



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีระบบ
กลไฟฟ้าจุลภาค

**Development of Capacitive Pressure Sensor using
Microelectromechanical Systems Technology**

โดย ดร.นิमित ชมนาวัง และคณะ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สิงหาคม 2556

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันชนิดเก็บประจุด้วยเทคโนโลยีระบบ
กลไฟฟ้าจุลภาค

Development of Capacitive Pressure Sensor using
Microelectromechanical Systems Technology

คณะผู้วิจัย

ดร.นิมิต ชมนาวัง

นายวัชรพล ภูมรา

สังกัด

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ดร.อดิสร เตื่อนตรานนท์

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ	ก
ABSTRACT	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญตาราง.....	ง
สารบัญรูป.....	จ
บทที่	

1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 การจัดรูปเล่ม.....	3

2 ปรีทรรสน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

2.1 ชนิดของตัวตรวจรู้ความดัน.....	5
2.1.1 ตัวตรวจรู้ความดันแบบของเหลว.....	6
2.1.2 ตัวตรวจรู้ความดันเชิงกล.....	7
2.1.3 ตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ.....	9
2.1.4 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	10
2.1.5 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำ.....	11
2.2 ตัวตรวจรู้ความดันตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน.....	12

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.3	ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	13
3	กระบวนการพื้นฐานในการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค.....	22
3.1	กระบวนการเคลือบโลหะ.....	22
3.1.1	กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering)	22
3.1.2	กระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Evaporation)	24
3.2	กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์.....	25
3.3	กระบวนการลิโธกราฟี.....	29
3.4	สรุป.....	31
4	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน.....	32
4.1	การออกแบบไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดัน.....	32
4.1.1	การทดสอบหาค่ามอดูลัสของยัง.....	34
4.1.2	การทดสอบการโก่งตัวเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบ หาค่ามอดูลัสของยังของไดอะแฟรม PDMS.....	36
4.1.3	การทดสอบการโก่งตัวเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบ หาค่ามอดูลัสของยังของไดอะแฟรม PI.....	37
4.1.4	การจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมในกรณีต่าง ๆ.....	39
4.2	การออกแบบโครงสร้างและการสร้างตัวเก็บประจุ.....	47
4.3	สรุป.....	54
5	การสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	55
5.1	การวาดลวดลายจุลภาค.....	55
5.2	กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นวัสดุฐาน.....	57
5.2.1	การเตรียมแผ่นฐานรองพอลิอิมิด์เคลือบโลหะ.....	58

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.2.2	การเคลือบสารไวแสงชนิดบวกลงบนฐานรองและการถ่ายทอดลงลาย ลงบนสารไวแสง	59
5.2.3	การสร้างวัสดุชุบรังสีเอกซ์โดยใช้โลหะเงินจากกระบวนการชุบโลหะ ด้วยไฟฟ้า.....	60
5.2.4	การล้างสารไวแสงและกัดโลหะไทเทเนียม/เงินชั้นฐานออก.....	63
5.3	กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นกราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน.....	65
5.3.1	การทำความสะอาดแผ่นกราฟไฟต์และการหมุนเคลือบสารไวแสง.....	66
5.3.2	การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากทึบแสงเพื่อถ่ายทอดลงลาย.....	67
5.3.3	กระบวนการชุบโลหะบนกราฟไฟต์.....	69
5.4	กระบวนการสร้างโครงสร้างสัณฐานสูงและกระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS.....	69
5.4.1	การเตรียมฐานกราฟไฟต์	71
5.4.2	การเตรียมสารไวแสง SU-8 บนฐานกราฟไฟต์.....	72
5.4.3	กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์.....	74
5.4.4	กระบวนการเคลือบโลหะ.....	76
5.4.5	กระบวนการขัดกราฟไฟต์ชั้นฐานทิ้ง.....	79
5.4.6	กระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS.....	84
5.5	กระบวนการติดตั้งตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม.....	87
5.5.1	การเตรียมช่องเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร.....	88
5.5.2	การติดฟิล์มบาง PDMS บนช่องเปิดวงกลม.....	88
5.5.3	การติดฟิล์ม PI บนช่องเปิดวงกลม.....	90
5.5.4	การติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรมและเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า.....	91
5.6	สรุป.....	95
6	การสอบเทียบและผลการทดสอบ.....	96
6.1	การทดสอบระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	96

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

6.2 การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและทดสอบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	100
6.3 การทดสอบผลของอุณหภูมิ.....	104
6.4 การสอบเทียบตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์.....	106
6.4.1 การทดสอบตัวตรวจรู้ไดอะแฟรม PDMS กับตัวตรวจรู้ MPX4250.....	106
6.4.2 การสอบเทียบตัวตรวจรู้ไดอะแฟรม PI กับตัวตรวจรู้ MPX5700.....	109
6.5 วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าและชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน.....	111
6.6 การทดสอบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	115
6.7 เสถียรภาพของตัวตรวจรู้ความดัน.....	117
6.8 ฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ความดัน.....	119
6.9 การทดสอบผลการตอบสนองทางเวลา.....	121
6.10 สรุปคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น.....	126
7 การประยุกต์ใช้งานตัวตรวจรู้ความดัน.....	129
7.1 การวัดความดันในยางรถจักรยานยนต์แบบไร้สายโดยใช้ตัวตรวจรู้ความดัน แบบตัวเก็บประจุ.....	129
7.1.1 การออกแบบชุดรับส่งข้อมูลไร้สายและการติดตั้งตัวตรวจรู้ความดันภายใน ยางรถจักรยานยนต์.....	130
7.1.2 การทดสอบและผลการทดสอบการส่งข้อมูล.....	138
7.2 สรุป.....	141
8 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	142
8.1 บทสรุปงานวิจัย.....	142
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	145
เอกสารอ้างอิง.....	146

บทคัดย่อ

ตัวตรวจรู้ความดันชนิดเก็บประจุได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคโดยใช้ไดอะแฟรมพอลิเมอร์ในการรับรู้ปริมาณความดันก๊าซ การเคลื่อนที่ของไดอะแฟรมพอลิเมอร์ถูกนำมาแปรค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแบบชี้หัวซึ่งมีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์เคลือบโลหะกำหนดรูปร่างด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี ตัวเก็บประจุดังกล่าวประกอบด้วยอิเล็กโทรดพอลิเมอร์เคลือบโลหะกว้างและหนา 500 μm มีช่องว่างอากาศกันระหว่างอิเล็กโทรด 60 μm ความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุสามารถเปลี่ยนค่าไปตามการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเมื่อโครงสร้างตัวเก็บประจุถูกดัดขึ้นบนแผ่นไดอะแฟรมพอลิเมอร์ที่ถูกขึงบนช่องรับความดันก๊าซรูปวงกลมซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000 μm เมื่อแผ่นไดอะแฟรมได้รับความดันก๊าซจะโก่งตัวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของความดันก๊าซ แผ่นพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นไดอะแฟรมมีสองชนิดคือ Polyimide (PI) ความหนา 25 μm ใช้ประกอบกับตัวเก็บประจุขึ้นเป็นตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I สำหรับย่านความดัน 0 – 500 kPa และ Polydimethylsiloxane (PDMS) ความหนา 120 μm ใช้ประกอบกับตัวเก็บประจุขึ้นเป็นตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S สำหรับย่านความดัน 0 – 100 kPa ตามลำดับ จากการทดสอบคุณสมบัติโดยใช้ตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์เป็นมาตรฐานพบว่า ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S มีการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้ามากที่สุด 38.23 % ความไวเฉลี่ยเท่ากับ 4.714 fF/kPa ค่าความผิดพลาดในการวัด ± 9 % ผลตอบสนองทางเวลาทั้งขาขึ้นและขาลง 1 วินาที ส่วนตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I มีการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้ามากที่สุด 3.94 % ความไวเฉลี่ยเท่ากับ 0.03343 fF/kPa ค่าความผิดพลาดในการวัด ± 7.4 % ผลตอบสนองทางเวลาช่วงขาขึ้น 7 วินาที ช่วงขาลง 27 วินาที ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่สร้างขึ้นได้ถูกนำไปทดสอบวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์และรายงานค่าความดันผ่านระบบรับส่งข้อมูลไร้สาย ระบบเครื่องมือวัดที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อน 8.27 % จากเต็มสเกล 100 kPa สามารถรายงานความดันภายในยางรถจักรยานยนต์ได้ในรัศมี 40 เมตร

ABSTRACT

Capacitive pressure sensors were designed and fabricated using microelectromechanical system technology. In this design, a polymeric diaphragm was used to transfer input gas pressure into mechanical displacement due to its deflection. Variable capacitors having 500 μm -wide and 500 μm -high interdigital electrodes were formed by x-ray lithography of SU-8 photoresist. The capacitor electrodes were coated with a conformal metal film by sputtering. Electrodes fingers were separated by 60 μm -wide air gap. When a capacitor structure was attached at the middle of a polymeric diaphragm its electrode spacing is variable with a corresponding input gas pressure resulting in a variable output capacitance. Two type of polymeric sheets were used as input pressure diaphragm. A 25 μm -thick Polyimide (PI) diaphragm coupling with a capacitor structure was used as an SUT-I pressure sensor for 0 – 500 kPa pressure range. Similarly, a 120 μm -thick Polydimethylsiloxane (PDMS) diaphragm coupling with a capacitor structure was used as an SUT-S pressure sensor for 0 – 100 kPa pressure range. Both sensors were calibrated using corresponding commercial pressure sensors as pressure standard. Characterizations showed that the SUT-S pressure sensor has a maximum capacitance change of 38.23 %, an average sensitivity of 4.714 fF/kPa, an accuracy of ± 9 %, rising and falling time response of 1 second. The SUT-I pressure sensor has a maximum capacitance change of 3.94 %, an average sensitivity of 0.03343 fF/kPa, an accuracy of ± 7.4 %, a rising time response of 7 seconds and a falling time response of 27 seconds. To demonstrate its application, the SUT-S pressure sensor along with wireless trasmitter were installed inside an inflated motor-cycle tire. The apparatus can measure the tire pressure with accuracy of 8.27% from 100 kPa full scale. The measurement results can be transmitted to the wireless receiver within a radius of 40 meters.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้ดำเนินการเสร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษาและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยอันเป็นจุดเริ่มต้นของโครงการนี้ ขอขอบคุณ ดร.อดิสร เตื่อนตรานนท์ แห่งศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ที่ให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือในการวิจัยและเก็บข้อมูลตลอดระยะเวลาที่ดำเนินงาน ขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ในการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณนายวัชรพล ภูมิรา นักศึกษาปริญญาโท และบุคลากรสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับความช่วยเหลือและการอำนวยความสะดวกในการวิจัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดและพื้นที่ของไดอะแฟรม.....	20
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PDMS ที่ความดันต่าง ๆ.....	36
ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่าง ๆ.....	38
ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระยะโก่งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง.....	39
ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองระยะโก่งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมเมื่อความยาวรัศมีต่างกัน.....	41
ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระยะโก่งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมเมื่อความหนา ไดอะแฟรมต่างกัน.....	43
ตารางที่ 4.6 ผลการจำลองค่าความจุไฟฟ้าที่ระยะห่าง x ต่าง ๆ.....	51
ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงความจุไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นความถี่จากการคำนวณด้วย สมการที่(6.1) เทียบกับเทียบกับการทดลองที่ความดันต่าง ๆ.....	116
ตารางที่ 6.2 ข้อมูลเฉพาะของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S.....	127
ตารางที่ 6.3 ข้อมูลเฉพาะของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I.....	128

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ความดันลักษณะต่างๆ.....	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของมาโนมิเตอร์.....	6
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของหลอดบัวร์ดองทั้ง 3 แบบ.....	8
รูปที่ 2.4 ตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ.....	9
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทั่วไปของตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	10
รูปที่ 2.6 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำ	11
รูปที่ 2.7 บารอมิเตอร์ของทอริเชลลิ.....	12
รูปที่ 2.8 ตัวตรวจรู้ความดันของ Sung-Pil Chang (2002)	14
รูปที่ 2.9 ตัวตรวจรู้ความดันแบบสัมผัสของ Satoshi (2003)	16
รูปที่ 2.10 ตัวตรวจรู้ความดันของ Min-Xin Zhu (2005)	17
รูปที่ 2.11 ตัวตรวจรู้ความดันของ Jithendra N.	17
รูปที่ 2.12 ตัวตรวจรู้ความดันของ Ezzat G (2010)	18
รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบคุณลักษณะที่พึงประสงค์ของตัวตรวจรู้ความดันจากงานวิจัยต่าง ๆ ด้วย ตัวชี้วัดคือ ความไวและขนาดของไดอะแฟรม.....	21
รูปที่ 3.1 เครื่องเคลื่อน โลหะแบบสปีดเตอริง.....	23
รูปที่ 3.2 วงจรและอุปกรณ์เครื่องเคลื่อน โลหะแบบระเหยโลหะในสุญญากาศ.....	24
รูปที่ 3.3 เครื่องเคลื่อน โลหะแบบระเหยโลหะในสุญญากาศ.....	25
รูปที่ 3.4 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์บนแผ่นพลาสติกใส.....	27
รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ ด้านขวาเป็นภาพขยายแสดงลายโครงสร้าง ของตัวเก็บประจุ.....	28
รูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์บนกราฟไฟต์.....	29
รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบกระบวนการสร้างลวดลายสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ.....	30

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 แบบจำลองโครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ.....	32
รูปที่ 4.2 ลักษณะการโค้งตัวของไดอะแฟรม.....	33
รูปที่ 4.3 การทดสอบวัดการโค้งตัวของไดอะแฟรมโดยใช้หลักการเชิงแสงด้วย เครื่อง WYKO NT1100.....	35
รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการโค้งตัวของไดอะแฟรม PDMS เพื่อคำนวณหาค่ามอดูลัสของยัง.....	37
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการโค้งตัวของไดอะแฟรม PI เพื่อคำนวณหาค่ามอดูลัสของยัง.....	38
รูปที่ 4.6 กราฟผลการจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรม PDMS ที่ความดันต่าง ๆ.....	40
รูปที่ 4.7 กราฟผลการจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่าง ๆ.....	40
รูปที่ 4.8 กราฟผลการจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรม PDMS ซึ่งมีรัศมีขนาดต่าง ๆ.....	42
รูปที่ 4.9 กราฟผลการจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรม PI ซึ่งมีรัศมีขนาดต่าง ๆ.....	42
รูปที่ 4.10 กราฟผลการจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรม PDMS ซึ่งมีความหนาต่าง ๆ.....	44
รูปที่ 4.11 กราฟผลการจำลองการโค้งตัวของไดอะแฟรม PI ซึ่งมีความหนาต่าง ๆ.....	44
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการโค้งตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม PDMS ที่ความดันต่าง ๆ.....	46
รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการโค้งตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่าง ๆ.....	46
รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุ.....	47
รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุ.....	48
รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะของตัวเก็บประจุสองตัวที่อยู่ตรงข้ามกัน.....	49
รูปที่ 4.17 ค่าความจุไฟฟ้าที่ระยะการเคลื่อนที่ต่าง ๆ.....	52
รูปที่ 4.18 ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความดันก๊าซของไดอะแฟรม PDMS.....	53
รูปที่ 4.19 ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความดันก๊าซของไดอะแฟรม PI.....	53
รูปที่ 5.1 แสดงแบบจำลองโครงสร้างสามมิติของตัวเก็บประจุ.....	55
รูปที่ 5.2 หน้าต่างโปรแกรม Layout editor สำหรับวาดลวดลายจุลภาค.....	56
รูปที่ 5.3 หน้ากากลวดลายที่บ่งแสงสำหรับกันแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	56
รูปที่ 5.4 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นวัสดุฐาน.....	57

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.5 แผ่นพอลิอิมิด์เคลือบโลหะสำหรับสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ขนาด 1.5 นิ้ว.....	58
รูปที่ 5.6 การเตรียมสารไวแสงและฟิล์มทึบแสงสำหรับสร้างลวดลายบนสารไวแสง.....	59
รูปที่ 5.7 การสร้างลวดลายบนสารไวแสงบนแผ่นใสเคลือบโลหะขนาด 1.5 นิ้ว.....	60
รูปที่ 5.8 วงจรและอุปกรณ์ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	61
รูปที่ 5.9 หน้ากากกันรังสีเอกซ์หลังจากชุบโลหะเงินหนา 20 ไมโครเมตร ลงบนฐานรอง แผ่นใสที่เคลือบด้วยไทเทเนียม 300 Å° และเงิน 500Å°	62
รูปที่ 5.10 หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ผ่านการชุบโลหะนิเกิลบนผิวของโลหะเงิน.....	62
รูปที่ 5.11 หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่เสร็จสมบูรณ์หลังจากการล้างสารไวแสงและ โลหะเงิน/ไทเทเนียมออกแล้ว.....	63
รูปที่ 5.12 ชิ้นงานที่เสียหายเนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นหลังจากการหมุนเคลือบสารไวแสง.....	64
รูปที่ 5.13 ชิ้นงานที่เสียหายเนื่องโลหะชั้นฐานหลุดจากพอลิอิมิด์ระหว่างกระบวนการชุบโลหะ....	64
รูปที่ 5.14 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้กราไฟต์เป็นวัสดุฐาน.....	65
รูปที่ 5.15 แผ่นกราไฟต์ที่ทำความสะอาดแล้วพร้อมเคลือบสารไวแสง.....	66
รูปที่ 5.16 แผ่นกราไฟต์ที่ผ่านการหมุนเคลือบสารไวแสง SU8-3025.....	67
รูปที่ 5.17 ฟิล์มทึบแสงที่ใช้สำหรับถ่ายทอดลวดลายลงบนสารไวแสงชนิดลบ.....	68
รูปที่ 5.18 สารไวแสงหลังจากการฉายแสง อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงออก.....	68
รูปที่ 5.19 หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ชุบโลหะเสร็จสมบูรณ์พร้อมใช้งาน.....	69
รูปที่ 5.20 กระบวนการสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุ.....	70
รูปที่ 5.21 แผ่นกราไฟต์ที่ผ่านการอบและรีดเรียบด้วยเครื่องรีดร้อน.....	71
รูปที่ 5.22 กราไฟต์ที่ติดกับกระจกด้วยเทป PI ซึ่งจะได้อานกราไฟต์ที่พร้อมใช้งานใน กระบวนการต่อไป.....	72
รูปที่ 5.23 การหยดสารไวแสงบนฐานกราไฟต์ที่วางอยู่บนแผ่นความร้อน.....	73

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.24 การวัดความหนาสารไวแสงที่ผ่านการขัดเพื่อให้ได้ความหนาประมาณ 500 ไมโครเมตร.....	73
รูปที่ 5.25 ชิ้นงานหลังจากการฉายแสงเอกซเรย์ผ่านการอบหลังฉายแสง.....	75
รูปที่ 5.26 ชิ้นงานที่ผ่านการล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงออกไป.....	75
รูปที่ 5.27 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)	76
รูปที่ 5.28 แสงพลาสมาจากกระบวนการสปัตเตอริง.....	77
รูปที่ 5.29 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหมุนชิ้นงานในเครื่องสปัตเตอริง.....	78
รูปที่ 5.30 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบโลหะด้วยกระบวนการสปัตเตอริงแบบหมุน.....	78
รูปที่ 5.31 การเทสารไวแสงลงบนชิ้นงานเพื่อให้โครงสร้างทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน.....	79
รูปที่ 5.32 फिल्मที่บดสำหรับฉายแสงอัลตราไวโอเลตเพื่อยึดโครงสร้าง.....	80
รูปที่ 5.33 การติดชิ้นงานบนแผ่นใสเพื่อใช้เป็นฐานชั่วคราว.....	81
รูปที่ 5.34 ชิ้นงานที่ผ่านการขัดกราไฟต์ออกไป.....	81
รูปที่ 5.35 ชิ้นงานที่หลุดออกมาในน้ำยาล้างสารไวแสง SU8-Developer.....	82
รูปที่ 5.36 โครงสร้างตัวเก็บประจุที่เสร็จสมบูรณ์.....	82
รูปที่ 5.37 ภาพ SEM ของโครงสร้างตัวเก็บประจุที่เสร็จสมบูรณ์.....	83
รูปที่ 5.38 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS.....	85
รูปที่ 5.39 การสร้างขอบสารไวแสง Dryfilm.....	86
รูปที่ 5.40 การกดอัด PDMS และวางบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส.....	87
รูปที่ 5.41 PDMS ฟิล์มบางที่ได้จากการกดอัดและผ่านการทำความสะอาดพร้อมใช้งาน.....	87
รูปที่ 5.42 แผ่นอะคริลิกใสที่เจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตรสำหรับติดไดอะแฟรม.....	88
รูปที่ 5.43 แผ่นอะคริลิกใสที่ผ่านการพันทราย.....	89
รูปที่ 5.44 การติดฟิล์มบาง PDMS ช่องเปิดขนาด 1 มิลลิเมตรเพื่อใช้เป็นไดอะแฟรม.....	89
รูปที่ 5.45 แผ่น PI ที่พันทรายบริเวณผิว.....	90
รูปที่ 5.46 การติดฟิล์ม PI ช่องเปิดขนาด 1 มิลลิเมตรเพื่อใช้เป็นไดอะแฟรม.....	90
รูปที่ 5.47 การติดกาวอีพอกซีบนไดอะแฟรมเพื่อเชื่อมกับโครงสร้างตัวเก็บประจุ.....	91

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.48 การติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม.....	92
รูปที่ 5.49 การเชื่อมต่อสายสายเข้ากับขั้วของตัวเก็บประจุ.....	93
รูปที่ 5.50 การเชื่อมต่อต่อความดันเข้ากับตัวตรวจรู้ความดันด้วยกามอีพอกซี่.....	94
รูปที่ 5.51 ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว.....	94
รูปที่ 6.1 ลักษณะการโค้งตัวของไดอะแฟรมแบบ point contact และแบบ large contact.....	97
รูปที่ 6.2 ไดอะแกรมการทดสอบวัฏระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่ติดตั้ง ตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม.....	98
รูปที่ 6.3 ภาพขณะทำการทดสอบการวัฏระยะการเคลื่อนที่ของตัวเก็บประจุ.....	98
รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบการวัฏระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรม PDMS เทียบกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	99
รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบการวัฏระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรม PI เทียบกับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	99
รูปที่ 6.6 ชุดทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง Precision LCR Meter.....	101
รูปที่ 6.7 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับความดันที่ความถี่ต่างกันของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่อุณหภูมิห้อง (30 ° C)	101
รูปที่ 6.8 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับความดันที่ความถี่ต่างกันของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ที่อุณหภูมิห้อง (30 ° C).....	102
รูปที่ 6.9 ขนาดการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ความดันต่างๆ เปรียบเทียบการใช้ความถี่ทดสอบของ LCR meter ในช่วง 10 kHz – 1MHz ซึ่งได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน.....	103
รูปที่ 6.10 ขนาดการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ที่ความดันต่างๆ เปรียบเทียบการใช้ความถี่ทดสอบของ LCR meter ในช่วง 10 kHz – 1MHz ซึ่งได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน.....	103
รูปที่ 6.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ความดันต่างๆด้วยเครื่อง LCR meter ที่ความถี่ 100 kHz.....	105

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.12 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ที่ความดันต่าง ๆ ด้วยเครื่อง LCR meter ที่ความถี่ 100 kHz.....	105
รูปที่ 6.13 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เตาอบควบคุมอุณหภูมิ.....	106
รูปที่ 6.14 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่าง ๆ.....	107
รูปที่ 6.15 ค่าความดันที่ได้จากสมการปรับเทียบและค่าความดันจริงเพื่อใช้หาความผิดพลาดของ ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S.....	108
รูปที่ 6.16 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน และค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เตาอบควบคุมอุณหภูมิ.....	109
รูปที่ 6.17 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่าง ๆ.....	110
รูปที่ 6.18 ค่าความดันที่ได้จากสมการปรับเทียบและค่าความดันจริงเพื่อใช้หาความผิดพลาด ของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I.....	111
รูปที่ 6.19 การติดตั้งวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า.....	113
รูปที่ 6.20 แผนผังชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน.....	114
รูปที่ 6.21 ภาพถ่ายของชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน.....	115
รูปที่ 6.22 ผลการทดสอบวงจรแปลงความจุไฟฟ้าเป็นความถี่จากการคำนวณเทียบ กับการทดลองที่ความดันต่าง ๆ.....	117
รูปที่ 6.23 กราฟค่าความจุไฟฟ้าที่ความดัน 80 kPa ของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S.....	118
รูปที่ 6.24 กราฟค่าความจุไฟฟ้าที่ความดัน 360 kPa ของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I.....	119
รูปที่ 6.25 ผลการทดสอบฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S.....	119

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 6.26 ผลการทดสอบฮิสเตอร์รีซีซของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I.....	120
รูปที่ 6.27 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดของตัวตรวจรู้ความดันSUT-S.....	121
รูปที่ 6.28 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาขึ้นของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S	122
รูปที่ 6.29 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาลงของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S.....	122
รูปที่ 6.30 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I.....	123
รูปที่ 6.31 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาขึ้นของตัวตรวจรู้ SUT-I.....	124
รูปที่ 6.32 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาลงของตัวตรวจรู้ SUT-I.....	124
รูปที่ 6.33 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบลาดเอียงของตัวตรวจรู้ SUT-S.....	125
รูปที่ 6.34 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบลาดเอียงของตัวตรวจรู้ SUT-I.....	126
รูปที่ 7.1 ตัวตรวจรู้ความดันในยางรถยนต์แบบไร้สาย.....	129
รูปที่ 7.2 โมดูลรับ-ส่งสัญญาณไร้สาย nRF24L01.....	130
รูปที่ 7.3 โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความดันสำหรับวัดความดันยางรถยนต์.....	131
รูปที่ 7.4 ตัวตรวจรู้ความดันที่ใช้วัดความดันในยางรถจักรยานยนต์.....	132
รูปที่ 7.5 แผนผังอุปกรณ์สำหรับอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ความดันและส่งข้อมูล.....	135
รูปที่ 7.6 แผนผังอุปกรณ์สำหรับรับข้อมูล ประมวลผลข้อมูลและแสดงผล.....	135
รูปที่ 7.7 ชุดอุปกรณ์สำหรับอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ความดันและส่งข้อมูล.....	136
รูปที่ 7.8 ชุดอุปกรณ์สำหรับรับข้อมูล ประมวลผลข้อมูลและแสดงผล.....	136
รูปที่ 7.9 การใส่ชุดอุปกรณ์เข้าไปในยางรถจักรยานยนต์ก่อนประกอบเข้ากับยางชั้นนอก.....	137
รูปที่ 7.10 การปะยางบริเวณที่ถูกตัด.....	137
รูปที่ 7.11 ภาพการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ติดตั้งภายในยางรถจักรยานยนต์ โดยส่งข้อมูลไร้สายจากชุดส่งสัญญาณภายในยาง.....	138

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 7.12 ภาพการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S และ MPX5700 ที่ติดตั้งภายในยาง รถจักรยานยนต์โดยส่งข้อมูลไร้สายจากชุดส่งสัญญาณภายในยางและแสดงผล ผ่านจอ LCD ของชุดรับสัญญาณ.....	139
รูปที่ 7.13 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ความดันต่าง ๆ โดยใช้ MPX5700 เป็นมาตรฐานความดัน	139
รูปที่ 7.14 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่อยู่ภายในยางรถจักรยานยนต์ ในช่วงเวลา 600 วินาที	140
รูปที่ 8.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะที่พึงประสงค์ของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S และ SUT-I กับงานวิจัยอื่น ๆ ด้วยตัวชี้วัดคือ ความไวและขนาดของไดอะแฟรม.....	143

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างตัวตรวจรู้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วซึ่งเมื่อเทียบกับในอดีตที่มีการคิดค้นสร้างตัวตรวจรู้ต่างๆขึ้นมาเพื่อใช้ตรวจวัดในด้านต่างๆเช่น อุตสาหกรรมการแพทย์ การเกษตร เครื่องมือวัดต่าง ๆ งานวิจัย เป็นต้น ซึ่งการสร้างตัวตรวจรู้ในอดีตมีความแม่นยำไม่มากนัก เนื่องจากเริ่มต้นหลักการง่าย ๆ ที่สามารถสร้างได้ด้วยเทคโนโลยีในสมัยนั้น และมีการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้นและมีความแม่นยำมากขึ้น ในปัจจุบันการสร้างตัวตรวจรู้ต่างๆ มีความถูกต้องแม่นยำค่อนข้างสูง เนื่องจากเทคโนโลยีก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วสามารถผลิตชิ้นส่วนทางกลและชิ้นส่วนทางไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กและมีความแม่นยำสูง จึงสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวในการสร้างตัวตรวจรู้ที่มีขนาดเล็ก ความถูกต้องแม่นยำสูง และมีการรวมเอาวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า วงจรรวม (Integrated Circuit : IC) บรรจุเข้าไปในตัวทำหน้าที่แปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า สามารถอ่านค่าได้ด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือคอมพิวเตอร์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หรือแสดงผลต่อไป จะเห็นได้ว่าตัวตรวจรู้ในปัจจุบันถูกผลิตขึ้นมาให้ใช้งานง่าย มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง แต่เนื่องจากการสร้างจะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง เช่น เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เป็นต้น ซึ่งในกระบวนการบางอย่างในการผลิตมีต้นทุนในการผลิตค่อนข้างสูง จึงทำให้ตัวตรวจรู้ปริมาณทางกายภาพในปัจจุบันมีราคาสูง

การพัฒนาตัวตรวจรู้ให้มีต้นทุนการผลิตต่ำลงต้องมีการออกแบบโครงสร้าง การเลือกใช้วัสดุ และการวางแผนออกแบบการผลิตที่ดีเพื่อลดขั้นตอนการผลิตลงให้น้อยที่สุด ซึ่งเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเป็นอีกทางเลือก ที่สามารถผลิตชิ้นส่วนขนาดเล็กและมีความแม่นยำสูง โดยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนี้พัฒนามาจากเทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม โดยในปัจจุบันมีความต้องการผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ขนาดเล็ก มีประสิทธิภาพสูง และราคาถูก ส่งผลให้เทคโนโลยีดังกล่าวนี้ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น ในการนำไปใช้งานในเครื่องมือวัด และความคุม ปัจจุบันเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวตรวจรู้ เช่น ตัวตรวจรู้อุณหภูมิ ความชื้น ความดัน ความเร่ง ตรวจวัดอัตราการไหลของก๊าซ ตรวจวัดอนุภาค เป็นต้น และ

การสร้างตัวขับเคลื่อน (actuator) ชนิดต่างๆ เช่น ไมโครมอเตอร์ (Micromotor) ไมโครสวิตช์ (Microswitch) ไมโครปั๊ม (Micropump) ไมโครวาล์ว (Microvalve) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการสร้างตัวตรวจวัดความดันก๊าซ ซึ่งมีการใช้งานค่อนข้างมากในทางอุตสาหกรรม ทางการแพทย์ ตัวตรวจวัดความดันของลมยางเพื่อลดอุบัติเหตุบนท้องถนน เป็นต้น โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันอากาศหรือความดันก๊าซ ลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ของตัวตรวจวัดความดันก๊าซ จะมีไดอะแฟรมเป็นตัววัดปริมาณอินพุต โดยทั่วไปไดอะแฟรมจะถูกสร้างด้วยซิลิคอน และยังมีการใช้โลหะ พอลิเมอร์ และเซรามิก เพื่อความแข็งแรงและเหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับตัวตรวจวัดในงานวิจัยนี้เป็นแบบเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งลักษณะของตัวตรวจวัดความดันนี้ คือ มีตัวเก็บประจุติดอยู่บนแผ่นไดอะแฟรม เมื่อป้อนความดันเข้าไดอะแฟรมจะเกิดการโก่งตัวทำให้ระยะช่องอากาศของตัวเก็บประจุที่ติดอยู่บนไดอะแฟรมเปลี่ยนไป เป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในส่วนของการออกแบบ จะทำการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรม ที่ใช้วัสดุสองชนิดคือ Polydimethylsiloxane (PDMS) และ Polyimide (PI) แล้วนำผลที่ได้จากการจำลองการโก่งตัวมาทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างที่ออกแบบโดยใช้กระบวนการเอกซเรย์ลิโทกราฟี การอ่านค่าจากตัวตรวจวัดความดันแบบตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้นจะใช้วงจรเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการวัดค่าความถี่และคำนวณค่าความดันจากความถี่ที่อ่านได้จากสมการการปรับเทียบ ตัวตรวจวัดความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS จะออกแบบให้ตรวจวัดความดันได้ในช่วง 0 – 100 kPa ส่วนตัวตรวจวัดความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI จะออกแบบให้ตรวจวัดความดันในช่วง 0 – 500 kPa และตัวตรวจวัดที่สร้างขึ้นจาก PDMS ได้ถูกนำไปทดสอบวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์ โดยมีการรายงานค่าความดันผ่านระบบรับส่งข้อมูลไร้สาย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- สร้างตัวตรวจวัดความดันที่ใช้ PI และ PDMS เป็นแผ่นรับรู้ปริมาณอินพุต
- ออกแบบและสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุที่เป็นพอลิเมอร์เคลือบโลหะสร้างด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโทกราฟี
- ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่เป็นผลมาจากความดัน

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- สร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ PI และ PDMS เป็นแผ่นรับรู้ปริมาณอินพุต
- ทดสอบตัวตรวจรู้ความดันในช่วง 0 - 100 kPa สำหรับไดอะแฟรมที่เป็น PDMS และ 0 - 500 kPa สำหรับไดอะแฟรมที่เป็น PI

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- สร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุใช้ PI และ PDMS เป็นแผ่นรับรู้ปริมาณอินพุตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm
- สร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุที่เป็นพอลิเมอร์เคลือบโลหะด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโทกราฟี
- เปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้ความดันมาตรฐานเชิงพาณิชย์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโทกราฟี
- พัฒนาองค์ความรู้ในการสร้างชิ้นงานจำนวนมากด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโทกราฟี

1.6 การจัดรูปเล่ม

รายงานฉบับสมบูรณ์นี้ประกอบด้วย 7 บทได้แก่ บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์งานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง บทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการพื้นฐานในการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน เช่น กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ กระบวนการเอกซเรย์ลิโทกราฟี กระบวนการเคลือบโลหะ บทที่ 4 กล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวตรวจรู้ความดันซึ่งจะมีส่วนของการออกแบบไดอะแฟรมและการออกแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุรวมไปถึงการจำลองผลการออกแบบด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ บทที่ 5 กล่าวถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโทกราฟี บทที่ 6 กล่าวถึง การทดสอบคุณลักษณะสมบัติของตัวตรวจรู้ความดัน การสร้างชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดันและผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน บทที่ 7 เป็นการประยุกต์ใช้งานตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น บทที่ 8 เป็นบทสรุปงานวิจัย ข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปริมาตรนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความดัน (Pressure, p) เป็นปริมาณชนิดหนึ่งทางฟิสิกส์ หมายถึงแรงที่กระทำตั้งฉากซึ่งกระทำโดยของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของสารใด ๆ (ของแข็ง ของเหลว หรือ ก๊าซ) ความดันเป็นปริมาณสเกลาร์ ซึ่งเป็นปริมาณที่มีแต่ขนาด ไม่มีทิศทาง จากความหมายของความดันข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์โดยทั่วไปได้ดังนี้

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

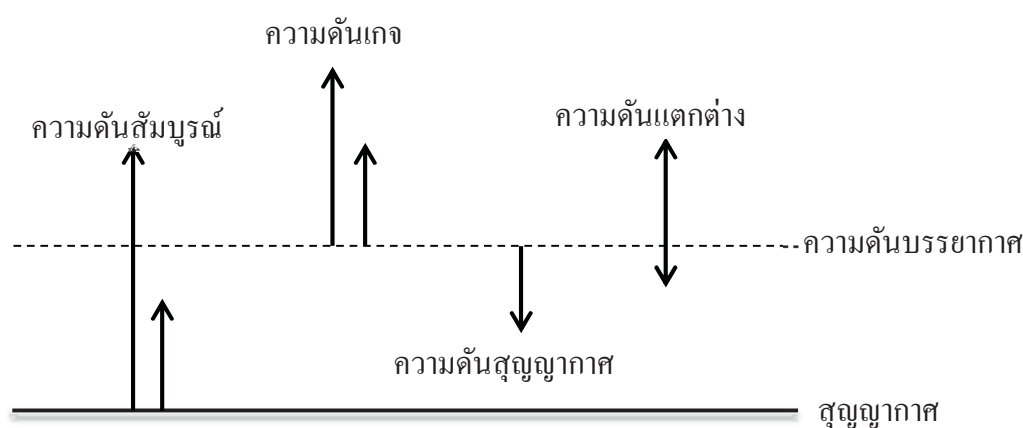
โดยที่ p คือ ความดัน (Pressure)

F คือ แรงที่กระทำตั้งฉากกับพื้นผิวนั้นๆ

A คือ พื้นที่

เนื่องจาก F มีหน่วยเป็นนิวตัน (N) และ A มีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2) ดังนั้นความดันจึงมีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2 ; เขียนในรูปหน่วยฐาน $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$) ต่อมา มีการกำหนดหน่วยของความดันขึ้นใหม่ เรียกว่า ปาสคาล (Pascal, Pa) และกำหนดให้เป็นหน่วยเอสไอ (SI) ของความดัน โดยที่ 1 ปาสคาล มีค่าเท่ากับ 1 นิวตันต่อตารางเมตร นอกจากหน่วยปาสคาลแล้ว ยังมีหน่วยอื่นๆ เช่น บาร์ (bar), บรรยากาศ (atm), ทอร์ (Torr), ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) เป็นต้น ความดันเป็นตัวแปรที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับระบบอุตสาหกรรม ในการวัดและควบคุมค่าความดันสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือที่เป็นอุปกรณ์ตัวตรวจรู้ความดันโดยโครงสร้างพื้นฐานทางกายภาพของอุปกรณ์แต่ละตัว จะพิจารณาจากการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลักๆ ที่สำคัญคือ ขบวนการวัดความดัน รูปแบบหรือชนิดของความดัน และตัวกลางที่ทำให้เกิดค่าความดันที่เกิดจากของเหลว ก๊าซ อากาศ เป็นต้น อีกทั้งยังต้องพิจารณาให้ลึกลงถึงลักษณะชนิดของของเหลว และชนิดของก๊าซ โดยชนิดของความดันสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด คือ ความดันแบบเกจ (Gauge pressure) จุดเริ่มต้นของความดันเกจอยู่ที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) ซึ่งเทียบกับระดับความสูงของน้ำทะเล โดยความดันเกจจะสูงขึ้นไปจากความดันบรรยากาศ ซึ่งตัวตรวจรู้ความดันแบบเกจจะอ่านค่าได้เท่ากับศูนย์ที่ความดันบรรยากาศ ความดันแบบสุญญากาศ (Vacuum pressure) จุดเริ่มต้นของการวัดความดันมีจุดเดียวกับการวัดความดัน

แบบความดันเกจ คือเริ่มที่ระดับน้ำทะเลหรือที่ความดันบรรยากาศ ความดันสัมบูรณ์ (Absolute pressure) เป็นการวัดเทียบกับความดันที่มีค่าเท่ากับศูนย์ (Vacuum) ความดันบรรยากาศมีค่า 101.325 kPa หรือ 14.7 psi ที่ระดับความสูงระดับน้ำทะเลซึ่งเทียบกับความดันมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งความดันสัมบูรณ์คือค่าความดันจริงทั้งหมด ของการรวมค่าความดันเกจและค่าความดันบรรยากาศ และความดันแบบแตกต่าง (Differential pressure) การวัดความดันแบบแตกต่างนี้จะใช้การอ่านค่าผลต่างความดัน 2 ค่า ความดันทั้ง 4 ชนิด ที่กล่าวมาข้างต้น มีลักษณะดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความดันลักษณะต่างๆ

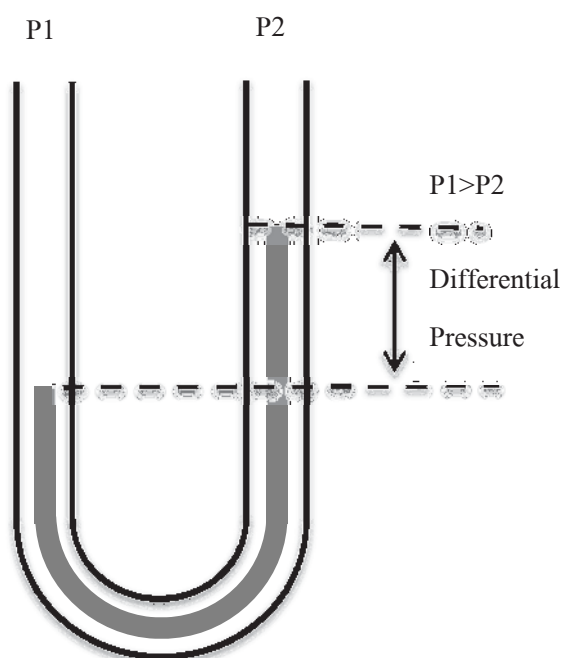
2.1 ชนิดของตัวตรวจรู้ความดัน

ตัวตรวจรู้ หรือ เซนเซอร์ (Sensor) คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดปริมาณทางฟิสิกส์ เช่น อุณหภูมิ ความดัน แสง เสียง ความเร็ว ความเร่ง อัตราการไหล เป็นต้น จากนั้นเปลี่ยนสัญญาณที่วัดได้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเพื่อให้สามารถนำไปประมวลผลได้ ในการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ที่ใช้ตรวจวัดปริมาณต่างๆ จะถูกออกแบบให้เหมาะกับการใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน เพื่อให้ใช้งานได้ตรงตามความต้องการ เช่น การออกแบบใช้บรรจุภัณฑ์มีความแข็งแรงเพื่อให้เหมาะกับการใช้งานด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น ในส่วนของตัวตรวจรู้ความดันก็เช่นเดียวกัน ในอดีตจนถึงปัจจุบันมีการออกแบบและพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันแบบต่างๆขึ้นมาใช้งาน ซึ่งแต่ละแบบก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ตัวตรวจรู้ความดันแบบของเหลว

ตัวตรวจรู้ความดันแบบของเหลว เป็นตัวตรวจรู้ความดันชนิดแรกๆ ที่มนุษย์คิดค้นขึ้น โดยตัวตรวจรู้ความดันถูกสร้างขึ้นครั้งแรกโดย Evangelista Torricelli (1644)) โดยได้นำหลอดขนาด 1 เมตร ที่ปลายด้านหนึ่งถูกปิดผนึกอย่างแน่นหนา โดยนำหลอดนี้จุ่มลงในอ่างปรอทในแนวตั้งทำให้ระดับของปรอทที่อยู่ในหลอดเท่ากับ 760 มิลลิเมตร และมีที่ว่างด้านบนเป็นสุญญากาศ ซึ่งตัวตรวจรู้ความดันแบบปรอทนี้สามารถใช้ตรวจวัดความดันบรรยากาศได้ ต่อมาได้มีการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันที่ใช้ของเหลวโดยใช้หลักการสมดุลแรงโน้มถ่วง (Gravity Balance) เรียกว่า มาโนมิเตอร์ (Manometer) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดความดันได้โดยตรง มีลักษณะดังรูปที่

2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของมาโนมิเตอร์

มาโนมิเตอร์จะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยหลอดแก้วรูปตัว U โดยมีสเกลบอกตำแหน่งในหน่วยนิ้วหรือมิลลิเมตร บนสเกลศูนย์จะอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางและที่ปลายทั้งสองด้านของหลอดแก้วจะเปิดสู่บรรยากาศภายนอก ระดับของของเหลวซึ่งส่วนมากใช้ป็นน้ำหรือปรอท จะอยู่ที่ตำแหน่งศูนย์ทั้งสองด้าน เมื่อมีความดันมากระทบด้านใดด้านหนึ่งของมาโนมิเตอร์ของเหลวที่อยู่ภายในจะถูกกดลงส่งผลให้ของเหลวอีกด้านเพิ่มขึ้น ของเหลวจะหยุดเมื่อแรงที่เกิดจากความดันแตกต่างสมดุลกับแรงที่เกิดจากน้ำหนักของของเหลวในหลอดแก้ว การวัดความแตกต่างระหว่าง

ความสูงของของเหลวในหลอดแก้วทั้งสองด้าน นั่นคือค่าความดันในหน่วยนิ้วหรือมิลลิเมตรของของเหลว นั่นเอง

ข้อดีของตัวตรวจรู้ความดันแบบของเหลวคือสามารถวัดความดันในย่านต่ำๆ ได้ดี และสามารถวัดความดันสุญญากาศได้ดี ให้ความถูกต้องและมีความไวในการวัดสูงเนื่องจากเป็นการวัดโดยตรง มีโครงสร้างที่ง่ายที่สุด และมีราคาถูก แต่มีข้อเสียคือ สามารถวัดความดันในย่านต่ำเท่านั้น และต้องมีการปรับระดับก่อนการใช้งานทุกครั้ง และไม่มีอุปกรณ์ป้องกันเมื่อเกิดแรงดันเกิน

2.1.2 ตัวตรวจรู้ความดันเชิงกล

ตัวตรวจรู้ความดันเชิงกล เป็นตัวตรวจรู้ความดันชนิดแรกๆ ที่มีการนำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ซึ่งมีหลักการทำงานง่ายๆ คือ อาศัยการเปลี่ยนแปลงทางกลเช่น การโก่ง งอ ของวัสดุ เมื่อมีแรงกระทำซึ่งก็คือความดันนั่นเอง ตัวตรวจรู้ความดันเชิงกลที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปจะเป็นแบบ หลอดบูร์ดอง (Bourdon tube) และแบบเบลโลว์ (Bellow)

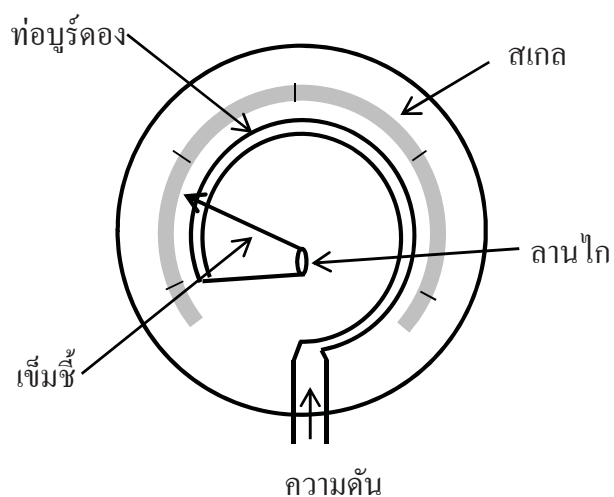
หลอดบูร์ดอง ถูกคิดค้นขึ้น โดย Eugene Bourdon วิศวกรชาวฝรั่งเศส และถูกปรับปรุงขึ้นในปี ค.ศ.1848 บูร์ดองเป็นอุปกรณ์วัดความดันที่นิยมใช้กันมากที่สุดในงานอุตสาหกรรมประมาณ 95 % ของเกจวัดความดันทั้งหมด เนื่องจากเป็นแบบที่มีโครงสร้างที่ง่าย ราคาถูก สามารถวัดความดันในย่านสูงๆ ได้ และสามารถวัดสุญญากาศได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถออกแบบให้ใช้งานร่วมกับทรานสดิวเซอร์อื่นๆ ได้ บูร์ดองที่ใช้กันทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ บูร์ดองรูปตัว C บูร์ดองรูปก้นหอย (Spiral Bourdon tube) และบูร์ดองแบบขดซ้อน (Helical Bourdon tube)

บูร์ดองรูปตัว C จะมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นส่วนโค้งของวงกลมประมาณ 270 องศา ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้จะคล้ายกับตัว C เมื่อป้อนความดันเข้าไปในท่อโลหะ จะเกิดการยืดตัวของท่อโลหะ การยืดตัวของท่อโลหะจะมีค่าประมาณ 2 – 7 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าค่อนข้างน้อย จึงจำเป็นต้องมีการขยายระยะทางการเคลื่อนที่เพื่อนำไปแสดงผลที่สามารถสังเกตได้ง่าย การขยายระยะการเคลื่อนที่ดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้ชุดเฟืองขยาย โครงสร้างของหลอดบูร์ดองมีลักษณะดังรูปที่ 2.3(ก)

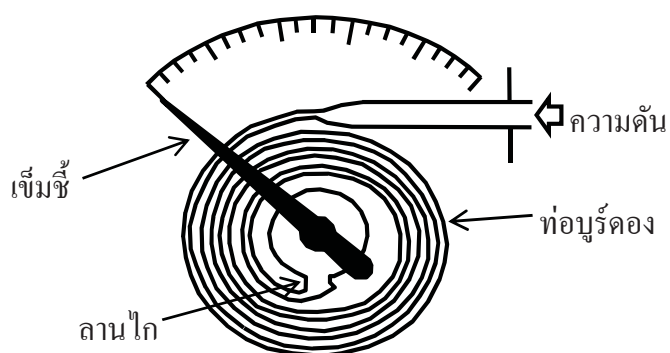
บูร์ดองรูปก้นหอย (Spiral Bourdon tube) บูร์ดองชนิดนี้ จะมีลักษณะคล้ายบูร์ดองรูปตัว C แต่จะถูกขดเป็นรูปก้นหอย ดังรูปที่ 2.3(ข) หลักการทำงานก็คล้ายกับบูร์ดองรูปตัว C เช่นกัน แต่บูร์ดองรูปก้นหอย จะคลายตัวเมื่อป้อนความดันและก้นหอยจะยืดตัวมากกว่าจึงไม่จำเป็นต้องมีชุดเฟืองขยาย มีความเที่ยงตรงมากกว่าบูร์ดองรูปตัว C

บูร์ดองแบบขดซ้อน (Helical Bourdon tube) มีลักษณะคล้ายแบบก้นหอย แต่การขดจะมีรัศมีเท่ากันและขดซ้อนเป็นวงหลาย ๆ วง ซึ่งทำให้บูร์ดองแบบขดซ้อนมีระยะการเคลื่อนที่มากที่สุด ส่วนของเข็มชี้หรือทรานสดิวเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ จะติดอยู่กับปลายของชิ้นส่วนที่ต่อ

ร่วมกับปลายของด้านที่ปิด ดังรูปที่ 2.3(ค) บุรุดองชนิดนี้สามารถทนต่อความดันเกินพิกัดได้ดีกว่า ทั้งสองแบบที่กล่าวมา มีเสถียรภาพในการใช้งาน ทดต่อการเปลี่ยนแปลงความดันอย่างรวดเร็วได้ดี



(ก)



(ข)



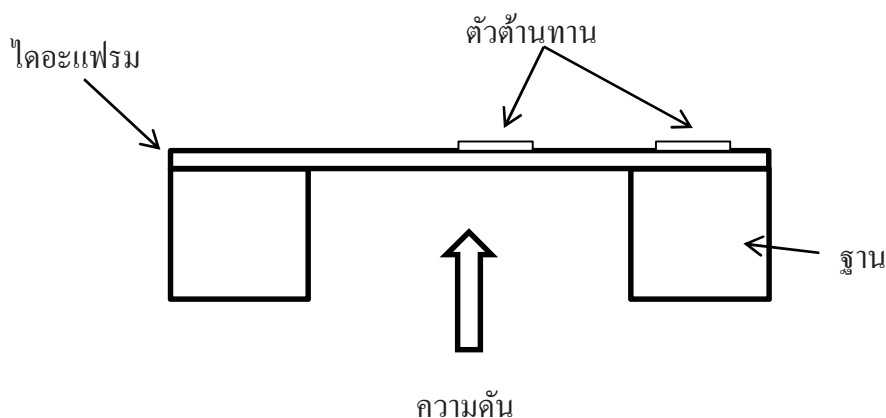
(ค)

รูปที่ 2.3 โครงสร้างของหลอดบุรุดองทั้ง 3 แบบ

ข้อดีของตัวตรวจรู้ความดันแบบหลอดบูร์ดอง คือ มีโครงสร้างที่ง่าย มีราคาถูก สามารถออกแบบให้ใช้งานได้ทุกย่านของการใช้งาน สามารถออกแบบให้เข้ากับทรานสดิวเซอร์ชนิดต่างๆ ได้ ทั้ง นิวเมติกส์ ไฮดรอลิกส์ และอิเล็กทรอนิกส์ มีข้อเสียคือ มีฮิสเตอรีซิส หรือค่าความผิดพลาดภายในตัวเองค่อนข้างสูง ที่ความดันน้อยกว่า 1 bar หรือ 15 psi ไม่ค่อยนิยมใช้เนื่องจากแรงดันที่มาจากท่อโลหะมีผลต่อความแม่นยำในการวัด และไม่สามารถใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการสั่นสะเทือนได้

2.1.3 ตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ

ตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ จะอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะเมื่อโลหะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือรูปร่าง ตัวตรวจรู้ความดันแบบนี้จะมีส่วนประกอบหลักๆ อยู่สองส่วนคือ ไดอะแฟรม และตัวต้านทานสเตรนเกจ ไดอะแฟรมที่เป็นตัวตรวจรู้ความดันส่วนใหญ่จะใช้วัสดุที่เป็นซิลิคอนเนื่องจากคุณสมบัติในการยืดหยุ่นที่ดี มีค่าความผิดพลาดในตัวหรือ ฮิสเตอรีซิส น้อยมาก และมีตัวต้านทานสเตรนเกจติดอยู่ด้านบนไดอะแฟรมดังรูปที่ 2.4 เมื่อไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัว ตัวต้านทานสเตรนเกจก็จะเกิดการยืดตัวทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไป ตัวต้านทานสเตรนเกจจะสร้างขึ้นด้วยฟิล์มโลหะบาง ออกแบบให้มีโครงสร้างของวงจรตัวต้านทานภายในเป็นแบบ Wheatstone bridge ซึ่งจะให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบความต่างของแรงดัน ความต่างของแรงดันที่ออกมาจะอยู่ในระดับมิลลิโวลต์ และผ่านวงจรปรับแต่งและขยายสัญญาณเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันมากเพียงพอต่อการใช้งาน ตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ มีข้อดีคือ ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความดันได้ดี มีความไวสูง ค่าความผิดพลาดในตัวหรือ ความผิดพลาดฮิสเตอรีซิสต่ำ และมีข้อเสียคือ ตัวต้านทานมีสัญญาณรบกวนได้ง่าย และอุณหภูมิมีผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของตัวต้านทาน

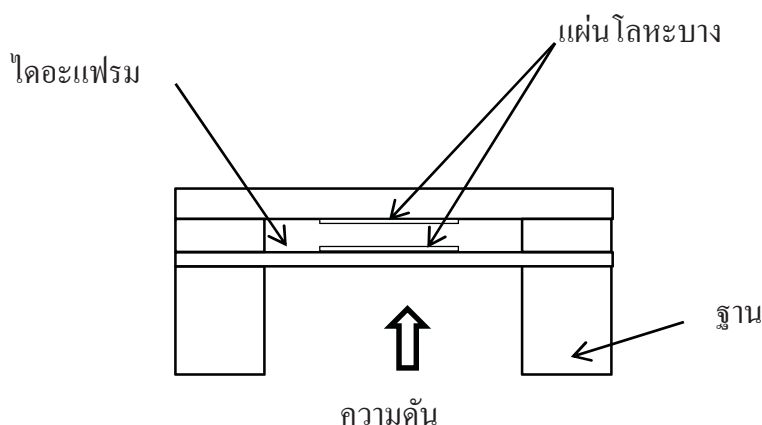


รูปที่ 2.4 ตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ

ปัจจุบันตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซ ได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น มีความแม่นยำมากขึ้น ตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่จะเป็นแบบความต้านทานเพียโซ ซึ่งมีหลายบริษัทที่ผลิตตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวต้านทานเพียโซออกมาจำหน่าย เช่น HoneyWell, Motorola, Freescale Semiconductor เป็นต้น ตัวตรวจรู้ความดันที่ใช้เปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ เป็นตัวตรวจรู้ความดันแบบความต้านทานเพียโซเช่นกัน

2.1.4 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

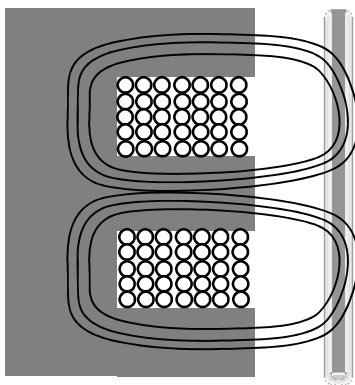
ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ จะใช้การเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า โดยใช้ไดอะแฟรมเป็นตัวตรวจรู้ปริมาณอินพุต ลักษณะ โครงสร้างทั่วไปของตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุเป็นดังรูปที่ 2.5 โดยส่วนประกอบหลักๆ มีไดอะแฟรมที่ติดกับแผ่นโลหะบางซึ่งเป็นขั้วของตัวเก็บประจุ และแผ่นโลหะอีกแผ่นอยู่ด้านบนขนานกับแผ่นโลหะที่ติดอยู่กับไดอะแฟรม เมื่อป้อนความดันไดอะแฟรมจะเกิดการโก่งตัวระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองแผ่นเปลี่ยนไป ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ สามารถออกแบบให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าได้มากกว่า 25 % ของค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้น และออกแบบให้ทนต่อความดันเกิดพิภคได้โดยการออกแบบ โครงสร้างทางกล ข้อดีของตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุคือ เอาท์พุตมีความเป็นเชิงเส้นสูง สัญญาณรบกวนต่ำ มีเสถียรภาพสูง ความไวสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การออกแบบโครงสร้างด้วย และข้อเสียคือ ไม่เหมาะกับการวัดความดันต่ำ



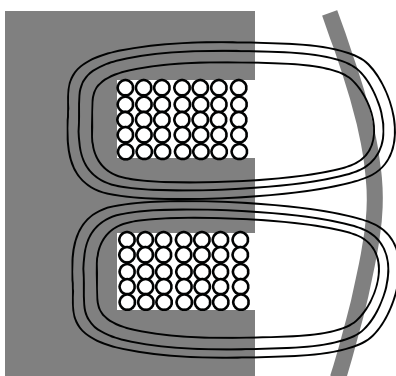
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทั่วไปของตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

2.1.5 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำ

ในการวัดความดันที่มีค่าน้อยๆ ไดอะแฟรมจะมีการโก่งตัวน้อยเช่นเดียวกันถ้าใช้ตัวต้านทานสเตรนเกจ แรงดันเอาต์พุตที่ได้จะมีค่าน้อยมาก ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุไม่เหมาะสำหรับการวัดความดันค่าน้อยๆ การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางแม่เหล็ก หรือตัวเหนี่ยวนำ เรียกว่า Variable reluctance pressure (VRP) ตัวตรวจรู้ความดันชนิดนี้จะใช้วัสดุแม่เหล็กเป็นไดอะแฟรม มีลักษณะเป็นตัวต้านทานแม่เหล็กของวงจรแม่เหล็กซึ่งจะมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ โครงสร้างทั่วไปของตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำมีเป็นดังรูปที่ 2.6



(ก)

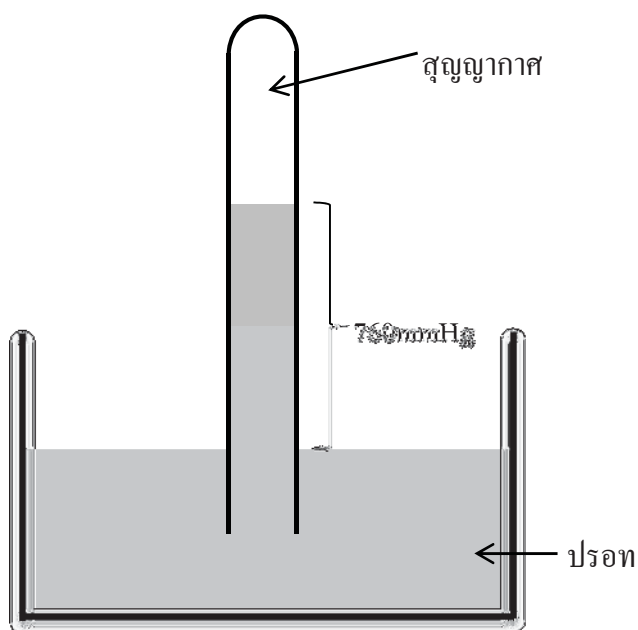


(ข)

รูปที่ 2.6 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเหนี่ยวนำ (ก) ขณะไม่มีความดัน (ข) ขณะมีความดัน ไดอะแฟรมที่เป็นตัวต้านทานแม่เหล็กจะเคลื่อนที่

2.2 ตัวตรวจรู้ความดันตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน

ตัวตรวจรู้ความดันถูกสร้างขึ้นเป็นครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอิตาลี Evangelista Torricelli (1644) โดยได้นำหลอดขนาด 1 เมตร ที่ปลายด้านหนึ่งถูกปิดผนึกอย่างแน่นหนา โดยนำหลอดนี้จุ่มลงในอ่างปรอทในแนวตั้งทำให้ระดับของปรอทที่อยู่ในหลอดเท่ากับ 760 มิลลิเมตร และมีที่ว่างด้านบนเป็นสุญญากาศ โดยมีลักษณะดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 บารอมิเตอร์ของทอริเชลลิ

ทอริเชลลิได้บันทึกปรากฏการณ์นี้ว่า เป็นแรงบนพื้นผิวของโลก แต่ไม่ทราบสาเหตุที่มาของแรงดังกล่าวนี้ และกล่าวสรุปว่า ช่องว่างที่บริเวณด้านบนของหลอดนั้นเป็นที่ว่างที่เรียกว่าสุญญากาศ (Vacuum) ต่อมา Pascal (1648) นักปรัชญา นักฟิสิกส์ และนักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ได้ทราบถึงการทดลองของทอริเชลลิ ทำให้เชื่อว่าแรงที่พบนั้นเป็นแรงของอากาศที่อยู่ด้านบนบริเวณเหนืออ่างปรอท ที่กดให้ปรอทมีระดับสูงขึ้นในหลอด และได้คาดการณ์ว่าที่ความสูงเพิ่มขึ้นระดับของของเหลวจะลดลง และจากการทดลองของปาสคาล ทำให้สามารถคำนวณน้ำหนักของอากาศที่เรียกว่าความดัน จากนั้น Gottfried (1700) ได้คิดค้นวิธีทำมาตรวัดความดัน (Barometer) ที่ไม่ใช่ของเหลว แต่ใช้โลหะและสปริงแทน ซึ่งเรียกว่า บารอมิเตอร์แบบแอนิรอยด์ (Aneroid barometer) แต่ยังไม่มีการนำมาสร้างเพื่อใช้งานจริงจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1843 Lucien นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสได้สร้างบารอมิเตอร์แบบแอนิรอยด์ขึ้นมาเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริง

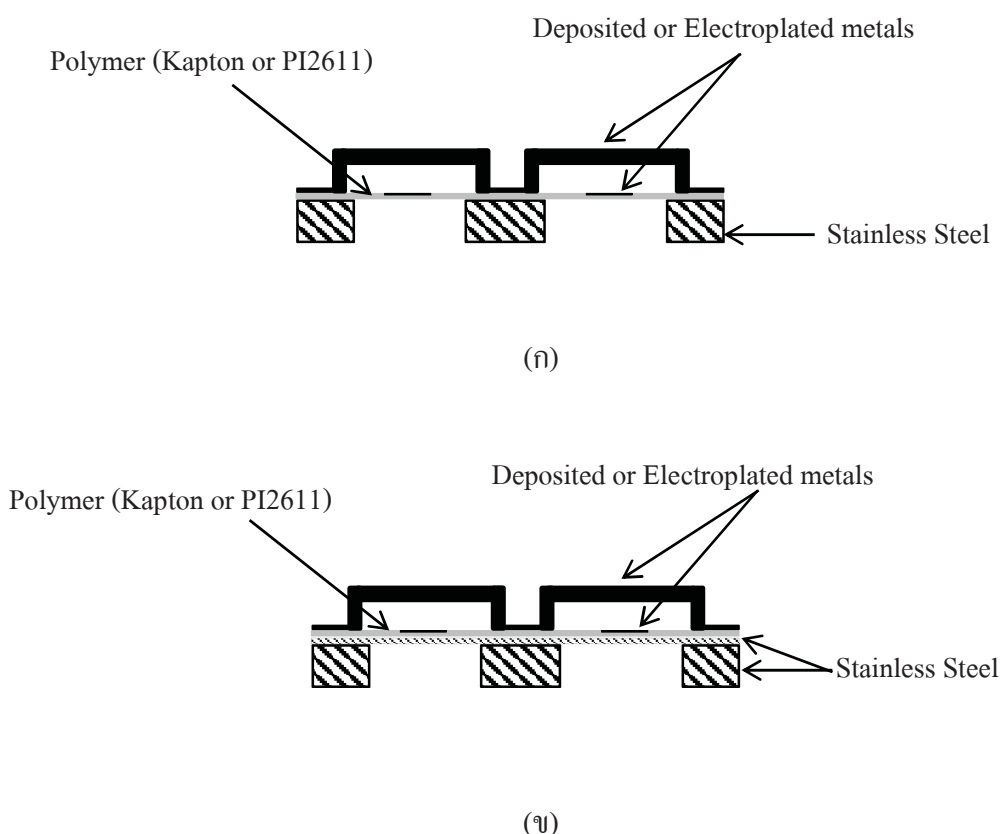
และเป็นที่มาของหลอดบัวร์ดอง (Bourdon tube) มีลักษณะดังรูปที่ 2.2 ในปี ค.ศ. 1849 ซึ่งเหมาะกับการวัดความดันสูง

ต่อมาในปี ค.ศ. 1856 ได้มีการค้นพบการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของโลหะเนื่องจากแรงทางกลโดย William Thomson (Lord Kelvin) และในปี ค.ศ. 1930 ได้มีการสร้างทรานซิสเตอร์ความดันขึ้นมาเป็นครั้งแรก โดยอาศัยกลไกของการเคลื่อนที่ของไออะพาร์ต และหลอดบัวร์ดอง ต่อมา Simmons and Ruge (1938) ได้ประดิษฐ์สเตรนเกจ (Strain gauge) ขึ้นซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงค่าความเครียดในวัสดุเป็นค่าความต้านทานได้ และในปี ค.ศ. 1954 นักวิจัย Smith ได้ค้นพบปรากฏการณ์ เพียโซรีซิสทีฟ ในซิลิคอนและเยอรมันเนียม โดยปรากฏการณ์เพียโซรีซิสทีฟคือการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของวัสดุเมื่อมีความเครียด (Strain) ทางกลมากระทำ และในปี ค.ศ. 1958 ได้มีการพัฒนาเพื่อสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบเพียโซรีซิสทีฟในเชิงพาณิชย์ โดยบริษัท Kulite Semiconductor Product Honeywell และบริษัท Microsystem Kulite (1961) ได้นำซิลิคอนสเตรนเกจซึ่งเป็นตัวต้านทานสร้างด้วยวิธีการแพร่สารกึ่งตัวนำ (Diffusion) ไว้บนซิลิคอนแบบบางที่ทำหน้าที่เป็นไออะพาร์ต ต่อมาปี 1966 บริษัท Honeywell พัฒนารูปการสร้างไออะพาร์ตซิลิคอนโดยการกัดซิลิคอนเพื่อให้เกิดช่องว่าง (Cavity) เพื่อทำหน้าที่เป็นไออะพาร์ต ปี ค.ศ. 1971 ตัวตรวจรู้ความดันที่มีสัญญาณเอาต์พุตแบบดิจิตอลได้ถูกออกแบบและทำการทดสอบที่มหาวิทยาลัย Case Western Reserve : CWRU ด้วยซิลิคอนที่มีขนาดเล็กและตัวต้านทานแบบบริดจ์ที่บริเวณจุดศูนย์กลางของไออะพาร์ต ในระหว่างการทดสอบและประเมินผลพบว่าบรรจุภัณฑ์ (Packaging) เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของตัวตรวจรู้ด้วย ซึ่งตัวตรวจรู้แบบเพียโซรีซิสทีฟมีความไวต่อสิ่งรบกวนมากทำให้ตัวตรวจรู้ความดันมีความถูกต้องลดลง เพื่อให้ได้ความไวและเสถียรภาพของตัวตรวจรู้ที่ดี จึงได้มีการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุขึ้นในปี ค.ศ. 1977 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ (Capacitive Pressure Sensor) ได้ถูกพัฒนาขึ้นที่มหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford university) ต่อมาไม่นานมหาวิทยาลัย CWRU ที่มีการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันอย่างต่อเนื่อง ได้นำเอาระบบกลไฟฟ้าจุลภาคมาใช้ในการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน ซึ่งมีข้อดีคือมีขนาดเล็ก ราคาถูก สามารถทำซ้ำได้ มีความน่าเชื่อถือสูง และให้ผลผลิตสูงอีกด้วย

2.3 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

Sung-Pil Chang (2002) ได้นำเสนอตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุแบบอะเรย์ซึ่งจะมีตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุอยู่ภายในหลายตัว ซึ่งจะทำให้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดัน และทำการทดลองใช้วัสดุชนิดต่างๆ ในการสร้างไออะพาร์ต คือ Kapton , Stainless steel และ Titanium ไออะพาร์ตที่เป็น Kapton มีความหนา

50 μm เส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม 2 mm วางเป็นอะเรย์ขนาด 8×8 ทดสอบที่ย่านความดัน 0 - 34 kPa จากการทดสอบ ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 0.14 pF ส่วนไดอะแฟรมที่เป็น Stainless steel ความหนา 12.7 μm เส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม 2 mm วางเป็นอะเรย์ขนาด 6×6 ทดสอบที่ย่านความดัน 0 - 178 kPa จากการทดสอบ ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 0.14 pF และไดอะแฟรมที่เป็น Titanium ความหนา 25.4 μm เส้นผ่านศูนย์กลางไดอะแฟรม 2 mm วางเป็นอะเรย์ขนาด 6×6 ทดสอบที่ย่านความดัน 0-178 kPa จากการทดสอบ ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 0.25 pF การใช้ไดอะแฟรมที่เป็นโลหะจะช่วยให้ตัวตรวจรู้ความดันมีความทนทานต่อสภาพการใช้งานต่างๆ มากกว่าไดอะแฟรมที่เป็นพอลิเมอร์ โดยโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความดันดังกล่าวมีลักษณะดังรูปที่ 2.8

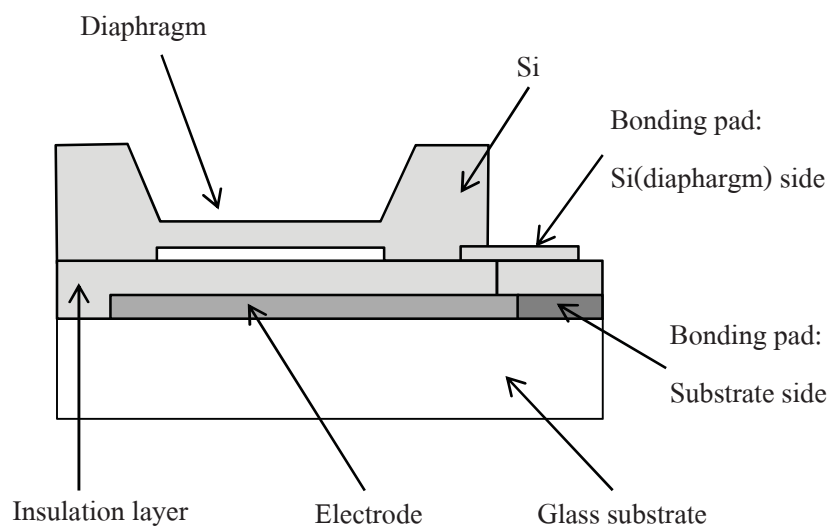


รูปที่ 2.8 ตัวตรวจรู้ความดันของ Sung-Pil Chang(2002) (ก) ไดอะแฟรมพอลิเมอร์ (ข) ไดอะแฟรมโลหะ

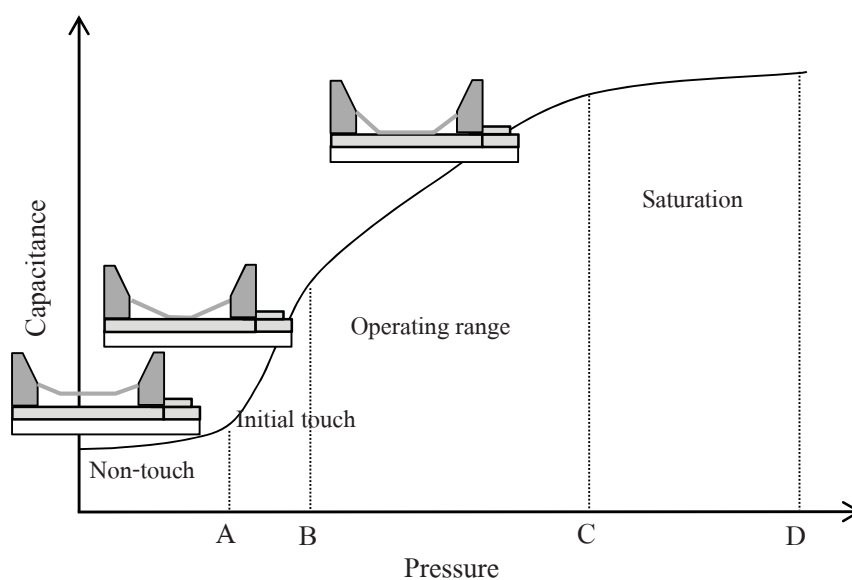
Satoshi Yamamoto (2003) ได้นำเสนอตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่ออกแบบให้ทำงานในโหมดสัมผัส (Touch Mode) สำหรับตรวจวัดความดันภายในยางรถยนต์ โดยตัวตรวจรู้ความดันแบบสัมผัส จะให้ค่าความจุไฟฟ้าออกมาใกล้เคียงแบบเชิงเส้นในช่วงที่ไดอะแฟรมที่มีขั้วอิเล็กโทรดเคลือบฉนวนสัมผัสกันดังรูปที่ 2.9(ก) ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุชนิดนี้จะให้ค่าความไวมากกว่าตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุทั่วไป (Non-touch mode) แต่มีข้อเสียคือจะสามารถให้ค่าความจุไฟฟ้าที่เป็นเชิงเส้นในช่วงที่ออกแบบเท่านั้น ซึ่งมีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความดันดังรูปที่ 2.9(ข) ตัวตรวจรู้ความดันที่ Satoshi สร้างขึ้นจะใช้ซิลิคอน n-type เป็นไดอะแฟรมมีความหนา 300 μm บนฐานกระจกที่มีขั้วอิเล็กโทรด ออกแบบให้วัดความดันภายในยางรถยนต์ส่วนบุคคล ความดันเริ่มสัมผัส 60 kPa ความไวที่ความดัน 250 kPa เท่ากับ 0.049 pF/kPa ส่วนตัวตรวจรู้ความดันที่ใช้วัดความดันภายในยางรถบรรทุก ออกแบบความดันเริ่มสัมผัส 150 kPa ความไวที่ 700 kPa เท่ากับ 0.016 pF/kPa

Min-Xin Zhu (2005) ได้นำเสนอการสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่มีโครงสร้างไดอะแฟรมแบบแซนด์วิช มีไดอะแฟรมที่เป็นวัสดุต่างชนิดกันคือ SiO_2 และ Si_3N_4 ทั้งหมด 3 ชั้น ใช้เทคนิค Anodic bonding ในการเชื่อมต่อวัสดุทั้งสองชนิดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ดัดบนช่องเปิดซิลิคอนสี่เหลี่ยม มีลักษณะดังรูปที่ 2.10 ออกแบบให้มีขนาดความกว้าง 800 μm , 1000 μm , 1200 μm และ 1500 μm ตามลำดับ จากการทดสอบได้ความไวเท่ากับ 0.08 pF/kPa, 0.12 pF/kPa, 0.15 pF/kPa, 0.2 pF/kPa ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดฮิสเทอรีซิสสูงสุด 3.3 % เทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงทั้งหมด

Jithendra N. (2006) ได้นำเสนอการสร้างตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) โดยวัสดุที่ใช้ในการสร้างทั้งหมดรวมถึงไดอะแฟรมจะใช้ Liquid-crystal polymer (LCP) โดยโครงสร้างจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 2.11 ได้แก่ ส่วนฐานที่เคลือบโลหะเป็นขั้วอิเล็กโทรด ชั้นที่สองจะเป็นช่องวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm ส่วนชั้นที่สามเป็นไดอะแฟรมที่มีขั้วอิเล็กโทรดวงกลมขนาดพื้นที่ 4.9 mm^2 ดัดบนช่องวงกลม ทดสอบที่ความดัน 0 - 100 kPa ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเท่ากับ 0.277 pF มีความไวเท่ากับ 0.00277 pF/kPa

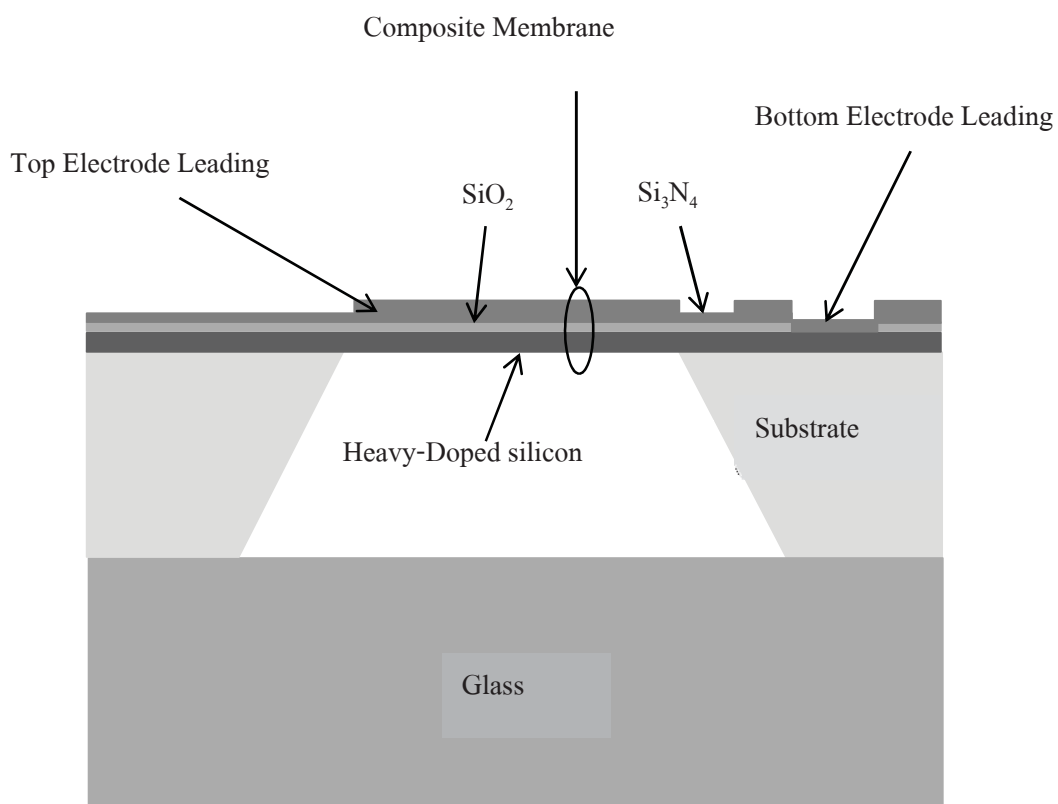


(ก)

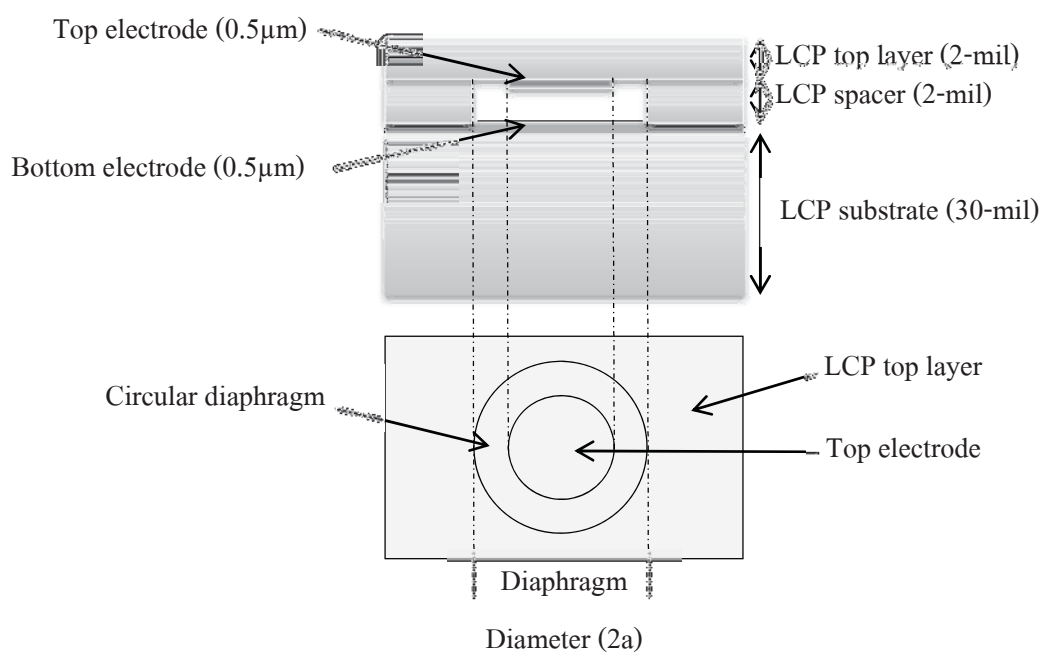


(ข)

รูปที่ 2.9 ตัวตรวจรู้ความดันแบบสัมผัสของ Satoshi (2003) (ก) โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความดัน (ข) กราฟคุณลักษณะของตัวตรวจรู้ความดันแบบสัมผัส



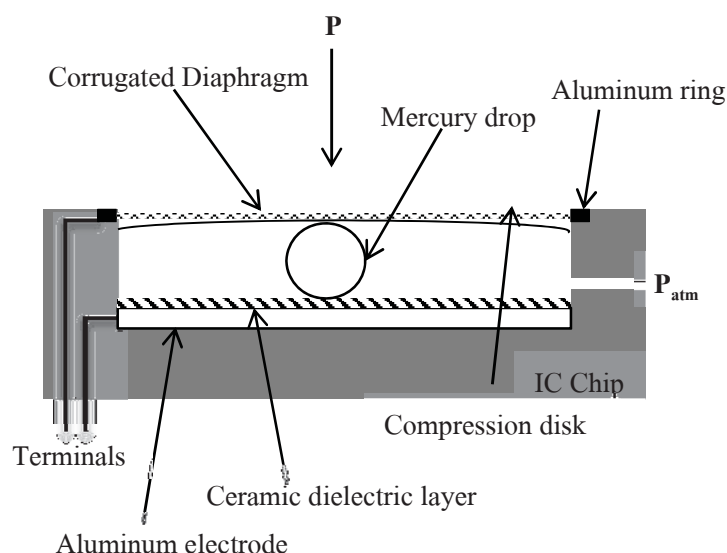
รูปที่ 2.10 ตัวตรวจรู้ความดันของ Min-Xin Zhu (2005)



รูปที่ 2.11 ตัวตรวจรู้ความดันของ Jithendra N.(2006)

Ezzat G (2010) ได้นำเสนอเทคนิคใหม่ในการสร้างตัวตรวจรู้ความดันซึ่งมีความไวสูง การสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบใหม่นี้จะใช้อลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดเคลือบด้วย Barium Strontium Titanate หนา $1\text{ }\mu\text{m}$ โดยวัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุเซรามิกที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง (Permittivity) จากนั้นหยดตะกั่วขนาดเล็กลงบนวัสดุไดอิเล็กตริก แล้วปิดทับด้วยอลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดอีกด้าน ดังรูปที่ 2.12 ทำการทดสอบที่ความดัน $0 - 3\text{ kPa}$ ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปมากกว่า $6\text{ }\mu\text{F}$ และมีความไวเท่ากับ $2.24\text{ }\mu\text{F/kPa}$

จากงานวิจัยในอดีตจะพบว่ามีการพัฒนาตัวตรวจรู้ความดันด้วยเทคนิคต่างๆมากมาย เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆให้ดีขึ้น เช่น พัฒนาให้มีขนาดเล็กลง มีความไวสูงขึ้น โครงสร้างแข็งแรงขึ้นเพื่อรองรับการใช้งานที่สภาวะแวดล้อมต่างๆ พัฒนาระบบการผลิตเพื่อลดต้นทุน ปรับปรุงตัวเก็บประจุเพื่อลดผลของอุณหภูมิ เป็นต้น ในการออกแบบให้มีลักษณะเด่นในเรื่องต่างๆเพื่อตอบสนองการใช้งานในรูปแบบต่างๆซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะออกแบบให้มีความโดดเด่นในหลายๆด้าน สำหรับงานวิจัยนี้จะเน้นในส่วนของความไวและไดอะแฟรมขนาดเล็ก ในการเพิ่มความไวของ

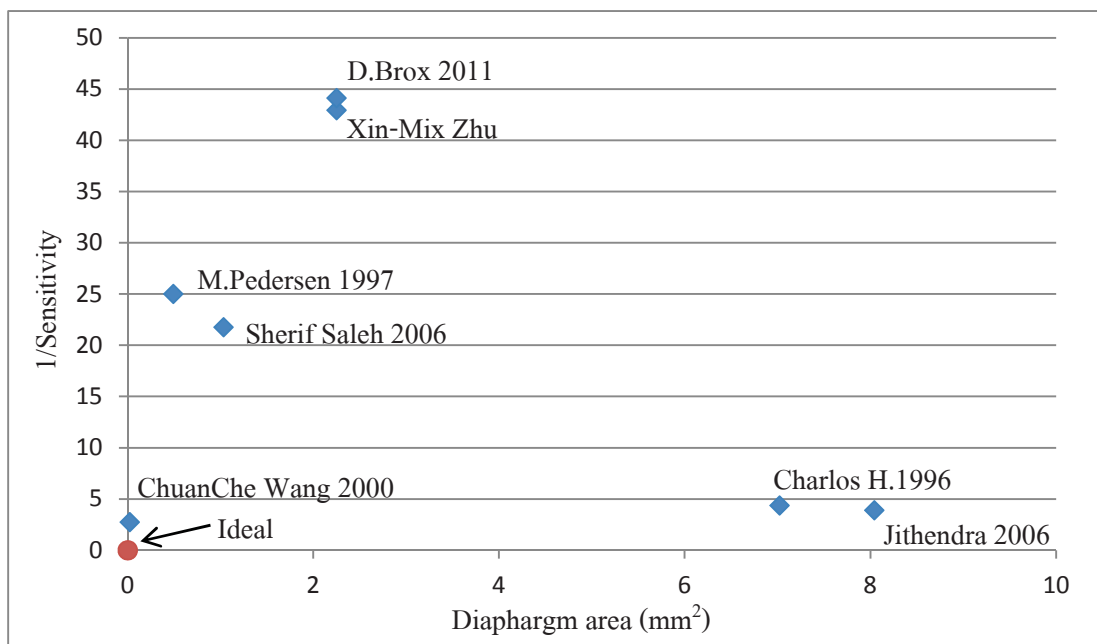


รูปที่ 2.12 ตัวตรวจรู้ความดันของ Ezzat G (2010)

ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ สามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ซึ่งโดยทั่วไปจะออกแบบให้แผ่นโลหะขนานของตัวเก็บประจุให้มีระยะห่างที่น้อยที่สุด และมีขนาดพื้นที่ของแผ่นโลหะใหญ่ซึ่งจะทำให้ขนาดของตัวตรวจรู้ความดันมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย ดังนั้น การที่จะสร้างตัวตรวจรู้ความดันให้มีขนาดเล็กและมีความไวสูงจึงเป็นเรื่องที่ยาก ในงานวิจัยนี้จะเน้นการออกแบบเพื่อลดขนาดและเพิ่มความไวเป็นหลัก โดยการออกแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่มีตัวเก็บประจุหลายๆตัวอยู่ภายในโครงสร้างเดียวกัน จึงทำให้มีขนาดเล็กลง และตัวเก็บประจุดังกล่าวจะสร้างขึ้นด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ออกแบบกระบวนการผลิตให้สามารถผลิตชิ้นงานได้จำนวนมากๆ ช่วยลดต้นทุนการผลิตได้อีกด้วย สำหรับงานวิจัยที่มีการพัฒนาขึ้นในอดีตถึงปัจจุบันนี้มีค่าการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าและค่าความจุไฟฟ้าตั้งต้นของตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 เนื่องจากตัวตรวจรู้ความดันที่มีขนาดเล็กและมีความไว (Sensitivity) หรืออัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดต่อค่าความจุไฟฟ้าตั้งต้นที่มีค่ามากแต่มีพื้นที่ไดอะแฟรมน้อยนั้น ถือเป็นตัวตรวจรู้ความดันซึ่งเป็นที่ต้องการในการประยุกต์ใช้งานทั่วไป ดังนั้นจึงเปรียบเทียบคุณลักษณะของตัวตรวจรู้อันพึงประสงค์ (figure of merits) สองประการดังกล่าวจากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต โดยนำค่าคุณลักษณะทั้งสองวาดลงในกราฟดังรูปที่ 2.13 จุดในกราฟซึ่งเข้าใกล้จุดกำเนิดมากแสดงถึงตัวตรวจรู้ที่มีค่าความไวสูงและมีพื้นที่ไดอะแฟรมน้อย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มุ่งออกแบบตัวตรวจรู้ความดันเพื่อให้มีคุณสมบัติทั้งสองประการมากที่สุด ที่วัสดุและเทคโนโลยีการผลิตจะอำนวย

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดและพื้นที่ของไดอะแฟรม

ปี	ผู้ประพันธ์	ค่าความจุไฟฟ้าที่ เปลี่ยนแปลง	ค่าความจุ ไฟฟ้าตั้งต้น	พื้นที่ไดอะแฟรม (mm ²)	ย่านการวัด (kPa)
1987	Hin-Leung Chau	6 pF	-	9	0 - 4
1996	Carlos H.	0.8 pF	3.5 pF	7.02	0 - 689
1997	M.Pedersen	0.135 pF	3.375 pF	0.49	0 - 100
2000	ChuanChe Wang	0.073 pF	0.2 pF	0.0225	-70 - 70
2002	Sung-Pil Chang	0.14 pF	11.35 pF	113.1	0 - 34
		0.25 pF	11.35 pF	113.1	0 - 178
		0.14 pF	11.35 pF	113.1	0 - 178
2005	Min-Xin Zhu	6 pF	257.6 pF	2.25	80 - 105
2006	Sherif Saleh	0.8 pF	17.4 pF	1.03	0 - 482
2006	Jithendra	0.277 pF	1.08 pF	8.04	0 - 100
2011	Y.Zhang	0.22 pF	-	2.544	0 - 2
		0.9 pF	-	3.141	0 - 3.5
2011	Chia-Fang Chiang	0.481 pF	-	0.246	0 - 100
2011	D.Brox	0.45 pF	19.85 pF	2.25	0 - 32



รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบคุณลักษณะที่พึงประสงค์ของตัวตรวจรู้ความดันจากงานวิจัยต่าง ๆ ด้วยตัวชี้วัดคือ ความไวและขนาดของไดอะแฟรม

บทที่ 3

กระบวนการพื้นฐานในการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

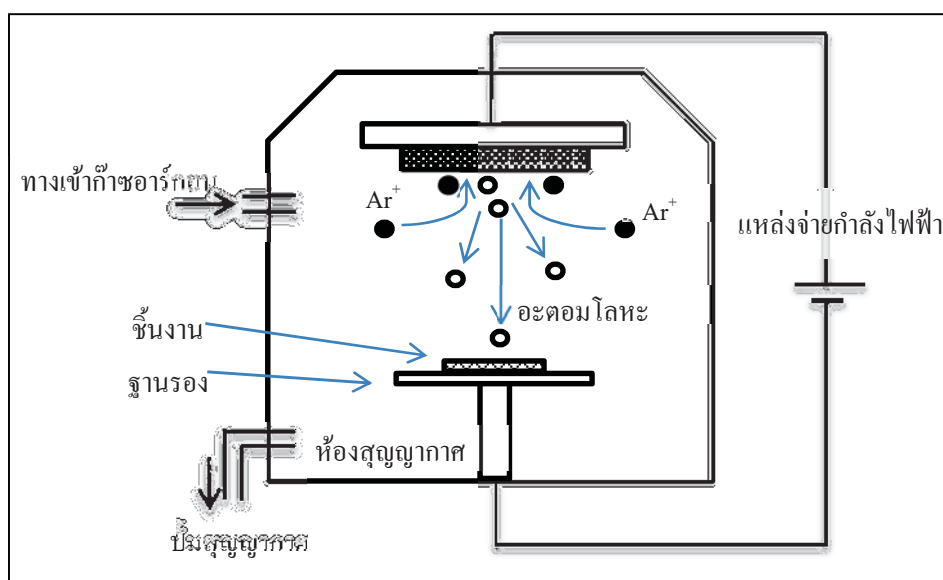
ในกระบวนการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค วิธีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ กระบวนการลิโธกราฟี นอกจากนี้ยังมีกระบวนการอื่นๆที่มีความสำคัญในการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ซึ่งกระบวนการต่างๆที่ใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนั้นมีกระบวนการต่างๆค่อนข้างมากนอกเหนือจากกระบวนการลิโธกราฟี ในการสร้างอุปกรณ์ทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เช่น การสร้างตัวตรวจรู้แบบต่าง ๆ ตัวจับเร็ว ช่องทางเดินจุลภาค เป็นต้น การสร้างอุปกรณ์ดังกล่าวนี้มีกระบวนการสร้างที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ การออกแบบกระบวนการสร้าง เช่น กระบวนการเคลือบโลหะ (Evaporation, Sputtering) กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ (X-ray mask) การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) กระบวนการสกัดเนื้อวัสดุ (Etching) เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้จะนำเสนอเพียงกระบวนการที่ จำเป็นสำหรับงานวิจัย ดังนี้

3.1 กระบวนการเคลือบโลหะ

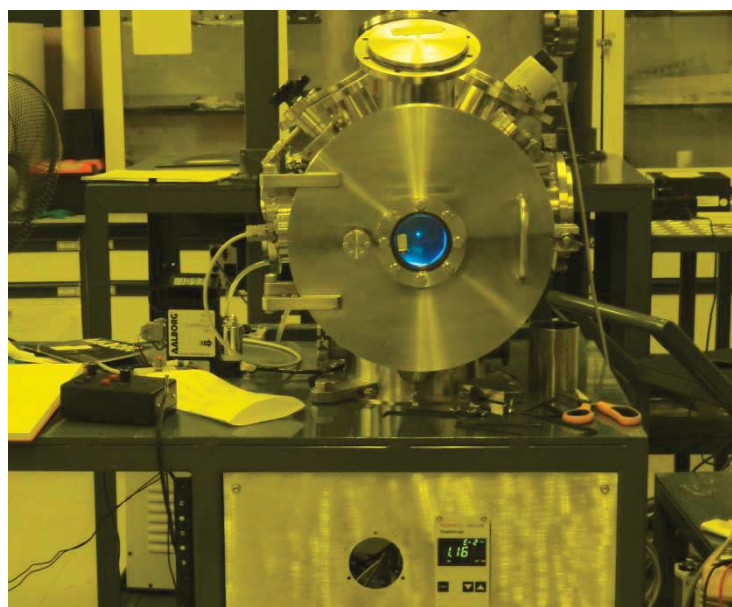
3.1.1 กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering)

การเคลือบโลหะด้วยการสปัตเตอริงเป็นวิธีการเคลือบโลหะวิธีหนึ่งที่มีความ นิยมมาก สามารถเคลือบใช้งานได้ทั้งบริเวณผิวหน้าและด้านข้างของชิ้นงานไปพร้อมกัน สำหรับ งานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการนี้ในการเคลือบโลหะบนพอลิเมอร์เพื่อให้ได้โครงสร้างพอลิเมอร์ เคลือบโลหะนำไฟฟ้า การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้มีหลักการคือ การสร้างพลาสมา จากก๊าซเฉื่อย Ar^+ ด้วยสนามไฟฟ้าและเหนี่ยวนำให้พุ่งเข้าชนโลหะเป้าหมายทำให้อะตอมของ โลหะเป้าหมายกระเจิงออกมาเคลือบบนชิ้นงานดังรูปที่ 3.1 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นลำแสงพลาสมา การสปัตเตอริงสามารถแบ่งชนิดของแหล่งจ่ายออกได้สองชนิดคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า กระแสตรง (DC sputtering) สำหรับการเคลือบโลหะบนชิ้นงาน และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ความถี่สูง (RF sputtering) ซึ่งสามารถเคลือบได้ทั้งโลหะและฉนวน โดยทั่วไปจะนิยมใช้ความถี่ 13.56 MHz สำหรับการเคลือบโลหะบนโครงสร้างพอลิเมอร์ในงานวิจัยนี้จะใช้แหล่งจ่าย แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และจะต้องเคลือบทุกทิศทาง จึงจำเป็นต้องมีการหมุนชิ้นงานในระหว่าง

กระบวนการเคลือบโลหะ โลหะที่ใช้จะเป็นโครเมียม (Cr) เคลือบลงบนโครงสร้างพอลิเมอร์แล้วตามด้วยโลหะเงิน (Ag) เนื่องจากโลหะเงินนำไฟฟ้าได้ดีกว่าโครเมียมแต่ยึดเกาะกับผิวของพอลิเมอร์ไม่ดีนัก จึงต้องใช้โลหะโครเมียมเคลือบรองพื้นลงไปก่อน



(ก)

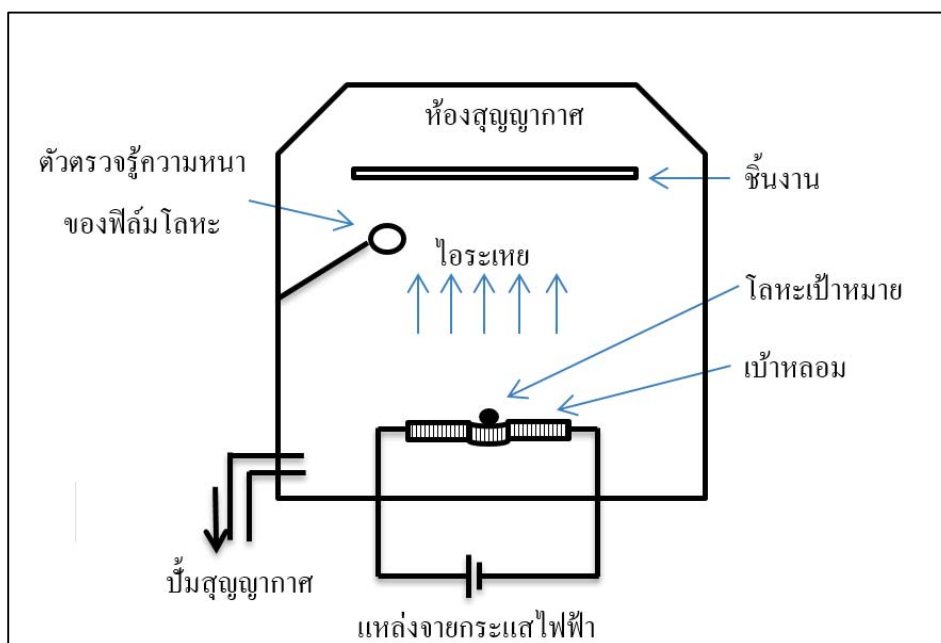


(ข)

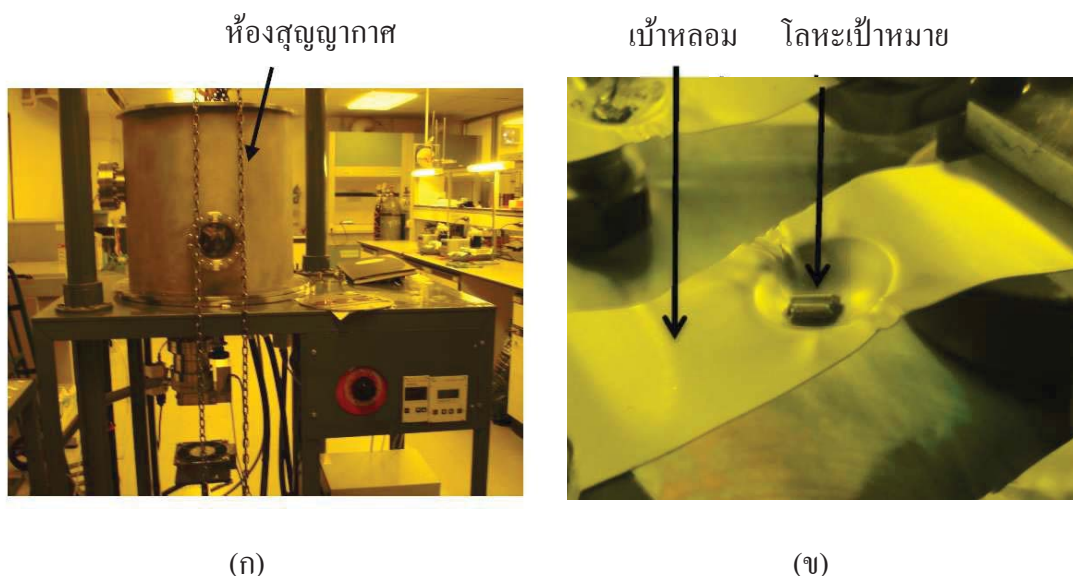
รูปที่ 3.1 เครื่องเคลือบโลหะแบบสปัตเตอร์ริง (ก) วงจรและอุปกรณ์ (ข) ภาพถ่ายเครื่องสปัตเตอร์ริง

3.1.2 กระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Evaporation)

เป็นการเคลือบฟิล์มบางโลหะลงบนชิ้นงาน ซึ่งสามารถเคลือบฟิล์มบางตั้งแต่ความหนาระดับอังสโตมจนถึงไมโครเมตรขึ้นอยู่กับชนิดของและปริมาณของโลหะที่ใช้เคลือบ การเคลือบโลหะด้วยวิธีดังกล่าวนี้จะใช้หลักการให้ความร้อนกับแผ่นความร้อนหรือเบ้าหลอม (boat) ที่เป็นโลหะทังสเตน (Tungsten) ในสุญญากาศโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับเบ้าหลอมที่มีความต้านทานต่ำ ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนสูงทำให้โลหะที่วางอยู่ในเบ้าหลอมเกิดการหลอมเหลวและระเหยกลายเป็นไอ ลอยขึ้นไปติดกับชิ้นงานที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโลหะจึงกลับมาเป็นของแข็งเคลือบบนชิ้นงาน ในการเคลือบด้วยวิธีนี้สามารถเคลือบชิ้นงานได้เพียงด้านเดียว และวัสดุที่ใช้เคลือบต้องเป็นโลหะเท่านั้น สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้การเคลือบโลหะด้วยวิธีการระเหยโลหะในสุญญากาศสำหรับกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ซึ่งจะใช้ในการเคลือบโลหะไทเทเนียม (Ti) และโลหะเงิน (Ag) บนแผ่นใสเพื่อใช้เป็นฐานโลหะในกระบวนการชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 3.2 วงจรและอุปกรณ์เครื่องเคลือบโลหะแบบระเหยโลหะในสุญญากาศ



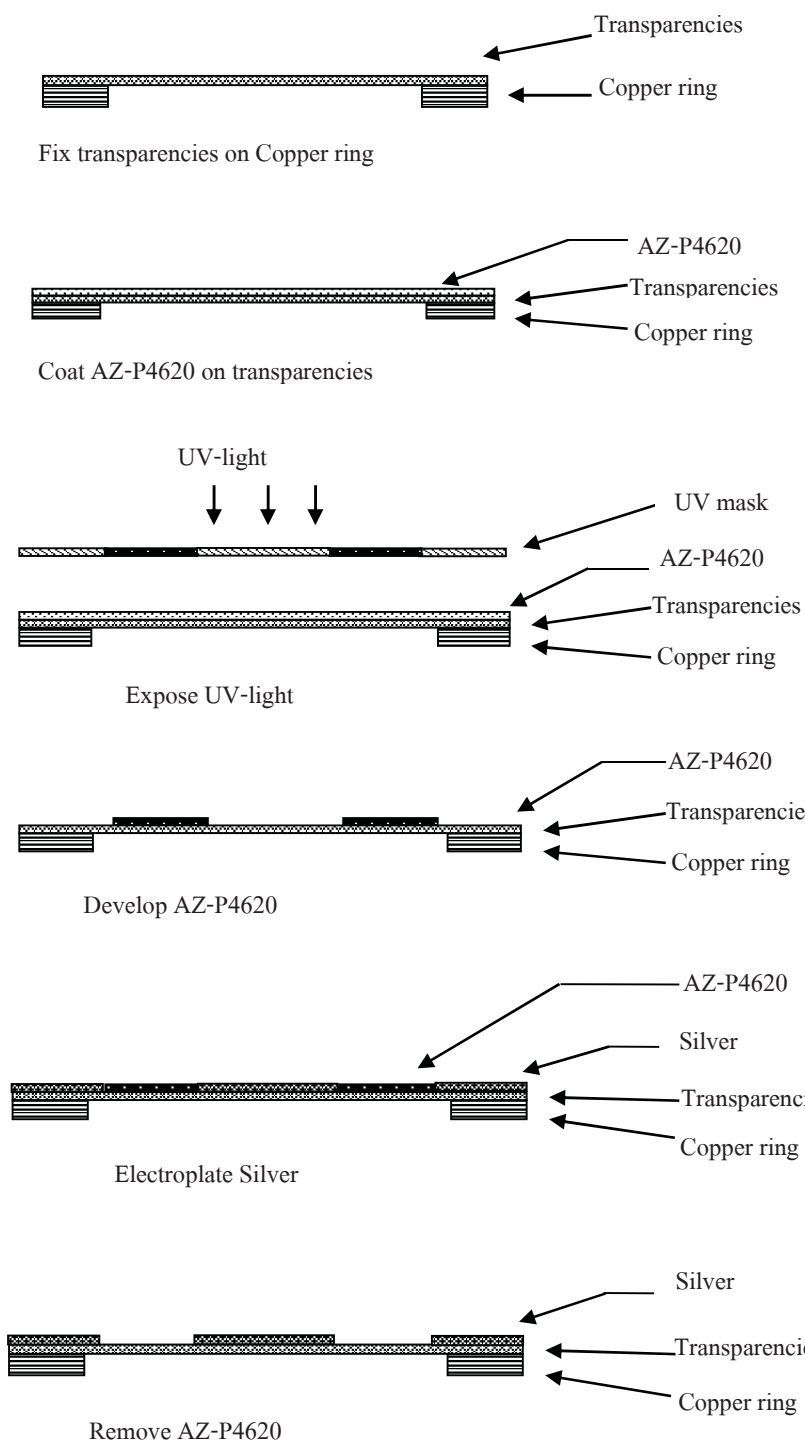
รูปที่ 3.3 เครื่องเคลือบโลหะแบบระเหยโลหะในสุญญากาศ (ก) ภาพถ่ายวงจรและอุปกรณ์
(ข) เบ้าหลอมโลหะ

3.2 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์

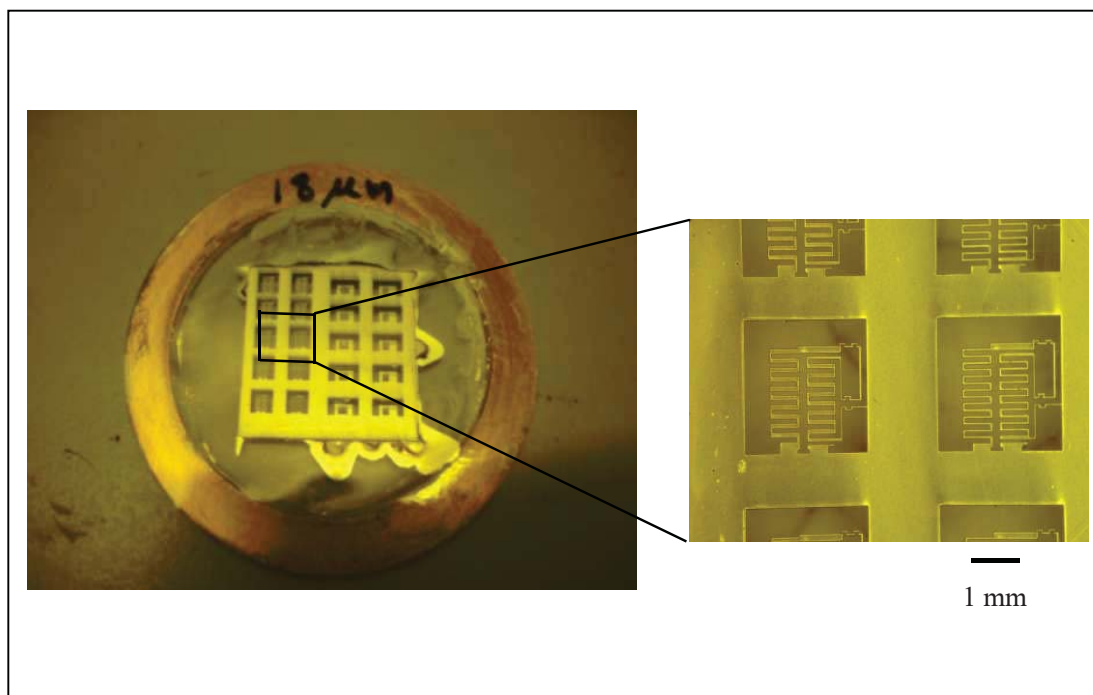
หน้ากากกันรังสีเอกซ์มีความสำคัญในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์เพราะ ลวดลายที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานเกิดจากการถ่ายทอดลวดลายผ่านหน้ากากกันรังสีเอกซ์ ความถูกต้อง แม่นยำของการถ่ายทอดลวดลายของโครงสร้างที่ออกแบบ จะขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการสร้าง หน้ากากกันรังสีเอกซ์เช่นกัน เนื่องจากรังสีเอกซ์มีคุณสมบัติการทะลุทะลวงสูงวัสดุที่ใช้สร้าง หน้ากากกันรังสีเอกซ์จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการดูดซับรังสีเอกซ์ได้ ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้ สำหรับดูดซับรังสีเอกซ์จะเป็นวัสดุโลหะ เช่น ทองคำ เงิน ตะกั่ว เป็นต้น ในงานวิจัยนี้จะใช้โลหะเงิน เป็นวัสดุดูดซับรังสีเอกซ์ เนื่องจากสามารถขึ้นรูปโครงสร้างขนาดเล็กได้ด้วยกระบวนการชุบโลหะ ด้วยไฟฟ้า ในการขึ้นรูปโครงสร้างขนาดเล็กที่เป็นลวดลายจำเป็นต้องสร้างบนวัสดุฐานที่นำไฟฟ้า เช่น แผ่นกราฟไฟต์ แผ่นพลาสติกใสเคลือบโลหะ วัสดุฐานที่กล่าวมาข้างต้นมีข้อดีและข้อเสียที่ แตกต่างกัน แผ่นกราฟไฟต์จะสามารถสร้างลวดลายโลหะเงินได้หนากว่าแผ่นใสเคลือบโลหะ สามารถสร้างลวดลายโลหะเงินได้มากกว่า 100 ไมโครเมตร สามารถฉายรังสีเอกซ์บนชิ้นงานที่มีความหนาในในระดับมิลลิเมตรได้ แต่กราฟไฟต์เป็นวัสดุทึบแสง เหมาะกับการสร้างชิ้นงานขึ้น เดียวหรือการฉายแสงเอกซเรย์ชั้นเดียว ส่วนวัสดุฐานที่เป็นแผ่นพลาสติกใสเคลือบโลหะหลังจาก เสร็จสิ้นกระบวนการจะได้หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่มีบริเวณที่ไม่มีโลหะเงินจะมีลักษณะโปร่งแสง สามารถมองเห็นทะลุได้ ซึ่งมีข้อดีในการสร้างโครงสร้างหลายชั้นช่วยให้วางหน้ากากได้แม่นยำ แต่

กระบวนการชุบโลหะบนแผ่นพลาสติกทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากโลหะที่เคลือบแผ่นพลาสติกใสมีแรงยึดเกาะไม่มาก เมื่อทำการเติมโลหะขึ้นมาจะเกิดแรงกระทำกับโลหะที่เคลือบแผ่นพลาสติกทำให้โลหะหลุดออกจากฐาน จึงทำให้วัสดุฐานที่เป็นพลาสติกใสเคลือบโลหะไม่สามารถสร้างลวดลายโลหะเงินได้หนามากนัก หรือหนาไม่เกิน 30 ไมโครเมตร ในการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้วัสดุฐานทั้งสองชนิดที่กล่าวมา มีกระบวนการดังนี้

กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นพลาสติกใสเคลือบโลหะเป็นวัสดุฐาน มีกระบวนการดังรูปที่ 3.4 โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลต ฉายผ่านหน้ากากลงบนสารไวแสง ซึ่งสารไวแสงที่ใช้ในที่นี้จะใช้สารไวแสงชนิดบวก AZ-P4620 (Clariant Corp., USA) การเตรียมสารไวแสงในการทำหน้ากากกันรังสีเอกซ์ เริ่มจากการนำแผ่นใสมาติดกับวงแหวนด้วยกาวอีพ็อกซี (Epoxy) แล้วทำความสะอาดแผ่นใสด้วยไอพีเอ และน้ำสะอาดจากนั้นก็เคลือบโลหะไทเทเนียม (Ti) และเงิน (Ag) ด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Evaporation) เพื่อให้แผ่นใสมีส่วนที่นำไฟฟ้า แล้วทำการหมุนเคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ-P4620 ให้ได้ความหนาประมาณ 30-50 μm อบให้สารไวแสงแข็งตัวที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากที่มีลวดลายทึบแสงแล้วล้างสารไวแสงออกด้วยสารเคมีจะเกิดเป็นลวดลายของสารไวแสงบนโลหะ จากนั้นทำการชุบโลหะเงินด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ให้ได้ความหนาประมาณ 20 - 30 μm เมื่อได้ความหนาที่ต้องการแล้วล้างสารไวแสงและโลหะไทเทเนียมและโลหะเงินที่ไม่ถูกชุบด้วยโลหะเงินออก จะได้หน้ากากกันรังสีเอกซ์ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 นำไปใช้ในการสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงต่อไป

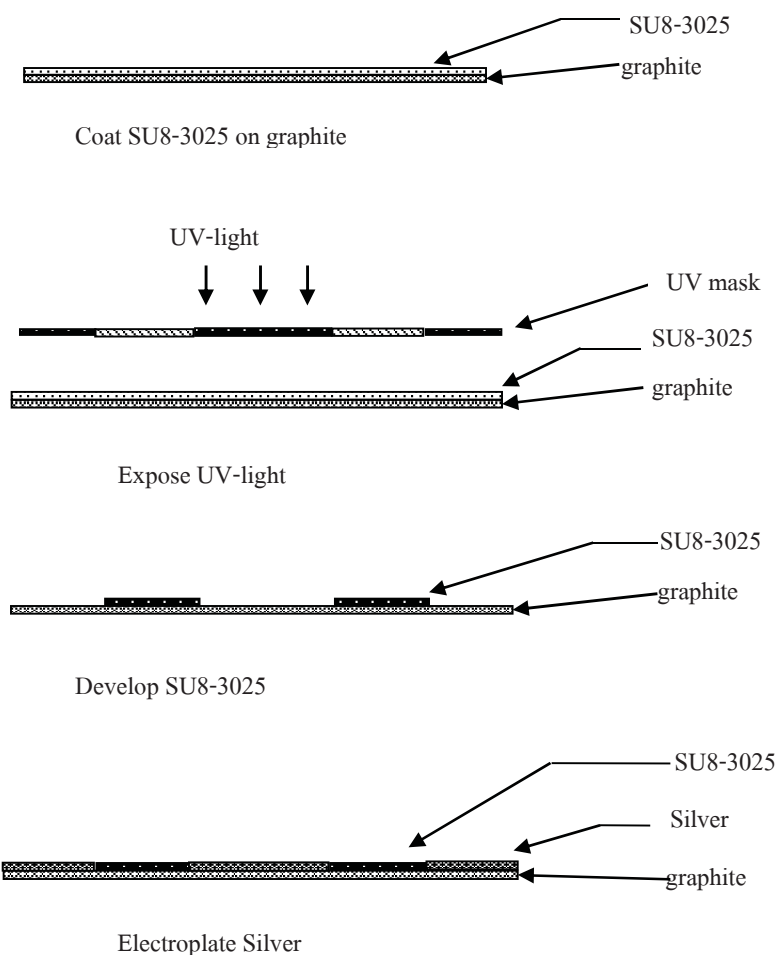


รูปที่ 3.4 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์บนแผ่นพลาสติกใส



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ ด้านขวาเป็นภาพขยายแสดงลายโครงสร้างของตัวเก็บประจุ

การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นกราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน มีกระบวนการดังรูปที่ 3.6 โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลต ฉายผ่านหน้ากากลงบนสารไวแสง ซึ่งสารไวแสงที่ใช้ในที่นี้จะใช้สารไวแสงชนิดลบ SU8-3025 (MicroChem Crop.,USA) การเตรียมสารไวแสงในการทำหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ เริ่มจากทำความสะอาดแผ่นกราฟไฟต์ด้วยไอพีเอ และน้ำสะอาดจากนั้นทำการหมุนเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU8-3025 ให้ได้ความหนาประมาณ 30-50 μm อบให้สารไวแสงแข็งตัวที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากที่มีลวดลายที่บดแสงแล้วล้างสารไวแสงออกด้วยสารละลายดีเวลลอปเปอร์จะเกิดเป็นลวดลายของสารไวแสงบนโลหะ จากนั้นทำการชุบโลหะเงินด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าให้ได้ความหนาประมาณ 20 - 30 μm ซึ่งเป็นกระบวนการสุดท้าย จะได้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ ซึ่งนำไปใช้ในการสร้างโครงสร้างสัณฐานสูงต่อไป

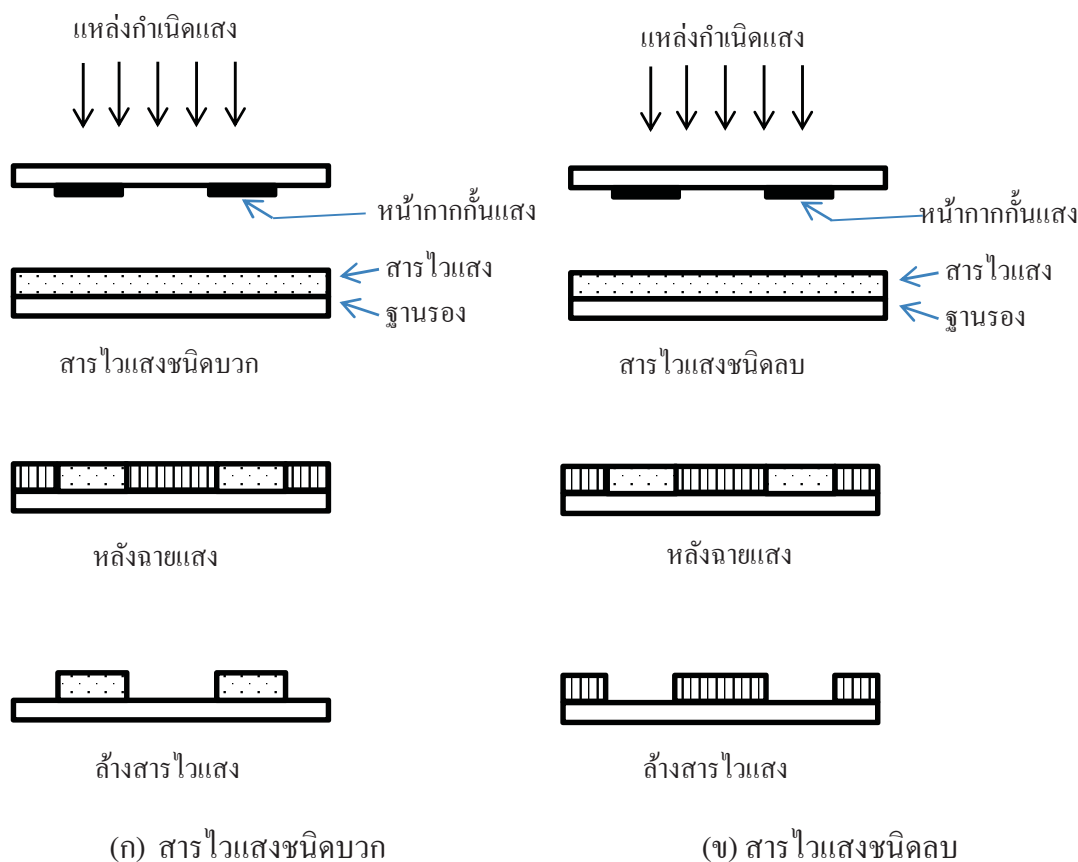


รูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์บนกราฟไฟต์

3.3 กระบวนการลิโกราฟี

กระบวนการลิโกราฟีเป็นกระบวนการที่ถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดสำหรับกระบวนการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ โดยในการผลิตวงจรรวมในปัจจุบันยังคงใช้กระบวนการลิโกราฟีในการผลิตแต่ในส่วนองวิธีการและแหล่งพลังงานแสงที่ใช้ได้ถูกพัฒนาให้มีสมรรถภาพมากขึ้นมาโดยตลอด โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้นั้นมีแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากกันแสงแบบหนึ่งต่อหนึ่ง หรือฉายผ่านเลนส์เพื่อย่อขนาดของชิ้นงานลง โดยทั่วไปแล้วการฉายแสงแบบหนึ่งต่อหนึ่งจะใช้ร่วมกับเครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV mask aligner) แหล่งกำเนิดแสงในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต ความยาวคลื่นประมาณ 365 - 450 nm ซึ่งกระบวนการลิโกราฟีจากแหล่งกำเนิด

แสงดังกล่าวนี้ ความสูงของชั้นงานหลังจากฉายแสงสามารถทำได้สูงถึง $100\text{ }\mu\text{m}$ แต่ในบางงานที่ต้องการความสูงของชั้นงานที่มีความสูงหลายร้อยไมโครเมตร หรือระดับมิลลิเมตร จึงได้มีการพัฒนากระบวนการเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีซึ่งมีพลังงานสูงกว่าแสงอัลตราไวโอเลตมาก ในการฉายรังสีเอกซ์ลงบนชั้นงานจะฉายผ่านหน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ทำจากวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับรังสีเอกซ์ซึ่งสามารถสร้างชั้นงานที่มีความหนามากถึงระดับมิลลิเมตรได้ ในส่วนของสารไวแสง (Photoresist) ที่ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟี จะจำแนกออกได้เป็นสองชนิดคือ สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) และสารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) เมื่อสารไวแสงกระทบกับแสงจากแหล่งกำเนิด จะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดความแตกต่าง ระหว่างบริเวณที่กระทบแสงและบริเวณที่ไม่กระทบแสง เมื่อนำไปล้างด้วยสารละลายดีเวลลอปเปอร์จะเกิดลวดลายตามหน้ากาที่ใช้กันแสง ซึ่งอาจจะเหมือนกับลวดลายต้นแบบหรือตรงข้ามกันขึ้นอยู่กับชนิดของสารไวแสงดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เปรียบเทียบกระบวนการสร้างลวดลายสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ

ในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการลิโทกราฟีในส่วนของการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์และการสร้างโครงสร้างสัณฐานสูงที่เป็นโครงสร้างตัวเก็บประจุ ในส่วนของการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์จะใช้กระบวนการลิโทกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต ฉายผ่านหน้ากาฟิล์มที่บดแสงลงบนสารไวแสงชนิดบวก AZ 4620 ที่ความหนา 30 μm เพื่อสร้างลวดลายก่อนที่จะทำการเติมวัสดุอุดชั้นรังสีด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ส่วนของการสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุ จะใช้กระบวนการเอชเรย์ลิโทกราฟีโดยการฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากากกันรังสีเอกซ์ลงบนสารไวแสงชนิดลบ SU8-2100 ความหนา 500 μm บนแผ่นกราฟไฟต์ เพื่อให้ได้โครงสร้างสัณฐานสูงที่เป็นพอลิเมอร์และสามารถขัดแผ่นกราฟไฟต์ออกได้เพื่อนำโครงสร้างไปใช้งานต่อไป

3.4 สรุป

ในบทนี้ กล่าวถึงกระบวนการพื้นฐานทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาคที่จำเป็นในการสร้างตัวตรวจรู้ความดันได้แก่ กระบวนการเคลือบโลหะ กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นใสเคลือบโลหะและกราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน และกระบวนการเอชเรย์ลิโทกราฟี ในบทที่ 4 จะกล่าวถึงการออกแบบและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวตรวจรู้ความดันต่อไป

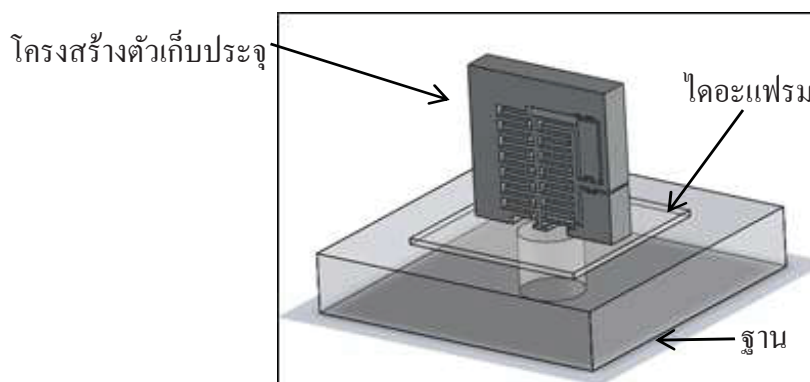
บทที่ 4

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน

ตัวตรวจรู้ความดัน คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดความดันอากาศหรือความดันก๊าซ โดยใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงลักษณะหรือคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุ เช่น การโก่งตัว การบิด-งอ เมื่อมีแรงเนื่องจากความดันอากาศหรือความดันก๊าซมากระทำกับวัสดุ จากนั้นเปลี่ยนเป็นค่าทางไฟฟ้าเพื่อทำการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลง เช่น ความต้านทาน ค่าความจุไฟฟ้า ค่าความเหนียวนำ เป็นต้น สำหรับตัวตรวจรู้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งลักษณะของตัวตรวจรู้ความดันนี้ คือ มีตัวเก็บประจุติดอยู่บนแผ่นไดอะแฟรม เมื่อป้อนความดันเข้าไดอะแฟรมจะเกิดการโก่งตัวทำให้ระยะช่องอากาศของตัวเก็บประจุที่ติดอยู่บนไดอะแฟรมเปลี่ยนไป เป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ในส่วนของการออกแบบ จะทำการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรม 2 ชนิด คือ PI และ PDMS แล้วนำผลที่ได้จากการจำลองการโก่งตัวมาทำการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างที่ออกแบบโดยใช้กระบวนการเอกซเรย์ลิโทกราฟี จากนั้นออกแบบวงจรไฟฟ้าสำหรับตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า โดยจะเปลี่ยนจากค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่แล้วอ่านค่าความถี่ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อเก็บข้อมูลและแสดงผล การออกแบบและจำลองแบ่งออกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

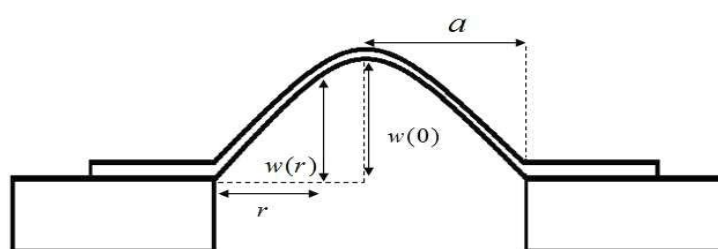
4.1 การออกแบบไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดัน

ในการออกแบบตัวตรวจรู้ความดันในงานวิจัยนี้ จะสร้างรูวงกลมขนาด บนแผ่นอะคริลิก แล้วติดไดอะแฟรมบนรูด้วยกาวอีพ็อกซี่ จากนั้นจึงนำโครงสร้างของตัวเก็บประจุที่สร้างด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโทกราฟีติดบนไดอะแฟรม ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แบบจำลองโครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

การออกแบบขั้นแรกเริ่มจากการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ยังไม่ติดโครงสร้างของตัวเก็บประจุ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ไดอะแฟรมที่มีลักษณะเป็นวงกลม มีความหนาไม่มาก (ไม่เกิน 20 % ของเส้นผ่านศูนย์กลาง) เมื่อทำการป้อนความดันที่ระนาบของไดอะแฟรม จะทำให้ไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวดังรูปที่ 4.2 และเนื่องจากไดอะแฟรมมีลักษณะเป็นวงกลมสมมาตร จึงทำให้ระยการโก่งตัวสมมาตรด้วย ส่วนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่เป็นแผ่นวงกลมที่เกิดจากความดันก๊าซสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ (4.1) โดย S.P.Timoshenko (1959)



รูปที่ 4.2 ลักษณะการโก่งตัวของไดอะแฟรม

$$w(r) = \frac{P(a^2 - r^2)^2}{64D} \quad (4.1)$$

โดยที่ w คือ ระยการโก่งตัวของไดอะแฟรมในแนวตั้งฉากกับระนาบ

P คือ ความดันก๊าซ (Pa)

a คือ ความยาวรัศมีของไดอะแฟรม

r คือ ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางไดอะแฟรม

D คือ ความแข็งเชิงคด (Flexural rigidity) กำหนดโดยสมการที่ (4.2)

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4.2)$$

โดยที่ E คือ มอดูลัสของยัง (Young's modulus) ของวัสดุที่เป็นไดอะแฟรม

h คือ ความหนาของไดอะแฟรม

ν คือ อัตราส่วนปัวซอง (Poisson's ratio) ของวัสดุที่เป็นไดอะแฟรม

เมื่อนำสมการที่ (4.2) แทนในสมการที่ (4.1) จะได้สมการที่ (4.3)

$$w(r) = \frac{3(1-\nu^2)P}{16Eh^3}(a^2 - r^2)^2 \quad (4.3)$$

เนื่องจากไดอะแฟรมมีลักษณะเป็นวงกลม ซึ่งโดยปกติระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมวงกลมจะมากที่สุดที่จุดกึ่งกลางของแผ่นไดอะแฟรมนั่นคือ $r = 0$ และบริเวณที่ห่างออกไปจากจุดศูนย์กลางทั้งสองข้างจะมีลักษณะสมมาตร จากสมการที่ (4.3) จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อการโก่งตัวของไดอะแฟรม คือ ความดัน (P) ความยาวรัศมีไดอะแฟรม (a) และความหนาของไดอะแฟรม (h) ในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุสองชนิดที่ใช้เป็นตัวรับปริมาณอินพุตหรือไดอะแฟรม คือ PI และ PDMS ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้กับแพร่หลายในเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

งานวิจัยนี้จะศึกษาผลของการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ใช้วัสดุทั้งสองชนิดที่ความดันต่างกัน ซึ่งจะแบ่งพิจารณาเพียงครึ่งส่วนของไดอะแฟรมเนื่องจากไดอะแฟรมมีลักษณะสมมาตร โดยทำการจำลองผลการโก่งตัวด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (4.3) ตามรายงานของ Wilson, Atkinson ในปี 2007 PI มีค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ 4.5 GPa และอัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.35 ส่วน PDMS ตามรายงานของ D. W. Lee, Y. Choi ในปี 2008 มีค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ 0.75 GPa และอัตราส่วนของปัวซองเท่ากับ 0.5

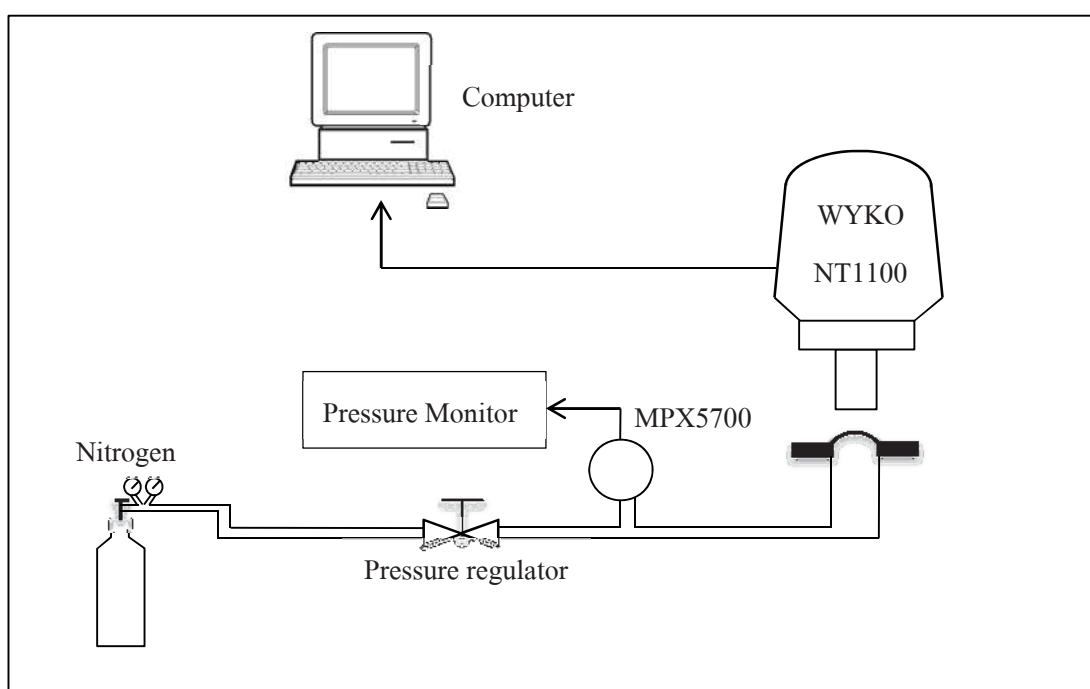
เนื่องจากค่ามอดูลัสของยังของวัสดุต่างๆมีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากส่วนประกอบภายในวัสดุ นั้นๆ เช่น PDMS เป็นวัสดุที่มีค่ามอดูลัสของยังไม่แน่นอน เนื่องจากอัตราส่วนในการผสมสารละลายลงใน PDMS มีผลต่อความแข็งของ PDMS ซึ่งค่าที่รายงานจากผลงานตีพิมพ์อื่นๆอาจจะไม่ตรงกับคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ในการหาค่ามอดูลัสของยังสำหรับวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย จะทำการทดสอบวัสดุทั้งสองชนิดเพื่อให้ได้ค่ามอดูลัสของยังที่เป็นของวัสดุที่ใช้จริงในการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับการออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน ส่วนค่าอัตราส่วนปัวซองจะยึดตามค่าที่รายงานจากผลงานตีพิมพ์ที่กล่าวมาข้างต้น เนื่องจากเป็นค่าที่มีผลต่อการโก่งตัวของไดอะแฟรมน้อย เมื่อเทียบกับค่ามอดูลัสของยัง ในส่วนของรายละเอียดการทดสอบหามอดูลัสของยังของวัสดุทั้งสองชนิดจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.1.1 การทดสอบหาค่ามอดูลัสของยัง

มอดูลัสของยัง (Young's modulus, E) หรือมอดูลัสของสภาพยืดหยุ่น (Modulus of elasticity หรือ elastic modulus) เป็นค่าบอกระดับความแข็งแรงของวัสดุ ซึ่งมอดูลัสของยังหาได้จาก ลิมิตของอัตราการเปลี่ยนแปลงของ ความเค้น(stress) ต่อ ความเครียด(strain) ที่ค่าความเค้นน้อย สามารถหาได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นกับความเครียด ที่ได้จากการทดลองดึง การทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังสามารถทำได้โดยการใช้แรงภายนอกกระทำกับวัสดุต่อหน่วยพื้นที่ที่เรียกว่าความเค้น ทำให้วัสดุรูปร่างเปลี่ยนไปหรือมีความเครียด ซึ่งแรงที่กระทำกับ

วัสดุจะต้องมีค่าไม่เกินขีดจำกัดความยืดหยุ่น เพื่อให้วัสดุเสียรูป ในส่วนของการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังของวัสดุ จะทำการทดสอบแรงดึงโดยขึ้นรูปวัสดุให้มีรูปแบบตามมาตรฐาน ซึ่งผลการทดสอบจะออกมาในรูปของกราฟความเค้นและความเครียด ซึ่งค่าความชันของกราฟดังกล่าวคือค่ามอดูลัสของยัง

ในการทดสอบหามอดูลัสของยังในงานวิจัยนี้ จะทำการทดสอบหาระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมเนื่องจากความดันโดยการวัดระยะการโก่งตัวสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม โดยสร้างรูเจาะบนอะคริลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร และติดตั้งไดอะแฟรม PDMS และไดอะแฟรม PI ซึ่งรายละเอียดในการสร้างฟิล์มบางและการติดไดอะแฟรมจะกล่าวถึงในบทที่ 5 เมื่อป้อนความดันต่างๆ โดยใช้เครื่อง Veeco Optical profiling system รุ่น WYKO NT1100 ซึ่งมีแผนผังการทดสอบดังรูปที่ 4.3 จากนั้นนำค่าที่วัดได้แทนในสมการที่ (4.3) เพื่อคำนวณหาค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus) ที่ได้จากการทดสอบเทียบกับค่ามอดูลัสของยังที่เป็นค่ามาตรฐานของวัสดุ การทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ การทดสอบค่ายังมอดูลัสของ PDMS และการทดสอบค่ายังมอดูลัสของ PI



รูปที่ 4.3 การทดสอบวัดการ โก่งตัวของไดอะแฟรมโดยใช้หลักการเชิงแสงด้วยเครื่อง

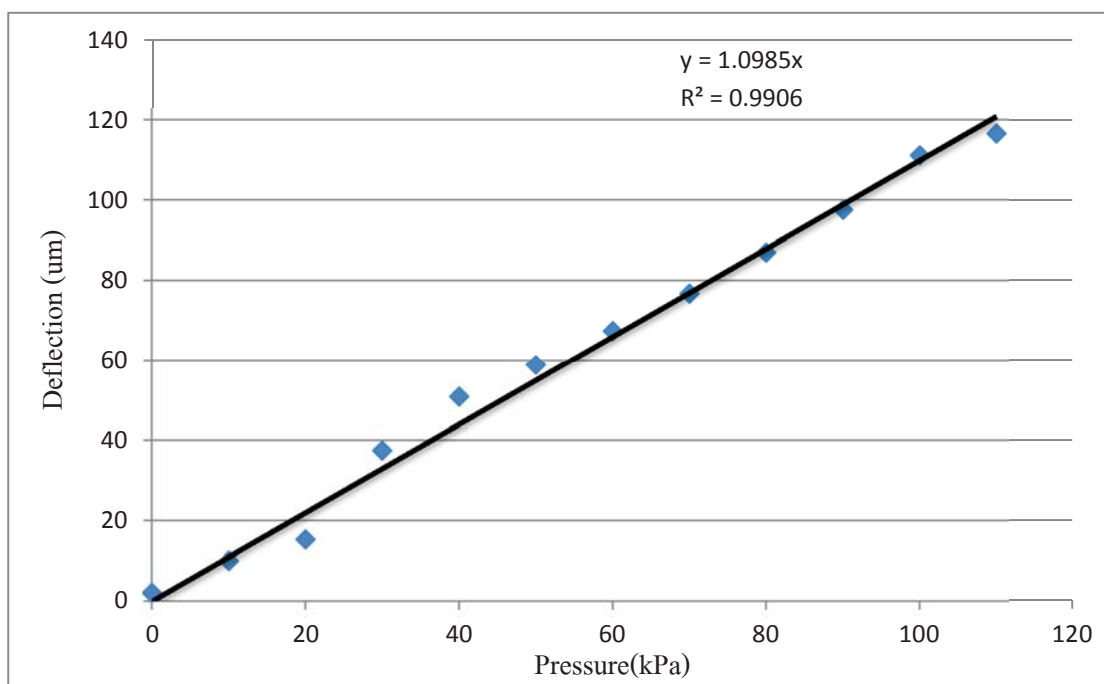
WYKO NT1100

4.1.2 การทดสอบการโก่งตัวเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังของไดอะแฟรม PDMS

ในส่วนของ PDMS จะทำการทดสอบความดันตั้งแต่ 0 kPa เพิ่มความดันครั้งละ 10 kPa ไปจนถึง 100 kPa ในแต่ละจุด และนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับผลการจำลองการโก่งตัวที่ค่ามอดูลัสของยังค่าต่างๆ ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1 และสามารถวาดกราฟผลการทดสอบเทียบกับการคำนวณดังรูป 4.2

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PDMS ที่ความดันต่างๆ

ความดัน (kPa)	ระยะการโก่งตัวจากการวัด (μm)
9.48	2.10
21.80	10.00
30.81	15.31
40.51	37.42
50.45	50.83
60.39	58.79
70.81	67.35
80.51	76.70
90.45	87.00
100.39	97.50



รูปที่ 4.4 ผลการทดสอบการโก่งตัวของไดอะแฟรม PDMS เพื่อคำนวณหาค่ามอดูลัสของยัง

จากกราฟรูปที่ 4.2 เป็นกราฟจากการทดสอบระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PDMS ซึ่งเมื่อหาสมการความสัมพันธ์ของความดันและระยะการโก่งตัวเป็นสมการเส้นตรงในรูป $y = mx + c$ ซึ่ง C มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น สมการความสัมพันธ์คือ $w = mP$ และ m คือความชันของกราฟ ซึ่งเมื่อเทียบกับสมการที่ (4.3) จะได้

$$m = \frac{3(1-\nu^2)}{16Eh^3}(a^2 - r^2)^2 \quad (4.4)$$

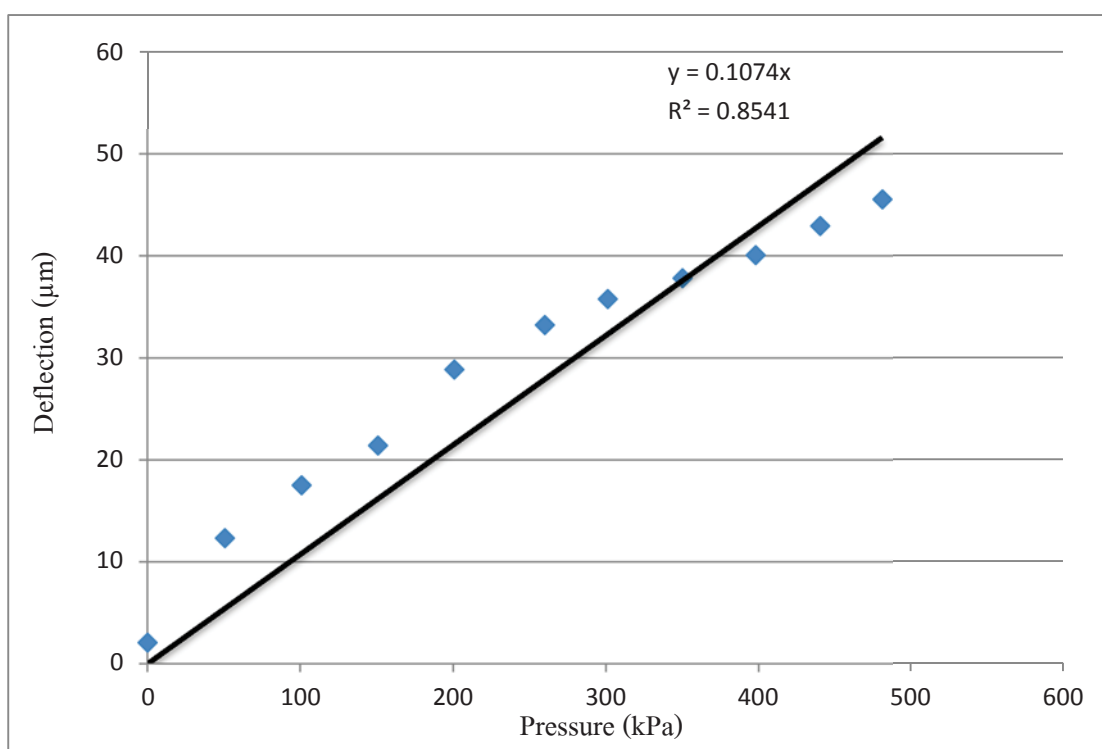
จากกราฟ m มีค่าเท่ากับ 1.0985 แทนค่าในสมการที่ (4.4) โดยกำหนด $\nu = 0.55$ $h = 120\mu m$ $a = 500\mu m$ $r = 0\mu m$ จะได้ค่ามอดูลัสของยังของไดอะแฟรม PDMS เท่ากับ 4.30 MPa ซึ่งค่านี้จะใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบตัวตรวจรู้ความดันต่อไป

4.1.3 การทดสอบการโก่งตัวเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการหาค่ามอดูลัสของยังของไดอะแฟรม PI

ในส่วนของ PI จะทำการทดสอบความดันตั้งแต่ 0 kPa เพิ่มความดันครั้งละ 50 kPa ไปจนถึง 500 kPa และนำค่าที่ได้มาวาดกราฟเทียบกับผลการจำลองการโก่งตัวที่ค่ามอดูลัสของยังค่าต่างๆดังรูปที่ 4.5 ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่างๆ

ความดัน (kPa)	ระยะการโก่งตัวจากการวัด (μm)
0.00	2.10
50.47	12.36
100.82	17.52
150.63	21.44
200.72	28.87
259.80	33.26
300.97	35.81
349.97	37.86
397.80	40.10
440.00	42.98



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI เพื่อคำนวณหาค่ามอดูลัสของยัง

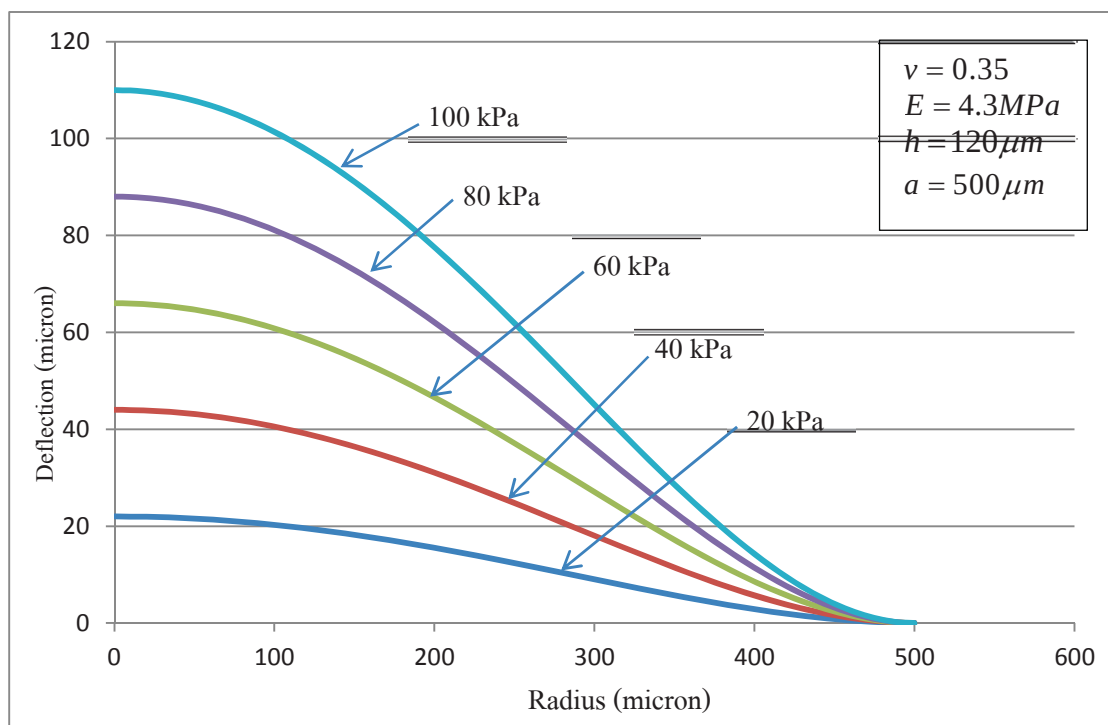
จากกราฟ m มีค่าเท่ากับ 1.0985 แทนค่าในสมการที่ (4.5) โดยกำหนด $\nu = 0.35$ $h = 25\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ $r = 0\mu\text{m}$ จะได้ค่ามอดูลัสของยังของไคอะแฟรม PI เท่ากับ 6.12 GPa ซึ่งค่านี้จะใช้ในการคำนวณเพื่อออกแบบตัวตรวจรู้ความดันต่อไป

4.1.4 การจำลองการโก่งตัวของไคอะแฟรมในกรณีต่าง ๆ

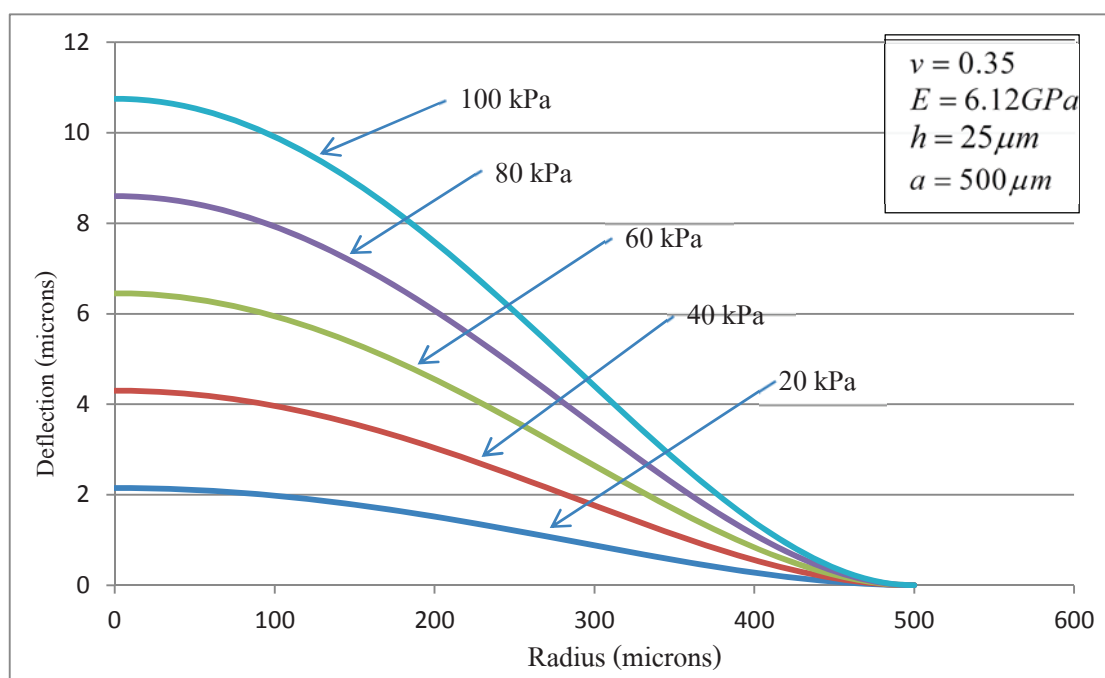
ในการจำลองการโก่งตัวของไคอะแฟรมที่เงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมในการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน ในขั้นตอนแรกจะจำลองผลการโก่งตัวของไคอะแฟรมเนื่องจากความดันของไคอะแฟรม PDMS และ PI โดยจะกำหนดรัศมีของไคอะแฟรมเท่ากับ 500 μm ความดันตั้งแต่ 10 -150 kPa ความหนาของไคอะแฟรม PI เท่ากับ 25 μm และ PDMS เท่ากับ 120 μm ทำการคำนวณตามสมการที่ (4.3) ได้ดังผลตารางที่ 4.3 และกราฟในรูปที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.3 ผลการจำลองระยะโก่งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไคอะแฟรมเมื่อความดันเปลี่ยนแปลง โดยกำหนด $\nu = 0.55$ $E = 4.3\text{MPa}$ $h = 120\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ สำหรับ PDMS และ $\nu = 0.35$ $E = 6.1\text{GPa}$ $h = 25\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ สำหรับ PI

ความดันก๊าซ (kPa)	ระยะการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของไคอะแฟรม (μm)	
	PDMS	PI
10	0.00	1.08
20	11.00	2.15
30	22.00	3.23
40	33.00	4.30
50	44.00	5.38
60	55.00	6.45
70	66.00	7.53
80	77.00	8.60
90	88.00	9.68
100	99.00	10.75
110	110.01	11.83
120	121.01	12.90
130	132.01	13.98
140	143.01	15.06
150	154.01	16.13



รูปที่ 4.6 กราฟผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรม PDMS ที่ความดันต่าง ๆ

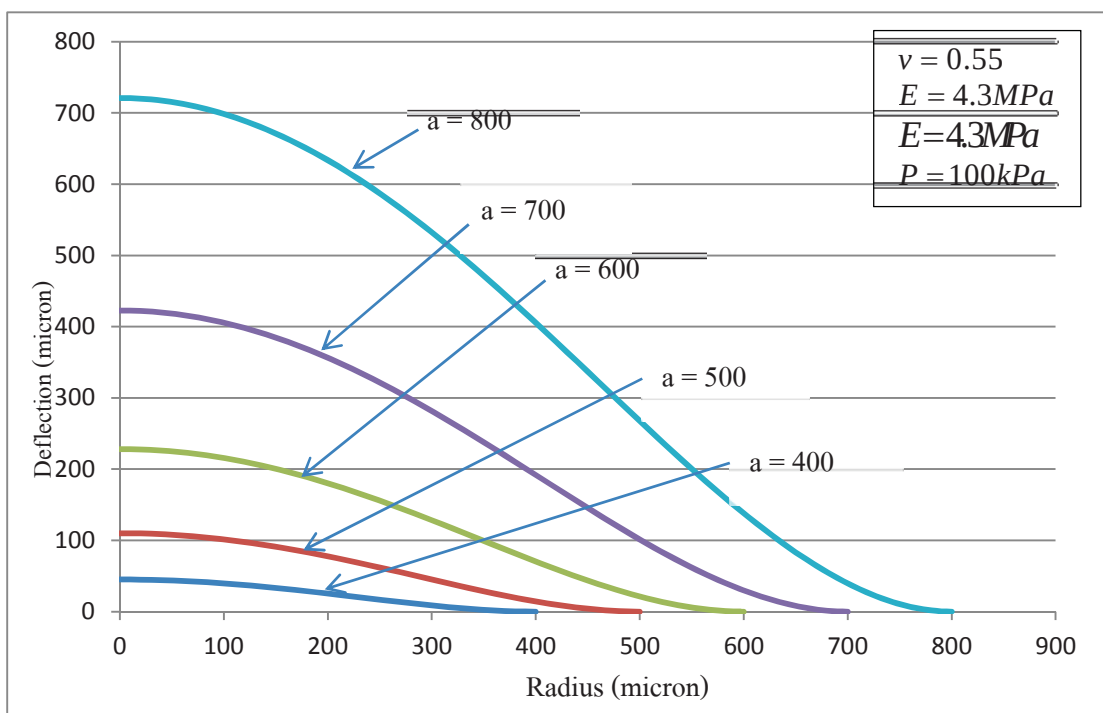


รูปที่ 4.7 กราฟผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่าง ๆ

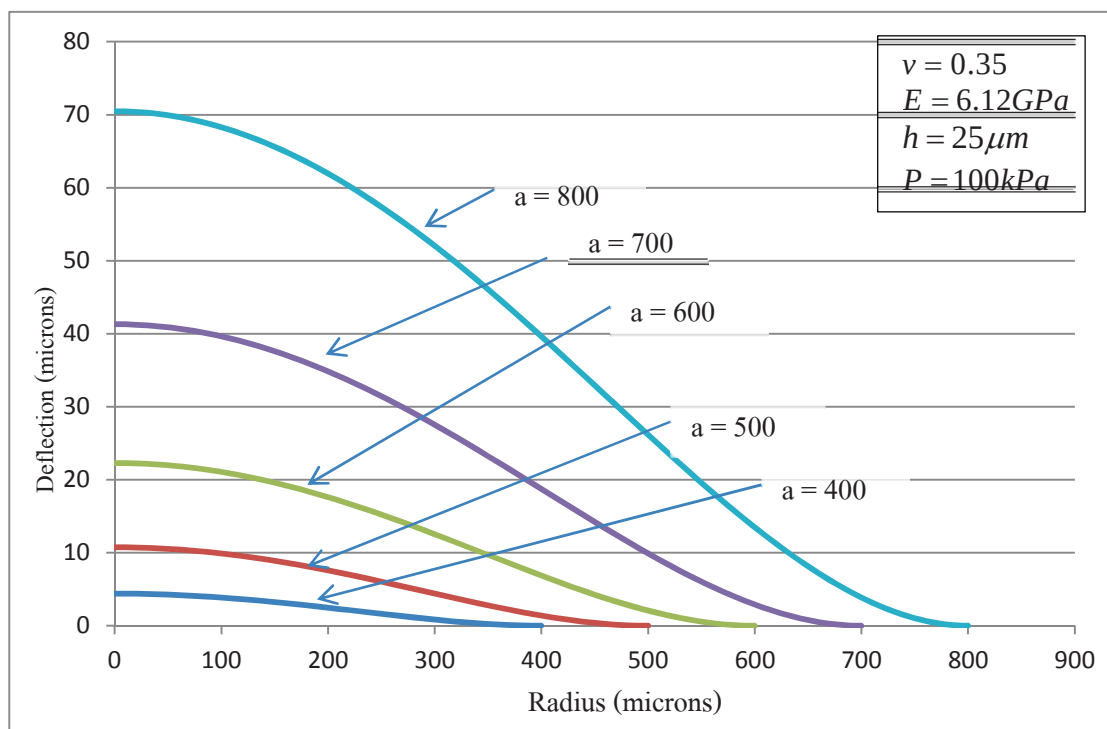
จากผลการจำลองระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมของวัสดุทั้งสองชนิดเมื่อความดันเพิ่มขึ้น พบว่าไดอะแฟรมมีการโก่งตัวเพิ่มขึ้นเช่นกัน และระยะการโก่งตัวจะสูงสุดที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม และลดลงตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลาง นอกจากความดันที่มีผลต่อระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมแล้วขนาดรัศมีของไดอะแฟรม (a) ก็มีผลต่อระยะการโก่งตัวเช่นเดียวกัน ในการจำลองผลของของการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่รัศมีต่างๆ ยังคงใช้สมการที่ (4.3) โดยในการจำลองจะกำหนดความดัน 100 kPa ความหนาของไดอะแฟรม Polyimide (PI) เท่ากับ 25 μm และ Polydimethylsiloxane (PDMS) เท่ากับ 120 μm ทำการคำนวณตามสมการที่ (4.3) ได้ดังตารางที่ 4.4 และกราฟในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.4 ผลการจำลองระยะโก่งตัว ณ จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรมเมื่อความยาวรัศมีต่างกัน

รัศมีไดอะแฟรม (μm)	ระยะการโก่งตัวที่จุดศูนย์กลางของไดอะแฟรม (μm)	
	PDMS	PI
100	0.18	0.02
200	2.82	0.28
300	14.26	1.40
400	45.06	4.42
500	110.01	10.79
600	228.11	22.37
700	422.60	41.45
800	720.93	70.71



รูปที่ 4.8 กราฟผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรม PDMS ซึ่งมีรัศมีขนาดต่าง ๆ

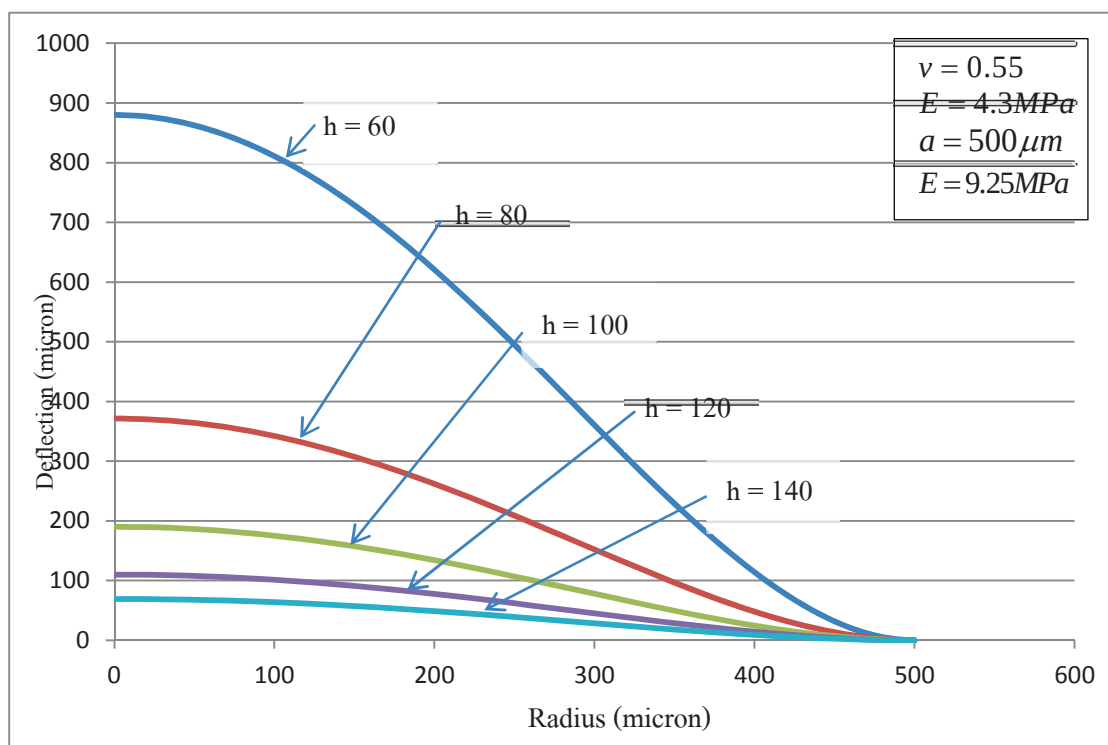


รูปที่ 4.9 กราฟผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI ซึ่งมีรัศมีขนาดต่าง ๆ

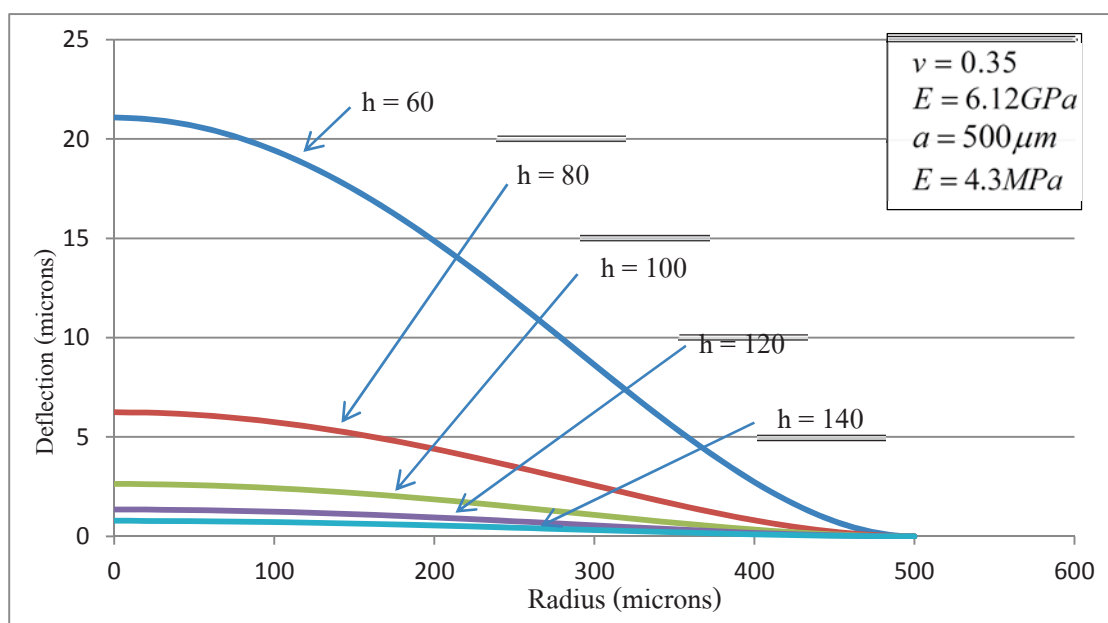
จากผลการจำลองพบว่าที่ความดันเดียวกัน ไคอะแฟรมที่มีรัศมีมากกว่า จะมีระยะการโค้งตัวที่จุดศูนย์กลางมากกว่าไคอะแฟรมที่มีรัศมีน้อย และตัวแปรอีกตัวที่มีผลต่อระยะการโค้งตัวของไคอะแฟรมคือ ความหนาของไคอะแฟรม ในส่วนของการจำลองผลของการโค้งตัวของไคอะแฟรมที่มีความหนาต่างๆ โดยในการจำลองจะกำหนดความดัน 100 kPa ความหนาของไคอะแฟรม PI เท่ากับ 25 μm และ PDMS เท่ากับ 120 μm ทำการคำนวณตามสมการที่ (4.3) ได้ตั้งตารางที่ 4.5 และกราฟดังรูปที่ 4.10 และรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.5 ผลการจำลองระยะ โกงตัว ณ จุดศูนย์กลางของไคอะแฟรมเมื่อความหนาไคอะแฟรมต่างกัน

ความหนาไคอะแฟรม (μm)	ระยะการโค้งตัวที่จุดศูนย์กลางของไคอะแฟรม (μm)	
	PDMS	PI
20	23761.13	21.07214
30	7040.33	6.243596
40	2970.14	2.634017
50	1520.71	1.348617
60	880.04	0.78045
70	554.20	0.491478
80	371.27	0.329252
90	260.75	0.231244
100	190.09	0.168577
110	142.82	0.126654
120	110.01	0.097556



รูปที่ 4.10 กราฟผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรม PDMS ซึ่งมีความหนาต่าง ๆ

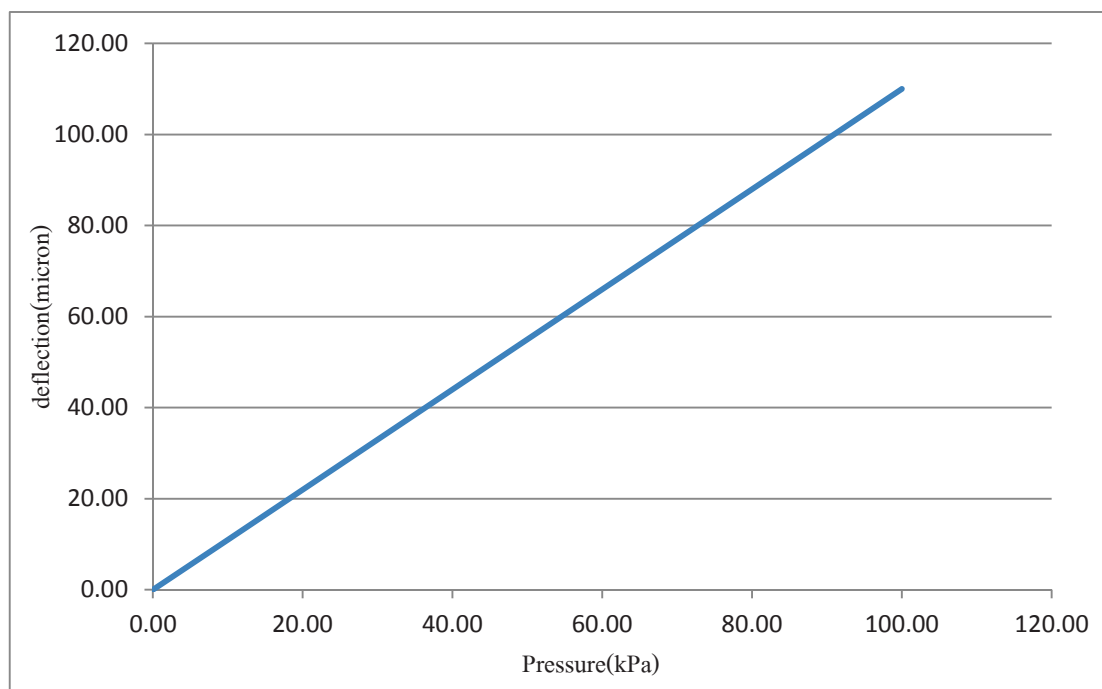


รูปที่ 4.11 กราฟผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI ซึ่งมีความหนาต่าง ๆ

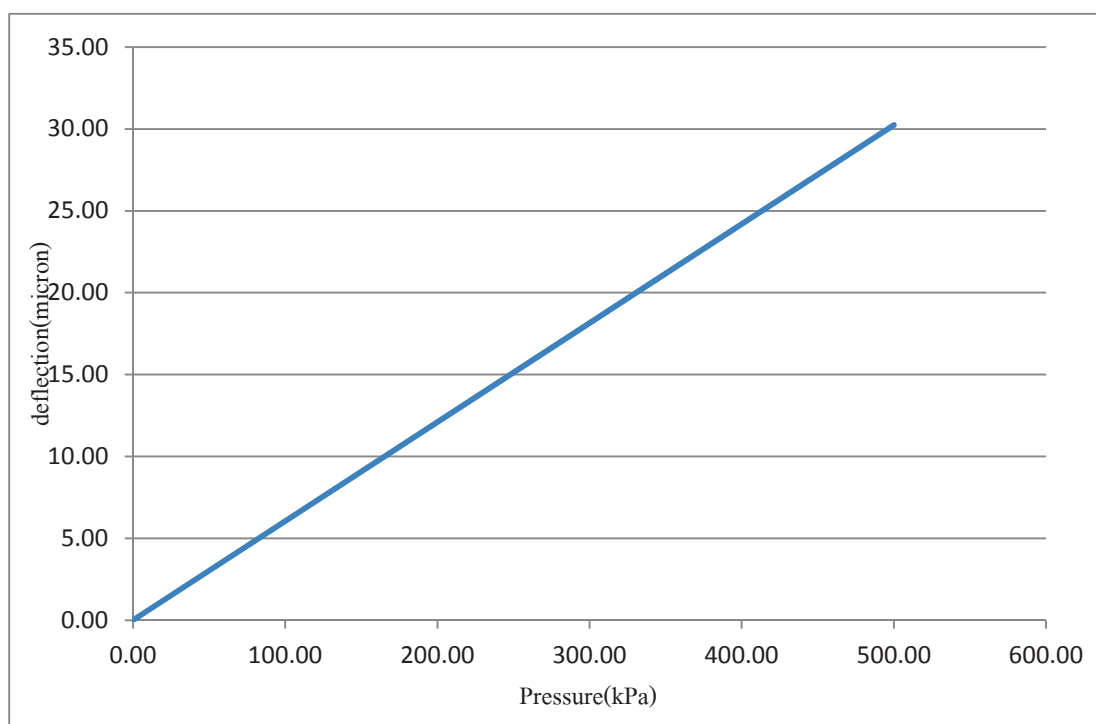
จากการจำลองผลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความไวของตัวตรวจวัดสามารถสรุปได้ดังนี้ ผลของความดันที่มีผลต่อระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมของวัสดุทั้งสองชนิด พบว่า ไดอะแฟรมที่เป็น PDMS ที่ความหนา 120 μm มีระยะการโก่งตัวค่อนข้างมาก เนื่องจากค่ามอดุลัสของยังมีค่าน้อย จึงเหมาะกับการตรวจวัดความดันในย่านต่ำๆ ส่วนไดอะแฟรมที่เป็น PI ที่ความหนา 25 μm มีระยะการโก่งตัวค่อนข้างน้อยมาก จึงเหมาะกับการวัดความดันในย่านสูงๆ ในส่วนของการจำลองความยาวรัศมีที่มีผลต่อระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม จากการพบว่า ไดอะแฟรมที่มีความยาวรัศมีมากกว่า จะมีระยะการโก่งตัวมากกว่าไดอะแฟรมที่มีความยาวรัศมีน้อย และการจำลองความหนาของไดอะแฟรมที่มีผลต่อระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม พบว่าไดอะแฟรมที่มีความหนามาก จะมีระยะการโก่งตัวน้อยกว่าไดอะแฟรมที่มีความหนาน้อย

จากผลการจำลอง จะทำการเลือกความหนาของไดอะแฟรม และ ระยะห่างรัศมี โดยที่ไดอะแฟรมที่เป็น PDMS จะเลือกความหนาที่ 120 μm เนื่องจากเป็นความหนาที่เหมาะสม มีระยะการโก่งตัวมากพอประมาณ และถ้าออกแบบให้มีความหนาน้อยกว่านี้อาจจะเกิดความเสียหายต่อไดอะแฟรมได้เนื่องจากคุณสมบัติของ PDMS ที่มีความอ่อนตัวสูง ส่วน PI จะเลือกความหนาที่ 25 μm เนื่องจากมีความหนาที่เหมาะสม มีระยะการโก่งตัวมากพอสมควร ถ้าใช้หนามากกว่านี้ระยะการโก่งตัวจะน้อย อาจจะตรวจวัดความดันในย่านต่ำไม่ได้ และ PI ที่มีขายทั่วไปและมีราคาค่อนข้างต่ำ จะมีความหนา 25 μm 60 μm และ 120 μm ถ้าเลือกใช้ความหนานอกเหนือจากนี้จะเป็นการยุ่งยากในการสร้าง ในส่วนของความยาวรัศมีของไดอะแฟรม โดยไดอะแฟรมที่ทำจากวัสดุทั้งสองชนิด จะเลือกขนาดความยาวรัศมีเท่ากันที่ 500 μm หรือเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm เนื่องจากเป็นระยะที่การโก่งตัวของวัสดุทั้งสองชนิดมีความเหมาะสมที่สุดคือ PDMS มีระยะการโก่งตัวไม่มากเกินไปและ PI มีระยะการโก่งตัวไม่น้อยเกินไป เพื่อที่จะสามารถสร้างตัวตรวจวัดที่ใช้วัสดุแตกต่างกัน สามารถสร้างด้วยกระบวนการเดียวกันได้จึงต้องออกแบบให้ตัวตรวจวัดที่ใช้วัสดุแตกต่างกันทั้งสองชนิดมีความยาวรัศมีเท่ากัน เพื่อเป็นการลดเวลาในการสร้างและประหยัดงบประมาณในการสร้างอีกด้วย

เมื่อทำการจำลองและออกแบบไดอะแฟรมแล้วในหัวข้อต่อไปจะเป็นการออกแบบโครงสร้างของตัวเก็บประจุที่จะนำมาติดที่ไดอะแฟรม สามารถจำลองผลการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI โดยกำหนด $\nu = 0.35$ $h = 25\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ $A = 0.12 \times 10^{-6}$ ผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 4.12 ส่วน ไดอะแฟรมที่เป็น PDMS จะกำหนด $\nu = 0.55$ $h = 100\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ $A = 0.12 \times 10^{-6}$ ผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 4.13



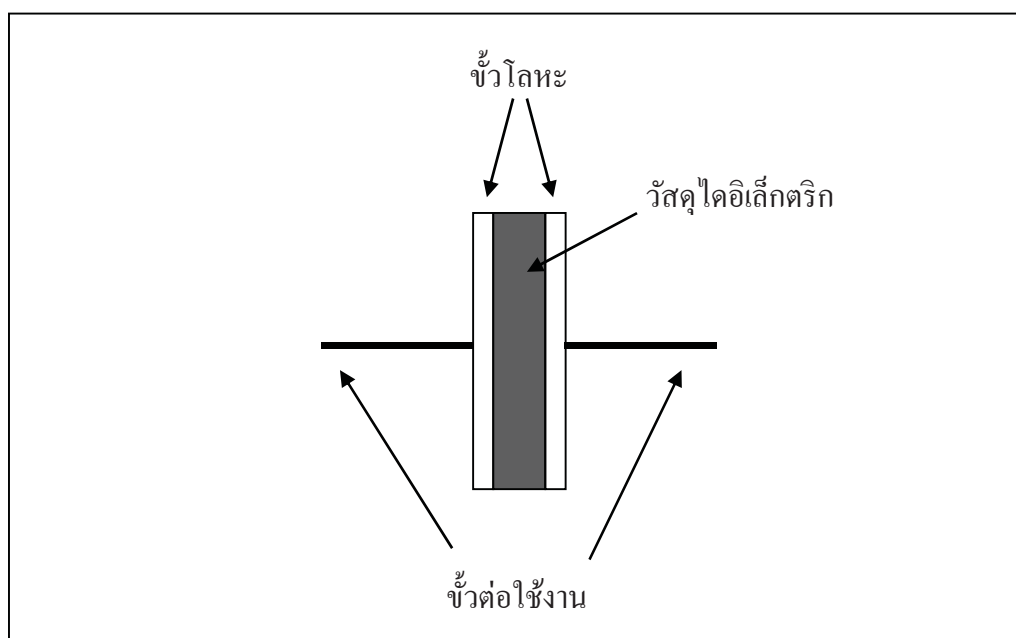
รูปที่ 4.12 ผลการจำลองการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม PDMS ที่ความดันต่าง ๆ



รูปที่ 4.13 ผลการจำลองการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม PI ที่ความดันต่าง ๆ

4.2 การออกแบบโครงสร้างและการสร้างตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่ง ทำหน้าที่เก็บพลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นระหว่างแผ่นโลหะสองแผ่น โดยมีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากันแต่มีชนิดของขั้วตรงข้ามกัน ตัวเก็บประจุ เป็นอุปกรณ์พื้นฐานสำคัญในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และพบได้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์แทบทุกวงจร ในส่วนของโครงสร้างของตัวเก็บประจุจะประกอบด้วยแผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกัน และคั่นด้วยวัสดุ ไดอิเล็กทริก (dielectric) ซึ่งทำด้วยฉนวนไฟฟ้า เช่น กระดาษ ไมก้า เซรามิก หรืออากาศ โครงสร้างของตัวเก็บประจุมีลักษณะดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุ

หน่วยวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุคือ ฟารัด (Farad,F) จากโครงสร้างของตัวเก็บประจุในรูปที่ สามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าได้จากสมการที่ (4.5)

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (4.5)$$

โดยที่ C คือ ค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น ฟารัด (F)

ϵ_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี (Permittivity) ของสุญญากาศอากาศ มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

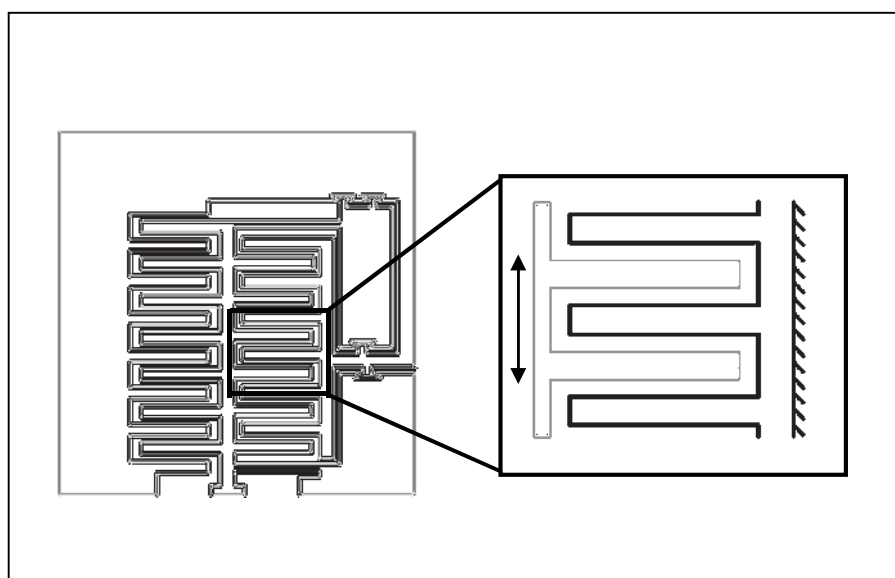
ϵ_r คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของวัสดุไดอิเล็กตริก

A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะที่ขนานกัน

d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะที่ขนานกัน

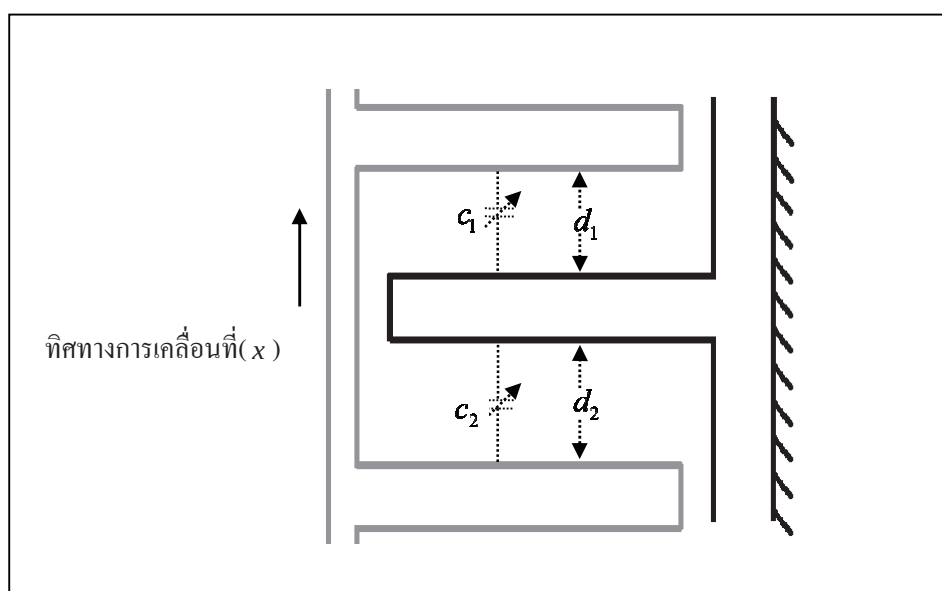
จากสมการที่ (4.10) พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของวัสดุไดอิเล็กตริก พื้นที่ของแผ่นโลหะที่ขนานกัน และ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะที่ขนานกัน จากหัวข้อที่แล้วได้ทำการจำลองผลการโค้งตัวของไดอะแฟรม ต่อมาจะทำการออกแบบตัวเก็บประจุแบบปรับเปลี่ยนค่าได้ เพื่อที่จะติดตั้งบนแผ่นไดอะแฟรม ในส่วนของการออกแบบตัวเก็บประจุแบบปรับค่าได้ จากสมการที่ (4.10) ตัวแปรที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าโดยมีความสัมพันธ์กันระยะการโค้งตัวของไดอะแฟรมที่มีผลมากที่สุดคือ ระยะห่างระหว่างแผ่นโลหะที่ขนานกัน (d) โดยมีพื้นที่ของขั้วโลหะเป็นค่าคงที่ และมีไดอิเล็กตริกเป็นอากาศ

ในการออกแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุ จะออกแบบโครงสร้างที่สามารถติดตั้งบนแผ่นไดอะแฟรมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 mm ได้ ตัวเก็บประจุดังกล่าวนี้จะออกแบบและสร้างขึ้นด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโธกราฟี โครงสร้างที่ออกแบบจะมีลักษณะเป็นแบบซี่หวี เพื่อให้ได้จำนวนตัวเก็บประจุหลายตัวซึ่งจะส่งผลให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่มากขึ้น และมีผลต่อความไวของตัวตรวจรู้ด้วย เนื่องจากจำนวนตัวเก็บประจุที่มากขึ้นจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน โครงสร้างของตัวเก็บประจุที่ต้องการสร้างมีลักษณะดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุ

จากรูปที่ 4.15 ตัวเก็บประจุที่ออกแบบจะมีตัวเก็บประจุย่อยอยู่ทั้งหมด 26 ตัว โดยมีแกนกลางที่จะติดอยู่กับไดอะแฟรม เมื่อไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวจะทำให้แกนของตัวเก็บประจุเคลื่อนที่ ระยะห่างของแผ่นโลหะ (d) เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัวเปลี่ยนไป โดยตัวเก็บประจุจะวางอยู่ในลักษณะที่เป็นคู่ เมื่อแกนของตัวเก็บประจุมีการเคลื่อนที่ระยะห่าง (d) ของตัวเก็บประจุทั้งสองตัวที่อยู่คู่กันจะมีทิศทางตรงข้ามกัน คือ เมื่อระยะตัวห่างตัวหนึ่งเพิ่ม อีกตัวก็จะลดลง ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะของตัวเก็บประจุสองตัวที่อยู่ตรงข้ามกัน

จากรูปที่ 4.16 ในกรณีที่ไม่มี การเคลื่อนที่ระยะห่าง d_1 จะเท่ากับ d_2 ซึ่งจะออกแบบให้มีขนาด $60\ \mu\text{m}$ ดังนั้น จะสามารถความสัมพันธ์ระหว่าง d_1 กับ d_2 ได้คือ

$$d_1 + d_2 = 60\ \mu\text{m} + 60\ \mu\text{m} \quad (4.6)$$

ดังนั้น

$$d_2 = 100\ \mu\text{m} - d_1 \quad (4.7)$$

กำหนดให้ x แทนระยะการเคลื่อนที่ของแกนตัวเก็บประจุ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ d_1 และ d_2 โดยตรงคือ

$$d_1 = 60\mu m - x \quad (4.8)$$

ดังนั้น

$$d_2 = 60\mu m + x \quad (4.9)$$

จากรูปที่ 4.15 จะเห็นได้ว่าตัวเก็บประจุ c_1 และ c_2 ต่อขนานกัน ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าของแต่ละตัวได้จากสมการที่ (4.5) แต่เนื่องจากตัวเก็บประจุต่อขนานกันอยู่ ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มีค่าดังสมการที่ (4.10)

$$C = c_1 + c_2 \quad (4.10)$$

โดยที่

$$c_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_1} \quad (4.11)$$

$$c_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d_2} \quad (4.12)$$

แทนสมการที่ (4.8) ในสมการที่ (4.11) และแทนสมการที่ (4.9) ในสมการที่ (4.12) จะได้

$$c_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{60\mu m - x} \quad (4.13)$$

$$c_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{60\mu m + x} \quad (4.14)$$

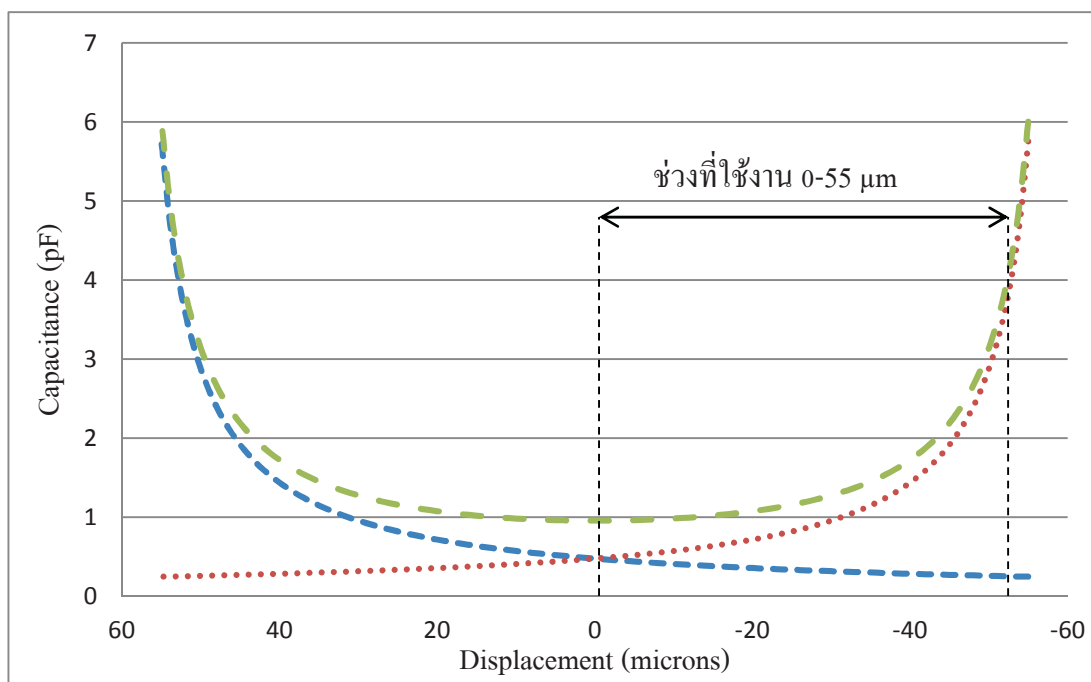
ในการออกแบบจะมีตัวเก็บประจุ c_1 ทั้งหมด 13 ตัว และตัวเก็บประจุ c_2 ทั้งหมด 13 ตัว ดังนั้นสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้ารวมทั้งหมด ดังสมการที่ (4.15)

$$c = 13 \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{60 \mu m - x} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{60 \mu m + x} \right) \quad (4.15)$$

เมื่อได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวเก็บประจุแล้ว จากนั้นจะทำการจำลองผลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ (4.20) โดยกำหนดให้ความหนาของตัวเก็บประจุเท่ากับ $500 \mu m$ พื้นที่ของแผ่นโลหะขนาน (A) เป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดยาวด้านละ $500 \mu m$ จึงมีพื้นที่เท่ากับ $0.25 \times 10^{-6} m^2$ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศอากาศ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} F/m$ ค่าเปอร์มิตติวิตีของอากาศ $\epsilon_r = 1$ กำหนดหนดระยะเคลื่อนที่ x ตั้งแต่ $0 - 55 \mu m$ ทำการคำนวณตามสมการที่ (4.15) จะได้ผลการจำลองดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.17

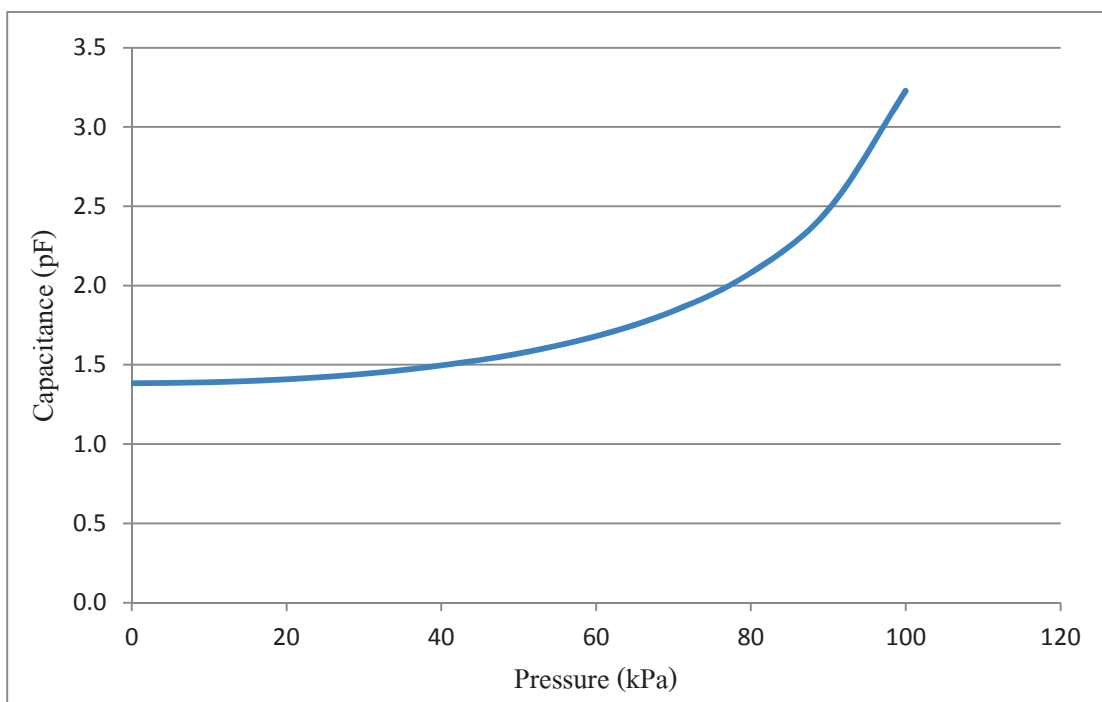
ตารางที่ 4.6 ผลการจำลองค่าความจุไฟฟ้าที่ระยะห่าง x ต่าง ๆ โดยใช้สมการที่ (4.20)

ระยะห่าง (μm)	ค่าความจุไฟฟ้า (pF)
0	0.9592
5	0.9659
10	0.9866
12	1.0231
20	1.0791
25	1.1607
30	1.2789
35	1.4539
40	1.7265
45	2.1924
50	3.1391
55	6.0053

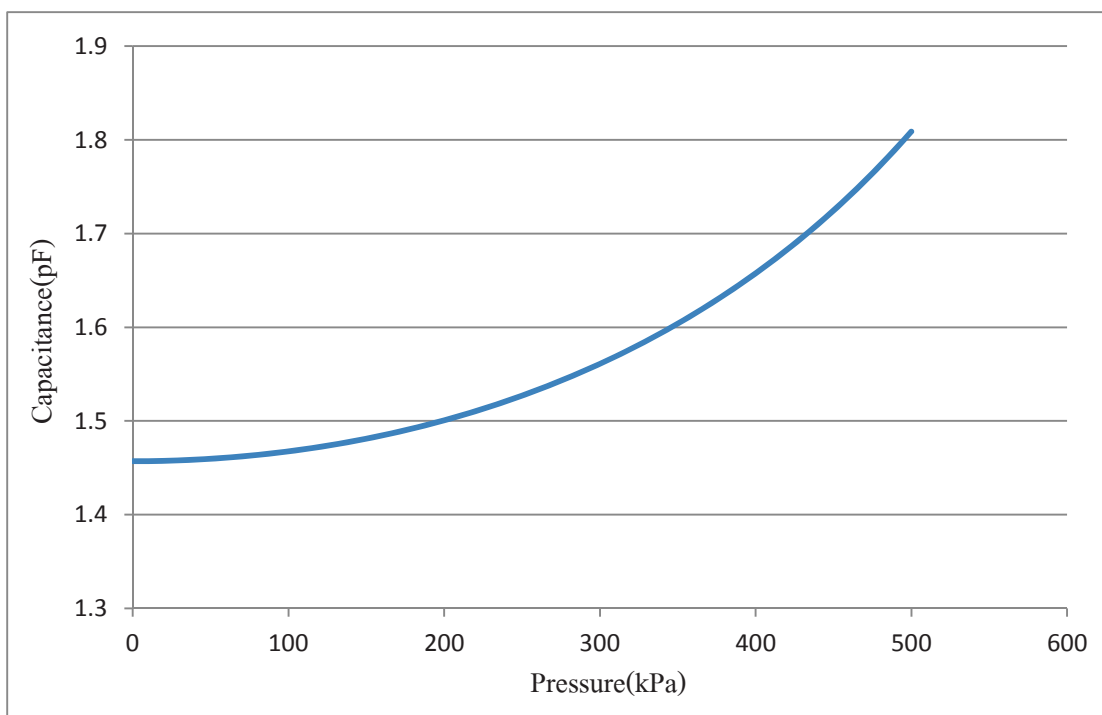


รูปที่ 4.17 ค่าความจุไฟฟ้าที่ระยะการเคลื่อนที่ต่าง ๆ

จากการจำลองการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่ระยะต่างๆจากรูปที่ 4.18 จากการกำหนดระยะการเคลื่อนที่ 0 - 55 μm เมื่อนำโครงสร้างของตัวเก็บประจุที่ออกแบบไปติดตั้งบนไดอะแฟรมระยะการเคลื่อนที่ของแกนตัวเก็บประจุ จะขึ้นกับระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมดังสมการที่ (4.9) เมื่อนำระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมมาแทนในสมการที่ (4.20) จะได้สมการที่มีอินพุตเป็นความดันและเอาต์พุตเป็นค่าความจุไฟฟ้า โดยมีผลการจำลองของไดอะแฟรมที่เป็น PDMS ดังรูปที่ 4.18 และไดอะแฟรมที่เป็น PI ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.18 ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความดันก๊าซของไดอะแฟรม PDMS



รูปที่ 4.19 ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความดันก๊าซของไดอะแฟรม PI

จากการจำลองผลการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าเนื่องจากความดันของไดอะแฟรมทั้งสองชนิด พบว่าไดอะแฟรมที่เป็น PDMS มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าค่อนข้างมาก มีความไวหรือเฉลี่ยที่ 18.5 fF/kPa ส่วนไดอะแฟรมที่เป็น PI มีความไวเฉลี่ยที่ 0.1407 fF/kPa และอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดต่อค่าความจุไฟฟ้าตั้งต้นของไดอะแฟรม PDMS เท่ากับ 133.39 % และตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI เท่ากับ 24.15 %

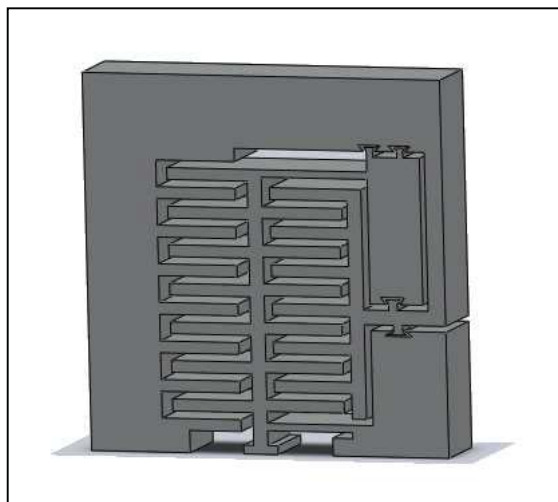
4.3 สรุป

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบตัวตรวจรู้ความดัน ในขั้นแรกจะทำการทดสอบหาค่ามอดูลัสของยังโดยการติดตั้งไดอะแฟรมบนช่องเปิด จากนั้นทดสอบการโก่งตัวโดยการป้อนความดันต่างๆ และวัดระยะการโก่งตัว คำนวณค่ามอดูลัสของยังโดยใช้สมการที่ (4.3) เมื่อได้ค่ามอดูลัสของยังแล้วต่อไปจะเริ่มจากการออกแบบขนาดของไดอะแฟรมทั้งสองชนิด โดยเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไดอะแฟรม 1 mm ความหนาของไดอะแฟรม PDMS เท่ากับ 120 μm ความหนาของไดอะแฟรม PI เท่ากับ 60 μm ต่อมาทำการออกแบบโครงสร้างตัวเก็บประจุที่นำไปติดตั้งบนไดอะแฟรม โดยมีตัวเก็บประจุอยู่ภายในทั้งหมด 26 ตัว โดยแบ่งออกเป็น 13 คู่ ระยะการเคลื่อนที่ของตัวเก็บประจุ 55 μm ค่าความจุไฟฟ้าที่ได้อยู่ในช่วง 0.9592 – 6.0053 pF ไดอะแฟรม PDMS มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความดันค่อนข้างสูง เหมาะกับการวัดความดันในย่านต่ำ ส่วนไดอะแฟรม PI มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความดันที่ค่อนข้างต่ำจึงเหมาะกับการนำมาใช้งานในย่านความดันสูง เมื่อทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อออกแบบลักษณะโครงสร้างแล้ว ในบทที่ 5 จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างโครงสร้างตัวตรวจรู้ความดันตั้งแต่การวาดลวดลายขนาดเล็กไปจนถึงกระบวนการสุดท้ายของการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน

บทที่ 5

การสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

โครงสร้างของตัวเก็บประจุที่ทำการออกแบบและจำลองผลโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สามารถจำลองโครงสร้างที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม SolidWork สร้างแบบจำลองตามมิติของโครงสร้างก่อนที่จะทำการสร้างจริง ซึ่งผลการจำลองโครงสร้างมีลักษณะดังรูปที่ 5.1 โดยส่วนของโครงสร้างจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนซึ่งเป็นขั้วของตัวเก็บประจุโดยจะไม่เชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า โดยจะใช้กาวอีพอกซีที่ซึ่งเป็นฉนวนไฟฟ้าในการยึดให้โครงสร้างนำไฟฟ้าทั้งสองส่วนติดกัน

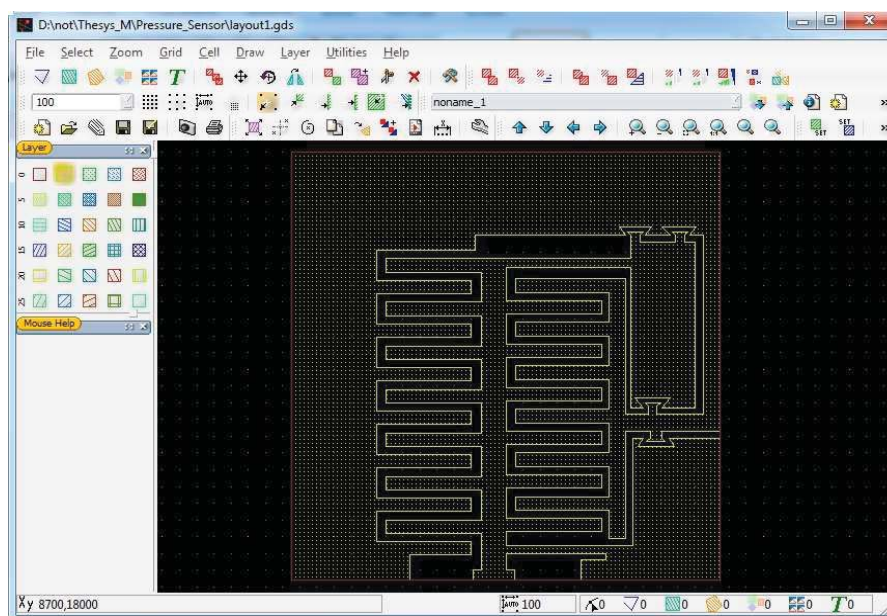


รูปที่ 5.1 แสดงการจำลองโครงสร้างสามมิติของตัวเก็บประจุ

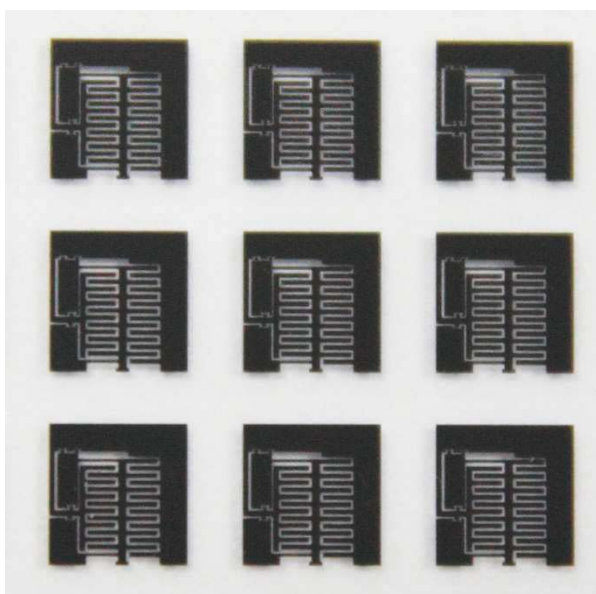
5.1 การวาดลวดลายจุลภาค

การวาดลวดลายของโครงสร้างจุลภาคเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างโครงสร้าง ลัดส่วนสูงด้วยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ในการวาดลวดลายขนาดเล็กสำหรับกระบวนการดังกล่าว จะทำการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ชื่อว่า Layout editor ซึ่งเป็น โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถออกแบบลวดลายขนาดเล็กระดับไมโครเมตรได้ ซึ่งมีหน้าต่างโปรแกรมดังรูปที่ 5.2 เมื่อทำการวาดลวดลายเสร็จสิ้น จากนั้นจะทำการแปลงไฟล์ให้อยู่ในรูปของไฟล์โพสต์สคริปต์ (Postscript : ps) โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ LinkCAD เพื่อทำการพิมพ์ลวดลายที่

ออกแบบลงบนแผ่นฟิล์ม เพื่อใช้เป็นหน้ากากกั้นแสงอัลตราไวโอเล็ต ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งจะมีส่วนที่โปร่งแสง และส่วนที่ทึบแสง ซึ่งจะนำไปใช้ในกระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ต่อไป



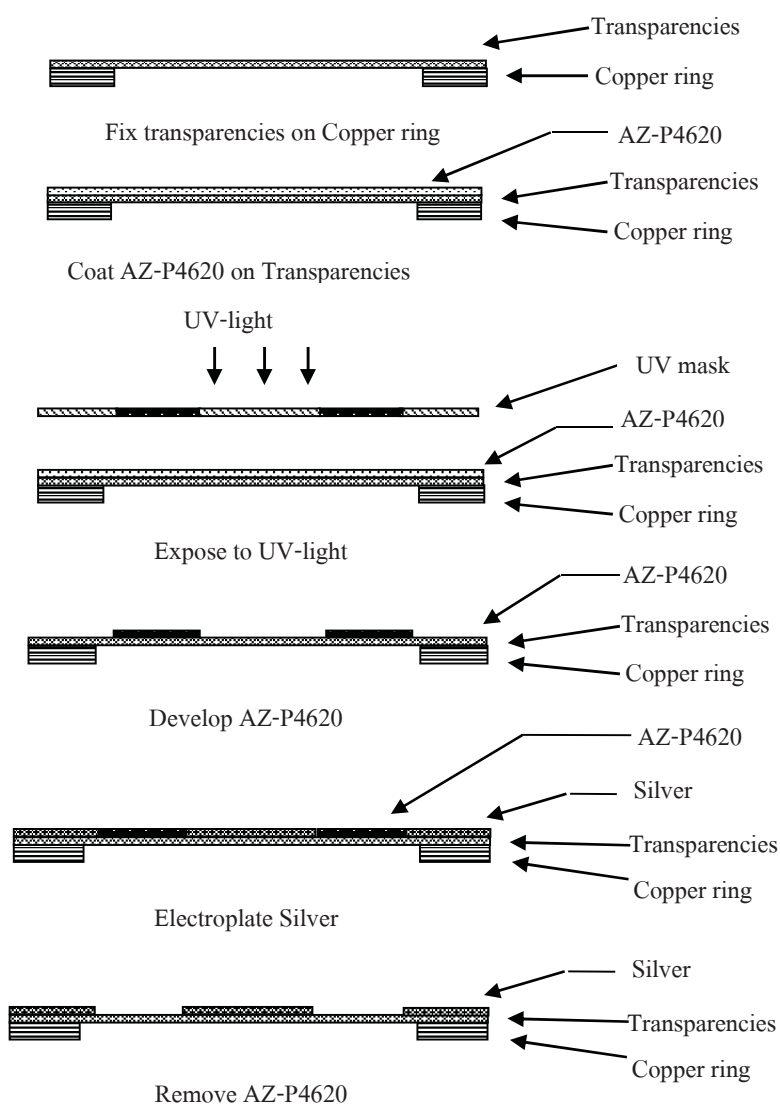
รูปที่ 5.2 หน้าต่างโปรแกรม Layout editor สำหรับวาดลวดลายจุลภาค



รูปที่ 5.3 หน้ากากลวดลายทึบแสงสำหรับกั้นแสงอัลตราไวโอเล็ต

5.2 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นวัสดุฐาน

หน้ากากกันรังสีเอกซ์มีความสำคัญในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์เป็นอย่างมาก เนื่องจากโครงสร้างที่สร้างด้วยกระบวนการนี้ จะต้องทำการฉายแสงเอกซเรย์บนชิ้นงาน โดยมี หน้ากากกันรังสีเอกซ์เป็นตัวดูดซับแสงเอกซเรย์ในบริเวณที่ไม่ต้องการใช้ชิ้นงานถูกฉายด้วยแสงเอกซเรย์เพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ หน้ากากกันรังสีเอกซ์จะทำจากวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับรังสีเอกซ์ เช่น โลหะทองคำ โลหะเงิน ตะกั่ว เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ จะใช้โลหะเงินเป็นวัสดุดูดซับรังสีเอกซ์ ในการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ เนื่องจากเป็นโลหะมีราคาถูกกว่าทองคำและสามารถสร้างลวดลายโลหะเงินด้วยการบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า กระบวนการสร้างเป็นดังรูปที่ 5.4



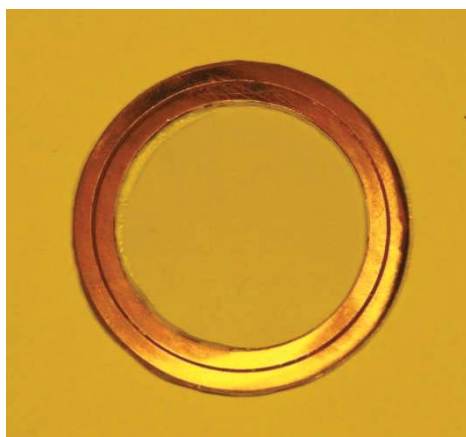
รูปที่ 5.4 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นวัสดุฐาน

จากรูปที่ 5.4 สามารถอธิบายกระบวนการโดยย่อได้ดังนี้

1. เคลือบโลหะชั้นฐานลงบนพอลิอิมิด์ที่ติดบนวงแหวนทองแดงด้วยโลหะไทเทเนียมและเงินตามลำดับ
2. หมุนเคลือบสารไวแสงชนิดบวกลงบนฐาน
3. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากที่เป็นฟิล์มที่บดแสงลงไปบนสารไวแสงเพื่อสร้างลวดลายบนสารไวแสง แล้วสารสารไวแสงบริเวณที่ถูกฉายด้วยแสงทิ้งไป
4. ชุบโลหะเงินเพื่อเป็นวัสดุชุบรังสี
5. กัดโลหะชั้นฐานที่เป็นโลหะไทเทเนียมและโลหะเงินทิ้งไป

5.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองพอลิอิมิด์เคลือบโลหะ

โดยการนำวงแหวนทองแดงมาขัดทำความสะอาดแล้วนำแผ่นพอลิอิมิด์ติดกับวงแหวนด้วยกาวอีพอกซี ดังรูปที่ 5.5(ก) จากนั้นทำความสะอาดแผ่นพอลิอิมิด์โดยใช้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) ชุบสำลีแล้วเช็ดทำความสะอาดบริเวณผิวหน้าของแผ่นพอลิอิมิด์ หลังจากเช็ดด้วยสำลีแล้ว ทิ้งไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์อีกครั้ง แล้วจุ่มลงในน้ำสะอาด เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน และอบที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 3 นาที จากนั้นก็ทำการเคลือบโลหะไทเทเนียมและเงินที่ความหนา $300 \text{ \AA}$ และ $500 \text{ \AA}$ ตามลำดับ ดังรูปที่ 5.5(ข) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะแบบระเหยในสุญญากาศ (Thermal evaporator) ที่ความดันสุญญากาศประมาณ $4 \times 10^{-5} \text{ torr}$



(ก)

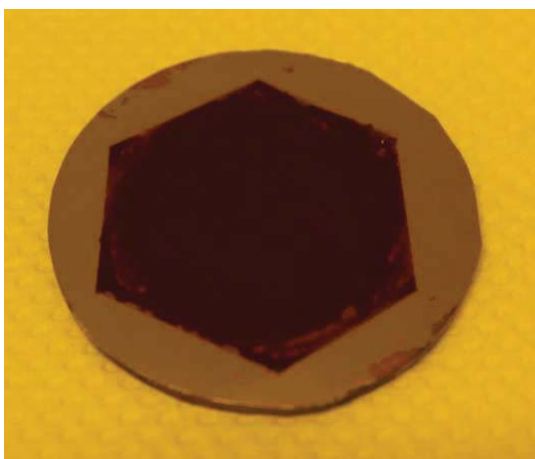


(ข)

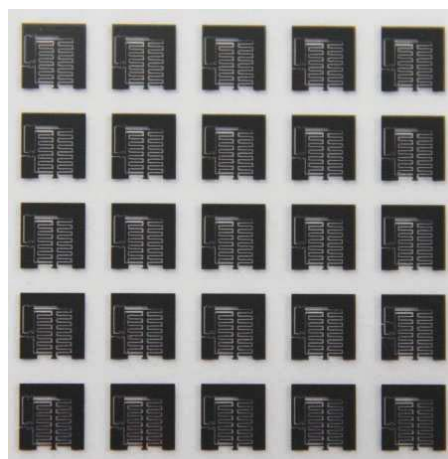
รูปที่ 5.5 แผ่นพอลิอิมิด์เคลือบโลหะสำหรับสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ขนาด 1.5 นิ้ว (ก) ก่อนเคลือบโลหะไทเทเนียม/เงิน (ข) หลังเคลือบโลหะไทเทเนียม/เงิน

5.2.2 การเคลือบสารไวแสงชนิดบวกลงบนฐานรองและการถ่ายทอดลวดลายลงบนสารไวแสง

หลังจากการเตรียมฐานรองเคลือบโลหะเรียบเรียบร้อยแล้ว ต่อมาเป็นการเคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ-4620 ลงบนฐานรอง โดยการหมุนเคลือบด้วยเครื่องหมุนเคลือบ Laurell รุ่น WS-400B-6NPP/LIT ที่ความเร็ว 400 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และ 500 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ตามลำดับ โดยจะได้ความหนาประมาณ $30\text{ }\mu\text{m}$ ในการหมุนเคลือบสารไวแสงต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศในสารไวแสงเพราะจะทำให้เกิดลวดลายที่ไม่ต้องการบนสารไวแสง ซึ่งอาจจะเกิดปัญหาในกระบวนการชุบโลหะได้ จากนั้นอบที่อุณหภูมิ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำออกจากเตาอบทันทีแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้องเพื่อให้ความชื้นภายนอกซึมเข้าไปในสารไวแสง ป้องกันไม่ให้สารไวแสงแข็งตัวจนเปราะและแตกง่าย จะได้ฐานรองเคลือบสารไวแสงดังรูปที่ 5.6(ก) จากนั้น ทำการถ่ายทอดลวดลายจากฟิล์มที่มีลวดลายทึบแสง ดังรูปที่ 5.6(ข) โดยการใช้ฟิล์มทึบแสงเป็นหน้ากากแล้วฉายแสงอัลตราไวโอเลตจากเครื่อง Quintel รุ่น Q 4000 เป็นเวลา 180 วินาที ที่ความเข้มแสง 18.4 mW/cm^2 ได้พลังงานสะสมที่ตกกระทบสารไวแสงเท่ากับ 3312 mJ/cm^2 สารไวแสงที่ถูกฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเลตจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.7(d) จากนั้นทำการล้างสารไวแสงบริเวณที่ถูกฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเลต โดยใช้สารเคมีที่มีส่วนผสมระหว่าง $\text{KOH}:\text{H}_3\text{BO}_3:\text{H}_2\text{O}$ อัตราส่วนเท่ากับ 4g:1g:200ml ตามลำดับ เป็นเวลาประมาณ 5 นาที แล้วล้างด้วยน้ำป้อนได้ออนแล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จะได้ลวดลายของสารไวแสงดังรูปที่ 5.7(ข)

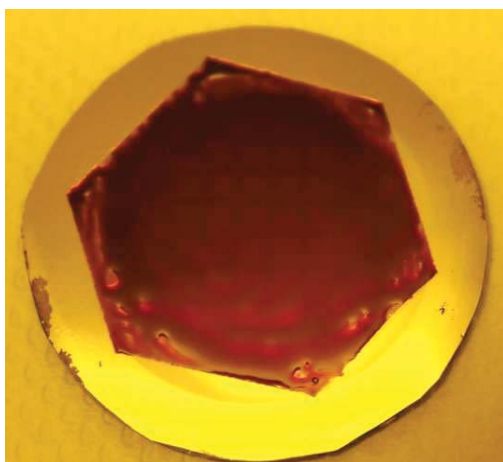


(ก)

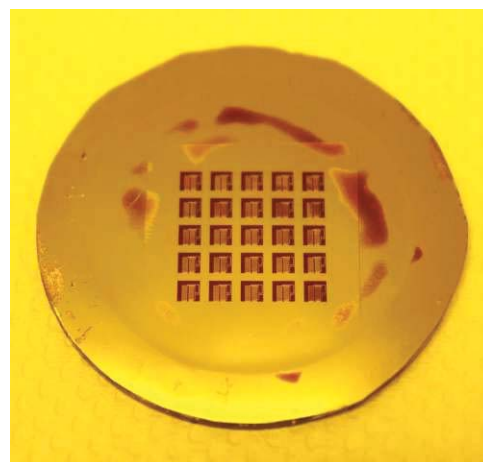


(ข)

รูปที่ 5.6 การเตรียมสารไวแสงและฟิล์มทึบแสงสำหรับสร้างลวดลายบนสารไวแสง (ก) สารไวแสงบนที่เคลือบบนแผ่นใสเคลือบโลหะ (ข) ฟิล์มทึบแสงที่ใช้เป็นแบบถ่ายทอดลวดลาย



(ก)



(ข)

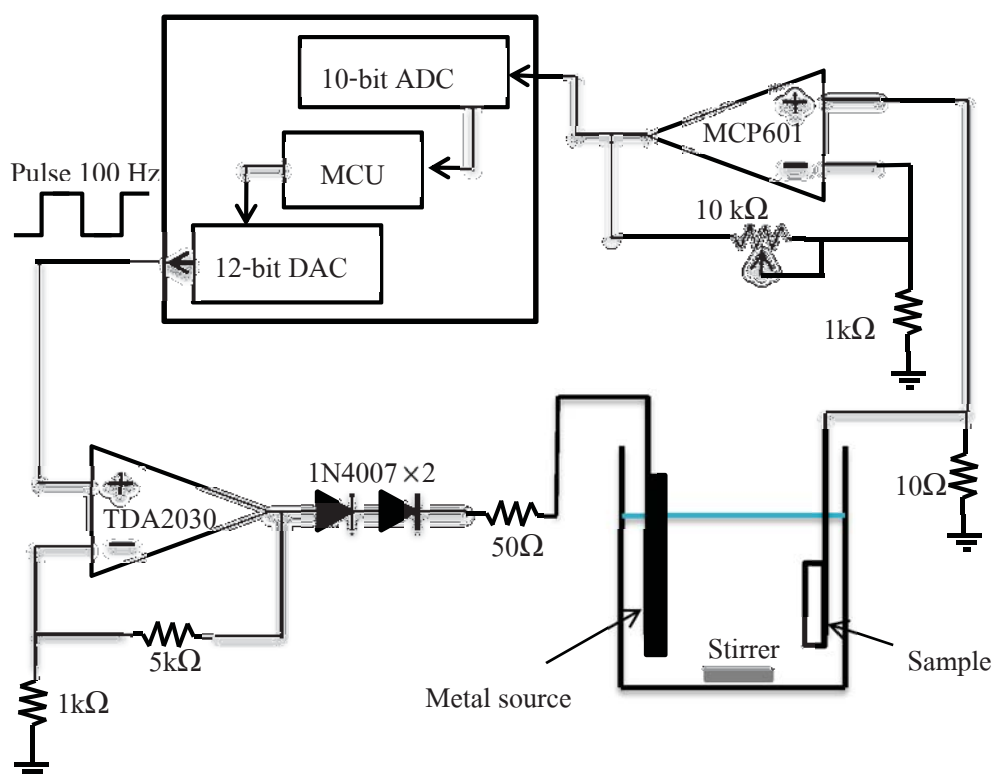
รูปที่ 5.7 การสร้างลวดลายบนสารไวแสงบนแผ่นใสเคลือบโลหะขนาด 1.5 นิ้ว(ก) ฐานรองที่เคลือบสารไวแสง (ข) फिल्मที่บ่มแสงสำหรับกันแสง UV (ค) สารไวแสงที่ถูกฉายด้วยแสงUV (ง) ลวดลายสารไวแสงที่ล้างสารไวแสงแล้ว

5.2.3 การสร้างวัสดุอุดขั้วรังสีเอกซ์โดยใช้โลหะเงินจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

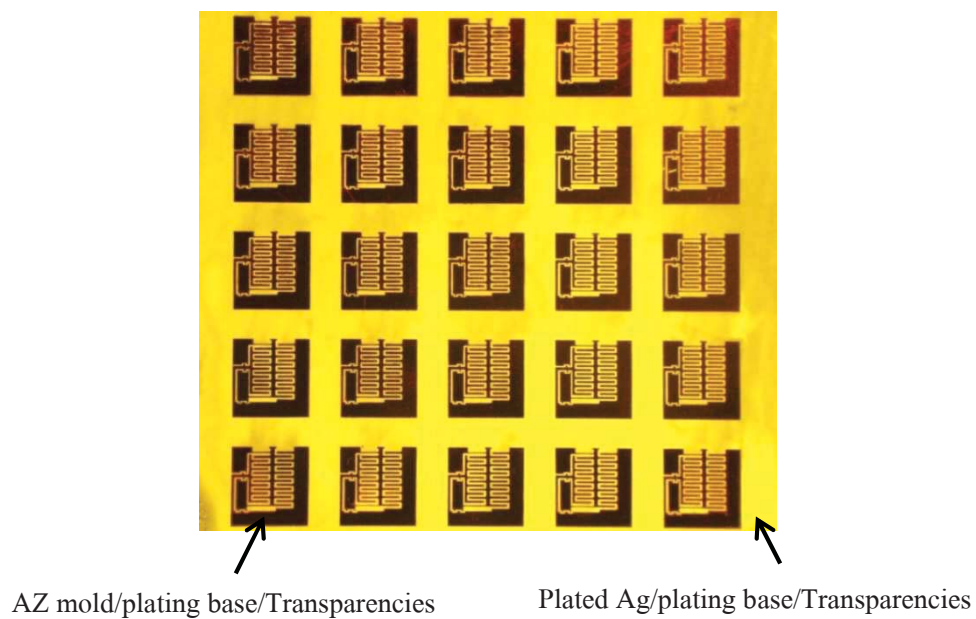
เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการลิโทกราฟีกระบวนการต่อมาคือการชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้าโดยใช้สารละลายเงินที่เตรียมไว้ในกระบวนการชุบโลหะจะใช้แท่งแพลทินัมเป็นขั้วบวก (Anode) และชิ้นงานที่ต้องการเติมโลหะเป็นขั้วลบ กระแสที่ใช้ในการชุบโลหะนี้จะใช้การจ่ายกระแสแบบพัลส์ (Pulse plating) โดยมีอุปกรณ์ในการชุบโลหะดังรูปที่ 5.8 การชุบโลหะแบบพัลส์นี้จะช่วยให้ผิวของโลหะบริเวณขอบเรียบขึ้น และช่วยลดแรงดึงผิวของโลหะทำให้โอกาสที่โลหะจะหลุดออกจากแผ่นพอลิอิมิดลดลงด้วย วงจรไฟฟ้าในกระบวนการการชุบโลหะแบบพัลส์เป็นดังรูปที่ 5.8 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสร้างสัญญาณพัลส์ความถี่ 100 Hz Duty cycle 60 % ผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (Digital analog converter: DAC) ขนาด 12 บิต ซึ่งสามารถควบคุมกระแสในการชุบโลหะได้โดยการควบคุมแรงดันในช่วงเวลาเปิดของสัญญาณพัลส์ ออกแบบให้ปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 – 2.5V จากนั้นป้อนสัญญาณพัลส์ผ่านวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting amplifier) อัตราขยาย 5 เท่า เนื่องจากสารละลายมีค่าความต้านทานต่ำมาก และมีค่าไม่คงที่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย จึงต้องเพิ่มตัวต้านทานอนุกรมเข้าไปในวงจร 50 Ω ซึ่งจะลดผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของสารละลายที่มีผลต่อกระแสที่ใช้ในการชุบโลหะได้ จากนั้นต่อขั้วบวกของแรงดันที่ผ่านตัวต้านทานเข้าที่ขั้วโลหะที่อยู่ในสารละลาย

ส่วนข้อต่อกับชิ้นงานที่ต้องการชุบ ซึ่งข้อต่อจะมีตัวต้านทาน $10\ \Omega$ สำหรับวัดค่ากระแสโดยการวัดแรงดันตกคร่อมตัวต้านทาน แรงดันจากตัวต้านทานผ่านวงจะขยายแรงดันแบบไม่กลับเฟสที่อัตราขยาย 5 เท่า ให้มีแรงดันอยู่ในย่านการวัดด้วยวงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog digital converter: ADC) ขนาด 10 บิต คำนวณค่ากระแสในการชุบโลหะโดยใช้กฎของโอห์ม ซึ่งค่ากระแสที่ได้จะนำไปในการควบคุมแรงดันที่จ่ายให้กับขั้วโลหะในสารละลายเพื่อควบคุมกระแสให้ได้ตามต้องการ

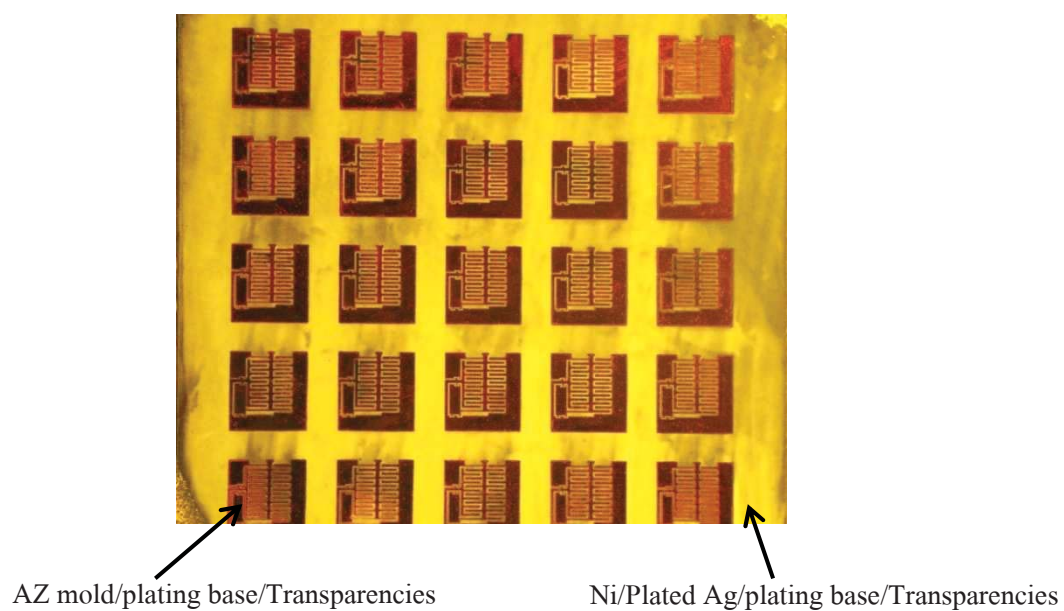
ความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในการชุบเป็น 100 Hz ที่อัตราส่วนกระแสช่วงเปิด(On) ต่อคาบเวลาของสัญญาณ (T) เท่ากับ 0.6 หรือ 60% (Duty cycle 60%) การชุบโลหะเริ่มต้นจะใช้ความหนาแน่นกระแสเฉลี่ย $12\ \text{mA}/\text{cm}^2$ เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มความหนาแน่นกระแสเฉลี่ย ขึ้นเป็น $20\ \text{mA}/\text{cm}^2$ เป็นเวลา 5 นาที และเพิ่มความหนาแน่นกระแสเฉลี่ย เป็น $40\ \text{mA}/\text{cm}^2$ เป็นเวลา 10 นาที จะได้ผลการชุบโลหะดังรูปที่ 5.9 และเมื่อได้ความหนาแน่นของโลหะเงินตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นทำการชุบโลหะนิเกิลที่ความหนาแน่นกระแสเฉลี่ยเท่ากับ $8\ \text{mA}/\text{cm}^2$ ลงบนผิวของโลหะเงินเพื่อป้องกันการกัดของสารเคมีที่ใช้ในการกัดโลหะชั้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.8 วงจรและอุปกรณ์ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



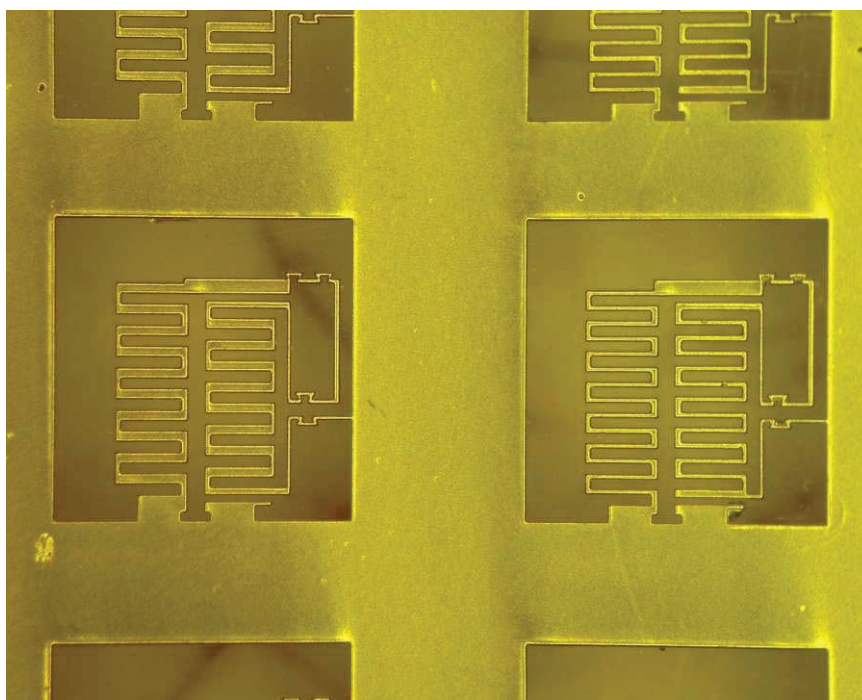
รูปที่ 5.9 หน้ากากกันรังสีเอกซ์หลังจากชุบโลหะเงินหนา 20 ไมโครเมตร ลงบนฐานรองแผ่นใสที่เคลือบด้วยไทเทเนียม 300 Å° และเงิน 500Å°



รูปที่ 5.10 หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ผ่านการชุบโลหะนิกเกิลบนผิวของโลหะเงิน

5.2.4 การล้างสารไวแสงและกัดโลหะไทเทเนียม/เงินชั้นฐานออก

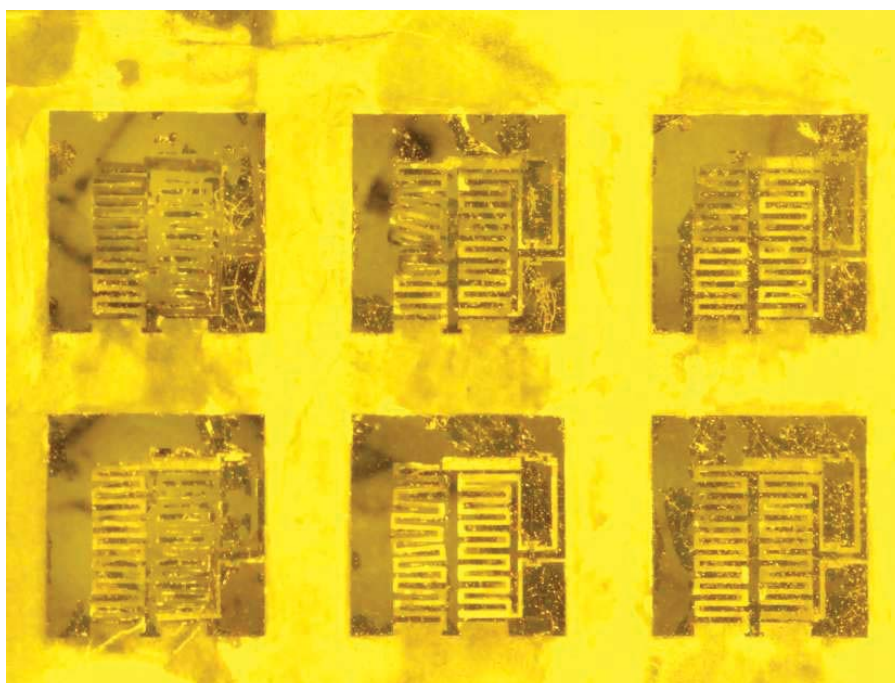
เมื่อทำการชุบโลหะได้ความหนาที่ต้องการแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการล้างสารไวแสงออกไปโดยใช้อะซิโตน และล้างด้วยน้ำปอดไอออน เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นกัดโลหะชั้นฐานทิ้งไป โดยการกัดโลหะเงินที่เป็นชั้นฐานด้านบนก่อนโดยใช้สารละลาย $\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}$ ในอัตราส่วน 1: 10 โดยปริมาตร ได้ผลดังรูปที่ 5.11 และกัดโลหะไทเทเนียมโดยใช้กรด HF ความเข้มข้น 5% ตามลำดับ ล้างด้วยน้ำปอดไอออน จากนั้นเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ดังรูปที่ 5.11 เป็นอันสิ้นสุดกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุ ในการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์นี้มีทั้งชิ้นงานที่ใช้ได้และชิ้นงานที่เสียหายตั้งแต่กระบวนการเคลือบสารไวแสงที่มีฟองอากาศเข้าไปในเนื้อสารไวแสง ดังรูปที่ 5.12 ทำให้ไม่สามารถใช้งานในกระบวนการต่อไปได้ ในส่วนของกระบวนการเคลือบโลหะชิ้นงานบางส่วนเสียหายเนื่องจากการโลหะนำไฟฟ้าชั้นฐานยึดเกาะกับพอลิอิมิด์ไม่แน่นจึงทำให้โลหะหลุดออกมาระหว่างกระบวนการชุบดัง รูปที่ 5.13 เป็นต้น



รูปที่ 5.11 หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่เสร็จสมบูรณ์หลังจากการล้างสารไวแสงและโลหะเงิน/ไทเทเนียมออกแล้ว



รูปที่ 5.12 ชิ้นงานที่เสียหายเนื่องจากฟองอากาศที่เกิดขึ้นหลังจากการหมุนเคลือบสารไวแสง

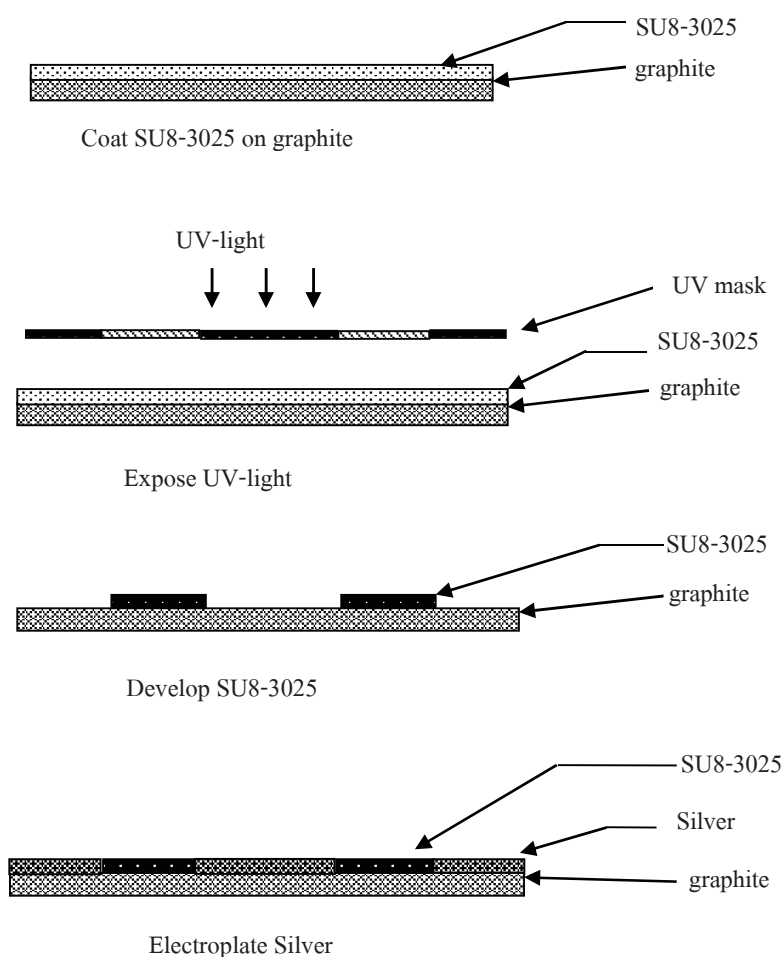


รูปที่ 5.13 ชิ้นงานที่เสียหายเนื่องโลหะชั้นฐานหลุดจากพอลิอิมได์ระหว่างกระบวนการชุบโลหะ

5.3 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นกราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน

กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นกราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน มีกระบวนการสร้างคล้ายกับการใช้แผ่นใสเป็นวัสดุฐาน มีกระบวนการดังรูปที่ 5.14 และมีกระบวนการโดยย่อ ดังนี้

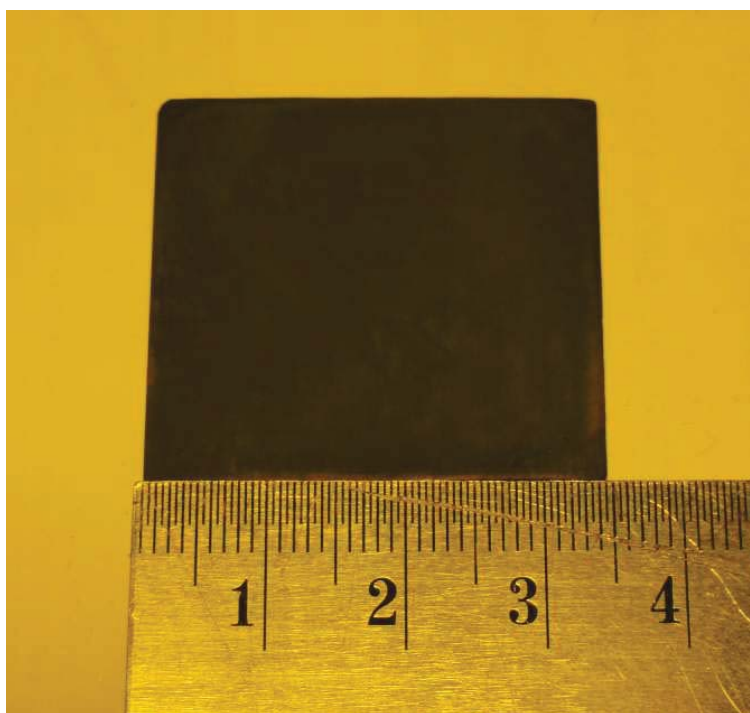
1. ทำความสะอาดแผ่นกราฟไฟต์ และ หมุนเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU8-3025
2. ฉายแสงอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากที่เป็นฟิล์มที่บดแสงลงบนสารไวแสงเพื่อสร้างลวดลายบนสารไวแสง แล้วสารไวแสงบริเวณที่ถูกฉายด้วยแสงทิ้งไป
3. ชุบโลหะเงินเพื่อเป็นวัสดุอุดซับริ่ง



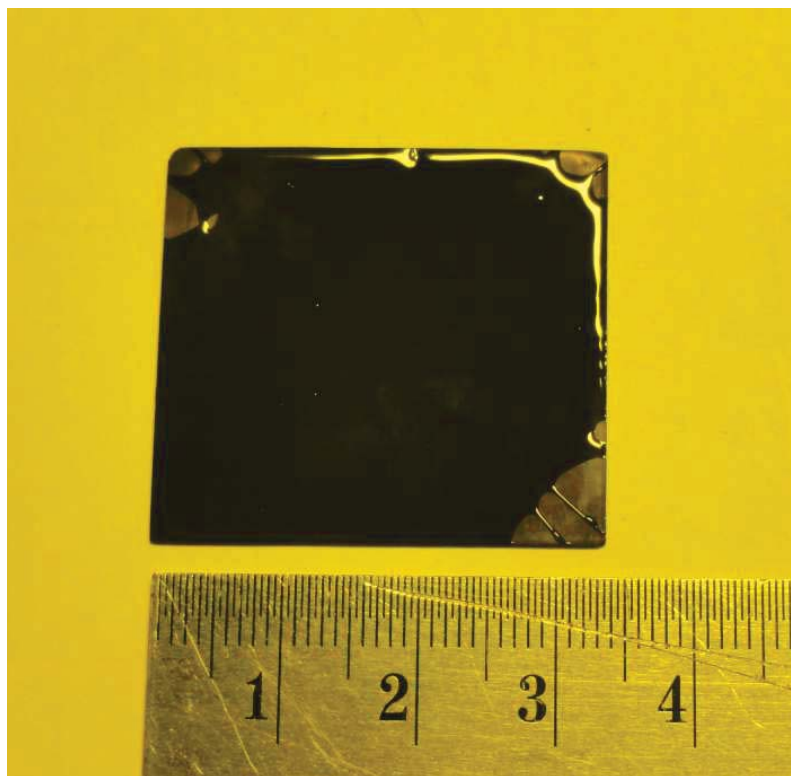
รูปที่ 5.14 กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้กราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน

5.3.1 การทำความสะอาดแผ่นกราฟต์และการหมุนเคลือบสารไวแสง

ในการทำความสะอาดแผ่นกราฟต์ ขั้นตอนแรกนำแผ่นกราฟต์ทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิกด้วยน้ำสะอาด ครั้งละ 5 นาทีแล้วเปลี่ยนน้ำจนกว่าไม่มีตะกอนของกราฟต์หลงเหลืออยู่ จากนั้นอัลตราโซนิกด้วยเมทานอลอีก 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที ตามด้วยซูปเปอร์โซนิคด้วยน้ำสะอาดอีก 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที หลังจากนั้นเป่าให้แห้งแล้วอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง รอให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง กราฟต์ที่ทำความสะอาดแล้วมีลักษณะดังรูปที่ 5.15 ต่อมาเป็นการเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU8-3025 ลงบนกราฟต์ โดยการหมุนเคลือบด้วยเครื่องหมุนเคลือบ Laurell รุ่น WS-400B-6NPP/LIT ที่ความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และ 2000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ตามลำดับ โดยจะได้ความหนาประมาณ 30 - 40 μm ในการหมุนเคลือบสารไวแสงต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศในสารไวแสงเพราะจะทำให้เกิดรอยแตกที่ไม่ต้องการบนสารไวแสง ซึ่งอาจจะเกิดปัญหาในกระบวนการชุบโลหะได้ จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปลอ่ยให้เย็นตัวในเตาอบจะได้กราฟต์เคลือบสารไวแสงดังรูปที่ 5.16



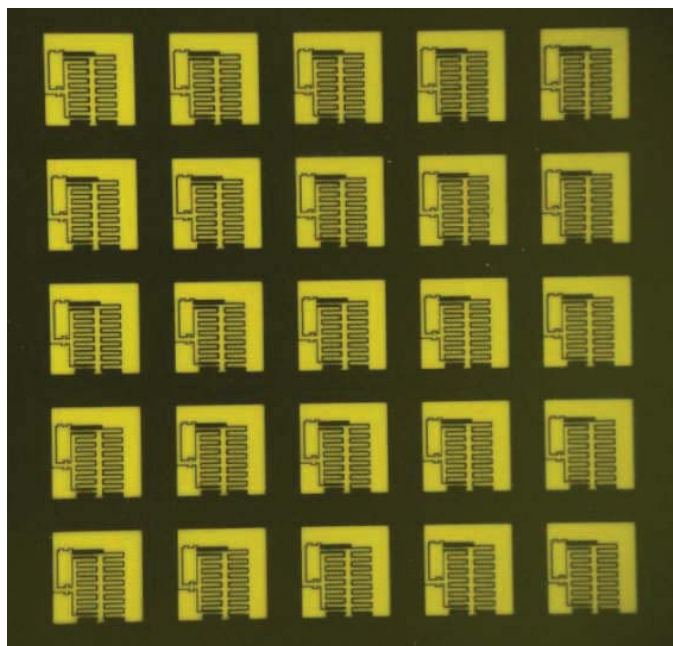
รูปที่ 5.15 แผ่นกราฟต์ที่ทำความสะอาดแล้วพร้อมเคลือบสารไวแสง



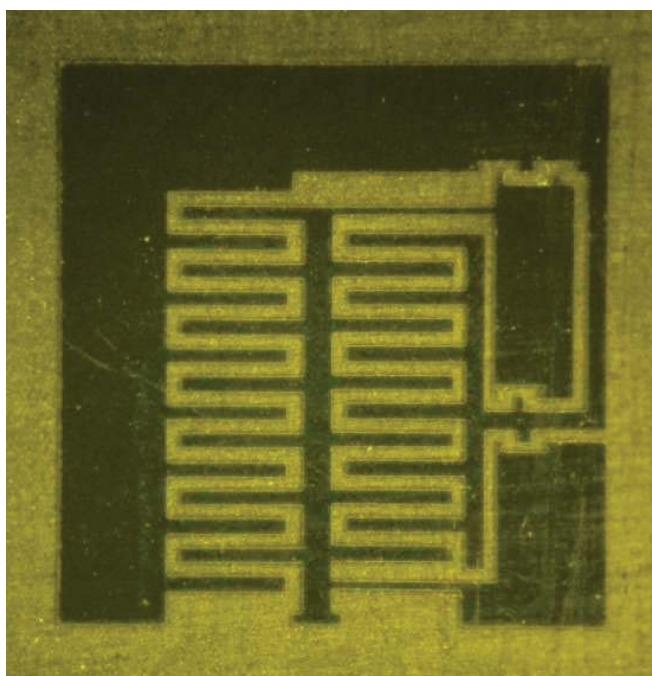
รูปที่ 5.16 แผ่นกราฟต์ที่ผ่านการหมุนเคลือบสารไวแสง SU8-3025

5.3.2 การฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากทึบแสงเพื่อถ่ายทอดลวดลาย

ทำการถ่ายทอดลวดลายจากฟิล์มที่มีลวดลายทึบแสงซึ่งฟิล์มทึบแสงที่ใช้จะมีลวดลายตรงข้ามกับลวดลายที่ใช้กับสารไวแสงชนิดบวก ดังรูปที่ 5.17 ใช้ฟิล์มทึบแสงเป็นหน้ากากแล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตจากเครื่อง Quintel รุ่น Q 4000 เป็นเวลา 9 วินาที ที่ความเข้มแสง 18.6 mW/cm^2 ได้พลังงานสะสมที่ตกกระทบบสารไวแสงเท่ากับ 167.4 mJ/cm^2 หลังจากนั้นทำการอบสารไวแสงหลังฉายแสงที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ด้วยน้ำยา SU8 Developer เป็นเวลาประมาณ 5 นาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จะได้ลวดลายของสารไวแสงดังรูปที่ 5.18



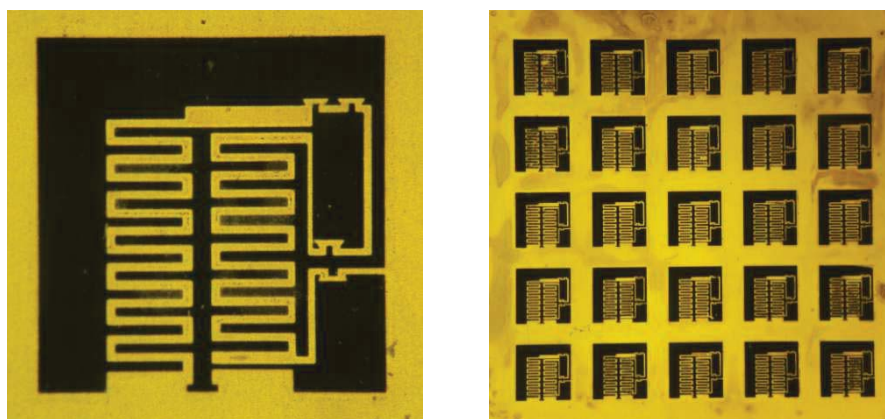
รูปที่ 5.17 फिल्मที่บ่งแสงที่ใช้สำหรับถ่ายทอดลงบนสารไวแสงชนิดลบ



รูปที่ 5.18 สารไวแสงหลังจากการฉายแสง อบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงออก

5.3.3 กระบวนการชุบโลหะบนกราฟต์

กระบวนการชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้าจะใช้สารละลายเงินที่เตรียมไว้เหมือนกับการชุบโลหะบนฐานรองที่เป็นแผ่นพลาสติกใสเคลือบโลหะ กระแสไฟฟ้าที่ใช้เป็นแบบพัลส์กระแสตรง ความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในการชุบเป็น 100 Hz ที่อัตราส่วนกระแสช่วงเปิด(On) ต่อคาบเวลาของสัญญาณ (T) เท่ากับ 0.6 หรือ 60% (Duty cycle 60%) การชุบโลหะจะใช้ความหนาแน่นกระแสคงที่ 3 mA/cm^2 เป็นเวลา 30 นาที วัดความหนาของโลหะเงินโดยใช้เครื่อง Veeco Optical profiler ได้ความหนาของโลหะเงินเท่ากับ ผลการชุบโลหะดังรูปที่ 5.19 ซึ่งเป็นการเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์โดยใช้กราฟต์เป็นวัสดุฐาน

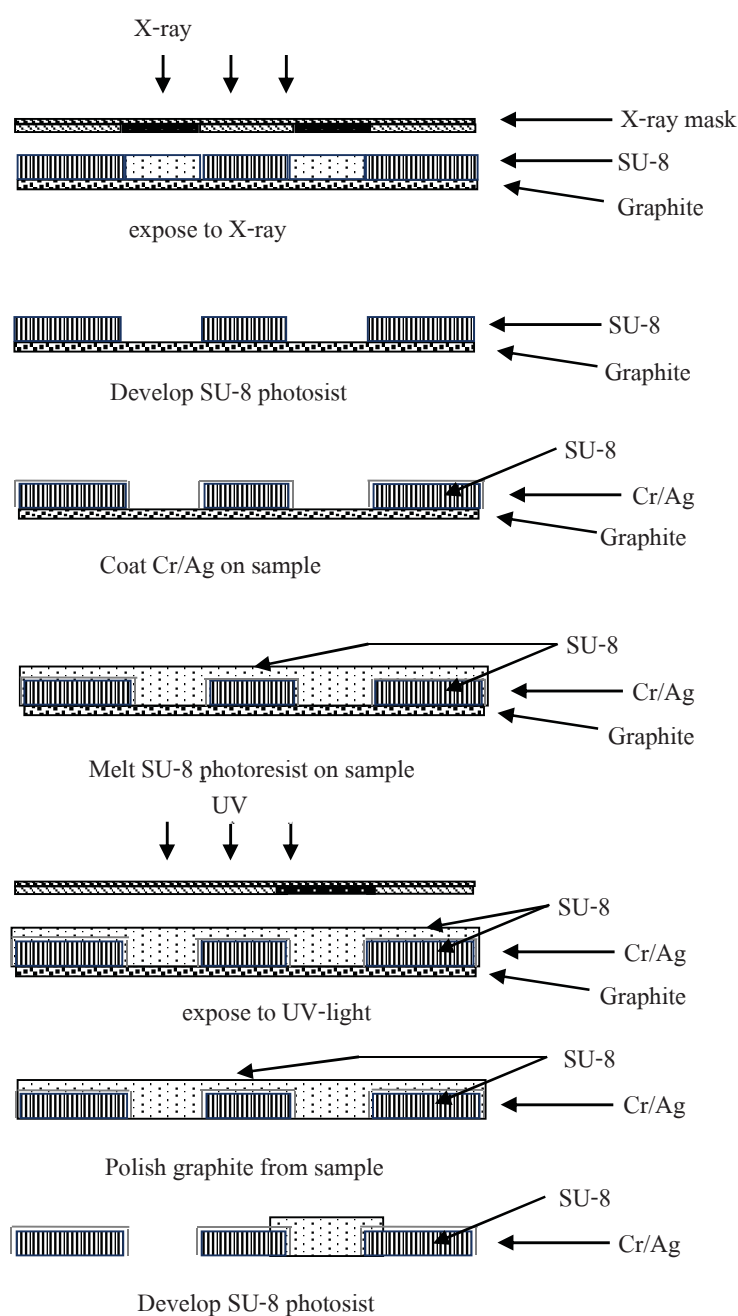


รูปที่ 5.19 หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ชุบโลหะเสร็จสมบูรณ์พร้อมใช้งาน

5.4 กระบวนการสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงและกระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS

เมื่อได้หน้ากากกันรังสีเอกซ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงโดยใช้สารไวแสง SU-8 2100 ความหนา 500 ไมโครเมตร บนฐานกราฟต์ แล้วฉายแสงเอกซเรย์ผ่านหน้ากากกันรังสีเอกซ์ จากนั้นล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงเอกซเรย์ออกไป จะได้โครงสร้างสัดส่วนสูงที่เป็นพอลิเมอร์ จากนั้นเคลือบโลหะโครเมียมและโลหะเงินบนโครงสร้างพอลิเมอร์ จะได้โครงสร้างนำไฟฟ้าสำหรับเป็นตัวเก็บประจุของตัวตรวจรู้ความดัน จากนั้นทำการสร้างฟิล์มบางสำหรับใช้เป็นไดอะแฟรมโดยใช้ Polydimethylsiloxane (PDMS) ซึ่ง PDMS มีลักษณะเป็นของเหลวก่อนที่จะเติมสารเคมีเพื่อให้แข็งตัว ในการสร้างแผ่นฟิล์มบาง PDMS ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการสร้างหลุมโดยมีขอบที่มีของความหนาคงที่ ในการสร้างขอบดังกล่าวใช้ Dry film ที่เป็นสารไวแสงชนิดลบซึ่งมีความหนาคงที่ที่ $40 \mu\text{m}$ ริดติดลงบนกระจกสไลด์ขนาด 3×1 นิ้ว

โดยจะใช้ Dry film สามชั้นเพื่อให้ได้ความหนา $120\text{ }\mu\text{m}$ ใช้ฟิล์มที่บดแสงปิดบริเวณตรงกลางของ Dry film บนกระจกสไลด์ นำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต แล้วล้างสารไวแสงออก จะได้หลุมที่มีความหนา $120\text{ }\mu\text{m}$ จากนั้น นำ PDMS เทลงบนหลุมให้ทั่วแล้วใช้แผ่นใสปิดด้านบนและกดกระจกสไลด์อีกแผ่นให้เรียบ อบให้ PDMS แข็งตัวแล้วลอกแผ่นฟิล์ม PDMS ออกมา จะได้ความหนาเท่ากันทั้งแผ่น ขั้นตอนทั้งหมดแสดงในรูปที่ 5.20

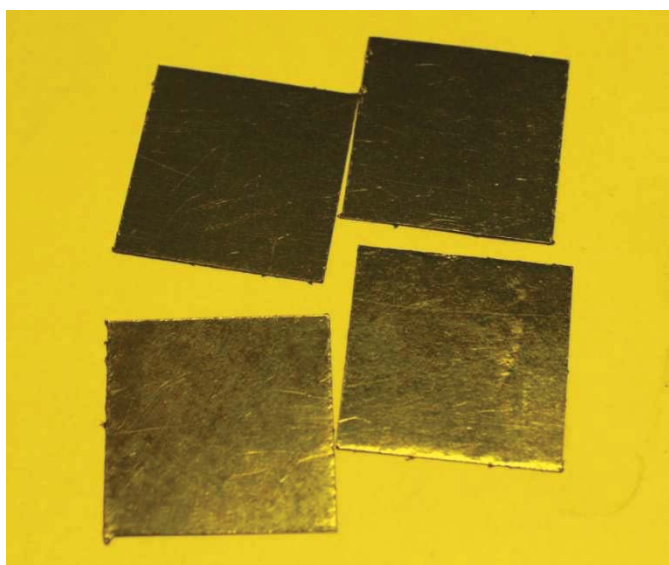


รูปที่ 5.20 กระบวนการสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุ

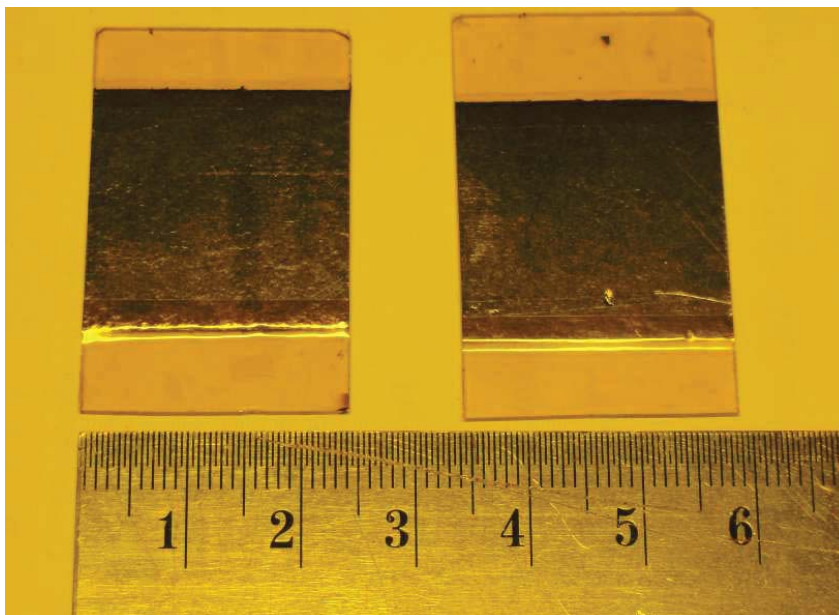
จากรูปที่ 5.19 ในส่วนของกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์และกระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS มีขั้นตอนการสร้างโดยละเอียดดังนี้

5.4.1 การเตรียมฐานกราฟไฟต์

ในงานวิจัยนี้จะใช้กราฟไฟต์แบบอ่อนเป็นวัสดุฐาน ซึ่งมีราคาถูก และสามารถตัดออกได้ง่ายในกระบวนการสุดท้ายที่มีการขจัดวัสดุชั้นฐานทิ้งไป โดยในการเตรียมกราฟไฟต์จะเริ่มจากการตัดกราฟไฟต์ให้ได้ความกว้าง 1 นิ้ว ยาวประมาณ 7 นิ้ว จากนั้นรีดแผ่นกราฟไฟต์ด้วยความร้อนโดยใช้เครื่องรีดร้อนหรือเครื่องเคลือบบัตรประมาณ 30-40 รอบ เพื่อให้แผ่นกราฟไฟต์อ่อน แน่น และมีความแข็งมากขึ้น แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไม่ให้ความชื้นอยู่ภายในแผ่นกราฟไฟต์ ซึ่งอาจมีปัญหาเรื่องฟองอากาศในกระบวนการต่อไปได้ หลังจากอบแล้วก็นำแผ่นกราฟไฟต์ออกมารีดด้วยลูกกลิ้งผิวเรียบ อีก 3-4 ครั้ง แล้วตัดให้มีขนาด 1x1 นิ้ว ดังรูปที่ 5.21 จากนั้นเตรียมกระจกสไลด์ ขนาด 1.5x1 นิ้ว นำแผ่นกราฟไฟต์ติดกับกระจกโดยใช้เทป PI ติดบริเวณขอบของแผ่นกราฟไฟต์ แล้วรีดด้วยลูกกลิ้งอีกครั้งเพื่อให้ความหนาของเทป PI เท่ากับความหนาของกราฟไฟต์ ดังรูปที่ 5.22 เป็นอันเสร็จกระบวนการเตรียมฐานกราฟไฟต์ หลังจากที่ได้เตรียมฐานกราฟไฟต์เสร็จควรจะนำไปใช้งานทันที เพราะถ้าเก็บไว้จะทำให้ความชื้นเข้าไปในกราฟไฟต์ได้ จะต้องทำการอบอีกครั้งก่อนใช้งาน



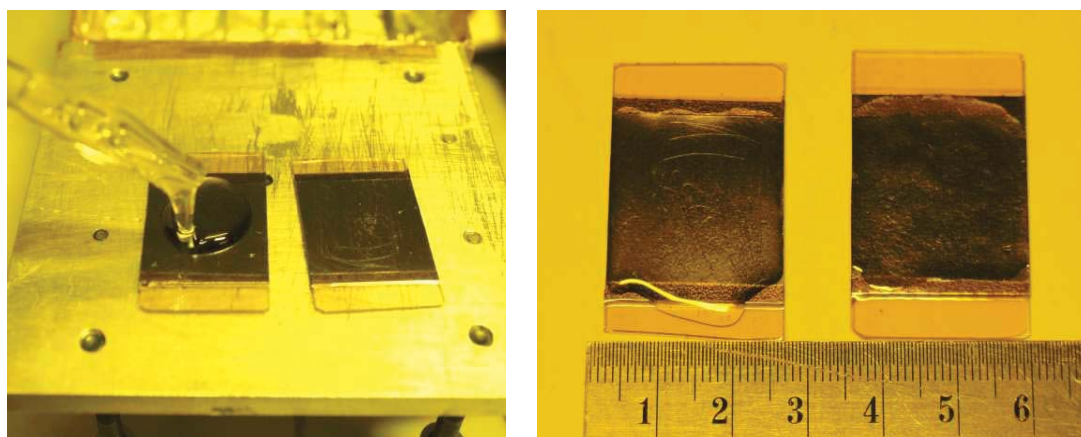
รูปที่ 5.21 แผ่นกราฟไฟต์ที่ผ่านการอบและรีดเรียบด้วยเครื่องรีดร้อน



รูปที่ 5.22 กราไฟต์ที่ติดกับกระจกด้วยเทป PI ซึ่งจะได้ฐานกราฟไฟต์ที่พร้อมใช้งานในกระบวนการต่อไป

5.4.2 การเตรียมสารไวแสง SU-8 บนฐานกราฟไฟต์

หลังจากเตรียมฐานกราฟไฟต์แล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการเตรียมสารไวแสงความหนา 500 ไมโครเมตรโดยประมาณบนฐานกราฟไฟต์ โดยเริ่มจากการทำความสะอาดแผ่นกราฟไฟต์โดยใช้ IPA ชุบสำลีแล้วเช็ดบริเวณผิวของกราฟไฟต์ จากนั้นหยดสารไวแสงลงบนฐานกราฟไฟต์ที่วางอยู่บนแผ่นความร้อนที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 95 องศาเซลเซียส ให้มีความหนามากกว่า 500 ไมโครเมตรโดยประมาณ ดังรูปที่ 5.23 อบบนแผ่นความร้อนเป็นเวลา 20 ชั่วโมงเพื่อให้ตัวทำละลายภายในสารไวแสงระเหยจนเหลือประมาณ 7 % จะทำให้สารไวแสงแข็งตัว จากนั้นขัดให้ได้ความหนา 500 ไมโครเมตร โดยใช้ไมโครมิเตอร์ในการวัดความหนาของสารไวแสงหลังจากการขัด ดังรูปที่ 5.24



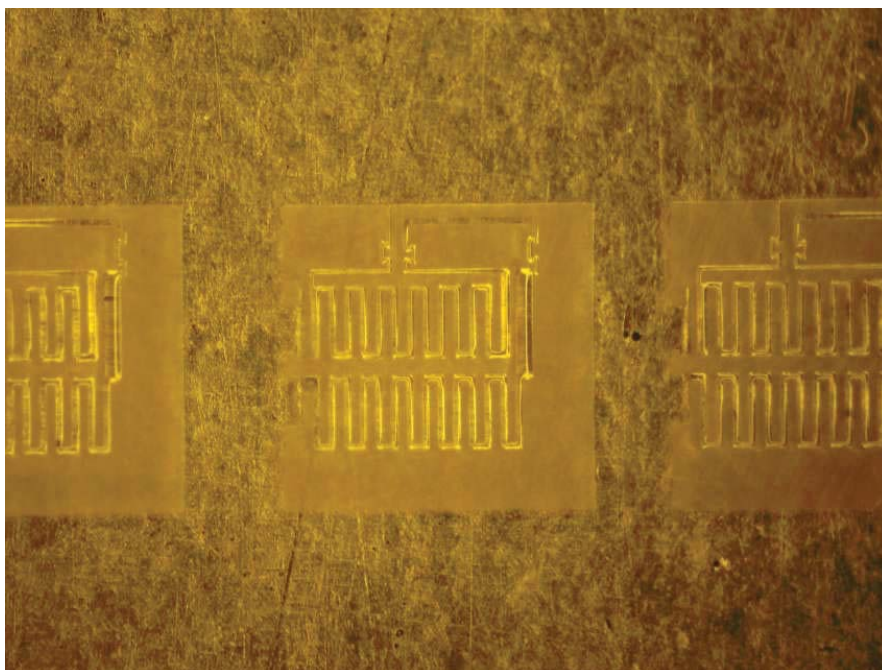
รูปที่ 5.23 การหยดสารไวแสงบนฐานกราฟไฟต์ที่วางอยู่บนแผ่นความร้อน



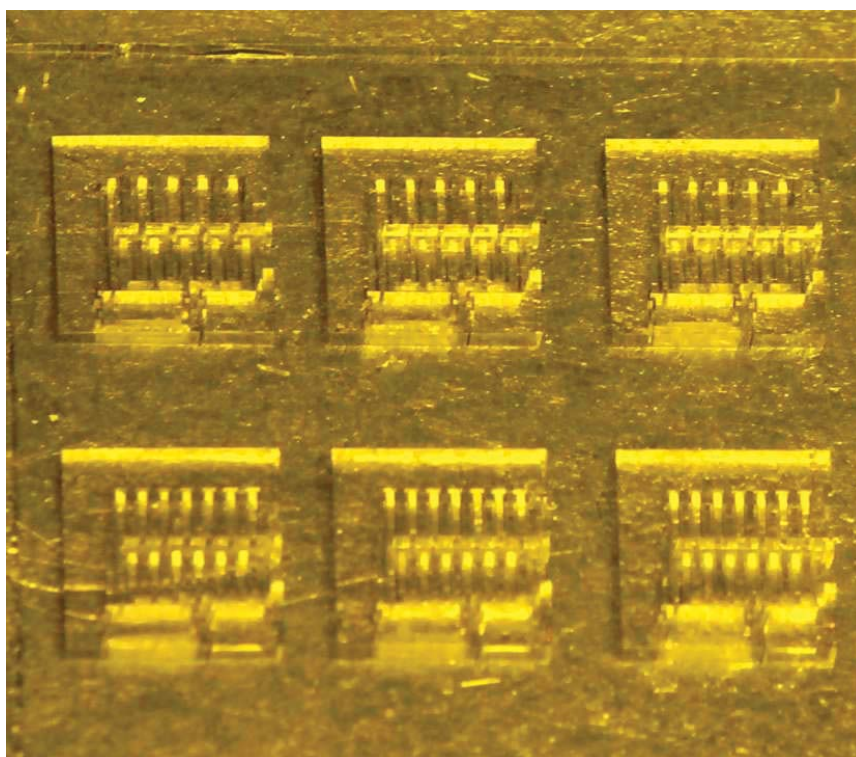
รูปที่ 5.24 การวัดความหนาสารไวแสงที่ผ่านการขัดเพื่อให้ได้ความหนาประมาณ 500 ไมโครเมตร

5.4.3 กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

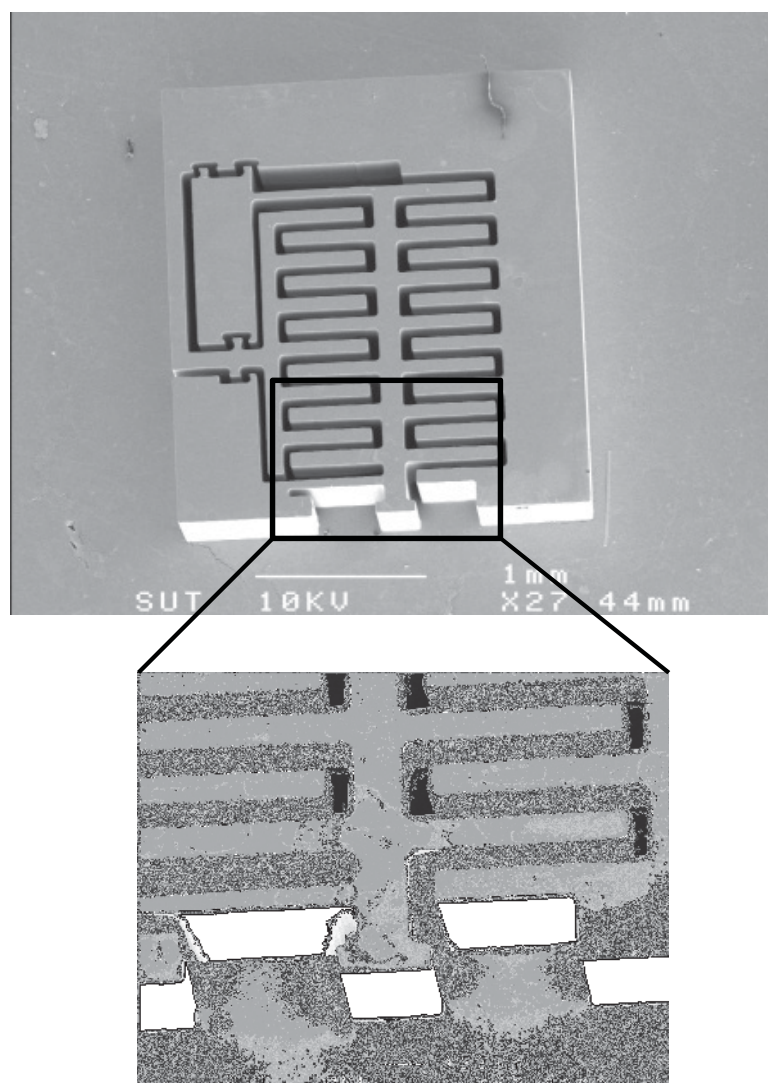
กระบวนการลิโธกราฟีคือการถ่ายทอดลวดลายจุลภาคจากหน้ากากกันรังสีลงบนชิ้นงานที่เป็นสารไวแสง โดยในการสร้างโครงสร้างสัดส่วนสูงจะใช้แสงเอกซเรย์ฉายผ่านหน้ากากกันรังสีเอกซ์ไปยังชิ้นงาน โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงสีเอกซเรย์ที่ สถานีทดลองที่ 6 (BL6A-DXL) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) โดยใช้หน้าต่างที่เป็นผลึกเบอริเลียม (Beryllium windows) ซึ่งโปร่งใสต่อแสงเอกซเรย์และแสงย่านอื่นๆ เนื่องจากแสงซินโครตรอนที่ออกมาจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็นแสงที่มีช่วงความถี่กว้าง ลักษณะของแสงซินโครตรอนที่ออกมาจะเป็นสีเหลี่ยมผืนผ้ามีความกว้าง 7.43 มิลลิเมตร ยาว 88.31 มิลลิเมตร เนื่องจากชิ้นงานที่ต้องการฉายมีความใหญ่กว่าความกว้างของแสงเอกซเรย์ที่ออกมา จึงต้องมีการสแกนให้ชิ้นงานเคลื่อนที่ในแนวขึ้น-ลงเพื่อให้รังสีเอกซ์ตกกระทบชิ้นงานได้พลังงานเท่ากันทั้งชิ้น ก่อนที่จะนำชิ้นงานไปฉายแสงเอกซเรย์จะต้องประกบหน้ากากกันรังสีเอกซ์บนชิ้นงานที่เป็นสารไวแสง ชิ้นงานที่ต้องการฉายแสงเอกซเรย์มีความหนา 500 ไมโครเมตร ใช้พลังงานในการฉาย (Dose) เท่ากับ 18000 mJ/cm^2 โดยจะฉายที่กระแสน้ำอิเล็กตรอน(Beam current) ประมาณ 120-150 mA จำนวนรอบในการฉายแสงประมาณ 15-20 รอบ รอบละ 29 วินาที จากนั้นทำการอบหลังฉายแสงเอกซเรย์โดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง จะสังเกตเห็นลวดลายของสารไวแสงในบริเวณที่ถูกฉายด้วยแสงเอกซเรย์ดังรูปที่ 5.25 ล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงเอกซเรย์ออกไปด้วยน้ำยา SU-8 Developer โดยวางชิ้นงานคว่ำลงในน้ำยา SU-8 Developer แช่ไว้เป็นเวลา 120 นาที แล้วนำชิ้นงานขึ้นมาเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน แล้วตรวจสอบว่าสารไวแสงถูกล้างออกหมดหรือยัง เมื่อสารไวแสงถูกล้างออกหมดแล้วทำความสะอาดผิวของสารไวแสงที่มีคราบของน้ำยา SU-8 Developer โดยใช้เครื่องพลาสมาที่ 100 วัตต์ เป็นเวลา 3 นาที จะได้ชิ้นงานที่เป็นโครงสร้างสัดส่วนสูงดังรูปที่ 5.26 และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ดังรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.25 ชิ้นงานหลังจากการฉายแสงเอกซเรย์ผ่านการอบหลังฉายแสง



รูปที่ 5.26 ชิ้นงานที่ผ่านการล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงออกไป

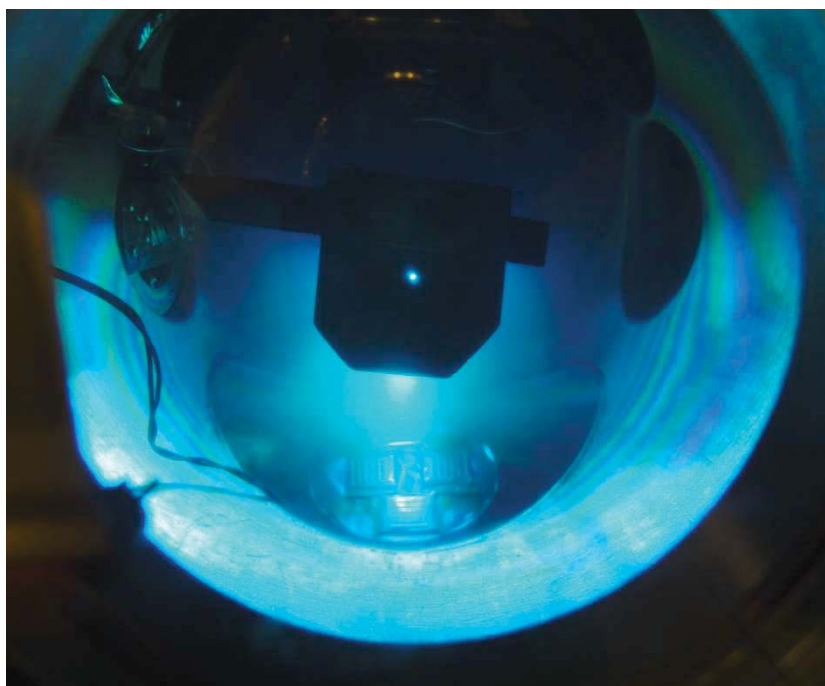


รูปที่ 5.27 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

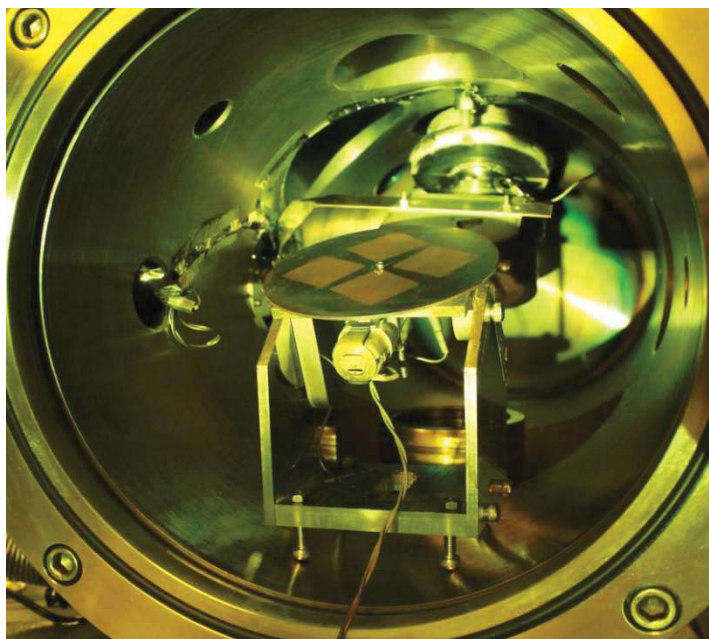
5.4.4 กระบวนการเคลือบโลหะ

สำหรับการสร้างโครงสร้างของตัวเก็บประจุที่ต้องการโครงสร้างที่สามารถนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงต้องทำการเคลือบโลหะบนโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ปั่นสารไวแสงจากขั้นตอนที่ผ่านมา ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering) โดยใช้เครื่องสปัตเตอริง ซึ่งเป็นวิธีการเคลือบฟิล์มบางโลหะอีกวิธีหนึ่ง การเคลือบโลหะด้วยกระบวนการดังกล่าวนี้มีหลักการคือ การสร้างพลาสมาจากก๊าซเฉื่อย AR^+ ด้วยสนามไฟฟ้าและเนืยวนำให้พุ่งเข้าชนโลหะเป้าหมายทำให้อะตอมของโลหะเป้าหมายกระเจิงออกมาเคลือบบนชิ้นงานดังรูปที่ 5.28 ซึ่งจะมีลักษณะเป็นลำแสงพลาสมา การสปัตเตอริงสามารถแบ่งชนิดของแหล่งจ่ายออกได้สองชนิดคือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

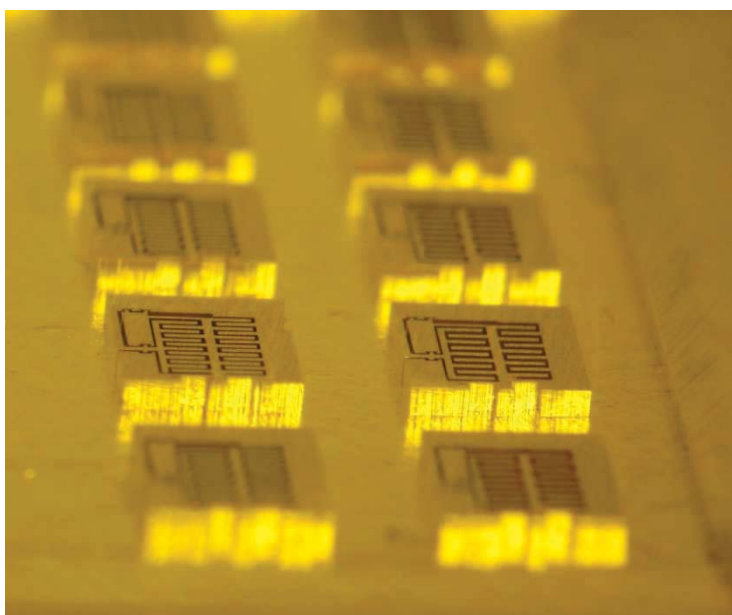
กระแสตรง สำหรับการเคลือบโลหะบนชิ้นงาน และแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง(RF) ซึ่งสามารถเคลือบได้ทั้งโลหะและฉนวน สำหรับการเคลือบโลหะบนโครงโครงสร้างตัวเก็บประจุจะใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และจะต้องเคลือบทุกทิศทาง จึงจำเป็นต้องมีการหมุนชิ้นงานในระหว่างกระบวนการเคลือบโลหะ อุปกรณ์ที่ใช้หมุนเคลือบโลหะมีลักษณะดังรูปที่ 5.29 โลหะที่ใช้จะเป็นโครเมียม (Cr) เคลือบลงบนโครงสร้างพอลิเมอร์แล้วตามด้วยโลหะเงิน (Ag) เนื่องจากโลหะเงินนำไฟฟ้าได้ดีกว่าโครเมียมแต่ยึดเกาะกับผิวของพอลิเมอร์ไม่ดีนัก จึงต้องใช้โลหะโครเมียมเคลือบลงไปก่อน โลหะโครเมียมจะทำการสปัตเตอริงด้วยแรงดันกระแสตรงที่กําลัง 150 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที ที่ความดัน 1.12×10^{-3} Torr ซึ่งโลหะโครเมียมจะยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี จากนั้นเคลือบโลหะเงิน (Ag) บนโครเมียมโดยทำการสปัตเตอริงแรงดันกระแสตรงที่กําลัง 100 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที ที่ความดัน 1.12×10^{-3} Torr ในกระบวนการสปัตเตอริงจะมีความร้อนค่อนข้างสูงซึ่งอาจจะเกิดความเสียหายกับชิ้นงานได้ ดังนั้นในการสปัตเตอริงแต่ละครั้งจะใช้เวลาไม่เกิน 1 นาทีแล้วพักเป็นเวลา 10 นาทีแล้วจึงสปัตเตอริงอีกครั้ง ทำอย่างนี้ไปจนกว่าจะครบเวลาที่ต้องการจะได้โครงสร้างเคลือบโลหะดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.28 แสงพลาสมาจากกระบวนการสปัตเตอริง



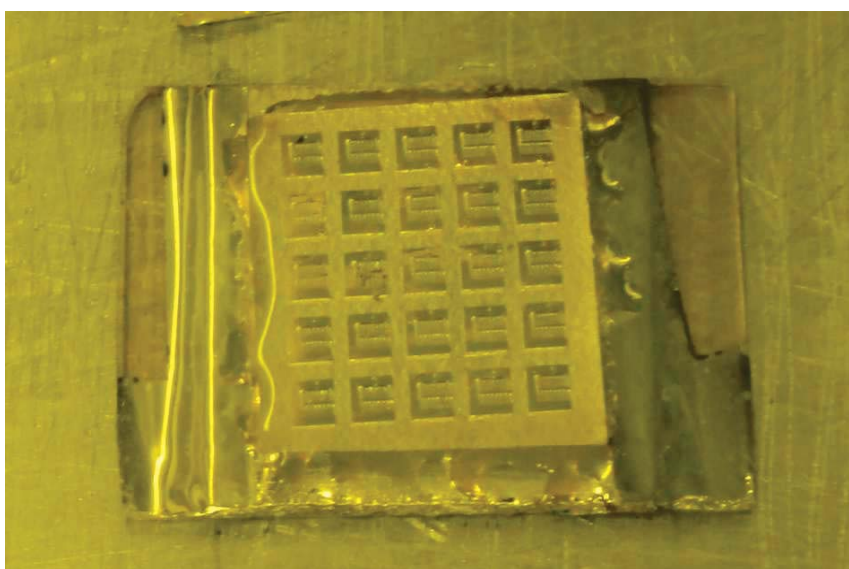
รูปที่ 5.29 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับหมุนชิ้นงานในเครื่องสปัตเตอร์



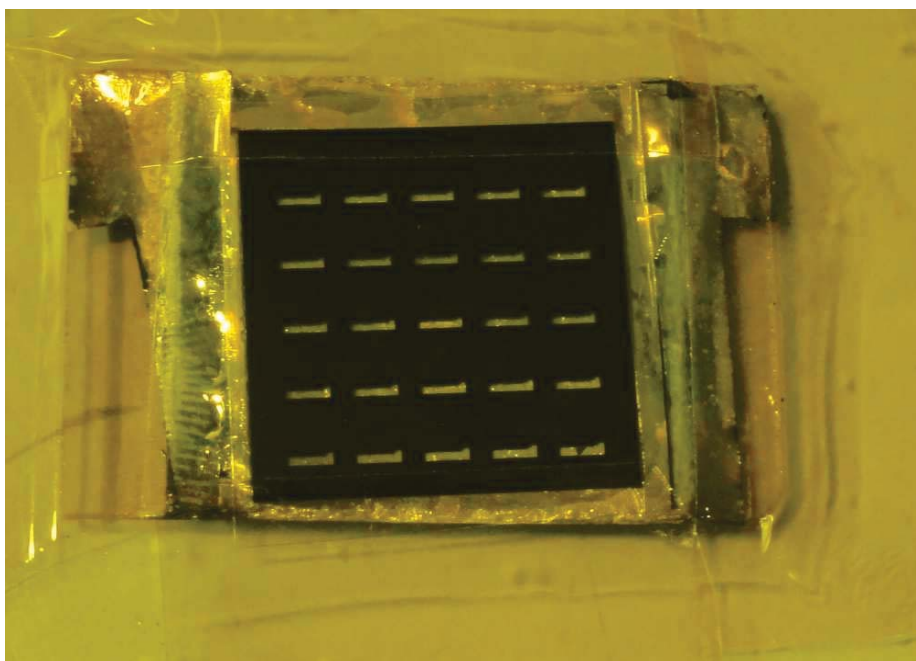
รูปที่ 5.30 ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการเคลือบโลหะด้วยกระบวนการสปัตเตอร์แบบหมุน

5.4.5 กระบวนการจัดการไฟต์ขั้นพื้นฐานทั้ง

ในส่วนของการจัดการไฟต์ขั้นพื้นฐานไฟต์ออกไปเพื่อให้ได้โครงสร้างนำไฟฟ้ามาใช้งานในขั้นตอนต่อไป ในการจัดการไฟต์ทั้งไปจะๆไม่สามารถจัดการได้ทันทีเนื่องจากจะทำให้โครงสร้างขนาดเล็กเสียหายได้ ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการถนอมสารไวแสงลงบนชิ้นงานให้ทั่วเพื่อโครงสร้างทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกันดังรูป 5.31 ทำการเทสารไวแสง SU8-2100 ลงบนชิ้นงานแล้วอบบนแผ่นความร้อนเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ก่อนที่จะทำการจัดการออกไปจะต้องทำการเชื่อมส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุซึ่งจะไม่ติดกันถ้าจัดการออกไปก่อน จะทำให้โครงสร้างทั้งสองส่วนแยกออกจากกัน ซึ่งการเชื่อมต่อโครงสร้างทั้งสองส่วนสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต ฉายแสงในส่วนที่ใช้ยึดโครงสร้าง โดยจะทำการจัดการไวแสงที่ถนอมลงไปบนโครงสร้างให้มีความหนาใกล้เคียงกับความหนาของชิ้นงาน จากนั้นทำการฉายแสงอัลตราไวโอเลตผ่านฟิล์มที่บดแสงที่เปิดช่องเฉพาะบริเวณที่ใช้ยึดโครงสร้างทั้งสองส่วนดังรูปที่ 5.32 ฉายแสง เป็นเวลา 180 วินาที ที่ความเข้มแสง 18.1 mW/cm^2 ได้พลังงานสะสมที่ตกกระทบสารไวแสงเท่ากับ 3258 mJ/cm^2 อบชิ้นงานหลังฉายแสงโดยใช้เตาอบที่อุณหภูมิ 75°C องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

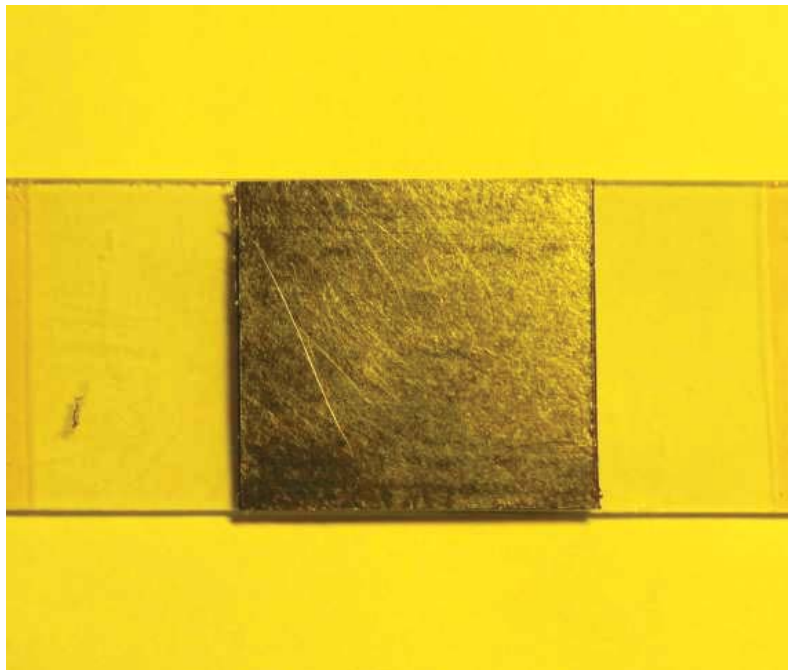


รูปที่ 5.31 การเทสารไวแสงลงบนชิ้นงานเพื่อให้โครงสร้างทั้งหมดเป็นเนื้อเดียวกัน

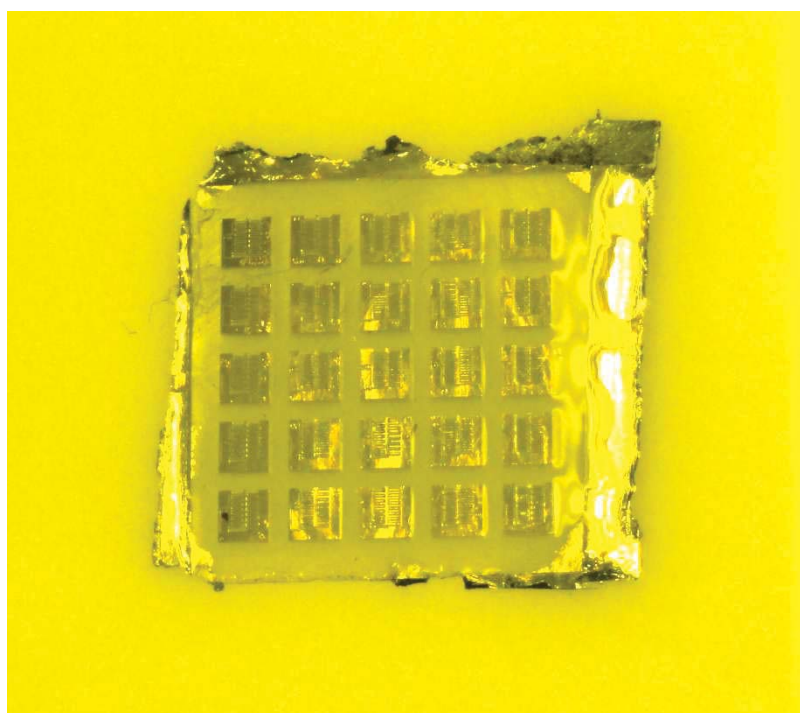


รูปที่ 5.32 फिल्मทึบแสงสำหรับฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อยึดโครงสร้าง

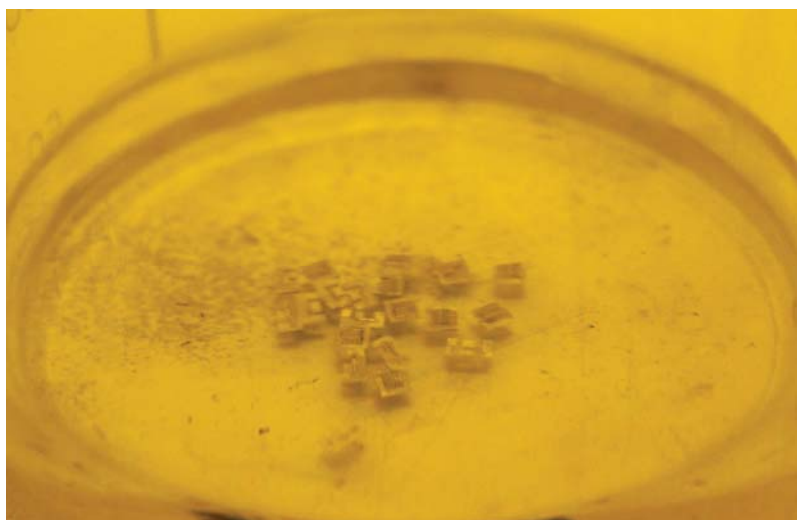
หลังจากการฉายแสงแล้วขั้นตอนต่อไปเป็นการการขีดกราฟิ์พื้นฐานทิ้งไป ซึ่งเริ่มจากการใช้แผ่นสไลด์ติดกับกระจกสไลด์วางลงบนชิ้นงานในขณะที่ยังร้อนหลังจากการอบหลังฉายแสง และสารไวแสงยังไม่แข็งตัวเพื่อใช้เป็นฐานชั่วคราวดังรูปที่ 5.33 ก่อนที่จะขีดกราฟิ์ออกด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 จนบางเห็นเนื้อสารไวแสง แล้วขัดต่อด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800 จนกราฟิ์หมดไปดังรูปที่ 5.34 จากนั้นล้างสารไวแสงออกไปโดยใช้น้ำยา SU8 Developer เป็นเวลา 90 นาที ชิ้นงานจะหลุดออกมาจากฐานชั่วคราวดังรูปที่ 5.35 จากนั้นนำชิ้นงานขึ้นจากน้ำยา Developer วางไว้ให้น้ำยา Developer ระเหยจนแห้งเป็นเวลา 60 นาที แล้วทำความสะอาดกับน้ำยา Developer บนชิ้นงานออก ด้วยการพลาสมาที่กำลัง 100 วัตต์เป็นเวลา 3 นาที จะได้โครงสร้างตัวเก็บประจุสำหรับสร้างตัวตรวจรู้ความดันดังรูปที่ 5.36 และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนดังรูปที่ 5.37



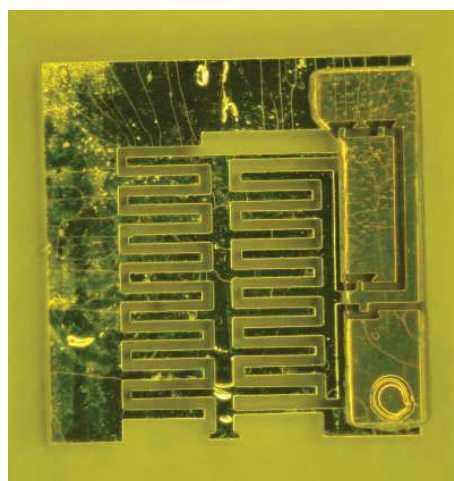
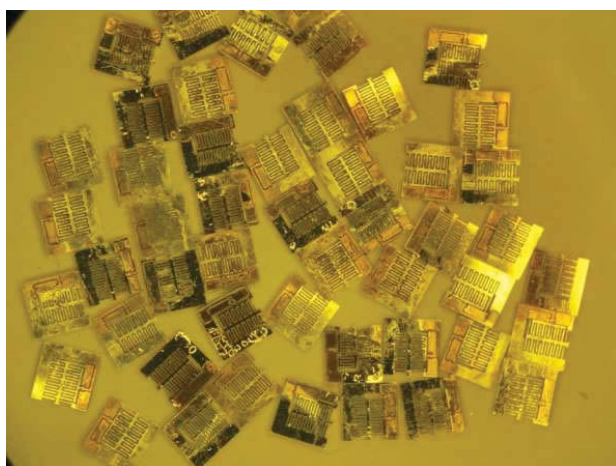
รูปที่ 5.33 การติดชิ้นงานบนแผ่นใสเพื่อใช้เป็นฐานชั่วคราว



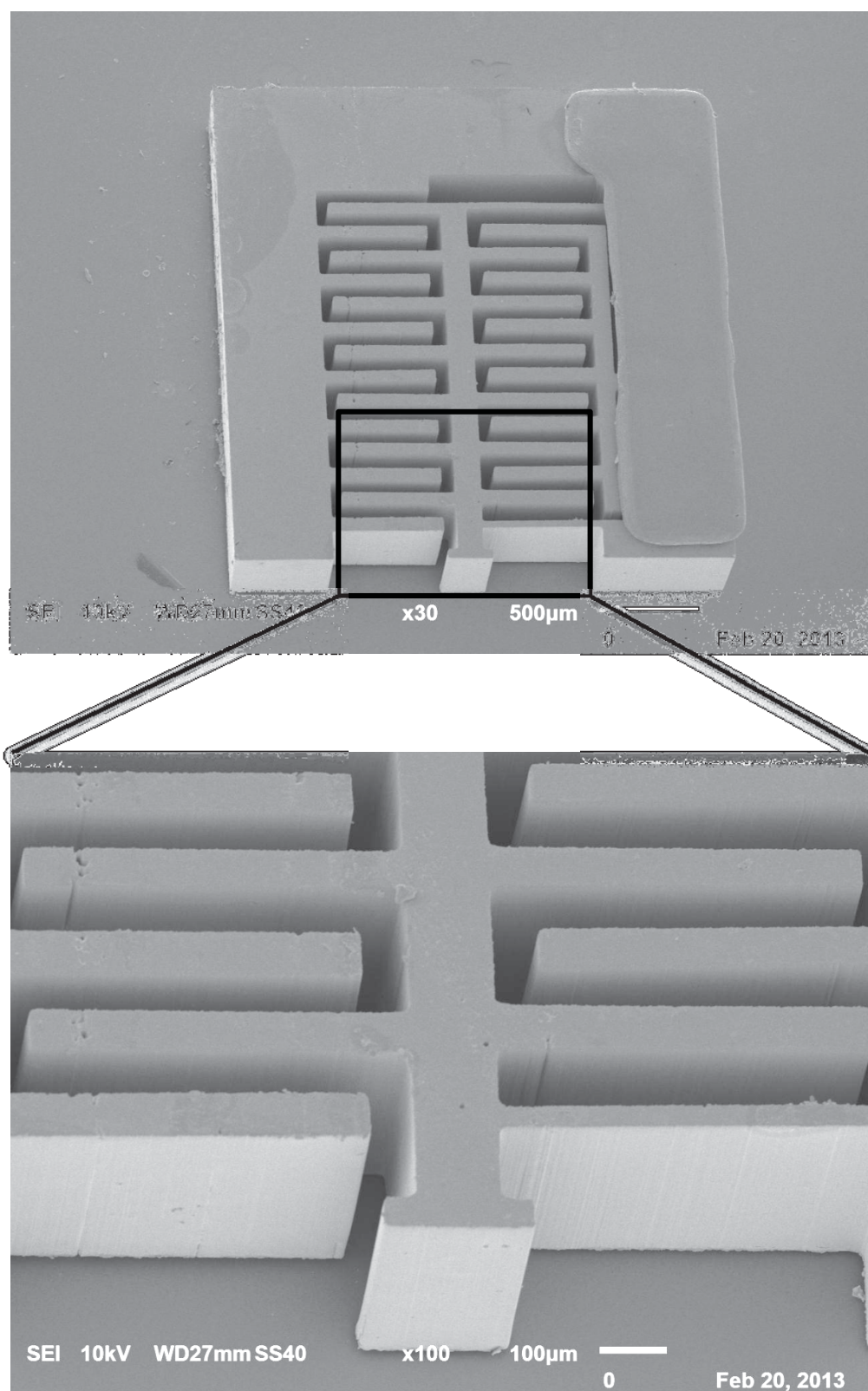
รูปที่ 5.34 ชิ้นงานที่ผ่านการจัดกราฟไฟต์ออกไป



รูปที่ 5.35 ชิ้นงานที่หลุดออกมาในน้ำยาล้างสารไวแสง SU8-Developer



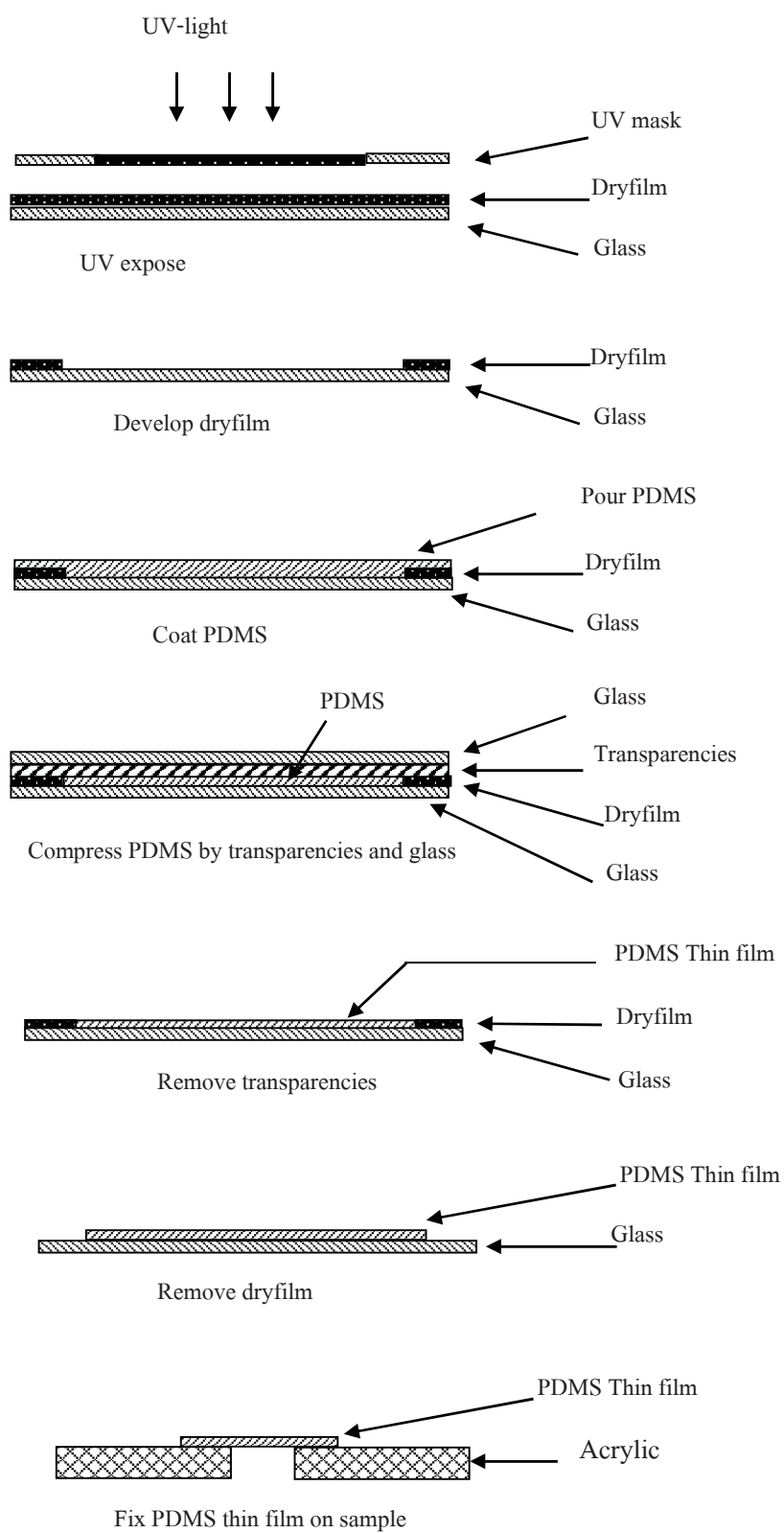
รูปที่ 5.36 โครงสร้างตัวเก็บประจุที่เสร็จสมบูรณ์



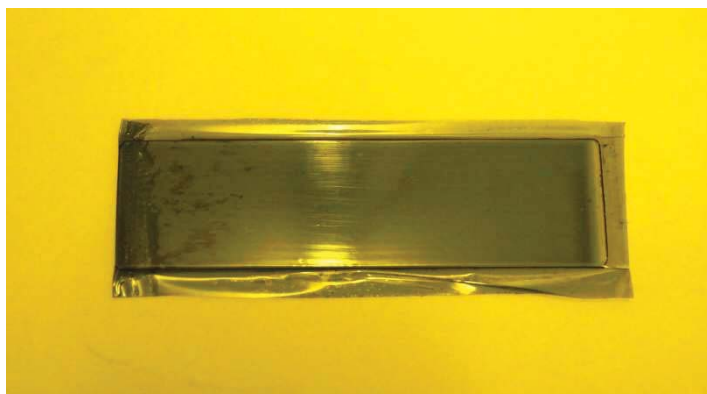
รูปที่ 5.37 ภาพ SEM ของโครงสร้างตัวเก็บประจุที่เสร็จสมบูรณ์

5.4.6 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS

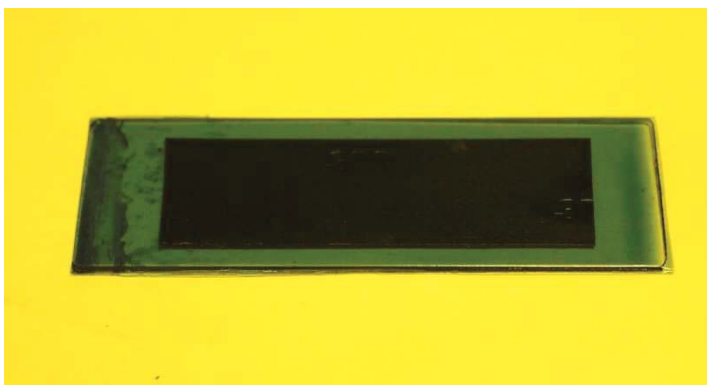
ในส่วนของการสร้างฟิล์มบาง PDMS สำหรับใช้เป็นไดอะแฟรม กดอัด PDMS เหลวบนขอบที่มีความหนาคงที่ ซึ่งจะได้ความหนาที่ต้องการ และสามารถทำซ้ำได้ สำหรับการเตรียมของที่มีความหนาคงที่ ต่างจากการหมุนเคลือบที่มักจะได้รับความหนาไม่แน่นอน มีกระบวนการดังรูปที่ 5.38 ในการสร้างฟิล์มบาง PDMS เริ่มจาก นำกระจกสไลด์ขนาด 1x3 นิ้ว มาเคลือบด้วยสารไวแสงชนิดบวกโดยจะใช้ Dryfilm ที่ซึ่งมีความหนา 40 ไมโครเมตร เคลือบสามชั้นเพื่อให้ได้ความหนา 120 ไมโครเมตรในส่วนของการเคลือบจะใช้เครื่องเคลือบบัตร ทำการรีดที่ละชั้น ชั้นละ 4 รอบ ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส จะได้ผลดังรูปที่ 5.39(ก) จากนั้นนำเทปกาวทึบแสงปิดบริเวณตรงกลางของกระจกสไลด์ โดยให้เหลือขอบไว้พอประมาณดังรูปที่ 5.39 (ข) จากนั้นนำไปฉายแสง UV เป็นเวลา 2 นาที แล้วลอกเทปกาวทึบแสงออก จะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่ถูกฉายด้วยแสงจะมีสีเข้มกว่าบริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสง จากนั้นนำชิ้นงานไปล้างสารไวแสง Dryfilm ด้วยสารละลาย NaCO_3 ในอัตราส่วน NaCO_3 1 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร จุ่มชิ้นงานลงไปแล้วใช้ฟองน้ำเช็ดผิวของ Dryfilm จนกว่า Dryfilm จะถูกล้างออกไปหมด ก็จะได้ขอบสารไวแสงที่มีความหนาคงที่สำหรับสร้างฟิล์มบางดังรูปที่ 5.39 (ค) ต่อมาคือการเตรียม PDMS (Sylgard 184 Silicone Elastomer) ในชุดของ PDMS จะมีสารเคมีอยู่สองส่วน ผสมสารเคมีทั้งสองส่วนในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก คนให้สารเคมีทั้งสองส่วนเข้ากัน แล้วนำเข้าเครื่องดูดอากาศเพื่อดูดฟองอากาศที่อยู่ใน PDMS ออกไป จากนั้นเท PDMS ลงบนกระจกสไลด์ที่มีขอบเป็น Dryfilm ที่เตรียมไว้ให้ทั่ว แล้วปิดทับด้วยแผ่นใส และกระจกสไลด์และใช้ไฟมรด้านบนก่อนที่จะกดอัดด้วยแผ่นอูมิเนียมดังรูปที่ 5.40 นำไปอบบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 74 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที รอให้เย็นตัวลงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นลอก PDMS ที่อยู่ภายในกรอบ Dryfilm โดยใช้ น้ำยาถอดแบบ Mould release LU-158 เมื่อฟิล์มบางหลุดออกมาแล้วนำไปวางบนกระจกสไลด์อีกแผ่นทำความสะอาดน้ำยาถอดแบบด้วยน้ำยา Mould SS Cleaner Spray แล้วจุ่มลงใน IPA เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้แน่ใจว่าน้ำยาถอดแบบถูกล้างออกไปหมดแล้ว จะได้ฟิล์มบาง PDMS ดังรูปที่ 5.41 สำหรับใช้เป็นไดอะแฟรมของตัวตรวจวัดความดัน



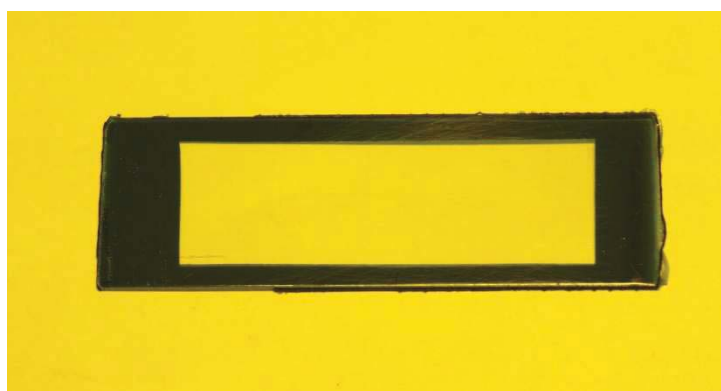
รูปที่ 5.38 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง PDMS



(ก)

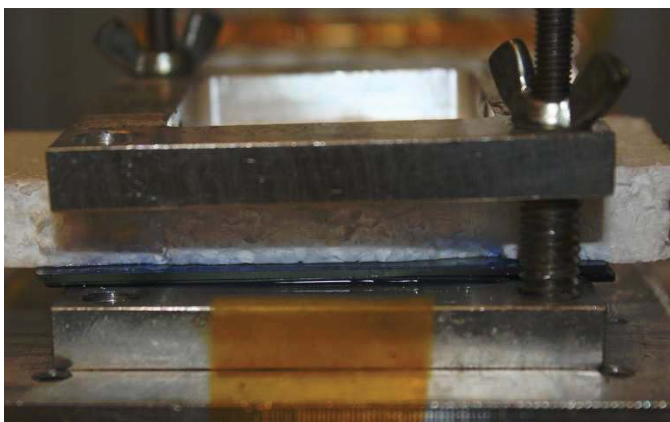


(ข)

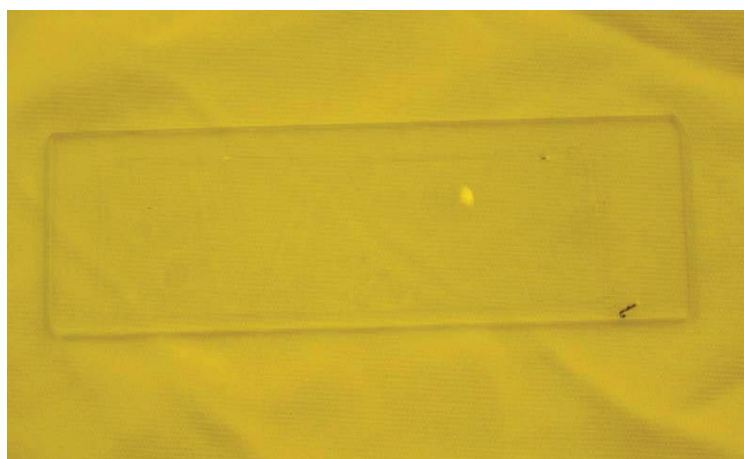


(ค)

รูปที่ 5.39 การสร้างขอบสารไวแสง Dryfilm (ก) Dryfilm 3 ชั้นที่รีดบนกระจกสไลด์ขนาด 1x3 นิ้ว
(ข) ติดเทปกาวทึบแสงบน Dryfilm (ค) หลังจากล้าง Dryfilm บริเวณที่ไม่ถูกฉายด้วยแสงออกไป



รูปที่ 5.40 การกดอัด PDMS และวางบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส



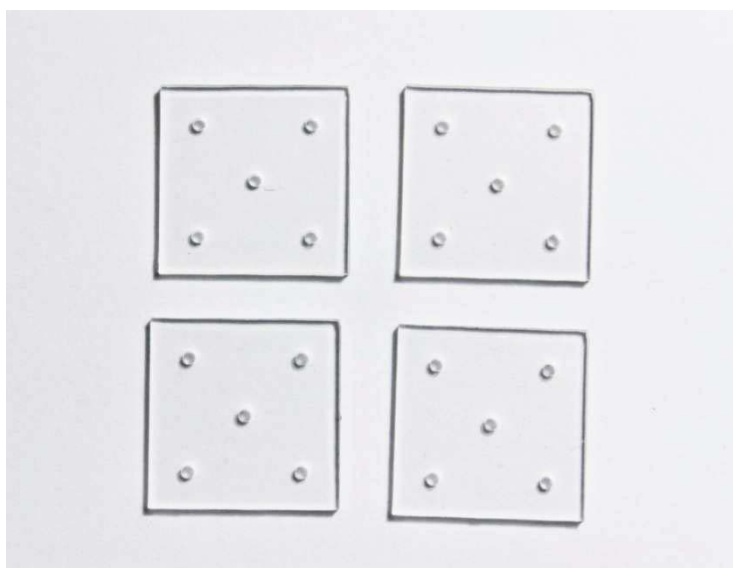
รูปที่ 5.41 PDMS फिल्मบางที่ได้จากการกดอัดและผ่านการทำความสะอาดพร้อมใช้งาน

5.5 กระบวนการติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม

จากหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุและฟิล์มบาง PDMS ต่อมาจะเป็นการติดฟิล์มบาง PDMS บนช่องเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร เพื่อจะได้ไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดัน จากนั้นนำโครงสร้างของตัวเก็บประจุติดตั้งบนไดอะแฟรมและเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า มีขั้นตอนโดยละเอียดดังนี้

5.5.1 การเตรียมช่องเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร

ในส่วนของการเตรียมช่องเปิดวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร จะใช้แผ่นอะคริลิกใส ตัดให้มีขนาด 1x1 เซนติเมตร เจาะรูตรงกลางด้วยดอกสว่านขนาด 1 มิลลิเมตร และเจาะรูบริเวณมุมทั้งสี่มุมของแผ่นเพื่อติดตั้งขั้วโลหะสำหรับเชื่อมต่อกับวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.42 โดยในการเจาะรูและการตัดทั้งหมดจะใช้เครื่อง CNC เพื่อความแม่นยำ

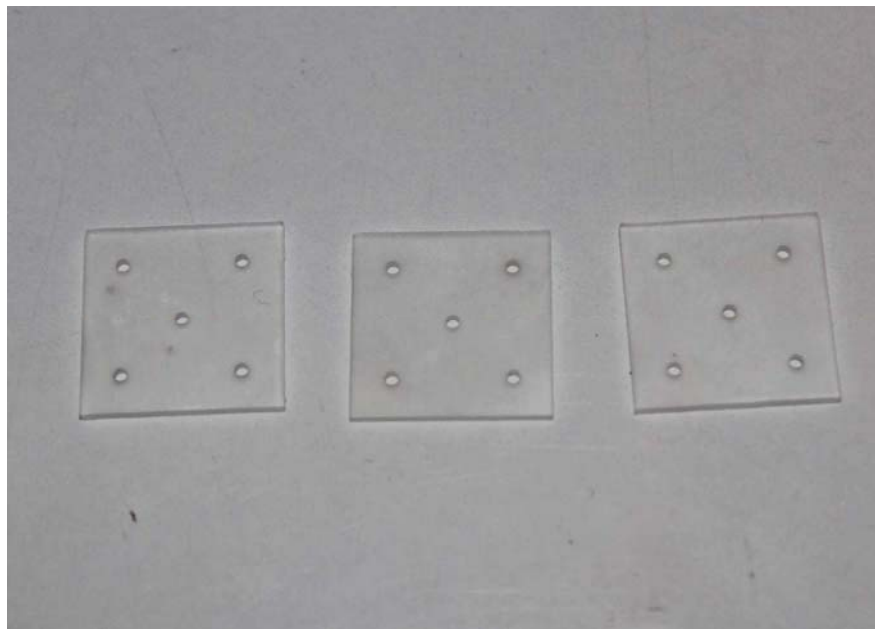


รูปที่ 5.42 แผ่นอะคริลิกใสที่เจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตรสำหรับติดไดอะแฟรม

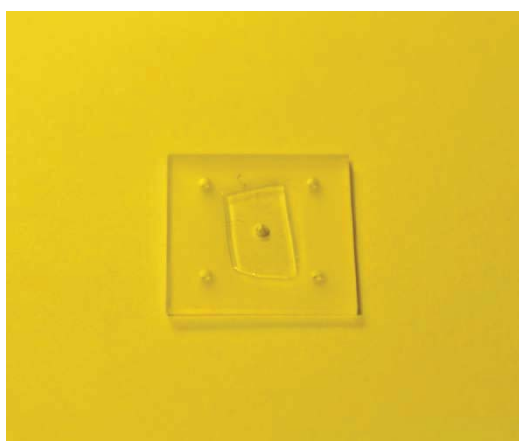
5.5.2 การติดฟิล์มบาง PDMS บนช่องเปิดวงกลม

ในการติดฟิล์มบาง PDMS บนอะคริลิก จะใช้ PDMS เป็นตัวเชื่อมระหว่าง PDMS และอะคริลิก แต่ PDMS ไม่สามารถยึดติดกับแผ่นอะคริลิกได้เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีผิวเรียบ จึงต้องทำให้ผิวของอะคริลิกขรุขระเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะ ซึ่งสามารถทำได้โดยนำแผ่นอะคริลิกที่เจาะรูไว้แล้วไปพ่นทราย แล้วทำความสะอาดด้วยเครื่องซูเปอร์โซนิคในน้ำเป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ทรายที่ฝังในเนื้ออะคริลิกหลุดไป จะได้อะคริลิกที่มีผิวขรุขระดังรูปที่ 5.43 จากนั้นนำแผ่นอะคริลิกที่พ่นทรายแล้วไปหมุนเคลือบ PDMS ที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาทีแล้วนำฟิล์มบาง PDMS ที่เตรียมไว้

ตัดให้มีขนาด 5x5 มิลลิเมตร ติดลงไปบนช่องเปิดวงกลมบนแผ่นอะคริลิกดังรูป 5.44 นำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที



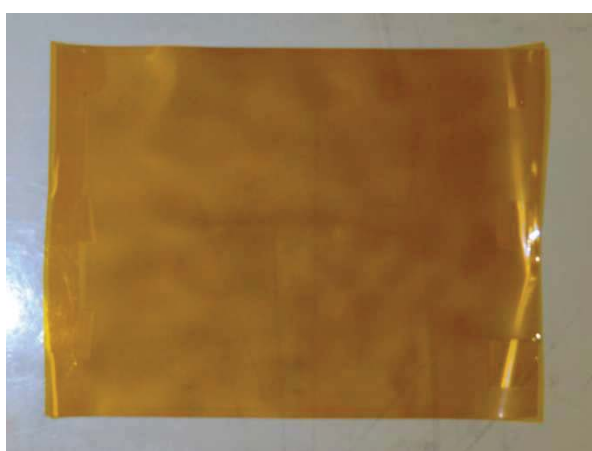
รูปที่ 5.43 แผ่นอะคริลิกใสที่ผ่านการพันทราย



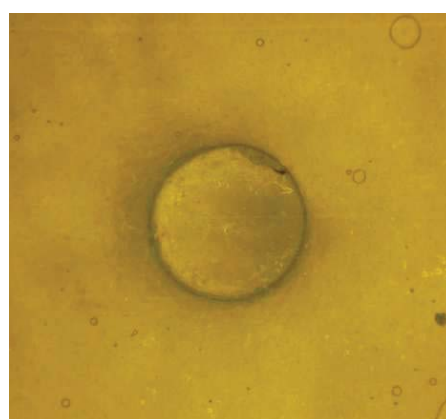
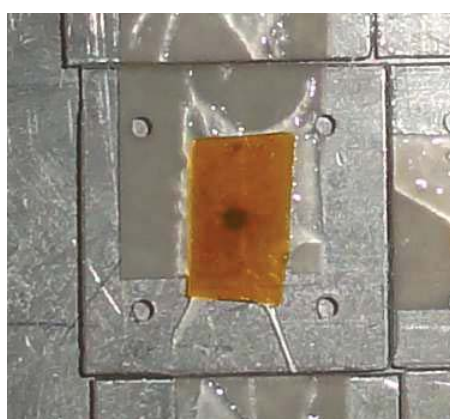
รูปที่ 5.44 การติดฟิล์มบาง PDMS ช่องเปิดขนาด 1 มิลลิเมตรเพื่อใช้เป็นไดอะแฟรม

5.5.3 การติดฟิล์ม PI บนช่องเปิดวงกลม

การติดฟิล์ม PI บนช่องเปิดวงกลม จะมีขั้นตอนคล้ายกับการติดฟิล์มบาง PDMS คือนำแผ่น อะคริลิกไปพันทรายเพื่อเพิ่มแรงยึดเกาะ และพันทรายแผ่น PI ด้วยเช่นกัน โดยแผ่น PI ที่ทำการพันทรายมีลักษณะดังรูปที่ 5.45 ส่วนการยัดแผ่น PI บนช่องเปิดจะใช้กาวอีพอกซีแห้งช้า โดยการหมุนเคลือบที่ความเร็ว 6000 รอบต่อนาที จากนั้นนำแผ่น PI ด้านที่ถูกพันทรายติดบนช่องเปิด ดังรูปที่ 5.46



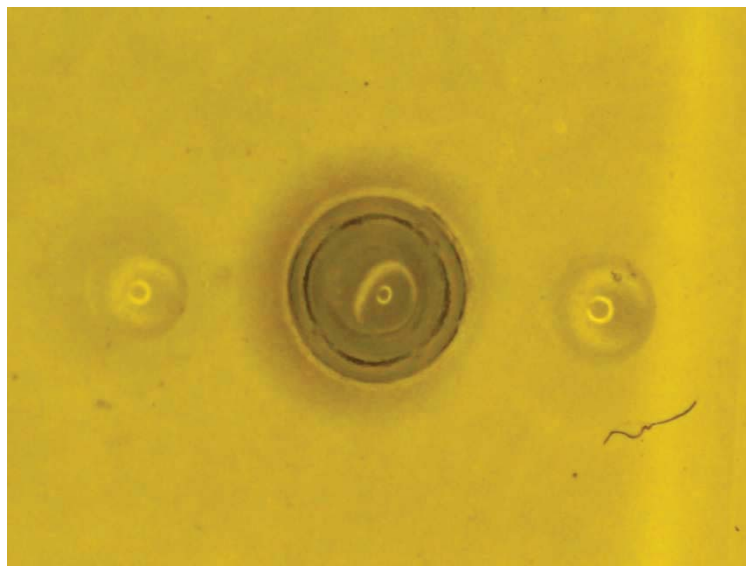
รูปที่ 5.45 แผ่น PI ที่พันทรายบริเวณผิว



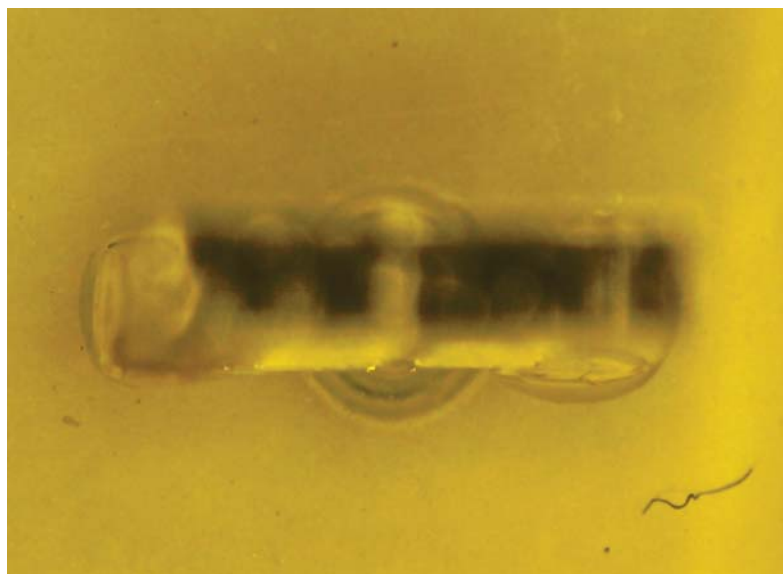
รูปที่ 5.46 การติดฟิล์ม PI ช่องเปิดขนาด 1 มิลลิเมตรเพื่อใช้เป็นไดอะแฟรม

5.5.4 การติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรมและเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า

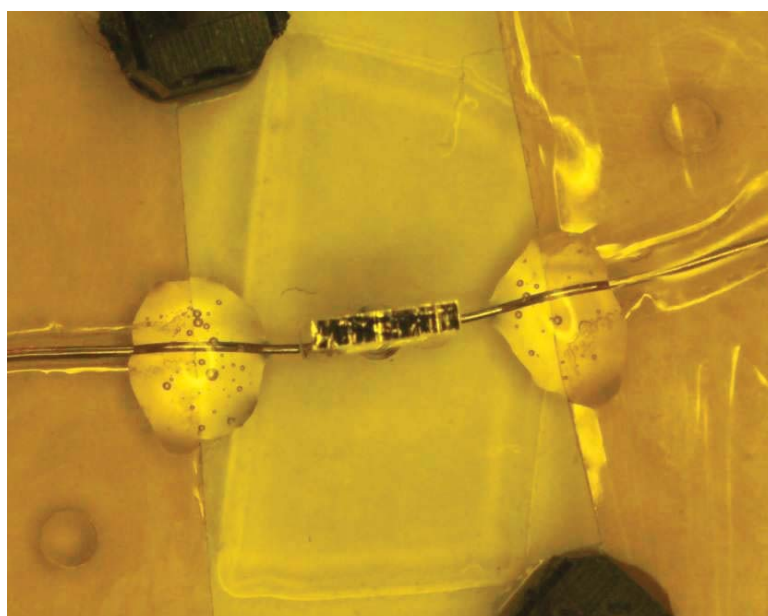
เมื่อติดไดอะแฟรมเรียบร้อยแล้ว ต่อมาเป็นการติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม การยึดตัวเก็บประจุให้ติดกับไดอะแฟรมจะใช้กาวอีพอกซีชนิดแห้งเร็ว 5 นาที ติดบนไดอะแฟรมดังรูปที่ 5.47 ก่อนที่จะวางตัวเก็บประจุลงไปดังรูปที่ 5.48(ก) รอให้กาวแห้งเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำเส้นลวดทองแดงวางไว้ให้ชิดกับขั้วของตัวเก็บประจุแล้วติดกาวอีพอกซีให้ลวดทองแดงไม่หลุดออกโดยเว้นช่องที่ปลายของเส้นลวดเพื่อติดกาวนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.48(ข) รอให้กาวแห้งเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเชื่อมต่อปลายของลวดทองแดงกับขั้วของตัวเก็บประจุด้วยกาวนำไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.49(ก) อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เพื่อให้กาวนำไฟฟ้าแข็งตัว เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำขั้วต่อโลหะมาติดกับรูเจาะที่มุมของแผ่นอะคริลิกและนำลวดทองแดงที่เชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุมาเชื่อมกับขั้วโลหะดังกล่าวนี้ด้วยเพื่อเชื่อมต่อกับวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าดังรูปที่ 5.49(ข) จากนั้นนำท่อความดันมาติดด้านล่างของแผ่นอะคริลิกด้วยกาวอีพอกซี ดังรูปที่ 5.50 เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดความดันแบบตัวเก็บประจุดังรูปที่ 5.51



รูปที่ 5.47 การติดกาวอีพอกซีบนไดอะแฟรมเพื่อเชื่อมกับ โครงสร้างตัวเก็บประจุ

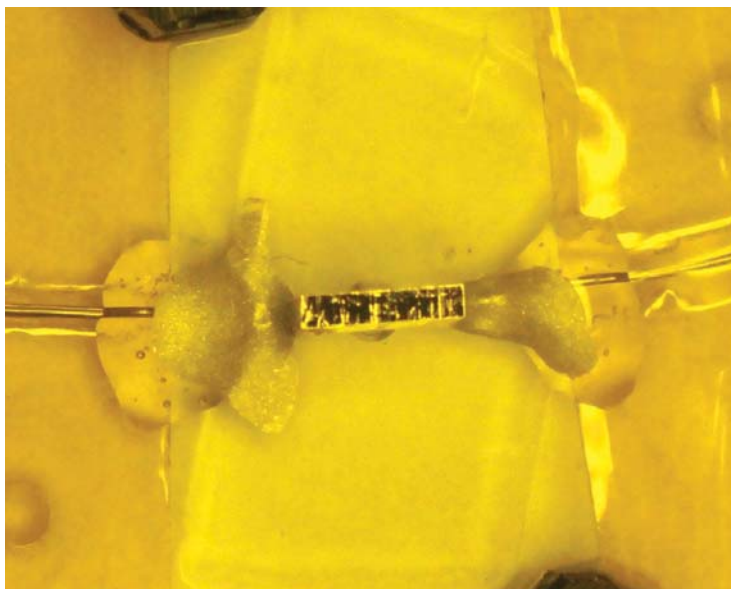


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.48 การติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม (ก) ลักษณะการติดตั้งโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม (ข) การวางลวดเพื่อเชื่อมต่อกับขั้วของตัวเก็บประจุ



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.49 การเชื่อมต่อสายสายเข้ากับขั้วของตัวเก็บประจุ (ก) การเชื่อมต่อการนำไฟฟ้ากับขั้วของ
ตัวเก็บประจุ (ข) การต่อสายออกไปยังจุดเชื่อมต่อวงจร



รูปที่ 5.50 การเชื่อมต่อท่อความดันเข้ากับตัวตรวจรู้ความดันด้วยกาวอีพอกซี



รูปที่ 5.51 ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว

5.6 สรุป

บทที่ 5 กล่าวถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความดันตั้งแต่กระบวนการวาดตลาดด้วยโปรแกรม Layout Editor การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ โดยใช้แผ่นพลาสติกใสเป็นวัสดุฐาน และแผ่นกราฟไฟต์เป็นวัสดุฐาน ซึ่งการใช้หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ใช้แผ่นใสเป็นวัสดุฐานไม่สามารถใช้ฉายรังสีบนสารไวแสงที่มีความหนาแน่นมากกว่า 500 ไมโครเมตรได้เนื่องจากโลหะเงินที่ได้จากการชุบโลหะในบริเวณช่องขนาดเล็กมีความหนาไม่มากพอ จึงไม่สามารถชุบรังสีเอกซ์ได้หมดทำให้สารไวแสงบริเวณช่องขนาดเล็กแข็งตัวไม่สามารถล้างออกได้ จึงเลือกใช้หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ใช้กราฟไฟต์เป็นวัสดุฐานซึ่งสามารถชุบโลหะได้หนาแน่นกว่าแผ่นใสเคลือบโลหะ หลังจากสร้างโครงสร้างด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโธกราฟี จะได้โครงสร้างตัวเก็บประจุที่เป็นพอลิเมอร์ จากนั้นนำโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ได้ไปเคลือบโลหะโครเมียมและโลหะเงินด้วยกระบวนการสปัตเตอริงและถมสารไวแสงลงไปบนโครงสร้างอีกครั้งเพื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตเชื่อมต่อโครงสร้างของขั้วตัวเก็บประจุให้ติดกันก่อนที่จะขัดฐานกราฟไฟต์ทิ้งไป ล้างสารไวแสงออกจะได้โครงสร้างตัวเก็บประจุ จากนั้นตัดโครงสร้างตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรมทั้งสองแบบ เชื่อมต่อสายไฟเข้ากับวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการสร้างตัวตรวจรู้ความดัน ส่วนของการทดสอบเพื่อหาคุณลักษณะเฉพาะของตัวตรวจรู้ในบทที่ 6 ต่อไป

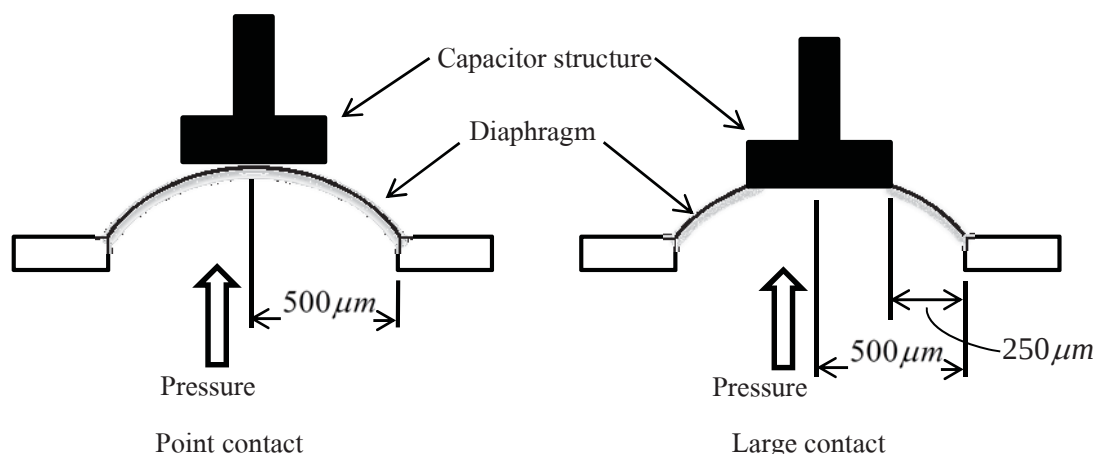
บทที่ 6

การทดสอบคุณลักษณะสมบัติตัวตรวจรู้ความดัน

ในบทนี้จะกล่าวถึง การนำตัวตรวจรู้ความดันที่ได้ออกแบบและสร้าง มาทำการทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความดัน ซึ่งจะทำให้การทดสอบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทดสอบผลของอุณหภูมิ และทดสอบเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น (SUT-S และ SUT-I) กับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ MPX4250 และ MPX5700 การออกแบบและสร้างวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า ชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน การทดสอบผลการตอบสนองทางเวลา และทดสอบฮิสเตอร์ซิส สรุปคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นทั้งสองแบบสรุปเป็นตารางเพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไป การทดสอบคุณลักษณะสมบัติทั้งหมดมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.1 การทดสอบระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการสร้างตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS และไดอะแฟรม PI ในบทที่ 5 ซึ่งหลังจากที่สร้างตัวตรวจรู้ความดันเสร็จสมบูรณ์แล้ว จะทำการทดสอบการโก่งตัวของไดอะแฟรมทั้งสองแบบที่ติดตั้งตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรมแล้วเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จำลองการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรมซึ่งมีผลการทดสอบดังรูปที่ 4.11 สำหรับไดอะแฟรม PDMS และรูปที่ 4.12 และภาพขณะทำการทดสอบดังรูปที่ 6.2 ซึ่งในการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมในบทที่ 4 เป็นการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมขณะที่ไม่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุหรือติดตั้งเป็นจุดขนาดเล็ก (Point contact) ดังรูปที่ 6.1(d)ซึ่งคำนวณโดยใช้สมการการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ความดันต่างๆ สมการที่ 4.3 โดยไดอะแฟรม PDMS กำหนด $\nu = 0.55$ $E = 4.3\text{MPa}$ $h = 120\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ $r = 0\mu\text{m}$ ส่วน ไดอะแฟรม PI กำหนด $\nu = 0.35$ $E = 6.12\text{GPa}$ $h = 25\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ $r = 0\mu\text{m}$ ผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมทั้งสองชนิดเป็นดังรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 เส้นที่เป็น Point contact แต่ในการสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุในบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.4.4 ไม่สามารถติดตั้งตัวเก็บประจุเป็นจุดสัมผัสขนาดเล็กได้ เนื่องจากตัวเก็บประจุที่ออกแบบมีจุดสัมผัสขนาดใหญ่ ในการติดตั้งจึงใช้พื้นที่ในการติดตั้งขนาดใหญ่ (Large contact) ดังรูปที่ 6.1

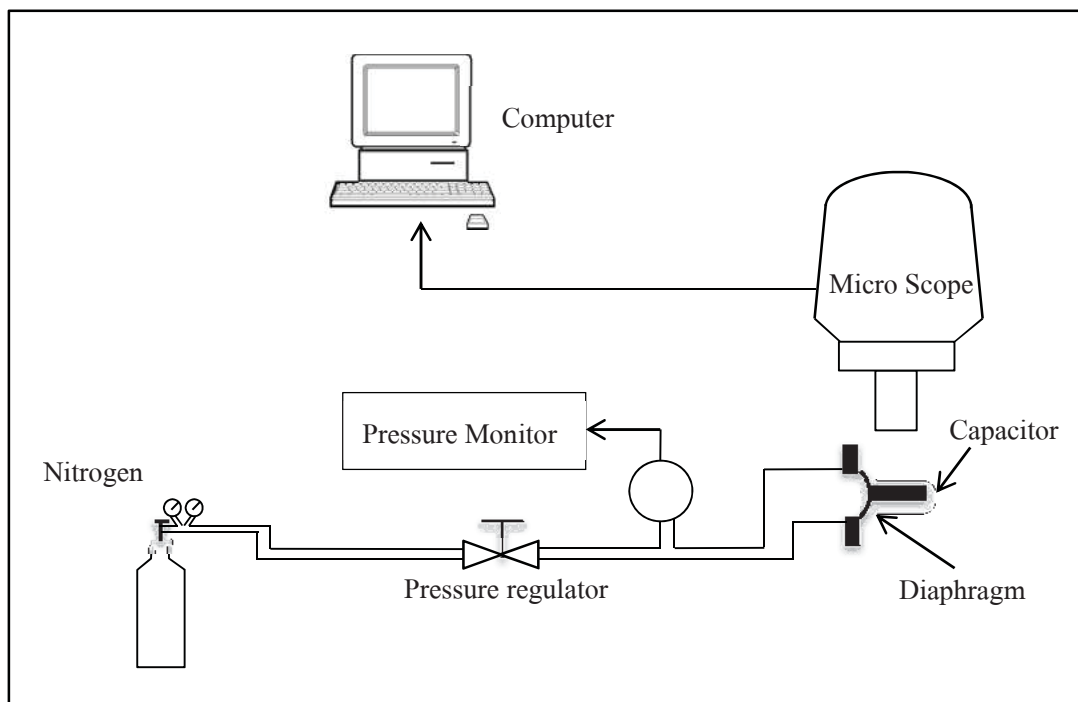


รูปที่ 6.1 ลักษณะการโก่งตัวของไดอะแฟรมแบบ point contact (ซ้าย) และแบบ Large contact (ขวา)

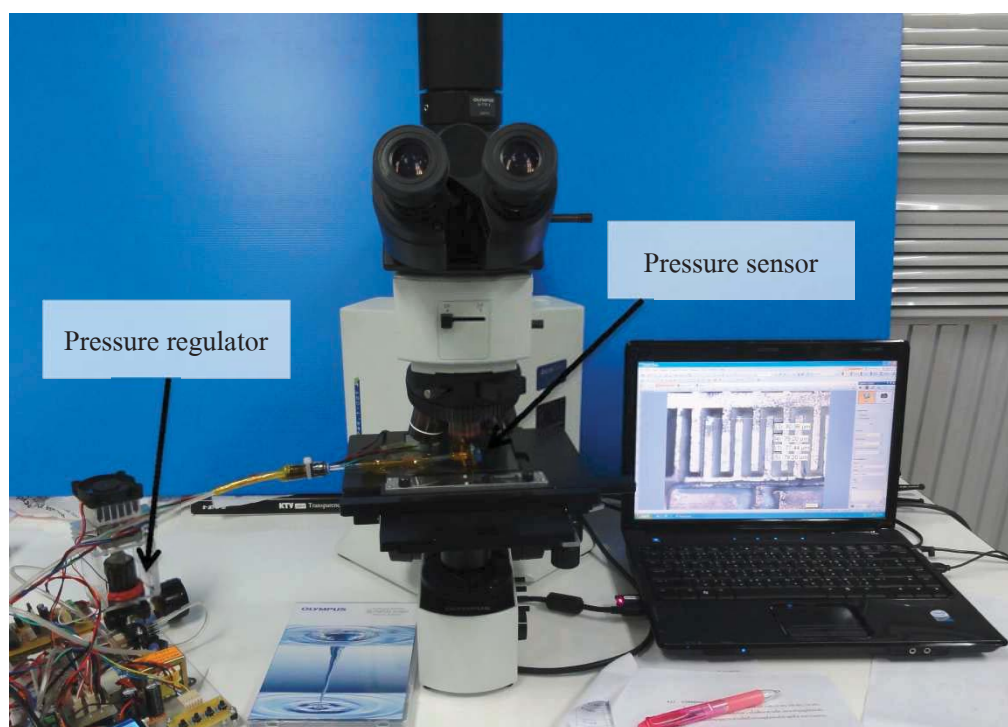
ในรูปที่ 6.1 เป็นลักษณะของการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่มีพื้นที่การติดตั้งตัวเก็บประจุ การโก่งตัวสูงสุดของไดอะแฟรมจึงไม่ใช่จุดกึ่งกลาง แต่การโก่งตัวสูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง $r = 250\mu\text{m}$ ดังนั้นการคำนวณการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่มีพื้นที่ติดตั้งตัวเก็บประจุในกรณีดังรูปที่ 6.1(ข) จะใช้สมการการโก่งตัว สมการที่ 4.3 สำหรับไดอะแฟรม PDMS กำหนด $\nu = 0.55$ $E = 4.3\text{MPa}$ $h = 120\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ $r = 250\mu\text{m}$ ส่วนไดอะแฟรม PI กำหนด $\nu = 0.35$ $E = 6.12\text{GPa}$ $h = 25\mu\text{m}$ $a = 500\mu\text{m}$ $r = 250\mu\text{m}$ ผลการจำลองการโก่งตัวของไดอะแฟรมทั้งสองชนิดเป็นดังรูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5 เส้นที่เป็น Large contact

สำหรับการทดสอบการโก่งตัวของไดอะแฟรมทั้งสองชนิด ทำการป้อนความดันให้กับตัวตรวจรู้ความดันและวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรมโดยการวัดระยะการเคลื่อนที่ของตัวเก็บประจุด้วยกล้องจุลทรรศน์ Olympus BX51TRF ซึ่งติดตั้งกล้องและโปรแกรมที่สามารถวัดระยะตามแนวระนาบได้ มีแผนผังการทดสอบดังรูปที่ 6.1 และภาพขณะทำการทดสอบดังรูปที่ 6.2 โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวกำเนิดความดันผ่านตัวควบคุมความดันและตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ MPX4250 สำหรับไดอะแฟรม PDMS และ MPX5700 สำหรับไดอะแฟรม PI ป้อนความดันเข้าตัวตรวจรู้ความดันที่ทดสอบซึ่งอยู่ใต้กล้องจุลทรรศน์ และใช้คอมพิวเตอร์ในการวัดระยะการเคลื่อนที่

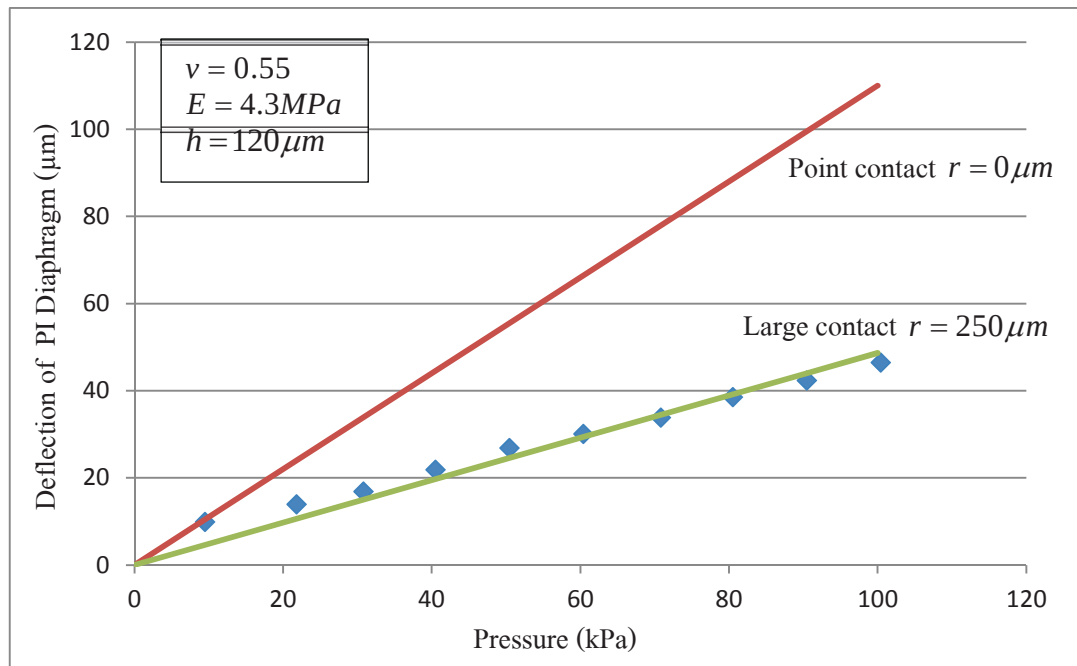
ผลการทดสอบการโก่งตัวของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS มีผลการทดสอบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการโก่งตัวทั้งสองกรณี เป็นดังรูปที่ 6.4 และตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI เทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการโก่งตัวทั้งสองกรณี ดังรูปที่ 6.5



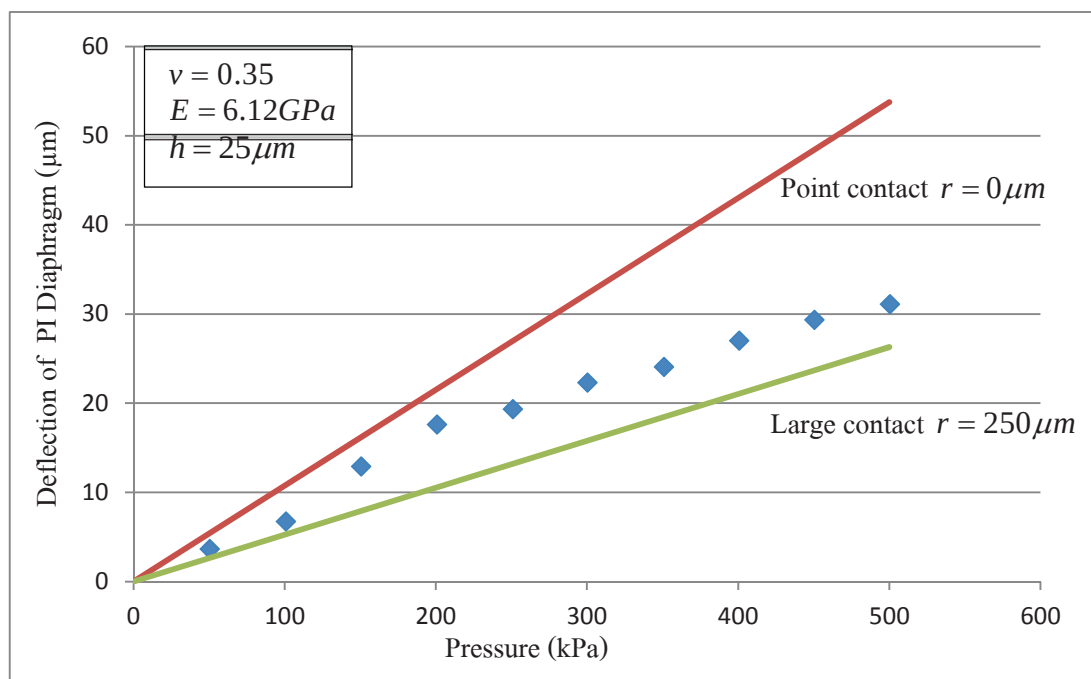
รูปที่ 6.2 ไดอะแกรมการทดสอบวัฏระยะการ โกงตัวของไดอะแฟรมที่ติดตั้งตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรม



รูปที่ 6.3 ภาพขณะทำการทดสอบการวัฏระยะการเคลื่อนที่ของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PDMS เทียบกับ
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 6.5 ผลการทดสอบการวัดระยะการโก่งตัวของไดอะแฟรม PI เทียบกับแบบจำลอง
ทางคณิตศาสตร์

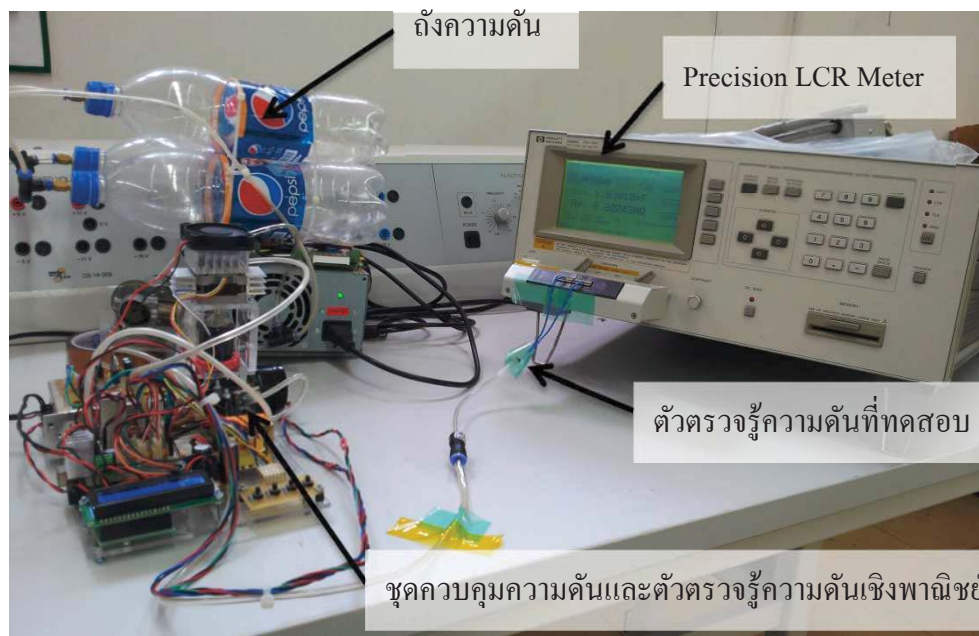
จากรูปที่ 6.4 และรูปที่ 6.5 การทดสอบการโก่งตัวของไดอะแฟรมที่ติดตั้งตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองแบบ ผลการทดสอบพบว่า ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS มีผลการทดสอบใกล้เคียงกับทางคณิตศาสตร์ ส่วนตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI ผลการทดสอบใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ความดัน 0 – 200 kPa ส่วนที่ความดันค่าสูงกว่า 200 kPa ระยะการโก่งตัวจะห่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พอสมควร ซึ่งเกิดจากการติดตั้งตัวเก็บประจุบนไดอะแฟรมมีพื้นที่ในการติดกาวแต่ในการคำนวณจะกำหนดให้พื้นที่การติดกาวเป็นจุดขนาดเล็กไม่มีผลต่อการโก่งตัวที่จุดกึ่งกลางของไดอะแฟรม จึงทำให้การโก่งตัวของไดอะแฟรมมีความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังผลการทดสอบ

6.2 การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าและทดสอบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า

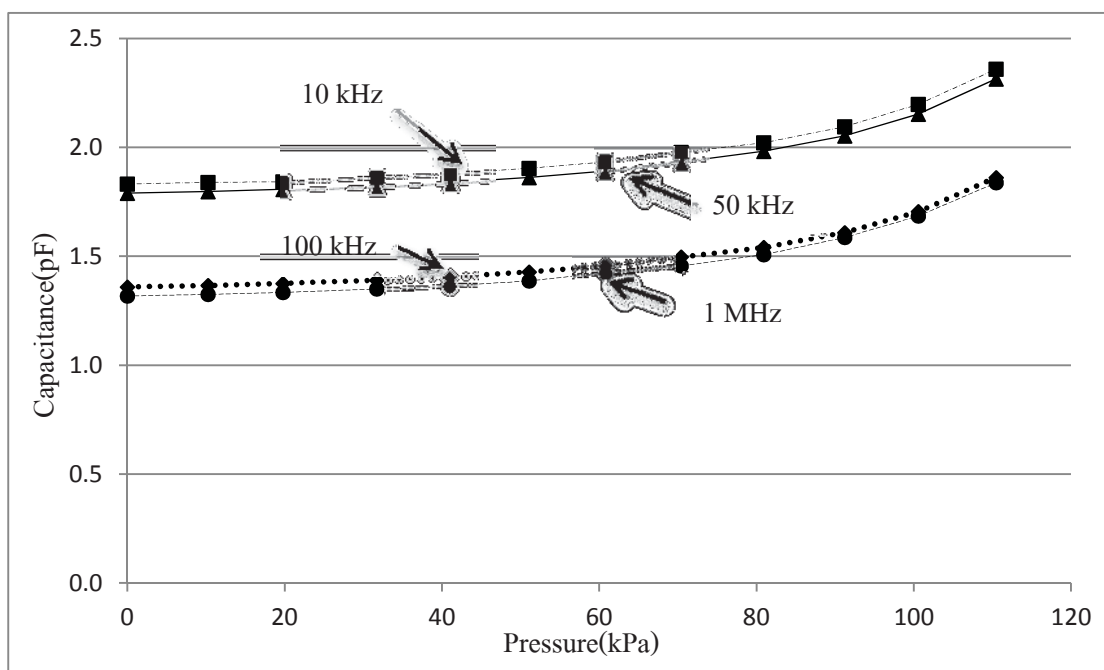
การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างตัวเก็บประจุที่ติดตั้งอยู่บนไดอะแฟรม ซึ่งจะใช้ Precision LCR Meter ของบริษัท Hewlett Packard รุ่น 4284A ซึ่งสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ได้ตั้งแต่ 20 Hz – 1 MHz และเนื่องจากตัวเก็บประจุมีความจุไฟฟ้าแปรผันตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของวัสดุ ซึ่งค่าดังกล่าวนี้จะมีค่าแปรผันกับความถี่เช่นเดียวกัน ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ใช้งานต่างๆ จึงมีค่าไม่เท่ากัน การทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าจึงต้องทำการวัดที่ความถี่ใกล้เคียงกับการใช้งานจึงจะได้ค่าที่ถูกต้อง โดยจะทำการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันที่ความถี่ 10 kHz 50 kHz 100 kHz และ 1 MHz ตามลำดับ ที่อุณหภูมิห้อง 30 องศาเซลเซียส ซึ่งชุดทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 6.6 มีตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ MPX4250 และ MPX5700 สำหรับไดอะแฟรม PDMS และ PI ตามลำดับ เป็นตัวตรวจรู้ความดันมาตรฐานในการวัดซึ่งการอ่านความดันจากตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อ่านสัญญาณอนาล็อกผ่านวงจรแปลงอนาล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 10 บิต และคำนวณค่าความดันจากสัญญาณที่อ่านได้โดยอ่านสัญญาณ 100 ครั้งระยะห่างในการอ่าน 1 ms แล้วหาค่าเฉลี่ยก่อนที่จะแสดงผล การวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS มีตารางผลการทดสอบ ในภาคผนวก ค. นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 6.7 และความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI มีตารางผลการทดสอบ ในภาคผนวก ค. นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณดังรูปที่ 6.8

จากรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.8 เป็นกราฟของค่าความจุไฟฟ้าที่ค่าความถี่ต่างกัน จะเห็นได้ว่ากราฟมีความแตกต่างกันที่ค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้น ซึ่งเมื่อนำกราฟข้อมูลในแต่ละเส้นมาลบค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้นจะได้เป็นกราฟของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าดังรูปที่ 6.9 และรูปที่ 6.10 จะพบว่ากราฟแต่ละเส้นที่มีความถี่ในการวัดต่างกันเมื่อลบค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้นออกไป การ

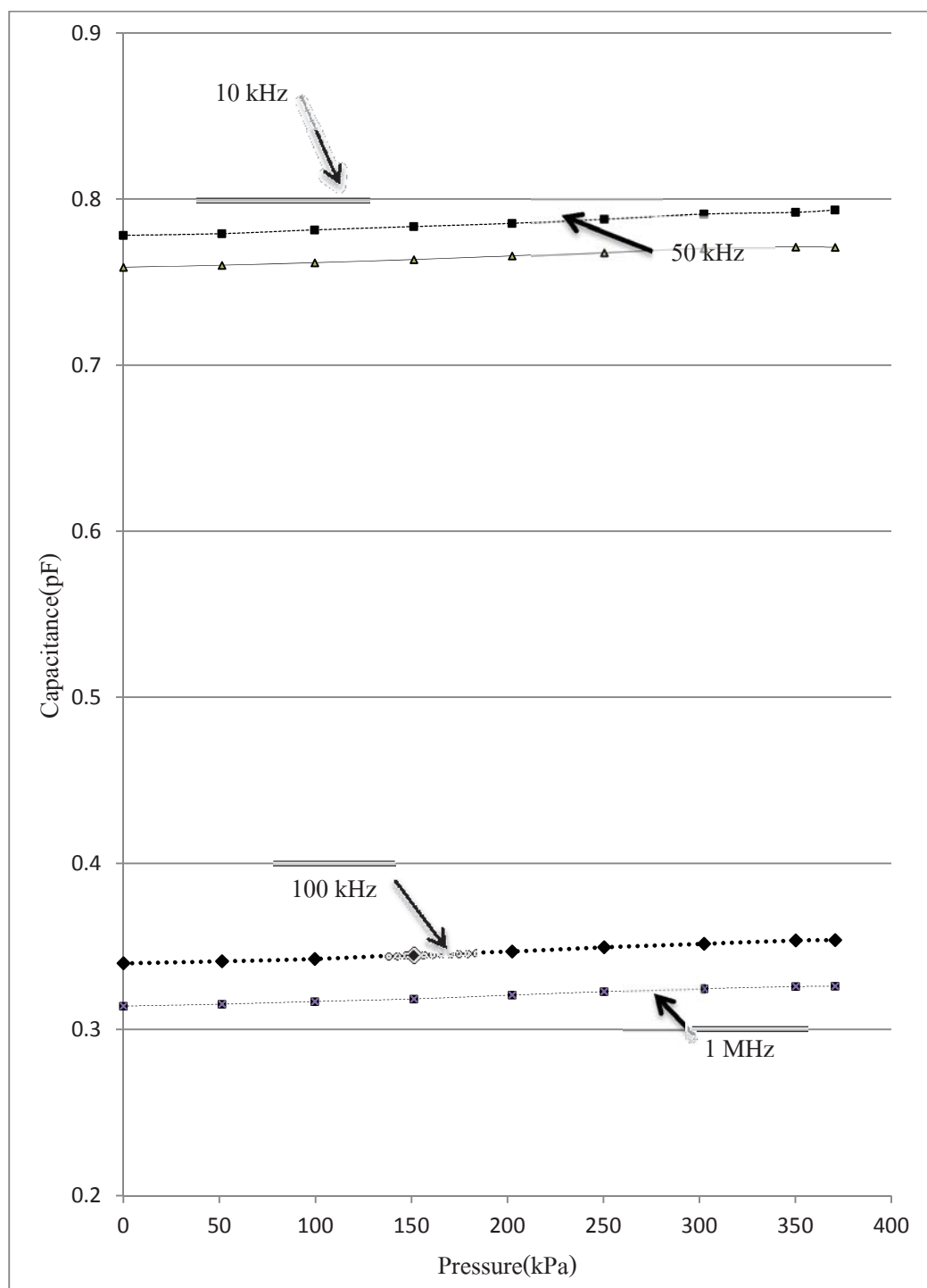
เปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันในทุกๆความถี่ ในการนำตัวตรวจรู้ความดันไปใช้งานที่ความถี่อื่นๆนอกเหนือจากการทดสอบ สามารถใช้สมการร่วมกันได้โดยการลบค่าความจุไฟฟ้าเริ่มต้นออกไป



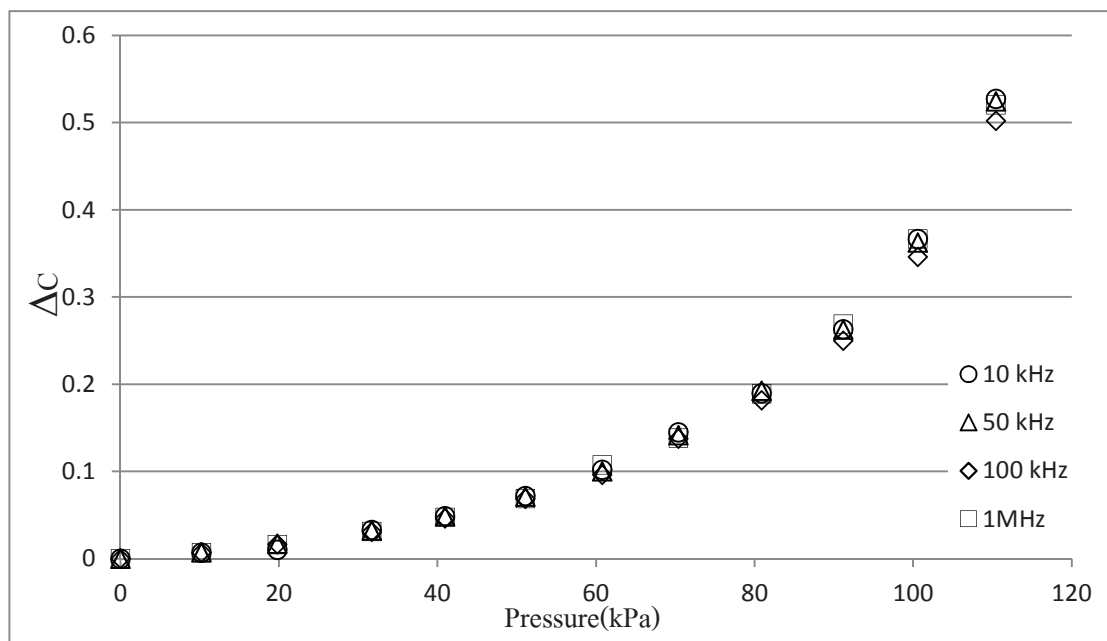
รูปที่ 6.6 ชุดทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าด้วยเครื่อง Precision LCR Meter



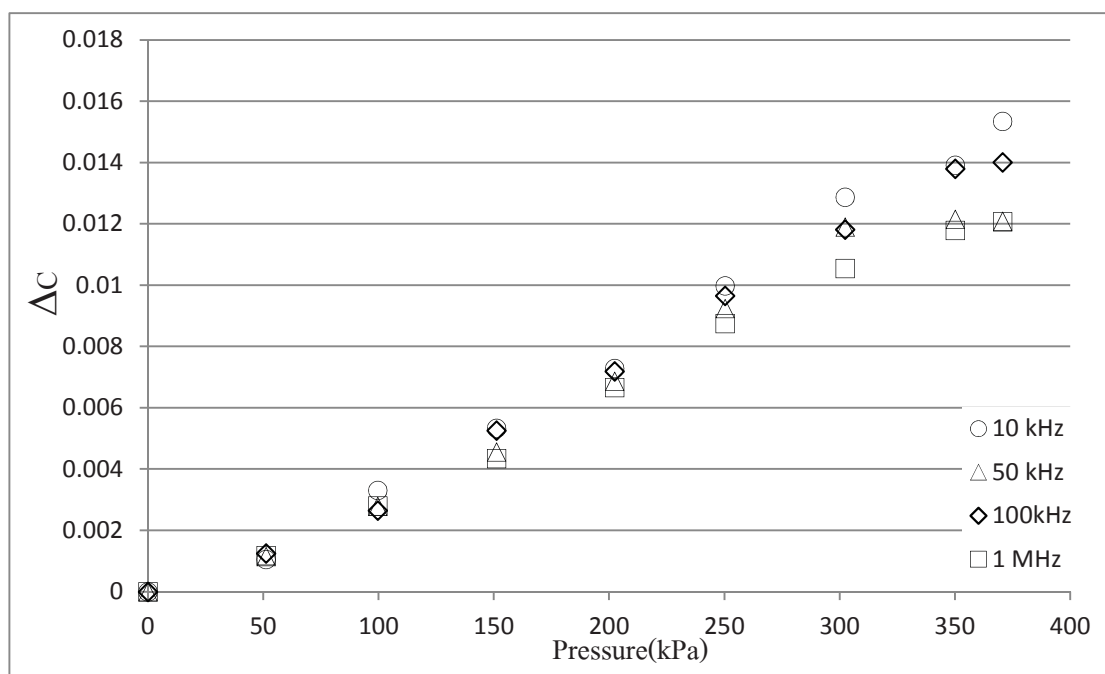
รูปที่ 6.7 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับความดันที่ความถี่ต่างกันของตัวตรวจรู้ความดันSUT-S ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C)



รูปที่ 6.8 ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้ากับความดันที่ความถี่ต่างกันของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ที่อุณหภูมิห้อง (30 °C)



รูปที่ 6.9 ขนาดการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดความดัน SUT-S ที่ความดันต่างๆ เปรียบเทียบการใช้ความถี่ทดสอบของ LCR meter ในช่วง 10 kHz – 1MHz ซึ่งได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน



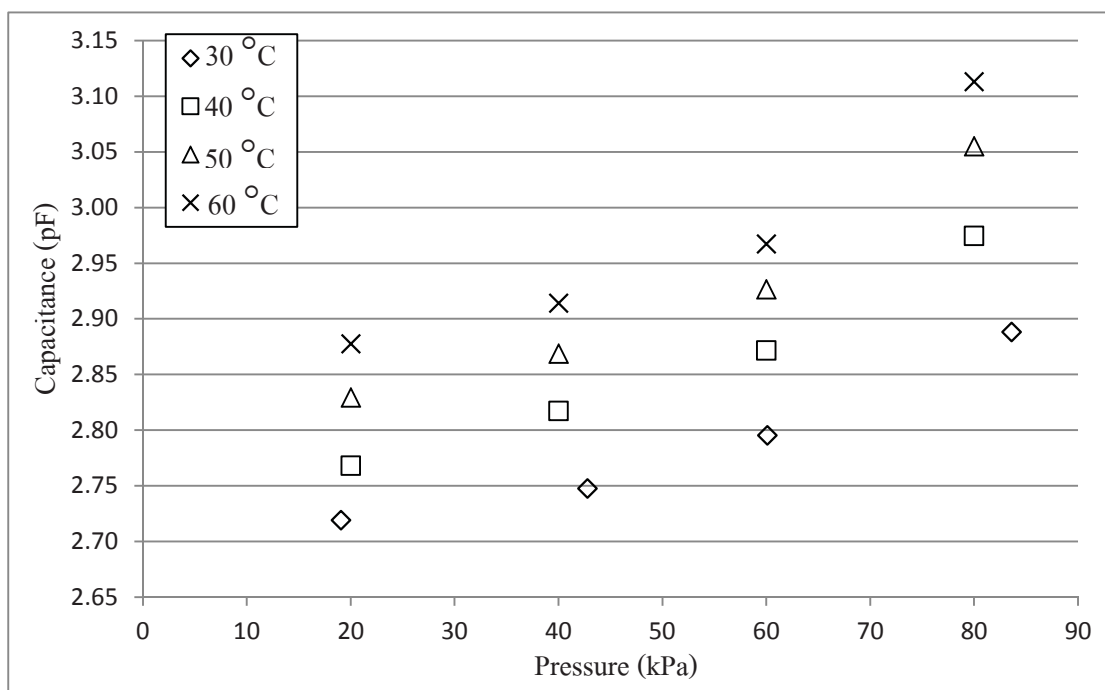
รูปที่ 6.10 ขนาดการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดความดัน SUT-I ที่ความดันต่างๆ เปรียบเทียบการใช้ความถี่ทดสอบของ LCR meter ในช่วง 10 kHz – 1MHz ซึ่งได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน

6.3 การทดสอบผลของอุณหภูมิ

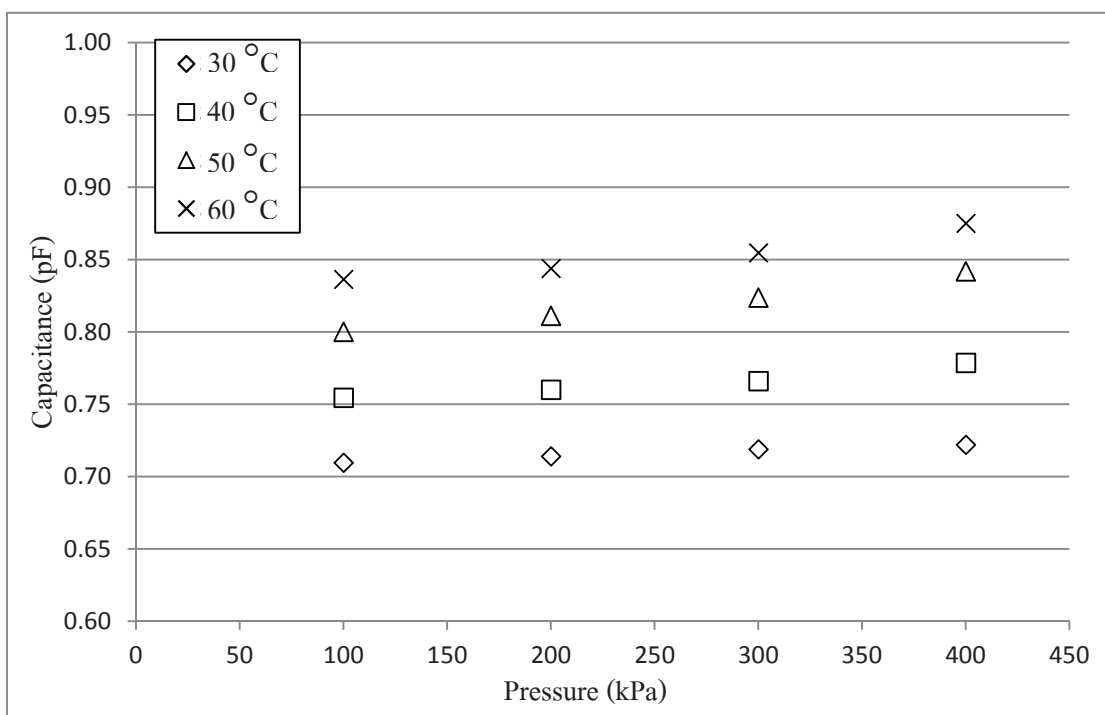
การใช้งานตัวตรวจรู้ความดันในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน ตัวตรวจรู้ความดันที่ดีจะต้องตอบสนองต่อความดันเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติตัวผลของสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันมีผลต่อการตอบสนองของตัวตรวจรู้ โดยปัจจัยหลักๆ ที่ให้ความสำคัญมากที่สุดคือ ผลของอุณหภูมิ เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อค่ามอดูลัสของยังของวัสดุพอลิเมอร์ที่เป็นไดอะแฟรม ในการทดสอบผลของอุณหภูมิของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นนี้ จะทำการทดสอบที่อุณหภูมิสูงสุด 60 องศาเซลเซียส เนื่องจากวัสดุที่ใช้ประกอบตัวตรวจรู้ซึ่งเป็นแผ่น PMMA หรือ Acrylic สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุด 83 องศาเซลเซียส ในส่วนของวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่กับตัวตรวจรู้ในการใช้งานจริงซึ่งไม่สามารถแยกออกมาได้เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากสายเชื่อมต่อ ดังนั้นในการทดสอบผลของอุณหภูมิ จะต้องทดสอบพร้อมกับวงจรด้วยเช่นกัน

ในส่วนของการทดสอบ จะทำการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองแบบคือ ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS จะทำการทดสอบที่ความดัน 20 kPa 40 kPa 60 kPa และ 80 kPa ตามลำดับในแต่ละความดัน ซึ่งจะเริ่มต้นทดสอบที่ 30 องศาเซลเซียสแล้วเพิ่มเป็น 40 องศาเซลเซียสตามลำดับไปจนถึง 60 องศาเซลเซียส ในแต่ละจุดอุณหภูมิจะทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 30 วินาที จำนวน 5 ครั้ง และเมื่อทดสอบถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ผลการทดสอบเป็นดังรูปที่ 6.11 ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI จะทำการทดสอบที่ความดัน 100 kPa 200 kPa 300 kPa และ 400 kPa ตามลำดับในแต่ละความดันจะทำการทดสอบในเงื่อนไขเดียวกับการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI ผลการทดสอบเป็นดังรูปที่ 6.12

จากการทดสอบผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองแบบ จากรูปที่ 6.11 และรูปที่ 6.12 จะเห็นได้ว่าจุดข้อมูลที่ความดันเท่ากันแต่อุณหภูมิต่างกันระยะห่างระหว่างจุดข้อมูลที่อุณหภูมิต่างๆมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า อุณหภูมิมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับค่าความจุไฟฟ้า ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS ที่อุณหภูมิเปลี่ยนไป 10 องศาเซลเซียส ค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเฉลี่ยเท่ากับ 0.0672 pF หรือเท่ากับ 0.00672 pF/°C ส่วนตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI มีค่าเท่ากับ 0.00448 pF/°C ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าผลของอุณหภูมิของไดอะแฟรม PI ดีกว่าไดอะแฟรม PDMS เนื่องจาก PI มีผลของอุณหภูมิน้อยกว่า PDMS



รูปที่ 6.11 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ความดันต่าง ๆ ด้วยเครื่อง LCR meter ที่ความถี่ 100 kHz



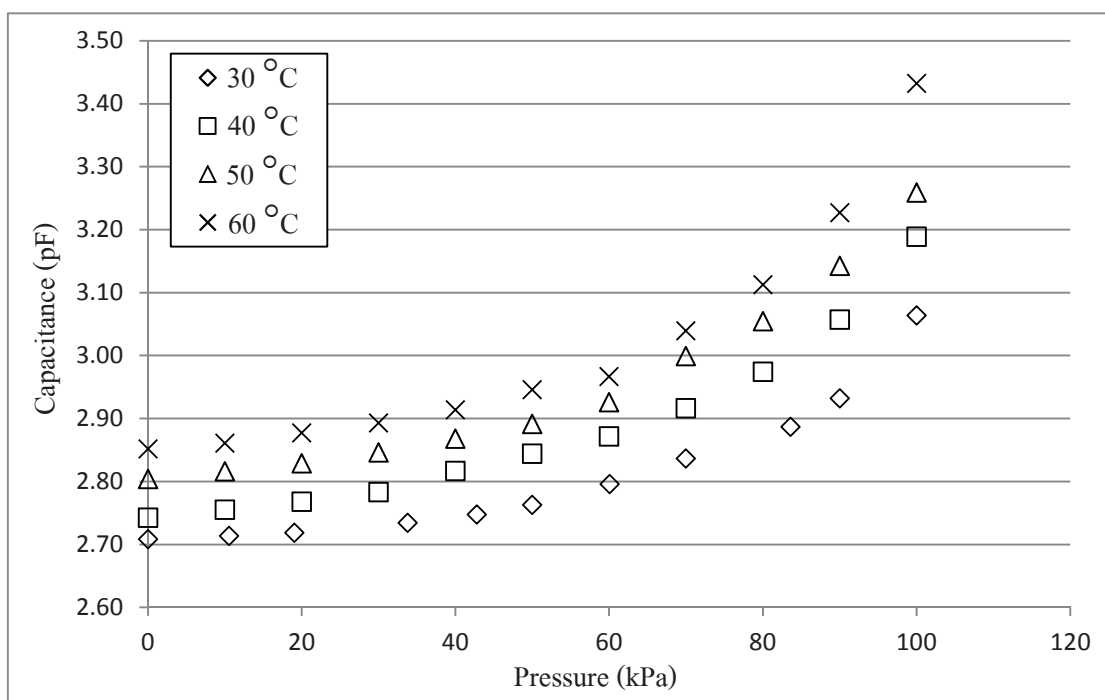
รูปที่ 6.12 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ความดันต่าง ๆ ด้วยเครื่อง LCR meter ที่ความถี่ 100 kHz

6.4 การสอบเทียบตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์

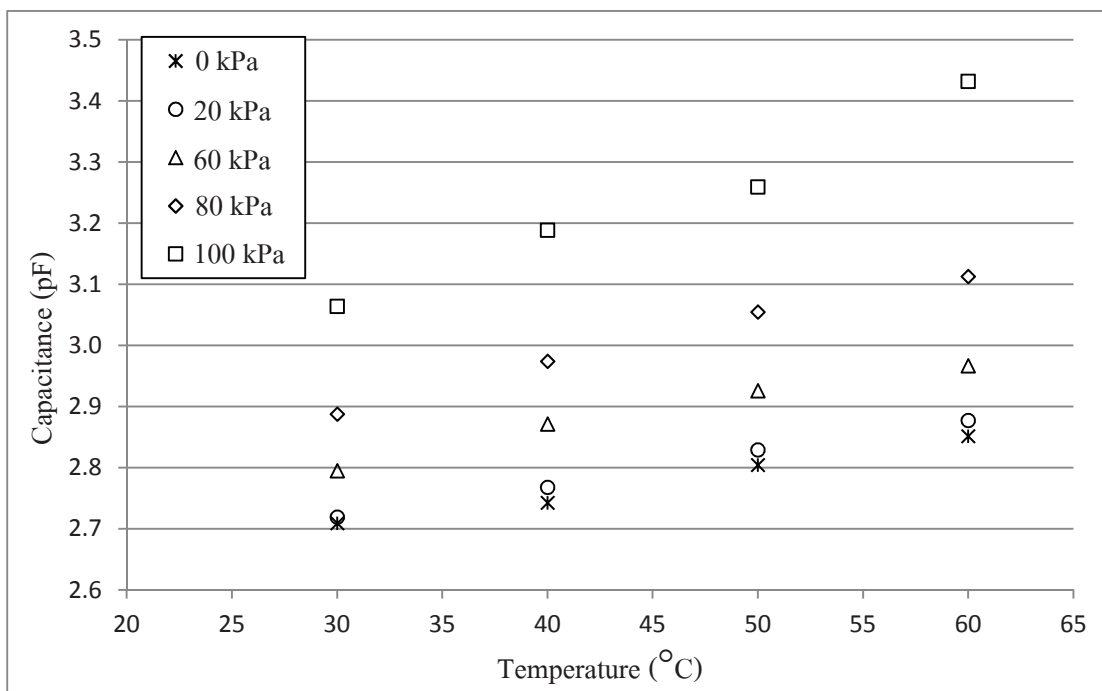
เมื่อทำการสร้างตัวตรวจรู้ความดันและทำการทดสอบผลของอุณหภูมิแล้ว ขั้นตอนที่สำคัญต่อไปคือ การสอบเทียบกับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์เพื่อให้สามารถวัดความดันได้จริง ซึ่งวิธีการทดสอบมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

6.4.1 การทดสอบตัวตรวจรู้ไคอะแฟรม PDMS กับตัวตรวจรู้ MPX4250

การสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดันจะทำการทดสอบความดันของอากาศอัดด้วยปั๊มอัดอากาศโดยกำหนดความดันสูงสุดที่ 100 kPa จากการทดสอบผลของอุณหภูมิพบว่า มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดัน ดังนั้นในการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดันกับตัวตรวจรู้ความดันมาตรฐานจะต้องทำการชดเชยอุณหภูมิด้วย โดยจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 40 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในแต่ละอุณหภูมิ จะทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 11 จุด เริ่มจาก 0 kPa 10 kPa 20 kPa ไปจนถึง 100 kPa แต่ละจุดจะเก็บข้อมูลตัวอย่างทั้งหมด 5 ตัวอย่าง โดยใช้ Precision LCR Meter ในการวัดค่าความจุไฟฟ้า มีระยะห่างในการเก็บข้อมูลแต่ละจุด 30 วินาที จากนั้นนำข้อมูลค่าความถี่ อุณหภูมิ และความดันมาพล็อตกราฟและหาสมการ ความสัมพันธ์โดยใช้ Surface fitting ใน Matlab Toolbox โดยจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า อุณหภูมิ และความดัน ดังรูปที่ 6.13 และรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.13 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เตาอบควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 6.14 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่าง ๆ

จากรูปที่ 6.13 และรูปที่ 6.14 การสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้ตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์เบอร์ MPX4250 เป็นมาตรฐาน จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความดัน ความถี่และอุณหภูมิจากตัวตรวจรู้ความดันดังสมการที่ 6.1 ความสอดคล้องของสมการนี้กับชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่า $R^2 = 0.82$

$$C = (4 \times 10^{-5})P^2 + (6 \times 10^{-5})PT + 0.0045T - 0.00255P + 2.575 \quad (6.1)$$

เมื่อ P คือ ความดันก้ำชมีหน่วยเป็น kPa

T คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

C คือค่าความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น pF

จากการทดลองตัวตรวจรู้มีค่าความไวเฉลี่ยเท่ากับ 0.04714 pF/kPa ความไวสูงสุดอยู่ที่ 0.01583 pF/kPa จากสมการที่ (6.1) เป็นสมการการปรับเทียบตัวตรวจรู้ความดันซึ่งสมการมีอินพุตเป็นความดันและอุณหภูมิและมีค่าความจุไฟฟ้าเป็นเอาต์พุตของสมการ แต่ในการใช้งานตัวตรวจรู้ความดันในทางปฏิบัติผู้ใช้งานต้องการทราบค่าของความดันที่วัดได้จากตัวตรวจรู้ในหน่วยของ

ความดัน ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุตของตัวตรวจรู้จึงอยู่ในรูปความดัน ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและความจุไฟฟ้า จากข้อมูลการวัดความจุไฟฟ้าด้วย เครื่อง LCR meter ที่อุณหภูมิต่างๆพบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าวมีลักษณะเป็นเส้นโค้งคล้ายสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง ดังนั้นจึงกำหนดความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง $ax^2 + bx + c = 0$ โดยที่ x คือค่าความดันซึ่งอ่านได้จากตัวตรวจรู้ความดันมาตรฐาน ดังนั้นสามารถหาค่า x ได้โดยการหารากของสมการดังกล่าวโดย

$$P_{out} = \left(-b + \sqrt{b^2 - 4ac} \right) / 2a \quad (6.2)$$

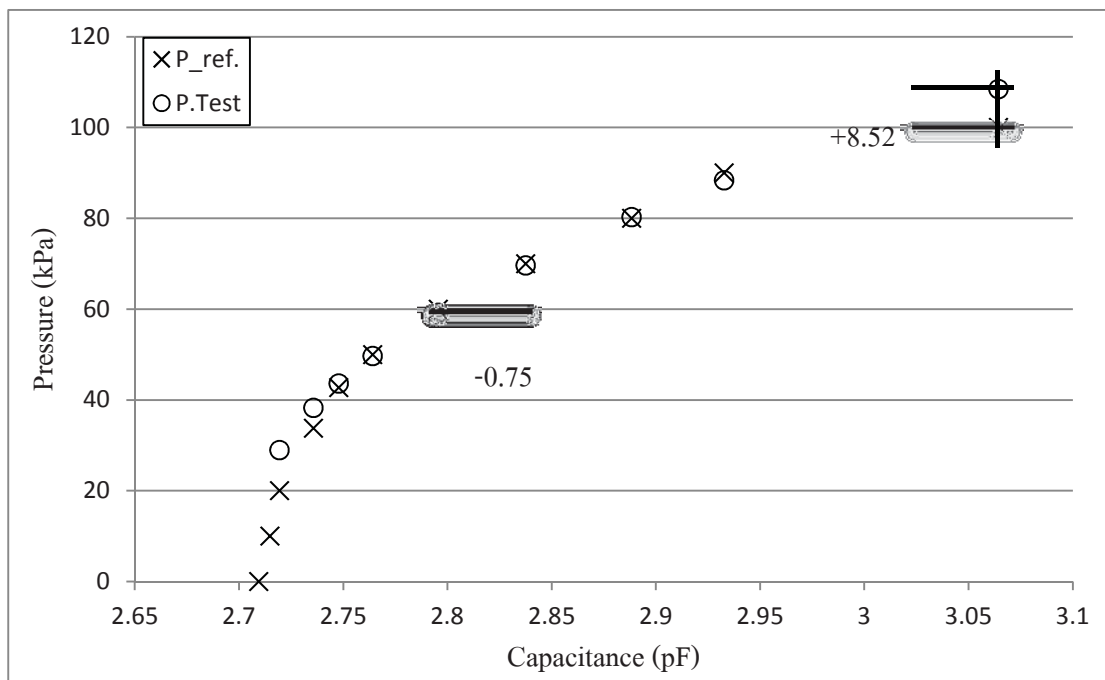
เมื่อสมการที่ (6.1) อยู่ในรูปของสมการโพลิโนเมียลกำลังสองจะได้

$$a = 4 \times 10^{-5}$$

$$b = 6 \times 10^{-5} T - 0.0027$$

$$c = 0.0045T + 2.575 - C$$

เมื่อนำค่าจากสมการที่ 6.2 มาวาดกราฟเทียบกับค่าความดันจริงจากผลทดสอบเพื่อหาค่าความความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ความดันที่อุณหภูมิใช้งาน 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 6.15

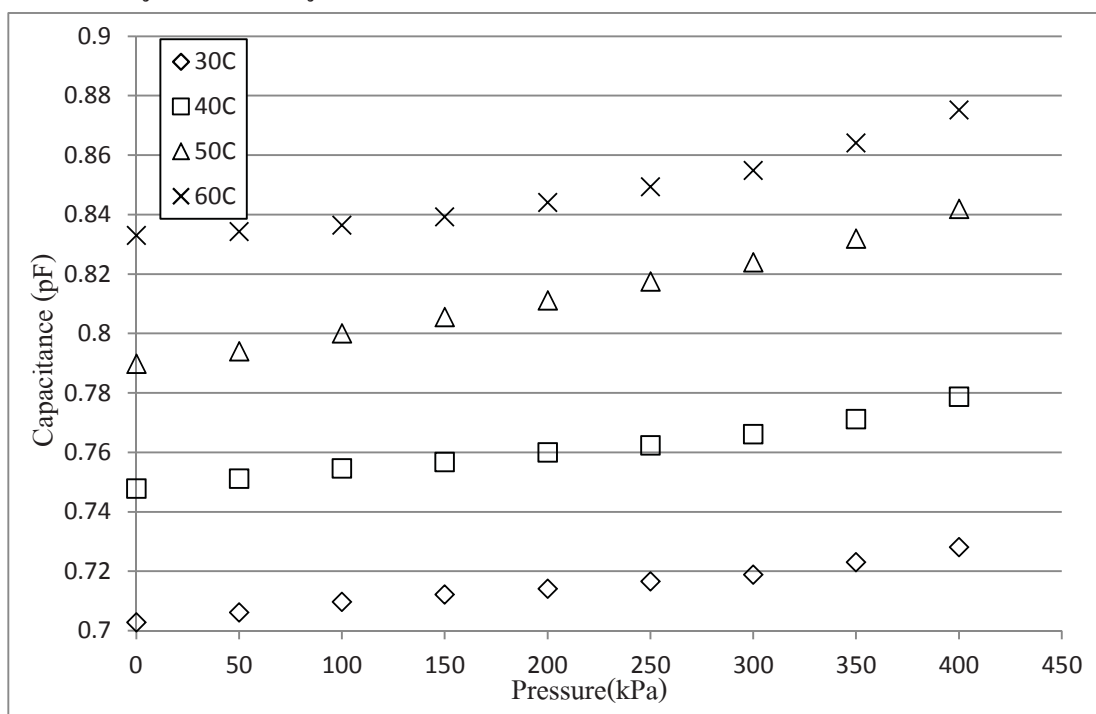


รูปที่ 6.15 ค่าความดันที่ได้จากสมการเปรียบเทียบและค่าความดันจริงเพื่อใช้หาความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S

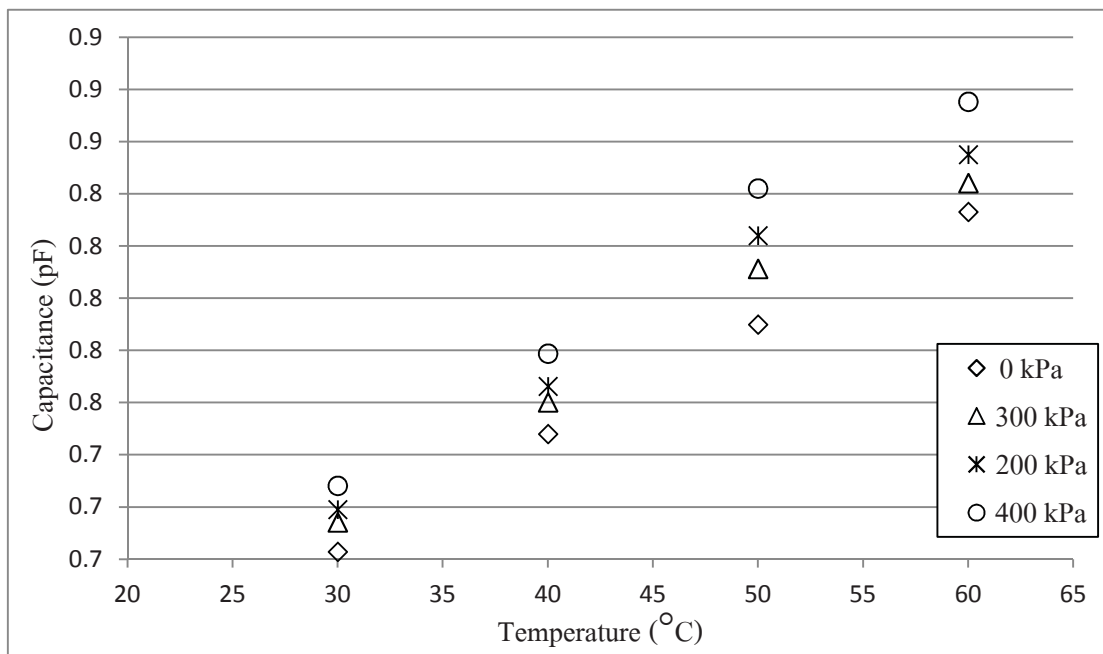
จากรูปที่ 6.14 ในการแสดงผลคำนวณจากสมการปรับเทียบกับและค่าความดันจริงจากตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ ในช่วงความดัน 20kPa – 100 kPa มีค่าความคลาดเคลื่อนด้านบวกสูงสุด 9 % และค่าความคลาดเคลื่อนด้านลบสูงสุด 0.75 % สามารถสรุปได้ว่าสามารถสรุปได้ว่า ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S มีค่าความแม่นยำ (accuracy) เท่ากับ $\pm 9\%$ เทียบกับเต็มย่านการวัด 100 kPa

6.4.2 การสอบเทียบตัวตรวจรู้ไคอะแฟรม PI กับตัวตรวจรู้ MPX5700

การสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดันจะทำการทดสอบความดันอากาศอัดโดยกำหนดความดันสูงสุดที่ 400 kPa ด้วย โดยจะทำการทดสอบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 40 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 60 องศาเซลเซียสตามลำดับ เช่นเดียวกับตัวตรวจรู้ไคอะแฟรม PDMS โดยในแต่ละอุณหภูมิ จะทำการเก็บข้อมูลทั้งหมด 11 จุด เริ่มจาก 0 kPa เพิ่มความดันครั้งละ 50 kPa ไปจนถึง 400 kPa โดยแต่ละจุดจะเก็บข้อมูลตัวอย่างทั้งหมด 5 ตัวอย่าง โดยใช้ Precision LCR Meter ในการวัดค่าความจุไฟฟ้า มีระยะห่างในการเก็บข้อมูลแต่ละจุด 30 วินาที จากนั้นนำข้อมูลค่าความจุไฟฟ้า อุณหภูมิ และความดันมาพล็อตกราฟสามมิติและหาสมการความสัมพันธ์โดยใช้ Surface fitting ใน Matlab Toolbox โดย จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า อุณหภูมิ และความดัน ดังรูปที่ 6.16 และรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.16 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและค่าความจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยใช้เตาอบควบคุมอุณหภูมิ



รูปที่ 6.17 กราฟผลการสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และค่าความจุไฟฟ้าที่ความดันต่าง ๆ

จากรูปที่ 6.16 และ 6.17 การสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดันโดยใช้ตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์เบอร์ MPX5700 เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบ จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความถี่จากตัวตรวจรู้ความดันดังสมการที่ (6.2) ความสอดคล้องของสมการนี้กับชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีค่า $R^2 = 0.845$

$$C = (8 \times 10^{-8})P^2 + (2.2 \times 10^{-6})PT + 0.0042T - (4 \times 10^{-5})P + 0.579 \quad (6.3)$$

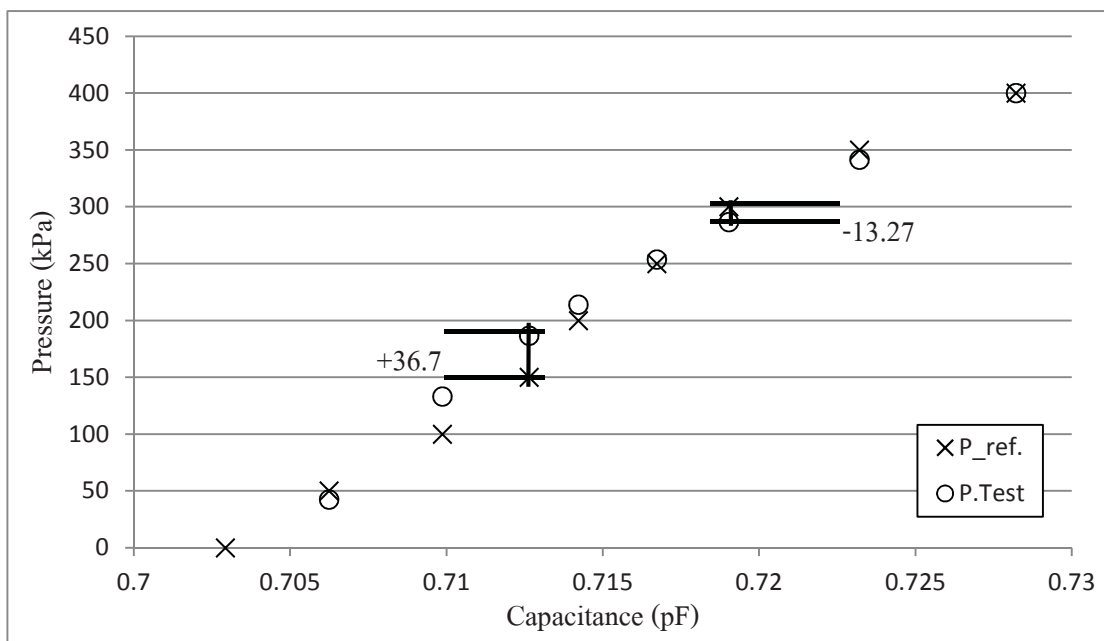
จากการทดสอบตัวตรวจรู้มีค่าความไวเฉลี่ยเท่ากับ 0.03343 fF/kPa ความไวสูงสุดอยู่ที่ 0.04811 fF/kPa จากสมการที่ (6.3) เป็นสมการการปรับเทียบตัวตรวจรู้ความดันไม่สามารถใช้เป็นสมการการใช้งานได้ สมการใช้งานจะใช้สมการที่ 6.2 โดยมีค่าตัวแปรในสมการดังนี้

$$a = 8 \times 10^{-8}$$

$$b = 2.2 \times 10^{-6}T - 4 \times 10^{-5}$$

$$c = 0.0042T + 0.579 - C$$

จากสมการที่ 6.2 จะได้ผลลัพธ์จากการคำนวณค่าความดัน 2 ค่าซึ่งจะมีค่าเป็นลบและเป็นบวก ซึ่งค่าความดันที่เป็นจริงจะเป็นบวกเสมอ เมื่อนำค่าจากสมการที่ 6.2 มาวาดกราฟเทียบกับค่าความดันจริงจากผลทดสอบเพื่อหาค่าความความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ความดันที่อุณหภูมิใช้งาน 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 ค่าความดันที่ได้จากสมการเปรียบเทียบและค่าความดันจริงเพื่อใช้หาความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I

จากรูปที่ 6.18 ในการแสดงผลคำนวณจากสมการเปรียบเทียบและค่าความดันจริงจากตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ในช่วงความดัน 50 kPa – 400 kPa มีค่าความคลาดเคลื่อนด้านบวกสูงสุด 7.34 % และค่าความคลาดเคลื่อนด้านลบสูงสุด 2.65 % สามารถสรุปได้ว่า ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S มีค่าความแม่นยำ (accuracy) เท่ากับ ± 7.4 % เทียบกับเต็มย่านการวัด 500 kPa หลังจากการทดสอบเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความดันแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการออกแบบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าและชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน

6.5 วงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าและชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน

หลังจากสร้างตัวตรวจรู้ความดันและเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ ในการนำตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่มีสัญญาณเอาต์พุตเป็นค่าความจุไฟฟ้า จะต้องใช้วงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปมีให้เลือกใช้หลายรูปแบบ เช่น วงจรแปลง

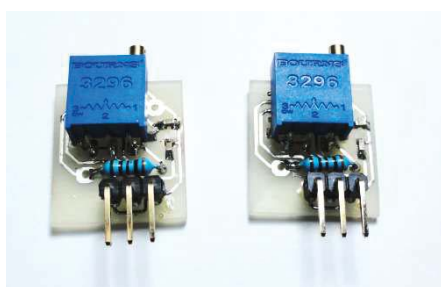
ค่าความจุไฟฟ้าเป็นสัญญาณดิจิทัล (Capacitance to digital converter) ใช้ไอซี AD7746 AD7150 หรือ LC717A วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นแรงดัน (Capacitance to voltage converter) ใช้ไอซี เบอร์ CAV444 วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ (Capacitance to frequency converter) ใช้ไอซี กำหนดสัญญาณนาฬิกาทั่วไป ซึ่งวงจรทั้งสามแบบที่กล่าวมาข้างต้น สองแบบแรกเป็นวงจรที่ใช้อ่านค่าความจุไฟฟ้าของจอสัมผัสแบบตัวเก็บประจุ (Capacitive touch screen) ซึ่งมีราคาสูง ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ ซึ่งมีราคาถูกกว่ามาก

โดยทั่วไปจะใช้วงจรกำเนิดความถี่ซึ่งประกอบด้วย ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และ ตัวเก็บประจุ เป็นหลัก ซึ่งค่าความถี่ที่ได้จากวงจรกำเนิดความถี่ ขึ้นอยู่กับ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ในวงจร ซึ่งวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าดังกล่าวนี้ สามารถสร้างขึ้นเอง หรือใช้ไอซีที่ตรวจวัดความจุไฟฟ้าแบบสำเร็จรูปซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงและสามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่มีค่าน้อยได้ ในงานวิจัยนี้จะใช้ไอซีเป็นตัวกำเนิดความถี่แบบที่ใช้งานในวงจรทั่วไป ซึ่งมีราคาถูก เพราะ โครงสร้างของตัวเก็บประจุที่ทำการออกแบบขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่มากพอสมควร ซึ่งสามารถใช้ไอซีกำเนิดความถี่ทั่วไปที่มีขายตามท้องตลาดได้ โดยจะเลือกใช้ Precision timer เบอร์ 555 เป็นไอซีกำเนิดความถี่ที่ใช้ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุเป็นตัวกำหนดความถี่โดยมีสมการการคำนวณค่าความถี่ดังสมการที่ 6.1 ในการต่อใช้งานแบบ Astable ดังรูปที่ 6.20(ก) โดยออกแบบใช้ค่าความต้านทาน R_A เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้ และ R_B เท่ากับ 330 k Ω ส่วนวงจรที่ติดตั้งเข้ากับตัวตรวจรู้ความดันจะออกแบบแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) ให้มีขนาดเท่ากับ อะคริลิกที่เป็นฐานของตัวตรวจรู้ความดันขนาด 1×1 เซนติเมตรดังรูปที่ 6.19(ก) เพื่อเชื่อมต่อกับขั้วของตัวตรวจรู้ความดันได้โดยตรงรูปที่ 6.19 (ข) การติดตั้งวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าไว้กับตัวตรวจรู้ความดัน เพื่อลดความยาวของสายไฟเชื่อมต่อกับตัวเก็บประจุ ซึ่งจะช่วยลดค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากสายเชื่อมต่อ และลดสัญญาณรบกวนได้ และสามารถเชื่อมต่อสัญญาณความถี่เข้ากับชุดทดสอบความดันได้โดยตรง

$$f = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B)C} \quad (6.3)$$

ชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน จะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านค่าความถี่ที่ได้จากวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า และมีตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ที่ใช้ในการสอบเทียบจะใช้ตัวตรวจรู้ความดัน MPX5700 ของบริษัท Freescale Semiconductor สำหรับสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PI สำหรับวัดความดันในช่วง 0-500 kPa และ MPX4250 สำหรับสอบเทียบตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PDMS วัดความดันในช่วง 0-100 kPa ในการอ่านค่าจากตัว

ตรวจรู้ความดันนี้ ใช้วงจรแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ขนาด 10 บิต ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์แล้วคำนวณค่าดิจิทัลเป็นความดัน ส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็นตระกูล AVR Atmega 168 ของบริษัท Atmel และใช้โปรแกรมพัฒนาของ Arduino



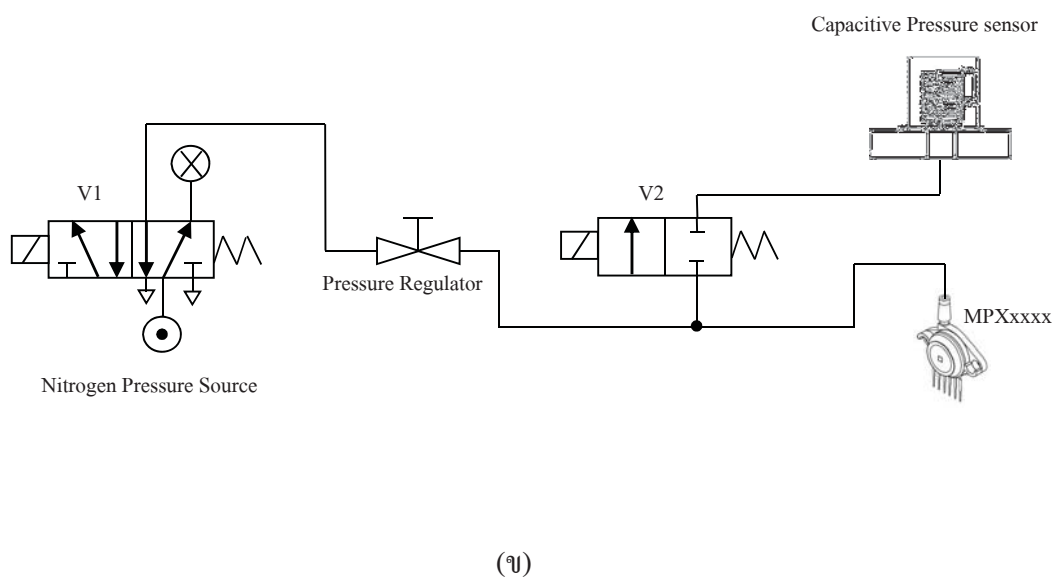
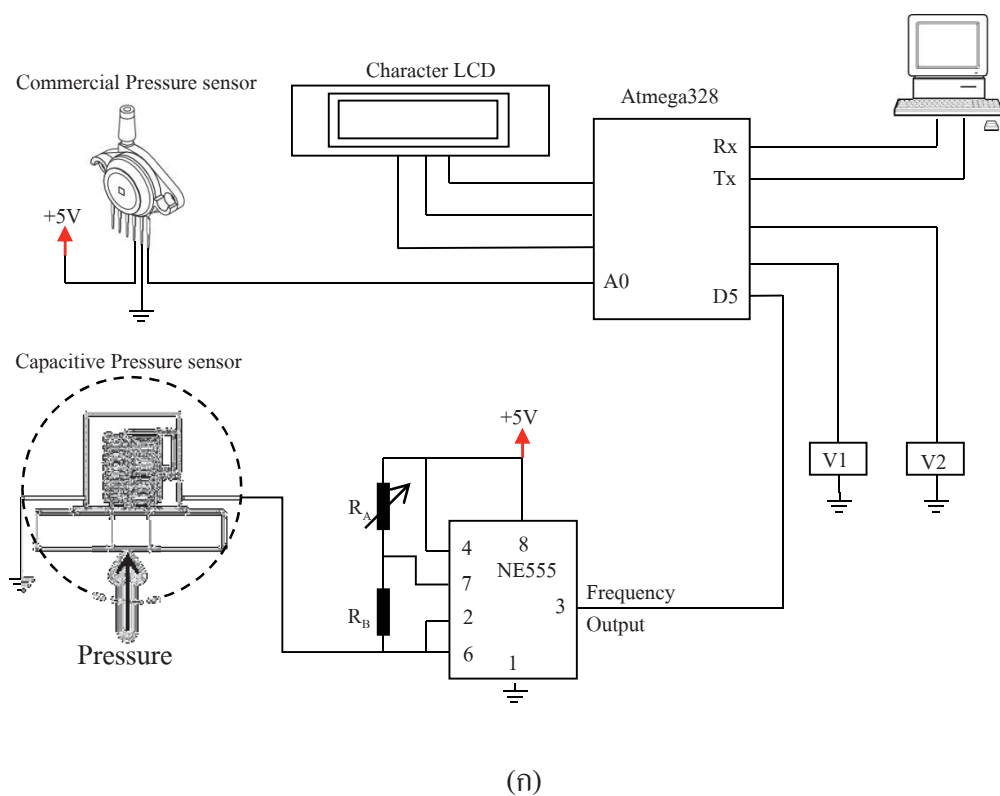
(ก)



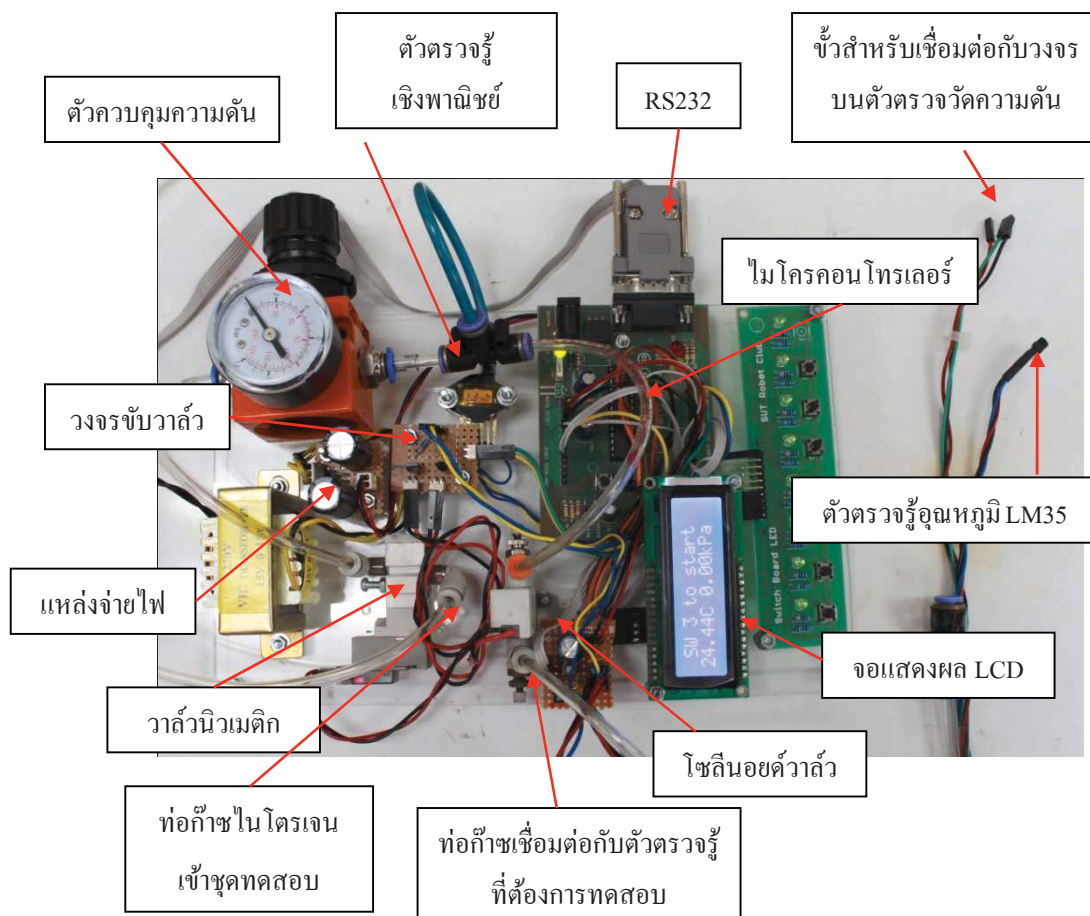
(ข)

รูปที่ 6.19 การติดตั้งวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า (ก) วงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า (ข) ตัวตรวจรู้ความดัน

จากนั้นส่งข้อมูลที่อ่านได้จากวงจรอ่านค่าความจุไฟฟ้า เข้าคอมพิวเตอร์ผ่านทาง RS232 แล้วทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Microsoft Excel โดยมีวงจรดังรูป 6.20(ก) ในส่วนของความดันที่ใช้ในการทดสอบจะใช้ก๊าซไนโตรเจนผ่านวาล์วนิวเมติกแบบ 2-Position, 4-way, 5-port (V1) ซึ่งสามารถปล่อยความดันในระบบทดสอบให้เท่ากับความดันบรรยากาศในขณะที่วาล์วไม่ทำงาน จากนั้นจะผ่านตัวควบคุมความดัน(Pressure regulator) และต่อเข้ากับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ เพื่อวัดความดันที่ออกจากตัวควบคุมความดันเพื่อปรับความดันให้ได้ตามต้องการ เมื่อได้ความดันที่ต้องการแล้วจะมีวาล์วนิวเมติกแบบ 2-position, 2-way (V2) สำหรับจ่ายความดันให้กับตัวตรวจรู้ความดันที่ต้องการทดสอบ โดยมีแผนผังการทำงานดังรูปที่ 6.20(ข) และชุดทดสอบที่เสร็จสมบูรณ์มีลักษณะดังรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.20 แผนผังชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน (ก) วงจรไฟฟ้า (ข) วงจรนิวเมติกวาล์ว



รูปที่ 6.21 ภาพถ่ายของชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน

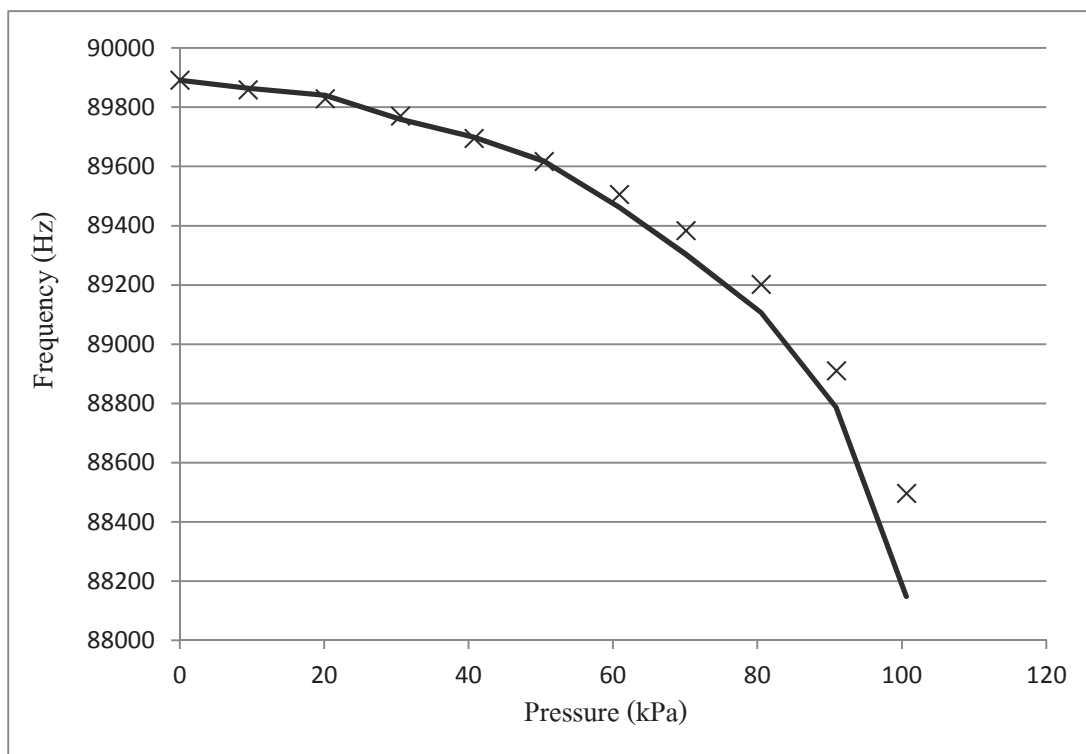
6.6 การทดสอบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า

การทดสอบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้า สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วงจร Astable multivibrator ซึ่งวงจรนี้จะเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ การทดสอบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้านี้จะเป็นการทดสอบเพื่อหาความคลาดเคลื่อนของวงจรในการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นค่าความถี่ ซึ่งการทดสอบ จะทำการป้อนความดันโดยเริ่มจาก 0 kPa เพิ่มความดันครั้งละ 10 kPa จนถึงความดัน 100 kPa ในแต่ละจุดจะใช้เครื่อง LCR Meter ในการวัดค่าความจุไฟฟ้าดังตารางที่ 6.1 และหลังจากวัดค่าความจุไฟฟ้าในแต่ละจุด จะนำวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าต่อเข้ากับตัวตรวจรู้ความดันและเก็บค่าความถี่จากการวัดได้ดังตาราง จากนั้นนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้แทนในสมการที่ (6.1) โดยกำหนดค่า $R_1=232.4 \text{ k}\Omega$ $R_2=330 \text{ k}\Omega$ ซึ่ง R_1 เป็นตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อให้สามารถปรับความถี่เริ่มต้นตามที่ต้องการได้ ค่าดังกล่าวนี้ได้จากการวัดความต้านทานด้วยมัลติมิเตอร์ ส่วน R_2 เป็นตัวต้านทานค่าคงที่ จากการคำนวณค่าความถี่จากสมการที่ (6.1) ได้ผลดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการทดสอบวงจรแปลงความจุไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นความถี่จากการคำนวณด้วยสมการที่ (6.1) เทียบกับเทียบกับการทดลองที่ความดันต่าง ๆ โดยกำหนด $R_1 = 232.4 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 330 \text{ k}\Omega$

ความดัน (kPa)	ค่าความจุไฟฟ้า จากการวัด (pF)	ความถี่จากการ คำนวณ (Hz)	ความถี่จากการวัด (Hz)	ค่าความคลาด เคลื่อน (%)
0	2.70933	89891	89891	0.00
9.48	2.71467	89862	89859	0.00
20.14	2.71936	89821	89829	0.02
30.57	2.73559	89759	89770	0.04
40.75	2.74780	89695	89695	0.04
50.45	2.76405	89599	89617	0.08
60.87	2.79546	89483	89505	0.10
70.08	2.82740	89308	89383	0.20
80.51	2.86723	89123	89202	0.24
90.93	2.93273	88837	88910	0.29
100.63	3.06435	88440	88496	0.34

จากตารางการทดสอบวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้าจากการคำนวณค่าความถี่จากค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้โดยใช้เครื่อง LCR meter ค่าความถี่ที่ได้จะมีค่าห่างจากค่าความถี่ที่ได้จากการวัดพอสมควร เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่อยู่ภายในวงจร ดังนั้นการคำนวณค่าความถี่จะต้องบวกค่าความจุไฟฟ้าแฝงดังกล่าวเข้าไปด้วยซึ่งสามารถคำนวณได้จากการแทนค่าความถี่ที่วัดได้ในสมการที่ (6.2) จะได้ค่าความจุไฟฟ้าแล้วลบกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันที่วัดจาก LCR meter ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าแฝงที่คำนวณได้เท่ากับ 15.241 pF จากตารางการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นค่าความถี่ของวงจรวัดค่าความจุไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.34% ซึ่งถือว่ามีค่าน้อย สามารถนำไปใช้งานได้ กราฟผลการคำนวณเทียบกับผลการวัดเป็นดังรูปที่ 6.22

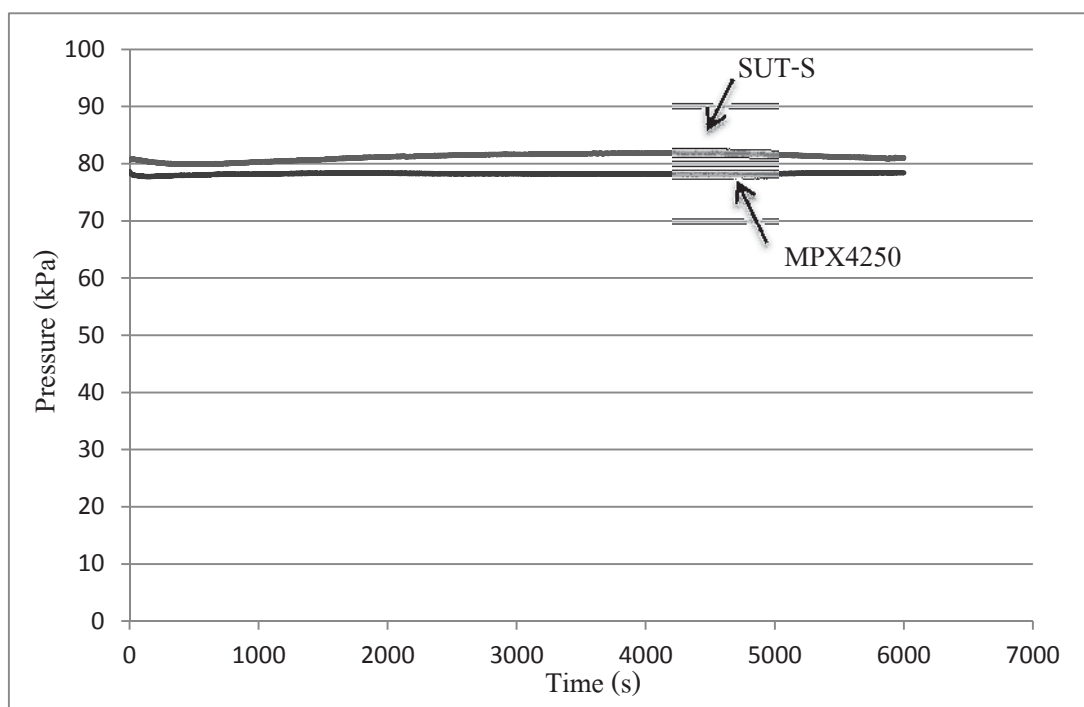


รูปที่ 6.22 ผลการทดสอบวงจรแปลงความจุไฟฟ้าเป็นความถี่จากการคำนวณด้วยสมการที่ (6.1) เทียบกับการทดลองที่ความดันต่าง ๆ

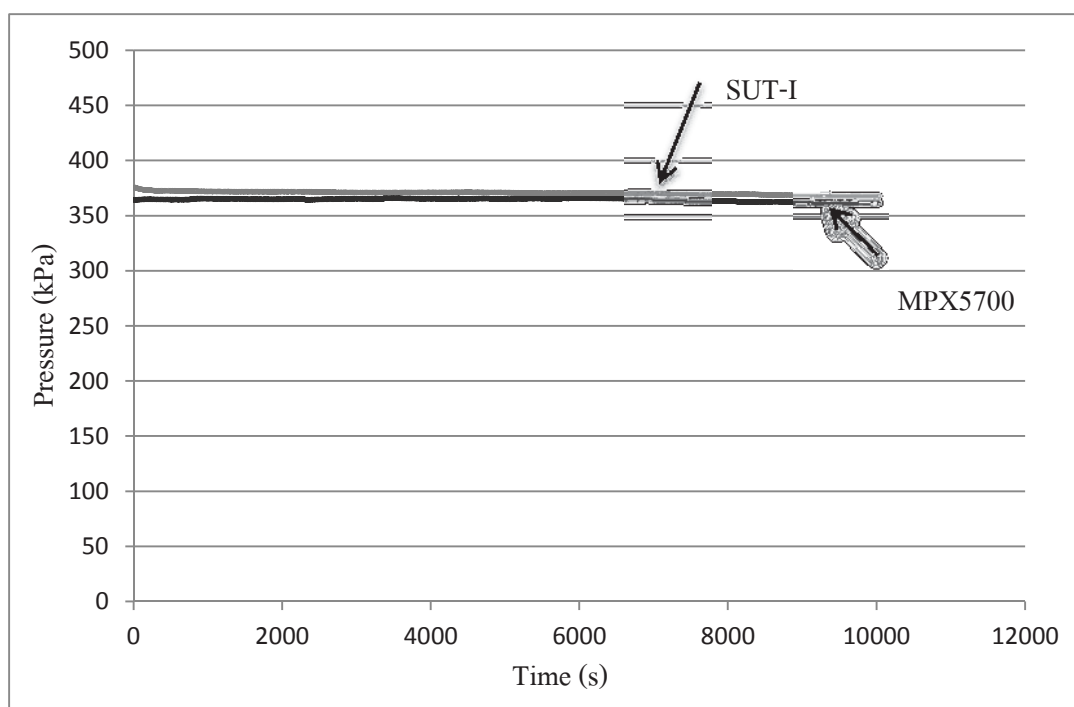
6.7 เสถียรภาพของตัวตรวจรู้ความดัน

การทดสอบเสถียรภาพของตัวตรวจรู้ความดันในการใช้งานเป็นระยะเวลานาน จะทำการทดสอบโดยทำการป้อนความดันก๊าซคงที่ ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS จะทำการทดสอบที่ความดัน 80 kPa ทดสอบที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 100 นาที และตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PI จะทำการทดสอบที่ความดัน 360 kPa ทดสอบที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 100 นาที เช่นเดียวกัน ในการทดสอบจะทำการวัดค่าความถี่จากวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่โดยความจุไฟฟ้าจะถูกป้อนเข้าที่ขา 3 ของไอซี 555 มีเอาต์พุตความถี่ที่ขา 6 และอ่านค่าความถี่ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นและคำนวณค่าความจุไฟฟ้าจากความถี่โดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (6.4) โดยกำหนด $R_1 = 232.4 \text{ k}\Omega$ $R_2 = 330 \text{ k}\Omega$ และคำนวณค่าความดันโดยใช้สมการที่ (6.2)

$$C = \frac{1.44}{(R_A + 2R_B) f} \quad (6.4)$$



รูปที่ 6.23 กราฟค่าความจุไฟฟ้าที่ความดัน 80 kPa ของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S

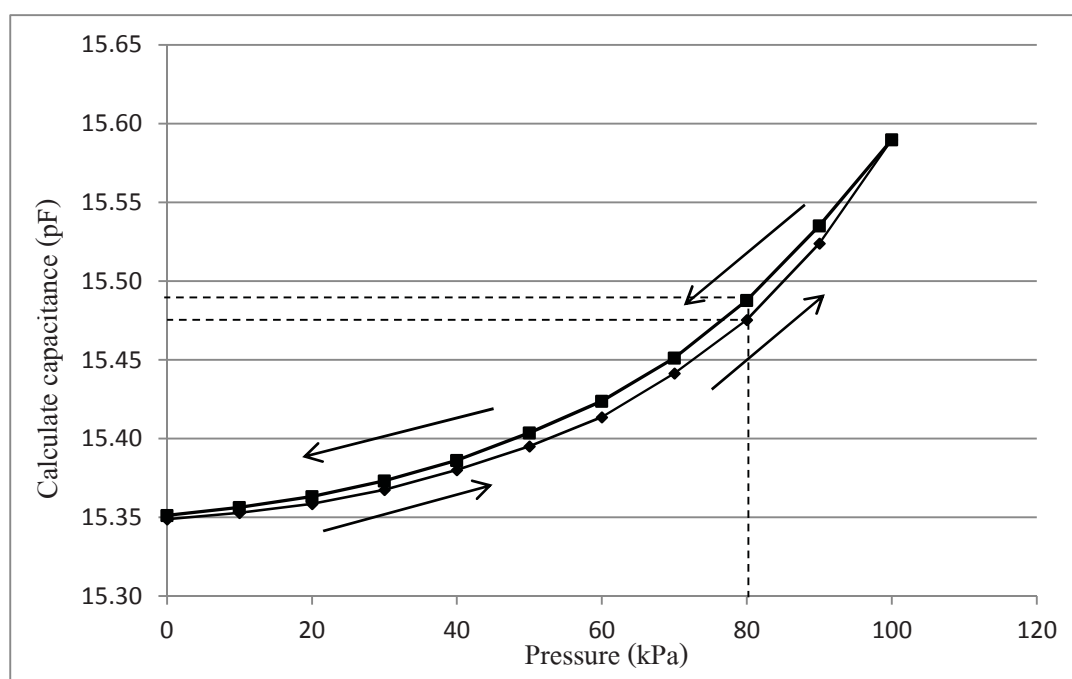


รูปที่ 6.24 กราฟค่าความจุไฟฟ้าที่ความดัน 360 kPa ของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I

ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ทั้งสองตัวเป็นดังรูปที่ 6.23 และรูปที่ 6.24 จากการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PDMS ที่ความดัน 80 kPa มีค่าความคลาดเคลื่อน 2.81 % และตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PI ที่ความดัน 360 kPa มีค่าความคลาดเคลื่อน 2.32 %

6.8 ฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ความดัน

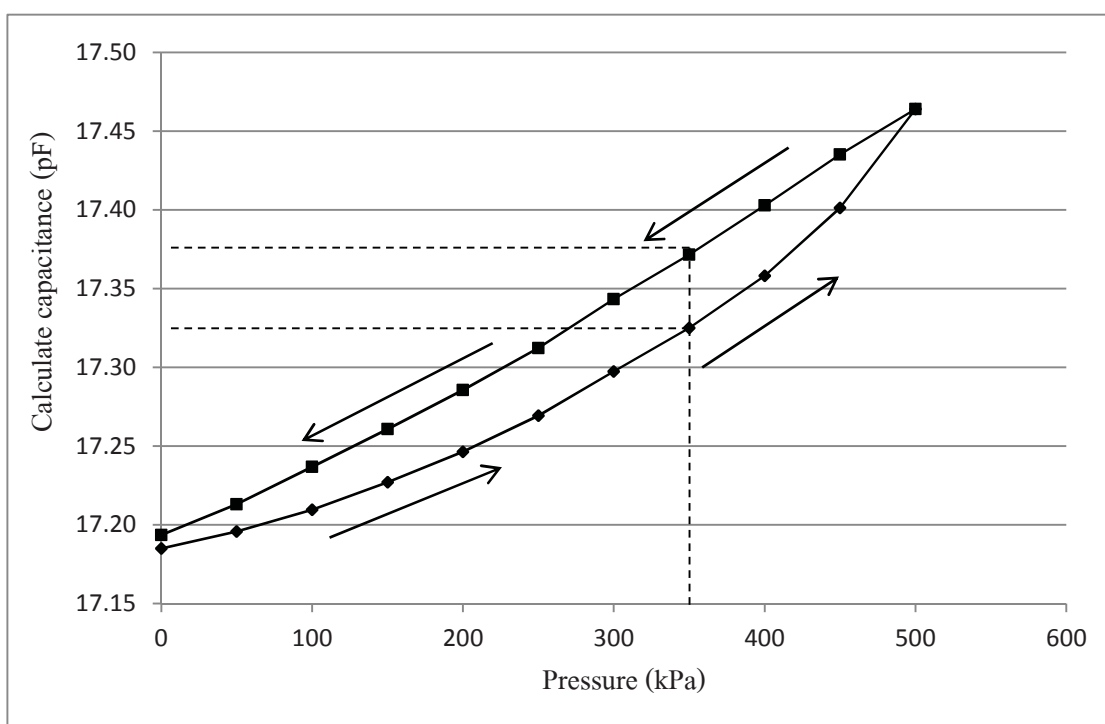
ฮิสเตอร์รีซิส คือความผิดพลาดทางเอาต์พุตของตัวตรวจรู้ความดันที่อินพุตค่าใดค่าหนึ่งเมื่อทำการวัดในทิศทางตรงข้าม ซึ่งจะออกมาในรูปผลต่างของสัญญาณเอาต์พุตที่อินพุตค่าเดิม ในการทดสอบฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PDMS จะทำการทดสอบโดยการป้อนความดันให้กับตัวตรวจรู้โดยเริ่มจาก 0 kPa เพิ่มครั้งละ 10 kPa ไปจนถึง 110 kPa และปรับลดค่าความดันจาก 100 kPa ลงมาจนถึง 0 kPa โดยแต่ละจุดข้อมูลจะทำการเก็บข้อมูลตัวอย่าง 60 ตัวอย่าง แล้วหาค่าเฉลี่ย ซึ่งข้อมูลที่ได้มาจะอยู่ในรูปของความถี่ ทำการคำนวณค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ (6.1) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.25 ผลการทดสอบฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S

จากการทดสอบฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PDMS จากรูปที่ 6.20 ช่วงที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือที่ความดัน 80 kPa มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 72.1 Hz หรือ 0.0108 pF มีค่าความคลาดเคลื่อนฮิสเตอร์รีซิสของค่าความจุไฟฟ้าเต็มสเกลเท่ากับ 5.7 %

การทดสอบฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PI จะทำการทดสอบเหมือนกับตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PDMS แต่จะป้อนความดันให้กับตัวตรวจรู้โดยเริ่มจาก 0 kPa เพิ่มครั้งละ 50 kPa ไปจนถึง 500 kPa และปรับลดค่าความดันจาก 500 kPa ลงมาจนถึง 0 kPa ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.26

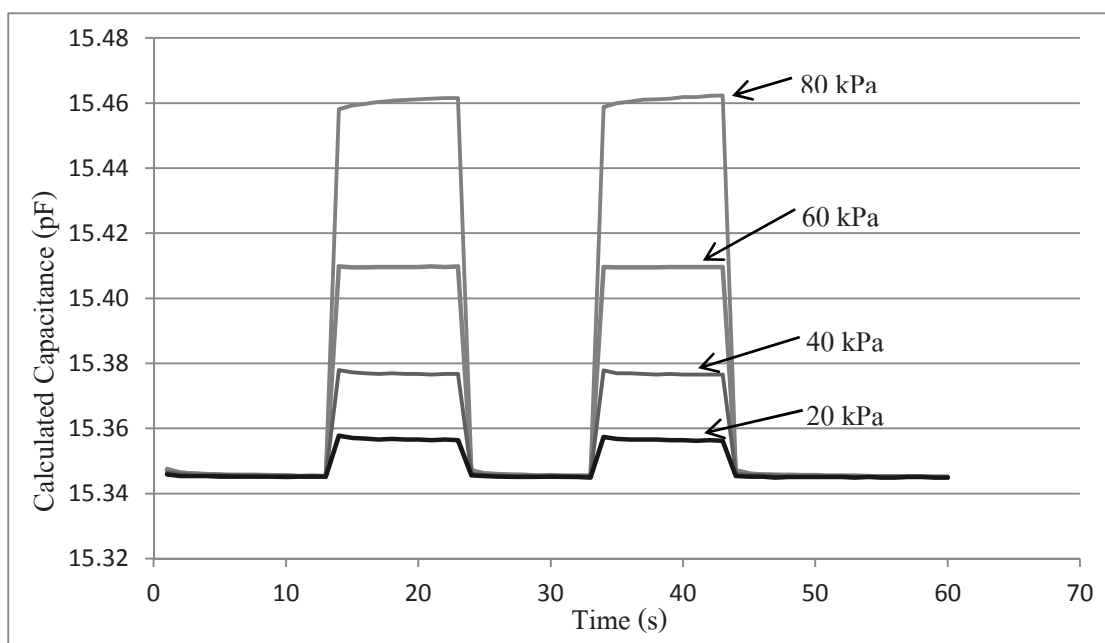


รูปที่ 6.26 ผลการทดสอบฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I

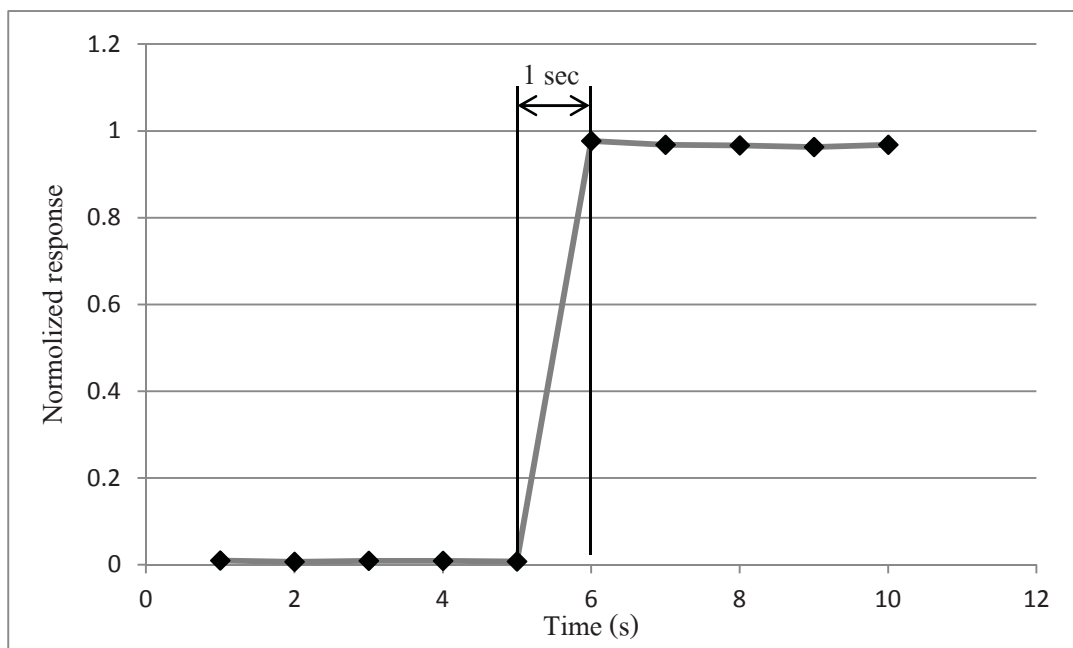
จากการทดสอบฮิสเตอร์รีซิสของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PI จากรูปที่ 6.24 ช่วงที่มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดคือที่ความดัน 350 kPa มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 240.2 Hz หรือ 0.0467 pF ค่าความคลาดเคลื่อนฮิสเตอร์รีซิสของค่าความจุไฟฟ้าเต็มสเกลเท่ากับ 16.67 %

6.9 การทดสอบผลตอบสนองทางเวลา

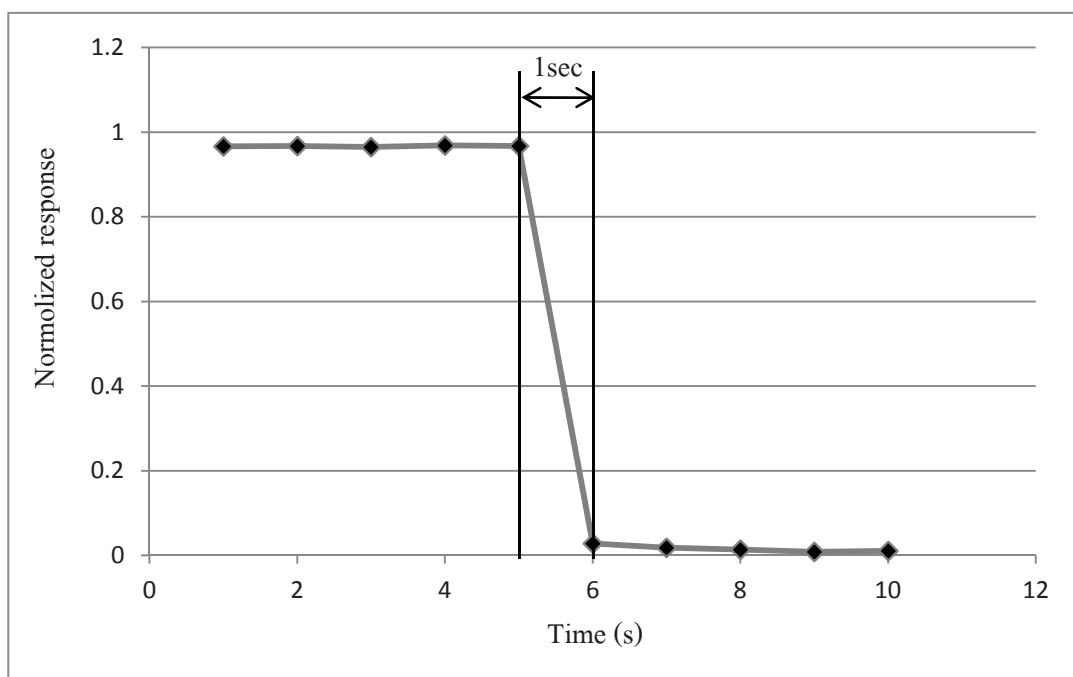
ผลการตอบสนองทางเวลา เป็นตัวบ่งชี้ความไวต่อการตอบสนองต่ออินพุตของตัวตรวจรู้ ซึ่งสามารถทดสอบได้โดยการป้อนอินพุตลักษณะต่างๆ เช่น อินพุตแบบ Step อินพุตแบบ Ramp หรือแบบอื่นๆ ที่ต้องการทดสอบ สำหรับการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น จะทำการทดสอบการป้อนความดันแบบขึ้นบันได (Step) และแบบลาดเอียง (Ramp) โดยชุดทดสอบเป็นดังรูปที่ 6.15(ข) ในการป้อนความดันแบบ Step จะใช้วาล์วนิวเมติกส์ (V1) เป็นตัวเปิด-ปิดก๊าซที่จ่ายให้กับตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นกับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรมเป็น PDMS จะทำการทดสอบผลตอบสนองต่อสัญญาณขึ้นบันได ที่ความดัน 20 kPa 40 kPa 60 kPa และ 80 kPa ทำการวัดค่าความถี่จากวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าทุก 1 วินาที และคำนวณค่าความจุไฟฟ้าโดยใช้สมการที่ (6.4) ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากวงจรเป็นดังรูปที่ 6.27 จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยผลการตอบสนองดังรูปที่ 6.28 และรูปที่ 6.29



รูปที่ 6.27 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขึ้นบันไดของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S



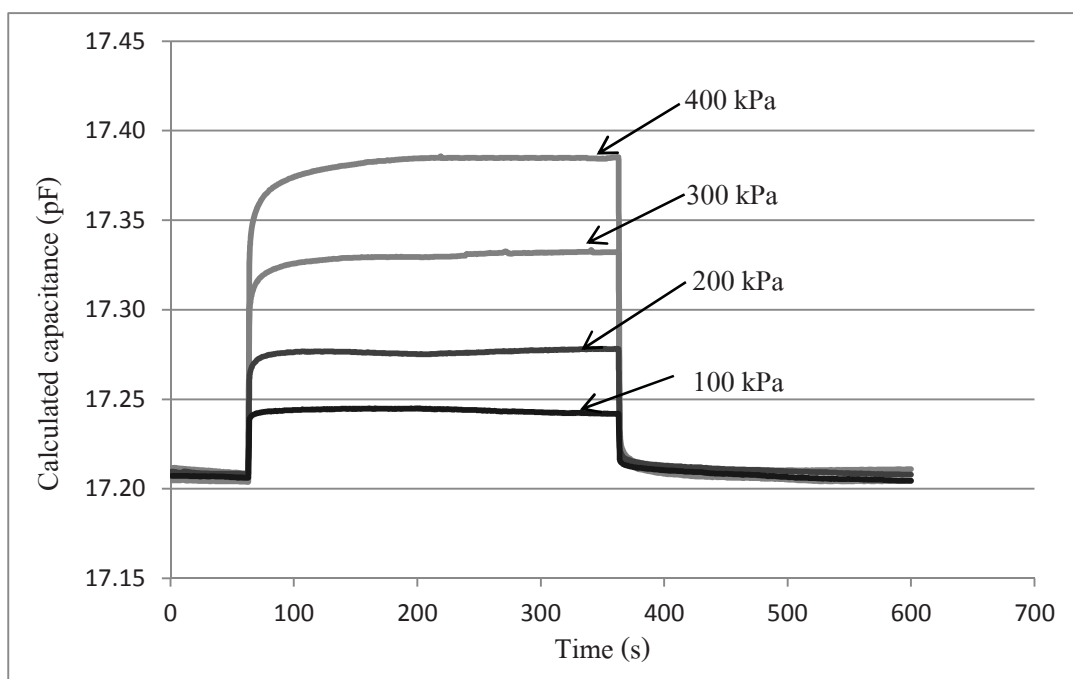
รูปที่ 6.28 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาขึ้นของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S



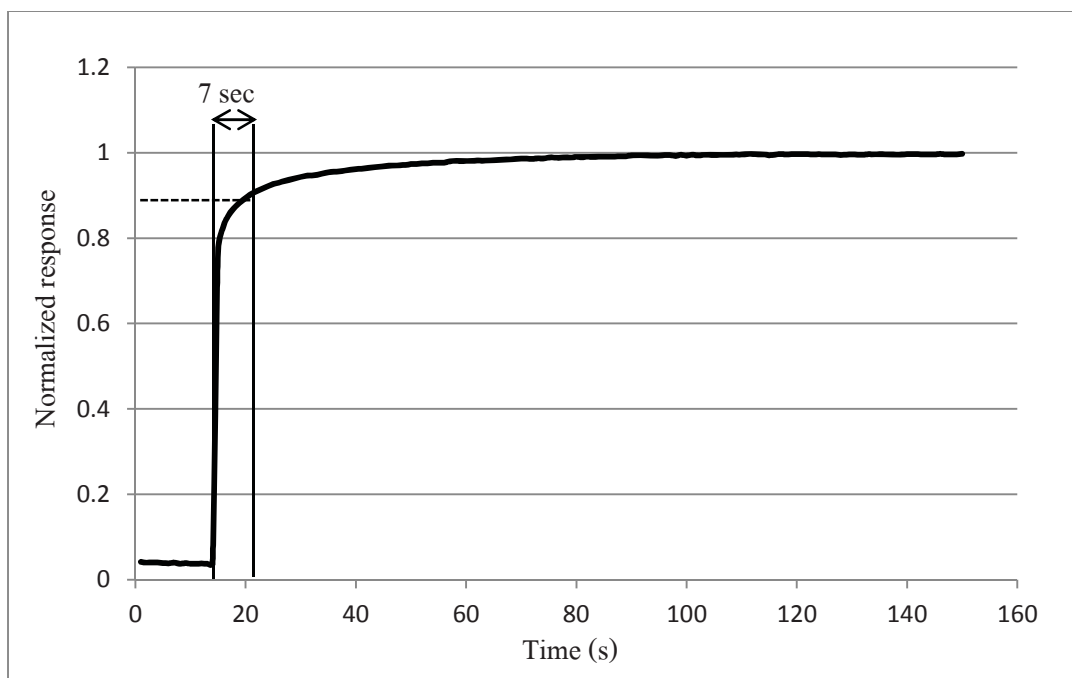
รูปที่ 6.29 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาลงของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S

จากรูปที่ 6.27 การทดสอบผลการตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรม PDMS ในแต่ละช่วงความดันพบว่าการตอบสนองต่อความดันแบบขั้นบันไดได้ดี จากรูปจะพบว่ากราฟช่วงขาขึ้นจะมีความดันพุ่งเกินเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากตัวควบคุมความดัน ไม่ได้เกิดจากตัวตรวจรู้ความดันที่ทดสอบ รูปที่ 6.28 เป็นกราฟค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาขาขึ้น หรือ Rise time คือช่วงเวลาที่ผลการตอบสนอง 10 % - 90 % การตอบสนองสัญญาณแบบขั้นบันไดจากการทดสอบ พบว่าช่วงเวลาขาขึ้น ค่าน้อยกว่า 1 วินาที แต่เนื่องจากการอ่านค่าความถี่จะต้องใช้เวลาในการอ่านอย่างน้อย 1 วินาที ตัวตรวจรู้ความดันจึงมีเวลาในการตอบสนองเร็วที่สุดที่ 1 วินาที เช่นกัน ส่วนรูปที่ 6.29 เป็นกราฟค่าเฉลี่ยช่วงเวลาขาลงหรือ Fall time ในการตอบสนองสัญญาณแบบขั้นบันได มีช่วงเวลาขาลงเท่ากับ 1 วินาที

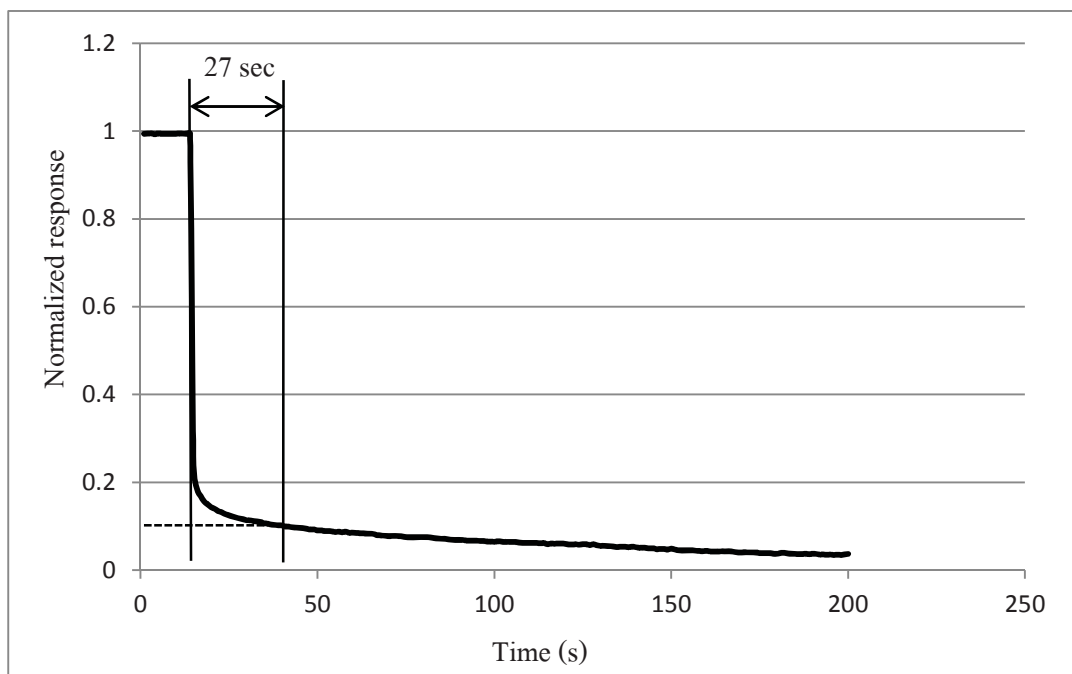
ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PI จะทำการทดสอบผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดที่ความดัน 100 kPa 200 kPa 300 kPa และ 400 kPa ทำการวัดค่าความถี่จากวงจรตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้าทุก 1 วินาที และคำนวณค่าความจุไฟฟ้า ผลการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ได้จากวงจรเป็นดังรูปที่ 6.30 จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยผลการตอบสนองดังรูปที่ 6.31 และรูปที่ 6.32



รูปที่ 6.30 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I



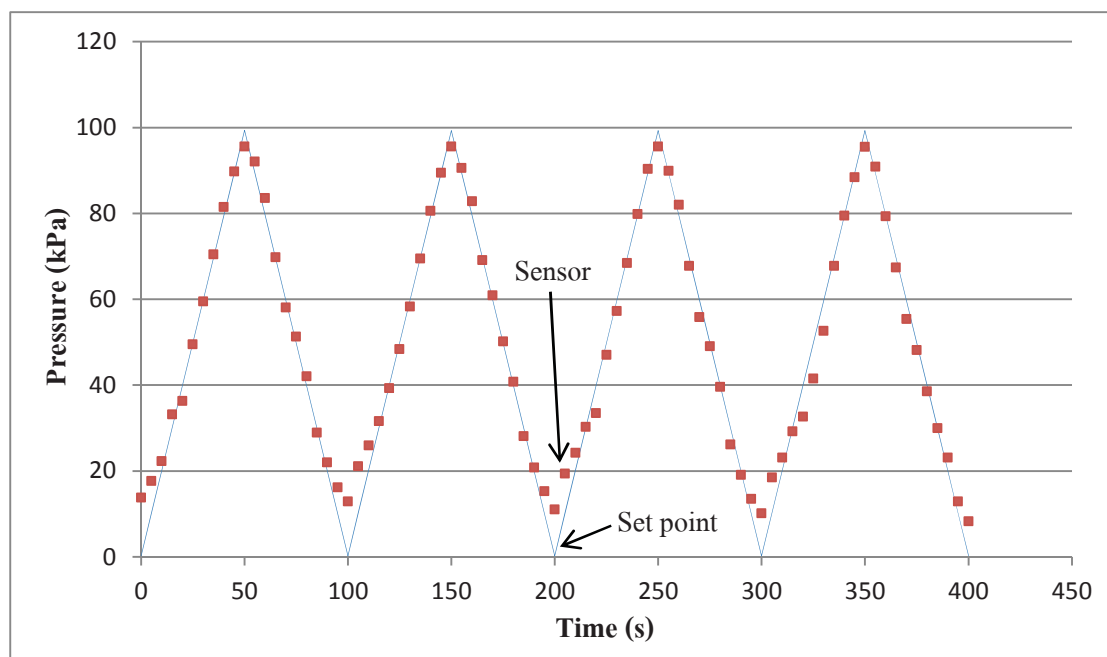
รูปที่ 6.31 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาขึ้นของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I



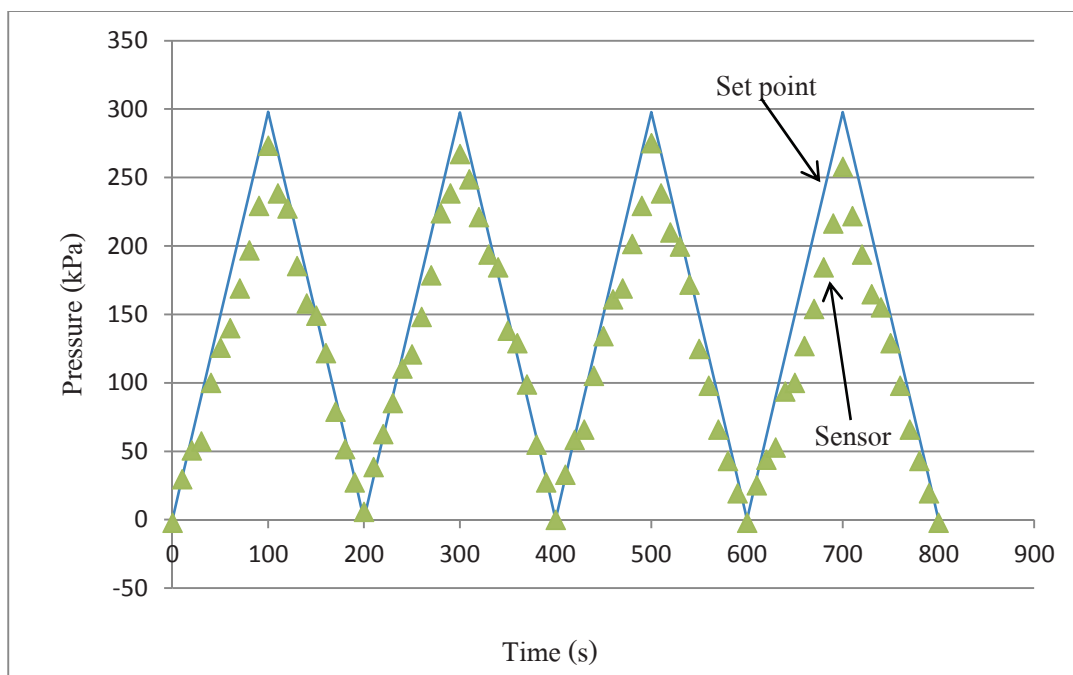
รูปที่ 6.32 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดขาลงของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I

จากรูปที่ 6.30 การทดสอบผลการตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรม PI ในแต่ละช่วงความดันพบว่ามีการตอบสนองต่อความดันแบบขึ้นบันไดช้ากว่าตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PDMS อย่างเห็นได้ชัด รูปที่ 6.31 เป็นกราฟค่าเฉลี่ยของช่วงเวลาขาขึ้น หรือ Rise time มีในการตอบสนองสัญญาณแบบขึ้นบันได จากการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันเวลาขาขึ้น 7 วินาที ส่วนรูปที่ 6.32 เป็นกราฟค่าเฉลี่ยช่วงเวลาขาลงหรือ Fall time ในการตอบสนองสัญญาณแบบขึ้นบันได มีช่วงเวลาขาลงเท่ากับ 27 วินาที

หลังจากการเป็นการทดสอบโดยการป้อนแรงดันแบบลาดเอียงความชัน 2 kPa/s ทั้งขาขึ้นและขาลง โดยทดสอบผลการตอบสนองทางเวลาโดยการป้อนแรงดันแบบขึ้นบันไดเพื่อหาผลการตอบสนองช่วงเวลาขาขึ้นและขาลง ต่อมาการควบคุมแรงดันจะใช้สเต็ปมอเตอร์หมุนตัวควบคุมความดันที่สั่งงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อให้สามารถควบคุมความดันให้ได้ความดันลักษณะลาดเอียงอัตโนมัติ จากนั้นจะทำการวัดค่าความดันจากตัวตรวจรู้ที่สร้างขึ้นเทียบกับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ทุกๆ 5 วินาที สำหรับการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PDMS จะทำการทดสอบที่ความดันสูงสุด 100 kPa และตัวตรวจรู้ความดันที่มีไคอะแฟรมเป็น PI จะทำการทดสอบที่ความดันสูงสุด 300 kPa เนื่องจากข้อจำกัดของมอเตอร์ที่ใช้หมุนตัวควบคุมความดันที่ไม่สามารถหมุนปรับความดันมากกว่า 300 kPa ได้ ผลการทดสอบของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นทั้งสองตัวเป็นดังรูปที่ 6.33 และรูปที่ 6.34



รูปที่ 6.33 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบลาดเอียงของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S



รูปที่ 6.34 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบลาดเอียงของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I

6.10 สรุปคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น

บทที่ 6 ได้กล่าวถึงการทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S และ SUT-I ซึ่งทำการทดสอบตั้งแต่การทดสอบการ โกงตัวเทียบกับจำลองทางคณิตศาสตร์ ทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ทดสอบผลของอุณหภูมิ และเปรียบเทียบตัวตรวจรู้ความดันเทียบกับตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ ทดสอบฮิสเตอร์รีซิส ทดสอบผลการตอบสนองทางเวลา จากการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นทั้งสองแบบ คือตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S และ SUT-I คุณลักษณะสมบัติต่างๆของตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองชนิด สามารถสรุปข้อมูลลักษณะเฉพาะของตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองชนิด ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางข้อมูลลักษณะเฉพาะของตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองแบบ ดังตารางที่ 6.2 และ ดังตารางที่ 6.3 เพื่อเป็นข้อมูลในการนำตัวตรวจรู้ความดันไปประยุกต์ใช้งานต่อไป

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลเฉพาะของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S

Characteristic	Min	Type	Max	Unit
Pressure Range	0	100	110	kPa
Voltage Supply	4.5	5	18	V
Supply Current	-	80	-	mA
Full scale span (C)	-	0.51851	-	pF
Full scale span (f)	-	4800	-	Hz
Effect of tempreature	-	0.00672	-	pF/°C
Hysteresis error	-	-	±2.9	%f _{FSS}
Accuracy	-	± 9	-	%
Sensitivity(C)	-	0.004714	0.01714	pF/kPa
Sensitivity(f)	4.7	12.9	34.6	Hz/kPa
Rise time	-	1	-	sec
Fall time	-	1	-	sec
Operating Temperature	-	20 to 60	80	°C

ตารางที่ 6.3 ข้อมูลเฉพาะของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I

Characteristic	Min	Type	Max	Unit
Pressure Range	0	-	500	kPa
Voltage Supply	4	-	18	V
Supply Current	-	80	-	mA
Full scale span (C)	-	0.01337	-	pF
Full scale span (f)	-	2845	-	Hz
Effect of temperture	-	0.00488	-	pF/°C
Hysteresis error	-	-	±8.3	%f _{FSS}
Accuracy	-	± 7.4	-	%
Sensitivity(C)	-	0.03343	0.04810	fF/kPa
Sensitivity(f)	2.08	2.83	4.67	Hz/kPa
Rise time	-	7	-	sec
Fall time	-	27	-	sec
Operating Temperature	-	20 to 60	80	°C

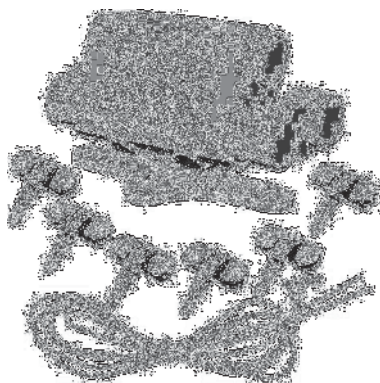
บทที่ 7

การประยุกต์ใช้งานตัวตรวจรู้ความดัน

หลังจากทดสอบคุณลักษณะสมบัติของตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองแบบที่สร้างขึ้นจนเสร็จสมบูรณ์แล้ว ในบทนี้จะทำการนำตัวตรวจรู้ความดันไปใช้งาน ซึ่งจะนำเสนอการใช้งานตัวตรวจรู้ความดันในการวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์ โดยการรายงานค่าความดันแบบไร้สายตลอดเวลา ซึ่งรายละเอียดในการออกแบบและทดสอบการใช้งานดังนี้

7.1 การวัดความดันในยางรถจักรยานยนต์แบบไร้สายโดยใช้ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุ

การตรวจวัดความดันในยางรถยนต์หรือ Tire pressure monitoring system (TPMS) ในปัจจุบันจะใช้ตัวตรวจรู้ความดันแบบไร้สายติดตั้งในยางรถยนต์และส่งข้อมูลไปยังตัวรับสัญญาณเพื่อแสดงผล ตัวตรวจวัดความดันในยางรถยนต์ที่มีขายทั่วไปมีลักษณะและการติดตั้งดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 ตัวตรวจรู้ความดันในยางรถยนต์แบบไร้สาย

TPMS คืออุปกรณ์เตือนภัยล่วงหน้าที่ทำกรตรวจสอบ แรงดันลมยาง และ อุณหภูมิ ซึ่งจะเตือนผู้ขับขี่ให้ทราบทันที (Real Time) และ ตลอดเวลา (Full Time) เมื่อแรงดันลมยาง หรืออุณหภูมิเปลี่ยนไป ไม่ว่าจะรวดเร็วหรือช้าทำให้สามารถแก้ปัญหาได้ล่วงหน้าทันทีและยังช่วย ผู้ใช้รถยนต์หลีกเลี่ยง จากอุบัติเหตุยางระเบิดเนื่องจากความดันไม่เหมาะสมขณะขับขี่ ซึ่งทำให้ลดเสียการทรงตัว และยังช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่ายของเชื้อเพลิงจากการขับขี่ขณะที่ยางอ่อนเกินไป ช่วยรักษาอายุการใช้งานของยางได้นานมากขึ้นจากการเติมแรงดันลมยางที่ถูกต้องอุปกรณ์วัดความดันลมยางนี้ มี

ความสำคัญต่อผู้ใช้รถยนต์ ร่วมกันบนถนนสาธารณะ ซึ่งรัฐบาลของประเทศสหรัฐอเมริกาบังคับใช้เป็นอุปกรณ์มาตรฐานของรถยนต์ที่จำหน่ายในประเทศตั้งแต่ปี ค.ศ.2008 สืบเนื่องจากเกิดอุบัติเหตุพลิกคว่ำของรถยนต์หลายครั้ง มีผลทำให้ มีผู้เสียชีวิต หลายราย จากการ ค้นหาสาเหตุ จึงได้ ทราบว่า ส่วนมากมาจากสาเหตุ ของยางรถยนต์ เนื่องจาก ยางมีข้อบกพร่องจากการผลิต และ การบำรุงรักษาดูแลของผู้ใช้รถยนต์ที่ละเลย ตรวจสอบสภาพยางให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ จากการผลทดสอบวิจัยของ กระทรวงคมนาคมของสหรัฐอเมริกา (US Department of Transportation, DOT) และสำนักงานดูแลความปลอดภัยการจราจรบนถนน (National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA) พบว่าแรงดันลมยาง มีผล ต่อการบังคับรถ ชัดเจนจากการทดสอบเมื่อแรงดันลมยาง อ่อนเกินไปทำให้การบังคับควบคุมรถไม่สามารถทำได้ ตามปกติ ทำให้รถเสียการทรงตัวได้

7.1.1 การออกแบบชุดรับส่งข้อมูลไร้สายและการติดตั้งตัวตรวจรู้ความดันภายในยางรถจักรยานยนต์

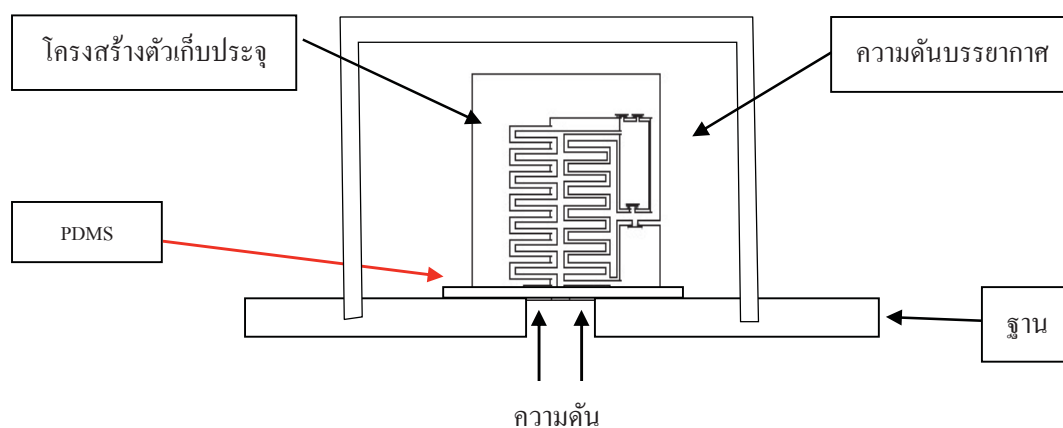
ในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบวัดความดันในยางแบบไร้สาย ซึ่งใช้ยางรถจักรยานยนต์ในการทดสอบ โดยใช้ตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ MPX5700 และตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้น แล้วส่งข้อมูลค่าความดันจากตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองตัวออกมาแสดงผลผ่านทางไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์ ในการส่งข้อมูลไร้สายออกมาจากยางรถจักรยานยนต์ จะส่งข้อมูลด้วยสัญญาณ Wireless 2.4 GHz. ใช้โมดูล Wireless เบอร์ nRF24L01 ดังรูปที่ 7.2



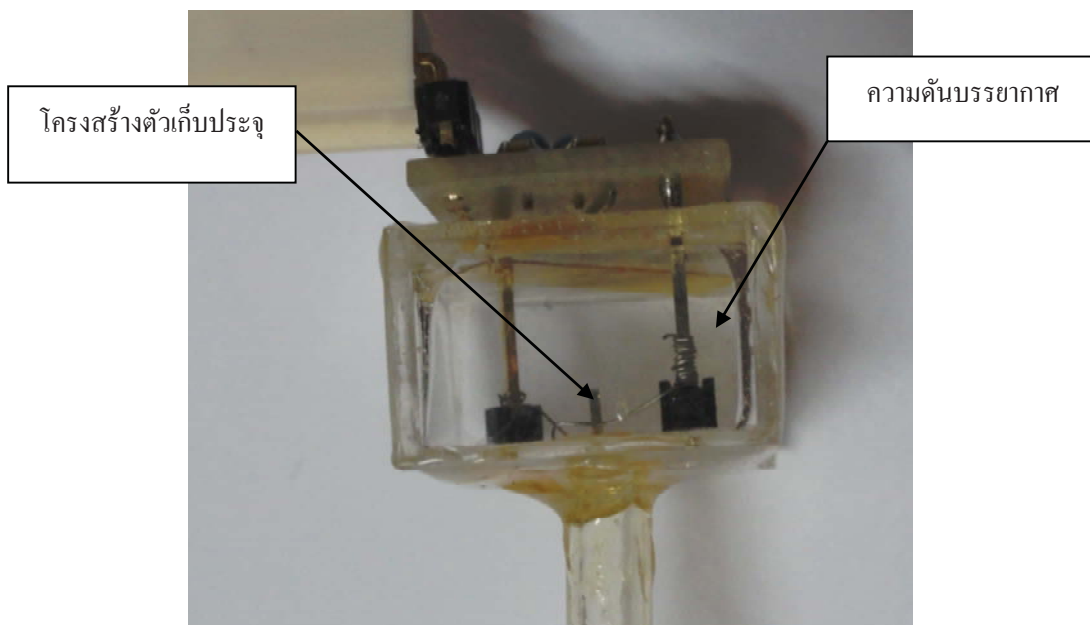
รูปที่ 7.2 โมดูลรับ-ส่งสัญญาณไร้สาย nRF24L01

nRF24L01 เป็น Wireless ชิพเดี่ยวราคาประหยัด ผลิตโดย Nordic semiconductor ถูกออกแบบให้เป็นอุปกรณ์ส่งข้อมูลไร้สายพลังงานต่ำสามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุด 2 Mbps ใช้พลังงานต่ำเพียง 13 mA ในโหมด Rx หรือ Tx และ 900 nA ในโหมดสแตนด์บาย ทำงานที่ความถี่ ISM ที่ 2.400 - 2.4835 GHz ติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านอินเตอร์เฟสแบบ SPI สามารถกำหนดการทำงานได้ทุกโหมดโดยการกำหนดรีจิสเตอร์ภายใน สามารถจัดการข้อมูลได้ด้วยตัวเอง มีการส่งข้อมูลแบบ FIFOs หรือ First in first out ทำให้การส่งข้อมูลมีความเร็วสูงและความถูกต้องและแม่นยำในการส่งข้อมูลสูง

ส่วนของตัวตรวจรู้ความดันที่นำมาสาธิตในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ซึ่งมีไดอะแฟรมเป็น PDMS เป็นตัวตรวจรู้ความดันแบบเกจ คือวัดความดันเทียบกับความดันบรรยากาศ ดังนั้นในการวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์ ต้องทำชุดครอบตัวตรวจรู้ความดันด้านที่เป็นโครงสร้างตัวเก็บประจุดังรูปที่ 7.3 เพื่อให้มีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ตัวตรวจรู้ความดันที่ประกอบสมบูรณ์พร้อมทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.3 โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ซึ่งมีไดอะแฟรมเป็น PDMS ที่ใช้ในการทดสอบความดันในยางรถจักรยานยนต์



รูปที่ 7.4 ตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่พร้อมทดสอบวัดความดันยางรถจักรยานยนต์

ในส่วนของการอ่านค่าความดันจากตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S จากการปรับเทียบกับตัวตรวจรู้ความดันมาตรฐานในบทที่ 6 ซึ่งจะได้สมการความสัมพันธ์ของค่าความดัน อุณหภูมิและค่าความจุไฟฟ้าซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$P_{out} = \left(-b + \sqrt{b^2 - 4ac} \right) / 2a \quad (7.1)$$

โดยที่ $a = 4 \times 10^{-5}$

$$b = 6 \times 10^{-5} T - 0.0027$$

$$c = 0.0045 T + 2.575 - C$$

และ P_{out} คือ ความดันก๊าซที่วัดได้ มีหน่วยเป็น kPa

T คือ อุณหภูมิมีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

C คือ ความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ มีหน่วยเป็น pF

แม้สมการที่ (7.1) จะให้อาต์พุตเป็นค่าความดันที่ตัวตรวจรู้วัดได้ แต่ในการประยุกต์ใช้งานจริงตัวตรวจรู้ความดันจะเปรียบเสมือนตัวเก็บประจุปรับค่าได้เท่านั้น และต้องมีการแปลงความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามความดันอินพุตให้เป็นการเปลี่ยนแปลงปริมาณทางไฟฟ้าอื่น ตามชนิดของวงจรเชื่อม

ต่อไปใช้งานของการประยุกต์นั้นๆ ในที่นี้จะแปลงความจุไฟฟ้าไปเป็นความถี่ และอ่านค่าความถี่ด้วย timer/counter ของไมโครคอนโทรลเลอร์ ก่อนที่จะคำนวณเป็นความดันที่อ่านได้นำออกแสดงผลต่อไป ในการประยุกต์ใช้งานนี้ได้แปลงค่าความจุไฟฟ้าไปเป็นความถี่โดยใช้ วงจรรวม Timer NE555 ซึ่งจะกำเนิดสัญญาณที่เป็นความถี่ f_{555} แปรผกผันกับความจุไฟฟ้า C_{sensor} มีสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความถี่ดังสมการที่ 7.2

$$f_{555} = 1.613 \times 10^{-6} / (C_{sensor} + C_{555}) \quad (7.2)$$

โดยที่ C_{sensor} คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ มีหน่วยเป็น ฟารัด

f_{555} คือ ค่าความถี่เอาต์พุตของวงจรรวม Timer NE555

C_{555} คือ ค่าความจุไฟฟ้าแฝงของวงจร NE555 มีหน่วยเป็น ฟารัด

ดังนั้น ความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ SUT-S ที่ตรงกับค่าความถี่ที่วัดได้จากความถี่ f_{555} จึงมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} C_{555} + C_{sensor} &= 1.613 \times 10^{-6} / f_{555} \\ C_{sensor} &= 1.613 \times 10^{-6} / f_{555} - C_{555} \end{aligned} \quad (7.3)$$

เมื่อแทนค่า C_{sensor} ลงในสมการที่ (7.1) จะได้สมการที่ (7.4) ซึ่งมีการเพิ่มพจน์ที่สามารถปรับแก้ ซึ่งสามารถบรรจุลงในโปรแกรมที่ไมโครคอนโทรลเลอร์จะนำไปคำนวณหาค่าความดันก๊าซที่วัดได้เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

$$P_{out} = \left(-b + \sqrt{b^2 - 4ac} \right) / 2a \quad (7.4)$$

โดยที่ $a = 4 \times 10^{-5}$

$$b = 6 \times 10^{-5} T - 0.0027$$

$$c = 0.0045T + 2.575 - (1.613 \times 10^{-6} / f_{555}) - C_{555}$$

ค่า C_{555} หรือค่าความจุไฟฟ้าแฝงของวงจร NE555 ได้จากการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าโดยการทดสอบวัดค่าความดันที่ความดันต่างๆ ตามข้อมูลการทดสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าในบทที่ 6 หัวข้อย่อยที่ 6.4 ที่ความดัน 0 kPa จะสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความดันได้คือ $C_{sensor} = 2.71$ pF และวัดค่าความถี่จากวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ที่ความดัน 0 kPa

คำนวณค่าความจุไฟฟ้า $C_{555} + C_{sensor}$ ด้วยสมการที่ 7.2 ได้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 17.95 pF ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้า $C_{555} = 17.95 \text{ pF} - 2.71 \text{ pF} = 15.24 \text{ pF}$

ส่วนของตัวตรวจรู้ความดัน MPX 5700 จะส่งสัญญาณออกมาเป็นแอนะล็อกในช่วงแรงดัน 0 – 5V มีสมการความสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความถี่ดังสมการที่ (7.4)

$$P = \frac{V_o - 0.04V_s}{0.0012858V_s} \quad (7.5)$$

เมื่อ V_o คือ แรงดันเอาต์พุตที่อ่านได้จาก MPX5700

V_s คือ แรงดันของแหล่งจ่ายที่ป้อนให้กับ MPX5700

ส่วนของตัวตรวจวัดอุณหภูมิภายในยางรถยนต์จะใช้ตัวตรวจวัดอุณหภูมิเบอร์ LM 35 มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณแอนะล็อก แรงดันของแหล่งจ่าย 5 V มีความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันดังสมการที่ (7.6)

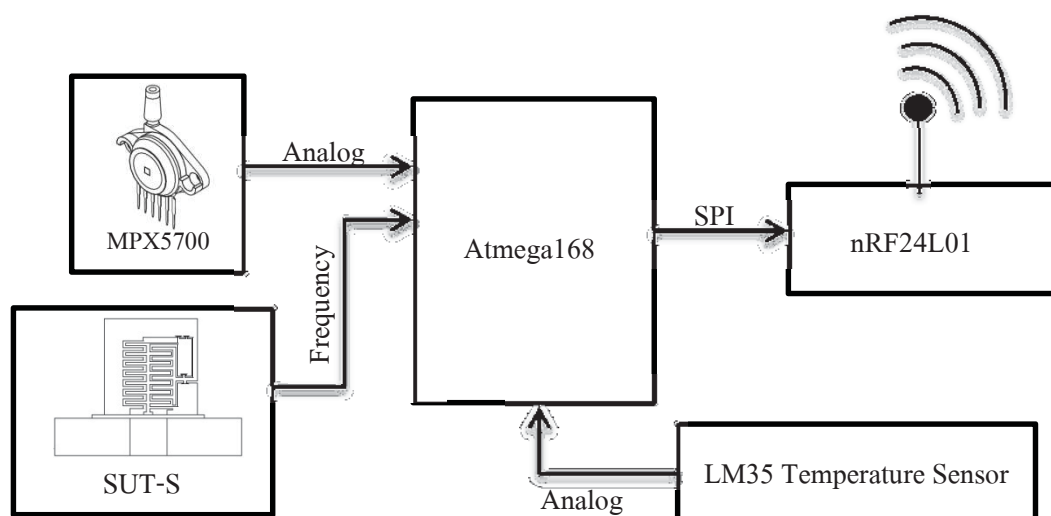
$$T = 100V_o \quad (7.6)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ

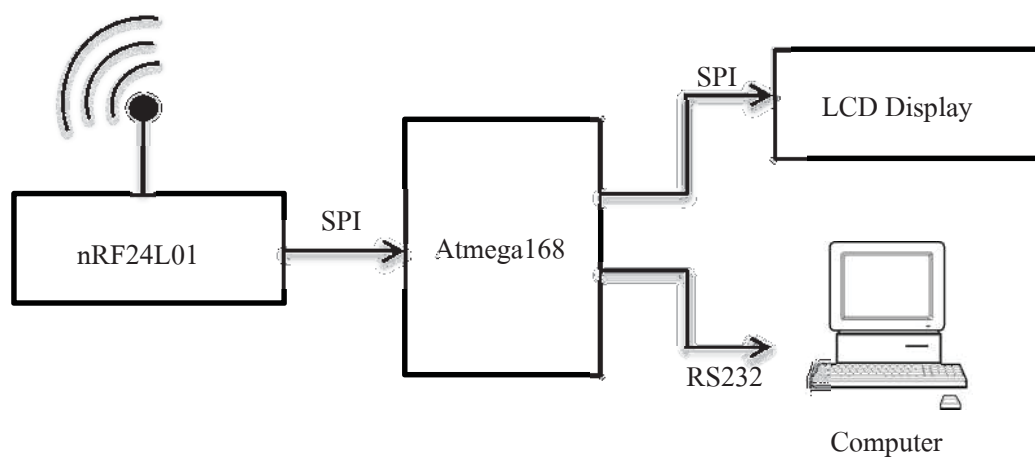
V_o คือ แรงดันที่อ่านได้จาก LM35

ในการอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ MPX5700 และ LM35 ซึ่งมีเอาต์พุตเป็นแอนะล็อกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR Atmega168 อ่านค่าสัญญาณแอนะล็อกด้วยวงจร 10-bit ADC ภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์และคำนวณออกมาเป็นแรงดันก่อนที่จะใช้สมการคำนวณค่าความดันและอุณหภูมิ

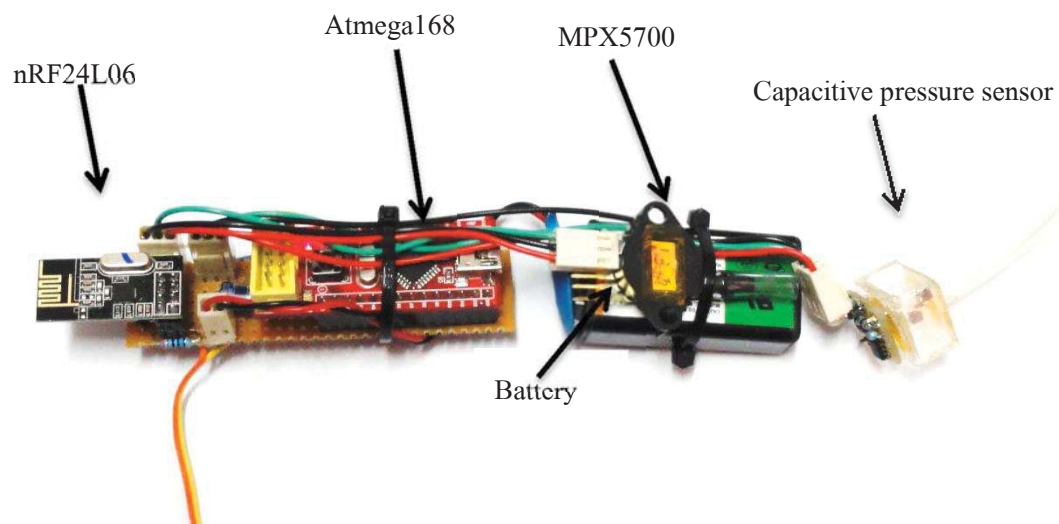
ในการส่งข้อมูลไร้สายจากภายในยางรถยนต์จะใช้โมดูลส่งสัญญาณที่กล่าวมาข้างต้นร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR เบอร์ Atmega168 และอ่านสัญญาณจากตัวตรวจรู้ความดันและอุณหภูมิ เพื่อให้ง่ายต่อการแก้ไขสมการในช่วงของการทดสอบ ค่าที่ส่งออกมาจะเป็นข้อมูลดิบ คือ ความถี่ และแรงดัน และชุดวงจรรับข้อมูลจะรับข้อมูลดิบมาเพื่อคำนวณค่าความดันด้วยสมการความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้น และแสดงผลค่าความดันผ่านทางจอแสดงผล LCD และคอมพิวเตอร์ผ่านทาง RS232 มีแผนผังดังรูปที่ 7.5 – 7.8



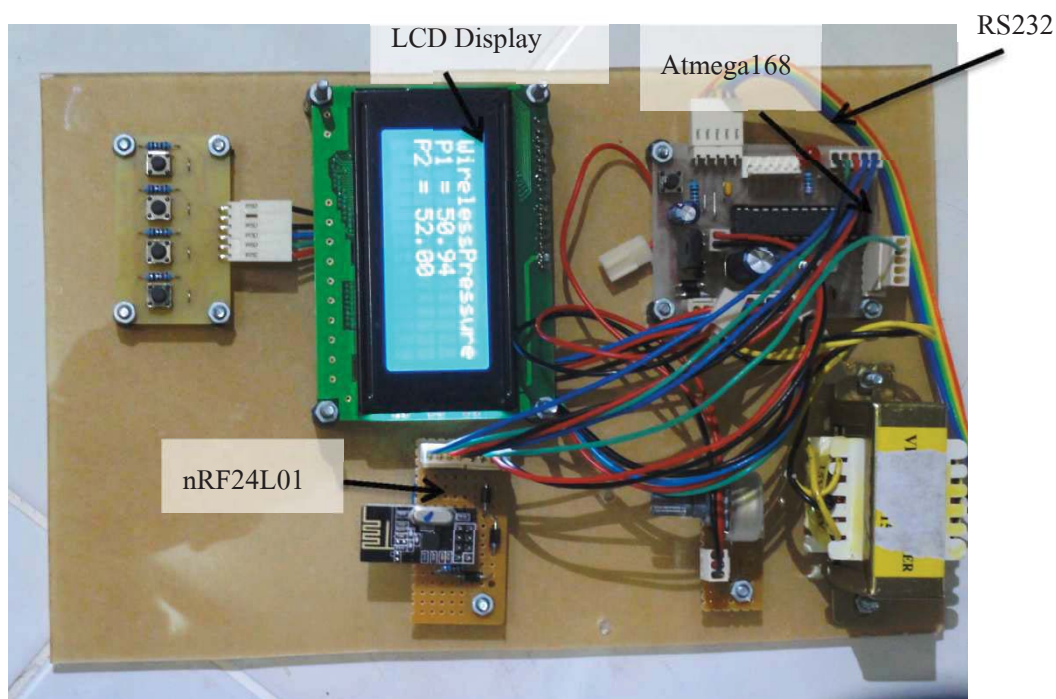
รูปที่ 7.5 แผนผังอุปกรณ์สำหรับอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ความดันและส่งข้อมูล



รูปที่ 7.6 แผนผังอุปกรณ์สำหรับรับข้อมูล ประมวลผลข้อมูลและแสดงผล

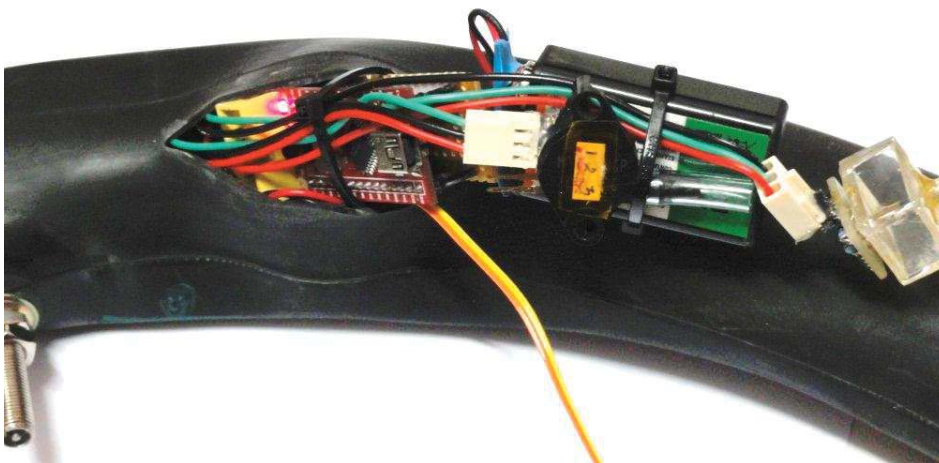


รูปที่ 7.7 ชุดอุปกรณ์สำหรับอ่านค่าจากตัวตรวจรู้ความดันและส่งข้อมูล



รูปที่ 7.8 ชุดอุปกรณ์สำหรับรับข้อมูล ประมวลผลข้อมูลและแสดงผล

เมื่อทำการสร้างอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ และทำการทดสอบการส่งสัญญาณเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำชุดอุปกรณ์ส่งสัญญาณและตัวตรวจวัดความดันใส่เข้าไปในยางรถจักรยานยนต์ โดยการตัดยางในให้เป็นช่องแล้วใส่ชุดอุปกรณ์เข้าไปในยางจากนั้นทำการปะยางบริเวณที่ตัดดังรูปที่ 7.9 และรูปที่ 7.10



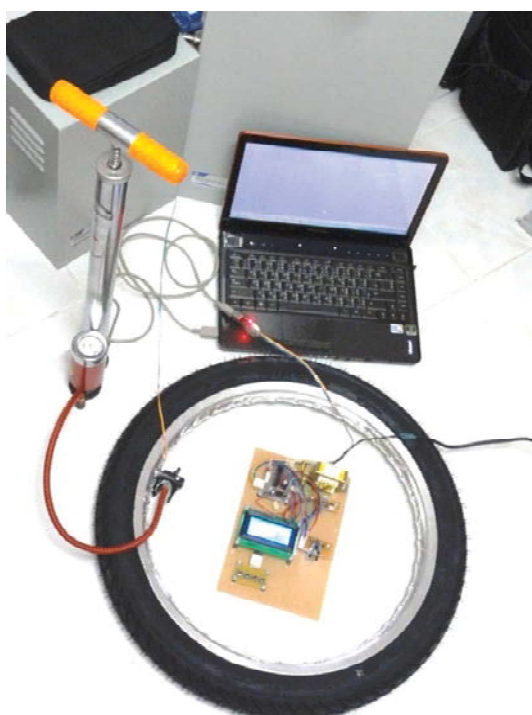
รูปที่ 7.9 การใส่ชุดอุปกรณ์เข้าไปในยางรถจักรยานยนต์ก่อนประกอบเข้ากับยางชั้นนอก



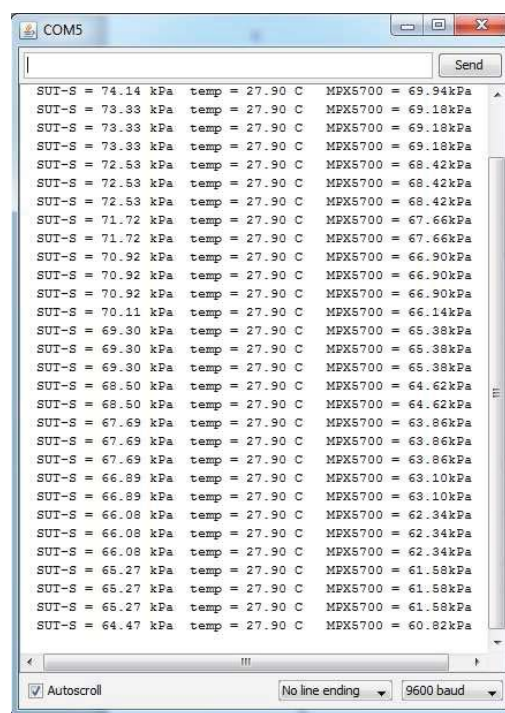
รูปที่ 7.10 การปะยางบริเวณที่ถูกตัด

7.1.2 การทดสอบและผลการทดสอบการส่งข้อมูล

หลังจากทำการปะยางในเรียบร้อยแล้ว ประกอบยางเข้ากับล้อ จากนั้นเริ่มทำการทดสอบ โดยเปิดชุดรับสัญญาณเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ โดยสัญญาณที่ส่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ไปยังคอมพิวเตอร์ผ่าน RS232 จะส่งทุกๆ 1 วินาที ค่าที่ส่งมาจะประกอบด้วย ค่าความดันจากตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ ค่าความถี่ที่วัดจากตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S และค่าความดันที่คำนวณจากสมการเปรียบเทียบ ตามลำดับ โดยข้อมูลที่ส่งมามีลักษณะดังรูปที่ 7.11(ข) และชุดอุปกรณ์ในการทดสอบดังรูปที่ 7.11(ก) ชุดส่งสัญญาณที่ติดตั้งภายในยางรถจักรยานยนต์ สามารถส่งสัญญาณมายังตัวรับสัญญาณได้ระยะห่างมากที่สุด 40 เมตร ซึ่งเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งาน ในส่วนของจอแสดงผล LCD จะแสดงผล ค่าความดันจาก SUT-S ค่าอุณหภูมิจาก LM35 และค่าความดันจาก MPX5700 ดังรูปที่ 7.12

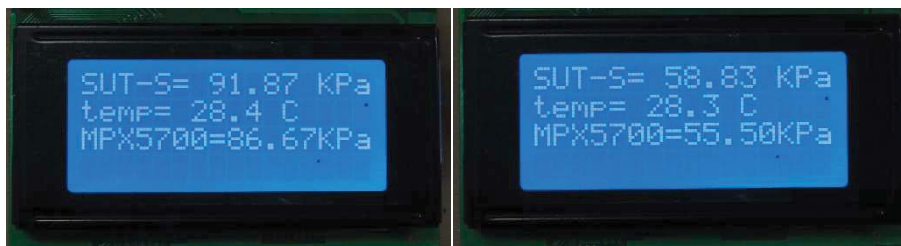


(ก)



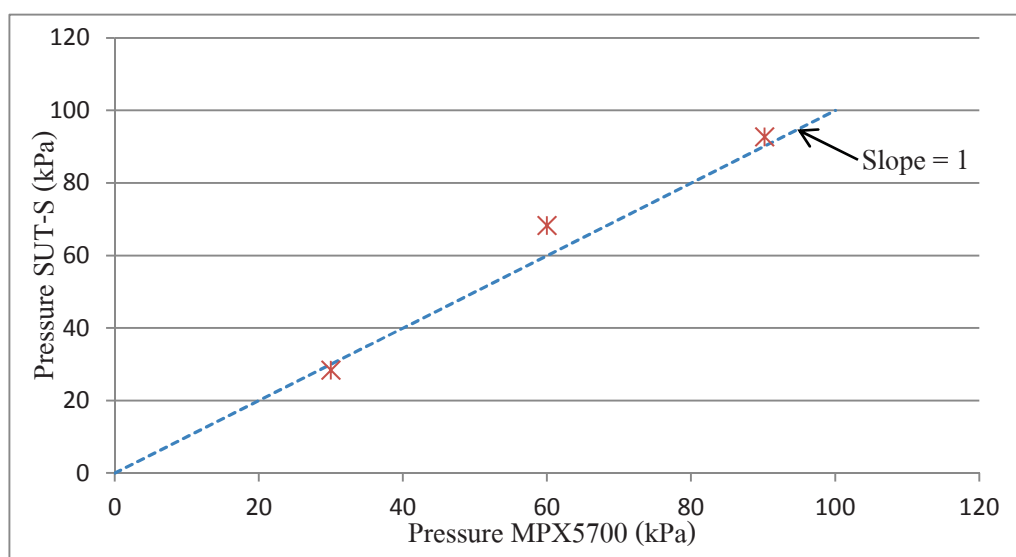
(ข)

รูปที่ 7.11 ภาพการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ติดตั้งภายในยางรถจักรยานยนต์ โดยส่งข้อมูลไร้สายจากชุดส่งสัญญาณภายในยาง (ก) แสดงภาพอุปกรณ์ในการทดสอบ (ข) ค่าที่ถูกส่งออกมาจากตัวตรวจรู้ความดันภายในยางมายังตัวรับและแสดงผลผ่านจอคอมพิวเตอร์

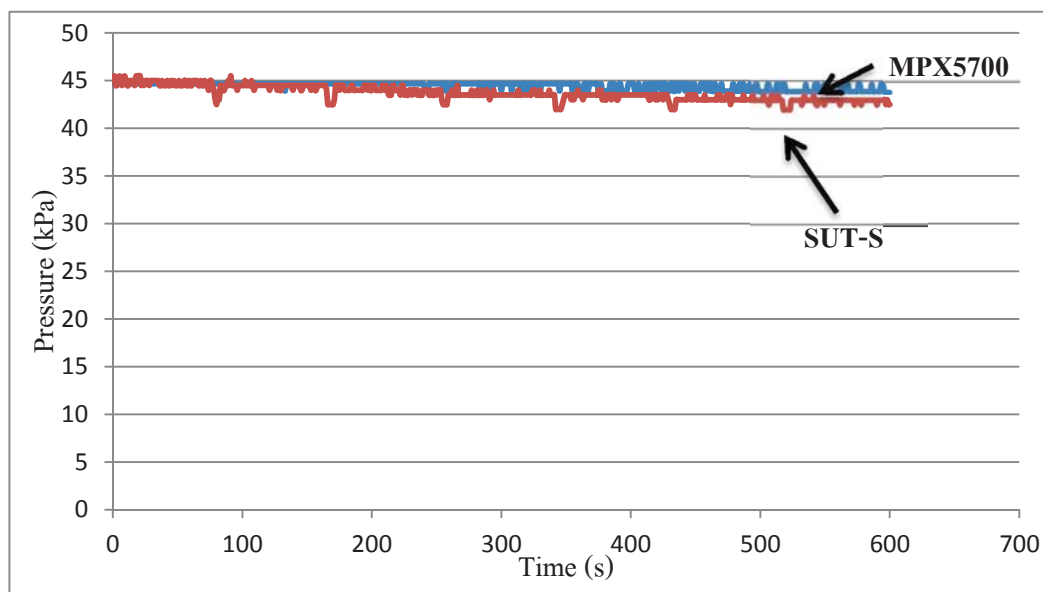


รูปที่ 7.12 ภาพการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S และ MPX5700 ที่ติดตั้งภายในยางรถจักรยานยนต์ โดยส่งข้อมูลไร้สายจากชุดส่งสัญญาณภายในยางและแสดงผลผ่านจอ LCD ของชุดรับสัญญาณ

ในการทดสอบวัดความดัน จะทำการทดสอบวัดความดัน 3 ค่า ที่ความดัน 30 kPa (4.35 PSI) 60 kPa (8.7 PSI) และ 90 kPa (13.5 PSI) ตามลำดับ ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ตัวตรวจรู้ MPX5700 เป็นมาตรฐานความดัน ดังรูปที่ 7.14 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 8.27 % จากเต็มสเกล 100 kPa และการทดสอบที่จำเป็นอีกประการคือการทดสอบเสถียรภาพที่ความดันคงที่ เนื่องจากความดันภายในยางรถยนต์โดยทั่วไปมีความดันคงที่ และมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เปลี่ยนแปลงมากน้อยซึ่งผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองตัวเทียบกันเป็นเวลา 600 วินาที เก็บข้อมูลทุกๆ 1 วินาที ได้ผลดังรูปที่ 7.13



รูปที่ 7.13 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่ความดันต่าง ๆ โดยใช้ MPX5700 เป็นมาตรฐาน



รูปที่ 7.14 ผลการทดสอบตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่อยู่ในยางรถจักรยานยนต์
ในช่วงเวลา 600 วินาที

7.2 สรุป

การทดสอบการตรวจวัดความดันภายในยางรถยนต์โดยใช้ตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ และตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุที่สร้างขึ้น ส่งข้อมูลไร้สายแบบ Wireless 2.4 GHz. โดยใช้โมดูล Wireless เบอร์ nRF24L01 ตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ตัวตรวจรู้ความดัน MPX5700 และตัวตรวจรู้อุณหภูมิ LM35 จะถูกใส่เข้าไปในยางเพื่อวัดความดันลมภายใน สำหรับตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S เป็นเพียงตัวเก็บประจุปรับค่าได้ ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงค่าความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนตามความดันอินพุตเป็นปริมาณทางไฟฟ้าอื่น ตามชนิดของวงจรเชื่อมต่อ ซึ่งในการประยุกต์ใช้งานนี้จะใช้วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ โดยใช้วงจรรวม Timer NE555 ซึ่งจะกำเนิดสัญญาณความถี่แปรผกผันกับค่าความจุไฟฟ้า และอ่านค่าความถี่ด้วย timer/counter ของไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อได้ค่าความถี่จากตัวตรวจรู้ SUT-S อุณหภูมิจากตัวตรวจรู้ LM35 และ ความดันจากตัวตรวจรู้ MPX5700 ข้อมูลที่อ่านได้จะถูกส่งออกไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เป็นตัวรับข้อมูลผ่านโมดูล nRF24L01 ข้อมูลที่ได้รับผ่านระบบไร้สายถูกนำมาคำนวณค่าความดันโดยใช้สมการการปรับเทียบค่าความดันจากตัวตรวจรู้ความดัน MPX5700 โดยการชดเชยค่าความจุไฟฟ้าแฝงของวงจรกำเนิดความถี่ สุดท้ายข้อมูลค่าอุณหภูมิจากตัวตรวจรู้ LM35 ค่าความดันจาก SUT-S และ MPX5700 ได้ถูกนำไปแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านทาง RS232 และแสดงผล LCD ในการทดสอบ ผลการทดสอบพบว่าตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่สร้างขึ้น สามารถวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์

ได้เป็นอย่างดี มีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ MPX 5700 สูงสุด 8.27 % จากเต็มสเกล 100 kPa และ
ตัวส่งสัญญาณไร้สาย สามารถรับส่งข้อมูลในรัศมี 40 เมตร

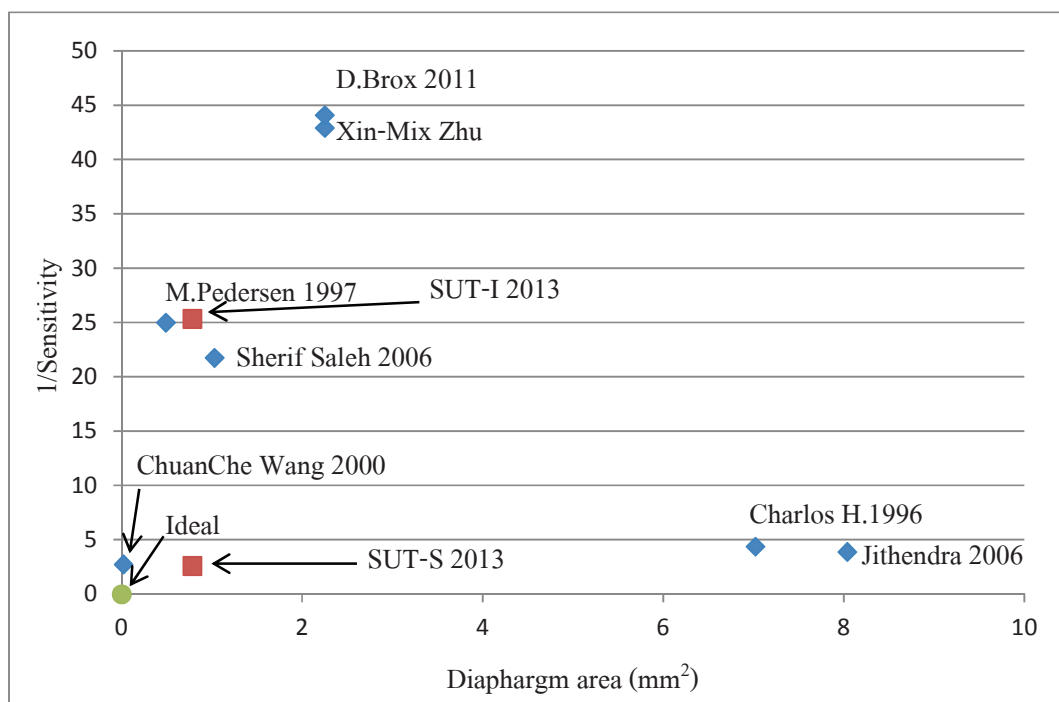
บทที่ 8

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

8.1 บทสรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความดันแบบตัวเก็บประจุมีไดอะแฟรมเป็นตัวรับรู้ปริมาณอินพุต ส่วนของโครงสร้างตัวเก็บประจุเป็นโครงสร้างพอลิเมอร์ที่สร้างด้วยกระบวนการเอกซเรย์ลิโธกราฟี โดยการฉายแสงเอกเรย์ผ่านหน้ากากคูคซ์รังสี บนสารไวแสงชนิดบวกความหนา 500 μm ล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายแสงออก จากนั้นเคลือบโลหะบนโครงสร้างตัวเก็บประจุเพื่อให้ได้โครงสร้างที่นำไฟฟ้า และถนสารไวแสงลงไปอีกครั้งเพื่อเชื่อมต่อโครงสร้างที่เป็นขั้วไฟฟ้าโดยการฉายแสงอัลตราไวโอเลตผ่านฟิล์มที่บแสงบริเวณที่ต้องการเชื่อมต่อ จากนั้นจัดฐานกราฟต์ทิ้งไปและล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่ถูกฉายออกไป ซึ่งกระบวนการดังกล่าวนี้ช่วยลดขั้นตอนในกระบวนการสร้างโครงสร้างนำไฟฟ้าซึ่งทำให้สามารถลดระยะเวลาในการผลิตและลดต้นทุนในการผลิตได้ โครงสร้างตัวเก็บประจุที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีจำนวนตัวเก็บประจุภายในทั้งหมด 26 ตัว หรือ 13 คู่ แต่ละตัวมีพื้นที่อิเล็กโทรด $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเท่ากับ 60 μm ส่วนไดอะแฟรมจะใช้พอลิเมอร์สองชนิดคือ Polyimide (PI) ความหนาเท่ากับ 25 μm และ Polydimethylsiloxane (PDMS) ความหนาเท่ากับ 120 μm มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1000 μm ไดอะแฟรมที่เป็น PDMS วัดความดันในช่วง 0 - 100 kPa ไดอะแฟรมที่เป็น PI วัดความดันในช่วง 0 - 500 kPa โครงสร้างของตัวเก็บประจุที่เป็นโครงสร้างพอลิเมอร์เคลือบโลหะจะถูกนำมาติดตั้งบนไดอะแฟรมซึ่งเมื่อไดอะแฟรมเกิดการโก่งตัวเนื่องจากความดัน จะส่งผลให้แกนของโครงสร้างตัวเก็บประจุเคลื่อนที่ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุจะเปลี่ยนไปเท่ากับระยะการโก่งตัว ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลง ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรม PDMS (SUT-S) และ ตัวตรวจรู้ความดันที่มีไดอะแฟรม PI (SUT-I) ถูกเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่เป็นตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ MPX4250 และ MPX5700 ตามลำดับ จากการทดสอบคุณสมบัติตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าตลอดย่านการวัดเท่ากับ 0.51851 pF หรือมีการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 38.23 % ความไวเฉลี่ยเท่ากับ 0.004714 pF/kPa ค่าความผิดพลาดสูงสุด เท่ากับ $\pm 9\%$ ผลการตอบสนองทางเวลาทดสอบโดยใช้วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ ได้

1 วินาทีสำหรับขาขึ้น และ 1 วินาทีสำหรับขาลง ส่วนตัวตรวจรู้ความดัน SUT-I มีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าตลอดย่านการวัดเท่ากับ 0.0134 pF หรือมีค่าการเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 3.94 % มีความไวเฉลี่ยเท่ากับ 0.03343×10^{-3} pF/kPa และมีค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ $\pm 7.5\%$ ผลการตอบสนองทางเวลาทดสอบโดยใช้วงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ มีช่วงเวลาขาขึ้นเท่ากับ 7 วินาที และมีช่วงเวลาลง 27 วินาที เมื่อเปรียบเทียบความไวและขนาดของไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดันทั้งสองแบบในงานวิจัยนี้เทียบกับตัวตรวจรู้ความดันที่มีผู้สร้างไว้จากอดีตจนถึงปัจจุบัน ดังรูปที่ 8.1 กราฟในรูปแกนนอนคือขนาดของไดอะแฟรมของตัวตรวจรู้ความดัน ส่วนแกนตั้งความไว (Sensitivity) หรืออัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดต่อค่าความจุไฟฟ้าตั้งต้นที่มีค่ามากแต่มีพื้นที่ไดอะแฟรมน้อยนั้น ถือเป็นตัวตรวจรู้ความดันซึ่งเป็นที่ต้องการในการประยุกต์ใช้งานทั่วไป จุดในกราฟซึ่งเข้าใกล้จุดกำเนิดมากแสดงถึงตัวตรวจรู้ที่มีค่าความไวสูงและมีพื้นที่ไดอะแฟรมน้อย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้มุ่งออกแบบตัวตรวจรู้ความดันเพื่อให้มีคุณสมบัติทั้งสองประการมากที่สุด



รูปที่ 8.1 เปรียบเทียบคุณลักษณะที่พึงประสงค์ของตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S และ SUT-I กับงานวิจัยอื่นๆ ด้วยตัวชี้วัดคือความไวและขนาดของไดอะแฟรม

ส่วนของการประยุกต์ใช้งานตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้น ได้ทำการทดสอบวัดความดันภายใน ยางรถจักรยานยนต์ที่สามารถรายงานค่าความดันแบบไร้สาย โดยติดตั้งตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ตัวตรวจรู้ความดันเชิงพาณิชย์ MPX 5700 และตัวตรวจรู้อุณหภูมิเชิงพาณิชย์ พร้อมทั้งแบตเตอรี่และวงจรส่งข้อมูลไร้สายเข้าไปในยางรถจักรยานยนต์ เนื่องจากตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S เป็นตัวเก็บประจุปรับค่าได้ตามความดันอินพุตที่เข้ามา ดังนั้นจึงต้องมีการแปลงค่าความจุไฟฟ้าเป็นปริมาณทางไฟฟ้าอื่น เพื่อเชื่อมต่อกับระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการประยุกต์ใช้งานนี้ได้แปลงค่าความจุไฟฟ้าจากตัวตรวจรู้ SUT-S ไปเป็นความถี่ โดยใช้วงจรรวม Timer NE555 ซึ่งจะกำเนิดสัญญาณความถี่แปรผกผันกับค่าความจุไฟฟ้า ความถี่ดังกล่าวถูกนับค่าด้วย timer/counter ของไมโครคอนโทรลเลอร์ สำหรับตัวตรวจรู้เชิงพาณิชย์ MPX5700 และ LM35 ซึ่งรายงานค่าความดันเอาต์พุตและค่าอุณหภูมิออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้านั้น ได้ถูกเชื่อมต่อเข้ากับวงจร 10-bit ADC ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ข้อมูลตัวแปรได้แก่ ค่าความถี่จากตัวตรวจรู้ SUT-S ค่าอุณหภูมิจากตัวตรวจรู้ LM35 และค่าความดันก๊าซจากตัวตรวจรู้ความดัน MPX5700 ได้ถูกส่งผ่านโมดูลส่งข้อมูลไร้สาย nRF24L01 ภายในยางรถจักรยานยนต์ไปยังโมดูลรับข้อมูลไร้สาย nRF24L01 ที่เชื่อมต่ออยู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้แสดงผลการวัดซึ่งอยู่ภายนอกยางรถจักรยานยนต์ สำหรับข้อมูลความถี่ที่ได้รับมาจากตัวตรวจรู้ SUT-S ผ่านระบบไร้สายได้ถูกแปลงเป็นค่าความดันก๊าซในหน่วย kPa ด้วยสมการที่ได้จากการเปรียบเทียบกับค่าความดันจากตัวตรวจรู้ MPX5700 โดยการชดเชยค่าความจุไฟฟ้าแฝงของวงจรกำเนิดความถี่ สุดท้ายข้อมูลความดันก๊าซที่วัดได้จากตัวตรวจรู้ SUT-S และ MPX5700 ในหน่วย kPa พร้อมทั้งค่าอุณหภูมิที่ได้จากตัวตรวจรู้ LM35 ในหน่วยองศาเซลเซียส ได้ถูกส่งไปแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ผ่านระบบรับส่งข้อมูลอนุกรม RS-232 จากการทดสอบพบว่าตัวตรวจรู้ความดัน SUT-S ที่สร้างขึ้น สามารถวัดความดันภายในยางรถจักรยานยนต์มีค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับ MPX5700 สูงสุด 8.27 % จากเต็มสเกล 100 kPa และชุดวงจรส่งสัญญาณแบบไร้สายสามารถส่งข้อมูลผ่านยางชั้นในและยางชั้นนอกของรถจักรยานยนต์ ไปยังตัวรับที่อยู่ภายนอกได้อย่างถูกต้องแม่นยำที่ระยะห่างไม่เกิน 40 เมตร ซึ่งแนวคิดในการทดสอบนี้สามารถนำไปต่อยอดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ได้ต่อไป

8.2 ข้อเสนอแนะ

ตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นยังมีปัญหาในเรื่องของพื้นที่ในการติดกาวบริเวณจุดเชื่อมต่อไคอะแฟรมตัวเก็บประจุเนื่องจากพื้นที่ในการติดกาวจะมีผลต่อระยะการโค้งตัวสูงสุดของไคอะแฟรม ทำให้ผลการทดสอบไม่เป็นไปตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และอาจจะมีผลคลาดเคลื่อนในการติดตั้งซึ่งจะมีปัญหาในการควบคุมการผลิตในกรณีที่มีการผลิตเป็นจำนวนมาก แนวทางการแก้ปัญหาสามารถทำได้โดยการออกแบบให้จุดสัมผัสมีขนาดเล็กติดอยู่กึ่งกลางของไคอะแฟรม

ในส่วนของการออกแบบให้ตัวตรวจรู้ความดันมีความไวสูงขึ้นสามารถทำได้โดยการออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดของตัวเก็บประจุมีค่าน้อยๆ จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงมากขึ้นซึ่งในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในกระบวนการสร้างฟิล์มต้นแบบจึงไม่สามารถสร้างระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดต่ำกว่า 50 ไมโครเมตรในการพัฒนางานวิจัยในขั้นต่อไป จึงจำเป็นต้องออกแบบและสร้างโครงสร้างตัวเก็บประจุให้มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความไวและลดขนาดของตัวตรวจรู้ความดันให้มีขนาดเล็กลงได้อีกเช่นกัน

การนำตัวตรวจรู้ความดันไปประยุกต์ใช้งาน จะต้องมีการตรวจสอบวัดค่าความจุไฟฟ้าซึ่งการทดสอบในงานวิจัยนี้ใช้โอซีสำเร็จรูปในการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการวัด ปัญหาที่พบคือสัญญาณรบกวนจากภายนอกทำให้ความจุไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่าเปลี่ยนไปเนื่องจากตัวตรวจรู้ความดันที่สร้างขึ้นไม่มีบรรจุภัณฑ์ที่สามารถกันสัญญาณรบกวนจากสนามไฟฟ้าภายนอกได้ ซึ่งสัญญาณรบกวนจะส่งผลทำให้การรายงานค่าความดันผิดพลาดจากความเป็นจริง ในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการออกแบบบรรจุภัณฑ์ที่กันสัญญาณรบกวนได้ เช่น บรรจุภัณฑ์ที่เป็นโลหะ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- Carmen, K.M.F, Maggie, Q.H.Z. , Dong, Z. and Wen J.Li.(2005). Fabrication of CNT-Based MEMS Piezoresistive Pressure Sensor Using DEP Nanoassembly, Proceeds of 2005 5th IEEE Conference on Nanotechnology, July 11-15, 2005, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan
- C. F. Chiang, A. B. Graham, M. W. Messana, J Provine, D. T. Buchman, G.J. O'Brien, T. W. Kenny, Capacitive absolute pressure sensor with independent electrode and membrane sizes for improved fractional capacitance change, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS), 16th International ,July 5-9, 2011, Beijing, China
- C. Hierold, B. Clasbrummel, D. Behrend, T. Scheiter, M. Steger, K. Oppermann, H. Kapels, E. Landgraf, D. Wenzel, D. Etzrodt, Low power integrate pressure sensor system for medical applications, Sensor and Actuator 73 (1999), 58-67
- C. H. Mastrangelo, Surface-Micromachined Capacitive Differential Pressure Sensor with Lithographically Defined Silicon Diaphragm, Journal of Microelectromechanical system, VOL.5, JUNE 1996, 98-105
- C. Yang, C. Zhao, L. Wold, K. R. Kaufman, Biocompatibility of a physiological pressure sensor, Biosensor and Bioelectronics 19 (2003), 51-58
- D. Belavic, M. S. Zarnik, M. Mozek, S. Kocjan, M. Hrovat, J. Holc, M. Jerlah, S. Macek, Low energy consumption thick-film pressure sensor, Microelectronics and Packaging Conference, 2009. EMPC 2009. European, June 15-18, 2009
- D. Brox, A. R. Mohammadi, K.Takahata,Non-lithographically microfabricated capacitive pressure sensor for biomedical applications, Electronics Letters ,VOL.47, September 2011, 1015-1017
- D. W. Lee, Y. Choi, A novel pressure sensor with a PDMS diaphragm, Microelectronic Engineering 85 (2008), 1054-1058
- E. G. Bakhoun, Marvin H. M. Cheng, Novel Capacitive Pressure Sensor, Journal of Microelectromechanical system, VOL. 19, NO. 3, JUNE 2010, 443-450

- H. L. CHU, K. D. Wise, Scaling limits in batch-fabricated silicon pressure sensor, IEEE Transactions on devices, VOL. 34, NO. 4, April 1987, 850-858
- J. Han, M. A. Channon, Smooth contact capacitive pressure sensor in Touch- and Peeling-Mode operation, IEEE sensor journal, VOL.9, NO. 3, MARCH 2009, 199-206
- J. N. Palasagaram and Ramesh Ramadoss, MEMS-Capacitive Pressure Sensor Fabricated Using Printed-Circuit-Processing Techniques, IEEE Sensors journal, VOL. 6, NO. 6, DECEMBER 2006, 1374-1375
- L.Lin, H.C.Chu, Y.W.Lu, A Simulation Program for the sensitivity and linearity of Piezoresistive Pressure Sensor. Journal of Microelectromechanical systems, vol.8, No.4, December 1999, 514-522
- M. Pedersen, M.G.H. Meijerink, W.Olthuis, P.Bergveld, An IC-compatible polyimide pressure sensor with capacitive readout, Sensor and Actuator A 63 (1997), 163-168
- M. X. Zhou, Q. A. Huang, A novel capacitive pressure sensor base on sandwich structures, Journal of Microelectromechanical system, VOL.14, No.6, DECEMBER 2005,1272-1282
- S.P. Chang, J.B. Lee, M.G. Allen, Robust capacitive pressure sensor array, sensor and actuator A 101 (2002)231-238
- S. Saleh, A. Zaki, H. Elsemery, Modeling of Sensitivity of fabricated Capacitive Pressure Sensor, IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on 6-10 Nov. 2006, Paris, France
- S. Yamamoto, H. Nakamura, H. Nishimura, T Suzuki, T. Takizawa, O. Nakao, Touch mode capacitive pressure sensor, Fujikura technical review, 2003, VOL.32, 45-49
- Timoshenko, S. and Woinosky - Krieger, S.(1959). Theory of plate and shells. McGraw-hill.
- X.Zhao, J. M. Tasi, H. Cai, X. M. Ji, J. Zhou, M.H. Bao, Y. P. Huang, D. L. Kwang, A. Q. Liou, Pressure sensor using nano-opto-mechanical systems (NEMS), IEEE Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS), 2011 16th International, June 5-9 2011, Beijing, China, 1030-1033