

การศึกษาเชิงวิเคราะห์วิธีการและผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์
ตามมาตรฐาน ISO 7500-1

Analytical study on the method and results of the calibration
of universal testing machine according to ISO 7500-1

นายทรงพล สายอรุณ รหัสสนិត 53361986
นายสมชาย ภูผาชัยศิริ รหัสสนិត 53362327
นางสาวสุณิสา มีสุโข รหัสสนិត 53362365

ห้องสมุด คณะวิศวกรรมศาสตร์
รับที่รับ 20 ก.ค. 2558
เลขทะเบียน 1691A068
เลขที่ออกใบให้
นางสาวสุณิสา มีสุโข ๗๑๔๑ ๙

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2556



ใบรับรองโครงการ


หัวข้อโครงการ : การศึกษาเชิงวิเคราะห์วิธีการและผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรง
อเนกประสงค์ ตามมาตรฐาน ISO 7500-1


ผู้ดำเนินโครงการ : นายทรงพล สายอรุณ รหัสสนิสิต 53361986
นายสมชาย ภูผาชัยศิริ รหัสสนิสิต 53362327
นางสาวสุณิสา มีสุโข รหัสสนิสิต 53362365


อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.สุเมธ เทมะวัฒน์นะชัย
สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา : 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ


..... ที่ปรึกษาโครงการ
(ดร.สุเมธ เทมะวัฒน์นะชัย)


..... กรรมการ
(ผศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสุวรรณค์)


..... กรรมการ
(ดร.ศลิษา วีรพันธุ์)

หัวข้อโครงการ	: การศึกษาเชิงวิเคราะห์วิธีการและผลการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ ตามมาตรฐาน ISO 7500-1		
ผู้ดำเนินโครงการ	: นายทรงพล	สายอรุณ	รหัสหนังสือ 53361986
	: นายสมชาย	ภูผาชัยศิริ	รหัสหนังสือ 53362327
	: นางสาวสุณิสา	มีสุข	รหัสหนังสือ 53362365
อาจารย์ที่ปรึกษา	: ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย		
สาขาวิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	: 2556		

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการนำหลักการสอบเทียบแรงของเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ Universal Testing Machine (UTM) ตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2004 มาประยุกต์ใช้ในการสอบเทียบเครื่อง UTM ของทางภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อให้เข้าใจหลักการและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ การสอบเทียบ โดยการนำโหลดเซลล์แบบ S-Type มาเป็นเครื่องวัดแรงมาตรฐานเพื่อใช้สอบเทียบให้กับเครื่อง UTM ในโหมดของแรงอัด จำนวน 5 รอบ แล้วนำผลการทดสอบมาคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆตามมาตรฐานฯ และจัดคลาสของเครื่อง UTM

จากผลการทดสอบพบว่าเครื่อง UTM ที่ใช้ทดสอบมีค่าคุณสมบัติต่างๆ เช่นค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative accuracy error) มีขนาดสูงสุดที่ 0.96 % ค่าความผิดพลาดจากการทวนซ้ำสัมพัทธ์ (Relative repeatability error) สูงสุดที่ 0.19 % ค่าความผิดพลาดจากการคืนสู่ค่าศูนย์สัมพัทธ์ (Relative zero error) อยู่ที่ 0.0067 % ค่าความผิดพลาดจากการย้อนกลับสัมพัทธ์ (Relative reversibility error) มีขนาดสูงสุดที่ 0.19 % และค่าความละเอียดสัมพัทธ์ (Relative resolution) คือ 0.02 % ซึ่งบ่งชี้ว่า เครื่อง UTM นี้ จัดอยู่ในคลาส 1 ตามมาตรฐานฯ

Project Title	: Analytical study on the method and results of the calibration of universal testing machine according to ISO 7500-1		
Name	: Songpon	Saiaroon	Code 5336198
	Somchai	Pupachaisiri	Code 53362327
	Sunisa	Mesucho	Code 53362365
Project Advisor	: Dr. Sumet	Heamawatanachai	
Major	: Mechanical Engineering		
Department	: Mechanical Engineering		
Academic Year	: 2013		

Abstract

This research is a study of calibration of Universal Testing Machine (UTM). The method used in this study was applied from ISO 7500-1:2004 to calibrate a UTM in the Department of Mechanical Engineering. The objectives were to understand the calibration method and factors that affect the calibration results. During experiments, an S-Type load cell was used as a reference loadcell to calibrate the UTM totally 5 calibration runs. The results were then calculated to analyze the classification of the UTM.

From the experiments results, the maximum relative accuracy error was 0.96 %, the maximum relative repeatability error was 0.19 %, the relative zero error of the UTM was 0.0067 %, the maximum relative reversibility error was 0.19 % and the relative resolution was 0.02 %. Indicating that, the UTM is in class 1 according to ISO 7500-1:2004

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จและลุล่วงไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้ดำเนินงาน ต้องขอขอบพระคุณ ดร. สุเมธ เหมะวัฒนะชัย เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการและให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการดำเนินโครงการ ตลอดจนติดตามประเมินผลการดำเนินโครงการมาโดยตลอด ทางคณะผู้ดำเนินงานขอขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ทุกท่านและเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำโครงการ อบรมสั่งสอน ให้ความรู้แก่คณะผู้ดำเนินงาน

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ช่วยอุปการะกำลังทรัพย์และคอยให้กำลังใจให้จนกระทั่งโครงการนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ คณะผู้ดำเนินงานขอขอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงการนี้ แต่ผู้มิพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้โครงการนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และถ้าเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงการนี้ คณะผู้ดำเนินงานต้องกราบขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายทรงพล สายอรุณ
นายสมชาย ภูผาชัยศิริ
นางสาวสุณิสา มีสุโข

ลำดับสัญลักษณ์และอักษรย่อ

a	ค่าความละเอียดสัมพัทธ์ (%)
b	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากความทวนซ้ำได้ของการวัด (%)
f_0	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการกลับสู่ค่าศูนย์ของระบบการวัดแรงของเครื่องทดสอบ (%)
F	แรงจริงที่อ่านได้จากเครื่องวัดแรงในช่วงทดสอบแรงแบบขาขึ้น (N)
F'	แรงจริงที่อ่านได้จากเครื่องวัดแรงในช่วงทดสอบแรงแบบขาลง (N)
F_i	ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบในช่วงทดสอบแรงแบบขาขึ้น (N)
F'_i	ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบในช่วงทดสอบแรงแบบขาลง (N)
\bar{F}_i, \bar{F}	ค่าเฉลี่ยของ F_i และ F
$F_{i\max}, F_{i\min}, F_i, F_{i\max}, F_{i\min}$	ค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของ F_i และ F ของแรงที่ระดับการทดสอบเดียวกัน
F_{10}	ค่าแสดงผลแรงที่ตกค้างอยู่ในเครื่อง UTM หลังจากถอนแรงออก (N)
F_N	ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในช่วงที่ทำการทดสอบ (N)
g_n	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2)
q	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ของความแม่นยำ (%)
r	ค่าความละเอียด (resolution) ของจอแสดงผลของเครื่องทดสอบ (N)
v	ค่าความผิดพลาดย้อนกลับสัมพัทธ์ (N)
ρ_{air}	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
ρ_m	ความหนาแน่นของก้อนน้ำหนัก (kg/m^3)

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
ลำดับสัญลักษณ์และคำย่อ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ฅ
สารบัญตาราง	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนแผนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 แผนการดำเนินงาน	3
1.7 งบประมาณที่ใช้	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	4
2.1 หลักการและส่วนประกอบของเครื่อง UTM	4
2.1.1 หลักการ	4
2.2 สรุปหลักการสอบเทียบของเครื่อง UTM ตามมาตรฐาน ISO 7500-1 : 2004	5
2.2.1 ขอบเขต	5
2.2.2 หลักการอ้างอิงเอกสาร	5
2.2.3 เงื่อนไขและคำจำกัดความ	6
2.2.4 สัญลักษณ์และความหมาย	6
2.2.5 การตรวจเครื่องทดสอบโดยทั่วไป	6
2.2.6 การสอบเทียบของระบบวัดแรงของเครื่องทดสอบ	7

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.7 Class ของพิสัยของการทดสอบเครื่องทดสอบ	9
2.2.8 การรายงานผลการตรวจสอบเครื่อง UTM	10
2.2.9 ช่วงเวลาระหว่างการตรวจสอบ	10
บทที่ 3 หลักการวัดแรง การทดสอบและการสอบเทียบ	11
3.1 โหลดเซลล์	11
3.1.1 ทฤษฎีของ Strain gage	11
3.1.2 วงจรบริดจ์	12
3.1.3 การวิเคราะห์ห้วงจรบริดจ์แบบทั่วไปกับแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้	12
3.1.4 การหาความต้านทานภายใน load cell standard ที่นำมาใช้ในการทดลอง	15
3.2 การติดตั้งและการเตรียมอุปกรณ์สำหรับปฏิบัติการสอบเทียบ	19
3.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์	19
3.2.2 ขั้นตอนการสอบเทียบ	20
3.2.3 ดำเนินการทดลอง	26
3.2.4 การบันทึกค่า	27
3.2.5 แปลงค่า strain ที่อ่านได้เป็นแรง (N)	28
3.2.6 การคำนวณเพื่อการจัด Class ของเครื่อง UTM	29
3.2.7 การประเมิน Class ของเครื่อง UTM	31
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	33
4.1 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบ	34
4.2 การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนและวิเคราะห์กราฟ	39
4.3 การวิเคราะห์ Load cell ในสภาวะ No load	42
4.4 การวิเคราะห์ค่า Uncertainty	44
บทที่ 5 สรุปผลการปฏิบัติการสอบเทียบ	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	52
ภาคผนวก (ก) ทาสมการความสัมพันธ์	53
ภาคผนวก (ข) ผลการทดลองและการคำนวณทั้งหมด	54
ภาคผนวก (ค) การตรวจสอบโดยทั่วไปของเครื่องทดสอบ	74
ภาคผนวก (ง) คู่มือสำหรับปฏิบัติการสอบเทียบแรง	75
บรรณานุกรม	105
ประวัติผู้จัดทำโครงการ	106



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่อง UNIVERSAL TESTING MACHINE (UTM) ของ INSTRON รุ่น 5567A	4
รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของ Strain Gage	11
รูปที่ 3.2 วงจรวงจรบริดจ์	12
รูปที่ 3.3 โหลดเซลล์แบบ S – Type	14
รูปที่ 3.4 Load Cell Standardผู้ผลิต Zega model keed-a Serial no 5g29340	15
รูปที่ 3.5 วงจรฟูบริดจ์ใน Load Cell Standard	16
รูปที่ 3.6 วงจรของ Load cell standard	18
รูปที่ 3.7 เครื่อง UTM และ Load cell	19
รูปที่ 3.8 indicator (Universal Strain Gage module NI-SCXI-1520)	20
รูปที่ 3.9 เครื่องคอมพิวเตอร์	20
รูปที่ 3.10 การติดตั้งโหลดเซลล์	21
รูปที่ 3.11 controllerของเครื่อง UTM	21
รูปที่ 3.12 โปรแกรมที่ใช้ในการสอบเทียบ	21
รูปที่ 3.13 Data Neighborhood	22
รูปที่ 3.14 NI-DaQmx Tasks	22
รูปที่ 3.15 ตั้งค่าโปรแกรม	23
รูปที่ 3.16 Device	23
รูปที่ 3.17 Calibration	24
รูปที่ 3.18 ตั้งชื่อไฟล์	24
รูปที่ 3.19 Number of samples to average	25
รูปที่ 3.20 Scientific Notation	25
รูปที่ 3.21 ตารางแสดงค่าแรง (N) และระยะยืด (strain)	26
รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการสอบเทียบทั้งหมด	27
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างแรงที่อ่านได้จาก load cell กับแรงที่อ่านได้จากเครื่อง UTMของข้อมูลทั้งหมด 5 ชุด	41
รูปที่ 4.2 ช่วงการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของ Load cell ในสภาวะ No load	42
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่า Uncertainty ทั้ง 4 เปรียบเทียบกัน	48
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่า Expanded Uncertainty	49

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สัญลักษณ์และความหมาย	6
ตารางที่ 2 ค่า Characteristic ของระบบการวัดแรง	9
ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าข้อมูลดิบจากการเก็บข้อมูลครั้งที่ 4	27
ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงค่าแรงที่ได้จากการแปลงค่า strain	28
ตารางที่ 3.3 ตารางค่าที่ได้จากการคำนวณ	29
ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติสำหรับการประเมิน Class	30
ตารางที่ 3.5 ตาราง Class ตามมาตรฐาน ISO 7500-1	31
ตารางที่ 3.6 ตารางที่ได้จากผลการประเมิน Class	32
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าแรงของ Load cell ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 1	34
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 1	34
ตารางที่ 4.3 ตารางการประเมิน Class ในการสอบเทียบครั้งที่ 1	34
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าแรงของ Load cell ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 2	35
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 2	35
ตารางที่ 4.6 ตารางการประเมิน Class ในการสอบเทียบครั้งที่ 2	35
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าแรงของ Load cell ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 3	36
ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 3	36
ตารางที่ 4.9 ตารางการประเมิน Class ในการสอบเทียบครั้งที่ 3	36
ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าแรงของ Load cell ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 4	37
ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 4	37
ตารางที่ 4.12 ตารางการประเมิน Class ในสอบเทียบครั้งที่ 4	37
ตารางที่ 4.13 ตารางแสดงค่าแรงของ Load cell ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 5	38
ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 5	38
ตารางที่ 4.15 ตารางการประเมิน Class ในสอบเทียบครั้งที่ 5	38
ตารางที่ 4.16 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบรอบที่ 1	39
ตารางที่ 4.17 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบรอบที่ 2	39
ตารางที่ 4.18 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบรอบที่ 3	40
ตารางที่ 4.19 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบรอบที่ 4	40
ตารางที่ 4.20 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบรอบที่ 5	41

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.21 ตารางการหาช่วงการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของ Load cell ในสภาวะ No load	43
ตารางที่ 4.22 ตารางการหาช่วงการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย	43
ตารางที่ 4.23 ตารางการหาช่วงการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเฉลี่ยของ Load cell ในสภาวะ No load	44
ตารางที่ 4.24 ตารางแสดงค่า Uncertainty ที่ได้จากการคำนวณ	47



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ของภาคอุตสาหกรรมให้ได้คุณภาพมาตรฐานนั้น จำเป็นต้องมีการตรวจวัดและทดสอบในทุกขั้นตอนตั้งแต่การทดสอบคุณสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาใช้ ไปจนถึงการทดสอบความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ก่อนส่งไปจำหน่าย เครื่องมือที่ใช้ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุด้านเชิงกลมีหลายประเภท เช่นการทดสอบแรงดึงแรงกดโดยใช้ Universal testing machine (UTM) การทดสอบการทนต่อแรงกระแทกโดยใช้ Impact testing machine และการทดสอบความแข็งของวัสดุโดย Hardness testing machine

ในบรรดาเครื่องทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่มีใช้ในภาคอุตสาหกรรม จากการศึกษาพบว่าเครื่องทดสอบแรงดึงแรงกด Universal testing machine (UTM) ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย และมีการใช้อย่างกว้างขวางตั้งแต่อุตสาหกรรมพลาสติก ยาง ไม้ ตลอดจนอุตสาหกรรมเหล็กเช่น การสร้างสะพานและการผลิตรถยนต์

การสอบเทียบเครื่องมือจะช่วยให้การควบคุมคุณภาพการผลิต ดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การผลิตมีความคงเส้นคงวาได้มาตรฐาน ดังนั้นความถูกต้องของเครื่องมือวัดแรงที่วัดได้จากเครื่อง UTM จึงมีความสำคัญต่อคุณภาพสินค้าและระบบเศรษฐกิจของประเทศอย่างมาก

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการสอบเทียบเครื่องทดสอบแรงอนกประสงค์ตามมาตรฐาน ISO7500-1
- 1.2.2 เพื่อทดลองและสอบเทียบเครื่อง UTM ตามมาตรฐาน ISO7500-1
- 1.2.3 เพื่อคำนวณและวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนของการวัดแรงด้วยเครื่อง UTM
- 1.2.4 เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการวัด
- 1.2.5 เพื่อสร้างโปรแกรมคำนวณในการจัด Class ของเครื่อง UTM
- 1.2.6 เพื่อสร้างคู่มือสำหรับปฏิบัติการสอบเทียบเครื่อง UTM ตามมาตรฐาน ISO 7500-1

1.3 ขอบเขตของโครงการงาน

- 1.3.1 ศึกษาหลักการทำงานของเครื่อง UTM
- 1.3.2 ศึกษาด้านการประยุกต์ใช้งานของเครื่อง UTM
- 1.3.3 ศึกษาวิธีการสอบเทียบเครื่อง UTM ตามมาตรฐาน ISO7500-1:2004
- 1.3.4 ทดลองการสอบเทียบตามมาตรฐาน ISO 7500-1 และวิเคราะห์ผลการสอบเทียบ
- 1.3.5 จัดทำโปรแกรมต้นแบบเพื่อคำนวณและวิเคราะห์ผลการสอบเทียบโดยใช้ Excel
- 1.3.6 วิเคราะห์ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการวัด

1.4 ขั้นตอนแผนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ศึกษาทฤษฎีขั้นตอนการสอบเทียบเครื่อง UTM ตามมาตรฐาน ISO 7500-1
- 1.4.2 ดำเนินการปฏิบัติการสอบเทียบจริงตามทฤษฎีที่ได้ศึกษาในข้อ 1.4.1
- 1.4.3 นำผลการสอบเทียบมาคำนวณวิเคราะห์หาค่าความไม่แน่นอน
- 1.4.4 สรุปผลการวิเคราะห์และจัดทำรายงาน

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถทำการสอบเทียบเครื่อง Universal testing machine (UTM) ตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2004 ได้ และเปรียบเทียบค่าที่ได้กับมาตรฐานที่นำมาสอบเทียบจากนั้นจะคำนวณหาค่าความไม่แน่นอน เพื่อที่จะบอกได้ว่า เครื่อง Universal testing machine (UTM) ที่นำมาทดสอบนั้นอยู่ในช่วงระดับ (class) ไต และสามารถเข้าใจถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อแรงวัดด้วยเครื่อง UTMรวมทั้งการประยุกต์ใช้งานของเครื่อง UTM ในลักษณะต่างๆ

1.6 แผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการทำโครงการ	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.
1. ศึกษาทฤษฎีขั้นตอนการสอบเทียบ							
เครื่อง Universal testing machine ตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2004	←————→						
2.ดำเนินการปฏิบัติการสอบเทียบจริง ตามทฤษฎีที่ได้ศึกษาในข้อ 1.4.1				←————→			
3.นำผลการสอบเทียบมาวิเคราะห์กับ มาตรฐานที่อ้างอิงและคำนวณหาค่า ความไม่แน่นอน						←————→	
4.สรุปผลการวิเคราะห์และจัดทำ รายงาน							←————→

1.7 งบประมาณ

1.7.1 ค่าวัสดุ	1000 บาท
1.7.2 ค่ารายงาน	1000 บาท
1.7.3 ค่าทดสอบ	1000 บาท
รวม	3000 บาท

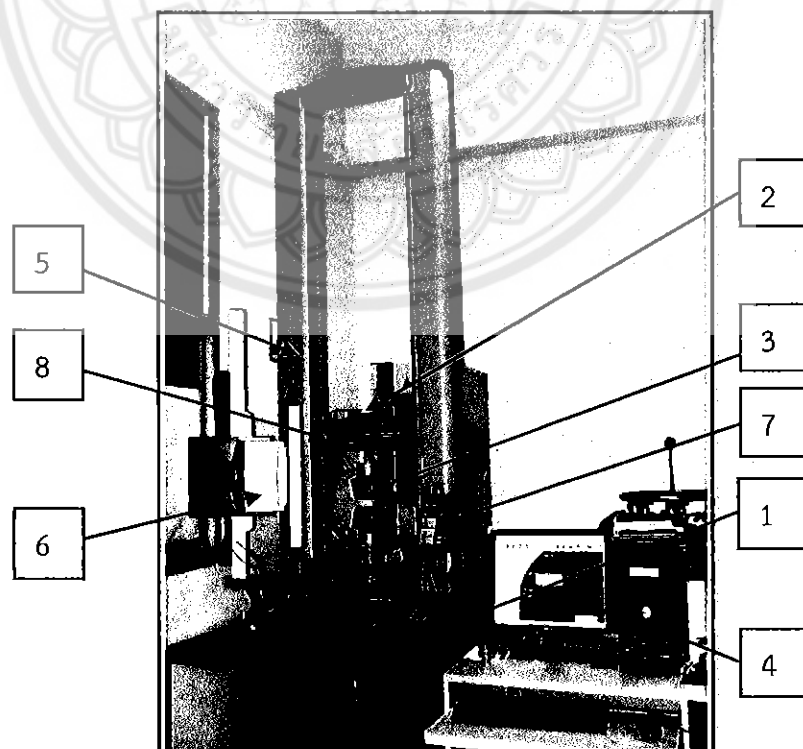
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการและส่วนประกอบของเครื่อง Universal testing machine (UTM)

2.1.1 หลักการ

เครื่อง Universal testing machine (UTM) เป็นเครื่องทดสอบวัสดุเนกประสงค์สามารถให้แรงกระทำต่อชิ้นงานทั้งแรงดึง แรงอัด แรงดัด ซึ่งแรงที่ให้นั้นจะเป็นแรงทดสอบที่คงที่ในการกระทำต่อชิ้นงาน (static load test) ในการทดสอบนั้นเมื่อนำชิ้นงานมาติดตั้งกับหัวจับชิ้นงาน เครื่อง UTM จะออกแรงกระทำต่อชิ้นงานซึ่งเซนเซอร์ใน load cell จะแปลงค่าแรงดึง แรงอัด แรงดัด เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อใช้คำนวณแรงดึงแรงอัดเครื่อง UTM ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และสามารถใช้ทดสอบวัสดุได้มากมายเช่น โลหะ เซรามิกส์ ยาง โพลีเมอร์ อาหาร โดยตัวอย่างที่จะทดสอบต้องมีลักษณะตามมาตรฐานที่รองรับ



รูปที่ 2.1 เครื่อง UNIVERSAL TESTING MACHINE (UTM) ของ INSTRON รุ่น 5567A

ส่วนประกอบของเครื่อง UTM ดังรูปที่ 2.1 ดังต่อไปนี้

1. ตัวเครื่อง (Frame)
2. Load cell
3. หัวจับชิ้นงาน (แบบแรงดึงและแบบแรงกด)
4. คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์
5. ระบบขับเคลื่อนแบบบอลสกรู (Ball Screw)
6. ตัววัดระยะยืด (Extensometer)
7. แผงควบคุม
8. Crosshead

2.2 สรุปหลักการสอบเทียบของเครื่อง UTM ตามมาตรฐาน ISO 7500-1:2004^[1]

2.2.1 ขอบเขต

ในส่วนของ ISO 7500-1 นี้เป็นตัวระบุการตรวจสอบเครื่องทดสอบแรงดึง/แรงกด การตรวจสอบนี้ประกอบด้วย

1. การตรวจสอบโดยทั่วไปของเครื่องทดสอบรวมทั้งอุปกรณ์เสริมที่นำมาใช้งานด้วย
2. การสอบเทียบของระบบการวัดแรง

*หมายเหตุ ในส่วนของมาตรฐาน ISO 7500-1 เป็นการระบุถึงการตรวจสอบระบบวัดแรงของเครื่องในโหมดสแตติก (Mode statistic) และเกี่ยวกับการสอบเทียบ ผลที่ได้จากการสอบเทียบไม่สามารถจะนำไปใช้ได้เสมอไป ในรูปแบบที่มีการเปลี่ยนแรงแบบรวดเร็วหรือแบบไดนามิกส์ (dynamic) เนื่องจากค่าที่ได้ อาจมีความผิดพลาดที่เป็นผลมาจากไดนามิกส์เอฟเฟค (dynamic-effects)

2.2.2 หลักการอ้างอิงเอกสาร

เอกสารอ้างอิงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานตามมาตรฐานนี้ สำหรับเอกสารที่มีการระบุวันที่อ้างอิงให้ใช้เอกสารตามเวอร์ชันที่ระบุ ส่วนเอกสารอ้างอิงที่ไม่ได้ระบุวันที่ให้ใช้เอกสารอ้างอิงเวอร์ชันฉบับล่าสุด

**หมายเหตุ ISO 376^[2] เป็นมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่องวัดแรงมาตรฐาน (force-proving instrument) ซึ่งนำมาใช้สำหรับการทดสอบเครื่องทดสอบแรงในแนวแกนเดียว

2.2.3 เงื่อนไขและคำจำกัดความ

การสอบเทียบ (Calibration) คือการเปรียบเทียบผลการวัดภายใต้เงื่อนไขที่ระบุ และหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดกับตัววัดค่ามาตรฐาน

2.2.4 สัญลักษณ์และความหมาย

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์และความหมาย

สัญลักษณ์	หน่วย	ความหมาย
a	%	ค่าความละเอียดสัมพัทธ์
b	%	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากความทวนซ้ำได้ของการวัด
f_0	%	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการกลับสู่ค่าศูนย์ของระบบการวัดแรงของเครื่องทดสอบ
F	N	แรงจริงที่อ่านได้จากเครื่องวัดแรงในช่วงทดสอบแรงแบบขาขึ้น
F'	N	แรงจริงที่อ่านได้จากเครื่องวัดแรงในช่วงทดสอบแรงแบบขาลง
F_i	N	ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบในช่วงทดสอบแรงแบบขาขึ้น
F'_i	N	ค่าแรงที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบในช่วงทดสอบแรงแบบขาลง
\bar{F}_i, \bar{F}	N	ค่าเฉลี่ยของ F_i และ F
$F_{imax}, F_{imn}, F_{max}, F_{min}$	N	ค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของ F_i และ F ของแรงที่ระดับการทดสอบเดียวกัน
F_{10}	N	ค่าแสดงผลแรงที่ตกค้างอยู่ในเครื่อง UTM หลังจากถอนแรงออก
F_n	N	ค่าแรงสูงสุดที่ใช้ในช่วงที่ทำการทดสอบ
g_n	m/s^2	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
v	%	ค่าความผิดพลาดย้อนกลับสัมพัทธ์
q	%	ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ของความแม่นยำ
r	N	ค่าความละเอียด (resolution) ของจอแสดงผลของเครื่องทดสอบ
ρ_{air}	kg/m^3	ความหนาแน่นของอากาศ
ρ_m	kg/m^3	ความหนาแน่นของก้อนน้ำหนัก

2.2.5 การตรวจเครื่องทดสอบโดยทั่วไป

การตรวจสอบเครื่องทดสอบจะต้องดำเนินการตรวจสอบเบื้องต้นว่าเครื่องอยู่ในสภาพการทำงานที่ดี

*หมายเหตุ การปฏิบัติการสอบเทียบที่ดีในการสอบเทียบทางมาตรวิทยา จะต้องมีการสอบเทียบก่อนการบำรุงรักษาหรือปรับแต่งเครื่องทดสอบ

2.2.6 การสอบเทียบของระบบวัดแรงของเครื่องทดสอบ

ในการสอบเทียบถ้าเครื่อง UTM มีเครื่องวัดแรง (Load cell) ที่ถูกใช้อยู่หลายตัวให้ทำการสอบเทียบทุกตัว และการสอบเทียบสามารถดำเนินการได้โดยการให้แรงที่เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ อย่างน้อย 3 series

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสอบเทียบจะต้องสามารถสอบกลับได้สู่ระบบ SI Unit

เครื่องวัดแรงมาตรฐาน (สำหรับนำมาใช้สอบเทียบ UTM) จะต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ใน ISO 376^[2] คือ class ของเครื่องวัดแรงมาตรฐาน (Load cell standard) จะต้องเท่ากับหรือดีกว่า class ของเครื่อง UTM ในกรณีที่ใช้ก่อนน้ำหนักค่าความผิดพลาดของแรงที่เกิดจากก้อนน้ำหนักเหล่านี้จะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ $\pm 0.1\%$

*หมายเหตุ สมการที่ให้แรง F (N) ที่ถูกสร้างขึ้นโดยน้ำหนักของมวล (kg) คำนวณได้จาก

$$F = mg_n \left[1 - \frac{\rho_{air}}{\rho_m} \right] \dots\dots\dots(2.1)$$

แรงที่ใช้ยังสามารถประมาณได้จากสูตร

$$F = mg_n \dots\dots\dots(2.2)$$

ความผิดพลาดของแรงสามารถคำนวณโดยใช้สูตร

$$\frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta g_n}{g_n} \dots\dots\dots(2.3)$$

ประเมินความละเอียดสัมพัทธ์ของจอแสดงผล (UTM) ความละเอียดสัมพัทธ์หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$a = \frac{r}{F} \times 100 \dots\dots\dots(2.4)$$

เมื่อ r คือความละเอียด

F คือแรงที่จุดที่จะพิจารณา

ขั้นตอนการสอบเทียบ

ก. การจัดตำแหน่งของเครื่องวัดแรงมาตรฐาน (Load cell) โดยติดตั้งเครื่องวัดแรงมาตรฐาน (Load cell standard) เข้ากับเครื่อง UTM ซึ่งจะต้องติดตั้ง Load cell standard ให้ตรงกึ่งกลางพอดีกับแท่นจับยึด

ข. การปรับสภาพเครื่องก่อนการทดสอบ เมื่อติดตั้งเครื่องวัดแรงมาตรฐาน (Load cell standard) เสร็จแล้วให้ทำการ Preload อย่างน้อย 3 ครั้งระหว่างแรงที่ศูนย์ถึงแรงสูงสุดที่จะทำการทดสอบ

ค. ข้อกำหนดในการให้แรง การสอบเทียบจะต้องทำการวัดแรงอย่างน้อย 5 ระดับ แบ่งเป็นสัดส่วนเท่ากัน และให้แรงระหว่าง 20% ถึง 100% ของแรงสูงสุด ถ้าในการสอบเทียบแรงที่น้อยกว่า 20% ให้ใช้ตุ้มน้ำหนักในการทดสอบ และการวัดแรงจะต้องทำที่ประมาณ 10%, 5%, 2%, 1% , 0.5%, 0.2%, และ 0.1%

*หมายเหตุ ขีดจำกัดล่างของขอบเขตที่ใช้ในการประเมิน UTM สามารถกำหนดโดยการคูณด้วยความละเอียด r คือ

400 สำหรับ Class 0.5

200 สำหรับ Class 1

100 สำหรับ Class 2

67 สำหรับ Class 3

ง. ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการกลับสู่ค่าศูนย์ (relative zero error) ของแต่ละชุดหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$f_0 = \frac{f_{i0}}{f_N} \times 100 \quad \dots\dots(2.5)$$

จ. การกำหนดค่า Relative reversibility error เมื่อจำเป็นต้องใช้ relative reversibility error หรือค่า v จะต้องดำเนินการสอบเทียบโดยให้แรงที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบในช่วงทดสอบแรงแบบขาขึ้นเทียบกับแรงที่อ่านได้จากเครื่องทดสอบในช่วงทดสอบแรงแบบขาลง

ค่า relative reversibility error คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$v = \frac{F - F'}{\bar{F}} \times 100 \quad \dots\dots(2.6)$$

สำหรับกรณีที่ต้องการดำเนินการการสอบเทียบกับแรงจริงที่คงที่

$$v = \frac{F'_i - F_i}{F} \times 100 \quad \dots\dots(2.7)$$

ฉ. ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ของความแม่นยำ Relative accuracy error แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของค่าเฉลี่ยของแรง \bar{F} โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$q = \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \times 100 \quad \dots\dots(2.8)$$

สำหรับกรณีของการดำเนินการสอบเทียบกับแรงคงที่ที่ถูกต้อง ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ของความแม่นยำ (Relative accuracy error) จะใช้สมการต่อไปนี้

$$q = \frac{\bar{F}_i - F}{F} \times 100 \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

ข. ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากความทวนซ้ำได้ของการวัด (Relative repeatability error) หรือค่า b ของแรงในแต่ละระดับ เป็นความแตกต่างระหว่างค่าต่ำสุดและสูงสุดของการวัดหารค่าเฉลี่ย โดยสามารถใช้สมการต่อไปนี้

$$b = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\bar{F}} \times 100 \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

สำหรับกรณีเฉพาะที่ต้องการดำเนินการการสอบเทียบโดยกำหนดจากค่าแรงแท้จริงที่คงที่ (ค่าแรงแท้จริงเช่น แรงที่อ่านได้จากเครื่องวัดแรงมาตรฐานหรือจากก้อนน้ำหนัก) ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากความทวนซ้ำได้ของการวัด (Relative repeatability error) จะใช้สมการต่อไปนี้

$$b = \frac{F_{i\max} - F_{i\min}}{F} \times 100 \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

ข. ข้อตกลงระหว่างการวัดแรงที่มีตัววัดแรง 2 แรง เมื่อมีการวัดแรงจากตัววัดแรง 2 แรง (ในเครื่อง UTM ที่มี load cell 2 ตัว) จำเป็นต้องมีการวัดของการสอบเทียบ เพื่อหาความแตกต่างระหว่างค่าความแม่นยำของความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่ได้จากโหลดเซลล์ทั้งสองและค่าที่ได้จะต้องไม่เกิน 1.5b โดย b เป็นค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการทวนซ้ำได้ ในตารางที่ 2 หรือเขียนได้ว่า $q_1 - q_2 < 1.5b$

2.2.7 Class ของพิสัยของการทดสอบเครื่องทดสอบ

ตารางที่ 2 แสดงค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ ในการประเมิน class ของเครื่อง UTM

ตารางที่ 2 ค่า Characteristic ของระบบการวัดแรง

Class ของเครื่อง UTM	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ (%)				
	q	b	v	f ₀	a
0.5	±0.5	0.5	±0.75	±0.05	0.25
1	±1.0	1.0	±1.5	±0.1	0.5
2	±2.0	2.0	±3.0	±0.2	1.0
3	±3.0	3.0	±4.5	±0.3	1.5

2.2.8 การรายงานผลการตรวจสอบเครื่อง UTM

ในรายงานผลการตรวจสอบทั่วไปจะต้องประกอบด้วยอย่างน้อยดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลทั่วไป

ก. อ้างอิงถึงมาตรฐาน ISO 7500-1

ข. รหัสหรือเลขประจำตัวของเครื่องทดสอบ (ผู้ผลิต ชนิด ปีของของผู้ผลิตถ้ารู้ หมายเลขประจำเครื่อง) และถ้ามีรหัสหรือตัวเลขเฉพาะของเครื่องจอแสดงผล (ทำเครื่องหมาย ประเภทหมายเลขประจำเครื่อง)

ค. สถานที่ตั้งของเครื่องจักร

ง. ประเภท Class และมาตรฐานของเครื่องวัดแรงที่ใช้สอบเทียบใบรับรองและวันหมดอายุของใบรับรอง

จ. อุณหภูมิ ณ ตอนสอบเทียบ

ฉ. วันที่ในการตรวจสอบ

ช. ชื่อหรือเครื่องหมายของผู้ตรวจสอบ

2. ผลของการตรวจสอบ

ก. ความผิดปกติที่พบในระหว่างการตรวจสอบ

ข. สำหรับแต่ละระบบการวัดแรงที่ใช้โหมดการสอบเทียบ (แรงดึง แรงอัด) class ของแต่ละช่วงในการสอบเทียบ มาตรฐาน ISO 7500-1 ค่าคุณสมบัติต่างๆ ของ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ของความแม่นยำ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากความทวนซ้ำได้ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการกลับสู่ค่าศูนย์ และค่าละเอียดสัมพัทธ์

ค. ค่าขีดจำกัดขอบเขตล่างของพิสัยที่มีการประเมิน

2.2.9 ช่วงเวลาระหว่างการตรวจสอบ

โดยทั่วไปช่วงเวลาระหว่างการสอบเทียบสองครั้งห่างกันไม่ควรเกิน 12 เดือน เว้นแต่มีการระบุเพิ่มเติม

ต้องมีการสอบเทียบเครื่องเพิ่มเติม เมื่อมีการย้ายเครื่องไปยังสถานที่ใหม่หรือมีการซ่อมแซมหรือปรับเปลี่ยนตำแหน่ง

บทที่ 3

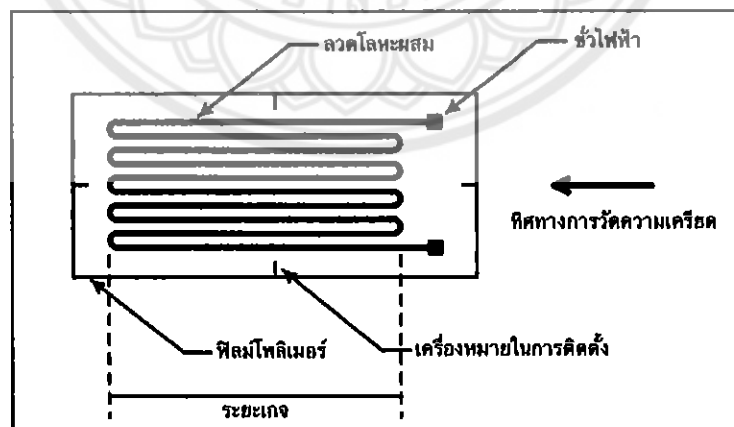
หลักการวัดแรง การทดลองและการสอบเทียบ

หลักการวัดแรงของ Load cell

3.1 โหลดเซลล์ คือ เซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าแรงกดหรือแรงดึงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เหมาะสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Properties of Parts) โหลดเซลล์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภทเช่น การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน (Press fit) ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุโลหะ ทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ทดสอบไม้ เป็นต้น

3.1.1 ทฤษฎีของ Strain Gage

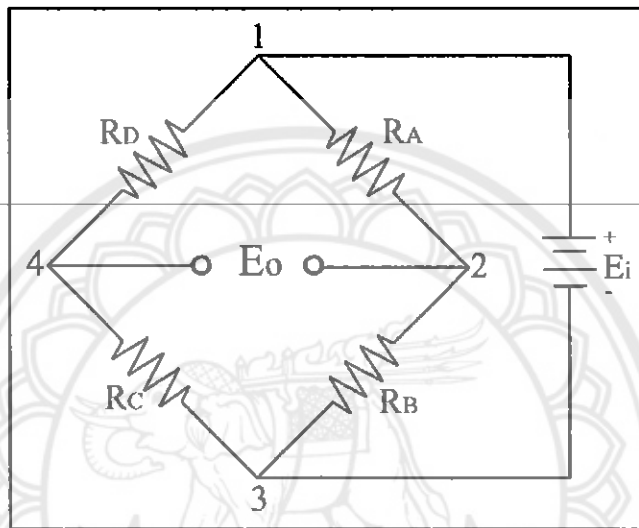
Strain Gage เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความเครียดโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า Strain Gage วัดความเครียดประกอบด้วยขดลวดที่ทำจากโลหะผสมที่มีความไวของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าต่อความเครียดสูงขดลวดโลหะนี้จะถูกยึดติดบนแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ ซึ่งฟิล์มโพลีเมอร์นี้จะถูกยึดติดบนผิวของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่ต้องการวัดความเครียด ระยะของขดลวดใช้เป็นระยะ Strain Gage ในการวัดความเครียด



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของ Strain Gage

3.1.2 วงจรบริดจ์

การวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาด เพื่อใช้คำนวณความเครียด (Strain) กระทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นในการใช้เกจวัดความเครียดจึงวัดการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔE) ที่เกิดขึ้นในวงจรสโตนบริดจ์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้สะดวกกว่าการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้างดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 วงจรวงจบริดจ์

จากรูปที่ 3.2 E_i คือ กระแสที่จ่ายให้กับวงจบริดจ์ในด้าน input สามารถตั้งค่าได้คือ 2.5 , 5 , 10 เป็นต้น และ E_o คือ output ที่อ่านได้จากวงจบริดจ์

3.1.3 การวิเคราะห์ท่วงจบริดจ์แบบทั่วไปกับแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้

$$V_{14} = \frac{R_D}{R_D + R_C} \times E_i \quad \text{----- (3.1)}$$

$$V_{12} = \frac{R_A}{R_A + R_B} \times E_i \quad \text{----- (3.2)}$$

เมื่อ $V_{14} = V_1 - V_4$ และ $V_{12} = V_1 - V_2$

ดังนั้น $V_{42} = (V_1 - V_2) - (V_1 - V_4)$

จะได้ $V_{42} = V_4 - V_2 = V_{12} - V_{14}$

$$\therefore V_{42} = \left[\frac{R_A}{R_A + R_B} - \frac{R_D}{R_D + R_C} \right] \times E_i \quad \text{----- (3.3)}$$

$$V_{43} = \frac{R_C}{R_D + R_C} \times E_i \quad \text{----- (3.4)}$$

$$V_{23} = \frac{R_B}{R_A + R_B} \times E_i \quad \text{----- (3.5)}$$

เมื่อ $V_{43} = V_4 - V_3$ และ $V_{23} = V_2 - V_3$

ดังนั้น $V_{42} = (V_4 - V_3) - (V_2 - V_3)$

จะได้ $V_{42} = V_4 - V_2 = V_{43} - V_{23}$

$$V_{42} = \left[\frac{R_C}{R_D + R_C} - \frac{R_B}{R_A + R_B} \right] \times E_i \quad \text{----- (3.6)}$$

เนื่องจาก

$$E_0 = \frac{V_{42} + V_{42}}{2}$$

$$\therefore E_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{R_A}{R_A + R_B} - \frac{R_D}{R_D + R_C} + \frac{R_C}{R_D + R_C} - \frac{R_B}{R_A + R_B} \right) \times E_i \quad \text{----- (3.7)}$$

ให้ $R_A \approx R_B \approx R_C \approx R_D = R$ แทนค่าในสมการที่ (3.7)

$$\text{จะได้ } E_0 \approx \frac{1}{2} \left(\frac{R + \Delta R_A}{2R} - \frac{(R + \Delta R_D)}{2R} + \frac{(R + \Delta R_C)}{2R} - \frac{(R + \Delta R_B)}{2R} \right) \cdot E_i$$

$$E_0 \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_A}{2R} - \frac{\Delta R_D}{2R} + \frac{\Delta R_C}{2R} - \frac{\Delta R_B}{2R} \right) \cdot E_i$$

$$E_0 \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_A}{R} - \frac{\Delta R_D}{R} + \frac{\Delta R_C}{R} - \frac{\Delta R_B}{R} \right) \cdot E_i$$

$$E_0 \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_A}{R_A} - \frac{\Delta R_D}{R_D} + \frac{\Delta R_C}{R_C} - \frac{\Delta R_B}{R_B} \right) \cdot E_i$$

$$\therefore \frac{E_o}{E_i} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_A}{R_A} - \frac{\Delta R_D}{R_D} + \frac{\Delta R_C}{R_C} - \frac{\Delta R_B}{R_B} \right) \quad \text{----- (3.8)}$$

เนื่องจากคุณสมบัติของ strain gage จากผู้ผลิต ซึ่งมีค่า gage factor (K) เป็นค่าคงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อ strain ที่เกิดขึ้นดังสมการที่ (3.9)

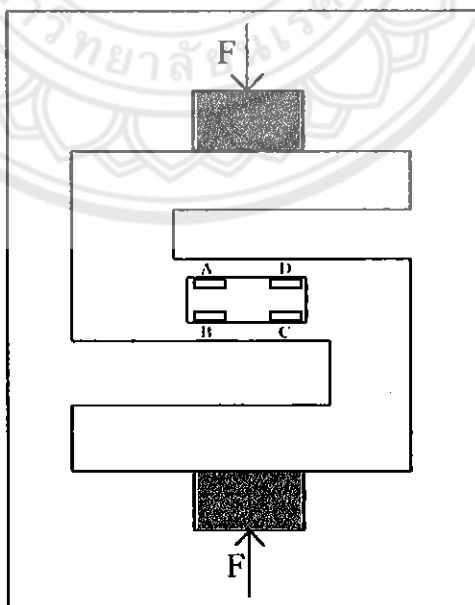
$$K = \frac{\Delta R / R}{\epsilon} \quad \text{----- (3.9)}$$

$$\therefore K = \frac{\Delta R / R}{\epsilon} = \frac{\Delta R_A / R_A}{\epsilon} = \frac{\Delta R_D / R_D}{\epsilon} = \frac{\Delta R_C / R_C}{\epsilon} = \frac{\Delta R_B / R_B}{\epsilon} \quad \text{---- (3.10)}$$

นำสมการที่ (3.10) แทนในสมการที่ (3.8)

$$\text{จะได้ } \frac{E_o}{E_i} \approx \frac{1}{4} (K\epsilon_A - K\epsilon_D + K\epsilon_C - K\epsilon_B)$$

$$\therefore \frac{E_o}{E_i} \approx \frac{1}{4} K (\epsilon_A - \epsilon_D + \epsilon_C - \epsilon_B)$$



รูปที่ 3.3 โหลดเซลล์แบบ S - Type

จากรูปที่ 3.3 กำหนดให้

$$\approx \varepsilon_A = \varepsilon$$

$$\approx \varepsilon_D = -\varepsilon$$

$$\approx \varepsilon_C = \varepsilon$$

$$\approx \varepsilon_B = -\varepsilon$$

$$\text{จะได้ } \frac{E_0}{E_i} \approx \frac{1}{4}(\varepsilon + \varepsilon + \varepsilon + \varepsilon) = K\varepsilon \quad \therefore \varepsilon = \frac{E_0}{KE_i} \quad \text{----(3.11)}$$

3.1.4 การหาความต้านทานภายใน Load cell standard ที่นำมาใช้ในการทดลอง

เนื่องจาก Load cell standard ที่นำมาใช้เป็นแบบ S - type ดังรูปที่ 3.4 และมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

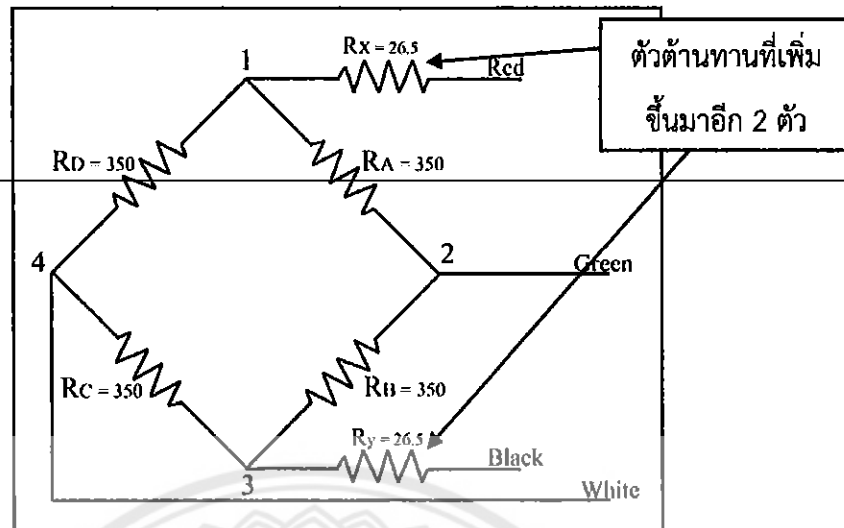
Eligible Certificate จากผู้ผลิต	
Sensitivity	: 2.0003 mv/v
Zero Output	: 0.45 %F.S
Input Resistance	: 402.7 Ω
Output Resistance	: 352.2 Ω
Red	: + Excitation
Black	: -Excitation
Green	: + Signal
White	: - Signal



รูปที่ 3.4 Load Cell Standardผู้ผลิต
Zega model keed-a
Serial no 5g29340

จากข้อมูลผู้ผลิตให้มาพบว่า

Input Resistance = 402.7 Ω ไม่เท่ากับ Output Resistance = 352.2 Ω ดังนั้นจึงทำการวัดและคำนวณเพื่อหาความต้านทานภายในที่แท้จริง



รูปที่ 3.5 วงจรฟูบริดจ์ใน Load Cell Standard

เมื่อได้วัดความต้านทานในภายใน Load cell ด้วย Multimeter รุ่น Extech model 380225 พบว่า

ระหว่างสาย Black & Red	: 402 Ω = $R_{(B,R)}$
ระหว่างสาย Green & White	: 349 Ω = $R_{(G,W)}$
ระหว่างสาย Black & White	: 289 Ω = $R_{(B,W)}$
ระหว่างสาย Green & Black	: 289 Ω = $R_{(G,B)}$
ระหว่างสาย White & Red	: 289 Ω = $R_{(W,R)}$
ระหว่างสาย Red & Green	: 289 Ω = $R_{(R,G)}$

จากวงจรภายในของ Load cell ดังรูปที่ 3.5 สามารถคำนวณหาตัวต้านทานในภายในได้ว่า

$$\frac{1}{R_{(B,R)}} = \frac{1}{R_A + R_B} + \frac{1}{R_C + R_D}$$

$$\frac{1}{402} = \frac{1}{350+350} + \frac{1}{350+350}$$

$$\frac{1}{402} \neq \frac{1}{350}$$

เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้มาคำนวณ ค่าที่ได้จากการวัดระหว่างสาย B,R ก็กับการคำนวณระหว่างจุด 1,3 ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงประเมินได้ว่าวงจรของ Load Cell มีตัวต้านทานต้านทานเพิ่มเติมคือ R_x และ R_y ดังรูปที่ 3.5 สามารถคำนวณหาตัวต้านทาน R_x และ R_y ได้ดังนี้

หาค่าตัวต้านทาน R_x เมื่อ $R_{(R,G)} = R_{(1,2)}$ จะได้

$$\frac{1}{R_{(1,2)}} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_C + R_D + R_B}$$

$$\frac{1}{R_{(1,2)}} = \frac{1}{350} + \frac{1}{1050}$$

$$R_{(1,2)} = \frac{350 \times 1050}{350 + 1050} = 262.5$$

แต่เมื่อทำการวัดจริง $R_{(R,G)} = 289 \Omega$

จะได้ $R_{(R,G)} = R_{(1,2)} + R_x$

$$289 = 262.5 + R_x$$

$$\therefore R_x = 26.5 \Omega$$

หาค่าตัวต้านทาน R_y เมื่อ $R_{(G,B)} = R_{(2,3)}$

$$\frac{1}{R_{(2,3)}} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C + R_D + R_A}$$

$$\frac{1}{R_{(2,3)}} = \frac{1}{350} + \frac{1}{1050}$$

$$R_{(2,3)} = \frac{350 \times 1050}{350 + 1050} = 262.5$$

แต่เมื่อทำการวัดจริง $R_{(G,B)} = 289 \Omega$

จะได้ $R_{(G,B)} = R_{(1,2)} + R_y$

$$289 = 262.5 + R_y$$

$$\therefore R_y = 26.5 \Omega$$

พิสูจน์ค่าที่คำนวณได้

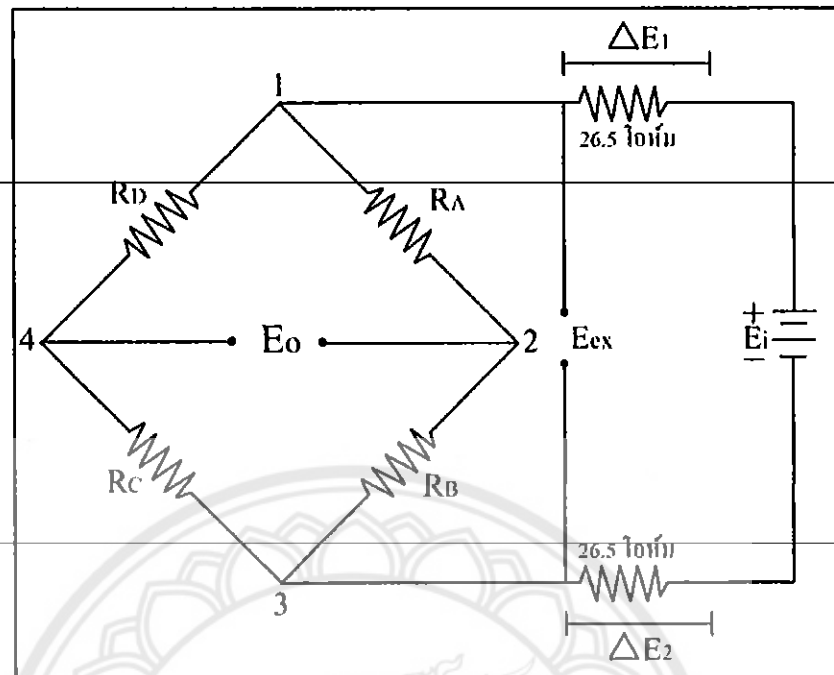
$$\text{ให้ } R_{(R,G)} = R_{(G,W)}$$

$$R_{(R,G)} - R_x - R_y = R_{(G,W)}$$

$$402 - 26.5 - 26.5 = 349$$

สรุปได้ว่าใน Load cell จะมีตัวต้านทานเพิ่มขึ้นไปอีก 2 ตัวคือ

$$R_y = 26.5 \Omega \text{ และ } R_x = 26.5 \Omega \text{ ดังรูปที่ 3.5}$$



รูปที่ 3.6 วงจรของ Load cell standard

โดยทั่วไปแล้ววงจรบริดจ์ที่ใช้จะเป็นดังรูปที่ 3.2 แต่โหลดเซลล์ที่ใช้วัดแรงในงานวิจัยนี้ มีตัวทานเพิ่มขึ้นมา 2 ตัวซึ่งทำให้มีความดันตก(ลดลง)เท่ากับ ΔE ทำให้ความดันที่ขั้ว 1,3 ลดลงเป็น E_{ex} ดังรูปที่ 3.6 เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านประมาณว่าคงที่ ดังนั้น Voltage drop ΔE จึงประมาณว่าคงที่เช่นกัน

จากสมการบริดจ์ทั่วไปดังสมการที่ (3.11) Strain ที่ indicator อ่านได้คือ $\epsilon \approx E_o / KE_i$ จะได้ $E_o = K\epsilon E_i$ แต่ในกรณี(รูปที่ 3.6) $E_{ex} = E_i - \Delta E$ ดังนั้น Voltage ที่ E_o จะได้เท่ากับ $E_o = K\epsilon E_{ex}$

$$\therefore \epsilon_{\text{indicator}} = \frac{K\epsilon E_{ex}}{KE_i} \Rightarrow \epsilon_{\text{indicator}} = \frac{K\epsilon(E_i - \Delta E)}{KE_i}$$

$$\epsilon_{\text{indicator}} = \frac{K\epsilon - K\epsilon\Delta E}{KE_i} \Rightarrow \epsilon_{\text{indicator}} = \left(1 - \frac{\Delta E}{E_i}\right) \epsilon$$

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงวิเคราะห์ดูว่า วงจรบริดจ์แบบทั่วไป (Full bridge 1) สามารถนำมาใช้กับ วงจรบริดจ์ที่มีตัวต้านทานเพิ่มขึ้นมาในด้าน in put ได้หรือไม่ ซึ่งโดยปกติแล้วค่า strain ที่ indicator

อ่านได้นั้นจะเท่ากับ $\epsilon \approx \frac{E_0}{KE_i}$ แต่ในงานวิจัยพบว่า $\epsilon_{\text{indicator}} = \left(1 - \frac{\Delta E}{E_i}\right) \epsilon = \left(1 - \frac{53}{402}\right) \epsilon$

จะได้ค่า $\epsilon_{\text{indicator}}$ ที่อ่านได้เท่ากับ 0.868ϵ ซึ่ง ϵ ที่คูณกับค่าคงที่นั้นคือค่าสเตรนที่แท้จริงของวงจรรบริดจ์
สรุปได้ว่า เครื่องมือที่จ่ายและวัดแรงดันกับวงจรรบริดจ์ทั่วไปดังรูป 3.2 สามารถนำมาใช้กับ
วงจรรของเครื่องวัดแรงในงานวิจัยนี้ได้เพราะยังมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง ดังรูปที่ 3.6

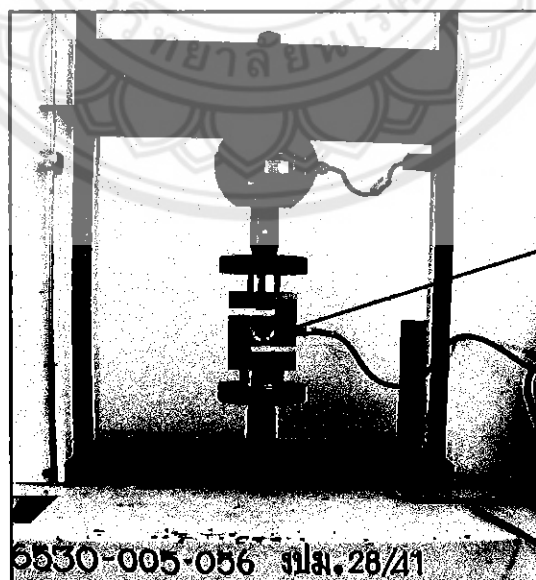
3.2 การติดตั้งและการเตรียมอุปกรณ์สำหรับปฏิบัติการสอบเทียบ

3.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์

ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและวอร์มเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ
ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่อง UTM, load cell, indicator(Universal Strain Gage module NI-SCXI-
1520) และเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.7, 3.8, 3.9

ในการปฏิบัติการสอบเทียบเครื่อง UTM นี้จะเป็นการสอบเทียบในโหมดแรงกด
(compression) เนื่องจากการสอบเทียบในโหมดแรงกดทำได้ง่ายกว่า หัววัดในการสร้างตัวยึด
load cell standard ได้ง่ายกว่า ราคาถูกกว่า

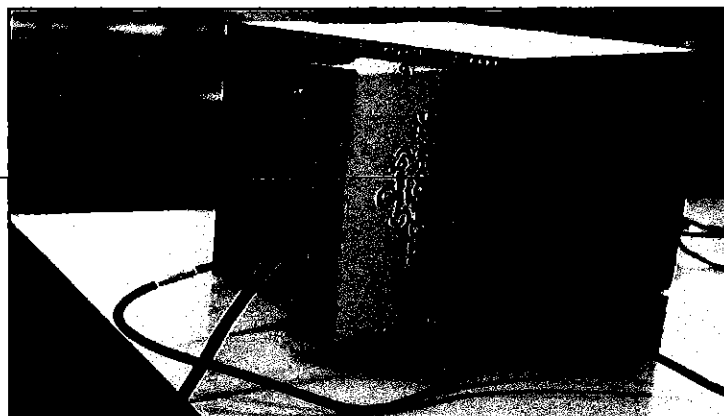
*การติดตั้ง load cell standard เข้ากับหัวกดนั้นจะต้องติดตั้ง load cell standard ให้อยู่
กึ่งกลางพอดีกับหัวกดมากที่สุดเพื่อการอ่านค่า Strain ที่แม่นยำ



load Cell Standardผู้ผลิต
Zega model keed-a
Serial No.5G29340

6530-005-086 งาม. 28/41

รูปที่ 3.7 เครื่อง UTM และ Load cell



รูปที่ 3.8 indicator (Universal Strain Gage module NI-SCXI-1520)

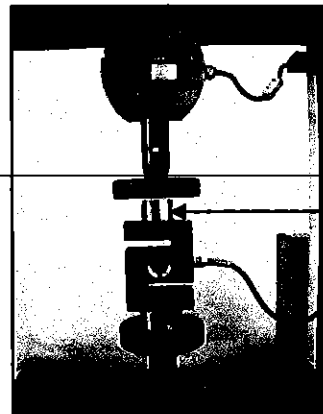


รูปที่ 3.9 เครื่องคอมพิวเตอร์

3.2.2 ขั้นตอนการสอบเทียบ

หลังจากติดตั้งอุปกรณ์และวอร์มเครื่องเสร็จแล้ว ขั้นตอนการทดสอบดังนี้

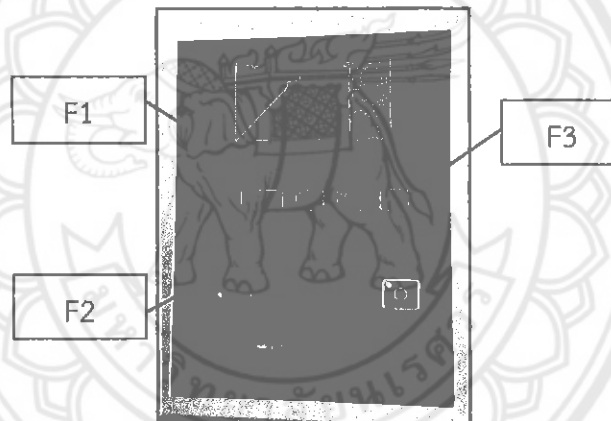
- ก. ปรับระยะหัวกด (Compression) ลงมาให้ห่างจาก load cell ประมาณ 0.2mm ดังรูปที่ 3.10 ตรวจสอบให้ได้ะไลน์เมนต์ (alignment) ให้ตั้งอยู่ศูนย์กลางไม่มีการเอียงศูนย์



ห่างจากหัวกด
ประมาณ 0.2 mm

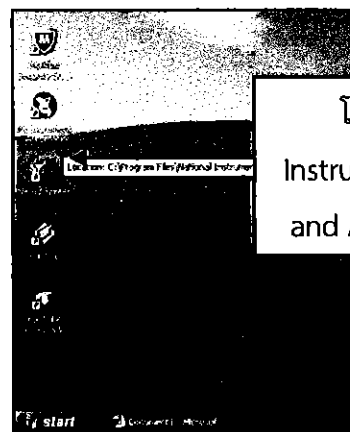
รูปที่ 3.10 การติดตั้งโหนดเซลล์

ข. ทำการเซต ค่าแรง ตำแหน่ง ระยะยึดที่ Controller ของเครื่อง UTM ทั้งหมดให้เป็นศูนย์โดยการกดปุ่ม F1, F2 และ F3 ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 controller ของเครื่อง UTM

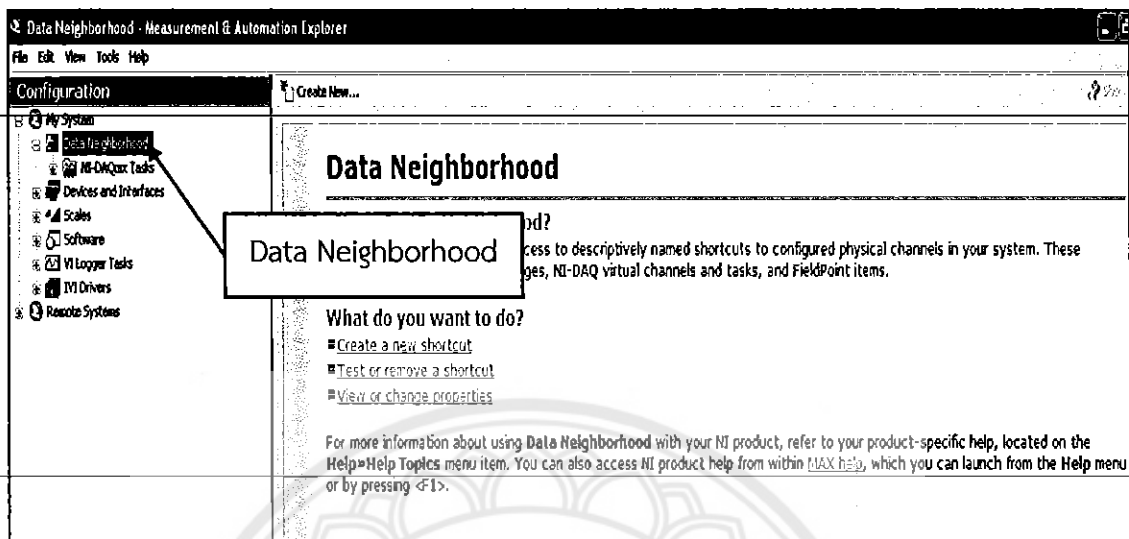
ค. ทำการเปิดโปรแกรม National Instruments Measurement and Automation Explorer เพื่อจะเริ่มดำเนินการสอบเทียบดังรูปที่ 3.12



โปรแกรม National
Instruments Measurement
and Automation Explorer

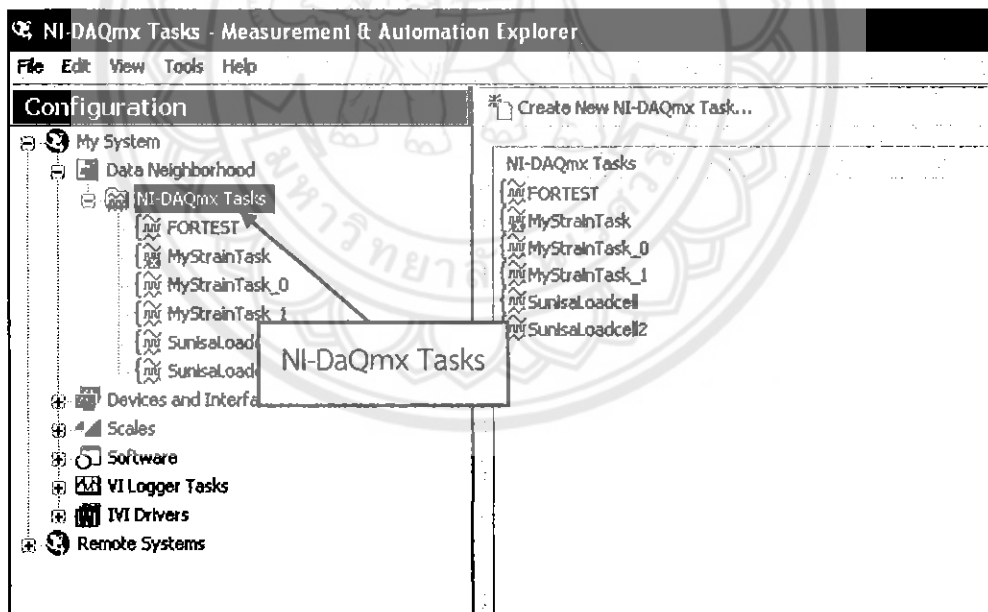
รูปที่ 3.12 โปรแกรมที่ใช้ในการสอบเทียบ

ง. ตั้งค่าโปรแกรมดังรูปที่ 3.13 เลือกที่ Data Neighborhood



รูปที่ 3.13 Data Neighborhood

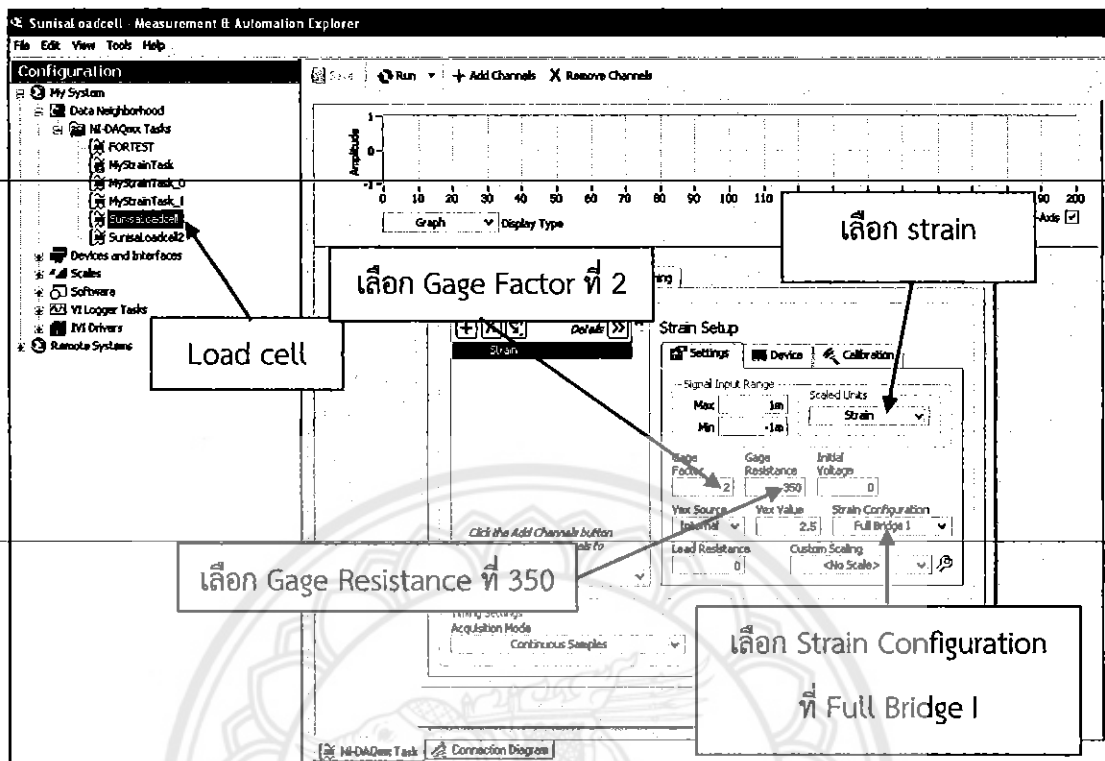
จ. เลือกที่ NI-DaQmxTasks ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 NI-DaQmx Tasks

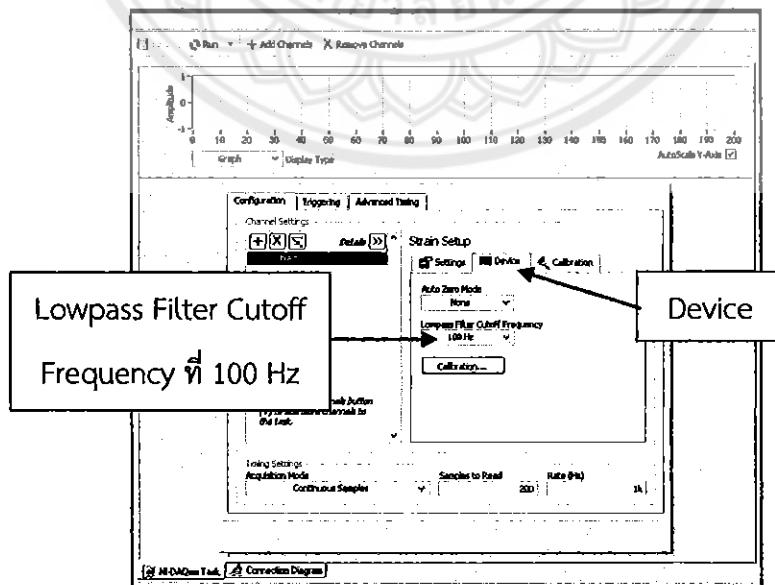
ฉ. เลือกที่ task ที่ตั้งค่าไว้ดังรูปที่ 3.15

- 1).เลือก strain
- 2).เลือก Gage Resistance ที่ 350
- 3).เลือก Gage Factor ที่ 2
- 4). เลือก Strain Configuration ที่ Full Bridge I



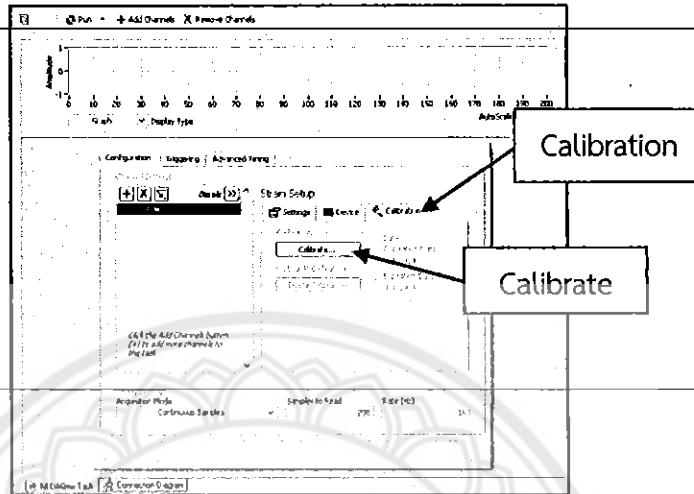
รูปที่ 3.15 ตั้งค่าโปรแกรม

ข.เลือกที่ Device เลือก Lowpass Filter Cutoff Frequency ที่ 100Hz
 ดังรูปที่ 3.16 (สัญญาณที่ได้รับเป็นแบบ mode static ดังนั้นจึงตัดความถี่ที่ต่ำกว่า 100Hz ให้ผ่านไป
 ได้ ส่วนความถี่ที่เกิน 100 Hz จะถูกตัดออก)

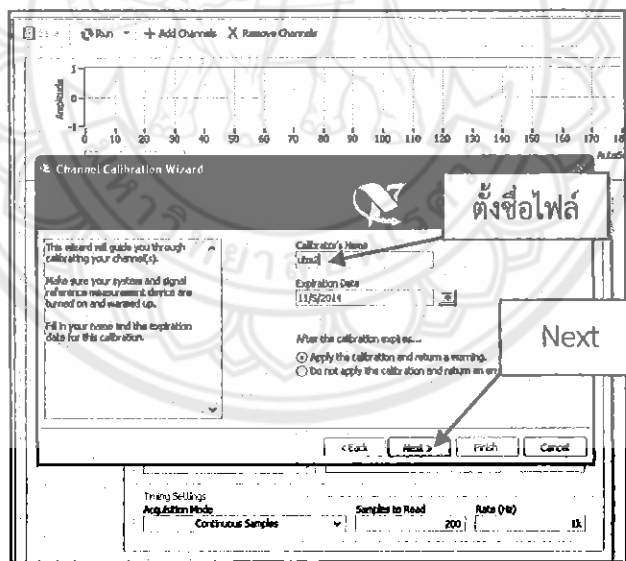


รูปที่ 3.16 Device

ข.เลือกที่ Calibration แล้วคลิกที่ Calibrate และตั้งชื่อไฟล์ เช่นutm2และกด Next ดังรูปที่ 3.17, 3.18

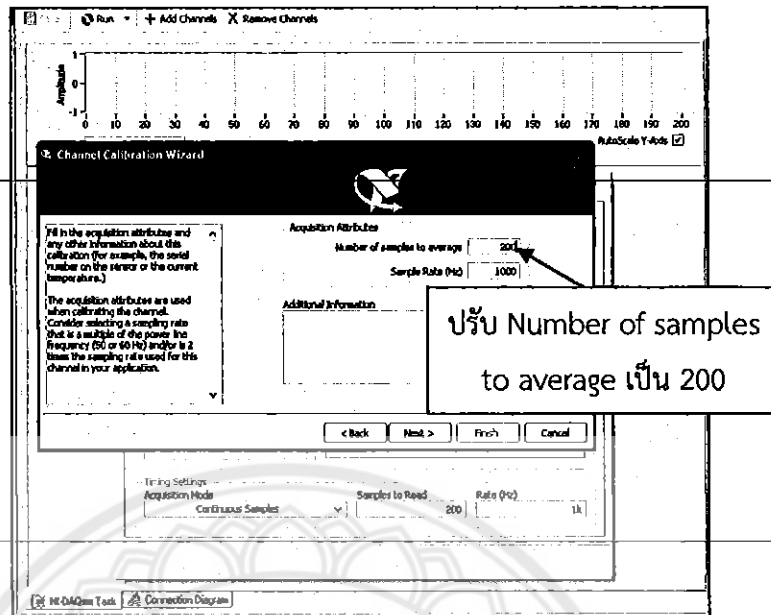


รูปที่ 3.17 Calibration



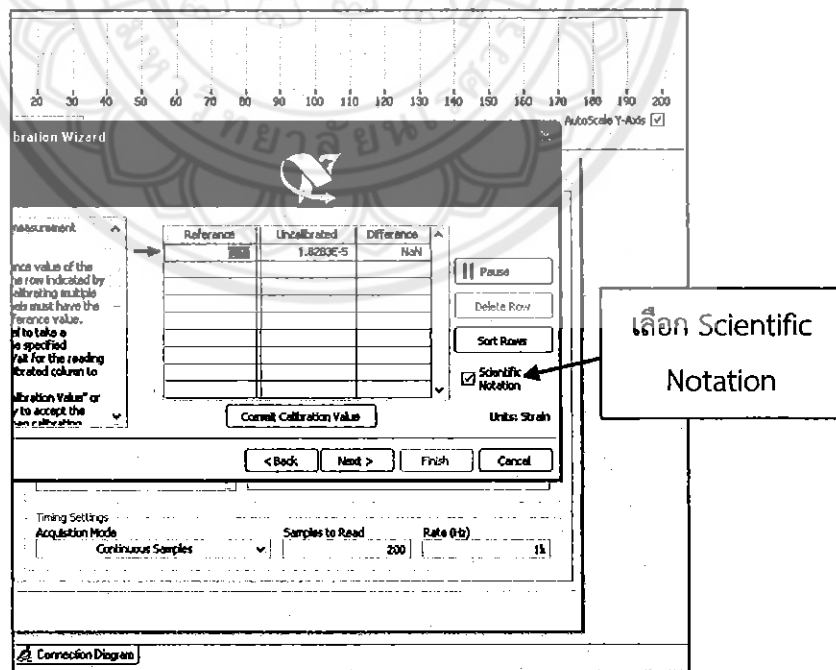
รูปที่ 3.18 ตั้งชื่อไฟล์

ณ.ปรับ Number of samples to average จาก 1000 เป็น 200 เพื่อให้ค่า strain แสดงผลได้เร็วขึ้น (1 วินาที แสดงผล 5 ครั้ง) และกดปุ่ม Next ดังรูปที่ 3.19



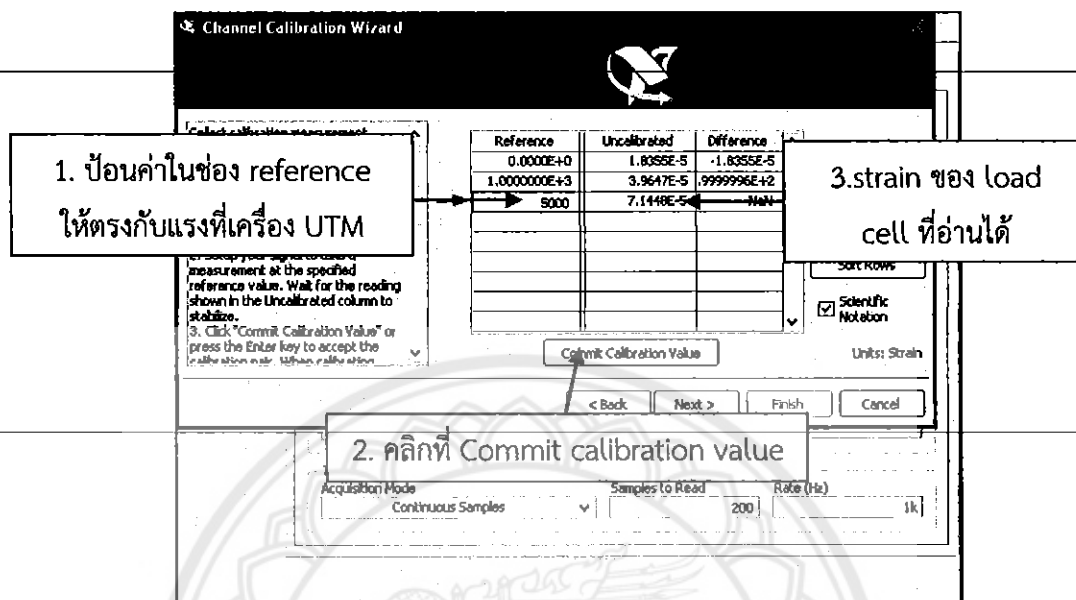
รูปที่ 3.19 Number of samples to average

ดู. เลือกที่ Scientific Notation เพื่อให้โปรแกรมแสดงผลค่า strain ได้อย่างละเอียดดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 Scientific Notation

ฏ. ป้อนค่าในช่อง reference ให้ตรงกับแรงที่เครื่อง UTM รอจนกว่าค่าจะนิ่งแล้วคลิกที่ Commit calibration value เพื่อบันทึกค่า strain ที่อ่านได้จาก indicator ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ตารางแสดงค่าแรง (N) และระยะยืด (strain)

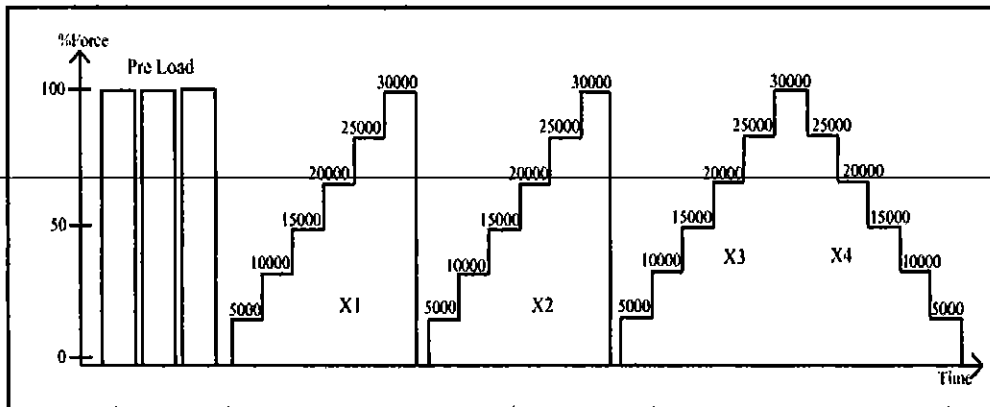
3.2.3 ดำเนินการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ขั้นตอนการสอบเทียบนั้น ประยุกต์มาจากขั้นตอนการสอบเทียบที่แนะนำในมาตรฐาน ISO 7500-1^[1] แสดงในรูปที่ 3.22

การ Pre load โดยจะให้แรงไปที่แรงสูงสุดที่จะทำการทดสอบในกรณีนี้เพื่อความปลอดภัยจึงทดสอบแรงสูงสุดที่ 30000 N แม้ว่าในตัวเครื่อง UTM จะใช้ได้สูงสุด 50000 N ก็ตาม แล้วจึงถอดแรงลงมาที่ศูนย์ ทำ 3 ครั้ง เพื่อเป็นการวอร์มเครื่อง

X1, X2 เป็นการให้แรงไปที่เครื่อง UTM โดยแรงที่ให้นั้นจะต้องเพิ่มขึ้นครั้งละเท่าๆกัน แล้วอ่านค่าแรงที่ได้จาก load cell standard และบันทึกผล

X3, X4 จะเป็นการทดสอบค่าความผิดพลาดจากการย้อนกลับ โดยจะให้แรงเพิ่มขึ้นไปครั้งละเท่าๆกันและถอดแรงออกครั้งละเท่าๆกัน ว่าในตำแหน่งแรงที่เท่ากันจะอ่านค่าแรงได้เท่ากันหรือไม่ และบันทึกผล



รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการสอบเทียบทั้งหมด

3.2.4 การบันทึกค่า

จากผลการทดลองเก็บข้อมูลดังขั้นตอนในรูปที่ 3.22 สามารถนำผลการทดลองที่ได้บันทึกลงในตารางที่ 3.1

*หมายเหตุ ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ได้มีการสอบเทียบเครื่อง UTM ทั้งหมด 5 ครั้ง โดยตารางที่ 3.1 เป็นข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบในครั้งที่ 4

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าข้อมูลดิบจากการเก็บข้อมูลครั้งที่ 4

UTM (N)	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				X average
	x1	x2	x3	x4	
0	18.795	18.883	18.969	18.989	18.882
5000	122.770	122.870	122.880	122.720	122.840
10000	225.720	225.710	225.810	225.430	225.747
15000	328.680	328.660	328.650	328.430	328.663
20000	431.420	431.320	431.380	431.170	431.373
25000	534.260	534.240	534.280	534.110	534.260
30000	637.050	637.020	636.980		637.017
0	18.883	18.969			

จากตารางที่ 3.1 ช่อง UTM แสดงแรงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM และ x1 ถึง x4 แสดงค่า strain ที่อ่านได้จาก load cell มาตรฐาน ในหน่วยไมโครสเตรน ($\mu\epsilon$) ส่วน X average คือค่าเฉลี่ยของ strain x1 x2 และ x3

3.2.5 แปลงค่า strain ที่อ่านได้เป็น แรง (N)

นำข้อมูลจากตารางที่ 3.1 มาแทนค่าในสมการความสัมพันธ์ $y = 48.563x - 947.83$ ดัง (ภาคผนวก ก) โดยสมการนี้จะถูกนำมาใช้ ในการแปลงค่า Strain (ที่อ่านได้จาก load cell-standard) เป็นแรง (N)

ตัวอย่างเช่น ในระดับแรงที่ 10000 N

แทนค่า $y = 48.563(225.72) - 947.83 = 10013.81\text{N}$ จะได้ค่าแรงทั้งหมดดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงค่าแรงที่ได้จากการแปลงค่า strain

UTM	Load cell (N)			
	x1	x2	x3	x4
0	-35.088	-30.815	-26.639	-25.667
5000	5014.250	5019.106	5019.591	5011.821
10000	10013.810	10013.320	10018.180	9999.727
15000	15013.860	15012.890	15012.400	15001.720
20000	20003.220	19998.360	20001.280	19991.080
25000	24997.440	24996.470	24998.410	24990.150
30000	29989.230	29987.770	29985.830	
0	-30.815	-26.639		

ต้องทำให้ค่าเริ่มต้นเป็น ศูนย์ เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบระหว่างแรงของเครื่อง UTM กับแรงของ load cell standard ที่จุดเริ่มต้นเดียวกัน

ตัวอย่างเช่น ระดับแรงที่ 0 จะได้ $-35.0884 - (-35.0884) = 0$

ดังนั้นระดับแรงที่ 10000N จะได้ $10013.81 - (-35.0884) = 10048.889\text{ N}$ ค่าที่ได้ทั้งหมดดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตารางค่าที่ได้จากการคำนวณ

UTM	Load cell (N)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	0.971	0
5000	5049.338	5049.921	5046.230	5038.460	5048.496
10000	10048.899	10044.140	10044.819	10026.366	10045.953
15000	15048.945	15043.700	15039.038	15028.355	15043.895
20000	20038.308	20029.178	20027.915	20017.717	20031.800
25000	25032.527	25027.282	25025.048	25016.792	25028.286
30000	30024.318	30018.587	30012.468		30018.458
0	4.274	4.176			

3.2.6 การคำนวณเพื่อจัด Class ของเครื่อง UTM

หลังจากที่ได้ค่าแรงของ load cell standard จากตารางที่ 3.3 แล้วสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อประเมิน Class ของเครื่อง UTM ตามมาตรฐาน ISO 7500-1 และตัวอย่างการคำนวณดังต่อไปนี้

ค่าความละเอียดของสัมพัทธ์ของเครื่องของ UTM

จากสมการที่ (2.4) คือ
$$a = \frac{r}{F} \times 100$$

ตัวอย่างเช่น แทนค่าแรงที่ 10000N จะได้
$$a = \frac{1}{10000} \times 100 = 0.01\%$$

ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการกลับสู่ค่าศูนย์ของระบบการวัดแรงของเครื่องทดสอบ (relative zero error)

จากสมการที่ (2.5) คือ
$$f_0 = \frac{f_{10}}{f_N} \times 100$$

$F_{10} = 0$ เนื่องจากแรงตกค้างที่อ่านได้จากเครื่อง UTM = 0 จากภาคผนวก ข ตารางผลการทดลองครั้งที่ 4

ตัวอย่างเช่น แทนค่าแรงที่ 10000N จะได้
$$f_0 = \frac{0}{30000} \times 100 = 0\%$$

ค่าความผิดพลาดย้อนกลับสัมพัทธ์ (Relative reversibility error)

จากสมการที่ (2.6) คือ
$$v = \frac{F - F'}{\bar{F}} \times 100$$

ตัวอย่างเช่น แทนค่าแรงที่ 10000N จะได้
$$v = \frac{10044.889 - 10026.366}{10045.953} \times 100 = 0.1837\%$$

ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ของความแม่นยำ (Relative accuracy error)

จากสมการที่ (2.8) คือ
$$q = \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \times 100$$

ตัวอย่างเช่น แทนค่าแรงที่ 10000N จะได้
$$q = \frac{10000 - 10045.953}{10045.953} \times 100 = -0.4574\%$$

ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากความทวนซ้ำได้ของการวัด (Relative repeatability error)

จากสมการที่ (2.10) คือ
$$b = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\bar{F}} \times 100$$

ตัวอย่างเช่น แทนค่าแรงที่ 10000N จะได้
$$b = \frac{10048.889 - 10044.140}{10045.953} \times 100 = 0.0474\%$$

จากการคำนวณเพื่อประเมิน Class ตามสมการด้านบน โดยใช้ข้อมูลตารางที่ 3.3 มาคำนวณ จะได้ผลจากการคำนวณ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงค่า Relative accuracy error (q), Relative repeatability error (b), Relative reversibility error (v), Relative zero error (f₀) และ Relative Resolution (a) ที่ได้จากการคำนวณสำหรับการประเมิน Class

UTM	q (%)	b (%)	v (%)	f ₀ (%)	a (%)
0				0	
5000	-0.9606	0.0731	0.1539	0	0.0200
10000	-0.4574	0.0474	0.1837	0	0.0100
15000	-0.2918	0.0659	0.0710	0	0.0067
20000	-0.1587	0.0519	0.0509	0	0.0050
25000	-0.1130	0.0299	0.0330	0	0.0040
30000	-0.0615	0.0395	0	0	0.0033

จากตารางการจัด Class ตามมาตรฐาน ISO 7500-1 ได้กำหนด Class ของเครื่อง UTM ได้ 4 ระดับ คือ class 0.5,1,2 และ 3 ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตาราง Class ตามมาตรฐาน ISO 7500-1

Class ของ เครื่อง UTM	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ (%)				
	q	b	v	f ₀	a
0.5	±0.5	0.5	±0.75	±0.05	0.25
1	±1.0	1.0	±1.5	±0.1	0.5
2	±2.0	2.0	±3.0	±0.2	1.0
3	±3.0	3.0	±4.5	±0.3	1.5

3.2.7 การประเมิน Class ของเครื่อง UTM

ตามมาตรฐาน ISO7500-1 ได้มีการกำหนดการประเมิน Class ของเครื่อง UTM ไว้เพื่อจะได้ง่ายต่อการจัดว่าเครื่องที่สอบเทียบอยู่ Class ไດยั้งใช้งานได้ตามมาตรฐานหรือไม่

-ค่า q แรงที่ 10000N จะได้ค่ามาหนึ่งค่า ถ้าค่าอยู่ในช่วง±0.5 จะอยู่ใน class 0.5

ถ้าค่าอยู่ในช่วง±1.0 จะอยู่ใน class 1

ถ้าค่าอยู่ในช่วง ±2.0 จะอยู่ใน class 2

ถ้าค่าอยู่ในช่วง ±3.0 จะอยู่ใน class 3

ตัวอย่างเช่นแรงที่ 10000 N ค่า q= -0.4574 มีค่าอยู่ในช่วง±0.5 จะอยู่ใน class 0.5

- ค่า b แรงที่ 10000N จะได้ค่ามาหนึ่งค่า ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ0.5 จะอยู่ใน class 0.5

ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ1.0 จะอยู่ใน class 1

ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ2.0 จะอยู่ใน class 2

ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ3.0 จะอยู่ใน class 3

ตัวอย่างเช่นแรงที่ 10000N ค่า b=0.0474 มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ0.5 จะอยู่ใน class 0.5

-ค่า v แรงที่ 10000Nจะได้ค่ามาหนึ่งค่า ถ้าค่าอยู่ในช่วง±0.75 จะอยู่ใน class 0.5

ถ้าค่าอยู่ในช่วง±1.5 จะอยู่ใน class 1

ถ้าค่าอยู่ในช่วง±3.0จะอยู่ใน class 2

ถ้าค่าอยู่ในช่วง±4.5 จะอยู่ใน class 3

ตัวอย่างเช่นแรงที่ 10000N ค่า $v=0.1837$	มีค่าอยู่ในช่วง ± 0.75 จะอยู่ใน class 0.5
-ค่า f_0 แรงที่ 10000Nจะได้ค่ามาหนึ่งค่า	ถ้าค่าอยู่ในช่วง ± 0.05 จะอยู่ใน class 0.5
	ถ้าค่าอยู่ในช่วง ± 0.1 จะอยู่ใน class 1
	ถ้าค่าอยู่ในช่วง ± 0.2 จะอยู่ใน class 2
	ถ้าค่าอยู่ในช่วง ± 0.3 จะอยู่ใน class 3
ตัวอย่างเช่นแรงที่ 10000N ค่า $f_0=0$	มีค่าอยู่ในช่วง ± 0.05 จัดอยู่ใน class 0.5
-ค่า a แรงที่ 10000N จะได้ค่ามาหนึ่งค่า	ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ0.25จะอยู่ในclass 0.5
	ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ0.5 จะอยู่ใน class 1
	ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ1.0 จะอยู่ใน class 2
	ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ1.5 จะอยู่ใน class 3
ตัวอย่างเช่น แรงที่ 10000N ค่า $a=0.01$	มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ0.25 จะอยู่ใน class 0.5

จากผลการคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆที่ใช้ในการประเมิน Class ของเครื่อง UTM สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ตารางที่ได้จากผลการประเมิน Class

UTM	Class ของเครื่อง UTM (%)				
	q	b	v	f_0	a
0				0.5	
5000	1	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

บทที่ 4

วิเคราะห์ผลการทดลอง

เนื่องด้วย Load cell มาตรฐานที่นำมาใช้ในการสอบเทียบ UTM ในงานวิจัยนี้ยังไม่ได้ถูกส่งไปสอบเทียบจึงยังไม่ทราบค่าสมการที่ใช้ในการแปลงค่าจาก strain เป็นแรง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้ผลจากการทดลองครั้งที่ 4 มาใช้ในการหาสมการของ Load cell หาความสัมพันธ์ของ strain กับแรงโดยใช้การ fit curve ด้วย least square technique และสร้างกราฟด้วยโปรแกรม Microsoft Office Excel และใช้สมการเส้นตรง $y = a_1x + a_0$ จะได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้ $y = 48.563x - 947.83$ ซึ่ง X หมายถึง strain ที่อ่านได้ในหน่วย ($\mu\epsilon$) และ y หมายถึง ค่าแรงที่ได้ในหน่วยนิวตัน โดยจะใช้สมการนี้ในการสอบเทียบกับเครื่อง UTM ต่อไป

4.1 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบ

4.1.1 นำข้อมูลจากตารางที่ 3.1 มาแทนค่าในสมการความสัมพันธ์ $y = 48.563x - 947.83$ ดัง (ภาคผนวก ก) โดยสมการนี้จะถูกนำมาใช้ในการแปลงค่า Strain (ที่อ่านได้จาก load cell-standard) เป็นแรง (N)แล้วจะได้ค่าดังตารางที่ 3.2

4.1.2 ทำให้ค่าเริ่มต้นเป็น ศูนย์ เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบระหว่างแรงของเครื่อง UTM กับแรงของ load cell standard ที่จุดเริ่มต้นเดียวกันดังตารางที่ 3.3 และ 4.10

4.1.3 คำนวณหาค่า Relative accuracy error (q), Relative repeatability error (b), Relative reversibility error (v), Relative zero error (f_0) และ Relative Resolution (a) จะได้ดังตารางที่ 3.4 และ 4.11 เพื่อทำการประเมิน Class ของเครื่อง UTM ดังตารางที่ 3.6 และ 4.12

4.1.4 คำนวณซ้ำโดยเปลี่ยนไปใช้ข้อมูลดิบของการสอบเทียบรอบที่ 12 3 4 และ 5 จะได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงผลการสอบเทียบและการจัดคลาสของเครื่อง UTM ครั้งที่ 1

ตารางที่ 4.4 ถึง 4.6 แสดงผลการสอบเทียบและการจัดคลาสของเครื่อง UTM ครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.7 ถึง 4.9 แสดงผลการสอบเทียบและการจัดคลาสของเครื่อง UTM ครั้งที่ 3

ตารางที่ 4.10 ถึง 4.12 แสดงผลการสอบเทียบและการจัดคลาสของเครื่อง UTM ครั้งที่ 4

ตารางที่ 4.13 ถึง 4.15 แสดงผลการสอบเทียบและการจัดคลาสของเครื่อง UTM ครั้งที่ 5

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าแรงของ Load cell ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 1

UTM	Load cell (N)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	24.184	0
5000	5027.970	5019.229	5019.229	5028.941	5022.143
10000	10024.617	10018.304	10018.304	10021.218	10020.408
15000	15016.894	15010.580	15010.580	15013.009	15012.685
20000	19998.001	20000.914	20000.914	20001.400	19999.943
25000	24984.449	24984.449	24984.449	24989.791	24984.449
30000	29972.355	29973.326	29973.326		29973.003
0	13.598	14.472			

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 1

UTM	q (%)	b (%)	v (%)	f ₀ (%)	a (%)
0				0	
5000	-0.4409	0.1741	-0.1934	0	0.0200
10000	-0.2037	0.0630	-0.0291	0	0.0100
15000	-0.0845	0.0421	-0.0162	0	0.0067
20000	0.0003	0.0146	-0.0024	0	0.0050
25000	0.0622	0.0000	-0.0214	0	0.0040
30000	0.0901	0.0032	0	0	0.0033

ตารางที่ 4.3 ตารางการประเมิน Class ในการสอบเทียบครั้งที่ 1

UTM	Class ของเครื่อง UTM (%)				
	q	b	v	f ₀	a
0				0.5	
5000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าแรงของ Load cell ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 2

UTM	Load cell (N)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	-3.642	0
5000	5042.248	5047.541	5037.926	5033.555	5042.571
10000	10040.352	10039.817	10032.145	10025.831	10037.438
15000	15033.114	15036.465	15028.306	15018.593	15032.628
20000	20026.847	20026.313	20018.154	20010.870	20023.771
25000	25010.868	25015.675	25011.888	24999.747	25012.810
30000	30002.658	30004.067	29995.908		30000.878
0	1.020	2.477			

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 2

UTM	q (%)	b (%)	v (%)	f ₀ (%)	a (%)
0				0.0067	
5000	-0.8442	0.1907	0.0867	0.0067	0.0200
10000	-0.3730	0.0818	0.0629	0.0067	0.0100
15000	-0.2170	0.0543	0.0646	0.0067	0.0067
20000	-0.1187	0.0434	0.0364	0.0067	0.0050
25000	-0.0512	0.0192	0.0485	0.0067	0.0040
30000	-0.0029	0.0272	0	0.0067	0.0033

ตารางที่ 4.6 ตารางการประเมิน Class ในการสอบเทียบครั้งที่ 2

UTM	Classของเครื่องUTM (%)				
	q	b	v	f ₀	a
0				0.5	
5000	1	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงค่าแรงของ Load cell ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 3

UTM	Load cell (N)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	14.569	0
5000	5029.136	5025.882	5033.458	5032.972	5029.492
10000	10026.268	10025.928	10031.562	10020.392	10027.920
15000	15021.459	15031.317	15031.123	15020.439	15027.966
20000	20016.163	20011.938	20016.600	20006.888	20014.901
25000	25004.069	25005.186	25004.992	25000.135	25004.749
30000	29988.575	29989.692	29989.498		29989.255
0	6.168	4.079			

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 3

UTM	q (%)	b (%)	v (%)	f ₀ (%)	a (%)
0				0.0067	
5000	-0.5864	0.1506	0.0097	0.0067	0.0200
10000	-0.2784	0.0562	0.1114	0.0067	0.0100
15000	-0.1861	0.0656	0.0711	0.0067	0.0067
20000	-0.0744	0.0233	0.0485	0.0067	0.0050
25000	-0.0190	0.0045	0.0194	0.0067	0.0040
30000	0.0358	0.0037	0	0.0067	0.0033

ตารางที่ 4.9 ตารางการประเมิน Class ในการสอบเทียบครั้งที่ 3

UTM	Classของเครื่องUTM (%)				
	q	b	v	f ₀	a
0				0.5	
5000	1	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

ตารางที่ 4.10 ตารางแสดงค่าแรงของ Load cell ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 4

UTM	Load cell (N)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	0.971	0
5000	5049.338	5049.921	5046.230	5038.460	5048.496
10000	10048.899	10044.140	10044.819	10026.366	10045.953
15000	15048.945	15043.700	15039.038	15028.355	15043.895
20000	20038.308	20029.178	20027.915	20017.717	20031.800
25000	25032.527	25027.282	25025.048	25016.792	25028.286
30000	30024.318	30018.587	30012.468		30018.458
0	4.274	4.176			

ตารางที่ 4.11 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 4

UTM	q (%)	b (%)	v (%)	f ₀ (%)	a (%)
0				0	
5000	-0.9606	0.0731	0.1539	0	0.0200
10000	-0.4574	0.0474	0.1837	0	0.0100
15000	-0.2918	0.0659	0.0710	0	0.0067
20000	-0.1587	0.0519	0.0509	0	0.0050
25000	-0.1130	0.0299	0.0330	0	0.0040
30000	-0.0615	0.0395	0	0	0.0033

ตารางที่ 4.12 ตารางการประเมิน Class ในสอบเทียบครั้งที่ 4

UTM	Classของเครื่อง UTM (%)				
	q	b	v	f ₀	a
0				0.5	
5000	1	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

ตารางที่ 4.13 ตารางแสดงค่าแรงของ Load cell ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 5

UTM	Load cell (N)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	4.128	0
5000	5047.201	5047.007	5043.802	5043.316	5046.003
10000	10036.078	10041.226	10047.733	10036.078	10041.679
15000	15039.524	15039.815	15043.409	15033.211	15040.916
20000	20031.315	20029.664	20033.743	20025.487	20031.574
25000	25025.048	25025.825	25028.448	25023.591	25026.440
30000	30024.123	30013.245	30019.753		30019.040
0	0.194	-0.194			

ตารางที่ 4.14 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ที่ได้จากการสอบเทียบครั้งที่ 5

UTM	q (%)	b (%)	v (%)	f ₀ (%)	a (%)
0				0.0067	
5000	-0.9117	0.0674	0.0096	0.0067	0.0200
10000	-0.4151	0.1161	0.1161	0.0067	0.0100
15000	-0.2720	0.0258	0.0678	0.0067	0.0067
20000	-0.1576	0.0204	0.0412	0.0067	0.0050
25000	-0.1056	0.0136	0.0194	0.0067	0.0040
30000	-0.0634	0.0362	0.0000	0.0067	0.0033

ตารางที่ 4.15 ตารางการประเมิน Class ในสอบเทียบครั้งที่ 5

UTM	Classของเครื่อง UTM (%)				
	q	b	v	f ₀	a
0				0.5	
5000	1	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

4.2 การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนและวิเคราะห์กราฟ

4.2.1 การคำนวณหากราฟเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่าง Load cell มาตรฐาน และ UTM จากการทดลองทั้ง 5 รอบตัวอย่างเช่น แรงที่ 10000N จะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรอบที่ 1 ได้ดังนี้

$$\frac{10000 - 10020.408}{10000} \times 100 = -0.2041\%$$

ตารางที่ 4.16 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบรอบที่ 1

UTM (N)	Load cell (N)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรอบที่ 1
5000	5022.143	-0.4429
10000	10020.408	-0.2041
15000	15012.685	-0.0846
20000	19999.943	0.0003
25000	24984.449	0.0622
30000	29973.003	0.0899

ตัวอย่างเช่น แรงที่ 10000N จะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรอบที่ 2 ได้ดังนี้

$$\frac{10000 - 10037.438}{10000} \times 100 = -0.3744\%$$

ตารางที่ 4.17 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบรอบที่ 2

UTM (N)	Load cell (N)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรอบที่ 2
5000	5042.571	-0.8514
10000	10037.438	-0.3744
15000	15032.628	-0.2175
20000	20023.771	-0.1189
25000	25012.810	-0.0512
30000	30000.878	-0.0029

ตัวอย่างเช่น แรงที่ 10000N จะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรอบที่ 3 ได้ดังนี้

$$\frac{10000 - 10027.920}{10000} \times 100 = -0.2792\%$$

ตารางที่ 4.18 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบรอบที่ 3

UTM (N)	Load cell (N)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรอบที่ 3
5000	5029.492	-0.5898
10000	10027.920	-0.2792
15000	15027.966	-0.1864
20000	20014.901	-0.0745
25000	25004.749	-0.0190
30000	29989.255	0.0358

ตัวอย่างเช่น แรงที่ 10000N จะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรอบที่ 4 ได้ดังนี้

$$\frac{10000 - 10045.953}{10000} \times 100 = -0.4595\%$$

ตารางที่ 4.19 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบรอบที่ 4

UTM (N)	Load cell (N)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรอบที่ 4
5000	5048.496	-0.9699
10000	10045.953	-0.4595
15000	15043.895	-0.2926
20000	20031.800	-0.1590
25000	25028.286	-0.1131
30000	30018.458	-0.0615

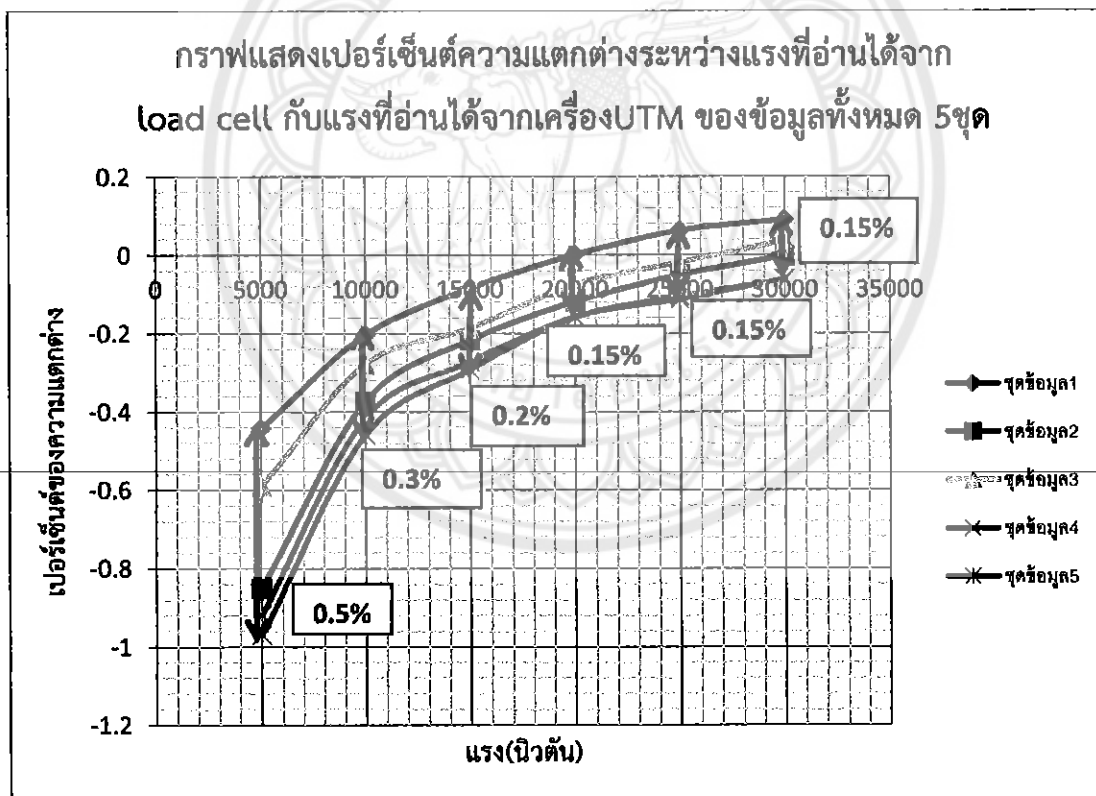
ตัวอย่างเช่น แรงที่ 10000N จะสามารถคำนวณเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรอบที่ 5 ได้ดังนี้

$$\frac{10000 - 10041.679}{10000} \times 100 = -0.4168\%$$

ตารางที่ 4.20 ตารางแสดงเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบรอบที่ 5

UTM (N)	Load cell (N)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนรอบที่ 5
5000	5046.003	-0.9201
10000	10041.679	-0.4168
15000	15040.916	-0.2728
20000	20031.574	-0.1579
25000	25026.440	-0.1058
30000	30019.040	-0.0635

4.2.2 นำเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบจากตารางที่ 4.16 ถึง 4.20 มาสร้างกราฟจะได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1กราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างแรงที่อ่านได้จาก load cell กับแรงที่อ่านได้จากเครื่อง UTMของข้อมูลทั้งหมด 5 ชุด

4.2.3 วิเคราะห์กราฟ (รูปที่ 4.1)

แรงในช่วง 5000 N จากกราฟจะเห็นว่ามีการกระจายตัวที่อยู่ในช่วง -0.45% ถึง -0.95% ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลถือว่าห่างเนื่องมาจาก Load cell ตัวนี้มีขนาด 50000 N ซึ่งเหมาะกับการใช้งานที่แรงตั้งแต่ 20% ถึง 100% (10000-50000N)

แรงในช่วง 10000 N จากกราฟจะเห็นว่าอยู่ในช่วง -0.2% ถึง -0.5% ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลถือว่าเริ่มเกาะกลุ่มกัน

แรงในช่วง 15000 N จากกราฟจะเห็นว่าอยู่ในช่วง -0.1% ถึง -0.3% ลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลถือว่าเกาะกลุ่มเดียวกัน เพราะว่าแรงในช่วง 15000 N คือ 30% ของแรง 50000 N ซึ่งจะใช้ได้ดีเมื่ออยู่ในช่วง 20% ถึง 100%

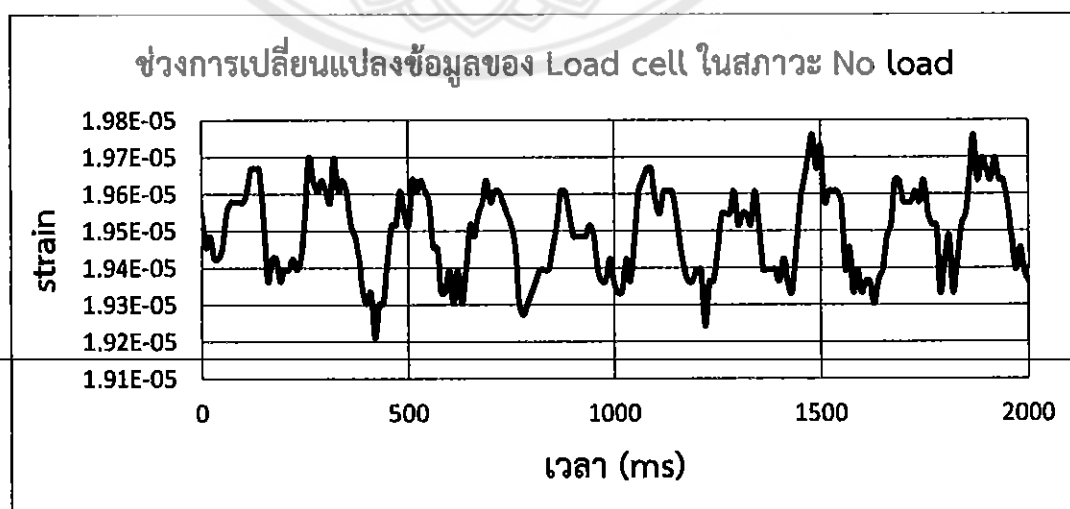
แรงในช่วง 20000 N 25000 N และ 30000 N จากกราฟจะเห็นได้ว่าระยะห่างจะเท่าๆกัน ทั้งช่วงคือประมาณ 0.15% แต่ถ้าเมื่อสังเกตพบว่าจะมีเพียงเส้นเดียวที่ออกห่างจากกลุ่ม อาจเป็นเพราะความผิดพลาดจากผู้ปฏิบัติ แต่การทดสอบที่เหลืออีก 4 ค่านั้น เกาะกลุ่มกันดีมากระยะห่างของช่วงประมาณได้เท่ากับ 0.1%

สรุปว่า Load cell ขนาด 50000 N ทำงานได้ดีในช่วงแรงที่ 20% ถึง 100% ของแรงทั้งหมด

4.3 การวิเคราะห์ Load Cell ในสภาวะ No Load

4.3.1 ช่วงการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของ Load cell ในสภาวะ No load

จากการสังเกตจะพบว่ากราฟนั้นไม่สม่ำเสมอ มีลักษณะเป็นคลื่นซิกแซกอาจเกิดจากพฤติกรรมด้านความเสถียรของระบบไม่เท่ากัน ในค่าแรงที่ศูนย์ของ Load cell ก็ยังมีค่าความไม่แน่นอน สั้นไปสั้นมาไม่แน่นอนดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ช่วงการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของ Load cell ในสภาวะ No load

จากรูปที่ 4.2 เมื่อนำมาวิเคราะห์ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด จะได้ Range ของข้อมูลดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ตารางการหาช่วงการเปลี่ยนแปลงข้อมูลของ Load cell ในสภาวะ No load

Max strain	1.976×10^{-5}
Min strain	1.921×10^{-5}
max-min	5.495×10^{-7}

จากตารางที่ 4.21 เมื่อ Load cell อยู่ในสภาวะ No load ค่าที่ได้จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลง 5.495×10^{-7}

ดังนั้นสามารถประเมินค่าความละเอียดของการวัดด้วย Load cell ในเชิงใหญ่ขึ้นเพื่อให้ครอบคลุม มีค่าประมาณ $0.6 \mu\epsilon$

เนื่องจากเครื่อง indicator ที่อ่านได้นั้น เก็บค่าที่ได้จากการทดลองโดยนำข้อมูลดิบมาเฉลี่ยทุกๆ 200 ms ดังนั้นเพื่อให้ผลการทดลองสอดคล้องกับความเป็นจริง จึงได้ทำการหา Range ใหม่ โดยการหาค่าเฉลี่ยทุกๆ 200 ms ดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 ตารางการหาช่วงการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ย

ลำดับ	เวลา (ms)	ค่าเฉลี่ย (strain)
1	0 - 200	1.951×10^{-5}
2	200 - 400	1.953×10^{-5}
3	400 - 600	1.947×10^{-5}
4	600 - 800	1.946×10^{-5}
5	800 - 1000	1.946×10^{-5}
6	1000 - 1200	1.950×10^{-5}
7	1200 - 1400	1.946×10^{-5}
8	1400 - 1600	1.953×10^{-5}
9	1600 - 1800	1.950×10^{-5}
10	1800 - 2000	1.955×10^{-5}

จากตารางที่ 4.22 เมื่อนำค่าเฉลี่ยที่ได้มาวิเคราะห์ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด จะได้ Range ของข้อมูลดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.23 ตารางการหาช่วงการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเฉลี่ยของ Load cell ในสภาวะ No load

Max strain	1.955×10^{-5}
Min strain	1.946×10^{-5}
max-min	9.310×10^{-8}

จากตารางที่ 4.23 เมื่อ Load cell อยู่ในสภาวะ No load ค่าที่ได้จะมีช่วงการเปลี่ยนแปลง (Range) 9.310×10^{-8} strain

ดังนั้นสามารถประเมินค่าความละเอียดของการวัดด้วย Load cell ในเชิงใหญ่ขึ้นให้ครอบคลุมโดยมีค่าประมาณ $0.1 \mu\epsilon$

จากมาตรฐาน ISO 376^[2] ในการสอบเทียบ Load cell standard ระบุว่าขีดจำกัดล่างของ load cell class 0.5 จะต้องไม่ต่ำกว่า $2000 \times r$ และขีดจำกัดล่างของ load cell class 1 จะต้องไม่ต่ำกว่า $1000 \times r$ โดย load cell ที่ใช้ในการทดลองนี้มีค่า r ประมาณ $0.1 \mu\epsilon$ ดังนั้นขีดจำกัดล่างในการประเมิน class 0.5 คือ $2000 \times 0.1 = 200 \mu\epsilon$ และขีดจำกัดล่างในการประเมิน class 1 คือ $1000 \times 0.1 = 100 \mu\epsilon$ เมื่อดูจากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า ค่าที่ให้แรงต่ำสุดคือ 5000N จะทำให้ load cell อ่านค่าได้ $122.770 - 18.795 = 103.975 \mu\epsilon \geq 100 \mu\epsilon$

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า Resolution ของ load cell standard ที่นำมาใช้มีค่าเพียงพอสำหรับ class 1 ในช่วงการทดลองด้วยแรง 5000N ถึง 30000N

4.4 การวิเคราะห์ค่า Uncertainty คือ วิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนในการสอบเทียบ

4.4.1 ค่า Uncertainty ตามมาตรฐาน ISO 7500-1 ที่มีปัจจัยต่อการสอบเทียบ ดังนี้

1. u_{rep} = uncertainty repeatability คือ ค่าความไม่แน่นอนของความทวนซ้ำได้

สมการคือ

$$u_{rep} = \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\frac{100}{\bar{F}} \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{j=1}^n (F_j - \bar{F})^2} \right)$$

ตัวอย่างการคำนวณที่แรง 10000 N โดยใช้ข้อมูลจาก ตารางที่ 4.10 จะได้

$$u_{rep} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{100}{10045.953} \sqrt{\frac{1}{(2)} \times \left[(10048.899 - 10045.953)^2 + (10044.140 - 10045.953)^2 + (10044.819 - 10045.953)^2 \right]} \right)$$

$$u_{rep} = 0.03336\%$$

2. $u_{res}(UTM)$ = uncertainty resolution (UTM) คือ ค่าความไม่แน่นอนของความละเอียดของเครื่อง UTM

$$\text{สมการคือ } u_{res} = \frac{a}{2\sqrt{3}}$$

ตัวอย่างการคำนวณที่แรง 10000 N โดยใช้ข้อมูลจาก ตารางที่ 4.11 จะได้

$$u_{res} = \frac{0.0100}{2\sqrt{3}} = 0.0029\%$$

3. $u_{res}(\text{loadcell})$ = uncertainty resolution (loadcell) คือ ค่าความไม่แน่นอนของความละเอียดของ loadcell

$$\text{สมการคือ } u_{res} = \frac{a}{2\sqrt{3}} = \frac{(a_1 / \bar{F})}{2\sqrt{3}}$$

ตัวอย่างการคำนวณที่แรง 10000 N โดยใช้ข้อมูลจาก ตารางที่ 4.11 และ สมการความสัมพันธ์ $y = 48.563x - 947.83$ ที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 4 (ภาคผนวก ก) ซึ่ง load cell-standard ตัวนี้ มีค่าความละเอียดในการวัดประมาณที่ 0.1 μE

$$\text{จะได้ } a_1 = 48.563(0.1)$$

$$\therefore a_1 = 4.8563$$

$$u_{res} = \frac{(4.8563 / 10045.953)}{2\sqrt{3}} \times 100 = 0.0140\%$$

4. u_{std} = uncertainty transfer standard คือความไม่แน่นอนของเครื่องวัดแรงมาตรฐาน

$$\text{สมการคือ } u_{std} = \sqrt{u_{cal}^2 + A^2 + B^2 + C^2}$$

u_{cal} คือ ค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากการสอบเทียบ เนื่องจาก load cell ไม่ได้ถูกส่งไปสอบเทียบจึงประมาณค่าที่ 0.1 %

A คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากอุณหภูมิ เนื่องจากห้องทดลองไม่ได้ควบคุมจึงประมาณค่าที่ 0.01 %

B คือค่าความไม่แน่นอนเนื่องจาก drift เนื่องจากไม่มีข้อมูลประวัติของ load cell จึงประมาณค่าที่ 0.01 %

C คือ ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจาก linear approximation ในที่นี้ประมาณ 0.05 %

ตัวอย่างการคำนวณที่แรง 10000 N

$$u_{\text{std}} = \sqrt{0.1^2 + 0.01^2 + 0.01^2 + 0.05^2} = 0.1127\%$$

เมื่อกำหนดหาค่าครบทั้ง 4 ค่าที่กล่าวมาข้างต้น สามารถหา u_c = combined uncertainty

สมการคือ
$$u_c = \sqrt{\sum_{k=1}^n u_i^2}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ที่แรง 10000 N โดยใช้ข้อมูลจาก ตารางที่ 4.24

$$u_c = \sqrt{(0.0336)^2 + (0.0029)^2 + (0.0140)^2 + (0.1127)^2} = 0.1185\%$$

สุดท้ายหาค่า U = Expanded Uncertainty โดยการคูณด้วยค่าคงที่ ($k=2$) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

สมการคือ
$$U = k \times u_c = k \times \sqrt{\sum_{k=1}^n u_i^2}$$

ตัวอย่างการคำนวณ ที่แรง 10000 N โดยใช้ข้อมูลจาก ตารางที่ 4.24

$$U = 2 \times \sqrt{(0.0336)^2 + (0.0029)^2 + (0.0140)^2 + (0.1127)^2} = 0.2369\%$$

ตารางที่ 4.24 ตารางแสดงค่า Uncertainty ที่ได้จากการคำนวณ

UTM	$u_{rep}(\%)$	$u_{res}(\text{UTM})(\%)$	$u_{res}(\text{loadcell})(\%)$	$u_{std}(\%)$	$u_c(\%)$	U(%)
5000	0.0218	0.0058	0.0278	0.1127	0.1182	0.2365
10000	0.0336	0.0029	0.0140	0.1127	0.1185	0.2369
15000	0.0083	0.0019	0.0093	0.1127	0.1134	0.2268
20000	0.0059	0.0014	0.0070	0.1127	0.1131	0.2262
25000	0.0041	0.0012	0.0056	0.1127	0.1129	0.2258
30000	0.0105	0.0010	0.0047	0.1127	0.1133	0.2266

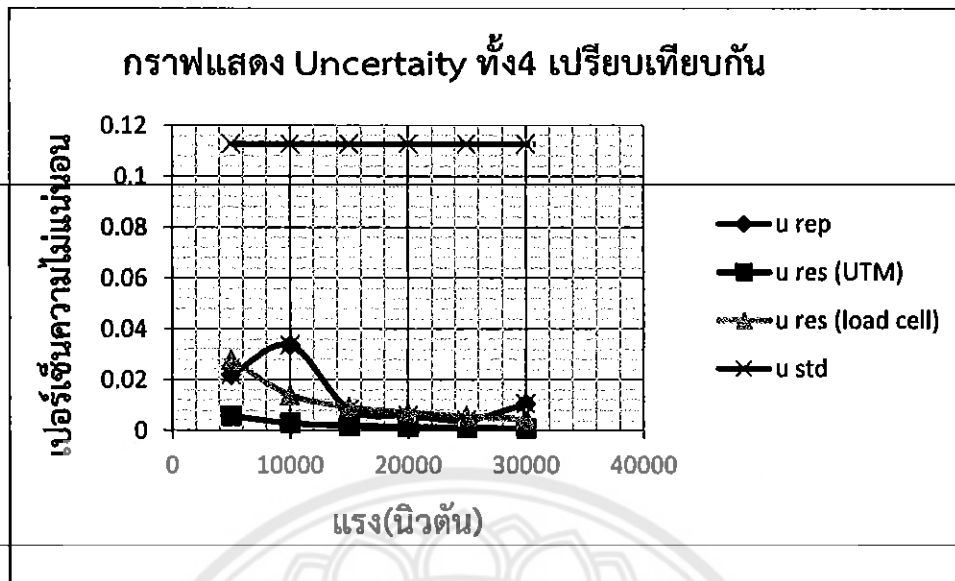
4.4.2 วิเคราะห์จากตารางที่ 4.24 ได้ดังต่อไปนี้

U_{rep} = uncertainty repeatability คือ ค่าความไม่แน่นอนของความทวนซ้ำได้ จากตาราง เมื่อให้แรงไปที่ 5000N ค่าที่ได้คือ 0.0218 เมื่อเพิ่มแรงขึ้นอีกเป็น 10000N จะได้ค่าคือ 0.0336 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และเมื่อเพิ่มแรงขึ้นอีก ค่าที่ได้จะลดลงจนกระทั่งถึงแรงสูงสุดคือที่ 30000N จะได้ 0.0105

$U_{res}(\text{UTM})$ = uncertainty resolution (UTM) คือ ค่าความไม่แน่นอนของความละเอียดของเครื่อง UTM จากตารางเมื่อให้แรงไป 5000N ค่าความไม่แน่นอน resolution มีค่า 0.0058 และถ้าเพิ่มแรงไปเรื่อยๆ ค่าที่ได้ก็จะลดลงเช่นกัน

$U_{res}(\text{loadcell})$ = uncertainty resolution (loadcell) คือ ค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียดของ loadcell จากตารางเมื่อให้แรงไป 5000N ค่าความไม่แน่นอน resolution มีค่า 0.0278 และถ้าเพิ่มแรงไปเรื่อยๆ ค่าที่ได้ก็จะลดลงเช่นกัน

U_{std} = Uncertainty Transfer Standard คือ ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องวัดแรงมาตรฐาน ประมาณ 0.1127%



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่า Uncertainty ทั้ง 4 เปรียบเทียบกัน

4.4.3 วิเคราะห์จากรูปที่ 4.3 มีกราฟอยู่ 4 เส้น คือ U_{rep} , $U_{res}(UTM)$, $U_{res}(loadcell)$

และ U_{std} จากกราฟจะเห็นได้ว่าค่า

ช่วงแรงที่ 5000N ค่าที่ได้จาก $U_{res}(UTM) < U_{rep} < U_{res}(loadcell) < U_{std}$

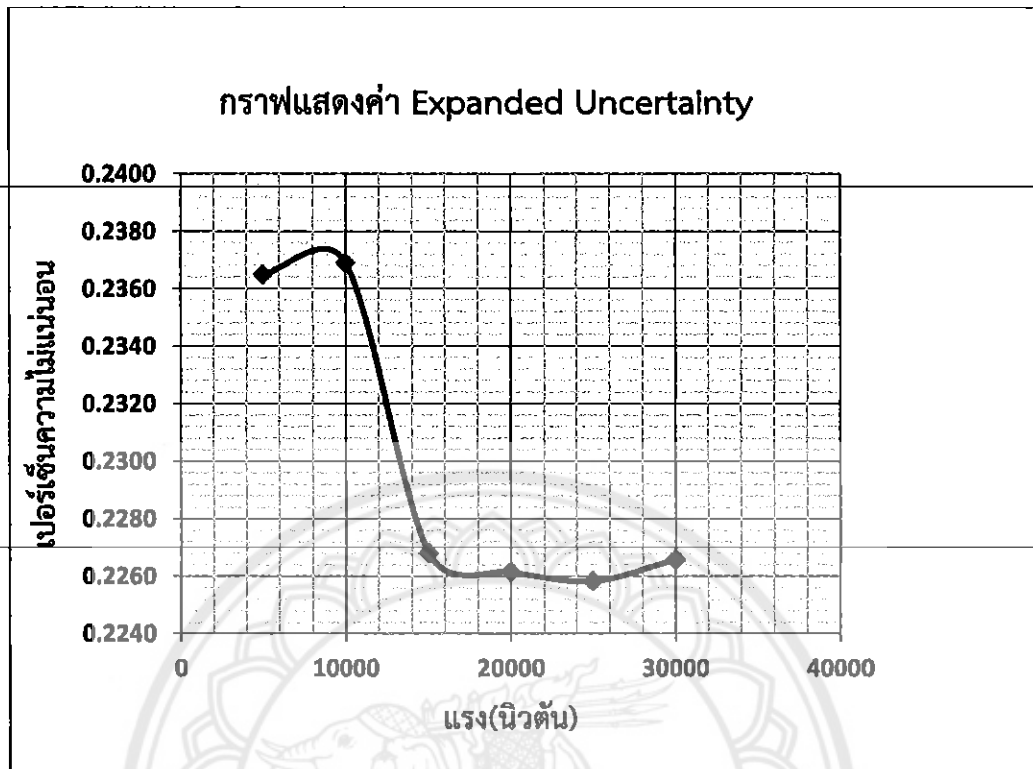
ช่วงแรงที่ 10000N ค่าที่ได้จาก $U_{res}(UTM) < U_{res}(loadcell) < U_{rep} < U_{std}$

ช่วงแรงที่ 15000N ค่าที่ได้จาก $U_{res}(UTM) < U_{rep} < U_{res}(loadcell) < U_{std}$

ช่วงแรงที่ 20000N ค่าที่ได้จาก $U_{res}(UTM) < U_{rep} < U_{res}(loadcell) < U_{std}$

ช่วงแรงที่ 25000N ค่าที่ได้จาก $U_{res}(UTM) < U_{rep} < U_{res}(loadcell) < U_{std}$

ช่วงแรงที่ 30000N ค่าที่ได้จาก $U_{res}(UTM) < U_{res}(loadcell) < U_{rep} < U_{std}$



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่า Expanded Uncertainty

จากรูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่า Expanded Uncertainty จะทราบได้ว่าค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 0.2375% และค่าต่ำสุดที่ประมาณ 0.2258% ลักษณะกราฟ เริ่มต้นแรงที่ 5000N ถึงแรงที่ 9000N กราฟจะเพิ่มขึ้นจากนั้นแรงที่ 9000N ถึง 16000N กราฟจะลดลงคงที่ ส่วนแรงที่ 16000N ถึง 30000N กราฟจะคงที่สม่ำเสมอ

บทที่ 5

สรุปผลการปฏิบัติการสอบเทียบ

จากการปฏิบัติการสอบเทียบเครื่อง UTM ตามมาตรฐาน ISO 7500-1 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ทำให้เข้าใจถึงขั้นตอนในการสอบเทียบเครื่อง UTM เพื่อสามารถปฏิบัติงานได้จริง
2. ทำให้เข้าใจวิธีการคำนวณผลการสอบเทียบเพื่อการประเมินมาตรฐานของเครื่อง UTM
3. จากงานวิจัยนี้ทำให้ได้คู่มือที่ใช้ในการปฏิบัติการสอบเทียบเครื่อง UTM เพื่อใช้งานกับการ

เรียนการสอนในอนาคต

4. ได้โปรแกรมสำหรับคำนวณผลการสอบเทียบและประเมิน class ของเครื่อง UTM
5. จากการทดสอบนี้ทำให้ทราบว่าเครื่อง UTM ในเบื้องต้นอยู่ใน Class 1 ซึ่งยังถือว่าเป็น class ที่อยู่ในมาตรฐาน ISO 7500-1 ทั้งนี้ในงานวิจัยยังมีปัจจัยที่อาจส่งผลกับการประเมินเครื่อง UTM ที่ผิดพลาดได้คือ โหลดเซลล์มาตรฐานที่นำมาใช้ไม่ได้ถูกสอบเทียบและห้องทดลองไม่ได้ควบคุม อุณหภูมิ

ข้อเสนอแนะและปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสอบเทียบดังนี้

1. ปัจจัยด้านอะไหล่เมนต์ (การติดตั้ง Load Cell Standard ที่เยื้องศูนย์กับหัวกด) เนื่องจากว่าในการปฏิบัติการสอบเทียบเครื่อง UTM จะต้องติดตั้ง Load Cell Standard เข้ากับหัวกดของเครื่อง UTM ถ้าหากว่าติดตั้ง Load Cell Standard เยื้องศูนย์กับหัวกด ก็จะมีผลทำให้ Load Cell Standard อ่านค่า strain ได้ไม่แม่นยำ
2. Rotation เพราะ Load cell Standard ขณะที่ติดตั้งสามารถหมุนได้รอบทิศ ในแต่ละครั้งที่ทำการสอบเทียบเครื่อง UTM ตัว load cell Standard อาจะหมุนหรือคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมในส่วนนี้ก็มีผลทำให้ค่า Strain ที่อ่าน คลาดเคลื่อนได้เช่นกัน
3. ปัจจัยด้านการควบคุมแรง ระหว่างปฏิบัติการสอบเทียบเครื่อง UTM จะต้องเพิ่มแรงให้กับเครื่อง UTM เมื่อเพิ่มแรงให้เครื่อง UTM ตามที่ต้องการแล้ว Load Cell UTM เกิดการ creep ทำให้ยากต่อการรักษาระดับแรงให้คงที่ ก็จะมีผลทำให้ Load Cell standard อ่านค่าได้ดีเลย์ไปบ้าง ผู้ควบคุมเครื่อง UTM จะต้องใจเย็นและมีสมาธิอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องรอให้ค่าแรงของเครื่อง UTM นิ่งก่อนแล้วค่อยอ่านค่า Strain และบันทึกผลการทดลอง

4. ปัจจัยด้านการควบคุมอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการสอบเทียบก็มีผลต่อการสอบเทียบ โดยในห้องปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ ดังนั้นควรปรับปรุงระบบควบคุมอุณหภูมิของห้องทดสอบให้ดีขึ้น

5. การปรับขึ้นลงของ cross head ในเครื่อง UTM ที่ระดับความสูงไม่เท่ากัน อาจส่งผลให้ cross head เอียงเล็กน้อย เมื่อ cross head เอียงไม่เท่ากันก็อาจส่งผลให้การอ่านค่าสเตรน ในแต่ละครั้งแตกต่างกันได้

6. การตั้งค่าโปรแกรม National Instruments Measurement and Automation Explorer ที่ใช้ในการสอบเทียบเครื่อง UTM ควรใช้อัตราความเร็วที่เหมาะสม เพราะถ้าเยอะไปจะอ่านค่าไม่ทัน ถ้าน้อยไปค่าที่ได้ก็จะผิดพลาดเนื่องจากการคืบ ในกรณีนี้ตั้งไว้ให้แสดงผลทุกๆ 200 millisecond

7. จากรูปที่ 4.1 จะได้กราฟความแตกต่างของการสอบเทียบทั้ง 5 รอบ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างดังนี้ 0.5% ที่แรง 5000 N , 0.3% ที่ 10000 N , 0.2% ที่ 15000 N , 0.15% ที่ 20000 N 0.15% ที่ 25000 N , และ 0.15% ที่ 30000 N ดังนั้นจะได้ว่า Load Cell UTM ขนาด 50000 N ใช้งานได้ดีที่ 20% -100% ของแรงทั้งหมด

8. ถ้าจะได้ผลที่แม่นยำกว่านี้ควรส่ง Load Cell Standard ไปสอบเทียบด้วย

9. ขณะนี้ตัวโปรแกรมที่ใช้ยังต้องมีการจดบันทึกค่าด้วยคน ซึ่งในอนาคตควรมีการปรับปรุงให้สามารถบันทึกค่าอัตโนมัติ เพื่อที่จะได้ผลการสอบเทียบที่แม่นยำขึ้น

10. ควรมีการทดลองศึกษาด้าน resolution ของระบบการวัดแรงของเครื่องวัดแรงมาตรฐานเพื่อให้ได้ค่า resolution ที่ถูกต้องขึ้น

11. ในอนาคตควรจะลดค่า Lowpass filter cutoff frequency ให้ต่ำลงเหลือ 40 Hz จากว่าที่เคยตั้งไว้ 100 Hz เพื่อลด Noise จากระบบไฟฟ้า ซึ่งมีความถี่ 50 Hz



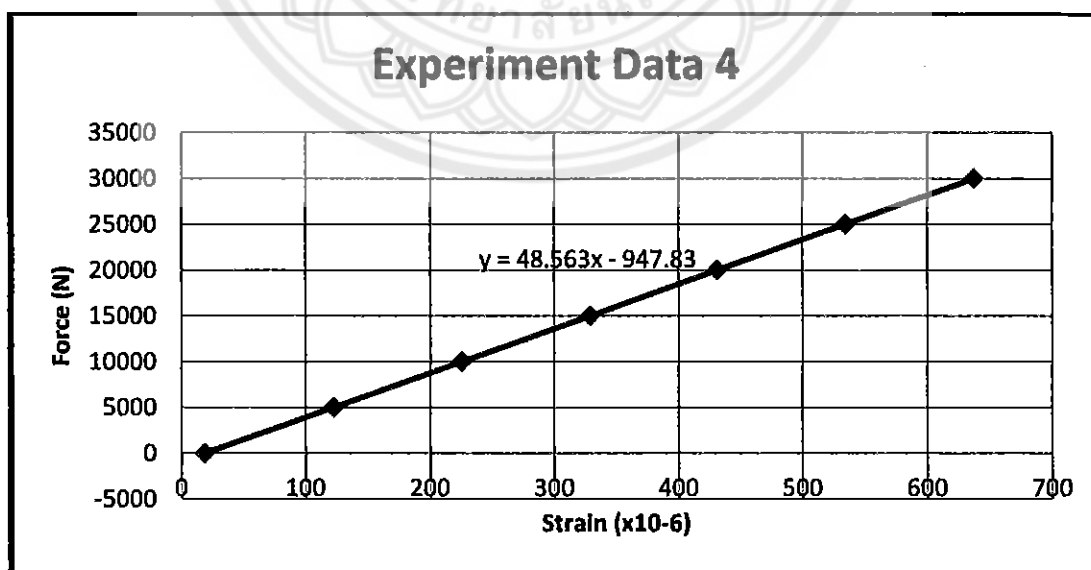
ภาคผนวก (ก)

หาสมการความสัมพันธ์

นำข้อมูลจากตารางที่ 3.1 มาสร้างกราฟด้วยวิธีการ least square technique เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรง (N) กับค่า strain (Load cell standard) ซึ่งได้สมการคือ $y = 48.563 - 947.83$ ดังรูป ก

ตารางที่ ก.1 แสดงค่าเฉลี่ยของข้อมูลดิบจากผลการทดลองครั้งที่ 4

UTM	X average
0	18.882
5000	122.840
10000	225.747
15000	328.663
20000	431.373
25000	534.260
30000	637.017



รูปที่ ก กราฟแสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรง (N) กับค่า strain

ภาคผนวก (ข)
ผลการทดลองและการคำนวณทั้งหมด
บันทึกผลการทดลองพร้อมคำนวณครั้งที่ 1

ตารางที่ ข.1.1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 1

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0	17.705	0	0
5000	121.24	0.397	5000
10000	224.13	0.594	10000
15000	326.93	0.786	15000
20000	429.5	0.972	20000
25000	532.18	1.155	25000
30000	634.89	1.335	30000
0	17.985	0	0

ตารางที่ ข.1.2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 1

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0	17.985	0	0
5000	121.34	0.398	5000
10000	224.28	0.595	10000
15000	327.08	0.787	15000
20000	429.84	0.973	20000
25000	532.46	1.156	25000
30000	635.19	1.335	30000
0	18.283	0	0

ตารางที่ ข.1.3 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 1

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0	17.985	0	0
5000	121.34	0.399	5000
10000	224.28	0.596	10000
15000	327.08	0.788	15000
20000	429.84	0.974	20000
25000	532.46	1.156	25000
30000	635.19	1.336	30000
25000	532.57	1.163	25000
20000	429.85	0.983	20000
15000	327.13	0.797	15000
10000	224.34	0.604	10000
5000	121.54	0.405	5000
0	18.483	0	0

ตารางที่ ข.1.4 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 1

UTM	Load cell strain($\times 10^{-6}$)				X average
	x1	x2	x3	x4	
0	17.705	17.985	17.985	18.483	17.892
5000	121.24	121.34	121.34	121.54	121.307
10000	224.13	224.28	224.28	224.34	224.230
15000	326.93	327.08	327.08	327.13	327.030
20000	429.5	429.84	429.84	429.85	429.727
25000	532.18	532.46	532.46	532.57	532.367
30000	634.89	635.19	635.19		635.090
0	17.985	18.283			

ตารางที่ ข.1.5 แสดงแรงที่คำนวณได้จากการทดลองครั้งที่ 1

UTM	Load cell (N)			
	x1	x2	x3	x4
0	-88.022	-74.424	-74.424	-50.240
5000	4939.948	4944.804	4944.804	4954.517
10000	9936.595	9943.880	9943.880	9946.793
15000	14928.872	14936.156	14936.156	14938.584
20000	19909.979	19926.490	19926.490	19926.976
25000	24896.427	24910.025	24910.025	24915.367
30000	29884.333	29898.902	29898.902	
0	-74.424	-59.953		

ตารางที่ ข.1.6 ทำให้ค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ของการทดลองครั้งที่ 1

UTM	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	24.184	0
5000	5027.970	5019.229	5019.229	5028.941	5022.143
10000	10024.617	10018.304	10018.304	10021.218	10020.408
15000	15016.894	15010.580	15010.580	15013.009	15012.685
20000	19998.001	20000.914	20000.914	20001.400	19999.943
25000	24984.449	24984.449	24984.449	24989.791	24984.449
30000	29972.355	29973.326	29973.326		29973.003
0	13.598	14.472			

ตารางที่ ข.1.7 แสดงค่า q , b , v , f_0 และ a ที่ได้รับการทดลองครั้งที่ 1

UTM	q	b	v	f_0	a
0				0	
5000	-0.4409	0.1741	-0.1934	0	0.0200
10000	-0.2037	0.0630	-0.0291	0	0.0100
15000	-0.0845	0.0421	-0.0162	0	0.0067
20000	0.0003	0.0146	-0.0024	0	0.0050
25000	0.0622	0.0000	-0.0214	0	0.0040
30000	0.0901	0.0032	0	0	0.0033

ตารางที่ ข.1.8 แสดง class ที่ได้รับการทดลองครั้งที่ 1

UTM	classของเครื่อง UTM				
	q	b	v	f_0	a
0				0.5	
5000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

บันทึกผลการทดลองพร้อมคำนวณครั้งที่ 2

ตารางที่ ข.2.1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 2

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้ จากเครื่อง UTM
0	19.281	0	0
5000	123.11	0.325	5000
10000	226.03	0.532	10000
15000	328.84	0.715	15000
20000	431.67	0.901	20000
25000	534.3	1.083	25000
30000	637.09	1.262	30000
0	19.302	0	0

ตารางที่ ข.2.2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 2

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้ จากเครื่อง UTM
0	19.312	0	0
5000	123.25	0.326	5000
10000	226.05	0.532	10000
15000	328.94	0.715	15000
20000	431.69	0.901	20000
25000	534.43	1.083	25000
30000	637.15	1.263	30000
0	19.363	0	0

ตารางที่ ข.2.3 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 2

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0	19.45	0	0
5000	123.19	0.326	5000
10000	226.03	0.824	10000
15000	328.91	0.716	15000
20000	431.66	0.902	20000
25000	534.49	1.084	25000
30000	637.12	1.263	30000
25000	534.24	1.09	25000
20000	431.51	0.91	20000
15000	328.71	0.724	15000
10000	225.9	0.531	10000
5000	123.1	0.331	5000
0	19.375	0	2

ตารางที่ ข.2.4 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 2

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)				X average
	x1	x2	x3	x4	
0	19.281	19.312	19.45	19.375	19.348
5000	123.11	123.25	123.19	123.1	123.183
10000	226.03	226.05	226.03	225.9	226.037
15000	328.84	328.94	328.91	328.71	328.897
20000	431.67	431.69	431.66	431.51	431.673
25000	534.3	534.43	534.49	534.24	534.407
30000	637.09	637.15	637.12		637.120
0	19.302	19.363			

ตารางที่ ข.2.5 แสดงแรงที่คำนวณได้การทดลองครั้งที่ 2

UTM	Load cell (N)			
	x1	x2	x3	x4
0	-11.487	-9.981	-3.280	-6.922
5000	5030.761	5037.560	5034.646	5030.275
10000	10028.865	10029.836	10028.865	10022.552
15000	15021.627	15026.483	15025.026	15015.314
20000	20015.360	20016.331	20014.875	20007.590
25000	24999.381	25005.694	25008.608	24996.467
30000	29991.172	29994.085	29992.629	
0	-10.467	-7.505		

ตารางที่ ข.2.6 ทำให้ค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ของการทดลองครั้งที่ 2

UTM	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	-3.642	0
5000	5042.248	5047.541	5037.926	5033.555	5042.571
10000	10040.352	10039.817	10032.145	10025.831	10037.438
15000	15033.114	15036.465	15028.306	15018.593	15032.628
20000	20026.847	20026.313	20018.154	20010.870	20023.771
25000	25010.868	25015.675	25011.888	24999.747	25012.810
30000	30002.658	30004.067	29995.908		30000.878
0	1.020	2.477			

ตารางที่ ข.2.7 แสดงค่า q , b , v , f_0 และ a ที่ได้รับการทดลองครั้งที่ 2

UTM	q	b	v	f_0	a
0				0.006667	
5000	-0.8442	0.1907	0.0867	0.006667	0.0200
10000	-0.3730	0.0818	0.0629	0.006667	0.0100
15000	-0.2170	0.0543	0.0646	0.006667	0.0067
20000	-0.1187	0.0434	0.0364	0.006667	0.0050
25000	-0.0512	0.0192	0.0485	0.006667	0.0040
30000	-0.0029	0.0272	0	0.006667	0.0033

ตารางที่ ข.2.8 แสดง class ที่ได้รับการทดลองครั้งที่ 2

UTM	classของเครื่อง UTM				
	q	b	v	f_0	a
0				0.5	
5000	1	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

บันทึกผลการทดลองพร้อมคำนวณครั้งที่ 3

ตารางที่ ข.3.1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 3

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0	18.681	0	0
5000	122.24	0.304	5000
10000	225.14	0.502	10000
15000	328	0.694	15000
20000	430.85	0.88	20000
25000	533.56	1.062	25000
30000	636.2	1.242	30000
0	18.808	0	0

ตารางที่ ข.3.2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 3

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0	18.808	0	0
5000	122.3	0.304	5000
10000	225.26	0.502	10000
15000	328.33	0.695	15000
20000	430.89	0.881	20000
25000	533.71	1.063	25000
30000	636.35	1.242	30000
0	18.892	0	2

ตารางที่ ข.3.3 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 3

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0	18.892	0	2
5000	122.54	0.305	5000
10000	225.46	0.503	10000
15000	328.41	0.695	15000
20000	431.07	0.881	20000
25000	533.79	1.064	25000
30000	636.43	1.243	30000
25000	533.69	1.07	25000
20000	430.87	0.889	20000
15000	328.19	0.703	15000
10000	225.23	0.51	10000
5000	122.53	0.31	5000
0	19.192	0	2

ตารางที่ ข.3.4 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 3

UTM	Load cell strain($\times 10^{-6}$)				X average
	x1	x2	x3	x4	
0	18.681	18.808	18.892	19.192	18.794
5000	122.24	122.3	122.54	122.53	122.360
10000	225.14	225.26	225.46	225.23	225.287
15000	328	328.33	328.41	328.19	328.247
20000	430.85	430.89	431.07	430.87	430.937
25000	533.56	533.71	533.79	533.69	533.687
30000	636.2	636.35	636.43		636.327
0	18.808	18.892			

ตารางที่ ข.3.5 แสดงแรงที่คำนวณได้การทดลองครั้งที่ 3

UTM	Load cell (N)			
	x1	x2	x3	x4
0	-40.625	-34.457	-30.378	-15.809
5000	4988.511	4991.425	5003.080	5002.594
10000	9985.644	9991.471	10001.184	9990.014
15000	14980.834	14996.860	15000.745	14990.061
20000	19975.539	19977.481	19986.222	19976.510
25000	24963.444	24970.729	24974.614	24969.757
30000	29947.951	29955.235	29959.120	
0	-34.457	-30.378		

ตารางที่ ข.3.6 ทำให้ค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ของการทดลองครั้งที่ 3

UTM	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	14.569	0
5000	5029.136	5025.882	5033.458	5032.972	5029.492
10000	10026.268	10025.928	10031.562	10020.392	10027.920
15000	15021.459	15031.317	15031.123	15020.439	15027.966
20000	20016.163	20011.938	20016.600	20006.888	20014.901
25000	25004.069	25005.186	25004.992	25000.135	25004.749
30000	29988.575	29989.692	29989.498		29989.255
0	6.168	4.079			

ตารางที่ ข.3.7 แสดงค่า q , b , v , f_0 และ a ที่ได้รับการทดลองครั้งที่ 3

UTM	q	b	v	f_0	a
0				0.006667	
5000	-0.5864	0.1506	0.0097	0.006667	0.0200
10000	-0.2784	0.0562	0.1114	0.006667	0.0100
15000	-0.1861	0.0656	0.0711	0.006667	0.0067
20000	-0.0744	0.0233	0.0485	0.006667	0.0050
25000	-0.0190	0.0045	0.0194	0.006667	0.0040
30000	0.0358	0.0037	0	0.006667	0.0033

ตารางที่ ข.3.8 แสดง class ที่ได้รับการทดลองครั้งที่ 3

UTM	classของเครื่อง UTM				
	q	b	v	f_0	a
0				0.5	
5000	1	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

บันทึกผลการทดลองพร้อมคำนวณครั้งที่ 4

ตารางที่ ข.4.1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 4

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้ จากเครื่อง UTM
0	18.795	0	0
5000	122.77	0.307	5000
10000	225.72	0.506	10000
15000	328.68	0.699	15000
20000	431.42	0.885	20000
25000	534.26	1.067	25000
30000	637.05	1.247	30000
0	18.883	0	0

ตารางที่ ข.4.2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 4

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้ จากเครื่อง UTM
0	18.883	0	0
5000	122.87	0.307	5000
10000	225.71	0.507	10000
15000	328.66	0.699	15000
20000	431.32	0.885	20000
25000	534.24	1.068	25000
30000	637.02	1.248	30000
0	18.969	0	0

ตารางที่ ข.4.3 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 4

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0	18.969	0	0
5000	122.88	0.308	5000
10000	225.81	0.507	10000
15000	328.65	0.7	15000
20000	431.38	0.885	20000
25000	534.28	1.068	25000
30000	636.98	1.248	30000
25000	534.11	1.074	25000
20000	431.17	0.893	20000
15000	328.43	0.708	15000
10000	225.43	0.515	10000
5000	122.72	0.313	5000
0	18.989	0	0

ตารางที่ ข.4.4 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 4

UTM	Load cell strain($\times 10^{-6}$)				X average
	x1	x2	x3	x4	
0	18.795	18.883	18.969	18.989	18.882
5000	122.77	122.87	122.88	122.72	122.840
10000	225.72	225.71	225.81	225.43	225.747
15000	328.68	328.66	328.65	328.43	328.663
20000	431.42	431.32	431.38	431.17	431.373
25000	534.26	534.24	534.28	534.11	534.260
30000	637.05	637.02	636.98		637.017
0	18.883	18.969			

ตารางที่ ข.4.5 แสดงแรงที่คำนวณได้จากการทดลองครั้งที่ 4

UTM	Load cell (N)			
	x1	x2	x3	x4
0	-35.088	-30.815	-26.638	-25.667
5000	5014.250	5019.106	5019.591	5011.821
10000	10013.810	10013.325	10018.181	9999.727
15000	15013.857	15012.886	15012.400	15001.716
20000	20003.219	19998.363	20001.277	19991.079
25000	24997.438	24996.467	24998.410	24990.154
30000	29989.229	29987.772	29985.830	
0	-30.815	-26.638		

ตารางที่ ข.4.6 ทำให้ค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ของการทดลองครั้งที่ 4

UTM	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	0.971	0
5000	5049.338	5049.921	5046.230	5038.460	5048.496
10000	10048.899	10044.140	10044.819	10026.366	10045.953
15000	15048.945	15043.700	15039.038	15028.355	15043.895
20000	20038.308	20029.178	20027.915	20017.717	20031.800
25000	25032.527	25027.282	25025.048	25016.792	25028.286
30000	30024.318	30018.587	30012.468		30018.458
0	4.274	4.176			

ตารางที่ ข.4.7 แสดงค่า q , b , v , f_0 และ a ที่ได้รับการทดลองครั้งที่ 4

UTM	q	b	v	f_0	a
0				0	
5000	-0.9606	0.0731	0.1539	0	0.0200
10000	-0.4574	0.0474	0.1837	0	0.0100
15000	-0.2918	0.0659	0.0710	0	0.0067
20000	-0.1587	0.0519	0.0509	0	0.0050
25000	-0.1130	0.0299	0.0330	0	0.0040
30000	-0.0615	0.0395	0	0	0.0033

ตารางที่ ข.4.8 แสดง class ที่ได้รับการทดลองครั้งที่ 4

UTM	classของเครื่อง UTM				
	q	b	v	f_0	a
0				0.5	
5000	1	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

บันทึกผลการทดลองพร้อมคำนวณครั้งที่ 5

ตารางที่ ข.5.1 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 5

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0	18.989	0	0
5000	122.92	0.309	5000
10000	225.65	0.508	10000
15000	328.68	0.7	15000
20000	431.47	0.886	20000
25000	534.3	1.069	25000
30000	637.24	1.249	30000
0	18.993	0	0

ตารางที่ ข.5.2 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 5

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0	18.993	0	0
5000	122.92	0.309	5000
10000	225.76	0.508	10000
15000	328.69	0.7	15000
20000	431.44	0.886	20000
25000	534.32	1.069	25000
30000	637.02	1.249	30000
0	18.989	0	2

ตารางที่ ข.5.3 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 5

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0	18.989	0	2
5000	122.85	0.309	5000
10000	225.89	0.508	10000
15000	328.76	0.701	15000
20000	431.52	0.886	20000
25000	534.37	1.069	25000
30000	637.15	1.249	30000
25000	534.27	1.075	25000
20000	431.35	0.894	20000
15000	328.55	0.709	15000
10000	225.65	0.516	10000
5000	122.84	0.315	5000
0	19.074	0	2

ตารางที่ ข.5.4 แสดงข้อมูลดิบจากการทดลองครั้งที่ 5

UTM	Load cell strain($\times 10^{-6}$)				X average
	x1	x2	x3	x4	
0	18.989	18.993	18.989	19.074	18.990
5000	122.92	122.92	122.85	122.84	122.897
10000	225.65	225.76	225.89	225.65	225.767
15000	328.68	328.69	328.76	328.55	328.710
20000	431.47	431.44	431.52	431.35	431.477
25000	534.3	534.32	534.37	534.27	534.330
30000	637.24	637.02	637.15		637.137
0	18.993	18.989			

ตารางที่ ข.5.5 แสดงแรงที่คำนวณได้จากการทดลองครั้งที่ 5

UTM	Load cell (N)			
	x1	x2	x3	x4
0	-25.667	-25.473	-25.667	-21.539
5000	5021.534	5021.534	5018.135	5017.649
10000	10010.411	10015.753	10022.066	10010.411
15000	15013.857	15014.342	15017.742	15007.544
20000	20005.648	20004.191	20008.076	19999.820
25000	24999.381	25000.352	25002.780	24997.924
30000	29998.456	29987.772	29994.085	
0	-25.473	-25.667		

ตารางที่ ข.5.6 ทำให้ค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ของการทดลองครั้งที่ 5

UTM	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	4.128	0
5000	5047.201	5047.007	5043.802	5043.316	5046.003
10000	10036.078	10041.226	10047.733	10036.078	10041.679
15000	15039.524	15039.815	15043.409	15033.211	15040.916
20000	20031.315	20029.664	20033.743	20025.487	20031.574
25000	25025.048	25025.825	25028.448	25023.591	25026.440
30000	30024.123	30013.245	30019.753		30019.040
0	0.194	-0.194			

ตารางที่ ข.5.7 แสดงค่า q , b , v , f_0 และ a ที่ได้รับการทดลองครั้งที่ 5

UTM	q	b	v	f_0	a
0				0.006667	
5000	-0.9117	0.0674	0.0096	0.006667	0.0200
10000	-0.4151	0.1161	0.1161	0.006667	0.0100
15000	-0.2720	0.0258	0.0678	0.006667	0.0067
20000	-0.1576	0.0204	0.0412	0.006667	0.0050
25000	-0.1056	0.0136	0.0194	0.006667	0.0040
30000	-0.0634	0.0362	0	0.006667	0.0033

ตารางที่ ข.5.8 แสดง class ที่ได้รับการทดลองครั้งที่ 5

UTM	classของเครื่อง UTM				
	q	b	v	f_0	a
0				0.5	
5000	1	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

ภาคผนวก ค

(กฎเกณฑ์)

การตรวจสอบโดยทั่วไปของเครื่องทดสอบ

1. ทั่วไป

การตรวจสอบทั่วไปของเครื่องทดสอบ จะต้องดำเนินการก่อนที่จะสอบเทียบระบบวัดแรง และจะประกอบด้วยดังต่อไปนี้

2. การตรวจสอบด้วยสายตา

2.1 ว่าเครื่องที่อยู่ในการทำงานที่ดีและไม่ได้รับผลกระทบจากบางอย่างของสภาพทั่วไป เช่น

2.1.1 การสึกหรอที่เด่นชัดหรือความผิดปกติในองค์ประกอบของ Crosshead ในการเคลื่อนที่หรือจับ

2.1.2 ความหลวมใน Columns' mountings และในการ fixed crosshead

2.2 เครื่องจะไม่ได้รับผลกระทบจากสภาพสิ่งแวดล้อม (การสั้นสะเทือน สัญญาณรบกวน ทาง-ไฟฟ้า ผลกระทบจากการกีดกัน ความแตกต่างของอุณหภูมิภายใน ฯลฯ)

3. การตรวจสอบโครงสร้างของตัวเครื่อง

การตรวจสอบทำให้แน่ใจว่าโครงสร้างและระบบการจับที่สามารถนำแรงมาประยุกต์ใช้ได้

4. การตรวจสอบกลไกการขับเคลื่อนของ Crosshead

จะต้องตรวจสอบกลไกการขับเคลื่อน Crosshead เป็นไปอย่างแบบ uniform และสามารถใช้งานของแรงต่างๆได้อย่างต่อเนื่องและมีความถูกต้องเพียงพอ

*หมายเหตุ กลไกการขับเคลื่อนควรเปิดใช้งานที่อัตราการเสียรูปของชิ้นทดสอบที่จำเป็นในการกำหนดคุณสมบัติเชิงกลที่ระบุไว้

ภาคผนวก ง
คู่มือสำหรับปฏิบัติการสอบเทียบแรง

เครื่อง Universal Testing Machine (UTM) HT Hounsfield Serial no. 0126 model H50KS

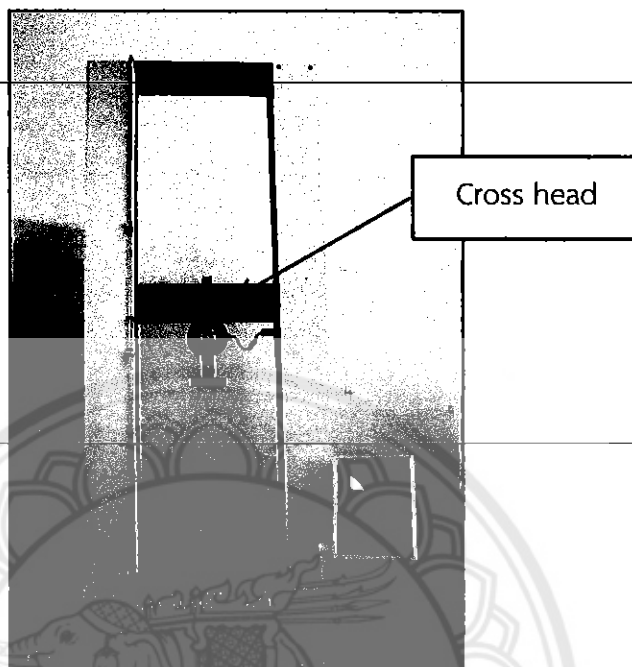


คำนำ

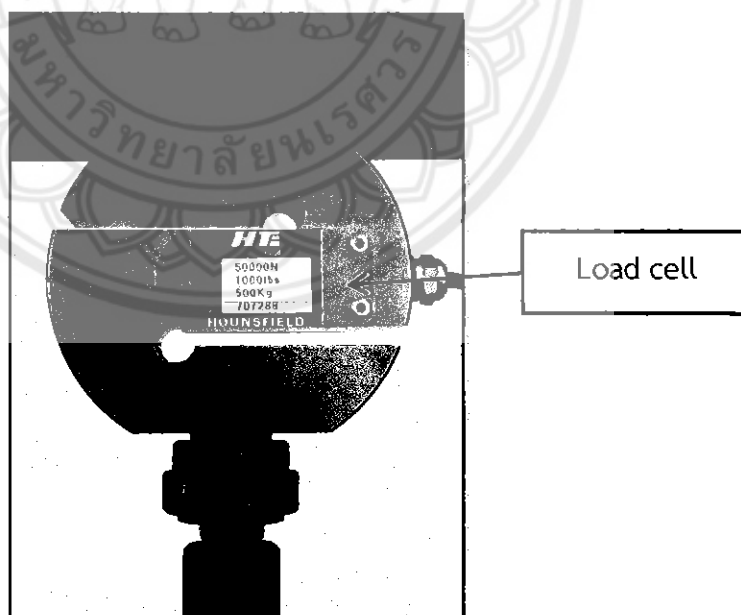
เครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ Universal testing machine (UTM) เป็นเครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรมและการศึกษาในการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ โดยเป็นเครื่องที่สามารถให้แรงกระทำต่อชิ้นงานในการทดสอบทั้งแรงดึง แรงอัด และแรงดัด เป็นต้น ซึ่งการวัดแรงด้วยเครื่อง UTM นั้นทำได้โดยการอ่านค่าจากโพลดเซลล์ซึ่งติดตั้งที่เครื่องทดสอบแรง โดยเพื่อให้มั่นใจว่าค่าแรงที่อ่านได้มีความถูกต้องและผลการทดสอบวัสดุมีคุณภาพ จำเป็นต้องมีระบบสอบเทียบแรง ซึ่งโดยทั่วไปอ้างอิงวิธีการตามมาตรฐาน ISO 7500-1 แรงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM เอกสารนี้เป็นคู่มือประกอบปฏิบัติการสอบเทียบตามมาตรฐาน 7500-1 และเครื่องอ่านค่าสเตรนเครื่องวัดแรง (Universal Strain Gage module NI-SCXI-1520) ในการสอบเทียบโดยอ้างอิงวิธีการพื้นฐานตามมาตรฐาน ISO 7500-1 เพื่อให้เข้าใจถึงหลักการและปัจจัยต่างๆที่มีผลกับการวัด และการจัดคลาสของเครื่อง UTM

ในคู่มือนี้จะประกอบไปด้วย ประเภทของเครื่อง Universal Testing machine หลักการทำงาน ส่วนประกอบของเครื่อง UTM และเมนูคำสั่งที่ใช้กับเครื่อง Universal Testing machine รุ่น HT Hounsfield Serial no. 0126 model H50KS สำหรับปฏิบัติการสอบเทียบ

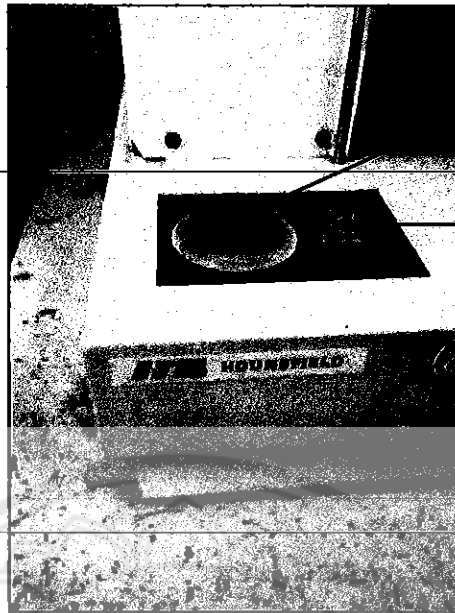
1. ส่วนประกอบของเครื่อง UTM



รูปที่ 1 เครื่อง UTM ยี่ห้อ HT Hounsfield



รูปที่ 2 Load cell ของเครื่อง UTM ขนาด 50000 N ,serial number 707288



ปุ่ม Emergency Stop

ปุ่ม Switch ON-OFF

รูปที่ 3 ปุ่ม Emergency Stop



ปุ่มหยุดการเคลื่อนที่ของ
Cross head

ปุ่มกดหมายเลขต่างๆ
สำหรับการตั้งค่า

ปุ่มปรับระดับ Cross
head เคลื่อนที่ขึ้น

ปุ่มปรับระดับ Cross
head เคลื่อนที่ลง

รูปที่ 4 Controller

1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในปฏิบัติการสอบเทียบ

- เครื่อง UTM
- Load cell standard
- indicator (Universal Strain Gage module NI-SCXI-1520)
- คอมพิวเตอร์และโปรแกรม National Instruments Measurement and Automation Explorer

2. ส่วนทั่วไป

ยี่ห้อเครื่อง HT Hounsfield Serial no. 0126 model H50KS เลขครุภัณฑ์ 6530-005-056 งปม. 28/41

2.1 การทำงานของเครื่อง

เครื่อง UTM เครื่องนี้เป็นเครื่อง UTM ที่ขับเคลื่อนด้วยระบบบอลสกรู สามารถใช้ทดสอบได้ทั้งแรงดึงและแรงกด

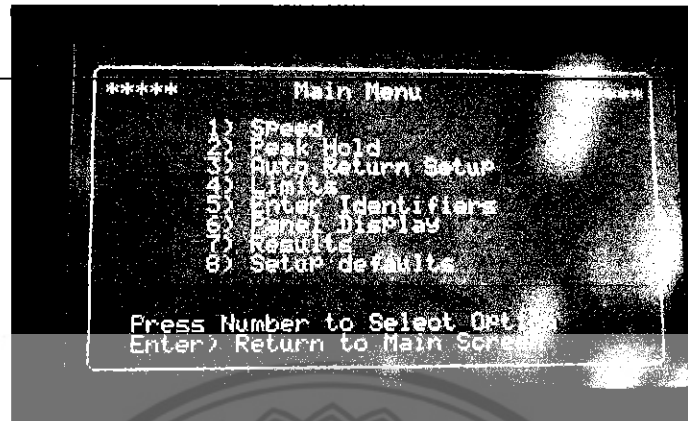
2.2 การใช้งานเครื่อง UTM เพื่อปฏิบัติการสอบเทียบ

2.2.1 กดปุ่มเปิดเครื่อง UTM (Switch ON) ดังรูปที่ 3 ก็จะปรากฏหน้าจอตั้งรูปที่ 5 ขั้นตอนต่อมาคือ กดปุ่มหมายเลข 6 และ กดปุ่ม stop จะได้หน้าจอตั้งรูปที่ 6 จากนั้นจะเป็นการแนะนำการใช้ เมนูคำสั่ง และตั้งค่าเครื่อง UTM สำหรับปฏิบัติการสอบเทียบดังต่อไปนี้



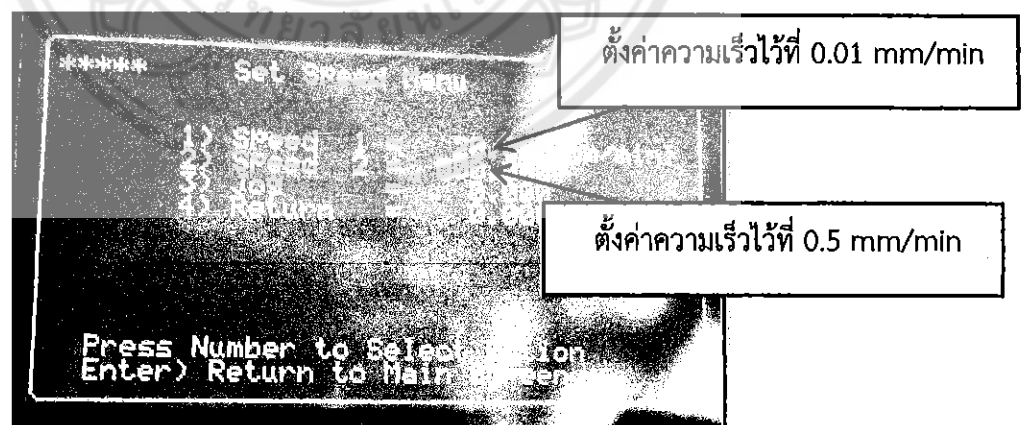
รูปที่ 5 หน้าจอเริ่มต้น

2.2.2 ทำการกดปุ่ม Menu จากนั้นหน้าจอก็จะแสดงผลดังรูปที่ 6



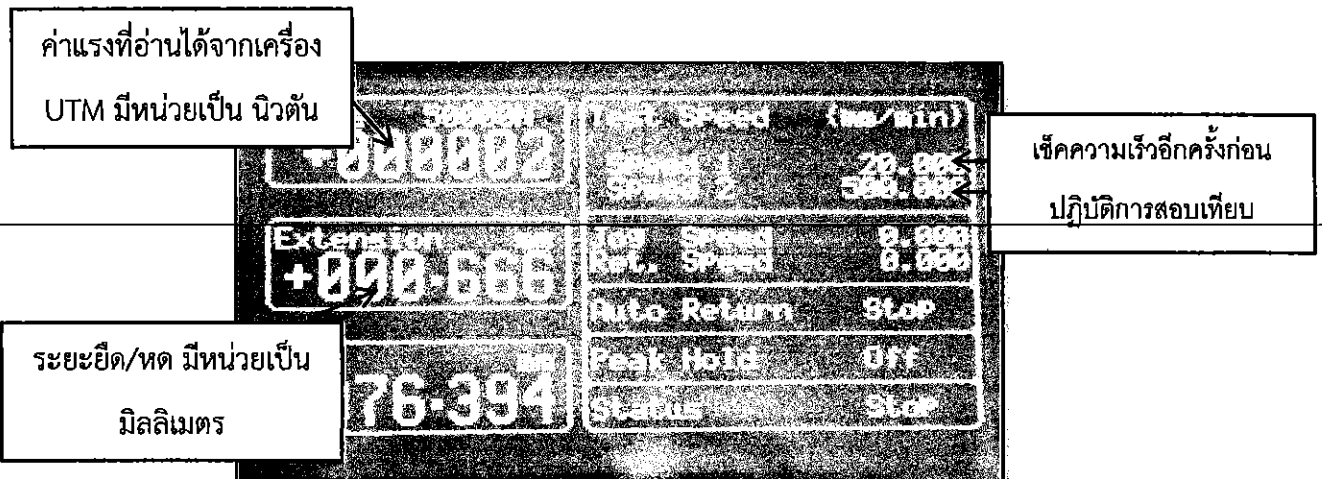
รูปที่ 6 ชุดเมนูของเครื่อง UTM

2.2.3 เมนูหมายเลข 1) ปรับความเร็ว (speed) ของเครื่อง UTM ในการดึงหรือกดชิ้นงาน สามารถตั้งความเร็วได้ในระดับเลขนัยสำคัญ 2 ตำแหน่ง ซึ่งในการปฏิบัติการสอบเทียบเครื่อง UTM นี้จะตั้งความเร็วไว้ที่ 0.01 mm/min และ 0.5 mm/min ตามลำดับ ดังรูปที่ 7 เมื่อทำการกดปุ่ม (ปุ่มปรับระดับ Cross head เคลื่อนที่ลง) ดังรูปที่ 4 หนึ่งครั้งก็จะทำให้ Cross head เคลื่อนที่ลงด้วยความเร็ว 0.01 mm/min และถ้ากดปุ่มนั้นซ้ำอีกครั้งก็จะทำให้ Cross head เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.5 mm/min



รูปที่ 7 การตั้งค่าความเร็วของเครื่อง UTM

2.2.4 เมนูหมายเลข 6) คำสั่ง Panel Display เป็นการเช็คดูคำสั่งที่เคยตั้งไว้ก่อนหน้า Speed ส่วนฝั่งซ้ายมือที่มีตัวหนังสือใหญ่ๆ จะเป็นค่า แรงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM(N) และระยะยัด (mm) จากบนลงล่างตามลำดับ ดังรูปที่ 8



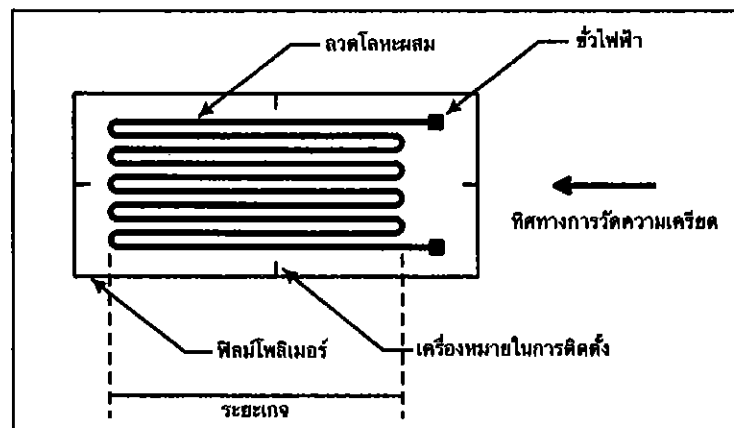
รูปที่ 8 Display

3. ทฤษฎีของสเตรนเกจ

3.1 โหลดเซลล์ คือ เซนเซอร์ที่สามารถแปลงค่าแรงกดหรือแรงดึงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ เหมาะสำหรับการทดสอบคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน (Mechanical Properties of Parts) โหลดเซลล์ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลากหลายประเภทเช่น การชั่งน้ำหนัก การทดสอบแรงกดของชิ้นงาน การทดสอบความแข็งแรงของชิ้นงาน การทดสอบการเข้ารูปชิ้นงาน (Press fit) ใช้สำหรับงานทางด้านวัสดุโลหะ ทดสอบโลหะ ชิ้นส่วนรถยนต์ วิศวกรรมโยธา ทดสอบคอนกรีต ทดสอบไม้ เป็นต้น

3.1.1 ทฤษฎีของ Strain Gage

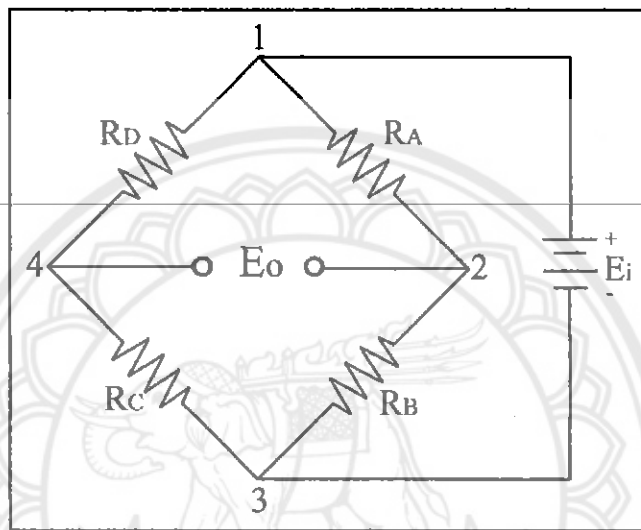
Strain Gage เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความเครียดโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า Strain Gage วัดความเครียดประกอบด้วยขดลวดที่ทำจากโลหะผสมที่มีความไวของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าต่อความเครียดสูงขดลวดโลหะนี้จะถูกยึดติดบนแผ่นฟิล์ม-โพลีเมอร์ ซึ่งฟิล์มโพลีเมอร์นี้จะถูกยึดติดบนผิวของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่ต้องการวัดความเครียด ระยะของขดลวดใช้เป็นระยะ Strain Gage ในการวัดความเครียด



รูปที่ 9 ส่วนประกอบของ Strain Gage

3.1.2 วงจรบริดจ์

การวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุเมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาด เพื่อใช้คำนวณความเครียด (Strain) กระทำได้ยาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นในการใช้เกจวัดความเครียดจึงวัดการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า (ΔE) ที่เกิดขึ้นในวงจรสโตนบริดจ์ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้สะดวกกว่าการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้างดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 วงจรวงจบริดจ์

จากรูปที่ 10 E_i คือ กระแสที่จ่ายให้กับวงจบริดจ์ในด้าน input สามารถตั้งค่าได้คือ 2.5 , 5 , 10 เป็นต้น และ E_o คือ output ที่อ่านได้จากวงจบริดจ์

3.1.3 การวิเคราะห์ท่วงจบริดจ์แบบทั่วไปกับแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้

$$V_{14} = \frac{R_D}{R_D + R_C} \times E_i \quad \text{----- (1)}$$

$$V_{12} = \frac{R_A}{R_A + R_B} \times E_i \quad \text{----- (2)}$$

เมื่อ $V_{14} = V_1 - V_4$ และ $V_{12} = V_1 - V_2$

ดังนั้น $V_{42} = (V_1 - V_2) - (V_1 - V_4)$

จะได้ $V_{42} = V_4 - V_2 = V_{12} - V_{14}$

$$\therefore V_{42} = \left[\frac{R_A}{R_A + R_B} - \frac{R_D}{R_D + R_C} \right] \times E_i \quad \text{----- (3)}$$

$$V_{43} = \frac{R_C}{R_D + R_C} \times E_i \quad \text{----- (4)}$$

$$V_{23} = \frac{R_B}{R_A + R_B} \times E_i \quad \text{----- (5)}$$

เมื่อ $V_{43} = V_4 - V_3$ และ $V_{23} = V_2 - V_3$

ดังนั้น $V_{42} = (V_4 - V_3) - (V_2 - V_3)$

จะได้ $V_{42} = V_4 - V_2 = V_{43} - V_{23}$

$$V_{42} = \left[\frac{R_C}{R_D + R_C} - \frac{R_B}{R_A + R_B} \right] \times E_i \quad \text{----- (6)}$$

เนื่องจาก

$$E_0 = \frac{V_{42} + V_{42}}{2}$$

$$\therefore E_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{R_A}{R_A + R_B} - \frac{R_D}{R_D + R_C} + \frac{R_C}{R_D + R_C} - \frac{R_B}{R_A + R_B} \right) \times E_i \quad \text{----- (7)}$$

ให้ $R_A \approx R_B \approx R_C \approx R_D = R$ แทนค่าในสมการที่ (7)

$$\text{จะได้ } E_0 \approx \frac{1}{2} \left(\frac{R + \Delta R_A}{2R} - \frac{(R + \Delta R_D)}{2R} + \frac{(R + \Delta R_C)}{2R} - \frac{(R + \Delta R_B)}{2R} \right) \cdot E_i$$

$$E_0 \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_A}{2R} - \frac{\Delta R_D}{2R} + \frac{\Delta R_C}{2R} - \frac{\Delta R_B}{2R} \right) \cdot E_i$$

$$E_0 \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_A}{R} - \frac{\Delta R_D}{R} + \frac{\Delta R_C}{R} - \frac{\Delta R_B}{R} \right) \cdot E_i$$

$$E_0 \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_A}{R_A} - \frac{\Delta R_D}{R_D} + \frac{\Delta R_C}{R_C} - \frac{\Delta R_B}{R_B} \right) \cdot E_i$$

$$\therefore \frac{E_o}{E_i} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_A}{R_A} - \frac{\Delta R_D}{R_D} + \frac{\Delta R_C}{R_C} - \frac{\Delta R_B}{R_B} \right) \quad \text{----- (8)}$$

เนื่องจากคุณสมบัติของ strain gage จากผู้ผลิต ซึ่งมีค่า gage factor (K) เป็นค่าคงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่อ strain ที่เกิดขึ้นดังสมการที่ (9)

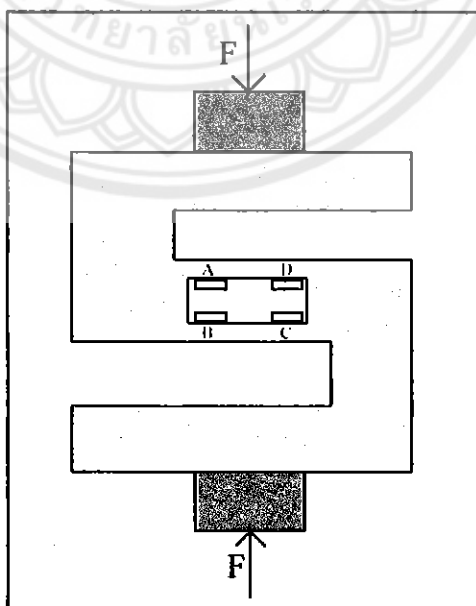
$$K = \frac{\Delta R / R}{\epsilon} \quad \text{----- (9)}$$

$$\therefore K = \frac{\Delta R / R}{\epsilon} = \frac{\Delta R_A / R_A}{\epsilon} = \frac{\Delta R_D / R_D}{\epsilon} = \frac{\Delta R_C / R_C}{\epsilon} = \frac{\Delta R_B / R_B}{\epsilon} \quad \text{----(10)}$$

นำสมการที่ (10) แทนในสมการที่ (8)

$$\text{จะได้ } \frac{E_o}{E_i} \approx \frac{1}{4} (K\epsilon_A - K\epsilon_D + K\epsilon_C - K\epsilon_B)$$

$$\therefore \frac{E_o}{E_i} \approx \frac{1}{4} K (\epsilon_A - \epsilon_D + \epsilon_C - \epsilon_B)$$



รูปที่ 11 โหลดเซลล์แบบ S - Type

จากรูปที่ 11 กำหนดให้

$$\approx \varepsilon_A = \varepsilon$$

$$\approx \varepsilon_D = -\varepsilon$$

$$\approx \varepsilon_C = \varepsilon$$

$$\approx \varepsilon_B = -\varepsilon$$

$$\text{จะได้ } \frac{E_0}{E_1} \approx \frac{1}{4}(\varepsilon + \varepsilon + \varepsilon + \varepsilon) = K\varepsilon \quad \therefore \varepsilon = \frac{E_0}{KE_1} \quad \text{---(11)}$$

3.1.4 การหาความต้านทานภายใน Load cell standard ที่นำมาใช้ในทดลอง

เนื่องจาก Load cell standard ที่นำมาใช้เป็นแบบ S - type ดังรูปที่ 12 และมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

Eligible Certificate	จากผู้ผลิต
Sensitivity	: 2.0003 mv/v
Zero Output	: 0.45 %F.S
Input Resistance	: 402.7 Ω
Output Resistance	: 352.2 Ω
Red	: + Excitation
Black	: -Excitation
Green	: + Signal
White	: - Signal



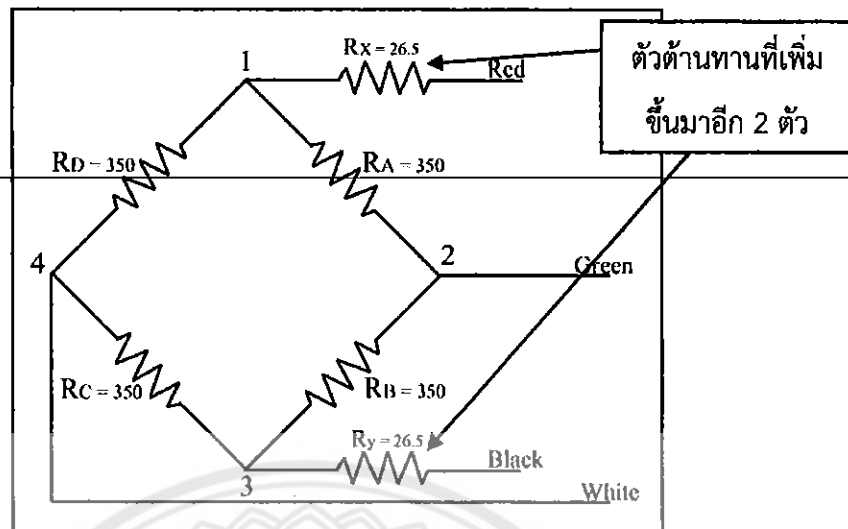
รูปที่ 12 Load Cell Standardผู้ผลิต

Zega model keed-a

Serial no 5g29340

จากข้อมูลผู้ผลิตให้มาพบว่า

Input Resistance = 402.7 Ω ไม่เท่ากับ Output Resistance = 352.2 Ω ดังนั้นจึงทำการวัดและคำนวณเพื่อหาความต้านทานภายในที่แท้จริง



รูปที่ 13 วงจรฟูบริดจ์ใน Load Cell Standard

เมื่อได้วัดความต้านทานในภายใน Load cell ด้วย Multimeter รุ่น Extech model 380225 พบว่า

ระหว่างสาย Black & Red	: 402 Ω = $R_{(B,R)}$
ระหว่างสาย Green & White	: 349 Ω = $R_{(G,W)}$
ระหว่างสาย Black & White	: 289 Ω = $R_{(B,W)}$
ระหว่างสาย Green & Black	: 289 Ω = $R_{(G,B)}$
ระหว่างสาย White & Red	: 289 Ω = $R_{(W,R)}$
ระหว่างสาย Red & Green	: 289 Ω = $R_{(R,G)}$

จากวงจรภายในของ Load cell ดังรูปที่ 13 สามารถคำนวณหาตัวต้านทานในภายในได้ว่า

$$\frac{1}{R_{(B,R)}} = \frac{1}{R_A + R_B} + \frac{1}{R_C + R_D}$$

$$\frac{1}{402} = \frac{1}{350+350} + \frac{1}{350+350}$$

$$\frac{1}{402} \neq \frac{1}{350}$$

เมื่อนำข้อมูลที่วัดได้มาคำนวณ ค่าที่ได้จากการวัดระหว่างสาย B,R ก็กับการคำนวณระหว่างจุด 1,3 ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงประเมินได้ว่าวงจรของ Load Cell มีตัวต้านทานต้านทานเพิ่มเติมคือ R_x และ R_y ดังรูปที่ 13 สามารถคำนวณหาตัวต้านทาน R_x และ R_y ได้ดังนี้

หาค่าตัวต้านทาน R_x เมื่อ $R_{(R,G)} = R_{(1,2)}$ จะได้

$$\frac{1}{R_{(1,2)}} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_C + R_D + R_B}$$

$$\frac{1}{R_{(1,2)}} = \frac{1}{350} + \frac{1}{1050}$$

$$R_{(1,2)} = \frac{350 \times 1050}{350 + 1050} = 262.5$$

แต่เมื่อทำการวัดจริง $R_{(R,G)} = 289 \Omega$

จะได้ $R_{(R,G)} = R_{(1,2)} + R_x$

$$289 = 262.5 + R_x$$

$$\therefore R_x = 26.5 \Omega$$

หาค่าตัวต้านทาน R_y เมื่อ $R_{(G,B)} = R_{(2,3)}$

$$\frac{1}{R_{(2,3)}} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C + R_D + R_A}$$

$$\frac{1}{R_{(2,3)}} = \frac{1}{350} + \frac{1}{1050}$$

$$R_{(2,3)} = \frac{350 \times 1050}{350 + 1050} = 262.5$$

แต่เมื่อทำการวัดจริง $R_{(G,B)} = 289 \Omega$

จะได้ $R_{(G,B)} = R_{(1,2)} + R_y$

$$289 = 262.5 + R_y$$

$$\therefore R_y = 26.5 \Omega$$

พิสูจน์ค่าที่คำนวณได้

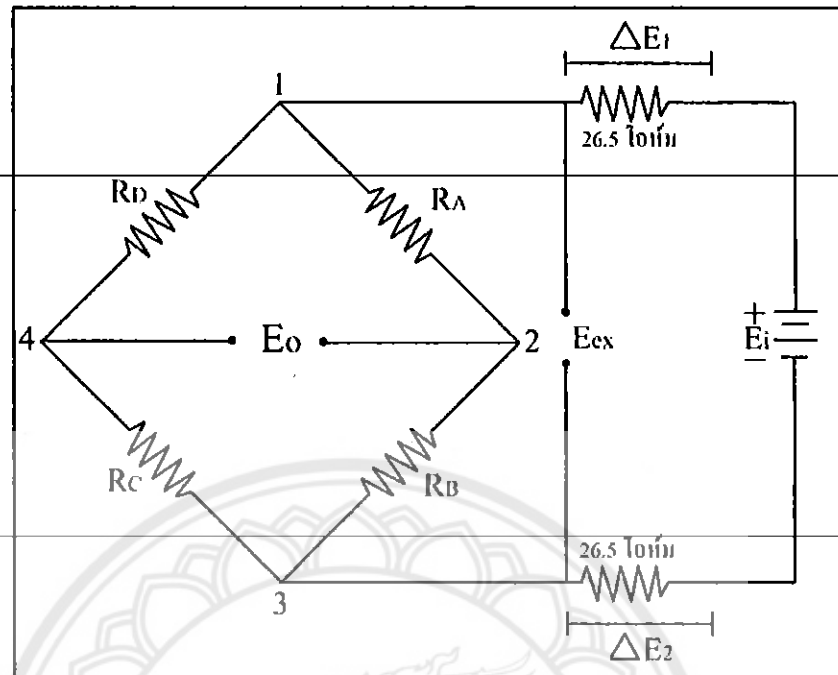
$$\text{ให้ } R_{(R,G)} = R_{(G,W)}$$

$$R_{(B,R)} - R_x - R_y = R_{(G,W)}$$

$$402 - 26.5 - 26.5 = 349$$

สรุปได้ว่าใน Load cell จะมีตัวต้านทานเพิ่มขึ้นไปอีก 2 ตัวคือ

$$R_y = 26.5 \Omega \text{ และ } R_x = 26.5 \Omega \text{ ดังรูปที่ 13}$$



รูปที่ 14 วงจรของ Load cell standard

โดยทั่วไปแล้ววงจรบริดจ์ที่ใช้จะเป็นดังรูปที่ 10 แต่โหลดเซลล์ที่ใช้วัดแรงในงานวิจัยนี้ มีตัวทานเพิ่มขึ้นมา 2 ตัวซึ่งทำให้มีความดันตก(ลดลง)เท่ากับ ΔE ทำให้ความดันที่ขั้ว 1,3 ลดลงเป็น E_{ex} ดังรูปที่ 14 เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านประมาณว่าคงที่ ดังนั้น Voltage drop ΔE จึงประมาณว่าคงที่เช่นกัน

จากสมการบริดจ์ทั่วไปดังสมการที่ (11) Strain ที่ indicator อ่านได้คือ $\epsilon \approx E_o / KE_i$ จะได้ $E_o = K\epsilon E_i$ แต่ในกรณี(รูปที่ 14) $E_{ex} = E_i - \Delta E$ ดังนั้น Voltage ที่ E_o จะได้เท่ากับ $E_o = K\epsilon E_{ex}$

$$\therefore \epsilon_{\text{indicator}} = \frac{K\epsilon E_{ex}}{KE_i} \Rightarrow \epsilon_{\text{indicator}} = \frac{K\epsilon(E_i - \Delta E)}{KE_i}$$

$$\epsilon_{\text{indicator}} = \frac{K\epsilon - K\epsilon\Delta E}{KE_i} \Rightarrow \epsilon_{\text{indicator}} = \left(1 - \frac{\Delta E}{E_i}\right) \epsilon$$

ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงวิเคราะห์เห็นว่า วงจรบริดจ์แบบทั่วไป (Full bridge 1) สามารถนำมาใช้กับ วงจรบริดจ์ที่มีตัวต้านทานเพิ่มขึ้นมาในด้าน in put ได้หรือไม่ ซึ่งโดยปกติแล้วค่า strain ที่ indicator

อ่านได้นั้นจะเท่ากับ $\epsilon \approx \frac{E_0}{KE_i}$ แต่ในงานวิจัยพบว่า $\epsilon_{\text{indicator}} = \left(1 - \frac{\Delta E}{E_i}\right) \epsilon = \left(1 - \frac{53}{402}\right) \epsilon$

จะได้ค่า $\epsilon_{\text{indicator}}$ ที่อ่านได้เท่ากับ 0.868ϵ ซึ่ง ϵ ที่คูณกับค่าคงที่นั่นคือค่าสเตรนที่แท้จริงของวงจรบรีดจ์
สรุปได้ว่า เครื่องมือที่จ่ายและวัดแรงดันกับวงจรบรีดจ์ทั่วไปดังรูป 10 สามารถนำมาใช้กับ
วงจรของเครื่องวัดแรงในงานวิจัยนี้ได้เพราะยังมีความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง ดังรูปที่ 14

3.2 การติดตั้งและการเตรียมอุปกรณ์สำหรับปฏิบัติการสอบเทียบ

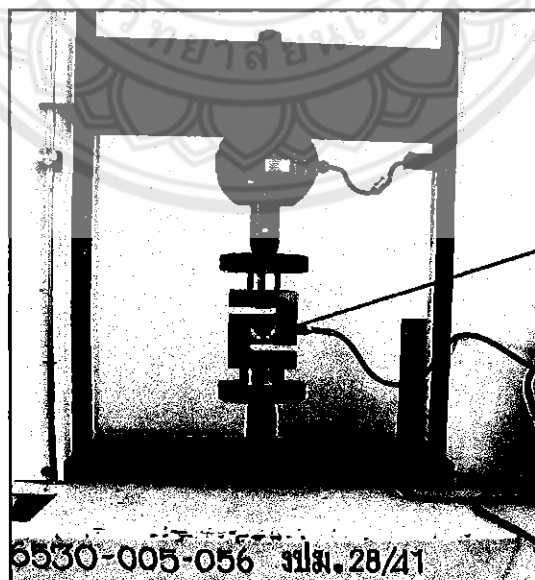
3.2.1 การติดตั้งอุปกรณ์

ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองและวอร์มเครื่องทิ้งไว้อย่างน้อย 1 ชั่วโมงก่อนทำการทดสอบ

ซึ่งประกอบไปด้วย เครื่อง UTM, load cell, indicator(Universal Strain Gage module NI-SCXI-1520) และเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 15, 16, 17

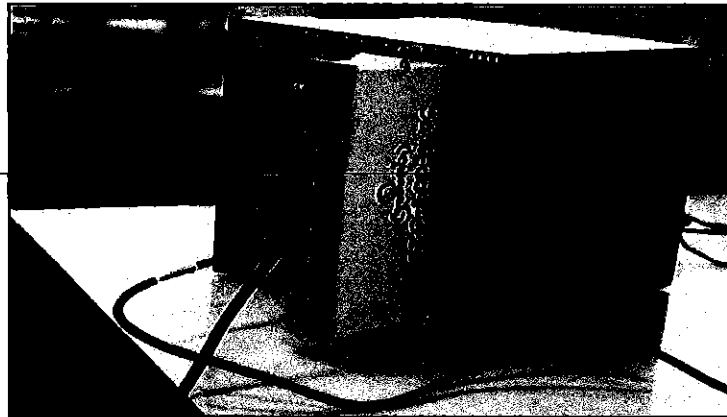
ในการปฏิบัติการสอบเทียบเครื่อง UTM นี้จะเป็นการสอบเทียบในโหมดแรงกด (compression) เนื่องจากการสอบเทียบในโหมดแรงกดทำได้ง่ายกว่า หัววัดในการสร้างตัววัด load cell standard ได้ง่ายกว่า ราคาถูกกว่า

*การติดตั้ง load cell standard เข้ากับหัวกดนั้นจะต้องติดตั้ง load cell standard ให้อยู่กึ่งกลางพอดีกับหัวกดมากที่สุดเพื่อการอ่านค่า Strain ที่แม่นยำ



load Cell Standardผู้ผลิต
Zega model keed-a
Serial No.5G29340

รูปที่ 15 เครื่อง UTM และ Load cell



รูปที่ 16 indicator (Universal Strain Gage module NI-SCXI-1520)

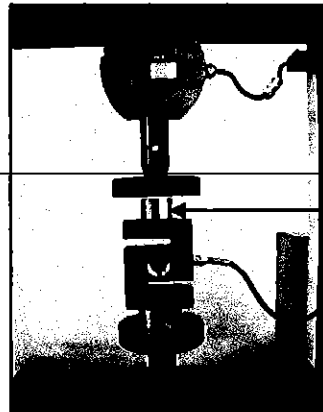


รูปที่ 17 เครื่องคอมพิวเตอร์

3.2.2 ขั้นตอนการสอบเทียบ

หลังจากติดตั้งอุปกรณ์และวอร์มเครื่องเสร็จแล้ว ขั้นตอนการทดสอบดังนี้

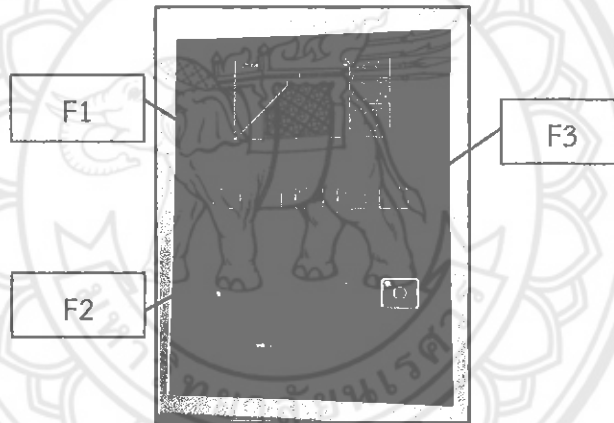
- ก. ปรับระยะหัวกด (Compression) ลงมาให้ห่างจาก load cell ประมาณ 0.2mm ดังรูปที่ 18 ตรวจสอบให้ได้อะไลน์เมนต์ (alignment) ให้ตั้งอยู่ศูนย์กลางไม่มีการเอียงศูนย์



ห่างจากหัวกด
ประมาณ 0.2 mm

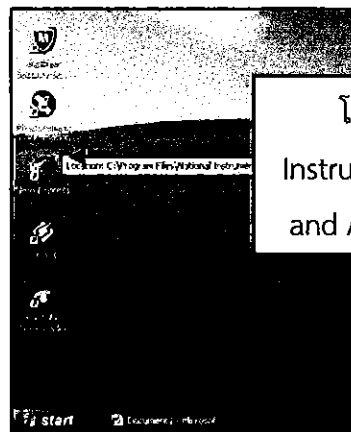
รูปที่ 18 การติดตั้งโหลดเซลล์

ข. ทำการเซต ค่าแรง ตำแหน่ง ระยะยัดที่ Controller ของเครื่อง UTM ทั้งหมดให้เป็นศูนย์โดยการกดปุ่ม F1, F2 และ F3 ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 controller ของเครื่อง UTM

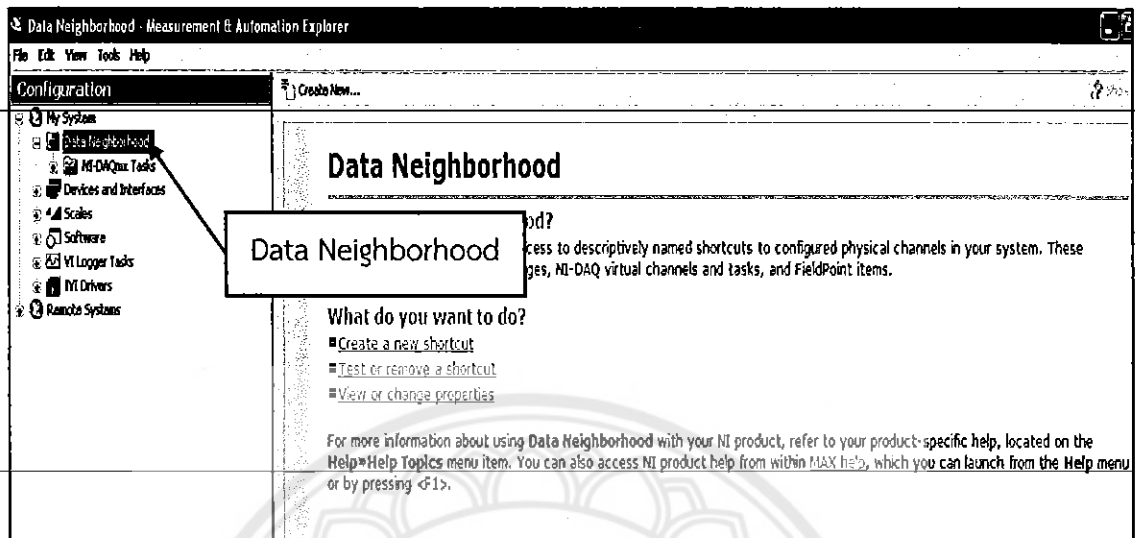
ค. ทำการเปิดโปรแกรม National Instruments Measurement and Automation Explorer เพื่อจะเริ่มดำเนินการสอบเทียบดังรูปที่ 20



โปรแกรม National
Instruments Measurement
and Automation Explorer

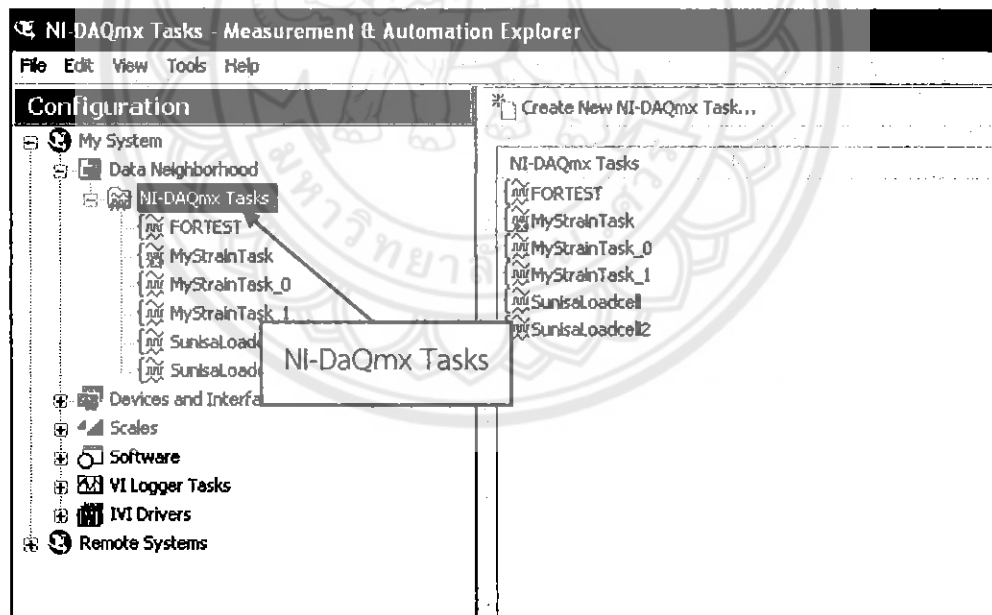
รูปที่ 20 โปรแกรมที่ใช้ในการสอบเทียบ

ง. ตั้งค่าโปรแกรมดังรูปที่ 21 เลือกที่ Data Neighborhood



รูปที่ 21 Data Neighborhood

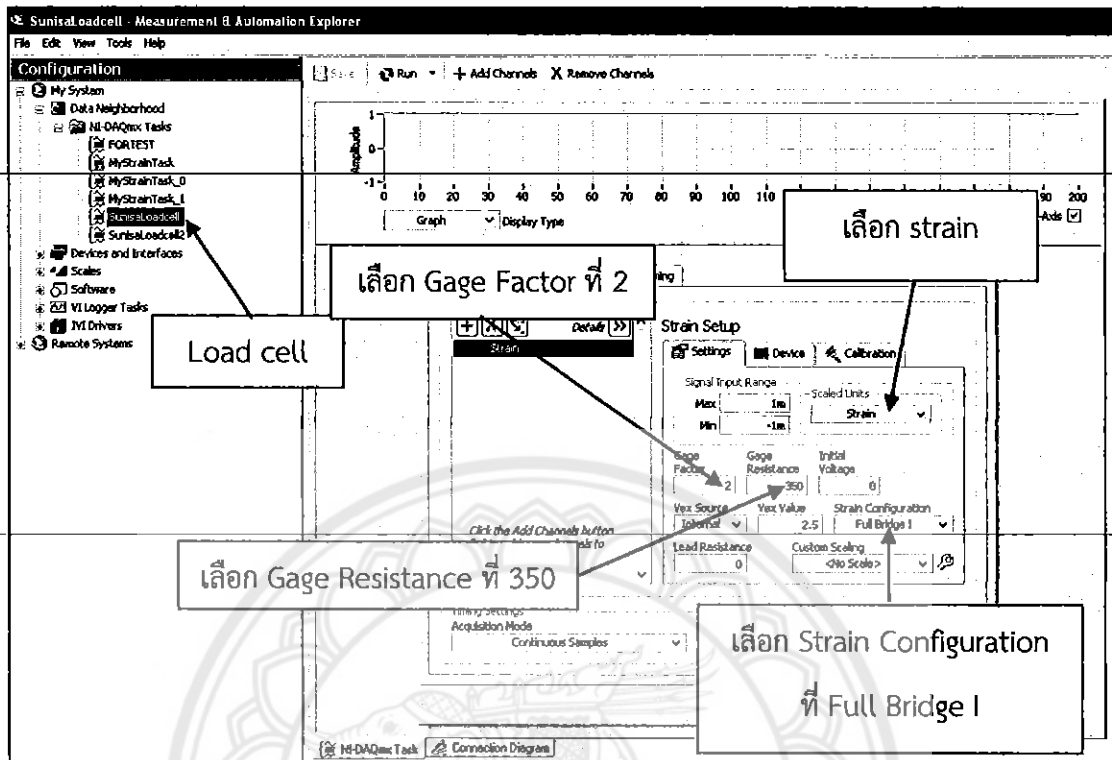
จ.เลือกที่ NI-DaQmxTasksดังรูปที่ 22



รูปที่ 22 NI-DaQmx Tasks

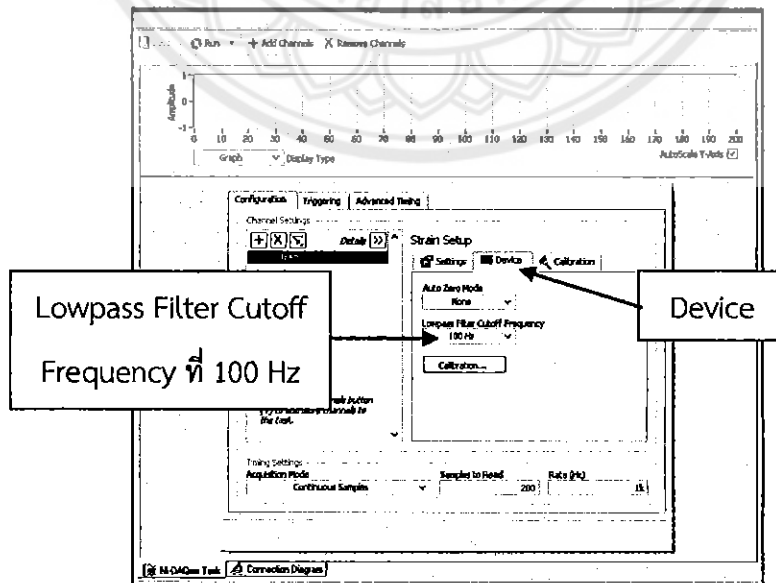
ฉ.เลือกที่ task ที่ตั้งค่าไว้ดังรูปที่ 23

- 1).เลือก strain
- 2).เลือก Gage Resistance ที่ 350
- 3).เลือก Gage Factor ที่ 2
- 4). เลือก Strain Configuration ที่ Full Bridge I



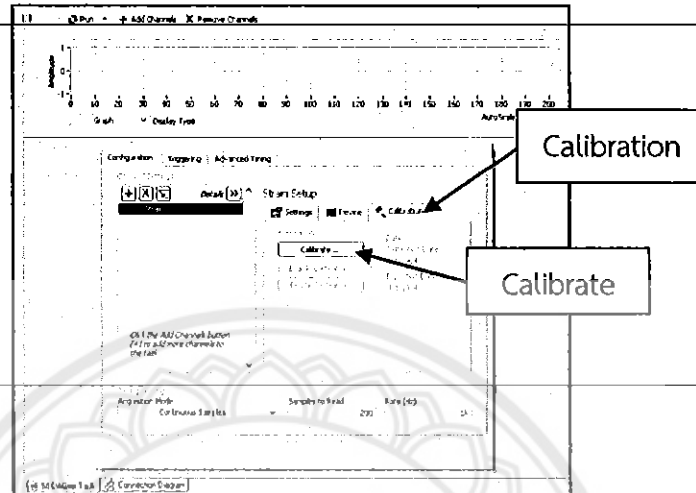
รูปที่ 23 ตั้งค่าโปรแกรม

ข.เลือกที่ Device เลือก Lowpass Filter Cutoff Frequency ที่ 100Hz
 ดังรูปที่ 24 (สัญญาณที่ได้รับเป็นแบบ mode static ดังนั้นจึงตัดความถี่ที่ต่ำกว่า 100Hz ให้ผ่านไปได้ ส่วนความถี่ที่เกิน 100 Hz จะถูกตัดออก)

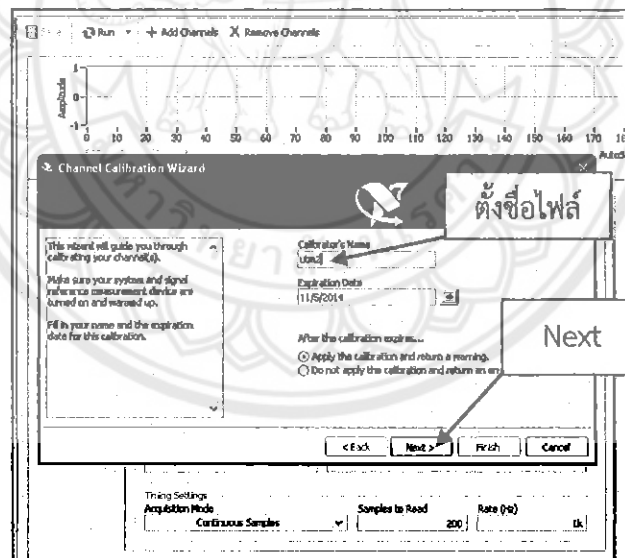


รูปที่ 24 Device

ข.เลือกที่ Calibration แล้วคลิกที่ Calibrate และตั้งชื่อไฟล์ เช่นutm2 และกด
Next ดังรูปที่ 25, 26

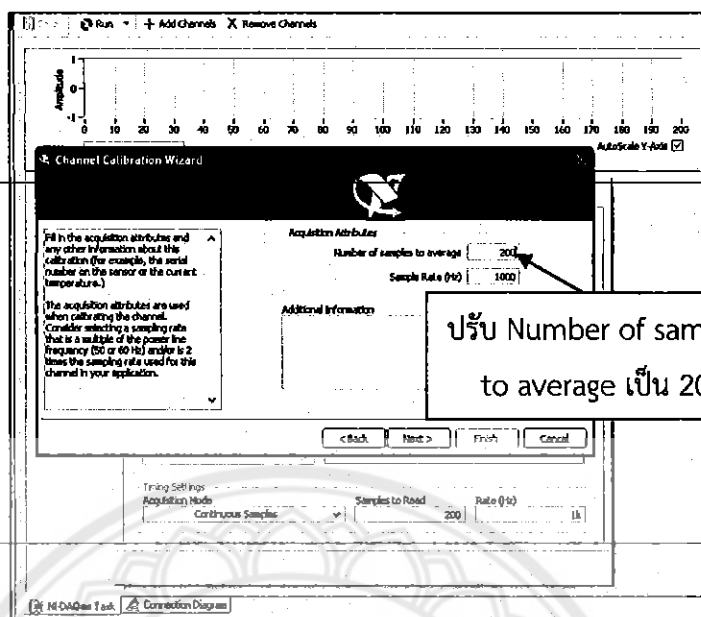


รูปที่ 25 Calibration



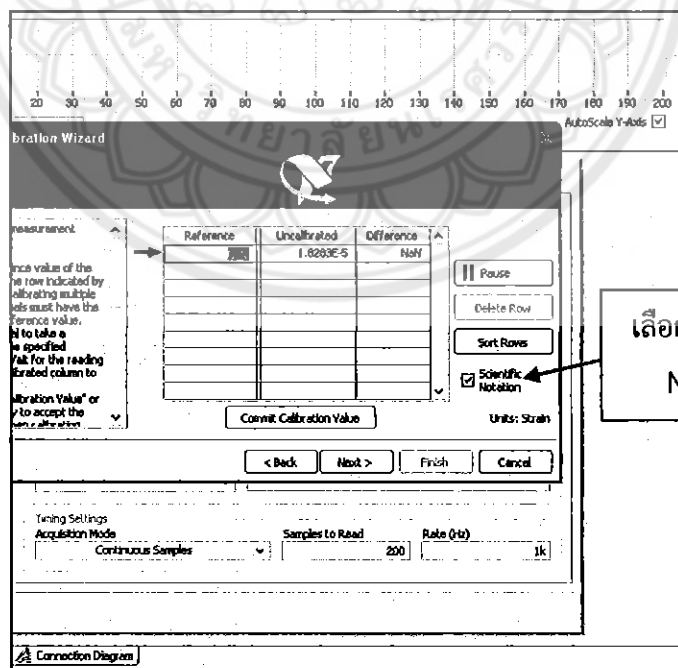
รูปที่ 26 ตั้งชื่อไฟล์

ณ.ปรับ Number of samples to average จาก 1000 เป็น 200 เพื่อให้ค่า strain แสดงผลได้เร็วขึ้น (1 วินาที แสดงผล 5 ครั้ง) และกดปุ่ม Next ดังรูปที่ 27



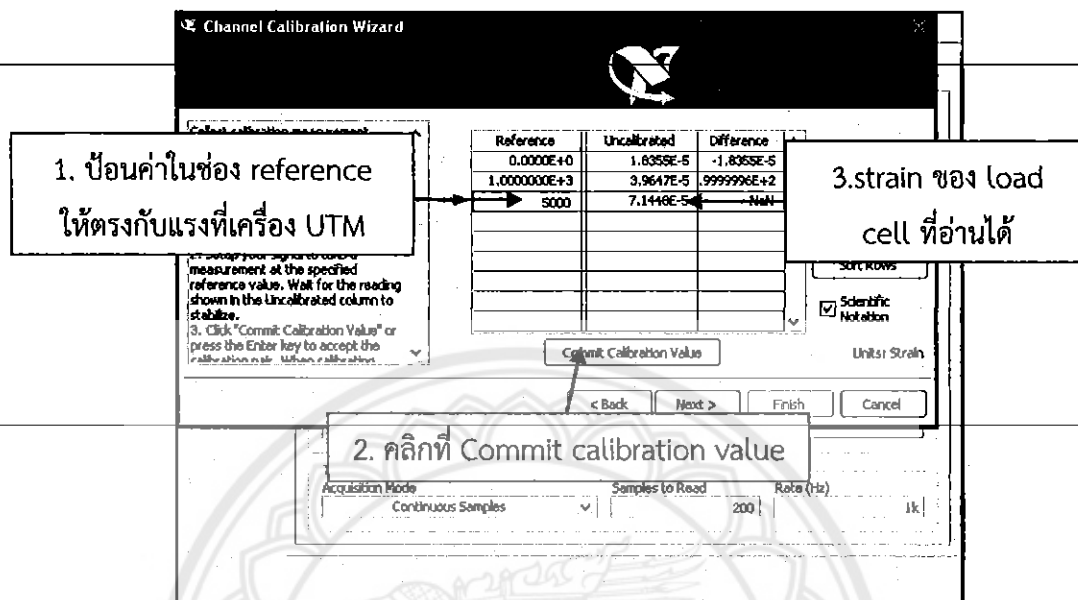
รูปที่ 27 Number of samples to average

ณ. เลือกที่ Scientific Notation เพื่อให้โปรแกรมแสดงผลค่า strain ได้อย่างละเอียดดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 Scientific Notation

๓. ป้อนค่าในช่อง reference ให้ตรงกับแรงที่เครื่อง UTM รอจนกว่าค่าจะนิ่งแล้วคลิกที่ Commit calibration value เพื่อบันทึกค่า strain ที่อ่านได้จาก indicator ดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 ตารางแสดงค่าแรง(N)และระยะยืด(strain)

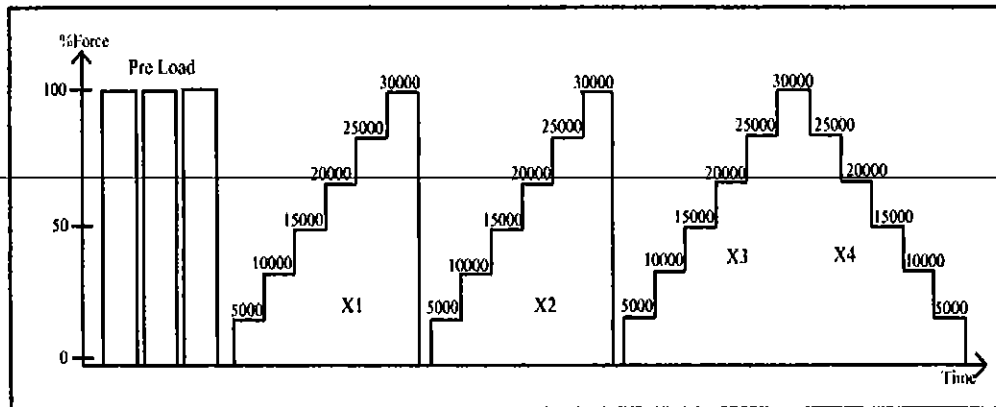
3.2.3 ดำเนินการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ขั้นตอนการสอบเทียบนั้น ประยุกต์มาจากขั้นตอนการสอบเทียบที่แนะนำในมาตรฐาน ISO 7500-1^[1] แสดงในรูปที่ 30

การ Pre load โดยจะให้แรงไปที่แรงสูงสุดที่จะทำการทดสอบในกรณีนี้เพื่อความปลอดภัยจึงทดสอบแรงสูงสุดที่ 30000 N แม้ว่าในตัวเครื่อง UTM จะใช้ได้สูงสุด 50000 N ก็ตาม แล้วจึงถอดแรงลงมาที่ศูนย์ ทำ 3 ครั้ง เพื่อเป็นการวอร์มเครื่อง

X1 , X2 เป็นการให้แรงไปที่เครื่อง UTM โดยแรงที่ให้นั้นจะต้องเพิ่มขึ้นครั้งละเท่าๆกัน แล้วอ่านค่าแรงที่ได้จาก load cell standard และบันทึกผล

X3 , X4 จะเป็นการทดสอบค่าความผิดพลาดจากการย้อนกลับ โดยจะให้แรงเพิ่มขึ้นไปครั้งละเท่าๆกันและถอดแรงออกครั้งละเท่าๆกัน ว่าในตำแหน่งแรงที่เท่ากันจะอ่านค่าแรงได้เท่ากันหรือไม่ และบันทึกผล



รูปที่ 30 ขั้นตอนการสอบเทียบทั้งหมด

3.2.4 การบันทึกค่า

จากผลการทดลองเก็บข้อมูลดังขั้นตอนในรูปที่ 30 สามารถนำผลการทดลองที่ได้บันทึกลงในตารางที่ 1

*หมายเหตุ ในการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ได้มีการสอบเทียบเครื่อง UTM ทั้งหมด 5 ครั้ง โดยตารางที่ 1 เป็นข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบในครั้งที่ 4

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่าข้อมูลดิบจากการเก็บข้อมูลครั้งที่ 4

UTM (N)	Load cell ($\times 10^{-6}$ strain)				X average
	x1	x2	x3	x4	
0	18.795	18.883	18.969	18.989	18.882
5000	122.770	122.870	122.880	122.720	122.840
10000	225.720	225.710	225.810	225.430	225.747
15000	328.680	328.660	328.650	328.430	328.663
20000	431.420	431.320	431.380	431.170	431.373
25000	534.260	534.240	534.280	534.110	534.260
30000	637.050	637.020	636.980		637.017
0	18.883	18.969			

จากตารางที่ 3.1 ช่อง UTM แสดงแรงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM และ x1 ถึง x4 แสดงค่า strain ที่อ่านได้จาก load cell มาตรฐาน ในหน่วยไมโครสเตรน ($\mu\epsilon$) ส่วน X average คือค่าเฉลี่ยของ strain x1 x2 และ x3

3.2.5 แปลงค่า strain ที่อ่านได้เป็น แรง (N)

นำข้อมูลจากตารางที่ 1 มาแทนค่าในสมการความสัมพันธ์ $y = 48.563x - 947.83$

ตั้ง (ภาคผนวก ก) โดยสมการนี้จะถูกนำมาใช้ ในการแปลงค่า Strain (ที่อ่านได้จาก load cell-standard) เป็นแรง (N)

ตัวอย่างเช่น ในระดับแรงที่ 10000 N

แทนค่า $y = 48.563(225.72) - 947.83 = 10013.81\text{N}$ จะได้ค่าแรงทั้งหมดดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าแรงที่ได้จากการแปลงค่า strain

UTM	Load cell (N)			
	x1	x2	x3	x4
0	-35.088	-30.815	-26.639	-25.667
5000	5014.250	5019.106	5019.591	5011.821
10000	10013.810	10013.320	10018.180	9999.727
15000	15013.860	15012.890	15012.400	15001.720
20000	20003.220	19998.360	20001.280	19991.080
25000	24997.440	24996.470	24998.410	24990.150
30000	29989.230	29987.770	29985.830	
0	-30.815	-26.639		

ต้องทำให้ค่าเริ่มต้นเป็น ศูนย์ เพื่อง่ายต่อการเปรียบเทียบระหว่างแรงของเครื่อง UTM กับแรงของ load cell standard ที่จุดเริ่มต้นเดียวกัน

ตัวอย่างเช่น ระดับแรงที่ 0 จะได้ $-35.0884 - (-35.0884) = 0$

ดังนั้นระดับแรงที่ 10000 จะได้ $10013.81 - (-35.0884) = 10048.89\text{ N}$ ค่าที่ได้ทั้งหมดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางค่าที่ได้จากการคำนวณ

UTM	Load cell (N)				average
	x1	x2	x3	x4	
0	0	0	0	0.971	0
5000	5049.338	5049.921	5046.230	5038.460	5048.496
10000	10048.899	10044.140	10044.819	10026.366	10045.953
15000	15048.945	15043.700	15039.038	15028.355	15043.895
20000	20038.308	20029.178	20027.915	20017.717	20031.800
25000	25032.527	25027.282	25025.048	25016.792	25028.286
30000	30024.318	30018.587	30012.468		30018.458
0	4.274	4.176			

3.2.6 การคำนวณเพื่อจัด Class ของเครื่อง UTM

หลังจากที่ได้ค่าแรงของ load cell standard จากตารางที่ 3 แล้วสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อประเมิน Class ของเครื่อง UTM ตามมาตรฐาน ISO 7500-1 และตัวอย่างการคำนวณดังต่อไปนี้

ค่าความละเอียดของสัมพัทธ์เครื่องของ UTM

สมการคือ
$$a = \frac{r}{F} \times 100$$

ตัวอย่างเช่น แทนค่าแรงที่ 10000N จะได้
$$a = \frac{1}{10000} \times 100 = 0.01\%$$

ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการกลับสู่ค่าศูนย์ของระบบการวัดแรงของเครื่องทดสอบ (relative zero error)

สมการคือ
$$f_0 = \frac{f_{10}}{f_N} \times 100$$

$F_{10} = 0$ เนื่องจากแรงตกค้างที่อ่านได้จากเครื่อง UTM = 0 จากภาคผนวก ข ตารางผลการทดลองครั้งที่ 4

ตัวอย่างเช่น แทนค่าแรงที่ 10000N จะได้
$$f_0 = \frac{0}{30000} \times 100 = 0\%$$

ค่าความผิดพลาดย้อนกลับสัมพัทธ์ (Relative reversibility error)

สมการคือ
$$v = \frac{F - F'}{\bar{F}} \times 100$$

ตัวอย่างเช่น แทนค่าแรงที่ 10000N จะได้
$$v = \frac{10044.889 - 10026.366}{10045.953} \times 100 = 0.1837\%$$

ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ของความแม่นยำ (Relative accuracy error)

สมการคือ
$$q = \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \times 100$$

ตัวอย่างเช่น แทนค่าแรงที่ 10000N จะได้
$$q = \frac{10000 - 10045.953}{10045.953} \times 100 = -0.4574\%$$

ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากความทวนซ้ำได้ของการวัด (Relative repeatability error)

สมการคือ
$$b = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\bar{F}} \times 100$$

ตัวอย่างเช่น แทนค่าแรงที่ 10000N จะได้
$$b = \frac{10048.889 - 10044.140}{10045.953} \times 100 = 0.0474\%$$

จากการคำนวณเพื่อประเมิน Class ตามสมการด้านบน โดยใช้ข้อมูลตารางที่ 3 มาคำนวณ จะได้ผลจากการคำนวณ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตารางแสดงค่า Relative accuracy error (q), Relative repeatability error (b), Relative reversibility error (v), Relative zero error (f_0) และ Relative Resolution (a) ที่ได้จากการคำนวณสำหรับการประเมิน Class

UTM	q (%)	b (%)	v (%)	f_0 (%)	a (%)
0				0	
5000	-0.9606	0.0731	0.1539	0	0.0200
10000	-0.4574	0.0474	0.1837	0	0.0100
15000	-0.2918	0.0659	0.0710	0	0.0067
20000	-0.1587	0.0519	0.0509	0	0.0050
25000	-0.1130	0.0299	0.0330	0	0.0040
30000	-0.0615	0.0395	0	0	0.0033

จากตารางการจัด Class ตามมาตรฐาน ISO 7500-1 ได้กำหนด Class ของเครื่อง UTM ได้ 4 ระดับ คือ class 0.5,1,2 และ 3 ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตาราง Class ตามมาตรฐาน ISO 7500-1

Class ของเครื่อง UTM	ค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ (%)				
	q	b	v	f ₀	a
0.5	±0.5	0.5	±0.75	±0.05	0.25
1	±1.0	1.0	±1.5	±0.1	0.5
2	±2.0	2.0	±3.0	±0.2	1.0
3	±3.0	3.0	±4.5	±0.3	1.5

3.2.7 การประเมิน Class ของเครื่อง UTM

ตามมาตรฐาน ISO7500-1 ได้มีการกำหนดการประเมิน Class ของเครื่อง UTM ไว้เพื่อจะได้ง่ายต่อการจัดว่าเครื่องที่สอบเทียบอยู่ Class ไດยั้งใช้งานได้ตามมาตรฐานหรือไม่

-ค่า q แรงที่ 10000N จะได้ค่ามาหนึ่งค่า ถ้าค่าอยู่ในช่วง±0.5 จะอยู่ใน class 0.5

ถ้าค่าอยู่ในช่วง±1.0 จะอยู่ใน class 1

ถ้าค่าอยู่ในช่วง ±2.0 จะอยู่ใน class 2

ถ้าค่าอยู่ในช่วง ±3.0 จะอยู่ใน class 3

ตัวอย่างเช่นแรงที่ 10000 N ค่า q= -0.4574 มีค่าอยู่ในช่วง±0.5 จะอยู่ใน class 0.5

- ค่า b แรงที่ 10000N จะได้ค่ามาหนึ่งค่า ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ0.5 จะอยู่ใน class 0.5

ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ1.0 จะอยู่ใน class 1

ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ2.0 จะอยู่ใน class 2

ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ3.0 จะอยู่ใน class 3

ตัวอย่างเช่นแรงที่ 10000N ค่า b=0.0474 มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ0.5 จะอยู่ใน class 0.5

-ค่า v แรงที่ 10000Nจะได้ค่ามาหนึ่งค่า ถ้าค่าอยู่ในช่วง±0.75 จะอยู่ใน class 0.5

ถ้าค่าอยู่ในช่วง±1.5 จะอยู่ใน class 1

ถ้าค่าอยู่ในช่วง±3.0จะอยู่ใน class 2

ถ้าค่าอยู่ในช่วง±4.5 จะอยู่ใน class 3

ตัวอย่างเช่นแรงที่ 10000N ค่า v= 0.1837 มีค่าอยู่ในช่วง±0.75 จะอยู่ใน class 0.5

-ค่า f_0 แรงที่ 10000Nจะได้ค่ามาหนึ่งค่า ถ้าค่าอยู่ในช่วง ± 0.05 จะอยู่ใน class 0.5
 ถ้าค่าอยู่ในช่วง ± 0.1 จะอยู่ใน class 1
 ถ้าค่าอยู่ในช่วง ± 0.2 จะอยู่ใน class 2

ตัวอย่างเช่นแรงที่ 10000N ค่า $f_0=0$

-ค่า a แรงที่ 10000N จะได้ค่ามาหนึ่งค่า ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 จะอยู่ใน class 0.5
 ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 จะอยู่ใน class 1
 ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.0 จะอยู่ใน class 2
 ถ้าค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.5 จะอยู่ใน class 3

ตัวอย่างเช่น แรงที่ 10000N ค่า $a=0.01$

มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.25 จะอยู่ใน class 0.5

จากผลการคำนวณค่าคุณสมบัติต่างๆที่ใช้ในการประเมิน Class ของเครื่อง UTM สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตารางที่ได้จากผลการประเมิน Class

UTM	Class ของเครื่อง UTM (%)				
	q	b	v	f_0	a
0				0.5	
5000	1	0.5	0.5	0.5	0.5
10000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
15000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
20000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
25000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
30000	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

ตัวอย่างตารางการกรอกข้อมูล

ตารางบันทึกข้อมูลช่วง Pre Load

	Load cell	Displacement	ค่าจริงที่อ่านได้
UTM	strain ($\times 10^{-6}$)	ของUTM (mm)	จากเครื่อง UTM
0			
30000			
0			
30000			
0			
30000			
0			

ตารางบันทึกข้อมูลขาขึ้น (X1)

UTM	Load cell	Displacement	ค่าจริงที่อ่านได้
	strain ($\times 10^{-6}$)	ของUTM (mm)	จากเครื่อง UTM
0			
5000			
10000			
15000			
20000			
25000			
30000			
0			

ตารางบันทึกข้อมูลขาขึ้น (X2)

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement ของUTM (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0			
5000			
10000			
15000			
20000			
25000			
30000			
0			

ตารางบันทึกข้อมูลขาขึ้น (X3),(X4)

UTM	Load cell strain ($\times 10^{-6}$)	Displacement ของUTM (mm)	ค่าจริงที่อ่านได้จากเครื่อง UTM
0			
5000			
10000			
15000			
20000			
25000			
30000			
25000			
20000			
15000			
10000			
5000			
0			

บรรณานุกรม

- [1] ISO 7500-1:2004
- [2] ISO 376
-
- [3] หนังสือการสอบเทียบเครื่องมือวัด (Fundamental Parameter and Application).
พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : แผนกวารสารวิชาการสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น),
2551



ประวัติผู้จัดทำโครงการ

ชื่อ-นามสกุล : นายทรงพล สายอรุณ
 ภูมิลำเนา : 65 หมู่ 1 ต.บ้านดง อ.ชาติตระการ จ. พิษณุโลก 65170
 ประวัติการศึกษา : จบระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนชาติตระการวิทยา จังหวัดพิษณุโลก
 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ชื่อ-นามสกุล : นายสมชาย ภูผาศัยศิริ
 ภูมิลำเนา : 146 หมู่ที่ 14 ตำบลบ้านตู อำเภอมือง จังหวัดเชียงราย 57100
 ประวัติการศึกษา : จบระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนดำรงราษฎร์สงเคราะห์
 จังหวัดเชียงราย ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ชื่อ-นามสกุล : นางสาวสุนิสา มีสุโข
 ภูมิลำเนา : 91/1 หมู่ที่ 11 ตำบลบ้านไร่ อำเภอสรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย 64120
 ประวัติการศึกษา : จบระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบ้านไร่พิทยาคม จังหวัดสุโขทัย
 ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4
 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร