

# โหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำสำหรับเครื่องทดสอบการรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกน

## Submersible Load Cells for Triaxial Tests

ปิยะฉัตร ฉัตรตันใจ\*  
ชนม์พิสิทธิ์ ยาห้วม  
ชนกันต์ โคจรนา

ภาควิชา วิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ.ชลบุรี

\*Corresponding Author. Email : Piyachatc@eng.buu.ac.th

(Received: August 17, 2018; Revised: September 21, 2018; Accepted: September 24, 2018)

**บทคัดย่อ :** งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาและการออกแบบโหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำขนาด 5 kN สำหรับเครื่องทดสอบหาค่าแรงเฉือนของดินแบบสามแกนซึ่งจะถูกออกแบบให้สามารถบรรจุโหลดเซลล์ดังกล่าวเข้าไปภายในเซลล์ทดสอบเพื่อตัดปัญหาความผิดพลาดในการวัดแรงเนื่องจากแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งเหล็กกดด้านบน (Piston) กับเซลล์ทดสอบ ในการออกแบบจะใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์การเสียรูปเพื่อหาความหนาของแผ่นวัดแรงที่เหมาะสมและตำแหน่งที่ดีที่สุดที่จะใช้ในการติดตั้งชุดสเตรนเกจ การศึกษาผลกระทบของแรงเสียดทานและแรงดันน้ำที่มีผลต่อการอ่านค่าแรงในแนวตั้งของโหลดเซลล์ที่ประดิษฐ์ขึ้นจะทดสอบโดยการสอบเทียบการรับน้ำหนักของโหลดเซลล์ผ่านสปริงที่ทำการสอบเทียบแล้ว โดยอุปกรณ์ทั้งสองจะถูกบรรจุเข้าไปในเซลล์ทดสอบค่าแรงเฉือนของดินแบบสามแกน การสอบเทียบนั้นทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันน้ำภายในเซลล์ทดสอบและทำการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงกดจากผลการทดสอบพบว่าโหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำที่ได้รับการออกแบบในงานวิจัยนี้มีความเป็นเส้นตรงและความแม่นยำดี อีกทั้งยังสามารถกำจัดผลกระทบของแรงดันน้ำภายในเซลล์ทดสอบต่อการวัดค่าแรงกดในแนวตั้งรวมทั้งกำจัดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากแรงเสียดทานทำให้การวัดค่าแรงกดมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

**คำสำคัญ:** โหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำ การทดสอบแรงอัดแบบสามแกน แรงในแนวตั้ง แรงเสียดทาน

**Abstract :** The main purpose of this research is to study and design a 5 kN artificial submersible load cell of triaxial tests. In order to eradicate the effect of the skin friction between piston bar and the triaxial cell on measured vertical load, this load cell was designed to install inside the triaxial cell. The finite element method was not only used to determine the suitable model geometry and the thickness of diaphragm but also the position for installation of strain gauges. The effect of skin friction and confining pressure were evaluated by a particular calibration method which the load cell and the calibrated spring were all placed inside the triaxial cell. The calibration processes were performed under several confining pressures and for loading and unloading conditions. According to the testing results, this artificial submersible load cells has very good linearity and accuracy and there is no effect on confining pressure and skin friction for measurement the high-accurate vertical load.

**Keywords:** Submersible Load Cells, Triaxial Compression Tests, Vertical Stress, Friction

## 1. บทนำ

งานด้านการทดสอบในสาขาวิศวกรรมปฐพีส่วนใหญ่เน้นมักจะเน้นไปที่การหาค่าความสามารถในการรับแรงเฉือนของดินเป็นหลัก ซึ่งการทดสอบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือการทดลองแรงอัดแกนเดียว (Unconfined Compression Test) การทดสอบแรงเฉือนแบบโดยตรง (Direct Shear Test) และการทดสอบการรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกน (Triaxial Test) ซึ่งทั้งสามการทดสอบนี้จะมีการจำลองเงื่อนไขสถานะแวดล้อม (Boundary Condition) ที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามทั้งสามการทดสอบนั้นจะต้องมีการวัดค่าของแรงกระทำในแนวแกน ซึ่งในอดีตจะนิยมใช้มาตรวัดแรงแบบวงแหวน (Proving Ring) ซึ่งทำหน้าที่ไม่ต่างจากสปริงที่มีความเป็นอีลาสติคเชิงเส้นสูง (Linear Elastic) เมื่อมีแรงกดในแนวแกนมากกระทำก็จะเกิดการยุบตัวซึ่งจะแปรผันตรงกับค่าแรงกระทำ ดังนั้นผู้ทดสอบจะทราบค่าแรงกระทำได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวโดยอ่านได้จากค่าการยุบตัวของไดอัลเกจ (Dial Gauge) แต่เนื่องจากมาตรวัดแรงแบบวงแหวนนั้นจะต้องอาศัยการอ่านด้วยตาซึ่งอาจเกิดความผิดพลาดทั้งด้านการอ่านค่าและจังหวะการอ่านตามเวลาที่

กำหนด หรือในกรณีที่การทดสอบนั้นต้องใช้ระยะเวลาการทดสอบยาวนาน จึงไม่สะดวกที่จะต้องคอยเข้ามาอ่านค่าตามเวลาที่กำหนด ดังนั้นจึงมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่สามารถทำการวัดแรงได้อย่างถูกต้องแม่นยำอีกทั้งยังมีความสะดวกในการใช้งานเนื่องจากสามารถเก็บค่าแรงกดตามเวลาที่กำหนดแบบอัตโนมัติซึ่งอุปกรณ์นี้เรียกว่า “โหลดเซลล์” (Load Cell) โหลดเซลล์ คือ อุปกรณ์ที่สามารถแปลงค่าแรงกด หรือแรงดึง เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ ซึ่งการเปลี่ยนพลังงานทางกลให้กลายเป็นการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า (Voltage) จะต้องอาศัยเซนเซอร์ที่เรียกว่า “สเตรนเกจ” (Strain Gauge) ซึ่งมักจะต่อกันเป็นวงจรแบบ “Full-Bridge” เพื่อให้สัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาจากรวงจรมีความชัดเจนที่สุด การนำโหลดเซลล์มาใช้งานในการทดสอบด้านวิศวกรรมปฐพีมักจะพบเห็นในการทดสอบการรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกน ซึ่งจะต้องทำงานร่วมกับอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) และระบบเก็บข้อมูลอัตโนมัติ (Data Acquisition) การติดตั้งโหลดเซลล์เข้าไปในเครื่องทดสอบแรงอัดแบบสามแกนนั้นแต่เดิมมักจะติดตั้งบริเวณด้านบนบนของเซลล์ทดสอบ (Triaxial Cell) และส่งถ่ายแรงผ่านแท่งกดลงสู่ตัวอย่างดิน โดยที่ระหว่าง

ผิวสัมผัสของแท่งกด (Piston) กับตัวเซลล์ทดสอบนั้น จะมีระบบป้องกันการรั่วซึมของน้ำโดยใช้โอริง (O-Ring) ร่วมกับสารหล่อลื่น (Grease) เพื่อลดแรงเสียดทาน แต่อย่างไรก็ตามการวัดแรงระบบนี้ก็หลีกเลี่ยงความผิดพลาดในการวัดแรงเนื่องจากแรงเสียดทานไม่ได้ ดังนั้นจึงมีการนำเอาโพลดเซลล์ทนแรงดันน้ำ (Submersible Load Cells) เข้ามาใช้โดยโพลดเซลล์ชนิดนี้ถูกออกแบบเพื่อติดตั้งภายในเซลล์ทดสอบ จึงสามารถตัดปัญหาความผิดพลาดในการวัดแรงในแนวแกนเนื่องจากแรงเสียดทานออกไปได้ Lai [3] ได้สรุปข้อดีของการติดตั้งโพลดเซลล์ทั้งสองระบบไว้ดังนี้

#### 1.1 กรณีติดตั้งโพลดเซลล์ไว้ภายนอก

- 1) เนื่องจากความต้องการในการใช้งานโพลดเซลล์จะใช้เฉพาะตอนเดือนตัวอย่างเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถใช้โพลดเซลล์เพียงตัวเดียวในการทดสอบแทนที่จะต้องใช้โพลดเซลล์หนึ่งตัวสำหรับเซลล์ทดสอบหนึ่งเซลล์
- 2) การติดตั้งแบบนี้จะสามารถเข้าถึงโพลดเซลล์ได้ง่ายเนื่องจากอยู่ภายนอก
- 3) ไม่เกิดปัญหาในเรื่องของการกัดกร่อน (Corrosion) และลัดวงจรในสายสัญญาณ

#### 1.2 กรณีติดตั้งโพลดเซลล์ไว้ภายใน

- 1) ในการทดสอบแบบทำซ้ำ (Cyclic Shear Tests) สามารถตัดความผิดพลาดในการวัดแรงที่สำคัญซึ่งจะเกิดขึ้นในขณะที่แท่งกดสลับทิศทางการกดอันจะทำให้ทิศทางของแรงเสียดทานเกิดการสลับทิศทางเช่นกัน
- 2) ในการทดสอบแบบไดนามิก (Dynamic Tests) จะสามารถลดผลกระทบเนื่องจากแรงเฉื่อยได้
- 3) ในการทดสอบความคืบ (Creep) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของแรงเสียดทานบริเวณผิวแท่งกดนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ซึ่งการติดตั้งโพลดเซลล์ไว้ภายในนั้นจะทำให้การทดสอบมีความสะดวกมากขึ้นเนื่องจากจะทราบผลของแรงเสียดทานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของแรงกระทำที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

4) การติดตั้งโพลดเซลล์ไว้ภายในจะทำให้ผลการวัดมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

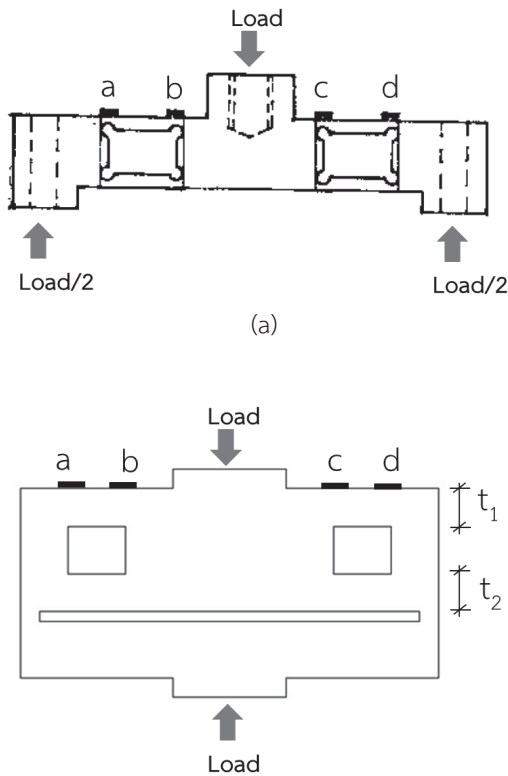
แต่อย่างไรก็ตามโพลดเซลล์ชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูงและต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อประดิษฐ์โพลดเซลล์ทนแรงดันน้ำสำหรับเครื่องทดสอบแรงเฉือนของดินแบบสามแกนขึ้น นอกจากนั้นยังทำการตรวจสอบประสิทธิภาพ ความแม่นยำ รวมทั้งศึกษาผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการวัดแรงในแนวแกนอีกด้วย

## 2. การออกแบบโพลดเซลล์

### 2.1 รูปแบบโพลดเซลล์

รูปแบบโพลดเซลล์ที่นำมาเป็นพื้นฐานในการพัฒนาและออกแบบในการศึกษานี้เป็นโพลดเซลล์ที่ถูกใช้งานโดย Kongkitkul [1] ซึ่งรูปแบบได้รับการปรับปรุงและพัฒนาจากโพลดเซลล์ของ Tatsuoka และคณะ [2] ดังแสดงในภาพที่ 1

จากรูปแบบทั้งสองจะพบว่าหลักการออกแบบนั้นไม่ได้มีความแตกต่างใดๆ คือยังคงอาศัยหลักการเสียรูปของคานช่วงเดี่ยวที่รับแรงที่จุดกึ่งกลางคานแต่จะแตกต่างกันที่รูปแบบของ Kongkitkul [1] จะเป็นลักษณะคานสองชั้นเชื่อมต่อระหว่างกันโดยมีระยะห่างที่เหมาะสม จึงทำให้มีเสถียรภาพในการรับแรงมากกว่าและสามารถย้ายไปติดตั้งในอุปกรณ์อื่นๆ ได้สะดวกกว่า ในกรณีที่แรงกระทำเป็นแรงอัดจะทำให้จุด a และ d เกิดความเค้นดึง (Tensile Strain) สูงสุด ส่วน จุด b และ c เกิดความเค้นอัด (Compressive Strain) สูงสุด ดังนั้นตำแหน่งดังกล่าวจะถูกติดตั้งสเตรนเกจซึ่งจะทำให้สัญญาณไฟฟ้าที่ออกมามีความไวตัว (Sensitive) สูงสุด

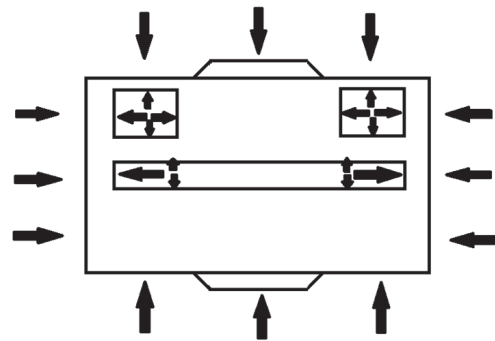


ภาพที่ 1 รูปแบบโพลีเซลล์ (a) Tatsuoka และคณะ [2] และ (b) Kongkitkul [1]

## 2.2 ลักษณะสมมูลของแรงดันน้ำ

จากข้อดีของการติดตั้งโพลีเซลล์ไว้ภายในเซลล์ทดสอบดังที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้จึงต้องการออกแบบโพลีเซลล์ที่สามารถทำงานอยู่ภายใต้สภาวะแรงดันน้ำภายในเซลล์ทดสอบ (Confining Pressure หรือ Cell Pressure) สำหรับการทดสอบแรงเฉือนของดินแบบสามแกนนั้น เมื่อการเฉือนใช้ทางเดินของหน่วยแรงแบบดั้งเดิม (Conventional Triaxial Stress Path) ระหว่างการเฉือนดิน ค่าแรงดันน้ำภายในเซลล์ทดสอบจะคงที่ แต่กรณีที่ใช้ทางเดินของหน่วยแรงที่แตกต่างออกไป ค่าแรงดันน้ำภายในเซลล์จะไม่คงที่ระหว่างการเฉือนซึ่งขึ้นอยู่กับมุมของเส้นทางเดินของหน่วยแรง (Stress Path) ที่ใช้ ดังนั้นโพลีเซลล์ที่บรรจุอยู่ภายในเซลล์ทดสอบนอกจากจะต้องมีการป้องกันการ

ซึมผ่านของน้ำเข้ามาในวงจรไฟฟ้าและสายสัญญาณแล้วยังต้องปราศจากผลกระทบใดๆ สำหรับการวัดแรงในแนวตั้งเนื่องจากแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างทำการเฉือน จากภาพที่ 2 จะพบว่า เมื่อมีแรงดันน้ำกระทำกับโพลีเซลล์จะเกิดสภาวะสมดุลที่จุดวัดแรง (a, b, c และ d ในภาพที่ 1) และไม่เกิดการเสียรูป ดังนั้นจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าขาออก เนื่องจากแรงดันน้ำกระทำเท่ากันทุกทิศทางและโพลีเซลล์ที่ออกแบบนั้นมีช่องทะลุหากัน ดังนั้นโพลีเซลล์รูปแบบนี้จึงมีความเป็นไปได้ที่จะไม่มีผลกระทบใดๆ ในการวัดแรงในแนวแกนเนื่องจากแรงดันน้ำรอบข้างที่เปลี่ยนแปลงไป



ภาพที่ 2 โพลีเซลล์เมื่อถูกแรงดันน้ำกระทำเท่ากันทุกทิศทาง

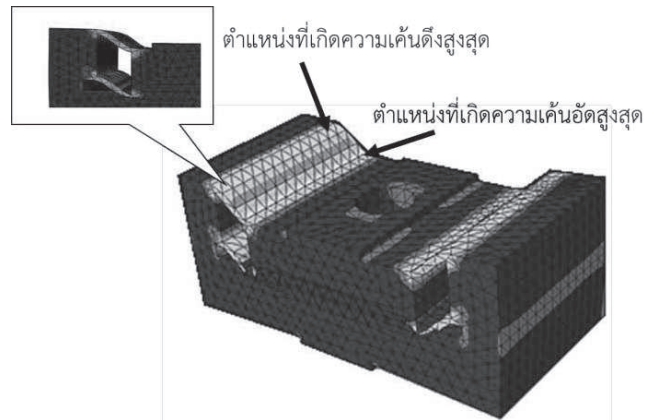
## 2.3 การออกแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การออกแบบโพลีเซลล์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นทำโดยผู้วิจัยหลายท่านซึ่งมีรูปแบบแตกต่างกันออกไป (สุภกิจ รูปจันทร์ [5], สราวุธ เรืองกิจตระการ [6] และเพิ่มศักดิ์ เกตุนวม [7]) งานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการออกแบบโพลีเซลล์เช่นกันโดยอาศัยรูปแบบเดียวกับ Kongkitkul [1] จากหัวข้อ 2.1 ได้แสดงรูปแบบโพลีเซลล์และบริเวณที่จะเกิดความเค้นดึงและอัดสูงสุด แต่สิ่งที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือค่าความหนาของ  $t_1$  และ  $t_2$  (ภาพที่ 1(b)) ที่เหมาะสมเนื่องจากต้องการรักษาคุณสมบัติการยืดหยุ่นแบบเป็นเส้นตรง (Linear Elastic) ของตำแหน่งวัดแรง (จุด a, b, c และ d ในภาพที่ 1) เมื่อได้รับแรงกระทำสูงสุด อีกทั้ง

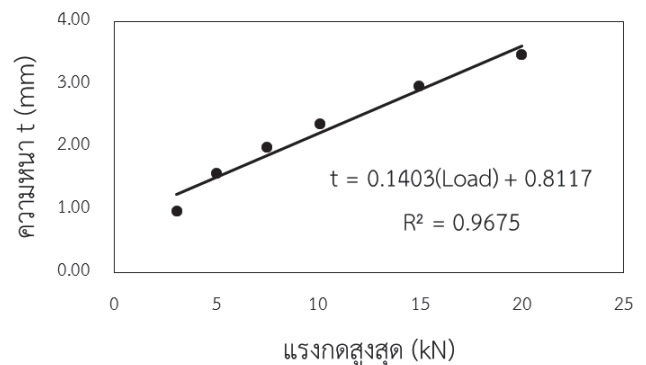
ยังต้องการให้ผลการวัดมีความละเอียดสูงสุดเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์ค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุดที่เกิดขึ้นโดยค่าดังกล่าวจะต้องไม่เกินค่าจุดดลาค (Yield Stress) ในที่นี้ใช้สแตนเลสเกรด 304 มาเป็นวัสดุขึ้นรูปโพลดเซลล์ซึ่งมีคุณสมบัติทางกลดังแสดงในตารางที่ 1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ (Constitutive Model) จะใช้แบบยืดหยุ่นเป็นเส้นตรง (Linear Elastic) และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จะใช้ความหนา  $t_1 = t_2 = t$  การวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนความหนา  $t$  ที่ตำแหน่งวัดแรงตั้งแต่ 1 ถึง 3.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการหาค่าแรงกดสูงสุดที่โพลดเซลล์รับได้โดยไม่ทำให้เกิดการเสียรูปถาวรขึ้นบนชิ้นส่วนของโพลดเซลล์ผลการวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 3 พบว่าตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นดึงและอัดสูงสุดนั้นจะต้องวัดห่างจากมุมแต่ละด้านเป็นระยะเท่ากับความหนา  $t$  และความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดสูงสุดกับความหนา  $t$  นั้นแสดงในภาพที่ 4

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกลของสแตนเลสเกรด 304

ประเภทข้อมูล	ค่าที่ใช้ในการวิเคราะห์
Density ( $\text{kg/m}^3$ )	8000
Young's Modulus (GPa)	190
Yield Strength (MPa)	240
Tensile Strength (MPa)	520
Poisson's ratio	0.29

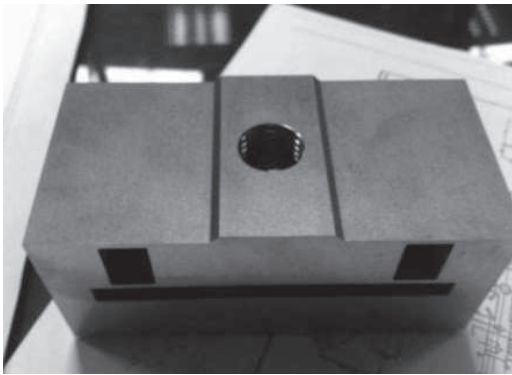


ภาพที่ 3 ลักษณะการเสียรูปจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

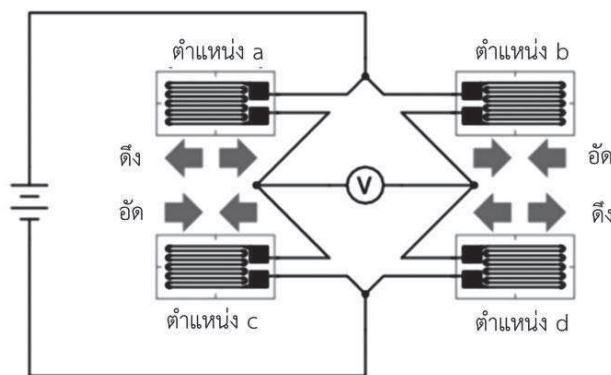


ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดสูงสุดกับความหนา  $t$

ในการศึกษาครั้งนี้ต้องการโพลดเซลล์ที่สามารถรับแรงในแนวตั้งได้ 5 kN เมื่อนำไปแทนในสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดสูงสุดกับความหนา  $t$  พบว่า จะต้องใช้ความหนา  $t_1 = t_2 = 1.51$  มิลลิเมตร ซึ่งในที่นี่จะเพิ่มความหนาเข้าไปอีก 30 เปอร์เซ็นต์เป็นค่าความปลอดภัย ดังนั้นจะใช้  $t = 1.95$  มิลลิเมตร หรือ 2.0 มิลลิเมตร ทั้งนี้หลังจากการวิเคราะห์หาความหนาแล้วก็จะทำการขึ้นรูปโลหะด้วยเครื่อง Wire Cut ดังแสดงในภาพที่ 5 หลังจากนั้นทำการติดตั้งชุดสเตรนเกจในตำแหน่งที่กำหนดแล้วทำการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าแบบ Full-Bridge ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 5 โหลดเซลล์ที่ถูกขึ้นรูปโดยเครื่อง Wire cut



ภาพที่ 6 การเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าแบบ Full-Bridge

### 3. การสอบเทียบภายใต้แรงดันบรรยากาศ

การสอบเทียบภายใต้แรงดันบรรยากาศทำโดยใช้เครื่อง Oedometer ที่มีอัตราส่วนการให้แรงเท่ากับ 1 : 10 เพื่อสร้างแรงกดในแนวตั้งให้กับโหลดเซลล์ เมื่อโหลดเซลล์ถูกกดก็จะเกิดสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น แต่เนื่องจากสัญญาณมีขนาดเล็กมากจึงต้องนำสัญญาณที่ได้ส่งไปยังเครื่องขยายสัญญาณ (Amplifier) เพื่อขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จากนั้นส่งสัญญาณที่ขยายแล้วไปยัง Data Acquisition (DAQ) เพื่อแปลงจาก

สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบอนาล็อก (Analog) ให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (Digital) และส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงค่าและบันทึกผลด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยผังอุปกรณ์นั้นแสดงในภาพที่ 7

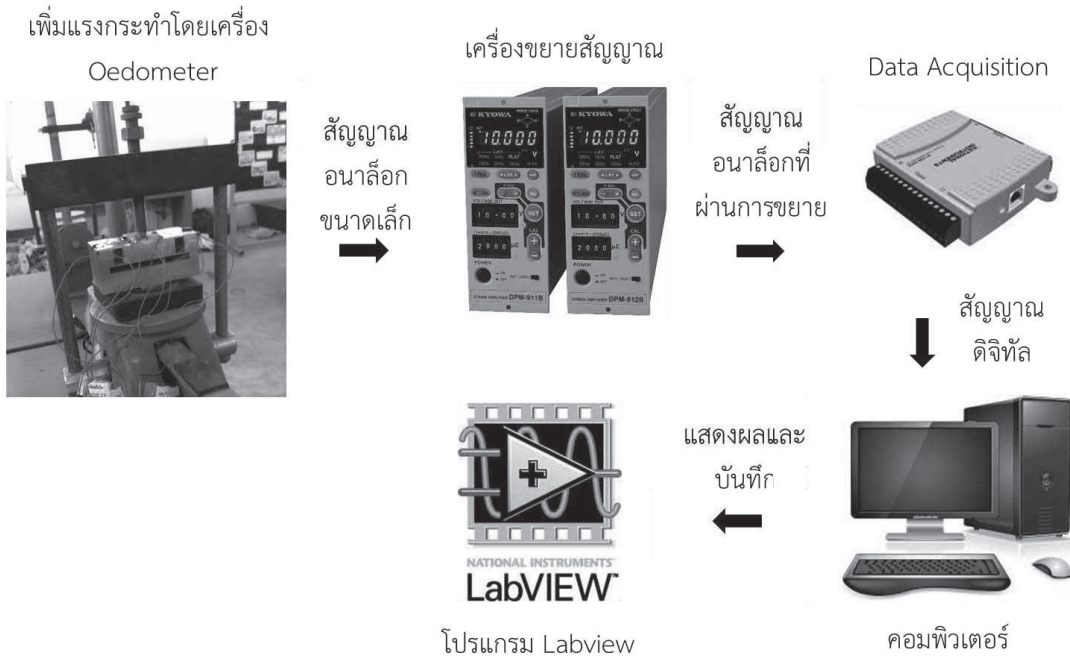
การสอบเทียบนี้เพื่อดูความเป็นเส้นตรง (Linearity) และค่าความละเอียดในการวัดโดยจะทำทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของแรงกระทำ ค่าแรงกดสูงสุดที่ใช้ทดสอบเท่ากับ 4 kN และทำการเพิ่มแรงขึ้นและลดแรงลงครั้งละ 0.25 kN ผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดในแนวตั้งกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้แสดงดังภาพที่ 8 และสามารถเขียนเป็นสมการเส้นตรงมีค่า  $R^2 = 0.9999$  ได้ดังสมการที่ 1

$$\Delta \text{ Axial Load} = 583.18 \times \Delta \text{ Volt}_{out} \quad (1)$$

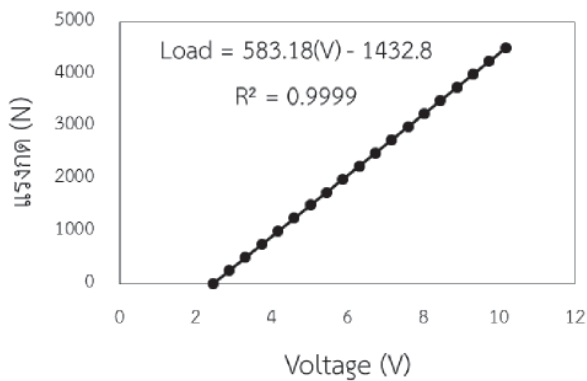
### 4. การทดสอบประสิทธิภาพโหลดเซลล์ภายใต้สถานะแรงดันน้ำ

เนื่องจากโหลดเซลล์นี้ต้องนำไปบรรจุในเซลล์ของเครื่องทดสอบแรงเฉือนของดินแบบสามแกน ซึ่งจะต้องทำงานภายใต้แรงดันน้ำในสถานะต่างๆ ดังได้อธิบายไปในตอนต้น ดังนั้นในขั้นตอนการทดสอบนี้ ทั้งวงจรไฟฟ้าและสายสัญญาณจะต้องถูกป้องกันการซึมของน้ำ ไม่เช่นนั้นน้ำจะสามารถเข้าไปในจุดที่ติดตั้งชุดสเตรนเกจซึ่งมีวงจรไฟฟ้า เมื่อสัมผัสกับน้ำจะเกิดการการลัดวงจรและสร้างความเสียหายกับอุปกรณ์อื่นๆ ได้ ในที่นี่จะใช้ SB-TAPE (Coating Materials) ปิดทับจุดที่ติดตั้งชุดสเตรนเกจรวมไปถึงจุดต่อระหว่างสายสัญญาณกับตัวโหลดเซลล์เพื่อไม่ให้น้ำซึมเข้าไปในสายสัญญาณได้





ภาพที่ 7 ผังอุปกรณ์และวิธีที่ใช้ในการสอบเทียบโพลดเซลล์ภายใต้แรงดันบรรยากาศ



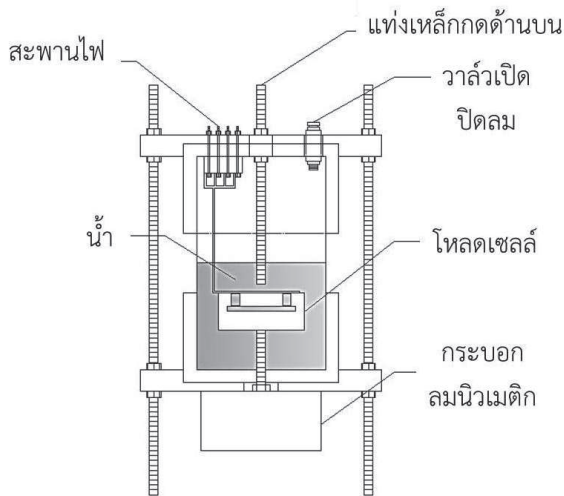
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดในแนวตั้งกับความต่างศักย์ไฟฟ้า

เพื่อจำลองสถานะที่โพลดเซลล์จะถูกแรงดันน้ำกระทำโดยรอบ ถึงอัดแรงดันน้ำที่สามารถสร้างแรงกดให้กับโพลดเซลล์และสร้างแรงดันน้ำโดยรอบโพลดเซลล์จึงถูกออกแบบและสร้างขึ้นดังภาพที่ 9 โดยมีองค์ประกอบหลักๆ คือ

- 1) ถึงอัดความดันซึ่งสร้างขึ้นจากท่อ PVC ที่ทนแรงดันน้ำได้ 13 bar ปิดหัวและท้ายด้วยฝาปิดท่อ PVC ซึ่งจะถูกบีบอัดด้วยแผ่นเหล็กวงกลมหนา 20 มิลลิเมตร และใช้เสาสตัดเกลียวตลอด (Full Thread Stud Bolt) ในการสร้างแรงกด เพื่อความปลอดภัยและป้องกันไม่ให้ฝาปิดท่อ PVC โกงตัว การสร้างแรงดันน้ำนั้นจะทำการอัดแรงดันลมผ่านช่องที่ติดตั้งวาล์วเปิดปิดบริเวณด้านบนของถังเพื่อให้ลมไปกดผิวของน้ำซึ่งเติมเข้าไปก่อนหน้านี้ โดยปริมาณน้ำที่ใส่เข้าไปจะต้องเพียงพอที่จะท่วมตัวโพลดเซลล์ทั้งหมด
- 2) สะพานไฟซึ่งมีหน้าที่นำสัญญาณไฟฟ้าจากโพลดเซลล์ที่บรรจุอยู่ในถังแรงดันน้ำออกมาเข้าสู่อุปกรณ์ขยายสัญญาณโดยไม่ทำให้เกิดการรั่วซึมของแรงดันและต้องไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรของระบบไฟฟ้า โดยสะพานไฟนี้ทำขึ้นจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและถูกสอดใส่ด้วยแท่งสแตนเลสจำนวนเท่ากับจำนวนของช่องสัญญาณ
- 3) กระบอกลมนิวเมติก (Pneumatic Cylinder) ซึ่งจะถูกยึดกับแผ่นเหล็กด้านล่าง ส่วนปลายของแท่งกด

จะถูกยึดเข้ากับโหลดเซลล์เพื่อให้อยู่ในตำแหน่งโดยด้านบนของโหลดเซลล์จะมีแท่งกดอีกแท่งซึ่งจะถูกยึดไว้กับแผ่นเหล็กด้านบน เมื่อทำการอัดลมเข้าไปในกระบอกนิวเมติก โหลดเซลล์จะยกตัวขึ้นไปกดกับแท่งเหล็กด้านบน ซึ่งเป็นวิธีสร้างแรงในแนวแกนให้กับโหลดเซลล์

ชุดควบคุมแรงดันลมจะทำหน้าที่จ่ายแรงดันลมให้กับกระบอกลมนิวเมติกที่ติดตั้งอยู่ด้านล่าง นอกจากนั้นยังมีหน้าที่จ่ายแรงดันลมให้กับถังอัดแรงดันเพื่อสร้างแรงดันน้ำที่กระทำโดยรอบโหลดเซลล์ การสั่งงานชุดควบคุมลมจะกระทำผ่านระบบคอมพิวเตอร์เพื่อความสะดวกและแม่นยำ เมื่อพิจารณาหน้าตัดของกระบอกลมดังแสดงในภาพที่ 10 การคำนวณค่าแรงดันลมที่ต้องจ่ายให้กับกระบอกนิวเมติกเพื่อสร้างแรงกดที่ต้องการสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2



ภาพที่ 9 ถังอัดแรงดันน้ำ

$$\frac{Load_{calculate}}{1000 \times A_n} + \frac{Y \times A_l}{A_n} = P \quad (2)$$

โดยที่

$Load_{calculate}$  คือค่าแรงกดที่ต้องการกดลงบนโหลดเซลล์ (N)

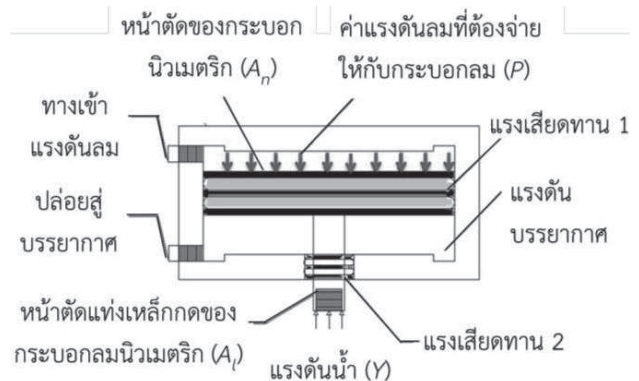
$A_n$  คือพื้นที่หน้าตัดของกระบอกนิวเมติก ( $m^2$ )

$A_l$  คือพื้นที่หน้าตัดของแท่งเหล็กกดของกระบอกลมนิวเมติก ( $m^2$ )

$Y$  คือค่าแรงดันน้ำในถังอัดแรงดัน (kPa)

$P$  คือค่าแรงดันลมที่ต้องจ่ายให้กับกระบอกลมนิวเมติก (kPa)

ขั้นตอนการทดสอบจะเริ่มจากการปล่อยแรงดันลมเข้าไปในถังอัดแรงดันเพื่อสร้างแรงดันน้ำ ค่าแรงดันน้ำที่ใช้ในการศึกษานี้อยู่ระหว่าง 0 – 750 kPa ซึ่งจะทำให้เปลี่ยนแปลงครั้งละ 50 kPa ในทุกครั้งที่มีการทดสอบ เมื่อได้ค่าแรงดันน้ำที่ต้องการก็ทำการเพิ่มแรงดันลมเข้าไปในกระบอกลมนิวเมติกเพื่อเพิ่มแรงกดให้กับโหลดเซลล์ ในขั้นตอนนี้ทำการให้แรงกดเบื้องต้น (Pre-Loading) กับโหลดเซลล์ก่อนที่ 600 N (จากการคำนวณด้วยสมการที่ 2) เพื่อให้ระบบแนบสนิทกัน จากนั้นเพิ่มแรงกดไปจนถึง 4,100 N



ภาพที่ 10 รูปตัดกระบอกลมนิวเมติก

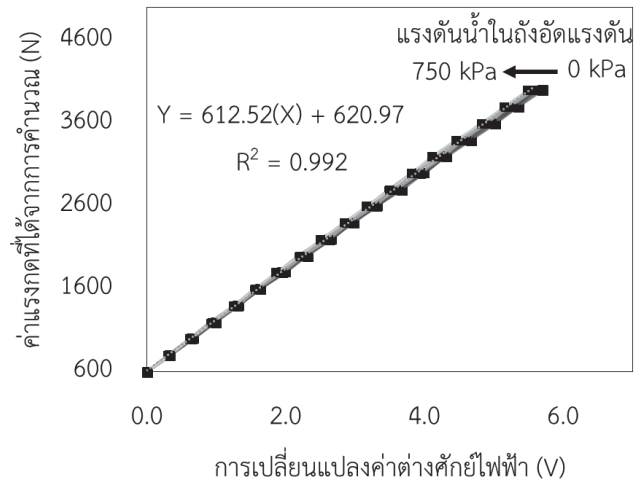
ภาพที่ 11 แสดงผลความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดในแนวตั้งที่คำนวณได้จากสมการที่ 2 กับการเปลี่ยนแปลงค่าต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกมาจากโหลดเซลล์ภายใต้แรงดันน้ำที่กระทำต่อโหลดเซลล์ที่แตกต่างกัน พบว่ายังมีความเป็นเส้นตรงที่ดีและมีค่าความชัน (Slope) เฉลี่ยอยู่ที่ 612.52

ภาพที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันของกราฟ



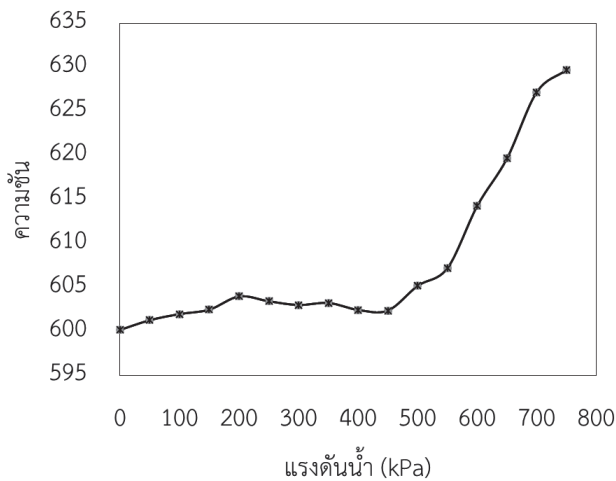
ในแต่ละการทดสอบ กับค่าแรงดันน้ำที่กระทำโดยรอบ โหลดเซลล์เพื่อดูผลกระทบของแรงดันต่อการวัดแรงในแนวตั้ง

เมื่อนำความชันของกราฟ (ภาพที่ 8) ที่ทำการสอบเทียบภายใต้แรงดันบรรยากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ 583.18 มาเปรียบเทียบกับค่าความชันเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบครั้งนี้จะพบว่ามีความแตกต่างกันถึง 5.03% ซึ่งเป็นผลมาจากการทดสอบนี้มีการย้ายตำแหน่งอุปกรณ์ทดสอบและเปลี่ยนตัวขยายสัญญาณไฟฟ้าให้อัตราส่วนการขยายไม่เท่ากัน เมื่อพิจารณาภาพที่ 11 จะพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันน้ำในถังอัดแรงดัน เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าแรงกดที่ต้องการให้กดลงบนโหลดเซลล์ ( $Load_{calculate}$ ) มีแนวโน้มเอียงไปทางซ้าย และเมื่อพิจารณาภาพที่ 12 จะเห็นได้ว่าความชันเส้นกราฟในแต่ละการทดสอบมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อแรงดันน้ำในถังเพิ่มขึ้น ซึ่งหมายถึงในจุดที่การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าเดียวกัน จะต้องใช้แรงกดลงบนโหลดเซลล์ ( $Load_{calculate}$ ) ที่คำนวณจากสมการที่ 2 มากขึ้นเมื่อแรงดันน้ำในถังมีค่าสูงขึ้น นั่นเป็นผลมาจากค่าแรงเสียดทานในกระบอกลมนิวเมตริกซึ่งจะเกิดขึ้นได้ 2 ตำแหน่งดังแสดงในภาพที่ 10 ซึ่งค่าแรงเสียดทานดังกล่าวจะแปรผันตรงกับค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากระบบซีลลัม (Seal) ของกระบอกลมนิวเมตริกนั้นจะมีคุณสมบัติพิเศษคือ ยังมีแรงดันมากกระทำมากขึ้นเท่าไร ระบบซีลก็จะกดกับผิวสัมผัสให้แน่นยิ่งขึ้นทำให้ค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วย

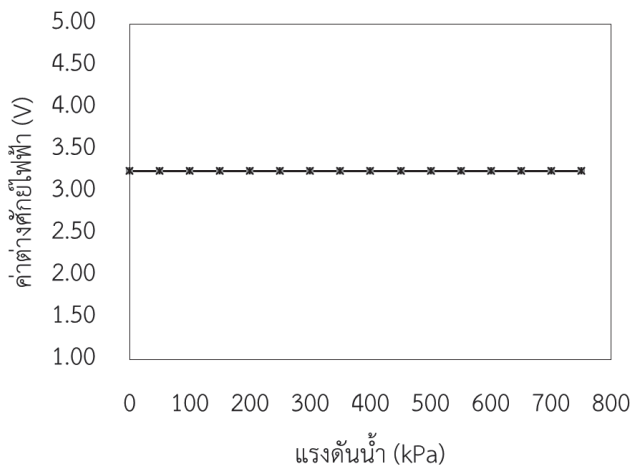


ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดในแนวตั้งกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ค่าแรงดันน้ำแตกต่างกัน

อย่างไรก็ตามเพื่อคลายข้อสงสัยว่าโหลดเซลล์นี้มีผลกระทบใดๆ ต่อแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ ดังนั้นจึงได้มีการทดสอบเพิ่มเติมโดยพิจารณาเฉพาะผลกระทบของแรงดันน้ำที่มีผลต่อสัญญาณไฟฟ้าขาออกของโหลดเซลล์ เริ่มจากทำการถอดแท่งเหล็กด้านบนที่ทำหน้าที่กดโหลดเซลล์ออกไป จากนั้นเพิ่มแรงดันลมให้กับกระบอกนิวเมตริกที่ 800 kPa ดังนั้นปลายกระบอกลมจะยึดตัวจนสุดและอยู่กับที่โดยไม่มีแรงกระทำใดๆ ด้านบน จากนั้นทำการเพิ่มแรงดันเข้าไปในถังอัดแรงดันตั้งแต่ 0-750 kPa โดยกระทำครั้งละ 50 kPa ผลปรากฏว่าแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มีผลใดๆ กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกมาจากโหลดเซลล์ดังแสดงในภาพที่ 13 ดังนั้นโหลดเซลล์นี้จึงไม่มีผลกระทบใดๆ เมื่อแรงดันน้ำรอบข้างเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของกราฟในแต่ละผลการทดสอบกับค่าแรงดันน้ำที่กระทำกับโพลีเอสเตอร์



ภาพที่ 13 ผลกระทบของแรงดันน้ำที่มีผลต่อสัญญาณไฟฟ้าขาออกของโพลีเอสเตอร์

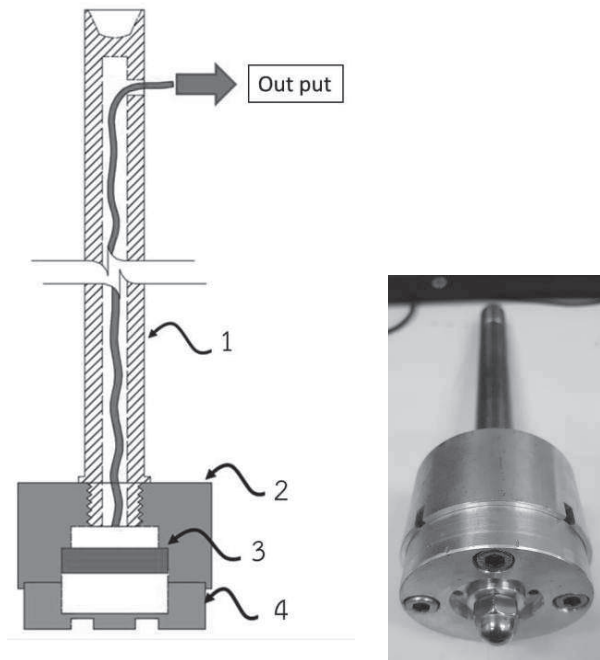
## 5. การศึกษาผลกระทบเนื่องจากแรงเสียดทานต่อการวัดค่าแรงในแนวตั้ง

จากหัวข้อที่ผ่านมา งานวิจัยนี้ได้ศึกษาในเรื่องผลกระทบของแรงดันน้ำที่มีผลต่อการวัดแรงในแนวตั้งของโพลีเอสเตอร์ทนแรงดันน้ำที่ได้ออกแบบและประดิษฐ์ขึ้น ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำเอาโพลีเอสเตอร์ไปติดตั้งในเซลล์ทดสอบการรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกนแล้วทำการศึกษาผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการ

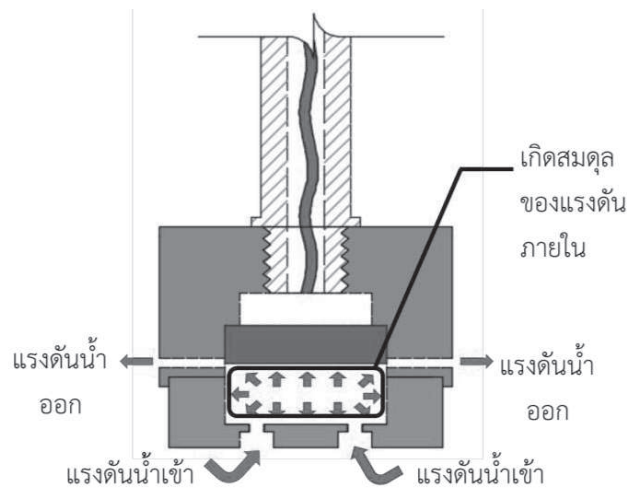
วัดแรงในแนวตั้ง แต่กลับพบว่าไม่สามารถทำได้เนื่องจากไม่สามารถนำสัญญาณไฟฟ้าออกมาจากเซลล์ทดสอบได้ ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบและประดิษฐ์โพลีเอสเตอร์ตัวใหม่ที่สามารถนำสัญญาณไฟฟ้าจากโพลีเอสเตอร์ออกมาได้อย่างสะดวกดังแสดงในภาพที่ 14 โพลีเอสเตอร์แบบใหม่นี้จะมีรูปทรงเป็นวงกลมโดยแบ่งกวด้านบน (หมายเลข 1 ในภาพที่ 14) นั้นทำมาจากสแตนเลสเกรด 304 ที่เจาะรูยาวตลอดเพื่อจะสามารถร้อยสายสัญญาณไฟฟ้าเข้าไปได้ ที่ผิวด้านข้างจะเจียรไน (Grinding) ให้เรียบเพื่อลดแรงเสียดทานโดยหมายเลข 2 คือ ฝาครอบกันน้ำมีหน้าที่ป้องกันไม่ให้น้ำไหลเข้ามาในสายสัญญาณและใช้เป็นตัวยึดชิ้นส่วนวัดแรงและสะพานไฟ (หมายเลข 4 และ 3 ตามลำดับ) หมายเลข 3 คือสะพานไฟ ทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้าและมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านทานแรงดันน้ำ ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้อะคริลิกที่ถูฝังด้วยสกรูขนาด 4 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตัว ที่ผิวสัมผัสระหว่างอะคริลิกกับสกรูจะทำการป้องกันการรั่วซึมด้วยเทปพันเกลียวอุปกรณ์นี้มีหน้าที่นำสัญญาณจากชุดสเตรนเกจส่งไปที่สายสัญญาณโดยไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรและการรั่วซึมน้ำ และหมายเลข 4 คือ ชิ้นส่วนวัดแรงที่จะต้องออกแบบขนาดและนำเอาชุดสเตรนเกจมาติดตั้ง

โดยการออกแบบจะออกแบบให้ระบบน้ำมีการไหลเข้าและออกดังแสดงในภาพที่ 15 เมื่อแรงดันน้ำค้างที่ชิ้นส่วนวัดแรงจะอยู่ในสมดุลจากแรงดันน้ำภายนอกและภายในตัวโพลีเอสเตอร์ ทำให้ไม่เกิดการเสียรูปในจุดวัดแรง ดังนั้นในทางทฤษฎีก็จะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ออกมาจากชุดสเตรนเกจอันเนื่องมาจากแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปภายในเซลล์ทดสอบ การหาขนาดความหนาของจุดวัดแรงที่เหมาะสมจะอาศัยหลักการวิเคราะห์ทั้งหมดที่กล่าวมาในตอนต้นโดยภาพที่ 16 แสดงวิธีการใส่เงื่อนไขสภาวะแวดล้อมและภาพที่ 17 แสดงให้เห็นจุดที่เกิดความเค้นดึงและอัดสูงสุดเมื่อชิ้นส่วนวัดแรงรับแรงกระทำสูงสุดซึ่งการวิเคราะห์จะทำด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์จะทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะความหนาของจุดวัดแรง จากนั้นจะทำการหาค่าแรงกระทำสูงสุดที่ทำให้ชิ้นส่วนวัดแรงเกิดแรงเค้นสูงสุดใกล้เคียงความเค้นที่จุดคลาก (Yield Stress) ของวัสดุ ซึ่งในการศึกษานี้ ชิ้นส่วนวัดแรงทำมาจากอลูมิเนียมเกรด 7075 ซึ่งสามารถรับความเค้นที่จุดคลากได้เท่ากับ 503 MPa จากผลการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของจุดวัดแรงกับแรงกดสูงสุดนั้นแสดงในภาพที่ 18 ซึ่งจะได้ออกมาเป็นสมการความสัมพันธ์ โดยในการออกแบบนี้ต้องการให้โหลดเซลล์สามารถรับแรงกดสูงสุดเท่ากับ 5 kN โดยไม่ทำให้วัสดุเกิดการเสียรูปถาวร แล้วเพิ่มความหนา 30% เพื่อเป็นสัดส่วนความปลอดภัย ดังนั้นจะใช้ความหนาเท่ากับ  $t = 1.9 \text{ mm}$  หรือ  $2.0 \text{ mm}$



ภาพที่ 14 โหลดเซลล์ทนแรงดันน้ำที่สามารถบรรจุเข้าไปในเซลล์ทดสอบการรับแรงเฉือนของดินแบบสามแกน

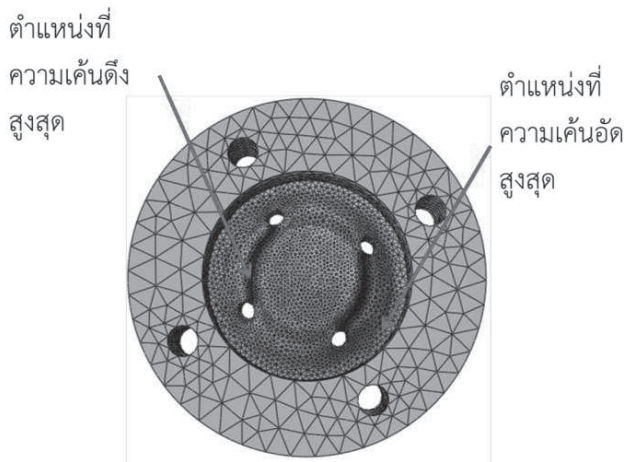


ภาพที่ 15 โหลดเซลล์เมื่อถูกแรงดันน้ำกระทำเท่ากันทุกทิศทาง

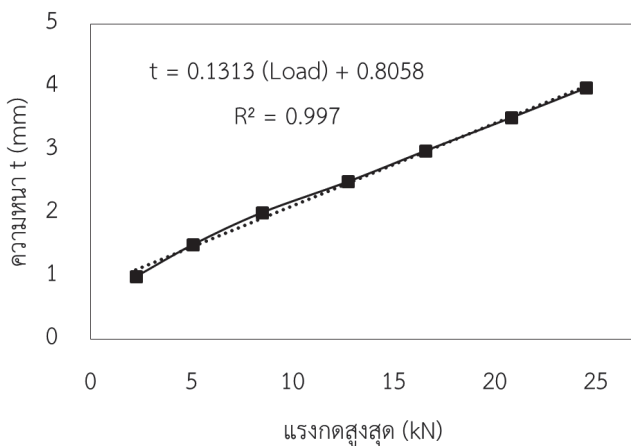
หลังจากทำการประกอบโหลดเซลล์แล้วจะต้องมีการทดสอบการรั่วซึมของน้ำซึ่งใช้อุปกรณ์ดังแสดงในภาพที่ 19 การทดสอบนี้จะทำการสร้างแรงดันน้ำขนาด 500 kPa ด้วย Bladder ผ่าน Volume Change Unit แล้วเข้าสู่เซลล์ทดสอบที่ติดตั้งชุดประกอบโหลดเซลล์แล้ว จากนั้นคงค้างแรงดันน้ำทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง โดยสามารถอ่านค่าปริมาณการรั่วซึมได้จากอุปกรณ์วัดปริมาณการไหลของน้ำ (Volume Change Unit) จากการทดสอบพบว่าไม่มีการรั่วซึมของน้ำ



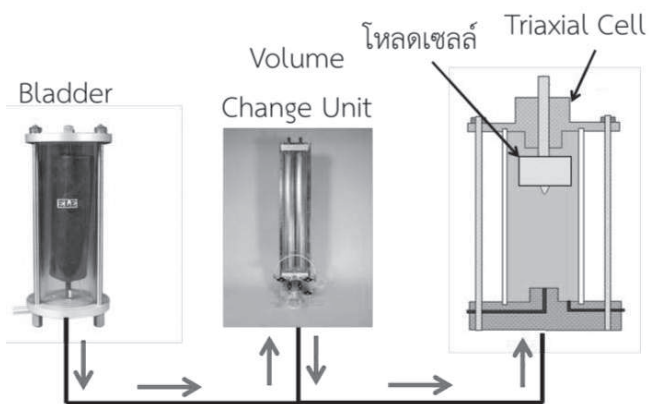
ภาพที่ 16 เจ็อนไซสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์แบบที่ 2



ภาพที่ 17 ลักษณะการเสียรูปจากการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของโหลดเซลล์แบบที่ 2

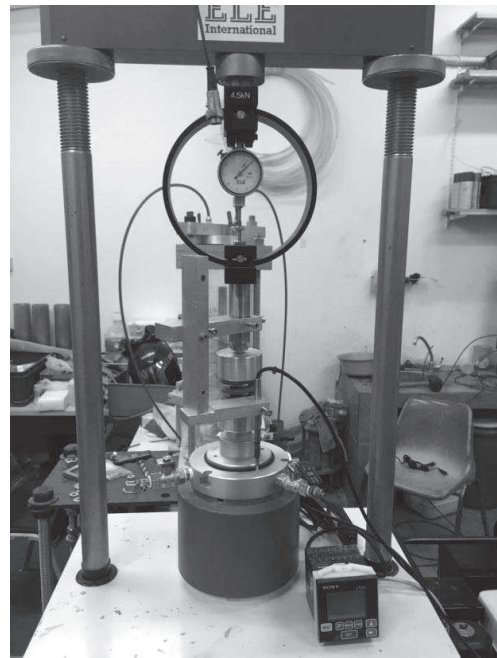


ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดสูงสุดกับความหนาของจุดวัดแรง



ภาพที่ 19 การทดสอบการรั่วซึมของน้ำ

การสอบเทียบโหลดเซลล์ที่ติดตั้งอยู่ในเซลล์ทดสอบแรงเฉือนของดินแบบสามแกนได้อย่างถูกต้องนั้น ในงานวิจัยนี้ใช้สปริงที่มีความยืดหยุ่นสูงนำมาติดตั้งไว้ในเซลล์ทดสอบ และเพื่อที่จะสามารถทราบค่าแรงกดที่เกิดขึ้นกับสปริง จะต้องทำการสอบเทียบการรับแรงกดของสปริงกับมาตรวัดแรงแบบวงแหวน (Proving Ring) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าการยุบตัวของสปริงกับแรงกดในแนวตั้งดังแสดงในภาพที่ 20 จากผลการสอบเทียบพบว่าสปริงมีความเป็นเส้นตรงดีมากโดยได้ค่า  $R^2 = 0.9984$

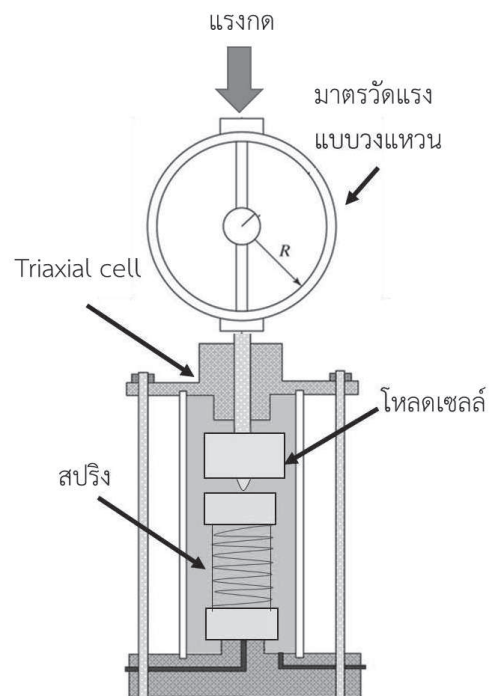


ภาพที่ 20 การสอบเทียบสปริงกับมาตรวัดแรงแบบวงแหวน

จากนั้นจะทำการประกอบชิ้นส่วนเข้าไปในเซลล์ทดสอบดังแสดงในภาพที่ 21 เพื่อทำการสอบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกมาจากโหลดเซลล์กับแรงกดของสปริงและเพื่อศึกษาผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการวัดค่าแรงในแนวตั้ง ในการทดสอบนี้จะใช้ค่าแรงกดสูงสุดที่ 2.5 kN เนื่องจากหากมากกว่านี้ ระยะการยุบตัวของสปริงจะเกินระยะสูงสุดที่

อุปกรณ์วัดการทรุดตัวที่ใช้จะวัดได้ ผลจากการทดสอบที่ค่าแรงดันบรรยากาศพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ออกมาจากโพลเซลล์กับค่าแรงกดที่อ่านได้จากสปริงนั้นมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงดีและมีค่า  $R^2 = 0.9985$  ดังนั้นโพลเซลล์ที่ถูกออกแบบขึ้นมาใหม่มีความเป็นเส้นตรงดีมาก ส่วนผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการวัดแรงในแนวตั้งที่เกิดขึ้นจริงภายในเซลล์ทดสอบนั้นทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าแรงกดที่อ่านได้จากสปริงซึ่งบรรจุอยู่ในเซลล์ทดสอบกับค่าแรงกดที่อ่านได้จากมาตรวัดแรงแบบวงแหวนที่ติดตั้งไว้ภายนอก การที่สปริงติดตั้งอยู่ในเซลล์ทดสอบทำให้การวัดแรงกดผ่านสปริงจะไม่ได้รับผลกระทบใดๆ จากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นและถือว่าเป็นแรงประสิทธิผลซึ่งเปรียบเสมือนแรงกดที่เกิดขึ้นจริงในตัวอย่างดินระหว่างทำการเฉือน แตกต่างจากมาตรวัดแบบวงแหวนที่ถูกติดตั้งไว้ภายนอกและจะได้รับผลกระทบจากแรงเสียดทานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โดยผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 22 พบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวัดแรงกดในแนวตั้งแบบการเพิ่มขึ้นของแรง (Loading) เกิดขึ้นระหว่าง 0 - 0.3% ซึ่งถือว่าน้อยมาก แต่สำหรับช่วงการลดลงของแรงกด (Unloading) จะพบว่าค่าของแรงกดที่เกิดขึ้นในสปริงจะมีค่ามากกว่าค่าแรงกดที่อ่านได้จากมาตรวัดแรงแบบวงแหวนซึ่งติดตั้งไว้ภายนอกเซลล์ทดสอบโดยความผิดพลาดในช่วงนี้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 5% ซึ่งมากกว่าช่วงการเพิ่มขึ้นของแรงกดอย่างมีนัยสำคัญและสามารถอธิบายจากหลักการสมดุลของแรงในแนวตั้งเมื่อทิศทางการเคลื่อนที่ของแท่งกดและโพลเซลล์เกิดการสลับทิศทางการเคลื่อนที่ของแท่งของแรงเสียดทานที่ผิวสัมผัสเกิดการสลับทิศด้วยเช่นกัน (แรงเสียดทานจะมีทิศทางการตรงข้ามกับการเคลื่อนที่) จากผลการทดสอบนี้พบว่า อิทธิพลของแรงเสียดทานในช่วงการลดลงของแรงกดนั้นมีมากกว่าช่วงการเพิ่มขึ้นของแรงกด สำหรับการทดสอบนี้ไม่มีอิทธิพลของแรงเฉื่อยเข้ามาเกี่ยวข้องเนื่องจากการวัดแรงจะทำในสภาวะหยุดนิ่งเท่านั้น ดังนั้นในกรณีที่นำเซลล์ทดสอบดังกล่าวไปทดสอบ

ทรายหลวม (Loose Sand) หรือ ดินเหนียวอัดตัวปกติ (NC-Clay) ถ้าติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงไว้ภายนอก ผลที่ได้ยังมีความถูกต้องแม่นยำดี แต่ถ้าในกรณีที่เป็นทรายแน่นหรือดินเหนียวชนิดอัดตัวมากกว่าปกติ (OC-Clay) ผลกระทบในช่วง Hardening นั้นจะค่อนข้างน้อยแต่จะส่งผลกระทบต่อชัดเจนในการวัดแรงช่วง Softening

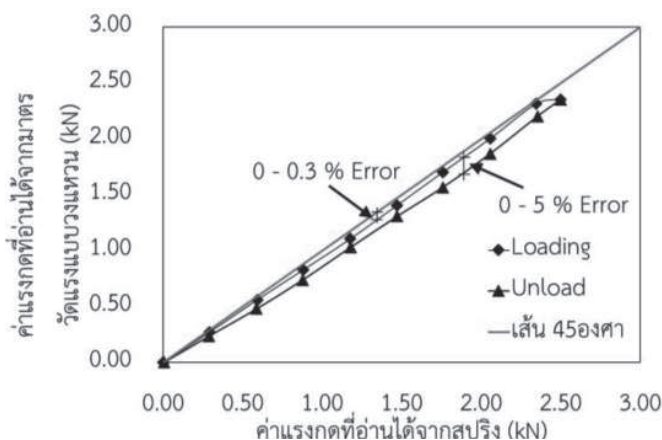


ภาพที่ 21 การสอบเทียบโพลเซลล์และหาผลกระทบของแรงเสียดทานต่อการวัดแรงในแนวตั้ง

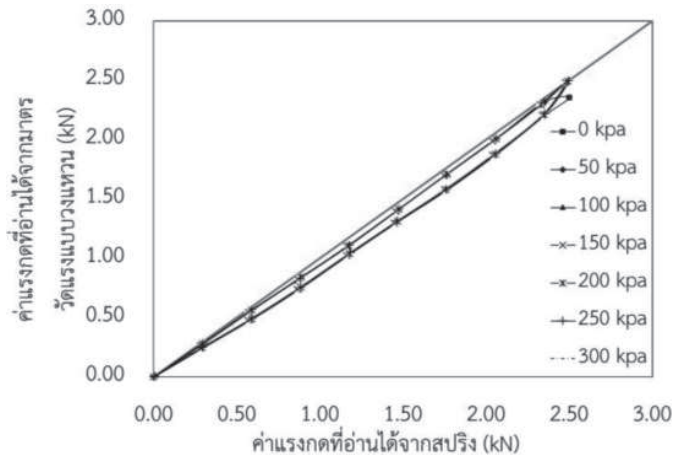
นอกจากนั้นยังได้มีการทดสอบผลกระทบของแรงดันน้ำต่อความผิดพลาดของการวัดแรงในแนวตั้งเนื่องจากแรงเสียดทานซึ่งผลได้แสดงในภาพที่ 23 พบว่าแรงดันน้ำภายในเซลล์ทดสอบที่เปลี่ยนไปไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อความผิดพลาดในการวัดแรงในแนวตั้งเนื่องจากแรงเสียดทาน และสุดท้ายจะเป็นการตรวจสอบผลกระทบของแรงดันน้ำที่มีต่อประสิทธิภาพการวัดแรงในแนวตั้งของโพลเซลล์ที่ได้ทำการออกแบบขึ้นมาใหม่ จากภาพที่ 24 พบว่าโพลเซลล์มีความแม่นยำ (Accuracy) และเป็น



เส้นตรงดีโดยสามารถพิจารณาได้จากค่า  $R^2 = 0.9984$  และการติดตั้งโพลดเซลล์ไว้ภายในเซลล์ทดสอบสามารถกำจัดความผิดพลาดเนื่องจากแรงเสียดทานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยที่แรงดันน้ำที่เปลี่ยนไปไม่มีผลกระทบใดๆ ต่อประสิทธิภาพของการวัดแรงในแนวตั้งเนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ค่าแรงดันน้ำแตกต่างกันกับค่าแรงกดที่อ่านได้จากสปริงไม่มีการเปลี่ยนแปลงและค่าความชันของเส้นกราฟค่อนข้างคงที่ ซึ่งจากค่าความชันเฉลี่ยและการหาขนาดความกว้างของสัญญาณรบกวน (Noise) สามารถนำไปใช้คำนวณค่าความละเอียด (Resolution) ซึ่งคำนวณได้เท่ากับ 0.048% ของแรงกระทำสูงสุดที่ออกแบบไว้ โดยที่โพลดเซลล์ทั่วไปตามท้องตลาดส่วนใหญ่จะมีค่าความละเอียดอยู่ที่ 0.05% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้และใช้งานกันอย่างกว้างขวาง

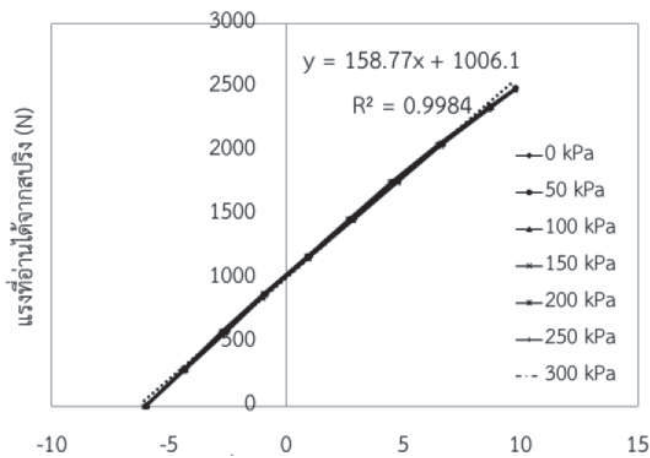


ภาพที่ 22 ผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการวัดแรงในแนวตั้งที่ค่าแรงดันน้ำเท่ากับ 0 kPa



ภาพที่ 23 ผลกระทบของแรงเสียดทานที่มีผลต่อการวัดแรงในแนวตั้งที่ค่าแรงดันน้ำเท่ากับ 0 ถึง 300 kPa

เมื่อทำการเปรียบเทียบภาพที่ 24 กับภาพที่ 11 จะพบว่าวิธีการทดสอบโดยการใช้น้ำแรงกดจากเฟรมทดสอบแล้วทำการอ่านค่าแรงกดประสิทธิภาพจากสปริงโดยตรงนั้นให้ผลที่ดีกว่าการคำนวณค่าแรงกดจากสมการที่ 2 อย่างมาก เนื่องจากสปริงไม่มีผลกระทบของแรงเสียดทานเนื่องจากแรงดันภายในเซลล์ทดสอบซึ่งแตกต่างกันอย่างมากกับกระบอกลมนิวเมตริกที่จะเกิดผลกระทบอย่างชัดเจนเมื่อแรงดันภายในถังทดสอบเปลี่ยนไป ดังนั้นการสอบเทียบโดยการบรรจุสปริงเข้าไปในเซลล์ทดสอบเพื่อเป็นตัวเทียบแรงกดมาตรฐานจะให้ค่าแรงกดที่กระทำต่อโพลดเซลล์ที่ถูกต้องและแม่นยำกว่า



ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงกดในแนวตั้งกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ค่าแรงดันน้ำแตกต่างกัน

## 6. สรุปผล

จากผลการศึกษสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1) โหลดเซลล์ที่ทำการประดิษฐ์ขึ้นมาสามารถทนต่อแรงดันน้ำได้และไม่มีผลกระทบใดๆ จากแรงดันน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งมีความแม่นยำและความละเอียดเพียงพอที่จะนำไปใช้งานได้

2) โหลดเซลล์ที่นำเสนอสามารถนำไปใช้กับเครื่องทดสอบหาแรงเฉือนของดินแบบสามแกนได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีต้นทุนต่ำประมาณ 4,000 บาท อีกทั้งยังสามารถนำเอาหลักการที่ใช้ในการออกแบบนี้ไปออกแบบโหลดเซลล์ขนาดอื่นๆ ที่เหมาะสมกับการทำสอบอื่นๆ ได้ต่อไปในอนาคต

3) การบรรจุโหลดเซลล์เข้าไปในเซลล์ทดสอบนั้นสามารถกำจัดข้อผิดพลาดในการวัดแรงเนื่องจากแรงเสียดทานและทำให้ได้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

4) การคำนวณแรงกระทำของกระบอกกลมนิวมेटริกนั้นเป็นเรื่องยากและมีความผิดพลาดสูง ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นค่าแรงกดมาตรฐานในการสอบเทียบ

5) ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวัดแรงกดในแนวตั้งเมื่อติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงไว้ภายนอกเซลล์ทดสอบแบบการเพิ่มขึ้นของแรง (Loading) จะเกิดขึ้นอยู่ระหว่าง 0 - 0.3%

และในช่วงการลดลงของแรงกด (Unloading) จะเกิดขึ้นอยู่ระหว่าง 0 - 5% ซึ่งส่งผลกระทบกับการวัดแรงกดในแนวตั้งค่อนข้างน้อยสำหรับการทดสอบดินเหนียวอัดตัวปกติและทรายหลวม แต่จะส่งผลกระทบอย่างมากเมื่อใช้ทดสอบดินเหนียวชนิดอัดตัวมากกว่าปกติและทรายแน่น

## 7. ข้อเสนอแนะ

1) ผลกระทบเนื่องจากแรงเสียดทานนั้นจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาดและแรงกดของโอริง (O-Ring) ที่ใช้ป้องกันการรั่วซึมของน้ำ ชนิดและคุณภาพของสารหล่อลื่นที่ใช้ และความเรียบบริเวณผิวสัมผัสระหว่างเซลล์ทดสอบกับแท่งกดตัวอย่าง ดังนั้นเซลล์ทดสอบแต่ละตัวอาจมีผลกระทบเนื่องจากแรงเสียดทานที่แตกต่างกัน

2) ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของความล้า (Fatigue) และการคืบ (Creep) ความคงทนของระบบป้องกันน้ำซึม รวมถึงผลเนื่องจากอุณหภูมิที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโหลดเซลล์เพิ่มเติม ในกรณีต้องการใช้งานระยะยาวและไม่ต้องการทำการสอบเทียบบ่อยครั้ง

3) ความละเอียดของการวัดนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น คุณภาพของสายดินและสายส่งสัญญาณ ความยาวของสายส่งสัญญาณ อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าอื่นๆ รอบบริเวณที่ทดสอบ คุณภาพของวงจรขยายสัญญาณ รวมถึงกำลังการขยายสัญญาณ

## 8. บรรณานุกรม

- (1) Kongkitkul W. (2004). Effects of material viscous properties on the residual deformation of geosynthetic-reinforced sand. Ph.D. Thesis. The University of Tokyo, Japan.
- (2) Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. & Fukushima, S. (1986). Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures, *Soils and Foundations*, 26(1), pp. 65-84.
- (3) Lai, J. (2004). Advanced geotechnical laboratory. Department of construction engineering. Chaoyang University of Technology, Taiwan.

- (4) Chao L.P. and Chen K.T. (1997). Shape optimal design and force sensitivity evaluation of six-axis force sensors, *International Journal of Sensors and Actuators*, 63, pp.105-112.
- (5) สุกกิจ รูปจันทร์ (2547). การศึกษาออกแบบโพลดเซลล์ชนิดคอลัมน์ โดยวิธีการทดลองและระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- (6) สราวุธ เรืองกิจตระการ (2549). กรณีศึกษารูปทรงของโพลดเซลล์ โดยใช้เทคนิคของไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- (7) เพิ่มศักดิ์ เกตุนวม (2550). การออกแบบโพลดเซลล์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.