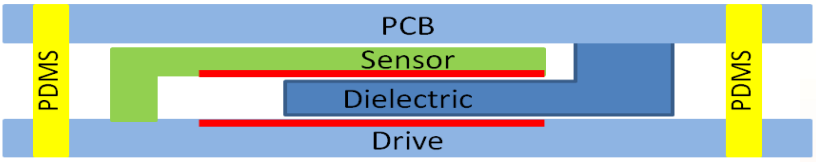
บทที่ 4 การปรับปรุงและพัฒนาเซ็นเซอร์

จากผลการทดลองและข้อมูลเซ็นเซอร์แบบใช้ PDMS หล่อเป็นไดอิเล็กตริก แสดงถึงปัญหาค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าระดับค่าสัญญาณรบกวน เมื่อมีแรงกระทำในทิศทางตัดเฉือน ส่งผลให้ไม่สามารถใช้งานข้อมูลจากการวัดได้ตรงกับแรงกระทำที่เกิดขึ้นจริง ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบเซ็นเซอร์แบบใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกใช้งานทดแทน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 การออกแบบเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 1

จากปัญหาการวัดค่าความจุไฟฟ้าของเซ็นเซอร์ที่ผ่านมา ผู้วิจัยได้ปรับเปลี่ยนรูปแบบเซ็นเซอร์ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยอิเล็กโทรดแผ่นโลหะตัวนำไฟฟ้าติดตั้งคู่ขนานบนวัสดุไดอิเล็กตริกที่เป็นแผ่นโพลีเอสเตอร์หนา 100 ไมโครเมตร มีคุณสมบัติวัสดุทางไฟฟ้าดังตารางที่ 4.1 แผ่นโพลีเอสเตอร์นี้จะคั่นกลางระหว่างแผ่นโลหะ ซึ่งจากการคำนวณเบื้องต้นเซ็นเซอร์นี้ถูกออกแบบเพื่อให้สามารถเลื่อนปรับตำแหน่งเพื่อเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าภายในช่วง ±1 พิโกฟารัด และไม่เกิน 20 พิโกฟารัด เพื่อสามารถใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรเลอร์ชุดเดิมได้ โดยมีระยะเลื่อนตำแหน่งแผ่นไดอิเล็กตริก 1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 ลำดับชั้นโครงสร้างเซ็นเซอร์

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติวัสดุทางไฟฟ้า

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε)
โพลีเอสเตอร์ [21]	3.2
อากาศแห้ง 20 °C	1.000536
สุญญากาศ	8.85419×10^{-12}

จากตารางที่ 4.1 สามารถคำนวณขนาดแผ่นอิเล็กโทรดโดยใช้แผ่น PCB หนา 1.6 มิลลิเมตร สำหรับเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบที่ระยะเลื่อน 1 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้แผ่นอิเล็กโทรดมีความกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 5 มิลลิเมตร โดยมีแผ่นไดอิเล็กตริกวางคั่นที่ระยะครึ่งความยาว และเมื่อ

มีระยะเคลื่อนตำแหน่งด้านข้าง 1 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้มีช่องว่างอากาศระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและแผ่นไดอิเล็กตริก 210 ไมโครเมตร

จากสมการที่ 2.2 สามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าได้ดังสมการต่อไปนี้

$$C = \varepsilon \frac{A}{d}$$

$$C_{air} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \times ((0.015 \times 0.005) - (0.013 \times (0.0025^{+0.0005}_{-0.0005})))}{0.0001 + Airgap}$$

$$C_{polyester} = \frac{\left(\frac{\varepsilon_{polyester} \times (0.013 \times 0.0025^{+0.0005}_{-0.0005})}{0.0001}\right) \times \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \times (0.013 \times 0.0025^{+0.0005}_{-0.0005})}{Airgap}\right)}{\left(\frac{\varepsilon_{polyester} \times (0.013 \times 0.0025^{+0.0005}_{-0.0005})}{0.0001}\right) + \left(\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \times (0.013 \times 0.0025^{+0.0005}_{-0.0005})}{Airgap}\right)}$$

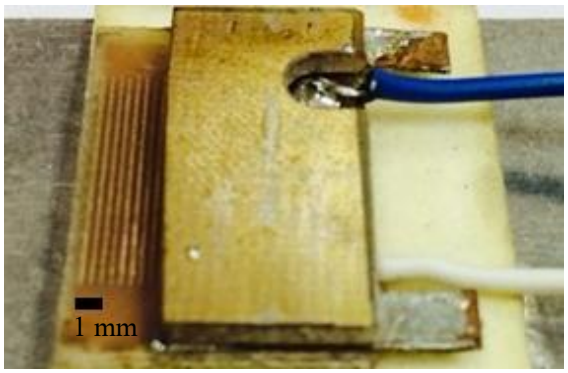
$$C = C_{polyester} + C_{air} \tag{4.1}$$

$$C_{\max} = 3.9643\,\text{pF}$$

$$C_{\min} = 3.6975\,\text{pF}$$

$$C_{diff} = 0.2668\,\text{pF}$$

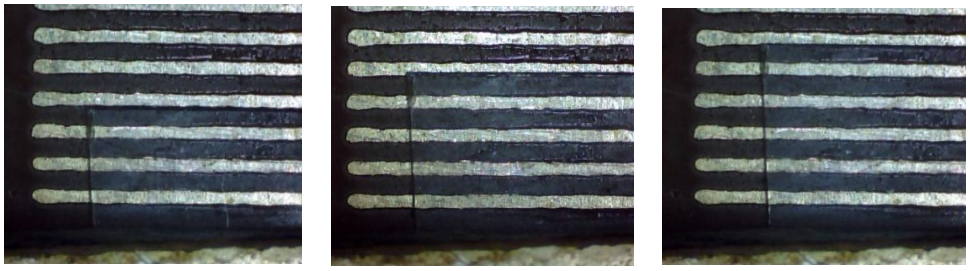
จากการคำนวณดังกล่าวแสดงถึงระดับค่าความจุไฟฟ้าสูงสุด 3.9643 พิโกฟารัด และ ค่าความจุไฟฟ้าต่ำสุด 3.6975 พิโกฟารัด และคิดเป็นความแตกต่าง 0.2668 พิโกฟารัด ตามขนาดแผ่นอิเล็กโทรดที่ออกแบบ ซึ่งการคำนวณความจุไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง ±1 พิโกฟารัด และค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 20 พิโกฟารัด ทำให้ผู้วิจัยได้ออกแบบเซ็นเซอร์ต้นแบบเพื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริก ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 เซ็นเซอร์ต้นแบบสำหรับการวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริก

4.1.1 ผลการออกแบบเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 1

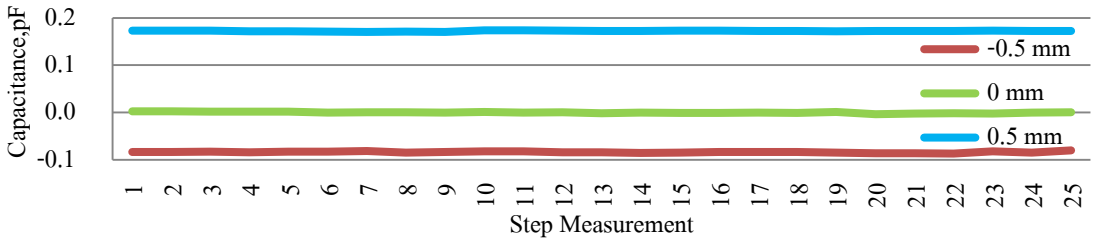
เซ็นเซอร์ที่ใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 1 สามารถปรับเปลี่ยนระดับได้ด้วยการสอดแผ่นโพลีเอสเตอร์เข้าช่องระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด โดยมีตำแหน่งเคลื่อนที่สามจุดซึ่งแต่ละจุดมีระยะทางห่างกัน 0.5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.3



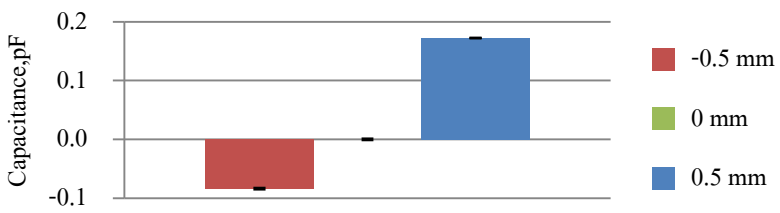
(a) (b) (c)

รูปที่ 4.3 ตำแหน่งเคลื่อนที่แผ่นโพลีเอสเตอร์
(a) ตำแหน่งเคลื่อนที่แผ่นโพลีเอสเตอร์ $-0.5mm$
(b) ตำแหน่งเคลื่อนที่แผ่นโพลีเอสเตอร์ $0 \quad mm$
(c) ตำแหน่งเคลื่อนที่แผ่นโพลีเอสเตอร์ $+0.5mm$

การวัดค่าความจุไฟฟ้าสำหรับเซ็นเซอร์นี้ถูกทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้า “HP 4284a” ตำแหน่งละ 25 ครั้ง โดยใช้อัตราสุ่ม 100 ตัวอย่าง ในความถี่ใช้งาน 250 KHz ได้ผลการวัดดังแสดงในรูปที่ 4.4 จากข้อมูลการวัดค่ารูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 ซึ่งผลต่างค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยมีค่า 0.2562 พิโกฟารัด ซึ่งหากนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ที่มีค่าความต่างของความจุไฟฟ้าที่ C_{diff} = 0.2668 พิโกฟารัด จะมีผลต่างกัน 0.0106 พิโกฟารัด



รูปที่ 4.4 ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้

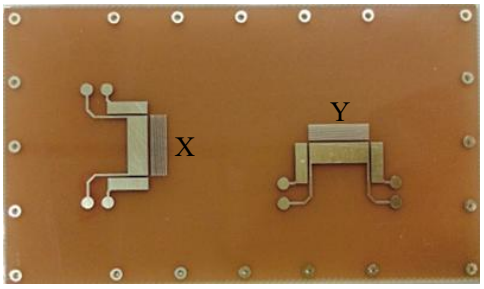


รูปที่ 4.5 ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยเปรียบเทียบตามตำแหน่งไดอิเล็กตริก

4.2 การออกแบบและผลิตเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 2

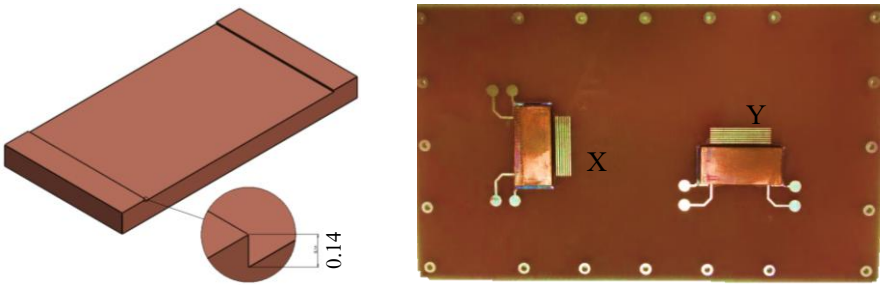
4.2.1 การออกแบบแผ่นเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 2

เนื่องจากเซ็นเซอร์ต้นแบบไม่สามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าตามแนวการเคลื่อนบนระนาบพร้อมกันทั้งสองแนวแกนได้ ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบเซ็นเซอร์โดยแบ่งออกเป็นสองชุด เพื่อวัดค่าความจุไฟฟ้าในสองแกน โดยตำแหน่งการติดตั้งแผ่นอิเล็กโทรดทั้งสองชุดทำมุมตั้งฉาก ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ทั้งนี้แผ่น PCB ทั้งหมดจะมีความกว้าง 70 มิลลิเมตร ยาว 120 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นแผ่นฐานรอง



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งแผ่นอิเล็กโทรดแผ่นฐานรอง

โดยโครงสร้างแผ่นอิเล็กโทรดส่วนบนใช้แผ่นทองแดงขนาด 1.6 × 22 × 5 มิลลิเมตร กัดร่องลึก 140 ไมโครเมตร สำหรับสอดแผ่นโพลีเอสเตอร์ เมื่อประกอบกับแผ่นฐานรอง จะสามารถส่งผ่านแรงกดจากแผ่น PCB ไปยังส่วนฐาน เพื่อลดผลกระทบของแรงกดขณะวัดค่าความจุไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.7



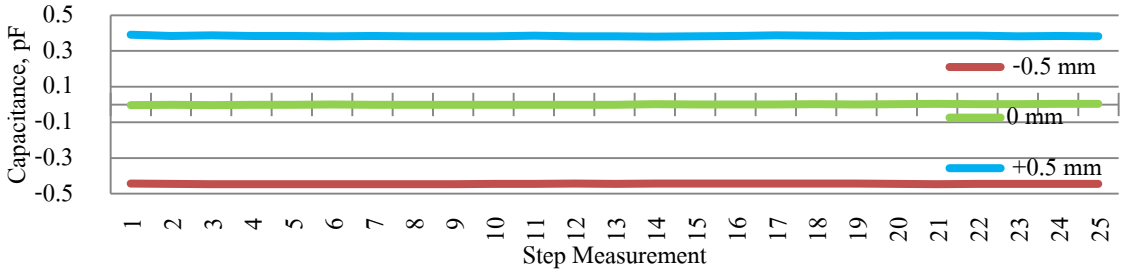
(a) (b)

รูปที่ 4.7 แผ่นอิเล็กโทรดส่วนบนและตำแหน่งติดตั้ง
(a) แผ่นอิเล็กโทรดส่วนบน
(b) ตำแหน่งติดตั้งแผ่นอิเล็กโทรดส่วนบน

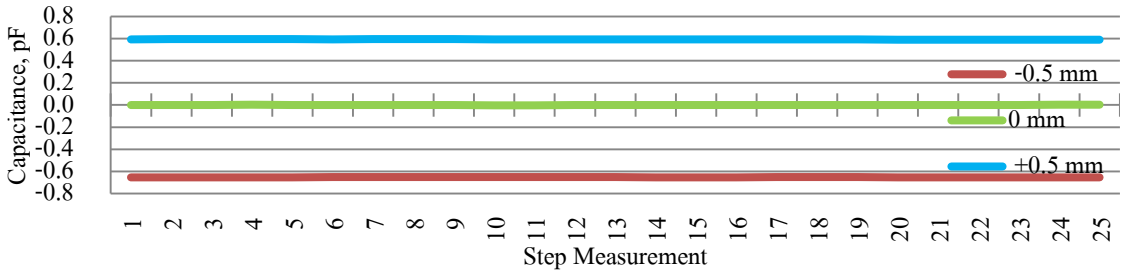
ขณะขึ้นรูปชิ้นงานนั้นสามารถวัดช่องอากาศระหว่างแผ่นโครงสร้างแผ่นไดอิเล็กตริกที่แกน X มีค่า 140 ไมโครเมตร และแกน Y มีค่า 120 ไมโครเมตร เมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.1 จะได้ค่าความจุไฟฟ้าในแนวแกน X = 0.7934 พิโกฟารัด และในแกน Y = 1.2867 พิโกฟารัด

4.2.2 ผลการทดลองแผ่นเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 2

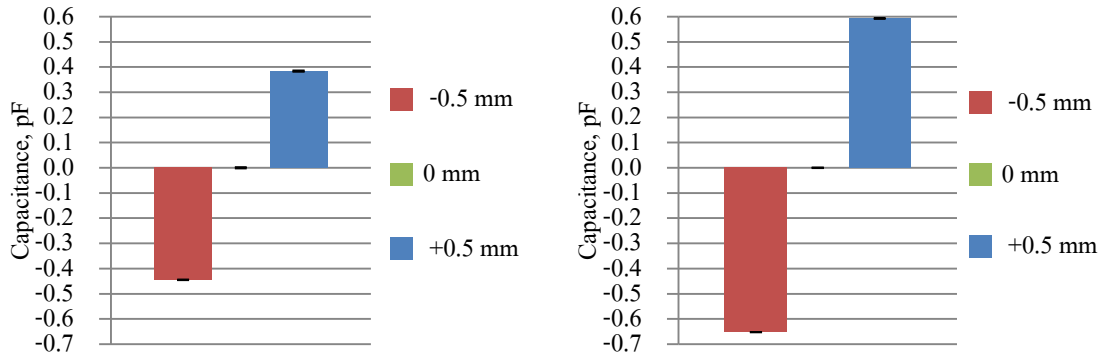
เซ็นเซอร์วัดแรงเฉือนเบื้องต้นถูกทดลองด้วยการสอดแผ่นโพลีเอสเตอร์เข้าช่องระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด ณ ตำแหน่งเคลื่อนที่สามจุด โดยแต่ละจุดห่างกัน 0.5 มิลลิเมตร และสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดค่าความจุไฟฟ้า “HP 4284a” จุดละ 25 ครั้ง โดยมีอัตราสุ่ม 100 ตัวอย่าง ที่ความถี่ 250 KHz ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.8 ค่าความจุไฟฟ้าแกน X



รูปที่ 4.9 ค่าความจุไฟฟ้าแกน Y



(a) (b)

รูปที่ 4.10 ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ย

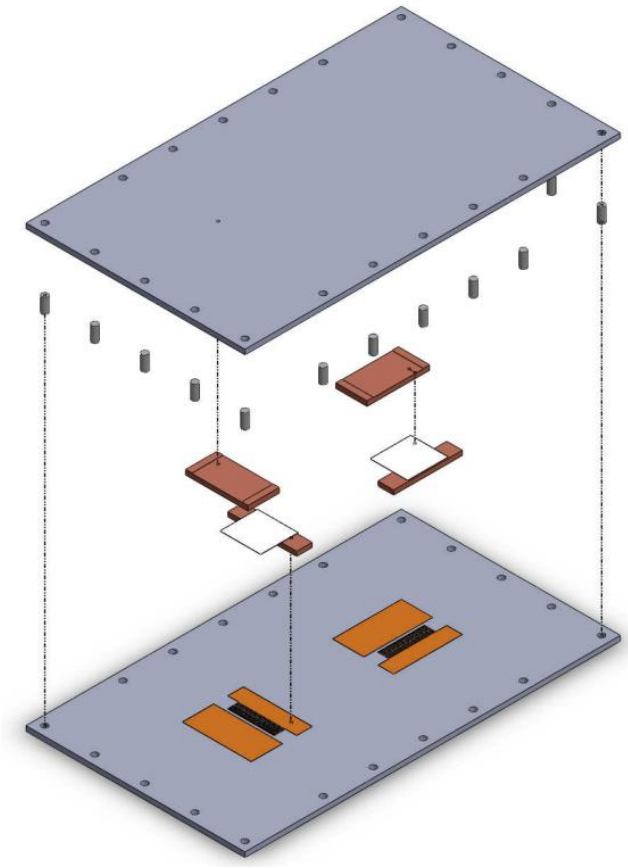
(a) ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยแกน X

(b) ค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยแกน Y

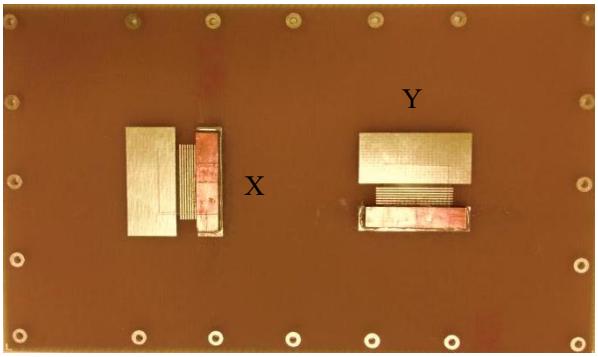
จากรูปที่ 4.8 ถึง 4.10 ผลต่างค่าความจุไฟฟ้าเฉลี่ยแกน X มีค่า 0.8285 พิโกฟารัด และแกน Y มีค่า 1.2449 พิโกฟารัด เมื่อเปรียบระหว่างค่าที่คำนวณแกน X มีค่าความจุไฟฟ้า C_{Xdiff} = 0.7934 พิโกฟารัด และแกน Y มีค่าความจุไฟฟ้า C_{Ydiff} = 1.2867 พิโกฟารัด มีผลต่างที่ใกล้เคียงกัน โดยแกน X ต่างกัน 0.0351 พิโกฟารัด และแกน Y มีความต่าง 0.0418 พิโกฟารัด

4.2.3 การประกอบเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 2

เซ็นเซอร์วัดค่าความจุไฟฟ้าถูกออกแบบให้สามารถเลื่อนตำแหน่งแผ่นไดอิเล็กตริกได้ไม่เกิน 1 มิลลิเมตร เมื่อประกอบเครื่องมือวัดแรงเฉือน โดยใช้ช่วงน้ำหนักทดสอบ 0 ถึง 1,000 กรัม และใช้วัสดุ PDMS หล่อเสาเชื่อมต่อแผ่น PCB ส่วนบนกับแผ่นฐานรอง จากนั้นนำชุดเลื่อนแผ่นไดอิเล็กตริกกับแผ่น PCB ส่วนบนมาประกอบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.11



(a)



(b)

รูปที่ 4.11 ส่วนประกอบเซ็นเซอร์วัดแรงเฉือน
(a) แผนภาพแสดงลำดับชิ้นส่วนเครื่องมือ
(b) ตำแหน่งติดตั้งแผ่นไดอิเล็กตริก

เครื่องมือวัดแรงเฉือนนี้ใช้น้ำหนักทดสอบสูงสุด 1,000 กรัม มีระยะเลื่อนแผ่นไดอิเล็กตริก 1 มิลลิเมตร และยึดแผ่น PCB เข้าด้วยกันโดยใช้การหล่อเสา PDMS โดยที่ทั้งสี่ขอบแผ่น PCB ประกอบไปด้วย 5 เสาในแต่ละขอบ จากการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสา PDMS ในสมการที่ 2.3 ถึง 2.7 สามารถสรุปได้ว่าเสาควรมีขนาด 2 มิลลิเมตร ดังรายละเอียดต่อไปนี้

$$D_{PDMS} = 2\sqrt[2]{\frac{P}{N_{rod_{PDMS}} \pi \times G \times \tan^{-1}(\frac{x_{diff}}{l})}} \tag{4.2}$$

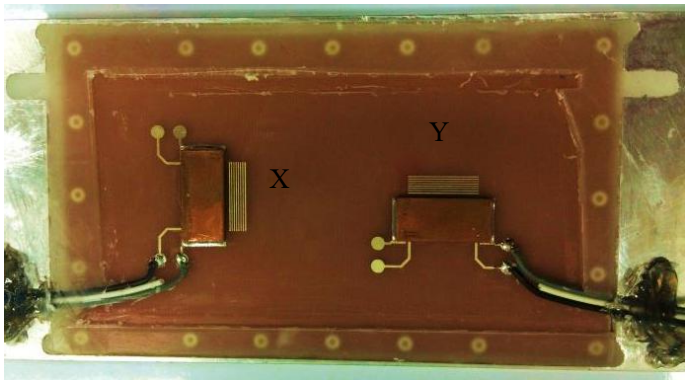
$$D_{PDMS} = 2\sqrt[2]{\frac{9.81}{20\pi \times 250000 \times \tan^{-1}(\frac{0.001}{0.0016})}}$$

$$D_{PDMS} = 2.0mm$$

โดย

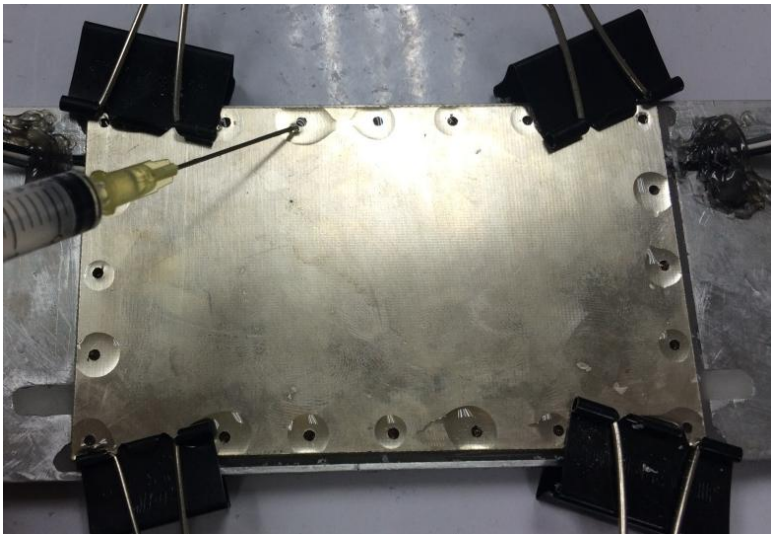
	D_{PDMS}	คือความหนาวัสดุ
	G	คือค่าโมดูลัสเฉือน
	l	คือความหนาวัสดุ
	$N_{rod_{PDMS}}$	คือความเครียดเฉือน
	P	คือแรงกระทำ
	x_{diff}	คือระยะทางการเคลื่อนที่

ก่อนการขึ้นรูปเสาหล่อ PDMS ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร เซ็นเซอร์ต้นแบบมีการเตรียมแม่พิมพ์สำหรับหล่อวัสดุพาราฟินลงในกรอบรองแผ่น PCB ตามระดับความหนาวัสดุและปรับระดับให้ได้ความหนา 1.6 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.12



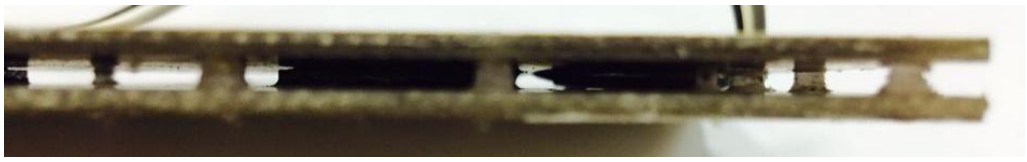
รูปที่ 4.12 แบบหล่อพาราฟินผ่านขั้นตอนการปรับระดับความหนา

หลังจากที่พาราฟินแข็งตัว ทำการประกบแผ่น PCB ส่วนบน โดยสอดแผ่นโพลีเอสเตอร์เข้าช่องระหว่างแผ่นอิเล็กโทรดและจัดตำแหน่งรูทั้ง 20 ตรงกันเพื่อเจาะรู 2 มิลลิเมตร สำหรับใช้เป็นแบบหล่อ PDMS สำหรับยึดแผ่น PCB เข้าด้วยกัน



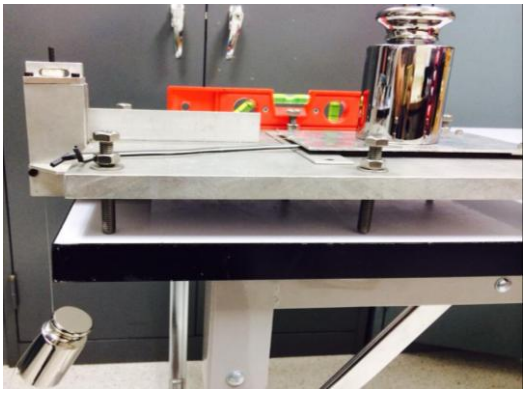
รูปที่ 4.13 ขั้นตอนการฉีดหล่อ PDMS

จากนั้นทำการเตรียมส่วนผสม PDMS ในอัตราส่วนผสม 1:10 [19, 20] และฉีดเติมช่องรูดังแสดงในรูปที่ 4.13 พร้อมทั้งกำจัดฟองอากาศและวางในแนวระนาบพื้น จากนั้น ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 20 ชั่วโมงเพื่อให้ PDMS แข็งตัวและพร้อมสำหรับทดลอง เมื่อครบเวลาที่กำหนดทำการตรวจสอบการแข็งตัว และถอดแบบหล่อพาราฟินด้วยการให้ความร้อน ก็จะได้เสา PDMS ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ที่ยึดติดแผ่น PCB สองแผ่นเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 เสา PDMS หล่อเชื่อมต่อแผ่น PCB

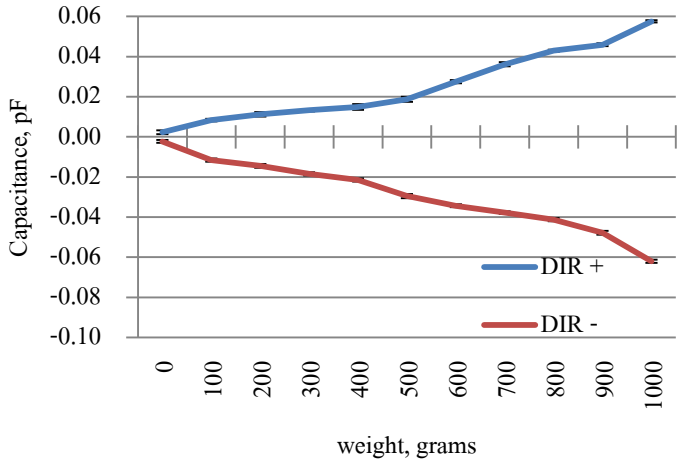
สำหรับการทดลองเซ็นเซอร์รูปแบบนี้จะใช้เครื่องมือทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.15 โดยใช้น้ำหนักกดทับ 2 กิโลกรัม และทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าตามแรงเฉือนด้วยการเพิ่มน้ำหนักครั้งละ 100 กรัม ในช่วงระหว่าง 0 ถึง 1,000 กรัม นับเป็น 11 ระดับแรง ซึ่งมีการวัดในระดับแรงเฉือนในสองทิศทางคือ X+, X-, Y+, Y- และทำการวัดเก็บข้อมูลค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เครื่องมือวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ใช้รุ่น “HP 4284a” ที่มีอัตตราสุ่ม 100 ตัวอย่าง และความถี่ในใช้งาน 250 KHz



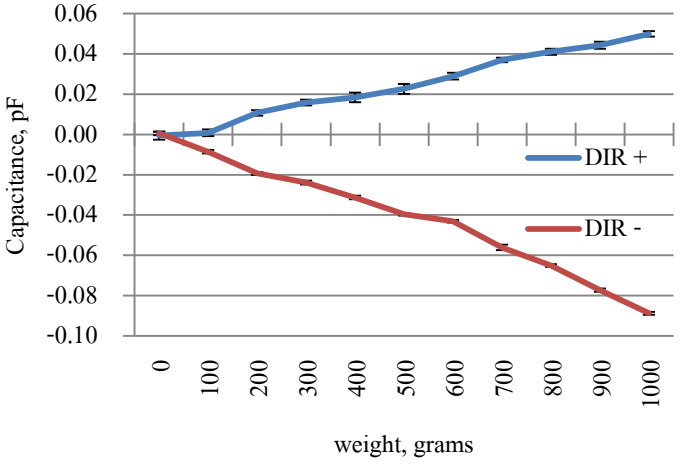
รูปที่ 4.15 ระบบทดสอบเซ็นเซอร์ และตำแหน่งติดตั้งน้ำหนัก

4.2.4 ผลการทดลองเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์เป็นไดอิเล็กตริกรูปแบบที่ 2

ผลการทดลองเซ็นเซอร์โดยใช้โพลีเอสเตอร์แสดงในรูปที่ 4.16 ในแกน X เมื่อได้รับแรงในทิศทางตามแนวแกน X+ ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.0553 พิโกฟารัด และทิศทางตามแนวแกน X- มีค่าความจุไฟฟ้าลดลง 0.0597 พิโกฟารัด ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (a) ในทิศทางตามแนวแกน Y+ ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 0.0505 พิโกฟารัด และทิศทางตามแนวแกน Y- ค่าความจุไฟฟ้าลดลง 0.0893 พิโกฟารัด ดังแสดงในรูปที่ 4.16 (b) ซึ่งผลต่างค่าความจุไฟฟ้าในแนวแกน X = 0.1150 และผลต่างค่าความจุไฟฟ้าในแนวแกน Y = 0.1398 พิโกฟารัด เมื่อเทียบกับการออกแบบควรมีค่า C_{Xdiff} = 0.7934, C_{Ydiff} = 1.2867 พิโกฟารัด ดังนั้นระดับค่าความจุไฟฟ้าดังกล่าวได้แสดงผลกระทบจากค่าความฝืดโดยน้ำหนักกดทับมีผลกับการเคลื่อนตัวของแผ่นเซ็นเซอร์ แต่น้ำหนักกดทับไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า ในขณะที่แผ่นเซ็นเซอร์ไม่เคลื่อนตัวโดยแรงเฉือน



(a)



(b)

รูปที่ 4.16 ค่าความจุไฟฟ้าที่ระดับแรงเฉือนต่างๆ

(a) ค่าความจุไฟฟ้าตำแหน่งแกน X

(b) ค่าความจุไฟฟ้าตำแหน่งแกน Y