



การทวนสอบอุปกรณ์ตรวจวัดความดันแบบเปียกเพื่อพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านวิทยาศาสตร์
วิจัย และนวัตกรรม

A VERIFICATION OF WET PRESSURE MONITORING DEVICES TO DEVELOP SCIENCE,
RESEARCH AND INNOVATION INFRASTRUCTURE

ศุภชัย หลีกคำ
กุลยศ สุวันทโรจน์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณกองทุนเพื่อการวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2567
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยเรื่องการทวนสอบอุปกรณ์ตรวจวัดความดันแบบเปียกเพื่อพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม มีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบชุดทวนสอบอุปกรณ์วัดความดันและศึกษาความคลาดเคลื่อนของชุดทวนสอบอุปกรณ์วัดความดัน การออกแบบชุดสาขาฯ เลือกใช้ประเภท Hydraulic dead weight tester และใช้น้ำมันเป็นสารตัวกลาง โดยการออกแบบนั้นอาศัยทฤษฎีคาน้ำคาน้ำดี ผลการศึกษาถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) การทวนสอบ และ 2) การทดสอบความเป็นเชิงเส้น การเปรียบเทียบผลการทวนสอบความดันที่ได้จากการคำนวณและมาตรฐานแสดงผลที่สถานะความดันสูงสุดถูกพบว่ามีค่าแตกต่างกันร้อยละ 12.42 และที่สถานะความดันต่ำสุด มีความแตกต่างกันร้อยละ 25 อีกทั้งการทดสอบความเป็นเชิงเส้นระหว่างความดันที่ได้จากการคำนวณและมาตรฐานแสดงผล พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9999 โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.00558 และมีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความดันที่ได้จากการคำนวณและมาตรฐานแสดงผล เฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 16.36

คำสำคัญ: ทวนสอบ, ความดัน, ความดันแบบเปียก



Title : A Verification of Wet Pressure Monitoring Devices to Develop Science,
Research and Innovation Infrastructure

Researcher : Mr.Supachai Lakkam, Faculty of Engineering, RMUTP
Mr.Kullayot Suwantaraj, Faculty of Engineering, RMUTP

Year : 2024

ABSTRACT

This research titled “A Verification of Wet Pressure Monitoring Devices to Develop Science, Research and Innovation Infrastructure” aims to design the demonstration set not exceeding 2MPa of pressure and also study the tolerance of the Calibration of Pressure Transducer Demonstration Kit. The Hydraulic dead weight tester concept was used in the experimental work with oil as an intermediate. The demonstration kit was designed by means of The Law of Lever theory. As a result, there are two parts of a study: 1) verification and 2) linearity testing. The comparison of pressure verification results by calculation and by display gauge at the highest-pressure condition was found to be 12.42% different. At the lowest-pressure conditions, there is 25% of difference. In addition, the linearity test between the by calculation and by display gauge show 0.9999 of correlation coefficient with 0.00558 of a standard deviation. The average tolerant between the by calculation and by display gauge is 16.36%.

Keywords: Verification, Pressure, Wet Pressure

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จด้วยการสนับสนุนจากงบประมาณกองทุนเพื่อการวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2567 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณต่อคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนขอขอบคุณผู้ที่ให้ความร่วมมือและให้ความอนุเคราะห์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ในที่นี้

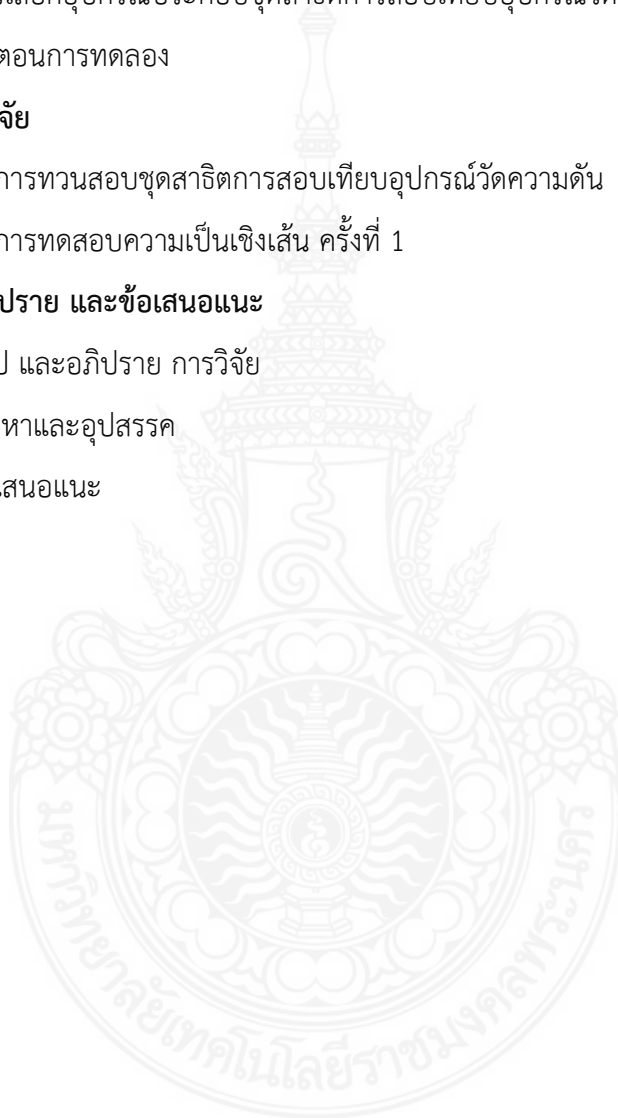
คณะผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 สมมุติฐานงานวิจัย	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แรง	4
2.2 ความดันจากทฤษฎี Pascal's law (Pa)	4
2.3 โมเมนต์ (Moment)	6
2.4 สเตรนเกจ (Strain gauge)	6
2.5 วงจรวิทสโตนบริดจ์	8
2.6 ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดสเตรนเกจ (Strain gauge pressure transducer)	9
2.7 การสอบเทียบ (Calibration)	10
2.8 สมการเส้นตรง	10
2.9 ความชัน	12
2.10 ความแปรปรวน (Variance) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)	13
2.11 ค่าความน่าจะเป็น P-value	13
2.12 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression)	14
2.13 คาน (Lever)	14

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	16
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	16
3.2 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
3.3 การออกแบบชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน	17
3.4 การเลือกอุปกรณ์ประกอบชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน	20
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	21
บทที่ 4 ผลการวิจัย	27
4.1 ผลการทวนสอบชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน	27
4.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ครั้งที่ 1	27
บทที่ 5 สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ	38
5.1 สรุป และอภิปราย การวิจัย	38
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	39
5.3 ข้อเสนอแนะ	39
บรรณานุกรม	40
ภาคผนวก	42
ประวัติผู้วิจัย	52



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ขนาดลูกสูบและความดัน	19
3.2 สภาวะความดันสูงสุด ($P_{\max,act}$) และความดันต่ำสุด ($P_{\min,act}$)	20
3.3 สภาวะการทวนสอบชุดสัทธิการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน	22
3.4 สภาวะการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของชุดสัทธิการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน	25
4.1 ผลการทวนสอบ	26



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แผนผังหลักการของงานวิจัยเชิงความร่วมมือและถ่ายทอดเทคโนโลยีขั้นสูง	3
2.1 แรงกระทำกับพื้นที่ภาชนะ	4
2.2 การส่งถ่ายแรงโดยผ่านทางความดันจากทฤษฎี Pascal's law	5
2.3 โครงสร้างของสเตอร์นเกจ	7
2.4 วงจรวิทส์โตนบริดจ์	9
2.5 ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดสเตอร์นเกจ	9
2.6 เส้นตรงขนานกับแกน x	11
2.7 เส้นตรงขนานกับแกน y	11
2.8 เส้นตรงไม่ขนานกับแกน x และแกน y	12
2.9 คานแบบที่หนึ่ง	15
2.10 คานแบบที่สอง	15
2.11 คานแบบที่หนึ่ง	15
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	16
3.2 การออกแบบชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน	17
3.3 ทรานสดิวเซอร์ความดัน รุ่น PGS-20KA	21
3.4 จอแสดงผล Model WGA-680A	21
3.5 การเปิดเครื่องทดสอบ	22
3.6 การปรับระดับคานของชุดสาธิตฯ	23
3.7 การปรับระดับกระบอกลูกสูบ	23
3.8 เริ่มการทวนสอบ	24
3.9 การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า	24
3.10 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	25
3.11 เริ่มการทดสอบ	26
4.1 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล 10 กิโลกรัม	28
4.2 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล 20 กิโลกรัม	29
4.3 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล 30 กิโลกรัม	30
4.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล 40 กิโลกรัม	31
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ได้จากการคำนวณและสัญญาณแรงดันไฟฟ้า	32
4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากมาตรฐานแสดงผลและสัญญาณแรงดันไฟฟ้า	33
4.7 การวัดความยาวคาน	34
4.8 การไล่อากาศออกจากระบบไฮดรอลิก	34
4.9 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล 10 กิโลกรัม	35
4.10 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล 20 กิโลกรัม	36

4.11 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล 30 กิโลกรัม	36
4.12 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล 40 กิโลกรัม	37



บทที่ 1

บทนำ

งานวิจัยบทนี้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์การวิจัย ขอบเขตของการศึกษาประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ธุรกิจในปัจจุบันก้าวเข้าสู่ยุคการค้าเสรี การแข่งขันทางการค้ามีความรุนแรงมากขึ้น ทั้งในระดับประเทศและต่างประเทศ ภายใต้สภาวะการณ์เช่นนี้ผู้ประกอบการจำเป็นต้องพัฒนาองค์กรในทุกด้าน โดยเฉพาะกระบวนการผลิต เพื่อให้มีศักยภาพสอดคล้องตามมาตรฐานสากลและเป็นที่ยอมรับในระดับโลก ซึ่งแนวทางที่สำคัญอีกประการหนึ่งในการเพิ่มขีดความสามารถและควบคุมมาตรฐานของกระบวนการผลิตคือการเลือกใช้เครื่องมือวัดที่มีคุณภาพมาตรฐานสูง อุปกรณ์ตรวจวัดหรือเครื่องมือวัดอุตสาหกรรม เป็นสิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้ในอุตสาหกรรมการผลิต เพื่อการวัดขนาดที่ถูกต้องแม่นยำ ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างผลิตภัณฑ์ที่ตรงกับการออกแบบทุกประการและรับประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ เป็นพื้นฐานสำคัญของการผลิตสินค้าให้มีคุณภาพ และช่วยควบคุมการผลิตให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ อีกทั้งยังมีบทบาทในด้านระบบป้องกัน ความเสียหายอันเกิดจากเหตุไม่พึงประสงค์ เช่น หยุดกระบวนการผลิตเมื่อมีความดันหรืออุณหภูมิสูงเกินกำหนดเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับบุคคลหรืออุปกรณ์ในกระบวนการผลิต เครื่องมือวัดความดัน เป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ในการบวนการผลิตที่มีความสำคัญ แต่เมื่อใช้งานไปแล้วในระยะหนึ่งค่าจากการวัดจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงไปตามปัจจัยแวดล้อม ซึ่งเกิดขึ้นได้ทั้งจากระยะเวลาการใช้งาน อุณหภูมิ ไฟฟ้า เคมี การเก็บรักษา ที่ส่งผลให้เครื่องมือวัดเสื่อมสภาพ และบอกค่าการวัดที่คลาดเคลื่อนไปจากเดิม เมื่อเครื่องมือวัดอยู่ในสภาพที่เสื่อมสภาพจะทำให้ผลจากการวัดมี ความน่าเชื่อถือน้อยลง และส่งผลต่อคุณภาพของกระบวนการผลิต การนำเครื่องมือวัดความดันไปใช้งานโดยไม่ทราบถึงค่าความผิดพลาดของเครื่องมือวัดที่เกิดขึ้น อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อกระบวนการผลิต เช่น ผลิตภัณฑ์ไม่ได้มาตรฐาน ทำให้เสียเวลา สิ้นเปลืองทรัพยากรและที่สำคัญทำให้ขาดความเชื่อมั่นและไม่เป็นที่ยอมรับของลูกค้า การจะให้กระบวนการผลิตทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสมบูรณ์และควบคุมคุณภาพการผลิตให้ได้สินค้า ตามมาตรฐาน จำเป็นจะต้องมีเครื่องมือวัดที่วัดค่าได้ถูกต้องและแม่นยำเชื่อถือได้แต่เนื่องจากความ ถูกต้องและแม่นยำของเครื่องมือวัดความดันจะแปรผันไปตามระยะเวลาการใช้งาน และ สภาพแวดล้อม ดังนั้น เมื่อต้องการทราบค่าที่แท้จริงก่อนนำไปใช้งานโดยเฉพาะในงานวิจัยและงานที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในโรงงานอุตสาหกรรม จำเป็นจะต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือวัด ก่อนด้วยเครื่องมือมาตรฐานที่ทราบค่าความไม่แน่นอนและสามารถสอบย้อนกลับไปยังมาตรฐานที่สูงกว่าได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบชุดทวนสอบอุปกรณ์วัดความดัน
- 2) เพื่อศึกษาความคลาดเคลื่อนของชุดทวนสอบอุปกรณ์วัดความดัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) สร้างชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันขนาดไม่เกิน 2MPa
- 2) ชุดสถิติการสอบเทียบใช้กับอุปกรณ์วัดความดันของเหลว
- 3) ชุดสถิติการสอบเทียบใช้น้ำมันไฮดรอลิกเป็นสารตัวกลาง

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

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

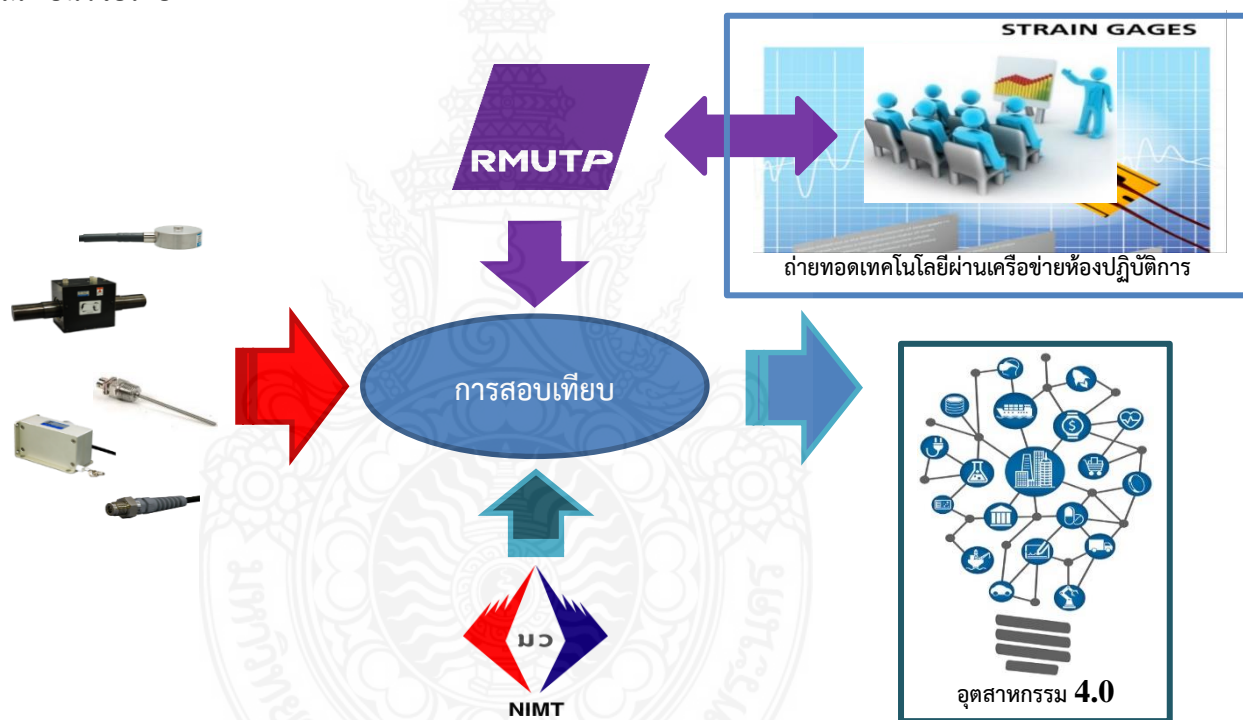
1.5 สมมุติฐานงานวิจัย

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

นอกจากการขีดความสามารถทางการวัดของเครื่องมือวัด และสร้างการยอมรับในระดับสากลแล้ว การถ่ายทอดเทคโนโลยีขั้นสูงเกี่ยวกับการสอบเทียบเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการสอบเทียบเครื่องมือวัดอุตสาหกรรมที่จำเป็นต้องส่งไปยังต่างประเทศในปัจจุบันให้ลดลง ซึ่งส่งผลดีต่อต้นทุนทางอุตสาหกรรม สร้างความสามารถด้านการแข่งขันให้กับประเทศ อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมรากฐานอุตสาหกรรมขั้นสูงของประเทศ และเป็นการสร้างความพร้อมด้านอุตสาหกรรมเกี่ยวเนื่อง เพื่อจูงใจการลงทุนจากต่างประเทศที่มีความจำเป็นต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูง

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

ดังนั้นการพัฒนาขีดความสามารถทางการวัดของเครื่องมือวัดด้วยการสอบเทียบด้วยเทคนิคการบ่อนความเครียดจะกลายเป็นกุญแจสำคัญที่นำไปสู่การพัฒนาอุตสาหกรรม 4.0 อีกทั้งยังเป็นการสร้างความเข้มแข็งให้ภาคอุตสาหกรรมผ่านความร่วมมือห้องปฏิบัติการเครือข่ายระดับนานาชาติ ภายใต้แผนพัฒนาเครือข่ายความร่วมมือนานาชาติเพื่อยกระดับความเป็นเลิศ ของมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัยไทย



ภาพที่ 1.1 แผนผังหลักการทำงานของงานวิจัยเชิงความร่วมมือและถ่ายทอดเทคโนโลยีขั้นสูง

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แรง [1]

แรง หมายถึง แรงกิริยาที่กระทำต่อวัตถุในรูปแบบของแรงกด หรือแรงอัด

$$F = mg \quad (2.1)$$

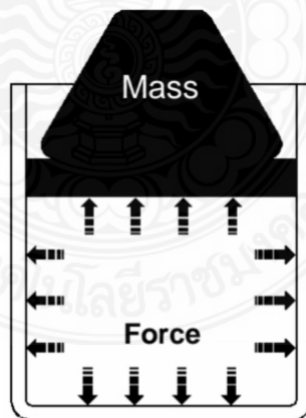
เมื่อ F คือ แรงกิริยา (N)

m คือ มวลของชุดทดสอบ (kg)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (9.81 m/s^2)

2.2 ความดันจากทฤษฎี Pascal's law (Pa) [2]

“ความดันในภาชนะปิดจะมีความดันเท่ากันทุกจุด ไม่ว่าจะวัดความดัน ณ จุดใดก็ตาม และภายใต้ความดันจะเกิดแรงกระทำในแนวตั้งฉากกับทุก ๆ พื้นผิว” จากทฤษฎี Pascal's law จะเป็นไปตามรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 แรงกระทำกับพื้นที่ภาชนะ [2]

แรงที่เกิดจากน้ำหนักของวัตถุกระทำบนลูกสูบของภาชนะปิดที่มีของไหลอยู่ภายใน ซึ่งจะเกิดแรงที่กระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

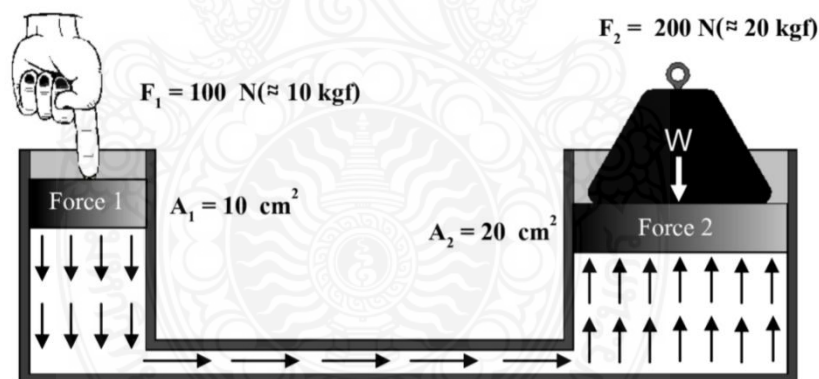
$$\text{ความดัน (Pressure)} = \frac{\text{แรง (Force)}}{\text{พื้นที่ (Area)}} \quad (2.2)$$

จากทฤษฎีของPascal's law

$$\text{Pascal (Pa)} = \frac{1 \text{ N}}{\text{m}^2} \quad (2.3)$$

2.2.1การส่งผ่านแรงโดยความดันของของไหล (Force transmission by pressure of Pascal's law) จากนิยามของปาสคาล สามารถสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

- 1) ความดันที่เกิดจากของไหลซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะปิดจะไปปรากฏและกระทำมีค่าเท่ากันในทุกทิศทางต่อพื้นผิวภาชนะ
- 2) ทิศทางของแรงที่เกิดจากความดันของของไหลจะกระทำในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ที่ของไหลนั้นสัมผัสอยู่
- 3) ความดันของของไหลจะมีค่าเท่ากันในระดับเดียวกัน หากเป็นภาชนะเปิดลักษณะเช่นเดียวกัน การส่งผ่านความดันของของไหลจะพบว่า ความดันทุก ๆ จุดในระบบปิดจะเท่ากันโดยไม่ขึ้นกับลักษณะรูปร่างของภาชนะที่ใช้บรรจุของเหลว



ภาพที่ 2.2 การส่งถ่ายแรงโดยผ่านทางความดันจากทฤษฎี Pascal's law [2]

จะได้ว่า

$$P_1 = \frac{F_1}{A_1}$$

และ

$$P_2 = \frac{F_2}{A_2} \quad (2.4)$$

จากสมการข้างต้นเมื่อระบบอยู่ในสภาพสมดุล จะได้ว่า $P_1 = P_2$
ดังนั้น

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad (2.5)$$

หรือ

$$F_1 = \frac{A_1 \cdot F_2}{A_2} \quad (2.6)$$

2.3 โมเมนต์ (Moment) [3]

การที่มีแรงกระทำบนวัตถุแล้วทำให้วัตถุหมุนได้นั้น ผลของแรงที่พยายามทำให้วัตถุหมุนรอบจุดๆ หนึ่งเรียกว่าโมเมนต์ของแรง ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของแรงกับระยะทางจากจุดหมุนตั้งฉากกับแนวแรงและมีหน่วยเป็นนิวตันเมตร (Nm) ส่วนจุดคงที่ที่วัตถุหมุนรอบ เรียกว่า จุดหมุน (Fulcrum) โมเมนต์ของแรงที่ทำให้วัตถุหมุนได้มี 2 ทิศทาง คือ หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เรียกว่า โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา และหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เรียกว่า โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา เพื่อความสะดวกในการคำนวณจึงกำหนดเครื่องหมายของโมเมนต์ โดยให้โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกาเป็นบวกและโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกาเป็นลบ หรือในทำนองกลับกัน

$$M = F \times L \quad (2.7)$$

เมื่อ M คือ โมเมนต์ของแรง มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร (Nm)

F คือ ขนาดของแรงในแนวตั้งฉาก มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

L คือ ระยะห่างจากแนวแรงถึงจุดหมุน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

หลักการของโมเมนต์ ถ้ามีแรงหลายแรงกระทำต่อวัตถุชิ้นหนึ่งแล้วทำให้วัตถุนั้นอยู่ในสภาวะสมดุล จะได้ว่าผลรวมของโมเมนต์รอบจุดใด ๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ หรืออาจกล่าวได้ว่าผลรวมของโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกามีค่าเท่ากับผลรวมของโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา

$$\text{โมเมนต์ทวน} = \text{โมเมนต์ตาม} \quad (2.8)$$

$$F_1 \times L_1 = F_2 \times L_2 \quad (2.9)$$

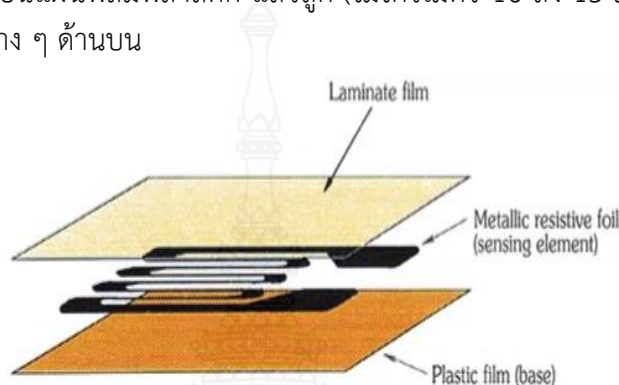
2.4 สเตรนเกจ (Strain gauge) [4]

สเตรนเกจเป็นเซนเซอร์ที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดมิติ หรือความเครียดในเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงภายนอกที่มากระทำด้วยการให้กำเนิดสัญญาณทางไฟฟ้า โดยสเตรนเกจถูก

นำมาใช้ในงานทางวิศวกรรมหลากหลายสาขา เช่น เครื่องจักรกล ยานยนต์ ไฟฟ้า โยธาก่อสร้าง เคมี และการแพทย์

2.4.1 โครงสร้างของสเตรนเกจ

สเตรนเกจมีอยู่หลายประเภท แต่แบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายมีโครงสร้างเป็นแถบของขดลวดตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่ทำจากโลหะแผ่นบาง มีความหนาประมาณ (ไมโครเมตร 6 ถึง 3 ซึ่งยึดติดอยู่บนฐานที่เป็นแผ่นฟิล์มพลาสติก แล้วถูก (ไมโครเมตร 16 ถึง 15 มีความหนาประมาณ) เคลือบด้วยแผ่นฟิล์มบาง ๆ ด้านบน



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของสเตรนเกจ [4]

2.4.2 หลักการทำงานของสเตรนเกจ

สเตรนเกจถูกยึดเข้ากับวัตถุที่ต้องการวัดความเครียดอย่างแน่นหนา จึงทำให้ตัวรับสัญญาณ จะยืดหรือหดตัวตามความเครียดของวัตถุที่ (ตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่ทำจากโลหะแผ่นบาง) ต้องการวัดค่า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะส่วนใหญ่จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อโลหะมีการยืดหรือหดตัวทางกล สเตรนเกจใช้หลักการนี้ในการวัดค่าความเครียดผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยทั่วไปตัวรับสัญญาณของสเตรนเกจจะทำจากโลหะผสมแผ่นบางที่มีส่วนผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล โลหะผสมแผ่นบางนี้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าต่อความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นที่มีค่าคงที่แน่นอนค่าหนึ่ง กำหนดความสัมพันธ์หลักดังนี้

$$\Delta R/R = K_s \cdot \epsilon \quad (2.10)$$

เมื่อ	R	คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าเดิมของสเตรนเกจ มีหน่วยเป็น โอห์ม
	ΔR	คือ ความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อสเตรนเกจมีการยืดหรือหดตัว มีหน่วยเป็น โอห์ม
	K_s	คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ หรือ เกจแฟคเตอร์ ไม่มีหน่วย
	ϵ	คือ ความเครียด ไม่มีหน่วย

เกจแฟคเตอร์ K_s จะมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะ ซึ่งโลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิลมีค่าเกจแฟคเตอร์ประมาณ ดังนั้น 2 สเตรนเกจที่ใช้โลหะผสมชนิดนี้เป็นตัวรับสัญญาณสามารถใช้ค่าคงที่นี้ในการแปลงค่าความเครียดทางกลเป็นค่าการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทาง

ไฟฟ้าได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความเครียดเป็นปรากฏการณ์ที่มีขนาดเล็กมากจนไม่สามารถมองเห็นได้ จึงทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความเครียดมีค่าน้อยมาก ตัวอย่าง คำนวณความต้านทานทางไฟฟ้าของสเตรนเกจที่เปลี่ยนแปลงไปจากความเครียดขนาด 1,000 โอห์ม 120 ไมโครเมตรต่อเมตร โดยทั่วไปความต้านทานทางไฟฟ้าของสเตรนเกจมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}\Delta R/R &= K_s \cdot \varepsilon \\ \Delta R &= R \cdot K_s \cdot \varepsilon \\ &= 120 \times 2 \times \frac{1000}{1000000} \\ &= 0.24 \Omega\end{aligned}$$

เมื่อ $R = 120 \Omega$, $K_s = 2$, $\varepsilon = 1,000 \mu\text{m/m}$

อัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้า

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{0.24}{120} = 0.002 = 0.2\%$$

ในความเป็นจริงแล้วการเปลี่ยนแปลงนี้ยากมากที่จะทำการวัดค่าได้อย่างถูกต้องและไม่สามารถวัดค่าได้ด้วยเครื่องมือวัดความต้านทานทางไฟฟ้าทั่วไป ด้วยเหตุนี้การวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าจึงต้องใช้เครื่องมือเฉพาะทางที่เรียกว่าสเตรนแอมพลิฟายเออร์ และวงจรไฟฟ้าที่เรียกว่าวิทสโตนบริดจ์

2.5 วงจรวิทสโตนบริดจ์ [5]

วงจรวิทสโตนบริดจ์เป็นวงจรไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปของสเตรนเกจ โดยวงจรประกอบด้วยตัวต้านทานจำนวน ตัว 4

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad (2.11)$$

หรือ

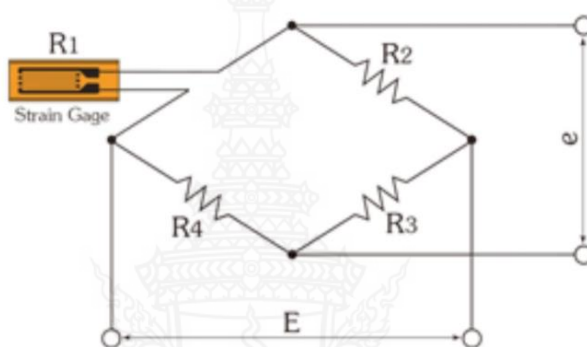
$$R_1 \times R_2 = R_3 \times R_4 \quad (2.12)$$

เมื่อทำการป้อนความต่างศักย์ให้ด้านอินพุตแล้ว ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุต e จะมีค่าเป็นศูนย์ สถานะนี้เรียกว่าวงจรบริดจ์สมดุล เมื่อวงจรบริดจ์เสียสมดุลจากการสูญเสียสภาพตามเงื่อนไขข้างต้น ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุตที่วงจรจ่ายออกมาจะสัมพันธ์กับค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง

ไปของสเตรนเกจ สเตรนเกจถูกนำมาต่อเข้ากับวงจรแทนที่ R1 เมื่อสเตรนเกจได้รับความเครียดแล้ว ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไป ΔR ความต่างศักย์ด้านเอาต์พุต e จะมีค่าดังนี้

$$e = \frac{1}{4} \cdot K_s \cdot \varepsilon \cdot E \quad (2.13)$$

เนื่องจากทราบค่าตัวแปรทุกตัวยกเว้น ε ดังนั้น ความเครียด ε สามารถทราบค่าได้โดยการวัดความต่างศักย์ด้านเอาต์พุตของวงจรวิสโตนบริดจ์



ภาพที่ 2.4 วงจรวิสโตนบริดจ์ [5]

2.6 ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดสเตรนเกจ (Strain gauge pressure transducer) [6]

ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดสเตรนเกจ คือ อุปกรณ์ทำหน้าที่แปลงความดันไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแบบอนาล็อก (Analog) โดยอาศัยการยึดหรือหดตัวของสเตรนเกจซึ่งยึดติดกับไดอะแฟรมของทรานสดิวเซอร์ความดันและต่อวงจรไปยังวงจรวิสโตนบริดจ์

การแปลงความดันไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้านั้น ทำได้โดยอาศัยความดันที่ป้อนเข้าไปที่ทรานสดิวเซอร์ความดันแล้วทำให้เกิดการหักเหของไดอะแฟรมและความเครียดที่เกจซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่วงจรไฟฟ้าซึ่งแปรผันตรงกับความดันด้านอินพุตของทรานสดิวเซอร์



ภาพที่ 2.5 ทรานสดิวเซอร์ความดันชนิดสเตรนเกจ [7]

2.7 การสอบเทียบ (Calibration) [8]

การสอบเทียบเป็นหัวใจสำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องมือวัดและการควบคุมกระบวนการทางอุตสาหกรรม การสอบเทียบคือการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าที่ต้องการของอินพุตและเอาต์พุตของเครื่องมือซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับมาตรฐานของตัวอ้างอิง เพื่อรับรองอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดว่าทำงานด้วยความถูกต้องแม่นยำอยู่ในขอบเขตที่ต้องการภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด เครื่องมือสอบเทียบทำให้โรงงานและกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มีคุณภาพตามความต้องการตลอดจนสามารถแสดงจุดบกพร่องและความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ให้เห็นได้

การสอบเทียบจะต้องทำเป็นระยะ ๆ เพื่อทดสอบความถูกต้องในการทำงานของเครื่องมือหรือระบบและกำหนดการใช้งานที่เป็นมาตรฐาน การสอบเทียบจะเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องมือวัดให้มีมาตรฐานและเป็นที่ยอมรับตามมาตรฐานของตัวสอบเทียบและมาตรฐานของสภาพแวดล้อม การสอบเทียบไม่ได้เป็นการรับประกันการทำงานของเครื่องมือแต่จะทำให้การวัดมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นหรือทำให้การทำงานที่ต้องใช้อุปกรณ์เหล่านี้มีความถูกต้องแม่นยำ น่าเชื่อถือ และอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ถ้าอุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดมีการปรับตั้งค่าใหม่ ซ่อมแซม เปลี่ยนแปลง หรือมีการใช้งานผิดๆ ควรจะต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือเหล่านั้นใหม่เสมอ การบันทึกข้อมูลจะต้องทำเหมือนกับผู้ผลิตและต้องสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้ใช้งานว่าสามารถนำข้อมูลไปใช้อ้างอิงได้ระดับ คือ 3 โดยมาตรฐานการยอมรับนั้นสามารถแบ่งได้

2.7.1 มาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard)

มาตรฐานปฐมภูมิ หมายถึง ระดับที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงและมีหน่วยวัดค่าสัมบูรณ์ที่รับรองโดยสถาบันรับรองมาตรฐานนานาชาติมีความทนทานต่อการใช้งาน การที่ผ่านมาตรฐานขั้นนี้และรักษาระดับมาตรฐานนี้ไว้เป็นเรื่องยากมาก ค่าสัมบูรณ์ในที่นี้หมายถึงความเป็นอิสระ ความสม่ำเสมอและไม่เกี่ยวข้องกับสิ่งอื่น

2.7.2 มาตรฐานทุติยภูมิ (Secondary standard)

มาตรฐานทุติยภูมิ หมายถึง มาตรฐานสัมบูรณ์ที่ใช้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิงในการสอบเทียบซึ่งจะกำหนดตัวเลขที่ได้มาจากมาตรฐานปฐมภูมิ การสอบเทียบในมาตรฐานทุติยภูมินี้จะเกี่ยวข้องกับความแม่นยำและชนิดของมาตรฐานที่ต้องการ

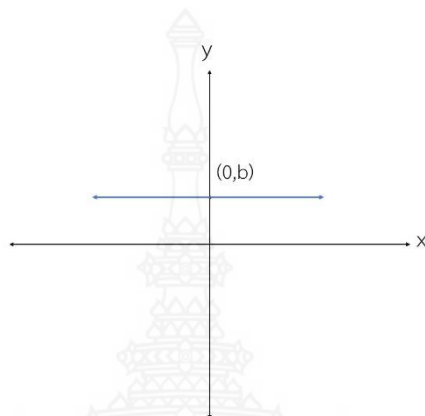
2.7.3 มาตรฐานการทำงาน (Working standard)

มาตรฐานการทำงาน หมายถึง มาตรฐานทั่วไป ซึ่งจะใช้เมื่อมีการจัดระบบในโรงงาน และในห้องทดลองที่ต้องการความแม่นยำน้อยกว่ามาตรฐานทุติยภูมิ เครื่องมือวัดที่จัดว่าดีนั้น ในความหมายของการสอบเทียบจะต้องมีทั้งมาตรฐานปฐมภูมิและทุติยภูมิ นอกจากนี้จะต้องประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่ผ่านการสอบเทียบสำหรับการวัดดังต่อไปนี้เช่น การกระจัด (Displacement) ความเร็ว (Velocity) ความเร่ง (Accelerate) แรง (Force) ความดัน (Pressure) การไหล (Flow) อุณหภูมิ (Temperature) แรงดันไฟฟ้า (Voltage) กระแสไฟฟ้า (Current) เวลา (Time) และความถี่ (Frequency) ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการในงานอุตสาหกรรม ข้อสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นตัวมาตรฐาน ที่มีความจำเป็นมาก คือ ตัวมาตรฐานจะต้องมีความแม่นยำมากกว่าเครื่องมือวัดที่จะทำการสอบเทียบมาตรฐานในการเปรียบเทียบต้องการเพียงความน่าเชื่อถือและความแม่นยำเหมือนกับการใช้งาน

2.8 สมการเส้นตรง [9]

สมการเส้นตรง มีสมการรูปแบบทั่วไปคือ $y=mx+c$ เส้นตรงหนึ่งเส้นประกอบไปด้วยจุดหลายจุด ซึ่งจุดเหล่านี้ทำให้สามารถหาความชันได้ และเมื่อทราบความชันก็สามารถหาสมการเส้นตรงได้ โดยสมการเส้นตรงมีทั้งหมด 3 กรณี

2.8.1 เส้นตรงขนานกับแกน x



ภาพที่ 2.6 เส้นตรงขนานกับแกน x

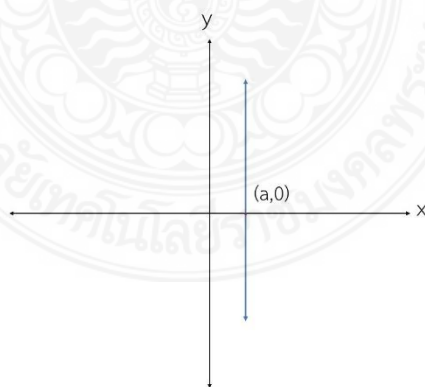
เส้นตรงขนานแกน x และตัดแกน y ที่จุด $(0,b)$

ถ้า $b > 0$

ถ้า $b = 0$ เส้นตรงจะทับแกน x

ถ้า $b < 0$ เส้นตรงจะอยู่ใต้แกน x เป็นระยะ b หน่วย

2.8.2 เส้นตรงขนานกับแกน y



ภาพที่ 2.7 เส้นตรงขนานกับแกน y

เส้นตรงขนานแกน y และตัดแกน x ที่จุด $(a,0)$

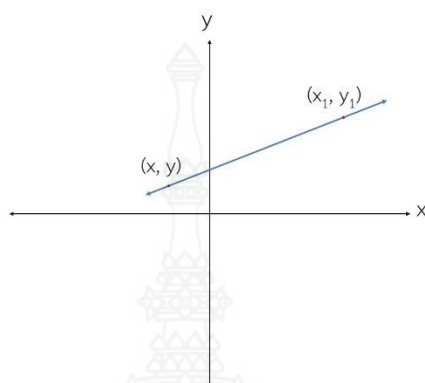
ถ้า $a > 0$ เส้นตรงจะทางขวาของแกน y และห่างจากแกน y เป็นระยะ a หน่วย

ถ้า $a = 0$ เส้นตรงจะทับแกน y

ถ้า $a < 0$ เส้นตรงจะทางซ้ายของแกน y และห่างจากแกน y เป็นระยะ a หน่วย

ถ้า $a > 0$ เส้นตรงจะทางซ้ายของแกน y และห่างจากแกน y เป็นระยะ a หน่วย

2.8.3 เส้นตรงไม่ขนานกับแกน x และแกน y



ภาพที่ 2.8 เส้นตรงไม่ขนานกับแกน x และแกน y

จากภาพที่ 2.8 ความชันของเส้นตรงคือ $m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$ และเส้นตรงนี้ผ่านจุด (x_1, y_1) เมื่อจัดรูป

สมการแล้วจะได้ว่า

$$y - y_1 = m(x - x_1)$$

$$y - y_1 = mx - mx_1$$

$$y = mx - mx_1 + y_1$$

$$y = mx + (-mx_1 + y_1)$$

$$\text{เมื่อ } c = -mx_1 + y_1 \text{ จะได้ } y = mx + c$$

2.9 ความชัน [10]

ความชัน (Slope) คือ ค่าที่บอกถึงความลาดเอียง หรือความสูงชันของเส้นกราฟ ค่าความชันยิ่งมากหมายถึงระดับความลาดเอียงหรือความสูงชันยิ่งมาก ความชันของเส้นตรงนิยมใช้ตัวแปร m การหาความชันจะต้องทราบจุดบนเส้นตรงอย่างน้อย 2 จุด

ตัวอย่าง สมมติให้ (x_1, y_1) และ (x_2, y_2) เป็นจุดบนเส้นตรง L จะหาความชันของเส้นตรง L ได้จาก

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2.14)$$

2.10 ความแปรปรวน (Variance) และ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) [11]

ความแปรปรวน คือ ผลรวมของความแตกต่างระหว่างข้อมูลแต่ละค่ากับค่าเฉลี่ยเลขคณิตทั้งหมดยกกำลังสอง แล้วหารด้วยจำนวนข้อมูลทั้งหมด

$$\sigma^2 = \frac{\sum (X_i - \mu)^2}{N} \quad (2.15)$$

เมื่อ σ^2 คือ ความแปรปรวนประชากร

X_i คือ ค่าของข้อมูลตัวที่ i

μ คือ ค่าเฉลี่ยของประชากร

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน คือ รากที่สองของความแปรปรวน

$$\sqrt{\sigma^2} = \frac{\sum (X_i - \mu)^2}{N} \quad (2.16)$$

2.11 ค่าความน่าจะเป็น P-value [12]

การทดสอบสมมติฐานไม่สามารถทำได้โดยตรงจากการเปรียบเทียบสมมติฐานหรือความเชื่อที่ต้องการทดสอบกับข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จากตัวอย่างหรือตัวแทนของประชากรที่เกี่ยวข้องกับสมมติฐานนั้น จะต้องใช้วิธีการทางสถิติช่วยในการทดสอบสมมติฐานที่สำคัญดังนี้

2.11.1 ตั้งสมมติฐานเพื่อการทดสอบ คือ ต้องตั้งสมมติฐานว่าง (H_0) กับสมมติฐานทางเลือก (H_1) ควบคู่กันตลอด ซึ่งต้องตั้งสมมติฐานตามความเชื่อหรือสิ่งที่ต้องการทดสอบก่อน แล้วจึงตั้งอีกสมมติฐานหนึ่งตามที่คาดว่าควรจะเป็นถ้าไม่ยอมรับสมมติฐานแรก โดยมากจะตั้งสมมติฐานที่สองนี้ให้อยู่ในลักษณะตรงกันข้ามกับสมมติฐานแรก เช่น ความเชื่อที่ว่า ค่าความดันที่ได้จากการคำนวณ (x) จะเท่ากับค่าที่ได้จากมาตรแสดงผล (y_1)

$$H_0 : x = y_1$$

$$H_1 : x \neq y_1$$

2.11.2 เลือกสถิติที่ใช้ทดสอบ จะเลือกใช้สถิติตัวใดนั้นขึ้นอยู่กับว่าต้องการทดสอบค่าของพารามิเตอร์ตัวใด ทราบการแจกแจงและความแปรปรวนประชากรหรือไม่ เป็นต้น แล้วคำนวณหาค่าสถิติออกมาเพื่อจะนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าวิกฤต

2.11.3 กำหนดระดับนัยสำคัญ คือ ขนาดของความผิดพลาดชนิดที่ 1 (α) ซึ่งบอกให้ทราบว่าสามารถเชื่อถือการทดสอบได้มากน้อยเพียงใด เช่น ถ้าระดับนัยสำคัญที่ $\alpha = 0.5$ จะหมายความว่าสามารถเชื่อถือผลการทดสอบได้ 95 % โดยทั่วไปนิยมกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.1, 0.05 และ 0.01

ค่าความน่าจะเป็น P-value หมายถึง ความน่าจะเป็นที่จะพบข้อมูลที่สำรวจได้ในปัจจุบันไป ในทิศทางเดียวกับ H_1 โดยการหาค่า P- Value สามารถทำได้โดยนำค่าสถิติไปเปิดตารางหรือคำนวณ จากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามชนิดการแจกแจงความน่าจะเป็น

2.12 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) [12]

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น เป็นวิธีการทางสถิติใช้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ประกอบด้วยตัวแปรที่ทราบค่า เรียกว่าตัวแปรประมาณการหรือตัวแปรต้น (Predictor, Independent variable, X) และตัวแปรที่เราต้องการทราบค่า เรียกว่าตัวตอบสนอง หรือตัวแปรตาม (Response, Dependent variable, Y) ว่าเป็นตัวแปรที่เป็นปัจจัยหรือเป็นเหตุผล ของกันและกันหรือไม่ โดยความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมานั้นคือการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์หรือ Pearson Correlation แทนด้วยสัญลักษณ์ r โดยที่สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 โดยหากพบค่า r เข้าใกล้ -1 หรือ 1 หมายความว่าตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันใน รูปแบบเส้นตรง (Linear) แต่ถ้าค่า r เข้าใกล้ 0 จะบ่งบอกว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรนั้นไม่ได้อยู่ใน รูปแบบเส้นตรง (Non-Linear) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Regression แทนด้วยสมการหรือฟังก์ชัน คณิตศาสตร์ดังนี้

$$y=f(x) \quad (2.17)$$

หรือ

$$y=bx+a \quad (2.18)$$

เมื่อ x แทนข้อมูลนำเข้า (input)

y แทนข้อมูลผลลัพธ์ที่ได้ (output)

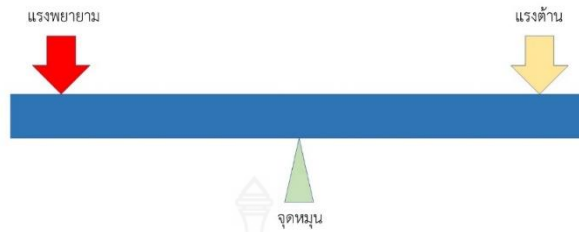
a แทนค่าคงที่ของสมการถดถอย ซึ่งเป็นค่าจุดตัด (Intercept) แกน y ของสมการ

b ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของตัวตอบสนอง x

2.13 คาน (Lever) [13]

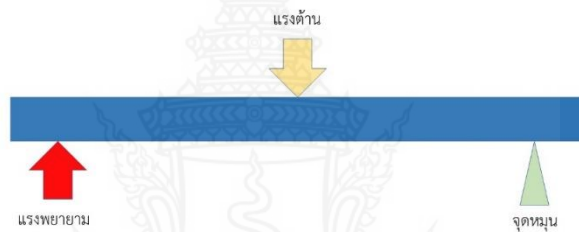
คาน คือ วัตถุแข็งเกร็งที่ใช้โดยมีจุดหมุนเพื่อทวีคูณแรงเชิงกลโดยใช้หลักการของโมเมนต์ คานถูกนำไปประยุกต์ในการทำงานได้หลากหลายโดยเฉพาะการนำไปใช้เรื่องการตีหรือการจับ จะอาศัยการเกิดโมเมนต์ของแรงคู่ควบในการหมุนทำให้การออกแรงกับคานแล้วจะเกิดแรง ในการต้านการหมุนขึ้นเป็นแรงคู่ควบกันหรือเรียกว่าแรงพยายามกับแรงต้าน ซึ่งจะเกิดในทิศทาง ตรงกันข้าม คือ ตามเข็มนาฬิกาและทวนเข็มนาฬิกา คานสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงาน ได้ 3 แบบดังนี้

1) คานแบบที่หนึ่ง คือ คานที่มีจุดหมุนอยู่ระหว่างแรงพยายามและแรงต้าน ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 คานแบบที่หนึ่ง

2) คานแบบที่สอง คือ คานที่มีแรงต้านอยู่ระหว่างแรงพยายามและจุดหมุน ดังภาพที่ 2.10



ภาพที่ 2.10 คานแบบที่สอง

3) คานแบบที่สาม คือ คานที่มีแรงพยายามอยู่ระหว่างแรงต้านและจุดหมุน ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 คานแบบที่สาม

บทที่ 3

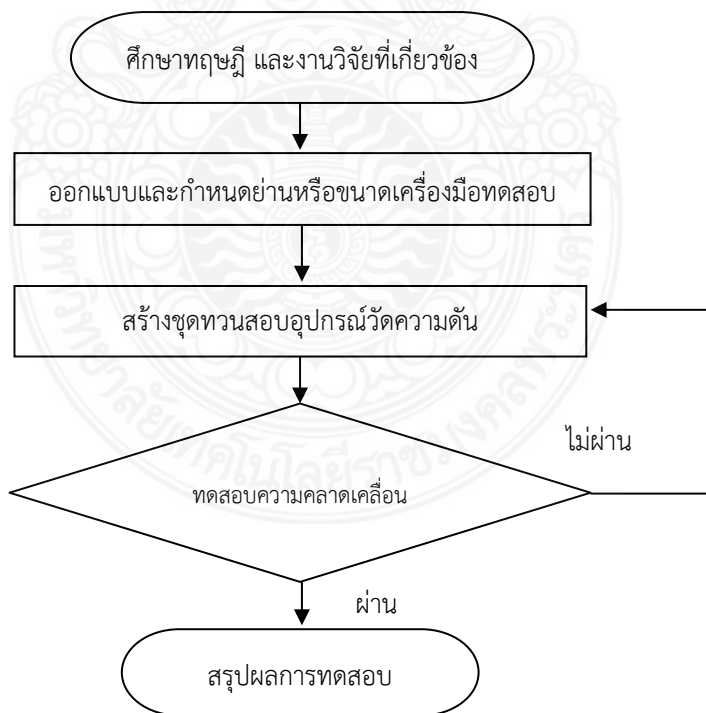
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์งานวิจัยในครั้งนี้ จำเป็นต้องมีการศึกษาข้อมูลต่างๆ และออกแบบการทดสอบ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

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

จากขั้นตอนการดำเนินงานดังกล่าวสามารถแสดงดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

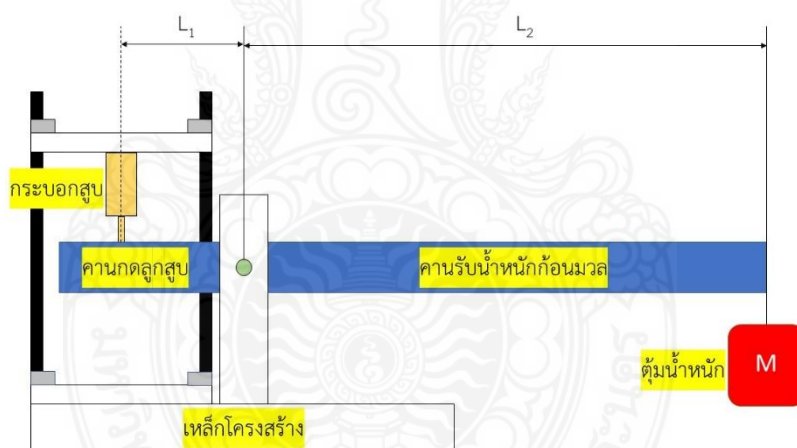
3.2 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ จึงเลือกที่จะทำชุดสาธิตการสอบเทียบ 1 อุปกรณ์วัดความดันโดยใช้วิธี Dead weight tester ใช้ทรานสดิวเซอร์เป็นอุปกรณ์วัดความดันใช้น้ำมันไฮดรอลิกเป็นสารตัวกลาง และออกแบบการทำงานของเครื่องโดยใช้ทฤษฎีคานงัด

3.3 การออกแบบชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

.33 1.การออกแบบชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

การออกแบบชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันควรคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของโครงการฯ โดยการออกแบบคานออกเป็น (1 ช่วง คือ 2คานกตลูกสูบ) L_1 เซนติเมตร 21 ยาว (2คานรับน้ำหนักก่อนมวล) L_2 เซนติเมตร เพื่อให้สัมพันธ์กับทรานสดิวเซอร์ความดันตาม 90 ยาว (ขอบเขตของโครงการที่กำหนดไว้และเลือกการติดตั้งลูกสูบไว้ด้านบนเพื่อให้สัมพันธ์กับลักษณะการทำงานของคานรับน้ำหนักจากการแขวนตุ้มน้ำหนัก ดังภาพที่3.2



ภาพที่ 3.2 การออกแบบชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

.33 2.การคำนวณแรง

การคำนวณหาแรงที่ใช้ในการออกแบบตุ้มน้ำหนักที่มากระทำต่อปลายคาน (F_2) มีมวลตั้งแต่ กิโลกรัม นำมาคำนวณหาแรงกิริยาเพื่อใช้ในการออกแบบและทดสอบ 40 และ 30 ,20 ,10 ,1 (2.10) ซึ่งสามารถคำนวณหาแรงกิริยาได้จากสมการที่

$$F=mg$$

แทนค่าหา F เมื่อลูกตุ้มมีมวล กิโลกรัม 1

$$F_{2,1} = (1 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$F_{2,1} = F_{\min} = 9.81 \text{ N}$$

แทนค่าหา F เมื่อลูกตุ้มมีมวล กิโลกรัม 10

$$F_{2,10} = (10 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$F_{2,10} = 98.1 \text{ N}$$

แทนค่าหา F เมื่อลูกตุ้มมีมวล กิโลกรัม 20

$$F_{2,20} = (20 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$F_{2,20} = 196.2 \text{ N}$$

แทนค่าหา F เมื่อลูกตุ้มมีมวล กิโลกรัม 30

$$F_{2,30} = (30 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$F_{2,30} = 294.3 \text{ N}$$

แทนค่าหา F เมื่อลูกตุ้มมีมวล กิโลกรัม 40

$$F_{2,40} = (40 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$F_{2,40} = 392.4 \text{ N}$$

แทนค่าหา F เมื่อลูกตุ้มมีมวล กิโลกรัม 41

$$F_{2,41} = (41 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$F_{2,41} = F_{2,\max} = 402.21 \text{ N}$$

3.3.3 การคำนวณโมเมนต์

จากการคำนวณแรงที่กระทำต่อปลายคาน (F₂) นำมาคำนวณโมเมนต์เพื่อหาแรงที่กระทำต่อลูกสูบ (F₁) ซึ่งสามารถคำนวณหาแรงได้จากสมการที่ (2.9)

$$F_1 \times L_1 = F_2 \times L_2$$

แทนค่า L₁ ยาว เซนติเมตร 21

L₂ ยาวตามระยะที่กำหนด (ตัวอย่าง L₂ มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 80 เซนติเมตร(

F₂ จากการคำนวณ) 3.1.2 ตัวอย่าง F_{2,max} มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 402.21 N)

เพื่อคำนวณหา F₁ ที่มีค่ามากที่สุด หรือ F_{1,max}

$$F_{1,\max} = \frac{F_2 \times L_2}{L_1}$$

$$F_{1,\max} = \frac{(402.21 \text{ N})(80 \text{ cm})}{(21 \text{ cm})} = 1,532.23 \text{ N}$$

3.3.4 การคำนวณขนาดพื้นที่หน้าตัดลูกสูบ

จากแรงที่กระทำต่อลูกสูบ (F_1) นำมาคำนวณหาขนาดลูกสูบ โดยคำนวณจากสภาวะความดันสูงสุด ($P_{\max, \text{the}}$) จากขอบเขตของโครงการที่ 2MPa หรือ 2N/mm^2 และแรงกระทำต่อลูกสูบที่มีค่ามากที่สุด ($F_{1, \max}$) มีค่าเท่ากับ 1,532.23N จากสมการ $P = F/A$ หรือ $A = F/P$ ดังตารางที่ 3.1

$$A = F_{1, \max} / P_{\max, \text{the}}$$

แทนค่า $F_{1, \max}$ มีค่าเท่ากับ 1,532.23 N

$P_{\max, \text{the}}$ มีค่าเท่ากับ 2 MPa หรือ 2N/mm^2

เพื่อคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดลูกสูบ A

$$A = F_{1, \max} / P_{\max, \text{the}}$$

$$A = (1,532.23\text{N}) / (2\text{N/mm}^2)$$

$$A = 766.12\text{mm}^2$$

เมื่อ $A = \frac{\pi}{4} d^2$ หรือ $d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$

แทนค่า A มีค่าเท่ากับ 766.12mm^2

เพื่อคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ d

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

$$d = \sqrt{\frac{4(766.12)}{\pi}} \text{mm}$$

$$d = 31.23\text{mm} \approx 32\text{mm}$$

จึงเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบมาตรฐาน มิลลิเมตร 32

ตารางที่ 3.1 ขนาดลูกสูบและความดัน

ขนาดลูกสูบ			
ความดัน, $P_{\max, \text{the}}$ (N/mm^2)	แรง, $F_{1, \max}$ (N)	พื้นที่หน้าตัดลูกสูบ, A (mm^2)	ขนาดลูกสูบ, d (mm)
2	1,532.23	766.12	31.23 \approx 32

จึงเลือกใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบมาตรฐาน มิลลิเมตรและมีพื้นที่หน้าตัด 32 ตารางมิลลิเมตร 767.48 ลูกสูบเท่ากับ จากนั้นทำการตรวจสอบความสามารถในการใช้งานจริงที่ สภาวะความดันสูงสุด ($P_{\max,act}$) และความดันต่ำสุด ($P_{\min,act}$) อีกครั้ง โดยคำนวณจากพื้นที่หน้าตัด ลูกสูบ A มีค่าเท่ากับ) ตารางมิลลิเมตร แรงกระทำต่อลูกสูบที่มีค่ามากที่สุด 767.48 $F_{1,\max}$) มีค่า เท่ากับ 1,532.23N และแรงกระทำต่อลูกสูบที่มีค่าน้อยที่สุด ($F_{1,\min}$) มีค่าเท่ากับ 9.34N จากสมการ $P = F/A$ ดังตารางที่ 3.2

สภาวะความดันสูงสุด ($P_{\max,act}$)

$$P_{\max,act} = F_{1,\max} / A$$

$$P_{\max,act} = (1,532.23N) / (767.48\text{mm}^2)$$

$$P_{\max,act} = 1.996\text{N/mm}^2$$

สภาวะความดันต่ำสุด ($P_{\min,act}$)

$$P_{\min,act} = F_{1,\min} / A$$

$$P_{\min,act} = (9.34N) / (767.48\text{mm}^2)$$

$$P_{\min,act} = 0.012\text{N/mm}^2$$

ตารางที่ 3.2 สภาวะความดันสูงสุด ($P_{\max,act}$) และความดันต่ำสุด ($P_{\min,act}$)

แรงที่กระทำต่อลูกสูบ, F (N)	พื้นที่หน้าตัดลูกสูบ ,A (mm ²)	ความดัน, P (N/mm ²)
$F_{1,\max} = 1,532.23$	767.48	$P_{\max,act} = 1.996$
$F_{1,\min} = 9.34$		$P_{\min,act} = 0.012$

3.4 การเลือกอุปกรณ์ประกอบชุดสาริตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

3.4.1. ทรานสดิวเซอร์ความดัน

จากขอบเขตของโครงการความดันมีขนาดไม่เกิน 2MPa หรือ 2N/mm² จึงเลือกใช้ ทรานสดิวเซอร์ความดันยี่ห้อ kyowa รุ่น PSG-20KA เนื่องจากรุ่นนี้มีความสามารถในการวัดค่าความดัน ได้ถึง 2MPa และมีค่า Nonlinearity และ Hysteresis อยู่ที่ไม่เกิน $\pm 0.3\%$ ค่า Safe overloads ถึง 150% ซึ่งถือว่ามีความละเอียดและแข็งแรง เหมาะสำหรับนำมาใช้ในการทดลอง



ภาพที่3.3 ทรานสดิวเซอร์ความดัน รุ่น PGS-20KA [14]

.342. จอแสดงผล

เลือกใช้ Model WGA-680A เนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย สามารถแสดงค่าที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ความดันมาเป็นค่าความดันและสามารถวัดค่า Output เป็นค่าทางกระแสไฟฟ้า ซึ่งจอแสดงผลนั้นมีค่า Nonlinearity อยู่ที่ไม่เกิน $\pm 0.02\%$



ภาพที่3.4 จอแสดงผล Model WGA-680A [15]

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลอง ถูกแบ่งออกเป็น (1 ขั้นตอน คือ 2การทวนสอบ (2การทดสอบความเป็นเชิงเส้น

3.5.1 การทวนสอบชุดสาริตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

การทวนสอบชุดสาริตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน เป็นการทดสอบเพื่อพิสูจน์ยืนยันว่าชุดสาริตฯ มีคุณลักษณะสอดคล้องกับคุณลักษณะที่ต้องการ ดังตารางที่ .33

ตารางที่ 3.3 สภาวะการทวนสอบชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

การทวนสอบการอ่านค่า			
มวล ,m) kg)	อุณหภูมิห้องทดสอบ ,T) °c)	ระยะคานกวด, L ₁ (cm)	ระยะแขนน้ำหนัก ,L ₂ (cm)
41 (m _{max})	25	21	80
1 (m _{min})		21	20

การทวนสอบชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1การเปิดเครื่องทดสอบ

การเปิดเครื่องทดสอบสามารถทำได้โดยเริ่มจากการต่อกระแสไฟเข้าชุดสาธิตฯ แล้วกดปุ่ม ZERO ให้ค่าก่อนการเก็บข้อมูลเป็นศูนย์ เพื่อให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด



ภาพที่3.5 การเปิดเครื่องทดสอบ

(2การปรับระดับคานของชุดสาธิตฯ

การปรับระดับคานของชุดสาธิตฯ สามารถทำได้โดยนำระดับน้ำวางบนคานของชุดสาธิตฯ ปรับระดับในแนวระนาบเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพในการทดสอบมากขึ้น



ภาพที่ 3.6 การปรับระดับคานของชุดสาธิตฯ

(3 การปรับระดับกระบอกสูบ

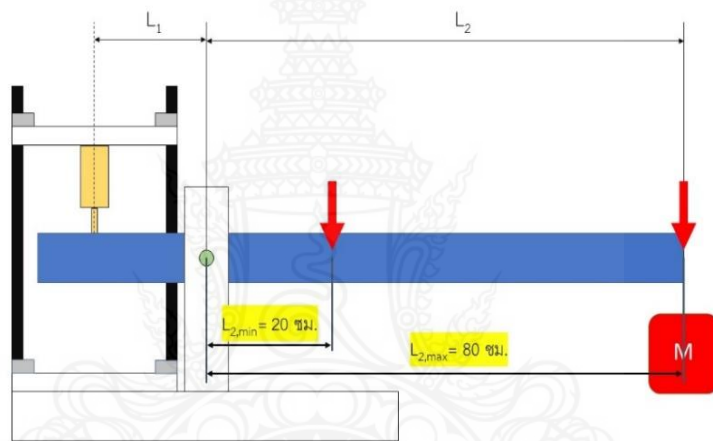
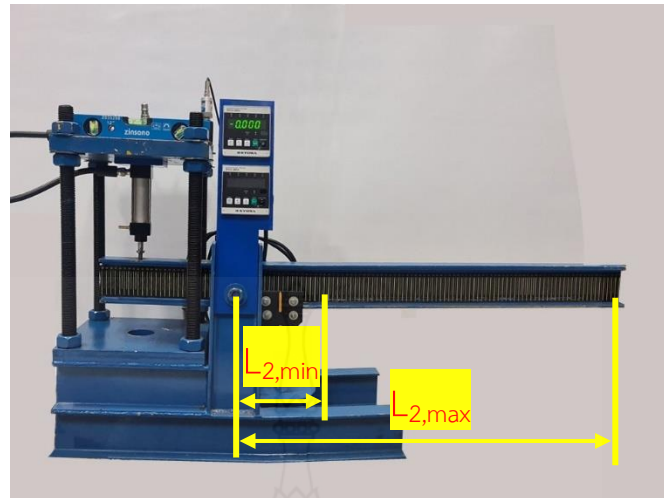
การปรับระดับกระบอกสูบสามารถทำได้โดยวางระดับน้ำบนแผ่นปรับระดับ จากนั้นขึ้นสกรูปรับระดับทั้ง ตัว 4 ให้แผ่นปรับระดับอยู่ในแนวระนาบและลูกสูบอยู่ในแนวตั้ง เพื่อให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพในการทดสอบมากขึ้น



ภาพที่ 3.7 การปรับระดับกระบอกสูบ

(4 เริ่มการทวนสอบ

เริ่มการทวนสอบตามสภาวะการทวนสอบชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันปรับความยาวคาน L_2 และมวลของตุ้มน้ำหนักตามในสภาวะที่กำหนดไว้ตามตารางที่ 3.3



ภาพที่ 3.8 เริ่มการทดสอบ

(5การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า

การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถทำได้โดยนำมัลติมิเตอร์มาวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว Input, Output, Com และ V_0 เพื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากมาตรแสดงผล



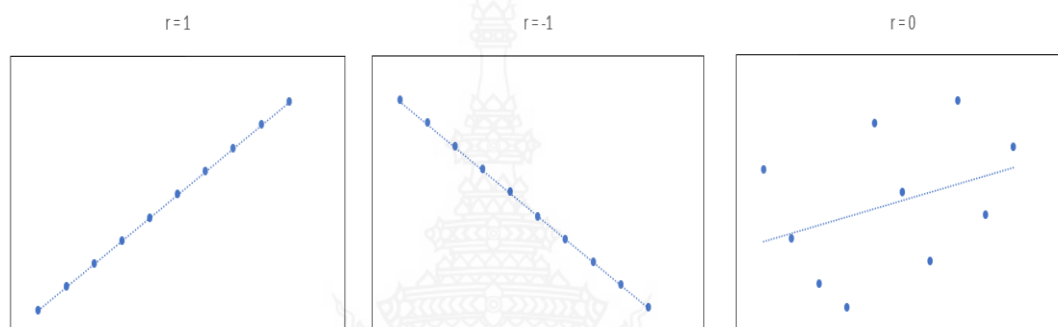
ภาพที่ 3.9 การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า

(6บันทึกผลการทวนสอบ

บันทึกผลการทวนสอบตามสภาวะการทวนสอบชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันที่กำหนดตามตารางที่ 3.3

3.5.2 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น

การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันจะแสดงให้เห็นความเที่ยงตรงและแม่นยำของชุดสถิติฯ โดยการเปรียบเทียบระหว่างความดันที่ได้จากการคำนวณและความดันที่ได้จากมาตรแสดงผล แสดงออกมาในรูปแบบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ด้วยสัญลักษณ์ r ดังภาพที่3.10



ภาพที่3.10 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ตารางที่ 3.4 สภาวะการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน			
มวล ,m) kg)	อุณหภูมิห้องทดสอบ ,T) °C)	ระยะคานกต, L_1 (cm)	ระยะแขนน้ำหนัก , L_2 (cm)
10	25	21	20-80
20			20-80
30			20-80
40			20-80

การทดสอบความเป็นเชิงเส้นของชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1การเปิดเครื่องทดสอบ

การเปิดเครื่องทดสอบสามารถทำได้โดยเริ่มจากการต่อกระแสไฟเข้าชุดสถิติฯ แล้วกดปุ่ม ZERO ให้ค่าก่อนการเก็บข้อมูลเป็นศูนย์ เพื่อให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

ดังภาพที่3.5

(2การปรับระดับคานของชุดสถิติฯ

การปรับระดับคานของชุดสถิติฯ สามารถทำได้โดยนำระดับน้ำวางบนคานของชุดสถิติฯ ปรับระดับในแนวระนาบเพื่อให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพในการทดสอบมากขึ้น ดังภาพที่3.6

(3การปรับระดับกระบอกลูกสูบ

การปรับระดับกระบอกลูกสูบสามารถทำได้โดยวางระดับน้ำบนแผ่นปรับระดับ จากนั้น
ชั้นสกรูปรับระดับทั้ง ตัว ปรับให้อยู่ในแนวระนาบและลูกสูบอยู่ในแนวตั้ง เพื่อให้ค่าที่ได้มี 4
ความแม่นยำและมีประสิทธิภาพในการทดสอบมากขึ้น ดังภาพที่3.7

(4เริ่มการทดสอบ

เริ่มการทดสอบโดยการนำตุ้มน้ำหนักที่มีขนาด กิโลกรัม 40 และ 30 ,20 ,10
แขวนบนเครื่องทดสอบกำหนดระยะ) เซนติเมตร โดยเพิ่มระยะคาน $20L_2$ ครั้งละ เซนติเมตร 5
พร้อมกับบันทึกผล 3.4 เซนติเมตร ตามสภาวะการทดลองที่กำหนดไว้ตามตารางที่ 80 จนถึง
ดังภาพที่3.11



ภาพที่3.11 เริ่มการทดสอบ

(5การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า

การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถทำได้โดยนำมัลติมิเตอร์มาวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขั้ว
Input, Output, Com และ V_0 เพื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากมาตรแสดงผล ดังภาพที่
3.9

(6 บันทึกผลการทดสอบ

บันทึกผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน
ที่ได้ในแต่ละช่วงน้ำหนักและระยะที่กำหนดตามตารางที่ เพื่อนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบกับ 3.3
ผลการคำนวณ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ผลการทวนสอบชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

จากผลการทวนสอบที่สภาวะความดันสูงสุด ($P_{\max,act}$) ความดันที่ได้จากการคำนวณ (x) และความดันที่ได้จากมาตรแสดงผล (y_1) มีความแตกต่างกันร้อยละ และที่สภาวะความดันต่ำสุด ($P_{\min,act}$) ความดันที่ได้จากการคำนวณ (x) และความดันที่ได้จากมาตรแสดงผล (y_1) มีความแตกต่างกันร้อยละ 25 ดังตารางที่ 4.1

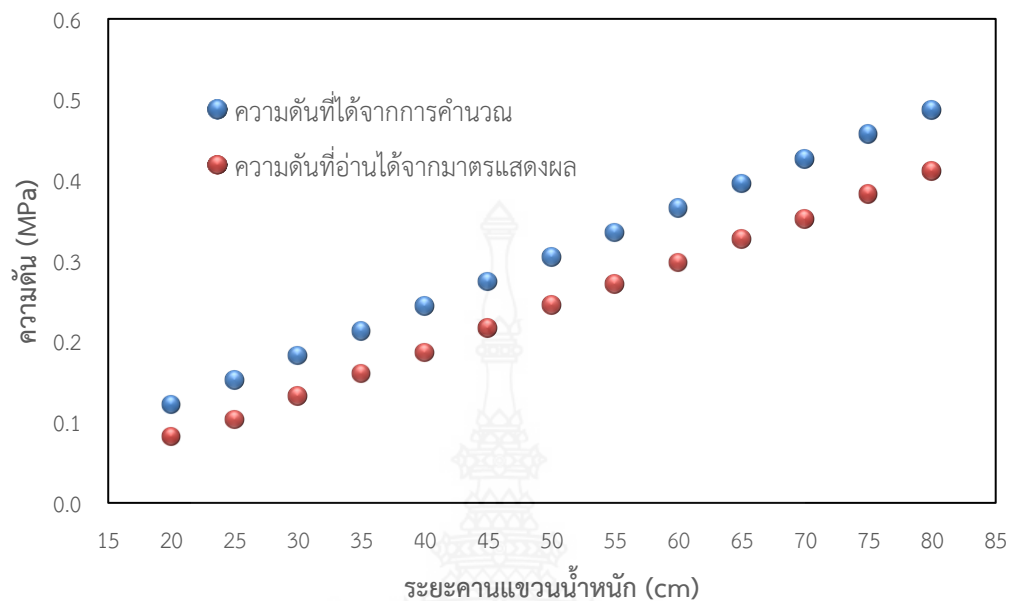
ตารางที่ 4.1 ผลการทวนสอบ

การทวนสอบ					
สภาวะ	ต้มน้ำหนัก , m) kg)	ระยะ , L_2)cm)	ผลความดัน คำนวณ , x)MPa)	ผลความดัน อ่านจากมาตร วัด , y_1)MPa)	ความ แตกต่าง , $x-y_1$)%)
$P_{\max,act}$	41	80	1.996	1.748	12.42
$P_{\min,act}$	1	20	0.012	0.009	25

4.2 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ครั้งที่ 1

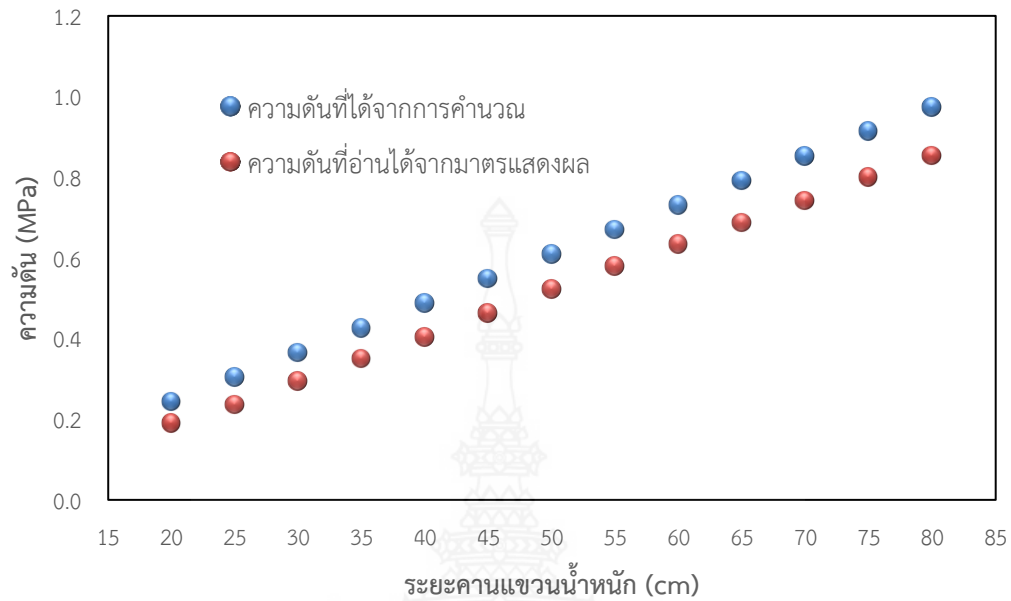
ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นระหว่างความดันที่ได้จากการคำนวณและมาตรแสดงผล 4.2.1

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล กิโลกรัม 10 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ได้จากการคำนวณ (x) และความดันที่ได้จากมาตรแสดงผล (y_1) และนำทฤษฎีสมการถดถอยแบบเส้นตรง (Linear regression) มาทำการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการได้คือ $y_1=0.0055x - 0.0331$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ โดยมีค่า 0.9998 ความน่าจะเป็น (P value) เท่ากับ 1.03×10^{-20} ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นของผลการทดลองครั้งนี้ที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ความดันและชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน ประกอบรวมกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความดันจากการคำนวณ (x) และความดันที่ได้จากมาตรแสดงผล (y_1) เฉลี่ยร้อยละ ดัง 21.98 ภาพที่ 4.1



ภาพที่4.1 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล กิโลกรัม 10

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล กิโลกรัม แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่าง 20) ความดันที่ได้จากการคำนวณ x) และความดันที่ได้จากมาตรแสดงผล (y_1) และนำทฤษฎีสมการถดถอยแบบเส้นตรง (Linear regression) มาทำการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการได้คือ $y_1=0.0112x - 0.04$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ) โดยมีค่าความน่าจะเป็น 0.9999P value) เท่ากับ 1.32×10^{-21} ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นของผลการทดลองครั้งนี้ที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ความดันและชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน ประกอบรวมกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความดันจากการคำนวณ (x) และความดันที่ได้จากมาตรแสดงผล (y_1) เฉลี่ยร้อยละ 15.89ภาพที่4.2

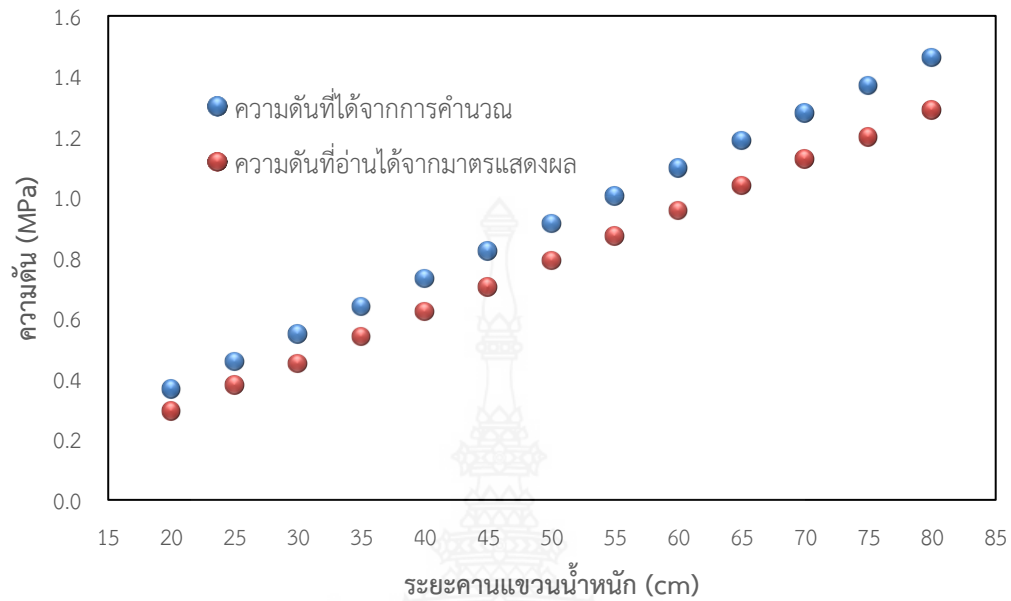


ภาพที่ 4.2 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล กิโลกรัม 20

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล กิโลกรัม แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่าง 30) ความดันที่ได้จากการคำนวณ (x) และความดันที่ได้จากมาตรแสดงผล (y_1) และนำทฤษฎีสมการถดถอยแบบเส้นตรง (Linear regression) มาทำการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการได้คือ $y_1=0.0166x - 0.041$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ) โดยมีค่าความน่าจะเป็น $0.9999P$ value) เท่ากับ 4.38×10^{-23} ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของผลการทดลองครั้งนี้ที่ได้จากทรานสดิวเซอร์

ค ว า ม ช ี น

และชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน ประกอบรวมกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความดันจากการคำนวณ (x) และความดันที่ได้จากมาตรแสดงผล (y_1) เฉลี่ยร้อยละ ดัง 14.40ภาพที่ 4.3

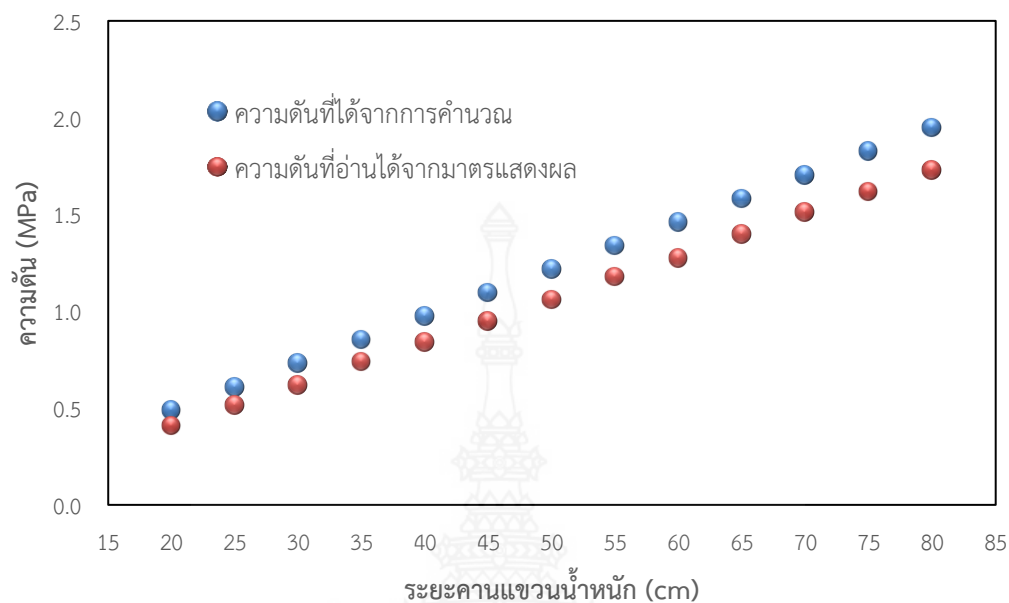


ภาพที่ 4.3 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล กิโลกรัม 30

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล กิโลกรัม แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่าง (ความดันที่คำนวณได้จากการคำนวณ x) และความดันที่อ่านได้จากมาตรแสดงผล (y_1) และนำทฤษฎีสมการถดถอยแบบเส้นตรง (Linear regression) มาทำการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการได้คือ $y_1=0.0221x - 0.04$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ) โดยมีค่าความน่าจะเป็น $0.9999P$ value) เท่ากับ 6.27×10^{-22} ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของผลการทดลองครั้งนี้ที่ได้จากทรานสดิวเซอร์

ค ว า ม ตั น

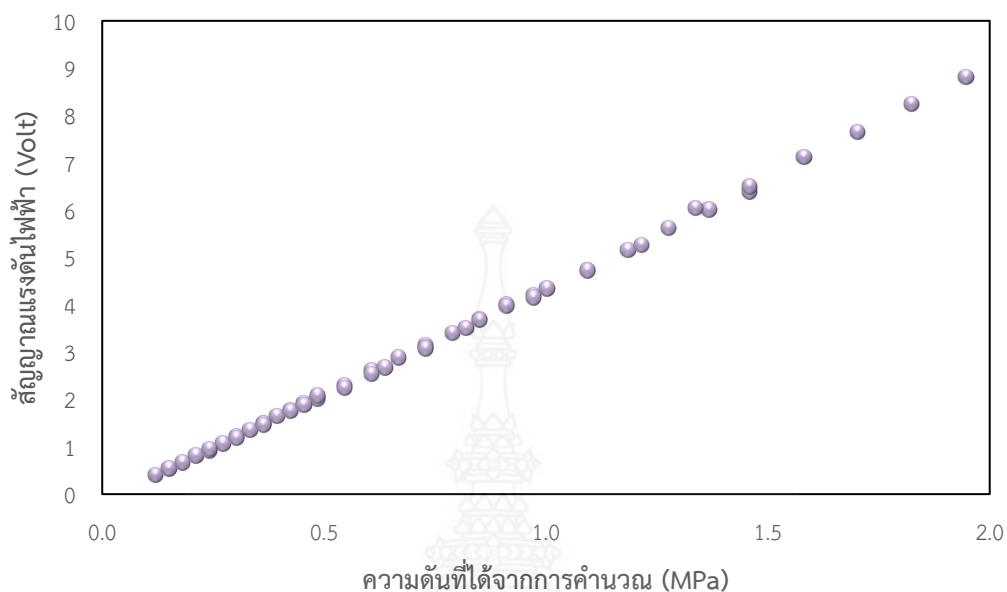
และชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน ประกอบรวมกัน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างความดันจากการคำนวณ (x) และความดันที่อ่านได้จากมาตรแสดงผล (y_1) เฉลี่ยร้อยละ ดัง 13.17 ภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นที่มวล กิโลกรัม 40

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นระหว่างความดันที่ได้จากการคำนวณและสัญญาณ 4.2.2 แรงดันไฟฟ้า

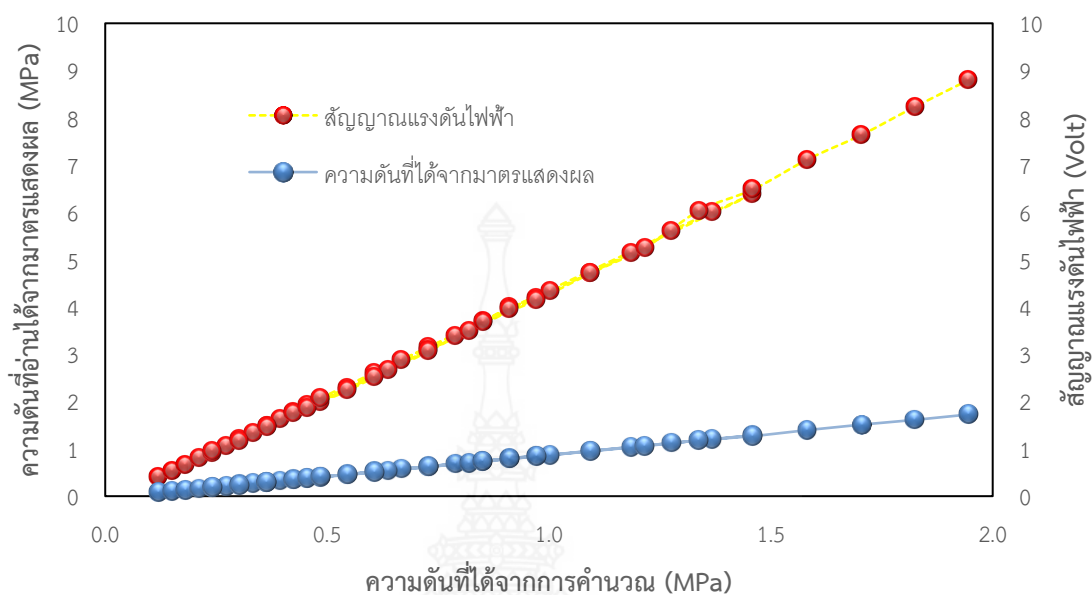
ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ได้จากการคำนวณ (x) และความดันที่อ่านได้จากสัญญาณแรงดันไฟฟ้า (y_2) จากการใช้ทฤษฎีสมการถดถอยแบบเส้นตรง (Linear Regression) สามารถสร้างสมการได้เท่ากับ $y_2 = 4.5683x - 0.2002$ และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 0.9996 โดยมีค่าความน่าจะเป็น (P value) เท่ากับ 3.84837×10^{-82} ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความเป็นเชิงเส้นของผลการทดลองครั้งนี้ที่ได้จากทรานสดิวเซอร์ความดันและชุดสถิติการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน ประกอบรวมกัน ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ได้จากการคำนวณและสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

ค่าความเบี่ยงเบน 4.2.3มาตรฐาน)Standard deviation)

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นผลลัพธ์ระหว่างความดันที่ได้จากมาตรแสดงผลและสัญญาณแรงดันไฟฟ้าโดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของมาตรแสดงผลเท่ากับ 0.00558และสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.02เนื่องจากเครื่องมือวัดที่ใช้ในการตรวจวัดระหว่างการทดลองมีข้อจำกัดด้านความละเอียดสูงสุดที่ 0.01 โวลต์ ทำให้ค่าที่บันทึกได้อาจมีความคลาดเคลื่อน อีกทั้งการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในห้องทดลองอาจส่งผลต่อความต้านทานของเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์ทำให้ผลการทดลองที่ได้จากสัญญาณแรงดันไฟฟ้ามียุทธศาสตร์ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่า (มัลติมิเตอร์) ผลการทดลองที่ได้จากมาตรแสดงผล ดังภาพที่4.6



ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากมาตรแสดงผลและสัญญาณแรงดันไฟฟ้า

4.2.4 ค่าความคลาดเคลื่อนของชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

การสร้างชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน ประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก 2 ตัว คือ 2 (1ทรานสดิวเซอร์ความดัน (2มาตรแสดงผล ซึ่งบริษัทผู้ผลิตได้กำหนดค่าความคลาดเคลื่อนของทรานสดิวเซอร์ความดันที่ร้อยละ 0.02 และค่าความคลาดเคลื่อนที่จอแสดงผลร้อยละ 0.3 สามารถนำค่าทั้งสองมาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนรวม

$$\begin{aligned} \text{ค่าความคลาดเคลื่อนรวม} &= \sqrt{0.3^2 + 0.02^2} \\ &= \text{ร้อยละ } 0.3 \end{aligned}$$

หลังจากการทดลองชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันพบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับร้อยละ 16.36 ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนรวมของอุปกรณ์หลักทั้ง 2 ตัวที่คำนวณได้จาก 2 มีความแตกต่างกัน 0.3 ข้อมูลบริษัทผู้ผลิตคือร้อยละร้อยละ ซึ่งค่าดังกล่าวสันนิษฐานว่า 16.06 เป็นค่าความคลาดเคลื่อนจากชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันที่สร้างขึ้น

4.3 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น ครั้งที่ 2

จากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมากจึงได้ทำ 1 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น ครั้งที่ โดยมีแนวทางในก 2ารทดลองเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนดังนี้ การวัดความยาวคาน 4.3.1

การวัดความยาวคานสามารถทำได้โดยใช้ตลับเมตรวัดความยาวออกมาจากจุดหมุนเพื่อตรวจสอบว่าแถบสติ๊กเกอร์วัดความยาวที่ติดอยู่บนคานมีความยาวถูกต้องตามค่าจริง โดยทำการวัดทั้งคานกลุ่กสูบและคานรับน้ำหนักก้อนมวล



ภาพที่ 4.7 การวัดความยาวคาน

การไล่อากาศออกจากระบบไฮดรอลิก 4.3.2

การไล่อากาศออกจากระบบไฮดรอลิกสามารถทำได้โดยการดึงก้านสูบเข้าและออกหลายๆครั้งเพื่อให้อากาศไหลผ่านออกทางกระปุกติมน้ำมันซึ่งอยู่ในตำแหน่งสูงสุดของระบบ



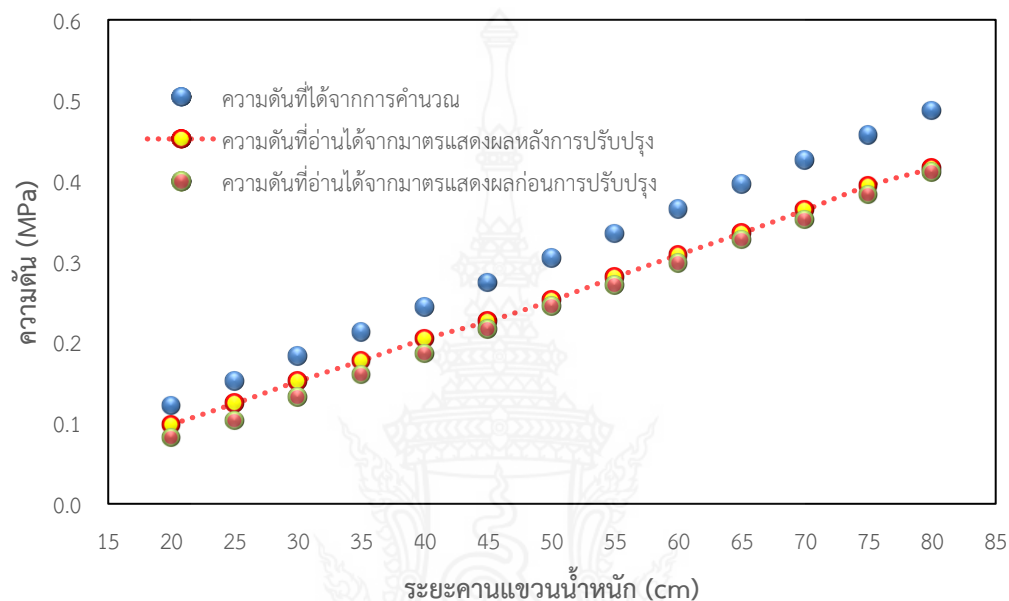
ภาพที่ 4.8 การไล่อากาศออกจากระบบไฮดรอลิก

การจับเวลาก่อนการเก็บข้อมูล 4.3.3

จากการสันนิษฐานว่าระยะเวลาส่งผลต่อค่าความดันที่อ่านได้จากมาตรแสดงผล จึงทำการจับเวลา วินาทีหลังจากแขวนตุ้มน้ำหนักแล้วจึงค่อยทำการบันทึกผล 10

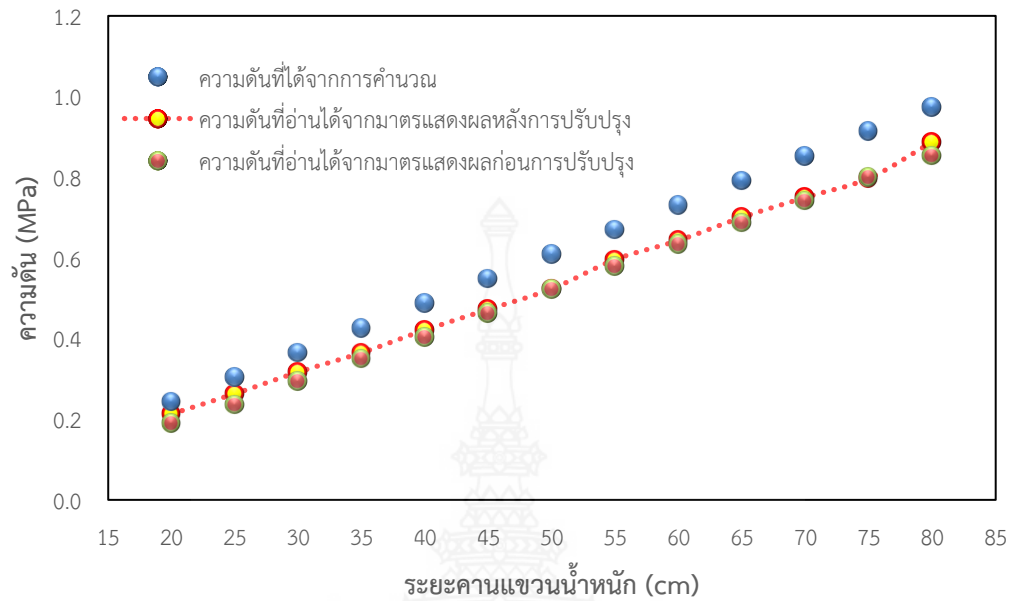
4.4 ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ครั้งที่ 2

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล กิโลกรัมพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อน 10 เฉลี่ยลดลงเหลือร้อยละ และมีค่าสัมประสิทธิ์ 0.0035 โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 16.24 สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9997 ดังภาพที่ 4.9



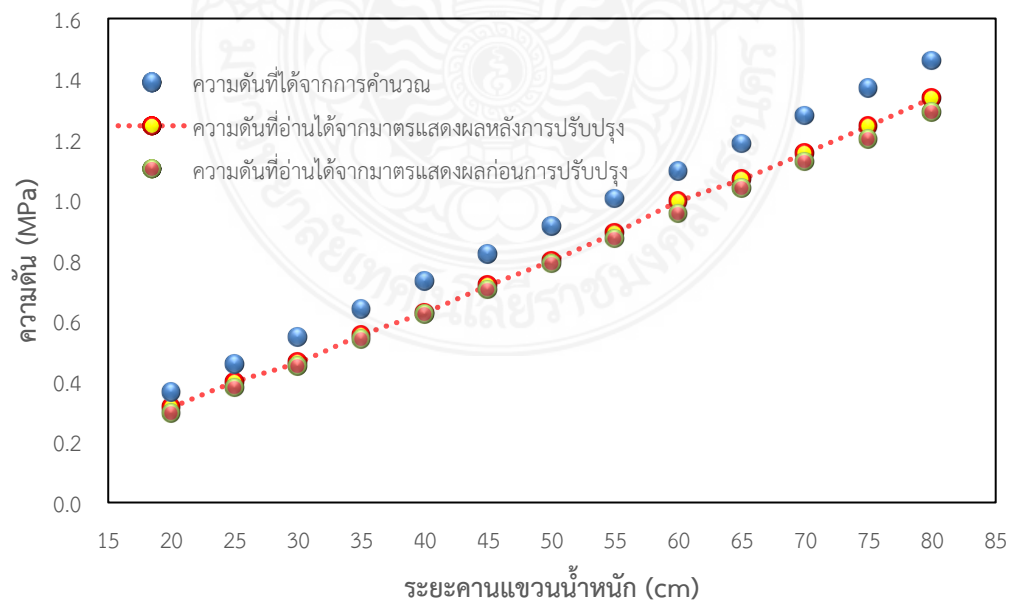
ภาพที่ 4.9 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล กิโลกรัม 10

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล กิโลกรัมพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อน 20 เฉลี่ยลดลงเหลือร้อยละ 12.51 โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0061 และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9990 ดังภาพที่ 4.10



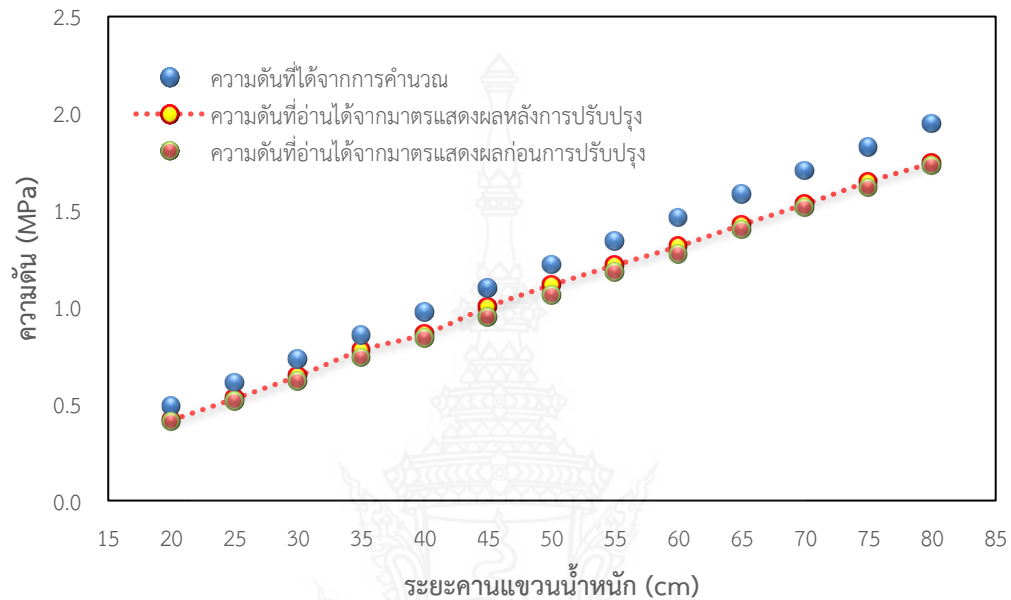
ภาพที่ 4.10 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล กิโลกรัม 20

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล กิโลกรัมพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อน 30 เบลีย์ลดลงเหลือร้อยละ 11.69 โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.007 และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9995 ดังภาพที่ 4.11



ภาพที่ 4.11 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล กิโลกรัม 30

ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล กิโลกรัมพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อน 40 เฉลี่ยลดลงเหลือร้อยละ 10.55 โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.0049 และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9996 ดังภาพที่4.12



ภาพที่4.12 การทดสอบความเป็นเชิงเส้นหลังการปรับปรุงที่มวล กิโลกรัม 40

บทที่ 5

สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป และอภิปราย การวิจัย

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการออกแบบชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน คณะผู้วิจัยจึงทำการศึกษาข้อมูล ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากการศึกษาพบว่า วิธีการที่นิยมใช้สอบเทียบความดันคือ การสอบเทียบความดันโดยใช้น้ำหนักตายตัว (Dead weight tester) เนื่องจากมีความแม่นยำสูง เสถียร และทำการสอบเทียบได้พิสัยกว้าง โดยสามารถแบ่งตามของไหลที่ใช้เป็นสารตัวกลางได้ 1 ประเภท คือ 2) ใช้อากาศเป็นสารตัวกลาง (Pneumatic dead weight tester) และ 2) ใช้ของเหลวเป็นสารตัวกลาง (Hydraulic dead weight tester) ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในบทที่ 1 ทั้งนี้ คณะผู้จัดทำได้ออกแบบชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันโดยเลือกใช้ประเภท Hydraulic dead weight tester ใช้น้ำมันเป็นสารตัวกลางเพราะมีย่านการวัดค่อนข้างสูงและออกแบบการทำงานของชุดสาธิตฯ จากทฤษฎีคานงัด เนื่องจากตุ้มน้ำหนักที่มีอยู่อย่างจำกัด และเพื่อความสะดวกในการทดลอง โดยออกแบบคานออกเป็น .1 ช่วง คือ 2คานกตุลลูกสูบ)L1 (ยาว .2 เซนติเมตร 21คานรับน้ำหนักก่อนมวล)L2เซนติเมตร และคำนวณขนาดเส้นผ่าน 80 ยาว (ศูนย์กลางลูกสูบจากสถานะความดันสูงสุด($P_{max,the}$) และแรงที่กระทำต่อลูกสูบ) $F_{1,max}$) ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบมีค่าเท่ากับ มิลลิเมตร จากนั้นทำการติดตั้งกระบอกสูบไว้ด้านบน 32) ของคานกตุลลูกสูบ หลักการทำงานคือ เมื่อแขวนตุ้มน้ำหนักไว้ที่คานรับน้ำหนักก่อนมวลL2คานจะ () กตุลลูกสูบทางด้านคานกตุลลูกสูบL1ซึ่งมีความยาวน้อยกว่า จะเบ้ (นการเพิ่มแรงที่กระทำต่อลูกสูบโดยใช้ข้อได้เปรียบเชิงกล ทำให้พิสัยการวัดกว้างขึ้น สอดคล้องกับขอบเขตของโครงการคือสร้างชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดันขนาดไม่เกิน 2MPa

นอกจากนี้ โครงการชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความคลาดเคลื่อนของชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน จากการศึกษาโดยแบ่งเป็น 5 1 หัวข้อ ได้แก่) การทวนสอบ 2) การทดสอบความเป็นเชิงเส้นระหว่างความดันที่ได้จากการคำนวณและมาตรฐานแสดงผล 3) การทดสอบความเป็นเชิงเส้นระหว่างความดันที่ได้จากการคำนวณและสัญญาณแรงดันไฟฟ้า 4) ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ 5) ค่าความคลาดเคลื่อนของชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน จากการศึกษาพบว่าค่าสหสัมพันธ์ หรือ r มีค่าเท่ากับ แสดง 0.9997 ให้เห็นถึงความเป็นเชิงเส้นระหว่างความดันที่ได้และความดันที่อ่านได้จากมาตรฐานแสดงผล

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

จากการทดลองชุดสาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน พบปัญหาระหว่างการทดลองดังนี้
ตู่มน้ำหนักที่นำมาใช้งานมีความคลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐานเนื่องจากสีกหลุดจากการใช้ 5.2.1
งานมานาน

5.2.2 เครื่องมือวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้า โวลต์ 0.01 มีความละเอียดสูงสุดเพียง (มิลลิเมตร)
และไม่ผ่านการสอบเทียบ จึงทำให้มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อน

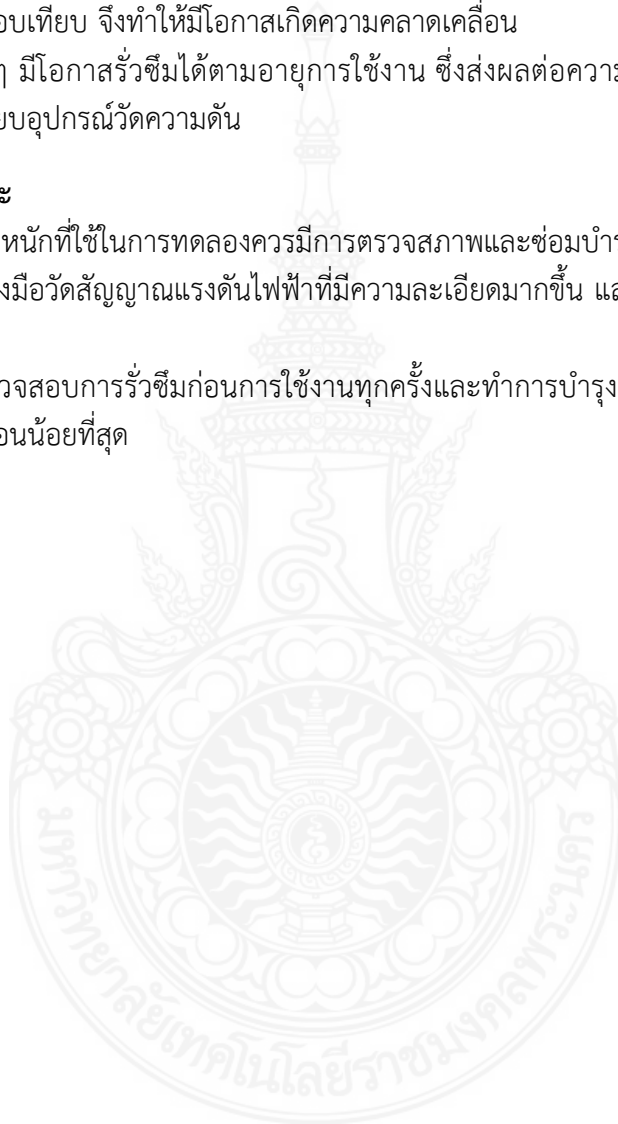
ข้อต่อต่าง ๆ มีโอกาสรั่วซึมได้ตามอายุการใช้งาน ซึ่งส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของชุด 5.2.3
สาธิตการสอบเทียบอุปกรณ์วัดความดัน

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ตู่มน้ำหนักที่ใช้ในการทดลองควรมีการตรวจสอบสภาพและซ่อมบำรุง

ควรรหาเครื่องมือวัดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีความละเอียดมากขึ้น และผ่านการสอบเทียบ 5.3.2
มาแล้ว

ควรมั่นตรวสอบการรั่วซึมก่อนการใช้งานทุกครั้งและทำการบำรุงรักษา เพื่อให้ค่าที่ได้ 5.3.3
มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด



บรรณานุกรม

- [1] C.Sitthisak (นามแฝง ,2560 ,(Laws of Motion [ออนไลน์]แหล่งที่มา ,: <https://www.scimath.org/lesson-physics/item/7207-laws-of-motion>. [09/12/2565
- [2] ม ,ป.ป.**Basic principle of hydraulics**, เอกสารวิชาหลักการพื้นฐานทางไฮดรอลิก สถาบันไทยเยอรมัน-
- [3] NGThai (นามแฝง ,2565 ,(โมเมนต์ของแรง [ออนไลน์]แหล่งที่มา ,: <https://ngthai.com/science/44847/moment-of-force/>. [09/12/2565]
- [4] kyowa, ม.,ป.ป. **สเตรนเกจคืออะไร** [ออนไลน์], แหล่งที่มา: https://www.kyowa-ei.co.th/tha/technical/strain_gages/strain_gage.html .[02/08/2564]
- [5] kyowa, ม ,.ป.ป.**วิทส์โตนบริดจ์** [ออนไลน์], แหล่งที่มา: https://www.kyowaei.co.th/tha/technical/strain_gages/wheatstone-bridge.html. [02/08/2564]
- [6] admin ,(นามแฝง)ม ,.ป.ป.**What is a pressure tranducer** [ออนไลน์], แหล่งที่มา: http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=813. [02/08/2564]
- [7] kyowa, ม ,.ป.ป.**Pressure transducer** [ออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.kyowa-ei.com/eng/technical/sensors/pressure.html>. [02/08/2564]
- [8] เกศญาณุพร ณรงค์แสงลณี ดางาม และศรัณย์ประวิช ,พงศธร ลิ้มปิษฐ์เฐียร ,นฤพนธ์ ทองอิม ,พรหมณ์ 2562, การศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดสอบโพลดเซลล์ปริมาตรนิพนธ์ ,มหาวิทยาลัย ,คณะวิศวกรรมศาสตร์ ,สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ,วิศวกรรมศาสตรบัณฑิตเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- [9] Pamsurisa (นามแฝง ,2565 ,(สมการเส้นตรง [ออนไลน์]แหล่งที่มา ,: [สมการกราฟเส้นตรง | pamsurisa \(wordpress.com\)](http://pamsurisa.wordpress.com). [10/12/2565]
- [10] บุศราศิริ ธนะ ,2565 ,**ความชัน** [ออนไลน์]แหล่งที่มา ,: <https://www.scimath.org/article-mathematics/item/12586-2022-02-15-07-09-20>. [10/12/2565]
- [11] สายชล สีนสมบูรณ์ทอง ,2562 ,**สถิติเบื้องต้น** ,3 พิมพ์ครั้งที่ ,กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- [12] วรวิทย์ จัฑ์สุวรรณ ,2564 ,**การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์** [ออนไลน์]แหล่งที่มา ,: https://web.rmutp.ac.th/woravith/?page_id=8206. [18/01/2566]
- [13] Thananthorn (นามแฝง ,2562 ,(หลักการทำงานของคาน [ออนไลน์]แหล่งที่มา ,: <https://www.trueplookpanya.com/knowledge/content/71147/-blo-sciphy-sci->. [06/12/2565]
- [14] kyowa, ม.,ป.ป. **PGS-A Small-sized Pressure Transducer** [ออนไลน์]แหล่งที่มา ,: <https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/sensors/pgs-a/index.html>. [15/08/2564]

- [15] kyowa, ม., .ป.ป.WGA-680A Instrumentation Amplifier [ออนไลน์], แหล่งที่มา: <https://www.kyowa-ei.com/eng/product/category/acquisition/wga-680a/index.html>.
[15/08/2564]



ภาคผนวก
ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น



ตารางที่ ก 1.ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ครั้งที่ 1

ระยะ (cm)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ, x (MPa)	ค่าเฉลี่ยจากการ ทดสอบ ,y ₁ (MPa)	ค่าที่ได้จากการทดสอบ แรงเคลื่อนไฟฟ้า ,y ₂ (VDC)	ความ แตกต่าง ,x-y ₁ (%)
	ตุ้มน้ำหนัก			
	10kg	10kg	10kg	
20	0.122	0.082	0.40	32.64
25	0.152	0.103	0.54	32.31
30	0.183	0.132	0.66	27.71
35	0.231	0.160	0.81	24.89
40	0.243	0.186	0.92	23.60
45	0.274	0.216	1.07	21.14
50	0.304	0.245	1.22	19.49
55	0.335	0.271	1.35	19.04
60	0.365	0.298	1.49	18.40
65	0.396	0.327	1.64	17.34
70	0.426	0.352	1.78	17.38
75	0.457	0.383	1.92	16.10
80	0.0487	0.411	2.06	15.59
	ตุ้มน้ำหนัก			
	20kg	20kg	20kg	
20	0.243	0.190	0.95	21.95
25	0.304	0.236	1.18	22.45
30	0.365	0.293	1.49	19.77
35	0.426	0.350	1.75	17.85
40	0.487	0.403	2.00	17.23
45	0.548	0.463	2.29	15.48
50	0.609	0.523	2.60	14.07

ตารางที่ ก 1.ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ครั้งที่ 1 (ต่อ)

ระยะ (cm)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ, x (MPa)	ค่าเฉลี่ยจากการ ทดสอบ ,y ₁ (MPa)	ค่าที่ได้จากการทดสอบ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (VDC)	ความ แตกต่าง ,x-y ₁ (%)
	ตุ้มน้ำหนัก			
	20kg	20kg	20kg	
55	0.670	0.579	2.88	13.52
60	0.730	0.633	3.15	13.33
65	0.791	0.687	3.40	13.17
70	0.852	0.742	3.70	12.92
75	0.913	0.800	4.00	12.37
80	0.974	0.853	4.20	12.41
	ตุ้มน้ำหนัก			
	30kg	30kg	30kg	
20	0.365	0.294	1.46	19.49
25	0.457	0.379	1.87	16.97
30	0.548	0.450	2.24	17.85
35	0.639	0.539	2.67	15.66
40	0.730	0.622	3.10	14.84
45	0.822	0.703	3.50	14.44
50	0.913	0.790	3.97	13.47
55	1.004	0.872	4.34	13.17
60	1.096	0.955	4.73	12.83
65	1.187	1.039	5.15	12.46
70	1.278	1.126	5.62	11.98
75	1.370	1.200	6.01	12.37
80	1.461	1.289	6.39	11.76

ตารางที่ ก 1.ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ครั้งที่ 1 (ต่อ)

ระยะ (cm)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ, x (MPa)	ค่าเฉลี่ยจากการ ทดสอบ ,y ₁ (MPa)	ค่าที่ได้จากการทดสอบ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (VDC)	ความ แตกต่าง ,x-y ₁ (%)
	ตุ้มน้ำหนัก			
	40kg	40kg	40kg	
20	0.487	0.408	2.08	16.21
25	0.609	0.513	2.53	15.71
30	0.730	0.618	3.07	15.38
35	0.852	0.739	3.68	13.27
40	0.974	0.840	4.15	13.74
45	1.096	0.949	4.72	13.38
50	1.217	1.059	5.26	13.00
55	1.339	1.178	6.04	12.02
60	1.461	1.272	6.49	12.92
65	1.583	1.398	7.12	11.66
70	1.704	1.513	7.64	11.22
75	1.826	1.617	8.24	11.44
80	1.948	1.729	8.81	11.23

ตารางที่ ก 2.ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ครั้งที่ 2

ระยะ (cm)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ, x (MPa)	ค่าเฉลี่ยจากการ ทดสอบ ,y ₁ (MPa)	ค่าที่ได้จากการทดสอบ แรงเคลื่อนไฟฟ้า ,y ₂ (VDC)	ความ แตกต่าง ,x-y ₁ (%)
	ตุ้มน้ำหนัก			
	10kg	10kg	10kg	
20	0.122	0.098	0.38	19.22
25	0.152	0.124	0.55	18.29
30	0.183	0.152	0.68	16.76
35	0.231	0.177	0.82	16.76
40	0.243	0.204	0.93	16.07
45	0.274	0.226	1.08	17.37
50	0.304	0.252	1.21	17.20
55	0.335	0.281	1.35	16.06
60	0.365	0.309	1.49	15.48
65	0.396	0.336	1.64	15.16
70	0.426	0.364	1.76	14.49
75	0.457	0.394	1.92	13.62
80	0.0487	0.419	2.03	13.95
	ตุ้มน้ำหนัก			
	20kg	20kg	20kg	
20	0.243	0.213	0.98	12.51
25	0.304	0.263	1.25	13.47
30	0.365	0.317	1.50	13.20
35	0.426	0.365	1.78	14.33
40	0.487	0.421	2.04	13.47
45	0.548	0.472	2.34	13.78
50	0.609	0.523	2.58	14.02

ตารางที่ ก 2.ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้น ครั้งที่ 2(ต่อ)

ระยะ (cm)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ, x (MPa)	ค่าเฉลี่ยจากการ ทดสอบ ,y ₁ (MPa)	ค่าที่ได้จากการทดสอบ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (VDC)	ความ แตกต่าง ,x-y ₁ (%)
	ตุ้มน้ำหนัก			
	20kg	20kg	20kg	
55	0.670	0.596	2.96	10.98
60	0.730	0.643	3.16	11.92
65	0.791	0.701	3.49	11.45
70	0.852	0.750	3.75	11.99
75	0.913	0.797	3.98	12.67
80	0.974	0.887	4.36	8.89
	ตุ้มน้ำหนัก			
	30kg	30kg	30kg	
20	0.365	0.315	1.48	13.84
25	0.457	0.398	1.97	12.74
30	0.548	0.463	2.32	15.42
35	0.639	0.554	2.73	13.37
40	0.730	0.628	3.14	13.97
45	0.822	0.717	3.56	12.70
50	0.913	0.800	3.94	12.41
55	1.004	0.892	4.42	11.18
60	1.096	0.995	4.90	9.21
65	1.187	1.069	5.33	9.93
70	1.278	1.155	5.76	9.61
75	1.370	1.245	6.20	9.12
80	1.461	1.337	6.67	8.45

ตารางที่ ก 2.ผลการทดสอบความเป็นเชิงเส้นครั้งที่ 2 (ต่อ)

ระยะ (cm)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ, x (MPa)	ค่าเฉลี่ยจากการ ทดสอบ , y_1 (MPa)	ค่าที่ได้จากการทดสอบ แรงเคลื่อนไฟฟ้า (VDC)	ความ แตกต่าง , $x-y_1$ (%)
	ตุ้มน้ำหนัก			
	40kg	40kg	40kg	
20	0.487	0.416	2.07	14.64
25	0.609	0.527	2.64	13.47
30	0.730	0.644	3.21	11.88
35	0.852	0.777	3.80	8.86
40	0.974	0.861	4.29	11.56
45	1.096	1.001	5.00	8.60
50	1.217	1.114	5.53	8.52
55	1.339	1.216	6.06	9.22
60	1.461	1.313	6.55	10.10
65	1.583	1.425	6.98	9.93
70	1.704	1.531	7.65	10.17
75	1.826	1.647	8.15	9.80
80	1.948	1.745	8.81	10.43

ตารางแสดงค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิวสัมผัสของยางที่ใช้ทดสอบ

ยาง	มุมเอียง $\theta(^{\circ})$	จุดที่ 1 $x_1(\text{mm}^2)$	จุดที่ 2 $x_2(\text{mm}^2)$	จุดที่ 3 $x_3(\text{mm}^2)$	เฉลี่ย $\bar{X}(\text{mm}^2)$
ยางไบแอส สำหรับทาง เรียบ	0	2,349	2,492	2,401	2,414
	5	2,581	2,551	2,647	2,593
	10	2,406	2,662	2,466	2,511
	15	2,546	2,792	2,621	2,653
ยางไบแอส สำหรับทุก สภาพผิวถนน	0	2,118	2,252	2,030	2,134
	5	2,131	2,118	2,361	2,203
	10	2,588	2,339	2,493	2,473
	15	2,362	2,538	2,531	2,477
ยางเรเดียล สำหรับทาง เรียบ	0	2,614	2,612	2,579	2,602
	5	2,436	2,523	2,567	2,509
	10	2,634	2,526	2,512	2,558
	15	2,516	2,512	2,575	2,534

ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของยางแต่ละตัวอย่าง ที่อุณหภูมิ 25°C(N/kN)

มุม เอียง θ ($^{\circ}$)	ยางไบแอส สำหรับทางเรียบ			ยางไบแอส สำหรับทุกสภาพผิวถนน			ยางเรเดียล สำหรับทางเรียบ		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
0	17.80	17.65	17.24	16.97	16.92	16.28	18.85	18.27	17.39
5	18.08	18.41	19.20	16.08	16.32	16.20	18.79	18.61	18.87
10	18.64	19.69	18.85	17.15	17.04	16.45	18.96	17.49	17.42
15	19.45	19.57	19.85	17.43	17.45	17.76	19.34	18.48	18.01

ตารางค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

มุมเอียง θ ($^{\circ}$)	ยางไบแอสสำหรับทางเรียบ		ยางไบแอสสำหรับทุกสภาพผิวถนน		ยางเรเดียลสำหรับทางเรียบ		ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนในแต่ละมุม (N/kN)
	ค่าเฉลี่ย \bar{X} (N/kN)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน S.D.	ค่าเฉลี่ย \bar{X} (N/kN)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน S.D.	ค่าเฉลี่ย \bar{X} (N/kN)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน S.D.	
0	17.56	0.28	18.17	0.73	16.72	0.38	17.43
5	18.56	0.57	18.75	0.12	16.20	0.10	17.83
10	19.06	0.55	18.05	0.79	16.88	0.37	17.99
15	19.62	0.19	18.61	0.67	17.54	0.17	18.59

ตารางค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนต่อหน่วยพื้นที่ยางไบแอสสำหรับทางเรียบ

มุมเอียง θ ($^{\circ}$)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิวสัมผัส A (mm^2)	ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน $C_{r25^{\circ}\text{C}}$ (N/kN)	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนต่อหน่วยพื้นที่ ($\text{N/kN}\cdot\text{mm}^2$)
0	2,414	17.56	7.2
5	2,593	18.56	7.1
10	2,511	19.06	7.5
15	2,653	19.62	7.3
\bar{X}	2,543	18.70	7.3

ตารางค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนต่อหน่วยพื้นที่ยางไบแอสสำหรับทุกสภาพผิวถนน

มุมเอียง θ ($^{\circ}$)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิวสัมผัส A (mm^2)	ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน $C_{r25^{\circ}\text{C}}$ (N/kN)	ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนต่อหน่วยพื้นที่ ($\text{N/kN}\cdot\text{mm}^2$)
0	2,134	18.17	8.5
5	2,203	18.75	8.7
10	2,473	18.05	6.9
15	2,477	18.61	7.8
\bar{X}	2,322	18.39	8.0

ตารางค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุนต่อหน่วยพื้นที่ยางเรเดียลสำหรับทางเรียบ

มุม เอียง θ (°)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ผิวสัมผัส A (mm ²)	ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์ความ ต้านทานการหมุน C _{r25°C} (N/kN)	สัมประสิทธิ์ความ ต้านทานการหมุนต่อ หน่วยพื้นที่ (N/kN·mm ²)
0	2,602	16.72	6.3
5	2,509	16.20	6.4
10	2,558	16.88	6.4
15	2,534	17.54	6.9
\bar{X}	2,551	16.83	6.5



ประวัติผู้วิจัย



หัวหน้าโครงการ

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

4. ประวัติการศึกษา

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

5. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญเป็นพิเศษ ระบุสาขาวิชาการ (ซึ่งอาจแตกต่างจากวุฒิการศึกษา)
- เทคนิคการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ (Computation and Simulation Techniques)

- เทคโนโลยีและการจัดการด้านพลังงาน (Energy Technology and Management)
6. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยระบุสถานภาพในการทำวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัยหรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละข้อเสนอการวิจัย
- 6.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย : -
- 6.2 หัวหน้าโครงการวิจัย : -
- เครื่องทดสอบพฤติกรรมวัสดุความเสียดทาน
 - การศึกษาปัจจัยการออกแบบท่อพักไอเสียเพื่อลดเสียงรบกวนและรักษาสมรรถนะของเครื่องยนต์
- 6.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :

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

Lakkam, S., & Suwataroj, K.) 2018. (A study of the injury mitigation of pedestrians based on head injury criterion using the lifted-up hood technique..... <i>Proceedings of the 10th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being)STISWB 2018(, Vientiane, Lao PDR, July 11th- 13th 51-53</i>	2018	การประชุมวิชาการ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร	หัวหน้าโครงการ
Suwataroj, K., & Lakkam, S.) 2018. (Development of remote monitoring system of locomotive engine via cloud network for the state railway of Thailand. <i>Proceedings of the 10th International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being)STISWB 2018(, Vientiane, Lao PDR, July 11th- 13th 54-56</i>	2018	การประชุมวิชาการ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร	ผู้ร่วมวิจัย

6.4 งานวิจัยที่กำลังทำ : -



ผู้ร่วมโครงการ

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

4. ประวัติการศึกษา

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

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

6.3 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว :

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

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

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

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

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

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

งานวิจัยที่กำลังทำ : -