

เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

ปริญญานิพนธ์
ของ
ประมาณ จันทรักษา

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2551

ประมาณ จันทรักษา. (2551) . เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm .ปริณิธานิพนธ์ วศ.ม.(วิศวกรรม
เครื่องกล) .กรุงเทพ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.คณะกรรมการควบคุม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิต บัวแก้ว, รองศาสตราจารย์ วรณ อาจฤทธิ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm โดยใช้หลักการของคานและน้ำหนักตายตัว (DeadWeight Type) ทำการประมวลผลให้อยู่ในรูปของทอร์ก ลักษณะเด่นของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานคือ จุดหมุนและที่ปลายคานทั้งสองข้างใช้แผ่นโลหะบางความหนา 0.03mm ความสามารถในการวัดของเครื่องได้จากการประเมิน ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดความยาวของคาน การสมดุลของคาน ความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง และแรงที่กระทำกับคาน และเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องได้ทำการเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ MODEL No: Dm-BNME 1,000 Nm S/N 153 GTM ที่ได้รับการยอมรับแล้ว

ผลการวิจัยพบว่า เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10Nm มีความไม่แน่นอนของการวัดอยู่ที่ 0.004% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการเปรียบเทียบเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm กับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm พบว่ามีค่ารีพีตอะบิลิตีเท่ากับ 0.002 % และ 0.02 % ค่ารีโพรดูซิบิลิตีเท่ากับ 0.005 % และ 0.015 % ค่าลิเนียริลิตีเท่ากับ 0.0048 % และ 0.01 % ค่าความเบี่ยงเบนของการวัด $2.461\text{E-}02$ % และ $2.461\text{E-}02$ % ตามลำดับ

10 Nm TORQUE STANDARD MACHINE

AN ABSTRACT

BY

PRAMANN CHANTARAKSAR

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

May 2008

Pramann Chantaraksar.(2008). *10 Nm Torque Standard Machine*. Master thesis, M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University.
Advisor Committee : Asst.Prof. Vichit Buakaew. Assoc.Prof.Varathon Arjith

In this research, an objective to create 10 Nm torque standard machine (deadweight type method) and evaluation in torque. The identity of 10 Nm torque standard machine has a fulcrum point using to hold beam with thin stainless steel sheet 0.03 millimeters thick and hold a weight at both end of beam. Measuring evaluation from Uncertainty of 10 Nm torque standard machine from Arm length, Equilibrium of arm length, Bending stiffness of thin metal and Force. Validation to compare with 1,000 Nm model Dm- S/N 153 GTM of National institute of metrology (Thailand)

It is found that 10 Nm torque standard machine has an Uncertainty of 0.004% defined in criteria and comparative results during 1,000 Nm model Dm- S/N 153 GTM and 10 Nm torque standard machine, Repeatability of 0.02% and 0.002%, Reproducibility of 0.015% and 0.005%, Linearity of 0.011% and 0.0048 %, Deviation of 2.46E-2% and 2.46E-2% respectively.

เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

ปริญญานิพนธ์
ของ
ประมาณ จันทรักษา

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2551

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

ของ

ประมาณ จันทรักษา

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวិชากรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญสิริ จิระเดชากุล)

วันที่.....เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว)

.....ประธาน

(รองศาสตราจารย์. ชาญ ถนัดงาน)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วรณ อัจฉฤทธิ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิชิต บัวแก้ว)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วรณ อัจฉฤทธิ์)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมงคล)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิจิต บัวแก้ว ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ วรธน อัจฉฤทธิ์ กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ชาญ ถนัดงาน ประธานสอบปริญญานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชัย อัมมมมงคล กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นกับปริญญานิพนธ์ ตลอดจนช่วยแก้ปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ พล.อ.ต.เพียร โตท่าโรง ผู้อำนวยการสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ คุณวีระ ตูลาสมบัติ หัวหน้าฝ่ายมาตรวิทยาเชิงกล คุณทัศนัย แสนพลพัฒน์ หัวหน้าห้องปฏิบัติการเทอร์กและความแข็ง พนักงานห้องปฏิบัติการความแข็ง พนักงานห้องปฏิบัติการเทอร์ก พนักงานห้องปฏิบัติการแรง พนักงานห้องปฏิบัติการมวล พนักงานห้องปฏิบัติการความยาว พนักงานห้องปฏิบัติการอุณหภูมิ ตลอดจนพนักงานสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือ ให้คำปรึกษา และคำแนะนำ

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และขอขอบคุณ เพื่อนร่วมชั้น โครงการความร่วมมือ หลักสูตร ปริญญาโท มศว. และ รร. จปร. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล รุ่น 3 ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนส่งกำลังใจให้กันเสมอ

ประมาณ จันทรักษา

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย	2
นิยามศัพท์	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ทฤษฎีพื้นฐานทอร์ก	4
การวัด	6
ความสามารถสลับกลับได้	10
การประเมินค่าผลของการวัดทอร์กมาตรฐาน	14
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
3 วิธีดำเนินการวิจัย	19
เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	21
วิธีการเตรียมปรับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm และเครื่องวัดทอร์ก มาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm	25
วิธีการประเมินค่าความไม่แน่นอนจากการวัดของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	27
วิธีการเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm กับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm	32
4 ผลการวิจัย	38
ผลการประเมินค่าส่วนประกอบของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	38
ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	43
ผลการเปรียบเทียบค่าการวัดที่ได้จากเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm กับ เครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm	46

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	53
สรุปผล	53
อภิปรายผล	54
ข้อเสนอแนะ	55
บรรณานุกรม	56
ภาคผนวก	58
ภาคผนวก ก ใบรับรองผลการวัดส่วนประกอบและอุปกรณ์ทดลอง	59
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	64
ภาคผนวก ค ตารางผลการทดลอง	68
ภาคผนวก ง ตารางสมบัติของ อะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม	110
ภาคผนวก จ บทความทางวิชาการงานประชุมวิชาการสมาคมมาตรวิทยา แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่วันที่ 11 – 12 กุมภาพันธ์ 2551 จัดโดย สมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน..	112
ภาคผนวก ช คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย	128
ภาคผนวก ซ แบบเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	131
ประวัติย่อผู้วิจัย	136

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ข้อมูลค่าความยาวของคาน 27	27
2 ค่าผลการปรับความยาวโดยใช้ตัวแปรสัญญาณทอร์ก 39	39
3 ค่าผลการสมดุลคานอย่างละเอียด 40	40
4 ค่าความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง,S 41	41
5 ข้อมูลค่ามวลของตุ้มน้ำหนัก 43	43
6 ค่าความไม่แน่นอนของการวัด ความยาวของคาน,L 44	44
7 ค่าความไม่แน่นอนของการวัดการสมดุลคาน,E 44	44
8 ค่าความไม่แน่นอนของการวัดความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง,S 45	45
9 ค่าความไม่แน่นอนของการวัด แรงที่กระทำกับคาน,F 45	45
10 ค่าความไม่แน่นอนของการวัดทอร์กรวม 46	46
11 ผลการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm กับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm 54	54
12 ตัวอย่างการบันทึกผลการทดลองการปรับความยาวคาน 65	65
13 แสดงตัวอย่างการบันทึกผลการทดลองค่าความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง 65	65
14 ตัวอย่างองค์ประกอบของค่าความไม่แน่นอนของการวัดแรง,F 66	66
15 ตัวอย่างองค์ประกอบของค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวม 67	67
16 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา) 69	69
17 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ) 70	70
18 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ) 71	71
19 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ) 72	72
20 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ) 73	73
21 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ) 74	74
22 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ) 75	75
23 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ) 76	76
24 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ) 77	77
25 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)..... 78	78
26 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา) 89	89
27 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ) 80	80

บัญชีตาราง(ต่อ)[illegible]

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
58 สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม 316	111
59 สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม 316 (ต่อ)	111

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงโมเมนต์ของแรงรอบจุดหมุน	4
2 แสดงการส่งผ่านแรงของโมเมนต์รอบจุดหมุน	5
3 แสดงโมเมนต์ของแรงคู่ควบ	5
4 แสดงการใช้ประแจวัดทอร์ก	6
5 แสดงภาพตารางการแปลงหน่วยของทอร์ก	7
6 แสดงบทบาทของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ในการสอบเทียบและความสามารถ สอบกลับได้	11
7 แผนภูมิความสามารถสอบกลับได้ของห้องปฏิบัติการทอร์ก	12
8 แผนภาพความสามารถสอบกลับได้ของห้องปฏิบัติการทอร์กสถาบันมาตรวิทยา แห่งชาติ	13
9 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย	20
10 แสดงชุดวัตถุดิบและเครื่องมือ และความชื้น	21
11 แสดงคอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ประกอบ	21
12 แสดงตัวแปรสัญญาณทอร์ก	22
13 แสดงอินดิเคเตอร์	22
14 แสดงนาฬิกาจับเวลา	23
15 แสดงระดับน้ำ	23
16 แสดงเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	24
17 แสดงเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm	24
18 แสดงการสมดุลคาน ในแนวตั้งและในแนวนอน	25
19 แสดงชุดปรับความยาวคาน	26
20 แสดงการปรับระดับของคานโดยใช้ระดับน้ำ	26
21 แสดงความยาวรวมของคาน	28
22 แสดงขั้นตอนการใส่ภาระที่กระทำกับคาน	29
23 แสดงภาพประกอบการคำนวณการสมดุลคาน	29
24 แสดงขั้นตอนการทริมเวต เมื่อใส่ภาระที่กระทำกับคานแล้ว	30
25 การหาค่าความความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่น โลหะบาง	31
26 แสดงลักษณะของตุ้มน้ำหนัก	32

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ตาราง	หน้า
27 แสดงการสอบเทียบเพื่อหาค่ารีฟิตอะบิลิตี้ และค่ารีโพรวิชันบิลิตี้	33
28 แสดงการสอบเทียบเพื่อหาค่าการเยื้องศูนย์ของทอร์ก	35
29 แสดงการปรับความยาวคานทั้งสองข้างให้เท่ากัน	38
30 แสดงค่าการปรับความยาวของคานโดยใช้ตัวแปรสัญญาณทอร์ก	39
31 แสดงการปรับความยาวคานโดยใช้วิธีทริมเวต	40
32 แสดงค่าผลการสมดุลของคานโดยใช้วิธีทริมเวต	41
33 แสดงค่าความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่น โลหะบาง	42
34 แสดงการเปรียบเทียบค่ารีฟิตอะบิลิตี้	47
35 แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์รีฟิตอะบิลิตี้	47
36 แสดงผลการวัดรีโพรวิชันบิลิตี้	48
37 แสดงเปอร์เซ็นต์รีโพรวิชันบิลิตี้	48
38 แสดงการเปรียบเทียบค่าลิเนียร์ลิตี้	49
39 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าลิเนียร์ลิตี้	49
40 แสดงการเปอร์เซ็นต์การเยื้องศูนย์ของทอร์ก 1,000 Nm	50
41 แสดงเปอร์เซ็นต์การเยื้องศูนย์ของทอร์ก 10 Nm	50
42 แสดงผลการเปรียบเทียบความเบี่ยงเบนของการวัด	51
43 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลการเปรียบเทียบความเบี่ยงเบนของการวัด	51
44 แสดงเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	53
45 แสดงใบรับรองผลการวัดความยาวคาน	60
46 แสดงใบรับรองผลตัวแปรสัญญาณทอร์ก	61
47 แสดงใบรับรองผลระดับน้ำ	62
48 แสดงใบรับรองผลนาฬิกาจับเวลา	63
49 แสดงภาพ 3 มิติของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	132
50 แสดงภาพฉายของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	132
51 แสดงคานของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	133
52 แสดงฐานรองคาน ของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	133
53 แสดงแผ่นโลหะบางของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	134
54 แสดงตม้น้ำหนักของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	134
55 แสดงฐานของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm	135

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การพัฒนาด้านมาตรวิทยาของโลกในปัจจุบันได้ดำเนินไปอย่างรวดเร็วในมิติของการเพิ่มความแม่นยำให้มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากความต้องการของโลกทั้งทางด้านวิทยาศาสตร์และการค้าระหว่างประเทศที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว กลุ่มประเทศที่มีความสามารถทางด้านการวัดต่ำกว่าจะเป็นฝ่ายเสียเปรียบต่อกับประเทศที่มีขีดความสามารถในทางการวัดสูงโดยอาจถูกนำไปใช้เป็นมาตรการกีดกันทางการค้า ซึ่งเป็นสาเหตุให้ประเทศต่างๆในโลกหันมาปรับเอาระบบควบคุมคุณภาพต่างๆ เช่น ISO 9000 และ ISO 14000 มาใช้ในระบบการผลิตและการบริการเพื่อเป็นมาตรการในการสนับสนุนผลิตผลทางการผลิตและบริการของประเทศนั้นๆ

เนื่องจากในปัจจุบันโลกเข้าสู่ยุคโลกาภิวัตน์การติดต่อทางธุรกิจและการค้าระหว่างประเทศ นำมาสู่ความมั่งคั่งของประเทศ ซึ่งประเทศที่มีความเข้มแข็งทางเศรษฐกิจมักเป็นประเทศที่มีความเข้มแข็งทางด้านความสามารถในการใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยเป็นเครื่องมือหลักในการสนับสนุน บุกเบิกหรือแม้แต่กีดกันทางการค้าของตน อย่างไรก็ตามเมื่อมีการค้าขายระหว่างกันอย่างกว้างขวางเกิดขึ้นในโลก ความถูกต้องของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ก็ยิ่งต้องถูกเน้นมากขึ้นด้วย ปัญหาที่ตามมาคือการวัดและทดสอบสมบัติหรือคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ซื้อขายกัน ซึ่งจะถูกระงับโดยผู้ซื้อและผู้ขาย หากเกิดการได้เปรียบหรือเสียเปรียบกันขึ้นเนื่องจากผลการตรวจสอบของผู้ขายและผู้ซื้อไม่สอดคล้องกัน ทำให้เกิดการโต้แย้งขึ้นซึ่งอาจรุนแรงถึงขั้นผลิตภัณฑ์ที่จะซื้อขายกันถูกส่งกลับเนื่องจากมีสมบัติหรือคุณลักษณะไม่เป็นไปตามที่ตกลงกันไว้จึงเกิดการสูญเสียอย่างมหาศาล แต่ละประเทศจึงพยายามก่อตั้งหน่วยงานขึ้นมารับผิดชอบในการพัฒนาระบบการวัดของประเทศอื่นได้แก่สถาบันมาตรวิทยาของแต่ละประเทศ (National Metrology Institute: NMI)

ดังนั้นสถาบันมาตรวิทยาของแต่ละประเทศจึงเป็นตัวกลางระหว่างระบบการวัดภายในประเทศของตนเองกับระบบการวัดระหว่างประเทศ ซึ่งผู้ทำหน้าที่เป็นแกนกลางหรือตัวแทนคือ The International Bureau of Weights and Measures (BIPM) โดยจะทำหน้าที่หลักในการเชื่อมโยงระบบการวัดระหว่างประเทศของแต่ละประเทศให้สอดคล้องกันทั้งนี้เพื่อให้ระบบการวัดในแต่ละประเทศสอดคล้องกันมากที่สุด การดำเนินการดังกล่าวคือการแบ่งกลุ่มประเทศต่างๆทั่วโลกออกเป็นกลุ่มๆ โดยให้แต่ละกลุ่มมีสมาชิกอยู่ในภูมิภาคเดียวกัน เช่น สหพันธรัฐเยอรมนี อังกฤษ ฝรั่งเศส อิตาลี อยู่ในกลุ่ม EUROMET หรือ ไทย ญี่ปุ่น จีน ไต้หวัน มาเลเซีย สิงคโปร์ ออสเตรเลีย อินเดีย อยู่ในกลุ่ม APMP เป็นต้น หลังจากนั้นคณะกรรมการของ BIPM ก็จะจัดให้มีการวัดเปรียบเทียบผลระหว่างกันโดยตัวแทนของกลุ่มต่างๆ (ซึ่งมักดำเนินการโดยสถาบันมาตรวิทยาที่มีความเข้มแข็งทางด้านวิชาการและสามารถสถาปนามาตรฐานปฐมภูมิได้และเป็นที่ยอมรับใน

ความสามารถในโลกแล้ว) โดยการวัดเปรียบเทียบผลนี้จะดำเนินการในทุกหน่วยวัดรวมถึงหน่วยวัดของทอร์กด้วย ปัญหาที่เกิดขึ้นในโลกปัจจุบันคือสถาบันมาตรวิทยาที่มีความสามารถสูงจะสามารถสถาปนามาตรฐานปฐมภูมิขึ้นเอง ซึ่งจากความสามารถดังกล่าวจะช่วยให้ได้รับการยอมรับในสังคมมาตรวิทยาระหว่างประเทศ แต่ประเทศที่ไม่มีขีดความสามารถถึงขั้นนั้นจำเป็นต้องใช้วิธีส่งมาตรฐานอ้างอิงของตนเองไปรับการสอบเทียบจากมาตรฐานปฐมภูมิของประเทศอื่นดังนั้นการยอมรับในสังคมโลกจึงลดลง

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติมีหน้าที่ พัฒนาระบบมาตรวิทยา จัดหาและเก็บรักษามาตรฐานแห่งชาติ วัสดุอ้างอิงมาตรฐานของประเทศทุกสาขา เพื่อให้สอดคล้องกับระบบมาตรวิทยาสากล รวมถึงการถ่ายทอดความถูกต้องของการวัดไปสู่มาตรฐานแห่งชาติ ซึ่งสถาบันได้ดำเนินการพัฒนาขีดความสามารถทางการวัดในสาขาการวัดต่างๆ มาอย่างต่อเนื่อง ภายใต้การสนับสนุนทางด้านวิชาการจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของมิตรประเทศอันได้แก่ ออสเตรเลีย จีน ญี่ปุ่น และเยอรมัน ซึ่งสถาบันฯ ได้รักษาและถ่ายทอดให้กับภาคอุตสาหกรรมในประเทศเพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียว

ในการวัดทอร์กหากต้องการให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำตามต้องการจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่ได้รับการสอบเทียบจากเครื่องมือมาตรฐานทอร์กที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงกว่าซึ่งเครื่องมือมาตรฐานดังกล่าวนั้นจะต้องได้รับการสอบเทียบมาจากเครื่องมือมาตรฐานด้านทอร์กที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูงกว่าขึ้นไปอีก เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆ ตามลำดับขั้นตอนดังกล่าวจำเป็นต้องสิ้นสุดที่เครื่องมือประเภทหนึ่งที่ไม่ต้องการการสอบเทียบจากเครื่องมือมาตรฐานด้านทอร์กอื่นๆ อีก เครื่องมือประเภทนี้เรียกว่าเครื่องมือมาตรฐานปฐมภูมิ เครื่องมือวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิที่มีในประเทศไทยปัจจุบันเป็นเครื่องที่ผลิตในประเทศเยอรมัน ซึ่งถ้าต้องการสถาปนาด้านทอร์กนั้น จำเป็นที่จะต้องสร้างเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานขึ้นเอง ดังนั้นจึงมีแนวความคิดในการที่จะวิจัย และสร้างเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างและประเมินเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าการวัดที่ได้จากเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานที่สร้างขึ้น กับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ ที่ได้รับการยอมรับแล้ว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ใช้แผ่นโลหะบางขนาด 0.03 mm เป็นจุดศูนย์กลางทอร์กและส่งแรงที่กระทำกับคาน

1.3.2 เครื่องวัดทอร์กที่ได้รับการยอมรับแล้วคือ เครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm

TYPE / MODEL No: Dm - BNME 1,000 Nm S/N 153 GTM

1.3.3 เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm ที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้เป็นเครื่องที่ได้จากการออกแบบและคำนวณที่ผู้วิจัยและสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้คำนวณแล้ว

1.3.4 ค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty) ที่สามารถยอมรับได้ไม่เกิน 0.05 % ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

1.4 นิยามศัพท์

1.4.1 รีพีตอะบิลิตี (Repeatability) หมายถึง การที่ค่าของผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อทำการทดลองที่มีเงื่อนไขเหมือนกันเดิม

1.4.2 รีโพรดิวซิบิลิตี (Reproducibility) หมายถึง ค่าความใกล้เคียงกันของผลการวัดปริมาณหนึ่งๆ โดยใช้วิธีเหมือนกันภายใต้การเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของการวัด

1.4.3 10 Nm TSM หมายถึง เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm ที่สร้างขึ้น

1.4.4 1,000 Nm TSM หมายถึง เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 1,000 Nm ที่ได้รับการยอมรับแล้วซึ่งสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติใช้สำหรับเป็นเครื่องปฐมภูมิ

1.4.5 ความไม่แน่นอนของการวัด หมายถึง ค่าที่รายงานมากับผลของการวัด จะบอกลักษณะการกระจายของค่า ซึ่งสามารถอธิบายถึงปริมาณที่ถูกวัดได้

1.4.6 มาตรฐานปฐมภูมิ หมายถึง มาตรฐานซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีคุณสมบัติทางมาตรวิทยาสองชุด และมีค่าเป็นที่ยอมรับโดยปราศจากการอ้างอิงถึงมาตรฐานอื่นที่เป็นปริมาณเดียวกัน

1.4.7 การสอบเทียบ หมายถึง การดำเนินการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ชี้บอกโดยเครื่องมือวัด หรือระบบการวัด กับค่าสมนัยที่รู้ของปริมาณที่วัดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้

1.4.8 ทริมเวต (Trim Weight) หมายถึง การปรับค่าความสมดุลของคานโดยใช้วิธีเพิ่มมวล

1.4.9 แผ่นโลหะบาง หมายถึง แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมความหนา 0.03 mm

1.4.10 ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded uncertainty) หมายถึง ปริมาณ ที่กำหนดช่วงรอบรอบผลการวัดที่อาจหวังได้ว่าครอบคลุมส่วนใหญ่ของการแจกแจงค่าที่สามารถจะเป็นตัวแทนของปริมาณที่ถูกวัด

1.4.11 ลิเนียริลิตี (Linearity) หมายถึง ค่าผลของการวัดทอร์กซึ่งแสดงค่าปริมาณที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง ในลักษณะภาวะเส้นตรง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถที่จะสถาปนาการทดสอบทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิสำหรับประเทศได้

1.5.2 สามารถใช้เป็นเครื่องสำหรับสอบเทียบของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้

1.5.2 สามารถนำผลที่ได้ไปเผยแพร่เพื่อเป็นความรู้เพื่อที่จะสามารถพัฒนาต่อไปได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยเพื่อให้ได้ผลการวัดทอร์กที่มีมาตรฐานมีค่าความถูกต้องและความแม่นยำสูงมาก จึงมีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยทฤษฎีและความรู้ในด้านต่างๆ เช่น ด้านวิศวกรรม ด้านการวัด ด้านสถิติ มาตรฐานอ้างอิงและอีกหลายด้านมาประมวลผลประกอบกันเพื่อสร้างเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน ขนาด 10 Nm จนมีความถูกต้องและแม่นยำสามารถที่จะเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับแล้วจนได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

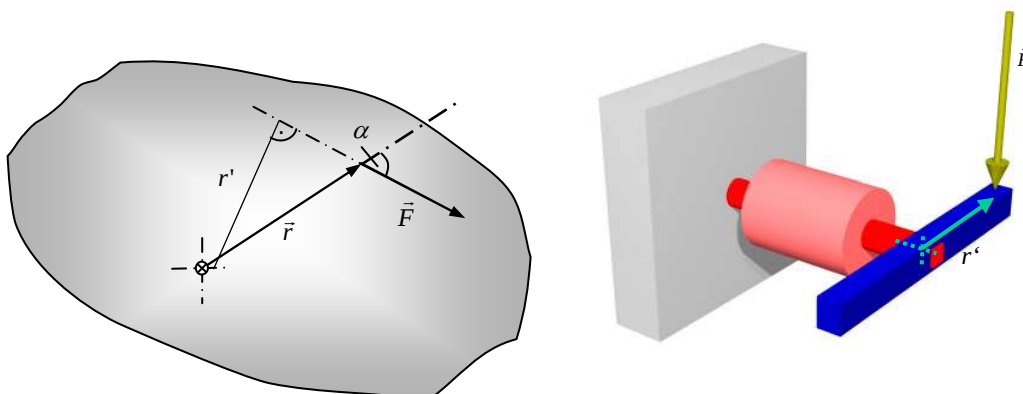
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานทอร์ก (Torque Basic theory)

นิยาม (Definition)

โมเมนต์ของแรงรอบจุด เท่ากับผลของการคูณแบบเวกเตอร์ ของระยะจากจุดหมุนถึงแนวแรงกับแรง (The moment of a force about a point is equal to the vector product of the radius vector, from this point to any point on the line of action of the force, and the force. : ISO 31/III-1978 (E))

Remark: In elasticity, M is used for bending moment and T for twisting or torsional moment

ทอร์ก (Torque) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โมเมนต์ของแรง (Moment of force) เป็นปริมาณอนุพันธ์ (Derived quantity) มีหน่วยการวัดที่เป็นไปตามมาตรฐานสากล (International System of Units, SI Units) คือ Nm โดยมีหลักการพื้นฐานดังภาพประกอบ 1 ภาพประกอบ 2 และภาพประกอบ 3



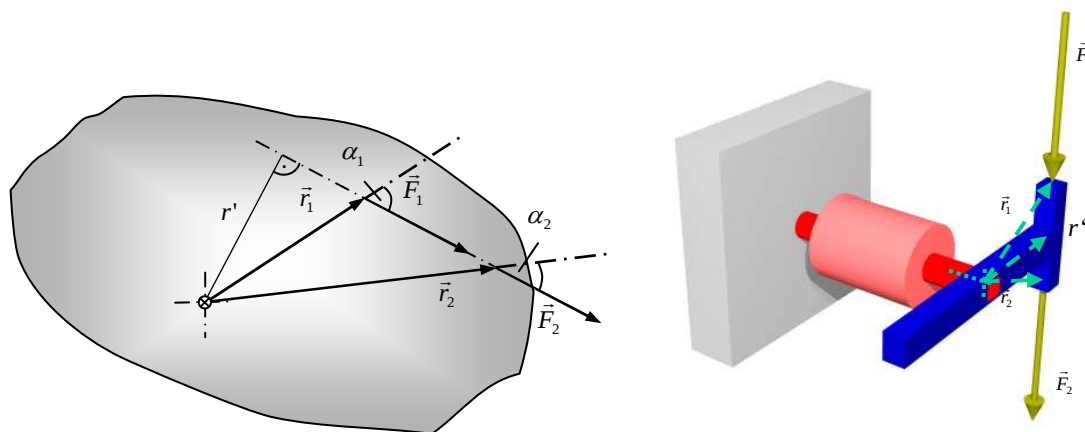
ภาพประกอบ 1 แสดงโมเมนต์ของแรงรอบจุดหมุน
จากภาพประกอบ 1 จะได้สมการดังนี้

$$\vec{M} = \vec{r} \cdot \vec{F} \quad (1)$$

$$M = r \cdot F \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

และในกรณีที่ $\alpha = 90^\circ$ จะได้สมการดังนี้

$$M = r' \cdot F \quad (3)$$



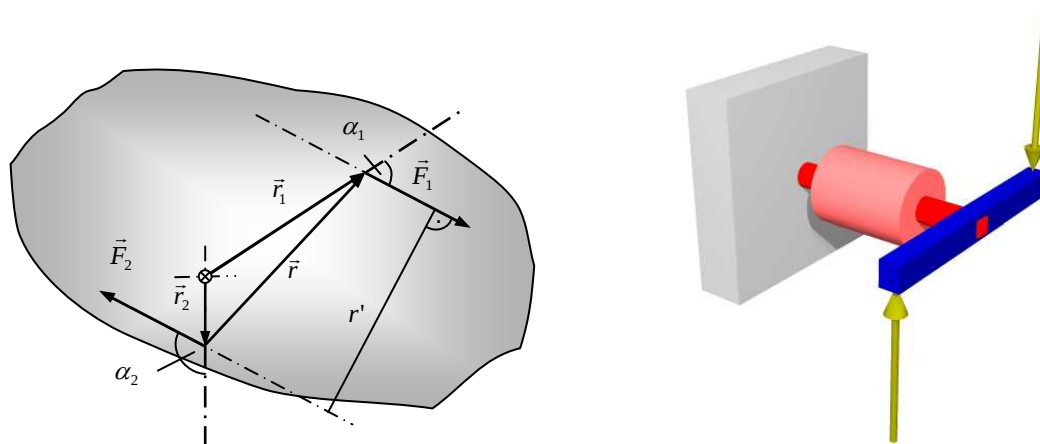
ภาพประกอบ 2 แสดงการส่งผ่านแรงของโมเมนต์รอบจุดหมุน

ในกรณีของภาพประกอบ 2 จากสมการที่ (3) $M = r' \cdot F$

ถ้าให้ $\vec{F}_1 = \vec{F}_2$ (4)

จะได้ $\vec{r}_1 \times \vec{F}_1 = \vec{r}_2 \times \vec{F}_2$ (5)

ดังนั้น $\vec{M}_1 = \vec{M}_2$ (6)



ภาพประกอบ3 แสดงโมเมนต์ของแรงคู่ควบ

ในกรณีของภาพประกอบ 3

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_1 \quad (7)$$

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0 \quad (8)$$

$$\vec{M} = \vec{r}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2 \quad (9)$$

$$\vec{M} = \vec{r}_1 \times \vec{F}_1 - \vec{r}_2 \times \vec{F}_1 \quad (10)$$

$$\vec{M} = (\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \times \vec{F}_1 = \vec{r} \times \vec{F}_1 \quad (11)$$

ดังนั้นจะได้

$$M = r' \cdot |\vec{F}_1| = r' \cdot F \quad (12)$$

$\vec{M}$ = โมเมนต์ มีหน่วยเป็น Nm

$\vec{F}$ = แรง มีหน่วยเป็น N

$\vec{r}$ = รัศมีจากจุดหมุนถึงแนวแรง มีหน่วยเป็น m

r' = รัศมีจากจุดหมุนถึงแนวแรงตั้งฉาก มีหน่วยเป็น m

ซึ่งทั้งสามกรณีข้างต้นเป็นหลักการพื้นฐานที่สอดคล้องและสนับสนุนหลักการทำงานของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ (Torque Primary Machine) ของห้องปฏิบัติการทอร์ก

2.2. การวัด (Measurement)

การวัดคือปฏิบัติการทั้งปวงที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการตัดสินค่าของปริมาณ (Set of operation having the object of determining a value of a quantity: VIM 2.1) ผลลัพธ์ของการวัดจะแบ่งเป็นสองส่วน คือ ค่าที่วัดได้พร้อมความไม่แน่นอนของค่าที่วัดได้ส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งคือหน่วยการวัด โดยที่การวัดเป็นปฏิบัติการทางเทคนิค ที่ต้องปฏิบัติตามวิธีการที่กำหนดขั้นตอนไว้แล้ว เพื่อการเปรียบเทียบกันระหว่างปริมาณที่ถูกวัดกับปริมาณมาตรฐาน (Standard) ซึ่งเป็นตัวแทนของหน่วยวัดซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดนั่นเองการวัดทอร์กในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานในหลากหลายรูปแบบและหลากหลายอุปกรณ์ ดังจะแสดงให้เห็นดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 การใช้ประแจวัดทอร์ก

ซึ่งจากภาพเป็นเพียงตัวอย่างส่วนหนึ่งที่แสดงให้เห็นว่าการวัดทอร์กเป็นสิ่งสำคัญมากเพียงใด ซึ่งการวัดที่ผิดพลาดอาจจะหมายถึง ความเสียหายต่อชีวิต ความเสียหายต่อธุรกิจ และความเสียหายต่อสภาวะแวดล้อมได้

2.2.1 ระบบของหน่วยวัด (The system of units)

1 หน่วยรากฐาน (SI base units)

หน่วยรากฐานเป็นหน่วยวัดรากฐานที่หน่วยวัดอื่นๆ ทั้งหมดสามารถสอบกลับมาได้ ในปัจจุบันประกอบด้วย 7 หน่วยหลัก

2 หน่วยอนุพันธ์ (SI derived unit)

หน่วยอนุพันธ์ คือหน่วยซึ่งอาจจะถูกแสดงในเทอมของหน่วยรากฐานโดยวิธีของเครื่องหมายทางคณิตศาสตร์โดยการคูณและหาร หน่วยอนุพันธ์จะถูกให้ชื่อและสัญลักษณ์จำเพาะ ซึ่งชื่อและสัญลักษณ์จำเพาะเหล่านี้อาจจะถูกใช้รวมเข้าด้วยกันเพื่อบอกหน่วยของปริมาณอื่นๆ

3 หน่วยที่ถูกใช้กับระบบ SI (Units used with the SI)

4 หน่วยของทอร์ก และการแปลงค่า (Unit of torque and conversion value)

หน่วยของทอร์กในระบบ SI สามารถแปลงไปสู่หน่วยของทอร์กในระบบต่างๆ ได้ดัง ภาพประกอบ 5

	SI UNIT SYSTEM			GRAVITY UNIT SYSTEM			AMERICAN UNIT SYSTEM		
	mN·m	cN·m	N·m	gf·cm	kgf·cm	kgf·m	ozf·in	lbf·in	lbf·ft
1mN·m =	1	0.1	0.001	10.2	0.0102	0.000102	0.142	0.00885	0.000738
1cN·m =	10	1	0.01	102	0.102	0.00102	1.42	0.0885	0.00738
1N·m =	1000	100	1	10200	10.2	0.102	142	8.85	0.738
1gf·cm =	0.0981	0.00981	0.0000981	1	0.001	0.00001	0.0139	0.000868	0.0000723
1kgf·cm =	98.1	9.81	0.0981	1000	1	0.01	13.9	0.868	0.0723
1kgf·m =	9810	981	9.81	100000	100	1	1390	86.8	7.23
1ozf·in =	7.06	0.706	0.00706	72.0	0.072	0.00072	1	0.0625	0.00521
1lbf·in =	113	11.3	0.113	1150	1.15	0.0115	16	1	0.0833
1lbf·ft =	1360	136	1.36	13800	13.8	0.138	192	12	1

ภาพประกอบ 5 แสดงตารางการแปลงหน่วยของทอร์ก

2.2.2 ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty)

ความไม่แน่นอนของการวัด หมายถึง พารามิเตอร์ที่รวมมากับผลของการวัด ที่บอกลักษณะการกระจายของค่า ซึ่งสามารถอ้างได้อย่างสมเหตุสมผลว่าเป็นของปริมาณที่ถูกวัดนั้น (Parameter, associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measured: VIM 3.9)

จากนิยามข้างต้น สามารถให้ความหมายของความไม่แน่นอนของการวัดได้ว่า ความไม่แน่นอนของการวัด คือ สิ่งที่บอกลักษณะการกระจายของค่า ซึ่งสามารถอ้างได้อย่างสมเหตุสมผลว่าเป็นของปริมาณที่ถูกวัด ความไม่แน่นอนของการวัดเกิดขึ้นทุกครั้งที่ในการถ่ายทอดความถูกต้องของการวัดไม่ว่าจะเป็นขั้นตอนไหนของความสามารถสอบกลับได้ ซึ่งในแต่ละระดับของการวัดจะเกิดความไม่แน่นอนของการวัดสะสมขึ้น

เรื่อยๆ จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการถ่ายทอดการวัดของแต่ละห้องปฏิบัติการและความไม่แน่นอนอาจเกิดขึ้นจากหลายสาเหตุ เช่น วิธีการวัด เครื่องมือวัด ผู้ปฏิบัติการ และสภาวะแวดล้อมในการวัด เป็นต้น ความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องคำนวณโดยวิธีที่เป็นที่ยอมรับอย่างเป็นสากล และโดยทั่วไปจะต้องรายงานที่ระดับความเชื่อมั่น 95% การคำนวณความไม่แน่นอนของการวัด ในแต่ละขั้นตอนของการถ่ายทอดความถูกต้องนั้น จะต้องจัดทำไว้เป็นเอกสาร เพื่อให้สามารถทวนสอบความถูกต้องเพื่อเป็นการยืนยันความสามารถสอบกลับได้ของการวัด ค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะถูกรายงานร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อนของการวัดในใบรายงานผลการสอบเทียบโดยห้องปฏิบัติการสอบเทียบ และค่าที่รายงานนี้จะเป็นจริงก็เฉพาะ ณ เวลาที่ทำการสอบเทียบและภายใต้เงื่อนไขของการสอบเทียบที่ระบุเท่านั้น การใช้เครื่องมือวัดภายใต้เงื่อนไขเดียวกันกับผลการสอบเทียบ แต่ในเวลาที่ยาวออกไปหรือยิ่งกว่านั้นคือการใช้เครื่องมือวัดในเงื่อนไขที่ต่างออกไปจากผลการสอบเทียบก็จะยิ่งทำให้ค่าความคลาดเคลื่อน และความไม่แน่นอนของการวัดยังมีค่ามากขึ้นกว่าที่ระบุไว้ในรายงานผลการสอบเทียบ ซึ่งบางครั้งอาจจะเกินกว่าที่จะยอมรับได้โดยผู้เกี่ยวข้อง ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ระบุไว้ในใบรายงานผลการสอบเทียบจะได้รับการยอมรับว่ามีความสัมพันธ์กับมาตรฐานแห่งชาติได้ก็ต่อเมื่อใบรายงานผลการสอบเทียบนั้นออกให้โดยห้องปฏิบัติการที่สามารถแสดงความสามารถโดยผ่านกระบวนการรับรองความสามารถโดยองค์กรที่เป็นที่ยอมรับระหว่างประเทศ บางครั้งใบรายงานผลการสอบเทียบจะรายงานความเป็นไปตามข้อกำหนดเฉพาะทางมาตรวิทยาของปริมาณที่ถูกวัดในกรณีเช่นนี้ค่าที่วัดได้เมื่อรวมกับความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องไม่ขยายไปเกินกว่าขีดจำกัดหรือเกณฑ์ยอมรับที่ระบุของปริมาณที่ถูกวัดนั้นๆ ในปี ค.ศ. 1990 ห้องปฏิบัติการ ชั่ง ตวง วัด ระหว่างประเทศ (BIPM) ร่วมกับ ISO ได้แนะนำให้ใช้ความไม่แน่นอนของการวัดเป็นมาตรการในการบอกความน่าเชื่อถือของผลการวัด โดยใช้ Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) ซึ่งมีแนวคิดดังนี้

ปริมาณที่ถูกวัด “Y” ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการวัดจะขึ้นอยู่กับปริมาณอินพุตที่เกี่ยวข้องในกระบวนการวัด

$$Y = f(\xi_1, \xi_2, \xi_3) \quad (13)$$

ความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of Measurement) คือสิ่งที่บอกได้ถึงคุณภาพของผลการวัดว่ามีความน่าเชื่อถือเพียงใด การรายงานความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องรายงานพร้อมกับผลของการวัดเสมอ เพื่อที่จะให้เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการวัดกับข้อกำหนดเฉพาะหรือมาตรฐาน หรือเกณฑ์ยอมรับสำหรับสิ่งที่ถูกวัด (Measurand) เป็นที่ยอมรับกันว่าการวัดทุกครั้งมีความคลาดเคลื่อน (Error) เกิดขึ้นเสมอซึ่งเป็นผลมาจากการที่ผลการวัดมีความแตกต่างจากค่าจริงของสิ่งที่ถูกวัด (True Value) และความไม่แน่นอนของการวัดส่วนหนึ่งได้มาจากการกระจายค่าของผลการวัดนั้นๆ เมื่อทำการวัดหลายๆ ครั้ง มีแนวคิดหลากหลายที่ใช้แสดงความน่าเชื่อถือได้ของผล

การวัด อย่างไรก็ตามก็มีความยากลำบากในการใช้วิธีประเมินความน่าเชื่อถือได้เหล่านั้นโดยวิธีต่าง ๆ กัน แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงของปริมาณอินพุตเหล่านั้นได้ ปริมาณอินพุตที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการวัดจะมีความไม่แน่นอนติดมาด้วยเสมอ ดังนั้นผลการวัด “Y” จึงเป็นเพียงค่าประมาณ “y” พร้อมกับความไม่แน่นอนของการวัดที่เกิดจากปริมาณอินพุตเหล่านั้นด้วย ในการรายงานผลปริมาณที่ถูกวัดจะอยู่ในรูป

$$Y = y \pm U \quad (14)$$

โดยความไม่แน่นอน U ได้มาจากการประเมินองค์ประกอบรวมทั้งหมดของความไม่แน่นอนในรูปแบบที่เป็น Type A และ Type B การประเมิน Type A เป็นผลมาจากการประเมินทางสถิติที่อยู่ในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและการประเมิน Type B จะใช้วิธีอื่นๆ ที่มีใช้การประเมินทางสถิติ ซึ่งอยู่ในรูปของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้มาจากใบรับรองการสอบเทียบ หรือข้อกำหนดจำเพาะของเครื่องมือ เป็นต้น

2.2.3 มาตรฐานการวัด (Measurement Standard)

มาตรฐานปฐมภูมิหมายถึงมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้หรือเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีคุณสมบัติทางมาตรวิทยาส่งสุด และมีค่าเป็นที่ยอมรับโดยปราศจากการอ้างอิงถึงมาตรฐานอื่นที่เป็นปริมาณเดียวกัน (Standards that is designated or widely acknowledged as having the highest metrological qualities and whose value is accepted without reference to other standards of the same quantity: VIM 6.4)

มาตรฐานทุติยภูมิหมายถึงมาตรฐานที่ได้ค่ามาจากการเปรียบเทียบกับมาตรฐานปฐมภูมิของปริมาณเดียวกัน (Standard whose value is assigned by comparison with a primary standard of the same quantity: VIM 6.5)

มาตรฐานการวัดระหว่างชาติ คือ มาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับโดยความตกลงกันระหว่างประเทศเพื่อเป็นฐานในการกำหนดค่าของมาตรฐานอื่นทั้งหมดที่เกี่ยวข้องระหว่างประเทศ (Standard recognized by an international agreement to serve internationally as the basis for assigning values to other standards of the quantity concerned: VIM 6.2)

มาตรฐานอ้างอิงคือมาตรฐานที่โดยทั่วไปมีคุณภาพทางมาตรวิทยาส่งสุดมีอยู่ ณ จุดใช้งานหรือในหน่วยงานซึ่งการวัดที่กระทำในหน่วยงานได้มาจากมาตรฐานนี้ (Standard, generally having the highest metrological quality available at a given location or in a given organization, from which measurements made there, are derived: VIM 6.6)

มาตรฐานถ่ายทอดคือมาตรฐานที่ใช้สำหรับการนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานอื่น (A standard used as an intermediary to compare standards: VIM 6.8)

มาตรฐานชั้นใช้งาน คือ มาตรฐานที่ใช้สำหรับการสอบเทียบหรือการตรวจสอบกับวัสดุวัดเครื่องมือวัดหรือวัสดุอ้างอิง (Standard that is used to calibrate or check material measures, measuring instruments or reference materials: VIM 6.7) มาตรฐานชั้นใช้งานจะสอบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงเสมอ และมาตรฐานชั้นใช้งานนี้อาจใช้สำหรับงานประจำ เพื่อให้มั่นใจว่าการวัดที่กระทำเป็นไปอย่างถูกต้องบางครั้งก็เรียกว่า มาตรฐานสำหรับตรวจสอบ (Check Standard)

2.2.4 การสอบเทียบ (Calibration)

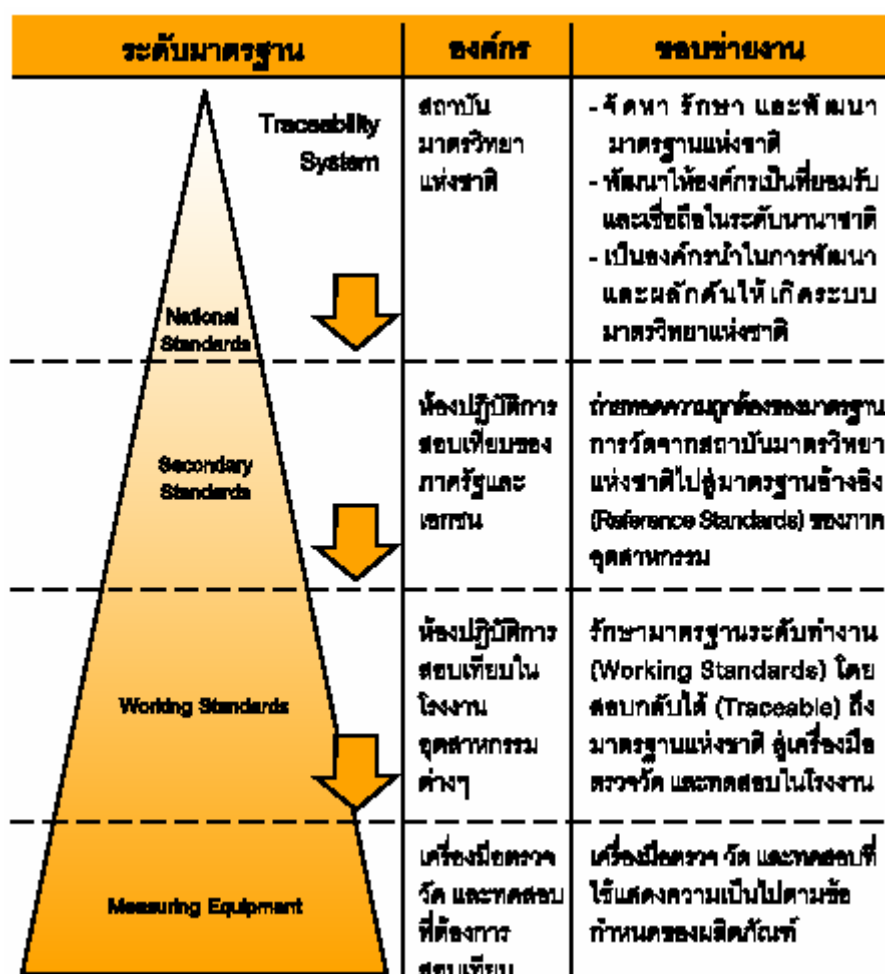
การสอบเทียบ หมายถึง ชุดของการดำเนินการเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ชี้บอกโดยเครื่องมือวัด หรือระบบการวัด หรือค่าที่แสดงโดยเครื่องวัดที่เป็นวัสดุกับค่าสมมติที่รู้ของปริมาณที่วัดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ (Set of operations that establish, under specified conditions, the relationship between values of quantities indicated by a measuring instrument or measuring system, or values represented by a material measure or a reference material, and the corresponding values realized by standards: VIM 6.11)

การสอบเทียบ ประกอบด้วยปัจจัยหลักดังต่อไปนี้

- 1 ตัดสินความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ชี้บอกของเครื่องมือวัดกับค่ามาตรฐาน ภายใต้สภาวะที่กำหนด และ ณ วัน เวลาที่ระบุ
- 2 ออกใบรายงานผลการสอบเทียบที่รายงานทั้งค่าความบ่ายเบนหรือค่าแก้พร้อมกับความไม่แน่นอนของการวัด

2.3. ความสามารถสอบกลับได้ (Traceability)

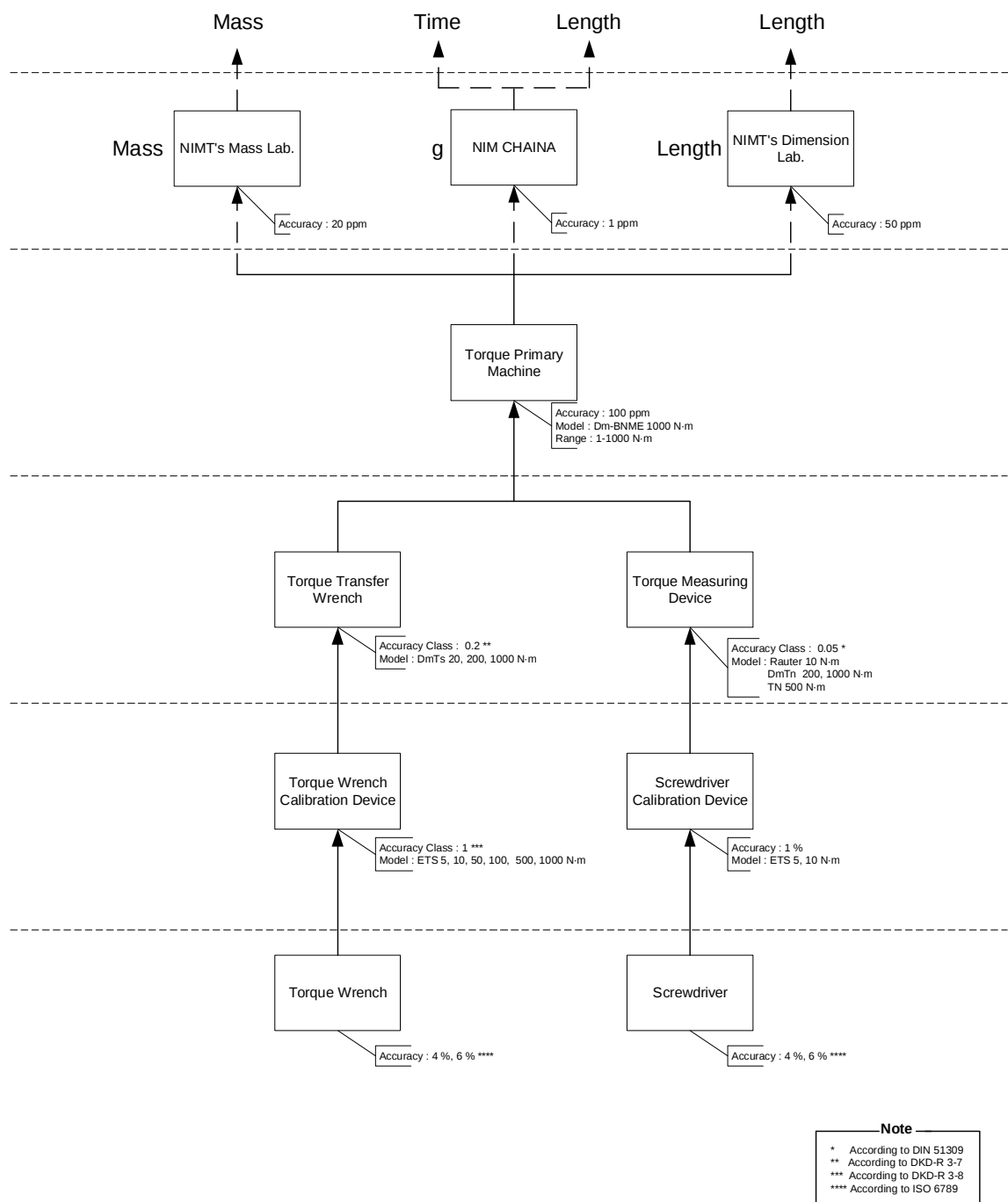
ความสามารถสอบกลับได้ มีนิยามดังนี้ สมบัติของผลการวัดที่สามารถโยงไปกับมาตรฐานแห่งชาติที่เป็นที่ยอมรับโดยการเปรียบเทียบกันอย่างไม่ขาดช่วงเป็นลูกโซ่ และจะต้องรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัดไว้ด้วย (Property of the result of a measurement or the value of a standard whereby it can be relate to state reference, usually national or international standard, through an unbroken chain of comparisons all having state uncertainties. : VIM 6.10) ซึ่งระบบของความสามารถสอบกลับได้แสดงดัง ภาพประกอบ 6



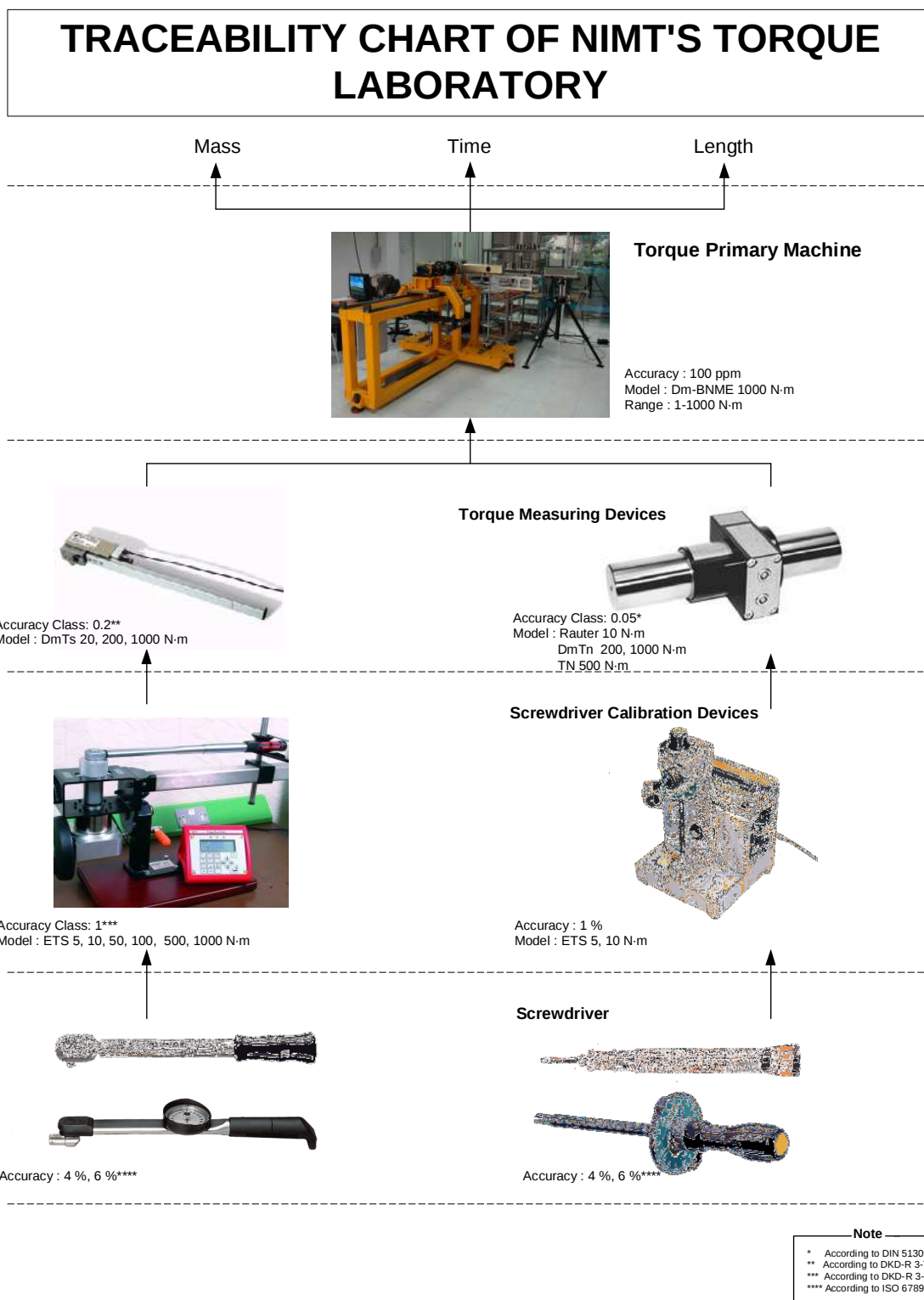
ภาพประกอบ 6 แสดงบทบาทของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ในการสอบเทียบและความสามารถ สอบกลับได้

ในปัจจุบันห้องปฏิบัติการทอรัของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติมีความสามารถสอบกลับได้ โดยอ้างอิงหน่วยวัด SI ซึ่งสิ้นสุดลงที่มาตรฐานขั้นปฐมภูมิ ที่ทำให้เป็นจริงของหน่วยวัด SI โดยสามารถแสดงได้ในภาพประกอบ 7 และ ภาพประกอบ 8

TRACEABILITY CHART OF NIMT'S TORQUE LABORATORY



ภาพประกอบ 7 แสดงแผนภูมิตraceabilityความสามารถสอบกลับได้ของห้องปฏิบัติการทอร์ก



ภาพประกอบ 8 แสดงแผนภาพความสามารถสอบกลับได้ของห้องปฏิบัติการทอร์ก สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

2.4 การประเมินค่าผลของการวัดทอร์กมาตรฐาน

การวัดค่าทอร์กมาตรฐานจากเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานสามารถสลับได้โดยตรงในหน่วยของ เอสไอ อยู่ในรูปมวล ความยาวและความผิดพลาดของทอร์กอันเนื่องมาจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบางดั่งสมการ

$$M_{std} = F \cdot L - M_{residual} \quad (15)$$

เมื่อ

M_{std}	=	ทอร์กมาตรฐาน
F	=	แรงที่กระทำกับคาน
L	=	ความยาวของคาน
$M_{residual}$	=	โมเมนต์คงเหลือของทอร์ก (Residual torque)

ทอร์กมาตรฐาน, M_{std} สามารถประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดได้ดั่งสมการที่ (16) โดยการคูณกันของ F, L , และ ลบด้วยค่าของ $M_{residual}$ ในการหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดทอร์กมาตรฐาน (M_{std}) สามารถประเมินได้ดั่งสมการ

$$w(M_{std}) = \sqrt{\left(\frac{\partial M_{std}}{\partial F} w(F)\right)^2 + \left(\frac{\partial M_{std}}{\partial L} w(L)\right)^2 + w^2 E(L) + \left(\frac{\partial M_{std}}{\partial S} w(S)\right)^2 + \left(\frac{\partial M_{std}}{\partial M_{residual}} w(M_{residual})\right)^2} \quad (16)$$

2.4.1 ค่าความไม่แน่นอนจากการวัด แรง (Force), F

การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดของแรงสามารถหาได้จากสมการ(18) โดยจะประกอบไปด้วย :

$$F = m \cdot g_{local} \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m}\right) - \Delta F_m \quad (17)$$

เมื่อ

F	=	แรง
m	=	มวลของตุ้มน้ำหนัก
g_{local}	=	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกตำแหน่งที่ทดลอง
ρ_a	=	ค่าความหนาแน่นของอากาศ
ρ_m	=	ค่าความหนาแน่นของมวล

ΔF_m = ค่าความผิดพลาดของมวล

ค่าความไม่แน่นอนของการวัดทอร์กสัมพัทธ์ $w(F)$ ของแรงสามารถหาได้จากสมการ

$$w(F) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial m} w(m)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial g_{local}} w(g_{local})\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \rho_a} w(\rho_a)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta F_m} w(\Delta F_m)\right)^2} \quad (18)$$

2.4.1.1 มวล (m) สามารถหาค่าได้จากการส่งสอบเทียบกับห้องปฏิบัติการมวลซึ่งได้รับการยอมรับและรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัด

2.4.1.2 ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g_{local}) มีค่า $9.783124318 \text{ m/s}^2$ ซึ่งได้จากการวัดของห้องปฏิบัติการความดันและรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัด

2.4.1.3 ค่าความหนาแน่นของอากาศ (ρ_a) สามารถประเมินค่าความไม่แน่นอนจากการวัดจากสมการ (19)

2.4.1.4 ค่าความหนาแน่นของมวล (ρ_m) มีค่าเท่ากับ $8,000 \text{ kg/m}^3$

2.4.1.5 ค่าความผิดพลาดของมวล (ΔF_m) ได้จากค่าความหนาแน่นของอากาศ 1.2 kg/m^3 และ ค่าความหนาแน่นของมวล มีค่าเท่ากับ $8,000 \text{ kg/m}^3$ ซึ่งมีค่าการเบี่ยงเบนไป $\pm 0.2 \text{ kg/m}^3$ และ $\pm 400 \text{ kg/m}^3$ ได้ค่าความผิดพลาดของแรง $\pm 1.5 \cdot 10^{-4} \%$ และคิดเป็นค่าความไม่แน่นอนของการวัด $\pm 8.7 \times 10^{-5} \%$

2.4.2 ความยาวของคาน, L

ความยาวของคาน L สามารถหาค่าความไม่แน่นอนจากการวัดได้จากการส่งวัดความยาวคานกับห้องปฏิบัติการความยาว

2.4.3 ความหนาแน่นของอากาศ, ρ_a สามารถหาค่าความไม่แน่นอนจากสมการ (19)

$$\rho_a = \frac{0.34848P - 0.009 \cdot (RH) \cdot e^{(0.061t)}}{(273.15 + t)} - \delta f \quad (19)$$

เมื่อ

ρ_a	=	ความหนาแน่นของอากาศ
δf	=	Uncertainty of the formula used
P	=	ความดันบรรยากาศ มีหน่วยเป็น mbar
RH	=	เปอร์เซ็นต์ค่าความชื้นสัมพัทธ์
t	=	อุณหภูมิห้อง °C

ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดของความหนาแน่นของอากาศหาได้จาก, $w(\rho_a)$:

$$w(\rho_a) = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_a}{\partial \mathcal{F}} w(\mathcal{F})\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial p} w(p)\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial hr} w^2(hr)\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_a}{\partial t} w^2(t)\right)^2} \quad (20)$$

1 ค่าความไม่แน่นอน ของ $\mathcal{F}$ มีค่าเท่ากับ $\pm 2 \cdot 10^{-4}$ ซึ่งอยู่ในค่า $900 \text{ hPa} < p < 1100 \text{ hPa}$, $10^\circ\text{C} < t < 30^\circ\text{C}$ and $RH < 80 \%$

2 ค่าความดันบรรยากาศ P , ความชื้นสัมพัทธ์ RH , อุณหภูมิ t , สามารถทราบค่าได้โดยใช้เครื่องวัดซึ่งต้องผ่านการสอบเทียบจากห้องปฏิบัติการอุณหภูมิ

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เดิร์ก รอสเก, กอนยา รูดอล์ฟ และ ไดเดิต เพสเซล (D. Roske, K. Rudolf and D. Peschel) Lever optimization for torque standard machines ศึกษาารูปร่างของคานที่เหมาะสมสำหรับเครื่องสอบเทียบมาตรฐานทอร์ก ห้องปฏิบัติการ ของ Phys.-Techn. Bundesanstalt (PTB) ประเทศเยอรมันได้มีการสร้างการคำนวณและออกแบบของเครื่องทดสอบทอร์กมาตรฐานขนาด 20 kNm โดยปัญหาที่พบคือ ความยาวของคานมีความผิดพลาดทำให้มีผลกับค่าของการวัดทอร์ก ซึ่งแก้ปัญหาโดยออกแบบด้วยวิธีไฟไนต์อีเลเมนต์ ให้คานสามารถที่จะปรับระยะได้ละเอียดมากเป็นไมโครเมตร แล้วทำการวัดสอบเทียบค่าความยาวของคานที่มีความเที่ยงตรงสูงอีกครั้ง เมื่อได้ค่าความยาวที่ต้องการจึงใช้ความยาวนั้นอ้างอิงในการคำนวณ เพื่อหาทอร์ก

ไดเดิต เพสเซล (Diedert peschel) Proposal for the design of torque calibration machines using the principle of a component system, PTB, Germany, 2000 เสนอการออกแบบเครื่องสอบเทียบทอร์ก โดยใช้กฎของการสอบเทียบได้หลายอุปกรณ์ มีการนำเสนอการออกแบบเครื่องทดสอบทอร์กมาตรฐานการวัดทอร์กโดยครอบคลุมการวัดได้หลายชนิด เช่น ตัวแปรสัญญาณทอร์ก, torque tool, torque wrench จึงได้มีการออกแบบให้สามารถทดสอบทอร์กได้ในชุดเดียวกัน ซึ่งค่าที่สามารถสอบเทียบได้จะมีค่าความไม่แน่นอนของการวัด 0.001 และ ข้อดีที่ได้ก็คือสามารถสอบเทียบเครื่องมือต่างๆที่ไม่ต้องการความละเอียดมากนักได้รวดเร็วและหลากหลาย

โคจิ โอคุชิ, ทาซาชิ โอตะ และคาซุนางะ อุเอตะ (Koji Ohgushi, Takashi Ota and Kazunaga Ueda) Tsukuba Load dependency of moment–arm length in the torque standard machine, Tsukuba Japan ศึกษาการใส่แรงบนคานของเครื่องสอบเทียบมาตรฐานทอร์ก อย่างอิสระ ได้ทำการเปรียบเทียบผลของการวัดทางด้านทอร์กของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของญี่ปุ่น (NIMJ) กับสถาบันแห่งชาติเยอรมัน(PTB) ทำให้เกิดข้อสงสัยเกี่ยวกับระบบการใส่ภาระของเครื่องทดสอบทอร์กมาตรฐาน ปัญหาคือค่าที่วัดได้เกิดการเบี่ยงเบนไป จากการวิเคราะห์แล้วพบว่าความยาวของคานและตำแหน่งของแรงที่กระทำกับคาน จึงได้มีความพยายามในการแก้ไขด้านความยาวของคาน ซึ่งวัดความยาวโดยไม่ใช้การสัมผัสกับคาน ด้วยการใช้ sensor ส่วนตำแหน่งที่ภาระกระทำกับคาน ใช้วิธีการใช้แผ่นโลหะบาง (Metal Bands ,MBs) ในการใส่ตำแหน่งของภาระที่ปลายทั้งสอง

ทำให้ได้ค่าที่เที่ยงตรง สามารถที่จะลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดได้ 0.0055 % ถึง 0.0024%

แอสเดรียส เบิร์ก (Andreas Bruege) Influence of Eccentric mounting on the calibration of torque measuring device, PTB, Germany ศึกษาผลกระทบจากการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องมือวัดทอร์ก ได้ทำการการสอบเทียบอุปกรณ์ส่งถ่ายค่าทอร์ก ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ค่าการเยื้องศูนย์ของอุปกรณ์เชื่อมต่อ (Flexible coupling) และจะมีค่าที่เที่ยงตรงได้ถ้ามีชุดประกอบเมื่อมีการวัดสอบเทียบค่า ซึ่งค่าที่เบี่ยงเบนไปนั้น ถ้าเกิดการเยื้องศูนย์ไป 1mm จะทำให้ค่าความผิดพลาด เป็น 0.00006 % ได้ทำการแก้ไขปัญหาเพื่อให้ได้ค่าที่ยอมรับได้สำหรับอุปกรณ์ โดยใช้วิธีการเชื่อมต่อของอุปกรณ์จากการทดสอบแล้วผลที่ได้คือควรจะมีการต่อกันไม่เกิน 3 ช่วงต่อ ซึ่งค่าที่เบี่ยงเบนไปจะไม่มากกว่า 0.001 ที่การทดสอบ บิด 90 องศา

แอสเดรียส เบิร์ก และ รูดอล์ฟ กอนยา (Andreas Bruege, Rudolf Konya) Investigations on transducers for transfer or reference in continuous torque calibration, PTB, Germany ศึกษาอุปกรณ์ส่งถ่ายค่าทอร์กแบบต่อเนื่องในการการเปรียบเทียบผลการวัด

ได้ทำการหาวิธีสอบเทียบทอร์กความแม่นยำสูงให้มีความรวดเร็วกว่าวิธีเดิมซึ่งใช้ ตัวแปรสัญญาณทอร์ก เป็นอุปกรณ์ในการสอบเทียบค่าซึ่งจะเสียเวลามาก โดยมีขั้นตอนมาก ซึ่งมีการถอดภาระ และใส่ภาระ เป็น วัฏจักร จำนวน 10 ครั้ง โดยวิธีที่ใช้ในการพัฒนาการสอบเทียบเพื่อลดเวลาในการสอบเทียบคือการสอบเทียบแบบต่อเนื่อง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการอ้างอิงและตัวส่งถ่ายค่า จะไม่คิดถึงผลกระทบของความไวในการอ่านค่าเมื่อมีภาระ ดังนั้น ตัวแปรสัญญาณทอร์ก ควรจะให้ผลการอ่านเร็วขึ้น ในเยอรมันแนะนำสำหรับปัญหาของการสอบเทียบแบบต่อเนื่องจะใช้ตามมาตรฐาน DKD และการนำเสนอนี้จะแสดงผลของการเปรียบเทียบการสอบเทียบ ตัวแปรสัญญาณทอร์กแบบต่อเนื่องกับวิธีการแบบเก่า

เดิร์ก รอสเก (Dirk Roske) Key comparisons in the field of torque measurement, นำเสนอผลการเปรียบเทียบการวัดทอร์ก ได้เข้าร่วมการเปรียบเทียบผลการวัดมาตรฐานทอร์ก โดยใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ของ ห้องปฏิบัติการ PTB ประเทศเยอรมันเป็นหลักซึ่งมีผู้เข้าร่วมทำการเปรียบเทียบผลการวัด 10 ประเทศ ตัวแทนของแต่ละประเทศ ส่วนใหญ่คือสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติซึ่งแต่ละประเทศก็จะมีเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบการวัดแตกต่างกัน และ การเปรียบเทียบผลการวัดจะมีขั้นตอน และวิธีซึ่งเป็นมาตรฐานเดียวกันในการเปรียบเทียบ ซึ่งผลที่ได้คือ ค่าความผิดพลาด หรือ ค่าความไม่แน่นอนของการวัดมีความแตกต่างกัน

สรุป

จากผลการสืบค้นข้อมูลการวิจัยที่ผ่านมา พบว่าปัญหาที่พบส่วนใหญ่แบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรก ด้านความยาวของคาน ปัญหาคือไม่สามารถกำหนดความยาวของคานได้แน่นอนซึ่งมีผลโดยตรงกับการวัดทอร์ก ได้แก้ไขโดยได้ออกแบบจุดหมุนของคานแบบใหม่ เพื่อกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นการวัดที่แน่นอนขึ้น ส่วนที่สอง ด้านแรงที่กระทำกับคานปัญหาคือไม่สามารถกำหนดตำแหน่งที่แรงกระทำกับคานได้ถูกต้องเพราะจะต้องแขวน หรือใส่ภาระที่ค่อนข้างมาก จึง

ต้องใช้วัสดุที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ได้แก้ไขโดยใช้แผ่นโลหะบางซึ่งมีความบางมากสามารถกำหนดตำแหน่งได้แม่นยำมากขึ้นทำการแขวนกับปลายคาน

บทที่ 3

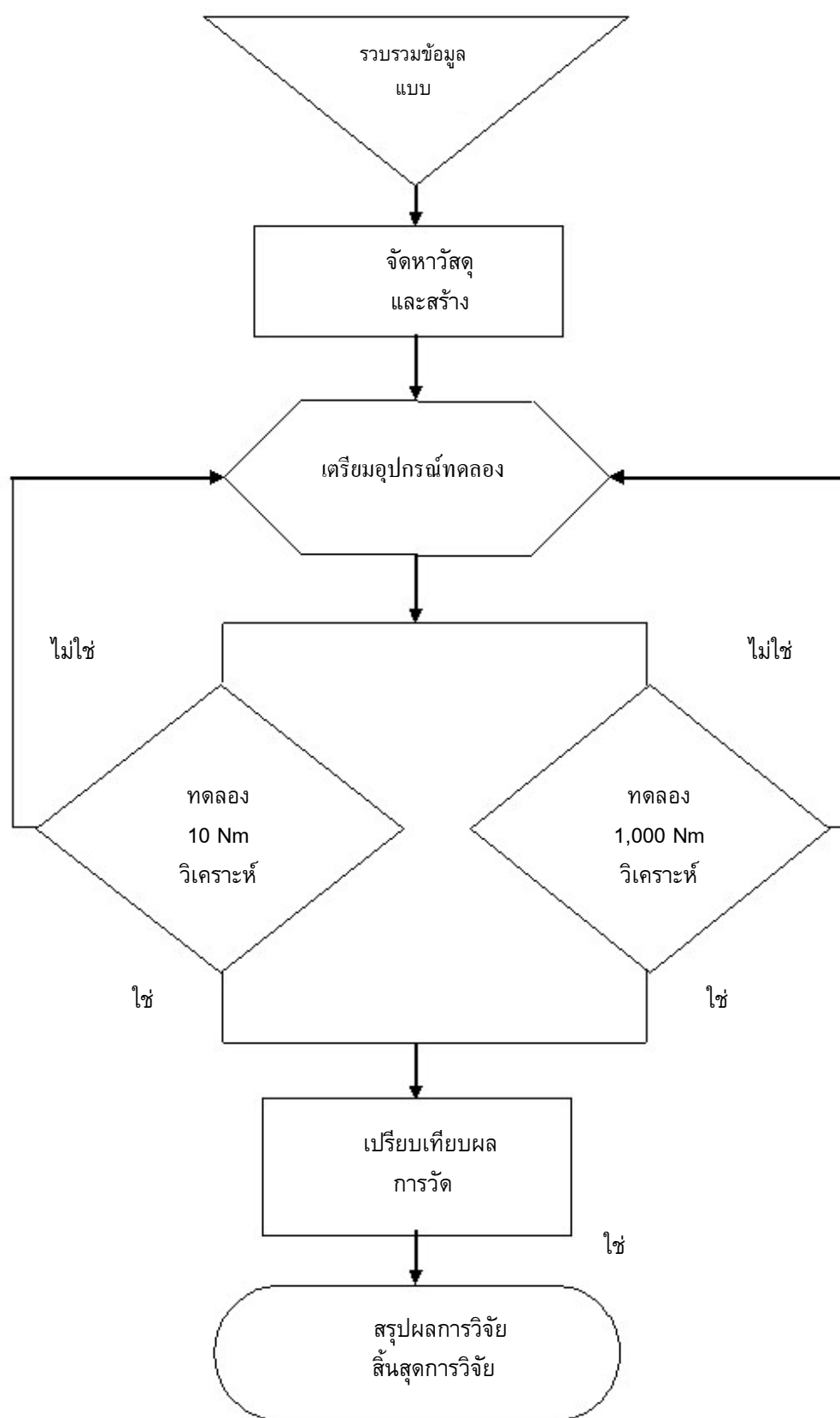
วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างและประเมินเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm และ เปรียบเทียบค่าการวัดที่ได้จากเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานที่สร้างขึ้นกับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิที่ได้รับการยอมรับแล้วซึ่ง ในบทนี้จะกล่าวถึงหัวข้อการดำเนินการวิจัยดังนี้

- เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย
- วิธีการเตรียมปรับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm และเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm
- วิธีการประเมินค่าความไม่แน่นอนจากการวัดเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm
- วิธีการเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm กับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm

3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยเพื่ออธิบายแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยและมีความเข้าใจในการดำเนินการมากขึ้นจึงได้แสดงแผนภาพ ดังแสดงภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 แสดงขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1.1 ชุดวัดอุณหภูมิ ความชื้น

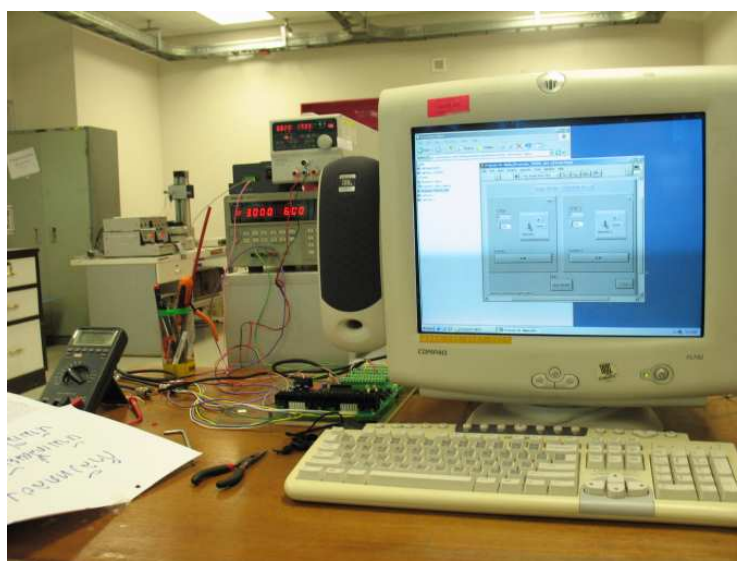
ผู้ผลิต Fluke รุ่น Hart Scientific 1620 จำนวน 1 เครื่อง



ภาพประกอบ 10 แสดงชุดวัดอุณหภูมิ และความชื้น

3.1.1.2 คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ประกอบ

โปรแกรม สำหรับประมวลผล Labview_8



ภาพประกอบ 11 แสดงคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์

3.1.1.3 ตัวแปรสัญญาณทอร์ก

ผู้ผลิต Raute Precision OY Type TT1/10 Nm จำนวน 1 เซท



ภาพประกอบ 12 แสดงตัวแปรสัญญาณทอร์ก

3.1.1.4 อินดิเคเตอร์

DK 38 จำนวน 1 เครื่อง



ภาพประกอบ 13 แสดงอินดิเคเตอร์ (Indicator)

3.1.1.5 นาฬิกาจับเวลา

ผู้ผลิต Casio model : Hs-30W



ภาพประกอบ 14 แสดงนาฬิกาจับเวลา

3.1.1.6 ระดับน้ำ

ผู้ผลิต : RSK model : 541-1002 จำนวน 1 ชิ้น



ภาพประกอบ 15 แสดงระดับน้ำ

3.1.1.7 เครื่องสอบเทียบทอร์กมาตรฐาน 10 Nm



ภาพประกอบ 16 แสดงเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

3.1.1.8 เครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm

ผู้ผลิต GTM TYPE / MODEL No: Dm-BNME 1,000 Nm S/N 153 จำนวน 1 เครื่อง



ภาพประกอบ 17 แสดงเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm

3.1.2 วิธีการเตรียมการปรับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm และเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm

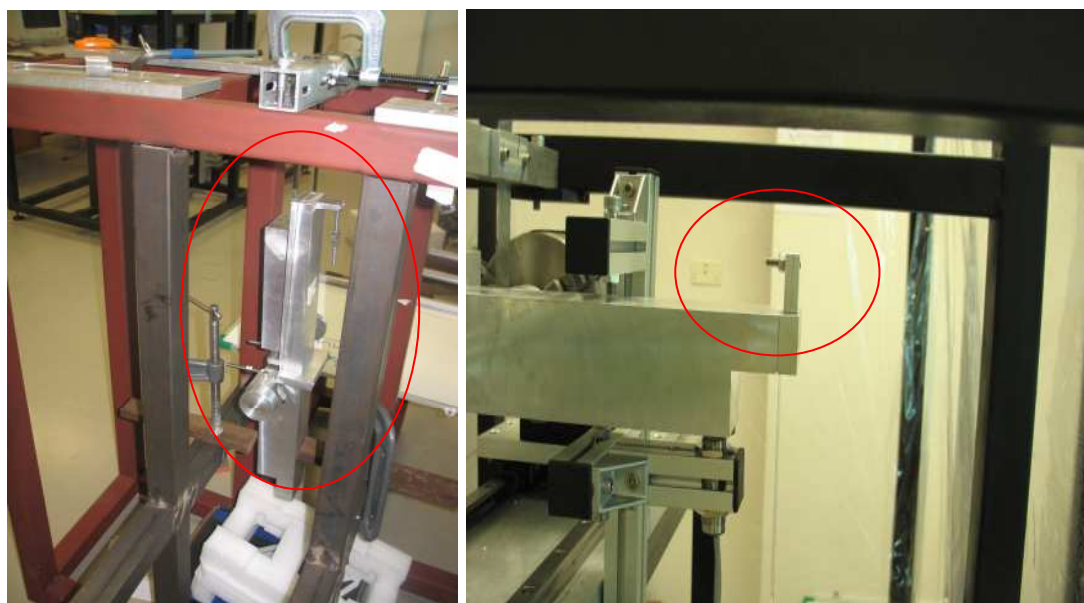
การเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm กับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm สามารถอธิบายลักษณะการทำงานเพื่อเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานทั้งสองได้ดังนี้

เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm มีความสามารถในการวัดทอร์กตั้งแต่ 1 Nm ถึง 10 Nm ใช้ตุ้มน้ำหนักสำหรับวัดทอร์ก 1 Nm ถึง 10 Nm เพื่อเปรียบเทียบผลการวัด 1,2,3,4,5,6,7,8,9 และ 10 Nm

ส่วนเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm มีความสามารถในการวัดทอร์กตั้งแต่ 1 Nm ถึง 1,000 Nm ซึ่งลักษณะการทำงานถ้าต้องการวัดทอร์กในพิสัยการวัดใดจะใช้ตุ้มน้ำหนักเซตสำหรับการวัดทอร์กนั้น เช่น พิสัยการวัด 1 Nm ถึง 10 Nm หรือ 10 Nm ถึง 100 Nm หรือ 100 Nm ถึง 1,000 Nm ซึ่งแต่ละพิสัยการวัดจะมีความสามารถในการวัดต่างกัน ในการเปรียบเทียบผลการวัดนี้ใช้พิสัยการวัดที่ 1 Nm ถึง 10 Nm เพื่อเปรียบเทียบผลการวัดที่ 1,2,3,4,5,6,7,8,9 และ 10 Nm

3.1.2.1 วิธีการเตรียมการปรับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm หลังจากการสร้างเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm ก่อนทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดแล้วจำเป็นที่จะต้องเตรียมการปรับเครื่อง ดังนี้

3.1.2.1.1 คานต้องผ่านการวัดความยาวและทำการสมดุลคานทั้งในแนวแกน ตั้งและในแนวแกนนอน



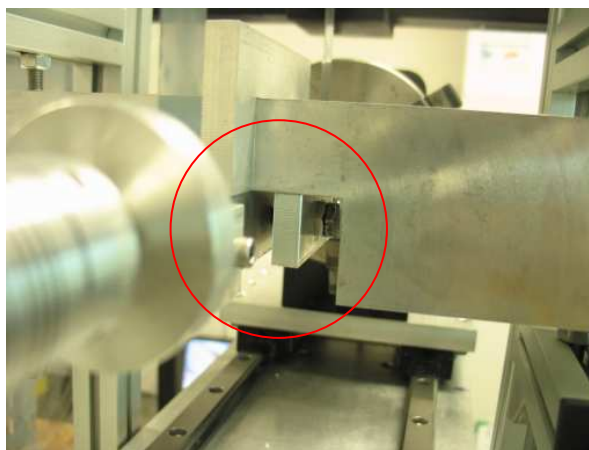
ภาพประกอบ 18 แสดงการสมดุลคาน ในแนวตั้งและในแนวนอน

3.1.2.1.2 ตุ่มน้ำหนัก ต้องผ่านการสอบเทียบน้ำหนัก

3.1.2.1.3 อุณหภูมิ ต้องไม่เกิน 22 ± 0.5 °C ความชื้นไม่เกิน 55 %

3.1.2.1.4 อุปกรณ์การวัดอื่นๆ เช่น ระดับน้ำ นาฬิกาจับเวลา อินดิเคเตอร์ ต้องผ่านการสอบเทียบมาแล้ว

3.1.2.1.5 ปรับความยาวคานทั้งสองข้างให้เท่ากันโดยปรับที่ชุดปรับความยาวของคานโดยทำการปรับอย่างหยาบด้วย ตัวแปรสัญญาณทอร์ก และ ทำการปรับละเอียดโดยวิธี ทริมเวต



ภาพประกอบ 19 แสดงชุดปรับความยาวคาน

3.1.2.1.6. ตั้งระดับคานโดยใช้ระดับน้ำ และ ปรับระยะของฟลอกซิมีตี เซนเซอร์ ทั้งด้านขวามือและด้านซ้ายมือให้มีระยะห่าง 2 mm



ภาพประกอบ 20 แสดงการปรับระดับของคานโดยใช้ระดับน้ำ

3.1.2.1.7 ติดตั้งตัวแปรสัญญาณทอร์ก โดยใช้ชุดจับยึดด้านท้ายคานจับยึด ก่อนจากนั้นใส่คัปปลิ้ง กับ ชุดรองคาน และใส่คัปปลิ้ง กับชุดเกียร์ จากนั้นจึงประกอบตัวแปร สัญญาณทอร์กแล้ว ยึดชุดเกียร์กับฐานให้แน่นเสร็จแล้วคลายชุดจับยึดด้านท้ายออกให้ห่างจากคาน

3.1.2.1.8 ทำการเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์การวัดเพื่อให้เครื่อง อยู่ในสภาวะพร้อมใช้งานอย่างน้อย 30 นาที

3.1.2.2 วิธีการเตรียมการปรับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm

3.1.2.2.1 คานต้องผ่านการวัดความยาวและทำการ สมดุลในแนวแกนนอน

3.1.2.2.2 ตุ่มน้ำหนัก ต้องผ่านการสอบเทียบน้ำหนัก

3.1.2.2.3 อุณหภูมิ ต้องไม่เกิน 22 ± 1 °C ความชื้นไม่เกิน 55 %

3.1.2.2.4 อุปกรณ์การวัดอื่นๆ เช่น ระดับน้ำ นาฬิกาจับเวลา อินดิเคเตอร์ ต้องผ่านการสอบเทียบมาแล้ว

3.1.3 วิธีการประเมินค่าความไม่แน่นอนจากการวัดเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

การดำเนินการวิจัยจำเป็นต้องประเมินค่าองค์ประกอบต่างๆ ของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้

- การวัดระยะความยาวของคาน, (Length)
- การสมดุลคาน, (Equilibrium)
- ความความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง, (Bending Stiffness)
- แรงที่กระทำกับคาน, (Force)

3.1.3.1 การวัดระยะความยาวของคาน

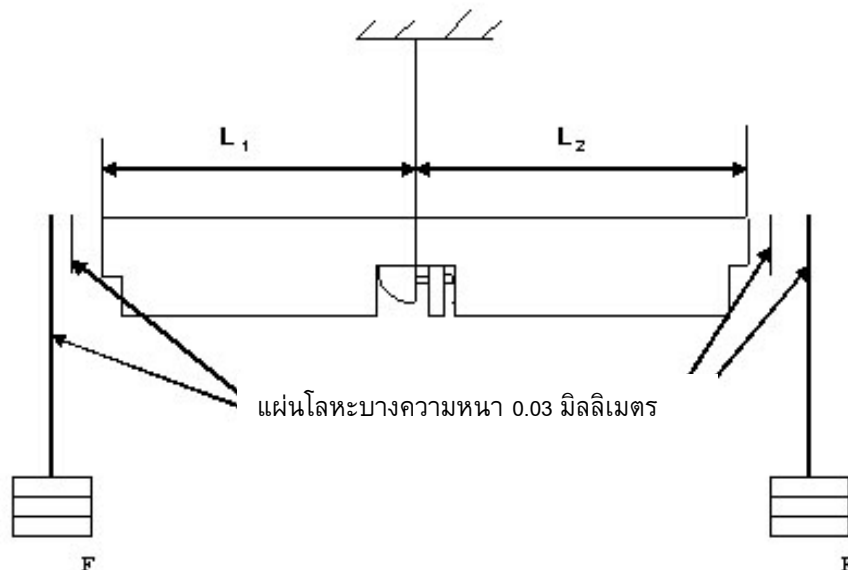
สมบัติที่จำเป็นของคานเพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อการวัดทอร์ก คือ มีน้ำหนักเบาและไม่มี ความเป็นแม่เหล็กได้ออกแบบคานซึ่งใช้วัสดุเป็นอะลูมิเนียม AA7075-T6 ดังแสดงสมบัติใน ภาคผนวก ง เพื่อให้ทราบค่าความยาวของคานที่แน่นอนสำหรับการคำนวณทอร์กจึงต้องมีการวัด โดยส่งวัดกับห้องปฏิบัติการ ความยาว สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งมีความยาวของคานดังข้อมูล ด้านล่าง

ตาราง 1 ข้อมูลค่าความยาวของคาน

ชื่อ/อุปกรณ์	ความยาวของชิ้นงาน (mm)	ค่าความขนาน (μm)
TB/10	499.929	1

ผลการวัดที่ได้คือค่าความไม่แน่นอนของการวัด = $1.0 \mu\text{m} + 1.8 \cdot 10^{-6} L$

L = ค่าความยาวของคาน มีหน่วยเป็น mm



ภาพประกอบ 21 แสดงความยาวรวมของคาน

ได้มีการเพิ่มความยาวของคานโดยใช้แผ่นโลหะบางที่มีความหนา 0.03 mm ที่ปลายคานทั้งสองข้างเมื่อประกอบกันแล้วคานจะมีความยาวทั้งหมด 500.019 mm ซึ่งการเพิ่มความยาวคานทั้งสองข้างนั้นค่าความไม่แน่นอนจากการวัดมีค่าน้อยมาก จึงไม่นำมาคิด

การสมดุลคานเพื่อให้คานทั้งสองข้างมีความยาวเท่ากันทั้งสองด้านมีขั้นตอน 2 ขั้นตอนโดยจะต้องทำวิธีสมดุลคานอย่างหยาบเสร็จแล้วจึงทำวิธีสมดุลคานอย่างละเอียด

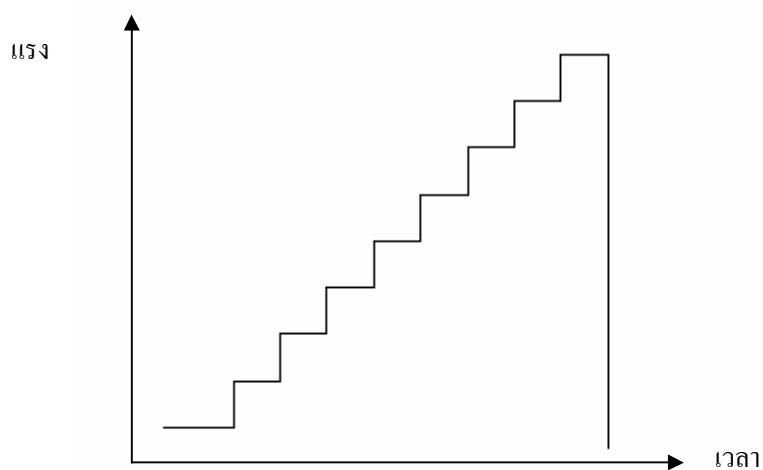
3.1.3.2 การสมดุลคาน

3.1.3.2.1 การสมดุลคานอย่างหยาบ โดยใช้ตัวแปรสัญญาณทอร์ก

1 ติดตั้งตัวแปรสัญญาณทอร์กกับคานให้เรียบร้อยแล้วเก็บค่าทอร์กเริ่มต้น

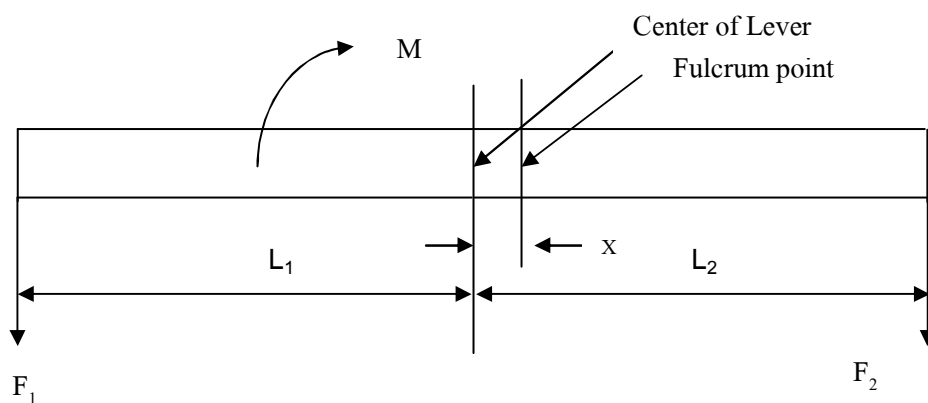
2 ใส่แรงที่กระทำกับคานทั้งสองข้างพร้อมกัน ที่แรง 4 N จับเวลา 60 วินาทีแล้วเก็บค่าทอร์กจากอินดิเคเตอร์จากนั้น นำแรงออก จับเวลา 60 วินาที เก็บค่าจากอินดิเคเตอร์แล้วกระทำซ้ำที่แรง 4 N อีก 2 ครั้ง

3 กระทำเหมือนกับขั้นตอนที่ 2 แต่เปลี่ยนแรงที่กระทำจาก 4 N เป็น 8 N เสร็จแล้วเปลี่ยนแรงที่กระทำเป็น 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 และ 40 N ซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละแรงที่กระทำ



ภาพประกอบ 22 แสดงขั้นตอนการใส่ภาระที่กระทำกับคาน

4. นำค่ามาคำนวณในสมการ (21) แล้วปรับความยาวคานที่จุด
ปรับความยาวคาน



ภาพประกอบ 23 แสดงภาพประกอบการคำนวณการสมดุลคาน

โดย กำหนดให้ $L_1 = L_2$ และ $F_1 = F_2$

$$M_1 = M_2$$

$$M_1 - M_2 = 0$$

เมื่อ $M = F \cdot L$

$$(L + \Delta X) \cdot F - (L - \Delta X) \cdot F = T$$

$$-2\Delta X = \frac{T}{F}$$

$$\Delta x = \frac{T}{-2F} \quad (21)$$

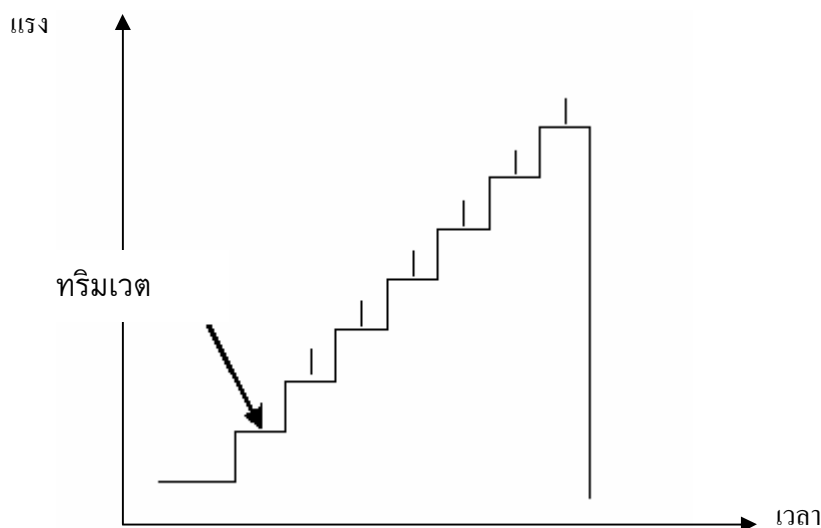
5 ปรับให้ ค่าทั้งสองข้างแตกต่างกัน $\pm 20 \mu\text{m}$ ค่าที่ได้จึงสามารถที่จะทำการปรับละเอียดได้ต่อไป

3.1.3.2.2 การสมดุลคานอย่างละเอียด โดยใช้วิธีทริมเวต

- 1 นำตัวแปรสัญญาณทอร์ก แล้วปล่อยคานให้สมดุล
- 2 ใช้ฟลอคซิมีตี เซนเซอร์ วัดระดับของคาน
- 3 เริ่มบันทึกผลค่าระดับของคาน
- 4 ใส่น้ำหนักที่กระทำกับคานทั้งสองข้างพร้อมกัน ที่น้ำหนัก 4 N จับเวลา 60 วินาที จากนั้นใส่มวลที่ข้างที่มีน้ำหนักเบาโดยเริ่มใส่จากมวลน้อยจนคานอยู่ในสภาวะเริ่มต้น จะได้ค่าน้ำหนักที่ใส่เพิ่มให้กับมวลเพื่อให้เกิดความสมดุล แล้วนำค่ามวลที่ใส่เพิ่มมาบันทึกค่า จากนั้นนำแรงออก จับเวลา 60 วินาที แล้วกระทำซ้ำที่แรง 4 N อีก 2 ครั้ง

5 กระทำเหมือนกับขั้นตอนที่ 4 แต่เปลี่ยนแรงที่กระทำจาก 4 N เป็น 8 N เสร็จแล้วเปลี่ยนแรงที่กระทำเป็น 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 และ 40 N ซ้ำ 3 ครั้งในแต่ละแรงที่กระทำ

6 นำค่าน้ำหนักที่บันทึกไว้มาคำนวณ ในสมการ (21) แล้ว ปรับความยาวคานที่ชุดปรับความยาวคาน ให้คานแตกต่างกันไม่เกิน $\pm 10 \mu\text{m}$

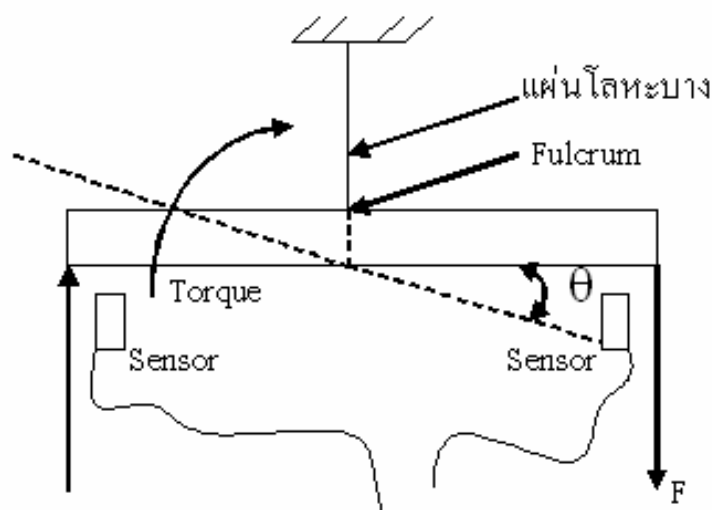


ภาพประกอบ 24 แสดงขั้นตอนการทริมเวต เมื่อใส่ภาระที่กระทำกับคาน

3.1.3.3. ความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะ

บาง

ในการออกแบบสมบัติที่จำเป็นสำหรับการวัดทอร์กคือเป็นแผ่นโลหะบางและมีความแข็งแรง และไม่เป็นแม่เหล็ก ไม่เป็นสนิม ได้เลือกใช้แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม จากระบบการทำงานของ เครื่องวัดทอร์กที่ทำการสร้างนี้ จำเป็นจะต้องรู้ค่าความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบางที่ใช้แขวนคาน ความสัมพันธ์ของทอร์กต่อมุมที่แผ่นโลหะบางดัดไป ถูกใช้เป็นตัวอธิบายปริมาณของความแข็งดิ่งต่อการดัด (Bending Stiffness) โดยเมื่อคานอยู่ในสภาวะ สมดุลได้ทำการใส่มวล 1 mg ถึง 6 mg ที่ปลายคาน คานจะเอียงไปเป็นมุม ซึ่งสามารถแปลงเป็นค่า แรงบิดได้จากนั้นคำนวณหาค่าความผิดพลาดที่ได้



ภาพประกอบ 25 แสดงลักษณะการหาค่าความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง

3.1.3.4 แรงที่กระทำกับคาน

ตุ้มน้ำหนัก เป็นอุปกรณ์ในการส่งถ่ายแรงที่กระทำกับคาน โดยผ่านแผ่นโลหะบางที่ปลายคานทั้งสองข้างซึ่งที่สมบัติที่จำเป็นคือ ไม่มีความเป็นแม่เหล็ก ไม่เป็นสนิม สร้างง่าย ได้ออกแบบตุ้มน้ำหนัก เป็นแบบ สเตปเวต ทำจากวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม 316 แต่ละชิ้นมีค่า $4 \text{ N} \pm 0.003 \%$ แขวนที่คานด้านขวา 10 ชิ้น และ แขวนที่คานด้านซ้าย 10 ชิ้น ซึ่งสามารถวัดทอร์กได้ 1,2,3,4,5,6,7,8,9 และ 10 Nm

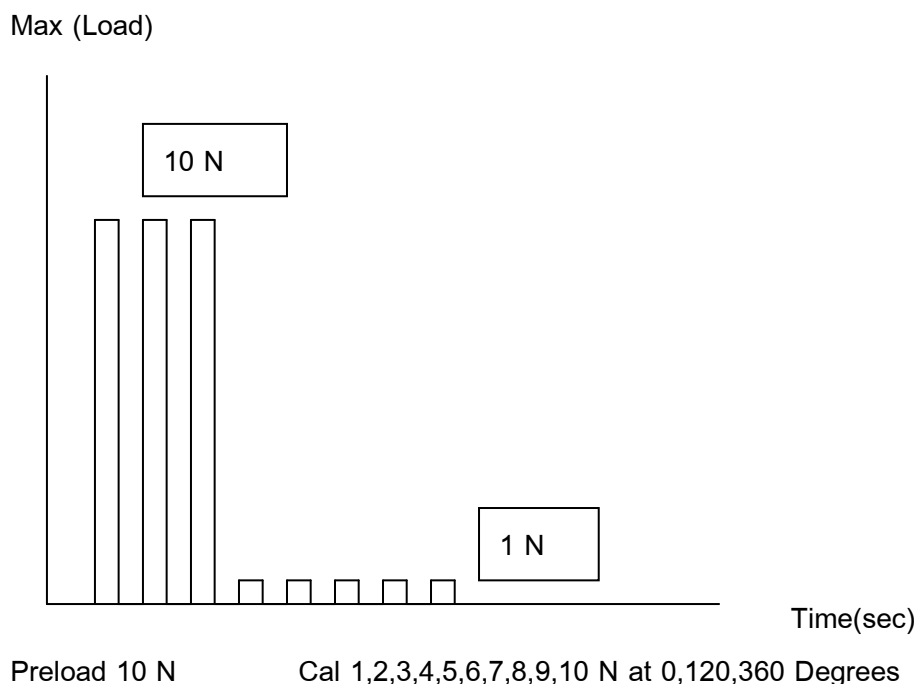


ภาพประกอบ 26 แสดงลักษณะของตุ้มน้ำหนัก

3.1.4 วิธีการเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องวัดทอร์ก 10 Nm กับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm

เพื่อหาค่าทอร์กที่คานถูกกระทำ โดยใช้หลักการคือ เมื่อคานอยู่ในสภาวะสมดุลและมีแรงจากภายนอกมากระทำกับคานในทิศทางที่ตั้งฉากกับคานนั้นจะทำให้คานเกิดการหมุนขึ้น หลังจากนั้นเมื่อออกแรงบิดผ่าน ตัวแปรสัญญาณทอร์ก ในทิศทางตรงกันข้ามกับการหมุนของคาน จนคานกลับไปอยู่ ณ ตำแหน่งเดิม ดังนั้นเราสามารถทราบทอร์กดังกล่าวได้ จะแบ่งการสอบเทียบออกเป็น 2 ส่วนดังนี้คือ

3.1.4.1 การสอบเทียบเพื่อหาค่ารีฟิเตอร์บิลิตี และ ค่ารีโพดิซิบิลิตี ของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานขนาด 10 Nm โดยจะต้องทำการสอบเทียบทอร์กของตัวแปรสัญญาณทอร์ก ทั้งหมด 3 มุมคือ 0 องศา 120 องศา และ 240 องศา ซึ่ง ในแต่ละองศา จะต้องทดลองค่าทอร์กตั้งแต่ 1 ถึง 10 Nm



ภาพประกอบ 27 การสอบเทียบเพื่อหาค่ารีฟิตอะบิลิตี้ และ ค่ารีโพรวินซ์บิลิตี้

1 หลังจากเครื่องพร้อมใช้งานแล้ว บันทึกค่าระยะของคานด้านซ้าย ระยะของคานด้านขวา และ มุมการบิด แล้วปรับค่าของตัวแปรสัญญาณทอร์กที่อินดิเคเตอร์ให้เป็นศูนย์แล้วบันทึกค่า

2. ใส่แรงที่กระทำกับคานโดย วางน้ำหนักที่ 40 N แล้วออกแรงบิดกลับโดยหมุนชุดเกียร์ในทิศทางตรงกันข้ามกับการวางน้ำหนัก จนคานกลับไปอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นโดยดูที่มุมการบิดของคาน เมื่อได้ตำแหน่งแล้วจับเวลาโดยรอจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 60 วินาที บันทึกค่าระยะของคานด้านซ้าย ระยะของคานด้านขวา มุมการบิด และค่าที่ได้จากอินดิเคเตอร์

3. นำแรงที่กระทำกับคานออกโดย ยกน้ำหนัก ขึ้นจนหมดแล้ว ปรับการบิดของคานให้บิดกลับมาที่มุมศูนย์จับเวลาโดยรอจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 60 วินาที บันทึกค่าระยะของคานด้านซ้าย ระยะของคานด้านขวา มุมการบิด และค่าที่ได้จากอินดิเคเตอร์

4. กระทำซ้ำ ในขั้นตอนที่ 2-3 จำนวน 3 ครั้ง

5. ทดลองที่ ทอร์ก 1 Nm โดยใส่แรงที่กระทำกับคาน วาง น้ำหนัก ที่ 4 N

6. ออกแรงบิดกลับโดยหมุนชุดเกียร์ ในทิศทางตรงกันข้ามกับ การวาง น้ำหนัก จนคานกลับไปอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นโดยดูที่มุมการบิดของคาน เมื่อได้ตำแหน่งแล้ว จับเวลาโดยรอจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 60 วินาที บันทึกค่า ระยะของคานด้านซ้าย ระยะของคานด้านขวา มุมการบิด และค่าที่ได้จากอินดิเคเตอร์

7. นำแรงที่กระทำกับคานออกโดย ยกน้ำหนัก ขึ้นจนหมดแล้ว ปรับการบิดของคาน

ให้บิดกลับมาที่มุมศูนย์ จับเวลาโดยรอจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 60 วินาที บันทึกค่า ระยะของ คานด้านซ้าย ระยะของคานด้านขวา มุมการบิด และค่าที่ได้จากอินดิเคเตอร์

8.กระทำซ้ำ ในขั้นตอนที่ 5-7 จำนวน 5 ครั้ง

9.ทดลองที่ทอร์ก 2 Nm โดยเปลี่ยนน้ำหนัก ที่ 8 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 -7 จำนวน 5 ครั้ง

10.ทดลองที่ทอร์ก 3 Nm โดยเปลี่ยนน้ำหนัก ที่ 12 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 -7 จำนวน 5 ครั้ง

11.ทดลองที่ทอร์ก 4 Nm โดยเปลี่ยนน้ำหนัก ที่ 16 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 -7 จำนวน 5 ครั้ง

12.ทดลองที่ทอร์ก 5 Nm โดยเปลี่ยนน้ำหนัก ที่ 20 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 -7 จำนวน 5 ครั้ง

13.ทดลองที่ทอร์ก 6 Nm โดยเปลี่ยนน้ำหนัก ที่ 24 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 -7 จำนวน 5 ครั้ง

14.ทดลองที่ทอร์ก 7 Nm โดยเปลี่ยนน้ำหนัก ที่ 28 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 -7 จำนวน 5 ครั้ง

15.ทดลองที่ทอร์ก 8 Nm โดยเปลี่ยนน้ำหนัก ที่ 32 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 -7 จำนวน 5 ครั้ง

16.ทดลองที่ทอร์ก 9 Nm โดยเปลี่ยนน้ำหนัก ที่ 36 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 -7 จำนวน 5 ครั้ง

17.ทดลองที่ทอร์ก 10 Nm โดยเปลี่ยนน้ำหนัก ที่ 40 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 -7 จำนวน 5 ครั้ง

18.ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 17 แต่เปลี่ยนมุมของ ตัวแปรสัญญาณทอร์ก เป็น 120° และ หลังจากเสร็จแล้ว จึงเปลี่ยน เป็น 240°

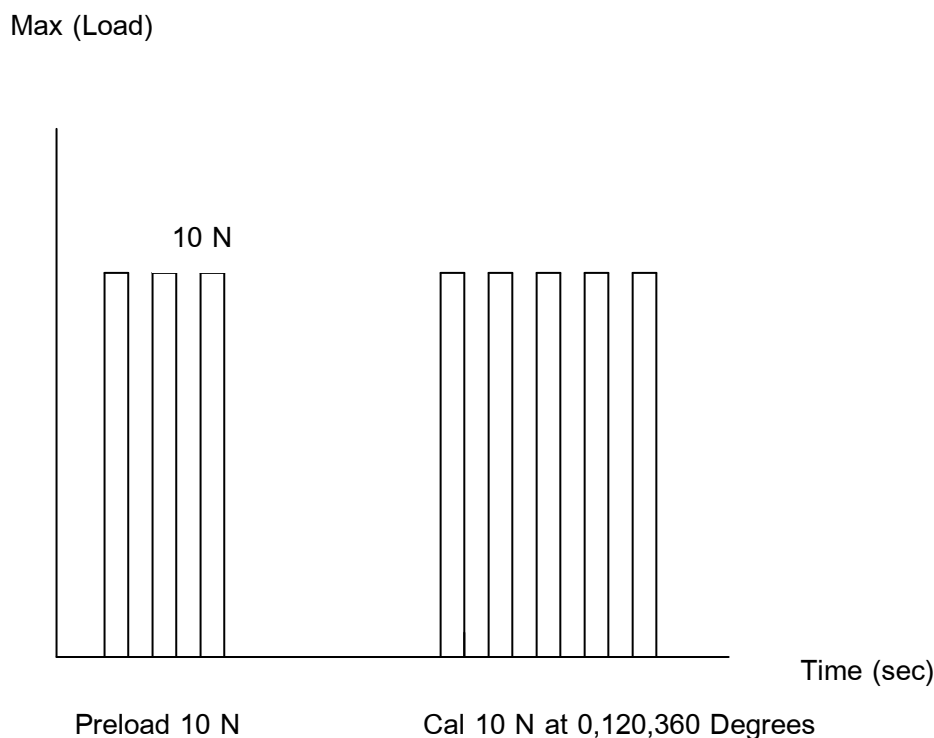
หลังจากทดลองเสร็จแล้วนำค่ามาประมวลผลการสอบเทียบเพื่อหาค่ารีฟิเตอร์บิลิตี และ ค่ารี โพรดิวิบิลิตี ดังสมการ

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (22)$$

เมื่อ

x_i	=	ข้อมูลที่ทำการทดลอง
$\bar{x}$	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูล
n	=	จำนวนข้อมูล

3.1.4.2 การสอบเทียบเพื่อเปรียบเทียบผลการวัดมิสอไลเมนต์ระหว่างเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานขนาด 10 Nm กับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติโดยใช้สภาวะในการสอบเทียบเดียวกันทั้งสามมุม



ภาพประกอบ 28 การสอบเทียบเพื่อหาค่าการเยื้องศูนย์ของทอร์ก

- 1 หลังจากเครื่องพร้อมใช้งานแล้ว บันทึกค่าระยะของคานด้านซ้าย ระยะของคานด้านขวาและมุมการบิดแล้วปรับค่าตัวแปรสัญญาณทอร์ก ที่อินดิเคเตอร์ให้เป็นศูนย์จากนั้นบันทึกค่า
2. ใส่แรงที่กระทำกับคานโดย วางน้ำหนัก ที่ 40 N แล้วออกแรงบิดกลับโดยหมุนชุดเกียร์ ในทิศทางตรงกันข้ามกับ การวางน้ำหนัก จนคานกลับไปอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นโดยดูที่มุมการบิดของคาน เมื่อได้ตำแหน่งแล้ว จับเวลาโดยรอจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 60 วินาที บันทึกค่าระยะของคานด้านซ้าย ระยะของคานด้านขวา มุมการบิด และค่าที่ได้จากอินดิเคเตอร์
3. นำแรงที่กระทำกับคานออกโดย ยกน้ำหนัก ขึ้นจนหมดแล้ว ปรับการบิดของคาน ให้บิดกลับมาที่มุมศูนย์จับเวลาโดยรอจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 60 วินาที บันทึกค่าระยะของคานด้านซ้าย ระยะของคานด้านขวา มุมการบิด และค่าที่ได้จากอินดิเคเตอร์
4. กระทำซ้ำ ในขั้นตอนที่ 2 ถึง 3 จำนวน 3 ครั้ง
5. ทดลองที่ ทอร์ก 1 Nm โดยใส่แรงที่กระทำกับคาน วางน้ำหนัก ที่ 4 N
6. ออกแรงบิดกลับโดยหมุนชุดเกียร์ ในทิศทางตรงกันข้ามกับ การวางน้ำหนัก จน

คานกลับไปอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นโดยดูที่มุมการบิดของคาน เมื่อได้ตำแหน่งแล้ว จับเวลาโดยรอจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 60 วินาที บันทึกค่า ระยะของคานด้านซ้าย ระยะของคานด้านขวา มุมการบิด และค่าที่ได้จากอินดิเคเตอร์

7. นำแรงที่กระทำกับคานออกโดย ยกน้ำหนักขึ้นจนหมดแล้ว ปรับการบิดของคาน ให้บิดกลับมามีมุม ศูนย์จับเวลาโดยรอจนเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลา 60 วินาที บันทึกค่าระยะของคานด้านซ้าย ระยะของคานด้านขวา มุมการบิด และค่าที่ได้จาก อินดิเคเตอร์

8. กระทำซ้ำ ในขั้นตอนที่ 5-7 จำนวน 5 ครั้ง

9. ทดลองที่ทอร์ก 2 Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 8 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่ 6 -7

10. ทดลองที่ทอร์ก 3 Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 12 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6-7

11. ทดลองที่ทอร์ก 4 Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 16 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

12. ทดลองที่ทอร์ก 5 Nm โดยเพิ่มน้ำหนักเป็น 20 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

13. ทดลองที่ทอร์ก 6Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 24 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

14. ทดลองที่ทอร์ก 8Nm โดยเพิ่มน้ำหนักเป็น 32 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

15. ทดลองที่ทอร์ก 10Nm โดยเพิ่ม น้ำหนัก เป็น 40 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

16. ทดลองที่ทอร์ก 8 Nm โดยลดน้ำหนัก เป็น 32 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

17. ทดลองที่ทอร์ก 6 Nm โดยลดน้ำหนัก เป็น 24 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

18. ทดลองที่ทอร์ก 5 Nm โดยลดน้ำหนัก เป็น 20 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

19. ทดลองที่ทอร์ก 4 Nm โดยลด น้ำหนัก เป็น 16 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

20. ทดลองที่ทอร์ก 3 Nm โดยลดน้ำหนัก เป็น 12 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

21. ทดลองที่ทอร์ก 2 Nm โดยลดน้ำหนัก เป็น 8 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

22. ทดลองที่ทอร์ก 1 Nm โดยลดน้ำหนัก เป็น 4 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่

6 -7

- 6 -7 23. ทดลองที่ทอร์ก 1 Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 4 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่
- 6 -7 24. ทดลองที่ทอร์ก 2 Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 8 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่
- 6 -7 25. ทดลองที่ทอร์ก 3 Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 12 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่
- 6 -7 26. ทดลองที่ทอร์ก 4 Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 16 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่
- 6 -7 27. ทดลองที่ทอร์ก 5 Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 20 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่
- 6 -7 28. ทดลองที่ทอร์ก 6 Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 24 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่
- 6 -7 29. ทดลองที่ทอร์ก 8 Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 32 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่
- 6 -7 30. ทดลองที่ทอร์ก 10 Nm โดยเพิ่มน้ำหนัก เป็น 40 N แล้วกระทำซ้ำในขั้นตอนที่
- 6 -7 31. ทำการทดลองซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ถึง 17 แต่เปลี่ยนมุมของตัวแปรสัญญาณทอร์ก เป็น 120 องศา และ หลังจากเสร็จแล้ว จึงเปลี่ยน เป็น 240 องศา

บทที่ 4

ผลการวิจัย

การวิจัยเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm ได้ทำการสร้างและประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดชิ้นส่วนของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน ที่มีผลต่อการวัดประกอบกันแล้วทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวม จากนั้นเพื่อยืนยันความถูกต้องได้ทำการเปรียบเทียบผลของการวัดกับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิที่ได้รับการยอมรับแล้วซึ่งมีผลการวิจัยดังนี้

1 ผลการประเมินเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

2 ผลการเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้จากเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm กับ เครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ ที่ได้รับการยอมรับแล้ว

4.1 ผลของการประเมินวัดเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

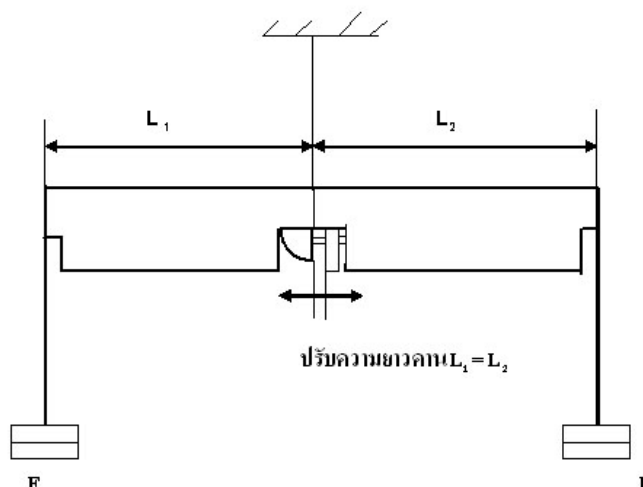
สามารถแบ่งผลการสร้างเครื่องออกเป็น สองส่วน ดังนี้

1 ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดส่วนประกอบของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

2 ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

4.1.1 ผลการประเมินส่วนประกอบของเครื่องวัดทอร์ก 10 Nm

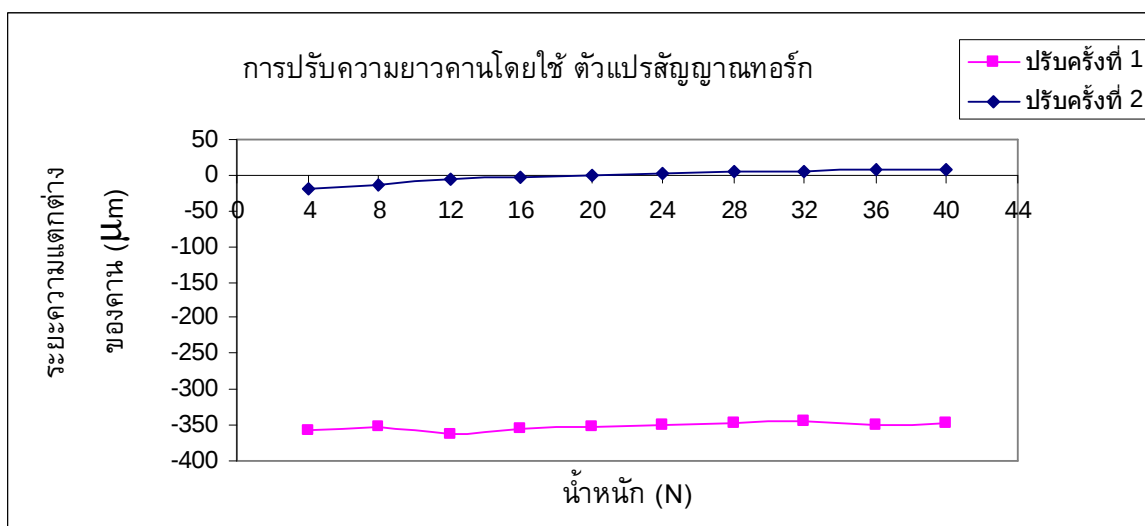
4.1.1.1 คาน การปรับความยาวคานเป็นองค์ประกอบของความไม่แน่นอนของการวัดของคานด้วย



ภาพประกอบ 29 แสดงการปรับความยาวคานทั้งสองข้างให้เท่ากัน

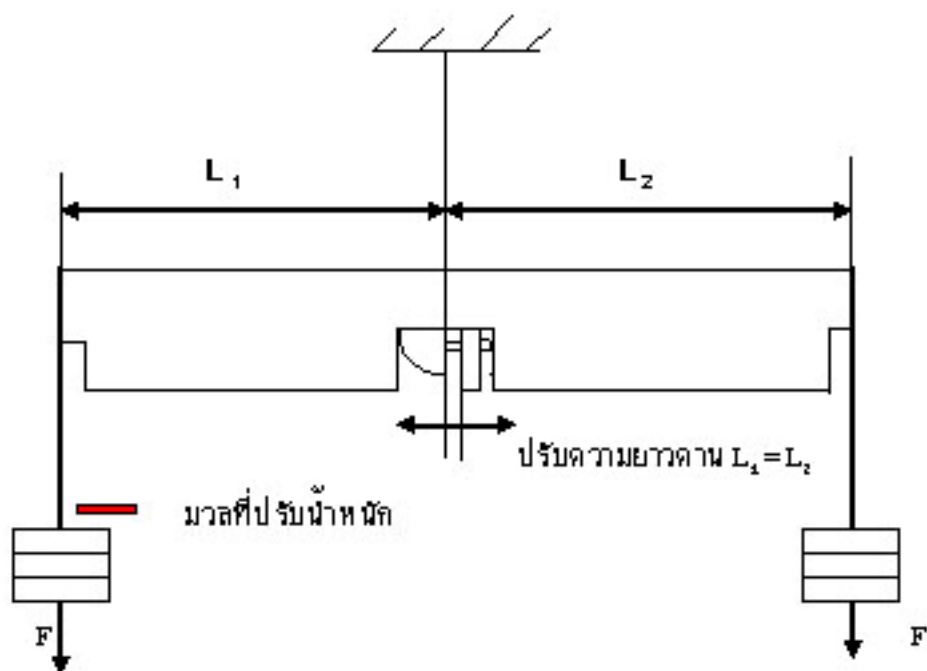
ตาราง 2 ค่าผลการปรับความยาวโดยใช้ตัวแปรสัญญาณทอร์ก

น้ำหนัก (N)	การปรับคานครั้งที่ 1		การปรับคานครั้งที่ 2	
	ทอร์ก (Nm)	ระยะความแตกต่างของ คาน (μm)	ทอร์ก (Nm)	ระยะความแตกต่าง ของคาน (μm)
0	0	0	0.00003	0
4	0.00287	-358.75	0.00015	-18.75
8	0.00565	-353.125	0.00021	-13.13
12	0.0087	-362.50	0.00013	-5.42
16	0.01135	-354.68	0.00007	-2.19
20	0.01408	-352.00	-0.00001	0.25
24	0.01677	-349.37	-0.00011	2.29
28	0.01943	-346.96	-0.00025	4.46
32	0.02199	-343.59	-0.0004	6.25
36	0.02518	-349.72	-0.0005	6.94
40	0.02785	-348.12	-0.00059	7.38
		$\bar{X} = -350.98$		$\bar{X} = -1.9$



ภาพประกอบ 30 แสดงค่าการปรับความยาวของคานโดยใช้ตัวแปรสัญญาณทอร์ก

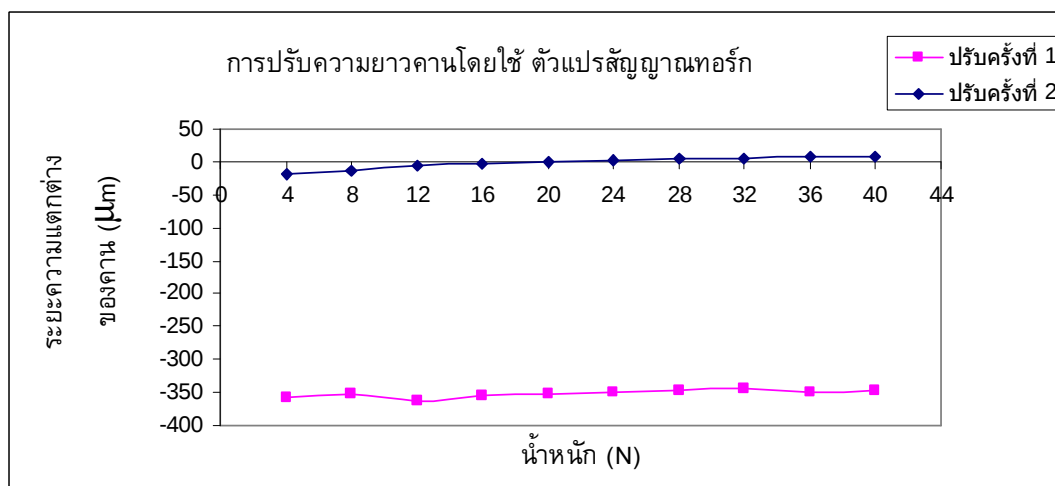
4.1.1.2 การปรับความยาวคานอย่างละเอียด โดยใช้วิธีทริมเวต



ภาพประกอบ 31 แสดงการปรับความยาวคานโดยใช้วิธีทริมเวต

ตาราง 3 ค่าผลการสมดุลคานอย่างละเอียดโดยใช้วิธีทริมเวต

ลำดับที่	แรงที่กระทำกับคาน (N)	มวลที่ใส่เพื่อให้คาน ระยะค่าความแตกต่างของ	
		สมดุล (mg)	คาน (μm)
1	4	0.08	-2.56
2	8	0.16	-2.17
3	12	0.241	-2.52
4	16	0.34	-2.67
5	20	0.405	-2.55
6	24	0.465	-2.44
7	28	0.5	-2.25
8	32	0.55	-2.17
9	36	0.62	-2.17
10	40	0.725	-2.27
			$\bar{X} = -2.44$



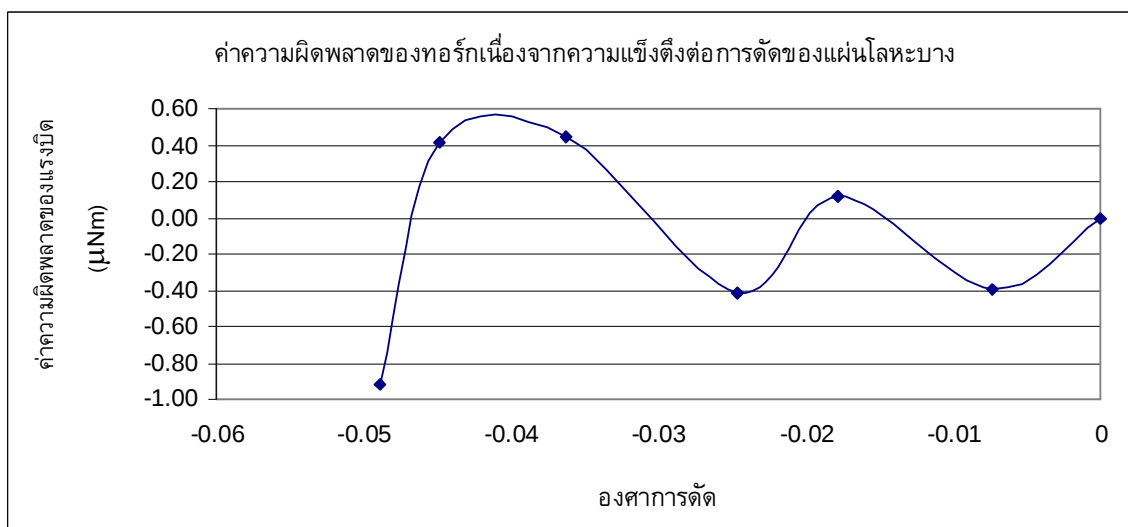
ภาพประกอบ 32 ค่าผลการสมดุลของคานโดยใช้วิธีทริมเวต

การปรับความยาวของคานจากภาพประกอบ 29 และ 31 พบว่าเพื่อให้ค่าการวัดทอร์กทั้งด้านตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกามีค่าเท่ากันมากที่สุดจำเป็นต้องปรับความยาวของคานแบ่งเป็นการปรับคานอย่างหยาบโดยวิธีใช้ตัวแปรสัญญาณทอร์ก ดังตาราง 2 และ ภาพประกอบ 30 ซึ่งจากผลการปรับสามารถปรับให้คานทั้งสองด้านอยู่ห่างกัน $-18 \mu\text{m}$ ถึง $7 \mu\text{m}$ เฉลี่ย $-1.19 \mu\text{m}$ หลังจากปรับความยาวคานอย่างหยาบแล้วจึงปรับความยาวคานอย่างละเอียดโดยใช้วิธีทริมเวตแสดงค่าดังตาราง 3 และ ภาพประกอบ 32 ซึ่งผลการปรับความยาวคานอย่างละเอียดทั้งสองข้างพบว่าสามารถปรับให้คานด้านขวายาวกว่าคานด้านซ้ายอยู่ระหว่าง $-2.56 \mu\text{m}$ ถึง $-2.17 \mu\text{m}$ เฉลี่ย $-2.44 \mu\text{m}$

4.1.1.3 ค่าความผิดพลาดของทอร์กอันเนื่องมาจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง

ตาราง 4 ค่าความผิดพลาดของทอร์กอันเนื่องมาจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง

มวล (mg)	มุมการบิด($^{\circ}$)	ทอร์กจริง (μNm)	ทอร์กจากการ คำนวณ(μNm)	ค่าความผิดพลาด ของทอร์ก(μNm)
1	-0.0073	2.074332	2.46828	-0.39
2	-0.0178	5.057961	4.93656	0.12
3	-0.0246	6.990216	7.40484	-0.41
4	-0.0363	9.87312	9.87312	0.44
5	-0.0449	12.3414	12.3414	0.42
6	-0.0489	13.89519	14.80968	-0.91



ภาพประกอบ 33 แสดงค่าความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง

จากภาพประกอบ 33 เพื่อหาค่าความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง(ค่าแรงต้านทอร์ก)ของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm โดยทำการเพิ่มมวล 1 mg ถึง 6 mg ที่ตุ้มน้ำหนัก พบว่าทอร์กที่ได้จากการทดลองมีค่า 2.074 μNm ถึง 13.895 μNm แต่จากการคำนวณมีค่า 2.46 μNm ถึง 14.80 μNm ทำให้เกิดความผิดพลาดของทอร์กสูงสุดที่มวล 6 mg มีค่า -0.91 μNm และยังสามารถคำนวณจากสมการการถดถอยเชิงเส้น ผลการทดลองพบว่า มีค่าอยู่ที่ 284 μNm ต่อองศาการบิด มีค่าความไม่แน่นอนที่ $\pm 2 \mu\text{Nm}$

4.1.1.4 แรงที่กระทำกับคาน

เพื่อให้แรงที่ได้จากตุ้มน้ำหนักแต่ละลูกมีค่า $4 \text{ N} \pm 0.003 \%$ จากค่าแรงโน้มถ่วงที่จุดใช้งาน (Local gravity) มีค่า 9.78312 m/s^2 ตุ้มน้ำหนักจึงถูกออกแบบให้มีค่า $408.929 \text{ g} \pm 5 \text{ mg}$ ผลการสอบเทียบตุ้มน้ำหนักทั้ง 20 ลูกพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด

ตาราง 5 ข้อมูลค่าน้ำหนักของตุ้มน้ำหนัก

ตุ้มน้ำหนักหมายเลข	มวล (g)
1	408.927
2	408.929
3	408.929
4	408.928
5	408.928
6	408.928
7	408.927
8	408.928
9	408.929
10	408.930
11	408.928
12	408.929
13	408.929
14	408.929
15	408.928
16	408.928
17	408.929
18	408.929
19	408.927
20	408.929

4.1.2 ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน

10 Nm

ค่าความไม่แน่นอนของการวัดของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm จึงประกอบไปด้วย

- การวัดระยะความยาวของคาน, L
- การสมมูลคาน, E
- ความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง, S
- แรงที่กระทำกับคาน, F

4.1.2.1 ความไม่แน่นอนของการวัดความยาวของคาน , L

ตาราง 6 ค่าความไม่แน่นอนของการวัดความยาวของคาน , L

องค์ประกอบ ความไม่ แน่นอนการ จากการวัด	พิสัยการ วัดโดย ประมาณ	ความไม่ แน่นอน สัมพัทธ์	การแจก แจงความ น่าจะเป็น	สัม ประสิทธิ์	ค่าความ ไม่ แน่นอน	ค่าความ ไม่ แน่นอน
X_i	$x_i, \mu\text{m}$	$u(x_i), \%$		C_i	$u_i(y), \mu\text{m}$	$u_i(y), \%$
L_{std}	250009.5	0.00025	Normal	1	2.5	0.00075
L	250009.5	ผลค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวม			2.5	0.00075
		ค่าความไม่แน่นอนขยาย , $k=2$			5.0	0.0015

4.1.2.2 ความไม่แน่นอนของการวัดการสมดุลคาน, E

ตาราง 7 ค่าความไม่แน่นอนของการวัดการสมดุลของคาน

องค์ประกอบ ความไม่ แน่นอนการ จากการวัด	พิสัยการวัด โดยประมาณ		ความไม่ แน่นอน สัมพัทธ์	การแจกแจง ความน่าจะเป็น	สัมประสิทธิ์	ค่าความ ไม่ แน่นอน
X_i	x_i		$w(x_i), \%$		C_i	$w_i(y), \%$
$E(L_{orrect})$	0.00000244	m	0.0002	Normal	1	0.0002
$E(L_{orrect})$	0.00000244	m	ผลค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวม			0.0002
			ค่าความไม่แน่นอนขยาย , $k=2$			0.0004

4.1.2.3 ค่าความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะ

บาง, S

ตาราง 8 ค่าความไม่แน่นอนของการวัดความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง

องค์ประกอบ ความไม่ แน่นอนการ จากการวัด	พิสัยการวัด โดยประมาณ		ความไม่ แน่นอน สัมพัทธ์	การแจกแจง ความน่าจะเป็น	สัมประสิทธิ์ ความไม่ แน่นอน	ค่าความไม่ แน่นอน
X_i	x_i		$w(x_i), \%$		C_i	$w_i(y), \%$
S	0	Nm	0.0002	Rectangular	1	0.0002
S	0	Nm	ผลค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวม			0.0002
			ค่าความไม่แน่นอนขยาย , $k=2$			0.0004

4.1.2.4 ความไม่แน่นอนของการวัดแรง , F

ตาราง 9 ค่าความไม่แน่นอนของการวัด แรงที่กระทำกับคาน

องค์ประกอบ ความไม่ แน่นอนการ จากการวัด	พิสัยการวัด โดยประมาณ		ความไม่ แน่นอน สัมพัทธ์	การแจกแจง ความน่าจะเป็น	สัมประสิทธิ์	ค่าความไม่ แน่นอน
X_i	x_i		$w(x_i), \%$		C_i	$w_i(y), \%$
m_c	0.408929 kg		0.001223	Normal	1	0.001223
g	9.783124 m/s ²		0.0001	Normal	1	0.0001
ρ_a^*	1.2 kg/m ³		0.00108	Rectangular	1	0.00108
DF_c	0 N		0.0000866	Rectangular	1	0.0000866
Force	4 N		ผลค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวม			0.0015
			ค่าความไม่แน่นอนขยาย , $k=2$			0.003

ตาราง 10 ค่าความไม่แน่นอนของการวัดทอร์กรวม

องค์ประกอบ ความไม่ แน่นอนการ จากการวัด	พิสัยการวัด โดยประมาณ	ความไม่ แน่นอน สัมพัทธ์	การแจกแจง ความน่าจะเป็น	สัมประสิทธิ์ ความไม่ แน่นอน	ค่าความไม่ แน่นอน
X_i	x_i	$w(x_i), \%$		C_i	$w_i(y), \%$
F	4 Nm	0.0015	Normal	1	0.0015
L	0.2500095 m	0.0010	Normal	1	0.0010
$E(L_{correct})$	0.00000244 m	0.0002	Normal	1	0.0002
S	0 Nm	0.0002	Rectangular	1	0.0002
M_{std}	1.00004776 Nm	ผลค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวม			0.002
		ค่าความไม่แน่นอนขยาย , $k=2$			0.004

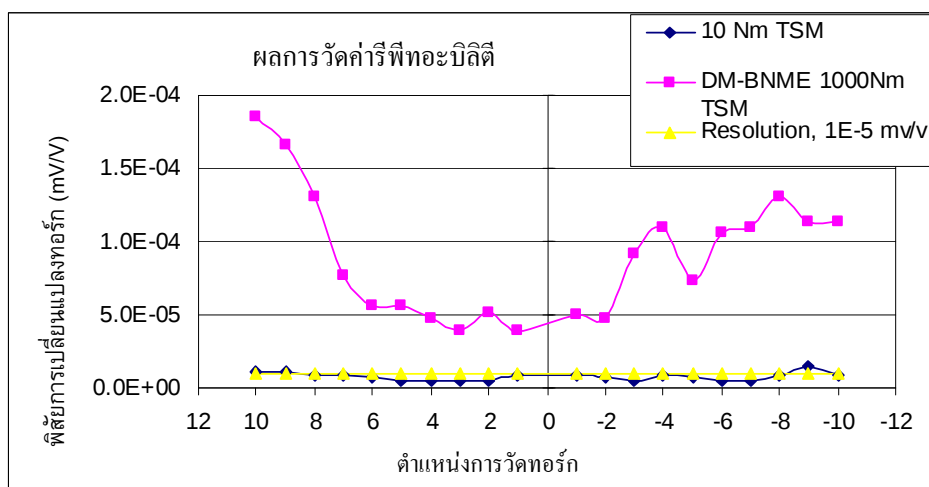
จากตาราง 6 ถึง 10 ผลการประเมินเครื่องมือวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm พบว่าค่าความไม่แน่นอนของการวัดของแรงเท่ากับ 0.0015 % ค่าความไม่แน่นอนของการวัดความยาวของคานจากจุดหมุนถึงจุดที่แรงกระทำ 0.0001 % ค่าความไม่แน่นอนของการวัดการสมดุลคาน 0.0002 % ค่าความไม่แน่นอนจากการวัดที่เกิดจากความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบางเท่ากับ 0.0002 % สามารถประเมินค่าความไม่แน่นอนได้เท่ากับ ± 0.004 % รายงานที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 %

4.2 ผลการเปรียบเทียบค่าการวัดที่ได้จากเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm กับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm

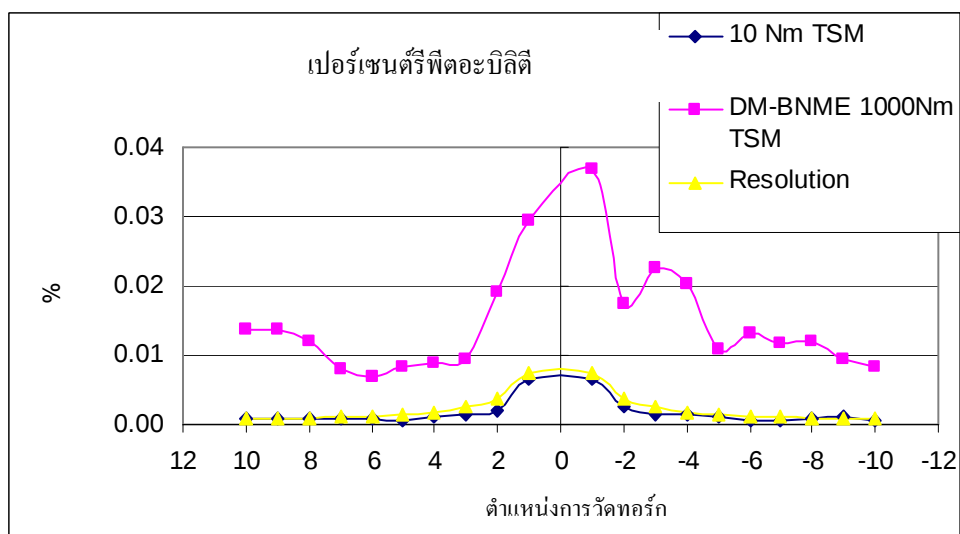
เพื่อเป็นการยืนยันผลการวัดของเครื่องวัดทอร์กที่ได้สร้างขึ้นจึงได้มีการเปรียบเทียบผลการวัดมีพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่าดังนี้

- 1 การเปรียบเทียบค่ารีพีตอะบิลิตี้
- 2 การเปรียบเทียบค่ารีโพรดูซิบิลิตี้
3. การเปรียบเทียบค่าลิเนียริตี้
4. การเปรียบเทียบค่าการเยื้องศูนย์ของทอร์ก

4.2.1 การเปรียบเทียบค่ารีฟิตอะบิลิตี



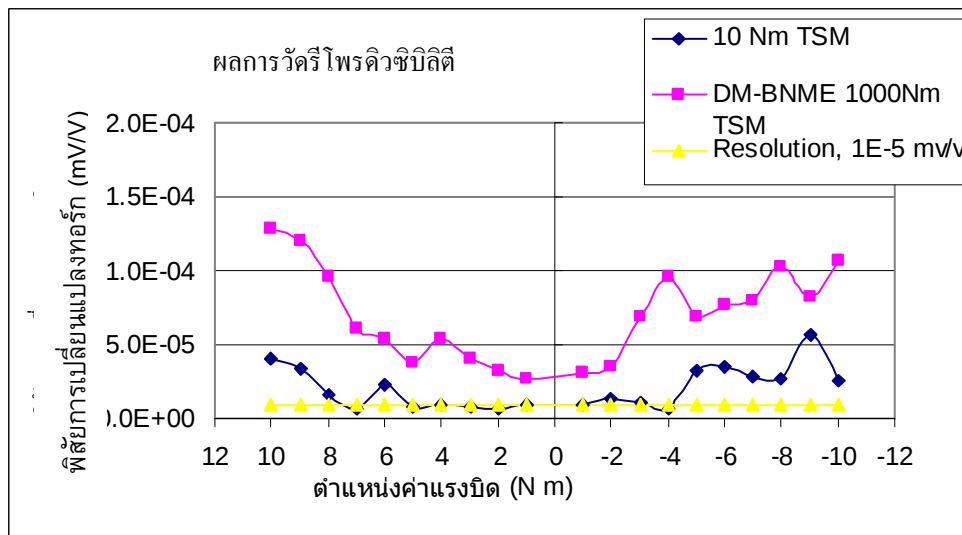
ภาพประกอบ 34 แสดงการเปรียบเทียบค่ารีฟิตอะบิลิตี



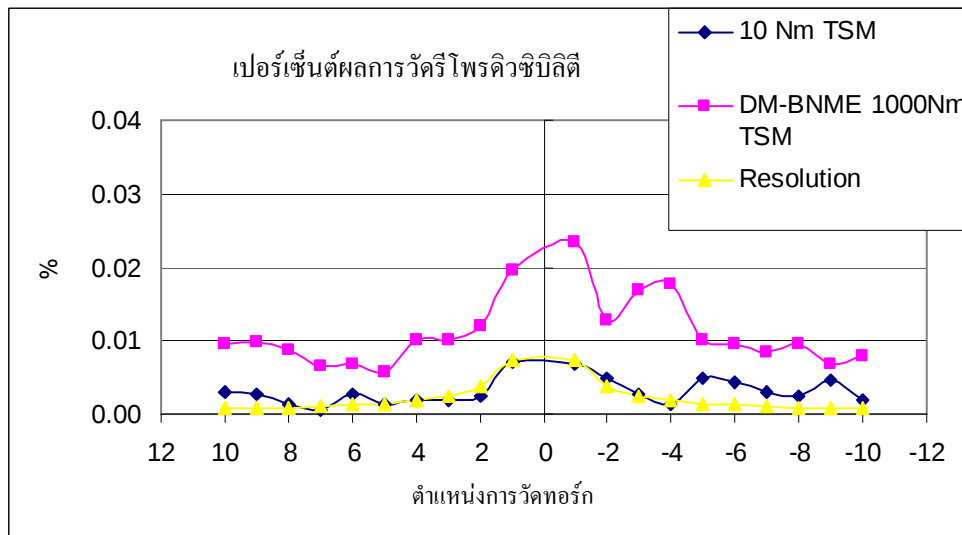
ภาพประกอบ 35 แสดงการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์รีฟิตอะบิลิตี

จากภาพประกอบ 34 ถึง 35 พบว่าค่ารีฟิตอะบิลิตี ของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm เฉลี่ย 8.96×10^{-5} mV/V พิจารณาในรูปของเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยได้ 0.02 % เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm เฉลี่ยที่ 7.79×10^{-6} mV/V พิจารณาในรูปเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยที่ 0.002 % ซึ่งมีความสามารถในการกระทำซ้ำได้ มีค่าดีกว่า

4.2.2 การเปรียบเทียบการวัดรีโพรวิตซ์บิลิตี



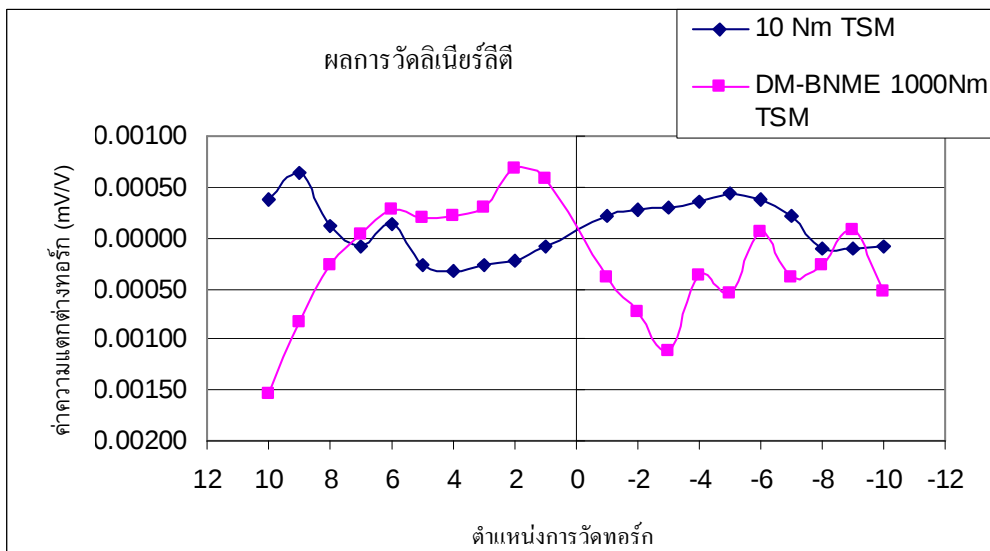
ภาพประกอบ 36 แสดงผลการวัดรีโพรวิตซ์บิลิตี



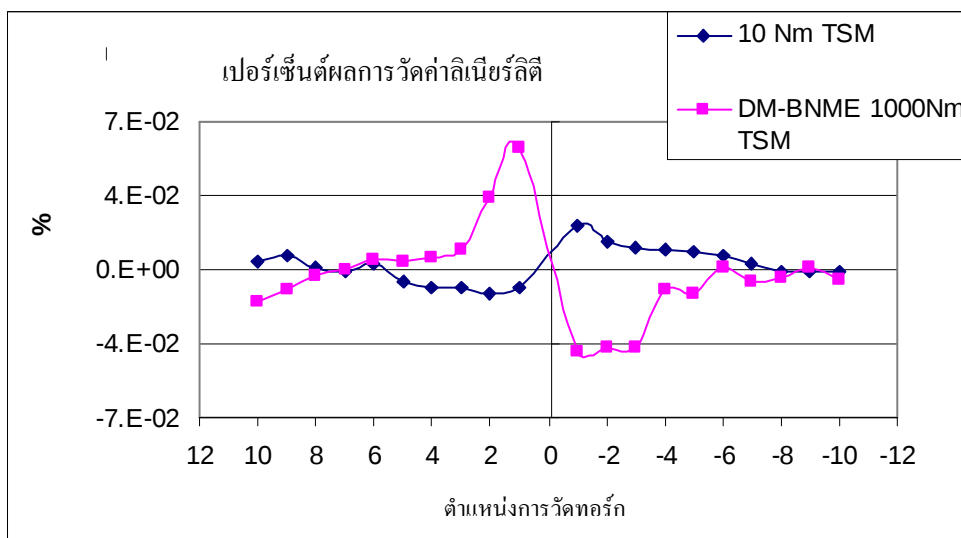
ภาพประกอบ 37 แสดงเปอร์เซ็นต์รีโพรวิตซ์บิลิตี

จากภาพประกอบ 36 ถึง 37 พบว่าค่ารีโพรวิตซ์บิลิตี ของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm เฉลี่ย 6.99×10^{-5} mV/V พิจารณาในรูปของเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย 0.015 % เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm เฉลี่ย 2.03×10^{-5} mV/V พิจารณาในรูปเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย 0.005 % ซึ่งมีค่ารีโพรวิตซ์บิลิตี ที่ดีกว่า

4.2.3 การเปรียบเทียบค่าลิเนียร์ลิตี



ภาพประกอบ 38 แสดงการเปรียบเทียบค่าลิเนียร์ลิตี

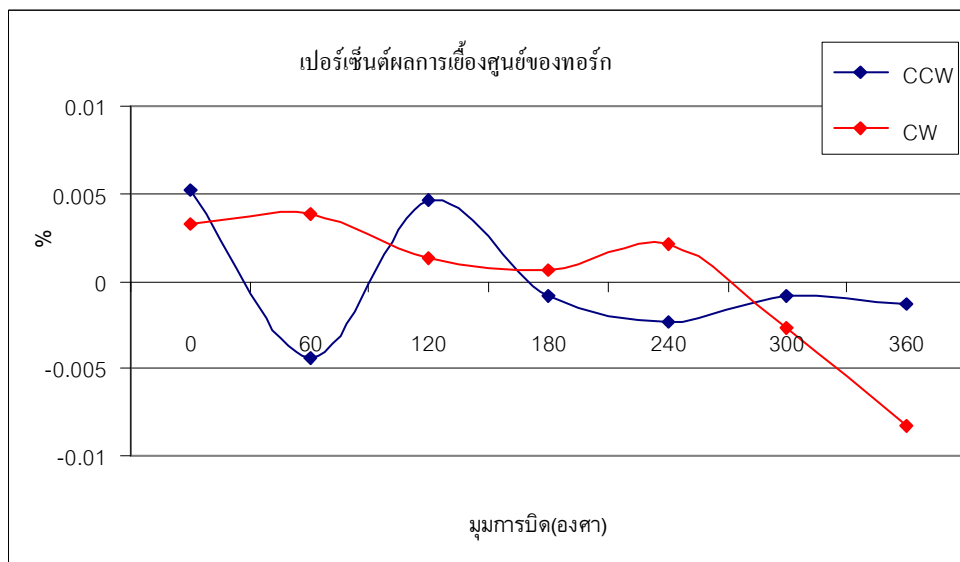


ภาพประกอบ 39 แสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าลิเนียร์ลิตี

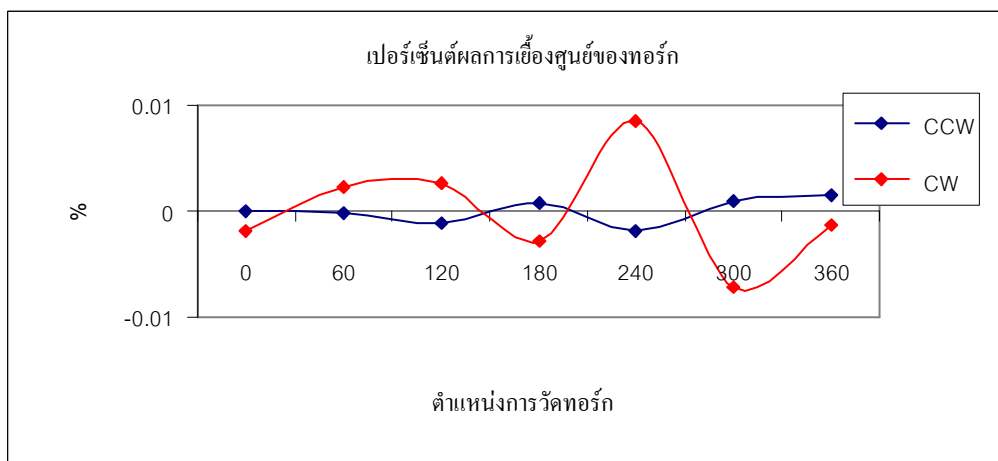
จากภาพประกอบ 38 ถึง 39 พบว่าค่าลิเนียร์ลิตีของเครื่องวัดทอริกมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm เฉลี่ยที่ $3.77\text{E-}4$ mV/V พิจารณาในรูปของเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย 0.011 % เครื่องวัดทอริก

มาตรฐาน 10 Nm เฉลี่ย 1.69×10^{-4} mV/V พิจารณาในรูปเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย 0.0048 % ซึ่งมีค่าลิเนียร์ลิตี ที่ดีกว่า

4.2.4 การเปรียบเทียบผลของการเยื้องศูนย์ของทอร์ค



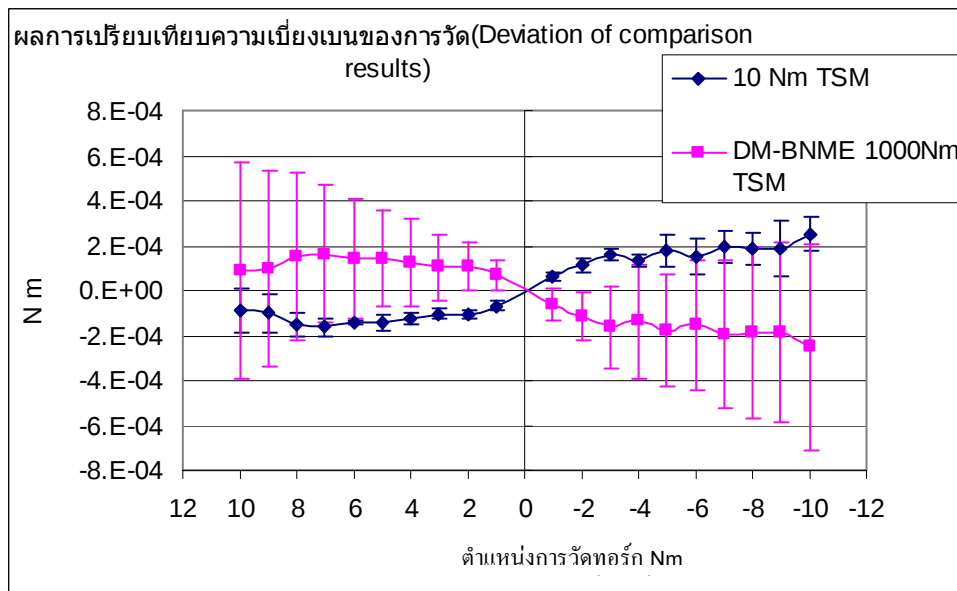
ภาพประกอบ 40 แสดงเปอร์เซ็นต์การเยื้องศูนย์ของทอร์ค 1,000 Nm



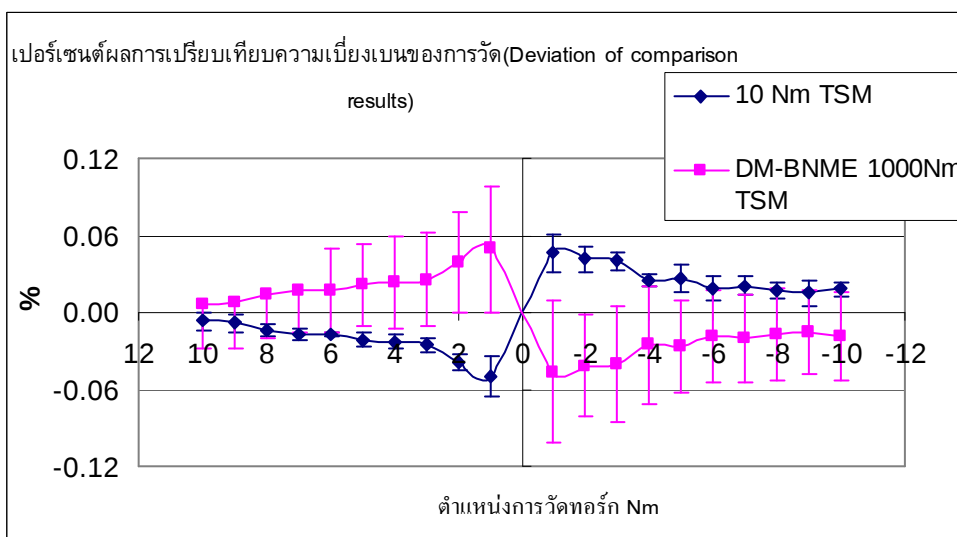
ภาพประกอบ 41 แสดงเปอร์เซ็นต์การเยื้องศูนย์ของทอร์ค 10 Nm

จากภาพประกอบ 40 ถึง 41 พบว่าค่าความสามารถในการวัดความเยื้องศูนย์ของทอร์คของเครื่องวัดทอร์คมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm เฉลี่ย 0.01 % และ เครื่องวัดทอร์คมาตรฐาน 10 Nm เฉลี่ยเท่ากับ 0.01 % มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งเดิมมีค่าไม่แตกต่างกัน

4.2.5 ผลการเปรียบเทียบความเบี่ยงเบนของการวัด (Deviation of comparison result)



ภาพประกอบ42 แสดงผลการเปรียบเทียบความเบี่ยงเบนของการวัด



ภาพประกอบ43 แสดงเปอร์เซ็นต์ผลการเปรียบเทียบความเบี่ยงเบนของการวัด

จากภาพประกอบ 42 ถึง 43 พบว่าค่าความเบี่ยงเบนของการวัดของเครื่องวัดทอร์ก
มาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm เฉลี่ย $2.70\text{E-}04$ Nm พิจารณาในรูปเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย $2.46\text{E-}02$ %
เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm เฉลี่ย $6.99\text{E-}5$ Nm พิจารณาในรูปเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย $2.46\text{E-}02$ %

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm โดยใช้หลักการของคาน และน้ำหนักตายตัว และทำการประมวลผล ให้อยู่ในรูปของทอร์ก ลักษณะเด่น ของเครื่องวัดทอร์ก มาตรฐานเครื่องนี้คือมีจุดหมุนที่ใช้หลักการแขวนคานด้วยแผ่นโลหะบางพร้อมกันนี้ยังใช้แขนตุ้ม น้ำหนักที่ปลายคานทั้งสองข้างด้วย ซึ่งแผ่นโลหะบางที่ใช้ ความหนา 0.03 mm การประเมิน ความสามารถจากการวัดของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm ได้จากค่าความไม่แน่นอนของการวัด ความยาวคาน การสมดุลของคาน ความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งตึงต่อการดัดของ แผ่นโลหะบาง และแรงที่กระทำกับคาน เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องได้เปรียบเทียบผลการวัดกับ เครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ ที่ได้รับการยอมรับแล้ว MODEL No: Dm-BNME 1,000 Nm S/N 153 GTM

5.1 สรุปผล

5.1.1 ผลการประเมินเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm



ภาพประกอบ 44 แสดงเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

ผลการวิจัยพบว่า เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm มีความไม่แน่นอนของการวัดอยู่ที่ 0.004% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการเปรียบเทียบเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm กับ เครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm พบว่ามีค่ารีฟิตอะบิลิตี้เท่ากับ 0.002 % และ 0.02 % ค่ารีโพรดิวซิเบิลิตี้เท่ากับ 0.005 % และ 0.015 % ค่าลิเนียร์ลิตี้เท่ากับ 0.0048 % และ 0.01 % ค่าความเบี่ยงเบนของการวัด 2.461E-02 % และ 2.461E-02 % ค่าการเยื้องศูนย์ของทอร์ก มีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งข้อดีของเครื่องที่สร้างนี้คือ การบำรุงรักษาง่าย ราคาถูก ไม่มีการรบกวนจากการสั่นสะเทือนของคาน ไม่มีการลื่นไถลของคาน และสามารถลดแรงกระทำในแนวแกนนอนได้

5.1.2. ผลการเปรียบเทียบค่าการวัดที่ได้จากเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm กับ เครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm

ตาราง 11 ผลการเปรียบเทียบระหว่างเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm กับ เครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm

รายการเปรียบเทียบ	เครื่อง 10 Nm TSM	เครื่อง 1,000 Nm TSM
พิสัย	1 - 10 Nm	1 - 1,000 Nm
ค่าความแม่นยำ	3·E-4	3·E-4
ค่าความไม่แน่นอนของการวัด	0.004%	0.030%
ค่ารีฟิตอะบิลิตี้	0.002%	0.02%
ค่ารีโพรดิวซิเบิลิตี้	0.005%	0.015%
ค่า ลิเนียร์ลิตี้	0.0048%	0.01%
ค่าการเยื้องศูนย์ทอร์ก	0.01%	0.01%
ค่าการเบี่ยงเบนของการวัด	2.46E-02%	2.46E-02%

5.2 อภิปรายผล

จากการสร้างเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm โดยใช้แผ่นโลหะบางเป็นจุดศูนย์กลางทอร์ก มีการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดแบ่งออกเป็นสองลักษณะ ประการแรกชิ้นส่วนที่สร้างขึ้น หลังจากสร้างเสร็จแล้วต้องส่งสอบเทียบกับห้องปฏิบัติการเฉพาะได้แก่ คาน ตุ่มน้ำหนัก เป็นต้น ประการที่สองคือ อุปกรณ์การวัดประกอบต่างๆ เช่น ระดับน้ำ นาฬิกาจับเวลา อุปกรณ์แสดงผล ต้องผ่านการสอบเทียบและสามารถสอบกลับได้ หลังจากนั้นนำเอามาประกอบกันแล้วทดลองวิเคราะห์ผล แก๊วเจนเป็นที่น่าสนใจแล้วจึงมีการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวมซึ่งผลการประเมินความไม่แน่นอนของการวัดรวมมีค่า 0.004% ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าสนใจอย่างมาก โดยที่ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ต้องการ คือ 0.05% และหลังจากนั้นได้เปรียบเทียบผลการวัดซึ่งประกอบไปด้วย ค่ารีฟิตอะบิลิตี้ รีโพรดิวซิเบิลิตี้ ค่าลิเนียร์ลิตี้ ค่าการเยื้องศูนย์ของทอร์ก และค่า

ความเปี่ยงเบนมาตรฐาน กับเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ รุ่น Dm-BNME 1,000 Nm S/N153 GTM หลังจาก เปรียบเทียบผลการวัดแล้วได้ค่า ค่ารีพีทอะบิลิตี รีโพรดิวซ์ซิเบิลิตี ลิเนียร์ลิตีดีกว่า ส่วนค่าการเยื้องศูนย์ของทอร์กไม่มีความแตกต่างกัน และค่าความไม่แน่นอนรวมของการวัดที่ 0.03% ซึ่งมีค่าความไม่แน่นอนของการวัดต่างกันค่อนข้างมากมีผลให้ผลการเปรียบเทียบได้ละเอียด ไม่ชัดเจนเท่าที่ควร ถ้าต้องการยืนยันความถูกต้องที่สูงขึ้นจำเป็นที่จะต้องเปรียบเทียบผลการวัดกับ เครื่องวัดทอร์กมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับแล้วเครื่องอื่นที่มีค่าความไม่แน่นอนของการวัดใกล้เคียง กัน และ ควรเปรียบเทียบผลการวัดในลักษณะเป็นกลุ่ม และจากผลการวิจัยในครั้งนี้ทำให้สถาบัน มาตรฐานแห่งชาติมีความคิดที่จะสถาปนามาตรฐานด้านทอร์กในขนาด 1 ถึง 10 Nm ขึ้นเองโดย ได้มีการวางแผนการเปรียบเทียบผลการวัดกับต่างประเทศ ซึ่งข้อดีของเครื่องที่ออกแบบนี้คือ การ บำรุงรักษาง่าย ราคาถูก ไม่มีการรบกวนจากการสั่นสะเทือนของคาน ไม่มีการลื่นไถลของคาน และสามารถลดแรงกระทำในแนวแกนนอนได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะทั่วไป

5.3.1.1 ควรปรับปรุงการใช้คอมพิวเตอร์สำหรับเก็บข้อมูลอัตโนมัติจากอินดิเคเตอร์ เพื่อลดค่าความผิดพลาดเนื่องจากผู้ทำการทดลอง

5.3.1.2 ควรใช้ชุดแสดงผลที่มีค่าการแสดงความละเอียดของการแสดงผลมากกว่า 0.00001 mV/V ทำห้ค่าความผิดพลาดจากการวัดลดลงได้

5.3.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัย

5.3.2.1 ควรปรับปรุงพิสัยการวัดให้สูงขึ้น แต่ควรคำนึงถึงความแข็งแรงของแผ่น โลหะบางและค่าความแข็งตึงต่อการดัด โดยพิสัยที่ทำการที่มีความต้องการใช้งานในอนาคต คือพิสัย 0.1 ถึง 1 Nm และพิสัย 10 ถึง 100 Nm

5.3.2.2 ควรปรับปรุงด้านความเสถียรของการวางตุ้มน้ำหนักแต่ละค่าให้มีความ เสถียรมากกว่านี้จะช่วยลดเวลาในการสอบเทียบค่าแต่ละค่าทอร์กที่สอบเทียบ

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- บรรจบ สุขทัต และ อัจฉรา เจริญสุข.2550. เอกสารประกอบการสอนหลักสูตรความไม่แน่นอนของการวัด (Uncertainty of Measurement) . สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ.
- ราชบัณฑิตยสถาน. 2546 ศัพท์วิทยาศาสตร์ อังกฤษ-ไทย ไทย-อังกฤษ. พิมพ์ครั้งที่ 5 กรุงเทพฯ. สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2546. มาตรวิทยา - ฉบับย่อ ปทุมธานี
- Andreas Bruege .1996,Influence of Eccentric mounting on the calibration of torque measuring device, Phys-Techn. Bundesanstalt Braunschweig. Germany
- Andreas Bruege & Rudolf Konya. 1998,Investigations on transducers for transfer or reference in continuous torque calibration. PTB, Germany
- Diedert peschel. 2000. Proposal for the design of torque calibration machines Using the principle of a component system. PTB, Germany
- DIN 51309. Feb1998. Calibration of Static Torque Measuring Devices
- Dirk Roske & K. Adolf & D. Peschel. 2000. Lever optimization for torque standard machines.torque laboratory division foe mechanics and Acoustics Phys-Techn. Bundesanstalt braunschweig Germany
- Dirk Roske. 2005. Key comparisons in the field of torque measurement . Solid mechanic department. Phys-Techn. Bundesanstalt Braunschweig. Germany
- International Measurement Confederation (IMEKO) TC-3 The 5th Asia-PacificSymposium on measurement of Force, Mass and Torque Tsukuba Center Inc Tsukuba November 7.10.2000
- Koji Ohgushi .Takashi Ota. .Kazunaga Ueda . 2003. Load dependency of moment –arm length in the torque standard machine . National Metrology Institute of Japan Tsukuba Japan.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก	ใบรับรองผลการวัดส่วนประกอบและอุปกรณ์ทดลอง
ภาคผนวก ข	ตัวอย่างการคำนวณ
ภาคผนวก ค	ตารางผลการทดลอง
ภาคผนวก ง	ตารางสมบัติของ อะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม
ภาคผนวก จ	บทความทางวิชาการงานประชุมวิชาการสมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทยครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่วันที่ 11 – 12 กุมภาพันธ์ 2551 จัดโดยสมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย ณ มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์ บางเขน
ภาคผนวก ช	คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย
ภาคผนวก ซ	แบบเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

ภาคผนวก ก

ใบรับรองผลการวัดการวัดส่วนประกอบและอุปกรณ์ทดลอง

 NMT	Calibration Report	Cal. Record No. DMF-0184/07 Page 1 of 3 Pages		
Equipment : LEVEL ARM LENGTH		Date of Cert. : 23 November 2007		
Model : TBM	Serial No. : 1-97-20047			
Range : 300 mm	Accuracy :			
Resolution :	Model No. : 01			
Customer : Transport Laboratory NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY (TECHNICAL) 24-24 Moo 11 Bang K, Bang Luang, Pathumthani 12130				
Calibration Frequency : 1 Year				
Calibration By : C. A. S.		Calibrated By : T. S. S.		
Test Equipment Card :				
Item No.	Description	Model/Type	SN	Due Date
1	TBM	TBM-001	121	6 February 2008
Remarks :				

ภาพประกอบ 45 ใบรับรองผลการวัดความยาวคัน

National Institute of Metrology (Thailand)
Ministry of Science and Technology

Certificate of Calibration

Certificate No. : MTIN 1004-07
Issued by : Torque Laboratory
 Mechanical Metrology Department Page 1 of 6 Pages

Object : Torque Transducer (10 N·m)

Manufacturer : Raute Precision OY

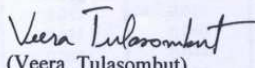
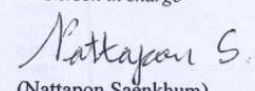
Type : TT1/10 N·m

Serial No. : #36838-04

Customer : Torque Laboratory, Mechanical Metrology Department
 National Institute of Metrology (Thailand)
 3/4-5 Moo 3, Klong 5, Klong Luang, Pathumthani 12120

Date of Calibration : 09.08.2007

The reported uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k=2$, providing a level of confidence of approximately 95%.

Reference	Date	Authorized Signatory	Person in charge
CSR No. I-07-172	10.08.2007	 (Veera Tulasombut)	 (Nattapon Saengkhum)

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the Director of National Institute of Metrology (Thailand).

National Institute of Metrology (Thailand), 3/5 Moo 3, Klong 5, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand
 Telephone (66) 2577-5100, Fax (66) 2577-3658

ภาพประกอบ 46 ใบรับรองผลตัวแปรสัญญาณทอร์ก 10 Nm



Calibration record

Continuation of Calibration Report on Serial Number DM-06-0070

Page 1 of 3 Pages

Equipment : Precision Level	W/O No. : I-06-182/1
MFR : RSK	Model : 541-1002
Range : $\pm 0,10$ mm/m	Serial No. : 05115
Accuracy : N/A mm/m	Resolution : 0,02 mm/m
Cal. Record No. : DMD-0060-06	Date of Cert. : 12 December 2006

Client : Torque Laboratory

National Institute of Metrology (Thailand)

3/4-5 Moo 3, Klong 5, Klong Luang, Pathumthani 12120

Calibration Procedure : JIS B 7510 :1993

Calibration By : *W. Atin S.omit*
12 December 2006

Certificate By : *T. Aumern.*
18/12/2006

Test Equipment Used :

Item No.	Description	Model/Type	S/N	Due Date
1	Electronic Inclinator	NT41-H	D0936	16/10/2007

Remarks :

ภาพประกอบ 47 ใบรับรองผลระดับน้ำ

Department : Electrical Metrology Page 1 of 2 Pages

Calibrated by : Massinee / Chairat Certified by : G-

[illegible]

Remarks : _____

.....

Fr-CRD 01/02
Rev:01

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

(ก)ตัวอย่างการคำนวณ การปรับความยาวคาน

ตาราง 12 ตัวอย่างการบันทึกผลการทดลองการปรับความยาวคาน

แรง(N)	การปรับคานครั้งที่ 1		การปรับคานครั้งที่ 2	
	ทอร์ก (Nm)	ระยะความแตกต่าง ของคาน (mm)	ทอร์ก (Nm)	ระยะความแตกต่าง ของคาน (mm)
4	0.00287	-0.35875	0.00015	-0.01875

จากสมการ (21)

$$\Delta x = \frac{T}{-2F}$$

$$T = 0.00287 \text{ Nm}$$

$$F = 4 \text{ N}$$

$$\Delta X = \frac{0.00287}{-2(4)}$$

$$= -3.5875 \times 10^{-4} \text{ m}$$

หรือ ทำให้เป็น mm

$$\text{ระยะความแตกต่างของคาน } \Delta X = -0.35875 \text{ mm}$$

การคำนวณค่าความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง, (Bending Stiffness) S

ตาราง 13 ตัวอย่างการบันทึกผลการทดลองค่าความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง

มวล (mg)	มุมการบิด (องศา)	ทอร์กจริง (μNm)	ทอร์กจากการ คำนวณ(μNm)	ค่าความ ผิดพลาด (μNm)
1	-0.0073	2.074332	2.46828	-0.39

จากสมการ (15) เมื่อ M_{residual} ,มีค่าเท่ากับ ศูนย์

$$\begin{aligned}
 M_{STD} &= F.L \\
 &= ((1/10^6) \times 9.87312) \times 0.25 \\
 &= 2.46828 \times 10^{-6} \text{ Nm} \\
 \text{หรือ} &= 2.46828 \text{ } \mu\text{Nm} \\
 \text{ค่าความผิดพลาด} &= 2.074332 - 2.46828 \\
 &= -0.39
 \end{aligned}$$

(ข)การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดแรง

ตาราง 14 ตัวอย่างองค์ประกอบของค่าความไม่แน่นอนของการวัดแรง

องค์ประกอบ ความไม่ แน่นอนการ จากการวัด	พิสัย โดยประมาณ	ความไม่ แน่นอน สัมพัทธ์	การแจกแจง ความน่าจะเป็น	สัมประสิทธิ์	ค่าความไม่ แน่นอน
X_i	x_i	$w(x_i), \%$		C_i	$w_i(y), \%$
m_c	0.408929 kg	0.001223	Normal	1	0.001223
	9.783124				
g	m/s^2	0.0001	Normal	1	0.0001
ρ_a^*	1.2 kg/m^3	0.00108	Rectangular	1	0.00108
DF_c	0 N	0.0000866	Rectangular	1	0.0000866
$Force$	4 N	ผลค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวม			0.0015
		ค่าความไม่แน่นอนขยาย , $k=2$			0.003

จากสมการ (18)

$$w(F) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial m} w(m)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial g_{local}} w(g_{local})\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \rho_a} w(\rho_a)\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta F_m} w(\Delta F_m)\right)^2}$$

$$F = \sqrt{(0.001223)^2 + (0.0001)^2 + (0.00108)^2 + (0.0000866)^2}$$

$$F = 0.0016$$

(ค)การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดความยาวของคานจากจุดหมุนถึงจุดที่แรงกระทำ

ได้จากการส่งคานวัดความยาวกับห้องปฏิบัติการความยาวสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ได้ค่า ความไม่แน่นอนของการวัด

(ง)การคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวม

ตาราง 15 ตัวอย่างองค์ประกอบของค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวม

องค์ประกอบ			ความไม่	การแจกแจง		ค่าความ
ความไม่	พิสัยโดยประมาณ		แน่นอน	ความน่า	สัมประสิทธิ์	ไม่
แน่นอนการ			สัมพัทธ์	จะเป็น		แน่นอน
จากการวัด						
X_i	x_i		$w(x_i), \%$		C_i	$w_i(y), \%$
F	4	Nm	0.0015	Normal	1	0.0015
L	0.2500095	m	0.0010	Normal	1	0.0010
$L_{correct}$	0.00000244	m	0.0002	Normal	1	0.0002
S	0	Nm	0.0002	Rectangular	1	0.0002
M	1.00004776	Nm	ผลค่าความไม่แน่นอนของการวัดรวม			0.002
			ค่าความไม่แน่นอนขยาย , $k=2$			0.004

จากสมการ (16)

$$\begin{aligned}
 w(M_{std}) &= \sqrt{\left(\frac{\partial M_{std}}{\partial F} w(F)\right)^2 + \left(\frac{\partial M_{std}}{\partial l} w(L)\right)^2 + w^2 E(L) + \left(\frac{\partial M_{std}}{\partial S} w(S)\right)^2 + \left(\frac{\partial M_{std}}{\partial M_{residual}} w(M_{residual})\right)^2} \\
 &= \sqrt{(0.0015)^2 + (0.001)^2 + (0.0002) + (0.0002)^2} \\
 &= 0.00184
 \end{aligned}$$

หรือรายงานค่า เท่ากับ 0.002

ภาคผนวก ค
ตารางผลการทดลอง

ตาราง 16 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)

ขั้นตอน ทดลอง	1 Nm				เฉลี่ย
	ไม่มีแรง	แรง	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
	กระทำ	กระทำ	หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต 0°	-0.01822	0.11691	0.13513	0.13511	0.13511
	-0.01823	0.11691	0.13514	0.13512	
	-0.01822	0.11690	0.13512	0.13510	
	-0.01822	0.11690	0.13512	0.13510	
	-0.01822	0.11690	0.13512	0.13510	
	-0.01822	0.11692	0.13514	0.13512	
	-0.01822	0.11691	0.13513	0.13511	
	-0.01822	0.11690	0.13512	0.13510	
ฟรีโหลต 120°	-0.01836	0.11679	0.13515	0.13513	0.13510
	-0.01832	0.11681	0.13513	0.13511	
	-0.01832	0.11680	0.13512	0.13510	
	-0.01832	0.11680	0.13512	0.13510	
	-0.01832	0.11680	0.13512	0.13510	
	-0.01832	0.11679	0.13511	0.13509	
ฟรีโหลต 240°	-0.01847	0.11667	0.13514	0.13512	0.13510
	-0.01842	0.11670	0.13512	0.13510	
	-0.01842	0.11669	0.13511	0.13509	
	-0.01842	0.11670	0.13512	0.13510	
	-0.01842	0.11669	0.13511	0.13509	
	-0.01841	0.11669	0.13510	0.13508	
ค่ากึ่งกลาง			0.13510		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			9.6E-06		
ค่าความไม่แน่นอน			2.1E-05		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			2.8E-05		

ตาราง 17 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	2 Nm				เฉลี่ย
	ไม่มีแรง	แรง	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
	กระทำ	กระทำ	หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต 0°	-0.01824	0.25203	0.27027	0.27024	
	-0.01820	0.25204	0.27024	0.27021	
	-0.01820	0.25204	0.27024	0.27021	
	-0.01820	0.25204	0.27024	0.27021	
	-0.01820	0.25203	0.27023	0.27020	
	-0.01820	0.25203	0.27023	0.27020	0.27020
	-0.01820	0.25203	0.27023	0.27020	
	-0.01821	0.25203	0.27024	0.27021	
ฟรีโหลต 120°	-0.01840	0.25190	0.27030	0.27027	
	-0.01832	0.25191	0.27023	0.27020	
	-0.01833	0.25191	0.27024	0.27021	
	-0.01833	0.25190	0.27023	0.27020	0.27020
	-0.01834	0.25190	0.27024	0.27021	
	-0.01834	0.25190	0.27024	0.27021	
ฟรีโหลต 240°	-0.01843	0.25184	0.27027	0.27024	
	-0.01838	0.25185	0.27023	0.27020	
	-0.01838	0.25184	0.27022	0.27019	
	-0.01839	0.25184	0.27023	0.27020	0.27019
	-0.01839	0.25184	0.27023	0.27020	
	-0.01839	0.25183	0.27022	0.27019	
ค่ากึ่งกลาง			0.27020		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			6.8E-06		
ค่าความไม่แน่นอน			1.8E-05		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			1.9E-05		

ตาราง 18 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	3 Nm				
	ไม่มีแรง	แรง	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
	กระทำ	กระทำ	หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต 0°	-0.01838	0.38703	0.40541	0.40536	-0.01838
	-0.01832	0.38704	0.40536	0.40531	-0.01832
	-0.01832	0.38703	0.40535	0.40530	-0.01832
	-0.01832	0.38703	0.40535	0.40530	-0.01832
	-0.01832	0.38703	0.40535	0.40530	-0.01832
	-0.01833	0.38702	0.40535	0.40530	-0.01833
	-0.01832	0.38703	0.40535	0.40530	-0.01832
	-0.01832	0.38703	0.40535	0.40530	-0.01832
ฟรีโหลต 120°	-0.01835	0.38708	0.40543	0.40538	-0.01835
	-0.01826	0.38711	0.40537	0.40532	-0.01826
	-0.01827	0.38710	0.40537	0.40532	-0.01827
	-0.01826	0.38711	0.40537	0.40532	-0.01826
	-0.01826	0.38710	0.40536	0.40531	-0.01826
	-0.01826	0.38710	0.40536	0.40531	-0.01826
ฟรีโหลต 240°	-0.01849	0.38689	0.40538	0.40533	-0.01849
	-0.01845	0.38691	0.40536	0.40531	-0.01845
	-0.01844	0.38691	0.40535	0.40530	-0.01844
	-0.01844	0.38692	0.40536	0.40531	-0.01844
	-0.01844	0.38691	0.40535	0.40530	-0.01844
	-0.01844	0.38691	0.40535	0.40530	-0.01844
ค่ากึ่งกลาง			0.40531		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			8.2E-06		
ค่าความไม่แน่นอน			2.4E-05		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			2.4E-05		

ตาราง 19 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	4 Nm				เฉลี่ย
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
			หน่วย	ค่าจริง	
ฟรีโหลต 0°	-0.01834	0.52220	0.54054	0.54048	0.54042
	-0.01830	0.52220	0.54050	0.54044	
	-0.01830	0.52221	0.54051	0.54045	
	-0.01828	0.52220	0.54048	0.54042	
	-0.01830	0.52219	0.54049	0.54043	
	-0.01829	0.52220	0.54049	0.54043	
	-0.01828	0.52221	0.54049	0.54043	
	-0.01828	0.52221	0.54049	0.54043	
	-0.01836	0.52215	0.54051	0.54045	
ฟรีโหลต 120°	-0.01831	0.52216	0.54047	0.54041	0.54040
	-0.01830	0.52217	0.54047	0.54041	
	-0.01830	0.52216	0.54046	0.54040	
	-0.01831	0.52216	0.54047	0.54041	
	-0.01831	0.52216	0.54047	0.54041	
	-0.01846	0.52207	0.54053	0.54047	
ฟรีโหลต 240°	-0.01839	0.52209	0.54048	0.54042	0.54042
	-0.01839	0.52209	0.54048	0.54042	
	-0.01839	0.52209	0.54048	0.54042	
	-0.01840	0.52209	0.54049	0.54043	
	-0.01840	0.52209	0.54049	0.54043	
ค่ากึ่งกลาง			0.54042		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.0E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			3.0E-05		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			2.9E-05		

ตาราง 20 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	5 Nm				เฉลี่ย
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
			หน่วย	ค่าจริง	
ฟรีโหลต	-0.01832	0.65736	0.67568	0.67560	
	-0.01828	0.65735	0.67563	0.67555	
	-0.01828	0.65735	0.67563	0.67555	
0°	-0.01827	0.65735	0.67562	0.67554	
	-0.01828	0.65735	0.67563	0.67555	
	-0.01828	0.65735	0.67563	0.67555	0.67555
	-0.01828	0.65735	0.67563	0.67555	
	-0.01827	0.65736	0.67563	0.67555	
ฟรีโหลต	-0.01830	0.65737	0.67567	0.67559	
120°	-0.01823	0.65738	0.67561	0.67553	
	-0.01824	0.65738	0.67562	0.67554	
	-0.01824	0.65738	0.67562	0.67554	0.67554
	-0.01823	0.65739	0.67562	0.67554	
	-0.01823	0.65739	0.67562	0.67554	
ฟรีโหลต	-0.01847	0.65720	0.67567	0.67559	
240°	-0.01840	0.65721	0.67561	0.67553	
	-0.01840	0.65721	0.67561	0.67553	
	-0.01839	0.65722	0.67561	0.67553	0.67553
	-0.01838	0.65723	0.67561	0.67553	
	-0.01838	0.65723	0.67561	0.67553	
ค่ากึ่งกลาง				0.67554	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				8.3E-06	
ค่าความไม่แน่นอน				3.2E-05	
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				2.4E-05	

ตาราง 21 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	6 Nm				เฉลี่ย
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
			หน่วย	ค่าจริง	
ฟรีโหลต 0°	-0.01834	0.79259	0.81093	0.81083	
	-0.01823	0.79260	0.81083	0.81073	
	-0.01823	0.79260	0.81083	0.81073	
	-0.01823	0.79261	0.81084	0.81074	
	-0.01822	0.79260	0.81082	0.81072	
	-0.01822	0.79261	0.81083	0.81073	0.81073
	-0.01821	0.79262	0.81083	0.81073	
	-0.01822	0.79261	0.81083	0.81073	
ฟรีโหลต 120°	-0.01832	0.79252	0.81084	0.81074	
	-0.01825	0.79253	0.81078	0.81068	
	-0.01825	0.79253	0.81078	0.81068	
	-0.01825	0.79253	0.81078	0.81068	0.81068
	-0.01825	0.79253	0.81078	0.81068	
	-0.01824	0.79254	0.81078	0.81068	
ฟรีโหลต 240°	-0.01852	0.79236	0.81088	0.81078	
	-0.01841	0.79240	0.81081	0.81071	
	-0.01841	0.79238	0.81079	0.81069	
	-0.01842	0.79239	0.81081	0.81071	0.81071
	-0.01841	0.79239	0.81080	0.81070	
	-0.01842	0.79240	0.81082	0.81072	
	ค่ากึ่งกลาง			0.81071	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			2.2E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			5.5E-05		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			6.4E-05		

ตาราง 22 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	7 Nm					
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย	
			หน่วย	ค่าจริง		
						(mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01835	0.92763	0.94598	0.94587		
0°	-0.01826	0.92764	0.94590	0.94579		
	-0.01826	0.92765	0.94591	0.94580		
	-0.01826	0.92765	0.94591	0.94580		
	-0.01825	0.92765	0.94590	0.94579		
	-0.01825	0.92765	0.94590	0.94579	0.94579	
	-0.01826	0.92765	0.94591	0.94580		
	-0.01825	0.92765	0.94590	0.94579		
	-0.01825	0.92769	0.94594	0.94583		
ฟรีโหลต						
120°	-0.01821	0.92770	0.94591	0.94580		
	-0.01820	0.92770	0.94590	0.94579		
	-0.01820	0.92770	0.94590	0.94579	0.94579	
	-0.01820	0.92770	0.94590	0.94579		
	-0.01821	0.92770	0.94591	0.94580		
	-0.01838	0.92757	0.94595	0.94584		
ฟรีโหลต						
	240°	-0.01831	0.92760	0.94591	0.94580	
	-0.01830	0.92761	0.94591	0.94580		
	-0.01830	0.92760	0.94590	0.94579	0.94579	
	-0.01830	0.92759	0.94589	0.94578		
	-0.01831	0.92760	0.94591	0.94580		
ค่ากึ่งกลาง				0.94579		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.3E-06		
ค่าความไม่แน่นอน				4.0E-05		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				1.8E-05		

ตาราง 23 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	8 Nm				
	ไม่มีแรง	แรง	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
	กระทำ	กระทำ	หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต	-0.01829	1.06283	1.08112	1.08099	
	-0.01824	1.06284	1.08108	1.08095	
	-0.01823	1.06283	1.08106	1.08093	
	-0.01822	1.06283	1.08105	1.08092	
	-0.01822	1.06284	1.08106	1.08093	
	-0.01822	1.06284	1.08106	1.08093	1.08093
	-0.01821	1.06285	1.08106	1.08093	
	-0.01822	1.06284	1.08106	1.08093	
	-0.01828	1.06288	1.08116	1.08103	
120°	-0.01818	1.06291	1.08109	1.08096	
	-0.01818	1.06291	1.08109	1.08096	
	-0.01817	1.06291	1.08108	1.08095	1.08095
	-0.01817	1.06291	1.08108	1.08095	
	-0.01816	1.06291	1.08107	1.08094	
	-0.01839	1.06271	1.08110	1.08097	
240°	-0.01832	1.06273	1.08105	1.08092	
	-0.01831	1.06274	1.08105	1.08092	
	-0.01831	1.06273	1.08104	1.08091	1.08092
	-0.01832	1.06273	1.08105	1.08092	
	-0.01831	1.06274	1.08105	1.08092	
ค่ากึ่งกลาง			1.08094		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.6E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			5.4E-05		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			4.5E-05		

ตาราง 24 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	9 Nm				
	ไม่มีแรง	แรง	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
	กระทำ	กระทำ	หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต	-0.01827	1.19812	1.21639	1.21625	
	-0.01817	1.19814	1.21631	1.21617	
	-0.01817	1.19814	1.21631	1.21617	
0°	-0.01817	1.19814	1.21631	1.21617	
	-0.01817	1.19814	1.21631	1.21617	
	-0.01817	1.19814	1.21631	1.21617	1.21616
	-0.01817	1.19813	1.21630	1.21616	
	-0.01817	1.19813	1.21630	1.21616	
ฟรีโหลต	-0.01819	1.19810	1.21629	1.21615	
120°	-0.01813	1.19811	1.21624	1.21610	
	-0.01813	1.19810	1.21623	1.21609	
	-0.01814	1.19810	1.21624	1.21610	1.21609
	-0.01814	1.19809	1.21623	1.21609	
	-0.01813	1.19809	1.21622	1.21608	
ฟรีโหลต	-0.01841	1.19794	1.21635	1.21621	
240°	-0.01829	1.19795	1.21624	1.21610	
	-0.01830	1.19797	1.21627	1.21613	
	-0.01829	1.19796	1.21625	1.21611	1.21611
	-0.01830	1.19796	1.21626	1.21612	
	-0.01829	1.19796	1.21625	1.21611	
ค่ากึ่งกลาง				1.21612	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.3E-05	
ค่าความไม่แน่นอน				8.2E-05	
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				9.5E-05	

ตาราง 25 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	10 Nm				เฉลี่ย
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
			หน่วย	ค่าจริง	
ฟรีโหลต 0°	-0.01833	1.33318	1.35151	1.35135	
	-0.01820	1.33321	1.35141	1.35125	
	-0.01819	1.33322	1.35141	1.35125	
	-0.01820	1.33321	1.35141	1.35125	
	-0.01820	1.33321	1.35141	1.35125	
	-0.01820	1.33322	1.35142	1.35126	1.35125
	-0.01820	1.33321	1.35141	1.35125	
	-0.01820	1.33322	1.35142	1.35126	
ฟรีโหลต 120°	-0.01832	1.33309	1.35141	1.35125	
	-0.01821	1.33311	1.35132	1.35116	
	-0.01821	1.33310	1.35131	1.35115	
	-0.01822	1.33312	1.35134	1.35118	1.35117
	-0.01822	1.33311	1.35133	1.35117	
	-0.01822	1.33311	1.35133	1.35117	
	-0.01837	1.33306	1.35143	1.35127	
	-0.01827	1.33307	1.35134	1.35118	
ฟรีโหลต 240°	-0.01828	1.33307	1.35135	1.35119	
	-0.01828	1.33306	1.35134	1.35118	1.35118
	-0.01828	1.33306	1.35134	1.35118	
	-0.01829	1.33306	1.35135	1.35119	
	ค่ากึ่งกลาง			1.35120	
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			4.0E-05	
	ค่าความไม่แน่นอน			9.7E-05	
	ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			1.2E-04	

ตาราง 26 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)

ขั้นตอน ทดลอง	1 Nm			
	ไม่มีแรง		ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
	กระทำ	แรงกระทำ	หน่วย	
			(mV/V)	ค่าจริง (mV/V)
ฟรีโหลต			0.00000	0.00000
	-0.01825	-0.15332	-0.13507	-0.13506
	-0.01824	-0.15333	-0.13509	-0.13508
0°	-0.01825	-0.15334	-0.13509	-0.13508
	-0.01825	-0.15334	-0.13509	-0.13508
	-0.01825	-0.15334	-0.13509	-0.13508
	-0.01825	-0.15334	-0.13509	-0.13508
	-0.01825	-0.15334	-0.13509	-0.13508
ฟรีโหลต	-0.01828	-0.15338	-0.13510	-0.13509
120°	-0.01827	-0.15337	-0.13510	-0.13509
	-0.01827	-0.15337	-0.13510	-0.13509
	-0.01827	-0.15338	-0.13511	-0.13510
	-0.01827	-0.15338	-0.13511	-0.13510
	-0.01826	-0.15336	-0.13510	-0.13509
ฟรีโหลต	-0.01842	-0.15351	-0.13509	-0.13508
240°	-0.01842	-0.15353	-0.13511	-0.13510
	-0.01842	-0.15352	-0.13510	-0.13509
	-0.01843	-0.15353	-0.13510	-0.13509
	-0.01841	-0.15353	-0.13512	-0.13511
	-0.01842	-0.15352	-0.13510	-0.13509
ค่ากึ่งกลาง				-0.13509
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				9.3E-06
ค่าความไม่แน่นอน				2.0E-05
ค่าเบี่ยงเบน (2 σ)				2.7E-05

ตาราง 27 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	2 Nm			
	ไม่มีแรง		ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
	กระทำ	แรงกระทำ	หน่วย	
			(mV/V)	ค่าจริง (mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01830	-0.28851	-0.27021	-0.27018
	-0.01829	-0.28850	-0.27021	-0.27018
	-0.01828	-0.28850	-0.27022	-0.27019
0°	-0.01829	-0.28850	-0.27021	-0.27018
	-0.01830	-0.28851	-0.27021	-0.27018
	-0.01830	-0.28851	-0.27021	-0.27018
	-0.01830	-0.28850	-0.27020	-0.27017
	-0.01829	-0.28851	-0.27022	-0.27019
				-0.27018
ฟรีโหลต	-0.01822	-0.28845	-0.27023	-0.27020
120°	-0.01820	-0.28843	-0.27023	-0.27020
	-0.01820	-0.28844	-0.27024	-0.27021
	-0.01821	-0.28844	-0.27023	-0.27020
	-0.01821	-0.28845	-0.27024	-0.27021
	-0.01821	-0.28845	-0.27024	-0.27021
				-0.27021
ฟรีโหลต	-0.01846	-0.28867	-0.27021	-0.27018
240°	-0.01844	-0.28866	-0.27022	-0.27019
	-0.01845	-0.28866	-0.27021	-0.27018
	-0.01845	-0.28866	-0.27021	-0.27018
	-0.01845	-0.28866	-0.27021	-0.27018
	-0.01845	-0.28867	-0.27022	-0.27019
				-0.27019
ค่ากึ่งกลาง				-0.27019
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.3E-05
ค่าความไม่แน่นอน				2.9E-05
ค่าเบี่ยงเบน (2 σ)				3.8E-05

ตาราง 28 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	3 Nm				
	ไม่มีแรง		ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
	กระทำ	แรงกระทำ	หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต 0°	-0.01831	-0.42368	-0.40537	-0.40533	
	-0.01831	-0.42367	-0.40536	-0.40532	
	-0.01832	-0.42368	-0.40536	-0.40532	
	-0.01832	-0.42368	-0.40536	-0.40532	
	-0.01832	-0.42368	-0.40536	-0.40532	
	-0.01833	-0.42368	-0.40535	-0.40531	-0.40532
	-0.01832	-0.42367	-0.40535	-0.40531	
	-0.01832	-0.42368	-0.40536	-0.40532	
	-0.01835	-0.42369	-0.40534	-0.40530	
ฟรีโหลต 120°	-0.01835	-0.42368	-0.40533	-0.40529	
	-0.01835	-0.42368	-0.40533	-0.40529	
	-0.01835	-0.42368	-0.40533	-0.40529	-0.40529
	-0.01835	-0.42368	-0.40533	-0.40529	
	-0.01835	-0.42369	-0.40534	-0.40530	
	-0.01849	-0.42383	-0.40534	-0.40530	
ฟรีโหลต 240°	-0.01848	-0.42383	-0.40535	-0.40531	
	-0.01849	-0.42383	-0.40534	-0.40530	
	-0.01849	-0.42383	-0.40534	-0.40530	-0.40530
	-0.01848	-0.42383	-0.40535	-0.40531	
	-0.01849	-0.42383	-0.40534	-0.40530	
ค่ากึ่งกลาง			-0.40530		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.1E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			2.8E-05		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			3.2E-05		

ตาราง 29 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	4 Nm				
	ไม่มีแรง		ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
	กระทำ	แรงกระทำ	หน่วย		
			ค่าจริง		
(mV/V)			(mV/V)		
ฟรีโหลต	-0.01834	-0.55879	-0.54045	-0.54040	
	-0.01832	-0.55878	-0.54046	-0.54041	
	-0.01832	-0.55880	-0.54048	-0.54043	
0°	-0.01833	-0.55880	-0.54047	-0.54042	
	-0.01832	-0.55880	-0.54048	-0.54043	
	-0.01833	-0.55880	-0.54047	-0.54042	-0.54042
	-0.01833	-0.55880	-0.54047	-0.54042	
	-0.01833	-0.55879	-0.54046	-0.54041	
ฟรีโหลต	-0.01826	-0.55873	-0.54047	-0.54042	
120°	-0.01826	-0.55873	-0.54047	-0.54042	
	-0.01827	-0.55873	-0.54046	-0.54041	
	-0.01827	-0.55873	-0.54046	-0.54041	-0.54041
	-0.01827	-0.55874	-0.54047	-0.54042	
	-0.01828	-0.55873	-0.54045	-0.54040	
ฟรีโหลต	-0.01852	-0.55897	-0.54045	-0.54040	
240°	-0.01850	-0.55896	-0.54046	-0.54041	
	-0.01850	-0.55897	-0.54047	-0.54042	
	-0.01851	-0.55897	-0.54046	-0.54041	-0.54041
	-0.01851	-0.55897	-0.54046	-0.54041	
	-0.01852	-0.55898	-0.54046	-0.54041	
ค่ากึ่งกลาง				-0.54041	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				7.4E-06	
ค่าความไม่แน่นอน				2.7E-05	
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				2.1E-05	

ตาราง 30 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	5 Nm				เฉลี่ย
	ไม่มีแรง		ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
	กระทำ	แรงกระทำ	หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต	-0.01836	-0.69403	-0.67567	-0.67560	
	-0.01839	-0.69402	-0.67563	-0.67556	
	-0.01840	-0.69403	-0.67563	-0.67556	
0°	-0.01840	-0.69402	-0.67562	-0.67555	
	-0.01840	-0.69402	-0.67562	-0.67555	
	-0.01840	-0.69402	-0.67562	-0.67555	-0.67555
	-0.01840	-0.69403	-0.67563	-0.67556	
	-0.01841	-0.69402	-0.67561	-0.67554	
ฟรีโหลต	-0.01836	-0.69395	-0.67559	-0.67552	
120°	-0.01837	-0.69395	-0.67558	-0.67551	
	-0.01836	-0.69395	-0.67559	-0.67552	
	-0.01836	-0.69395	-0.67559	-0.67552	-0.67552
	-0.01837	-0.69395	-0.67558	-0.67551	
	-0.01837	-0.69395	-0.67558	-0.67551	
ฟรีโหลต	-0.01852	-0.69408	-0.67556	-0.67549	
240°	-0.01853	-0.69408	-0.67555	-0.67548	
	-0.01854	-0.69408	-0.67554	-0.67547	
	-0.01853	-0.69408	-0.67555	-0.67548	-0.67548
	-0.01854	-0.69408	-0.67554	-0.67547	
	-0.01855	-0.69409	-0.67554	-0.67547	
ค่ากึ่งกลาง				-0.67552	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.3E-05	
ค่าความไม่แน่นอน				7.1E-05	
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				9.4E-05	

ตาราง 31 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	6 Nm				
	ไม่มีแรง		ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
	กระทำ	แรงกระทำ	หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต 0°	-0.01840	-0.82914	-0.81074	-0.81066	
	-0.01843	-0.82913	-0.81070	-0.81062	
	-0.01843	-0.82914	-0.81071	-0.81063	
	-0.01844	-0.82914	-0.81070	-0.81062	
	-0.01843	-0.82914	-0.81071	-0.81063	
	-0.01843	-0.82914	-0.81071	-0.81063	-0.81063
	-0.01843	-0.82913	-0.81070	-0.81062	
	-0.01843	-0.82914	-0.81071	-0.81063	
	-0.01845	-0.82923	-0.81078	-0.81070	
ฟรีโหลต 120°	-0.01846	-0.82922	-0.81076	-0.81068	
	-0.01846	-0.82923	-0.81077	-0.81069	
	-0.01846	-0.82923	-0.81077	-0.81069	-0.81069
	-0.01847	-0.82923	-0.81076	-0.81068	
	-0.01846	-0.82923	-0.81077	-0.81069	
	-0.01853	-0.82921	-0.81068	-0.81060	
ฟรีโหลต 240°	-0.01852	-0.82921	-0.81069	-0.81061	
	-0.01852	-0.82921	-0.81069	-0.81061	
	-0.01854	-0.82922	-0.81068	-0.81060	-0.81061
	-0.01854	-0.82922	-0.81068	-0.81060	
	-0.01854	-0.82923	-0.81069	-0.81061	
ค่ากึ่งกลาง			-0.81064		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			3.6E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			7.8E-05		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			1.0E-04		

ตาราง 32 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	7 Nm				เฉลี่ย
	ไม่มีแรง		ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
	กระทำ	แรงกระทำ	หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต	-0.01845	-0.96432	-0.94587	-0.94578	
	-0.01845	-0.96433	-0.94588	-0.94579	
	-0.01846	-0.96433	-0.94587	-0.94578	
0°	-0.01847	-0.96433	-0.94586	-0.94577	
	-0.01847	-0.96433	-0.94586	-0.94577	
	-0.01847	-0.96433	-0.94586	-0.94577	-0.94577
	-0.01847	-0.96433	-0.94586	-0.94577	
	-0.01847	-0.96434	-0.94587	-0.94578	
ฟรีโหลต	-0.01836	-0.96426	-0.94590	-0.94581	
120°	-0.01836	-0.96427	-0.94591	-0.94582	
	-0.01837	-0.96428	-0.94591	-0.94582	
	-0.01837	-0.96427	-0.94590	-0.94581	-0.94581
	-0.01837	-0.96428	-0.94591	-0.94582	
	-0.01837	-0.96428	-0.94591	-0.94582	
ฟรีโหลต	-0.01857	-0.96441	-0.94584	-0.94575	
240°	-0.01858	-0.96442	-0.94584	-0.94575	
	-0.01858	-0.96442	-0.94584	-0.94575	
	-0.01858	-0.96442	-0.94584	-0.94575	-0.94575
	-0.01857	-0.96442	-0.94585	-0.94576	
	-0.01858	-0.96442	-0.94584	-0.94575	
ค่ากึ่งกลาง				-0.94578	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.9E-05	
ค่าความไม่แน่นอน				6.9E-05	
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				8.3E-05	

ตาราง 33 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	8 Nm			
	ไม่มีแรง		ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
	กระทำ	แรงกระทำ	หน่วย	เฉลี่ย
			(mV/V)	(mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01843	-1.09952	-1.08109	-1.08098
	-0.01849	-1.09954	-1.08105	-1.08094
	-0.01848	-1.09952	-1.08104	-1.08093
0°	-0.01848	-1.09951	-1.08103	-1.08092
	-0.01848	-1.09949	-1.08101	-1.08090
	-0.01848	-1.09949	-1.08101	-1.08090
	-0.01848	-1.09949	-1.08101	-1.08090
	-0.01848	-1.09949	-1.08101	-1.08090
	-0.01848	-1.09949	-1.08101	-1.08090
ฟรีโหลต	-0.01839	-1.09952	-1.08113	-1.08102
120°	-0.01843	-1.09950	-1.08107	-1.08096
	-0.01843	-1.09951	-1.08108	-1.08097
	-0.01843	-1.09950	-1.08107	-1.08096
	-0.01843	-1.09951	-1.08108	-1.08097
	-0.01844	-1.09951	-1.08107	-1.08096
	-0.01844	-1.09951	-1.08107	-1.08096
ฟรีโหลต	-0.01862	-1.09969	-1.08107	-1.08096
240°	-0.01865	-1.09969	-1.08104	-1.08093
	-0.01866	-1.09969	-1.08103	-1.08092
	-0.01866	-1.09969	-1.08103	-1.08092
	-0.01865	-1.09969	-1.08104	-1.08093
	-0.01866	-1.09969	-1.08103	-1.08092
	-0.01866	-1.09969	-1.08103	-1.08092
ค่ากึ่งกลาง				-1.08093
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				2.7E-05
ค่าความไม่แน่นอน				6.9E-05
ค่าเบี่ยงเบน (2 σ)				7.7E-05

ตาราง 34 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	9 Nm			
	ไม่มีแรง		ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
	กระทำ	แรงกระทำ	หน่วย	
			(mV/V)	ค่าจริง (mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01849	-1.23469	-1.21620	-1.21608
	-0.01848	-1.23467	-1.21619	-1.21607
	-0.01848	-1.23467	-1.21619	-1.21607
0°	-0.01848	-1.23467	-1.21619	-1.21607
	-0.01848	-1.23468	-1.21620	-1.21608
	-0.01848	-1.23467	-1.21619	-1.21607
	-0.01848	-1.23468	-1.21620	-1.21608
	-0.01849	-1.23467	-1.21618	-1.21606
	-0.01845	-1.23469	-1.21624	-1.21612
ฟรีโหลต 120°	-0.01847	-1.23469	-1.21622	-1.21610
	-0.01847	-1.23471	-1.21624	-1.21612
	-0.01848	-1.23470	-1.21622	-1.21610
	-0.01848	-1.23470	-1.21622	-1.21610
	-0.01848	-1.23468	-1.21620	-1.21608
	-0.01861	-1.23473	-1.21612	-1.21600
ฟรีโหลต 240°	-0.01865	-1.23473	-1.21608	-1.21596
	-0.01865	-1.23474	-1.21609	-1.21597
	-0.01865	-1.23475	-1.21610	-1.21598
	-0.01864	-1.23474	-1.21610	-1.21598
	-0.01865	-1.23475	-1.21610	-1.21598
	-0.01861	-1.23473	-1.21612	-1.21600
ค่ากึ่งกลาง				-1.21605
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				5.7E-05
ค่าความไม่แน่นอน				1.2E-04
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				1.6E-04

ตาราง 35 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง			10 Nm		เฉลี่ย
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
			หน่วย	ค่าจริง	
ฟรีโหลต	-0.01848	-1.36978	-1.35130	-1.35117	
	-0.01847	-1.36977	-1.35130	-1.35117	
	-0.01847	-1.36977	-1.35130	-1.35117	
0°	-0.01847	-1.36979	-1.35132	-1.35119	
	-0.01848	-1.36981	-1.35133	-1.35120	
	-0.01850	-1.36981	-1.35131	-1.35118	-1.35118
	-0.01850	-1.36982	-1.35132	-1.35119	
	-0.01850	-1.36981	-1.35131	-1.35118	
ฟรีโหลต	-0.01833	-1.36964	-1.35131	-1.35118	
120°	-0.01834	-1.36965	-1.35131	-1.35118	
	-0.01835	-1.36967	-1.35132	-1.35119	
	-0.01836	-1.36966	-1.35130	-1.35117	-1.35117
	-0.01836	-1.36966	-1.35130	-1.35117	
	-0.01836	-1.36966	-1.35130	-1.35117	
ฟรีโหลต	-0.01864	-1.36988	-1.35124	-1.35111	
240°	-0.01864	-1.36990	-1.35126	-1.35113	
	-0.01864	-1.36991	-1.35127	-1.35114	
	-0.01865	-1.36992	-1.35127	-1.35114	-1.35113
	-0.01866	-1.36992	-1.35126	-1.35113	
	-0.01866	-1.36991	-1.35125	-1.35112	
ค่ากึ่งกลาง			-1.35116		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			2.6E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			7.5E-05		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			7.5E-05		

ตาราง 36 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)

ขั้นตอน ทดลอง	1 Nm				เฉลี่ย
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
			หน่วย	ค่าจริง	
ฟรีโหลต 0°	-0.01820	0.11685	0.13505	0.13507	
	-0.01829	0.11690	0.13519	0.13521	
	-0.01830	0.11685	0.13515	0.13517	
	-0.01835	0.11686	0.13521	0.13523	
	-0.01829	0.11690	0.13519	0.13521	
	-0.01824	0.11700	0.13524	0.13526	0.13523
	-0.01824	0.11696	0.13520	0.13522	
	-0.01825	0.11693	0.13518	0.13520	
ฟรีโหลต 120°	-0.01791	0.11721	0.13512	0.13514	
	-0.01798	0.11724	0.13522	0.13524	
	-0.01798	0.11723	0.13521	0.13523	
	-0.01799	0.11721	0.13520	0.13522	0.13524
	-0.01800	0.11722	0.13522	0.13524	
	-0.01794	0.11729	0.13523	0.13525	
ฟรีโหลต 240°	-0.01869	0.11651	0.13520	0.13522	
	-0.01866	0.11654	0.13520	0.13522	
	-0.01872	0.11655	0.13527	0.13529	
	-0.01867	0.11658	0.13525	0.13527	0.13524
	-0.01859	0.11663	0.13522	0.13524	
	-0.01857	0.11660	0.13517	0.13519	
ค่ากึ่งกลาง			0.13524		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			2.6E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			6.7E-05		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			7.6E-05		

ตาราง 37 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	2 Nm				
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
			หน่วย	ค่าจริง	
ฟรีโหลต	-0.01830	0.25197	0.27027	0.27032	
0°	-0.01838	0.25199	0.27037	0.27042	
	-0.01842	0.25199	0.27041	0.27046	
	-0.01839	0.25201	0.27040	0.27045	
	-0.01840	0.25199	0.27039	0.27044	
	-0.01833	0.25202	0.27035	0.27040	0.27043
	-0.01833	0.25206	0.27039	0.27044	
	-0.01832	0.25206	0.27038	0.27043	
	ฟรีโหลต	-0.01798	0.25240	0.27038	0.27043
120°	-0.01793	0.25244	0.27037	0.27042	
	-0.01793	0.25242	0.27035	0.27040	
	-0.01796	0.25241	0.27037	0.27042	0.27041
	-0.01798	0.25238	0.27036	0.27041	
	-0.01799	0.25236	0.27035	0.27040	
	ฟรีโหลต	-0.01876	0.25162	0.27038	0.27043
240°	-0.01873	0.25165	0.27038	0.27043	
	-0.01866	0.25172	0.27038	0.27043	
	-0.01862	0.25178	0.27040	0.27045	0.27040
	-0.01859	0.25168	0.27027	0.27032	
	-0.01869	0.25165	0.27034	0.27039	
	ค่ากึ่งกลาง			0.27041	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			3.2E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			1.0E-04		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			9.4E-05		

ตาราง 38 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	3 Nm			
	ไม่มีแรง กระทำ	แรง กระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
			หน่วย	ค่าจริง
			(mV/V)	(mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01840	0.38706	0.40546	0.40553
	-0.01831	0.38716	0.40547	0.40554
	-0.01825	0.38727	0.40552	0.40559
0°	-0.01822	0.38730	0.40552	0.40559
	-0.01820	0.38726	0.40546	0.40553
	-0.01822	0.38725	0.40547	0.40554
	-0.01829	0.38720	0.40549	0.40556
	-0.01831	0.38712	0.40543	0.40550
				0.40554
ฟรีโหลต 120°	-0.01798	0.38750	0.40548	0.40555
	-0.01790	0.38756	0.40546	0.40553
	-0.01790	0.38757	0.40547	0.40554
	-0.01789	0.38752	0.40541	0.40548
	-0.01790	0.38753	0.40543	0.40550
	-0.01791	0.38760	0.40551	0.40558
ฟรีโหลต 240°	-0.01864	0.38689	0.40553	0.40560
	-0.01855	0.38691	0.40546	0.40553
	-0.01856	0.38682	0.40538	0.40545
	-0.01863	0.38678	0.40541	0.40548
	-0.01864	0.38678	0.40542	0.40549
	-0.01865	0.38675	0.40540	0.40547
ค่ากึ่งกลาง				0.40552
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				4.1E-05
ค่าความไม่แน่นอน				1.5E-04
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				1.2E-04

ตาราง 39 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	4 Nm				
	ไม่มีแรง	แรง	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
	กระทำ	กระทำ	หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต	-0.01821	0.52230	0.54051	0.54060	
	-0.01817	0.52239	0.54056	0.54065	
	-0.01819	0.52235	0.54054	0.54063	
0°	-0.01823	0.52233	0.54056	0.54065	
	-0.01827	0.52232	0.54059	0.54068	
	-0.01831	0.52234	0.54065	0.54074	0.54068
	-0.01827	0.52230	0.54057	0.54066	
	-0.01827	0.52232	0.54059	0.54068	
ฟรีโหลต	-0.01798	0.52262	0.54060	0.54069	
120°	-0.01793	0.52264	0.54057	0.54066	
	-0.01784	0.52282	0.54066	0.54075	
	-0.01780	0.52284	0.54064	0.54073	0.54070
	-0.01778	0.52281	0.54059	0.54068	
	-0.01783	0.52276	0.54059	0.54068	
ฟรีโหลต	-0.01858	0.52201	0.54059	0.54068	
240°	-0.01852	0.52204	0.54056	0.54065	
	-0.01854	0.52200	0.54054	0.54063	
	-0.01854	0.52200	0.54054	0.54063	0.54062
	-0.01847	0.52197	0.54044	0.54053	
	-0.01857	0.52197	0.54054	0.54063	
ค่ากึ่งกลาง				0.54067	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				5.4E-05	
ค่าความไม่แน่นอน				1.9E-04	
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				1.5E-04	

ตาราง 40 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	5 Nm			
	ไม่มีแรง กระทำ	แรง กระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
			หน่วย	ค่าจริง
			(mV/V)	(mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01826	0.65740	0.67566	0.67577
	-0.01826	0.65748	0.67574	0.67585
	-0.01827	0.65748	0.67575	0.67586
0°	-0.01825	0.65748	0.67573	0.67584
	-0.01823	0.65744	0.67567	0.67578
	-0.01827	0.65739	0.67566	0.67577
	-0.01827	0.65749	0.67576	0.67587
	-0.01820	0.65759	0.67579	0.67590
				0.67584
ฟรีโหลต	-0.01796	0.65780	0.67576	0.67587
120°	-0.01792	0.65774	0.67566	0.67577
	-0.01794	0.65776	0.67570	0.67581
	-0.01794	0.65776	0.67570	0.67581
	-0.01796	0.65777	0.67573	0.67584
	-0.01800	0.65770	0.67570	0.67581
				0.67581
ฟรีโหลต	-0.01874	0.65707	0.67581	0.67592
240°	-0.01860	0.65715	0.67575	0.67586
	-0.01861	0.65706	0.67567	0.67578
	-0.01866	0.65703	0.67569	0.67580
	-0.01868	0.65702	0.67570	0.67581
	-0.01870	0.65703	0.67573	0.67584
				0.67582
ค่ากึ่งกลาง				0.67582
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.8E-05
ค่าความไม่แน่นอน				2.2E-04
ค่าเบี่ยงเบน (2 σ)				1.1E-04

ตาราง 41 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	6 Nm			
	ไม่มีแรง กระทำ	แรง กระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
			หน่วย (mV/V)	เฉลี่ย ค่าจริง (mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01836	0.79247	0.81083	0.81097
	-0.01833	0.79256	0.81089	0.81103
	-0.01820	0.79266	0.81086	0.81100
0°	-0.01813	0.79266	0.81079	0.81093
	-0.01818	0.79263	0.81081	0.81095
	-0.01824	0.79259	0.81083	0.81097
	-0.01827	0.79252	0.81079	0.81093
	-0.01824	0.79264	0.81088	0.81102
				0.81096
ฟรีโหลต	-0.01806	0.79272	0.81078	0.81092
120°	-0.01800	0.79289	0.81089	0.81103
	-0.01797	0.79286	0.81083	0.81097
	-0.01792	0.79293	0.81085	0.81099
	-0.01785	0.79311	0.81096	0.81110
	-0.01787	0.79305	0.81092	0.81106
				0.81103
ฟรีโหลต	-0.01868	0.79217	0.81085	0.81099
240°	-0.01868	0.79215	0.81083	0.81097
	-0.01866	0.79226	0.81092	0.81106
	-0.01867	0.79216	0.81083	0.81097
	-0.01869	0.79210	0.81079	0.81093
	-0.01873	0.79218	0.81091	0.81105
				0.81099
ค่ากึ่งกลาง				0.81099
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				5.5E-05
ค่าความไม่แน่นอน				2.7E-04
ค่าเบี่ยงเบน (2 σ)				1.6E-04

ตาราง 42 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	7 Nm			
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
			หน่วย	เฉลี่ย
			(mV/V)	(mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01829	0.92777	0.94606	0.94622
	-0.01817	0.92785	0.94602	0.94618
	-0.01818	0.92781	0.94599	0.94615
0°	-0.01819	0.92776	0.94595	0.94611
	-0.01828	0.92766	0.94594	0.94610
	-0.01825	0.92779	0.94604	0.94620
	-0.01826	0.92768	0.94594	0.94610
	-0.01829	0.92769	0.94598	0.94614
				0.94613
ฟรีโหลต	-0.01811	0.92808	0.94619	0.94635
120°	-0.01794	0.92799	0.94593	0.94609
	-0.01786	0.92820	0.94606	0.94622
	-0.01787	0.92810	0.94597	0.94613
	-0.01788	0.92798	0.94586	0.94602
	-0.01797	0.92797	0.94594	0.94610
				0.94611
ฟรีโหลต	-0.01874	0.92730	0.94604	0.94620
240°	-0.01863	0.92724	0.94587	0.94603
	-0.01863	0.92725	0.94588	0.94604
	-0.01868	0.92732	0.94600	0.94616
	-0.01864	0.92740	0.94604	0.94620
	-0.01859	0.92740	0.94599	0.94615
				0.94612
ค่ากึ่งกลาง				0.94612
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.1E-05
ค่าความไม่แน่นอน				3.1E-04
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				1.8E-04

ตาราง 43 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	8 Nm			
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
			หน่วย	ค่าจริง
			(mV/V)	(mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01828	1.06296	1.08124	1.08142
	-0.01825	1.06279	1.08104	1.08122
	-0.01827	1.06275	1.08102	1.08120
0°	-0.01822	1.06276	1.08098	1.08116
	-0.01830	1.06288	1.08118	1.08136
	-0.01824	1.06287	1.08111	1.08129
	-0.01817	1.06267	1.08084	1.08102
	-0.01822	1.06278	1.08100	1.08118
				1.08120
ฟรีโหลต	-0.01792	1.06318	1.08110	1.08128
120°	-0.01780	1.06320	1.08100	1.08118
	-0.01780	1.06329	1.08109	1.08127
	-0.01794	1.06314	1.08108	1.08126
	-0.01789	1.06318	1.08107	1.08125
	-0.01792	1.06320	1.08112	1.08130
				1.08125
ฟรีโหลต	-0.01862	1.06238	1.08100	1.08118
240°	-0.01853	1.06254	1.08107	1.08125
	-0.01859	1.06234	1.08093	1.08111
	-0.01862	1.06252	1.08114	1.08132
	-0.01862	1.06258	1.08120	1.08138
	-0.01854	1.06250	1.08104	1.08122
				1.08126
ค่ากึ่งกลาง				1.08124
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				9.5E-05
ค่าความไม่แน่นอน				3.8E-04
ค่าเบี่ยงเบน (2 σ)				2.7E-04

ตาราง 44 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	9 Nm			
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
			หน่วย	ค่าจริง
			(mV/V)	(mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01818	1.19796	1.21614	1.21635
	-0.01810	1.19793	1.21603	1.21624
	-0.01813	1.19796	1.21609	1.21630
0°	-0.01807	1.19804	1.21611	1.21632
	-0.01811	1.19817	1.21628	1.21649
	-0.01809	1.19796	1.21605	1.21626 1.21635
	-0.01808	1.19798	1.21606	1.21627
	-0.01816	1.19804	1.21620	1.21641
ฟรีโหลต	-0.01793	1.19809	1.21602	1.21623
120°	-0.01783	1.19839	1.21622	1.21643
	-0.01781	1.19826	1.21607	1.21628
	-0.01781	1.19832	1.21613	1.21634 1.21637
	-0.01785	1.19832	1.21617	1.21638
	-0.01784	1.19838	1.21622	1.21643
ฟรีโหลต	-0.01864	1.19756	1.21620	1.21641
240°	-0.01853	1.19765	1.21618	1.21639
	-0.01854	1.19772	1.21626	1.21647
	-0.01848	1.19747	1.21595	1.21616 1.21625
	-0.01841	1.19756	1.21597	1.21618
	-0.01853	1.19734	1.21587	1.21608
ค่ากึ่งกลาง				1.21632
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.2E-04
ค่าความไม่แน่นอน				4.4E-04
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				3.5E-04

ตาราง 45 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ตามเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	10 Nm			
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
			หน่วย	ค่าจริง
			(mV/V)	(mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01827	1.33306	1.35133	1.35156
	-0.01819	1.33324	1.35143	1.35166
	-0.01816	1.33290	1.35106	1.35129
0°	-0.01819	1.33309	1.35128	1.35151
	-0.01812	1.33296	1.35108	1.35131
	-0.01810	1.33308	1.35118	1.35141 1.35135
	-0.01806	1.33303	1.35109	1.35132
	-0.01804	1.33293	1.35097	1.35120
ฟรีโหลต	-0.01894	1.33335	1.35229	1.35252
120°	-0.01788	1.33326	1.35114	1.35137
	-0.01789	1.33316	1.35105	1.35128
	-0.01785	1.33365	1.35150	1.35173 1.35142
	-0.01779	1.33342	1.35121	1.35144
	-0.01775	1.33330	1.35105	1.35128
ฟรีโหลต	-0.01858	1.33267	1.35125	1.35148
240°	-0.01846	1.33282	1.35128	1.35151
	-0.01846	1.33267	1.35113	1.35136
	-0.01851	1.33263	1.35114	1.35137 1.35139
	-0.01844	1.33274	1.35118	1.35141
	-0.01858	1.33249	1.35107	1.35130
ค่ากึ่งกลาง				1.35138
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				1.3E-04
ค่าความไม่แน่นอน				4.8E-04
ค่าเบี่ยงเบน (2 σ)				3.7E-04

ตาราง 46 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)

ขั้นตอน ทดลอง	1 Nm			
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
			หน่วย	ค่าจริง
			(mV/V)	(mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01816	-0.15322	-0.13506	-0.13505
	-0.01802	-0.15330	-0.13528	-0.13527
	-0.01810	-0.15336	-0.13526	-0.13525
0°	-0.01822	-0.15338	-0.13516	-0.13515
	-0.01813	-0.15343	-0.13530	-0.13529
	-0.01811	-0.15333	-0.13522	-0.13521
	-0.01812	-0.15335	-0.13523	-0.13522
	-0.01811	-0.15333	-0.13522	-0.13521
ฟรีโหลต	-0.01800	-0.15305	-0.13505	-0.13504
120°	-0.01789	-0.15311	-0.13522	-0.13521
	-0.01788	-0.15306	-0.13518	-0.13517
	-0.01788	-0.15311	-0.13523	-0.13522
	-0.01787	-0.15313	-0.13526	-0.13525
	-0.01789	-0.15311	-0.13522	-0.13521
ฟรีโหลต	-0.01867	-0.15377	-0.13510	-0.13509
240°	-0.01853	-0.15377	-0.13524	-0.13523
	-0.01854	-0.15377	-0.13523	-0.13522
	-0.01853	-0.15376	-0.13523	-0.13522
	-0.01854	-0.15375	-0.13521	-0.13520
	-0.01855	-0.15379	-0.13524	-0.13523
ค่ากึ่งกลาง				-0.13521
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				3.2E-05
ค่าความไม่แน่นอน				7.5E-05
ค่าเบี่ยงเบน (2 σ)				9.1E-05

ตาราง 47 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฏิกิริยา 1,000 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	2 Nm				
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
			หน่วย	ค่าจริง	
ฟรีโหลต 0°	-0.01829	-0.28858	-0.27029	-0.27026	
	-0.01817	-0.28857	-0.27040	-0.27037	
	-0.01819	-0.28863	-0.27044	-0.27041	
	-0.01811	-0.28857	-0.27046	-0.27043	
	-0.01813	-0.28856	-0.27043	-0.27040	
	-0.01814	-0.28856	-0.27042	-0.27039	-0.27041
	-0.01813	-0.28861	-0.27048	-0.27045	
ฟรีโหลต 120°	-0.01819	-0.28860	-0.27041	-0.27038	
	-0.01802	-0.28840	-0.27038	-0.27035	
	-0.01794	-0.28834	-0.27040	-0.27037	
	-0.01797	-0.28838	-0.27041	-0.27038	
	-0.01791	-0.28834	-0.27043	-0.27040	-0.27041
	-0.01790	-0.28834	-0.27044	-0.27041	
	-0.01783	-0.28835	-0.27052	-0.27049	
ฟรีโหลต 240°	-0.01874	-0.28915	-0.27041	-0.27038	
	-0.01864	-0.28912	-0.27048	-0.27045	
	-0.01861	-0.28906	-0.27045	-0.27042	
	-0.01861	-0.28907	-0.27046	-0.27043	-0.27043
	-0.01863	-0.28912	-0.27049	-0.27046	
	-0.01863	-0.28905	-0.27042	-0.27039	
	ค่ากึ่งกลาง			-0.27042	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			3.5E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			1.1E-04		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			1.0E-04		

ตาราง 48 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	3 Nm			
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
			หน่วย	ค่าจริง
			(mV/V)	(mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01832	-0.42382	-0.40550	-0.40546
	-0.01817	-0.42389	-0.40572	-0.40568
	-0.01814	-0.42388	-0.40574	-0.40570
0°	-0.01816	-0.42384	-0.40568	-0.40564
	-0.01822	-0.42390	-0.40568	-0.40564
	-0.01821	-0.42398	-0.40577	-0.40573
	-0.01831	-0.42393	-0.40562	-0.40558
	-0.01831	-0.42396	-0.40565	-0.40561
				-0.40564
ฟรีโหลต	-0.01793	-0.42369	-0.40576	-0.40572
120°	-0.01798	-0.42367	-0.40569	-0.40565
	-0.01790	-0.42342	-0.40552	-0.40548
	-0.01791	-0.42346	-0.40555	-0.40551
	-0.01785	-0.42355	-0.40570	-0.40566
	-0.01785	-0.42356	-0.40571	-0.40567
				-0.40559
ฟรีโหลต	-0.01872	-0.42420	-0.40548	-0.40544
240°	-0.01860	-0.42433	-0.40573	-0.40569
	-0.01859	-0.42435	-0.40576	-0.40572
	-0.01857	-0.42425	-0.40568	-0.40564
	-0.01858	-0.42423	-0.40565	-0.40561
	-0.01860	-0.42430	-0.40570	-0.40566
				-0.40566
ค่ากึ่งกลาง				-0.40563
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				6.9E-05
ค่าความไม่แน่นอน				1.8E-04
ค่าเบี่ยงเบน (2 σ)				2.0E-04

ตาราง 49 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	4 Nm				เฉลี่ย
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
			หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต	-0.01828	-0.55887	-0.54059	-0.54053	
	-0.01823	-0.55893	-0.54070	-0.54064	
	-0.01823	-0.55894	-0.54071	-0.54065	
0°	-0.01822	-0.55903	-0.54081	-0.54075	
	-0.01834	-0.55917	-0.54083	-0.54077	
	-0.01830	-0.55919	-0.54089	-0.54083	-0.54073
	-0.01851	-0.55911	-0.54060	-0.54054	
	-0.01825	-0.55904	-0.54079	-0.54073	
	-0.01807	-0.55861	-0.54054	-0.54048	
120°	-0.01795	-0.55860	-0.54065	-0.54059	
	-0.01792	-0.55877	-0.54085	-0.54079	
	-0.01796	-0.55862	-0.54066	-0.54060	-0.54066
	-0.01808	-0.55869	-0.54061	-0.54055	
	-0.01797	-0.55879	-0.54082	-0.54076	
	-0.01884	-0.55955	-0.54071	-0.54065	
240°	-0.01872	-0.55956	-0.54084	-0.54078	
	-0.01896	-0.55962	-0.54066	-0.54060	
	-0.01888	-0.55960	-0.54072	-0.54066	-0.54067
	-0.01889	-0.55957	-0.54068	-0.54062	
	-0.01879	-0.55954	-0.54075	-0.54069	
	ค่ากึ่งกลาง			-0.54069	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			9.6E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			2.5E-04		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			2.8E-04		

ตาราง 50 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	5 Nm				
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
			หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต	-0.01850	-0.69434	-0.67584	-0.67577	
	-0.01833	-0.69428	-0.67595	-0.67588	
	-0.01839	-0.69422	-0.67583	-0.67576	
	-0.01823	-0.69427	-0.67604	-0.67597	
	-0.01825	-0.69422	-0.67597	-0.67590	
	-0.01820	-0.69423	-0.67603	-0.67596	-0.67591
	-0.01831	-0.69418	-0.67587	-0.67580	
	-0.01832	-0.69430	-0.67598	-0.67591	
	-0.01795	-0.69370	-0.67575	-0.67568	
120°	-0.01793	-0.69380	-0.67587	-0.67580	
	-0.01799	-0.69393	-0.67594	-0.67587	
	-0.01809	-0.69392	-0.67583	-0.67576	-0.67583
	-0.01798	-0.69388	-0.67590	-0.67583	
	-0.01791	-0.69386	-0.67595	-0.67588	
	-0.01878	-0.69464	-0.67586	-0.67579	
240°	-0.01862	-0.69446	-0.67584	-0.67577	
	-0.01862	-0.69461	-0.67599	-0.67592	
	-0.01863	-0.69463	-0.67600	-0.67593	-0.67588
	-0.01861	-0.69463	-0.67602	-0.67595	
	-0.01871	-0.69464	-0.67593	-0.67586	
	ค่ากึ่งกลาง			-0.67587	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			6.9E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			2.5E-04		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			2.0E-04		

ตาราง 51 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฏิกิริยา 1,000 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	6 Nm			
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง	
			หน่วย	เฉลี่ย
			(mV/V)	(mV/V)
ฟรีโหลต	-0.01841	-0.82941	-0.81100	-0.81091
	-0.01836	-0.82938	-0.81102	-0.81093
	-0.01840	-0.82945	-0.81105	-0.81096
0°	-0.01832	-0.82941	-0.81109	-0.81100
	-0.01837	-0.82940	-0.81103	-0.81094
	-0.01836	-0.82941	-0.81105	-0.81096
	-0.01835	-0.82938	-0.81103	-0.81094
	-0.01838	-0.82933	-0.81095	-0.81086
				-0.81094
ฟรีโหลต	-0.01804	-0.82910	-0.81106	-0.81097
120°	-0.01799	-0.82906	-0.81107	-0.81098
	-0.01793	-0.82890	-0.81097	-0.81088
	-0.01790	-0.82915	-0.81125	-0.81116
	-0.01795	-0.82902	-0.81107	-0.81098
	-0.01799	-0.82901	-0.81102	-0.81093
ฟรีโหลต	-0.01886	-0.82969	-0.81083	-0.81074
240°	-0.01872	-0.82969	-0.81097	-0.81088
	-0.01870	-0.82979	-0.81109	-0.81100
	-0.01876	-0.82972	-0.81096	-0.81087
	-0.01871	-0.82970	-0.81099	-0.81090
	-0.01871	-0.82968	-0.81097	-0.81088
ค่ากึ่งกลาง				-0.81095
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน				7.7E-05
ค่าความไม่แน่นอน				2.9E-04
ค่าเบี่ยงเบน (2 σ)				2.2E-04

ตาราง 52 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	7 Nm				
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
			หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต 0°	-0.01825	-0.96457	-0.94632	-0.94622	
	-0.01830	-0.96459	-0.94629	-0.94619	
	-0.01823	-0.96459	-0.94636	-0.94626	
	-0.01837	-0.96470	-0.94633	-0.94623	
	-0.01834	-0.96470	-0.94636	-0.94626	
	-0.01836	-0.96447	-0.94611	-0.94601	-0.94613
	-0.01835	-0.96456	-0.94621	-0.94611	
	-0.01834	-0.96449	-0.94615	-0.94605	
ฟรีโหลต 120°	-0.01808	-0.96422	-0.94614	-0.94604	
	-0.01803	-0.96429	-0.94626	-0.94616	
ฟรีโหลต 240°	-0.01802	-0.96421	-0.94619	-0.94609	
	-0.01801	-0.96429	-0.94628	-0.94618	-0.94618
	-0.01797	-0.96439	-0.94642	-0.94632	
	-0.01811	-0.96439	-0.94628	-0.94618	
	-0.01894	-0.96506	-0.94612	-0.94602	
	-0.01880	-0.96510	-0.94630	-0.94620	
	-0.01876	-0.96500	-0.94624	-0.94614	
	-0.01863	-0.96491	-0.94628	-0.94618	-0.94619
ค่ากึ่งกลาง	-0.01872	-0.96504	-0.94632	-0.94622	
	-0.01871	-0.96501	-0.94630	-0.94620	
				-0.94617	
				8.0E-05	
				3.3E-04	
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)				2.3E-04	

ตาราง 53 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	8 Nm				
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
			หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต 0°	-0.01852	-1.09972	-1.08120	-1.08108	
	-0.01842	-1.09979	-1.08137	-1.08125	
	-0.01842	-1.09959	-1.08117	-1.08105	
	-0.01832	-1.09966	-1.08134	-1.08122	
	-0.01835	-1.09979	-1.08144	-1.08132	
	-0.01839	-1.09987	-1.08148	-1.08136	-1.08131
	-0.01839	-1.09990	-1.08151	-1.08139	
	-0.01842	-1.09978	-1.08136	-1.08124	
	-0.01814	-1.09952	-1.08138	-1.08126	
ฟรีโหลต 120°	-0.01811	-1.09946	-1.08135	-1.08123	
	-0.01820	-1.09946	-1.08126	-1.08114	
	-0.01806	-1.09955	-1.08149	-1.08137	-1.08130
	-0.01806	-1.09948	-1.08142	-1.08130	
	-0.01800	-1.09956	-1.08156	-1.08144	
	-0.01892	-1.10010	-1.08118	-1.08106	
ฟรีโหลต 240°	-0.01877	-1.10018	-1.08141	-1.08129	
	-0.01867	-1.10029	-1.08162	-1.08150	
	-0.01877	-1.10029	-1.08152	-1.08140	-1.08132
	-0.01880	-1.10012	-1.08132	-1.08120	
	-0.01878	-1.10010	-1.08132	-1.08120	
	ค่ากึ่งกลาง			-1.08131	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.0E-04		
ค่าความไม่แน่นอน			3.8E-04		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			2.9E-04		

ตาราง 54 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ 1,000 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	9 Nm				เฉลี่ย
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		
			หน่วย (mV/V)	ค่าจริง (mV/V)	
ฟรีโหลต	-0.01849	-1.23482	-1.21633	-1.21620	
	-0.01837	-1.23499	-1.21662	-1.21649	
	-0.01830	-1.23494	-1.21664	-1.21651	
0°	-0.01833	-1.23490	-1.21657	-1.21644	
	-0.01832	-1.23499	-1.21667	-1.21654	
	-0.01838	-1.23492	-1.21654	-1.21641	-1.21646
	-0.01844	-1.23497	-1.21653	-1.21640	
	-0.01842	-1.23504	-1.21662	-1.21649	
ฟรีโหลต	-0.01818	-1.23468	-1.21650	-1.21637	
120°	-0.01811	-1.23474	-1.21663	-1.21650	
	-0.01811	-1.23461	-1.21650	-1.21637	
	-0.01813	-1.23465	-1.21652	-1.21639	-1.21644
	-0.01807	-1.23467	-1.21660	-1.21647	
	-0.01806	-1.23466	-1.21660	-1.21647	
ฟรีโหลต	-0.01885	-1.23539	-1.21654	-1.21641	
240°	-0.01876	-1.23513	-1.21637	-1.21624	
	-0.01869	-1.23524	-1.21655	-1.21642	
	-0.01874	-1.23522	-1.21648	-1.21635	-1.21637
	-0.01869	-1.23536	-1.21667	-1.21654	
	-0.01871	-1.23516	-1.21645	-1.21632	
ค่ากึ่งกลาง			-1.21642		
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			8.3E-05		
ค่าความไม่แน่นอน			4.0E-04		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			2.4E-04		

ตาราง 55 ข้อมูลการทดลองเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฏิกิริยา 1,000 Nm (ทวนเข็มนาฬิกา)(ต่อ)

ขั้นตอน ทดลอง	10 Nm				
	ไม่มีแรงกระทำ	แรงกระทำ	ค่าที่เปลี่ยนแปลง		เฉลี่ย
			หน่วย	ค่าจริง	
			(mV/V)	(mV/V)	
ฟรีโหลต 0°	-0.01830	-1.37009	-1.35179	-1.35164	
	-0.01833	-1.37013	-1.35180	-1.35165	
	-0.01838	-1.37017	-1.35179	-1.35164	
	-0.01839	-1.37024	-1.35185	-1.35170	
	-0.01831	-1.37022	-1.35191	-1.35176	
	-0.01805	-1.37013	-1.35208	-1.35193	-1.35175
	-0.01842	-1.37020	-1.35178	-1.35163	
	-0.01836	-1.37021	-1.35185	-1.35170	
ฟรีโหลต 120°	-0.01804	-1.36992	-1.35188	-1.35173	
	-0.01815	-1.36988	-1.35173	-1.35158	
	-0.01825	-1.36995	-1.35170	-1.35155	
	-0.01815	-1.36995	-1.35180	-1.35165	-1.35159
	-0.01817	-1.36984	-1.35167	-1.35152	
	-0.01806	-1.36984	-1.35178	-1.35163	
	-0.01885	-1.37049	-1.35164	-1.35149	
ฟรีโหลต 240°	-0.01882	-1.37048	-1.35166	-1.35151	
	-0.01875	-1.37056	-1.35181	-1.35166	
	-0.01877	-1.37054	-1.35177	-1.35162	-1.35165
	-0.01883	-1.37065	-1.35182	-1.35167	
	-0.01879	-1.37070	-1.35191	-1.35176	
	ค่ากึ่งกลาง			-1.35166	
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			1.1E-04		
ค่าความไม่แน่นอน			4.6E-04		
ค่าเบี่ยงเบน (2σ)			3.1E-04		

ตาราง 56 ข้อมูลการทดสอบการเยื้องศูนย์ของทอร์ก

ครั้งที่	ตำแหน่งการทดลองมุมของทอร์ก						
	0	60	120	180	240	300	360
ฟรีโหลด	-0.01827	-0.01828	-0.01841	-0.01844	-0.01862	-0.01845	-0.01829
ทดลอง							
ครั้งที่ 1	1.33315	1.33324	1.33311	1.33298	1.333	1.33296	1.33318
ฟรีโหลด	-0.0182	-0.01812	-0.01827	-0.01835	-0.01845	-0.01828	-0.01812
ทดลอง							
ครั้งที่ 2	1.33316	1.33328	1.33313	1.33299	1.33302	1.33298	1.33324
ฟรีโหลด	-0.01817	-0.01813	-0.01827	-0.01834	-0.01846	-0.01829	-0.01812
ทดลอง							
ครั้งที่ 3	1.33318	1.33326	1.33313	1.33299	1.33301	1.33297	1.33321
ฟรีโหลด	-0.01816	-0.01813	-0.01827	-0.01834	-0.01846	-0.01829	-0.01812
ทดลอง							
ครั้งที่ 4	1.33318	1.33326	1.33313	1.33299	1.33301	1.33297	1.33322
ค่าเฉลี่ย							
ทดลอง	1.35135	1.35139	1.35140	1.35133	1.35147	1.35126	1.35134
	1.35137	1.35143	1.35143	1.35136	1.35151	1.35130	1.35138
เปอร์เซ็นต์							
ความ							
ผิดพลาด%	-0.0011	0.0021	0.0026	-0.0023	0.0078	-0.0077	-0.0016

ภาคผนวก ง

ตารางสมบัติของ อะลูมิเนียมและเหล็กกล้าไร้สนิม

ตาราง 57 สมบัติของอะลูมิเนียม AA7075-T6

เกรด	กรรมวิธี ความร้อน	ความเค้น 0.2% (MPa)	ค่าความ ต้านทาน แรงดึง (MPa)	ค่าความ ต้านทาน แรงเฉือน (MPa)	เปอร์เซ็นต์ การยืดตัว A5 (%)	ค่าความ แข็งวิคเกอร์ (HV)
AA7075	0	105-145	225-275	150		
	T6	435-505	510-570	350		

ตาราง 58 สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม 316

Grade	Tensile Str (MPa) min	Yield Str 0.2% Proof (MPa) min	% Elo (% in 50mm) min	Hardness	
				Rockwell B (HR B) max	Brinell (HB) max
316	515	205	40	95	217
316L	485	170	40	95	217
316H	515	205	40	95	217

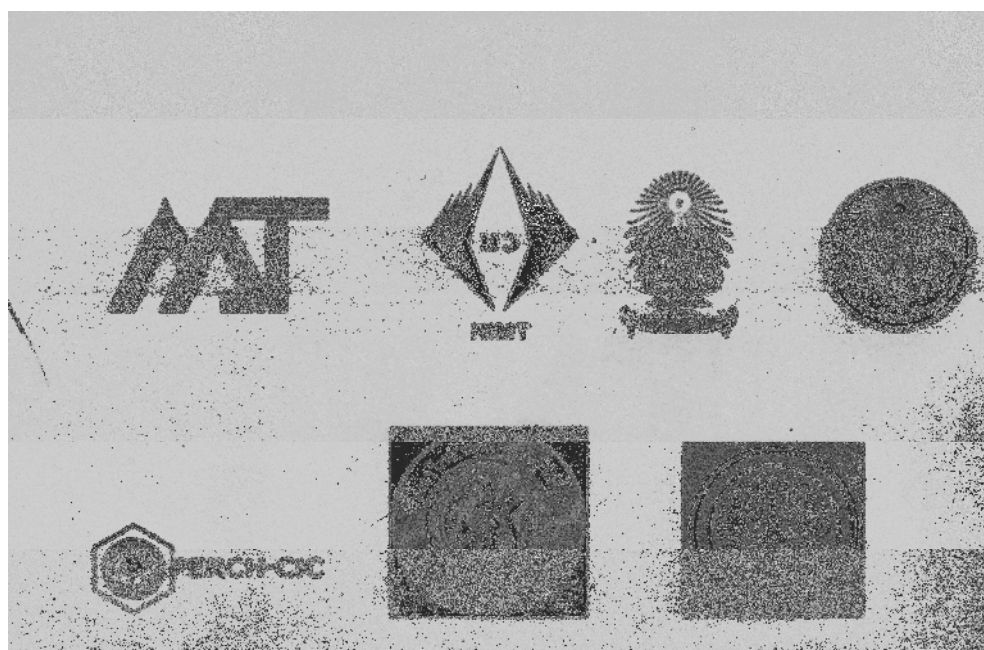
Note: 316H also has a requirement for a grain size of ASTM no. 7 or coarser. Physical Properties

ตาราง 59 สมบัติของเหล็กกล้าไร้สนิม 316 (ต่อ)

Grade	Density (kg/m ³)	Elastic Modulus (GPa)	Mean Co-eff of Thermal Expansion (µm/m/°C)			Thermal Conductivity (W/m.K)		Specific Heat 0- 100°C (J/kg.K)	Elec Resistivit y (nΩ.m)
			0- 100° C	0- 315°C	0- 538°C	At 100°C	At 500°C		
316/L/ H	8000	193	15.9	16.2	17.5	16.3	21.5	500	740

ภาคผนวก จ

บทความทางวิชาการงานประชุมวิชาการสมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 ระหว่างวันที่วันที่ 11 – 12 กุมภาพันธ์ 2551 ณ อาคาร นิเทศ 50 ปี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน จัดโดยสมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน



การประชุมวิชาการ
สมาคมมาตรวิทยาแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3
3rd MST CONFERENCE

11 -12 กุมภาพันธ์ 2551
ณ อาคารธารนิเทศ 50 ปี
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน
กรุงเทพมหานคร

เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

10 Nm Torque Standard Machine

ประมาณ จันทรักษา¹, ผศ.วิจิต บัวแก้ว¹, รศ. วรชน อางฤทธิ์¹

¹โครงการความร่วมมือทางวิชาการ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กับ กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

คำสำคัญ : สอบเทียบทอร์ก, ทอร์กมาตรฐาน

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการสร้างเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 1 Nm ถึง 10 Nm ค่าความไม่แน่นอนของการวัดไม่เกิน 0.05% โดยใช้หลักการของคานและน้ำหนักตายตัว และทำการประมวลผลให้อยู่ในรูปของทอร์ก ลักษณะเด่นของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐานเครื่องนี้คือมีจุดหมุนที่ใช้หลักการแขวนคานด้วยแผ่นโลหะบางพร้อมกันนี้ยังใช้แขน คีมน้ำหนักที่ปลายคานทั้งสอง ข้างด้วย โดยเลือกใช้แผ่นโลหะบาง ความหนา 0.030 mm ข้อดีของเครื่องที่ออกแบบนี้คือ การบำรุงรักษาง่าย ราคาถูก ไม่มีการรบกวนจากการสั่นสะเทือนของคาน ไม่มีการลื่นไถลของคาน และสามารถลด Axial force ได้

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นจากการออกแบบโครงสร้างของเครื่อง จัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่เหมาะสม ซึ่งโครงสร้างหลักของเครื่องประกอบไปด้วย คาน คีมน้ำหนัก ฐานเครื่อง และ แผ่นโลหะบาง ชุดวัดค่า ความแข็งตึงต่อการดัด ชุดเฟืองขับทอร์ก อุปกรณ์ที่มีผลต่อการวัดทอร์กจะถูกสอบเทียบให้อยู่ในพิสัยที่ยอมรับได้ ดังนี้ คานมีผลการสอบเทียบอยู่ที่ $500.019 \text{ mm} \pm 0.01\%$ คีมน้ำหนักมีผลการสอบเทียบที่ $408.929 \text{ g} \pm 0.0012 \%$ ที่ความเชื่อมั่น 95 % ค่าความแข็งตึง ต่อการดัดมีผลการสอบเทียบอยู่ที่ $284 \text{ } \mu\text{Nm}/^\circ \pm 2 \text{ } \mu\text{Nm}/^\circ$ จากการนำผลการสอบเทียบทั้งหมดมาทำการ ประมวลผลในรูปของทอร์ก และจากการประเมินผลเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm มีความไม่แน่นอนอยู่ที่ 0.004 % อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดการสร้าง

1. บทนำ

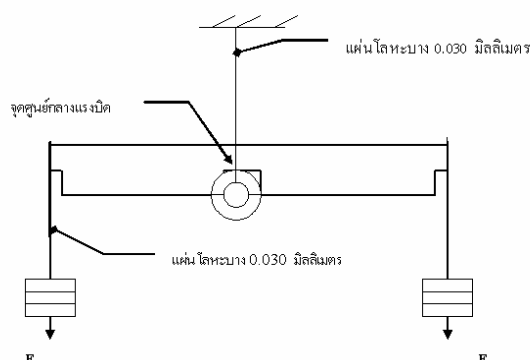
สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติมีหน้าที่พัฒนาจัดหาและเก็บรักษามาตรฐานแห่งชาติวัดคู่อ้างอิงมาตรฐานของประเทศทุกสาขาเพื่อให้สอดคล้องกับระบบมาตรวิทยาสากลรวมถึงการถ่ายทอดความถูกต้องของการวัดไปสู่มาตรฐานแห่งชาติทางสถาบันฯ ได้ดำเนินการพัฒนาขีดความสามารถทางการวัดในสาขาการวัดต่างๆ มาอย่างต่อเนื่อง ทอร์กมาตรฐาน (Torque Measurement Standard) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติเก็บรักษาและต้องถ่ายทอดค่าไปสู่ภาคอุตสาหกรรมผ่านทางห้องปฏิบัติการสอบเทียบ ในปัจจุบันห้องปฏิบัติการทอร์กของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติสามารถถ่ายทอดค่าความถูกต้องมากกว่า 10 Nm ถึง 1,000 Nm ซึ่งมีค่าความถูกต้องที่ 0.001 % และ 1 Nm ถึง 10 Nm ค่าความถูกต้อง 0.03 % เพื่อความสามารถถ่ายทอดค่าทอร์กจาก 1 Nm ถึง 1,000 Nm ที่ถูกต้อง 0.001 % ตลอดช่วงการวัดจำเป็นต้องออกแบบและสร้างเครื่องวัดทอร์กขึ้นใหม่ โดยเฉพาะช่วงทอร์ก 1 Nm ถึง 10 Nm

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1. การออกแบบเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

2.1.1 จุดศูนย์กลางทอร์ก

เพื่อต้องการให้แกนเกิดการบิดโดยที่มีจุดหมุนอยู่ตรงกลางแกนได้มีการนำแผ่นโลหะบางมายึดกับแกนตรงกลาง ในที่นี้ได้เลือกแผ่นโลหะ บางขนาด 0.03 mm การยึดเพื่อให้สามารถที่จะรับแรงการบิดได้ และไม่ทำให้จุดหมุนนั้นแข็งแรงหรือมีผลกระทบกับแรงที่กระทำที่แกนจึงต้องออกแบบชุด รองรับแกนร่วมด้วยดังแสดงในภาพประกอบ





ภาพประกอบ1 การใช้แผ่นโลหะบางเป็นจุดศูนย์กลางทอร์ก

2.1.2 แรงที่กระทำกับคาน

เพื่อให้การส่งถ่ายแรงที่กระทำกับคานทั้งสองข้างตั้งฉากกับคาน ได้ใช้แผ่นโลหะบางเป็นอุปกรณ์ในการส่งถ่ายแรงเพราะว่าแผ่นโลหะบางมีความแข็งแกร่งน้อยในที่นี้ได้เลือกแผ่นโลหะ สแตนเลสบางขนาด 0.03 mm



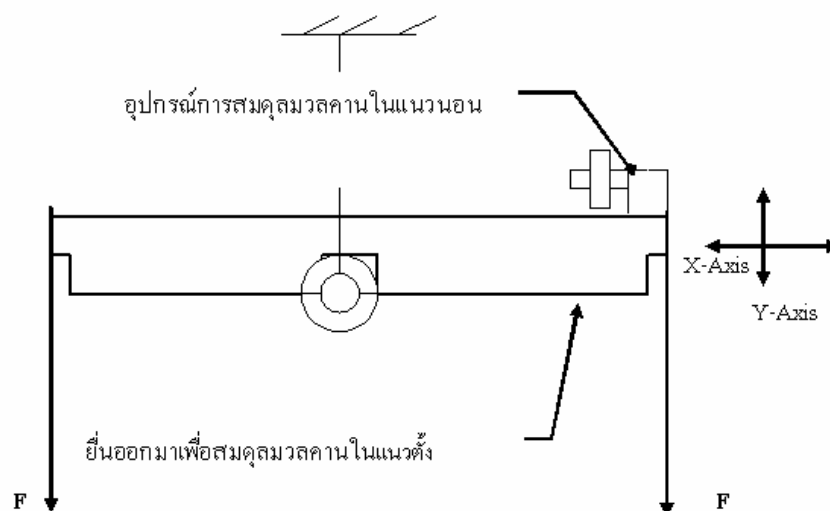
ภาพประกอบ 2 การใช้แผ่น โลหะบางเป็นชิ้นส่วนส่งถ่ายค่าแรงที่กระทำกับคาน

2.1.3. การวัดระดับของคานเพื่อวัดค่า Residual Torque ได้ใช้ พรอกซิมิติ ชนิด

Inductive Type เป็นอุปกรณ์การตรวจสอบซึ่งต้องเลือกใช้ระยะการทำงานที่ mm ติดตั้งที่คานทั้งสองข้าง ซึ่งการตรวจสอบจะอยู่ในรูปของมุมการบิดของคาน

2.1.4. คาน

เพื่อให้คานนั้นสมดุลในขณะที่เริ่มต้นวัดแรงจึงต้องสมดุลมวลของคานทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง



ภาพประกอบ3 การออกแบบเพื่อให้คานเกิดการสมดุล

2.2. อุปกรณ์การวิจัย

- 2.2.1. เครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm
- 2.2.2 ชุดวัดอุณหภูมิ ความชื้น
- 2.2.3 คอมพิวเตอร์ และอุปกรณ์ประกอบ
- 2.2.4 ตัวแปรสัญญาณทอร์ก 10 Nm
- 2.2.5 Indicator Resolution 0.00001 mV/V
- 2.2.6 นาฬิกาจับเวลา
- 2.2.7 ระดับน้ำ Resolution 0.002 mm/m
- 2.2.8 เครื่องวัดทอร์กมาตรฐานปฐมภูมิ Dm-BNME 1,000 Nm S/N153 GTM

2.3 ขั้นตอนการเตรียมการวิจัย

- 2.3.1 คาน ต้องผ่านการวัดความยาว และ ทำการ สมดุล คานทั้งในแนวแกน ตั้งและในแนวแกนนอน
- 2.3.2 ตู้น้ำหนัก ต้องผ่านการสอบเทียบน้ำหนัก
- 2.3.3 อุณหภูมิ ต้องไม่เกิน 22 ± 1 °C ความชื้นไม่เกิน 55 %

2.3.4 อุปกรณ์การวัดอื่นๆ เช่น ระดับน้ำ นาฬิกาจับเวลา อินดิเคเตอร์ ต้องผ่านการสอบเทียบมาแล้ว

2.3.5 ปรับความยาวคานทั้งสองข้างให้เท่ากันโดยปรับที่ชุดปรับความยาวของคานโดยทำการปรับอย่างหยาดด้วย ตัวแปรสัญญาณทอร์ก และ ทำการปรับละเอียดโดยวิธีทริมเวด

2.3.6 ตั้งระดับคานโดยใช้ระดับน้ำ และ ปรับระยะของ พรอกซิมีตีทั้งด้านขวมือและด้านซ้ายมือให้มีระยะห่าง 2 mm

2.3.7 ติดตั้งตัวแปรสัญญาณทอร์กโดยใช้ชุดจับยึดด้านท้ายคานจับยึดก่อนจากนั้นใส่ Flexible Coupling กับ ชุด Support คาน และใส่ Flexible Coupling กับชุด เกียร์จากนั้นจึงประกอบตัวแปรสัญญาณทอร์กแล้ว ยึดเกียร์กับฐานให้แน่นเสร็จแล้วคลายชุดจับยึดด้านท้ายออกให้ห่างจากคาน

2.3.8 ทำการเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์การวัดเพื่อให้เครื่องอยู่ในสภาวะพร้อมใช้งาน อย่างน้อย 30 นาที

2.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยจำเป็นต้องทำการ ประมวลผลให้ได้ค่าทอร์ก จากค่าองค์ประกอบของทอร์ก ดังนี้

- การวัดระยะความยาวของคาน
- การสมดุลคาน
- ความผิดพลาดของทอร์กเนื่องมาจากความแข็งตึงต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง
- แรงที่กระทำกับคาน

2.4.1 การวัดระยะความยาวของคาน

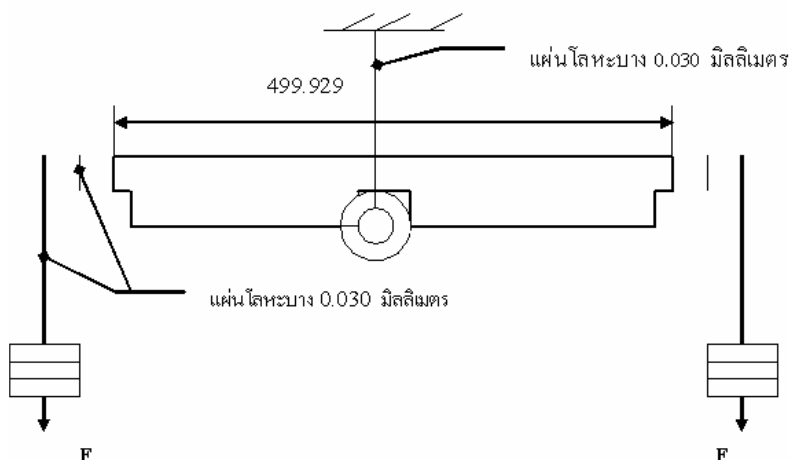
เพื่อให้ทราบค่าความยาวของคานที่แน่นอนสำหรับการคำนวณ ทอร์กจึงต้องมีการวัดโดยส่งวัดกับ ห้องปฏิบัติการความยาว สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ซึ่งมีรูปร่างและความยาวของคานดังข้อมูลด้านล่าง

ตาราง1 แสดงข้อมูลค่าความยาวของคาน

ชื่อ/อุปกรณ์	ความยาวของชิ้นงาน (mm)	ค่าความขนาน (μm)
TB/10	499.929	1

ผลการวัดที่ได้คือค่าความไม่แน่นอนของการวัด $= 1.0 \mu\text{m} + 1.8 \cdot 10^{-6} L$

L = ค่าความยาวของคาน มีหน่วยเป็น mm



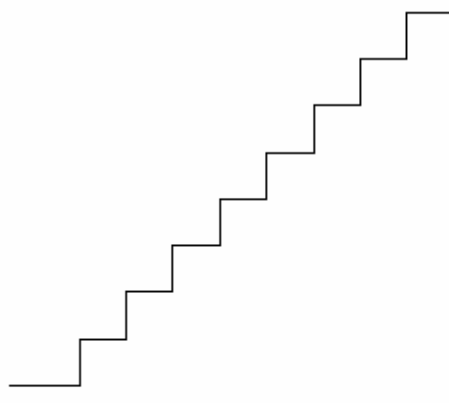
ภาพประกอบ4 แสดงความยาวรวมของคาน

ได้มีการเพิ่มความยาวของคานโดยใส่แผ่นโลหะบางที่มีความหนา 0.03 mm ที่ปลายคานทั้งสองข้างเมื่อประกอบกันแล้วคานจะมีความยาวทั้งหมด 500.019 mm

2.4.2 การสมดุลคาน เพื่อให้คานทั้งสองข้างมีความยาวเท่ากันทั้งสองด้านมีขั้นตอน 2 ขั้นตอนโดยจะต้องทำวิธีสมดุลคานอย่างหยาบเสร็จแล้วจึงทำวิธีสมดุลคานอย่างละเอียด

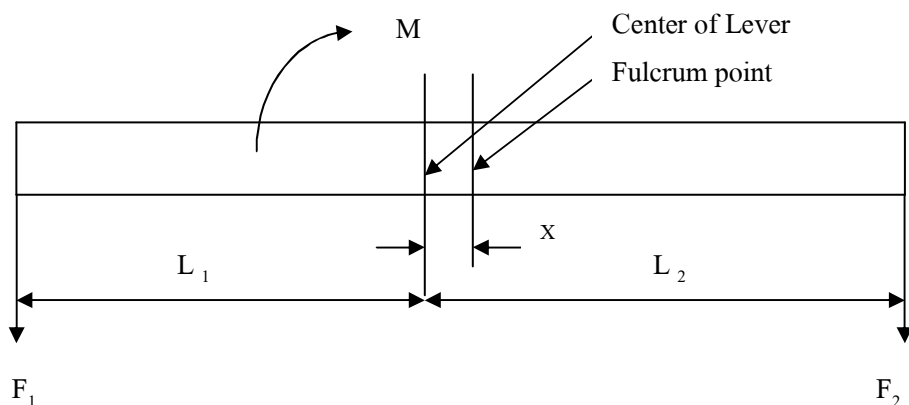
2.4.2.1 การสมดุลคานอย่างหยาบ โดยใช้ ตัวแปรสัญญาณเทอร์คปรับความยาวคาน

- ติดตั้ง ตัวแปรสัญญาณเทอร์คกับคานเรียบร้อยแล้วใส่แรงที่กระทำกับคานทั้งสองข้างพร้อมกัน ที่แรง 4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 และ 40 N ทำซ้ำ 3 ครั้ง



ภาพประกอบ5 แสดงขั้นตอนการใส่ภาระที่กระทำกับคานในการสมดุลคาน

- บันทึกค่าในแต่ละแรงที่กระทำกับคานแล้วนำค่ามาคำนวณในสมการด้านล่าง



ภาพประกอบ 6 แสดงภาพประกอบการคำนวณการสมดุลคาน

โดย กำหนดให้ $L_1 = L_2$ และ $F_1 = F_2$

$$M_1 = M_2$$

$$M_1 - M_2 = 0$$

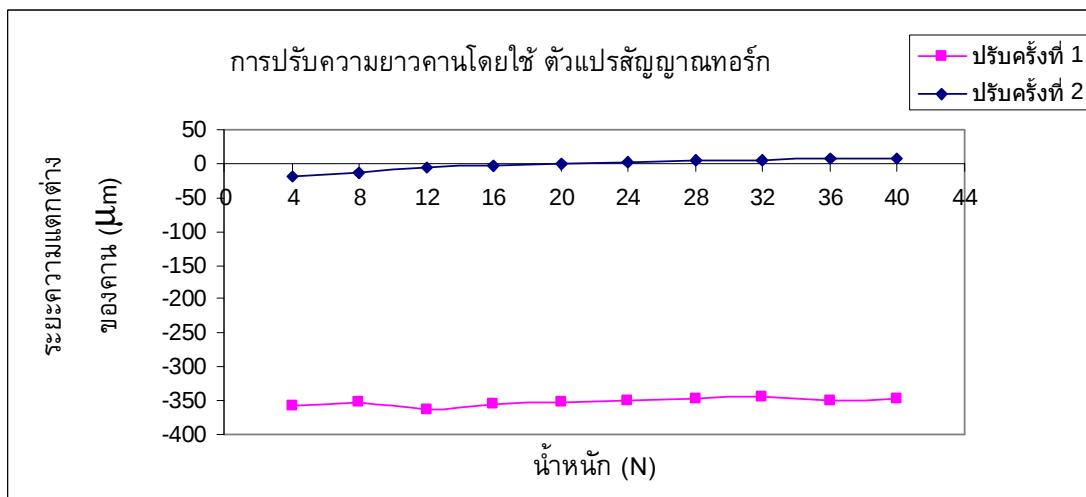
เมื่อ $M = F \cdot L$

$$(L + \Delta X) \cdot F - (L - \Delta X) \cdot F = T$$

$$-2\Delta X = \frac{T}{F}$$

$$\Delta X = \frac{T}{-2F} \quad (1)$$

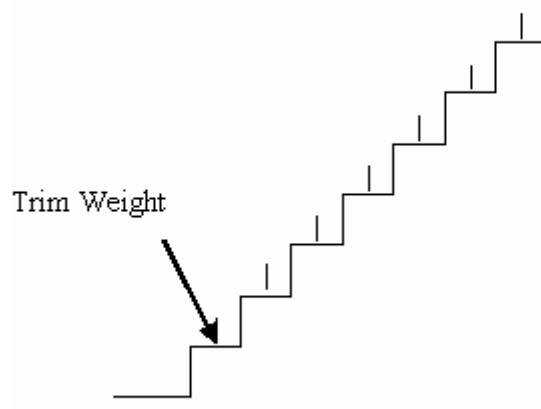
- นำมาคำนวณค่า แล้วปรับให้ ค่าทั้งสองข้างแตกต่างกัน $\pm 20 \mu\text{m}$
จึงสามารถยอมรับค่าได้



ภาพแสดง7 การปรับความยาวคานโดยใช้ ตัวแปรสัญญาณทอร์ก

2.4.2.2 การสมดุลคานอย่างละเอียด โดยใช้วิธีทริมเวต

- ปล่อยคานให้ลอยอิสระ แขนวนอยู่กับแผ่นโลหะบางจากนั้นใส่แรงที่กระทำกับ คานทั้งสองข้างพร้อมกัน ที่แรง 4 , 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36 และ 40 N โดยใช้ พรอกชิมิตีเป็นอุปกรณ์วัดว่าคานนั้นสมดุลหรือไม่

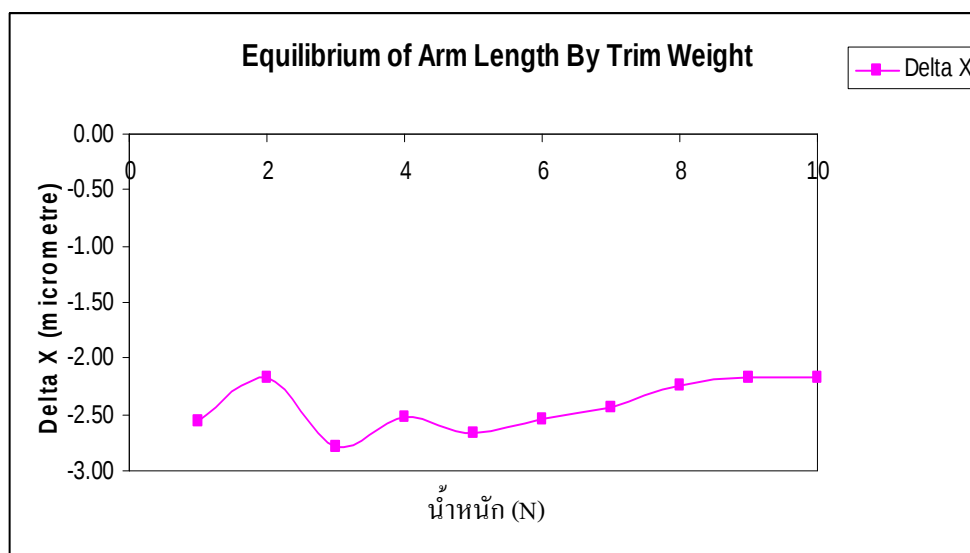


ภาพประกอบ 8 แสดงขั้นตอนการปรับความยาวคานโดยใช้วิธีทริมเวต

- ระหว่างที่ใส่แรงแต่ละค่าน้ำหนักคานจะ ไม่สมดุล ให้นำ น้ำหนัก มาวางจนอยู่ในสภาวะสมดุล แล้วบันทึกค่า

- นำค่ามาคำนวณ ดังในสมการ (1) แล้วปรับให้ค่าแตกต่างกันจนได้ค่า

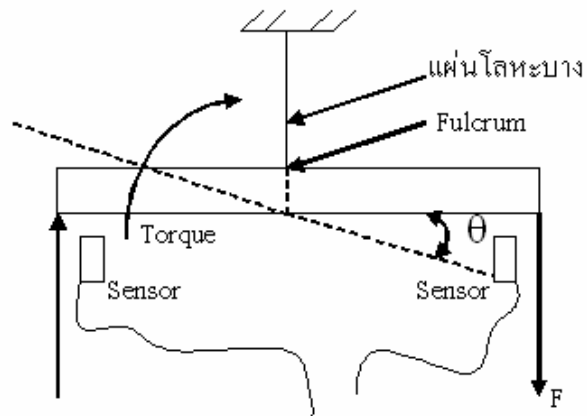
$\pm 10 \mu\text{m}$



ภาพแสดง 9 ค่าผลการสมดุลของคาน โดย ทริมเวต

2.4.3. ความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง

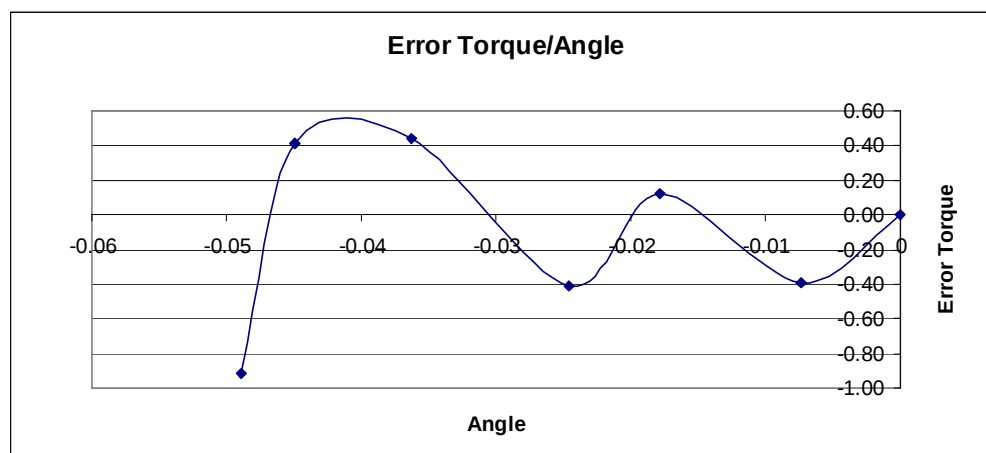
จากระบบการทำงานของเครื่องวัดทอร์กที่ทำการสร้างนี้ จำเป็นจะต้องรู้ ค่าความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบางที่ใช้แขวนคานความสัมพันธ์ของทอร์กต่อมุมที่แผ่นโลหะบางบิดไปถูกใช้เป็นตัวอธิบายปริมาณของความผิดพลาดของทอร์กเนื่องมาจากความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง ได้ทำการทดลองสังเกตมุมที่เปลี่ยนไปใน ช่วงของทอร์ก $2.5 \mu\text{Nm}$ ถึง $15 \mu\text{Nm}$ ที่ได้จากการใส่น้ำหนัก 1 mg ถึง 6 mg ค่าความผิดพลาดของทอร์กเนื่องมาจากความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง ถูกคำนวณจากสมการการถดถอยเชิงเส้น ผลการทดลองพบว่ามีค่าอยู่ที่ $284 \mu\text{Nm}^\circ$ มีค่าความไม่แน่นอนที่ $\pm 2 \mu\text{Nm}$ ดังตาราง 2



ภาพแสดง 10 การหาค่าความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง

ตาราง 2 แสดงข้อมูลความผิดพลาดของทอร์กเนื่องจากความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง

Mass (mg)	Angle(degrees) θ	T (μNm)	T'(μNm)	error(μNm)
1	-0.0073	2.46828	2.074332	-0.39
2	-0.0178	4.93656	5.057961	0.12
3	-0.0246	7.40484	6.990216	-0.41
4	-0.0363	9.87312	10.31483	0.44
5	-0.0449	12.3414	12.75856	0.42
6	-0.0489	14.80968	13.89519	-0.91



ภาพแสดง 11 ค่าความต้านทานต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง

2.4.4 แรงที่กระทำกับคาน

เพื่อให้แรงที่ได้จากค้อนน้ำหนักแต่ละลูกมีค่า 4 ± 0.003 % จากค่าแรงโน้มถ่วงที่จุดใช้งาน (Local gravity) มีค่า 9.78312 m/s^2 ค้อนน้ำหนักจึงถูกออกแบบให้มีค่า $408.929 \text{ g} \pm 5 \text{ mg}$ ผลการสอบเทียบค้อนน้ำหนักทั้ง 20 ลูกพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดทั้งหมด

3. การประเมิน ค่าความไม่แน่นอนจากการวัด

เครื่องวัดทอร์กถูกประเมินให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ (Mathematical model) ดังนี้

$$U_{\text{TSM}} = U_F + U_L + U_S$$

$$U_{\text{TSM}} = \text{ความไม่แน่นอนรวมทอร์กที่จุดหมุน}$$

$$U_F = \text{ความไม่แน่นอนของแรงที่กระทำกับคาน}$$

$$U_L = \text{ความไม่แน่นอนของระยะจากจุดหมุนถึงจุดที่แรงกระทำ รวมกับการ}$$

สมดุลของคาน, Equilibrium ทำการ Correct ค่าเป็น L_{Correct}

$$U_S = \text{ความไม่แน่นอนของการวัดทอร์กที่เกิดจากความผิดพลาดของทอร์ก}$$

เนื่องจากความแข็งดิ่งต่อการดัดของแผ่นโลหะบาง

ความไม่แน่นอนของแรง ระยะคานถูกประเมินดังตาราง 4 และ 5

ตาราง 3 แสดงค่าความไม่แน่นอนจากการวัดความยาวของคาน

Quantity	Estimate	Standard Uncertainty	Probability Distribution	Sensitivity Coefficient	Uncertainty contribution
X_i	$x_i, \mu\text{m}$	$u(x_i), \mu\text{m}$		C_i	$u_i(y), \mu\text{m}$
L_{std}	250009.5	2.5	Normal	1	2.5
L	250009.5	Combined uncertainty			2.5
		Expanded uncertainty, $k=2$			5.0

ตาราง 4 แสดงค่าความไม่แน่นอนจากการวัด แรงที่กระทำกับคาน

Quantity	Estimate	Relative Standard Uncertainty	Probability Distribution	Sensitivity Coefficient	Relative Uncertainty contribution
X_i	x_i	$w(x_i), \%$		C_i	$w_i(y), \%$
m_c	0.408929 kg	0.001223	Normal	1	0.001223
g	9.783124 m/s ²	0.0001	Normal	1	0.0001
r_a^*	1.2 kg/m ³	0.00108	Rectangular	1	0.00108
DF_c	0 N	0.0000866	Rectangular	1	0.0000866
$Force$	4 N	Combined uncertainty			0.002
		Expanded uncertainty, $k=2$			0.003

ส่วนความไม่แน่นอนของทอร์กที่จุดหมุนมีรูปแบบการประเมินดังต่อไปนี้

ตัวอย่าง การประเมินความไม่แน่นอนที่ 1 Nm ถูกแจกแจงดังตารางที่ 6

ตาราง 5 แสดงค่าความไม่แน่นอนจากการวัดทอร์ก ที่มีวล 1 N

Quantity	Estimate	Relative Standard Uncertainty	Probability Distribution	Sensitivity Coefficient	Relative Uncertainty contribution
X_i	x_i	$w(x_i), \%$		C_i	$w_i(y), \%$
F	4 Nm	0.0015	Normal	1	0.0015
L	0.2500095 m	0.0010	Normal	1	0.0010
$L_{correct}$	0.00000244 m	0.0002	Normal	1	0.0002
S	0 Nm	0.0002	Rectangular	1	0.0002
M	1.00004776 Nm	Combined uncertainty			0.002
		Expanded uncertainty, $k=2$			0.004

ผลการประเมินพบว่าเครื่องมือวัดทอร์กมีความไม่แน่นอนที่ $\pm 0.004 \%$ ที่ความเชื่อมั่น 95%

4. สรุปผลการวิจัย

เครื่องมือวัดทอร์กมาตรฐาน 1 Nm ถึง 10 Nm ถูกสร้างขึ้นตามแบบที่ออกแบบไว้ด้วยหลักการของระยะคันที่รู้ค่าและแรงที่กำหนดจากค้อนน้ำหนัก (Lever-mass system) โดยมีวัตถุประสงค์ให้มีความถูกต้องอยู่ใน 0.05 % ลักษณะที่สำคัญคือ ค้อนน้ำหนักถูกแขวนบนคันด้วยแผ่นโลหะบางและจุดหมุนที่ใช้หลักการแขวนคันด้วยโลหะบาง ชิ้นส่วนที่สำคัญถูกวัดและสอบเทียบให้อยู่ในพิสัยที่กำหนดจากการประเมินความไม่แน่นอนของการวัดพบว่ามีค่าอยู่ที่ ± 0.004 % อยู่ในเกณฑ์การออกแบบที่กำหนดไว้ จากผลการทดลองมีความเป็นไปได้ที่จะปรับปรุงแบบให้สามารถใช้สอบเทียบเครื่องมือวัดทอร์กที่มีแรงอัดด้านข้างสูง (Lateral Force) ได้ และมีความเป็นไปได้ที่จะขยายพิสัยการวัดให้สูงขึ้น แต่ควรคำนึงถึงความแข็งแรงของแผ่นโลหะบางและ ค่าความแข็งดิ่งต่อการดัด (Bending Stiffness)

5. บรรณานุกรม

- [1] D. Roske, K. Adolf and D. Peschel, Lever optimization for torque standard machines, Torque laboratory division for mechanics and Acoustics Phys-Techn. Bundesanstalt Braunschweig, Germany, 2000
- [2] Dirk Roske, Key comparisons in the field of torque measurement , Solid mechanic department, Phys-Techn. Bundesanstalt Braunschweig, Germany, 2005
- [3] Andreas Brube, Rudolf Konya, Investigations on transducers for transfer or reference in continuous torque calibration, PTB, Germany, 1998
- [4] Koji Ohgushi ,Takashi Ota, .Kazunaga Ueda , Load dependency of moment – arm length in the torque standard machine , National Metrology Institute of Japan Tsukuba Japan. 2003
- [5] Andreas Bruege , Influence of Eccentric mounting on the calibration of torque Measuring device, Phys-Techn. Bundesanstalt Braunschweig, Germany . 1996
- [6] Diedert peschel, Proposal for the design of torque calibration machines Using the principle of a component system, PTB, Germany , 2000
- [7] International Measurement Confederation (IMEKO) TC-3 The 5th Asia-Pacific Symposium on Measurement of Force, Mass and Torque Tsukuba Center Inc
Tsukuba November 7-10,2000
- [8] DIN 51309, Calibration of Static Torque Measuring Devices, Feb1998
- [9] สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มาตรวิทยา-ฉบับย่อ, สิงหาคม 2550

ภาคผนวก ข
คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

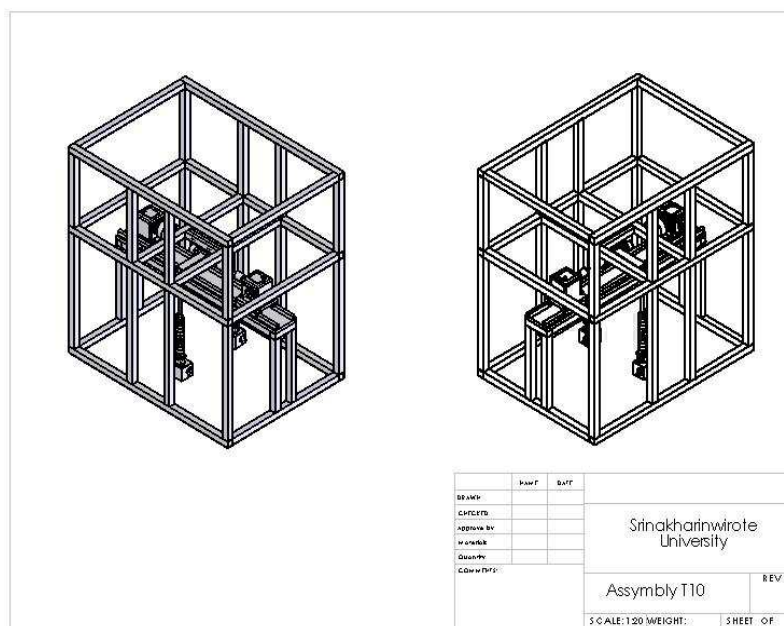
คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย

C_i	คือ	สัมประสิทธิ์ความไม่แน่นอนของการวัด	-
F	คือ	แรงที่กระทำกับคาน	N
$\vec{F}, \vec{F}_1, \vec{F}_2$	คือ	เวกเตอร์ของแรง	N
g_{Local}	คือ	อัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก ณ ตำแหน่งที่ทดลอง	$m\ S^{-2}$
L	คือ	ความยาวของคาน	m
L_1	คือ	ความยาวของคานด้านซ้าย	m
L_2	คือ	ความยาวของคานด้านขวา	m
$L_{Correct}$	คือ	ค่าแก้ไขความยาวของคาน	m
L_o	คือ	ระยะจากจุดหมุนถึงจุดที่แรงกระทำ	m
M	คือ	โมเมนต์	Nm
$\vec{M}$	คือ	โมเมนต์ของแรงรอบจุดหมุน	Nm
$\vec{M}_1$	คือ	โมเมนต์ของแรงด้านซ้าย	Nm
$\vec{M}_2$	คือ	โมเมนต์ของแรงด้านขวา	Nm
$M_{residual}$	คือ	โมเมนต์คงเหลือของทอร์ก(Residual torque)	Nm
M_{STD}	คือ	โมเมนต์ของทอร์กมาตรฐาน	Nm
m	คือ	มวลของตุ้มน้ำหนัก	g
N	คือ	ข้อมูลประชากรใดๆ	-
r	คือ	รัศมีจากจุดหมุนถึงแรง	m
r^t	คือ	รัศมีจากจุดหมุนถึงแนวแรงตั้งฉาก	m
$\vec{r}$	คือ	เวกเตอร์ของระยะจากจุดหมุนถึงแนวแรง	m
SD	คือ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	-
S^2	คือ	ค่าความแปรปรวน	-
T	คือ	ทอร์ก	Nm
T_s	คือ	ทอร์กที่เกิดจากความแข็งตึงต่อการดัด (Bending Stiffness)	Nm
$u(x_i),$	คือ	เปอร์เซ็นต์ค่าความไม่แน่นอนสัมพัทธ์	%
$u_i(y),$	คือ	ค่าความไม่แน่นอน	-
X_A	คือ	ระยะความยาวของคานที่ต้องปรับ	m
X_i, X_1, X_2	คือ	ข้อมูลประชากร	-
$\bar{X}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง	-
ΔX	คือ	ระยะความแตกต่างของคาน	m

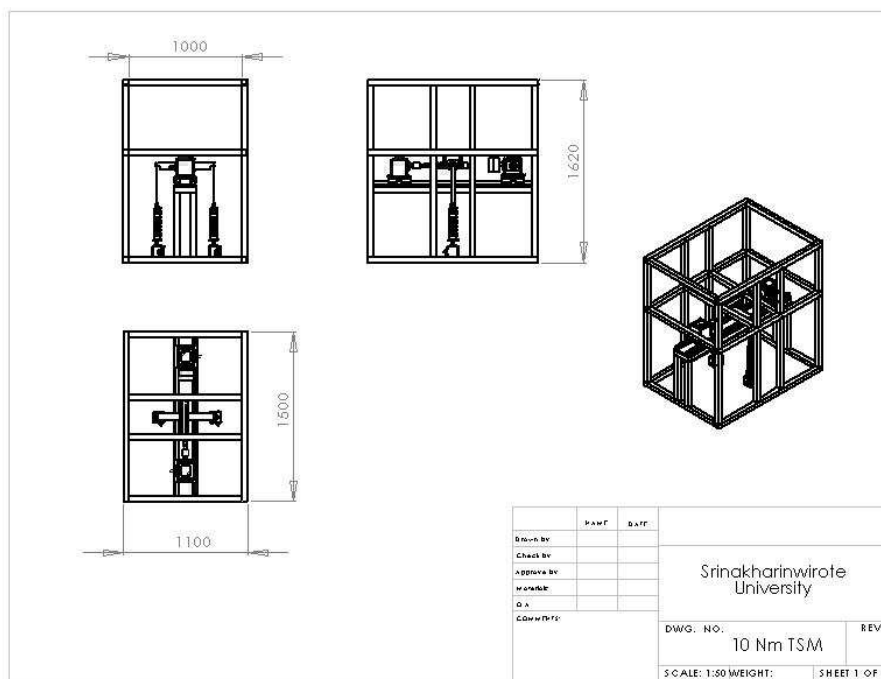
คำอธิบายสัญลักษณ์และหน่วย (ต่อ)

ΔF_m	คือ	ค่าความผิดพลาดของมวล	g
α	คือ	มุมที่แรงกระทำกับระยะจากจุดหมุนถึงแนวแรง	°
μ	คือ	ค่าเฉลี่ยเลขคณิต	-
ρ_a	คือ	ค่าความหนาแน่นของอากาศ	kg m ⁻³
ρ_m	คือ	ค่าความหนาแน่นของมวล	kg m ⁻³
σ	คือ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร	-
$w(M_{std})$	คือ	ค่าความไม่แน่นอนของการวัดทอร์ค	-

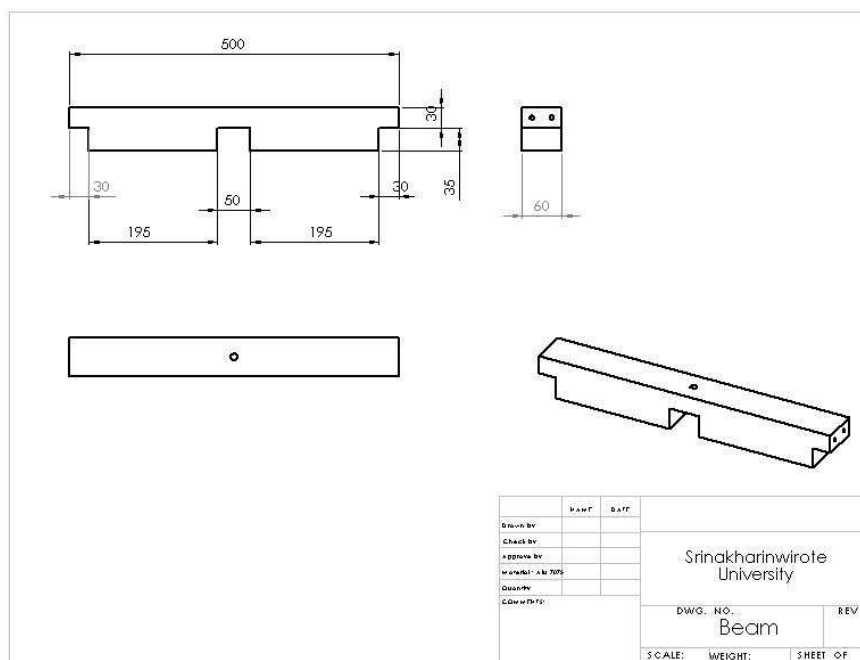
ภาคผนวก ซ
แบบเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm



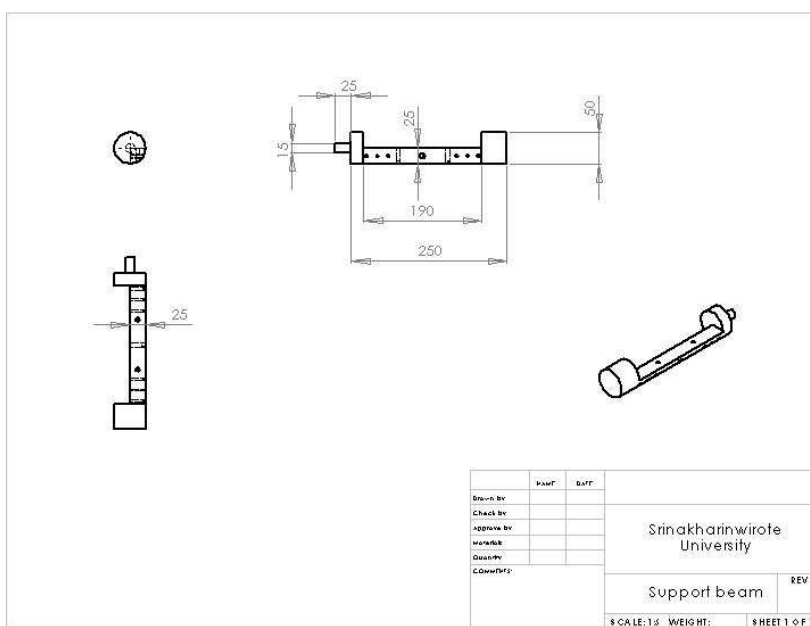
ภาพประกอบ 49 แสดงภาพ 3 มิติของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm



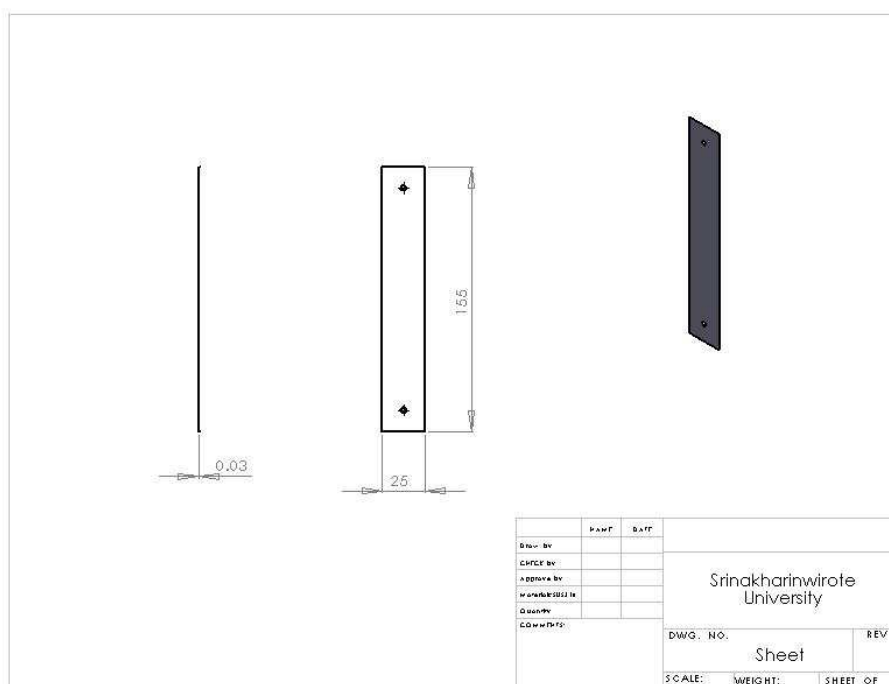
ภาพประกอบ 50 แสดงภาพฉายของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm



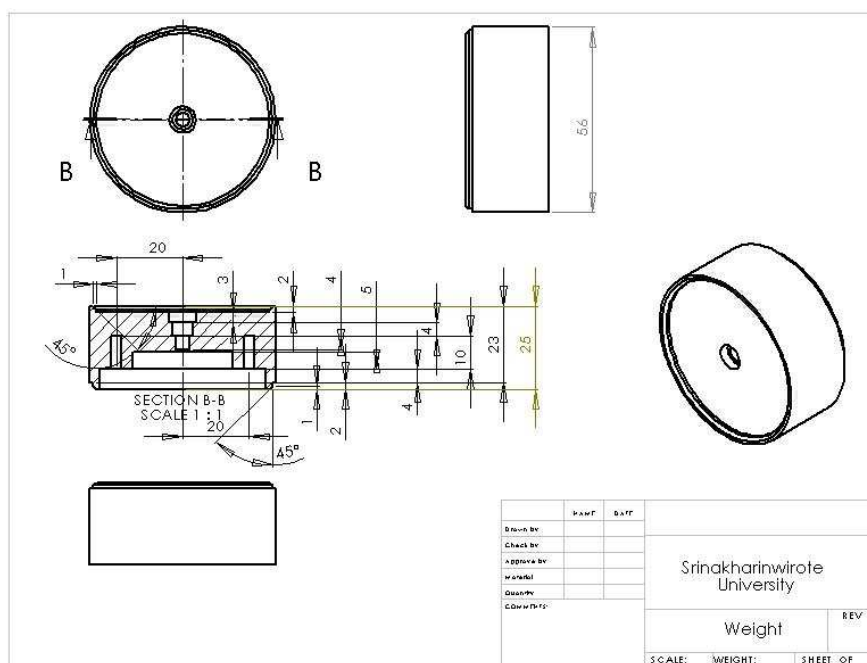
ภาพประกอบ 51 แสดงคานของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm



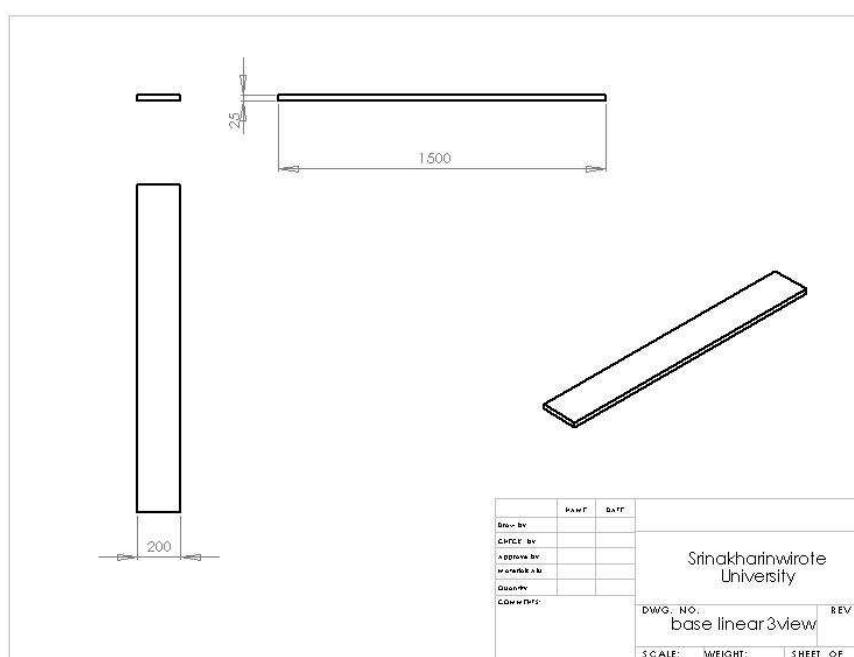
ภาพประกอบ 52 แสดงฐานรองคาน ของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm



ภาพประกอบ 53 แสดงแผ่นโลหะบางของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm



ภาพประกอบ 54 แสดงตั้มน้ำหนักของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm



ภาพประกอบ 55 แสดงฐานของเครื่องวัดทอร์กมาตรฐาน 10 Nm

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ นามสกุล	นาย ประมาณ จันทร์รักษา
วันเดือนปีเกิด	30 เมษายน 2518
สถานที่เกิด	ระยอง
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	61 หมู่ 1 ต. บ้านแลง อ. เมือง จ. ระยอง 21000
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2531	มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนวัดป่าประดู่
พ.ศ. 2534	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ วิทยาลัยเทคนิคระยอง
พ.ศ. 2537	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขต นนทบุรี
พ.ศ. 2539	อุดมศึกษา(อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต) วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2551	บัณฑิตศึกษา(วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต)วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ