 3) การทดสอบโพลดเซลล์

3.2 การออกแบบโพลดเซลล์

3.2.1 การหาขนาดของโพลดเซลล์

โดยมีข้อกำหนดในการหาขนาดของโพลดเซลล์ ดังนี้

- 1.) รับแรงได้ 5000 N
- 2.) เลือก สแตนเลส 304 ที่มีค่า $\sigma_y = 1140$ MPa และ $E = 190$ GPa โดย

คำนวณหาขนาดของโพลดเซลล์ได้ดังสมการ 3.1

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (3.1)$$

โดยที่ ϵ คือ ความเครียด

σ คือ ความเค้น (N/m^2)

E คือ ค่าอีลาสติคมอดูลัส (N/m^2)

ขั้นตอนการออกแบบโพลดเซลล์ มีดังต่อไปนี้

- 1.) การหาขนาดของโพลดเซลล์

เนื่องจากต้องการพื้นที่ผิวเพียงพอที่จะติดสเตรนเกจได้ ครบ 4 ตัว จึงออกแบบให้โพลดเซลล์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm เพื่อใช้รับแรงได้สูงสุด 5000 N

จากสมการ ที่ 2.1

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi(r)^2}$$

$$= \frac{5000}{\pi(0.005)^2}$$

$$= 63661977.24 \text{ N/m}^2$$

$$\approx 63.66 \times 10^6 \text{ Pa}$$

จากสมการที่ 3.1

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

$$\epsilon = \frac{63.66 \times 10^6}{190 \times 10^9}$$

$$= 3.35 \times 10^{-4}$$

$$= 335 \mu\epsilon$$

จากสมการที่ 2.1 และ 3.1 จะได้ว่า

$$\epsilon = \frac{F}{AE}$$

จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความเครียดทางทฤษฎี ดังสมการที่ 3.2

โดยที่ $F = AE\epsilon$ (3.2)

เมื่อ $F = AE\epsilon$

$$F = 14.923 \times 10^6 \epsilon$$
 (3.3)

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่า โหลดเซลล์ที่ออกแบบมีค่าความเค้น 63.66 MPa ซึ่งมีค่าไม่เกินความเค้นที่กำหนดไว้คือ 1140 MPa โหลดเซลล์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm สามารถรับแรงที่ 5000 N โดยไม่มีการเสียหายของชิ้นงานและมีพื้นที่เพียงพอสำหรับติดตั้งเตรนเกจ

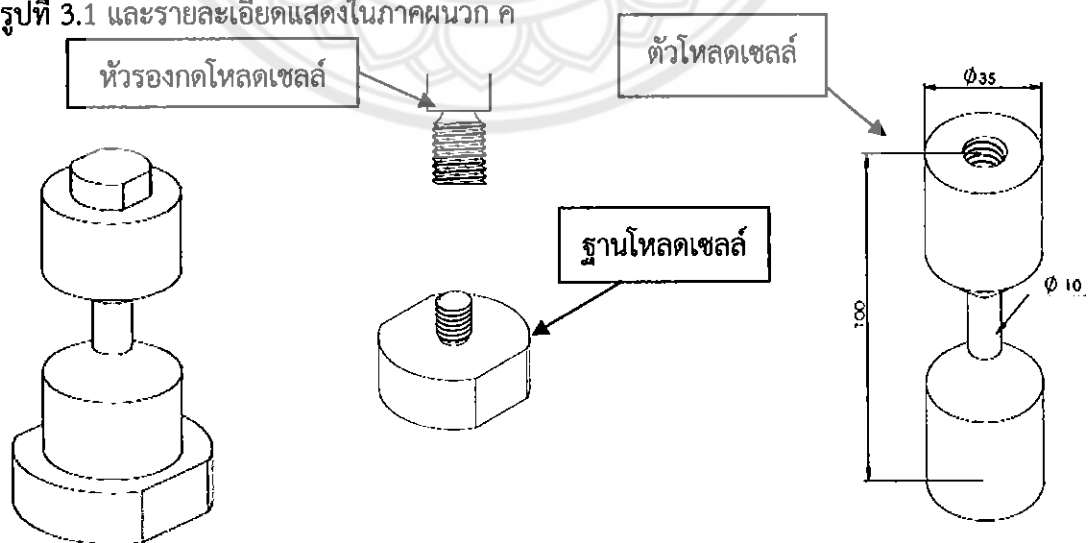
2.) ดำเนินการออกแบบโหลดเซลล์โดยใช้ Solidworks

การออกแบบโหลดเซลล์ จะดำเนินการโดยใช้ Solidworks โดยที่โหลดเซลล์มีส่วนประกอบ

3 ส่วน คือ

- 1.) ตัวโหลดเซลล์
- 2.) หัวรองกดโหลดเซลล์
- 3.) ฐานโหลดเซลล์

ดังรูปที่ 3.1 และรายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค



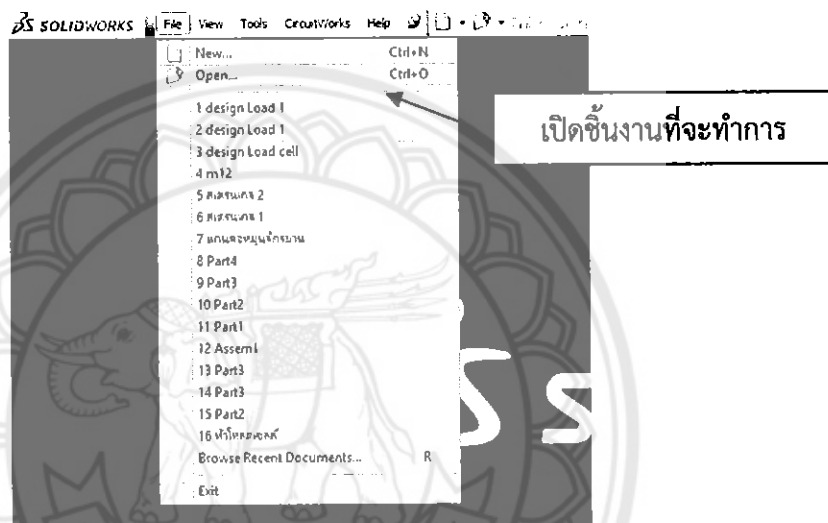
รูปที่ 3.1 รูปลักษณะและขนาดของโหลดเซลล์

3.2.2 การวิเคราะห์การเสีรูปของชิ้นงาน

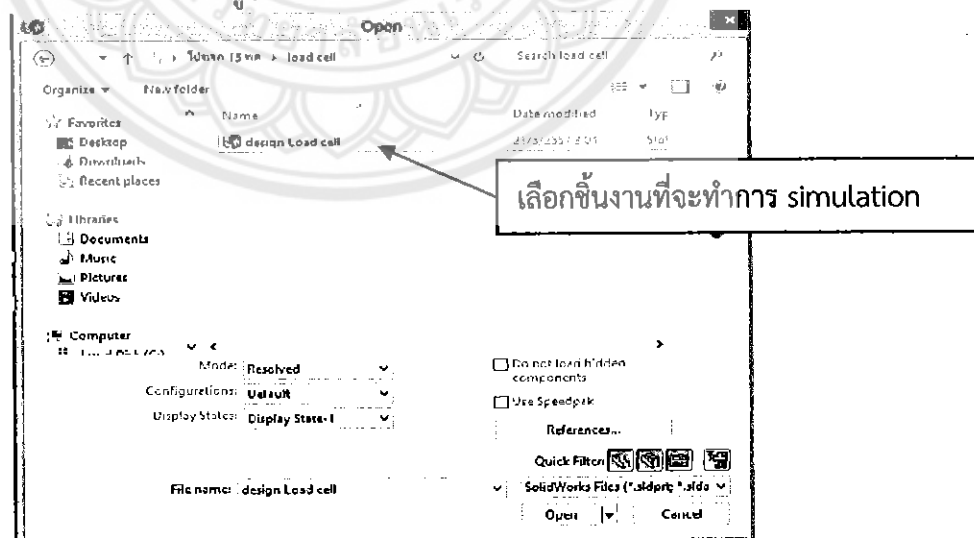
ขั้นตอนการวิเคราะห์การเสีรูปของชิ้นงาน ด้วย solidworks simulation มีดังต่อไปนี้

1.) การเลือกชิ้นงานที่จะทำการ simulation

เปิดไฟล์ด้วยคำสั่ง File ดังรูปที่ 3.2 แล้วเลือกชิ้นงานที่จะทำการ simulation โดยใช้คำสั่ง open ดังรูป ที่ 3.3



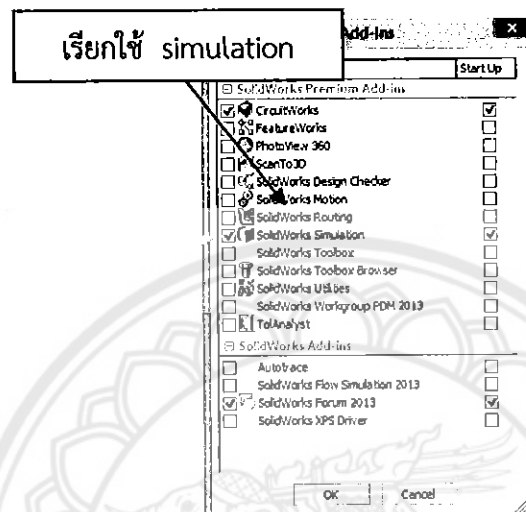
รูปที่ 3.2 เรียกชิ้นงานที่จะ simulation



รูปที่ 3.3 การเลือกชิ้นงาน

2.) การเรียกใช้คำสั่ง simulation

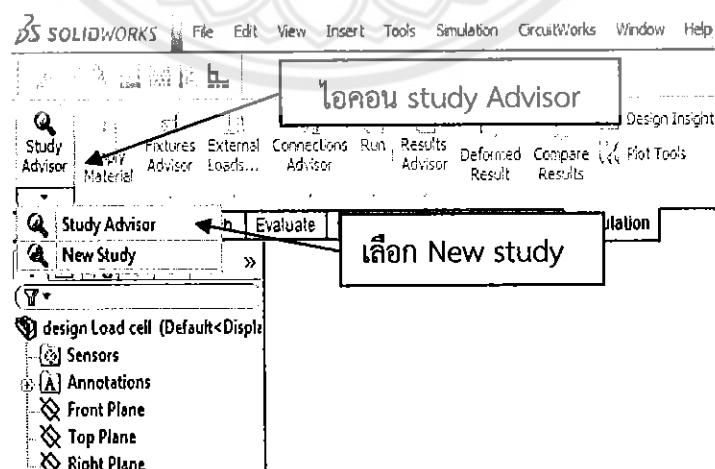
การเรียกใช้คำสั่ง simulation นั้นต้องเข้าไปกำหนดในแถบเมนู Tools เลือก Add-Ins จากนั้นเลือก solidWorks Simulation ดังรูปที่ 3.4



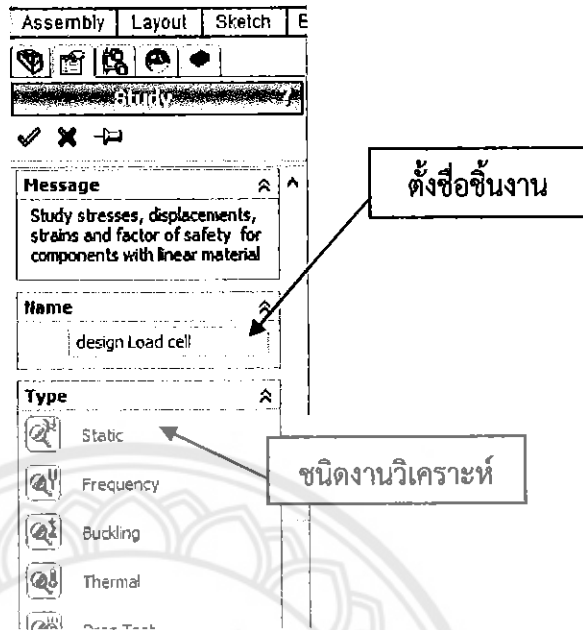
รูปที่ 3.4 การเรียก simulation

3.) การสร้างโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์

จากนั้นเรียกใช้ คำสั่ง simulation แล้วให้คลิกไอคอน study Advisor และเลือก New study ดังรูปที่ 3.5 เพื่อเข้าไปตั้งชื่อชิ้นงาน โดยใช้การวิเคราะห์เป็นการวิเคราะห์ความแข็งแรง ภายใต้แรงสถิตย์ (Static) ดังรูปที่ 3.6



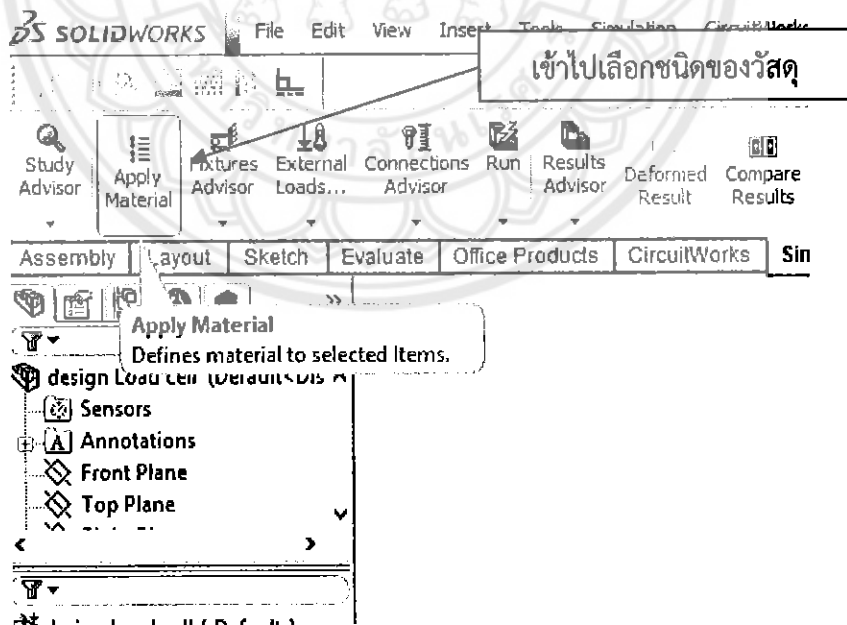
รูปที่ 3.5 การตั้งชื่อชิ้นงาน



รูปที่ 3.6 การเลือกชนิดแรงกระทำ

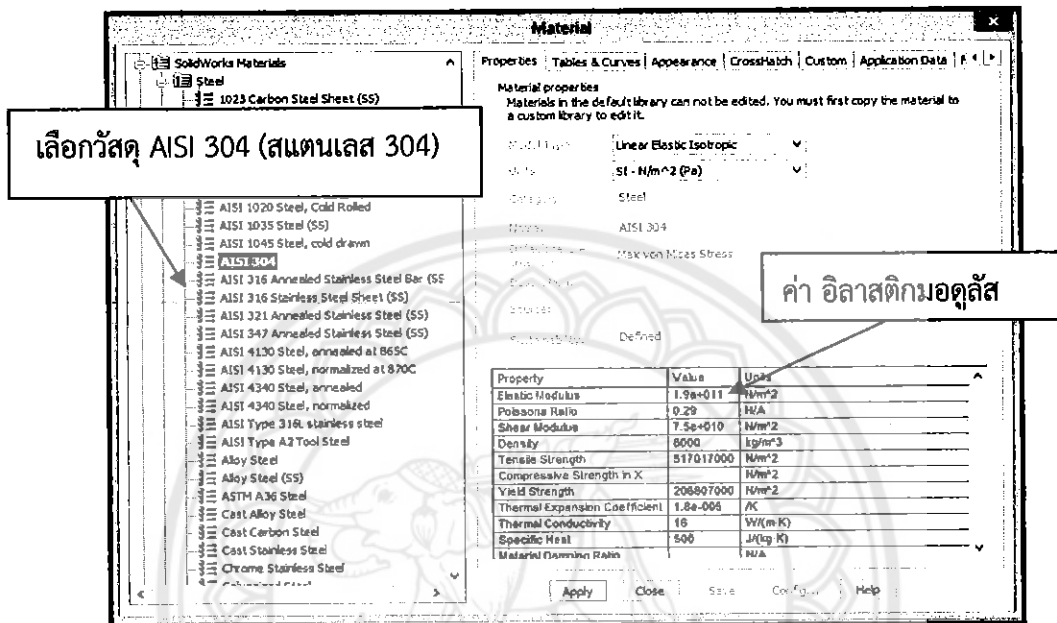
จากนั้นกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ด้วยการคลิกเลือก Apply Material to all Bodies

ดังรูปที่ 3.7



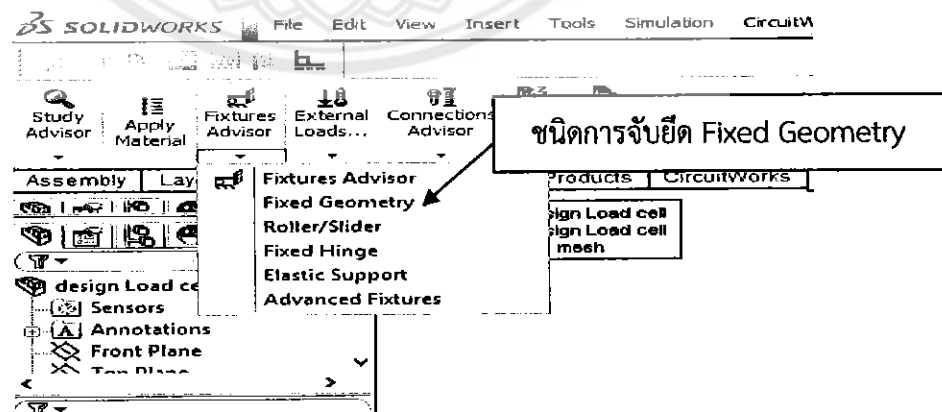
รูปที่ 3.7 กำหนดคุณสมบัติของวัสดุ

จากนั้นทำการเลือกวัสดุจากไฟล์ข้อมูลที่มีอยู่แล้วจากฐานข้อมูลของ solidworks materials แล้วคลิกเลือก AISI 304 (Stainless 304) โดยมีคุณสมบัติแสดงดังรูปที่ 3.8 ซึ่งมีค่าอีลาสติคโมดูลัส (Elastic modulus) เท่ากับ $1.9 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$

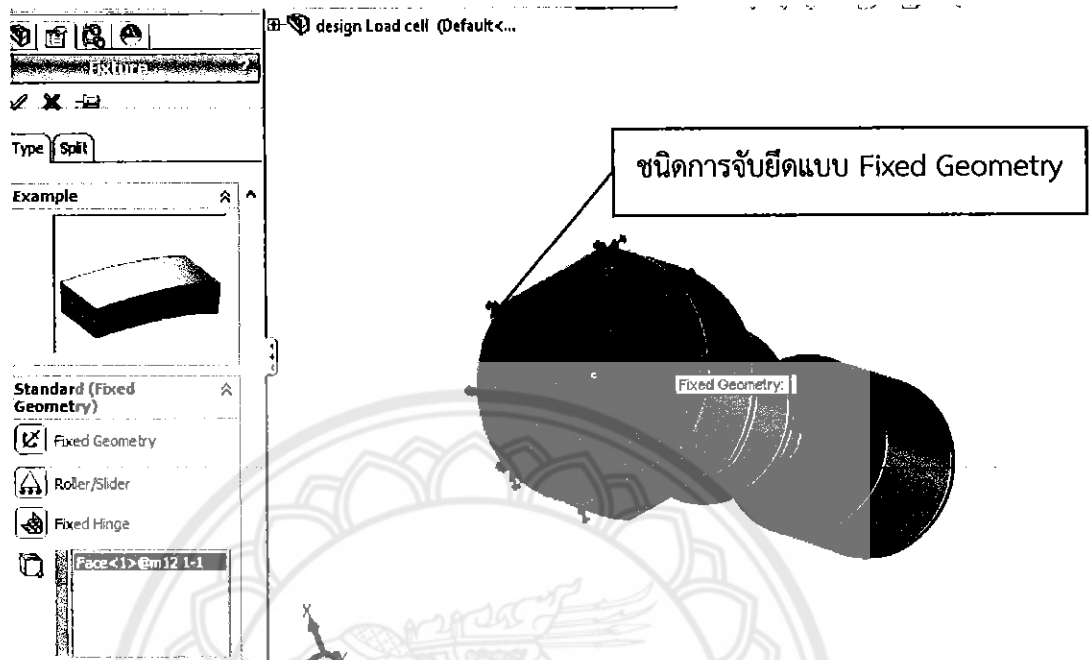


รูปที่ 3.8 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติของวัสดุ

4.) การกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตของชิ้นงานโดยการคลิกคำสั่งชุด Fixtures ดังรูปที่ 3.9 และเลือกชนิดการจับยึด Fixed Geometry โดยคลิกลงจุดบนชิ้นงานที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.10

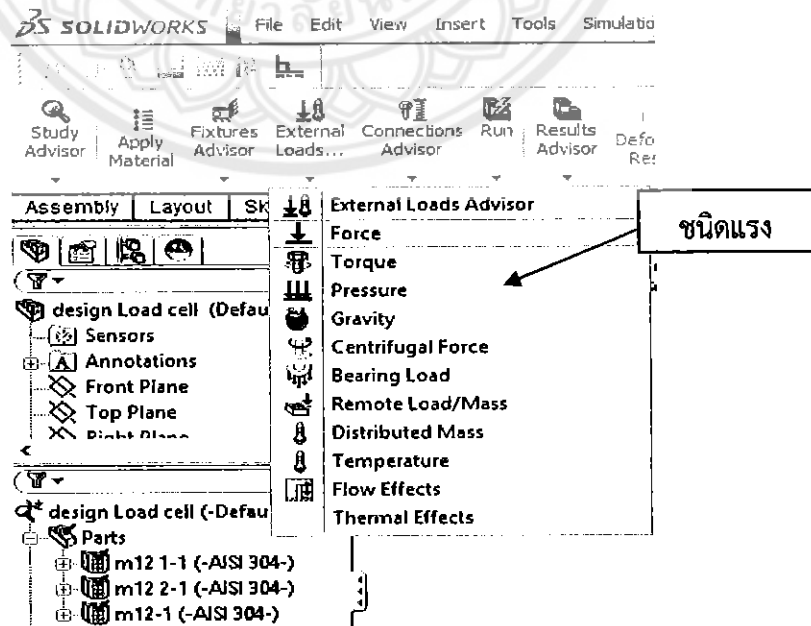


รูปที่ 3.9 การเลือกชนิดการจับยึด

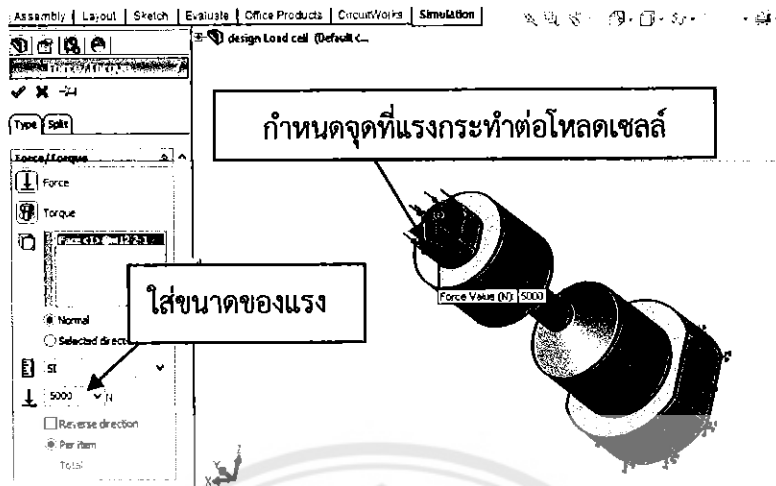


รูปที่ 3.10 การเลือกจุดจับยึด

จากนั้นกำหนดแรงกระทำต่อโหลดเซลล์ โดยคลิก External Loads โดยเลือก Force ดังรูปที่ 3.11 แล้วใส่ขนาดของแรงกระทำ 5000 นิวตัน ดังรูปที่ 3.12

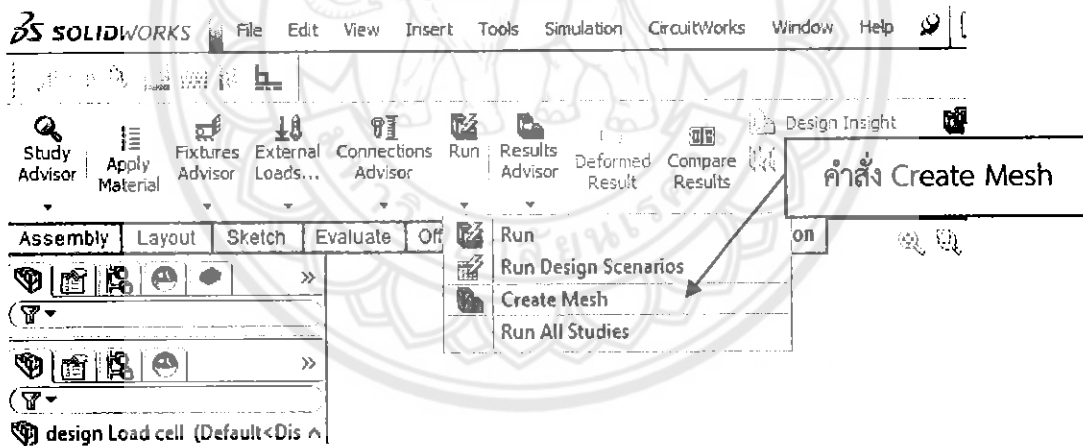


รูปที่ 3.11 กำหนดชนิดแรงกระทำ

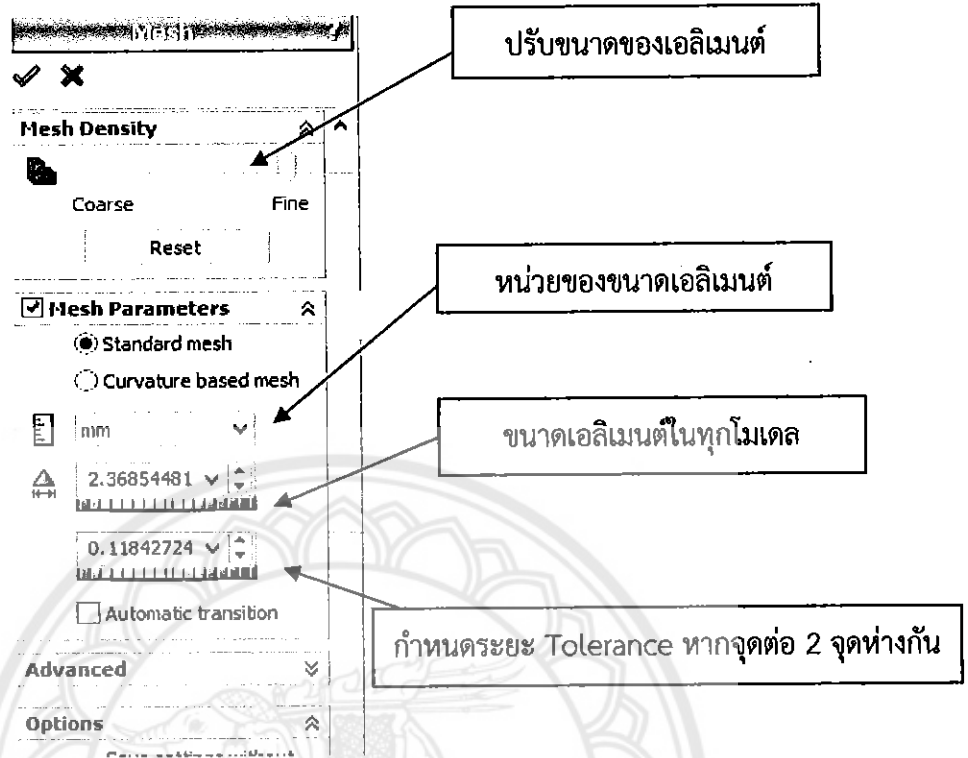


รูปที่ 3.12 เลือกจุดที่แรงกระทำ

จากนั้นเลือกคำสั่ง Run และเลือกคำสั่ง create Mesh ดังรูปที่ 3.13 จะปรากฏหน้าต่าง Mesh ขึ้นมา ดังรูป 3.14 ซึ่งจากสามารถปรับขนาดของเอลิเมนต์ได้

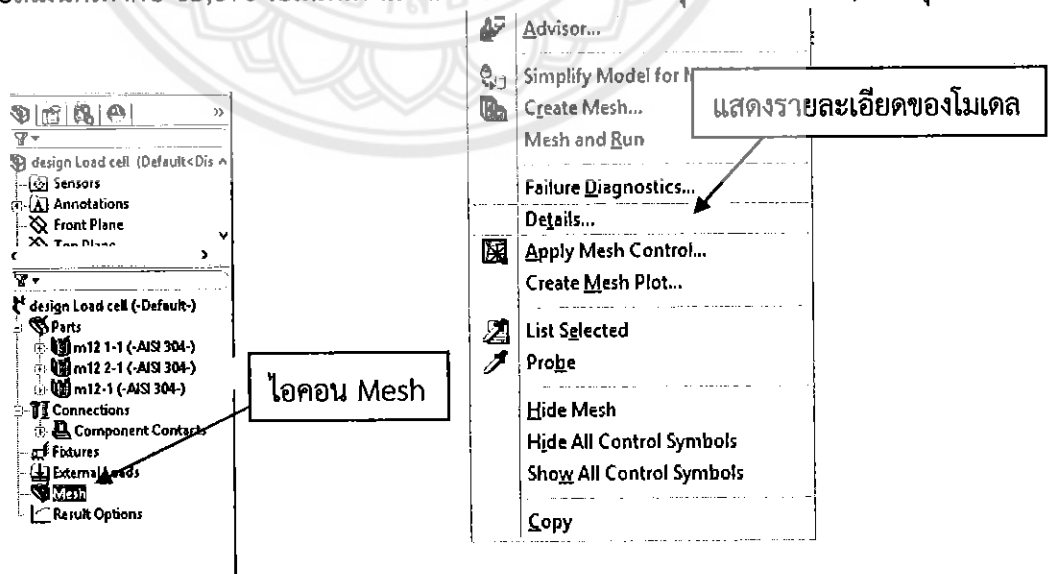


รูปที่ 3.13 เลือกคำสั่ง create Mesh



รูปที่ 3.14 การปรับขนาดของเอลิเมนต์

จากนั้นดูจำนวน Mesh ที่สร้างขึ้นจากโมเดลด้วยการคลิกไอคอน Mesh จากนั้นคลิกปุ่ม ขวาที่ไอคอน Details (รูปที่ 3.15) จะแสดงรายละเอียดของ Mesh ทั้งหมด (รูปที่ 3.16) โดยจะได้ จำนวนเอลิเมนต์เท่ากับ 65,676 เอลิเมนต์ และเมชที่สร้างขึ้นมีจำนวนจุดต่อเท่ากับ 97,466 จุดต่อ



รูปที่ 3.15 การแสดงรายละเอียดของโมเดล

Mesh Details	
Study name	Study 4 (-Default)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Element size	2.36685 mm
Tolerance	0.118342 mm
Mesh quality	High
Total nodes	97488
Total elements	65676
Maximum Aspect Ratio	34.835
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	96
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0.422
% of distorted elements (Jacobian)	0
Remesh (ailed parts with incompatible mesh)	Off
Time to complete mesh(h:mm:ss)	00:00:20
Computer name	

จำนวนจุดต่อ

จำนวนเอลิเมนต์

รูปที่ 3.16 รายละเอียดของโมเดล

Model name: design Load cell

Study name: Study

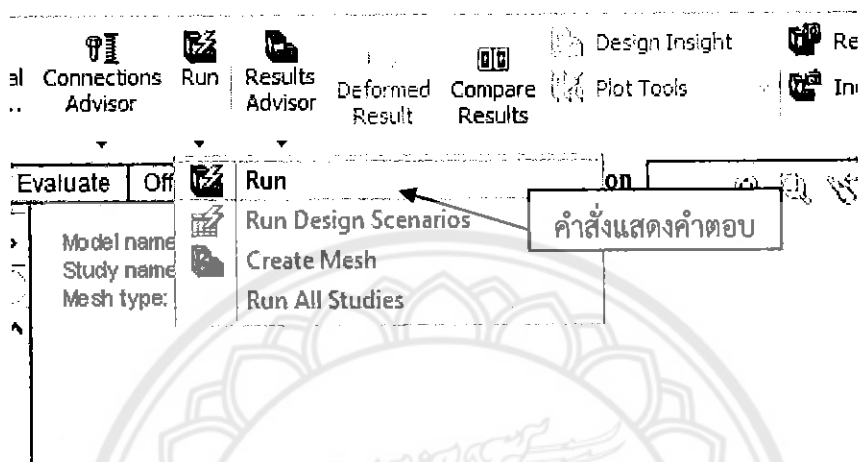
Mesh type: solid mesh



รูปที่ 3.17 แบบจำลอง Mesh ของโหลดเซลล์

5.) คำนวณหาคำตอบ

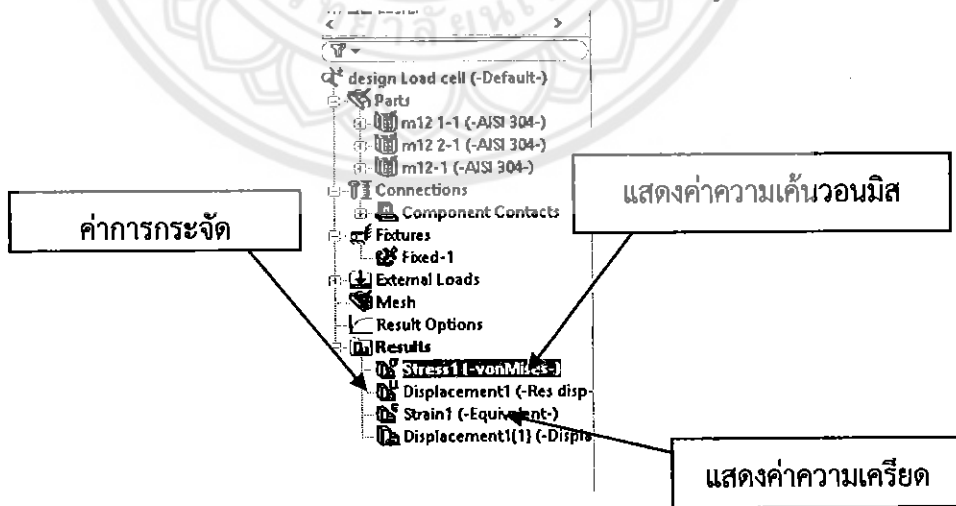
หลังจากทำครบ 4 ขั้นตอนข้างต้นแล้วก็ทำการ คลิกคำสั่ง Run ดังรูปที่ 3.18 เพื่อให้โปรแกรมแสดงการคำนวณค่าออกมา



รูปที่ 3.18 แสดงผลของคำตอบ

6.) การแสดงผลลัพธ์ที่ได้

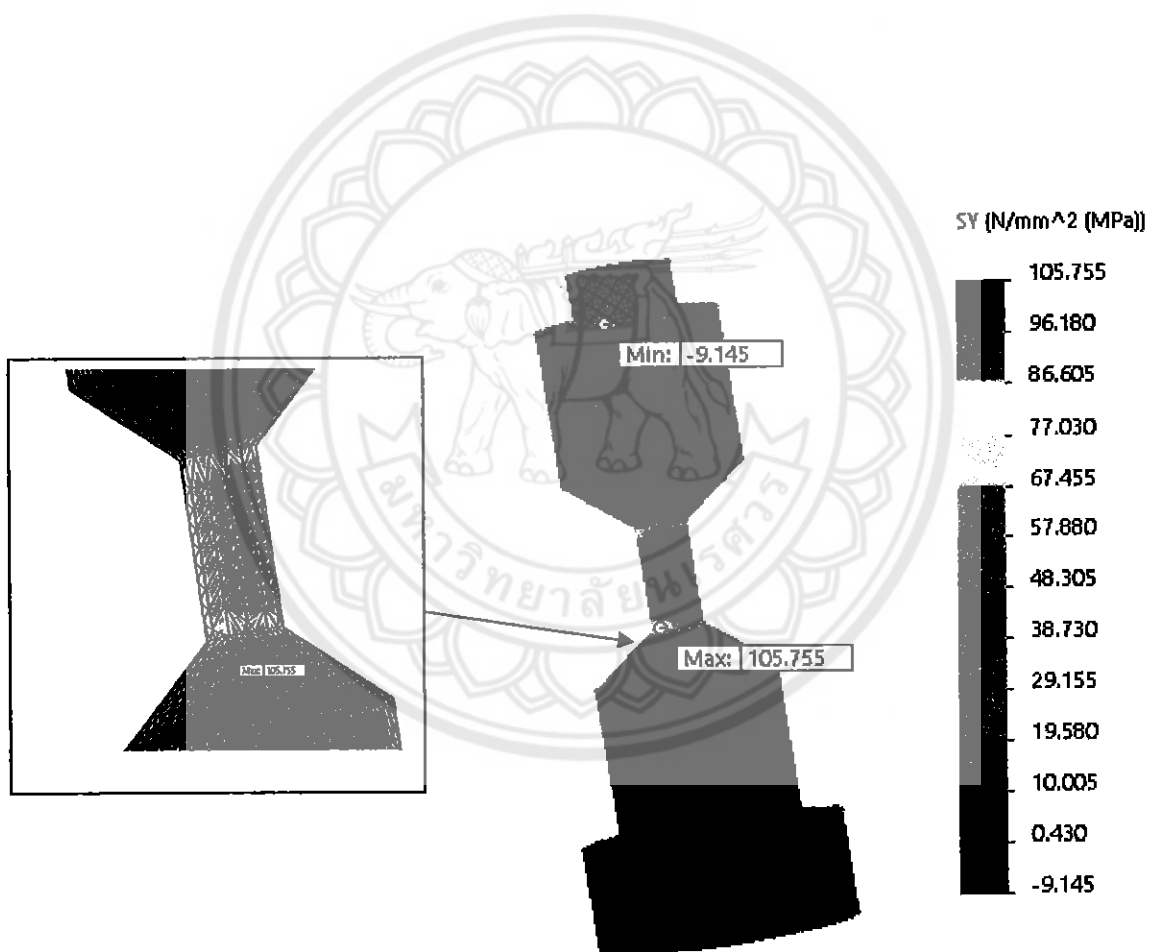
หลังจากการคำนวณเสร็จแล้ว โปรแกรมจะแสดงผลการคำนวณของชิ้นงานและแสดงค่า 3 ค่า ได้แก่ ค่าความเค้นวอนมิสที่เกิดขึ้น ค่าการกระจัด ค่าความเครียด ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 แสดงผลของคำตอบที่ทำการ simulation

ผลจะปรากฏดังรูปที่ 3.20 และ 3.21 ซึ่งเป็นการแสดงถึงการเสียรูปของวัสดุ ได้แก่ ความเค้น และความเครียด

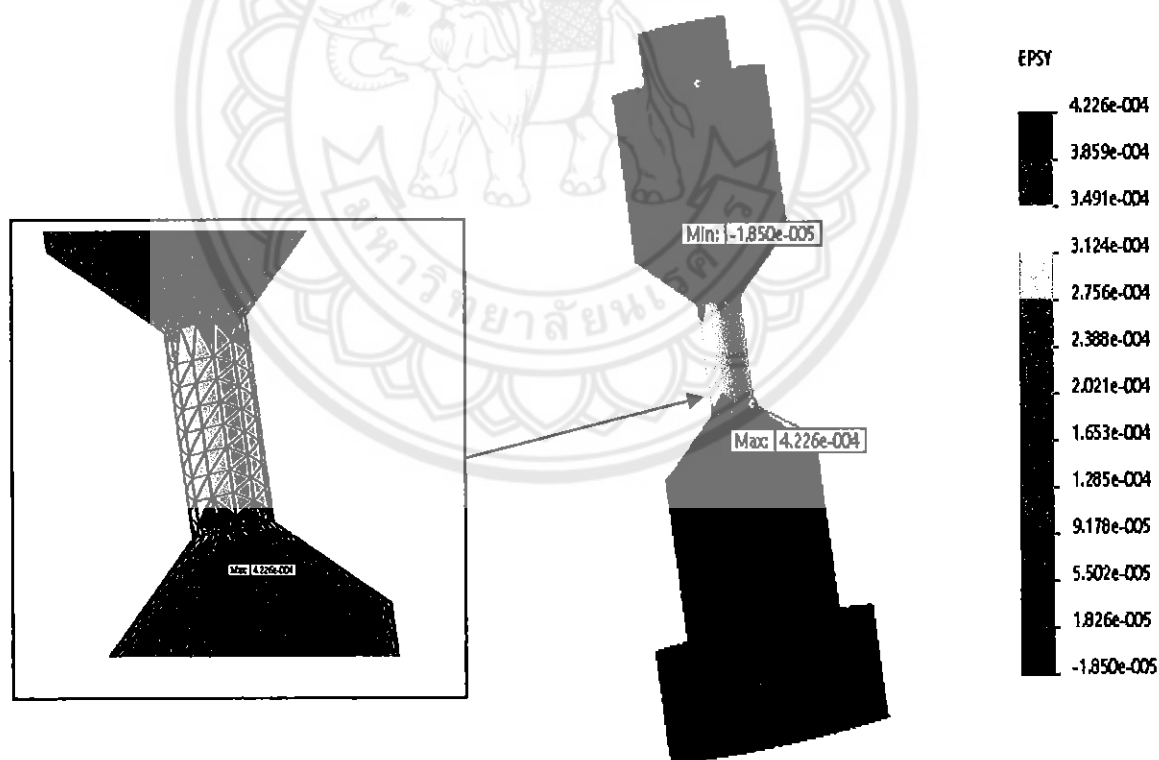
Name	Type	Min	Max
Stress1	Stress ในแนวแกน Y	-9.145 MPa	105.755 MPa



รูปที่ 3.20 ความเค้นของโพลดเซลล์

จากผลการทำ simulation ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่าค่าความเค้น อยู่ในช่วง 57.880-67.455 MPa ซึ่งค่า simulation ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีที่คำนวณได้ 63.66 MPa

Name	Type	Min	Max
Strain	Strain ในแนวแกน Y	-1.850×10^{-4}	4.226×10^{-4}



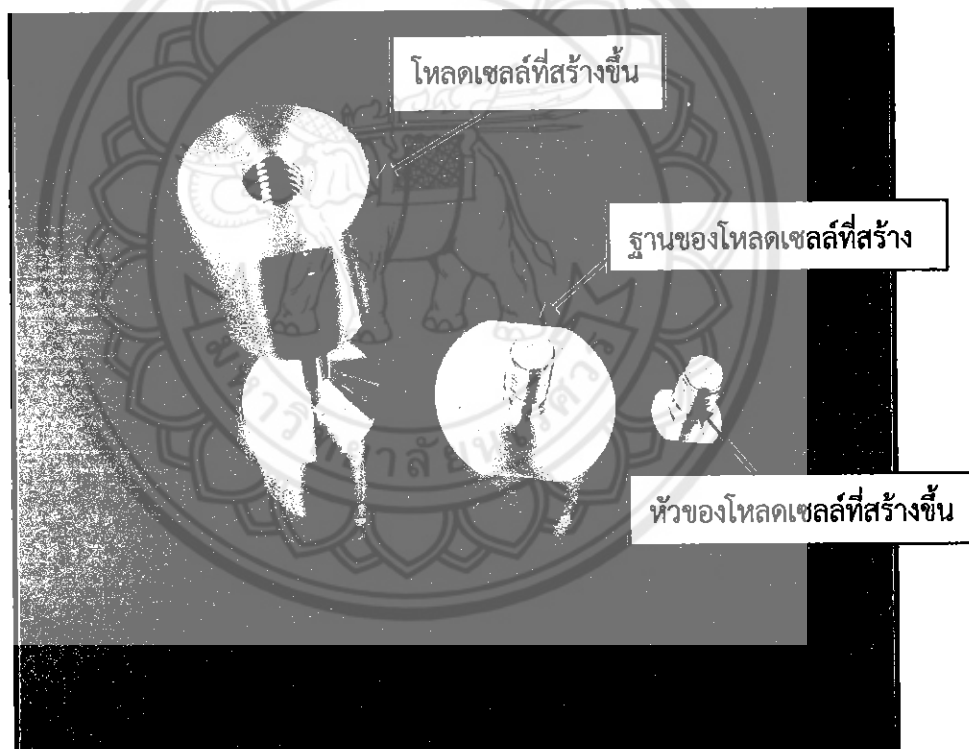
รูปที่ 3.21 ความเครียดของโพลดเซลล์

จากผลการทำ simulation ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่าค่าความเครียดอยู่ในช่วง 312.5-349.1 μE ซึ่งค่า simulation ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีที่คำนวณได้ 335 μE

3.3 การสร้างชิ้นงาน ติดตั้งสเตรนเกจและการต่อวงจร

3.3.1 การสร้างชิ้นงาน

ผลจากการออกแบบด้วย SolidWorks และวิเคราะห์โมเดลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ นำแบบที่ได้ไปสร้างชิ้นงานตามแบบที่กำหนดใช้วัสดุสแตนเลส 304 ขึ้นรูปด้วยการกลึง ซึ่งจะได้ชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ชิ้นงานที่สร้างขึ้นที่ได้จากการออกแบบ

3.3.2 ขั้นตอนการติดตั้งสเตรนเกจ

1.) วัสดุอุปกรณ์

วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งสเตรนเกจ มีดังนี้

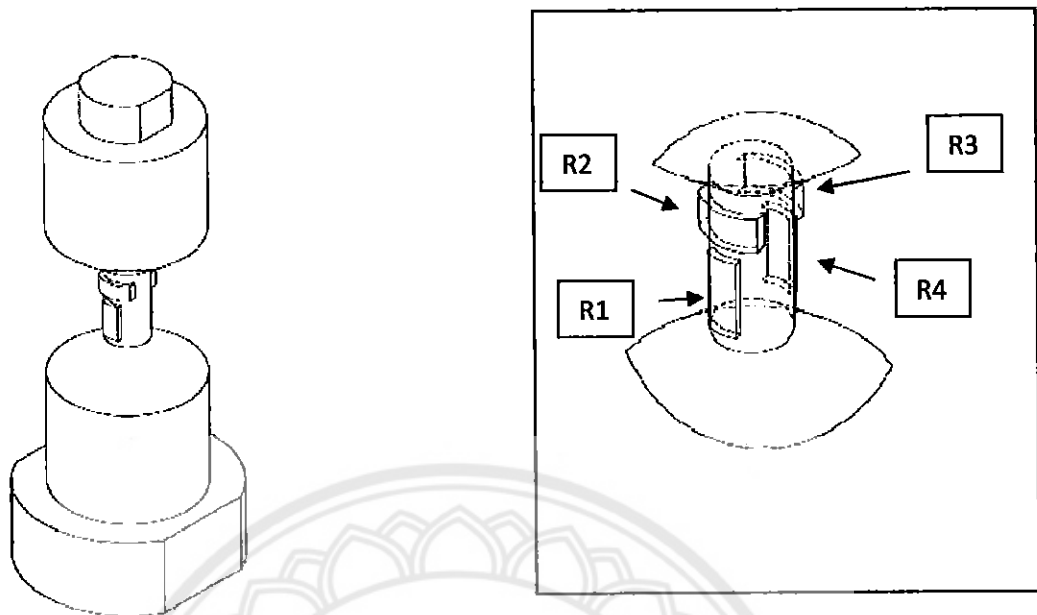
- 1.1) ชิ้นงานที่สร้างจากการออกแบบ
- 1.2) สเตรนเกจ Kyowa KFG-5-350-C1-16L30C2R จำนวน 4 ตัว
- 1.3) กาวสำหรับติดสเตรนเกจ ยี่ห้อ KYOWA
- 1.4) กระดาษทรายเบอร์ 2000



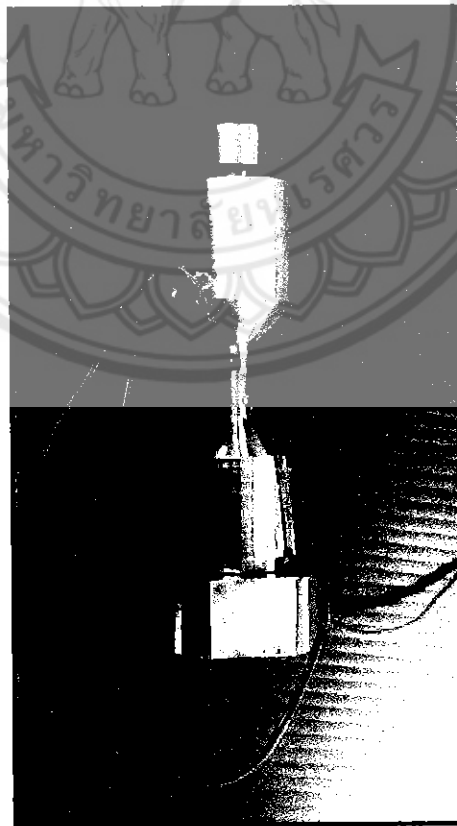
รูปที่ 3.23 วัสดุอุปกรณ์

2.) ขั้นตอนการติดตั้งสเตรนเกจ

- 2.1) นำชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาขัดด้วยกระดาษทรายละเอียด เพื่อให้ ชิ้นงานมีความละเอียดมากขึ้น
- 2.2) ทำความสะอาดชิ้นงาน
- 2.3) ติดตั้งสเตรนเกจตามตำแหน่งที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3.24 ติดสเตรนเกจในแนวตั้งฉากกับชิ้นงานจำนวน 2 ตัว โดยมีระยะห่างจากขอบล่างของโหดเซลล์มาถึงเครื่องหมายกึ่งกลางสเตรนเกจ 6.7 mm และติดตั้งในแนวขนานกับชิ้นงานจำนวน 2 ตัวโดยให้เครื่องหมายกึ่งกลางของสเตรนเกจอยู่ในแนวตั้งฉาก และชิ้นงานหลังการติดสเตรนเกจ แสดงดังรูปที่ 3.25



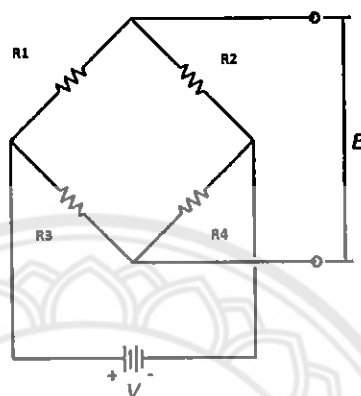
รูปที่ 3.24 ตำแหน่งติดตั้งสเตรนเกจ



รูปที่ 3.25 ชิ้นงานหลังจากการติดสเตรนเกจ

3.) การต่อวงจร

ทำการต่อวงจรบริดจ์ แสดงดังรูปที่ 3.26

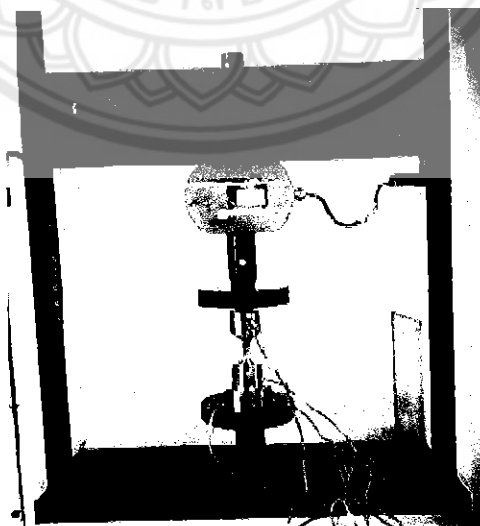


รูปที่ 3.26 การต่อวงจรบริดจ์ของโหนดเซลล์

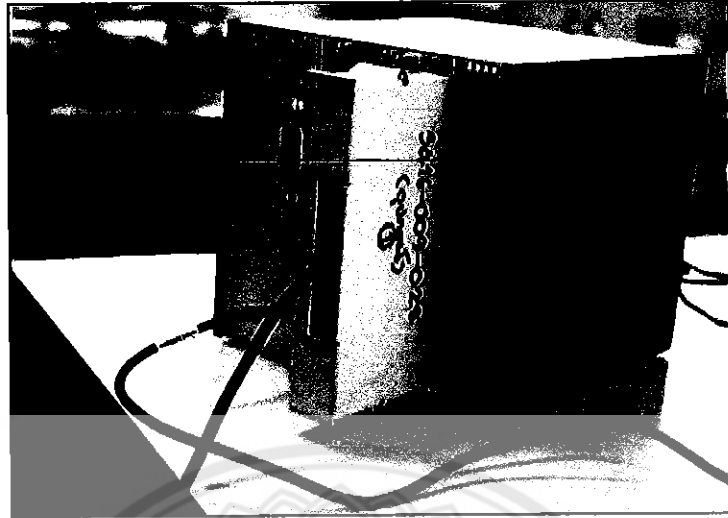
3.4 การทดสอบโหนดเซลล์

3.4.1 วิธีการติดตั้ง

ทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบให้ได้จุดศูนย์กลางของเครื่อง UTM และต่อวงจรเข้ากับเครื่อง indicator (Universal Strain Gage module NI-SCXI-1520) แสดงดังรูปที่ 3.27 และ 3.28



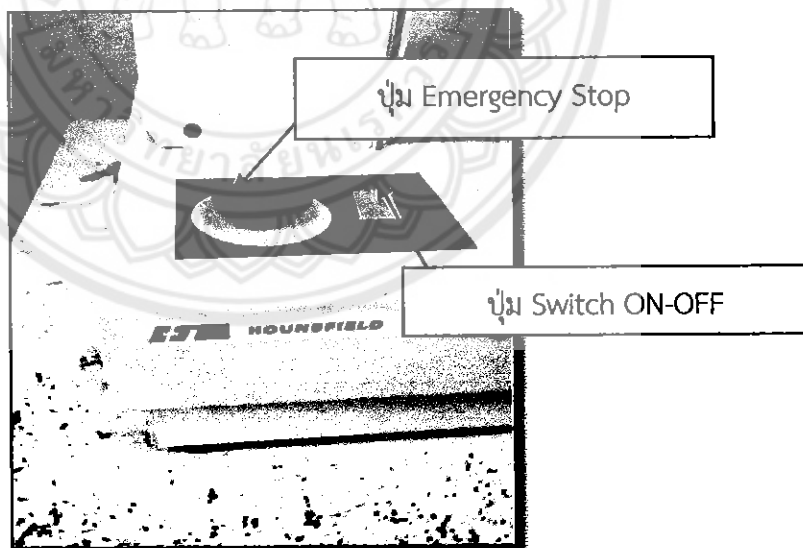
รูปที่ 3.27 การติดตั้งโหนดเซลล์กับเครื่อง UTM



รูปที่ 3.28 indicator (Universal Strain Gage module NI-SCXI-1520)

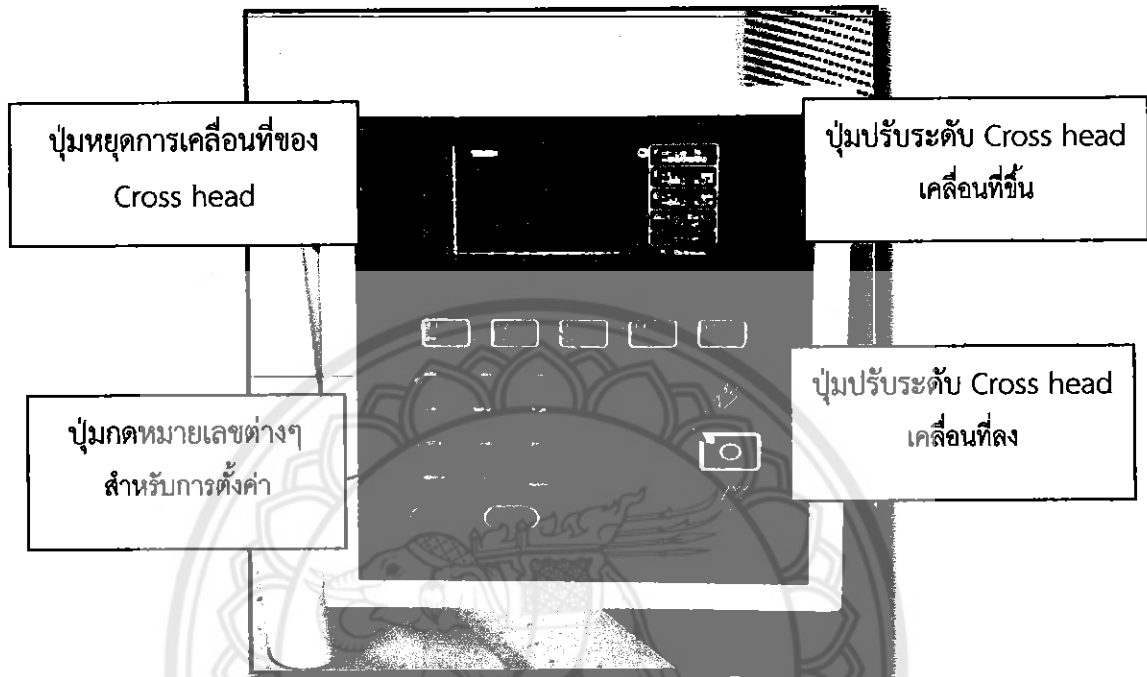
3.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

เมื่อทำการติดตั้งโหลดเซลล์กับเครื่อง UTM แล้วทำการวอร์มเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมง ก่อนเริ่มการทดสอบ โดยกดปุ่มเปิดเครื่อง ดังรูปที่ 3.29 เพื่อทำการทดสอบ มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.29 ปุ่ม Switch ON-OFF

1.) กดปุ่มเปิดเครื่อง UTM (Switch ON) ดังรูปที่ 3.29 จะปรากฏหน้าจอเริ่มต้นดังรูปที่ 3.31 จากนั้นจะเป็นการแนะนำการใช้ เมนูคำสั่ง และตั้งค่าเครื่อง UTM สำหรับทดสอบ

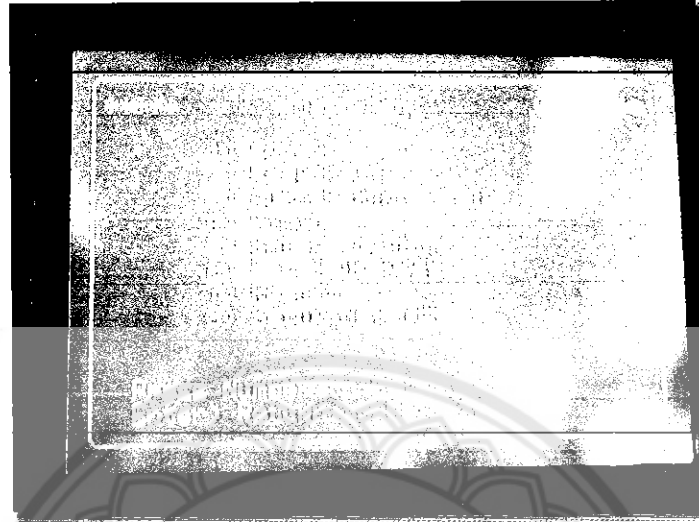


รูปที่ 3.30 Controller ของเครื่อง UTM



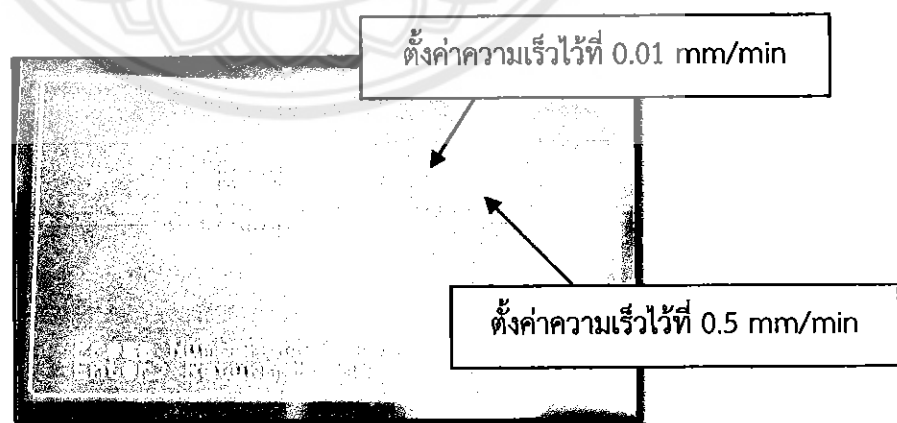
รูปที่ 3.31 หน้าจอเริ่มต้น

2.) ทำการกดปุ่ม Menu จากนั้นหน้าจอจะแสดงผลดังรูปที่ 3.32



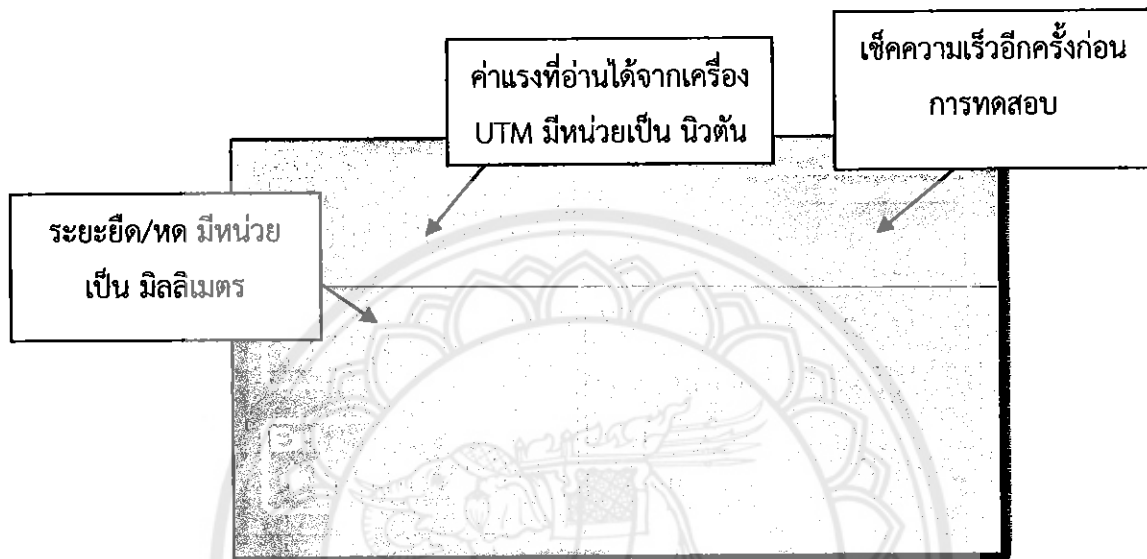
รูปที่ 3.32 ชุดเมนูของเครื่อง UTM

3.) เมนูหมายเลข (1) ปรับความเร็ว (speed) ของเครื่อง UTM ในการดึงหรือกดขึ้นงาน สามารถตั้งความเร็วได้ในระดับเลขนัยสำคัญ 2 ตำแหน่ง ซึ่งในการทดสอบเครื่อง UTM นี้จะตั้งความเร็วไว้ที่ 0.01 mm/min และ 0.5 mm/min ตามลำดับ ดังรูปที่ 3.33 เมื่อทำการกดปุ่ม (ปุ่มปรับระดับ Cross head เคลื่อนที่ลง) หนึ่งครั้งก็จะทำให้ Cross head เคลื่อนที่ลงด้วยความเร็ว 0.01 mm/min และถ้ากดปุ่มนั้นซ้ำอีกครั้งก็จะทำให้ Cross head เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.5 mm/min



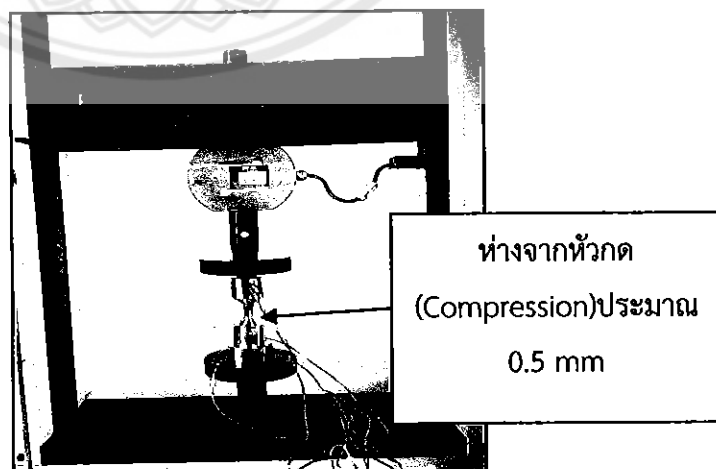
รูปที่ 3.33 การตั้งค่าความเร็วของเครื่อง UTM

4.) เมนูหมายเลข 6) คำสั่ง Panel Display เป็นการเช็คดูคำสั่งที่เคยตั้งไว้ก่อนหน้านี้คือ ความเร็ว ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM (N) และระยะยืด (mm) จากบนลงล่างตามลำดับ ดังรูปที่ 3.34



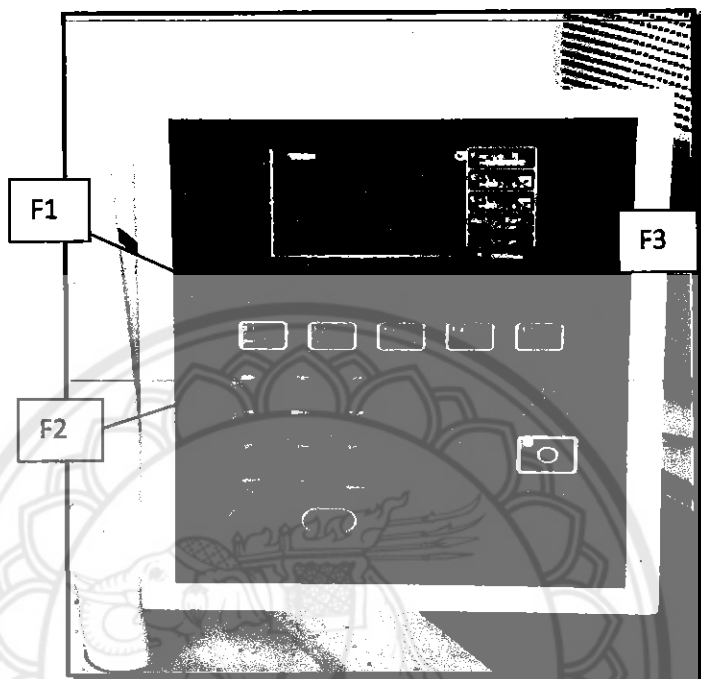
รูปที่ 3.34 Display

5.) ปรับระยะหัวกด (Compression) ให้ห่างจากตัวโหลดเซลล์ ประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.35 ทำการตรวจสอบให้ได้จุดศูนย์กลาง ให้ตั้งอยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางและไม่มี การเอียงศูนย์



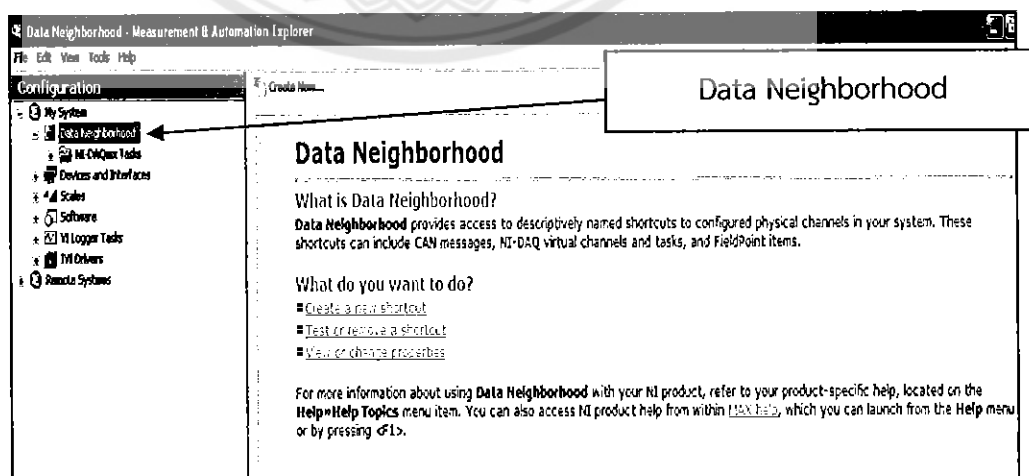
รูปที่ 3.35 การติดตั้งโหลดเซลล์

6.) หลังจากทำการตั้งค่าห้วงกว้างจากตัวโพลเดเซลล์ประมาณ 0.5 แล้วให้ปรับค่าแรง ค่ำระยะยัดของเครื่อง UTM เป็นศูนย์โดยการกดปุ่ม F1 F2 และ F3 ดังรูปที่ 3.36



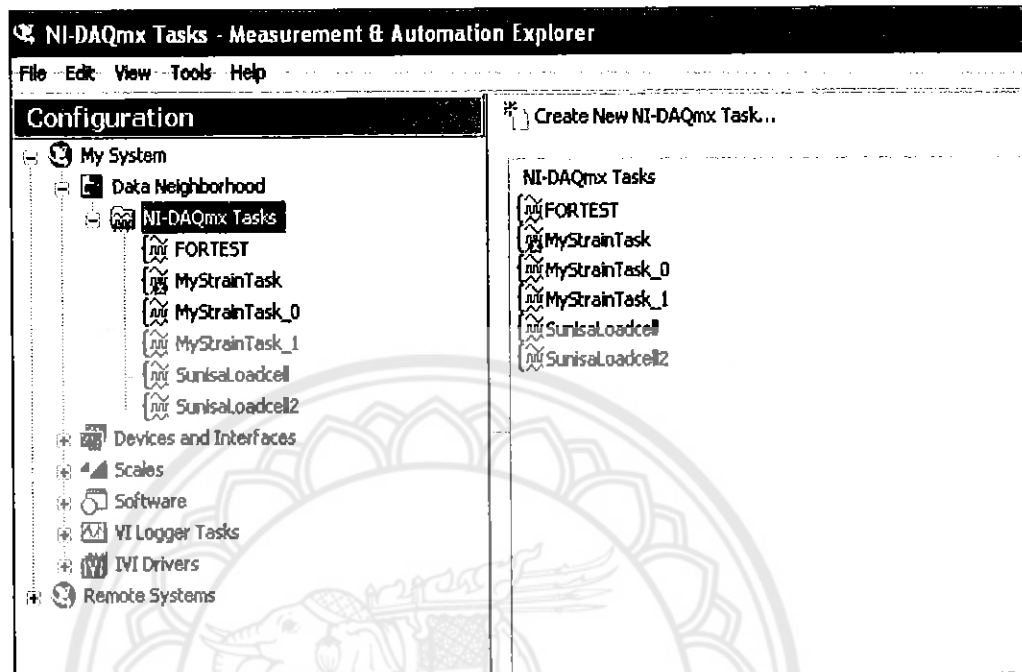
รูปที่ 3.36 ปรับค่า F1 F2 และ F3

7.) เปิดโปรแกรม National Instruments Measurement and Automation Explorer เพื่อที่จะดำเนินการทดสอบ และตั้งค่าโปรแกรม ดังรูปที่ 3.37 เลือกที่ Data Neighborhood



รูปที่ 3.37 Data Neighborhood

8.) เลือกที่ NI-DaQmxTasks ดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 NI-DaQmxTasks

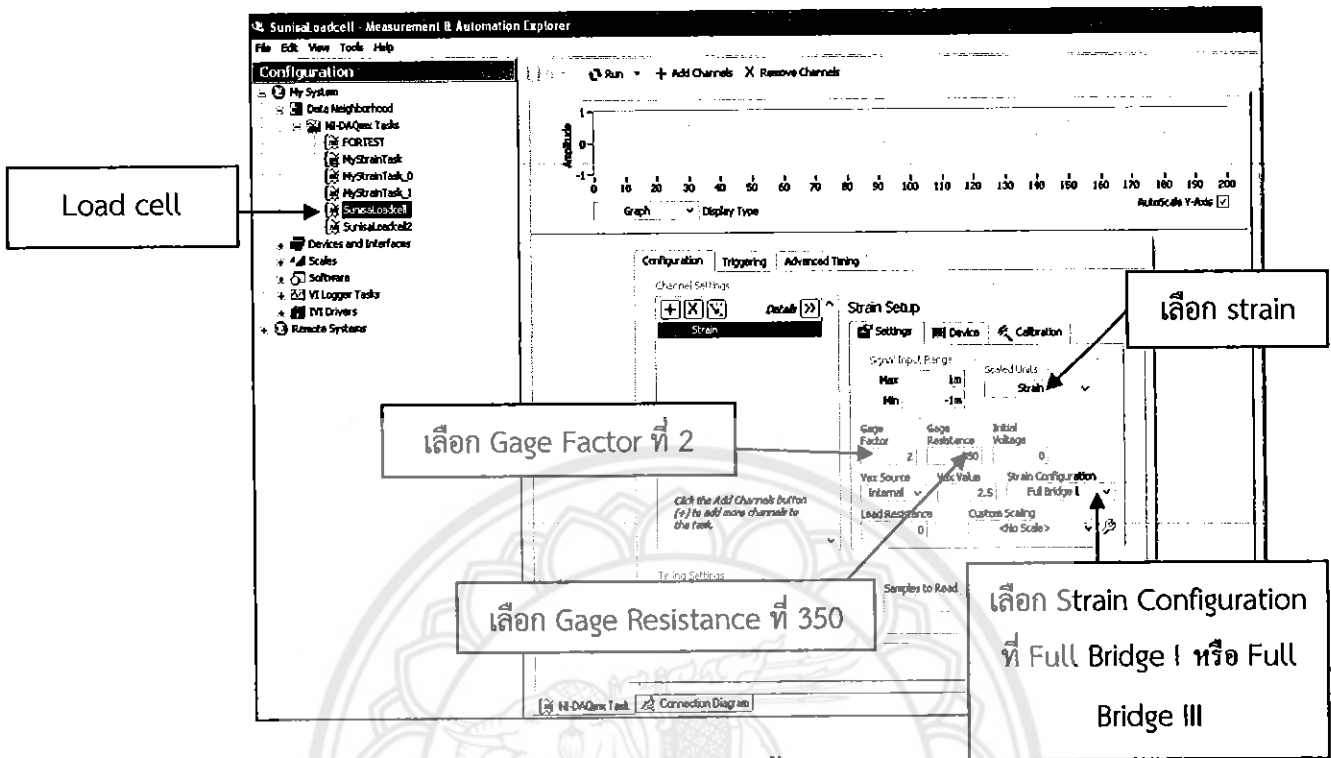
9.) เลือกที่ task ที่ตั้งค่าไว้ดังรูปที่ 3.39

ก. เลือก strain

ข. เลือก Gage Resistance ที่ 350

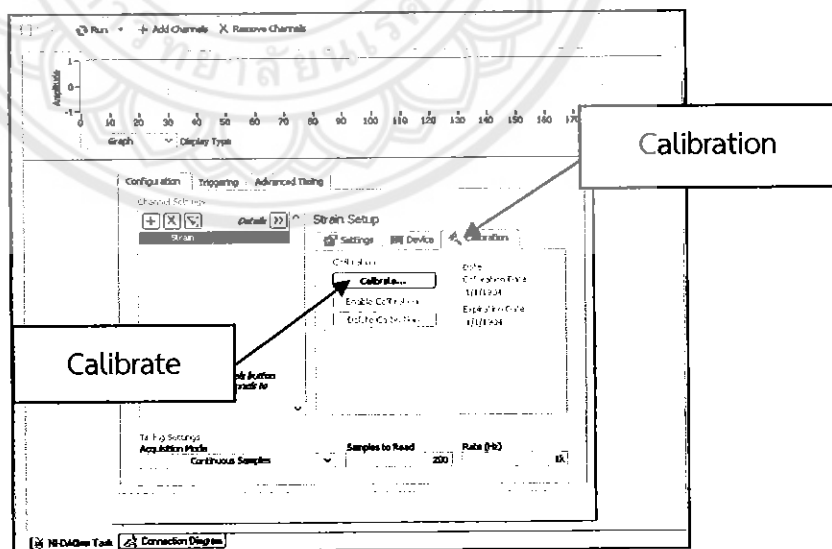
ค. เลือก Gage Factor ที่ 2

ง. เลือก Strain Configuration ที่ Full Bridge I หรือ Full Bridge III

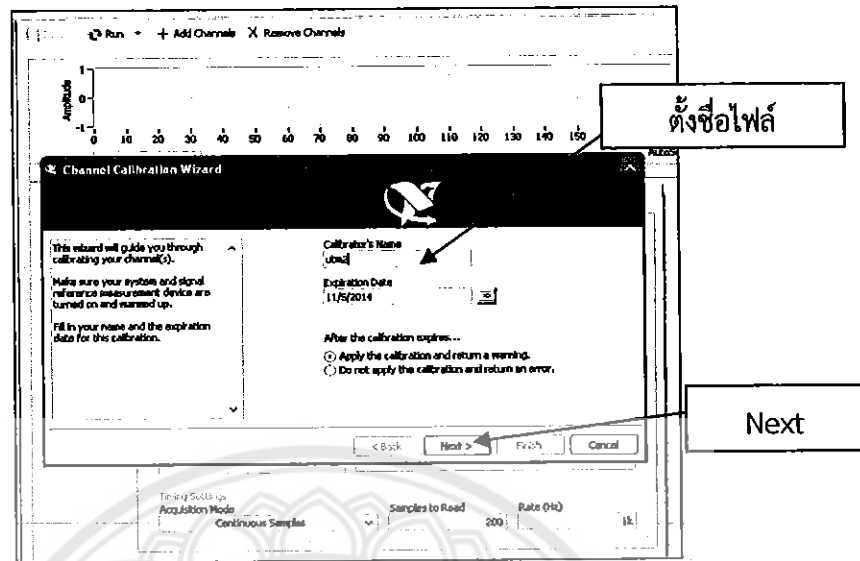


รูปที่ 3.39 การตั้งค่าโปรแกรม

10.) คลิกที่ Calibration แล้วเลือก Calibrate และตั้งชื่อไฟล์ เช่น UTM และกด Next แสดงดังรูปที่ 3.40 และ 3.41

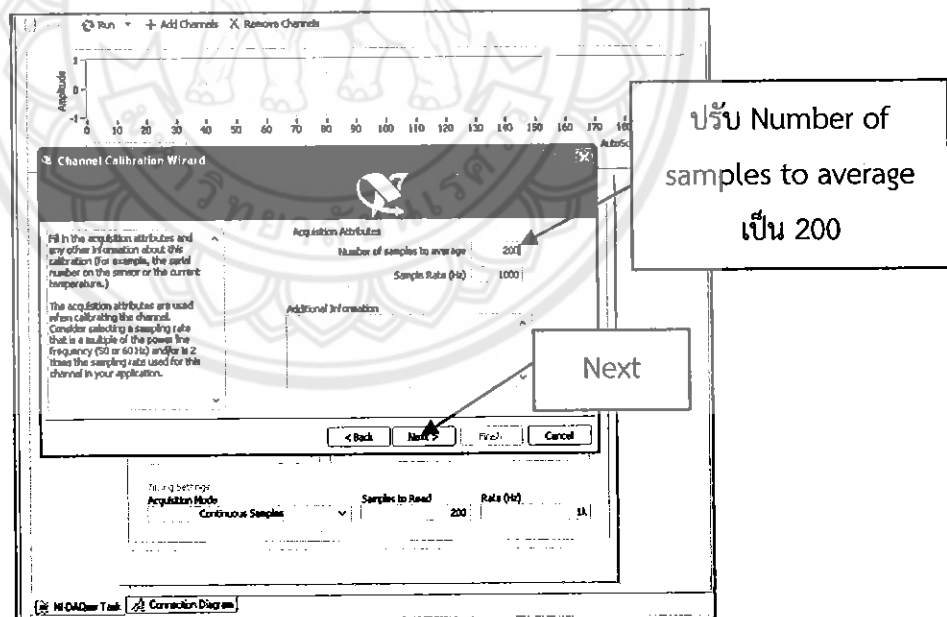


รูปที่ 3.40 การทดสอบ



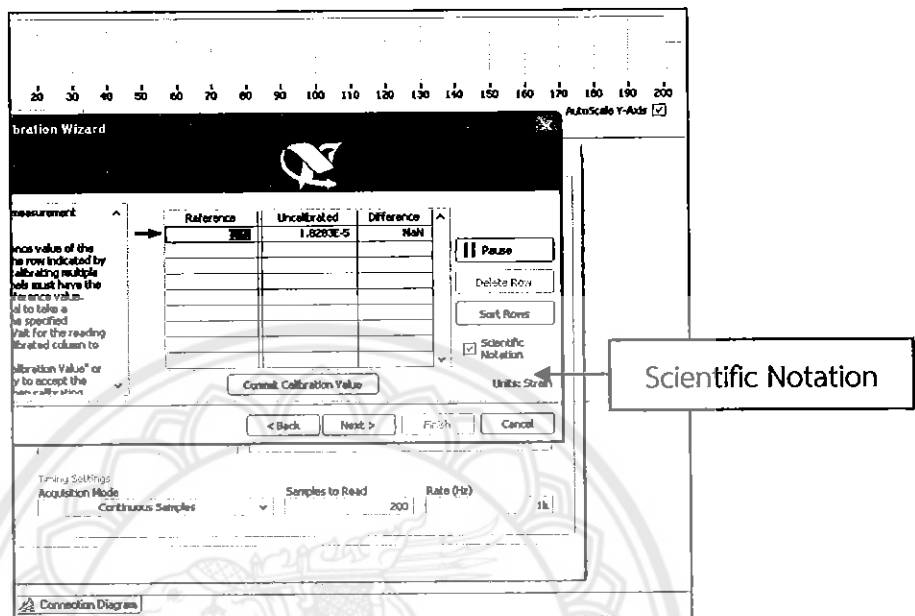
รูปที่ 3.41 การตั้งชื่อไฟล์

11.) ทำการปรับ Number of samples to average จาก 1000 เป็น 200 เพื่อให้ค่า strain แสดงผลออกมาเร็ว (1 วินาที อ่านได้ 5 ครั้ง) จากนั้นคลิกที่ปุ่ม Next แสดงดังรูปที่ 3.42



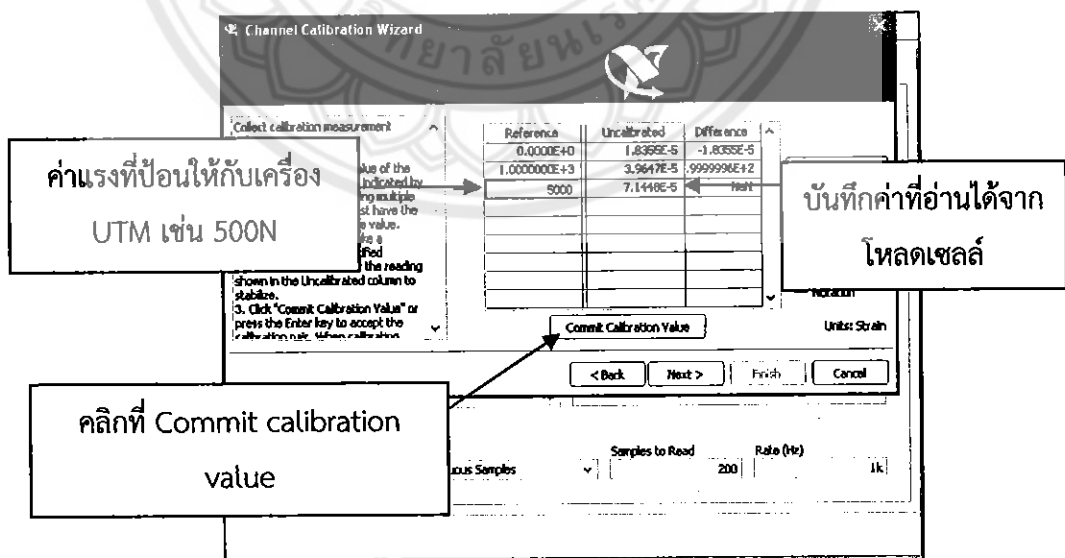
รูปที่ 3.42 Number of samples to average และ Next

12.) คลิกที่ Scientific Notation เพื่อให้โปรแกรมทำการอ่านค่าแรงที่ใส่เข้าไป แสดงดังรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.43 Scientific Notation

13.) ทำการใส่ค่าแรง (N) ที่ป้อนให้กับเครื่อง UTM รองจนกว่าค่าที่ได้จะคงที่ แล้วคลิกที่ Commit calibration value เพื่อบันทึกค่า strain ที่อ่านได้จาก indicator แสดงดังรูปที่ 3.44



รูปที่ 3.44 ตารางแสดงค่าของแรง (N) และความเครียด (strain)

3.4.3 การศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่องานวิจัย

ในการประเมินผลการวัดแรงจากโหลดเซลล์ในงานวิจัยนี้ ทำได้โดยการทดลองเปรียบเทียบค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM โดยนำขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 7500-1 มาประยุกต์ใช้ โดยปัจจัยต่างๆที่อาจจะส่งผลต่อการวัดแรงด้วยโหลดเซลล์ที่กำหนดไว้ในงานวิจัยนี้มี 3 ปัจจัยคือ

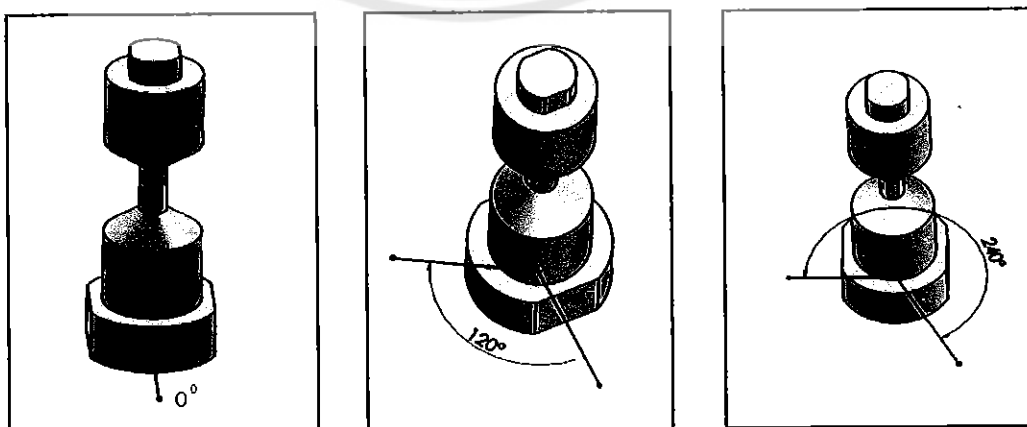
- 1.) ปัจจัยของการเลือกประเภทวงจรบริดจ์ของโปรแกรมทดสอบ
- 2.) ปัจจัยของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรบริดจ์ (Excitation Voltage)
- 3.) ปัจจัยจากการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนโหลดเซลล์

โดยมีขั้นตอนการทดลองโดยสรุปดังต่อไปนี้

1.) การทดสอบปัจจัยของการเลือกประเภทวงจรบริดจ์ของโปรแกรม Instruments Measurement and Automation Explorer ที่มีผลต่อค่าความเครียดที่วัดได้ ในการทดสอบจึงมีการเปลี่ยนแปลงการเลือกวงจรบริดจ์ I และวงจรบริดจ์ III เพื่อหาวงจรที่เหมาะสมกับโหลดเซลล์ที่ออกแบบและสร้างขึ้น เพื่อหาข้อผิดพลาดของโหลดเซลล์ก่อนการนำไปใช้งาน

2.) การทดสอบปัจจัยของขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรบริดจ์ (Excitation Voltage) ที่มีผลต่อค่าความเครียดที่วัดได้ จึงมีการทดลองที่แรงดันไฟฟ้าต่างกันที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์

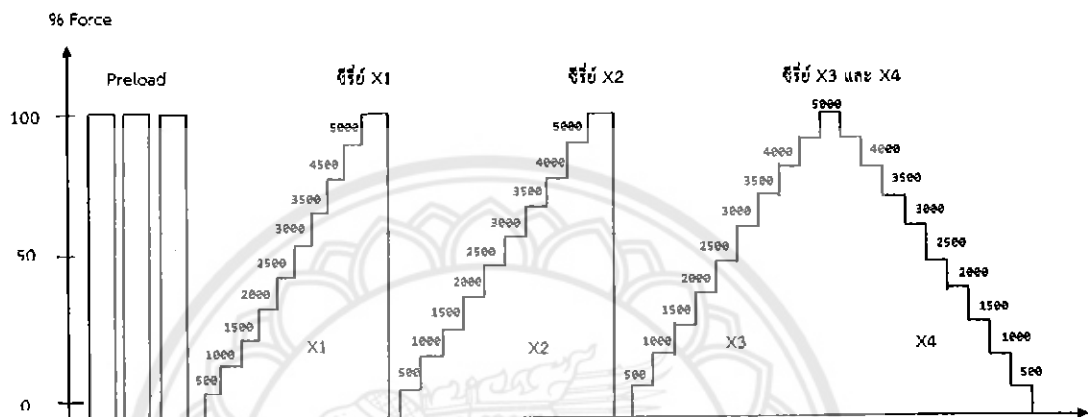
3.) การทดสอบปัจจัยจากการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนโหลดเซลล์ โดยนำวิธีการหมุนมาประยุกต์ใช้ในการทดสอบโหลดเซลล์ ซึ่งการทดสอบจะทำได้โดยการหมุนไปที่มุมแตกต่างกัน 3 ค่า โดยหมุนไปที่มุม 0 องศา ไปที่มุม 120 องศา และ 240 องศา ดังรูปที่ 3.45



รูปที่ 3.45 การทำการหมุนโหลดเซลล์จากมุม 0 , 120 และ 240 องศา[8]

3.4.4 การบันทึกค่าที่ได้จากการทดลอง

จากการทำการทดลอง โดยทำการใส่แรงจากเครื่อง UTM และอ่านค่าจากโพลดเซลล์ซึ่งติดตั้งที่เครื่องทดสอบแรง เพื่อให้มั่นใจว่าค่าแรงที่อ่านได้มีความถูกต้องและแม่นยำ จำเป็นต้องมีระบบการทดสอบแรง



รูปที่ 3.46 ขั้นตอนการทดสอบ

1.1) การทำ Pre load เป็นการทำให้เป็นการวอร์มเครื่องก่อนการทำการทดสอบ โดยจะทำการใส่แรง 0 นิวตัน ที่เครื่อง UTM และทำการอ่านค่าที่ได้จากเครื่อง indicator (Universal Strain Gage module NI-SCXI-1520) และบันทึกผล จากนั้นทำการเพิ่มแรงที่ 5000 นิวตัน และอ่านค่าที่ได้ จะทำซ้ำด้วยกันทั้งหมด 3 ครั้ง ดังรูปที่ 2.21

1.2) เป็นการใส่แรงไปที่เครื่อง UTM แรงที่ใส่ไปนั้นจะต้องเพิ่มขึ้นเรื่อยๆโดยที่ทำการใส่แรง 0 นิวตันและค่อยๆเพิ่มทีละ 500 นิวตัน เพิ่มไปจนถึง 5000 นิวตัน ตามที่ได้ออกแบบเมื่อทำการใส่แรงที่ 5000 นิวตัน และทำการปล่อยแรงออก ดังซีรี่ X1 รูปที่ 2.21 และทำการอ่านค่าแรงที่ได้จากโพลดเซลล์ทุกๆช่วงและทำการบันทึกผล ซึ่งซีรี่ X2 ทำเหมือนกันกับซีรี่ X1 ทุกขั้นตอน

1.3) ซีรี่ X3 และ ซีรี่ X4 ดังรูปที่ 2.21 จะทำแบบเดียวกันกับซีรี่ X1 และซีรี่ X2 แต่จะแตกต่างกันที่เมื่อทำการใส่แรงที่ 5000 นิวตันแล้วจะไม่มีปล่อยแรงออกทันที แต่จะทำการใส่แรงโดยลดขนาดของแรงลงเรื่อยๆ จนถึง 0 นิวตันและทำการอ่านค่าแรงที่ได้จากโพลดเซลล์ทุกๆช่วงและทำการบันทึกผล

1.) ขั้นตอนการ Preload

1.1.) เริ่มบันทึกค่าที่ 0 นิวตัน แล้วบันทึกผลค่าความเครียดที่อ่านได้ Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)

1.2.) ทำการเพิ่มแรงของเครื่อง UTM ที่ 5000 นิวตัน แล้วบันทึกค่าดังตารางที่ 3.1 ทำซ้ำกัน 3 ครั้ง

ตารางที่ 3.1 การบันทึกค่า preload

UTM(N)	ระยะยืดของเครื่อง UTM (mm)	ค่าที่อ่านได้จาก Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)
0		
5000		
0		
5000		
0		
5000		

2.) การเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2

2.1) เริ่มบันทึกค่าที่ 0 นิวตัน แล้วบันทึกระยะยืดของเครื่อง UTM และความเครียดที่อ่านได้จาก Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)

2.2) ทำการเพิ่มแรงของเครื่อง UTM ครั้งละ 500 นิวตัน แล้วบันทึกผลระยะยืดของเครื่อง UTM และค่าความเครียดที่อ่านได้จาก Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)

2.3) ทำซ้ำกันดังข้อ 2.2 จนครบ 5000 นิวตัน บันทึกค่าดังตารางตัวอย่างตารางที่

3.2

2.4) เก็บข้อมูลครั้งที่ 2 ด้วยการซ้ำตั้งแต่ ข้อ 2.1 ถึง 2.3

ตารางที่ 3.2 การเก็บข้อมูลครั้งที่ 1

UTM (N)	ระยะยืดของเครื่อง UTM (mm)	ผลต่างระยะยืด (mm)	ค่าที่อ่านได้จาก Load cell (x10 ⁻⁶ strain)
0			
500			
1000			
1500			
2000			
2500			
3000			
3500			
4000			
4500			
5000			

3.) การเก็บข้อมูลครั้งที่ 3

3.1) เริ่มบันทึกค่าที่ 0 นิวตัน แล้วบันทึกระยะยืดของเครื่อง UTM และความเครียดที่อ่านได้จาก Load cell (x10⁻⁶ strain)

3.2) ทำการเพิ่มแรงของเครื่อง UTM ครั้ง 500 นิวตัน แล้วบันทึกผลระยะยืดของเครื่อง UTM และค่าความเครียดที่อ่านได้จาก Load cell (x10⁻⁶ strain)

3.3) ทำซ้ำกันดังข้อ 2.2 จนครบ 5000 นิวตัน บันทึกค่าดังตารางตัวอย่าง ตารางที่ 3.3

3.4) ทำการลดแรงของเครื่อง UTM ครั้งละ 500 นิวตัน แล้วบันทึกผลระยะยืดของเครื่อง UTM และค่าความเครียดที่อ่านได้จาก Load cell (x10⁻⁶ strain)

3.5) ทำซ้ำกันดังข้อ 3.4 จนครบ 0 นิวตัน บันทึกค่าดังตารางตัวอย่าง ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การเก็บข้อมูลครั้งที่ 3

UTM (N)	ระยะยัดของเครื่อง UTM (mm)	ผลต่างระยะยัด (mm)	ค่าที่อ่านได้จาก Load cell (x10 ⁻⁶ strain)
0			
500			
1000			
1500			
2000			
2500			
3000			
3500			
4000			
4500			
5000			
4500			
4000			
3500			
3000			
2500			
2000			
1500			
1000			
500			
0			

3.5 วิธีการวิเคราะห์ผล

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้านสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับค่าความเครียดที่ได้จากการวัด โดยการใช้เทคนิค curve fitting ด้วย least square technique แล้วนำสมการที่ได้จากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับค่าความเครียดที่อ่านได้ นำมาหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับค่าความเครียดที่อ่านได้ โดยที่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงแรงไปเป็น Δy จะทำให้ความเครียดเปลี่ยนแปลงเป็น Δx แล้วจัดสมการความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูป

$$\Delta x = \frac{\Delta y}{z}$$

จากนั้นจะได้สมการความเครียด เพื่อนำไปหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างต่อไป

ตัวอย่างเช่น

หลังจากสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับค่าความเครียดที่อ่านได้
 $y = -14.77x + 1826.4$

จากนั้นนำมาจัดให้อยู่ในรูป $\Delta x = \frac{\Delta y}{z}$

จะได้ $x = \frac{y - 1826.4}{-14.77}$
 $= -0.068y + 123.66$

จากสมการจะได้สมการเปลี่ยนแปลงความเครียด หลังจากนั้นนำค่าความชันของสมการความเครียดมาใช้ในการหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง เพื่อเปรียบเทียบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากการใช้ค่าความชันมาคำนวณกับค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่คำนวณได้จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่าสอดคล้องกันหรือไม่

การวิเคราะห์ผลค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับทฤษฎีแสดงดังสมการที่ 3.4

%ความแตกต่างเทียบกับทฤษฎี =

$$\frac{\text{ค่าความชันของความเครียดทางทฤษฎี} - \text{ค่าความชันของความเครียดที่ได้จากผลการทดลอง}}{\text{ค่าความชันของความเครียดทางทฤษฎี}} \times 100\% \quad (3.4)$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

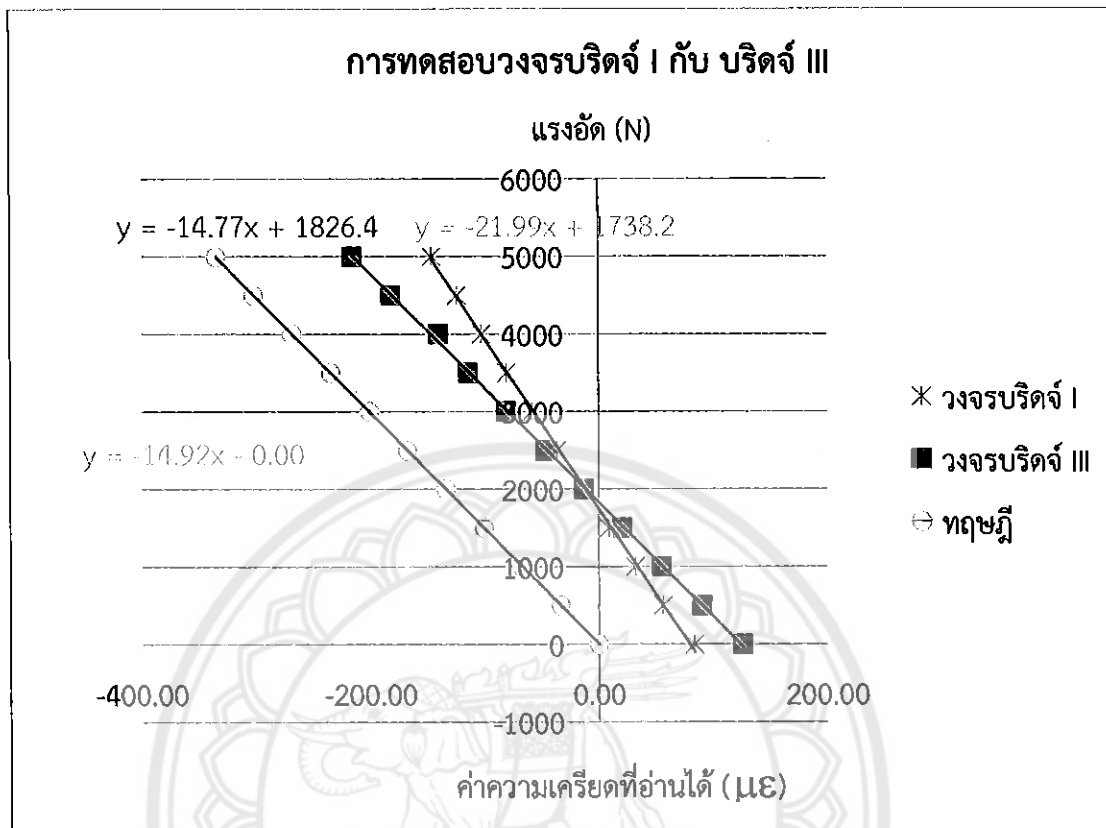
4.1 ผลของปัจจัยการเลือกประเภทวงจรบริดจ์ของโปรแกรมทดสอบโพลดเซลล์

โปรแกรมที่ใช้ในการอ่านค่าจากโพลดเซลล์ในงานวิจัยนี้คือโปรแกรม Instruments Measurement and Automation Explorer เพื่อให้แปรผลจากสัญญาณไฟฟ้าที่อ่านได้ไปแสดงเป็นค่าความเครียด ผู้ใช้ควรเลือกประเภทของวงจรบริดจ์ให้ตรงกับการติดตั้งสเตรนเกจที่โพลดเซลล์ ซึ่งในที่นี้โพลดเซลล์ต่อวงจรแบบบริดจ์ III ดังนั้นควรเลือกประเภทวงจรบริดจ์ III สำหรับโปรแกรม ทั้งนี้สิ่งที่น่าสนใจคือหากเลือกประเภทของวงจรบริดจ์ไม่ตรงกับการติดตั้งที่โพลดเซลล์จะเกิดผลอย่างไร ดังนั้นในการทดลองนี้จึงศึกษาผลจากการเลือกประเภทวงจรบริดจ์ในโปรแกรมสองแบบเทียบกับทางทฤษฎี ซึ่งแสดงในบทที่ 3 โดยตารางที่ 4.1 แสดงผลของแรงกดกับค่าความเครียดของโพลดเซลล์ทางทฤษฎีเทียบกับค่าความเครียดที่วัดได้จากการทดลอง จากการเลือกวงจรบริดจ์ I และ วงจรบริดจ์ III

ตารางที่ 4.1 ผลของแรงกดกับค่าความเครียดทางทฤษฎีเทียบกับค่าความเครียดที่วัดได้จากการทดลอง โดยเลือกวงจรบรีดจ์ I และ วงจรบรีดจ์ III

แรง (N)	ค่าทางทฤษฎี (με)	ค่าเฉลี่ยวงจรบรีดจ์ I (με)	ค่าเฉลี่ยวงจรบรีดจ์ III (με)
0	0.00	83.51	126.04
500	-33.51	56.29	90.13
1000	-67.01	32.03	55.07
1500	-100.52	8.95	20.82
2000	-134.03	-13.21	-13.21
2500	-167.53	-36.24	-47.01
3000	-201.04	-58.40	-80.85
3500	-234.54	-80.64	-114.48
4000	-268.05	-102.40	-140.59
4500	-301.56	-124.22	-181.81
5000	-335.06	-146.26	-215.35

จากตารางที่ 4.1 ค่าความเครียดที่วัดได้จากโหนดเซลล์กับการเลือกวงจรบรีดจ์ I ในโปรแกรมสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลในตารางที่ ก1. (ภาคผนวก ก) และค่าความเครียดที่วัดได้จากโหนดเซลล์ของวงจรบรีดจ์ III สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลในตารางที่ ก2. (ภาคผนวก ก) จะเห็นว่า ที่แรง 0 N มีค่าความเครียดที่อ่านได้จากการเลือกโปรแกรมวงจรบรีดจ์ I และวงจรบรีดจ์ III มีค่า 83.51 และ 126.04 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความเครียดตกค้างจากการติดตั้งสเตรนเกจ โดยมีสาเหตุจากหลายปัจจัยเช่น แนวการติดตั้งเอียง หรือการติดตั้งบนพื้นผิวโค้งเป็นต้น โดยเมื่อนำเอาค่าแรงที่ทดสอบต่างๆมาพล็อตร่วมกับค่าความเครียดจะได้กราฟดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การทดสอบระหว่างวงจรบรีดจ์ I และ วงจรบรีดจ์ III ที่ 2.5 โวลต์

จากรูปที่ 4.1 เมื่อดูจากความชันของกราฟซึ่งบ่งบอกถึง sensitivity ของเครื่องจะเห็นได้ชัดเจนว่าความชันของผลการวัดโดยใช้วงจรบรีดจ์ III มีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎีมากกว่าวงจรบรีดจ์ I โดยทั้งสองแบบมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังนั้นไม่ว่าจะเลือกใช้วงจรบรีดจ์แบบใดก็สามารถคำนวณแปรค่าความเครียดกลับเป็นค่าแรงได้โดยใช้สมการที่แสดงในกราฟ จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่ค่าแรงเป็นศูนย์ สำหรับการวัดจากโปรแกรมมีค่าความเครียดไม่เท่ากับ 0 (μE) เนื่องจากมีค่าตกค้างจากการติดตั้ง ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบค่า Sensitivity ของเครื่องมือหรือก็คือค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงต่อการเปลี่ยนค่าแรง ดังนั้นจึงทำการอ้างอิงค่าความเครียดที่จุดเริ่มให้เป็น 0 เท่ากัน โดยนำค่าความเครียดตกค้างที่ค่าแรงเป็นศูนย์มาลบออกในทุกๆข้อมูล จากตารางที่ 4.1 ยกตัวอย่างเช่น

ที่แรง 0 N มีค่าความเครียดตกค้างเริ่มต้นของวงจรบรีดจ์ I เท่ากับ 83.51 (μE)

ที่แรง 500 N มีค่าความเครียดที่อ่านได้ของวงจรบรีดจ์ I เท่ากับ 56.29 (μE)

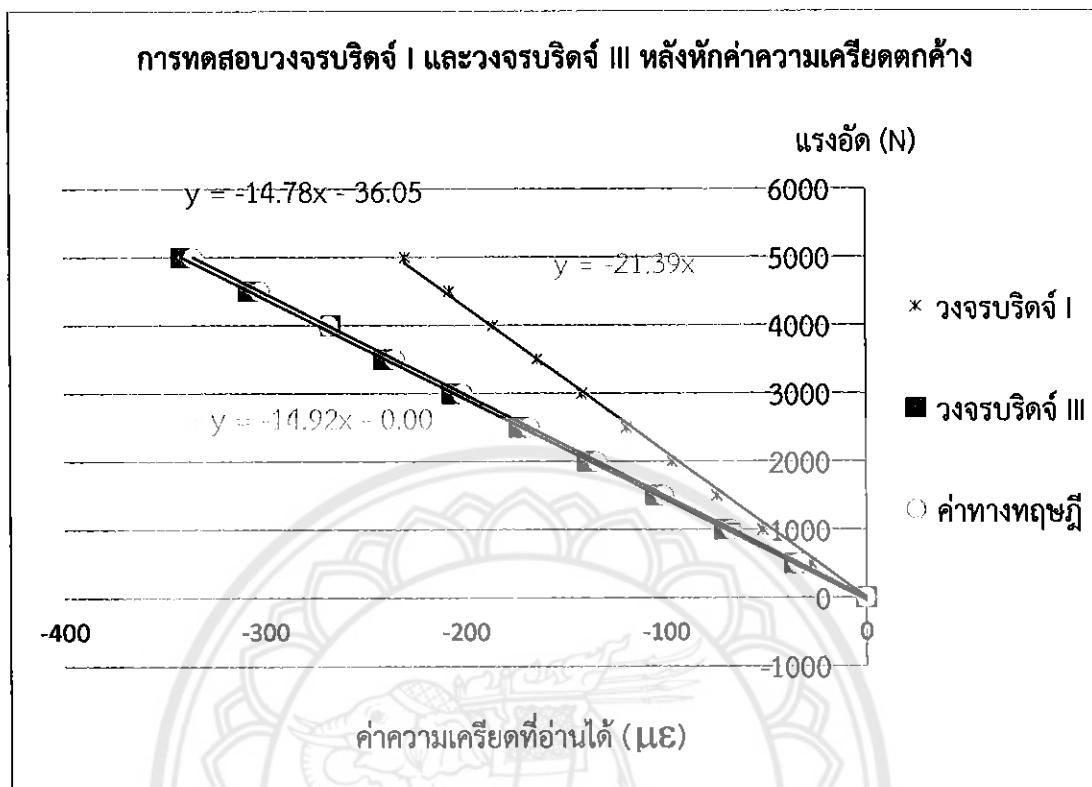
ดังนั้นความเครียดที่เปลี่ยนไปคือ $56.29 - 83.51 = -27.22$ (μE)

โดยนำค่าความเครียดตกค้างที่ค่าแรงเป็นศูนย์มาลบออกในทุกๆข้อมูล จะได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การนำค่าเฉลี่ยของความเครียดที่อ่านได้ลบด้วยค่าตกค้างของวงจรบรีดจ์ I และวงจรบรีดจ์ III

แรงกด (N)	ค่าความเครียดทางทฤษฎี (μE)	หาค่าเฉลี่ยวงจรบรีดจ์ I ให้เริ่มที่ 0 (μE)	หาค่าเฉลี่ยวงจรบรีดจ์ III ให้เริ่มที่ 0 (μE)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของวงจรบรีดจ์ I กับทฤษฎี	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของวงจรบรีดจ์ III กับทฤษฎี
0	0	0	0	0	0
500	-33.51	-27.22	-35.91	18.76	-7.17
1000	-67.01	-51.48	-70.97	23.18	-5.91
1500	-100.52	-74.56	-105.22	25.82	-4.68
2000	-134.03	-96.72	-139.25	27.83	-3.90
2500	-167.53	-119.75	-173.05	28.52	-3.29
3000	-201.04	-141.91	-206.89	29.41	-2.91
3500	-234.54	-164.15	-240.52	30.01	-2.55
4000	-268.05	-185.91	-266.63	30.64	0.53
4500	-301.56	-207.73	-307.85	31.11	-2.09
5000	-335.06	-229.77	-341.39	31.42	-1.89

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการป้อนแรงให้กับโพลดเซลล์ เช่นที่แรง 5000 N ค่าความเครียดทางทฤษฎีคำนวณได้ -335.06 μE ในขณะที่ค่าความเครียดที่อ่านได้จากวงจรบรีดจ์ I คือ -229.77 μE และจากวงจรบรีดจ์ III คือ -341.39 μE ซึ่งจากตารางที่ 4.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับทฤษฎีในวงจรบรีดจ์ I มีค่า ในช่วง 18.76% ถึง 31.42% ในขณะที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับทฤษฎีในวงจรบรีดจ์ III มีค่า ในช่วง 0.53% ถึง -7.17% โดยรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าทางทฤษฎี กับผลการวัดจากการเลือกวงจรบรีดจ์ I และ วงจรบรีดจ์ III หลังจากปรับค่าตกค้างเริ่มต้นแล้ว



รูปที่ 4.2 การทดสอบวงจรมอเตอร์ I และ วงจรมอเตอร์ III หลังจากหักค่าความเครียดตกค้าง

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การเลือกโปรแกรมด้วยวงจรมอเตอร์ III ให้ค่าความเครียดใกล้เคียงกับทางทฤษฎี มากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้วงจรมอเตอร์ I ซึ่งสอดคล้องกับรูปแบบการติดตั้งสเตรนเกจบนโพลดเซลล์ในงานวิจัยนี้ซึ่งเป็นวงจรมอเตอร์ III

จากตารางที่ 4.1 เมื่อวิเคราะห์ด้านสมการ จะได้ค่าความเครียดจากทฤษฎีสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$\text{ทฤษฎี} \quad y = -14.923x \quad (4.1)$$

$$\therefore x = \frac{y}{-14.923} = -0.067y \quad (4.2)$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับค่าความเครียดที่ได้จากการวัดโดยเลือกค่าวงจรมอเตอร์ I จะได้จากเทคนิค curve fitting ด้วย least square technique ดังแสดงในรูปที่ 4.1 คือ

$$\text{วงจรมอเตอร์ I} \quad y = -21.99x + 1738.2 \quad (4.3)$$

$$\therefore x = \frac{y-1738.2}{-21.99} = -0.044y + 75.61 \quad (4.4)$$

สมการความสัมพันธ์สำหรับการเลือกค่าวงจรบริดจ์ III คือ

$$\text{วงจรบริดจ์ III} \quad y = -14.77x + 1826.4 \quad (4.5)$$

$$\therefore x = \frac{y-1826.4}{-14.77} = -0.068y + 123.66 \quad (4.6)$$

โดยที่ y คือ แรงกด (N)

X คือ ค่าความเครียดที่อ่านได้ ($\mu\epsilon$)

เมื่อพิจารณาค่าความชันกราฟทางทฤษฎี (สมการที่ 4.2) กับสมการของการเลือกวงจรบริดจ์ I (สมการที่ 4.4) และวงจรบริดจ์ III (สมการที่ 4.6) จะพบว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับทฤษฎีดังนี้

$$\begin{aligned} \text{วงจรบริดจ์ I} &= \frac{(-0.067) - (-0.044)}{-0.067} \times 100\% \\ &= 34.33\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{วงจรบริดจ์ III} &= \frac{(-0.067) - (-0.068)}{(-0.067)} \times 100\% \\ &= -1.49\% \end{aligned}$$

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 จะเห็นได้ว่าการทดสอบวงจรบริดจ์ I และวงจรบริดจ์ III ที่ 2.5 โวลต์ จะพบว่าวงจรบริดจ์ I มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีมากกว่าวงจรบริดจ์ III และถ้าพิจารณาจากค่าความชันหรือ ความเครียดที่เปลี่ยนไปทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับค่าความเครียดที่เปลี่ยนไปจากการอ่านวงจรบริดจ์ I และ วงจรบริดจ์ III เมื่อมีการเปลี่ยนค่าแรงเท่าๆกันจะพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 34.33 และ -1.49 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับทฤษฎีดังแสดงในตารางที่ 4.2 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความเครียดเทียบกับทฤษฎีสามารถประมาณได้ด้วยการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่า sensitivity (dx/dy) ของสมการที่ 4.2 , 4.4 และ 4.6

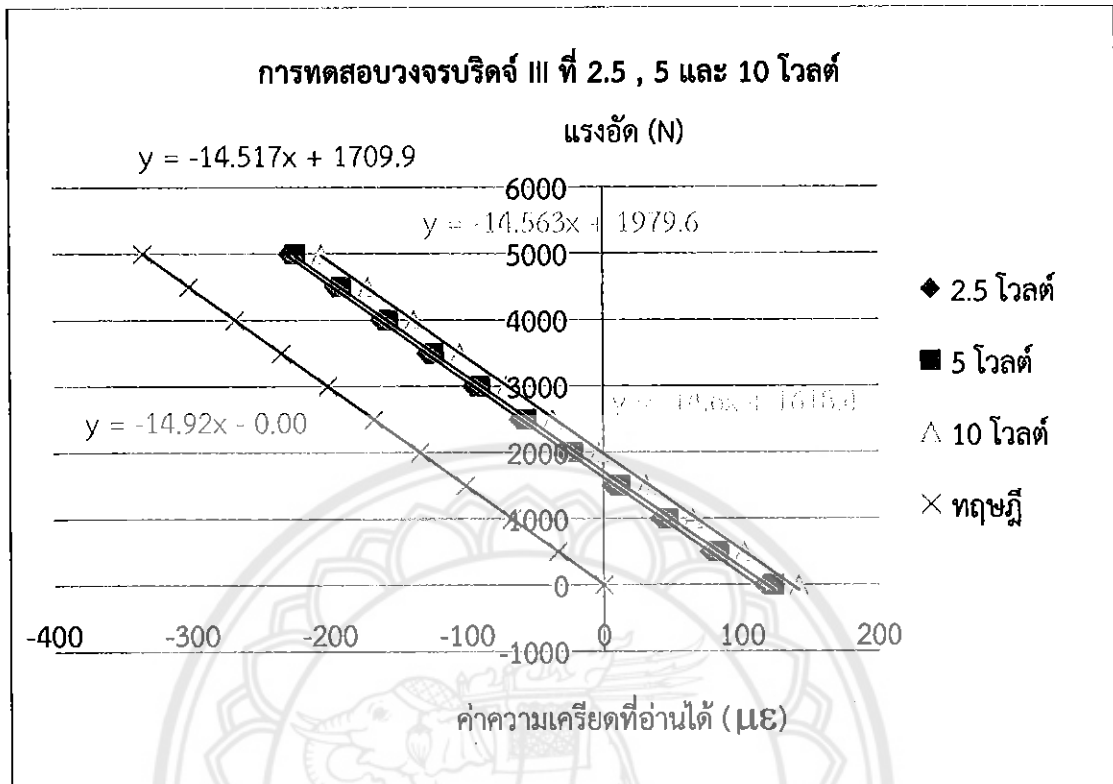
4.2 ผลของปัจจัยขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรบริดจ์ (Excitation Voltage)

ในการทดลองเพื่อวิเคราะห์ผลของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรบริดจ์ ทำโดยการทดสอบ โหลดเซลล์ โดยมีการเลือกวงจรบริดจ์ III และมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ ดังตารางที่ 4.3 แสดงผลของแรงกดกับค่าความเครียดของโหลดเซลล์ทางทฤษฎีเทียบกับค่าความเครียดที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของแรงกดกับค่าความเครียดของโหลดเซลล์ทางทฤษฎีเทียบกับค่าความเครียดที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์

แรง (N)	ค่าทางทฤษฎี ($\mu\epsilon$)	ค่าเฉลี่ยที่ 2.5 โวลต์ ($\mu\epsilon$)	ค่าเฉลี่ยที่ 5 โวลต์ ($\mu\epsilon$)	ค่าเฉลี่ยที่ 10 โวลต์ ($\mu\epsilon$)
0	0	115.88	123.35	141.34
500	-33.51	76.78	83.23	101.79
1000	-67.01	40.57	47.02	64.724
1500	-100.52	5.95	12.07	30.724
2000	-134.03	-28.38	-22.23	-3.53
2500	-167.53	-61.98	-56.20	-37.16
3000	-201.04	-95.64	-89.94	-70.94
3500	-234.54	-129.08	-123.45	-104.57
4000	-268.05	-162.68	-157.07	-138.25
4500	-301.56	-196.17	-190.86	-171.73
5000	-335.06	-229.49	-224.58	-205.49

จากตารางที่ 4.3 ค่าความเครียดที่วัดได้จากโหลดเซลล์ที่มีการต่อวงจรบริดจ์ III และมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลในตารางที่ ก3. – ก5. (ภาคผนวก ก) จะเห็นได้ว่าค่าแรงที่ 0 (N) มีค่าความเครียดที่อ่านได้ 115.88 , 123.35 และ 141.34 $\mu\epsilon$ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความเครียดตกค้างจากการติดตั้งสเตรนเกจ โดยเมื่อนำเอาค่าแรงที่ทดสอบต่างๆมาพล็อตรวมกับค่าความเครียด ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ 4.3



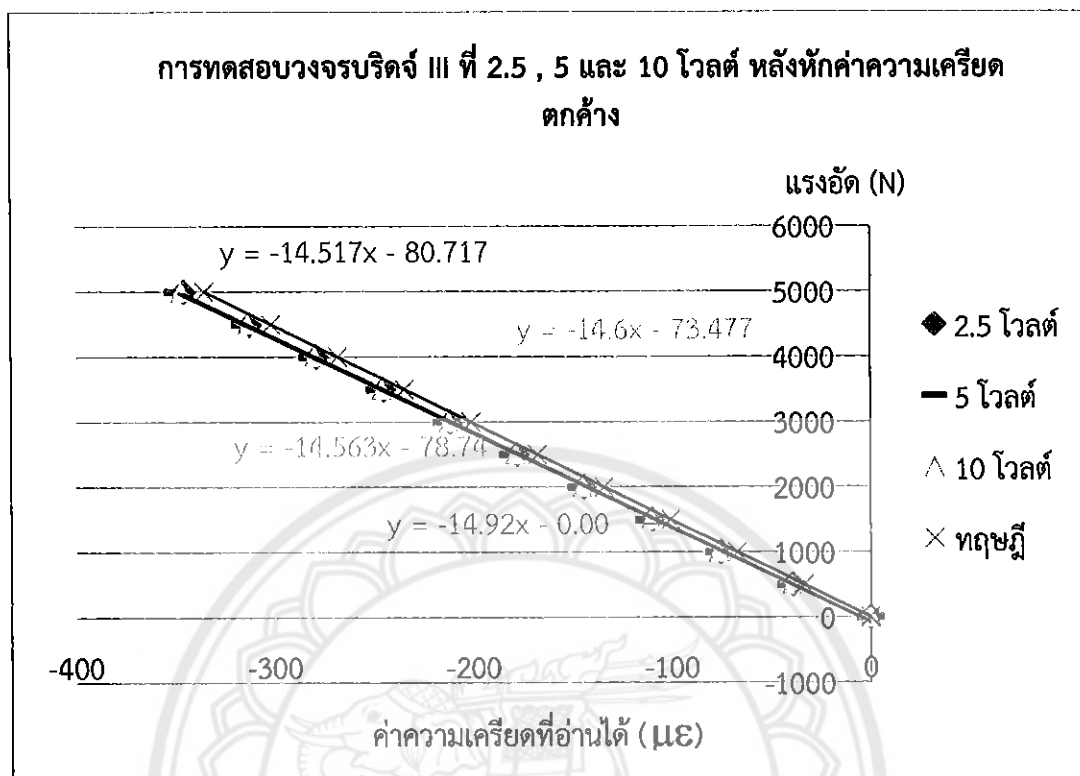
รูปที่ 4.3 การทดสอบวงจรมอเตอร์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์

จากรูปที่ 4.3 เมื่อดูจากความชันของกราฟซึ่งบ่งบอกถึง sensitivity ของเครื่องจะเห็นได้ชัดเจนว่าความชันของผลการวัดโดยใช้วงจรมอเตอร์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ มีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี โดยทั้งหมดมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังนั้นไม่ว่าจะเลือกใช้แรงดันไฟฟ้าแบบใดก็สามารถคำนวณแปรค่าความเครียดกลับเป็นค่าแรงได้โดยใช้สมการที่แสดงในกราฟ จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่ค่าแรงเป็นศูนย์ สำหรับการวัดจากโปรแกรมมีค่าความเครียดไม่เท่ากับ 0 ($\mu\epsilon$) เนื่องจากมีค่าตกค้างจากการติดตั้ง ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบค่า Sensitivity ของเครื่องมือหรือก็คือค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงต่อการเปลี่ยนค่าแรง ดังนั้นจึงทำการอ้างอิงค่าความเครียดที่จุดเริ่มให้เป็น 0 เท่ากัน โดยนำค่าความเครียดตกค้างที่ค่าแรงเป็นศูนย์มาลบออกในทุกๆข้อมูล จากตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การนำค่าเฉลี่ยของความเครียดที่อ่านได้ลบด้วยค่าตกค้างของวงจรรบริดจ์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์

แรง (N)	ค่าทางทฤษฎี ($\mu\epsilon$)	ทำค่าเฉลี่ยที่ 2.5 โวลต์ ให้เริ่มที่ 0 ($\mu\epsilon$)	ทำค่าเฉลี่ยที่ 5 โวลต์ ให้เริ่มที่ 0 ($\mu\epsilon$)	ทำค่าเฉลี่ยที่ 10 โวลต์ ให้เริ่มที่ 0 ($\mu\epsilon$)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ 2.5 โวลต์	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ 5 โวลต์	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ 10 โวลต์
0	0	0	0	0	0	0	0
500	-33.51	-39.1	-40.92	-39.55	-16.69	-19.74	-18.04
1000	-67.01	-75.31	-76.32	-76.616	-12.38	-13.89	-14.33
1500	-100.52	-109.93	-111.28	-110.616	-9.36	-10.71	-10.04
2000	-134.03	-144.26	-145.58	-144.87	-7.64	-8.62	-8.09
2500	-167.53	-177.86	-179.55	-178.5	-6.17	-7.17	-6.55
3000	-201.04	-211.52	-213.29	-212.28	-5.21	-6.09	-5.59
3500	-234.54	-244.96	-246.80	-245.91	-4.44	-5.22	-4.85
4000	-268.05	-278.56	-280.41	-279.59	-3.92	-4.61	-4.30
4500	-301.56	-312.05	-314.21	-313.07	-3.48	-4.20	-3.82
5000	-335.06	-345.37	-347.39	-346.83	-3.08	-3.84	-3.51

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการป้อนแรงให้กับโพลีเซลล์ เช่นที่แรง 5000 N ค่าความเครียดทางทฤษฎีคำนวณได้ -335.06 $\mu\epsilon$ ในขณะที่ค่าความเครียดที่อ่านได้จากวงจรรบริดจ์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ คือ -345.37 , -347.39 และ -346.83 $\mu\epsilon$ ตามลำดับ ซึ่งจากตารางที่ 4.4 ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับทฤษฎีในวงจรรบริดจ์บริดจ์ III ที่ 2.5 โวลต์ ในช่วง -16.69% ถึง -3.08% วงจรรบริดจ์ III ที่ 5 โวลต์ มีค่าในช่วง -19.74% ถึง -3.84% และที่ 10 โวลต์ มีค่าในช่วง -18.04% ถึง -3.51% โดยรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าทางทฤษฎี กับผลการวัดจากการเลือกวงจรรบริดจ์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ หลังจากปรับค่าตกค้างเริ่มต้นแล้ว



รูปที่ 4.4 การทดสอบวงจรรบริดจ์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ หลังจากหักค่าความเครียดตกค้าง

จากตารางที่ 4.3 เมื่อวิเคราะห์ด้านสมการ จะได้ค่าความเครียดจากทฤษฎีสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$\text{ทฤษฎี} \quad y = -14.923x \quad (4.1)$$

$$\therefore x = \frac{y}{-14.923} = -0.067y \quad (4.2)$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับค่าความเครียดที่ได้จากการวัดโดยเลือกค่าวงจรรบริดจ์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ จะได้จากเทคนิค curve fitting ด้วย least square technique ดังแสดงในรูปที่ 4.3 คือ

$$\text{วงจรรบริดจ์ III ที่ 2.5 โวลต์} \quad y = -14.6x + 1618.4 \quad (4.7)$$

$$\therefore x = \frac{y - 1618.4}{-14.6} = -0.068y + 110.85 \quad (4.8)$$

$$\text{วงจรรบริดจ์ III ที่ 5 โวลต์} \quad y = -14.517x + 1709.9 \quad (4.9)$$

$$\therefore x = \frac{y-1709.9}{-14.517} = -0.069y + 117.79 \quad (4.10)$$

วงจรมอเตอร์ III ที่ 10 โวลต์ $y = -14.563x + 1979.6 \quad (4.11)$

$$\therefore x = \frac{y-1979.6}{-14.563} = -0.069y + 135.93 \quad (4.12)$$

จากรูปที่ 4.3 และ 4.4 จะเห็นได้ว่าการทดสอบวงจรมอเตอร์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ จะพบว่าวงจรมอเตอร์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี และเมื่อพิจารณาค่าความชันกราฟ ทางทฤษฎี (สมการที่ 4.2) กับสมการของการเลือกวงจรมอเตอร์ III ที่ 2.5 โวลต์ (สมการที่ 4.8) , 5 โวลต์ (สมการที่ 4.10) และ 10 โวลต์ (สมการที่ 4.12) จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี โดยจากตารางที่ 4.4 พบว่า ที่ 500 N ค่าความเครียดที่วัดได้จากวงจรมอเตอร์ ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ มีความแตกต่างกันสูงสุดประมาณ 3% (19.74-16.69) โดยที่แรง 5000 N จะมีความแตกต่างความเครียดที่วัดได้ประมาณ 0.8% (3.84-3.08) จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้า ทั้งสามระดับที่ป้อนให้กับวงจรมอเตอร์ ได้ผลใกล้เคียงกัน

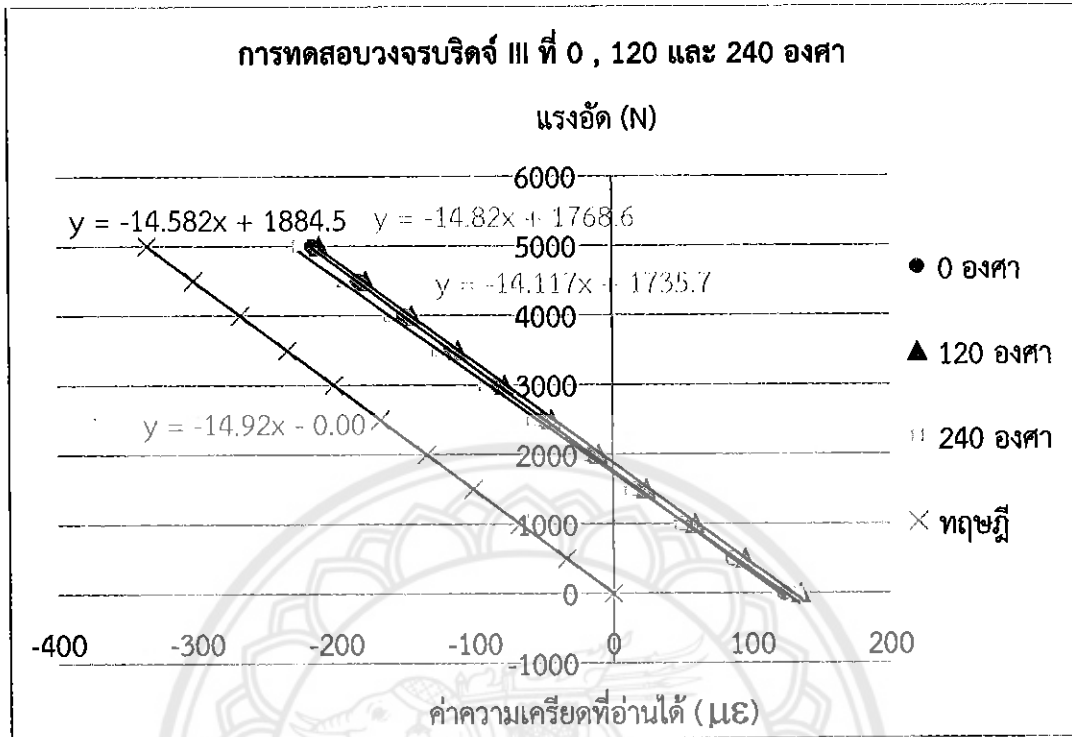
4.3 ผลของปัจจัยจากการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนโพลเซลล์

ในการทำการทดสอบโพลเซลล์ที่มีการต่อวงจรมอเตอร์ III และมีการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนโพลเซลล์ที่ 0 , 120 และ 240 องศาและแสดงค่าความเครียด โดยตารางที่ 4.5 แสดงผลของแรงกดกับค่าความเครียดของโพลเซลล์ทางทฤษฎีเทียบกับค่าความเครียดที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนโพลเซลล์ที่ 0 , 120 และ 240 องศา ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ผลของแรงกดกับค่าความเครียดของโพลีเอทิลีนที่ทางทฤษฎีเทียบกับค่าความเครียดที่วัดได้จากการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนโพลีเอทิลีนที่ 0 , 120 และ 240 องศา ตามลำดับ

แรง (N)	ค่าทางทฤษฎี (με)	ค่าเฉลี่ยที่ 0 องศา (με)	ค่าเฉลี่ยที่ 120 องศา (με)	ค่าเฉลี่ยที่ 240 องศา (με)
0	0.00	122.7	134.77	133.38
500	-33.51	85.72	95	86.81
1000	-67.01	50.52	58.99	48.7
1500	-100.52	16.73	23.9	12.62
2000	-134.03	-17.01	-10.22	-22.59
2500	-167.53	-50.43	-44.13	-57.33
3000	-201.04	-83.68	-77.7	-91.68
3500	-234.54	-116.79	-111.2	-125.94
4000	-268.05	-150.27	-144.54	-159.9
4500	-301.56	-183.69	-177.91	-193.68
5000	-335.06	-216.67	-211.27	-225.92

จากตารางที่ 4.5 ค่าความเครียดที่วัดได้จากโพลีเอทิลีนที่มีการต่อวงจรมัด III และมีการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนโพลีเอทิลีนที่ 0 , 120 และ 240 องศา สามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลในตารางที่ ก6. - ก9. (ภาคผนวก ก) จะเห็นได้ว่าค่าแรงที่ 0 (N) มีค่าความเครียดที่อ่านได้ 122.7 , 134.77 และ 133.38 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความเครียดตกค้างจากการติดตั้งสเตรนเกจ โดยเมื่อนำเอาค่าแรงที่ทดสอบต่างๆมาพล็อตร่วมกับค่าความเครียด ซึ่งจะได้กราฟดังรูปที่ 4.5



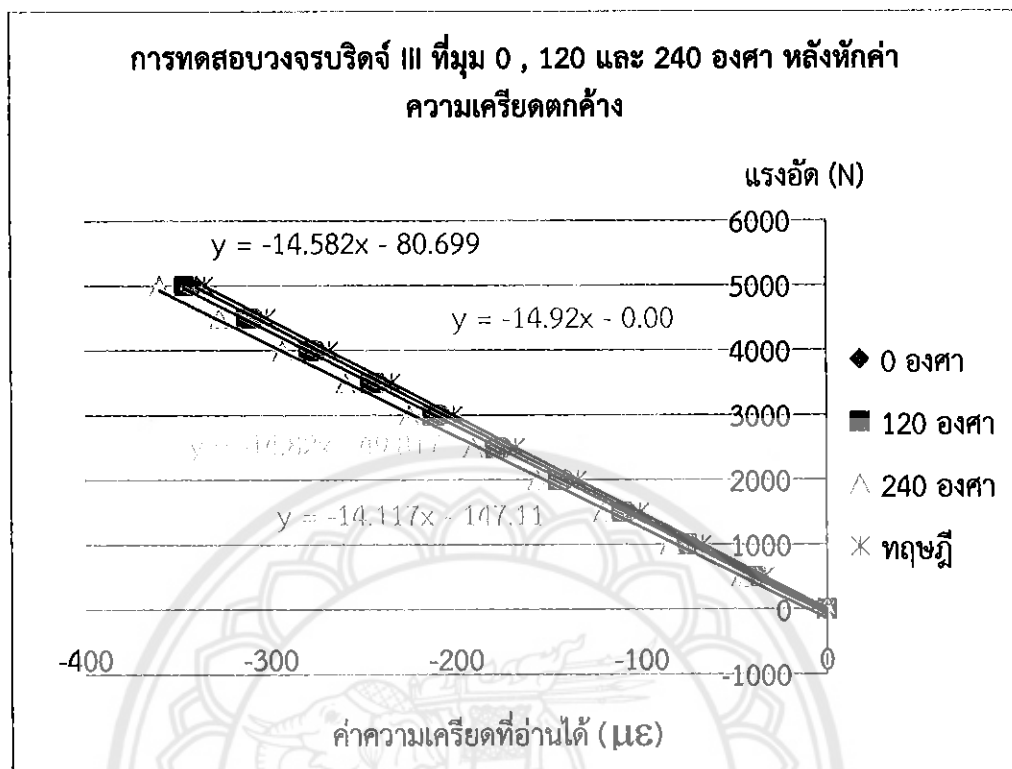
รูปที่ 4.5 การทดสอบวงจรบริดจ์ ที่มีมุม 0 , 120 และ 240 องศา

จากรูปที่ 4.5 เมื่อดูจากความชันของกราฟซึ่งบ่งบอกถึง sensitivity ของเครื่อง จะเห็นได้ชัดเจนว่าความชันของผลการวัดโดยใช้วงจรบริดจ์ III ที่ 0 , 120 และ 240 องศา มีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎี โดยทั้งหมดมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังนั้นไม่ว่าจะหมุนแบบใดก็สามารถคำนวณแปรค่าความเครียดกลับเป็นค่าแรงได้โดยใช้สมการที่แสดงในกราฟ จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่ค่าแรงเป็นศูนย์ สำหรับการวัดจากโปรแกรมมีค่าความเครียดไม่เท่ากับ 0 (μE) เนื่องจากมีค่าตกค้างจากการติดตั้ง ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบค่า Sensitivity ของเครื่องมือหรือก็คือ ค่าความเครียดที่เปลี่ยนแปลงต่อการเปลี่ยนค่าแรง ดังนั้นจึงทำการอ้างอิงค่าความเครียดที่จุดเริ่มให้เป็น 0 เท่ากัน โดยนำค่าความเครียดตกค้างที่ค่าแรงเป็นศูนย์มาลบออกในทุกๆข้อมูล จากตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การนำค่าเฉลี่ยของความเครียดที่อ่านได้ลบด้วยค่าตกค้างของวงจรบรีดจ์ III ที่ 0 , 120 และ 240 องศา

แรง (N)	ค่าทางทฤษฎี ($\mu\epsilon$)	ทำค่าเฉลี่ยที่ 0 องศา ให้เริ่มที่ 0 ($\mu\epsilon$)	ทำค่าเฉลี่ยที่ 120 องศา ให้เริ่มที่ 0 ($\mu\epsilon$)	ทำค่าเฉลี่ยที่ 240 องศา ให้เริ่มที่ 0 ($\mu\epsilon$)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ 0 องศา	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ 120 องศา	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างที่ 240 องศา
0	0	0	0	0	0	0	0
500	-33.51	-36.98	-39.77	-46.57	-10.37	-18.69	-38.99
1000	-67.01	-72.18	-75.78	-84.68	-7.71	-13.08	-26.36
1500	-100.52	-105.97	-110.87	-120.76	-5.42	-10.30	-20.14
2000	-134.03	-139.71	-144.99	-155.97	-4.24	-8.18	-16.37
2500	-167.53	-173.13	-178.9	-190.71	-3.34	-6.79	-13.84
3000	-201.04	-206.38	-212.47	-225.06	-2.66	-5.69	-11.95
3500	-234.54	-239.49	-245.97	-259.32	-2.11	-4.87	-10.56
4000	-268.05	-272.97	-279.31	-293.28	-1.84	-4.20	-9.41
4500	-301.56	-306.39	-312.68	-327.06	-1.60	-3.69	-8.46
5000	-335.06	-339.37	-346.04	-359.3	-1.29	-3.28	-7.23

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการป้อนแรงให้กับโพลดเซลล์ เช่นที่แรง 5000 N ค่าความเครียดทางทฤษฎีคำนวณได้ $-335.06 \mu\epsilon$ ในขณะที่ค่าความเครียดที่อ่านได้จากวงจรบรีดจ์ III ที่ 0 , 120 และ 240 องศา คือ -339.37 , -346.04 และ $-359.3 \mu\epsilon$ ตามลำดับ ซึ่งจากตารางที่ 4.6 ค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเทียบกับทฤษฎีในวงจรบรีดจ์บรีดจ์ III ที่ 0 องศา ในช่วง -10.37% ถึง -1.29% วงจรบรีดจ์ III ที่ 120 องศา มีค่าในช่วง -18.69% ถึง -3.28% และที่ 240 องศา มีค่าในช่วง -38.99% ถึง -7.23% โดยรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบค่าทางทฤษฎี กับผลการวัดจากการเลือกวงจรบรีดจ์ III ที่ 0, 120 และ 240 องศา หลังจากปรับค่าตกค้างเริ่มต้นแล้ว



รูปที่ 4.6 การทดสอบวงจรมอเตอร์ III ที่มีม 0 , 120 และ 240 องศา หลังหักค่าความเครียดตกค้าง

จากตารางที่ 4.5 เมื่อวิเคราะห์ด้านสมการ จะได้ค่าความเครียดจากทฤษฎีสามารถคำนวณได้โดยสมการที่ 3.2 ดังนี้

$$\text{ทฤษฎี} \quad y = -14.923x \quad (4.1)$$

$$\therefore x = \frac{y}{-14.923} = -0.067y \quad (4.2)$$

สมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับค่าความเครียดที่ได้จากการวัดโดยเลือกค่าวงจรมอเตอร์ III ที่ 0 , 120 และ 240 องศา จะได้จากเทคนิค curve fitting ด้วย least square technique ดังแสดงในรูปที่ 4.5 คือ

$$\text{วงจรมอเตอร์ III ที่ 0 องศา} \quad y = -14.82x + 1768.5 \quad (4.13)$$

$$\therefore x = \frac{y-1768.5}{-14.82} = -0.067y + 119.33 \quad (4.14)$$

$$\text{วงจรมอเตอร์ III ที่ 120 องศา} \quad y = -14.582x + 1884.5 \quad (4.15)$$

$$\therefore x = \frac{y-1884.5}{-14.582} = -0.069y + 129.23 \quad (4.16)$$

วงจรถัด III ที่ 240 องศา $y = -14.117x + 1735.7 \quad (4.17)$

$$\therefore x = \frac{y-1735.7}{-14.117} = -0.070y + 122.95 \quad (4.18)$$

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 จะเห็นได้ว่าการทดสอบวงจรถัด III ที่ 0 , 120 และ 240 องศา มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี แต่เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของค่าความเครียดที่วัดได้ จากทั้งสามตำแหน่งมุมการวางโพลดเซลล์ ดังตารางที่ 4.6 พบว่า ที่ 500N ค่าความเครียดที่วัดได้จากตำแหน่งมุมทั้งสาม มีความแตกต่างกันสูงสุดประมาณ 28% (38.99-10.37) โดยที่แรง 5000 N จะมีความแตกต่างความเครียดที่วัดได้ประมาณ 6% (7.23-1.29) จะเห็นได้ว่าตำแหน่งมุมการวางโพลดเซลล์มีค่าที่ได้แตกต่างกันค่อนข้างมาก ดังนั้นอาจสรุปว่าโพลดเซลล์นี้มีการขึ้นรูปห้วงรองกดไม่เรียบพอ หรือห้วงกดเอียง ทำให้ผลที่วัดได้ที่มุมต่างๆมีความแตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทำ simulation ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่าค่าความเค้นอยู่ในช่วง 57.880-67.455 MPa และค่าความเครียดอยู่ในช่วง 312.5-349.1 $\mu\epsilon$ ซึ่งค่า simulation ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สอดคล้องกับผลการคำนวณทางทฤษฎีที่คำนวณได้ความเค้น 63.66 MPa ค่าความเครียด 335 $\mu\epsilon$

1.) ผลของปัจจัยการเลือกประเภทวงจรถบรีดจ์ของโปรแกรมทดสอบโพลดเซลล์

การทดสอบวงจรถบรีดจ์ I และวงจรถบรีดจ์ III ที่ 2.5 โวลต์ จะพบว่าวงจรถบรีดจ์ III มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎีมากกว่าวงจรถบรีดจ์ I และถ้าพิจารณาจากค่าความชันหรือ ความเครียดที่เปลี่ยนไปทางทฤษฎีเปรียบเทียบกับค่าความเครียดที่เปลี่ยนไปจากการอ่านวงจรถบรีดจ์ I และ วงจรถบรีดจ์ III เมื่อมีการเปลี่ยนค่าแรงเท่าๆกันจะได้ว่ามีค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างอยู่ที่ 34.33 และ -1.49 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

2.) ผลของปัจจัยขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรถบรีดจ์ (Excitation Voltage)

การทดสอบวงจรถบรีดจ์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ จะพบว่าวงจรถบรีดจ์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี และเมื่อพิจารณาค่าความชันกราฟ ทางทฤษฎี กับสมการของการเลือกวงจรถบรีดจ์ III ที่ 2.5 , 5 และ 10 โวลต์ จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้า ทั้งสามระดับที่ป้อนให้กับวงจรถบรีดจ์ได้ผลใกล้เคียงกัน

3.) ผลของปัจจัยจากการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนโพลดเซลล์

การทดสอบวงจรถบรีดจ์ III ที่ 0 , 120 และ 240 องศา มีค่าใกล้เคียงกับทฤษฎี แต่เมื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของค่าความเครียดที่วัดได้ จากทั้งสามตำแหน่งมุมการวางโพลดเซลล์ พบว่าที่ 500 N ค่าความเครียดที่วัดได้จากตำแหน่งมุมทั้งสาม มีความแตกต่างกันสูงสุดประมาณ 28%

(38.99-10.37) โดยที่แรง 5000 N จะมีความแตกต่างความเครียดที่วัดได้ประมาณ 6% (7.23-1.29) จะเห็นได้ว่าตำแหน่งมุมการวางโพลดเซลล์มีค่าที่ได้แตกต่างกันค่อนข้างมาก ดังนั้นอาจสรุปว่าโพลดเซลล์นี้มีการขึ้นรูปหัวรองกดไม่เรียบพอ หรือ หัวกดเอียง ทำให้ผลที่วัดได้ที่มุมต่างๆมีความแตกต่างกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทดสอบโพลดเซลล์เกิดค่าความผิดพลาดขึ้น เนื่องจากในการขึ้นรูปชิ้นงานตรงรอยต่ออาจมีการยึดติดกันไม่สนิท จึงควรมีการกลึงขึ้นรูปชิ้นงานใหม่ให้ชิ้นงานปิดกันสนิท

5.2.2 ในขั้นตอนการติดตั้งสเตรนเกจในแนวตั้งฉากหรือแนวขนานองศาที่ติดตั้งอาจจะไม่ได้ตามที่กำหนดไว้

5.2.3 ในขั้นตอนการติดตั้งโพลดเซลล์ก่อนเริ่มทำการทดสอบ อาจเกิดการเอียงศูนย์จากการติดตั้งโพลดเซลล์เข้ากับเครื่อง UTM

5.2.4 การตั้งค่าโปรแกรม National Instruments Measurement and Automation Explorer ที่ใช้ในการทดสอบเครื่อง UTM อาจจะปรับตั้งค่าไม่เหมาะสมกับการทำการทดสอบ

5.2.5 ในการทดสอบโพลดเซลล์ที่มุมต่างๆ อาจจะมีคามคาดเคลื่อนได้ในระยะการหมุนองศา จึงทำให้เกิดค่าความผิดพลาดขึ้นในการทดสอบ

5.2.6 ตัวโพลดเซลล์ของเครื่อง UTM ไม่ได้รับการสอบเทียบมาเป็นเวลานาน อาจจะมีผลในการทำการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิชชุดา แสงสำลี,พร หรรษมนตร์,เพ็ญศิริ ทองผดุงโรจน์,ชนิดของโหลดเซลล์, <http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=1814§ion=9&rcountY>
- [2] สมบัติ อาบิดิน,2533,โหลดเซลล์แบบค่าความต้านทาน,วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพ, <http://research.rdi.ku.ac.th/world/cache/63/SoonthornKIMAll.pdf>
- [3] ชาวสวน กาญจน์มัย,ME 301 Mechanical Engineering Laboratory I,ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [4] ปราโมทย์ เดชะอำไพ,วิโรจน์ ลิมตระการ,เสก ภูววรรณ ,สุจิต ภาวัตสกุล,ยศกร ประทุมวัลย์, การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย solidWorks simulation,สมาคมส่งเสริม เทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- [5] ชำรงค์ศักดิ์ สุวานิชวงศ์ ,ภาณุวัฒน์ จ้อยกลัด,วิชชากร เมืองใจ,นาย วิรัตน์ แตนนารัตน์, การศึกษาหลักการทำงานของสเตรนเกจและการ์ดปรับภาระสัญญาณจากสเตรนเกจ, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยนเรศวร ปีการศึกษา 2554
- [6] คัตตาลี้ออก Kyowa,การอ่านสัญลักษณ์ของสเตรนเกจ,www.Kyowa-ei.com
- [7] โปรแกรม Instruments Measurement and Automation Explorer,การเลือกใช่วงจรบริดจ์ในการทำการทดสอบโหลดเซลล์,ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยนเรศวร
- [8] ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย,ปฏิบัติการด้านการวัดและการทดสอบแรง,การประยุกต์มาตรฐาน ISO 7500-1 มาใช้ในการทดสอบโหลดเซลล์,ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาลัยนเรศวร
- [9] สุรสิทธิ์ ปิยะศิลป์ และสุภกิจ รูปจันทร์,การศึกษาออกแบบโหลดเซลล์ชนิดคอลัมน์โดยวิธีการทดลองและระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์,ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [10] สุรินทร์ พงศ์ศุภสมิทธิ์,สราวุธ เหล่า พงศ์สวัสดิ์,กฤดา พิสิษฐ์ไพบูลย์และวาทัญญู สันตินิยม, เทคนิคการวัดแรงกระทำที่ใบมีดจอบหมุน,ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวันกรุงเทพฯ 10330



ตัวอย่างการคำนวณ

การคำนวณตามทฤษฎี

จากชิ้นงานที่สร้างขึ้น ทำจากสแตนเลส 304 มีค่า $D=10 \text{ mm}$, $E=190 \text{ GPa}$

เมื่อ
$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$= 7.85 \text{ mm}^2$$

จากความสัมพันธ์

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{AE}$$

$$F = AE\epsilon$$

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับความเครียดทางทฤษฎี ดังนี้

$$F = AE\epsilon$$

$$F = (1.4923 \times 10^7) \epsilon$$

การหาค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบ

ตารางที่ ก2. ค่าเฉลี่ยของวงจรมัดที่ 2.5 โวลต์

UTM(N)	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				ค่าเฉลี่ย
	x1	x2	x3	x4	
0	82.883	83.45	83.60	84.08	83.51
500	56.081	56.15	56.39	56.51	56.29
1000	31.88	32.13	32.25	31.84	32.03
1500	8.819	9.01	9.27	8.71	8.95
2000	-14.09	-14.01	-13.61	-13.68	-13.21
2500	-36.53	-36.382	-36.035	-36.011	-36.24
3000	-58.71	-58.509	-58.227	-58.137	-58.40
3500	-80.86	-80.605	-80.015	-81.057	-80.64
4000	-102.7	-102.55	-102.15	-102.13	-102.40
4500	-124.64	-124.3	-123.95	-123.99	-124.22
5000	-146.80	-146.36	-145.94	-145.94	-146.26

ตารางที่ ก3. ค่าเฉลี่ยของวงจรมัด III ที่ 2.5 โวลต์

UTM(N)	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				ค่าเฉลี่ย
	x1	x2	x3	x4	
0	125.48	126.13	126.25	126.33	126.04
500	89.87	90.12	90.56	89.98	90.13
1000	54.67	55.01	55.36	55.23	55.07
1500	20.47	20.68	21.06	21.07	20.82
2000	-13.55	-13.35	-13.02	-12.91	-13.21
2500	-47.68	-46.99	-46.73	-46.64	-47.01
3000	-81.43	-80.78	-80.63	-80.56	-80.85
3500	-114.99	-114.6	-114.07	-114.26	-114.48
4000	-148.80	-148.03	-117.63	-147.91	-140.59
4500	-182.41	-181.81	-181.57	-181.46	-181.81
5000	-215.79	-215.13	-215.24	-215.24	-215.35

ตารางที่ ก4. ค่าเฉลี่ยของวงจรบรีดจ์ III ที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า 2.5 โวลต์

UTM(N)	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				ค่าเฉลี่ย
	x1	x2	x3	x4	
0	115.37	115.46	115.71	116.99	115.88
500	76.74	76.85	77.02	76.50	76.78
1000	40.56	40.64	40.48	40.61	40.57
1500	5.66	5.90	5.925	6.326	5.95
2000	-28.93	-28.57	-28.44	-27.58	-28.38
2500	-62.45	-62.24	-62.21	-61.01	-61.98
3000	-95.99	-96.00	-95.77	-94.80	-95.64
3500	-129.48	-129.27	-129.21	-128.37	-129.08
4000	-163.13	-162.88	-162.75	-161.96	-162.68
4500	-196.63	-196.47	-196.23	-195.35	-196.17
5000	-230.15	-229.815	-229.63	-228.38	-229.49

ตารางที่ ก5. ค่าเฉลี่ยของวงจรบรีดจ์ III ที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า 5 โวลต์

UTM(N)	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				ค่าเฉลี่ย
	x1	x2	x3	x4	
0	122.13	122.6	123.13	125.53	123.35
500	82.828	83.337	83.918	82.827	83.23
1000	46.58	47.241	47.505	46.773	47.03
1500	11.525	12.134	12.349	12.261	12.07
2000	-22.986	-22.275	-21.805	-21.863	-22.23
2500	-56.721	-56.61	-55.848	-55.613	-56.20
3000	-90.668	-89.918	-89.253	-89.934	-89.94
3500	-124.09	-123.53	-123.02	-123.16	-123.45
4000	-157.74	-157.26	-156.67	-156.59	-157.07
4500	-191.64	-191.08	-190.45	-190.28	-190.86
5000	-225.11	-224.68	-224.27	-224.27	-224.58

ตารางที่ ก6. ค่าเฉลี่ยของวงจรบรีดจ์ III ที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า 10 โวลต์

UTM(N)	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				ค่าเฉลี่ย
	x1	x2	x3	x4	
0	139.2	140.68	141.91	143.60	141.34
500	100.29	101.40	102.96	102.51	101.79
1000	64.08	65.24	62.92	66.63	64.724
1500	29.11	30.30	31.66	31.81	30.724
2000	-5.47	-4.24	-2.58	-1.84	-3.53
2500	-39.31	-37.38	-36.21	-35.74	-37.16
3000	-72.78	-71.42	-70.01	-69.55	-70.94
3500	-106.37	-104.96	-103.63	-103.33	-104.57
4000	-139.84	-138.73	-137.29	-137.16	-138.25
4500	-173.51	-171.77	-170.83	-170.84	-171.73
5000	-207.35	-205.88	-204.38	-204.38	-205.49

ตารางที่ ก7. ค่าเฉลี่ยของวงจรบรีดจ์ III ที่แรงดัน 2.5 โวลต์ และมุม 0 องศา

UTM(N)	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				ค่าเฉลี่ย
	x1	x2	x3	x4	
0	122.62	122.48	122.76	122.96	122.70
500	85.68	85.41	85.437	86.36	85.72
1000	50.83	50.61	50.94	49.70	50.52
1500	16.46	16.84	16.567	17.05	16.73
2000	-17.19	-16.91	-16.912	-17.05	-17.01
2500	-50.16	-50.08	-50.441	-51.04	-50.43
3000	-83.54	-83.95	-83.88	-83.38	-83.68
3500	-116.41	-116.99	-117.14	-116.63	-116.79
4000	-150.26	-150	-150.62	-150.21	-150.27
4500	-183.59	-183.45	-184.05	-183.70	-183.69
5000	-216.66	-216.81	-216.61	-216.61	-216.67

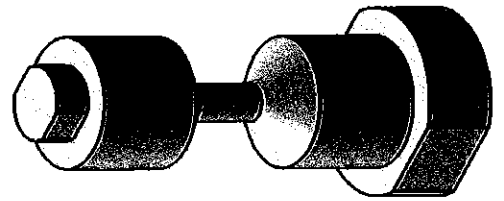
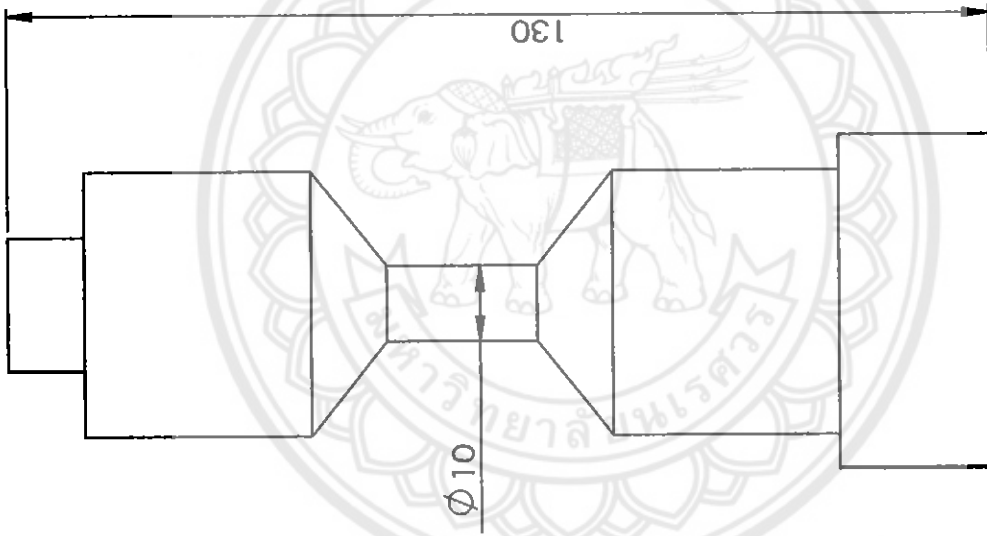
ตารางที่ ก8. ค่าเฉลี่ยของวงจรบรีดจ์ III ที่แรงดัน 2.5 โวลต์ และมุม 120 องศา

UTM(N)	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				ค่าเฉลี่ย
	x1	x2	x3	x4	
0	134.88	135.35	134.58	134.27	134.77
500	95.49	96.08	95.069	93.38	95.00
1000	59.44	59.64	59.13	57.77	58.99
1500	24.44	24.79	24.003	22.37	23.90
2000	-9.98	-9.49	-10.38	-11.02	-10.22
2500	-43.79	-43.68	-44.52	-44.55	-44.13
3000	-77.40	-77.56	-77.78	-78.07	-77.70
3500	-111.15	-110.93	-111.25	-111.47	-111.20
4000	-144.64	-143.92	-144.37	-145.25	-144.54
4500	-177.97	-177.70	-177.95	-178.05	-177.91
5000	-211.29	-211.13	-211.33	-211.33	-211.27

ตารางที่ ก9. ค่าเฉลี่ยของวงจรบรีดจ์ III ที่แรงดัน 2.5 โวลต์ และมุม 240 องศา

UTM(N)	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				ค่าเฉลี่ย
	x1	x2	x3	x4	
0	133.24	133.60	133.43	133.27	133.38
500	87.659	87.30	87.11	85.19	86.81
1000	49.62	49.69	48.67	46.81	48.70
1500	13.16	13.08	13.00	11.22	12.62
2000	-21.94	-22.46	-22.43	-23.53	-22.59
2500	-56.90	-57.08	-57.37	-57.98	-57.33
3000	-91.58	-91.58	-91.75	-91.81	-91.68
3500	-125.5	-126.11	-125.90	-126.18	-125.94
4000	-159.69	-159.66	-160.00	-160.28	-159.90
4500	-193.56	-193.33	-193.77	-194.09	-193.68
5000	-221.13	-227.42	-227.57	-227.57	-225.92





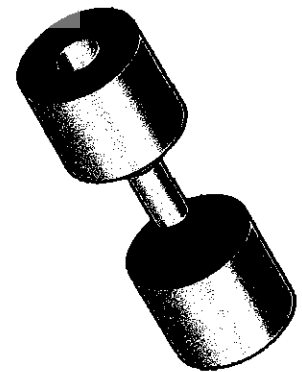
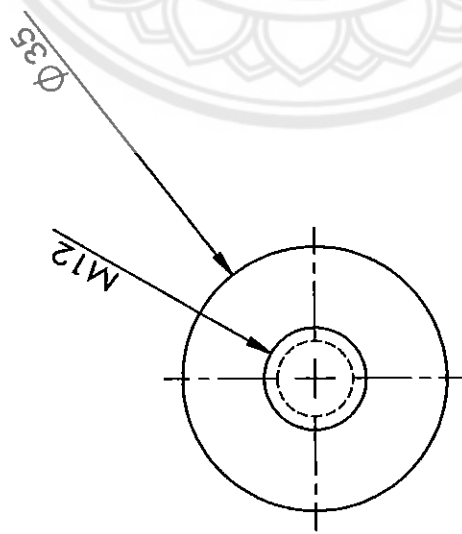
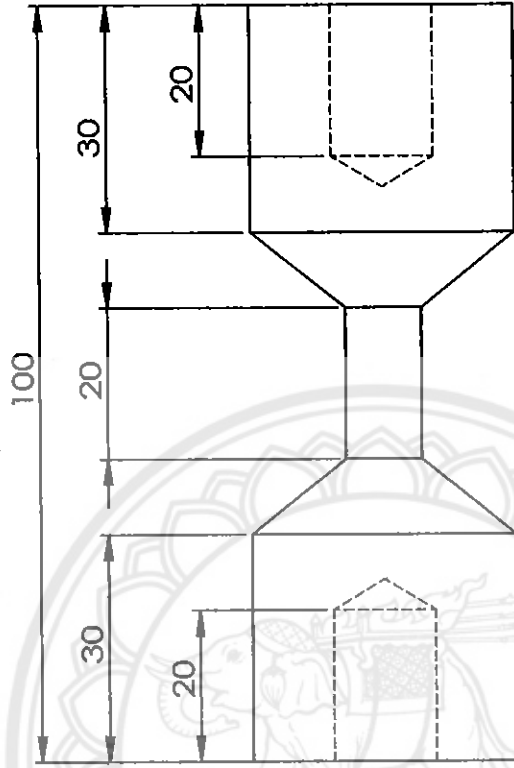
Project: design Load Cell

86

SIZE DWG. NO. REV

A Load Cell 1/1

SCALE: 1:1 WEIGHT: SHEET 1 OF 1



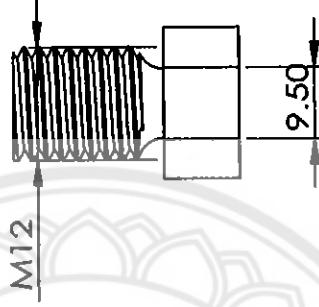
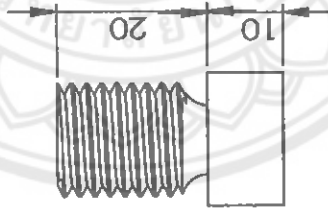
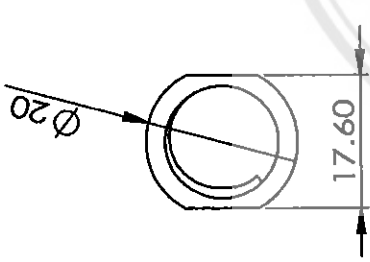
Project:designLoad Cells

87

SIZE DWG. NO. REV

A Load Cell 1/2

SCALE: 1:1 WEIGHT: SHEET 1 OF 1



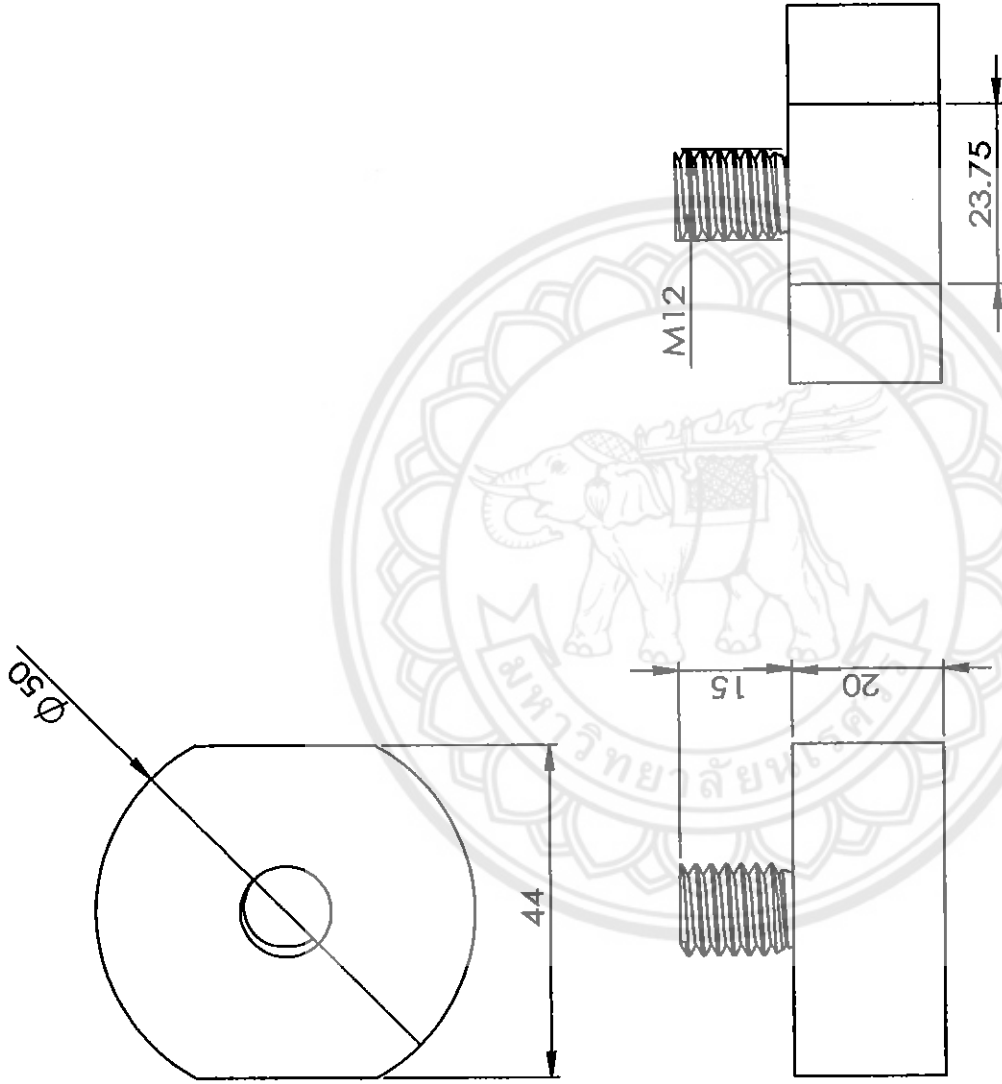
Project: designLoad Cell

88

SIZE DWG. NO. REV

A Load Cell 1/3

SCALE: 1:1 WEIGHT: SHEET 1 OF 1



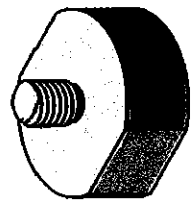
Project:designLoad Cell

89

SIZE DWG. NO. REV

A Load Cell 1/4

SCALE: 1:1 WEIGHT: SHEET 1 OF 1



ประวัติผู้จัดทำโครงการ

ชื่อ/สกุล	นายกันยา เด่นดวง
เกิดเมื่อ	22 กันยายน พ.ศ. 2534
ภูมิลำเนา	175 หมู่ที่ 6 ต.นาสีนวน อ. เมืองมุกดาหาร จ.มุกดาหาร 49000
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน มุกดาหาร อ.เมืองมุกดาหาร จ.มุกดาหาร 49000
E-Mail	ios_1234567@hotmail.com
ชื่อ/สกุล	นายณัฐกานต์ บั้นประเสริฐ
เกิดเมื่อ	15 เมษายน พ.ศ. 2534
ภูมิลำเนา	119/762 สายไหม 15 อัมรินทร์ 3 ผัง 4 ถนนสายไหม แขวงสายไหม เขต สายไหม จ.กรุงเทพมหานคร 10220
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน ฤทธิยะวรรณาลัย๒ จ.กรุงเทพมหานคร 10220
E-Mail	Nutza_rw2.02@hotmail.com
ชื่อ/สกุล	นางสาวพุกชา นุ่มน้อย
เกิดเมื่อ	15 เมษายน พ.ศ. 2534
ภูมิลำเนา	817 หมู่ที่ 7 ต. อรัญญิก อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียน ผดุงราษฎร์ อ. เมือง จ.พิษณุโลก 6500
E-Mail	Forwordiux@hotmail.com