

การออกแบบเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา  
DESIGN OF CALIBRATION TOOLS FOR POCKET VANE SHEAR

โดย

นายกิตติพัฒน์ กระจ่างลิขิต

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# DESIGN OF CALIBRATION TOOLS FOR POCKET VANE SHEAR

Kittiphat Krajanglikit

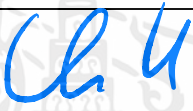
The seal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang is a large, circular emblem. It features a central sunburst with rays emanating from a central point. Below the sunburst are three tiered, pagoda-like structures. The entire emblem is surrounded by a decorative border with Thai script. The text within the seal includes 'สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง' (King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang) and 'วิศวกรรมศาสตร์' (Engineering).

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
BACHELOR DEGREE IN CIVIL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองโครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การออกแบบเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา  
DESIGN OF CALIBRATION TOOLS FOR POCKET VANE SHEAR  
นักศึกษา นายกิตติพัฒน์ กระจ่างลิขิต รหัสนักศึกษา 62010066  
หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมเกียรติ ขวัญพฤษ์

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ชลิตา	อุตะเภา	
ผศ.สมเกียรติ	ขวัญพฤษ์	
รศ.ดร.แหลมทอง	เหล่าคงถาวร	

ภาควิชาวิศวกรรมโยธารับรองแล้ว



(รศ.ดร.ชลิตา อุตะเภา)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

วันที่ 8 มิถุนายน พ.ศ. 2565

## การออกแบบเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

นายกิตติพัฒน์ กระจ่างลิขิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมเกียรติ ขวัญพุกฤษ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2565

### บทคัดย่อ

ในงานวิศวกรรมโครงสร้างและฐานรากนั้นจำเป็นต้องวัดค่าหลายประเภทเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอต่อการออกแบบอย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินนั้นเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญในการออกแบบโครงสร้างของปลุกสร้าง จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เครื่องมือวัดที่ใช้ในการสำรวจและเก็บข้อมูลต้องมีความเที่ยงตรงเพื่อป้องกันความผิดพลาดอันก่อให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างและตัวผู้ออกแบบเอง ดังนั้นอุปกรณ์ที่นำมาใช้งานจะต้องได้รับการสอบเทียบให้ตรงตามมาตรฐาน เครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา(Pocket vane shear test kit) หรือ Torvane ก็เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่ใช้วัดกำลังรับแรงเฉือนของดินที่นิยมใช้ในปัจจุบัน จึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบกับเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา เพื่อให้สามารถวัดค่ากำลังรับแรงเฉือนได้อย่างถูกต้อง ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและออกแบบเพื่อสร้างเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาเพื่อสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาให้มีความเที่ยงตรงตามมาตรฐาน จากผลการทดลองการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา ผลการสอบเทียบพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือสอบเทียบแต่ละจุดอยู่ในช่วง -15% ถึง +15% และค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของเครื่องมือสอบเทียบอยู่ในช่วง -5% ถึง +5% ของค่าจากการคำนวณทางทฤษฎี ผลการศึกษาเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาผลลัพธ์คือเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพามีค่าความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือแต่ยังมีข้อผิดพลาดบางประการที่ทำให้ไม่สามารถปรับแก้ค่าที่อ่านได้จริงให้สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีที่เป็นค่าตามมาตรฐานได้ แสดงให้เห็นว่าเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพานั้นยังมีข้อเสียบางประการดังนั้นผู้ใช้งานควรระมัดระวัง มีการตรวจสอบและปรับแก้ก่อนนำไปประยุกต์ใช้

# DESIGN OF CALIBRATION TOOLS FOR POCKET VANE SHEAR

Mr. Kittiphat Krajanglikit

Project Adviser Asst. Prof. Somkiat

Khwanpruk

Academic Year 2022

## ABSTRACT

In structural engineering and foundation work, it is necessary to measure important parameters such as weight, compressive strength, density, moisture content, and shear strength to ensure safe, cost-effective, and efficient design. The measurements obtained from tools must be accurate. Therefore, it is crucial that measuring instruments undergo calibration before being used to prevent negative consequences that may arise later due to inaccuracies, such as non-standard constructions, resource waste, budget overruns, and time delays. Since measuring the shear strength of soil obtained from the drilling and exploration process is one of the key variables for structural design, whether it's for foundation work, retaining walls, side slope stability, or road construction, the Pocket Vane Shear Test Kit or Torvane is a commonly used portable device for measuring soil shear strength due to its ease of use and portability. It is necessary to calibrate this portable shear strength measuring device against a calibration instrument to ensure accurate and precise measurement of shear strength. Therefore, the researchers have recognized the importance of calibrating the portable shear strength measuring device, and thus conducted a study to design and create a calibration instrument for the portable shear strength measuring device that is accurate and efficient for practical use. Based on the experimental results of the calibration tool used to calibrate the portable vane shear test kit, it was found that the deviation of the readings from the instrument during calibration at each point falls within the range of -15% to +15%. The average deviation of the calibration tool falls within the range of -5% to +5% compared to the theoretical calculations. The study of the calibration tool for the Pocket Vane Shear test kit concluded that the tool is within an acceptable

range of accuracy. However, there are some limitations that prevent precise adjustment of the readings to match the values obtained from the theoretical calculations according to the standard. This indicates that the calibration tool for the portable vane shear test kit still has some drawbacks. Therefore, users should exercise caution, conduct inspections, and make necessary adjustments before applying it in practice.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมนี้ได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของผู้จัดทำโครงการไปด้วยดี คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมเกียรติ ขวัญพฤษ์ ที่ให้คำแนะนำแนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่อง จนโครงการเล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และผู้ปกครอง ที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา ขอขอบคุณหน่วยทดสอบวัสดุของคณะวิศวกรรมศาสตร์สาขาเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้การสนับสนุน เครื่องมือ และอุปกรณ์ทดสอบ และความรู้เกี่ยวกับวิธีการใช้งาน และสุดท้ายนี้ขอบคุณเพื่อนๆคณะวิศวกรรมโยธาทุกคนที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจซึ่งกันและกัน

ผู้จัดทำ

นายกิตติพัฒน์ กระจ่างลิขิต



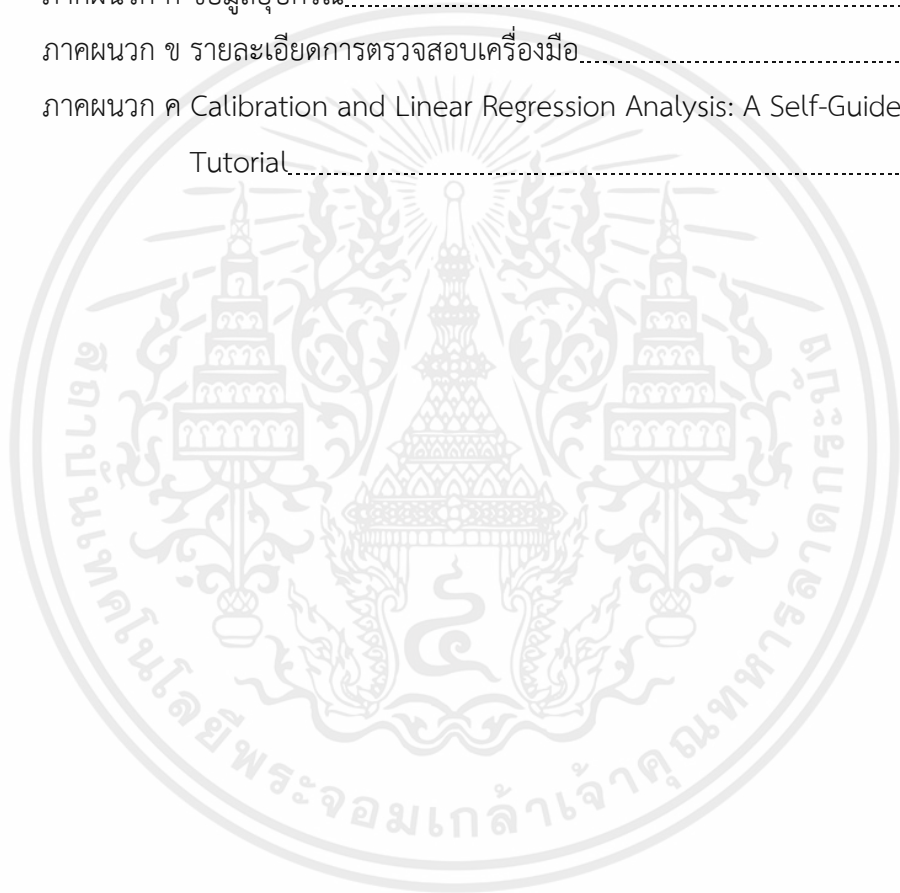
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 แผนการดำเนินงานโครงการ.....	2
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>4</b>
2.1 แนวคิด และทฤษฎี.....	4
2.2 เครื่องมือที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.3 โปรแกรมที่เกี่ยวข้อง.....	12
<b>บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....</b>	<b>13</b>
3.1 กำหนดรูปแบบและการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา.....	13
3.2 ออกแบบเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา.....	13
3.3 ตรวจสอบความถูกต้องการคำนวณ.....	23
3.4 ทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา.....	25
<b>บทที่ 4 การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ.....</b>	<b>29</b>
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	29
4.2 การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา.....	29
4.3 ผลการทดสอบ.....	31

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
5.3 ประโยชน์จากการทำงานวิจัย.....	39
เอกสารอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก.....	43
ภาคผนวก ก ข้อมูลอุปกรณ์.....	44
ภาคผนวก ข รายละเอียดการตรวจสอบเครื่องมือ.....	53
ภาคผนวก ค Calibration and Linear Regression Analysis: A Self-Guided Tutorial.....	60



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 กราฟแสดงเส้นถดถอยเมื่อ $r^2 = 1$ .....	8
2.2 กราฟแสดงเส้นถดถอยเมื่อ $r^2 = 0$ .....	9
2.3.....	9
2.4 วงแหวนรับแรง (Proving Ring).....	10
2.5 เครื่องมือทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของดินแบบพกพา (Pocket Vane Shear Test Kit).....	11
2.6 โปรแกรม Microsoft Excel.....	12
2.7 โปรแกรม AutoCAD.....	12
3.1 หลักการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบ.....	13
3.2 การวัดขนาดของเบ้าเสียบเครื่องมือ.....	14
3.3 แบบจำลองเบ้าสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา.....	14
3.4 แบบจำลองตลับลูกปืนสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา.....	14
3.5 แบบจำลองคานเพื่อคำนวณแรงที่กระทำกับเส้นเอ็นรับแรงดึง.....	15
3.6 แบบจำลองคานเพื่อคำนวณโมเมนต์ที่เกิดจากจากน้ำหนักคาน.....	17
3.7 แบบจำลองคานเพื่อคำนวณน้ำหนักของตุ้มถ่วง.....	18
3.8 แบบจำลองหน้าตัดของคาน.....	19
3.9 ตารางแสดงสมการของ slope และ deflection ของคาน.....	21
3.10 โปรแกรม Microsoft Excel คำนวณค่าแรงเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้น พื้นที่หน้าตัด และเส้นรอบรูปของเบ้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา.....	23
3.11 โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณโมเมนต์ของคานและค่าน้ำหนักของตุ้มถ่วง...	23
3.12 โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณค่า Section Modulus และค่า Deflection ของคานที่หน้าตัดต่าง ๆ ที่สามารถหาซื้อได้.....	24
3.13 เบ้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา.....	25
3.14 เส้นเอ็นรับแรงดึง.....	25
3.15 ตารางความทนต่อแรงต้านของเส้นเอ็นรับแรงดึง.....	25
3.16 การติดตั้งตุ้มถ่วงเพื่อให้คานอยู่ในสภาวะสมดุล.....	26
3.17 คานก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งตุ้มถ่วง.....	27
3.18 การติดตั้งคานเข้ากับจุดรองรับ.....	27

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 การติดตั้งวงแหวนรับแรง.....	28
3.20 ตัวกดและตัวรับแรงกดที่ปลายคานฝั่งวงแหวนรับแรง.....	28
4.1 และกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าที่อ่านได้จริงกับค่ามาตรฐาน.....	32



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม.....	2
4.1 ตารางบันทึกผลการทดสอบของเครื่องมือสอบเทียบที่ 1.0 ถึง 8.5 ksc.....	31
4.2 ตารางบันทึกผลการทดสอบของเครื่องมือสอบเทียบที่ 10 ถึง 240 ชอง (Division).....	33
4.3 ตารางแสดงค่าความคลาดเคลื่อนและการคำนวณค่าปรับแก้ค่าแรงเหวี่ยงที่อ่านได้จริงจาก เครื่องมือทดสอบแรงเหวี่ยงแบบพกพาโดยใช้สมการปรับแก้.....	35



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในงานวิศวกรรมโครงสร้างและฐานรากนั้นจำเป็นต้องมีการวัดค่าที่สำคัญ เช่น น้ำหนัก กำลังรับแรงอัด ความหนาแน่น ความชื้น และกำลังรับแรงเฉือน เพื่อการออกแบบที่ปลอดภัย คุ่มค่า และได้ประสิทธิภาพสูงสุด ค่าที่ได้จากการวัดโดยเครื่องมือจึงต้องมีความเที่ยงตรง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่อุปกรณ์เครื่องมือวัดจะต้องมีการสอบเทียบก่อนที่จะนำไปใช้งาน เพื่อป้องกันผลกระทบในเชิงลบที่อาจตามมาภายหลัง เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัด เช่น สิ่งปลูกสร้างไม่ได้มาตรฐาน การสิ้นเปลืองทรัพยากร งบประมาณ และเวลา ความเสียหายที่ตามมาหลังจากปลูกสร้างแล้วเสร็จ

เนื่องจากกำลังวัดแรงเฉือนของดินที่ได้จากขั้นตอนการเจาะสำรวจเป็นหนึ่งในตัวแปรสำคัญต่อการออกแบบโครงสร้าง ไม่ว่าจะเป็นงานฐานราก งานอุโมงค์ โครงสร้างรับแรงดิน ด้านข้าง และงานทาง สำหรับเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา (Pocket Vane Shear Test Kit) หรือ Torvane ก็เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรงเฉือนของดินที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เพราะพกพาง่ายและสะดวกต่อการใช้งาน จึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบกับเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา เพื่อให้วัดค่ากำลังรับแรงเฉือนอย่างถูกต้องแม่นยำ

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เห็นถึงความสำคัญของการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา จึงได้ทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา ว่ามีความเที่ยงตรงถูกต้อง และสามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อให้ศึกษานำความรู้ทางทฤษฎีมาแสดงหรือประยุกต์อย่างเป็นรูปธรรม
2. เพื่อศึกษา และออกแบบ หลักการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา
3. เพื่อสร้างเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาที่มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่น่าเชื่อถือ

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

#### 1.3.1 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ทำการศึกษาตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2565 ถึงเดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2566

1.3.2 ขอบเขตของตัวแปรที่มีผลต่อการออกแบบเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

ทำการศึกษาดูเฉพาะคุณสมบัติในลักษณะเชิงกล ประกอบด้วย โมเมนต์ แรงบิด และแรงเฉือน

1.3.4 ขอบเขตของความคลาดเคลื่อน

ค่าที่จริงอ่านได้จากเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาที่มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดในแต่ละจุดอยู่ในช่วง -15 เปอร์เซ็นต์ ถึง +15 เปอร์เซ็นต์ และมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง -5 เปอร์เซ็นต์ ถึง +5 เปอร์เซ็นต์

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและวิเคราะห์หลักการการทำงานและการสอบเทียบของเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

2. ออกแบบ และสร้างเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

3. นำเครื่องมือที่ได้ไปทดสอบเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อน

4. สรุปและอภิปรายผลการทดสอบ

5. จัดทำเอกสารและนำเสนอ

#### 1.5 แผนการดำเนินงานโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานโครงการวิศวกรรม

แผนงานในแต่ละสัปดาห์	กุมภาพันธ์				มีนาคม				เมษายน				พฤษภาคม			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1. ศึกษาและวิเคราะห์	x	x	x	x	x											
2. ออกแบบ และสร้าง					x	x	x	x	x	x	x	x				
3. ทดสอบเครื่องมือ												x				
4. สรุปผล												x				
5. จัดทำเอกสาร									x	x	x	x	x			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้ทบทวนความรู้และเนื้อหาทฤษฎีที่เรียนและนำมาประยุกต์ใช้
2. ได้ทราบหลักการทำงานของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบพกพาและวงแหวนรับแรง
3. ได้เรียนรู้หลักการออกแบบและหลักการสอบเทียบ
4. ได้เครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาที่มีความคลาดเคลื่อนสูงสุดในแต่ละจุดอยู่ในช่วง -15 เปอร์เซ็นต์ ถึง +15 เปอร์เซ็นต์ และมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดเฉลี่ยอยู่ในช่วง -5 เปอร์เซ็นต์ ถึง +5 เปอร์เซ็นต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 โมเมนต์ของแรง (Moment of Force) หรือ “โมเมนต์” (Moment) หมายถึงผลของแรงที่กระทำต่อวัตถุ ซึ่งทำให้เกิดการหมุนไปรอบจุดหมุน (Fulcrum) ของวัตถุนั้น ๆ เมื่อแรงกระทำไม่ผ่านจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุ

ในทางฟิสิกส์ การหมุนของวัตถุที่เกิดจากแรงกระทำในลักษณะนี้ คือการเกิดโมเมนต์ของแรง หรือผลคูณของแรงกับระยะตั้งฉากจากแนวแรงถึงจุดหมุนหาได้จากสมการที่ 2.1 [5]

$$M = F \times L \quad (2.1)$$

เมื่อ

M คือ โมเมนต์ของแรง

F คือ แรงกระทำ

L คือ ระยะที่ตั้งฉากกับแนวแรงที่กระทำ

ชนิดของโมเมนต์

แบ่งตามทิศทางการหมุนได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา และโมเมนต์

ทวนเข็มนาฬิกา

สมดุต่อการหมุน

วัตถุที่สมดุต่อการหมุน โมเมนต์ของแรงกระทำจะเป็นไปตามเงื่อนไข คือ โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกามีค่าเท่ากับโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา ดังสมการที่ 2.2 [10]

$$\sum M = 0 \quad (2.2)$$

2.1.2 แรงบิด (Torque) เป็นปริมาณที่บอกถึงความพยายามที่จะทำให้วัตถุเปลี่ยนสภาพการหมุน มีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนโมเมนต์เชิงมุม โมเมนต์เชิงมุม (Angular Momentum) หาได้จากสมการที่ 2.3 [7]

$$T = F \times d \quad (2.3)$$

เมื่อ

T คือ ขนาดของทอร์ก

F คือ แรงกระทำ

d คือ ระยะทางตั้งฉากจากจุดหมุนถึงแนวแรง

2.1.3 สมการแรงบิด (Torsion Formula) หน่วยแรงเฉือนในเพลาน้ำตัดกลมตันทำด้วยวัสดุ isotropic and homogeneous material และมีพฤติกรรมอยู่ในช่วง linear elastic ภายใต้แรงบิดอยู่ในรูปของสมการที่ 2.4 [8]

$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$\tau$  คือ หน่วยแรงเฉือน

$T$  คือ แรงบิด

$c$  คือ ระยะรัศมีของหน้าตัดแรงเฉือนที่สนใจ

$J$  คือ polar moment of inertia ของพื้นที่หน้าตัด

Polar moment of inertia ของเพลาน้ำตัดกลมตัน สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5 [8]

$$J = \frac{\pi}{2} c^4 \quad (2.5)$$

เมื่อ

$c$  คือ ระยะรัศมีของหน้าตัดแรงเฉือนที่สนใจ

$J$  คือ polar moment of inertia ของพื้นที่หน้าตัดที่สนใจ

Polar moment of inertia ของเพลาน้ำตัดกลมวง สามารถหาได้จากสมการที่ 2.6 [8]

$$J = \frac{\pi}{2} (c_o^4 - c_i^4) \quad (2.6)$$

เมื่อ

$c_o$  คือ รัศมีของวงนอก

$c_i$  คือ รัศมีของวงใน

$J$  คือ polar moment of inertia ของพื้นที่หน้าตัดที่สนใจ

2.1.4 การได้เปรียบเชิงกล (Mechanical Advantage) คืออัตราส่วนของผลคูณของแรงหรือทอร์กที่ใส่เข้าไปในงาน โดยเมื่อการได้เปรียบเชิงกลมีค่ามากกว่า 1 จะเป็นการผ่อนแรงพิจารณาจากสมการที่ 2.7 [12]

$$\text{การได้เปรียบเชิงกล} = \frac{W}{E} \quad (2.7)$$

เมื่อ

W คือ แรงต้าน

E คือ แรงพยายาม

การได้เปรียบเชิงกล = 1 (W=E) ไม่ผ่อนแรง แต่อำนวยความสะดวก

การได้เปรียบเชิงกล < 1 (W<E) ไม่ผ่อนแรง เสียเปรียบเชิงกล

การได้เปรียบเชิงกล > 1 (W>E) ผ่อนแรง ได้เปรียบเชิงกล

2.1.5 ความดัน (Pressure) เป็นปริมาณชนิดหนึ่งในทางฟิสิกส์ หมายถึง อัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำตั้งฉากซึ่งทำโดยของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ต่อพื้นที่ของสารใด ๆ (ของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส) ความดันเป็นปริมาณสเกลาร์ ซึ่งเป็นปริมาณที่มีแต่ขนาดไม่มีทิศทาง จากความหมายของความดันข้างต้นสามารถเขียนเป็นสูตรคณิตศาสตร์ (โดยทั่วไป) ได้ดังสมการที่ 2.8 [6]

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.8)$$

เมื่อ

P คือ ความดัน (Pressure)

F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น ๆ (Normal Force)

A คือ พื้นที่ (Area) หรืออาจใช้ S (Surface; พื้นผิว)

#### 2.1.6 ขั้นตอนการออกแบบคานเหล็ก

1) หาขนาดและตำแหน่งของแรงกระทำ ในการออกแบบคานเหล็กจากโมเมนต์สูงสุด ( $M_{max}$ ) เราจะต้องหาค่า Section Modulus ขั้นต่ำที่ต้องการ ( $S_{req}$ ) แล้วนำไปเลือกหน้าตัดคานจากตารางเหล็ก

Section Modulus ของเหล็กที่จะใช้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9 [15]

$$S = \frac{I}{C} \quad (2.9)$$

เมื่อ

S คือ Section Modulus ของคาน

I คือ Moment of Inertia

C คือ จุด Centroid ของหน้าตัดคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่า Section Modulus ขั้นต่ำที่ต้องการ ( $S_{req}$ ) ได้จากสมการที่ 2.10 และ 2.11 [15]

$$\sigma_{allow} = \frac{M_{max}C}{I} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$\sigma_{allow}$  = ความเคียดสูงสุดที่ยอมรับได้

$M_{max}$  = โมเมนต์สูงสุดที่กระทำ

$I$  = Moment of Inertia

$C$  = จุด centroid ของหน้าตัดคาน

จะได้ว่า

$$S_{req} = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} \quad (2.11)$$

ดังนั้น จึงต้องใช้คานเหล็กที่มี Section Modulus ( $S$ ) มากกว่า Section Modulus ขั้นต่ำที่ต้องการ ( $S_{req}$ ) ดังสมการที่ 2.12 [15]

$$S \geq S_{req} \quad (2.12)$$

2) ทำการตรวจสอบหน่วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนหน้าตัดที่ได้จากข้อ 1) โดยใช้สมการแรงเฉือน 2.13 [15]

$$\tau_{avg} = \frac{V_{max}}{A} \quad (2.13)$$

เมื่อ

$\tau_{avg}$  = แรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนหน้าตัด

$V_{max}$  = แรงสูงสุดที่กระทำกับคาน

$A$  = พื้นที่หน้าตัด

ถ้า  $\tau_{avg} \leq \tau_{allow}$  แล้ว หน้าตัดคานมีความต้านทานต่อแรงเฉือนได้ ถ้าไม่ทำการเลือกขนาดหน้าตัดของคานให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

3) ตรวจสอบการแอ่นตัวของคาน ตรวจสอบการแอ่นตัวของคานเทียบกับข้อกำหนดที่ระบุไว้ในมาตรฐานการออกแบบซึ่งระยะการโก่งตัวสูงสุดจะต้องน้อยกว่า  $L/240$  หรือ  $L/360$  ขึ้นอยู่กับแต่ละกรณี

2.1.7 สัมประสิทธิ์การกำหนด (The Coefficient of Determination) ก่อนจะใช้สมการถดถอยในการทำนายและประมาณค่าตัวแปร  $Y$  ต้องมีการประเมินสมการถดถอยที่ได้จากตัวอย่างก่อน โดยประเมินว่าสมการถดถอยที่ได้นั้นสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปรได้ดีเพียงใด นั่นคือผลบวกกำลังสองของเส้นถดถอย ส่วนผลบวกกำลังสองของทั้งหมดควรจะเป็นสัดส่วนที่ใหญ่ขึ้นเพียงนั้น ค่าของสัดส่วนที่ได้นี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์การกำหนดแทนด้วย  $r^2$  เขียนได้ดังสมการที่ 2.14 [13]

$$r^2 = \frac{\sum(y-\bar{y})^2}{\sum(x-\bar{x})^2} \quad (2.14)$$

เมื่อ

$r^2$  คือ สัมประสิทธิ์การกำหนด

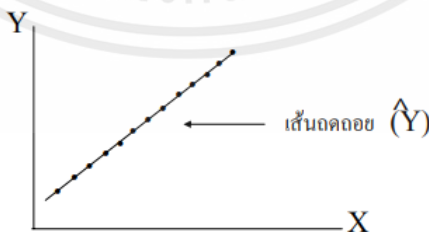
$y$  คือ ค่าของแต่ละจุดในแกนตั้ง

$\bar{y}$  คือ ค่าเฉลี่ยของจุดในแกนตั้ง

$x$  คือ ค่าของแต่ละจุดในแกนนอน

$\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ยของจุดในแกนนอน

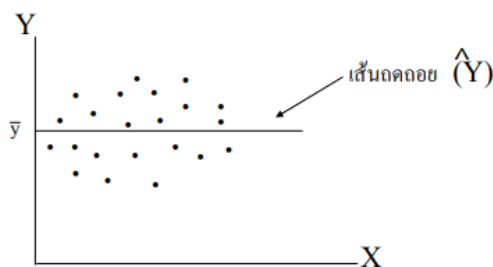
ค่า  $r^2$  ที่มากที่สุดคือ 1 จะเกิดขึ้นเมื่อความแปรปรวนทั้งหมดใน  $y_i$  อธิบายได้ด้วยการถดถอยเมื่อ  $r^2 = 1$  ค่าสังเกตทุกตัวของตัวอย่างจะอยู่บนเส้นถดถอย ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กราฟแสดงเส้นถดถอยเมื่อ  $r^2 = 1$

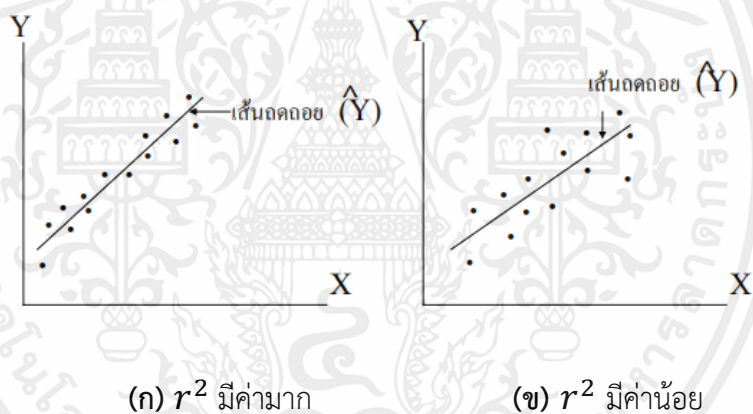
ค่า  $r^2$  ที่น้อยที่สุดคือ 0 จะเกิดขึ้นเมื่อเส้นถดถอยและเส้นที่ลากผ่าน  $y$  ทับกัน แสดงว่าความแปรปรวนทั้งหมดใน  $y_i$  ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยการถดถอย ดังแสดงในรูปที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงเส้นถดถอยเมื่อ  $r^2 = 0$

ค่า  $r^2$  เป็นการวัดความใกล้เคียงของเส้นถดถอยของตัวอย่างกับค่าสังเกตค่าต่าง ๆ ของตัวอย่าง ถ้าค่า  $r^2$  มีค่ามาก แสดงว่าเส้นถดถอยจะผ่านใกล้ค่าสังเกตค่าต่าง ๆ มากกว่าค่า  $r^2$  ที่มีค่าน้อยกว่า ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) และ (ข)



(ก)  $r^2$  มีค่ามาก

(ข)  $r^2$  มีค่าน้อย

รูปที่ 2.3

สำหรับการประเมินสมการถดถอยพหุ เราจะวัดค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดพหุ (The Coefficient of Multiple Determination) และสัมประสิทธิ์ การถดถอยบางส่วน (Partial Regression Coefficient) สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of Correlation) ของตัวอย่างคือ รากที่สองของ  $r^2$  แทนด้วยสัญลักษณ์  $r$  ได้เป็นสมการที่ 2.16 [13]

$$r = \pm \sqrt{r^2} \quad (2.16)$$

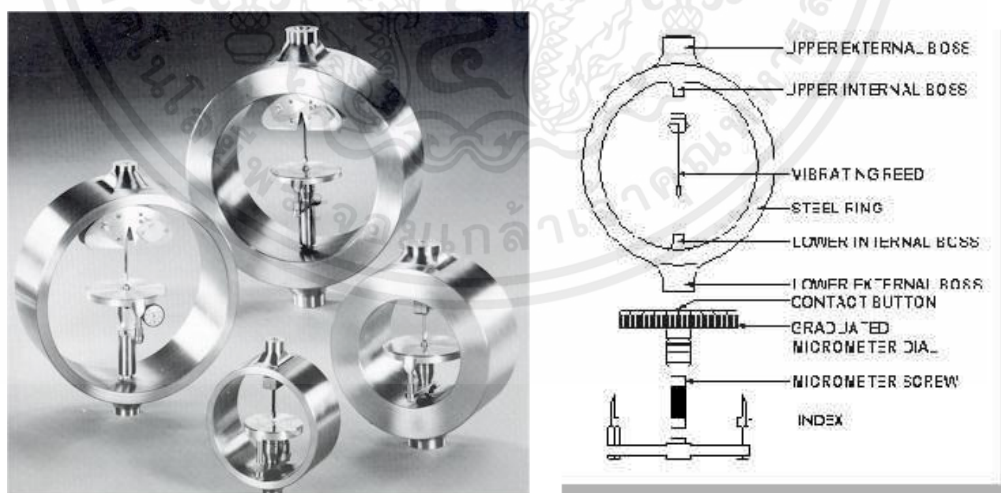
เครื่องหมายบวกหรือลบจะเป็นไปตามค่าความชันของเส้นถดถอยที่อาจเป็นบวกหรือลบ ดังนั้นค่า  $r$  จะอยู่ระหว่าง -1 ถึง +1

เส้นกราฟการสอบเทียบและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เครื่องมือทุกชิ้นที่ใช้ในการวิเคราะห์สามารถระบุได้ด้วยฟังก์ชันการตอบสนองเฉพาะ ฟังก์ชันการตอบสนองนี้อาจเป็นรูปแบบเชิงเส้นลอการิทึม เลขชี้กำลัง หรือรูปแบบทางคณิตศาสตร์อื่น ๆ ที่เหมาะสม ขึ้นอยู่กับลักษณะของพฤติกรรมของระบบที่กำลังวัด และกระบวนการวัดเอง แม้ว่าสิ่งนี้อาจทราบในทางทฤษฎี แต่ปัจจัยต่าง ๆ (เช่น การวิเคราะห์เฉพาะที่กำลังวัดอยู่ ผลกระทบของการรบกวนที่เกิดจากส่วนประกอบอื่น ๆ ของเมทริกซ์ตัวอย่าง หรือข้อผิดพลาดในการทดลองแบบสุ่ม) กำหนดให้เราทำการสอบเทียบเครื่องมือแต่ละชนิดสำหรับการวิเคราะห์เฉพาะและเงื่อนไขการวัดที่จะใช้ในการทดลองหนึ่ง ๆ เส้นโค้งการสอบเทียบเป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของเครื่องมือที่วิเคราะห์เฉพาะในเมทริกซ์ตัวอย่างเฉพาะ เช่นเดียวกับฟังก์ชันการตอบสนองของเครื่องมือ เส้นโค้งการสอบเทียบสามารถมีรูปแบบทางคณิตศาสตร์ได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับประเภทของการวัดที่ดำเนินการ ค่าสมการปรับแก้สามารถหาได้จากสมการเส้นตรง (Calibration Curve) ของเส้นถดถอย

สำหรับเครื่องมือสอบเทียบค่าความเชื่อมั่นของเส้นถดถอย  $r^2$  ควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.95 หรือ 95% [2]

## 2.2 เครื่องมือที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 วงแหวนรับแรง (Proving Ring)



รูปที่ 2.4 วงแหวนรับแรง (Proving Ring)

วงแหวนรับแรง (Proving Ring) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดแรง ประกอบด้วยวงแหวนยึดหยุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดที่เราทราบ มีอุปกรณ์วัดอยู่ตรงกลางวงแหวน โดยค่าที่ได้จากการอ่านจะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร หรือนิว ซึ่งสามารถนำไปเทียบเป็นค่าแรงที่วงแหวนรับได้ตามอัตราส่วนที่กำหนด

### 2.2.2 เครื่องมือทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของดินแบบพกพา (Pocket Vane Shear Test Kit)



รูปที่ 2.5 เครื่องมือทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของดินแบบพกพา (Pocket Vane Shear Test Kit)

เครื่องมือทดสอบหาค่ากำลังเฉือนของดินแบบพกพา เหมาะสำหรับใช้งานกับดินเหนียวอ่อนถึงอ่อนมาก เป็นเครื่องมือที่ถูกออกแบบมาให้ใช้ได้ทั้งในสนามและห้องปฏิบัติการ มีลักษณะคล้ายใบพัด (Vane) ขนาดเล็กมีให้เลือกหลายขนาดขึ้นอยู่กับชนิดของดินที่ทดสอบวิธีใช้งานเริ่มจากหมุนซีดบนหน้าปัดให้อยู่ที่เลขศูนย์ แล้วทำการกดใบพัดลงบนผิวของดินในกระบอกบางแล้วหมุนด้วยมือให้ดินถูกตัดขาดจากกัน อ่านค่าที่หน้าปัดด้านบน จะได้ค่าเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ (Undrained Shear Strength,  $S_u$ )

## 2.3 โปรแกรมที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 ไมโครซอฟท์ เอ็กเซล (Microsoft Excel) เป็นโปรแกรมประเภทตารางการคำนวณ พัฒนาโดยบริษัทไมโครซอฟท์ และเป็นโปรแกรมหนึ่งในชุดไมโครซอฟท์ ออฟฟิศ สำหรับจัดการและคำนวณข้อมูลในรูปแบบตาราง อีกทั้งสามารถจัดทำกราฟ แผนภูมิเพื่อแสดงผลข้อมูลได้นิยมในด้านการการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยใช้ฟังก์ชันพื้นฐาน บวก ลบ คูณ หาร ยกกำลัง รวมถึงฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ระดับสูง เช่น Modulo ตรีโกณมิติ ฟังก์ชันทางสถิติ เช่น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 2.6 โปรแกรม Microsoft Excel

2.3.2 AutoCAD เป็นซอฟต์แวร์สำหรับเขียนแบบ ออกแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ สามารถนำไปใช้งานออกแบบทางสถาปัตยกรรม วิศวกรรม งานสำรวจ ตกแต่งภายใน แผนที่ ตลอดจนงานออกแบบผลิตภัณฑ์และเครื่องกล

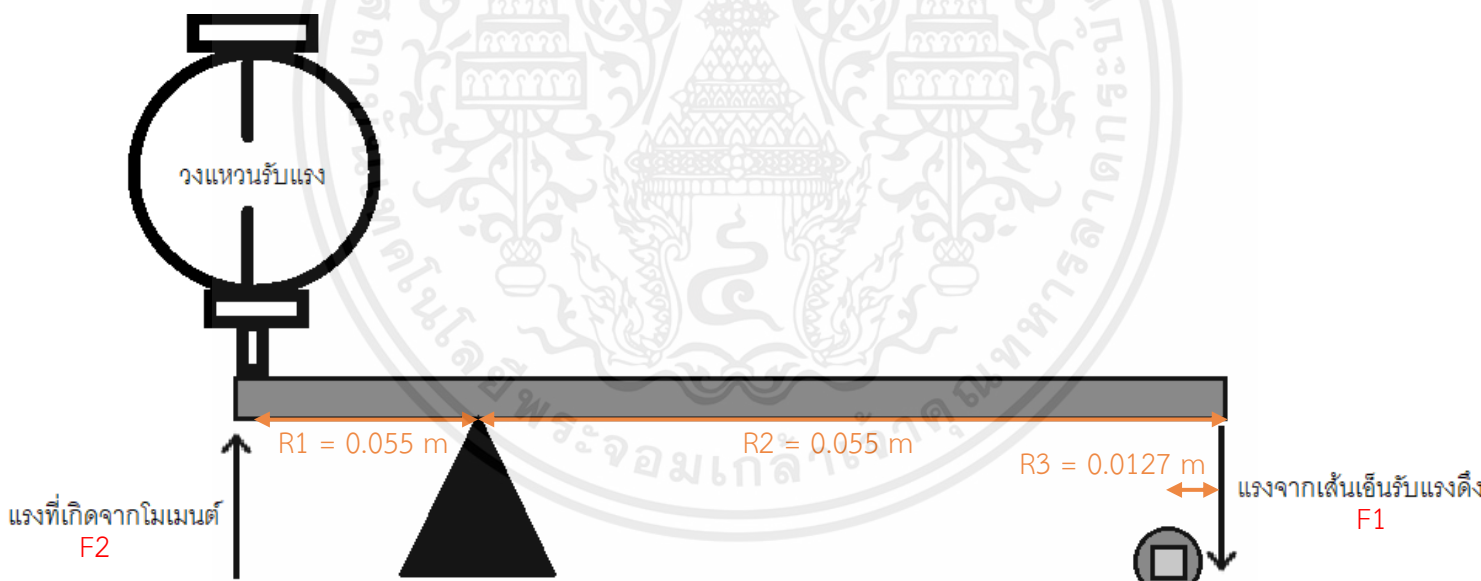


รูปที่ 2.7 โปรแกรม AutoCAD

### บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.1 กำหนดรูปแบบและการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

3.3.1 หลักการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา ในการออกแบบเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ คือ คาน ตั้มถ่วง เส้นเอ็นกรับแรงดึง และเบ้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือเพื่อทำการบิด ก่อนจะทำการทดสอบ ต้องติดตั้งตั้มถ่วงเพื่อให้คานอยู่ในสภาวะสมดุลก่อน หลักการทำงานคือใช้การถ่ายแรงโดยแรงบิด และโมเมนต์ของแรงไปสู่วงแหวนรับแรง โดยเมื่อทำการบิดเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาที่ติดตั้งเข้ากับเบ้ารับจะทำให้เกิดแรงบิด ซึ่งทำให้ทราบขนาดของแรงดึงเชือกที่เชื่อมต่อกับเบ้ารับและตัวคาน แรงดึงเชือกนี้ทำให้เกิดโมเมนต์ของแรงที่ปลายคานฝั่งเบ้ารับที่อยู่ในสภาวะสมดุลเนื่องจากเกิดโมเมนต์ของแรงที่ปลายคานฝั่งเบ้ารับ จากสมดุลของโมเมนต์ทำให้สามารถทราบขนาดของแรงที่ปลายคานฝั่งวงแหวนรับแรงอ่านได้ ดังนั้นจะได้ค่าที่เครื่องมืออ่านได้จริงมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของเครื่องมือสอบเทียบ

#### 3.2 ออกแบบเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

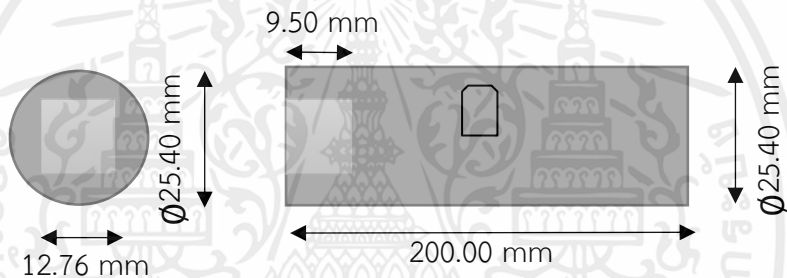
##### 3.2.1 เบ้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือน

1) กำหนดขนาดและระยะ ทำการวัดขนาดของเบ้าเสียบของเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาได้ขนาดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 12.76 มิลลิเมตร x 12.76 มิลลิเมตร หนา 9.50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 การวัดขนาดของเข้าเสียบเครื่องมือ

ดังนั้นได้เข้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนเพื่อทำการบิดเป็นเพลากลมต้นทำจากเหล็ก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร หนา 200.00 มิลลิเมตร เจาะรูเพื่อติดตั้งอุปกรณ์ที่จุดกึ่งกลาง ขนาดหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส 12.76 มิลลิเมตร x 12.76 มิลลิเมตร หนา 9.50 มิลลิเมตร และติดตั้งตะขอเพื่อต่อกับเส้นเอ็นรับแรงดึง



รูปที่ 3.3 แบบจำลองเข้าสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

2) อุปกรณ์สำหรับติดตั้งเข้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือน เนื่องจากเข้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนจำเป็นต้องมีอุปกรณ์สำหรับติดตั้งเพื่อให้สามารถหมุนได้ ดังนั้นจึงใช้สลักลูกปืนรัศมีวงใน 25.40 มิลลิเมตร รัศมีวงนอก 50.00 มิลลิเมตร เพื่อติดตั้งเข้ารับ



รูปที่ 3.4 แบบจำลองสลักลูกปืนสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

## 3.2.3 เส้นเอ็นรับแรงดึง



รูปที่ 3.5 แบบจำลองคานเพื่อคำนวณแรงที่กระทำกับเส้นเอ็นรับแรงดึง

เนื่องจากต้องการใช้เส้นเอ็นที่สามารถรับแรงดึงได้โดยไม่มีการยืดตัวหรือฉีกขาดดังนั้นจึงต้องหาแรงกระทำสูงสุดที่เข้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนจะกระทำต่อเส้นเอ็น ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

จากสมการแรงบิด ดังสมการที่ 2.4

$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$\tau$  = หน่วยแรงเฉือนสูงสุด

$c$  = รัศมีของหน้าตัดที่สนใจ

$J$  = polar moment of inertia ของพื้นที่หน้าตัดที่สนใจ

Polar moment of inertia ของเพลานี้ที่หน้าตัดกลมตัน สามารถหาได้จากสมการที่ 2.5

$$J = \frac{\pi}{2} c^4 \quad (2.5)$$

เมื่อ

$c$  = รัศมีของหน้าตัดที่สนใจ

$J$  = polar moment of inertia

เนื่องจากค่าแรงเฉือนสูงสุดของเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาอ่านได้มีค่า 10 กิโลกรัม/เมตร<sup>2</sup>

และจากสมการที่ 2.3

$$T = F \times d \quad (2.3)$$

เมื่อ

T=ขนาดของทอร์ก

F=แรงกระทำ

d=ระยะทางตั้งฉากจากจุดหมุนถึงแนวแรง

ให้ c=รัศมีของหน้าตัดแรงเฉือนที่สนใจคือเส้นแรงแม่เหล็กของสี่เหลี่ยมที่เป็นบ้ำรับ สำหรับติดตั้งเครื่องมีวัดแรงเฉือนแบบพกพามีค่าเท่ากับ 0.90 เซนติเมตร และ d=r รัศมีของหน้าตัด จะได้ว่า

$$\tau = \frac{(F \times r) \times c}{\frac{\pi}{2} c^4} \quad (3.1)$$

ทำการจัดรูปสมการที่ 3.1 เพื่อหาแรง  $F_{max}$  จะได้สมการที่ 3.2

$$F_{max} = \frac{\pi \times c^3}{2r} \tau \quad (3.2)$$

เมื่อทำการแทนค่าจะได้แรงสูงสุดของเส้นเอ็น

$$F_{max} = \frac{\pi \times 0.9^3 \times 9 \left( \frac{\text{กิโลกรัม}}{\text{เมตร}^2} \right)}{2 \times 1.27 \left( \text{เซนติเมตร}^2 \right)}$$

แก้สมการได้  $F_{max} = 10.30$  กิโลกรัม

ดังนั้นต้องเลือกใช้เส้นเอ็นที่รับแรงดึงได้มากกว่า 10.30 กิโลกรัม

### 3.2.4 คานและจตุรรองรับ

1) การได้เปรียบเชิงกลเนื่องจากวงแหวนรับแรงต้องการขนาดของแรงที่มาก ในการอ่านค่า จึงใช้ความได้เปรียบเชิงกลเพื่อให้ได้แรงที่มีขนาดเพิ่มขึ้น ดังนั้นด้านที่บิดเครื่องมือต้องมีการเพิ่มความยาวแขนให้ยาวกว่าด้านที่กดวงแหวน 6 เท่าเมื่อวัดระยะจากปลายคานของแต่ละด้าน ถึงกึ่งกลางจตุรรองรับ เพื่อเพิ่มขนาดของแรงที่กดวงแหวนรับแรง ดังนั้นเลือกคานเหล็กที่มีระยะ 0.49 เมตร ขนาดหน้าตัด กว้าง 0.019 เมตร ยาว 0.038 เมตร น้ำหนัก 2.8 กิโลกรัม โดยกำหนดให้ระยะ จากปลายคานฝั่งวงแหวนรับแรงถึงกึ่งกลางจตุรรองรับมีค่า 0.07 เมตร และระยะจากปลายคานฝั่งบ้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับสำหรับปิดอุปกรณ์วัดแรงเฉือนถึงกึ่งกลางจตุรกรรับมีค่า 0.42 เมตร มีจุดติดตั้งตัวคดงแหวนที่ระยะ 0.055 เมตรจากสมการการได้เปรียบเชิงกล สมการที่ 2.7

$$\text{การได้เปรียบเชิงกล} = \frac{W}{E} \quad (2.7)$$

เมื่อ

$W$  = แรงต้าน

$E$  = แรงพยายาม

จากสมการของโมเมนต์ จากสมการที่ 2.2

$$\sum M = 0 \quad (2.2)$$

จะได้ว่า

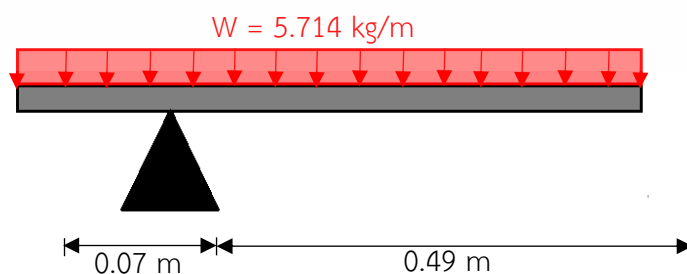
แรงจากเส้นเอ็นรับแรงดึง (กิโลกรัม)  $\times$  0.42 (เมตร) = แรงที่คดงแหวนรับแรง (กิโลกรัม)  $\times$  0.07 (เมตร)

$$\frac{\text{แรงที่กระทำกับวงแหวนรับแรง}}{\text{แรงจากเส้นเอ็นรับแรงดึง}} = \frac{0.42}{0.055}$$

ดังนั้น ขนาดของแรงที่กระทำกับวงแหวนรับแรงมีค่า เป็น 7.64 เท่าของขนาดแรงจากเส้นเอ็นรับแรงดึงซึ่งเกิดการผ่อนแรง

2) สมดุลของคาน เนื่องจากจตุรกรรับคานที่ออกแบบไม่ได้อยู่ที่จุดกึ่งกลางของตัวคาน เพื่อให้คานอยู่ในภาวะสมดุลจึงจำเป็นต้องมีตุ้มถ่วงน้ำหนักที่ปลายคานฝั่งวงแหวนรับแรง โดยน้ำหนักของตุ้มถ่วงสามารถคำนวณได้ดังนี้

2.1) คำนวณโมเมนต์ที่เกิดจากน้ำหนักคาน



รูปที่ 3.6 แบบจำลองคานเพื่อคำนวณโมเมนต์ที่เกิดจากจากน้ำหนักคาน

คานมีความยาว เท่ากับ 0.49 เมตร

น้ำหนักของคาน เท่ากับ 2.80 กิโลกรัม

จากข้อมูลข้างต้นน้ำหนักคานต่อเมตรมีค่า

$$\frac{2.80 \text{ กิโลกรัม}}{0.49 \text{ เมตร}}$$

เท่ากับ 5.714 กิโลกรัม/เมตร

โมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ปลายคานฝั่งวงแหวนรับแรงมีค่าเท่ากับ

$$(5.714 \text{ กิโลกรัม} \times 0.07 \text{ เมตร}) \times (0.07 \text{ เมตร} \times 0.50) = 0.014 \text{ กิโลกรัม} \cdot \text{เมตร}$$

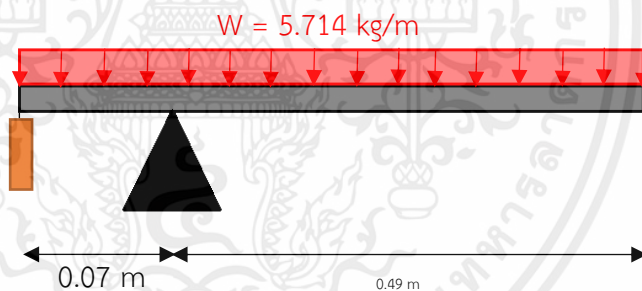
ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

โมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ปลายคานฝั่งเข้าสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเหวี่ยงมีค่าเท่ากับ

$$(5.714 \text{ กิโลกรัม} \times 0.42 \text{ เมตร}) \times (0.42 \text{ เมตร} \times 0.50) = 0.504 \text{ กิโลกรัม} \cdot \text{เมตร}$$

ในทิศตามเข็มนาฬิกา

2.2) คำนวณหาน้ำหนักของตุ้มถ่วง



รูปที่ 3.7 แบบจำลองคานเพื่อคำนวณน้ำหนักของตุ้มถ่วง

จากสมมูลของโมเมนต์ดังสมการที่ 2.2

$$\sum M = 0 \quad (2.2)$$

จะได้ว่า

โมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ปลายคานฝั่งวงแหวนรับแรง+โมเมนต์ที่เกิดขึ้นที่ปลายคานฝั่งเข้าสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเหวี่ยง+โมเมนต์ที่ปลายคานที่เกิดจากตุ้มถ่วงน้ำหนักมีค่าเป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$0.504 \text{ กิโลกรัม} \cdot \text{เมตร} + (-0.014 \text{ กิโลกรัม} \cdot \text{เมตร}) + (\text{น้ำหนักตุ้มถ่วง} \times 0.07 \text{ เมตร}) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นน้ำหนักค้ำถ่วงมีค่าเท่ากับ 7.00 กิโลกรัม

3) ตรวจสอบค่า Section modulus ของหน้าตัดคาน

จากสมการ Section Modulus ดังสมการที่ 2.9

$$S = \frac{I}{C} \quad (2.9)$$

เมื่อ

S = Section Modulus ของคาน

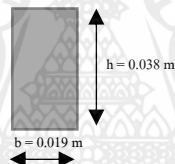
I = Moment of Inertia

C = จุด Centroid ของหน้าตัดคาน

จากการออกแบบคาน ความกว้าง  $b=1.90$  ความหนา  $h=3.80$  เซนติเมตร กำหนด

maximum stress allowable=1200 กิโลกรัม/เซนติเมตร<sup>2</sup>

คำนวณ moment of inertia ได้จากสมการที่ 3.3 [15]



รูปที่ 3.8 แบบจำลองหน้าตัดของคาน

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.3)$$

$$= \frac{1.9 \times 3.8^3}{12}$$

ดังนั้น moment of inertia ของคานที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 8.688 เซนติเมตร<sup>4</sup>

คำนวณ Section modulus ของคานที่ออกแบบคือ

$$S = \frac{I}{C} \quad (2.9)$$

$$S = \frac{8.688 \text{ เซนติเมตร}^4}{3.8 \text{ เซนติเมตร} \times 0.5}$$

ดังนั้น Section modulus ของคานที่ออกแบบมีค่าเท่ากับ 4.573 เซนติเมตร<sup>3</sup>

หาค่า Section Modulus ขั้นต่ำที่ต้องการ ( $S_{req}$ ) จากสมการ [15]

$$\sigma_{allow} = \frac{M_{max}C}{I} \quad (2.10)$$

เมื่อ

$\sigma_{allow}$  = ความเครียดสูงสุดที่ยอมรับได้

$M_{max}$  = โมเมนต์สูงสุดที่กระทำ

$I$  = Moment of Inertia

$C$  = จุด centroid ของหน้าตัดคาน

จะได้ว่า

$$S_{req} = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} \quad (2.11)$$

$$S_{req} = \frac{10.30 \text{ กิโลกรัม} \times 42.00 \text{ เซนติเมตร}}{1200 \text{ กิโลกรัม/เซนติเมตร}^2}$$

ดังนั้น Section modulus ขั้นต่ำที่ต้องการมีค่าเท่ากับ 0.361 เซนติเมตร<sup>3</sup>

เนื่องจาก

$$S = 4.573 \text{ เซนติเมตร}^3 \geq S_{req} = 0.361 \text{ เซนติเมตร}^3$$

ดังนั้น คานเหล็กที่ออกแบบมี Section Modulus ( $S$ ) มากกว่า Section Modulus

ขั้นต่ำที่ต้องการ ( $S_{req}$ )

4) ตรวจสอบการแอ่นตัวของคาน

เนื่องจากการใช้คานงัดวงแหวนรับแรงซึ่งมีความแข็งมากซึ่งอาจทำให้เกิดการแอ่นตัวของคานได้ จึงต้องตรวจสอบการโก่งตัวที่เกิดขึ้นให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

คำนวณการแอ่นตัวที่ยอมรับได้

จากสมการการแอ่นตัวที่ยอมรับได้ดังสมการที่ 3.4 [3]

$$v_{allow} = \frac{L}{360} \quad (3.4)$$

เมื่อ

$v_{allow}$  = ค่าการแอ่นตัวที่ยอมรับได้

$L$  = ความยาวของคาน

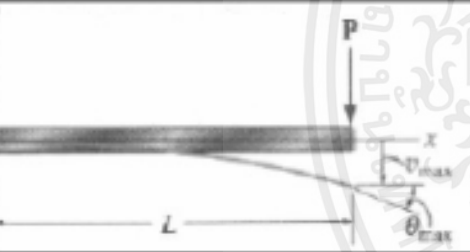
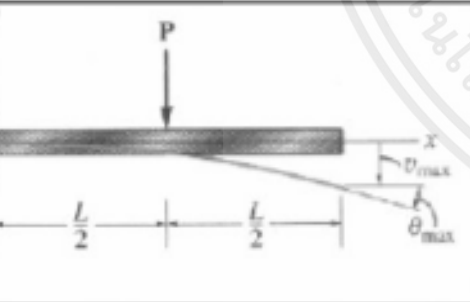
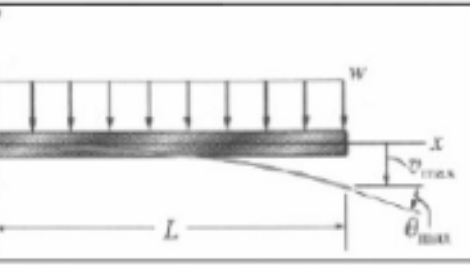
จากคานมีความยาว 49.00 เซนติเมตร

จะได้

$$v_{allow} = \frac{49.00 \text{ เซนติเมตร}}{360}$$

ดังนั้นการแอ่นตัวที่ยอมรับได้ของคานมีค่าเท่ากับ 0.136 เซนติเมตร

คำนวณการแอ่นตัวของคานที่เกิดขึ้นจริง

คาน	Slope	การโก่งตัว	เส้นโค้งการโก่งตัว
	$\theta_{max} = -\frac{PL^2}{2EI}$	$v_{max} = -\frac{PL^3}{3EI}$	$v = -\frac{Px^2}{6EI}(3L-x)$ $0 \leq x \leq L$
	$\theta_{max} = -\frac{PL^2}{8EI}$	$v_{max} = -\frac{5PL^3}{48EI}$	$v = -\frac{Px^2}{6EI}(3L/2-x)$ $0 \leq x \leq L/2$ $v = -\frac{PL^2}{24EI}(3x-L/2)$ $L/2 \leq x \leq L$
	$\theta_{max} = -\frac{wL^3}{6EI}$	$v_{max} = -\frac{wL^4}{8EI}$	$v = -\frac{wx^2}{24EI}(x^2 - 4Lx + 6L^2x)$ $0 \leq x \leq L$

รูปที่ 3.9 ตารางแสดงสมการของ slope และ deflection ของคาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้กรณีที่ยืดที่สุดคือ วงแหวนไม่ขยับตัวเลยจะได้กรณีของรูปที่ 1 ดังตาราง  
ได้สมการ Deflection ของคาน ดังสมการที่ 3.5 [15]

$$v_{max} = \frac{PL^3}{3EI} \quad (3.5)$$

เมื่อ

- $v_{max}$  = ค่าการแอ่นตัว  
 $P$  = แรงหรือน้ำหนักที่กระทำ  
 $L$  = ความยาวของคาน  
 $E$  = ค่า Elastic Modulus ของวัสดุ  
 $I$  = ค่า Moment of Inertia ของหน้าตัด

จากคานที่ทำการออกแบบ

แรงสูงสุดของเอ็นรับแรงดึงที่กระทำกับคานมีค่าเท่ากับ 25.34 กิโลกรัม

ความยาวของคานมีค่าเท่ากับ 49.00 เซนติเมตร

ค่า Elastic Modulus ของเหล็กมีค่าเท่ากับ  $2.04 \times 10^6$  กิโลกรัม/เซนติเมตร

ค่า Moment of Inertia ของหน้าตัดคานมีค่าเท่ากับ 8.688 เซนติเมตร<sup>4</sup>

จะได้

Deflection ของคาน

$$v = \frac{PL^3}{3EI} \quad (3.5)$$

$$v = \frac{25.34 \text{ กิโลกรัม} \times 49^3 \text{ เซนติเมตร}^3}{3 \times 2.04 \times 10^6 \text{ เซนติเมตร}^4 \times 8.688 \text{ เซนติเมตร}^4}$$

ได้การแอ่นตัวที่เกิดขึ้นจริงในคานมีค่าเท่ากับ 0.056 เซนติเมตร

จาก

$$v = 0.056 \text{ เซนติเมตร} \leq v_{max} = 0.136 \text{ เซนติเมตร}$$

ดังนั้นค่าการแอ่นตัวของคานที่เกิดขึ้นจริงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

5) ออกแบบการเชื่อมต่อคานกับจตุรรองรับและเส้นเอ็นรับแรงดึง ทำการเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.00 เซนติเมตร ที่กึ่งกลางของความสูงคาน = 1.90 เซนติเมตร ที่ระยะ 7.00 เซนติเมตร นับจากปลายคานฝั่งวงแหวนรับแรงเพื่อใช้เป็นจุดหมุน โดยใช้แท่งเหล็กกลมขนาดเส้นผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลาง 1.00 เซนติเมตร เป็นแกนหมุน และติดตั้งตะขอสำหรับผูกเส้นเอ็นรับแรงดึงที่ปลายคานฝั่ง  
เข่ารับสำหรับติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงเหวี่ยง

6) จูตรองรับ กำหนดให้ระยะของจูตรองรับจากพื้นจนถึงใต้คาน 20.00 เซนติเมตร และ  
ติดตั้งสลักลูกปืนขยายดเส้นผ่านศูนย์กลางวงใน 1.00 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 3.00  
เซนติเมตร เป็นตัวติดตั้งแท่งเหล็กเพื่อเป็นจุดหมุนของคาน

### 3.3 ตรวจสอบความถูกต้องการคำนวณ

ทำการตรวจสอบความถูกต้องของค่าที่คำนวณได้โดยใช้โปรแกรม Microsoft  
Excel ในการคำนวณเพื่อเลือกและปรับเปลี่ยนวัสดุ

เข่ารับ	d (cm)	r (cm)	Fmax (kg)
	2.2	1.1	8.926
	2.5	1.25	10.144
	2.54	1.27	10.306
	2.8	1.4	11.361
	2.9	1.45	11.767
	3	1.5	12.172
	3.2	1.6	12.984

(เอ็นรับแรงได้ 40.2kg)

รูปที่ 3.10 โปรแกรม Microsoft Excel คำนวณค่าแรงเหวี่ยงสูงสุดที่เกิดขึ้น พื้นที่หน้าตัด และเส้น  
รอบรูปของเข่ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเหวี่ยงแบบพกพา

น้ำหนักตุ้มถ่วง			
ความยาวคาน	0.49 เมตร	น้ำหนักคาน	2.8 กก.
ดิ่งวงแหวน	0.07 เมตร	น้ำหนักคานต่อเมตร	5.714286 กก./เมตร
ดิ่งเข่ารับ	0.42 เมตร		
		โมเมนต์ทวนเข็ม	0.014 kg*m
		โมเมนต์ตามเข็ม	0.504 kg*m
		น้ำหนักตุ้ม	7 kg

รูปที่ 3.11 โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณโมเมนต์ของคานและค่าน้ำหนักของตุ้มถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กคาน												
Fmax (kg)	L/2 (cm)	b (cm)	h (cm)	I (cm^4)	c (cm)	stress (ksc)	maximum allowable stress (ksc)	S (cm^3)	Sreq (cm^3)	Δallow (cm)	Δ (cm)	
15.45	24.5	1.9	3.8	8.688	1.9	82.780	1200	4.572667	0.54075	0.136	0.034	ok
15.45	24.5	1.2	3.2	3.277	1.6	184.827	1200	2.048	0.54075	0.136	0.091	พอใช้ได้
15.45	24.5	1.2	2.5	1.563	1.25	302.820	1200	1.25	0.54075	0.136	0.190	ใช้ไม่ได้
15.45	24.5	1.3	1.4	0.297	0.7	891.346	1200	0.424667	0.54075	0.136	0.999	ใช้ไม่ได้
15.45	24.5	1.6	1.7	0.655	0.85	491.166	1200	0.770667	0.54075	0.136	0.453	ใช้ไม่ได้
15.45	24.5	1.8	2	1.200	1	315.438	1200	1.2	0.54075	0.136	0.248	ใช้ไม่ได้
15.45	24.5	1.9	1.9	1.086	0.95	331.120	1200	1.143167	0.54075	0.136	0.273	ใช้ไม่ได้
15.45	24.5	1.5	4	8.000	2	94.631	1200	4	0.54075	0.136	0.037	ok

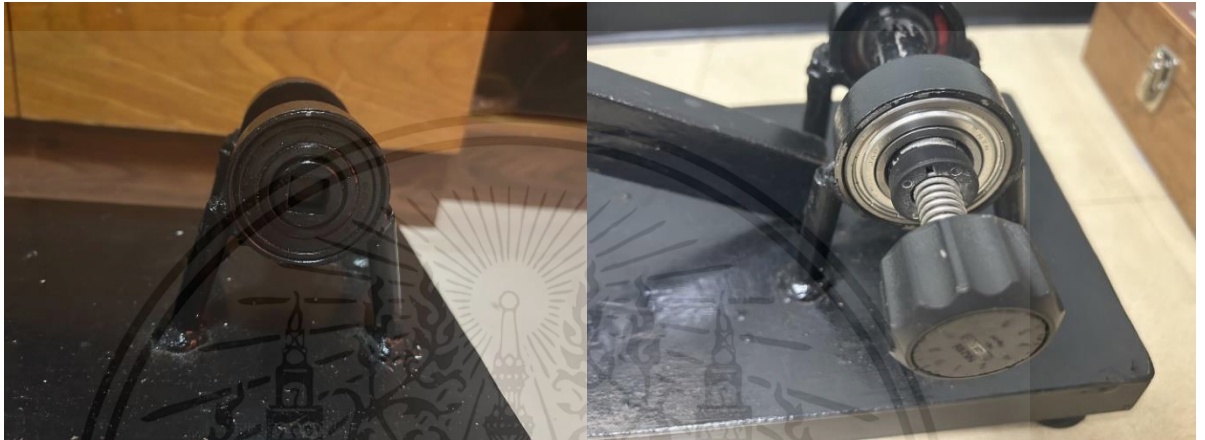
\*สมมติแรงเฉือนสูงสุด=9 ksc Fmax = 13.09 kg \*1.5(เป็นค่าเผื่อ) = 19.64 kg

รูปที่ 3.12 โปรแกรม Microsoft Excel ในการคำนวณค่า Section Modulus และค่า Deflection ของคานที่หน้าตัดต่าง ๆ ที่สามารถหาซื้อได้ทั่วไป

สำหรับหลักเกณฑ์ที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการเลือกเหล็กคาน คือ  $S \geq S_{req}$  และ  $\Delta_{allow} = \frac{L}{360}$

### 3.4 ทดสอบการทำงานของเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

หลังจากที่ได้ออกแบบ ตรวจสอบ และสร้างเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาเรียบร้อยแล้วจึงได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันแล้วตรวจสอบรายละเอียดต่าง ๆ แล้วนำไปทำการสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา



รูปที่ 3.13 เบ้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

สำหรับเบ้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาได้ทำการติดตั้งกับตลับลูกปืน และสามารถติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาเพื่อทำการบิด



รูปที่ 3.14 เส้นเอ็นรับแรงดึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับเส้นเอ็นรับแรงดึงใช้เป็นเอ็นตกลายี่ห้อ JOF Super PE x8 สายถัก 8 เส้นในการรับแรงที่เกิดจากการบิดเบ้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

สายถัก 9 เส้น รุ่น คงคงแบรนด์			
เส้นผ่าศูนย์กลาง (mm)	จำนวนเส้น	ความทนต่อแรงดึง	
		(LB)	(KG)
0.180	1.2	20.0	9.00
0.200	1.5	22.0	9.90
0.230	2.0	28.0	12.70
0.280	3.0	40.0	18.20
0.300	3.5	46.0	20.80
0.320	4.0	50.0	22.60
0.370	5.0	60.0	27.20
0.400	6.0	70.0	31.70
0.450	7.0	80.0	36.20
0.500	8.0	90.0	40.20

(Ref : <https://monster-fishing.com/product/>)

รูปที่ 3.15 ตารางความทนต่อแรงด้านของเส้นเอ็นรับแรงดึง

จากรูปที่ 3.15 เส้นเอ็นสามารถรับแรงดึงได้ เท่ากับ 40.20 kg  $\geq$  แรงดึงสูงสุดที่เกิดจากการบิดเบ้ารับสำหรับติดตั้งเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา เท่ากับ 10.31 kg



รูปที่ 3.16 การติดตั้งตุ้มถ่วงเพื่อให้คานอยู่ในสภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตุ้มถ่วงน้ำหนักจะติดตั้งโดยใช้ตะขอยึดที่ปลายคานฝั่งวงแหวนรับแรงเพื่อทำโมเมนต์ที่เกิดขึ้นกับคานอยู่ในสถานะสมดุล



รูปที่ 3.17 คานก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งตุ้มถ่วง

สำหรับคานเมื่อติดตั้งตุ้มถ่วงน้ำหนักที่ปลายคานฝั่งวงแหวน ตรวจสอบแล้วพบว่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นกับคานอยู่ในสถานะสมดุล



รูปที่ 3.18 การติดตั้งคานเข้ากับจุดรองรับ

สำหรับการติดตั้งคานเข้ากับจุดรองรับทำการติดตั้งโดยใช้ตลับลูกปืนและแท่งเหล็กที่ทำการออกแบบในการติดตั้งชิ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 การติดตั้งวงแหวนรับแรง

สำหรับการติดตั้งวงแหวนรับแรงต้องทำการติดตั้งในความสูงที่มีระดับพอดีกับตัวกดเพื่อให้สามารถรับแรงที่กระทำที่ปลายคานฝั่วงแหวนรับแรงได้



รูปที่ 3.20 ตัวกดและตัวรับแรงกดที่ปลายคานฝั่วงแหวนรับแรง

สำหรับตัวกดและตัวรับแรงกดที่ปลายคานฝั่วงแหวนรับแรง ประกอบเข้าหากันได้ เต็มพื้นที่พอดีทำให้สามารถอ่านค่าแรงต่อพื้นที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดสอบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ

#### 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

1. วงแหวนรับแรง ขนาด 200 กิโลกรัม ความละเอียด 0.002 มิลลิเมตร
2. เครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา ขนาด 9 กิโลกรัม/เมตร<sup>2</sup> ความละเอียด 0.1 กิโลกรัม/เซนติเมตร<sup>2</sup>

#### 4.2 การสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

เมื่อทำการบิดเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาที่ติดตั้งเข้ากับเบ้ารับจะทำให้เกิดแรงบิด (Torque) ซึ่งทำให้ทราบขนาดของแรงดึงเชือกที่เชื่อมต่อกับเบ้ารับและตัวคาน แรงดึงเชือกนี้ทำให้เกิดโมเมนต์ของแรงที่ปลายคานฝั่งเบ้ารับที่อยู่ในสภาวะสมดุล เนื่องจากเกิดโมเมนต์ของแรงที่ปลายคานฝั่งเบ้ารับ จากสมดุลของโมเมนต์ทำให้สามารถทราบขนาดของแรงที่ปลายคานฝั่งวงแหวนรับแรงอ่านได้ ดังนั้นจะได้ค่าที่เครื่องมืออ่านได้จริงมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา

โดยแรงที่เครื่องได้จากการบิดจากการคำนวณทางทฤษฎีสามารถหาได้จากสมการแรงบิด (Torsion formula) ดังสมการที่ 2.4

$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad (2.4)$$

เมื่อ

$\tau$  = หน่วยแรงเฉือนสูงสุด

$c$  = รัศมีของหน้าตัด

$J$  = polar moment of inertia ของพื้นที่หน้าตัด

และจากสมการแรงบิด สมการที่ 2.3

$$T = F \times d \quad (2.3)$$

เมื่อ

$T$  = ขนาดของทอร์ก

$F$  = แรงกระทำ

$d$  = ระยะทางตั้งฉากจากจุดหมุนถึงแนวแรง

จากสมการที่ 3.1

$$\tau = \frac{(F \times r) \times c}{\frac{\pi}{2} c^4} \quad (3.1)$$

ทำการจัดรูปเพื่อหาแรง F จะได้

$$F = \frac{\pi \times c^3}{2r} \tau$$

เนื่องจากการได้เปรียบเชิงกลมีค่าเป็น 7.64 เท่าของแรงที่ใช้ในการบิด ดังนั้นค่าที่วงแหวนรับแรงอ่านจะมีค่าเท่ากับ  $7.64 \times F / (\text{พื้นที่หน้าตัดหัวกด} = 1.77 \text{ ตารางเซนติเมตร})$

และเนื่องจากค่าที่ได้จากการอ่านวงแหวนรับแรงมีหน่วยเป็น Division หรือจำนวนช่อง จึงต้องแปลงแรงที่กระทำในทางทฤษฎีให้เป็นค่าที่วงแหวนอ่านได้โดย

$$142 \text{ ช่อง มีค่าเท่ากับ } 20 \text{ กิโลกรัม} \quad \frac{\text{น้ำหนัก}}{\text{จำนวนช่อง}} = \frac{20 \text{ กิโลกรัม}}{142 \text{ มิลลิเมตร}}$$

ดังนั้นทุก 1.00 ช่อง ค่าที่วงแหวนอ่านได้เท่ากับ 0.1408 กิโลกรัม

ในการทดสอบจะใช้เครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาที่ได้รับการสอบเทียบมาแล้ว จากบริษัท ELLE international โดยแทนค่าในหน่วยแรงเฉือน( $\tau$ ) ทั้งหมด 16 จุด ได้แก่ 1 , 1.5 , 2 , 2.5 , 3 , 3.5 , 4 , 4.5 , 5 , 5.5 , 6 , 6.5 , 7 , 7.5 , 8 และ 8.5 กิโลกรัม/เซนติเมตร<sup>2</sup> โดยทดสอบแต่ละค่าทั้งหมด 3 ครั้ง โดยบิดเป็นจำนวนช่องที่ได้จากการคำนวณในแต่ละจุด จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบในตารางและกราฟ เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา ได้ผลการทดสอบดังนี้

### 4.3 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการทดสอบของเครื่องมือสอบเทียบที่ 1.0 ถึง 8.5 ksc

ที่ Torvane Reading (ksc)	F จาก การ คำนวณ (kg)	F2 จาก การ คำนวณ (kg)	P จาก การ คำนวณ (kg/cm)	Division	Torvane อ่านได้จริง ครั้งที่1 (ksc)	Torvane อ่านได้จริง ครั้งที่2 (ksc)	Torvane อ่านได้จริง ครั้งที่3 (ksc)	ค่าเฉลี่ย (ksc)	error%
1.0	0.902	6.885	3.890	28	2	2	1.9	1.967	49.152
1.5	1.352	10.328	5.835	41	2.4	2.3	2.3	2.333	35.714
2	1.803	13.771	7.780	55	3	2.9	3	2.967	32.584
2.5	2.254	17.214	9.725	69	3.5	3.4	3.5	3.467	27.885
3	2.705	20.656	11.670	83	4.2	4.2	4.1	4.167	28
3.5	3.156	24.099	13.615	97	4.9	4.8	4.9	4.867	28.082
4	3.607	27.542	15.560	110	5.5	5.3	5.5	5.433	26.380
4.5	4.057	30.984	17.505	124	5.8	5.8	5.7	5.767	21.965
5	4.508	34.427	19.450	138	6.1	6.2	6.1	6.133	18.478
5.5	4.959	37.870	21.395	152	6.4	6.5	6.4	6.433	14.508
6	5.410	41.312	23.340	166	6.7	6.7	6.6	6.667	10
6.5	5.861	44.755	25.285	180	7	7	6.9	6.967	6.699
7	6.312	48.198	27.230	193	7.2	7.1	7.2	7.167	2.325
7.5	6.762	51.641	29.175	207	7.7	7.8	7.7	7.733	3.017
8	7.213	55.083	31.121	221	8.3	8.3	8.2	8.267	3.226
8.5	7.664	58.526	33.066	235	8.9	8.9	8.9	8.9	4.494
9	8.115	61.969	35.011	249	9	9	9	9	0
								AVG.	19.532

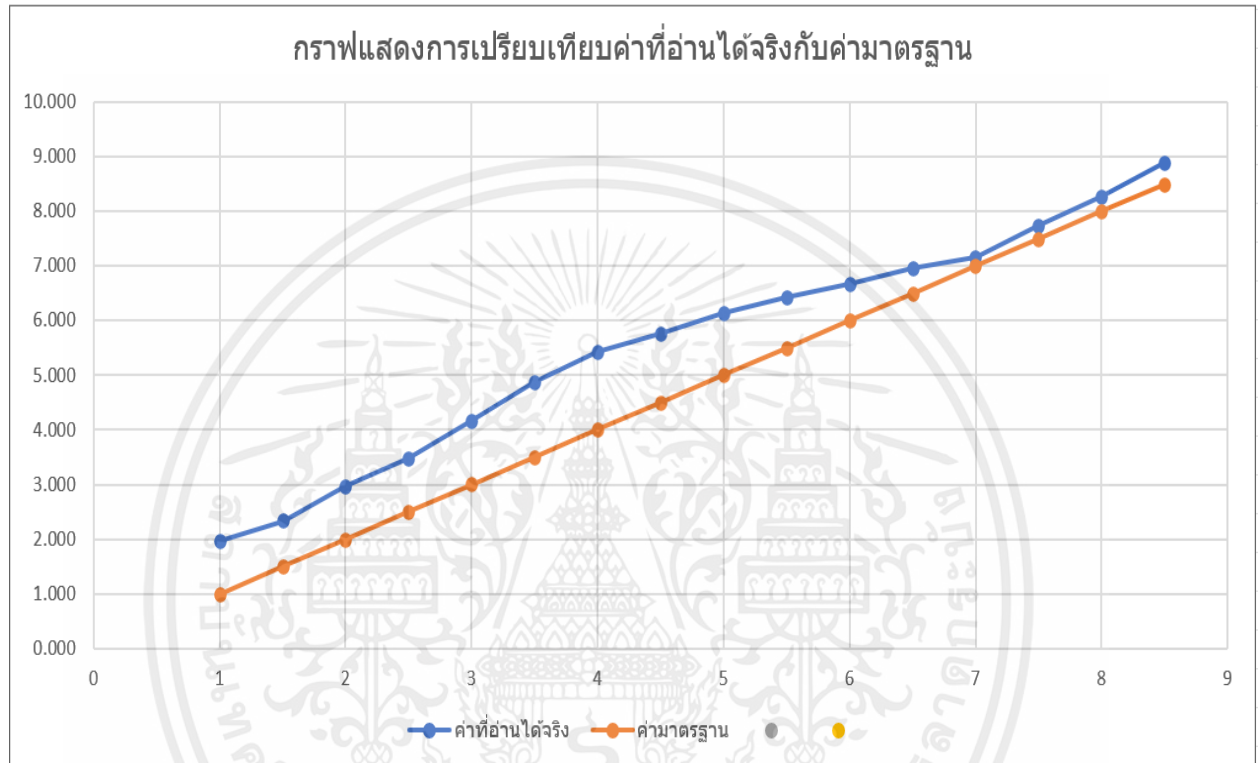
เนื่องจากค่าจากการคำนวณทางทฤษฎีที่ 8.5 ksc มีค่าที่เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนอ่านได้จริงคือ 8.9 ksc ทำให้ค่าจากการคำนวณทางทฤษฎีที่ 9.0 ksc มีแนวโน้มว่าจะมีค่ามากกว่าที่เครื่องมือจะวัดได้ จึงไม่นำมาใช้ในการวัดค่าที่เกิดขึ้นจริง

จากตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์ที่ได้คือ

ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 2.325%

ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 49.152%

ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 19.532%

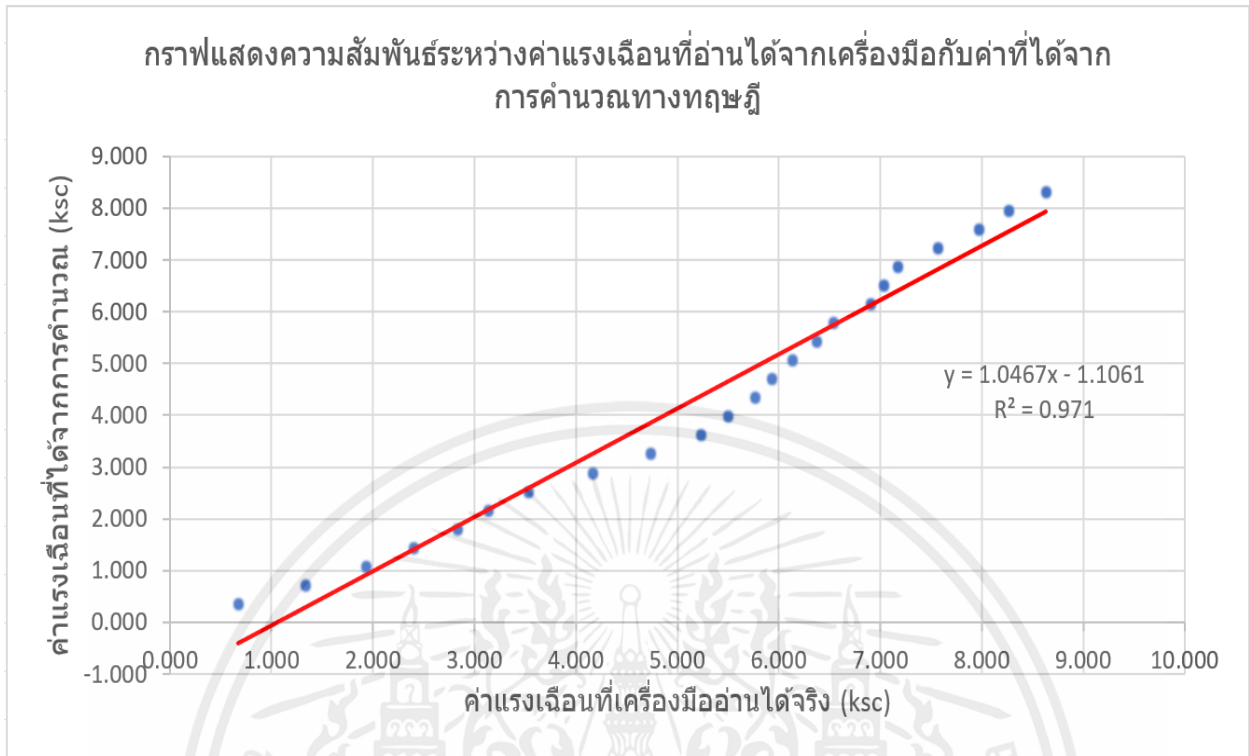


รูปที่ 4.1 และกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าที่อ่านได้จริงกับค่ามาตรฐาน

จากรูปที่ 4.1 และกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าที่อ่านได้จริงกับค่ามาตรฐาน พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่ามากกว่าที่ยอมรับได้ ดังนั้นจึงต้องใช้สมการปรับแก้โดยนำค่าที่อ่านได้จริงจากเครื่องมือมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี โดยทำการบันทึกข้อมูลในทุก 10 Division ของวงแหวนรับแรงตั้งแต่ 10 จนถึง 240 ช่อง ลงในตาราง และเขียนกราฟแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงเฉือนที่อ่านได้จากเครื่องมือกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

ตารางที่ 4.2 ตารางบันทึกผลการทดสอบของเครื่องมือสอบเทียบที่ 10 ถึง 240 ช่อง (Division)

Division	Torvane Reading 1 (ksc)	Torvane Reading 2 (ksc)	Torvane Reading 3 (ksc)	AVG.	P จากการคำนวณ (kg/cm <sup>2</sup> )	F จากการคำนวณ (kg)	ค่า Torvane Reading จากการคำนวณ (ksc)
10	0.7	0.6	0.7	0.667	1.408	2.489	0.362
20	1.3	1.3	1.4	1.333	2.817	4.978	0.724
30	1.9	1.9	2	1.933	4.225	7.467	1.086
40	2.4	2.4	2.4	2.400	5.634	9.956	1.448
50	2.8	2.9	2.8	2.833	7.042	12.445	1.809
60	3.1	3.2	3.1	3.133	8.451	14.934	2.171
70	3.5	3.6	3.5	3.533	9.859	17.423	2.533
80	4.1	4.2	4.2	4.167	11.268	19.911	2.895
90	4.7	4.8	4.7	4.733	12.676	22.400	3.257
100	5.3	5.2	5.2	5.233	14.085	24.889	3.619
110	5.5	5.5	5.5	5.500	15.493	27.378	3.981
120	5.8	5.8	5.7	5.767	16.901	29.867	4.343
130	5.9	6	5.9	5.933	18.310	32.356	4.705
140	6.1	6.1	6.2	6.133	19.718	34.845	5.066
150	6.4	6.4	6.3	6.367	21.127	37.334	5.428
160	6.6	6.5	6.5	6.533	22.535	39.823	5.790
170	7	6.8	6.9	6.900	23.944	42.312	6.152
180	7	7	7.1	7.033	25.352	44.801	6.514
190	7.1	7.2	7.2	7.167	26.761	47.290	6.876
200	7.5	7.6	7.6	7.567	28.169	49.779	7.238
210	8	7.9	8	7.967	29.577	52.268	7.600
220	8.2	8.3	8.3	8.267	30.986	54.757	7.962
230	8.6	8.6	8.7	8.633	32.394	57.246	8.323
240	9	9	9	9.000	33.803	59.734	8.685



เมื่อนำค่าที่ทดสอบได้จากตารางที่ 2 มาเขียนกราฟผลลัพธ์ที่ได้ คือ

สมการปรับแก้  $y = 1.0467x - 1.1061$  ksc

เมื่อ

$y$  = ค่าแรงเหวี่ยงที่เครื่องมืออ่านได้จากการคำนวณทางทฤษฎี

$x$  = ค่าแรงเหวี่ยงที่เครื่องมืออ่านได้จริง

ค่า coefficient of determination ( $R^2$ ) = 0.971

จะได้ว่า

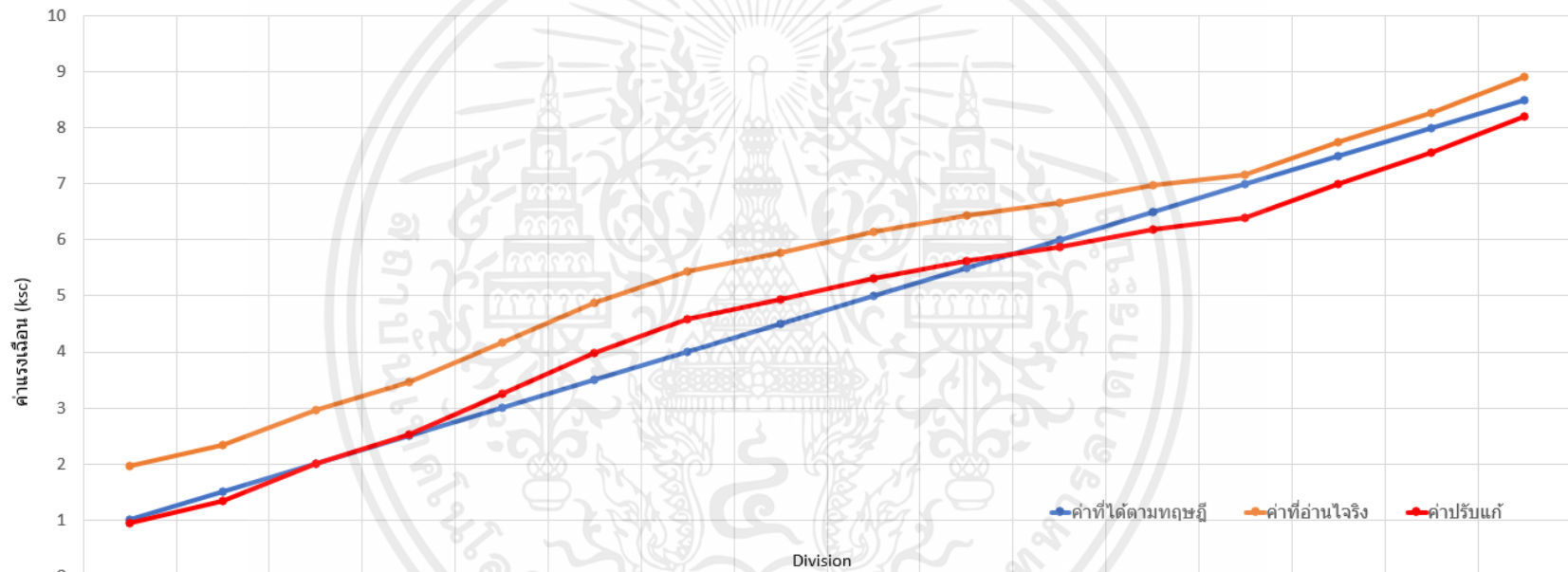
ค่า coefficient of determination ( $R^2$ ) = 0.971  $\geq$  ค่าที่ยอมรับได้ = 0.950

ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือสอบเทียบอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีค่าความเชื่อมั่นที่ 97.10% [2]

**ตารางที่ 4.3** ตารางแสดงค่าความคลาดเคลื่อนและการคำนวณค่าปรับแก้ค่าแรงเฉือนที่อ่านได้จริงจากเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบพกพาโดยใช้สมการปรับแก้

ที่ Torvane Reading (ksc)	ค่าเฉลี่ยจากเครื่องมือที่ อ่านได้จริง (ksc)	error%	ค่าปรับแก้จากสมการปรับแก้	error%
1	1.967	49.152	0.952	4.759
1.5	2.333	35.7143	1.336	10.920
2	2.967	32.584	1.999	0.0445
2.5	3.467	27.885	2.522	-0.898
3	4.167	28.000	3.255	-8.505
3.5	4.867	28.0822	3.988	-13.938
4	5.433	26.380	4.581	-14.524
4.5	5.767	21.965	4.930	-9.553
5	6.133	18.478	5.314	-6.273
5.5	6.433	14.508	5.628	-2.321
6	6.667	10.000	5.872	2.135
6.5	6.967	6.699	6.186	4.832
7	7.167	2.325	6.395	8.639
7.5	7.733	3.017	6.988	6.822
8	8.267	3.226	7.547	5.667
8.5	8.9	4.494	8.210	3.417
<b>avg.</b>	-	<b>19.532</b>	-	<b>-0.549</b>

กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงเดือนที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ค่าที่อ่านได้จริงจากเครื่องมือ และค่าที่ได้จากสมการปรับแก้



	28	41	55	69	83	97	110	124	138	152	166	180	193	207	221	235
ค่าที่ได้ตามทฤษฎี	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5
ค่าที่อ่านใจริง	1.967	2.333	2.967	3.467	4.167	4.867	5.433	5.767	6.133	6.433	6.667	6.967	7.167	7.733	8.267	8.9
ค่าปรับแก้	0.952	1.336	1.999	2.522	3.255	3.988	4.581	4.930	5.314	5.628	5.872	6.186	6.395	6.988	7.547	8.210

ผลลัพธ์ที่ได้ คือ

ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 0.898%

ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 14.524%

ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 0.549%

จะได้ว่า

ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดในแต่ละจุดของเครื่องมือสอบเทียบ = 14.524%  $\leq$  ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของเครื่องมือสอบเทียบในแต่ละจุดที่ยอมรับได้ =  $\pm$  15.000%

ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยสูงสุดของเครื่องมือสอบเทียบ = 0.549%  $\leq$  ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของเครื่องมือสอบเทียบที่ยอมรับได้ =  $\pm$  5.000%

ดังนั้น เครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเหวี่ยงแบบพกพามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีความน่าเชื่อถือ



## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

จากการที่ได้ทำการวิจัยการออกแบบเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ 2565 ถึงเดือน พฤษภาคม 2566 เป็นระยะเวลา 13 สัปดาห์ ส่งผลให้ผู้วิจัยนั้น ทราบถึงหลักการออกแบบ และการนำเครื่องมือมาทดสอบจริง ได้เรียนรู้ทักษะในการออกแบบการสอบเทียบที่ถูกต้องตามหลักมาตรฐาน ทราบถึงปัญหาที่ไดพบเจอในการทำงานและวิธีแก้ไขปัญหานั้น ทำให้ได้รับความรู้ในด้านงานออกแบบเครื่องมือ ว่ามีการทำงานอย่างไร และสามารถออกแบบเพื่อใช้งานได้อย่างไร โดยนำความรู้จากบทเรียนมาใช้อย่างเป็นรูปธรรม โดยการวิจัยในครั้งนี้อาจารย์ที่ปรึกษามอบหมายให้ ออกแบบเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา และนำไปใช้ในการสอบเทียบจริง ทำให้ได้รับประสบการณ์ การออกแบบและนำไปใช้งานจริงรวมถึงทราบปัญหาที่เกิดขึ้นกับตัวเครื่องมือ และปัจจัยต่างๆ ซึ่งทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนของตัวเครื่องมือสอบเทียบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา โดยแทนค่าในหน่วยแรงเฉือน( $T$ ) ทั้งหมด 16 จุดได้แก่ 1 , 1.5 , 2 , 2.5 , 3 , 3.5 , 4 , 4.5 , 5 , 5.5 , 6 , 6.5 , 7 , 7.5 , 8 และ 8.5 กิโลกรัม/เซนติเมตร<sup>2</sup> โดยทดสอบแต่ละค่าทั้งหมด 3 ครั้ง โดยบิดเป็นจำนวนช่องที่ได้จากการคำนวณในแต่ละจุด จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบในตารางและกราฟ เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพา ได้ผลลัพธ์ดังนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 2.325% ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 49.152% ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 19.532% สมการปรับแก้สำหรับเครื่องมือสอบเทียบนี้ คือ  $y = 1.0467x - 1.1061$  และค่า coefficient of determination ( $R^2$ ) = 0.971 เมื่อปรับแก้ค่าแล้วได้ผลลัพธ์ดังนี้ ค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 0.898% ค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 14.524% ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของเครื่องมือสอบเทียบมีค่า เท่ากับ 0.549% ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า เครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และมีความน่าเชื่อถือ แต่ยังมีข้อผิดพลาดบางประการที่ทำให้ไม่สามารถปรับแก้ให้สอดคล้องกันกับค่าที่คำนวณทางทฤษฎีได้

การในการออกแบบเครื่องมือสอบเทียบเครื่องมือวัดแรงเฉือนแบบพกพาและทำการนำมาทดสอบหาความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือสอบเทียบเพื่อนำไปใช้งานจริงนั้นส่งผลให้เกิดประโยชน์ในหลายด้าน ดังนี้

- 5.1.1 ได้ประสบการณ์และการวางแผนการทำงาน
- 5.1.2 ได้ความรู้เกี่ยวกับหลักการทำงานของเครื่องมือและการออกแบบเครื่องมือ
- 5.1.3 ได้ประสบการณ์การนำเครื่องมือไปใช้งานจริงในการทดสอบ
- 5.1.4 ได้ความรู้เกี่ยวกับการสอบเทียบเครื่องมือและการหาค่าปรับแก้
- 5.1.5 ได้พูดคุย ปรัชญาปัญหาและหาวิธีแก้ไขปัญหากับอาจารย์ที่ปรึกษา

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากตอนเรียนมีเพียงความรู้ขั้นพื้นฐาน ยังไม่เพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้จริง จึงต้องเรียนรู้และศึกษาการใช้เครื่องมือใหม่ ในเรื่องของหลักการทำงานของเครื่องมือ รวมถึง หลักการออกแบบเครื่องมือสอบเทียบ และหลักการสอบเทียบ ทำให้การทำงานในช่วงแรกไม่ราบรื่น

5.2.2 อาจมีตัวแปรหรือปัจจัยอื่นที่ผู้วิจัยยังไม่ได้ค้นคว้าเพื่อใช้ในการคำนวณในครั้งนี ทำให้มีข้อผิดพลาดหรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น เช่น การยึดตัวของเส้นเอ็น ความผิดในเบ้าบิต ซึ่งหากทราบถึงปัจจัยเหล่านั้นก็จะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้เที่ยงตรงมากขึ้น

5.2.3 การออกแบบในครั้งนีใช้วัสดุที่หาได้ทั่วไปเนื่องจากข้อจำกัดบางประการ ซึ่งในอนาคตสามารถทดแทนได้ด้วยวัสดุที่ดีกว่า เช่น มีน้ำหนักเบา แข็งแรงและทนทานกว่าในการใช้งาน

5.2.4 ในขั้นตอนการผลิตเครื่องมือสอบเทียบ อาจมีความคลาดเคลื่อน เช่น น้ำหนัก ระยะเวลาหมุน ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนไปจากที่ควรจะเป็นดังนั้นอาจใช้กระบวนการผลิตที่ทันสมัยกว่า เช่น ปัญญาประดิษฐ์ เพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำตามที่ออกแบบ

5.2.5 ในขั้นตอนการสอบเทียบอาจมีการใช้อุปกรณ์ที่มีค่าความละเอียดสูงกว่าที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เช่น ใช้ Proving Ring ขนาด 100 kg ละเอียด 0.001 mm. ในการทดสอบเพื่อให้ค่าที่ได้แม่นยำเที่ยงตรงมากขึ้น

## 5.3 ประโยชน์จากการทำงานวิจัย

### 5.3.1 ประโยชน์ต่อตนเอง

- ได้รับประสบการณ์ตรงตามวิชาชีพ
- ได้ทักษะจากการทำงานวิจัยที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงในอนาคต
- ได้พัฒนาตนเอง และได้รับความรู้ใหม่

### 5.3.2 ประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัย

- ได้ข้อมูลจากงานวิจัย ที่สามารถนำมาปรับปรุงหรือเพิ่มเติมสำหรับการเรียนการสอน

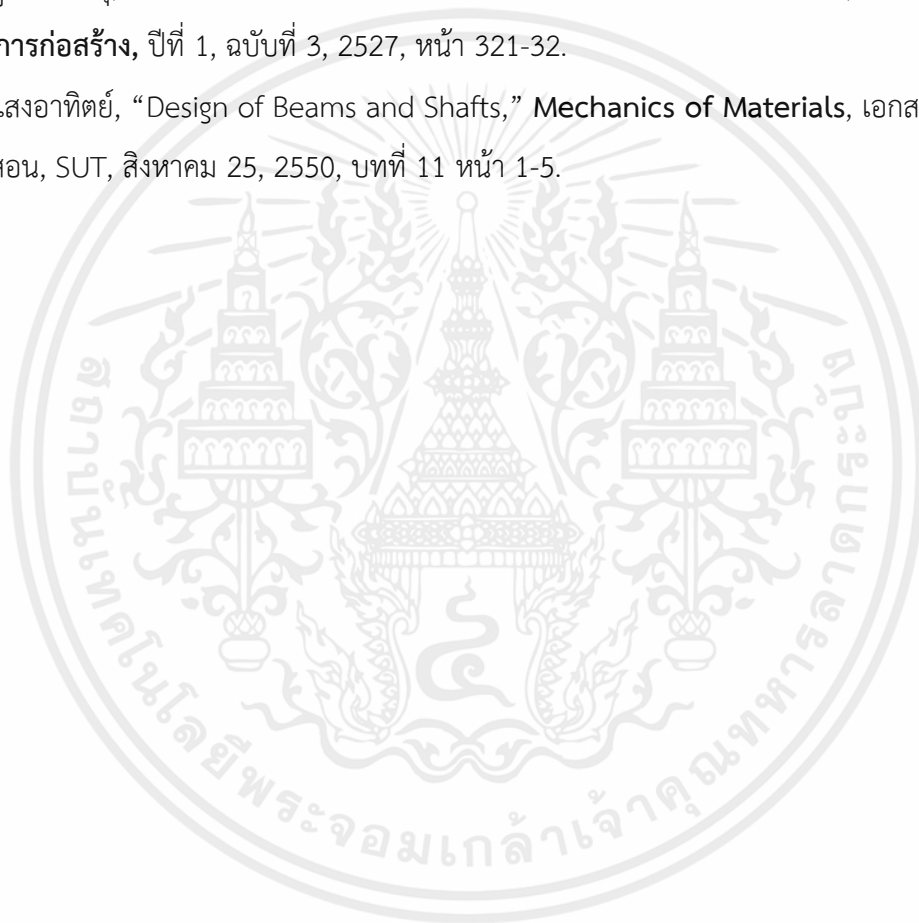


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] A. D. Loach, **Torvane and Penetrometer Quick Start Guide**, Confluence, Retrieved December 27, 2022, from <https://wiki.iodp.tamu.edu/display/LMUG/Torvane+and+Penetrometer+Quick+Start+Guide>.
- [2] D. Stone, **Calibration and Linear Regression Analysis: A Self-Guided Tutorial**, Instrumental Analysis, Department of Chemistry, University of Toronto, September 10, 2004, p. 5.
- [3] K. Benjamin, “Simplified Procedure to Determine Maximum Beam Deflection”, **Engineering Journal**, American Institute of Steel Construction, Vol. 4, 1967, pp.123-125.
- [4] L. C. Rodriguez, M. Ana, G. Campaia, C. J. Linares and M. R. Ceba, **Estimation of performance characteristics of an analytical method using the data set of the calibration experiment**. Analytical Letters, 1993, 26(6), pp. 1243-1258.
- [5] NGThai, **โมเมนต์ของแรงในเชิงวิทยาศาสตร์**, National Geographic ฉบับภาษาไทย, ตุลาคม 19, 2565, สืบค้นจาก <https://ngthai.com/science/44847/moment-of-force/>
- [6] P.S.E. Admin, **ความดัน pressure**, บริษัท พรีเมียมซิสเต็มเอนจิเนียริง จำกัด, มีนาคม 16, 2563, สืบค้นจาก <http://pse-cal.com/2019/03/16/ความดัน-pressure/>.
- [7] R. A. Serway, and Jr. Jewett, **Physics for Scientists and Engineers**, 7th ed., Belmont, Thomson Learning, Inc., 2008, pp.282-283.
- [8] R. C. Hibbeler, **Mechanics of Materials**, 8th ed., New York, Pearson, 2011, pp. 182-185.
- [9] S. Turney, **Coefficient of Determination Calculation & Interpretation**, Scribbr, Retrieved April 22, 2022, from <https://www.scribbr.com/statistics/coefficient-of-determination/>.
- [10] Tuemaster Admin, **เรียนฟิสิกส์ โมเมนต์ของแรง (moment of force)**, Totoroui-plus, มีนาคม 21, 2564, สืบค้นจาก <https://tuemaster.com/blog/เรียนฟิสิกส์-โมเมนต์ของแรง/>.
- [11] V. J. Go, **FIELD VANE SHEAR TEST IN COHESIVE SOIL**, Laboratory Report, Gokongwei College of Engineering De La Salle University, January 22, 2020.

- [12] Wayback Mechine, **เครื่องกลและเครื่องยนต์ในการขนส่ง**, Internet Archive, ตุลาคม 15, 2550, สืบค้นจาก  
<https://web.archive.org/web/20080731222140/http://www.geocities.com/sci123th/m17.html>.
- [13] ไม่ทราบชื่อผู้เขียน, “การวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย,” เอกสารประกอบการเรียนการสอน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ตุลาคม 14, 2548, หน้า 182-186.
- [14] สถาพร คูวิจิตรจาร์, “ข้อสังเกตบางประการในการออกแบบและสร้างวงแหวนวัดแรง,” **วารสารวิศวกรรมโยธาและการก่อสร้าง**, ปีที่ 1, ฉบับที่ 3, 2527, หน้า 321-32.
- [15] สิทธิชัย แสงอาทิตย์, “Design of Beams and Shafts,” **Mechanics of Materials**, เอกสารประกอบการเรียนการสอน, SUT, สิงหาคม 25, 2550, บทที่ 11 หน้า 1-5.





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลอุปกรณ์

### 1. Torvane Shear Device [1]

#### 1.1 Introduction

The Torvane shear device (ELE International model 26-2261) enables the user to quickly determine the shear strength of cohesive soils.

Three sizes of vanes are supplied with Torvane

- The standard vane (25.4 mm diameter) has a stress from 0 to 1 kg/cm<sup>2</sup>, this is also the approximate range of torque that can be easily applied by finger pressure. It is used for fully saturated cohesive soils with undrained strength independent of normal pressure. The stress range permits it to be used for clays varying in consistency from very soft to stiff.
- The sensitive vane (47.5 mm diameter) is provided for use with remolded samples. It is for a range of 0 to 0.2 kg/cm<sup>2</sup>. It has a ratio of 0.2.
- The high-capacity vane (19 mm diameter), it is used with stiffer clays. It is for a range of 0 to 2.5 kg/cm<sup>2</sup>. It has a ratio of 2.5.



รูป ก.1 Torvane shear device (ELE International)

- The pocket penetrometer was developed by Soiltest Inc. for use by field engineers to check the visual classification of soils. The readings of the penetrometer were compiled from several thousand unconfined compression tests of silty and clay-like soils.

## 1.2 Procedures - Making a Measurement

- 1) Select the appropriate vane size and fit for the vane driver.



รูป ก.2 Vane driver and the 3 kinds of vanes.

- 2) Make sure zero on dial is aligned with index mark on knob, rotating counterclockwise the dial face.



รูป ก.3 Dial aligned.

- 3) Test the surface, should be reasonably flat and at least two inches in diameter.
- 4) Press Torvane into soil to depth of blades and maintain a constant vertical pressure while turning knob. A rate of rotation such that failure develops in five to ten seconds is recommended.



รูป ก.4 Shear meter correct position.

5) After failure develops, release the remaining spring tension slowly and the index mark on the knob will indicate the maximum shear value.



รูป ก.5 Result at the end of the measurement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. Proving Ring [14]

วารสาร วิศวกรรมศิลา และ การก่อสร้าง ปีที่ 1 2527 321

**ข้อสังเกตบางประการในการออกแบบและสร้างวงแหวนวัดแรง**  
**Some Notes on Design and Manufacture of Proving Ring**

สถาพร ฐวิจิตรจาวู M.Eng.\*

**บทนำ**

วงแหวนวัดแรง (Proving Ring) ที่ใช้ในท้องตลาดทั่วไป เป็นวงแหวนที่เลือกเหมาะในการวัดแรงแต่ละขนาด ภายในติดตั้ง Dial Gauge เพื่ออ่านค่าการยุบตัวของวงแหวนเหล็กเมื่อใช้กดน้ำหนัก วงแหวนวัดแรงที่เหมาะสมสำหรับใช้ในท้องตลาดควรจะมบดัดดังต่อไปนี้

- 1) มีลักษณะมั่นคงแข็งแรง ทนสภาพต่อการใช้งานได้ดีไม่เสียหายง่าย
- 2) ลักษณะการออกแบบให้การทรงตัวดี ยึดวงแหวนเพียงตรง ไม่หลุดหลวมออกเลย และมีเกลียวสำหรับต่อเข้าเครื่องทดลองได้สะดวก
- 3) ติดตั้ง Dial Gauge ที่มีความละเอียดพอสำหรับงานที่จะใช้สำหรับวงแหวนแรงที่ในท้องตลาด โดยทั่วไปใช้ Dial Gauge อ่านละเอียด 0.0001 นิ้ว หรือ 0.002 หรือ 0.001 มม. ถ้า Dial Gauge จะต้องเคลื่อนตัวไค้คล้องไม่ติดขัด การทำความตักาน Dial Gauge ใช้แอลกอฮอล์เช็ด ห้ามทาน้ำมันจะทำให้ฝุ่นจับและผิด
- 4) การสอบเทียบ (Calibration) กระทำได้ง่าย ให้ค่าความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักจริง และค่ายุบตัวของ Dial Gauge เป็นเส้นตรง(Linear) วงแหวนเหล็กมีบิตดัดที่ไม่ยืดหรือล้า ให้ค่าการสอบเทียบคงที่
- 5) มีความไว(Sensitivity) พอเหมาะ ไม่อ่อนไป(จะทำให้วงแหวนยุบตัวเมื่อถูกกดมีผลให้ Strain Rate ที่ตั้งไว้ลดลงมาก) และไม่แข็งไป-ความไวน้อยไป

การใช้วงแหวนวัดแรง เพื่องานทดสอบวัสดุ หรือใช้เพื่อสอบเทียบ(Calibr - ค่าน้ำหนักที่จำเป็นในการทดสอบ มีความสำคัญมาก ทั้งในด้านความถูกต้องของค่าก และทั้งในด้านความยุติธรรมทั้ง เจ้าของงานและผู้รับจ้าง ในกรณีใช้วงแหวนวัดแรง

---

หน้าผู้ควบคุมห้องทดลองการวิจัย แผนกวิศวกรรมธรณีและการขนส่ง สถาบันเทคโนโลยี  
 ังเอเชีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับรอง(Certify) การทดสอบในงานก่อสร้างต่าง ๆ ผู้ใช้วงแหวนวัดแรงจึงควรได้พิจารณาเข้าในระบบและหลักการของวงแหวนวัดแรงให้ถี่ถ้วนแต่ ในบางกรณีวิศวกรมีความจำเป็นต้องใช้วงแหวนวัดแรงนอกเหนือไปจากวงแหวนวัดแรงที่ซื้อจากบริษัทผู้ผลิตเครื่องมือทดสอบด้วยเหตุผลใด ๆ ก็ตาม รวมทั้งเหตุผลในด้านเศรษฐกิจ(วงแหวนวัดน้ำหนักทั่วไปมีราคาแพง) ก็สามารถออกแบบและสร้างวงแหวนวัดแรงได้ โดยที่สามารถวัดแรงได้ถูกต้องวัดอุณหภูมิ ซึ่งเป็นจุดประสงค์หลักของบทความนี้

## 2. การออกแบบวงแหวนวัดแรง

หลักการออกแบบวงแหวนวัดแรงเพียงต้องคำนวณค่าแรงเค้นที่ปลอดภัย (Safe Stress) เพื่อให้ได้ขนาดวงแหวนที่พอเหมาะและมีความไวที่เหมาะสม การคำนวณสามารถหาได้จากสูตร (Theory of Thin Ring) ซึ่งค่ายุบตัวของวงแหวนสามารถหาได้จากสูตร (BISHOP & HENKEL, 1957) :

$$\delta = \frac{1.79Pr^3}{Ebt^3}$$

เมื่อ

$\delta$  = ค่ายุบตัวของวงแหวนเหล็กในแนวรัศมี (Radial) ที่จุดแรงกระทำ

$P$  = น้ำหนักกระทำ, ปอนด์

$r$  = ค่ารัศมีเฉลี่ยของวงแหวน, นิ้ว

$b$  = ความกว้างของวงแหวน, นิ้ว

$t$  = ความหนาของวงแหวน, นิ้ว

$E$  = Modulus of Elasticity ของวงแหวนเหล็ก, ปอนด์ต่อตาราง

ส่วนค่าแรงเค้นที่ผิว (Fiber Stress) หาได้จากสูตร :

$$f = \frac{6Pr}{bt^3}$$

และค่าความไว (Sensitivity) หรืออัตราส่วน  $\frac{P}{\delta}$  จะเป็น :

$$\text{Sensitivity, } \frac{P}{\delta} = \frac{Ebt^3}{1.79r^3} \quad \text{ปอนด์/นิ้ว}$$

โดยทั่วไปวงแหวนวัดน้ำหนักจะใช้ Dial Gauge ขนาดอ่านละเอียดขีด (Division) ละ 0.0001 นิ้ว ( $1 \times 10^{-4}$  นิ้ว) เพราะฉะนั้นเมื่อคิดความไวในหน่วยปอนด์ต่อขีด

$$\text{Sensitivity, } \frac{P}{\delta} = \frac{Ebt^3}{1.79r^3} \times 10^{-4} \quad \text{ปอนด์/ซัด} \quad (4)$$

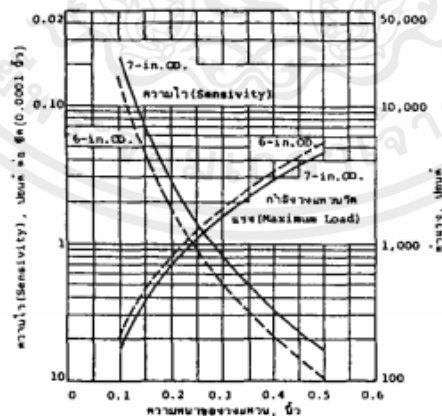
เพื่อให้ให้การออกแบบได้ขนาดวงแหวนที่พอเหมาะกล่าวคือ ให้ความไวสูง วัสดุมาใช้ทำวงแหวนควรเป็นเหล็ก High Tensile หรือเหล็ก High Carbon หรือเหล็กชิง (Heat-treated) หรือวงของลูกปืน (Ball Bearing Race) ที่ใช้แล้ว (LAMBE, 1) โดยกำหนดค่าแรงเค้นปลอดภัยไว้ประมาณ  $f = 112,000-144,000$  ปอนด์/ตร.นิ้ว ไม่มีการทดสอบเหล็กที่ใช้เพื่อหาค่า Modulus of Elasticity (E) อาจใช้ค่า

$30 \times 10^6$  ปอนด์/ตร.นิ้ว สำหรับเหล็กทั่วไป ซึ่งผลการคำนวณจะไม่คลาดเคลื่อนมากนัก

การเลือกออกแบบขนาดของวงแหวนเพื่อให้ได้ช่วงค่าความไวที่ต้องการ ต้องกความหนาและความกว้างที่เหมาะสม โดยปกติวงแหวนวัดน้ำหนักที่ใช้ในห้องทดลองมักขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6-8 นิ้ว การเพิ่มความหนาของวงแหวนจะทำให้ค่าไวลดลงได้เร็วกว่าค่ากำลัง (Load Capacity) ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการออกแบบควรจะเป็นแบบให้วงแหวนกว้างไว้ โดยปกติวงแหวนวัดแรงที่ใช้ทั่วไปจะกว้างประมาณ 1-2 นิ้ว

กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างความไว (Sensitivity) และกำลัง (Maxi-Load) และความหนาของวงแหวนสำหรับวงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 และ 7 นิ้ว รูปที่ 1 นี้ แสดงในรูปที่ 1

ขนาดวงแหวนวัดแรงที่ใช้ในห้องทดลอง ควรมีขนาดต่าง ๆ กันสำหรับเลือกใช้ ความอ่อน-แข็งของดินและวัสดุที่ทดสอบ



รูปที่ 1 กราฟแสดงคุณสมบัติของวงแหวนวัดแรงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก 6-7 นิ้ว ทำจากเหล็ก High Tensile ขนาดกว้าง 1 นิ้ว (BISHOP & HENKEL, 1957)

### การสอบเทียบ (Calibration)

เมื่อได้ออกแบบและทำวงแหวนวัดแรงจนเสร็จเรียบร้อยแล้วควรชุบโลหะ (สังกะสี โคโรเมียม) เพื่อกันสนิม ตรวจสอบความเรียบร้อยอีกครั้งหนึ่ง การสอบเทียบวงแหวนแรงทำได้หลายวิธี สำหรับวงแหวนวัดแรงที่ใช้วัดแรงไม่มาก สามารถใช้ค้อนน้ำหนักวางถ่วงบนขอแขวนน้ำหนักที่ตั้งบนวงแหวนวัดแรง ส่วนวงแหวนวัดแรงขนาดกลาง อาจใช้น้ำหนักร่วมกับคานตืด (Lever Arm) หรือการสอบเทียบด้วยการกดปะทะกับวงแหวนวัดแรงรฐานด้วยเครื่องกด (Compression Machine)

การสอบเทียบวงแหวนวัดแรงที่ทำขึ้นใหม่ ๆ ควรจะค่อย ๆ เพิ่มค้อนน้ำหนัก-ลดน้ำหนักลงเป็นศูนย์ แล้วจึงเพิ่มน้ำหนักขึ้นใหม่เป็นระดับ ๆ จนถึงน้ำหนักสูงสุดที่ออกแบบไว้ว่าที่ลดน้ำหนักลงเป็นศูนย์นี้ ควรจะตรวจสอบความเรียบร้อยต่าง ๆ ทันทีที่ลดน้ำหนักลง ศูนย์ดูว่า Dial Gauge ชี้กลับที่ศูนย์หรือไม่ (เคาะเดือนเบา ๆ) ตรวจสอบสกรูยึดประกับ ลวมขันให้แน่น ระหว่างการสอบเทียบ เปรียบเทียบค่าการยุบตัวของ Dial Gauge ที่น้ำหนักเดียวกันว่ามีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่ ระหว่างสอบเทียบแต่ละระดับน้ำหนักทดลอง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักและค่ายุบตัวของ Dial Gauge ว่าเป็นเส้นตรงหรือไม่ ถ้าไม่เป็นเส้นตรงควรตรวจสอบข้อผิดพลาดที่อาจเป็นไปได้

รูปที่ 3 แสดงผลการทดสอบวงแหวนวัดน้ำหนักที่ทำขึ้นขนาด 10 ดัน ส่วนข้อมูลนที่กการสอบเทียบแสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางสอบเทียบวงแหวนวัดแรงขนาด 10 ดัน ที่ทำขึ้น

วงแหวนวัดแรงขนาดตาราง		ค่ายุบตัว Dial Gauge, มม.(0.002 มม.)						ค่าคงที่
มม.(0.002)	แรง, กก.	1	2	3	4	5	เฉลี่ย	กก./มม.
0	0	0	0	0	0	0	0	-
60	500	59.0	58.5	59.5	59.0	58.5	59.0	8.47
122	1,000	122.0	122.0	122.0	122.0	121.5	122.0	8.20
183	1,500	185.0	185.0	185.0	185.0	184.0	185.0	8.11
245	2,000	249.0	248.5	249.0	248.5	248.0	248.0	8.06
307	2,500	314.0	313.0	314.0	313.0	312.0	313.0	7.99
369	3,000		377.0	376.5	376.5	376.0	376.5	7.97
431	3,500		439.5	440.0	439.5	439.0	439.5	7.96
493	4,000		503.0	504.0	503.0	503.0	503.0	7.95
617	5,000			633.0	632.5	632.5	632.5	7.91
742	6,000			761.0	760.0	760.0	760.0	7.89
867	7,000				887.5	887.5	887.5	7.89
993	8,000				1015.0	1015.0	1015.0	7.88
1120	9,000					1145.5	1145.5	7.86
1250	10,000					1279.0	1279.0	7.82
						เฉลี่ย		8.00

รูปที่ 14 เมษายน 2526

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูป ข.1 ตรวจสอบน้ำหนักคาน น้ำหนักคาน เท่ากับ 2.80 กิโลกรัม



รูป ข.2 ตรวจสอบน้ำหนักตุ้มถ่วง น้ำตุ้มถ่วง เท่ากับ 7.03 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข.3 ตรวจสอบระยะจากปลายคานฝั่งวงแหวนถึงจุดหมุน เท่ากับ 7.00 เซนติเมตร

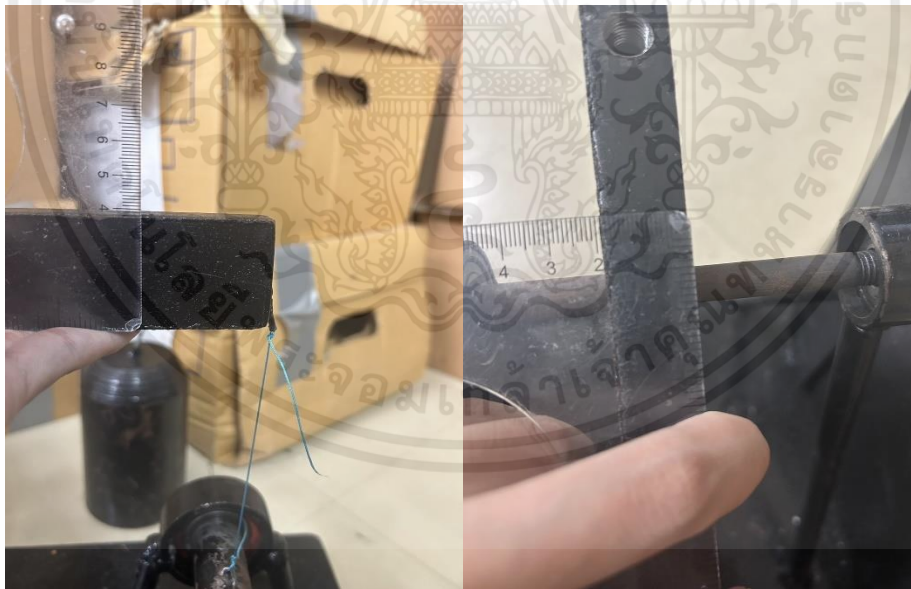


รูป ข.4 ตรวจสอบระยะจากกึ่งกลางตัวกตถึงจุดหมุน เท่ากับ 5.50 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข.5 ตรวจสอบความยาวคาน เท่ากับ 49.00 เซนติเมตร ดังนั้นระยะจากปลายคานฝั่งเข้ารีบ เท่ากับ 49.00-7.00 เท่ากับ 42.00 เซนติเมตร

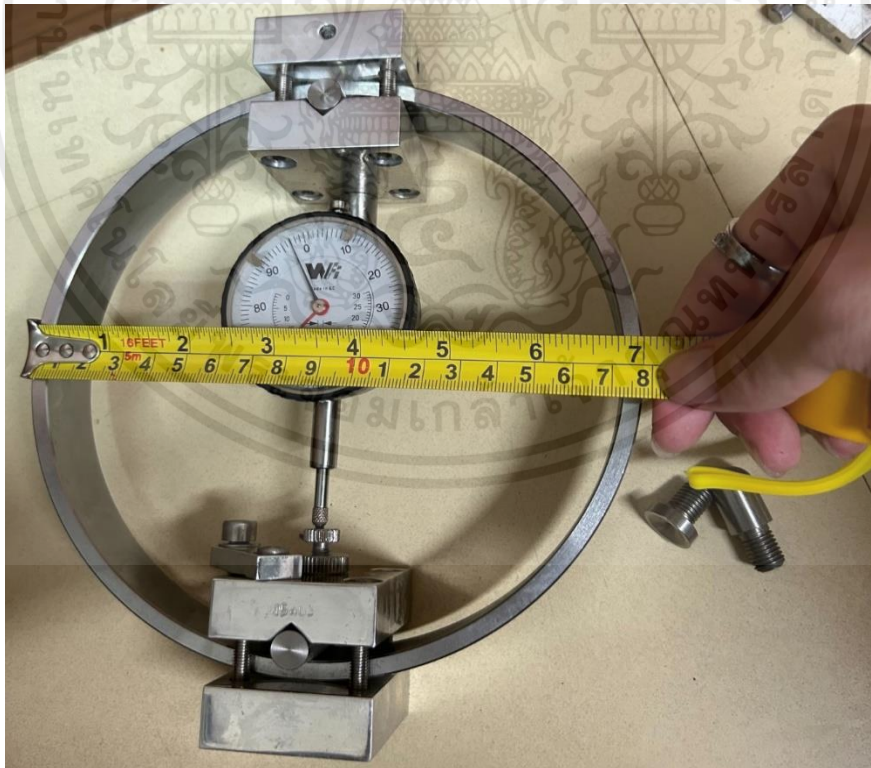


รูป ข.6 ตรวจสอบขนาดหน้าตัดคาน คานมีขนาดเท่ากับ 1.90 × 3.80 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป ข.7 ตรวจสอบขนาดวงแหวนรับแรง ความสูงของวงแหวนมีขนาดเท่ากับ 20.90 เซนติเมตร



รูป ข.8 ตรวจสอบขนาดวงแหวนรับแรง ความกว้างของวงแหวน 17.80 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## USE AND CARE OF LOAD RINGS FOR TRIAXIAL TESTS

### THE LOAD RING

The fabricated load rings are designed for ultra sensitivity. The great majority of the range have rings made from tempered high tensile steel and are fitted with precision blocks. The calibration tests are carried out on a dead load rig in our Works. All rings will retain elastic properties providing no load in excess of 100% above the capacity rating, are applied.

### APPLICATION OF LOAD RINGS

Our rings have the same basic construction throughout the range, with the exception that the higher capacity rings e.g., in excess of 1000 lbs or 500 kgf, have strengthened blocks and bolts.

The load rings supplied with Triaxial equipment have fixing pins at right angles to the plane of the ring, whilst for the shearbox proving rings, these pins are parallel to the plane of the ring.

### TRIAXIAL TEST

These are fitted with locating ends to suit our machines. It has to be mounted and suspended, from the two tension springs hanging from the cross beam of the testing machine or onto the ball seating where fitted. The female cone seating will then be located below, but not in contact with the male hemispherical pin fitted to the cross beam. The triaxial cell ram has a female conical end, which is below the proving ring male hemispherical bolt located in the lower block, when the triaxial cell is mounted on the platen of the triaxial machine.

When this is done the platen should be raised until contact is just made, which will be indicated by the dial gauge pointer just moving. The moment a small movement is noted, stop platen motion and rotate the dial gauge cover until pointer is zeroed. Then, using the calibration figures, the proving ring can be utilised for load measurement.

### CONSOLIDATION AND SHEARBOX TESTS

This follows a similar pattern of dial gauge operation i.e., the face is zeroed when the machine is in the stationary starting point before commencing the test.

When using residual procedures on the shearbox machine, it is necessary to reverse the zeroing technique with the ring in tension. The tailstock screw is unlocked and released until all compression is removed from ring, then the screw is re locked and the dial gauge reset to the reading shown on the tension calibration figures.

### CARE OF LOAD RINGS

Ensure that rings are never loaded past their maximum capacity. If this occurs or the rings are accidentally dropped, recalibration will be necessary. This can be carried out at our Works.

We recommend that all load rings are recalibrated every two years to ensure that the figures supplied with each ring are still valid.

**TOOLQUIP**  
Leicester  
LE67 5FT  
England

Tel: +44 (0) 1530 813655  
Fax: +44 (0) 1530 812054  
e-mail: sales@toolquip.co.uk

## รูป ข.9 คู่มือการใช้งานวงแหวนรับแรงที่นำมาใช้ในการทดสอบ

**TOOLQUIP International Ltd.**  
 Britannia House, Goliath Road  
 Hermitage Industrial Estate,  
 Coalville  
 LE67 5FT  
 England

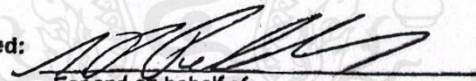
Tel: +44 (0) 1530 813655  
 Fax: +44 (0) 1530 812054  
 E-mail: sales@toolquip.co.uk

**WF No.:** 14120      **Ring No.:** 15403  
**Capacity:** 200 Kg.      **1 Division:** .002 mm

LOAD	COMPRESSION	TENSION
Kilograms Force	Division	Division
0	0	
20	142	
40	282	
60	426	
80	569	
100	714	
120	858	
140	1002	
160	1147	
180	1292	
200	1440	

A copy of this certificate is retained at our Works for reference and replacement purposes.

Signed:

  
 For and on behalf of  
 Quality Control

Date: 6<sup>th</sup> June 2000

Standard: ASTM

รูป ข.9 ข้อมูลการสอบเทียบ หมายเลขกำกับ และรายละเอียดของวงแหวนรับแรงที่นำมาใช้ใน

การทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## Calibration and Linear Regression Analysis: A Self-Guided Tutorial

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Calibration and Linear Regression Analysis: A Self-Guided Tutorial [2]

### Calibration and Linear Regression Analysis: A Self-Guided Tutorial

Part 1 – Instrumental Analysis with Excel: The Basics

CHM314 Instrumental Analysis

Department of Chemistry, University of Toronto

Dr. D. Stone (prepared by J. Ellis)

#### 1 Introduction - Instrumental Analysis and Calibration

Instrumental analysis is very important in all areas of analytical chemistry. Modern analytical chemistry is a quantitative science, meaning that the desired result is almost always numeric. We need to know there is 55  $\mu\text{g}$  of mercury in a sample of water, or 20 mM glucose in a blood sample. Quantitative results for analytical chemistry are obtained using devices or instruments that allow us to determine the concentration of a chemical in a sample from an observable signal.

Before an instrument can be successfully used to determine a concentration, it must be *calibrated* for values in the range that it is to be used. This normally involves testing samples of known concentration, known as standards, and measuring the corresponding signal from the device. This is performed over the entire operating range of the instrument, or at least within the linear range, to statistically generate a *calibration curve* for the device. In this brief tutorial, the basic fundamentals of calibration curve determination will be covered, including linear regression and correlation. As well, the basics of statistical analysis using Microsoft™ Excel will be presented.

A calibration curve is an equation relating the output signal of an instrument, such as an electrical voltage or current, to the quantity that the instrument measures. In the simplest form, the calibration curve will take the form of the equation of a straight line, with a slope and a y-intercept, determined by statistical analysis of the calibration data. Other equations can be used, such as logarithmic or polynomial fits. These will be explained in later sections.

Throughout this tutorial, all steps and examples are performed using MS Excel. However, the information and techniques can be applied to any spreadsheet program. Spreadsheet software can be easily applied to statistical problems, including calibration curve generation, but more sophisticated software exists to facilitate the computations, such as mathematical packages like Matlab or Mathematica, and statistical software like SAS or SPSS. In fact, Excel comes with a built-in Analysis Toolpak, which will be discussed at the end of the tutorial. While these packages automate many of the computations needed in statistical processing, the results are generally more difficult to interpret. The steps presented in this section, and throughout the tutorial, will provide you with a working knowledge of spreadsheets and their use in basic statistical instrumental analysis.

## 2 Microsoft™ Excel Basics

In this section, data manipulation using MS Excel is introduced, including importing, copying and pasting data and entering equations. A basic understanding of the Windows operating system is assumed, including the ability to navigate within Windows, and find and open files.

Throughout this tutorial, different text formats will be used to indicate different actions or operations. Keystrokes (things you need to type) will be denoted with the `Courier` font. Menus will be denoted with **bold Arial**, followed by an arrow, then the menu item in Arial. So if you see **File**→New, this means, click on the **File** menu at the top of the screen and select the New option. Options, buttons in dialog boxes and the Enter key will also use this font. Dialog box titles will be in **bold Times**. Functions will be denoted with ALL-CAPS COURIER.

### 2.1 Using Excel

1. Open Excel. One way to do this is to click the **Start** button, select Run and type `Excel`, then press Enter.
2. Open a new file by selecting **File**→New or pressing `Ctrl-N`. A new spreadsheet file will appear. You can also open an existing file by selecting **File**→Open, or pressing `Ctrl-O`. In this case, a dialog box will open, showing a directory tree. You can navigate to the file you would like to open. However, we will work with a new file, into which you will import numerical data.

#### 2.1.1 Cells in Excel

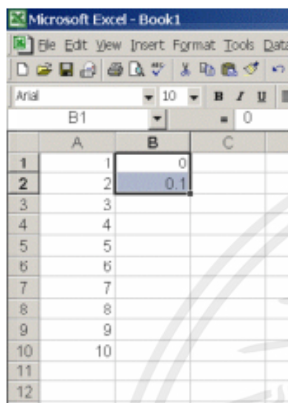
Data is entered and manipulated in Excel within cells. Each block on the screen when you look at Excel is a cell. A cell can contain letters, numbers or equations. Equations operate on other cells in the spreadsheet to calculate values. The cells are divided into columns, designated by letters, and rows, designated by numbers, and are denoted by the letter, followed by the number. For example, the first cell on a worksheet is A1. You can enter data into cells in a number of ways. The easiest is simply by typing the desired value into the cell and pressing the Enter key, but this can become tedious if there is a list or series of data that you wish to enter. This can be done by *pasting* a series of data or entering an equation. You can also plot a graph of your data.

#### 2.1.2 Pasting a Series

Pasting a series of data is useful if there is a regular pattern to the data, or if it is useful to view the form of an equation. It is of much use in analysis, but is a good introductory exercise as it illustrates some useful techniques. In this, we will see how to make three columns of regularly spaced data.

1. Open new worksheet, and place the cursor in the top-left most cell (A1).
2. Type 1 and press Enter. The number 1 should appear on the right side of the cell, and the cursor should move to cell A2.
3. Type 2 and press Enter. The first two cells in column A should now be filled with 1 and 2.
4. Select cells A1 and A2 by clicking and holding the mouse button on cell A1, dragging to cell A2, and releasing the mouse button.
5. Using the mouse, place the arrow at the bottom right corner of the selection, the *handle*, which is marked by a small square. The cursor should change to indicate that you are on the handle.

- Click and drag the handle down to cell A10. This will fill cells A1-10 with the numbers 1 through 10. You can drag the handle to different cells to create different length series.
- To create series with different intervals, simply change the first two numbers. In cells B1 and B2, enter 0 and 0.1, respectively.



- Drag the handle to B16 to create the series.
- You can have decreasing and negative series as well.

### 2.1.3 Equations

We will now see how to manipulate data using equations. This is useful when you want to test out a calibration curve, or use the calibration equation to analyze experimental data. You can use Excel to generate complex equations, however we will only treat very simple ones here. Before we begin, note the table of operators below used in numerical computing. These are not exactly the same as you would see written elsewhere, but they mean the same thing.

Task	Operator	Example	Result
Multiplication	*	2*3	6
Division	/	4/2	2
Exponent	^	2^3	8
Order of operations	(..)	2*3+5	11
		2*(3+5)	30
Power of ten	e or E	3.2e+4	32000
		3.2e-2	0.032

Continuing from the previous example:

- In cell C1, beside the 0 from the second series, type =, then select cell B1. Cell C1 should now contain the phrase =B1. The =-sign tells Excel that the text following the = is part of an equation.
- Continue the equation by typing \*2+5 (do not press Enter yet) so cell C1 should read B1\*2+5. Now press enter and the cell should read 5. This is the result of 0\*2+5.
- Now copy this equation to the other cells in column C by dragging the handle of cell C1 (the square in the bottom right corner of the cell) to C16. This fills in the values for all the cells, and should contain the values 5 to 8. Note that the equation for each cell, which you can view along the top of the worksheet in

the area marked  $f_x$ , has changed to reflect the referencing cell. Excel does this automatically to allow easy copying of equations.

	A	B	C	D
1	1	0	5	
2	2	0.1	5.2	
3	3	0.2	5.4	
4	4	0.3	5.6	
5	5	0.4	5.8	
6	6	0.5	6	
7	7	0.6	6.2	
8	8	0.7	6.4	
9	9	0.8	6.6	
10	10	0.9	6.8	
11		1	7	
12		1.1	7.2	
13		1.2	7.4	
14		1.3	7.6	
15		1.4	7.8	
16		1.5	8	
17				
18				

The series in column C1 is the equation for the straight line  $y = 2x + 5$  for  $x = 0 \dots 1.5$ . This will become more apparent in the next section. However, we will first try one more equation.

- In column E, create a series from -1 to 1 with an increment of 0.2.
- In cell F1, type the equation  $=E1^2 + \$A\$2$  and drag it over the whole series in column E.

The \$-sign tells Excel that when copying the equation into other cells, it should always use the value in A2, and not change it based on the cell referencing. This is useful for defining constants. You can also use the \$-modifier once only, such as \$A2. This means that the column remains constant, and only the rows change as the equation is copied.

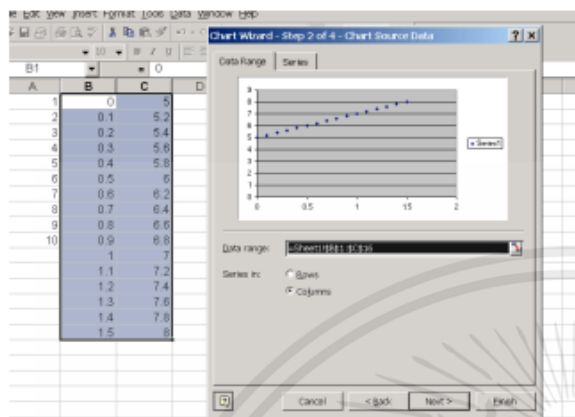
This series represents the parabola  $y = x^2 + 2$  for  $x = -1 \dots 1$ .

### 2.1.4 Plotting Data in Charts

A useful way to view and present your data is with charts. There are many types of charts available with Excel, but the most useful for calibration curves is the X-Y scatter plot. We will use this tool to plot the straight line  $y = 2x + 5$  and the parabola  $y = x^2 + 2$ .

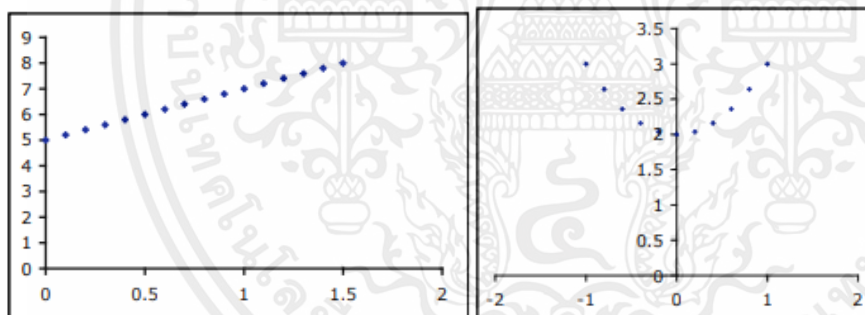
- With the mouse, highlight columns B and C, rows 1 to 16.
- Select **Insert** → **Chart**. The **Chart Wizard** dialog box will appear.
- In Step 1, there are many types of charts to choose from. Select the XY (Scatter) and click Next.
- In Step 2, we can choose to plot multiple series on the same chart. We won't do that here. In fact, Excel has already specified the proper axes, so we do not need to change anything.<sup>1</sup> Click Next.

<sup>1</sup> For more information on plotting multiple series on one chart, check the Excel Help under Plotting.



- In Step 3, you can enter chart titles, axis titles, and other display characteristics on the chart. Change what you want, then click Next.
- In Step 4, you can specify whether the chart should be shown in the current worksheet, or whether it should stand alone in a separate worksheet. Click Finish and the chart should appear.
- Repeat these steps to plot the parabola, highlighting instead columns E and F.

Your plots should look like this:



## 2.2 Excel Functions

In this section, we consider two very useful Excel functions that you will use to develop calibration curves. Excel functions are built-in formulas that perform frequent operations. The two functions we will review here are SUM and AVERAGE. Functions can be entered as part of an equation, using the = sign, or entered in a cell on its own.

You will enter fluorescence intensities and use this data to generate a calibration curve related concentrations in  $\text{pg}\cdot\text{ml}^{-1}$  to the intensities, from Miller and Miller<sup>2</sup>. This data will then be used in all the subsequent examples. Enter the following data in the second two columns of an Excel spreadsheet. Column B should contain the fluorescence intensities and column C the concentrations.

<sup>2</sup> Miller JN and Miller JC. **Statistics and Chemometrics for Analytical Chemistry**, Pearson Education Ltd: United Kingdom (2000), 4<sup>th</sup> Edition.

<i>Fluorescence Intensities</i>	<i>Concentration (pg/ml)</i>
2.1	0
5.0	2
9.0	4
12.6	6
17.3	8
21.0	10
24.7	12

### 2.2.1 The SUM Function

The SUM function in Excel is used to add all the elements in a series of data. This is fundamental for statistical analysis, since all applications involve the sum of a series of numbers or samples. Its use is straightforward when operating on a series of data, such as the fluorescence intensities in the previous exercise. Using this data as a starting point, we will see how the SUM function works.

1. If it is not already open, find and open the fluorescence data from the previous exercise.
2. In the cell directly under the concentration values (should be cell B9, from the previous exercise), type =sum) then highlight the cells you want to sum (in this case, B2-B8). The formula in the cell should now read =sum(B2:B8). Close the bracket and press Enter. The value in the cell should now be 42. This should come as no surprise.
3. Do the same for the fluorescence intensity data. The sum should be 91.7.

Throughout this tutorial, whenever you see the symbol  $\Sigma$  in a formula, it indicates summation over a series of samples or data.

### 2.2.2 The AVERAGE Function

The AVERAGE function, which calculates the mean of a set of samples, is also very useful in statistical analysis. A full definition of the arithmetic mean of a set of data is quite complicated and involved. A simple definition is that the mean is the expected result of any process. It is important to not confuse the population mean with the sample mean. The sample mean is the mean for a set of discrete samples  $n$ , given by the formula  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$ , where the  $x_i$  are all the discrete samples. The average of a set is denoted by the symbol  $\bar{x}$ , so any formula containing this indicates the use of the AVERAGE function.

The population mean is the expected value for a process as  $n$  approaches infinity. For instance, if we take a very large number of samples (normally on the order of  $10^6$  or even higher), we would approach the population mean. It is the true expected value, and the sample mean is an approximation of. This is normally denoted  $\mu$ , however it is not encountered in this tutorial and is only presented here as to make you aware that there is a difference.

The AVERAGE function is used in the same way in Excel as the SUM function, except the word sum is replaced with average. To calculate the average fluorescence intensity, the cell where you wish to do this should look like =average(A2:A9). The calculated value should be 13.1.

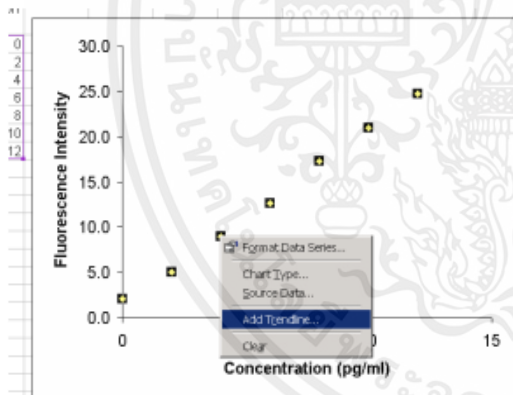
You are now ready to start calculating calibration curves using Excel, which will be covered in the next section.

### 3 The Calibration Curve and Correlation Coefficient

A calibration curve is an equation that permits us to calculate a desired experimental result in terms of another. In the simplest form, this is given as the equation for a straight line, where the  $x$ -value is the input and the  $y$ -value is the output. This is a best-fit curve through a series of experimental sample data, and is the series of all points that are average  $\{x,y\}$  pairs of data, for the range of  $x$  and  $y$ ,  $\{\bar{x},\bar{y}\}$ . Once we know the equation for the average line, we can determine how well it fits the actual experimental data, using the product-moment correlation coefficient, or, for simplicity, the correlation coefficient,  $R$ . This is a measure of how close the data points are to the line. If the correlation coefficient is  $\pm 1$ , it is a perfect fit and the line accurately describes the data. An  $R$  of 0 indicates no linear correlation, and the straight line does not describe the data at all. An  $|R|$  value close to 1 is desirable. The sign of  $R$  indicates the slope of the regression line. The square of the correlation coefficient,  $R^2$ , is also a common measure.

The simplest way to determine a calibration curve from plotted data in Excel is to use the Trendline option on a chart. From this you can view the best-fit curve line and display the equation and correlation coefficient. While this does not provide accurate information, it is a good first test of the correlation. To display a trendline on a plot on the fluorescence:

1. Plot the fluorescence intensity data on a chart, with the concentration on the  $x$ -axis and the fluorescence intensities on the  $y$ -axis.
2. On the plot, highlight the data series of interest and press the right mouse button. This will open a context-sensitive menu.
3. Select Add Trendline... A dialog box will appear.

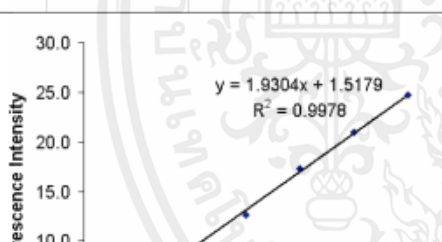


4. In the **Type** tab, select Linear in the **Trend/Regression Type** box and press OK. A trendline will appear on your plot, which is the best-fit line through the data points.



You can display the equation of the trendline and the correlation coefficient  $R^2$  on your plot. Once you have added the trendline,

1. Right-click on the trendline (not on the data points). A context menu will appear.
2. Select Format Trendline... A dialog box will appear.
3. In the **Options** tab, check the Display equation on chart and Display R-squared value on chart. Excel displays  $R^2$  as the correlation coefficient.
4. Click OK, and the equation and  $R^2$  values. You can see that these are the same as those calculated previously.



In future sections, we will discuss the meaning of the calibration equation and the correlation coefficient, as well as how to calculate them and determine the statistical error associated with them.