

## บทที่ 3 การออกแบบและทดลอง

จากการศึกษาเครื่องมือที่ใช้ในการวัดแรงเฉือนผ่านความสัมพันธ์เปลี่ยนแปลงทางระดับสัญญาณไฟฟ้าจากงานวิจัยและผลงานที่มีมาก่อน ได้แสดงถึงขั้นตอนกระบวนการสร้างเครื่องมือต้นแบบมีความซับซ้อนยากแก่การผลิต และเซ็นเซอร์วัดแรงเฉือนยังได้รับผลกระทบจากแรงกดส่งผลให้ค่าที่วัดได้เกิดความคลาดเคลื่อน ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบเครื่องมือวัดแรงเฉือนโดยใช้การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า และใช้โครงสร้างยึดหยุ่นเพื่อช่วยลดผลกระทบของแรงกดที่กระทำบนเครื่องมือ รายละเอียดของขั้นตอนและแผนการดำเนินงานมีดังนี้

### 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

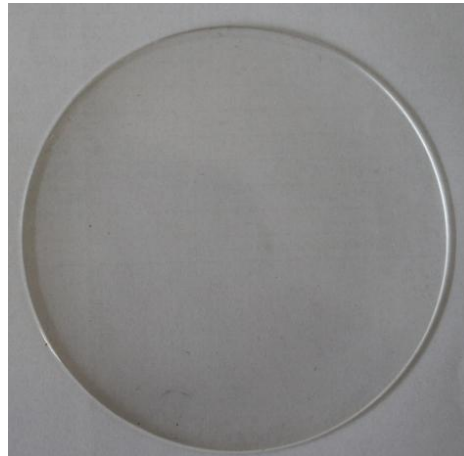
- ศึกษางานวิจัยและผลงานที่มีมาก่อน
- ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
- ออกแบบชิ้นงานพื้นฐาน
- จัดหาอุปกรณ์ เครื่องมือ
- วิเคราะห์การทำงานของชิ้นงาน
- แก้ไขปรับปรุงการออกแบบชิ้นงาน
- ผลิตและประกอบชิ้นงาน
- ทดลองชิ้นงานในสภาวะและขนาดแรงชนิดต่างๆ
- แก้ไขปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ
- จัดทำรายงานสรุปผล

### 3.2 การศึกษางานวิจัยและผลงานที่มีมาก่อน

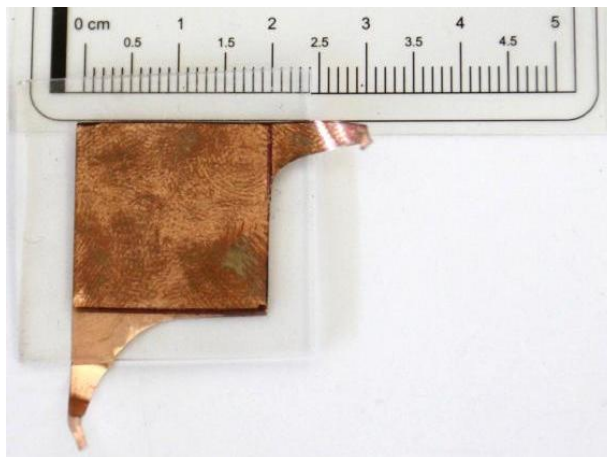
จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น ผู้วิจัยเลือกที่จะสร้างเครื่องมือตรวจวัดที่อาศัยหลักการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้า และเลือก PDMS เป็นวัสดุประเภทไดอิเล็กตริก เนื่องจากคุณสมบัติของวัสดุที่มีการศึกษามาก่อนแล้ว [19, 20] และยังมีความยืดหยุ่นที่เหมาะสมสำหรับการรับแรงกดอีกด้วย

### 3.3 การออกแบบเซ็นเซอร์โดยใช้ PDMS หล่อเป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 1

เซ็นเซอร์ต้นแบบประกอบไปด้วยแผ่น PDMS จัดเป็นวัสดุประเภทไดอิเล็กตริกดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยใช้แผ่น PDMS ที่อัตราส่วน 1:10 ซึ่งหล่อขึ้นรูปแล้วและมีความหนาประมาณ 1.2 มิลลิเมตร และเซ็นเซอร์ต้นแบบนี้เกิดจากการประกบแผ่นทองแดงขนาด  $20 \times 20$  มิลลิเมตร 2 แผ่นลงบนแผ่น PDMS ซึ่งแผ่นทองแดงทั้งสองแผ่นจะทำหน้าที่เป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยมี PDMS เป็นวัสดุชนิดไดอิเล็กตริก ลักษณะของชิ้นงานต้นแบบแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แผ่น PDMS หล่อขึ้นรูป

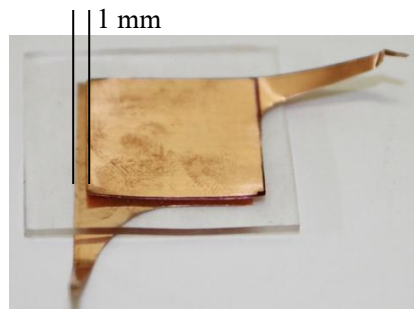


รูปที่ 3.2 เซ็นเซอร์ต้นแบบ

การวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้เครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้าในขณะที่ตำแหน่งอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วมีตำแหน่งจัดวางตรงกันได้ผลการวัด 14.2 พิโกฟารัด ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และเมื่อทำการย้ายตำแหน่งติดตั้งขั้วอิเล็กโทรดให้เหลื่อมล้ำกันระหว่างสองขั้วเป็นระยะห่าง 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.4 สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ 13.8 พิโกฟารัด ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.3 ค่าความจุไฟฟ้า ณ ตำแหน่งอิเล็กโทรดปรกติ



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งการจัดวางขั้วอิเล็กโทรด



รูปที่ 3.5 ค่าความจุไฟฟ้า ณ ตำแหน่งอิเล็กโทรดเหลื่อมล้ำ

แผ่น PDMS ซึ่งมีค่าโมดูลัสเฉือน  $G$  (shear modulus) 250 KPa [19] ค่า Dielectric Constant 2.65 [20] ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้การคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้ขนาดของแผ่นอิเล็กโทรดและความหนาของอิเล็กโทรด ณ ตำแหน่งที่ขั้วอิเล็กโทรดปรกติและเหลื่อมล้ำตำแหน่ง สามารถคำนวณได้ดังนี้

ณ ตำแหน่งขั้วอิเล็กโทรดปรกติ (คำนวณจากสมการที่ 2.2)

$$C_1 = 8.85 \times 2.65 \times 10^{-12} \times \frac{0.02 \times 0.02}{0.0012} \quad (3.1)$$

$$C_1 = 7.817 \times 10^{-12} \text{ F}$$

และขณะที่ขั้วอิเล็กโทรดเหลื่อมล้ำตำแหน่ง 1 มิลลิเมตร

$$C_2 = 8.85 \times 2.65 \times 10^{-12} \times \frac{0.019 \times 0.02}{0.0012} \quad (3.2)$$

$$C_2 = 7.427 \times 10^{-12} \text{ F}$$

ค่าความจุไฟฟ้าที่คำนวณได้ค่าความแตกต่าง  $7.817 - 7.427 = 0.39$  พิโกฟารัด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ค่าความแตกต่าง  $14.2 - 13.8 = 0.4$  พิโกฟารัด แสดงถึงความสัมพันธ์ที่มีแนวโน้มไปทิศทางเดียวกัน และค่าความจุไฟฟ้าในขณะที่ขั้วอิเล็กโทรดเหลื่อมล้ำตำแหน่ง 1 มิลลิเมตร สามารถคำนวณกลับไปเป็นแรงกระทำทิศทางเหนือได้ดังนี้

ขณะที่ขั้วอิเล็กโทรดเหลื่อมล้ำตำแหน่ง 1 มิลลิเมตร สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ 13.8 พิโกฟารัด จากสมการที่ 2.2 คำนวณกลับหาค่าพื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรดได้ แต่เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้อาจมีความผิดพลาดจึงทำให้ผลจากการคำนวณเกิดความคลาดเคลื่อน

$$A = \frac{Cd}{\epsilon} \quad (3.3)$$

$$A = \frac{13.8 \times 10^{-12} \times 0.0012}{8.85 \times 2.65 \times 10^{-12}}$$

$$A = 7.061 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

เนื่องจากความกว้างของขั้วอิเล็กโทรดคงที่ 20 มิลลิเมตร สามารถหารระยะเลื่อนได้จากรูปที่ 2.2

$$x = \left| \frac{7.061 \times 10^{-4}}{0.02} - 0.02 \right|$$

$$x = 0.0153 m$$

เมื่อได้ระยะเลื่อนสามารถคำนวณค่าความเครียดเฉือน ( $\gamma$ ) ได้จากสมการที่ 2.5

$$\gamma = \tan^{-1} \left( \frac{0.0153}{0.0012} \right)$$

$$\gamma = 0.9057 \text{ rad}$$

คำนวณค่าความเค้นเฉือน ( $\tau$ ) ได้จากสมการที่ 2.6 โดยมีค่าโมดูลัสเฉือน 250 kPa [19]

$$\tau = \gamma G$$

$$\tau = 0.9057 \times 250,000$$

$$\tau = 226,423 \text{ Pa}$$

จากสมการที่ 2.7 สามารถคำนวณค่าแรงเฉือนได้ดังนี้

$$P = \tau A$$

$$P = 226,423 \times (0.02 \times 0.02)$$

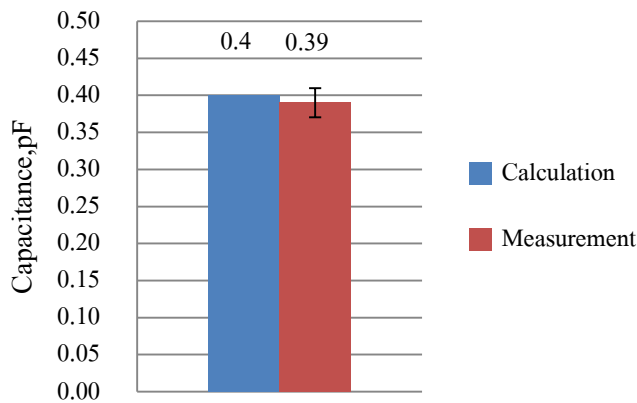
$$P = 90.57 \text{ N}$$

$$P \approx 9 \text{ K}_{gf}$$

เพราะฉะนั้นจากค่าความจุไฟฟ้าและความหนาของเซ็นเซอร์ต้องใช้แรงเฉือนประมาณ 9 กิโลกรัม เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 1 มิลลิเมตร

### 3.3.1 ผลการออกแบบเซ็นเซอร์โดยใช้ PDMS หล่อเป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 1

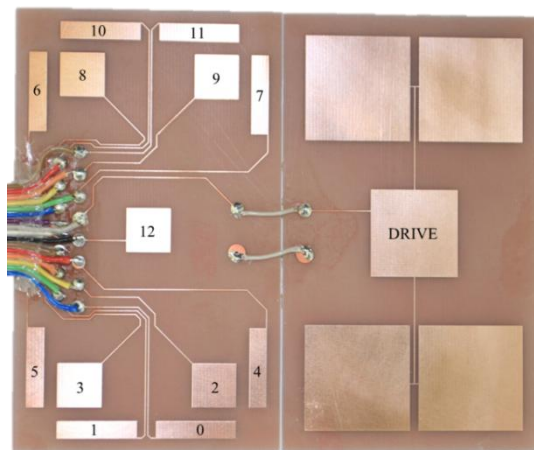
เซ็นเซอร์ต้นแบบรูปแบบที่ 1 ประกอบด้วยแผ่นอิเล็กโทรดขนาด 20 × 20 มิลลิเมตร ประกบลงบนแผ่น PDMS ที่มีความหนาประมาณ 1.2 มิลลิเมตร การวัดระดับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่ตำแหน่งขั้วอิเล็กโทรดปรกติและเหลื่อมล้ำตำแหน่ง 1 มิลลิเมตร เปรียบเทียบระหว่างผลคำนวณค่าความจุไฟฟ้าสมการที่ 3.3 ได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า ระดับความต่างค่าความจุไฟฟ้าตามตำแหน่งเคลื่อนที่ขั้วอิเล็กโทรด มีผลการคำนวณและการวัดค่าความจุไฟฟ้าจากการทดลอง ในระดับเทียบเท่ากัน โดยมีความแตกต่าง 0.01 พิโกฟารัด



รูปที่ 3.6 ผลเปรียบเทียบระดับค่าความจุไฟฟ้าโดยการคำนวณและผลข้อมูลเครื่องมือวัด

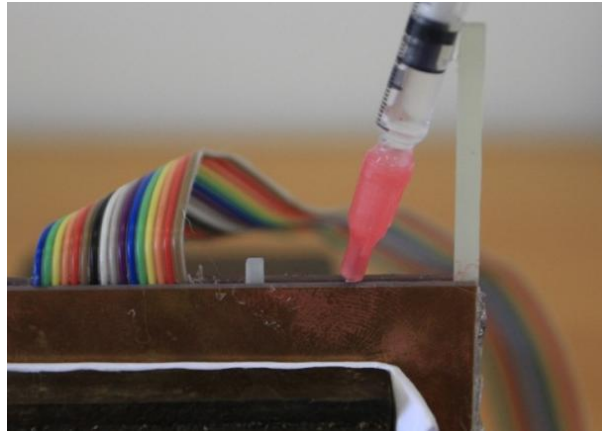
### 3.4 การออกแบบเซ็นเซอร์โดยใช้ PDMS หล่อเป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 2

ในรูปแบบต่อมา ผู้วิจัยได้ออกแบบแผ่นเซ็นเซอร์วัดแรงเฉือนขนาด 60 × 100 มิลลิเมตร ประกอบด้วยอิเล็กโทรดจำนวน 13 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยตำแหน่งอิเล็กโทรดบริเวณมุมทั้งสี่ใช้สำหรับวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าตามแรงเฉือน และตำแหน่งอิเล็กโทรดตรงกลาง 5 ตำแหน่งใช้สำหรับวัดค่าการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าตามแรงกด



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งอิเล็กโทรด

เมื่อขึ้นรูปขั้วอิเล็กโทรด 13 ตำแหน่งแล้วจึงนำมาประกอบร่วมกับแผ่นอิเล็กโทรด โดยการหล่อวัสดุ PDMS เป็นไดอิเล็กตริกคั่นกลางระหว่างเซ็นเซอร์ทั้งสองแผ่น ให้มีระยะห่าง 1.6 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.8

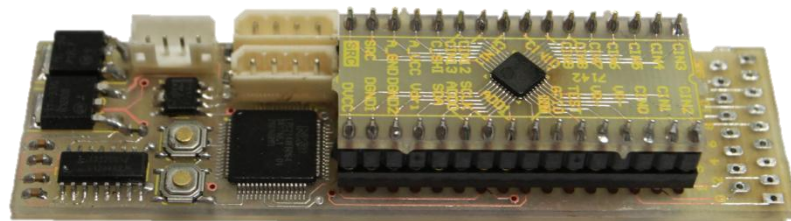


รูปที่ 3.8 ขั้นตอนหล่อ PDMS

จากค่าระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด และตำแหน่งการเชื่อมต่อสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าสำหรับเซ็นเซอร์ขนาด  $2 \times 18$  มิลลิเมตรได้ 0.527 พิโกฟารัด และคำนวณระดับค่าความจุไฟฟ้าสำหรับเซ็นเซอร์ขนาด  $10 \times 10$  มิลลิเมตร ได้ 1.467 พิโกฟารัด

### 3.4.1 การพัฒนาปรับปรุงเครื่องมือวัดผล

เนื่องจากค่าการเปลี่ยนความจุไฟฟ้าตามแรงจากภายนอก มีการเปลี่ยนแปลงน้อยจึงเลือกใช้วงจรรวมหมายเลข “AD7142” ซึ่งมีค่าช่วงการวัดระดับความจุไฟฟ้า  $\pm 2$  pF มีความละเอียดข้อมูล 16 บิต จำนวนอัตราสุ่มข้อมูล 128, 256 และความถี่ในการใช้งานที่ 250 kHz วงจรรวมนี้จะช่วยวัดระดับค่าความจุไฟฟ้าจากแผ่นอิเล็กโทรดที่ออกแบบและสร้างเป็นเครื่องมือวัดแรงเฉือนขนาดเล็ก เพื่อเก็บค่าจากการทดลอง วงจรรวมที่ใช้นี้มีช่องวัดสัญญาณไฟฟ้า 14 ช่องสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรรวมเพื่อวัดความจุไฟฟ้า

### 3.4.2 การทดลองวัดผลข้อมูลน้ำหนักกดทับจากเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2

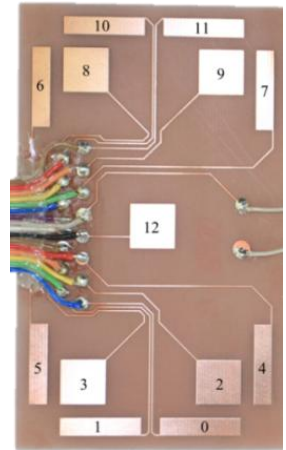
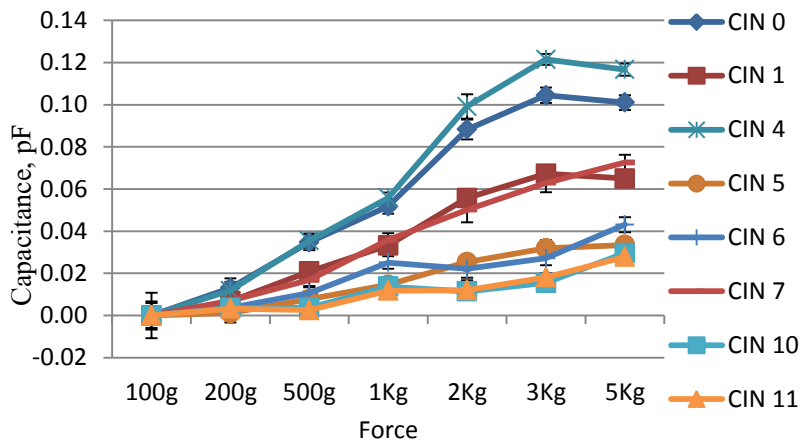
การทดลองวัดค่าความจุไฟฟ้าและเก็บผลใช้เครื่องมือดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยการวางและปรับเปลี่ยนน้ำหนักกดทับขนาดต่างๆ ในช่วงระดับ 100 กรัม ถึง 5 กิโลกรัมลงบนแท่นรองรับที่ติดตั้งแผ่นเซ็นเซอร์ เพื่อทำการวัดระดับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า



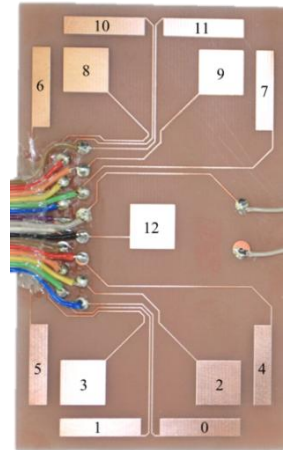
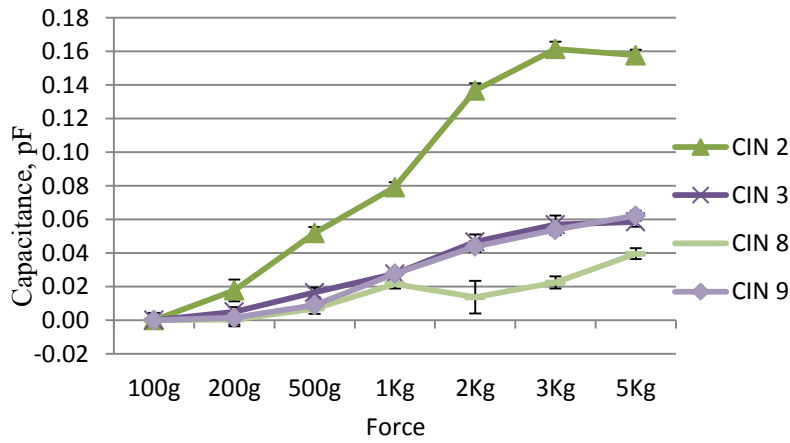
รูปที่ 3.10 ขั้นตอนวัดค่าความจุไฟฟ้าร่วมกับน้ำหนักกดทับ

### 3.4.3 ผลการทดลองวัดค่าข้อมูลน้ำหนักกดทับจากเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2

จากการทดลองที่ระดับน้ำหนักต่างๆ ได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าสัมพันธ์กับน้ำหนักกดทับที่วัดได้จากตำแหน่งเซ็นเซอร์รอบข้างดังแสดงในรูปที่ 3.11 และค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้จากตำแหน่งเซ็นเซอร์กลางแสดงในรูปที่ 3.12



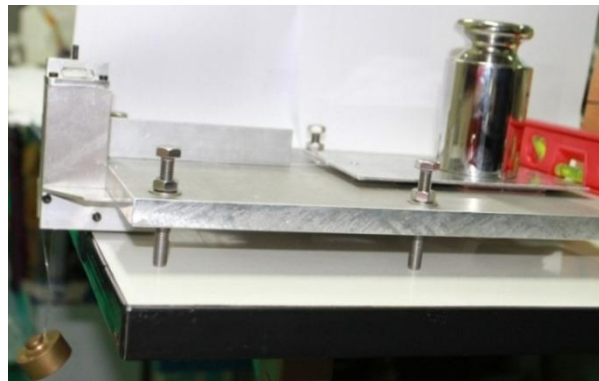
รูปที่ 3.11 ระดับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจากน้ำหนักที่กด ณ ตำแหน่งเซ็นเซอร์รอบข้าง



รูปที่ 3.12 ระดับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจากน้ำหนักกดตำแหน่งเซ็นเซอร์กลาง

### 3.4.4 การทดลองวัดผลข้อมูลน้ำหนักกดทับและแรงเฉือนจากเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2

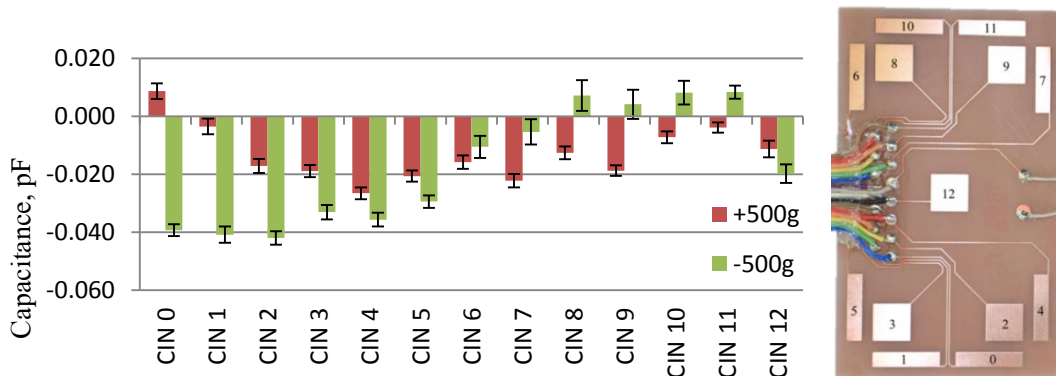
การทดสอบเซ็นเซอร์ทำได้โดยวางน้ำหนักกดทับขนาด 2 กิโลกรัมลงบนแท่นรองรับที่ติดตั้งแผ่นเซ็นเซอร์ไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.13 การวัดค่าความจุไฟฟ้าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากแรงดึงเฉือนด้วยน้ำหนักถ่วง 500 กรัม การบันทึกข้อมูลผลการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า และแรงดึงเฉือนในแนวแรงกระทำทิศทางบวกหรือลบ เมื่อเปรียบเทียบกับระดับค่าความจุไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีแรงดึงเฉือน



รูปที่ 3.13 ขั้นตอนทดสอบวัดน้ำหนักกดทับและแรงเฉือน

### 3.4.5 ผลการทดลองวัดค่าข้อมูลน้ำหนักกดทับและแรงเฉือนจากเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2

ค่าความจุไฟฟ้าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากแรงกดทับและแรงดึงเฉือนด้วยน้ำหนักถ่วง ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า และแรงดึงเฉือนในแนวแรงกระทำทิศทางบวกหรือลบเปรียบเทียบกับขนาดค่าความจุไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีแรงดึงเฉือน ดังแสดงในรูปที่ 3.14

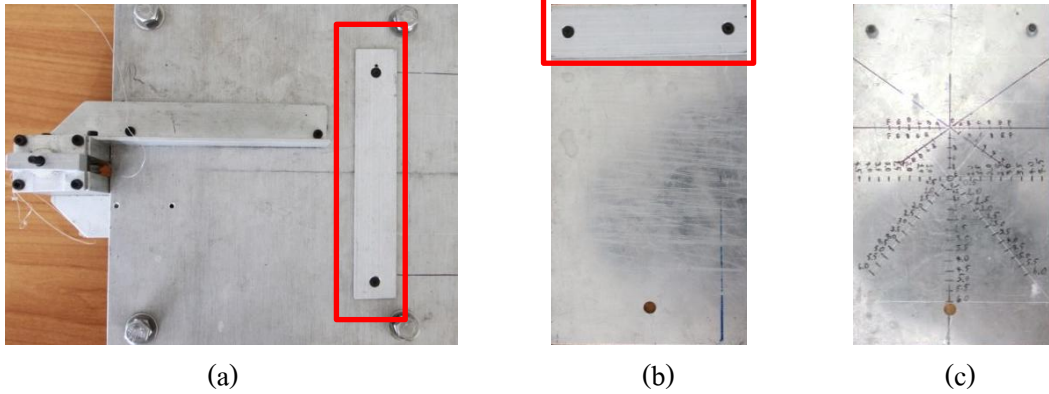


รูปที่ 3.14 ค่าความจุไฟฟ้าเปรียบเทียบแรงกดทับ 2 กิโลกรัม และแรงดึง 500 กรัม

เนื่องจากแรงกดทับขนาดต่างๆ ได้ส่งผลกับการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ตำแหน่ง CIN 0, 1, 4, 5, 6, 7, 10, 11 ที่ออกแบบสำหรับการวัดค่าแรงเฉือน ดังนั้น การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงกดจากเซ็นเซอร์ในตำแหน่ง CIN 2, 3, 8, 9, 12 ที่ออกแบบสำหรับการวัดแรงกดจะถูกชดเชยผลการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าในการคำนวณสำหรับการวัดแรงเฉือน

### 3.4.6 การปรับปรุงเครื่องมือทดลองวัดผลข้อมูลเซ็นเซอร์

ระหว่างการทดลองวัดผลแผ่นประกบเซ็นเซอร์เกิดการลื่นไถล ส่งผลให้ข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ผิดพลาด ผู้วิจัยจึงได้ปรับปรุงแผ่นประกบเซ็นเซอร์ โดยติดตั้งแผ่นโลหะเพื่อช่วยส่งแรงและลดผลกระทบจากการลื่นไถลดังแสดงในรูปที่ 3.15 นอกจากนี้ ยังมีการกำหนดจุดวางน้ำหนักสำหรับน้ำหนักกดทับ เพื่อลดการคลาดเคลื่อนในตำแหน่งที่น้ำหนักจะกดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.15 (c)



(a)

(b)

(c)

รูปที่ 3.15 ตำแหน่งปรับปรุงเครื่องมือวัดผล

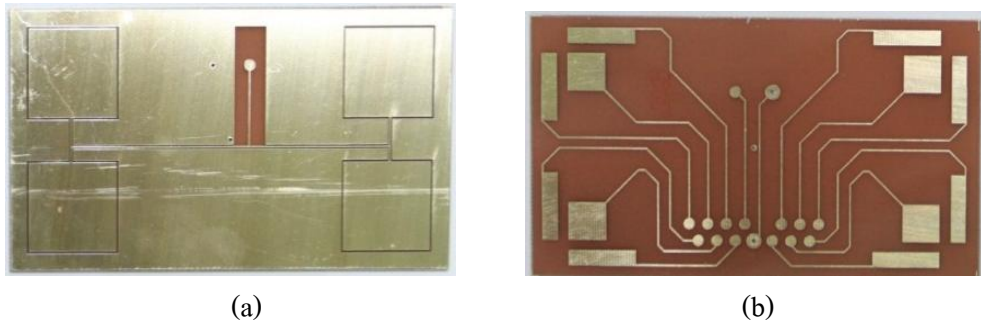
(a) ตำแหน่งติดตั้งแผ่นโลหะช่วยรับแรงฐานรอง

(b) ตำแหน่งติดตั้งแผ่นโลหะช่วยส่งแรงแผ่นประกบ

(c) แนวเส้นสำหรับวางน้ำหนักกดทับหลังแผ่นประกบ

### 3.4.7 การปรับปรุงลักษณะแผ่นเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2

เนื่องจาก เครื่องมือวัดค่าความจุไฟฟ้ามีโครงสร้างอุปกรณ์ภายนอกที่สามารถเชื่อมต่อช่องวัดสัญญาณไฟฟ้าได้ 14 ช่องสัญญาณ แต่โครงสร้างวงจรภายในสามารถอ่านค่าสัญญาณไฟฟ้าต่อเนื่องได้ไม่เกิน 12 ช่องสัญญาณ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ใหม่ โดยใช้ตำแหน่งชุดวัดสัญญาณที่มุมของแผ่นเซ็นเซอร์ และแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ขับเคลื่อนที่มีกราวด์ควบคุมดังแสดงในรูปที่ 3.16 เพื่อวัดผลระดับค่าความจุไฟฟ้า



(a)

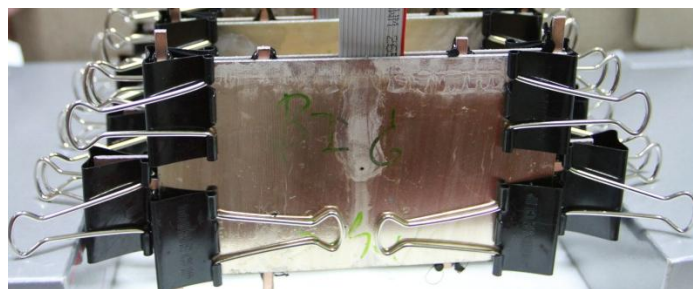
(b)

รูปที่ 3.16 แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ปรับปรุงใหม่

(a) แผ่นอิเล็กทรอนิกส์ขับเคลื่อน

(b) แผ่นเซ็นเซอร์

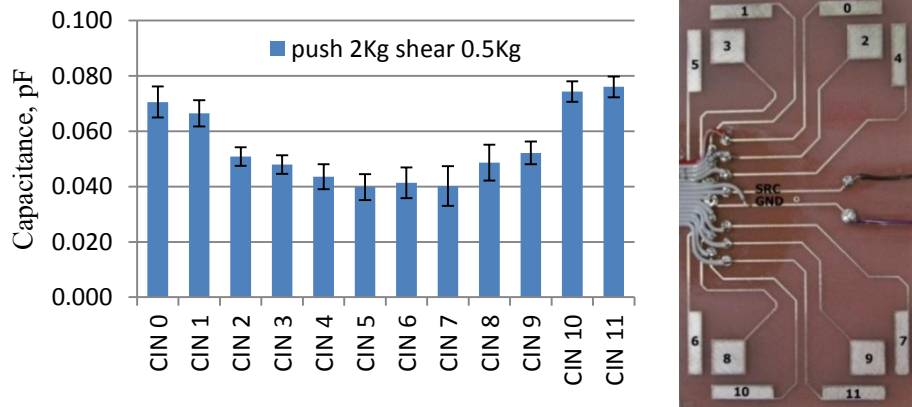
นอกจากนี้วิธีการหล่อแบบเซ็นเซอร์แบบเก่าโดยใช้ปากกาจับชิ้นงาน เพื่อบีบแผ่นเซ็นเซอร์ไว้ในระหว่างเทหล่อวัสดุ PDMS จึงส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมแรงบีบได้คงที่ ทำให้แผ่นเซ็นเซอร์โค้งงอจากแรงบีบอัดที่สูงเกิน ผู้วิจัยได้แก้ไขโดยตัดแปลงมาใช้สปริงหนีบแผ่นกระดาษขนาด 3 เซนติเมตรทดแทนวิธีการบีบด้วยปากกาจับชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.17



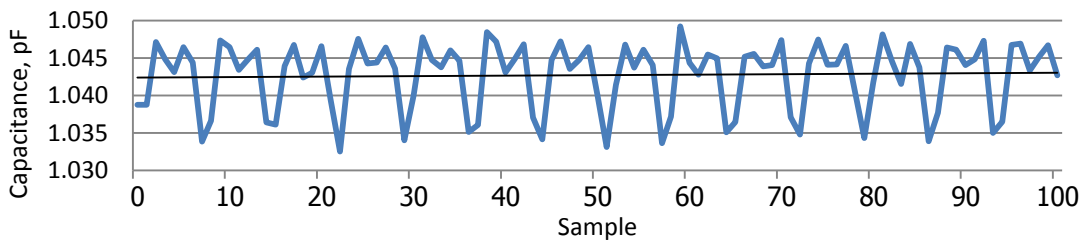
รูปที่ 3.17 วิธีบีบแผ่นเซ็นเซอร์ระหว่างหล่อ PDMS

### 3.4.8 ผลการปรับปรุงลักษณะแผ่นเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2

ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นเซ็นเซอร์รูปแบบที่ 2 มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อได้รับแรงดึงเพิ่มขึ้น 500 กรัม ในขณะที่มีน้ำหนักกดทับ 2 กิโลกรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และเมื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงระดับค่าความจุไฟฟ้าที่ตำแหน่ง CIN 0, CIN 1 จะมีค่าการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าน้อย ทั้งนี้ ข้อมูลการอ่านค่าจากวงจรรวมหมายเลข “AD7142” จะประกอบไปด้วยค่าความจุไฟฟ้าต่อเนื่อง 100 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 ค่าความจุไฟฟ้าในตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีแรงกดทับ 2 กิโลกรัม และแรงดึง 500 กรัม

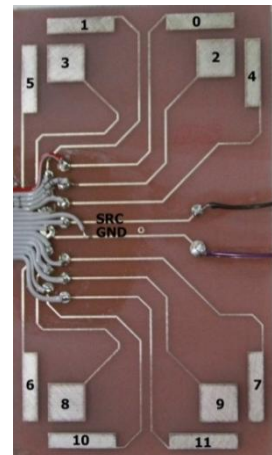
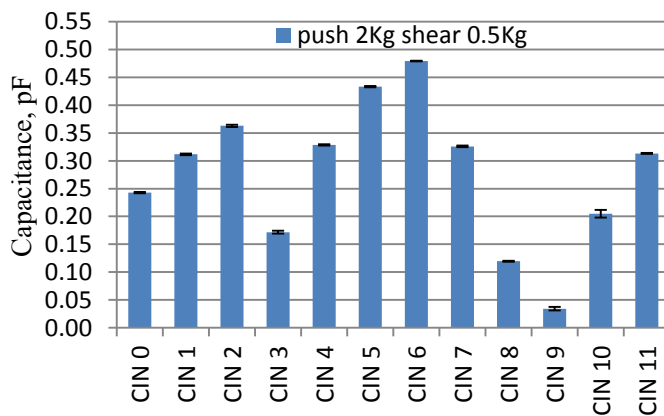


รูปที่ 3.19 ตัวอย่างค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง

ผลการวัดข้อมูลด้วยเครื่องมือวัดวงจรรวมหมายเลข “AD7142” แสดงถึงการแกว่งตัวของระดับค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้ ดังนั้น ผู้วิจัยได้เปลี่ยนเครื่องมือวัดโดยใช้เครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้ารุ่น “HP 4284a” ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ซึ่งเครื่องมือวัดนี้สามารถวัดค่าช่วงระดับความจุไฟฟ้า 0.01 เฟมโตฟารัด ถึง 9.9999 ฟารัด มีระดับความถี่ขณะใช้งาน 250 kHz สามารถอ่านค่าความจุไฟฟ้าจากแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ได้ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 เครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้ารุ่น HP 4284a



รูปที่ 3.21 ค่าความจุไฟฟ้าในตำแหน่งต่างๆ เมื่อมีแรงกดทับ 2 กิโลกรัม และแรงดึง 500 กรัม

เมื่อเปรียบเทียบค่าระดับความจุไฟฟ้าตำแหน่ง CIN 0, CIN1 จากผลของเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้ารุ่น “HP 4284a” และเครื่องมือวัดวงจรรวมหมายเลข “AD7142” จะมีการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นในลักษณะเดียวกัน ต่างกันที่การแบ่งกลุ่มของข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้ารุ่น “HP 4284a” มีค่าต่ำกว่า