



การทวนสอบแรงบิดด้วยเทคนิคการต่อสเตรนเกจวงจรรแบบฟูลบริดจ์เพื่อพัฒนาโครงสร้างพื้นฐาน  
ด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม

A TORQUE VERIFICATION WITH FULL BRIDGE STRAIN GAUGE TECHNIQUES TO DEVELOP  
SCIENCE, RESEARCH AND INNOVATION INFRASTRUCTURE

กุลยศ สุวันทโรจน์  
ศุภชัย หลักคำ

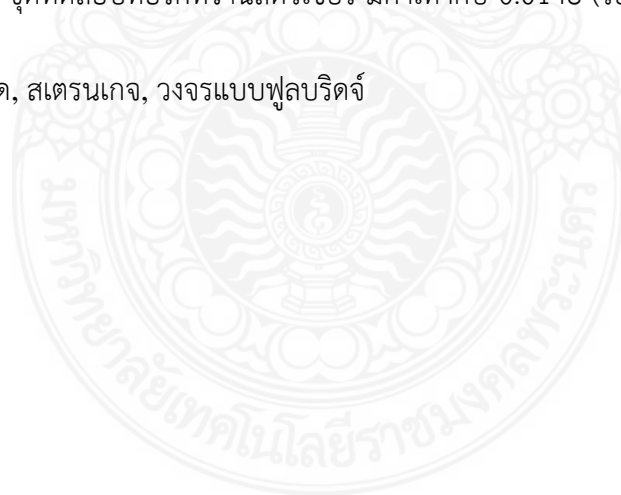
งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณกองทุนเพื่อการวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2567  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อเรื่อง : การทวนสอบแรงบิดด้วยเทคนิคการต่อสเตรนเกจวงจรแบบฟูลบริดจ์เพื่อพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม  
ผู้วิจัย : นายกุลยศ สุวันทโรจน์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร  
นายศุภชัย หลักคำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร  
พ.ศ. : 2567

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการทวนสอบแรงบิดด้วยเทคนิคการต่อสเตรนเกจวงจรแบบฟูลบริดจ์เพื่อพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบชุดทดสอบและศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์ โดยชุดทดสอบมีคานรับมวลความยาว 1,000 มิลลิเมตร สามารถสร้างแรงบิดที่ทอร์กทรานสดิวเซอร์ได้สูงสุดไม่เกิน 1,000 นิวตันต่อเมตร การทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการทวนสอบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์ และช่วงการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์ โดยทั้ง 2 ช่วงจะทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศา ใช้มวลขนาด 0.1 กิโลกรัม ถึง 103.10 กิโลกรัม ในสภาวะแรงบิดต่ำสุดที่ 1 นิวตันต่อเมตร และแรงบิดสูงสุด 880 นิวตันต่อเมตร จากการทดลองพบว่าความเป็นเชิงเส้นระหว่างแรงบิดที่ได้จากการคำนวณกับมาตรวัด และแรงบิดที่ได้จากการคำนวณกับสัญญาณแรงดัน ทางไฟฟ้า นั้นมีค่าความชันเฉลี่ย เท่ากับ 0.9851 และ 0.0050 มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของ มาตรวัดและสัญญาณแรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 0.2883 และ 0.2564 และมีค่าความคลาดเคลื่อนจาก ชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์ มีค่าเท่ากับ 0.0148 (ร้อยละ 1.48)

**คำสำคัญ:** แรงบิด, สเตรนเกจ, วงจรแบบฟูลบริดจ์



Title : A Torque Verification with Full Bridge Strain Gauge Techniques to Develop Science, Research and Innovation Infrastructure  
Researcher : Mr.Kullayot Suwantaroj, Faculty of Engineering, RMUTP  
Mr.Supachai Lakkam, Faculty of Engineering, RMUTP  
Year : 2024

### ABSTRACT

This research titled “A Torque Verification with Full Bridge Strain Gauge Techniques to Develop Science, Research and Innovation Infrastructure” aims to design a test set and study the tolerances of a torque transducer test set. The test set has a 1000 mm long mass beam capable of generating torque at the transducer up to a maximum of 1,000 newton-meters. The experiment will be divided into 2 periods is the verification interval of the torque transducer test set and the linearity and value experimental range. Tolerance of the test set torque transducer in both experiments at 25 °C used a mass of 0.1 kg to 103.10. kg in the condition of the lowest bit force at 1 Newton - meters and the maximum torque of 880 Newton - meters. As a result, it was found that the linearity between the calculated torque and the meter and the calculated torque and the voltage signal were averaged 0.9851 and 0.0050. The standard deviations of the meter and the voltage signal were 0.2883 and 0.2564, and the tolerance from the torque transducer test set was 0.0148 (1.48 percent).

**Keywords:** Torque, Strain Gauge, Full Bridge Strain

### กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จด้วยการสนับสนุนจากงบประมาณกองทุนเพื่อการวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2567 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณต่อคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนขอขอบคุณผู้ที่ให้ความร่วมมือและให้ความอนุเคราะห์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ในที่นี้

คณะผู้วิจัย



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 สมมุติฐานงานวิจัย	2
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 การสอบเทียบ (Calibration)	4
2.2 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรวม	5
2.3 ทอร์กเซลล์ (Torque cell)	5
2.4 สเตรนเกจ (Strain gauge)	8
2.5 วงจรวีทสโตน	10
2.6 ทฤษฎีการออกแบบ	13
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	<b>20</b>
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	20
3.2 การออกแบบและคำนวณโครงสร้าง	21
3.3 การทวนสอบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์	25
3.4 การหาความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบ ทอร์กทรานสดิวเซอร์	29

<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	34
4.1 ผลการทวนสอบของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดีวเซอร์	34
4.2 ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดีวเซอร์	35
4.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดีวเซอร์โดยใช้แรงบิด	38
<b>บทที่ 5 สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ</b>	40
5.1 สรุป และอภิปราย การวิจัย	40
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	40
5.3 ข้อเสนอแนะ	40
<b>บรรณานุกรม</b>	41
<b>ภาคผนวก</b>	42
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	54



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	สถานะการทวนสอบชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์	25
3.2	สถานะการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์	29
4.1	ผลการทวนสอบของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์	34
4.2	ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์	35
4.3	ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด	38



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แผนผังหลักการทำงานของงานวิจัยเชิงความร่วมมือและถ่ายทอดเทคโนโลยีขั้นสูง	3
2.1 การติดแผ่นสเตรนเกจ	5
2.2 วงจรของแผ่นสเตรนเกจ	6
2.3 จำลองการเคลื่อนของแผ่นสเตรนเกจ	6
2.4 โครงสร้างสเตรนเกจ	8
2.5 วงจรบริดจ์	11
2.6 วงจรแบบควอเตอร์เทอร์บริดจ์	11
2.7 วงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์	11
2.8 วงจรแบบฟูลบริดจ์	12
2.9 วงจรแบบควอเตอร์เทอร์บริดจ์	13
2.10 ความแตกต่างระหว่างเหล็ก I-beam และ H-beam	14
2.11 ขั้นตอนการเขียนแผนภาพ F.B.D., S.F.D., B.M.D.	18
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	20
3.2 การออกแบบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด	21
3.3 แผนภาพโมเมนต์ตัด	23
3.4 พื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อย	23
3.5 ทอร์กทรานสดิวเซอร์ รุ่น TPS-A-1KNM	24
3.6 จอแสดงผล รุ่น DC Voltmeters A6000 Serie	25
3.7 การเปิดเครื่องทดสอบ	26
3.8 การปรับระยะจุดแขวนน้ำหนัก	26
3.9 การปรับระดับน้ำในแนวระนาบ	27
3.10 การตั้งศูนย์มาตรวัด	27
3.11 การทดสอบและอ่านค่าจริง	28
3.12 การวัดกระแสไฟโดยใช้มัลติมิเตอร์	28
3.13 การบันทึกผลการทดสอบ	29
3.14 การเปิดเครื่องทดสอบ	30
3.15 การปรับขนาดความยาวของจุดแขวนน้ำหนัก	30
3.16 การปรับระดับน้ำในแนวระนาบ	31
3.17 การตั้งศูนย์มาตรวัด	31
3.18 การทดสอบและอ่านค่าจริง	32
3.19 การวัดกระแสไฟโดยใช้มัลติมิเตอร์	32
3.20 การบันทึกผลการทดสอบ	33
4.1 ผลการทดสอบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์	35



4.2	ผลการทดลองหาค่าแรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผลเทียบกับแรงบิดที่ได้จากการคำนวณของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์	36
4.3	ผลการทดลองหาค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเทียบกับแรงบิดที่ได้จากการคำนวณของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์	37
4.4	การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากมาตรแสดงผล และสัญญาณแรงดันไฟฟ้า	37
4.5	ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์	39



## บทที่ 1

### บทนำ

งานวิจัยบทนี้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์การวิจัย ขอบเขตของการศึกษาประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมหลายประเภทมีการวัดแรงบิด เพื่อควบคุมมาตรฐานการผลิต โดยวัดแรงบิดตั้งแต่ขั้นตอนการประกอบผลิตภัณฑ์ เช่น การขันน็อตประกอบชิ้นงาน ตลอดงานในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่มีเครื่องจักรกล และตรวจสอบมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลส่วนมากมีการทดสอบด้วยเครื่องไดนาโมมิเตอร์ ซึ่งภายในเครื่องไดนาโมมิเตอร์มีความต้องการการวัดข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งส่วนใหญ่อาศัยผลลัพธ์ที่ออกมาจากอุปกรณ์วัดแรงบิด เครื่องมือวัดแรงบิดประกอบด้วยทรานสดิวเซอร์เป็นตัวแปลงค่าความเครียดจากสเตรนเกจเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้า นอกเหนือจากข้อมูลที่ได้จากการวัด ความแม่นยำและเที่ยงตรงของผลลัพธ์เป็นสิ่งสำคัญที่กระทบต่อคุณภาพในกระบวนการผลิต ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์จะส่งผลเป็นอย่างมากในการอุตสาหกรรมจักรกล ด้วยเหตุนี้การสอบเทียบเครื่องมือวัดจึงเป็นกระบวนการหนึ่งในอุตสาหกรรมที่ใช้สร้างความมั่นใจที่จำเป็นสำหรับการทำให้แน่ใจว่าเครื่องมือวัดที่ใช้งานยังสามารถทำงานได้อย่างมีคุณภาพ และเป็นไปตามมาตรฐานกำหนด การสอบเทียบเครื่องมือวัด คือ การเปรียบเทียบค่าของเครื่องมือวัดภายในโรงงานอุตสาหกรรม กับค่ามาตรฐานของห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่สามารถสอบกลับได้สู่มาตรฐานแห่งชาติหรือมาตรฐานระหว่างชาติ โดยการสอบเทียบเครื่องมือวัดจะต้องรายงานค่าความไม่แน่นอนของการวัดด้วยทุกครั้ง ทุกมาตรฐานสากลมีข้อกำหนดในการสอบเทียบเครื่องมือวัด ซึ่งชุดทดสอบทรานสดิวเซอร์ โดยใช้แรงบิดจะช่วยให้ในการศึกษาค่าความคลาดเคลื่อน

ดังนั้นการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงบิดจึงกลายเป็นขั้นตอนการทดสอบที่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง แต่มีความจำเป็น เพราะหากพิจารณาให้ดีจะเห็นว่ามูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อใช้เครื่องมือวัดที่ไม่ได้มาตรฐาน อาจสูงกว่าค่าใช้จ่ายในการสอบเทียบเครื่องมือวัด การสอบเทียบที่ทำมากเกินไปก็อาจก่อให้เกิดการสูญเสียงบประมาณของหน่วยงาน ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะสร้างชุดทดสอบอุปกรณ์วัดแรงบิด โดยอาศัยเทคนิคการต่อสเตรนเกจวงจรแบบฟูลบริดจ์ เพื่อลดข้อจำกัดด้านการสอบเทียบเครื่องมือวัดขั้นต้น และใช้เป็นเครื่องมือขั้นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรมในระดับภาคการศึกษาและภาคอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์
- 2) เพื่อสร้างชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) สามารถใช้แรงถ่วงน้ำหนักระหว่าง 0.005 กิโลกรัม ถึง 103.10 กิโลกรัม
- 2) ความยาวของคานรับน้ำหนักที่ต่อมาจากเพลาลึงจุดถ่วงน้ำหนัก คือ 1,000 มิลลิเมตร
- 3) ทอร์กทรานสดิวเซอร์สามารถวัดได้ 1 กิโลนิวตันเมตร
- 4) ไม่คิดค่าความคลาดเคลื่อนของมัลติมิเตอร์

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของเครื่องสอบเทียบ
- 2) ออกแบบและกำหนดย่านหรือขนาดเครื่องมือทดสอบ
- 3) สร้างชุดทวนสอบอุปกรณ์วัดแรงบิด
- 4) ทดสอบความคลาดเคลื่อน
- 5) สรุปผลการดำเนินงาน

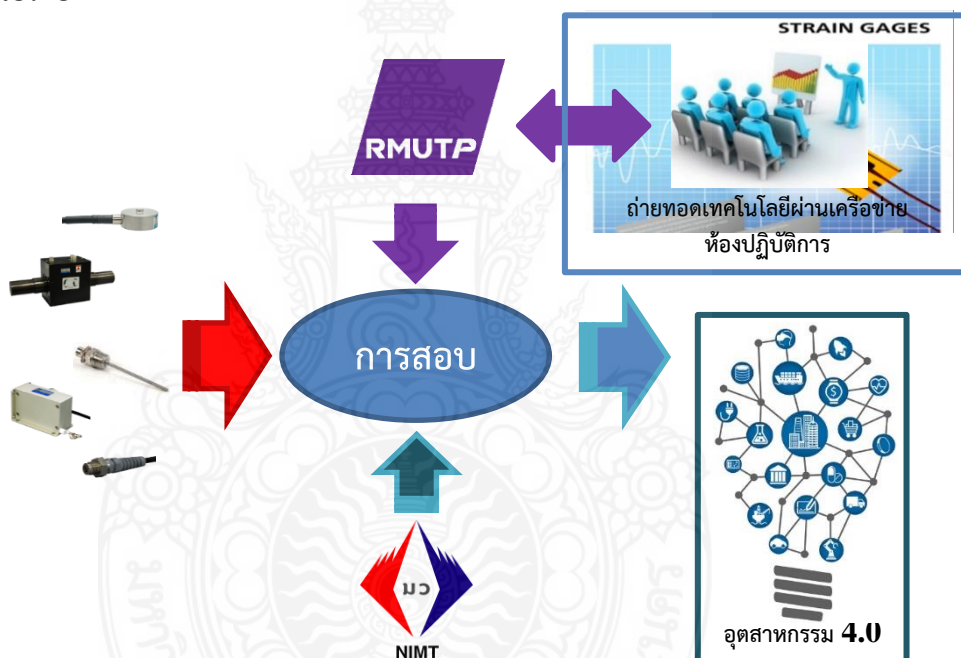
## 1.5 สมมติฐานงานวิจัย

เครื่องมือวัดในกลุ่มทรานสดิวเซอร์ที่มีใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบันมีหลักการทำงานคือแปลงพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง โดยการแปลงสัญญาณค่าความเครียดจากวัสดุภายในทรานสดิวเซอร์และแสดงผล แต่จากการสำรวจของนักวิจัยพบว่า การสอบเทียบของสถาบันสอบเทียบเครื่องมือวัดทั้งภาครัฐ อาศัยเทคนิคทางอ้อมสำหรับการสอบเทียบเครื่องมือวัดในส่วนทรานสดิวเซอร์ (เช่น Load cell, Pressure Transducer, Torque Transducer เป็นต้น) โดยการสร้างจำลองภาระทางไฟฟ้าป้อนเข้าทรานสดิวเซอร์ (Input) และอ่านค่าสัญญาณทางไฟฟ้าจากทรานสดิวเซอร์นั้น (Output) เนื่องจากการสร้างแหล่งกำเนิดความเครียดเพื่อจ่ายไปยังทรานสดิวเซอร์โดยตรงเป็นวิธีที่ควบคุมได้ยาก อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวกลับเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับในเรื่องความแม่นยำจากการสอบเทียบ ดังนั้นการอาศัยความร่วมมือด้านการวิจัยผ่านเครือข่ายความร่วมมือนานาชาติจากประเทศต้นทางอุตสาหกรรม จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จำนำเทคนิคการสอบเทียบขั้นสูงดังกล่าวเข้ามาใช้ภายในประเทศ เพื่อยกระดับและพัฒนาขีดความสามารถทางการวัดของเครื่องมือวัด และสร้างการยอมรับในระดับสากล

นอกจากการขีดความสามารถทางการวัดของเครื่องมือวัด และสร้างการยอมรับในระดับสากลแล้ว การถ่ายทอดเทคโนโลยีขั้นสูงเกี่ยวกับการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องส่งไปยังต่างประเทศในปัจจุบันให้ลดลง ซึ่งส่งผลดีต่อต้นทุนทางอุตสาหกรรม สร้างความสามารถด้านการแข่งขันให้กับประเทศ อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมรากฐานอุตสาหกรรมขั้นสูงของประเทศ และเป็นการสร้างความพร้อมด้านอุตสาหกรรมเกี่ยวเนื่อง เพื่อจูงใจการลงทุนจากต่างประเทศที่มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูง

นอกจากนี้ การพัฒนาบุคลากรเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันอุตสาหกรรม ถือเป็นสิ่งจำเป็นและสำคัญในการขับเคลื่อนกลุ่มอุตสาหกรรมเป้าหมายของประเทศ การบูรณาการบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้านภายในประเทศ นักวิจัยมีแนวความคิดในการบูรณาการบุคลากรร่วมกันระหว่าง **คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร** และ **สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ** โดยการเชิญผู้มีประสบการณ์ด้านการสอบเทียบเฉพาะทางจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติเป็นที่ปรึกษาในโครงการดังกล่าว

ดังนั้นการพัฒนาขีดความสามารถทางการวัดของเครื่องมือวัดด้วยการสอบเทียบด้วยเทคนิคการบ่อนความเครียดจะกลายเป็นกุญแจสำคัญที่นำไปสู่การพัฒนาอุตสาหกรรม 4.0 อีกทั้งเป็นการสร้างความเข้มแข็งให้ภาคอุตสาหกรรมผ่านความร่วมมือห้องปฏิบัติการเครือข่ายระดับนานาชาติ ภายใต้แผนพัฒนาเครือข่ายความร่วมมือนานาชาติเพื่อยกระดับความเป็นเลิศ ของมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัยไทย



ภาพที่ 1.1 แผนผังหลักการทำงานของงานวิจัยเชิงความร่วมมือและถ่ายทอดเทคโนโลยีขั้นสูง

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การสอบเทียบ (Calibration) [1]

การสอบเทียบเป็นหัวใจสำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องมือวัดและควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม การสอบเทียบคือการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าที่ต้องการของอินพุตและเอาต์พุตของเครื่องมือ เพื่อรับรองอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดว่าทำงานด้วยความถูกต้องแม่นยำและอยู่ในขอบเขตที่ต้องการภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด และมีคุณภาพตามที่ต้องการตลอดจนสามารถแสดงจุดบกพร่อง ความคลาดเคลื่อนต่างๆ ให้เห็นได้

การสอบเทียบจะต้องทำเป็นระยะๆ เพื่อทดสอบความถูกต้องในการทำงานของเครื่องมือหรือระบบและกำหนดการใช้งานให้เป็นมาตรฐาน การสอบเทียบจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือวัดให้มีมาตรฐานและเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานของตัวสอบเทียบ และมาตรฐานของสภาพแวดล้อม การสอบเทียบไม่ได้เป็นการรับประกันการทำงานของเครื่องมือแต่จะทำให้การวัดมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นหรือทำให้การทำงานที่ต้องใช้อุปกรณ์เหล่านี้มีความถูกต้องแม่นยำ น่าเชื่อถือ และอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ถ้าอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดมีการปรับตั้งค่าใหม่ ซ่อมแซม เปลี่ยนแปลง หรือมีการใช้งานผิดๆ ควรจะต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือเหล่านั้นใหม่เสมอ การบันทึกข้อมูลจะต้องทำเหมือนกับผู้ผลิตและต้องสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้ใช้งานว่าสามารถนำข้อมูลไปใช้อ้างอิงได้ โดยมาตรฐานการยอมรับนั้นสามารถแบ่งออกได้ 3 ระดับ คือ

##### 2.1.1 มาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard)

มาตรฐานปฐมภูมิหมายถึง ระดับที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงและมีหน่วยวัดค่าสัมบูรณ์ที่รับรองโดยสถาบันรับรองมาตรฐานนานาชาติมีความทนทานต่อการใช้งาน การที่จะได้เป็นเจ้าของมาตรฐานขั้นนี้และรักษาระดับมาตรฐานนี้ไว้เป็นเรื่องที่ยากมาก ค่าสัมบูรณ์ในที่นี้หมายถึงความเป็นอิสระ ความสม่ำเสมอและไม่เกี่ยวข้องกับสิ่งอื่น

##### 2.1.2 มาตรฐานทุติยภูมิ (Secondary standard)

มาตรฐานทุติยภูมิหมายถึง มาตรฐานสัมบูรณ์ที่ใช้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิงในการสอบเทียบ ซึ่งจะกำหนดตัวเลขที่ได้มาจากมาตรฐานปฐมภูมิ การสอบเทียบในมาตรฐานทุติยภูมินี้จะเกี่ยวข้องกับ ความแม่นยำและชนิดของมาตรฐานที่ต้องการ

##### 2.1.3 มาตรฐานการทำงาน (Working standards)

มาตรฐานการทำงาน หมายถึง มาตรฐานทั่วไป ซึ่งจะใช้เมื่อมีการจัดระบบในโรงงาน และในห้องทดลองที่ต้องการความแม่นยำน้อยกว่ามาตรฐานทุติยภูมิ เครื่องมือวัดที่จัดว่าดีนั้น ในความหมายของการสอบเทียบจะต้องมีทั้งมาตรฐานปฐมภูมิและทุติยภูมิ นอกจากนี้จะต้องประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ผ่านการสอบเทียบสำหรับการวัดดังต่อไปนี้เช่น การกระจัด (Displacement)

ความเร็ว (Velocity) ความเร่ง (Accelerate) แรง (Force) ความดัน (Pressure) การไหล (Flow) อุณหภูมิ (Temperature) แรงดันไฟฟ้า (Voltage) กระแสไฟฟ้า (Current) เวลา (Time) และความถี่ (Frequency) ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการในงานอุตสาหกรรม ข้อสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวมาตรฐาน ที่มีความจำเป็นมาก คือ ตัวมาตรฐานจะต้องมีความแม่นยำมากกว่าเครื่องมือวัดที่จะทำการสอบเทียบมาตรฐานในการเปรียบเทียบต้องการเพียงความน่าเชื่อถือและความแม่นยำเหมือนกับการใช้งาน

ในทุก ๆ ขั้นตอนของการสอบเทียบสมควรที่จะต้องมีการอ่านค่าทั้งในสภาพที่ปกติ และสภาพที่เสื่อมเชิงกล โดยปกติแล้วการสอบเทียบอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ชนิดเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล (Electro – Mechanical transducer) จะมีการสูญเสียเกิดขึ้นเนื่องจากการเสียดทาน ฮิสเตอร์รีซิส และปรากฏการณ์ธรรมชาติโดยทั่วไปส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นในกรณีของการไม่เชิงเส้นและความต้านทางสนามแม่เหล็ก เป็นต้น

## 2.2 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรวม [1]

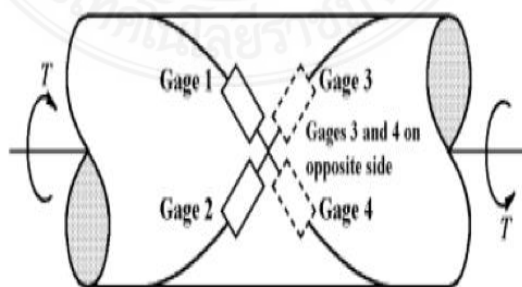
ความแม่นยำของระบบที่สมบูรณ์นั้นมีความสัมพันธ์กับความถูกต้องแม่นยำเฉพาะตัวของอุปกรณ์เซนเซอร์ และอุปกรณ์ที่ใช้งาน อุปกรณ์แต่ละชนิดจะมีความถูกต้องแม่นยำในขอบเขตของตนเอง ค่าขอบเขตความแม่นยำต่ำสุดสามารถเขียนได้ว่า

$$A = \sqrt{(a_1^2 + a_2^2 + a_3^2)} \quad (2.1)$$

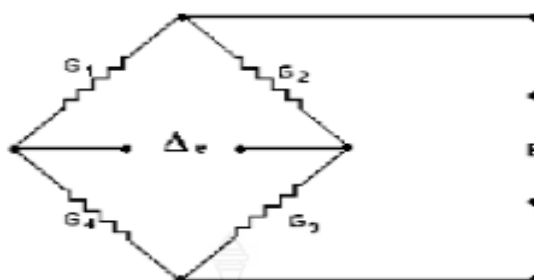
แต่ในทางปฏิบัติ รากที่สองของความแม่นยำมักจะถูกกำหนดขึ้นมา เนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่อุปกรณ์ทุกตัวในระบบ จะมีความคลาดเคลื่อนทางสถิติมากที่สุด ณ ตำแหน่งและช่วงเวลาเดียวกัน

## 2.3 ทอร์กเซลล์ (Torque cell) [2]

ทอร์กเซลล์ (Torque cell) เหมือนกับโพลดเซลล์ คือประกอบด้วยชิ้นส่วนทางกล (โดยปกติคือเพลลา ซึ่งมีพื้นที่ตัดเป็นรูปวงกลม) กับตัวรับรู้ คือ สเตรอนเกจ 4 ตัวติดอยู่บนเส้นเกลียว 2 เส้นที่ตั้งฉากกัน โดยแต่ละเส้นทำมุม 45 องศากับแกนของเพลลา เกจ 1 และ เกจ 3 ติดอยู่บนเกลียวขวาตรวจวัดความเครียดบวก เกจ 2 และ 4 ติดอยู่บนเกลียวซ้ายตรวจสอบความเครียดลบ



ภาพที่ 2.1 การติดแผ่นสเตรอนเกจ [3]



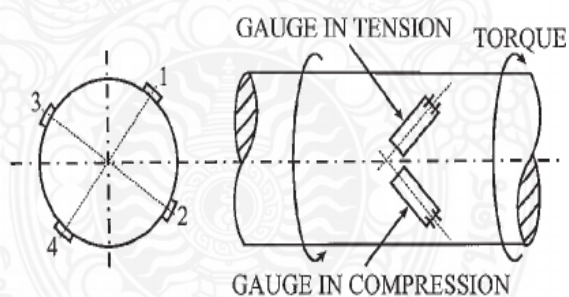
ภาพที่ 2.2 วงจรของแผ่นสเตรนเกจ [4]

ความเค้นเฉือนในเพลากลมสัมพันธ์กับแรงบิด  $T$  ที่กระทำต่อเพลากลมด้วยสมการ

$$T_{xz} = \frac{TD}{2J} = \frac{16T}{\pi D^3} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา

$J$  คือ โมเมนต์เชิงขั้วของความเฉื่อยของพื้นที่หน้าตัดวงกลมเท่ากับ  $\frac{\pi D^4}{32}$



ภาพที่ 2.3 จำลองการเคลื่อนของแผ่นสเตรนเกจ [5]

เมื่อเพลากลมอยู่ภายใต้การกระทำของแรงบิดเพียงอย่างเดียวความเค้นตั้งฉาก (Normal stress)

$\sigma_x = \sigma_z = 0$  จะได้

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \tau_{xz} = \frac{\pi D^4}{32} \quad (2.3)$$

ความเครียดหลัก (Principal strain)  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  หาได้จากสมการและกฎของฮุก

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) = \frac{16T}{\pi D^3} \left( \frac{1+\nu}{E} \right) \quad (2.4)$$

การตอบสนองของสเตรนเกจเป็นไปตามสมการ

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = -\frac{\Delta R_4}{R_4} = \frac{16T}{\pi D^3} \left( \frac{1+\nu}{E} \right) S_g \quad (2.5)$$

เมื่อต่อเกจเข้ากับวีตส์โตนบริดจ์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต  $v_0$  และแรงบิดจะหาโดยแทนสมการ

$$v_0 = \frac{r}{(1+r)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) v_s \quad (2.6)$$

จะได้

$$v_0 = \frac{16T}{\pi D^3} \left( \frac{1+\nu}{E} \right) S_g v_s \quad (2.7)$$

หรือ

$$T = \frac{\pi D^3 E}{16(1+\nu) S_g v_s} v_0 = C v_0 \quad (2.8)$$

เมื่อ

$$C = \frac{\pi D^3 E}{16(1+\nu) S_g v_0} \quad (2.9)$$

ความไวของทอร์กเซลล์-วีตส์โตนบริดจ์ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเอาต์พุต  $v_0$  และจะหาแรงบิดโดยแทนสมการ

$$S = \frac{V_0}{T} = \frac{1}{C} = \frac{16(1+\nu) S_g v_s}{\pi D^3 E} \quad (2.10)$$

เรนจ์ของทอร์กเซลล์ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลลา (D) ซีดจำกัดสัดส่วน  $S_g$  ของวัสดุในการบิดสำหรับการประยุกต์ใช้งานแบบสถิตจะได้



$$T_{\max} = \frac{\pi D^3 S_{\tau}}{16} \quad (2.11)$$

อัตราส่วนแรงดันที่ทอร์กสูงสุด  $(V_0 / V_s)_{\max}$  จะเป็น

$$\left( \frac{V_0}{V_s} \right)_{\max} = \frac{S_{\tau} S_g (1 + \nu)}{E} \quad (2.12)$$

โดยทั่วไปค่า  $(V_0 / V_s)^*$  ของทอร์กเซลล์จะถูกกำหนดไว้ระหว่าง 4 และ 5 mV/V แรงบิด  $T$  ที่สอดคล้องกับแรงดันเอาต์พุต  $V_0$  ถูกกำหนดโดยสมการ

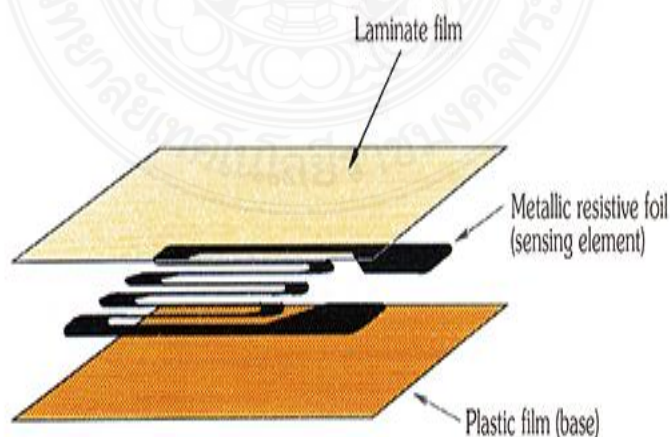
$$T = \frac{(V_0 / V_s)}{(V_0 / V_s)^*} T_{\max} \quad (2.13)$$

## 2.4 สเตรนเกจ (Strain gauge) [6]

สเตรนเกจเป็นเซ็นเซอร์ที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดมิติ หรือความเครียดในเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงภายนอกที่มากระทำด้วยการให้กำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้า โดยสเตรนเกจถูกนำมาใช้ในงานทางวิศวกรรมหลากหลายสาขาเช่น เครื่องจักรกล ยานยนต์ ไฟฟ้า โยธา ก่อสร้าง เคมี และการแพทย์

### 2.4.1 โครงสร้างของสเตรนเกจ

สเตรนเกจมีอยู่หลายประเภท แต่แบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีโครงสร้างเป็นแถบของขดลวดตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่ทำจากโลหะแผ่นบาง (มีความหนาประมาณ 3 ถึง 6 ไมโครเมตร) ซึ่งยึดติดอยู่บนฐานที่เป็นแผ่นฟิล์มพลาสติก (มีความหนาประมาณ 15 ถึง 16 ไมโครเมตร) แล้วถูกเคลือบด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ด้านบน



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างสเตรนเกจ [6]

### 2.4.2 หลักการทำงานของสเตรนเกจ

สเตรนเกจถูกยึดเข้ากับวัตถุที่ต้องการวัดความเครียดอย่างแน่นหนาจึงทำให้ตัวรับสัญญาณ (ตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่ทำจากโลหะแผ่นบาง) จะยืดหรือหดตัวตามความเครียดของวัตถุที่ต้องการวัดค่า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะส่วนใหญ่จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตัวโลหะมีการยืดหรือหดตัวทางกล สเตรนเกจใช้หลักการนี้ในการวัดค่าความเครียดผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยทั่วไปตัวรับสัญญาณของสเตรนเกจทำจากโลหะผสมแผ่นบางที่เป็นส่วนผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล โลหะผสมแผ่นบางนี้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าต่อความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นที่มีค่าคงที่แน่นอนค่าหนึ่งกำหนดความสัมพันธ์หลักดังนี้

$$\Delta R / R = K_s \cdot \epsilon \quad (2.14)$$

เมื่อ  $R$  คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าเดิมของสเตรนเกจ (โอห์ม)

$\Delta R$  คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสเตรนเกจมีการยืดหรือหดตัว (โอห์ม)

$K_s$  คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ หรือ เกจแฟกเตอร์

$\epsilon$  คือ ความเครียด

เกจแฟกเตอร์  $K_s$  จะมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะ ซึ่งโลหะผสมระหว่างทองแดงกับ นิกเกิลมีค่าเกจแฟกเตอร์ประมาณ 2 ดังนั้นสเตรนเกจที่ใช้โลหะผสมชนิดนี้เป็นตัวรับสัญญาณสามารถใช้ค่าคงที่นี้ในการแปลงค่าความเครียดทางกลเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากความเครียดเป็นปรากฏการณ์ที่มีขนาดเล็กมากๆ จนไม่สามารถมองเห็นได้ จึงทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความเครียดมีค่าน้อยมาก ๆ ด้วยเช่นกัน ตัวอย่าง คำนวณความต้านทานทางไฟฟ้าของสเตรนเกจที่เปลี่ยนแปลงไปจากความเครียดขนาด 1,000 ไมโครเมตรต่อเมตร โดยทั่วไปความต้านทานทางไฟฟ้าของสเตรนเกจมีค่าเท่ากับ 120 โอห์ม

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad \Delta R / R &= K_s \cdot \epsilon \\ \Delta R &= R \cdot K_s \cdot \epsilon \\ &= 120 \cdot 2 \cdot \frac{1,000}{1,000,000} \\ &= 0.24 \Omega \end{aligned}$$

เมื่อ  $R = 120$  โอห์ม,  $K_s = 2$ ,  $\epsilon = 1,000 \mu\text{m}$  และ  $m = 1,000/1,000,000$

อัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้า

$$\Delta R / R = 0.24 / 120 = 0.002 = 0.2\%$$

ในความเป็นจริงแล้วการเปลี่ยนแปลงนี้ยากมากที่จะทำการวัดค่าได้อย่างถูกต้อง และไม่สามารถวัดค่าได้ด้วยเครื่องมือวัดความต้านทานทางไฟฟ้าทั่วไป ด้วยเหตุนี้การวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าจึงต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางที่เรียกว่าสเตรนแอมพลิฟายเออร์ และวงจรไฟฟ้าที่เรียกว่าวิทส์โตนบริดจ์

## 2.5 วงจรวิทส์โตน [7]

วิทส์โตน บริดจ์เป็นวงจรไฟฟ้าเหมาะสมสำหรับการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของสเตรนเกจ โดยบริดจ์ประกอบด้วยความต้านทานจำนวน 4 ตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.5 และ 2.6

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad (2.15)$$

หรือ 
$$R_1 \times R_3 = R_2 \times R_4 \quad (2.16)$$

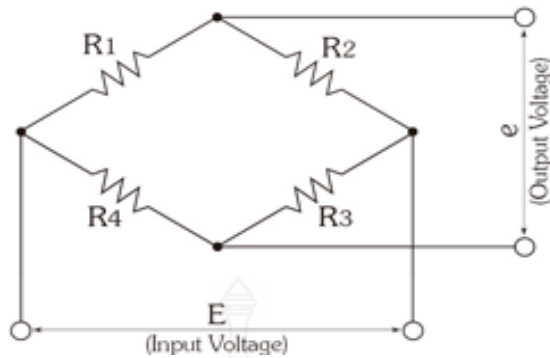
เมื่อทำการป้อนความต่างศักย์ให้ด้านอินพุตแล้ว ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุต  $e$  จะมีค่าเป็นศูนย์ สถานะนี้เรียกว่าวงจรบริดจ์สมดุล เมื่อวงจรบริดจ์เสียสมดุลจากการสูญเสียสภาพตามเงื่อนไขข้างต้นแล้ว ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุตที่วงจรจ่ายออกมาจะสัมพันธ์กับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของสเตรนเกจจนนำมาต่อเข้ากับวงจรแทนที่  $R_1$  เมื่อสเตรนเกจได้รับความเครียดแล้ว ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไป  $\Delta R$  ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุต  $e$  จะมีค่าดังนี้

$$e = \frac{1}{4} \times \Delta R / R \times E \quad (2.17)$$

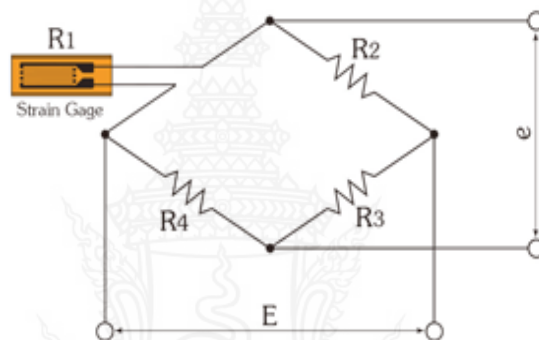
$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \times \varepsilon \quad (2.18)$$

ดังนั้น 
$$\Delta \varepsilon_1 = \sigma_b / \Sigma \quad (2.19)$$

เนื่องจากเราทราบค่าตัวแปรทุกตัวยกเว้น  $\varepsilon$  ดังนั้น ความเครียด  $\varepsilon$  สามารถทราบค่าได้โดยการวัดความต่างศักย์ด้านเอาต์พุตของวงจรบริดจ์



ภาพที่ 2.5 วงจรบริดจ์ [7]

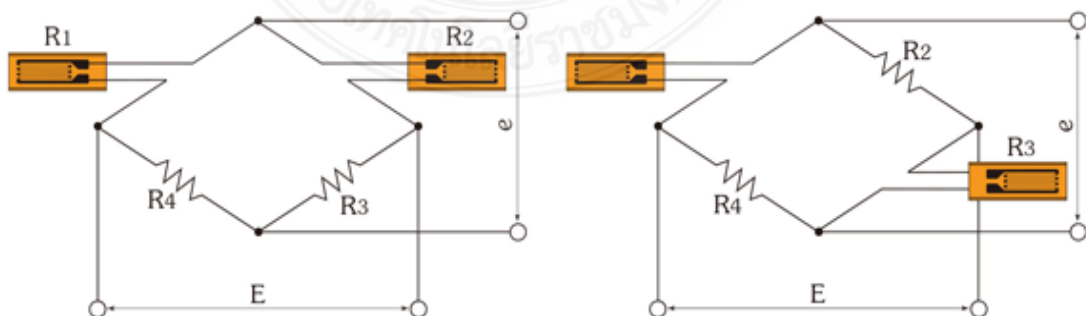


ภาพที่ 2.6 วงจรแบบควอเตอร์บริดจ์ [7]

### 2.5.1 โครงสร้างของบริดจ์

โครงสร้างที่อธิบายด้านบนเรียกว่าวงจรแบบควอเตอร์บริดจ์ เนื่องจากมีตัวต้านทานไฟฟ้า 1 ใน 4 ตัวของวงจรเป็นสเตรนเกจ นอกจากวงจรแบบควอเตอร์บริดจ์แล้ว ยังมีวงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์ และฟูลบริดจ์อีกด้วย

ในวงจรแบบนี้ สเตรนเกจจะถูกต่อเข้ากับวงจรบริดจ์ด้วยวิธีการแบบใดแบบหนึ่งในสองแบบ ดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 วงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์ [7]

### 2.5.2 ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุตของวงจรแบบฟูลบริดจ์

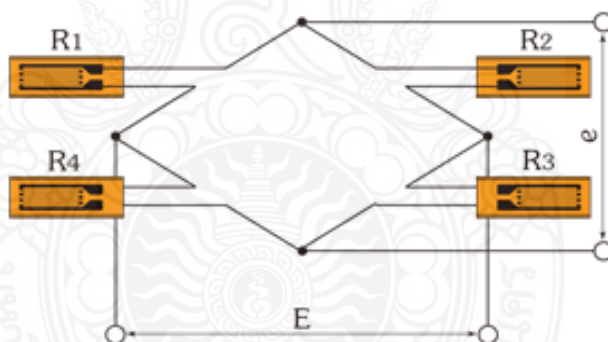
วงจรแบบฟูลบริดจ์มีสเตรนเกจต่ออยู่แทนที่ตัวต้านทั้ง 4 ตัวของวงจร วงจรแบบนี้ไม่นิยมนำมาใช้สำหรับการวัดความเครียด แต่ถูกใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดที่สร้างขึ้นจากสเตรนเกจเมื่อสเตรนเกจทั้ง 4 ตัว มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปเป็น

$R_1 + \Delta R_1$ ,  $R_2 + \Delta R_2$ ,  $R_3 + \Delta R_3$  และ  $R_4 + \Delta R_4$  ตามลำดับความต่างศักย์ด้านเอาต์พุต  $e$  คือ

$$e = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \cdot E \quad (2.20)$$

ถ้าสเตรนเกจทั้ง 4 ตัวมีคุณสมบัติเหมือนกันรวมทั้งค่าเกจแฟกเตอร์  $K_s$  ด้วย และความเครียดที่สเตรนเกจแต่ละตัวได้รับคือ  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  และ  $\varepsilon_4$  ตามลำดับแล้ว สมการด้านบนจะกลายเป็น

$$e = \frac{1}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \cdot E \quad (2.21)$$



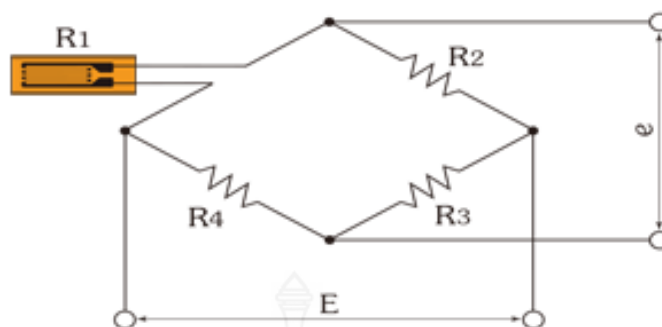
ภาพที่ 2.8 วงจรแบบฟูลบริดจ์ [7]

### 2.5.3 ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุตของวงจรแบบควอเตอร์บริดจ์

จากสมการของเอาต์พุตของวงจรแบบฟูลบริดจ์ กรณีของวงจรแบบควอเตอร์บริดจ์ซึ่งความต้านทาน  $R_1$  ตัวเดียวเท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นความต่างศักย์ด้านเอาต์พุต คือ

$$e = \frac{1}{4} \times \frac{\Delta R_1}{R_1} \times E \quad (2.22)$$

$$e = \frac{1}{4} \times \varepsilon_1 \times E \quad (2.23)$$



ภาพที่ 2.9 วงจรแบบควอเตอร์เตอร์บริดจ์ [7]

#### 2.5.4 ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุตของวงจรแบบฮาล์ฟบริดจ์

วงจรแบบนี้มีตัวต้านทานไฟฟ้า 2 ใน 4 ตัวของวงจรเป็นสเตรนเกจ ซึ่งค่าความต้านทานไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนแปลงได้ ดังวงจรที่แสดงในรูป 2.10 (a)

ให้ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุตคือ

$$e = \frac{1}{4} \times \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) \times E \quad (2.24)$$

หรือ

$$e = \frac{1}{4} \times K_s \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \times E \quad (2.25)$$

ในกรณีของรูป 2.9 (b)

$$e = \frac{1}{4} \times \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_3}{R_3} \right) \times E \quad (2.26)$$

$$e = \frac{1}{4} \times K_s \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \times E \quad (2.27)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเครียดที่เกิดขึ้นในสเตรนเกจตัวที่สองจะถูกนำไปหักล้างหรือบวกเพิ่มเข้าไปในความเครียดที่เกิดขึ้นในสเตรนเกจตัวแรก ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสเตรนเกจตัวที่สองว่าติดตั้งในวงจรในตำแหน่งที่อยู่ติดกัน หรือตรงกันข้ามกับสเตรนเกจตัวแรก

## 2.6 ทฤษฎีการออกแบบ [8]

พื้นฐานการออกแบบผู้ออกแบบควรมีพื้นฐานความรู้ความสามารถทางด้านความแข็งแรงของวัสดุ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักรกลว่าสามารถรับแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้มากน้อยเพียงใด นอกจากนี้ผู้ออกแบบควรมีความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัสดุวิศวกรรมที่ใช้กับเครื่องจักรกล รวมทั้งกรรมวิธีการผลิตต่าง ๆ หลักเศรษฐศาสตร์ของวิธีการผลิตและการแข่งขัน

ทางด้านราคาเพราะผู้ออกแบบมีหน้าที่ในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลให้มีราคาประหยัด เนื่องจากมีการแข่งขันกันทางด้านของราคา สมรรถนะของเครื่องจักร ความสวยงามบางประการและต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการใช้งาน เพื่อเป็นสิ่งดึงดูดใจของผู้ใช้งาน

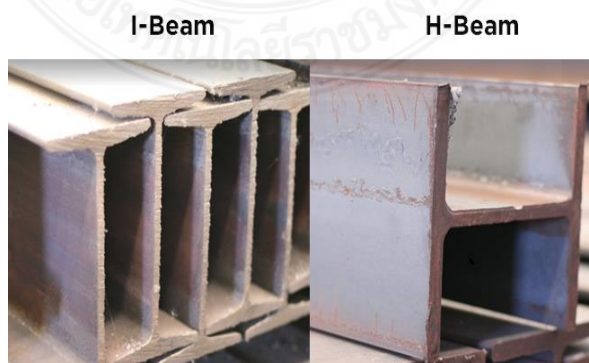
### 2.6.1 เหล็กโครงสร้าง [9]

เหล็ก เป็นวัสดุอุตสาหกรรมที่มีการนำมาใช้ในวงการอุตสาหกรรมและงานก่อสร้างอย่างแพร่หลายปัจจุบันเหล็กรูปพรรณประเภทต่าง ๆ ได้เข้ามามีบทบาทในการนำมาเป็นวัสดุสำหรับการสร้างเป็นเครื่องจักรกลเป็นจำนวนมาก และมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรม และวงการก่อสร้างของประเทศไทยให้ก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว โดยเหล็กสามารถแบ่งตามกระบวนการผลิตได้เป็น 2 ประเภทหลัก คือ

1) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดเย็น (Cold formed structural steel) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดเย็น เกิดจากการพับขึ้นรูปในขณะที่อยู่ในอุณหภูมิปกติโดยใช้เหล็กแผ่นรีดร้อน หรือเหล็กแผ่นชุบสังกะสีเป็นวัตถุดิบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน โดยมีความต้องการการต้านทาน การกัดกร่อน (Corrosion resistant) มากหรือน้อยเพียงใด ส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นโครงสร้างเสา คาน และอื่นๆ ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ได้แก่ เหล็กตัว C และเหล็กโครงสร้างรูปพรรณกลวงประเภทท่อเหล็กได้แก่ ท่อเหล็กกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้า และสี่เหลี่ยมจัตุรัส เป็นต้น

2) เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน (Hot rolled structural steel) เหล็กรูปพรรณรีดร้อนมีทั้งขนาดใหญ่ และขนาดเล็ก โดยเหล็กประเภทนี้ เกิดจากการหลอม และหล่อขึ้นรูป เป็นเหล็กแท่งในขั้นต้นแล้ว จึงให้ความร้อนเพื่อทำการรีด เพื่อลดขนาดและขึ้นรูปอีกครั้ง ผลิตภัณฑ์ประเภทนี้ได้แก่ เหล็ก H-beam และเหล็ก I-beam เป็นต้น เหล็กประเภทนี้สามารถต้านทานการตัดโค้ง (Bending) และการบิด (Twisting) ได้ดี จึงใช้เป็นเสา (Columns) และคาน (Beams)

เหล็กไอบีม (I-beam) คือ เหล็กรูปพรรณรีดร้อน (Hot-rolled structural steel) ที่เกิดจากการหลอมและหล่อเป็นเหล็กแท่ง แล้วรีดในขณะที่เหล็กยังร้อนให้มีหน้าตัดเป็นรูปตัวอักษรภาษาอังกฤษ “I” ตามการเรียกชื่อรูปแบบของหน้าตัดจะคล้ายกับเหล็กเอชบีม (H-beam) แต่ระยะของปีก (Flange) ทั้งบน และล่างจะสอบลงจากเอว (Web) และจนถึงปลายปีกซึ่งมีการปาดมุมโค้งอีกเล็กน้อย เหล็กไอบีมจะนิยมนำไปทำเป็นรางเครน (Crane girder) ที่ไว้ใช้ยกของที่มีน้ำหนักมาก โดยเหล็กไอบีมจะมีความหนาของเหล็ก และน้ำหนักมาก จึงส่งผลให้มีความแข็งแรงและสามารถรับแรงกระแทกได้



ภาพที่ 2.10 ความแตกต่างระหว่างเหล็ก I-beam และ H-beam [10]

### 2.6.2 แรงที่กระทำต่อโครงสร้าง [11]

แรงที่กระทำต่อโครงสร้างโดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 ชนิด คือ

1) แรงกระทำ (Active Force) หมายถึง น้ำหนักของโครงสร้างเอง หรือน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนโครงสร้าง ซึ่งน้ำหนักบรรทุกที่กระทำบนโครงสร้างยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ น้ำหนักบรรทุกแบบตายตัว (Dead load) เช่น น้ำหนักของพื้น คาน เสา ของโครงสร้างคอนกรีต โครงหลังคาเหล็ก เป็นต้น และน้ำหนักบรรทุกจร (Live load) เช่น น้ำหนักของคนที่ใช้อาคาร โต๊ะ ตู้ ที่วางบนอาคาร และแรงลม เป็นต้น

2) แรงปฏิกิริยา (Reaction) เป็นแรงต้านแรงกระทำซึ่งเกิดบริเวณฐานรองรับของโครงสร้าง เพื่อให้เกิดการสมดุลในโครงสร้างขึ้น การวิเคราะห์หาค่าแรงปฏิกิริยาเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เพราะค่าแรงปฏิกิริยาจะเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์หาค่าแรงอื่นๆ ซึ่งแรงปฏิกิริยาจะกระทำในแนวตั้งฉาก และแนวขนานกับฐานรองรับ นอกจากนี้แล้วยังมีโมเมนต์ดัดอีกหนึ่งตัวที่เกิดขึ้นคล้ายกับแรงปฏิกิริยา โดยโมเมนต์ดัดจะต้านทานต่อการหมุน หรือการดัดโค้งของโครงสร้าง อันเนื่องมาจากแรงกระทำที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง การคำนวณออกแบบส่วนของโครงสร้างนั้นผู้ออกแบบต้องศึกษารายละเอียดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งขั้นตอนการคำนวณ เพื่อให้สามารถวิเคราะห์หาค่าแรง ปฏิกิริยาได้อย่างถูกต้อง

การคำนวณหาค่าแรงปฏิกิริยาของโครงสร้างในที่นี่จะกล่าวถึง การหาแรงปฏิกิริยาในโครงสร้างแบบง่าย หรือแบบดีเทอร์มิเนท โดยมีน้ำหนักกระทำบนโครงสร้างในลักษณะต่าง ๆ I-beam H-beam ได้แก่ น้ำหนักกระทำเป็นจุด (Point load) น้ำหนักแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอ (Uniformly distributed load) น้ำหนักแผ่กระจายอย่างสม่ำเสมอในทางเพิ่มขึ้น

### 2.6.3 สมการสมดุล (Equilibrium equations) [11]

ในทางสถิตยศาสตร์ การสมดุล (Equilibrium) หมายถึง สภาวะที่วัตถุหรือโครงสร้างอยู่นิ่งกับที่ไม่มีการเคลื่อนที่ใด ๆ เมื่อมีแรงมากระทำภายใต้สภาวะสมดุลนี้ ตามกฎข้อที่สามของนิวตันจะได้สมการสมดุล 3 สมการ ได้แก่

$$\sum F_x = 0 \quad (2.28)$$

ผลรวมทางพีชคณิตของแรงตามแนวนอนหรือแนวแกน x มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\sum F_y = 0 \quad (2.29)$$

ผลรวมทางพีชคณิตของแรงตามแนวตั้งหรือแนวแกน y มีค่าเท่ากับศูนย์

$$\sum M = 0 \quad (2.30)$$

ผลรวมทางพีชคณิตของโมเมนต์ของแรงรอบจุดใด ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์



#### 2.6.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับแรง

แรงในที่นี้ หมายถึง แรงปฏิกิริยาที่กระทำต่อวัตถุในรูปของแรงกด หรือแรงอัด ซึ่งสามารถหาได้โดยวิธีดังต่อไปนี้

$$F = mg \quad (2.31)$$

เมื่อ  $F$  คือ แรงกิริยา (N)

$m$  คือ มวลของชุดทดสอบ (kg)

$g$  คือ ความเร่งจากแรงดึงดูดโลก ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

#### 2.6.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับแรงบิด [12]

แรงที่กระทำต่อระยะทางจากจุดหมุนและทำให้เกิดการหมุนที่จุดหมุนเรียกว่า “ทอร์ก”

$$T = Fr \quad (2.32)$$

เมื่อ  $T$  คือ ทอร์ก มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )

$F$  คือ ขนาดของแรงในแนวตั้งฉาก มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

$r$  คือ ระยะห่างจากแนวแรงถึงจุดหมุน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

#### 2.6.6 โมเมนต์ (Moment) [11]

การที่มีแรงกระทำบนวัตถุแล้วทำให้วัตถุหมุนได้นั้น ผลของแรงที่ทำให้วัตถุหมุนรอบจุด ๆ หนึ่ง เรียกว่าโมเมนต์ของแรง ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของแรงกับระยะทางจากจุดหมุนตั้งฉากกับแนวแรง และมีหน่วยเป็นนิวตันเมตร ( $\text{N} \cdot \text{m}$ ) ส่วนจุดคงที่ที่วัตถุหมุนรอบ เรียกว่า จุดหมุนโมเมนต์ของแรงที่ทำให้วัตถุหมุนได้มี 2 ทิศทาง คือหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเรียกว่า โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา และหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เรียกว่า โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงกำหนดเครื่องหมายของโมเมนต์ โดยให้โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาเป็นบวก และโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกาเป็นลบ

$$M = F \times L \quad (2.33)$$

เมื่อ  $M$  คือ โมเมนต์ของแรง มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )

$F$  คือ ขนาดของแรงในแนวตั้งฉาก มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

$L$  คือ ระยะห่างจากแนวแรงถึงจุดหมุน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

หลักการของโมเมนต์ ถ้ามีแรงหลายแรงกระทำต่อวัตถุชิ้นหนึ่งแล้วทำให้วัตถุนั้นอยู่ในภาวะสมดุล จะได้ว่า ผลรวมของโมเมนต์รอบจุดใด ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ หรืออาจกล่าวได้ว่าผลรวมของโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกามีค่าเท่ากับผลรวมของโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา จะได้ว่า

ผลรวมของโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา = ผลรวมของโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา

$$M_{\text{ทวน}} = M_{\text{ตาม}} \quad (2.34)$$

$$F_1 \times L_1 = F_2 \times L_2 \quad (2.35)$$

การพิจารณาถึงความแข็งแรงของชิ้นส่วนที่ประกอบเป็นโครงสร้างจะเห็นได้ชัดเจน เมื่อพิจารณาถึงรูปลักษณะพื้นที่หน้าตัดของคาน ถ้ากรณีพื้นที่หน้าตัดมีขนาดต่างกัน ย่อมทำให้ความแข็งแรง หรือความสามารถในการรับน้ำหนักแตกต่างกัน และเมื่อมีการกระจายอย่างต่อเนื่องกระทำต่อพื้นที่หน้าตัด จะทำให้ความเค้นของแรงเป็นสัดส่วนกับระยะทาง จากแนวแรงถึงแกนของโมเมนต์สมบัติของพื้นที่หน้าตัดที่มีผลต่อการกระจายของแรงดังกล่าวนี้ เรียกว่า โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่ (Area Moment of Inertia)

#### 2.6.7 คาน (Beam) [8]

ชิ้นส่วนเครื่องจักรกลจำนวนมากรับแรงในแนวตั้งลักษณะเช่นเดียวกับคานทั่วไป ฉะนั้นจึงใช้ความเค้นดัด (Bending stress) และการยุบตัว (Deflection) เป็นข้อจำกัดในการออกแบบความเค้นดัดสูงสุดเกิดขึ้นที่ผิวนอกสุดของคาน ณ ตำแหน่งที่โมเมนต์ดัด (Bending Moment) มีค่าสูงสุดซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I} \quad (2.36)$$

โดย  $\sigma_b$  คือ ความเค้นดัด

M คือ โมเมนต์ดัด

C คือ ระยะจากแกนสะเทินไปยังผิวนอกสุด

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่

#### 2.6.8 แรงเฉือนและโมเมนต์ดัด [13]

ในการคำนวณหาค่าแรงเฉือนและโมเมนต์ดัด โดยทั่วไปจะใช้สมการสมดุล คือ  $\Sigma F_y = 0$  ใช้สำหรับหาค่าแรงเฉือน และ  $\Sigma M = 0$  ใช้สำหรับหาค่าโมเมนต์ดัด ซึ่งจะพิจารณาจุดที่ตัดเสมอ และการพิจารณาสัดส่วนของคาน เพื่อสร้างสมการของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดนั้น จะตัดเป็นช่วง ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำ ซึ่งสมการที่สร้างขึ้นมาใช้เฉพาะช่วงที่พิจารณานั้น ๆ

การเขียนแผนภาพของแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด ในการวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างจำเป็นจะต้องทราบค่าแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น และเปลี่ยนแปลงไป ณ หน้าตัดต่างๆ ตลอดความยาวของโครงสร้างนั้นๆ ซึ่งการแสดงค่าของแรงเฉือนและโมเมนต์ดัดด้วยแผนภาพ จะช่วยให้มองเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

แผนภาพของแรงเฉือน (Shearing Force Diagram, S.F.D.) คือ แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือน ณ หน้าตัดต่าง ๆ กับความยาวขององค์อาคาร

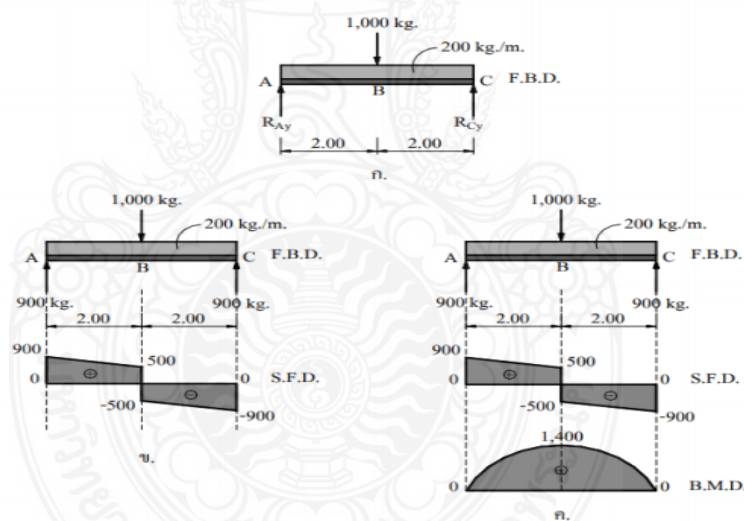
แผนภาพของโมเมนต์ดัด (Bending Moment Diagram, B.M.D.) คือแผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโมเมนต์ดัด ณ หน้าตัด ต่าง ๆ กับความยาวขององค์อาคาร

ขั้นตอนการเขียนแผนภาพแรงเฉือน และโมเมนต์ดัด ก่อนที่จะทำการเขียนแผนภาพแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดจะต้องคำนวณหาค่าแรงปฏิกิริยาให้เรียบร้อยก่อน เสร็จแล้วจึงคำนวณหา ค่าแรงเฉือน และโมเมนต์ดัดโดยการสร้างสมการเป็นช่วง ๆ

1) เขียนแผนภาพอิสระของแรง (Free Body Diagram, F.B.D.) จะยกโจทย์มาเขียน โดยไม่ต้องใส่สัญลักษณ์ของฐานรองรับ แต่ให้ใส่แรงปฏิกิริยาที่คำนวณได้ลงไปแทน

2) เขียนแผนภาพของแรงเฉือน (Shearing Force Diagram, S.F.D.) ถัดลงไปจาก F.B.D. โดยเริ่มพิจารณาจากจุดซ้ายมือสุดนำค่าแรงเฉือนที่คำนวณได้มาเขียนตามแกนคาน โดยค่าแรงเฉือนที่เป็นบวกจะเขียนเหนือแกนคาน ส่วนค่าแรงเฉือนที่เป็นลบจะเขียนใต้แกนคาน

เมื่อเชื่อมจุดต่าง ๆ ที่เขียนด้วยเส้นตรงหรือเส้นโค้งตามสมการของแรงเฉือนจะได้ แผนภาพของแรงเฉือนตามต้องการ



ภาพที่ 2.11 ขั้นตอนการเขียนแผนภาพ F.B.D., S.F.D., B.M.D. [13]

#### 2.6.9 Loss Function [14]

คือการคำนวณความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้จากทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลการทดลอง จะนำไปหาค่าเฉลี่ย เพื่อที่จะนำมาหา Gradient ของ Loss ขึ้นกับ Weight ต่าง ๆ สำหรับสมการการถดถอยจะมีวิธีการที่นิยมใช้ทั้งหมด 3 วิธี

1) Mean absolute error หรือ Least absolute deviations (MAE หรือ L1 Loss) การคำนวณ Error ของผลลัพธ์ในการทดลอง ( $y_i$ ) กับผลลัพธ์ในการคำนวณ ( $\hat{y}_i$ ) ด้วยการนำมาลบกันแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยไม่สนใจเครื่องหมาย (Absolute) เพื่อหาขนาดของ Error โดยไม่สนใจทิศทาง

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (2.37)$$

2) Mean squared error หรือ Least square errors (MSE หรือ L2 Loss) การคำนวณ Error ของผลลัพธ์ในการทดลอง ( $y_i$ ) กับผลลัพธ์ในการคำนวณ ( $\hat{y}_i$ ) ด้วยการนำมาลบกันแล้วยกกำลังสอง (Squared) เพื่อไม่ต้องสนใจค่าติดลบแล้วหาค่าเฉลี่ย

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.38)$$

3) Root mean squared error หรือ Root mean squared deviation (RMSE หรือ RMSD) การนำ MSE มาหารากที่สอง (Squared Root) ช่วยให้กลับมาเป็นสเกลเดิมทำให้ตีความได้ง่ายขึ้น

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2.39)$$

### บทที่ 3

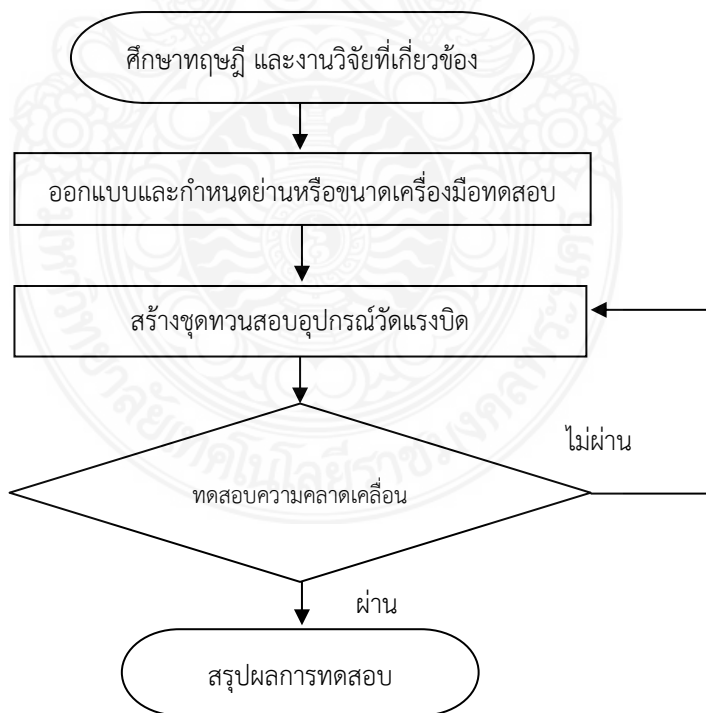
#### วิธีดำเนินการวิจัย

##### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์งานวิจัยในครั้งนี้ จำเป็นต้องมีการศึกษาข้อมูลต่างๆ และออกแบบการทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานเครื่องสอบเทียบ
- 2) ออกแบบและกำหนดย่านหรือขนาดเครื่องมือทดสอบ
- 3) สร้างชุดทวนสอบอุปกรณ์วัดแรงบิด
- 4) ทดสอบความคลาดเคลื่อน
- 5) สรุปผลการดำเนินงาน

จากขั้นตอนการดำเนินงานดังกล่าวสามารถแสดงดังภาพที่ 3.1

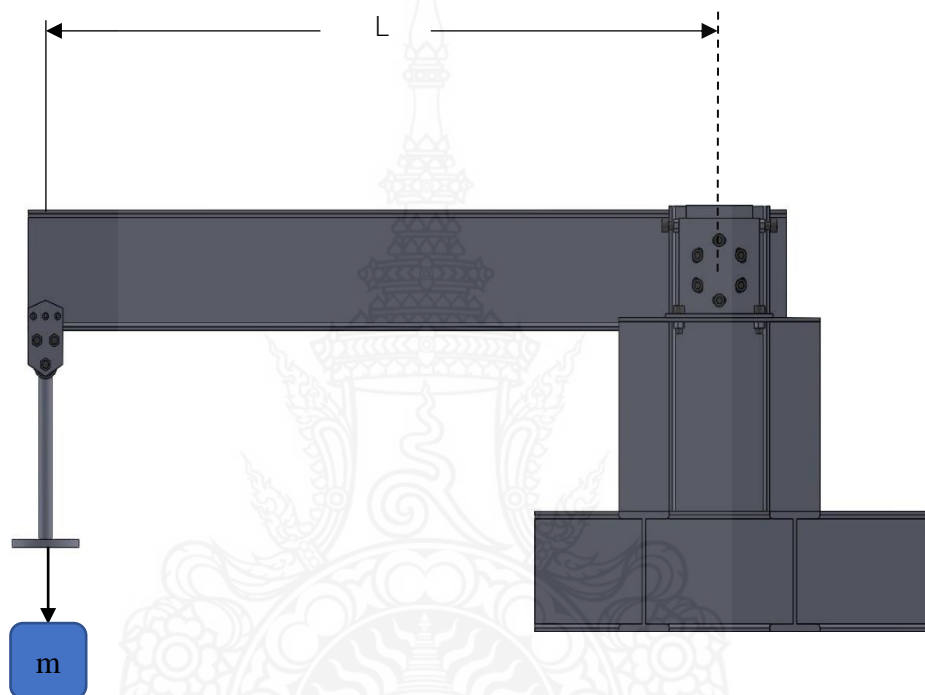


ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

## 3.2 การออกแบบและคำนวณโครงสร้าง

### 3.2.1 การออกแบบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด

การออกแบบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด ได้คำนึงถึงวัตถุประสงค์ของโครงการฯ โดยมีการออกแบบคานรับมวลให้มีความยาว (L) 1,000 มิลลิเมตร เพื่อให้สัมพันธ์กับทอร์กทรานสดิวเซอร์ตามขอบเขตของโครงการที่กำหนดไว้ และเลือกติดตั้งทอร์กทรานสดิวเซอร์ไว้ด้านหน้า เพื่อให้สัมพันธ์กับลักษณะการทำงานของเพลลาจากการแขวนมวล ดังภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การออกแบบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด

### 3.2.2 การคำนวณโครงสร้าง

#### 1) การคำนวณหาค่าแรงบิดที่ใช้ในการออกแบบ

จากการคำนวณชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์ สามารถวัดแรงบิดสูงสุดได้เพียง 880.00 นิวตันเมตร เท่านั้นเนื่องตัวอุปกรณ์ได้รับแรงบิดที่เกิดจากคานมาด้วย ในการคำนวณได้แบ่งค่าแรงบิดทั้ง 5 ช่วง คือ 1.00 นิวตันเมตร, 220.75 นิวตันเมตร, 440.50 นิวตันเมตร, 660.25 นิวตันเมตร และ 880.00 นิวตันเมตร นำมาคำนวณหาขนาดตึมน้ำหนักและความยาวที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการออกแบบและทดลองซึ่งสามารถคำนวณหาได้ดังนี้ จากสมการที่ (2.32)

$$T = F \times L$$

แทนสมการที่ (2.31) ลงในสมการ (2.32) จะได้

$$T = m \times g \times L$$

หามวลที่ทำให้เกิดแรงบิดขนาด 880.00 นิวตันเมตร ที่ความยาว 990.00 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} T &= m \times g \times L \\ (880.00\text{N}\cdot\text{m}) &= m \times (9.80665\text{m/s}^2) \times (990.00 \times 10^3 \text{mm}) \\ m &= 90.64\text{kg} \end{aligned}$$

หามวลที่ทำให้เกิดแรงบิดขนาด 660.25 นิวตันเมตร ที่ความยาว 960.00 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} T &= m \times g \times L \\ (660.25\text{N}\cdot\text{m}) &= m \times (9.80665\text{m/s}^2) \times (960.00 \times 10^3 \text{mm}) \\ m &= 70.13\text{kg} \end{aligned}$$

หามวลที่ทำให้เกิดแรงบิดขนาด 440.50 นิวตันเมตร ที่ความยาว 890.00 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} T &= m \times g \times L \\ (440.50\text{N}\cdot\text{m}) &= m \times (9.80665\text{m/s}^2) \times (890.00 \times 10^3 \text{mm}) \\ m &= 50.47\text{kg} \end{aligned}$$

หามวลที่ทำให้เกิดแรงบิดขนาด 220.75 นิวตันเมตร ที่ความยาว 750.00 มิลลิเมตร

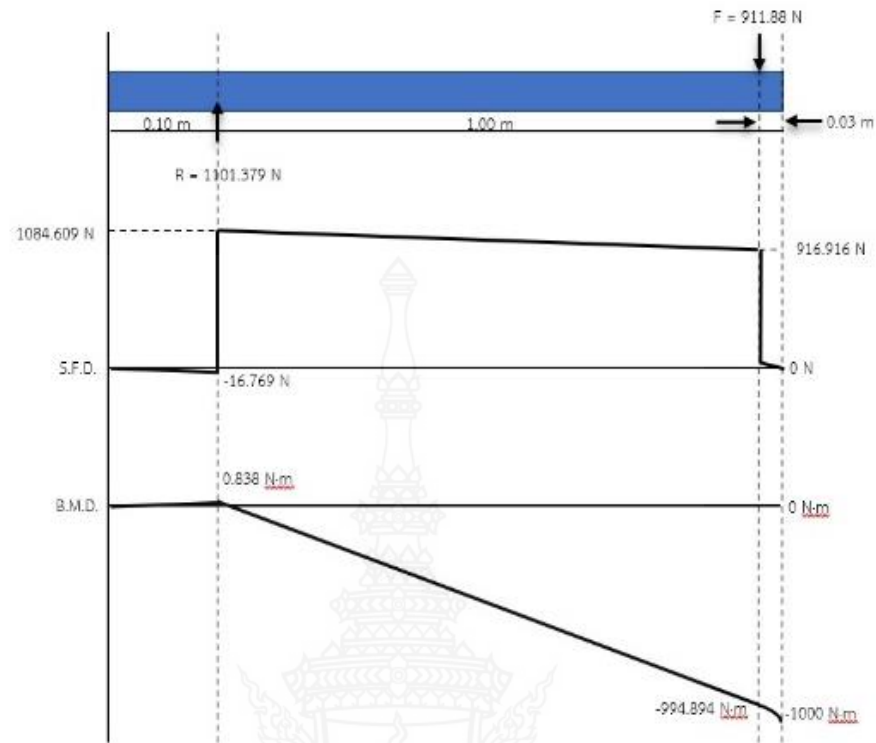
$$\begin{aligned} T &= m \times g \times L \\ (220.75\text{N}\cdot\text{m}) &= m \times (9.80665\text{m/s}^2) \times (750.00 \times 10^3 \text{mm}) \\ m &= 30.01\text{kg} \end{aligned}$$

หามวลที่ทำให้เกิดแรงบิดขนาด 1.00 นิวตันเมตร ที่ความยาว 1,000.00 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} T &= m \times g \times L \\ (1.00\text{N}\cdot\text{m}) &= m \times (9.80665\text{m/s}^2) \times (1,000.00 \times 10^3 \text{mm}) \\ m &= 0.10\text{kg} \end{aligned}$$

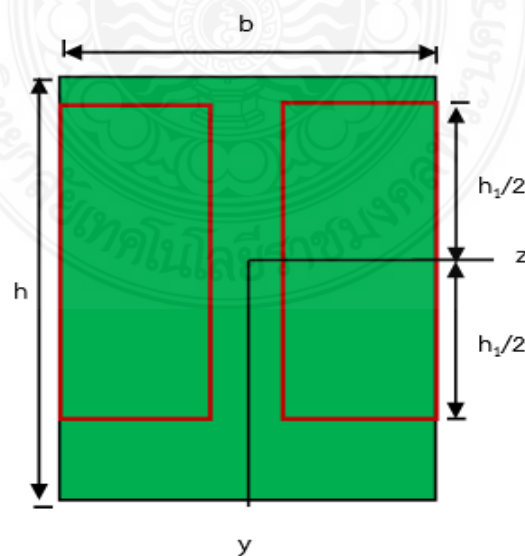
## 2) การเขียนแผนภาพของแรงเฉือนและโมเมนต์ตัด

จากขอบเขตโครงการ นำมาสู่การออกแบบโครงสร้างของเครื่องทดลองให้สามารถรับแรงบิดได้สูงสุดไม่เกิน 1,000 นิวตันเมตร โดยสามารถคำนวณหาโมเมนต์ตัดสูงสุด ดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 แผนภาพโมเมนต์ดัด

จากแผนภาพโมเมนต์ดัด (ภาพที่ 3.3) สามารถหาโมเมนต์ดัดสูงสุด  $M_{max}$  ได้จากแผนภาพ B.M.D. มีค่าเท่ากับ 1,000.00 นิวตันเมตร และระยะจากแกนสะเทินไปยังผิวนอกสุด  $y$  มีค่าเท่ากับ 75.00 มิลลิเมตร ซึ่งหน้าตัดของคานที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 150.00 x 75.00 ตารางมิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 พื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อย [11]



โดยโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่สามารถคำนวณค่าได้ดังนี้

$$I = \frac{bh^3}{12} - \frac{(b-t)h_1^3}{12}$$

$$I = \frac{(75)(150)^3}{12} - \frac{(75-5.5)131^3}{12}$$

$$= 8,073,556.3 \text{ mm}^4, 8.074 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

จากแผนภาพโมเมนต์ตัดสามารถคำนวณหาความเค้นดัดสูงสุดของคานาได้ดังสมการต่อไปนี้จะจากสมการที่ (2.35)

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

$$= \frac{1\text{kN} \cdot \text{m}(0.75\text{m})}{8.074 \times 10^{-6} \text{ m}^4}$$

$$\sigma = 92.890\text{MPa}$$

### 3.2.3 การเลือกอุปกรณ์ประกอบเครื่อง

#### 1) ทอร์คทรานสดิวเซอร์ [15]

จากขอบเขตการทดลองกำหนดแรงบิดไม่เกิน 1,000 นิวตันเมตร จึงเลือกใช้ทอร์คทรานสดิวเซอร์รุ่น TPS-A-1KNM เนื่องจากทอร์คทรานสดิวเซอร์รุ่นนี้สามารถรับแรงบิดได้ถึง 1,000 นิวตันเมตร และมีค่า Nonlinearity และ Hysteresis ไม่เกินร้อยละ 0.02 ค่า Safe-overloads อยู่ที่ร้อยละ 150 ซึ่งมีความละเอียดและความแข็งแรง เหมาะสมสำหรับการทดลองด้วยทอร์คทรานสดิวเซอร์ ตัวอย่าง ภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 ทอร์คทรานสดิวเซอร์ รุ่น TPS-A-1KNM [15]

## 2) จอแสดงผล [16]

เนื่องจากทอร์กทรานสดิวเซอร์มีแรงดันสัญญาณเอาต์พุตเป็น แบบ DC Voltage ดังนั้นการเลือกจอแสดงผลที่เหมาะสมกับทอร์กทรานสดิวเซอร์ จึงเลือกใช้ DC Voltmeters A6000 Serie ที่มีฟังก์ชันในการทำงานที่หลากหลาย ซึ่งสามารถรับค่าอินพุต แบบ DC Voltage และสามารถแสดงค่าที่ได้จากทอร์กทรานสดิวเซอร์มาเป็นค่าแรงบิดได้ จอแสดงผลนั้นมีค่า Nonlinearity ไม่เกินร้อยละ 3 ซึ่งเหมาะสมกับการทดลองนี้ ดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 จอแสดงผล รุ่น DC Voltmeters A6000 Serie [16]

## 3.3 การทวนสอบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์

การทวนสอบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์ เป็นการทดสอบเพื่อพิสูจน์ยืนยันว่าชุดทดสอบมีคุณลักษณะสอดคล้องกับคุณลักษณะตามต้องการ ซึ่งชุดทดสอบสามารถอ่านค่าแรงบิดได้สูงสุดอยู่ 880 นิวตันเมตร เนื่องจากทอร์กทรานสดิวเซอร์ได้รับมวลของคานทำให้ไม่สามารถอ่านค่าถึง 1,000 นิวตันเมตร ได้ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สภาวะการทวนสอบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์

การทวนสอบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์					
ช่วงที่	แรงบิด (N·m)	น้ำหนัก (kg)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะคานแขน น้ำหนัก (mm)	จำนวนการอ่านซ้ำ (n)
1	880.00 ( $T_{max}$ )	90.64	25	990	5
2	660.25	70.13		960	5
3	440.50	50.47		890	5
4	220.75	30.01		750	5
5	1.00 ( $T_{min}$ )	0.10		1000	5

## 1) เปิดเครื่องชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์

เริ่มทดสอบโดยการต่อกระแสไฟเข้าชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์ให้สามารถทำงานได้ ดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 การเปิดเครื่องทดสอบ

- 2) ปรับระยะจุดแขวนน้ำหนัก  
ปรับระยะจุดแขวนน้ำหนักตามขนาดความยาวที่ต้องการในการทดสอบ ดังภาพที่

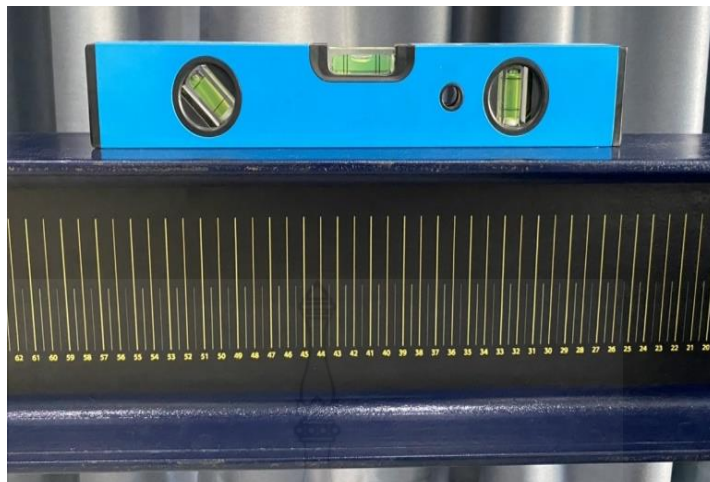
3.8



ภาพที่ 3.8 การปรับระยะจุดแขวนน้ำหนัก

- 3) ปรับระดับน้ำในแนวระนาบ

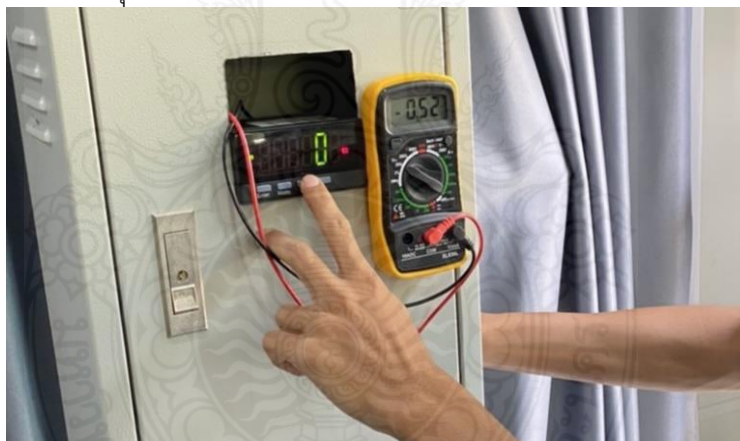
นำระดับน้ำวางบนคานของเครื่องทดสอบ ปรับระดับในแนวระนาบให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ ดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 การปรับระดับน้ำในแนวระนาบ

4) ตั้งศูนย์มาตรวัด

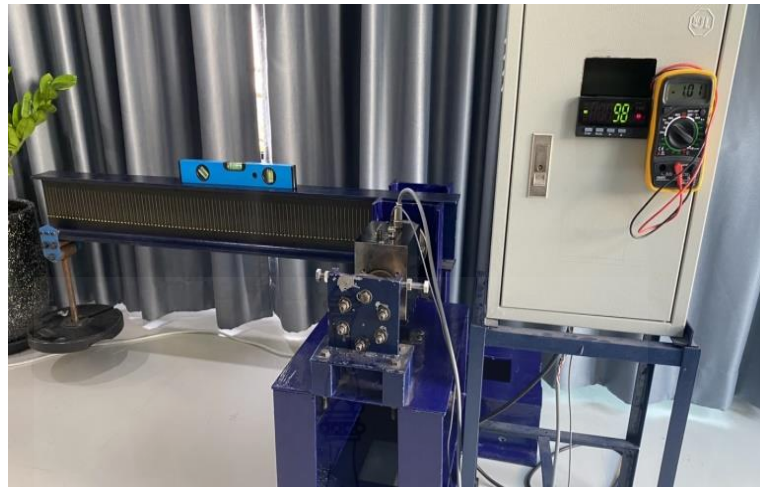
กดปุ่มเลื่อนไปทางขวา ค้างไว้ 3 วินาที ให้ค่าก่อนการเก็บข้อมูลเป็นศูนย์เพื่อให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 การตั้งศูนย์มาตรวัด

5) เริ่มทดลองและการอ่านค่าที่ทดลองได้

เริ่มทดลองวัดแรงบิดตามสถานะการทวนสอบของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์ ปรับขนาดความยาวของและปริมาณน้ำหนักของตุ้มน้ำหนักตามในสถานะที่กำหนดไว้ ดังภาพที่ 3.11



ภาพที่ 3.11 การทดสอบและอ่านค่าจริง

6) วัดกระแสไฟ โดยมัลติมิเตอร์

นำมัลติมิเตอร์มาวัดกระแสที่ขั้ว Input เพื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากเทอร์มิสเตอร์ ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 การวัดกระแสไฟโดยใช้มัลติมิเตอร์

7) บันทึกผลการทวนสอบ

บันทึกผลการทวนสอบตามสถานะการทวนสอบของชุดทดสอบเทอร์มิทรานสดิวเซอร์ ที่ได้ในแต่ละช่วงของแรงบิด ดังภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 การบันทึกผลการทดสอบ

### 3.4 การหาความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์

การหาความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์ จะแสดงให้เห็นถึงความเที่ยงตรงและค่าความแม่นยำของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์ โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงบิดที่ได้จากมาตรวัดกับค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ ให้ออกมาเป็นสมการเส้นตรงและ ค่าความแตกต่างของแรงบิดที่ได้ในแต่ละช่วง

ตารางที่ 3.2 สภาวะการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์

การทดลองหาความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์					
ช่วงการทดลอง	แรงบิด (N·m)	น้ำหนัก (kg)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะคานแขนน้ำหนัก(mm)	จำนวนการทดลองซ้ำ (n)
1	880.00 * <sub>1</sub>	90.64 * <sub>2</sub>	25	990	5
.	(แต่ละช่วงลดลงช่วงละ 8.79)	.	.	.	.
101	1.00	0.10	25	1,000	5

หมายเหตุ \*<sub>1</sub> การทดลองจะเริ่มการทดลองที่ แรงบิด 880.00 นิวตันเมตร จนถึง 1.00 นิวตันเมตร แบ่งออกเป็น 101 ช่วงการทดลองโดยจะลดลงช่วงละ 8.79 นิวตันเมตร

\*<sub>2</sub> การทดลองจะใช้น้ำหนักและระยะคานแขนน้ำหนัก ตามความเหมาะสม

- 1) การเปิดเครื่องชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์  
เริ่มทดสอบโดยการต่อกระแสไฟเข้าชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์ให้สามารถทำงาน  
ได้ ดังภาพที่ 3.14



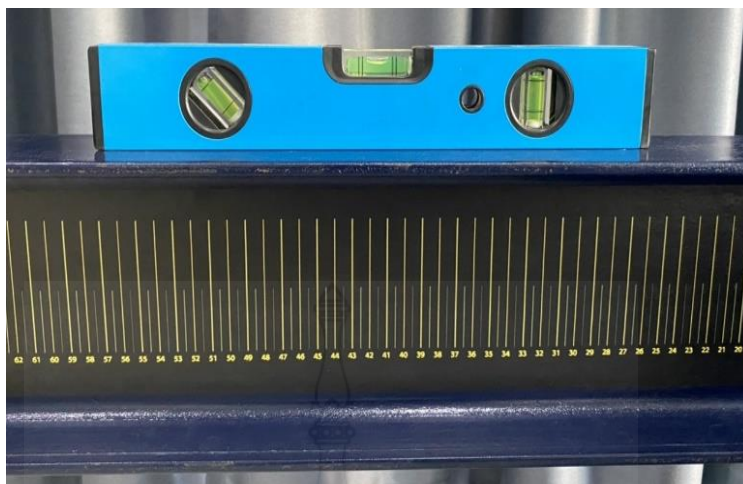
ภาพที่ 3.14 การเปิดเครื่องทดสอบ

- 2) ปรับระยะจุดแขวนน้ำหนัก  
ปรับระยะจุดแขวนน้ำหนักตามขนาดความยาวที่ต้องการในการทดลอง ดังภาพที่  
3.15



ภาพที่ 3.15 การปรับขนาดความยาวของจุดแขวนน้ำหนัก

- 3) ปรับระดับคานให้อยู่ในแนวระนาบ  
นำระดับน้ำวางบนคานของเครื่องทดสอบ ปรับระดับในแนวระนาบให้ค่าที่ได้มีความ  
แม่นยำและมีประสิทธิภาพ ดังภาพที่ 3.16



ภาพที่ 3.16 การปรับระดับน้ำในแนวระนาบ

4) ตั้งศูนย์มาตรแสดงผล

กดปุ่มเลื่อนไปทางขวา ค้างไว้ 3 วินาที ให้ค่าก่อนการเก็บข้อมูลเป็นศูนย์เพื่อให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังภาพที่ 3.17

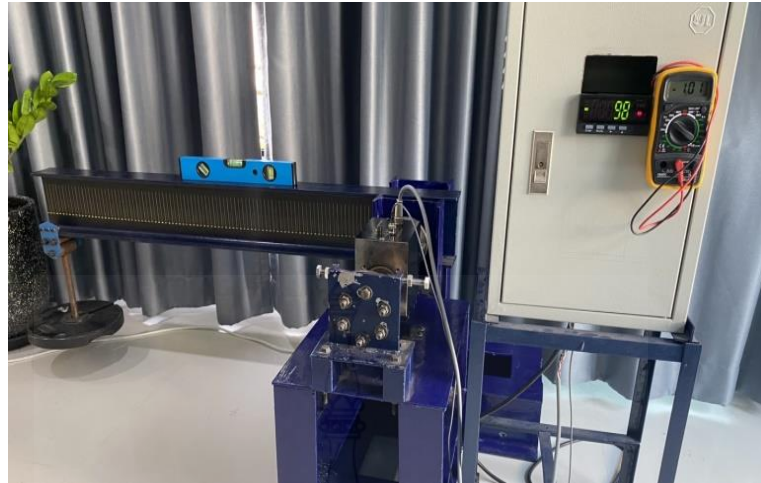


ภาพที่ 3.17 การตั้งศูนย์มาตรวัด

5) การเริ่มทดสอบ และการอ่านค่าที่ทดลองได้

เริ่มทดลองวัดแรงบิดตามสถานะการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์ ปรับขนาดความยาวของและปริมาณน้ำหนักของตุ้มน้ำหนักตามในสถานะที่กำหนดไว้ ดังภาพที่ 3.18





ภาพที่ 3.18 การทดสอบและอ่านค่าจริง

- 6) การวัดกระแสไฟ โดยมัลติมิเตอร์  
นำมัลติมิเตอร์มาวัดกระแสที่ขั้ว Input เพื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จาก  
เทอร์กเซลล์ ดังภาพที่ 3.19



ภาพที่ 3.19 การวัดกระแสไฟโดยใช้มัลติมิเตอร์

- 7) บันทึกผลการทดลอง  
บันทึกผลการทดลองตามสภาวะการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นและค่า  
ความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์ที่ได้ในแต่ละช่วงของแรงบิด ดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 การบันทึกผลการทดสอบ



## บทที่ 4

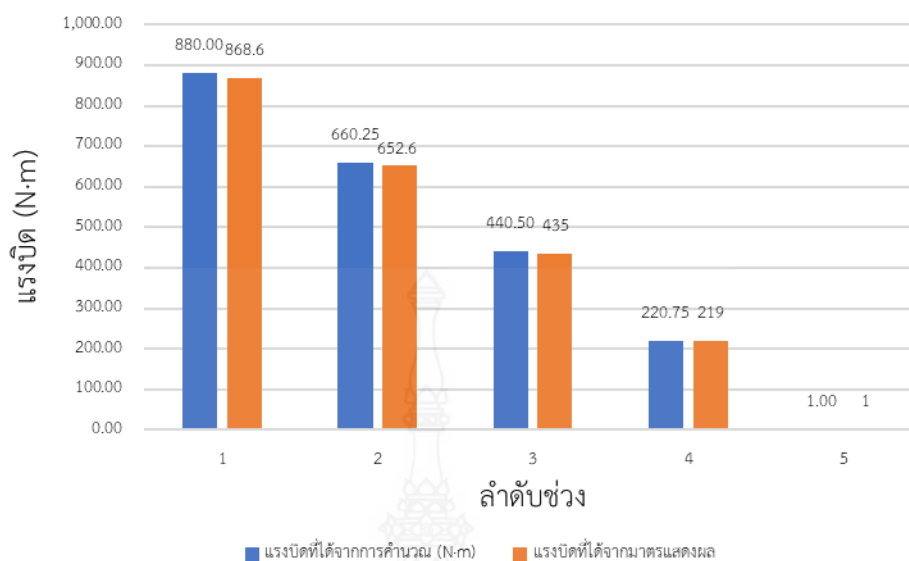
### ผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการทวนสอบของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์

ตารางที่ 4.1 ผลการทวนสอบของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์

การทวนสอบการอ่านค่าของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์						
ช่วงการทดลอง	แรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (N·m)	น้ำหนัก (kg)	ระยะแกนขนานน้ำหนัก (mm)	แรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผล (N·m)	ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (volt)	Error (%)
1	880.00 ( $T_{max}$ )	90.64	990	868.60	4.94	1.30
2	660.25	70.13	960	652.60	3.84	1.16
3	440.50	50.47	890	435.00	2.74	1.25
4	220.75	30.01	750	219.00	1.62	0.79
5	1.00 ( $T_{min}$ )	0.10	1,000	1.00	0.55	0.00

จากผลการทวนสอบ แรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผล (y) กับแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (x) โดยทวนสอบแรงบิดทั้งหมด 5 ช่วง ได้แก่ 1.00 นิวตันเมตร, 220.75 นิวตันเมตร, 440.50 นิวตันเมตร, 660.25 นิวตันเมตร และ 880.00 นิวตันเมตร ได้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างแรงบิดที่ได้จากการคำนวณและแรงบิดที่ได้จากการมาตรวัด มีค่าสูงสุดอยู่ที่ ร้อยละ 1.30 และ เฉลี่ยอยู่ที่ ร้อยละ 0.90 ดังภาพที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 ผลการทวนสอบชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์

#### 4.2 ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์

การทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์						
ช่วงการทดลอง	แรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (N·m)	น้ำหนัก (kg)	ระยะแกนแขนน้ำหนัก (mm)	ค่าแรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผล (N·m)	ค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (volt)	จำนวนการทดลองซ้ำ (n)
1	880.00 * <sub>1</sub>	90.64 * <sub>2</sub>	990	868.60	4.94	5
.	(แต่ละช่วงลดลงช่วงละ 8.79)	.	.	.	.	.
101	1.00	0.10	1,000	1.00	0.55	5

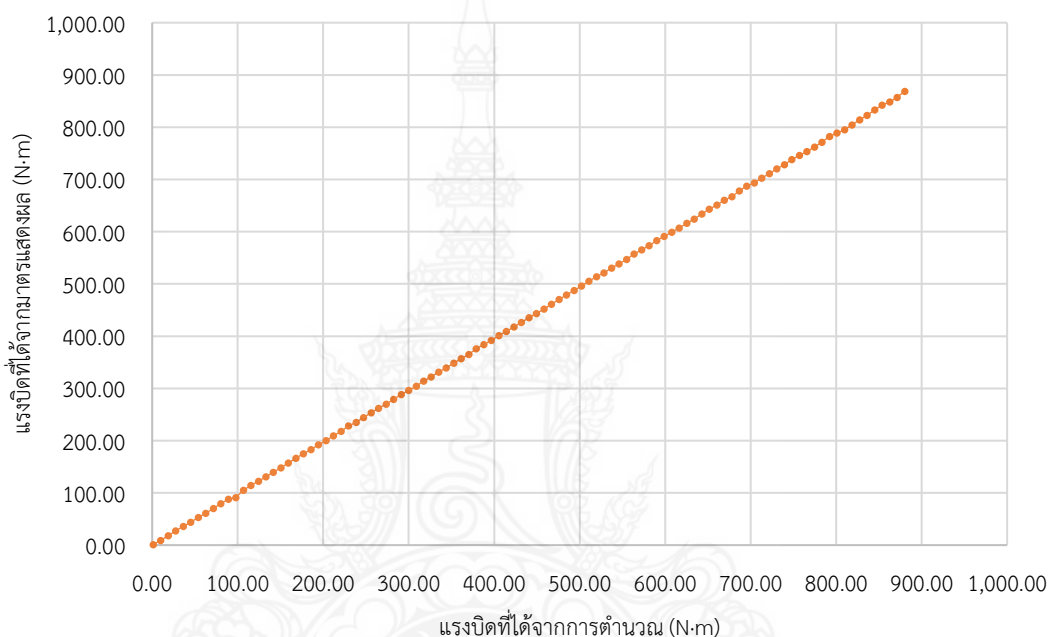
หมายเหตุ \*<sub>1</sub> การทดลองจะเริ่มการทดลองที่ แรงบิด 880.00 นิวตันเมตร จนถึง 1.00 นิวตันเมตร แบ่งออกเป็น 101 ช่วงการทดลองโดยจะลดลงช่วงละ 8.79 นิวตันเมตร

\*<sub>2</sub> หมายเหตุ การทดลองจะใช้น้ำหนักและระยะแกนแขนน้ำหนัก ตามความเหมาะสม

ผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ ระหว่างค่าแรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผล ( $y_1$ ) และสัญญาณแรงดันทางไฟฟ้า ( $y_2$ ) เทียบกับค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ ( $x$ )

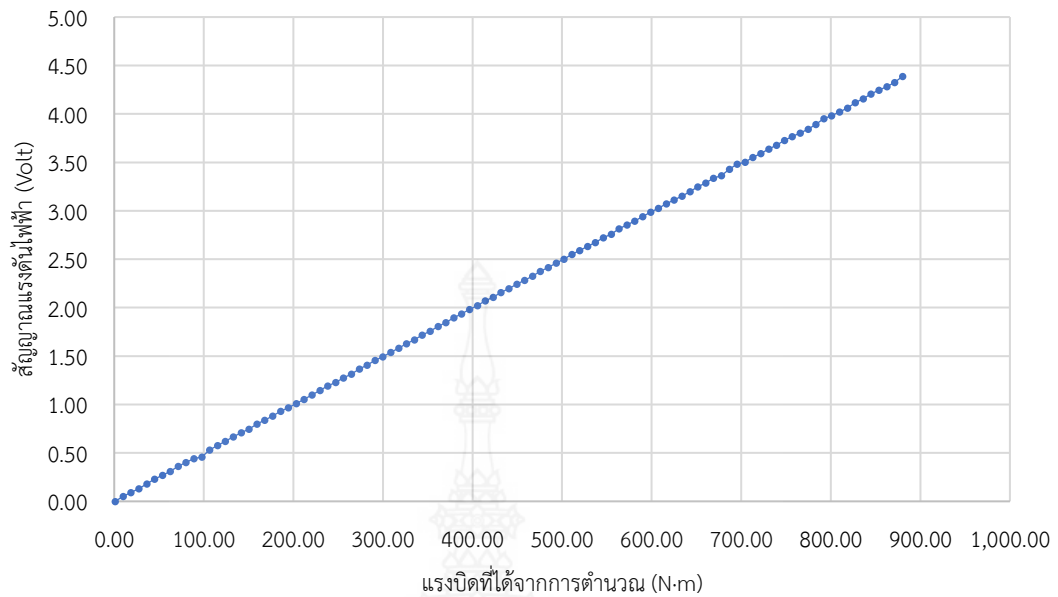
ครั้งนี้ได้นำทฤษฎีสมการถดถอยแบบเส้นตรง (Linear Regression) มาทำการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการทั้งสองสมการดังนี้

1)  $y_1=0.9851x+0.4054$  เป็นสมการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผลเทียบกับค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ ได้ค่าความชันสูงสุดอยู่ในช่วงของแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ ตั้งแต่ 88.90 และ 168.01 นิวตันเมตร มีค่าเท่ากับ 1.0087 ซึ่งสะท้อนให้เห็นความเป็นเชิงเส้นของผลการทดลองครั้งนี้ที่ได้จากทอร์กทรานสดิวเซอร์ ดังภาพที่ 4.2



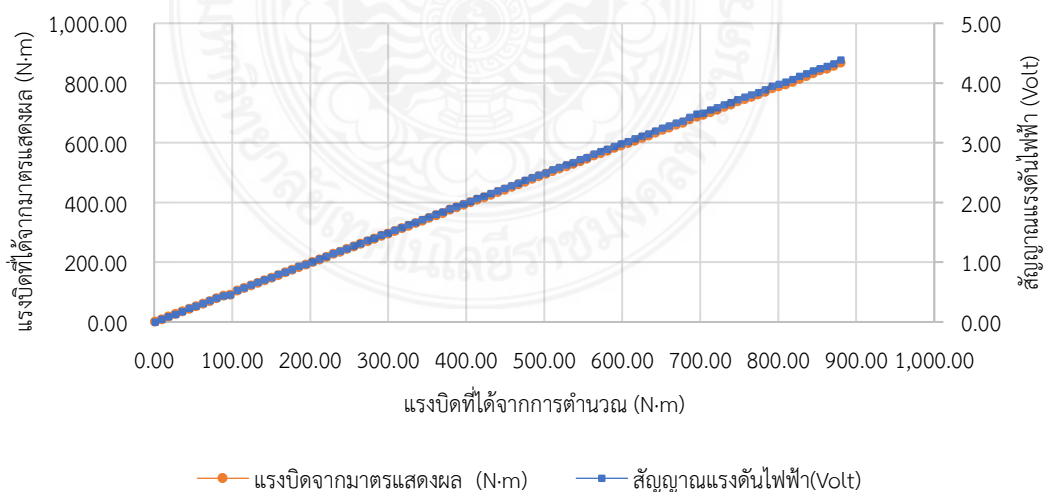
ภาพที่ 4.2 ผลการทดลองหาค่าแรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผลเทียบกับแรงบิดที่ได้จากการคำนวณของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์

2)  $y_2 = 0.0050x+0.5353$  เป็นสมการที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณแรงดันทางไฟฟ้าเทียบกับค่าแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ ได้ค่าความชันสูงสุดอยู่ในช่วงของแรงบิดที่ได้จากการคำนวณ ตั้งแต่ 616.30 จนถึง 695.41 นิวตันเมตร มีค่าเท่ากับ 0.0052 ซึ่งสะท้อนให้เห็นความเป็นเชิงเส้นของผลการทดลองครั้งนี้ที่ได้จากทอร์กทรานสดิวเซอร์ และเครื่องทดสอบความคลาดเคลื่อนของทอร์กทรานสดิวเซอร์ประกอบรวมกัน ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ผลการทดลองหาค่าสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเทียบกับแรงบิดที่ได้จากการคำนวณของ ชุดทดสอบทอร์กรานสตีวเซอร์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นผลลัพธ์ระหว่างแรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผล และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของมาตรแสดงผลเท่ากับ 0.2883 และเส้นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า เท่ากับ 0.2564 เนื่องจากเครื่องวัดที่ใช้การตรวจวัดระหว่างการทดลองมีข้อจำกัดด้านหน่วยวัดละเอียดที่ 1 ทำให้ค่าที่บันทึกได้อาจมีความคลาดเคลื่อน ดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากมาตรแสดงผล และสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

#### 4.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด

ผลการสร้างชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 2 ตัว คือ 1.) ทอร์กทรานสดิวเซอร์ 2.) จอแสดงผล ซึ่งบริษัทได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของทอร์กทรานสดิวเซอร์ที่ร้อยละ 0.05 และค่าความคลาดเคลื่อนที่จอแสดงผลร้อยละ 0.03 ดังนั้นสามารถนำค่าทั้งสองมาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนรวมได้จาก สมการที่ 2.39

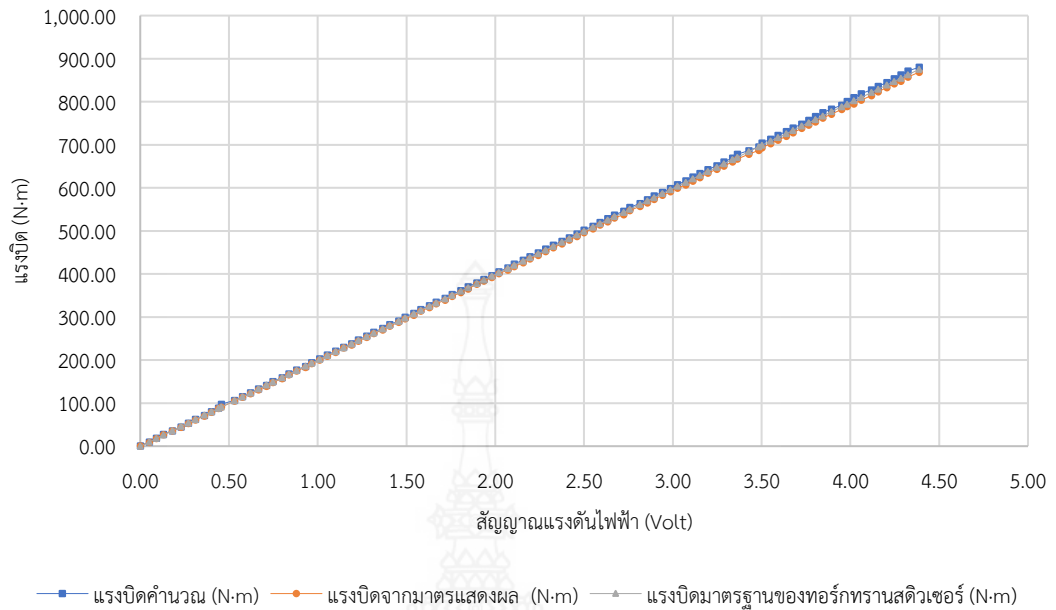
$$\begin{aligned} \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{0.05^2 + 0.03^2}{2}} \\ &\approx 0.0412 \\ &\approx 0.04 \end{aligned}$$

ตารางที่ 4.3 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด

สัญญาณแรงดันไฟฟ้า (output,V)	แรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (N·m)	แรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผล (N·m)	แรงบิดมาตรฐานของทอร์กทรานสดิวเซอร์ (output x 199.5 N·m/V, N·m)	Error <sub>test kit</sub>	Error <sub>dis</sub>
4.39	880.00	868.60	875.22	0.55	0.76
3.50	704.20	693.00	698.65	0.79	0.81
2.63	528.40	521.00	525.08	0.63	0.78
1.76	352.60	348.00	350.39	0.63	0.68
0.88	176.80	175.00	175.74	0.60	0.42
0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00

หมายเหตุ การทดลองจะเริ่มการทดลองที่ แรงบิด 880.00 นิวตันเมตร จนถึง 1.00 นิวตันเมตร แบ่งออกเป็น 101 ช่วงการทดลองโดยจะลดลงช่วงละ 8.79 นิวตันเมตร

จากตารางที่ 4.2 ได้นำผลการทดลองหาความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์ มาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์สูงสุดอยู่ที่ ร้อยละ 7.26 และค่าความคลาดเคลื่อนของหน้าจแสดงผลสูงสุดอยู่ที่ ร้อยละ 9.77 ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์

จากตารางที่ 4.3 เมื่อนำค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของหน้าจอสถิติผลมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนรวม โดยใช้สมการที่ 2.39 จะได้ว่า

$$\text{Error}_{\text{system}} = \sqrt{\frac{\text{Error}_{\text{test kit}}^2 + 0.05^2 + \text{Error}_{\text{dis}}^2}{3}}$$

$$\text{Error}_{\text{system}} = \sqrt{\frac{0.77^2 + 0.05^2 + 0.92^2}{3}}$$

$$\text{Error}_{\text{system}} = 0.6933$$

$$\text{Error}_{\text{system}} \approx 0.69$$



## บทที่ 5

### สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป และอภิปราย การวิจัย

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบชุดทดสอบและศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์ คณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาข้อมูล ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากการศึกษาพบว่า จากการสร้างชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด ชุดทดสอบสามารถอ่านค่าแรงบิดได้สูงสุดที่ 880.00 นิวตัน·เมตร ใช้เหล็กไอบีมขนาด 75 x 150 ตารางเซนติเมตร มาเป็นคานแขวนน้ำหนักและตัวโครงสร้างฐานชุดทดสอบ คานแขวนน้ำหนักสามารถปรับขนาดความยาวของจุดรับน้ำหนักได้ตั้งแต่ 450 มิลลิเมตร จนถึง 1,000 มิลลิเมตร

จากการทวนสอบและทดลองความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบ ได้ผลการทวนสอบว่าชุดทดสอบมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ ร้อยละ 1.30 เฉลี่ยอยู่ที่ ร้อยละ 0.90 และได้ผลการทดลองความเป็นเชิงเส้นสามารถนำผลการทดลองมาสร้างเป็นสมการได้ทั้งหมด 2 สมการ 1)  $y_1 = 0.9851x + 0.4054$  เป็นสมการที่ได้จากการบันทึกค่าระหว่างแรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผล และ แรงบิดที่ได้จากการคำนวณ 2)  $y_2 = 0.0050x + 0.5353$  เป็นสมการที่ได้จากการบันทึกค่าระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้า และ แรงบิดที่ได้จากการคำนวณ จากการทดลองพบว่าชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิดนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนรวมอยู่ที่ ร้อยละ 0.69

#### 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

จากการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด พบปัญหา ระหว่างการทดลองดังนี้

5.2.1 คานได้รับน้ำหนักมากจึงมีการบิดของน็อต จึงทำให้มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อน

5.2.2 ระยะความยาวของคานแขวนน้ำหนักไม่ผ่านการสอบเทียบจึงทำให้มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อน

5.2.3 มาตรวัดไม่สามารถเพิ่มความละเอียดได้ทำให้ บันทึกผลการทดลองได้ไม่ชัดเจน

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ใช้วัสดุทำโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้น เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

5.3.2 ควรสอบเทียบระยะความยาวคาน เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

5.3.3 ใช้อุปกรณ์ในการอ่านค่าแรงบิดให้ละเอียดมากขึ้น เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

### บรรณานุกรม

- [1] วิศรุต ศรีรัตน์. 2550. **เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์ในงานอุตสาหกรรม**. ซีเอ็ดดูเคชั่น, บมจ.
- [2] สมนึก บุญพาไสว, 2550, **การวัดและเครื่องมือวัด**, กรุงเทพฯ:ท้อป
- [3] Engineer Ambitiously, **สเตรนเกจบนเพลากลม** (ออนไลน์), .แหล่งที่มา : <http://www.ni.com/white-paper/14352/en/> [15/12/63]
- [4] Technimeasure, **วงจรสเตรนเกจ** (ออนไลน์), .แหล่งที่มา : <https://www.technimeasure.co.uk/> [15/12/63]
- [5] Reasrchgate, **วงกลมมออร์**, (ออนไลน์), แหล่งที่มา : <https://www.researchgate.net/profile/> [15/12/63]
- [6] Kyowa, **เตรนเกจ** [ออนไลน์], แหล่งที่มา : [http://www.kyowa-ei.co.th/tha/technical/strain\\_gages/strain\\_gage.html](http://www.kyowa-ei.co.th/tha/technical/strain_gages/strain_gage.html). [26/11/2563]
- [7] มิราเคิล อินเทอร์เน็ตเนชั่นแนลเทคโนโลยี, **ข้อมูลน่ารู้ด้านการสอบเทียบเครื่องมือวัด** [ออนไลน์], แหล่งที่มา : <http://www.mit.in.th/htmlthai/knowledge/detail/index.php?kn=39>. [26/11/2563]
- [8] ศ.ดร. วรสิทธิ์ อึ้งภากรณ์, 2556, **การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1**, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [9] น.ส. ญาณี ทำบุญ, 2545, **กลศาสตร์โครงสร้าง 2**, แผนกวิชาช่างก่อสร้าง: วิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่.
- [10] บริษัท ธนาสาร เซ็นทรัล สตีล จำกัด, **ข้อแตกต่างของ H-BEAM กับ I-BEAM** [ออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.thanasarn.co.th/ข้อแตกต่างของ-h-beam-beam>. [26/11/63]
- [11] รองศาสตราจารย์ ดร.ชาวสวน กาญจน์นัมย์, 2557, **กลศาสตร์วัสดุ**, ภาควิชาเครื่องกล: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- [12] University of Guelph, **What is Torque?** [Online], Available: <https://www.physics.uogu-elph.ca/tutorials/torque/Q.torque.intro.html>. [2018, November 16]
- [13] นันทวัฒน์ สิริไชยวิทย์, 2553, **การใช้ท่อเหล็กในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่**, วารสารโยธาสาร, ประจำเดือน พฤษภาคม-มิถุนายน
- [14] Keng Surapong, 2562, **Loss Function ep.1** [ออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.bua-labs.com/archives/2673>. [30/06/64]
- [15] Kyowa, **ทอร์กเซลล์** [ออนไลน์], แหล่งที่มา: <http://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/sensors/tps-a/index.html>. [26/11/63]
- [16] Watanabe, **Digital Panel Meters** [ออนไลน์], แหล่งที่มา : <https://www.watanabe-electric.co.jp/en/product/show/productCode/61/>. [25/02/64]

ภาคผนวก  
ตารางการทดลอง และคุณสมบัติจำเพาะของอุปกรณ์



ตารางที่ ก.1 สภาวะการทดสอบความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบทอร์ก  
ทรานสดิวเซอร์

ช่วงการ ทดลอง	แรงบิด (N·m)	น้ำหนัก (kg)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะคานแขน น้ำหนัก (mm)	จำนวนการทดลอง ซ้ำ (n)
1	880.00	90.64	25	990	5
2	871.21	91.59		970	5
3	862.42	90.66		970	5
4	853.63	91.63		950	5
5	844.84	90.68		950	5
6	836.05	90.70		940	5
7	827.26	90.71		930	5
8	818.47	91.72		910	5
9	809.68	90.73		910	5
10	800.89	90.74		900	5
11	792.10	80.77		1000	5
12	783.31	82.35		970	5
13	774.52	81.42		970	5
14	765.73	80.50		970	5
15	756.94	81.25		950	5
16	748.15	80.31		950	5
17	739.36	80.21		940	5
18	730.57	80.10		930	5
19	721.78	82.70		890	5
20	712.99	80.78		900	5
21	704.20	80.68		890	5
22	695.41	80.58		880	5
23	686.62	70.02		1000	5
24	677.83	71.26		970	5
25	669.04	71.81		950	5
26	660.25	72.39		930	5
27	651.49	71.43		930	5

ตารางที่ ก.1 สภาวะการทดสอบความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบทอร์ก  
ทรานสดิวเซอร์(ต่อ)

ช่วงการ ทดลอง	แรงบิด (N·m)	น้ำหนัก (kg)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะคานแขน น้ำหนัก(mm)	จำนวนการทดลอง ซ้ำ (n)
28	642.67	70.47	25	930	5
29	633.88	72.63		890	5
30	625.09	71.62		890	5
31	616.30	70.61		890	5
32	607.51	72.03		860	5
33	598.72	70.99		860	5
34	589.93	60.16		1000	5
35	581.14	61.09		970	5
36	572.35	61.44		950	5
37	563.56	60.49		950	5
38	554.77	60.18		940	5
39	545.98	62.56		890	5
40	537.19	60.86		920	5
41	528.40	60.54		890	5
42	519.61	52.99		1000	5
43	510.82	52.09		1000	5
44	502.03	51.19		1000	5
45	493.24	50.30		1000	5
46	484.45	52.00		950	5
47	475.66	51.06		950	5
48	466.87	50.11		950	5
49	458.08	52.48		890	5
50	449.29	51.48		890	5
51	440.50	52.23		860	5
52	431.71	51.79		850	5
53	422.92	50.74		850	5
54	414.13	42.23		1000	5

ตารางที่ ก.1 สภาวะการทดสอบความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบทอร์ก  
ทรานสดิวเซอร์(ต่อ)

ช่วงการ ทดลอง	แรงบิด (N·m)	น้ำหนัก (kg)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะคานแขน น้ำหนัก(mm)	จำนวนการทดลอง ซ้ำ (n)
55	405.34	41.33	25	1000	5
56	396.55	40.44		1000	5
57	387.76	41.62		950	5
58	378.97	40.68		950	5
59	370.18	40.16		940	5
60	361.39	42.85		860	5
61	352.60	42.30		850	5
62	343.81	41.25		850	5
63	335.02	40.19		850	5
64	326.23	40.08		830	5
65	317.44	32.37		1000	5
66	308.65	31.47		1000	5
67	299.86	30.58		1000	5
68	291.07	31.24		950	5
69	282.28	30.30		950	5
70	273.49	30.43		860	5
71	264.70	31.93		860	5
72	255.91	30.34		860	5
73	247.12	30.36		830	5
74	238.33	30.00		810	5
75	229.54	30.01		780	5
76	220.75	22.51		1000	5
77	211.96	21.61		1000	5
78	203.17	20.72		1000	5
79	194.38	20.86		950	5
80	185.59	21.03		900	5
81	176.80	20.03		900	5

ตารางที่ ก.1 สภาวะการทดสอบความเป็นเชิงเส้นและค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบทอร์ก  
ทรานสดิวเซอร์(ต่อ)

ช่วงการ ทดลอง	แรงบิด (N·m)	น้ำหนัก (kg)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะคานแขน น้ำหนัก(mm)	จำนวนการทดลอง ซ้ำ (n)
82	168.01	20.16	25	850	5
83	159.22	20.04		810	5
84	150.43	20.18		760	5
85	141.64	20.06		720	5
86	132.85	20.22		670	5
87	124.06	20.08		630	5
88	115.27	12.37		950	5
89	106.48	10.86		1000	5
90	97.69	10.60		940	5
91	88.90	10.07		900	5
92	80.11	10.09		810	5
93	71.32	10.10		720	5
94	62.53	10.12		630	5
95	53.74	10.15		540	5
96	44.95	10.19		450	5
97	36.16	3.69		1000	5
98	27.37	2.79		1000	5
99	18.58	1.89		1000	5
100	9.79	1.00		1000	5
101	1.00	0.10		1000	5

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์

การทดลองความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์							
ช่วง การ ทดลอง	แรงบิดที่ได้ จากการ คำนวณ (N·m)	น้ำหนัก (kg)	ระยะคาน แขวน น้ำหนัก (mm)	ค่าแรงบิดที่ได้ จากมาตร แสดงผล (N·m)	ค่า สัญญาณ แรงดันไฟ ฟ้า(volt)	จำนวน การ ทดลอง ซ้ำ (n)	ความ แตกต่าง (%)
1	880.00	90.64	990	868.6	4.94	5	1.30
2	871.21	91.59	970	857.0	4.87	5	1.63
3	862.42	90.66	970	848.0	4.83	5	1.67
4	853.63	91.63	950	842.0	4.79	5	1.36
5	844.84	90.68	950	833.0	4.75	5	1.40
6	836.05	90.70	940	822.8	4.70	5	1.58
7	827.26	90.71	930	814.0	4.66	5	1.60
8	818.47	91.72	910	804.0	4.60	5	1.77
9	809.68	90.73	910	795.0	4.56	5	1.81
10	800.89	90.74	900	789.0	4.52	5	1.48
11	792.10	80.77	1000	782.0	4.50	5	1.28
12	783.31	82.35	970	771.0	4.44	5	1.57
13	774.52	81.42	970	762.0	4.39	5	1.62
14	765.73	80.50	970	753.0	4.35	5	1.66
15	756.94	81.25	950	746.0	4.31	5	1.45
16	748.15	80.31	950	738.0	4.27	5	1.36
17	739.36	80.21	940	728.0	4.22	5	1.54
18	730.57	80.10	930	720.0	4.18	5	1.45
19	721.78	82.70	890	711.0	4.13	5	1.49
20	712.99	80.78	900	702.6	4.09	5	1.46
21	704.20	80.68	890	693.0	4.04	5	1.59
22	695.41	80.58	880	687.0	4.02	5	1.21
23	686.62	70.02	1000	678.0	3.98	5	1.26
24	677.83	71.26	970	667.0	3.91	5	1.60
25	669.04	71.81	950	660.0	3.88	5	1.35



ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์(ต่อ)

การทดลองความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์							
ช่วง การ ทดลอง	แรงบิดที่ ได้จากการ คำนวณ (N·5m)	น้ำหนัก (kg)	ระยะคาน แขวน น้ำหนัก (mm)	ค่าแรงบิดที่ได้ จากมาตร แสดงผล (N·m)	ค่า สัญญาณ แรงดันไฟ ฟ้า(volt)	จำนวน การ ทดลอง ซ้ำ (n)	ความ แตกต่าง (%)
26	660.25	72.39	930	651.0	3.83	5	1.40
27	651.46	71.43	930	643.0	3.79	5	1.30
28	642.67	70.47	930	634.0	3.74	5	1.35
29	633.88	72.63	890	624.0	3.69	5	1.56
30	625.09	71.62	890	616.0	3.65	5	1.45
31	616.30	70.61	890	607.0	3.61	5	1.51
32	607.51	72.03	860	599.0	3.56	5	1.40
33	598.72	70.99	860	591.0	3.52	5	1.29
34	589.93	60.16	1000	583.0	3.49	5	1.17
35	581.14	61.09	970	573.0	3.44	5	1.40
36	572.35	61.44	950	565.0	3.40	5	1.28
37	563.56	60.49	950	557.0	3.36	5	1.16
38	554.77	60.18	940	547.0	3.30	5	1.40
39	545.98	62.56	890	538.0	3.26	5	1.46
40	537.19	60.86	900	530.0	3.21	5	1.34
41	528.40	60.54	890	521.0	3.17	5	1.40
42	519.61	52.99	1000	513.6	3.14	5	1.16
43	510.82	52.09	1000	505.0	3.10	5	1.14
44	502.03	51.19	1000	496.0	3.05	5	1.20
45	493.24	50.30	1000	487.4	3.01	5	1.18
46	484.45	52.00	950	479.0	2.96	5	1.12
47	475.66	51.06	950	470.0	2.92	5	1.19
48	466.87	50.11	950	461.0	2.87	5	1.26
49	458.08	52.48	890	452.0	2.82	5	1.33
50	449.29	51.48	890	443.0	2.78	5	1.40

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์(ต่อ)

การทดลองความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์							
ช่วง การ ทดลอง	แรงบิดที่ ได้จากการ คำนวณ (N·m)	น้ำหนัก (kg)	ระยะคาน แขน น้ำหนัก (mm)	ค่าแรงบิดที่ได้ จากมาตร แสดงผล (N·m)	ค่า สัญญาณ แรงดันไฟ ฟ้า(volt)	จำนวน การ ทดลอง ซ้ำ (n)	ความ แตกต่าง (%)
51	440.5	52.23	860	435.0	2.73	5	1.25
52	431.71	51.79	850	426.0	2.69	5	1.32
53	422.92	50.74	850	417.4	2.64	5	1.31
54	414.13	42.23	1000	409.0	2.62	5	1.24
55	405.34	41.33	1000	401.0	2.57	5	1.07
56	396.55	40.44	1000	392.0	2.53	5	1.15
57	387.76	41.62	950	384.0	2.48	5	0.97
58	378.97	40.68	950	376.0	2.44	5	0.78
59	370.18	40.16	940	365.0	2.39	5	1.40
60	361.39	42.85	860	357.0	2.34	5	1.21
61	352.60	42.30	850	348.0	2.29	5	1.30
62	343.81	41.25	850	339.0	2.25	5	1.40
63	335.02	40.19	850	331.0	2.20	5	1.20
64	326.23	40.08	830	322.0	2.16	5	1.30
65	317.44	32.37	1000	314.0	2.13	5	1.08
66	308.65	31.47	1000	304.2	2.09	5	1.44
67	299.86	30.58	1000	296.0	2.04	5	1.29
68	291.07	31.24	950	288.0	2.00	5	1.05
69	282.28	30.30	950	279.0	1.95	5	1.16
70	273.49	32.43	860	270.0	1.90	5	1.28
71	264.70	31.39	860	262.0	1.85	5	1.02
72	255.91	30.34	860	253.0	1.81	5	1.14
73	247.12	30.36	830	244.0	1.76	5	1.26
74	238.33	30.00	810	235.0	1.72	5	1.40
75	229.54	30.01	780	228.0	1.67	5	0.67

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์(ต่อ)

การทดลองความเป็นเชิงเส้นของชุดทดสอบเทอร์กทรานสดิวเซอร์							
ช่วง การ ทดลอง	แรงบิดที่ได้ จากการ คำนวณ (N·m)	น้ำหนัก (kg)	ระยะคาน แขน น้ำหนัก (mm)	ค่าแรงบิดที่ได้ จากมาตร แสดงผล (N·m)	ค่า สัญญาณ แรงดันไฟ ฟ้า(volt)	จำนวน การ ทดลอง ซ้ำ (n)	ความ ต่าง ต่าง (%)
76	220.75	22.51	1000	218.0	1.65	5	1.25
77	211.96	21.61	1000	209.0	1.60	5	1.40
78	203.17	20.72	1000	200.0	1.56	5	1.56
79	194.38	20.86	950	192.0	1.51	5	1.22
80	185.59	21.03	900	183.0	1.47	5	1.40
81	176.80	20.03	900	175.0	1.42	5	1.02
82	168.01	20.16	850	166.0	1.37	5	1.20
83	159.22	20.04	810	157.0	1.33	5	1.39
84	150.43	20.18	760	148.0	1.27	5	1.62
85	141.64	20.06	720	139.0	1.23	5	1.86
86	132.85	20.22	670	131.0	1.18	5	1.39
87	124.06	20.08	630	122.0	1.13	5	1.66
88	115.27	12.37	950	114.0	1.12	5	1.10
89	106.48	10.86	1000	105.0	1.08	5	1.39
90	97.69	10.60	940	91.0	1.00	5	6.85
91	88.90	10.07	900	88.0	0.98	5	1.01
92	80.11	10.09	810	79.0	0.93	5	1.39
93	71.32	10.10	720	70.0	0.88	5	1.85
94	62.53	10.12	630	61.0	0.82	5	2.45
95	53.74	10.15	540	53.0	0.77	5	1.38
96	44.95	10.19	450	44.0	0.72	5	2.11
97	36.16	3.69	1000	36.0	0.73	5	0.44
98	27.37	2.79	1000	27.0	0.68	5	1.35
99	18.58	1.89	1000	18.0	0.64	5	3.12
100	9.79	1.00	1000	9.0	0.60	5	8.07
101	1.00	0.10	1000	1.0	0.55	5	0.00


ตารางที่ ก.3 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด

สัญญาณแรงดันไฟฟ้า (output,V)	แรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (N·m)	แรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผล (N·m)	แรงบิดมาตรฐานของทอร์กทรานสดิวเซอร์ (output x 199.5 N·m/V, N·m)	Error <sub>test kit</sub>	Error <sub>dis</sub>
1.58	317.44	314.00	315.21	0.71	0.38
1.54	308.65	304.20	307.23	0.46	0.99
1.49	299.86	296.00	297.65	0.74	0.56
1.46	291.07	288.00	290.36	0.24	0.81
1.41	282.28	279.00	280.39	0.67	0.50
1.37	273.49	270.00	272.37	0.41	0.87
1.32	264.70	262.00	262.40	0.88	0.15
1.28	255.91	253.00	254.42	0.59	0.56
1.23	247.12	244.00	245.09	0.83	0.45
1.19	238.33	235.00	237.55	0.33	1.07
1.15	229.54	228.00	228.63	0.40	0.27
1.10	220.75	218.00	219.45	0.59	0.66
1.05	211.96	209.00	210.27	0.80	0.61
1.01	203.17	200.00	201.50	0.83	0.74
0.97	194.38	192.00	192.61	0.92	0.32
0.93	185.59	183.00	185.72	0.07	1.46
0.88	176.80	175.00	175.74	0.60	0.42
0.84	168.01	166.00	166.85	0.69	0.51

ตารางที่ ก.3 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองชุดทดสอบทอร์กทรานสดิวเซอร์โดยใช้แรงบิด(ต่อ)

สัญญาณแรงดันไฟฟ้า (output,V)	แรงบิดที่ได้จากการคำนวณ (N·m)	แรงบิดที่ได้จากมาตรแสดงผล (N·m)	แรงบิดมาตรฐานของทอร์กทรานสดิวเซอร์ (output x 199.5 N·m/V, N·m)	Error <sub>test kit</sub>	Error <sub>dis</sub>
0.80	159.22	157.00	159.35	0.08	1.47
0.75	150.43	148.00	148.86	1.05	0.58
0.71	141.64	139.00	141.75	0.08	1.94
0.67	132.85	131.00	132.87	0.01	1.41
0.62	124.06	122.00	123.76	0.24	1.42
0.58	115.27	114.00	114.80	0.41	0.70
0.53	106.48	105.00	105.74	0.70	0.70
0.46	97.69	91.00	91.08	7.26	0.09
0.44	88.90	88.00	87.96	1.07	0.04
0.40	80.11	79.00	79.94	0.21	1.18
0.36	71.32	70.00	71.93	0.85	2.68
0.31	62.53	61.00	61.92	0.99	1.48
0.27	53.74	53.00	53.90	0.30	1.67
0.23	44.95	44.00	45.89	2.04	4.11
0.18	36.16	36.00	35.91	0.70	0.25
0.13	27.37	27.00	25.94	5.53	4.11
0.09	18.58	18.00	17.96	3.48	0.25
0.05	9.79	9.00	9.98	1.85	9.77
0.00	1.00	1.00	0.00	-	-

**検査成績書**  
Test Data Sheet  
トルク変換器  
TORQUE TRANSDUCER

<+> 出力方向 OUTPUT					
型式名 Model	TPS-A-1KNM	検査年月日 Inspected date	2016/1/18	製造番号 Serial No.	GF9740005
定格容量 Rated Capacity	1kN·m	温度 Temp.	23°C	湿度 Humidity	50%RH
1. 定格出力 Rated output	5.012V				
2. 非直線性 Nonlinearity	0.02%RO				
3. ヒステリシス Hysteresis	0.02%RO				
4. 校正係数 Calibration constant	0.1995kN·m/V				
<-> 出力方向 OUTPUT					
型式名 Model	TPS-A-1KNM	検査年月日 Inspected date	2016/1/18	製造番号 Serial No.	GF9740005
定格容量 Rated Capacity	-1kN·m	温度 Temp.	23°C	湿度 Humidity	50%RH
1. 定格出力 Rated output	-5.020V				
2. 非直線性 Nonlinearity	0.06%RO				
3. ヒステリシス Hysteresis	0.02%RO				
4. 校正係数 Calibration constant	0.1992kN·m/V				
 株式会社 <b>共和電業</b> KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO.,LTD.		検査者 Inspector		合格	
		責任者 Supervisor			

共和品-1354B

ภาพที่ ก.1 คุณสมบัติของทอร์กทรานสดิวเซอร์ รุ่น TPS-A-1KNM

ประวัติผู้วิจัย



**หัวหน้าโครงการ**

1. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) นายกุลยศ สุวันทโรจน์  
(ภาษาอังกฤษ) Mr.Kullayot Suwantaroj
2. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ระดับ 7
3. หน่วยงานและสถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ e-mail  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800  
โทรศัพท์:02-8363000 ต่อ 4138  
โทรสาร:02-8363000 ต่อ 4138  
E- mail : kullayot.s@rmutp.ac.th

## 4. ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาโท	วศ.ม.	วิศวกรรมเครื่องกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2546	ไทย
ปริญญาตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล เกียรตินิยมอันดับ) (สอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2541	ไทย

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ  
การเผาไหม้ขี้เถ้าชุมชน  
การอนุรักษ์พลังงานในโรงงานและอาคาร  
การผลิตไบโอดีเซลชุมชน  
สิ่งประดิษฐ์ทางการเกษตร
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพ  
ในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละ  
ข้อเสนอการวิจัย
  - 6.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : -
  - 6.2 หัวหน้าโครงการวิจัย :
    - การพัฒนาระบบทดสอบและติดตามสมรรถนะเครื่องยนต์ดีเซลของรถจักรยานยนต์ทำขบวน
    - การออกแบบงานเบรกเชิงการสะสมความร้อนเพื่อความปลอดภัย



### 6.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :

Suwantaroj, K., & Lakkam, S. (2022). Reducing brake noise, vibration, and harshness by damping layer on a brake pad. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 44 (2). 550-555.

ณัฐกิตติ์ ฤทธิทอง, ศุภชัย หล้าคำ, กุลยศ, สุวันทโรจน์ และ สถาพร วันนาพอ. (2562). การเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้าสูญเสียของรถจักรดีเซลไฟฟ้าจากการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง. งานประชุมวิชาการระดับชาติ นนทรีอีสาน ครั้งที่ 7, สกลนคร, วันที่ 2562 พฤศจิกายน 30.

สิทธิเดช มั่งมี, คชาภัส อุดมศรี, ธนกฤต เขมสุขสาราญ, อนันต์ เต็มเปี่ยม, พิเชษฐ์ บุญญาลัย, กุลยศ สุวันทโรจน์ และ ภูภูมิ พ่วงเจริญชัย. (2562). การควบคุมเครื่องจักรขับเคลื่อนงานทรงกระบอกรถด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิก คอนโทรลเลอร์. การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มทร พระนคร ครั้งที่.4, กรุงเทพฯ, 31 พฤษภาคม 2562.

ธวัชชัย ขาดิต้านาญ, สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ และ กุลยศ สุวันทโรจน์. (2561). การบูรณาการการมีส่วนร่วมเพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตชุมชนตาม แนวทางปรัชญาของเศรษฐกิจพอเพียงโครงการการคัดแยกเมล็ดถั่วเขียว. วารสารรับใช้สังคม มทรล้านนา ., 2(2), วันที่ 2561 ธันวาคม-กรกฎาคม 2.

Lakkam, S., & Suwantaroj, K. (2018). A study of the injury mitigation of pedestrians based on head injury criterion using the lifted-up hood technique . *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018)*, Vientiane, Lao PDR .July 11<sup>th</sup>- 13<sup>th</sup> . 51-53.

Suwantaroj, K., & Lakkam, S. (2018). Development of remote monitoring system of locomotive engine via cloud network for the state railway of Thailand .*Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB 2018)*, Vientiane, Lao PDR .July 11<sup>th</sup>- 13<sup>th</sup>. 54-56.

งานวิจัยที่กำลังทำ : -

**ผู้ร่วมโครงการ**

1. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) นายศุภชัย หลักคำ  
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Supachai Lakkam
2. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ (พนักงานมหาวิทยาลัย)
3. หน่วยงานและสถานที่ที่ติดต่อได้สะดวก  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
1381 ถ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800  
โทรศัพท์:02-8363000 ต่อ 4138  
โทรสาร:02-8363000 ต่อ 4138  
E-mail: supachai.l@mutp.ac.th

## 4. ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	วิชาเอก	สถานศึกษา	ปีที่สำเร็จ	ประเทศ
ปริญญาเอก	Ph.D.	Mechanical Engineering	The SirindhornInternational Thai-German Graduate School of Engineering (TGGS) มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2560	ไทย
ปริญญาโท	M.Sc.	Automotive Engineering	The SirindhornInternational Thai-German Graduate School of Engineering (TGGS) มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ	2552	ไทย
ปริญญาตรี	วศ.บ.	วิศวกรรมเครื่องกล เกียรตินิยมอันดับ) (สอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2549	ไทย

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญเป็นพิเศษ ระบุสาขาวิชาการ (ซึ่งอาจแตกต่างจากวุฒิการศึกษา)
  - เทคนิคการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (Computation and Simulation Techniques)
  - เทคโนโลยีและการจัดการด้านพลังงาน (Energy Technology and Management)

6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัยหรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย

6.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : -

6.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : -

- เครื่องทดสอบพฤติกรรมวัสดุความเสียดทาน

- การศึกษาปัจจัยการออกแบบท่อพักไอเสียเพื่อลดเสียงรบกวนและรักษาสมรรถนะของเครื่องยนต์

6.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :

ผลงานวิจัย	ปีที่พิมพ์	การเผยแพร่	แหล่งทุน	ตำแหน่ง
ศุภชัย หลีกคำ และ กุลยศ สุวันทโรจน์. การศึกษาอิทธิพลของความหนาและวัสดุคั่นกลางของกระจกนิรภัยหลายชั้นสำหรับรถโดยสารขนาดใหญ่ที่ส่งผลต่อความปลอดภัยในกรณีชนคนเดินเท้า, The Journal of KMUTNB, Vol.34, No.3, Jul.-Sep. 2024.	2024	วารสาร	สวทช.	หัวหน้าโครงการ
Kullayot Suwantaraj, Supachai Lakkam .Reducing brake noise, vibration, and harshness by damping layer on a brake pad ,Songklanakarin J. Sci. Technol. 44(2), 550-555, Mar.-Apr. 2022	2022	วารสาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร	หัวหน้าโครงการ
Supachai Lakkam, Polrut Boonmee. A study of bending stress of thickening wall materials and energy absorption of square bar materials derived from natural materials,UTK RESEARCH JOURNAL Vol. 14 No. 1 (2020) January-June, 2020 pp. 40-51.	2020	วารสาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร	หัวหน้าโครงการ
Lakkam , S., & Koetnियom, S. ) 2020). Development of city-bus assessment in Thailand, Songklanakarin J. Sci. Technol. 42 (6), 1407-1413. (Nov. - Dec.)	2020	วารสาร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร	หัวหน้าโครงการ
Lakkam,.....S.....&.....Tempiam.....A.....(2020). Enhancement of the type rolling resistance testing machine. <i>The International Conference on Materials Research and Innovation (ICMAR)</i> . IOP. Conf. Series: Materials Science and Engineering. 16-18. (Dec. 2020)	2020	การประชุมวิชาการ	วช.	หัวหน้าโครงการ
Lakkam, S., & Suwantaraj, K. ) 2018. (A study of the injury mitigation of pedestrians based on head injury criterion using the lifted-up hood	2018	การประชุมวิชาการ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร	หัวหน้าโครงการ

technique..... <i>Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being )STISWB 2018(</i> , Vientiane, Lao PDR.. July 11 <sup>th</sup> - 13 <sup>th</sup> ... 51-53				
Suwantaroj, K. & Lakkam, S.) 2018 (.. Development of remote monitoring system of locomotive engine via cloud network for the state railway of Thailand. <i>Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being )STISWB 2018(</i> , Vientiane, Lao PDR.. July 11 <sup>th</sup> - 13 <sup>th</sup> ... 54-56	2018	การประชุมวิชาการ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร	ผู้ร่วมวิจัย

6.4 งานวิจัยที่กำลังทำ : -

